


## HABERLEŞME UYDULARINDA İKİ EKSENLİ GÜNEŞ PANELİ KONTROLÜ ve GÜÇ ARTIRMA

İbrahim ÖZ<sup>1</sup> 

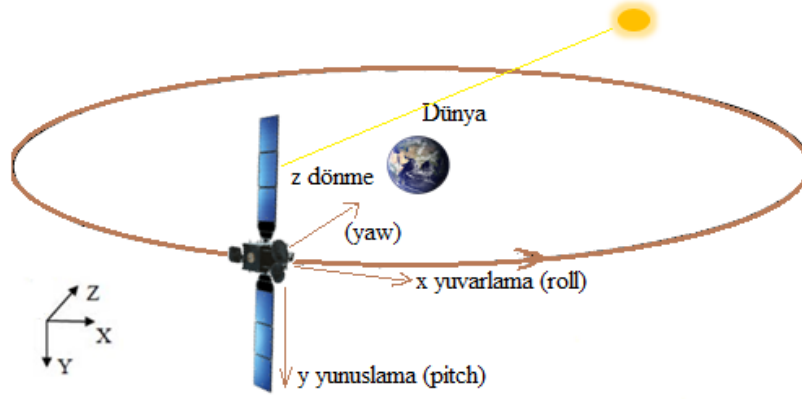
<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü,  
Eskişehir/Türkiye

### ÖZET

*Haberleşme uydularında güneş hücreleri ile foto-voltaik yöntemle elektrik enerjisi üretilmektedir. Yere eşlenik yörüngede (GEO) işletilen haberleşme uydularında, uydu güneş panelleri genel olarak dönme eksenini (Y eksenini) yönünde 24 saatlik periyotla güneşi günlük takip etmektedir. Güneşin ekvator düzlemi ile olan açısı ise yıllık periyotta  $\pm 23,45^\circ$  değişmekte ve bu açı güneş panelinin güneşi takip mekanizmasının dışında kalmaktadır. Bu çalışmada Y eksenine ilave olarak roll (X eksenini) yönünde de güneşin takip edilmesi durumunda elde edilecek sonuçlar değerlendirilmiştir. GEO uydu güneş panellerinin önerilen yöntem olan iki eksenli kontrol ile güneşi takip etmesi ile verimi %27,5 olan bir güneş panelinde yıllık ortalama  $356,65 \text{ W/m}^2$  olan güç üretimi  $372,11 \text{ W/m}^2$  'ye çıkmakta ve elde edilen güçte %4,33'lük bir artış olmaktadır. Bu durumda önerilen yöntem kullanıldığında ortalama bir GEO haberleşme uydusunda  $1,24 \text{ m}^2$  daha az güneş hücresine ihtiyaç duyulmakta ve tasarım parametrelerinde değişim olmaktadır. Uydu üreticileri ve uydu işletmecileri iki eksen kontrollü güneş takibi yapan sistemler kullanarak aynı sayıdaki güneş hücresinden daha fazla güç elde edebilmekte veya gücü sabit tuttuğu takdirde daha az güneş hücresine ihtiyaç duymaktadır. Bu yöntem (GEO) uydularının güneş panellerinin uydu işletme ömrü boyunca optimal güneş ışığına maruz kalmasını sağlamaktadır.*

### GİRİŞ

Haberleşme uyduları ekvatorundan 35786 km yükseklikte, yerküre ekvator düzlemi ile uydu yörünge açısı  $0^\circ$  veya  $0^\circ$  'ye çok yakın olacak şekilde ve yer sabit (yere eş zamanlı, yere eşlenik) yörüngede işletilmektedir [Öz, 2024]. Yere eşlenik yörüngede işletilmekte olan (GEO) haberleşme uyduları enerji ihtiyacını genellikle güneş panelleri aracılığıyla güç üreterek karşılamaktadır. Haberleşme uyduları yörüngelerinde ilerlerken paneller güneşi, uydu yunuslama (Y, pitch açısı) güneş ışınımını dik olarak alacak şekilde güneşi takip eder. Uydu panelleri güneş takibini sürücü mekanizmalar ve bu sistemi kontrol eden yazılımlar ile gerçekleştirir. Şekil 1'de bir haberleşme uydusunun uydu merkezli koordinat sistemi görülmektedir. Burada +X eksenini uydunun hareket yönünü, +Y eksenini güneyi ve +Z eksenini X ve Y'ye ortogonal ve uydudan dünyaya olan doğruyu göstermektedir. Güneş panelleri Şekil 1'de görüldüğü gibi kuzey-güney doğrultusundadır ve Y eksenini yönünde bir günde tam dönüş yapacak şekilde güneşi takip etmektedir [Öz, 2022], [Qingjun, L. I., et al., 2022], [Montenbruck, Oliver, et al, 2015].



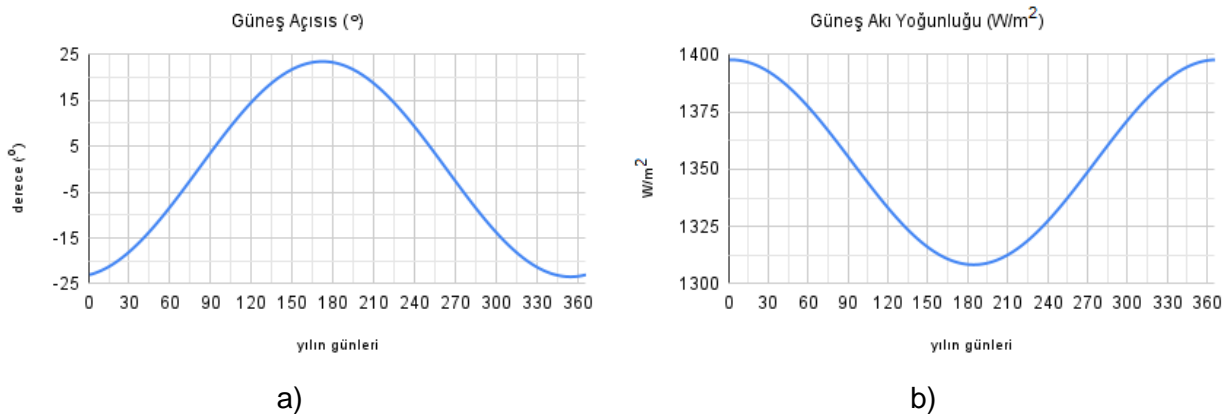
Şekil 1: Haberleşme uydusu güneş paneli oryantasyonu (ölçeksizdir)

Uydu işletmede paneller Y eksenini yönünde güneşi genel olarak tam takip edebilmekte bu sebeple yunuslama (pitch) yönünde güneşe tam olarak yönelmeme sebebiyle güç kaybı olmamaktadır [Ji, Xiangfei, et al. 2020].

Konum belirleme GPS uydularında güneş panellerine yüksek eğiklik (inclination) açısından dolayı dönme açısı düzeltme (yaw steering) uygulanmakla birlikte GEO haberleşme uydularında eğiklik açısı sıfıra yakın olduğu için dönme açısı düzeltmesine ihtiyaç olmamakta mevsimsel beta açısı ise düzeltilmemektedir [Montenbruck, Oliver, et al, 2015]. Düzeltilmeyen  $\beta$  açısı güneş ışığı bu yönde dik alınamadığı için verim kaybına sebep olmaktadır.

Haberleşme uyduları ekvator düzleminde  $0^\circ$  'ye yakın eğiklik açısı ile işletilmekte iken güneş ışınları Mart ve Eylül ekinoks dönemleri dışında uyduya dik gelmemektedir. Diğer zamanlarda güneş ışınları ekvatora dolayısıyla uydu panellerine de Z yönünde açılı gelmektedir. Bu açı genel olarak haberleşme uydularında güneş paneli hareketi ile düzeltilmemekte bu durumda güç kaybına neden olmaktadır. Bu çalışmada ekvator düzlemi ile güneşin açısından kaynaklı olarak meydana gelen bu güç kaybı analiz edilmiş ve düzeltme yapılması durumunda elde edilecek güç kazanımı araştırılmıştır.

Şekil 2 a) güneş ışınlarının uydu güneş paneli ile Z yönündeki açısının yıllık değişimini Şekil 2 b) buna bağlı olarak uydu paneli üzerine düşen güneş akı yoğunluğunu göstermektedir. Dünyanın ekvator düzlemi ile açısı ile aynı olan bu değer  $\pm 23,5^\circ$  arasında yıl içerisinde değişmektedir [Taherbaneh, Mohsen, et al., 2011]. GEO yörüngede uydu güneş panellerine ulaşan güç ortalama  $1376 \text{ W/m}^2$  olmakta olup bu güç dünyanın güneşe uzaklığı ile değişmektedir. Güneş panelleri üzerine düşen bu güç güneş dünya mesafesine bağlı olduğu gibi aynı zamanda fotovoltaik metotla elektrik enerjisi üretiminde, panellerin güneş ışınları ile yaptığı açıya da bağlıdır [Baraskar, Aditya, et al, 2022].



Şekil 2: GEO yörüngede yıllık olarak; a) Uydu güneş paneli, güneş açısı değişimi b) Güneş akı yoğunluğu

Dünya güneş etrafındaki yörüngesinde ilerlerken tam dairesel olmayan bir yörünge takip etmektedir. Bu durumda güneşe yakın olduğu zamanlarda daha fazla ışınım almakta, güneşe uzak olduğu dönemlerde ise daha az ışınım almaktadır. Dünyanın güneşe olan uzaklığına bağlı olarak GEO yörüngedeki güç değişimi yılın her bir günü için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [Abood, 2015];

$$\frac{H}{H_{\text{sabiti}}} = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right) \quad (1)$$

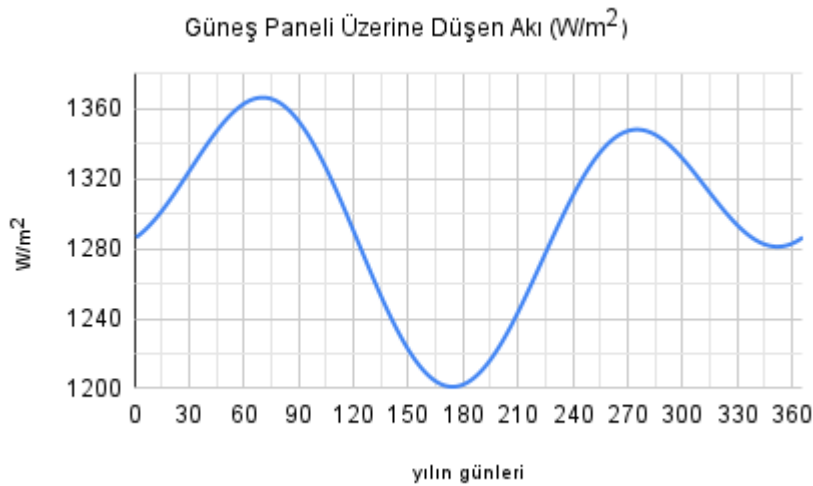
Burada; H, GEO yörüngede yayılan güç yoğunluğu H (W/m<sup>2</sup>), H sabiti: 1353 W/m<sup>2</sup>, n: yılın günü (1 Ocak, n=1)

Dünya güneş mesafesinin dışında dünyaya gelen güneş ışınlarının açısında güç elde etmede önemli bir etkidir. Güneşin ekvator düzlemi ile dolayısıyla uydu panelleri ile yaptığı açının yılın günleri ile değişimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [Yang et al, 2016].

$$\beta = 23.45^\circ + \sin\left[\frac{360}{365}(n + 284)\right] \quad (2)$$

burada  $\beta$ : güneş ile ekvator düzlemi açısı, n: yılın günü, n=1, 1 Ocak.

GEO yörüngede elde edilebilecek güç ise dünya güneş mesafesi ve güneş açısı birlikte değerlendirilerek hesaplanmaktadır [Plis, Elena A., et al.,2021]. Şekil 3 haberleşme uydularının güneş panellerinden klasik Y takipli yöntem ile elde edilebilecek gücün yılın günlerine göre değişimini göstermektedir. Dünyanın güneş etrafında eliptik bir yörünge izlemesi nedeniyle güneşe uzaklığı değişmektedir. Güneş ışınım değeri dünyanın güneşe olan uzaklığının ortalama değeri olan 1 AU değerinin (149.597.870.700 m, astronomik birim) %103'ü ve %97'si arasında artması ve azalmasıyla değişim göstermektedir. İlave olarak güneş ışınlarının ekvatorla yaptığı açıda güneş paneli üzerindeki ışınımı etkilemektedir.



Şekil 3: GEO yörüngedeki haberleşme uydusu güneş paneli üzerine düşen akı yoğunluğunun yılın günlerine göre değişimi

Güneş panelleri üzerine düşen ışınım fotovoltaik yöntemle elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve uydu tarafından kullanılmaktadır. Üretilen bir miktar enerji fazlası bataryalarda depolanmakta dünyanın gölgesinde kalınması nedeniyle güneşin görülemediği durumlarda kullanılmaktadır. Güneş panellerinde kullanılan malzeme ve teknolojiye göre farklı verimlilik değerleri elde edilmektedir [Demirel, 2017]. Tablo 1 güneş hücresi teknolojisine teknik parametreleri vermektedir. Güneş hücresi verimi sıcaklığa göre değişmekte ve 1 m<sup>2</sup> alanda elde edilebilen güç ve 1 m<sup>2</sup> alanın ağırlığı tasarımda kullanılan önemli parametreleri göstermektedir [Şafak, 2013].

Tablo 1' görüldüğü gibi seçilen güneş hücresi teknolojisi verim başta olmak üzere, özgül güç, güç yoğunluğu tasarım sırasında hedef istelere göre dikkate alınacak en önemli parametreleri göstermektedir.

Tabla 1. Güneş hücresi teknolojiler ve temel teknik özellikleri

Teknoloji	Güneş Hücre verimi (%, 28°C'de)	Özgül güç (W/m <sup>2</sup> )	Güç Yoğunluğu (kg/m <sup>2</sup> )	Güç değişimi (% / °C)
Si	13,7	185	0,55	-0,045
High ef. Si	16	216	0,28	-0,042
GaAs /GESJ	19	253	0,83	-0,022
GaInP2/ GaAs/ GeDJ	22	297	0,85	-0,030
GaInP2/ GaAs/ Ge TJ	25	337	0.85	-0,060
Hi 3J	28	378	0.86	-0,060

Bir haberleşme uydusunun güneş panelleri vasıtasıyla üretebileceği güç Denklem 3 ile ifade edilebilir.

$$P = GA\eta\sin\alpha\sin\beta \quad (3)$$

Burada P: üretilen güç, G: güneş ışınımı W/m<sup>2</sup>, A: güneş hücresi toplam yüzey alanı m<sup>2</sup>, η: verim, α: güneş ve uydu paneli X yönü gün içerisindeki açı değişimi, β: güneş ve uydu paneli Z yönü açısı, mevsimsel açı değişimi.

Denklem 3'te uydu güneşi Y dönünde tam olarak takip ettiğinde Sin(90°)= 1 olduğu için Denklem 4 aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$P = GA\eta\sin\beta \quad (4)$$

Önerilen yöntem kullanıldığında β açısı ve uydu paneli Y (pitch) açısı dik olacağından Denklem 5, her iki eksenli takip sistemi için aşağıdaki şekilde yazılabilir.

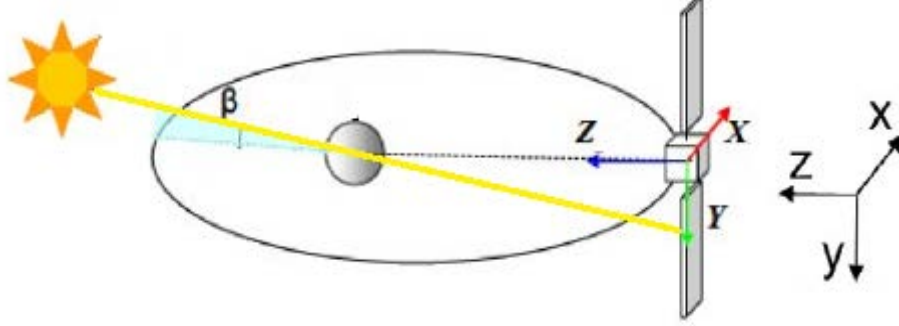
$$P = GA\eta \quad (5)$$

## YÖNTEM

Bu çalışmada haberleşme uydularının sadece Y eksen yönünde olan güneş ışınımını takip etme özelliğine ek olarak Z açısında dengeleyecek X eksen döndürme yöntemi önerilmiştir. Güneş hücresi verimi η :%27,5 alınmış ve hesaplamalar ona göre yapılmıştır [Bermudez-Garcia, Anderson, Philippe Voarino, and Olivier Raccurt., 2021].

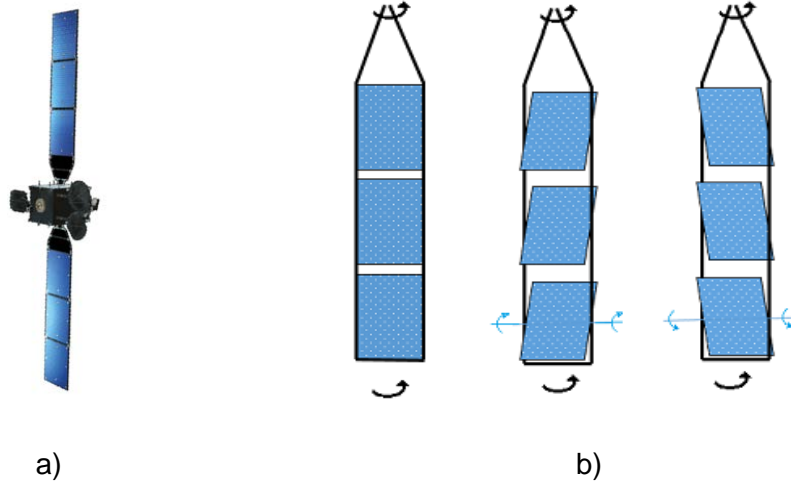
Şekil 4'te güneşin yıl içerisinde ±23,45° açı ile değişen mevsimsel β açısı görülmektedir. Ekvator düzleminde işletilmekte olan GEO haberleşme uyduları panelleri güneş ile β açısı kadar sürekli açılı

olmakta ekinoks dönemleri olan 21 mart ve 23 Eylül'de bu açı  $0^\circ$  olmaktadır. Bu çalışmada hedef  $\beta$  açısından kaynaklı verim kaybının gidermektir.



Şekil 4: GEO uyduda güneş panelinin güneş ile yıl içerisinde  $\pm 23,45^\circ$  değişen açısı

Şekil 5 a) da haberleşme uydusunun yönelimi, görülmektedir. Paneller Y eksenini yönde bir günde tam dönüş yaparak güneşi sürekli takip edebilmektedir. Şekil 5 b) soldaki şekil klasik yöntemle sadece Y yönünde güneşi takibi göstermektedir. Şekil 5 b) ortadaki ve soldaki şekil ise kış ve yaz mevsimlerinde önerilen yöntem ile güneş panel bölmelerinin kaydırılmış X eksenini üzerinde dönüş yaparak güneş ışınımını en iyi duruma getirme mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 5: GEO uyduda güneş panelinin iki eksenli günlük ve mevsimsel dönüşü

Önerilen yöntem ile güneş ışınları Y yönüne ilave olarak kaydırılmış X eksenini düzeltmesi ile Z yönündeki mevsimsel açı kaymasında dengelenmiştir. Bu yaklaşım uydunun gövdesinin bütünüyle X eksenini etrafında döndürülmesi ile yapılabilmektedir ancak anten açısında değişeceği için kapsama alanlarında istenmeyen kaymalara sebep olmaması için tercih edilmemiştir. Kuzey veya güney güneş panelinin bütünüyle uyduya bağlandığı noktadan hareket ettirilerek açı düzeltmeside yapılabilir. Bu durumda başka yan etkilere sebep olabilir.

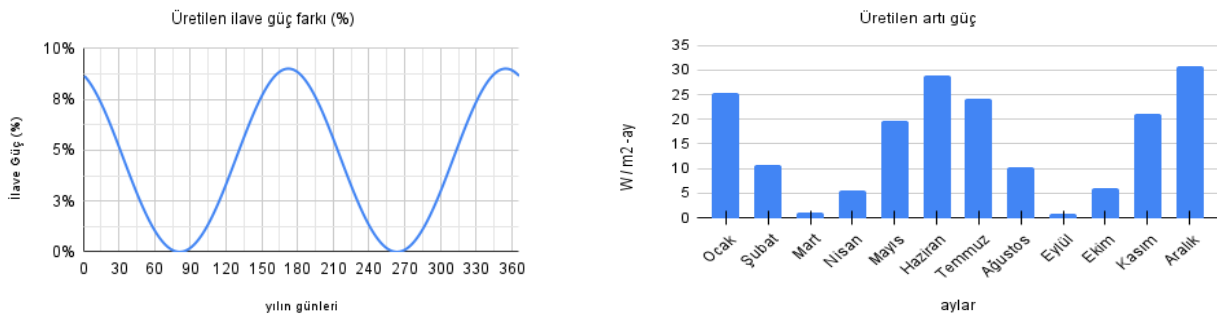
## UYGULAMALAR ve DEĞERLENDİRME

Haberleşme uydusu güneş panellerinin kaydırılmış X eksenini yönünde döndürülerek mevsimsel güneş açısında değiştirilmesi yöntemi ile  $1 \text{ m}^2$  güneş panelinden elde edilen güç Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 6'da kırmızı eğri, bir yıllık süre içinde sadece klasik yöntem ile Y eksenini etrafında güneş panelinin döndürülmesi ile elde edilen gücü göstermektedir. Mavi eğri ise önerilen yöntem ile güneş panelinin hem Y hem kaydırılmış X yönünde döndürülmesi ile elde edilen güç değişimini göstermektedir. Önerilen yöntem ile elde edilen ilave güç ise siyah eğri ile ve sağ eksen üzerinden değerlendirilecek şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6: GEO yörüngede bulunan bir haberleşme uydusunun  $1 \text{ m}^2$  lik kısmından elde edilen gücün tek eksenli takip, iki eksenli takip ile elde edilen değerleri ve elde edilen ilave güç

GEO haberleşme uydularında önerilen panellerin güneşi iki eksen üzerinde takibi ile elde edilen ilave güç gün bazında ve yüzde olarak Şekil 7 a) 'da verilmiştir. Şekil 7 b) 'de aylık ortalama ilave güç elde etme grafiğini göstermektedir. Mart ve Eylül aylarında önerilen yöntem ile elde edilen ilave güç oldukça az iken Haziran ve Aralık aylarında yüksek değerlere ulaşmaktadır.



a)

b)

Şekil 7: Önerilen yöntem ile elde edilen ilave güç a) yüze olarak günlük dağılımda b) Ay bazında elde edilen ilave güç.

Yukarıdaki hesaplamalar  $1 \text{ m}^2$  güneş paneli alanı için yapılmıştır. Ortalama  $1 \text{ m}^2$ 'den  $350 \text{ W}$  güç alınacağı ve güneş hücresi veriminin %27,5 olması durumuna göre hesaplamalar yapılmıştır. Benzer şekilde bir yıl süre içerisinde güneş ışınımının geleneksel yöntemlerle ve önerilen yöntem ile elektrik

enerjisine dönüştürülmesi durumunda elde edilen sonuçlar konsolide edilerek istatistiksel verilerle Tablo 2'de gösterilmiştir. Yıl içerisinde en yüksek güç Y takipli sistemde 375,74 W/m<sup>2</sup> ile 11 Mart tarihinde elde edilirken önerilen yöntemde 384,35 W/m<sup>2</sup> ile 2 Ocak tarihinde elde edilmiştir. Benzer şekilde en az güç geleneksel Y takipli yöntemde 330,29 W/m<sup>2</sup> ile 23 Temmuz tarihinde iken önerilen yöntem ile 359,80 W/m<sup>2</sup> ile 2 Temmuz tarihinde elde edilmiştir. Ekinoks dönemi olan ve güneşin tam ekvator düzleminde olduğu 21 Mart ve 23 Eylül tarihlerinde ilave bir güç elde edilememiş bu nedenle üretilen ilave güç sütununda farkın sıfır olduğu zaman gözlemlenmiştir. Bu farkın en yüksek olduğu 21 Aralık tarihinde ise 21,72 W/m<sup>2</sup> ilave güç elde edilmiştir. Güneş hücrelerinden elde edilen gücü güneşin açısı ile birlikte dünyanın güneşe olan uzaklığı da etkilediği için en düşük ve yüksek güç elde etme tarihleri bilinen 21 Mart 23 Eylül gibi ekinoks veya güneşin dönenceler üzerinde olduğu 21 Haziran ve 21 Aralık gibi tarihlerden farklı zamanlarda ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2. Geleneksel ve önerilen güneş takip yöntemi sonuçlarının istatistiksel verileri

İstatikler	Y takipli (W)	X Y Takipli (W)	Üretilen artı Güç (W)	İlave Verim %
En büyük	375,74	384,35	31,72	9,00%
En küçük	330,29	359,80	0,00	0,00%
Std. Sapma	13,59	8,71	10,91	3,19%
Ortalama	<b>356,65</b>	<b>372,11</b>	<b>15,46</b>	<b>4,43%</b>

Bu çalışmada amaç önerilen yöntem ile ne kadar ilave güç elde edilebilir sorusunun cevabını bulmaktır. Tablo 2 bu verileri konsolide olarak göstermektedir. Mart ve Eylül aylarında elde edilen ilave güç %1-2 seviyesinde iken Haziran ve Aralık aylarında bu değer %9'lara çıkmaktadır. Toplam yıllık ortalamada %4,33'lük bir kazanç elde edilmiştir. Bu durumda elde edilen bu iyileşme sistem tasarımında parametrelere yansıtılacak ve avantaj elde edilecektir.

Orta ölçekli bir haberleşme uydusu 10 kW, orta-yüksek ölçekli bir haberleşme uydusu ise 15 kW kadar elektrik enerjisine ihtiyaç duyar. Bu uydular önerilen XY takipli sistem ile üretildiğinde üretilen 10433,49 W ve 15649,50 W değerine çıkar. Elde edilen ilave güç, sistem ihtiyaçları için kullanılabilir veya uyduya ilave transponder konulabilir. Bu güç artırımına ihtiyaç olmadığı durumda 10 kW uydu için 1,24 m<sup>2</sup>, 15 kW uydu için ise 1,86 m<sup>2</sup> daha az hücre alanına göre uydu tasarlanabilir. Böylece güneş hücresi dolayısıyla güneş paneli maliyeti düşürülmüş olur.

## SONUÇ

GEO haberleşme uydu üreticileri güneş panellerinde önerilen iki eksenli güneşi takip yöntemini kullanarak sistem parametrelerinde iyileşme elde edebilir. Elde edilen iyileşme ile aynı güneş hücresi alanından daha fazla güç elde edilebilir veya aynı güç daha az güneş hücresi alanı ile elde edilebilir. Uydu işletmecileri bu metodu üreticilerden talep edebilir. Bununla birlikte önerilen sistemin ihtiyacı olan ek donanım ve yazılımında tasarımda dikkate alınması ve ödünleşiminin yapılması gerekmektedir.

## Kaynaklar

- Abood, Akram Abdulameer. 2015. *A comprehensive solar angles simulation and calculation using matlab*. International Journal of Energy and Environment 6.4: 367.
- Baraskar, Aditya, et al. 2022. *Space solar power satellite for the Moon and Mars mission*. Journal of Space Safety Engineering 9.1: 96-105.
- Bermudez-Garcia, Anderson, Philippe Voarino, and Olivier Raccurt. 2021. *Environments, needs and opportunities for future space photovoltaic power generation: A review*. Applied Energy 290: 116757.

- Demirel, Selman. 2017. *Haberleşme uydusunun elektrik güç sisteminin modellenmesi ve analizi*. Doktora tezi. Sakarya Üniversitesi, Türkiye.
- Ji, Xiangfei, et al. 2020. *Attitude control of space solar power satellite with large range of relative motion among subsystems*. Aerospace Science and Technology 100: 105781.
- Montenbruck, Oliver, et al. 2015. *GNSS satellite geometry and attitude models*. Advances in Space Research 56.6: 1015-1029.
- Safak, Omer. 2013. *Structural design and analysis of a solar array substrate for a GEO satellite*. MS thesis. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Plis, Elena A., et al. 2021. *Effect of simulated GEO environment on the properties of solar panel coverglasses*. IEEE Transactions on Plasma Science 49.5: 1679-1685.
- Taherbaneh, Mohsen, et al. 2011. *Evaluation end-of-life power generation of a satellite solar array*. Energy conversion and management 52.7 : 2518-2525.
- Oz, Ibrahim. 2024. *Proximity monitoring of collocated satellites based on real time measurement*. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 39.2: 825-834.
- Oz, Ibrahim. 2022. *Coverages stabilization of an inclined orbit communication satellite with two axis biases*. Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38: 219-229.
- Öz, İbrahim. 2024. *Minimizing Satellite Residence Time in the GEO Region through Elevated Eccentricity Method*. Turkish Journal of Engineering, vol. 8, no. 3, pp. 416-426, doi:10.31127/tuje.1395250
- Qingjun, L. I., et al. 2022. *Novel orbit-attitude combination mode for solar power satellites to reduce mass and fuel*. Chinese Journal of Aeronautics 35.8: 132-142.
- Yang, Yang, et al. *A novel design project for space solar power station (SSPS-OMEGA)*. Acta Astronautica 121 : 51-58.