



Süperkapasitörlerin Güneş Enerjili İnsansız Hava Araçlarında Kullanımına Yönelik Matlab/Simulink Modeli

Matlab/Simulink Model for the Use of Supercapacitors in Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles

Şerife Çamcı¹, Koray Ülgen^{2*}

¹ Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu, İzmir, TÜRKİYE

² Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: koray.ulgen@ege.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 05.07.2021

Kabul Tarihi / Accepted: 20.09.2021

Atıf şekli/ How to cite: ÇAMCI,Ş.,ÜLGEN, K.(2022).Süperkapasitörlerin Güneş Enerjili İnsansız Hava Araçlarında Kullanımına Yönelik Matlab/Simulink Modeli.DEUFMD, 24(70), 221-232.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247021

Öz

Dünya nüfusunun hızla artmasına paralel olarak, özellikle ticaret, turizm ve askeri alanlarda vazgeçilmez olan havacılık sektörünün yakıt tüketimi de çok hızlı bir ivmeyle artmaya devam etmektedir. Bu tüketimden dolayı ortaya çıkan enerji ve çevre sorunları uluslararası ortak bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle klasik enerji üretim yöntemlerinin kullanımı ve geliştirilmesinin ardından, enerji piyasasının talepleri doğrultusunda, yeni teknolojiler ve alternatif çözümler üretilmeye başlanmıştır. Bu talepler; enerjinin daha güvenilir, daha ucuz ve daha kaliteli olması ile birlikte daha çevreci olması yönündedir. Hava araçlarının karbondioksit emisyonu miktarı, dünyadaki toplam ulaştırma trafiğinin yaydığı karbondioksit miktarında büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle son yıllarda, hava araçlarında fosil jet yakıtı yerine güneş, hidrojen, biokütle ve nükleer enerji gibi yenilenebilir enerji kullanımına yönelik araştırmalar ve uygulamalar hız kazanmaktadır.

Bu makalede; Matlab/Simulink Modeli ile kanat üzeri fotovoltaik panel ile kaplanmış bir insansız hava aracında güneş ışınımından maksimum düzeyde yararlanabilmek için MPPT algoritması oluşturularak sistemin daha verimli çalışması sağlanmıştır. Bu simülasyonda bugüne kadar gerçekleştirilmiş uygulamalardan farklı bir enerji depolama sistemi olan süperkapasitör tercih edilmiş olup çıkıştaki fırçasız DC motor (BLDC) beslenecek şekilde bir model tasarlanmış ve simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir. Bu simülasyon modelinin; çok disiplinli gerçek bir uygulama için altyapı oluşturacağı ve bu alanda yapılacak diğer çalışmalara ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı (İHA), güneş enerjisi, fotovoltaik, süperkapasitör (ultrakapasitör), Simulink

Abstract

In parallel with the rapid growth of the world population, the fuel consumption of the aviation industry, which is indispensable especially in trade, tourism and military fields, continues to increase

at a rapid pace. The energy and environmental problems arising from this consumption have become a common international problem. For this reason, following the use and development of classical energy production methods, new technologies and alternative solutions have begun to be produced in line with the demands of the energy market. These demands are; energy is more reliable, cheaper and better quality, and more environmentally friendly. The amount of carbon dioxide emissions from air vehicles has a large share in the amount of carbon dioxide that the total transport traffic carries in the world. For this reason, in recent years, studies and applications for the use of renewable energy sources such as solar, hydrogen, biomass and nuclear energy instead of fossil jet fuels have gained momentum in air vehicles. In this article, with the Matlab/Simulink Model, an unmanned aerial vehicle covered with a photovoltaic panel on the wing has created the MPPT algorithm to make maximum use of solar radiation, and the system has been provided to operate more efficiently. In this simulation, a supercapacitor, which is an energy storage system different from the applications realized so far, was preferred and a model was designed to feed the brushless DC motor (BLDC) at the output and the simulation results were evaluated. It is considered that this simulation model will form the infrastructure for an actual multi-disciplinary application and will shed light on other studies to be conducted in this field.

Keywords: *Unmanned Aerial Vehicle (UAV), solar energy, photovoltaic, supercapacitor (ultracapacitor), Simulink*

1. Giriş

Dünya nüfusunun hızla artmasına paralel olarak özellikle ticaret, turizm ve askeri alanlarda vazgeçilmez olan havacılık sektörünün yakıt tüketimi de çok hızlı bir ivmeyle artmaya devam etmektedir. Bu tüketimden dolayı ortaya çıkan enerji ve çevre sorunları uluslararası ortak bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle klasik enerji üretim yöntemlerinin kullanımı ve geliştirilmesinin ardından, enerji piyasasının talepleri doğrultusunda, yeni teknolojiler ve alternatif çözümler üretilmeye başlanmıştır. Bu talepler; enerjinin daha güvenilir, daha ucuz ve daha kaliteli olması ile birlikte daha çevreci olması yönündedir.

Avrupa Birliği, tüm Avrupa'da enerji alanında bütünleşmeye büyük önem vermekte olup 2020 yılına kadar enerjisinin %20'sini yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) kullanarak sağlama kararı almıştır. ABD'nin hedefi ise 2030 yılına kadar enerjisinin %30'unu YEK'ten sağlamaktır. Gelişmiş ülkelerin gelecekte enerjilerini YEK üzerinden sağlama girişimleri giderek artmaktadır [1].

Hava araçlarının karbondioksit emisyonu miktarı, dünyadaki toplam ulaştırma trafiğinin yaydığı karbondioksit miktarında büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle son yıllarda, hava araçlarında fosil jet yakıtı yerine güneş, hidrojen, biokütle ve nükleer enerji gibi alternatif enerji

kullanımına yönelik araştırmalar ve uygulamalar hız kazanmaktadır. Örneğin Airbus şirketi 2035 yılında hayata geçmek üzere sıfır emisyonu sahip olacak hidrojenle çalışan uçaklar üretme planını açıklamıştır [2].

2015 yılındaki toplam verilere göre; hava taşımacılığında kaynaklanan karbondioksit emisyonu 781 milyon tona ulaşmıştır. Bu da dünyadaki toplam ulaştırma trafiğinin yaydığı karbondioksit miktarının ortalama olarak %12'sine karşılık gelmektedir. Hava Taşımacılığı bu hızla devam ederse önlem alınmadığı takdirde, 2050'li yıllara gelindiğinde bu emisyon miktarının en az iki katına çıkacağından endişe edilmektedir. Bunun için dünya genelinde birçok çalışma grupları kurularak önlemler alınmaya başlamıştır. Bu grupların başında gelen Air Transport Action Group (ATAG)'ın aldığı önlemler; yakıt tasarruflu ve verimli yeni teknolojiler geliştirmek, hava taşımacılığını azaltmak, alt yapıyı geliştirmek ve alternatif enerji kaynakları kullanarak karbondioksit salınımını minimuma indirmektir. ATAG Waypoint 2050 raporunun yayınlanmasıyla sektör, net CO2 emisyonlarını azaltmak için Şekil 1'de görüldüğü gibi, her yıl %1.5 oranında CO2 emisyonunda azalma sağlanarak sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF:Sustainable Aviation Fuel) kullanımı %75'lere ulaştığı takdirde 2050 yılındaki CO2 emisyonu salınımı 2005 yılının yarısına indirmeyi hedeflemektedir [3].

Çevreye olan bu zararları minimuma indirmek üzere, hava araçlarında fosil jet yakıtı yerine güneş, hidrojen, biokütle gibi alternatif enerji kullanımına yönelik araştırmalar ve uygulamalar gün geçtikçe hız kazanmaktadır. Bu nedenle

tasarımımızda kullandığımız insansız hava aracımızın PV (Photovoltaic-Fotovoltaik) panel yardımıyla güneş enerjisinden faydalanarak enerji sağlanması tercih edilmiştir.



Şekil 1. Uçaklarda karbondioksit emisyonunu düşürmek için yol haritası

Güneş enerjisinin hava araçlarında kullanımı çok eskilere dayanmaktadır. Bu uygulamaların tarihsel gelişimine bakacak olursak Şekil-2'den görüldüğü gibi 1957 yılında model uçakla başlayan güneş enerjisi uygulamaları 1974 yılından günümüze insansız hava aracı yoğunlukta olmak üzere karşımıza çıkmaktadır [4].

Güneş enerjisi ile çalışan insanlı uçaklara ait başarılı uygulamalar ise 1979 yılında başlamış ve günümüze kadar gelmiştir. En son popüler uygulama olan Solar Impulse-II adı verilen pilotlu uçağın gündüz uçuşlarında güneşten 17000'den fazla monokristal silikon güneş hücresi kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi, uçağı uçurabilecek ve gece için pilleri dolduracak güce sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. 9 Mart 2015 tarihinde Abu Dabi'den havalanarak dünya çevresindeki turuna başlamıştır. 26 Temmuz 2016 tarihinde uçak, kalkış yaptığı Abu Dabi'ye vararak Dünya etrafında bir tam tur atmayı başararak dünya rekoru kırmıştır [5].

2018'de Zephyr ailesinin yeni üyesi Zephyr S HAPS (Yüksek İrtifa Uydusu), yaklaşık 70.000 fit ortalama irtifada stratosferde uçarak dünya rekoru kırmıştır [5].

Dünyada son yıllarda güneş enerjili hava araçları görüntüleme, savunma sanayii, haberleşme,

uyarı ikaz ve arama kurtarma, tarımsal izleme ve destek sistemleri, atmosferik uydu gibi birçok uygulamalarda kullanılmasına yönelik çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir [7].

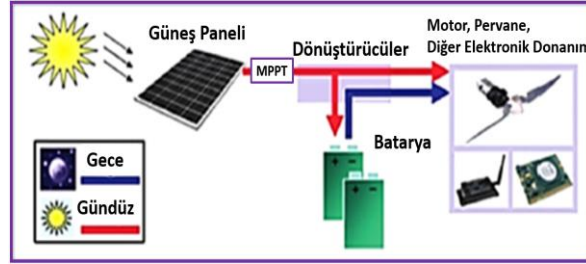
2. Materyal ve Metot

Güneş enerjili hava araçlarında güneş pillerinden oluşan paneller uçak kanatları, gövde ve kuyruk gibi diğer yüzeylere yerleştirilir. Böylece, güneş enerjisi PV (fotovoltaik) etki ile elektrik enerjisine dönüştürülerek itki ve elektronik sistemlerin ihtiyaç duyduğu güç elde edilmiş olur. Güneş ışığının yoğunluğu, havanın bulutlu olması ve hava sıcaklığı güneş panelinin ürettiği elektrik gücünü etkiler. Güneş enerjisi gece şartlarında bulunmadığından sürekli bir uçuş sağlayabilmek için enerji depolama sistemleri kullanılması gerekmektedir. Gün içinde elde edilen elektrik enerjisi ihtiyaç duyulan sistemlerde kullanılırken, enerji fazlası bataryanın şarj edilmesi için kullanılmaktadır. Güneş panelli uçaklarda genel olarak enerji yönetim sistemi Şekil 2' de görüldüğü gibidir [8, 9].

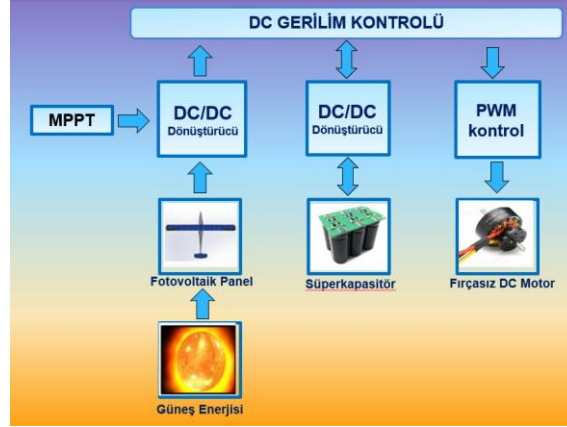
Güneş pilleri, yapımında kullanılan malzemeye göre isimlendirilir ve çok fazla çeşidi bulunur. Kullanılan malzemeye göre de verimliliği %5 ile %25 arasında değişmektedir [10].

Batarya öncesinde güneş panellerinden gelen enerjiden maksimum seviyede yararlanmak ve şarj kontrolü için MPPT (Maximum Power Point Tracking) sistemi kullanılmaktadır. Elde edilen elektrik enerjisinin hareket enerjisine dönüştürmek için de bir güç dönüştürücüsüne ihtiyaç duyulmaktadır [11].

Tasarlanacak olan Hibrit enerjili İHA'nın temel uçuş fonksiyonunu sağlaması için kullanılacak DC Gerilim akış kontrol blok diyagramı Şekil 3'de görülmektedir. Bu kontrol sistemi ilk olarak birincil güç kaynağı olan PV sistem, İkincil güç kaynağı olan Süperkapasitör (Ultrakapasitör) ve Fırçasız DC motorun hız kontrol sistemi olarak üç ana gruptan oluşmaktadır [12].



Şekil 2. Güneş enerjili hava aracının enerji yönetim sistemi



Şekil 3. Tasarımın DC Gerilim kontrol blok diyagramı

2.1 PV Panel ve Simülasyon modeli

Bir güneş gözesinin akım-gerilim (I-V) karakteristiği ve bu eğriden çıkarılabilecek güç tanımlamaları için, yaygın olarak tek diyot (single exponent equation) modeli kullanılmaktadır. Bu modelin dayandığı eşdeğer devre prensip olarak Şekil 4'de verilmektedir. Eşdeğer devrede güneş paneli, ışığa göre değişen bir akım kaynağı gibi davranmaktadır. I-V ilişkisi ise aşağıdaki denklemde verilmektedir [13].

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+I R_s)}{A k T}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1)$$

Bu denklemde,

I_{ph} : PV gözede oluşan akım,

I_0 : Ters sızıntı akımı,

q : Elektrik yükü ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C),

V : PV gözenin çıkış gerilimi,

I : PV gözenin çıkış akımı,

R_s : Hücrenin iç direnci,

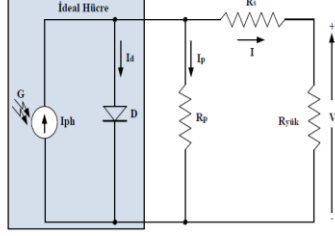
R_p : Paralel kaçak akım direnci,

A : Diyotun kalite faktörü,

k : Boltzman sabiti ($1,3806505 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T : PV gözenin Kelvin cinsinden sıcaklığı temsil etmektedir.

N_s seri ve N_p paralel bir şekilde düzenlenen mini-PV modül devresi Şekil 5'de gösterilmektedir.

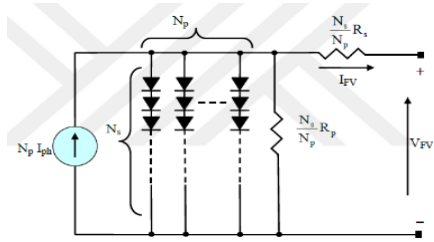


Şekil 4. Tek diyotlu güneş gözesi eşdeğer devresi

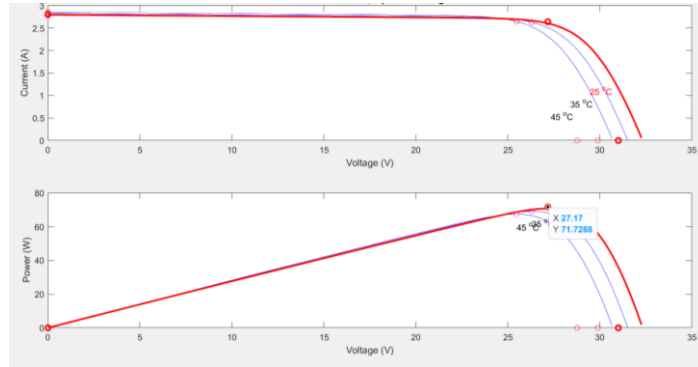
$$I_{FV} = N_p I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{q(V_d + I R_s)}{N_s k T F_{PV}} \right) - 1} \right] - \frac{N_p V_d / N_s}{R_p} \quad (2)$$

Buradaki N_s seri PV göze sayısı, N_p 'de paralel bağlı PV göze sayısını göstermektedir. Aslında mini PV modülünün verimini R_s çok az etkilerken R_p 'nin etkisi daha büyüktür [14].

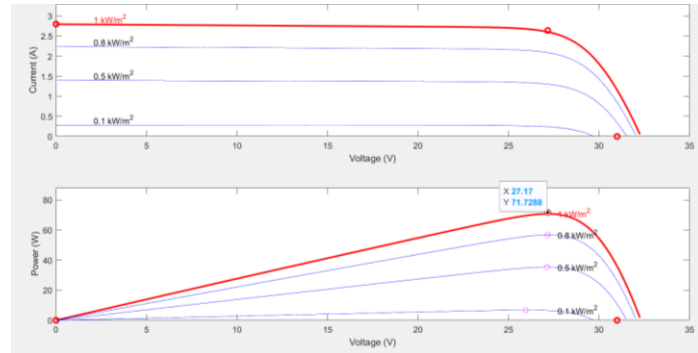
Tasarımda kullanılan güneş paneli; 11 adet seri ve 4 sıra paralel PV gözeden oluşan PV modülün iki tanesinin paralel bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Toplamda iki kanat üzerine 88 adet ELO(Epitaxial-Lift off) Maksimum Akım 0,33A, Maksimum Gerilim 2,47V özelliğinde esnek güneş gözesinden oluşmaktadır. Bu durumda; PV panele ait elde edilen MATLAB Simulink modeline ait I-V ve P-V grafiklerinin 25°C-35°C-45°C sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 6'da; 1kW/m²-0,8kW/m²-0,5kW/m²-0,1kW/m² ışımaya bağlı değişimi ise Şekil 7'de yer almaktadır..



Şekil 5. PV modül eşdeğer devresi



Şekil 6. PV modülün I-V ve P-V grafiklerinin sıcaklığa bağlı değişimi



Şekil 7. PV modülün I-V ve P-V grafiklerinin ışımaya bağlı değişimi

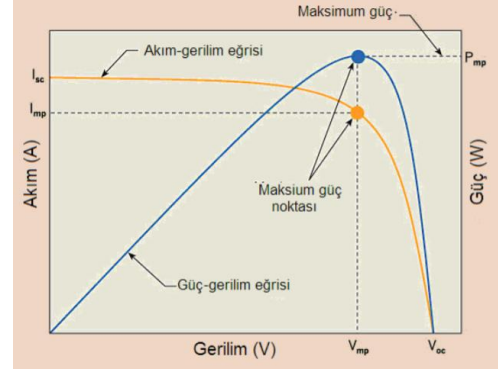
Pratik uygulamalarda kullanılan PV sistemler, kullanılan bileşenlerin ve kontrol sisteminin durumuna bağlı olarak farklı kombinasyonlarda tasarlanabilmektedir. Bu kombinasyonlar içinde performansı en yüksek olan ve en yaygın kullanılan maksimum güç noktası izleyici (MPPT) kombinasyonudur [15].

Güneş enerji sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlayan tekniklere MPPT (Maximum Power Point Tracking-Maksimum güç noktası izleme) adı verilir. MPPT tekniği, güç üretiminin anlık değişebildiği güneş enerji sistemlerinde belirli aralıklarla üretilen gücün, maksimuma ulaştığı değeri takip ederek yüke aktaran elektronik cihazlardır [14,15].

MPPT tekniği, belirli bir güneş ışınımı altında PV panelden P_{mp} maksimum güç çıkışı elde etmek için, V_{mp} gerilim değerinin ve I_{mp} akım değerinin bulunması ilkesine dayanır. Bu değerler Şekil 8'de gösterilmektedir. Dış etkilere bağlı olarak (güneş ışınımı, panel sıcaklığı veya yük) maksimum güç noktasını oluşturacak gerilim veya akım değeri farklılık gösterebilir. Dolayısı ile sürekli olarak gerilim ve akım parametrelerinin takip edilerek bir önceki durum ile karşılaştırılması gerekmektedir.

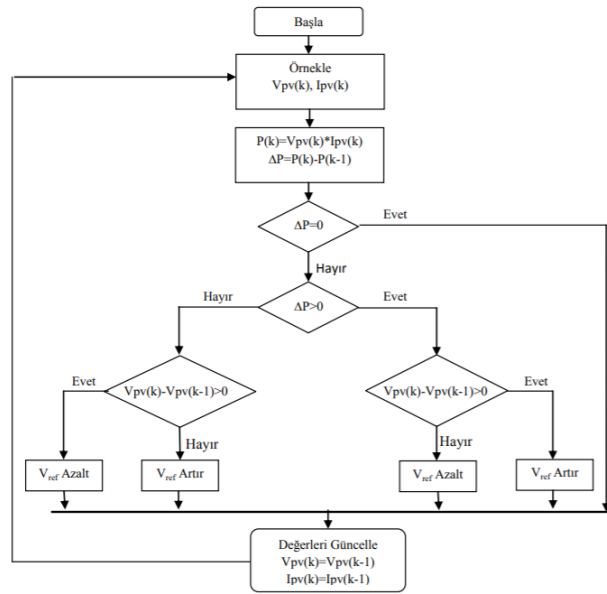
Simülasyon modelimizde kullandığımız Değiştir ve Gözlemler (Perturb and Observe, P&O) algoritması, PV panel akım ve geriliminin

örneklenecek güç değişiminin hesaplanarak izlenmesi prensibine dayanmaktadır.



Şekil 8. Bir PV hücrenin akım-gerilim eğrisi

P&O (Değiştir ve Gözlemler) algoritması kısaca Şekil 9'da özetlenmektedir. PV panel anlık gerilim ve akım değerleri örneklenecek, anlık güç değeri hesaplanıp verilen akış diyagramında görüldüğü gibi maksimum güç noktasına (MPP) gelinceye kadar işlemler her anahtarlama çevriminde tekrarlanmaktadır. Anlık güç değeri bir önceki güç değeri ile farkı alınarak ΔP değeri elde edilmektedir. Sistem MPP noktasında salınım göstermektedir. Salınım boyutunu azaltmak için ΔP karışıklık adım boyutu azaltılmaktadır. [16,17].



Şekil 9. Değiştir ve Gözlemler (P&O) algoritması akış diyagramı

2.2 Enerji depolama sistemleri

Güneş enerjili hava aracımızda gece şartlarında veya güneş ışınımının yetersiz olduğu koşullarda kesintisiz olarak uçuşa devam edilebilmesi için enerji sağlayacak enerji depolama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji depolama sistemi için genellikle batarya, yakıt pili, süperkapasitörler ve elektrostatik kapasitörler kullanılmaktadır.

Güneş enerjili hava araçlarında en çok tercih edilen enerji depolama sistemleri Li-Po, Li-ion, LiS bataryalar ve yakıt hücreleridir. Li-ion bataryalar yaklaşık 200Wh/kg enerji yoğunluğu ile elektrikli kara ve hava araçları ve solar araç uygulamalar için çok tercih edilmektedir. Lityum polimer (Li-Po) bataryalar ise li-ion'a benzer ancak elektrolitleri polimerdir. [18].

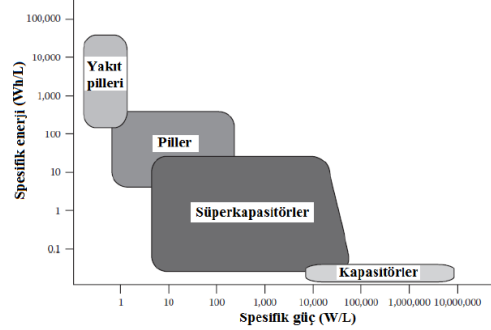
Bu nedenle çok sert bir şekli yoktur. Lityum sülfür (Li-S) yüksek enerji yoğunluğu ve hafifliğiyle dikkat çekmektedir. Enerji yoğunluğu teorik olarak 2500Wh/kg olmasına rağmen uygulamalarda 350Wh/kg olmaktadır. Rejeneratif yakıt hücreleri (RFC) ise yakıt hücresi, elektrolizör, depolama tankı olmak üzere geniş alanda yüksek güçlü bir sistemdir. Enerji yoğunluğu 700Wh/kg değerine kadar çıkmaktadır [18].

Yüksek değerlerde akım verebilmesi nedeniyle enerji kaynağı olarak elektriği kullanan insansız hava araçlarında lityum-polimer (Li-Po) batarya tercih edilmektedir. Ayrıca Li-Po bataryalar yüksek güçleri, hafif olmaları ve uzun kullanımları gibi nedenlerle insansız hava araçlarında en çok popüler olan enerji kaynağıdır. Li-Po bataryaların avantajları olduğu gibi birtakım dezavantajları vardır. Bunlar; batarya ömürlerin az olması ve hassas kimyasal yapılarının yanmaya müsait olmasıdır [18].

Enerji yoğunluğu (dikey eksen) ne kadar enerjinin depolanabileceğini, güç yoğunluğu (yatay eksen) ise depolanan enerjinin ne kadar sürede aktarılabilceğini tanımlayan bir karşılaştırma grafiği Şekil 10'da yer almaktadır.

Bu grafiğe göre süperkapasitörler yüksek güç yoğunluğunda düşük enerji yoğunluğuna sahipken, yakıt pilleri ve bataryalar yüksek enerjiye ancak sınırlı güç yoğunluğuna sahiptir. Lityum iyon pilleri ve ileri ikincil bataryaların yavaş güç aktarımına sahip olması, birçok yeni uygulamada daha yüksek enerji ve güç

yoğunluğuna sahip sistemlere olan ihtiyacı arttırmıştır.



Şekil 10. Farklı enerjili depolama sistemlerinin spesifik enerji-spesifik güç grafiği [19]

Güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu skalasında süper kapasitörler bataryalarla elektrolitik kapasitörlerin arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Süperkapasitörler bataryalar gibi enerjiyi elektrotların tamamında değil de yüzeyinde depoladıkları için bataryalara göre daha düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ancak şarjdeşarj verimliliği yüksek olduğu için spesifik güçleri de yüksektir [19].

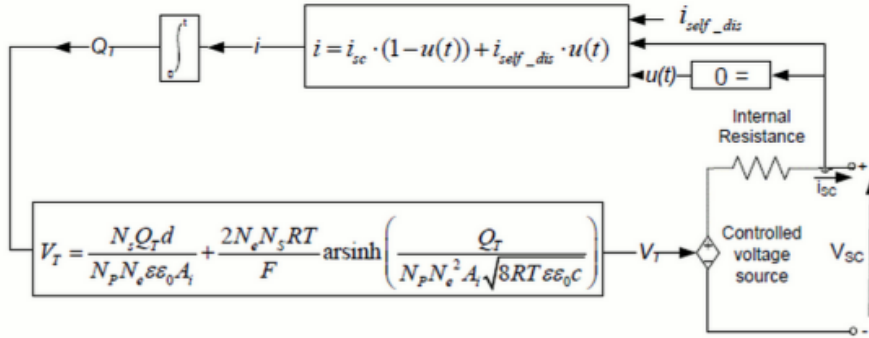
Tablo 1. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması

	Süperkapasitör	Elektrostatik Kapasitör	Batarya
Spesifik Güç (W/kg)	≈1000	>10.000	50-200
Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	1-10	<0,1	10-100
Şarj Süresi (s)	0,3-30	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³	1-5
Deşarj Süresi (s)	0,3-30	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³	0,3-3
Şarj/Deşarj Verimliliği	0,85-0,98	≈1	0,7-0,85
Döngü Sayısı	>100.000	>500.000	500-2000

Bataryalar ile süperkapasitörler arasındaki temel farklılıklar Tablo 1'de özetlenmektedir. Görüldüğü gibi süperkapasitörler elektrolitik kapasitörlerden 10 kat daha fazla enerji yoğunluğuna sahipken, bataryalardan daha kısa şarjdeşarj süresi, daha yüksek güç yoğunluğu, yüksek şarjdeşarj verimliliği ve uzun çevrim

ömrüne sahip olduğu görülmektedir [19]. Bu nedenlerle güneş enerjili insansız hava aracımızın tasarımında enerji depolama sistemi olarak süperkapasitör tercih edilmiştir.

Süperkapasitörün eşdeğer devresi için aşağıdaki parametreleri içeren Şekil 11'deki blok diyagram kullanılmaktadır [20].



Şekil 11. Süperkapasitörün eşdeğer devresi

Süperkapasitörün şarj durumunu SOC (State Of Charge) parametresi ile tanımlanmaktadır. Süperkapasitörün SOC parametresinde tam şarj durumu %100 ile ifade edilirken boş bir süperkapasitör %0 ile ifade edilmekte olup SOC parametresi denklem 3'de tanımlandığı gibi hesaplanmaktadır [21].

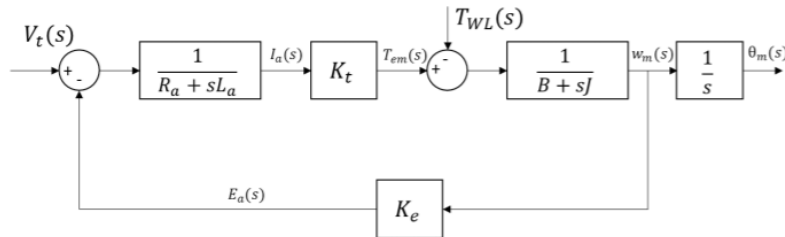
$$SOC = \frac{Q_{init} - \int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_T} * 100 \quad (3)$$

2.3 Fırçasız DC motor (BLDC-Brushless DC Motor) Simulink model

BLDC (Fırçasız DC motor) motorlar; yüksek verimlilik, sessiz çalışma, uzun ömürlü olma, daha az bakım gerektirme, sabit tork sağlama, geniş hız ve tork kontrol aralığına sahip olma gibi özelliklerinden dolayı son yıllarda endüstri, otomotiv, askeri ekipmanlar, evsel cihazlar ve otomasyon sistemlerinde yaygın halde kullanılmaktadır. Fırçalı motorlardaki komütasyon işleminde yardımcı olan fırçalar zamanla aşınarak motorun bozulması, verim

kaybı ve kıvılcım oluşturması gibi birtakım sorunlara neden olmaktadır. BLDC motorlarda komütasyon işlemi mekanik olmak yerine Hall sensörleri ve güç elektroniği tabanlı anahtarlama devreleri sayesinde gerçekleşir. Bu yüzden BLDC motorlara elektronik komütasyonlu motor da denmektedir ve fırçalı motorlara iyi bir alternatif olarak görülmektedir. BLDC motorlar kullanım amacına ve isteğe göre hız, konum ya da moment açısından kontrol edilebilirler. BLDC motorlar farklı açılardan kontrol edilebildiği gibi farklı kontrolcülerle de kontrol edilebilirler. Birçok gelişmiş kontrol yöntemi olmasına rağmen, orantı-integral-türev (PID) kontrol; kararlılığı, karmaşık olmayan yapısı, geniş bir alana uygulanabilirliği ve dijital/analog platformlarda uygulama kolaylığı gibi nedenlerden dolayı en çok tercih edilen ve kullanılan kontrol yöntemidir.

BLDC motor ve yüke ait blok diyagramı Şekil. 12'de verilmektedir. Burada $V_t(s)$ giriş işaretini, $W_m(s)$ motor açısal hızını vermektedir [22].



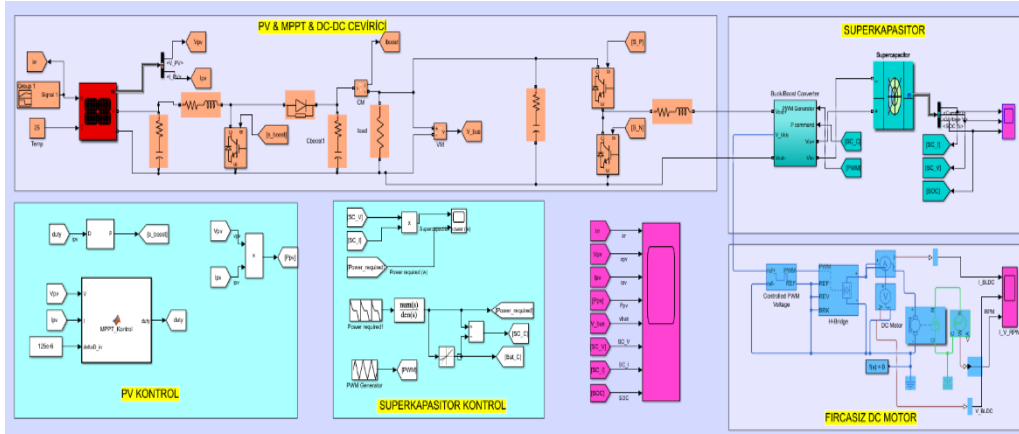
Şekil 12. BLDC motorun blok diyagramı

BLDC motor ve yüke ait transfer fonksiyonu denklem 4'de ifade edilmektedir [22].

$$G(s) = \frac{W(s)}{V_t(s)} = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR+LB)s + (BR+K_eK_t)} \quad (4)$$

2.4 Tasarımın Detaylı Simulink Modeli

Güneş enerjili insansız hava aracımızın birincil enerji kaynağı olarak PV panel, enerji depolama sistemi olarak süperkapasitör ve yük olarak fırçasız DC motor (BLDC) motor kullanılarak tasarlanmış durumdaki detaylı konfigürasyon yapısına ait Matlab\Simulink Modeli Şekil 13'te gösterilmektedir.



Şekil 13. Güneş enerjili insansız hava aracının detaylı Matlab\Simulink Modeli

3. Bulgular

Matlab\Simulink Modelinde yer alan Fotovoltaik panel, MPPT ve DC/DC çevirici çıkışından elde ettiğimiz birinci bölüme ait Simülasyonun solar ışımının (i_{rr}) 1000 W/m^2 olduğu koşullarda çıkış gerilimi (V_{pv}), çıkış akımı (I_{pv}) ve çıkış gücüne (P_{pv}) ait sinyal çıkışları Şekil 14'de yer almaktadır. Burada görüldüğü gibi solar ışım arttıkça çıkış gerilimi, akımı ve gücü de aynı orantıda artmaktadır.

Matlab\Simulink Modelinde yer alan PID kontrol ve DC/DC çevirici çıkışından elde ettiğimiz ikinci bölüme ait tasarımımızda 6 adet 2,7V 100F seri bağlı süperkapasitörden oluşan modül kullanılmış olup, simülasyonun süperkapasitör çıkış gerilimi (SC_V), çıkış akımı (SC_I), ve şarj durumu (SOC) sinyal çıkışları Şekil 15'de yer almaktadır. Buradaki çıkış geriliminden de anlaşılacağı gibi 11,1Volt'luk Fırçasız DC motor için gerekli DC gerilim değeri yeterli olmaktadır.

Matlab\Simulink Modelinde yer alan Fırçasız DC motor ve PID kontrolden elde ettiğimiz üçüncü bölüme ait simülasyonun Fırçasız DC motor çıkış gerilimi (V_{BLDC}), çıkış akımı (I_{BLDC}) ve RPM değerine ait sinyal çıkışları Şekil 16'da yer almaktadır. Buradaki çıkış sinyallerinden de anlaşılacağı gibi 11,1Volt gerilim değerindeki Fırçasız DC motorun dakikadaki dönme sayısı ise 7000 rpm değerine ulaştığı gözlemlenmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, sıradan olmayan bir depolama sistemi olarak süperkapasitör kullanılan güneş enerjili bir insansız hava aracının matematiksel modeli kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir.

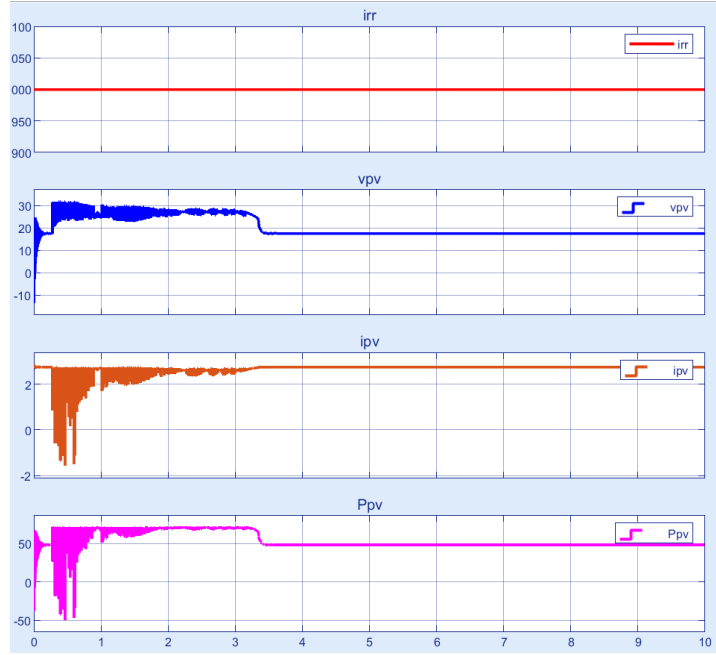
Esnek güneş panellerinden gelen enerjiden maksimum seviyede yararlanmak için P&O algoritması kullanılan bir MPPT (Maximum Power Point Tracking) sistemi kullanılmıştır. Elde edilen elektrik enerjisinin hareket enerjisine dönüştürmek için de bir fırçasız DC motor kullanılarak ihtiyaç duyulan RPM

değerine ulaşıldığı ve matematiksel modelin simülasyon sonuçları ile örtüştüğü gözlemlenmektedir.

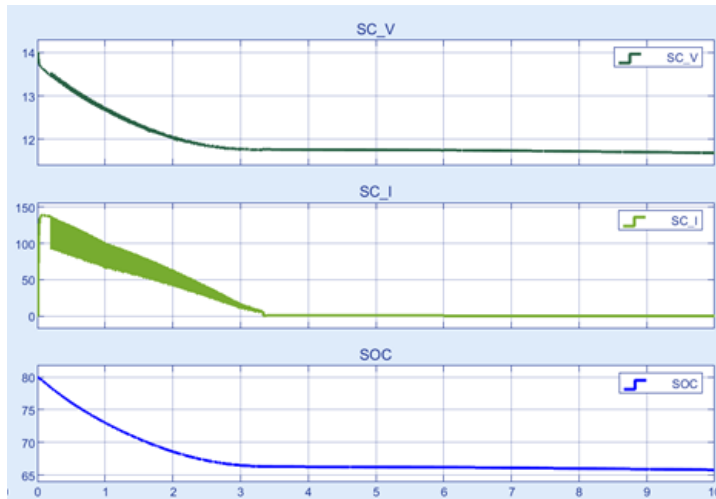
Sonuç olarak, güneş enerjili bir insansız hava aracında süperkapasitörlerin enerji depolama sistemi olarak kullanımının mümkün olduğu simüle edilmiş olup bu simülasyon modelinden elde edilen verilerle bundan sonra yapacağımız

deneysel çalışma aşamasının temeli atılmış bulunmaktadır.

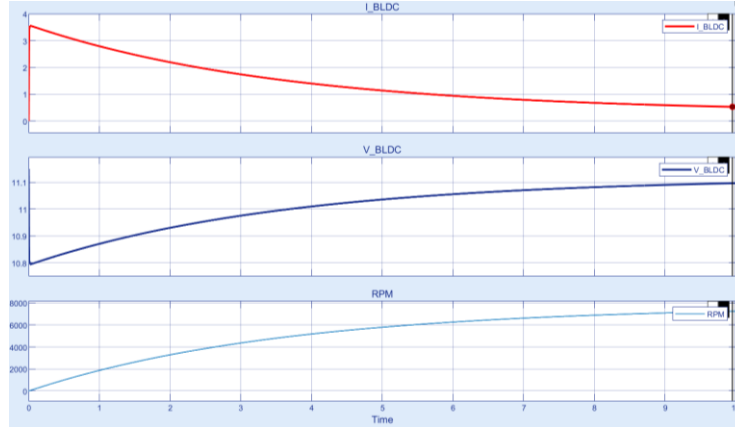
Bu çalışmanın, ülkemizde güneş enerjisinin insansız hava araçlarında uygulamalarına büyük katkı sağlayacağı ve daha sonra bu alanda yapılacak uygulamalara ışık tutacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 14. PV- MPPT Simulink Modeline ait çıkış sinyalleri



Şekil 15. Süperkapasitöre ait Simulink Modelinin çıkış sinyalleri



Şekil 16. Fırçasız DC motorun çıkış sinyalleri

Kaynakça

- [1] Köktürk, G., Akkurt H.B., Tokuç A., 2015. Yenilenebilir Enerji Alanında Sosyal Bilincin Arttırılması; İsem: İzmir Yenilenebilir Enerji Müzesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 17 Sayı 51, syf. 191-200.
- [2] Airbus. 2020. Airbus Reveals New Zero-Emission Concept Aircraft, 21 September 2020, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html>.
- [3] ATAG 2020. The Waypoint 2050 report, Air Transport Action Group (ATAG) Global Sustainable Aviation Forum, Geneva, 2020, <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>, (Erişim Tarihi: 01.06.2021).
- [4] Noth, A. Siegwart, R. 2008. Design of Solar Powered Airplanes for Continuous Flight, Autonomous Systems Laboratory, ETH Zürich, Switzerland
- [5] S.I.F. 2021. Solar Powered Aircraft, <http://www.solarimpulse.com>, (Erişim Tarihi: 03.06.2021)
- [6] Sener, E., Turk, I., Yazar, I. Karakoç, T.H. 2020. Solar powered UAV model on MATLAB/Simulink using incremental conductance MPPT technique, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 92 No. 2, pp. 93-100. DOI: 10.1108/AEAT-04-2019-0063.
- [7] Zhu, X., Guo, Z., Houn, Z. 2014. Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 71 pp. 36-53. DOI: 10.1016/j.paerosci.2014.06.003.
- [8] Gao, Z., Hou Z, Guo Zheng, Liu J., Chen X. 2013. Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft, Energy Conversion and Management, Vol. 70 pp.20-30. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.01.007.
- [9] Özcan, S.G. 2015. Design And Manufacturing Of A Solar Powered Unmanned Air Vehicle, Aerospace Engineering Department, METU, M.Sc. Thesis, 76 pgs, Ankara, Türkiye
- [10] E.I.E. 2021. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx (Erişim Tarihi: 3 Mart 2021)
- [11] Abbe, G., Smith, H. 2016. Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems, Renewable and Energy Reviews, Vol. 60 pp. 770-783. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.053.
- [12] Hong, W.P. 2014. A Matlab/Simulink-Based PV array-Supercapacitor Model Employing SimPowerSystem and Stateflow Tool Box, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.28, No.12, pp. 18-29. DOI: 10.2507/JIEIE.2014.28.12.018.
- [13] Karanfil, A. 2021. Kısmi Gölgeleme Durumundaki Seri Bağlı Fotovoltaik Panellerde Bypass Diyotunun Kullanılmasının Sistem Gücü Üzerine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt 23, Sayı 68, syf. 621-630.
- [14] Aktaş A., 2016. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Tabanlı Batarya ve Ultrakapasitörlü Hibrit Sistemin Akıllı Enerji Yönetimi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 250 syf. Kocaeli, Türkiye
- [15] Fıratoglu Z.A., Yeşilata B., 2003. Maksimum Güç Noktası İzleyicili Fotovoltaik Sistemlerin Optimum Dizayn ve Çalışma Koşullarının Araştırılması, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 5, Sayı 1, syf. 147-158.
- [16] Kurak, E., Erdemir, V., Dursun, B. 2016, PV Sistemin İçin Maksimum Güç Noktası İzleyicisi Tasarımı ve Uygulaması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 4, Sayı 2, syf. 581-592 .
- [17] Morales, D.S., 2010, Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic applications, M.Sc. Thesis, 73 pgs. Aalto University, Esbo-Finlandiya
- [18] Berradi S., Moutaouakkil F., Medromi H. 2016. Hybrid Electrical Architecture for Vertical Takeoff and Landing Unmanned Aerial Vehicle, EAS research group, ENSEM, Hassan University of Casablanca, Morocco.

- [19] Yıldırım N. 2017. Mikron Altı Boyutlarda Küresel Karbon Partiküllerin Sentezi Ve Süperkapasitör Elektrotlarında Kullanımı, Gazi Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kimya mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 77 syf. Ankara Türkiye
- [20] Oldham, K.B. 2008. A Gouy-Chapman-Stern model of the double layer at a (metal)/(ionic liquid) interface, *Journal of Electroanalytical Chemistry*. Vol. 613 No. 2, pp. 131-38. DOI: 10.1016/j.jelechem.2007.10.017
- [21] Xu, N., Riley J., 2011. Nonlinear analysis of a classical system: The double-layer capacitor, *Electrochemistry Communications*. Vol. 13, No. 10, pp. 1077-81. DOI: 10.1016/j.elecom.2011.07.003
- [22] Tabak, A., 2020. Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID/PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt19, Syf. 145-155.