

AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 035201 (570-578)

AKU J. Sci. Eng. 21 (2021) 035201 (570-578)

DOI: 10.35414/akufemubid.890076

## Araştırma Makalesi / Research Article

## FV Panel Temizliği için Doğrusal Motor ve Mekanizma Tasarımı

Mustafa EKER<sup>1</sup>, Yusuf AVŞAR<sup>2</sup>, Ahmet FENERCİOĞLU<sup>3</sup>,<sup>1,3</sup> Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, Tokat.<sup>2</sup> Trakya Üniversitesi, İpsala Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Edirne

Sorumlu yazar e-mail: mustafa.eker@gop.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1085-0968>

yusufavsar@trakya.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5431-9285>

ahmet.fenercioglu@gop.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1522-6868>

Geliş Tarihi: 02.03.2021

Kabul Tarihi: 25.06.2021

## Öz

## Anahtar kelimeler

Fotovoltaik;  
Gölgelenme; Doğrusal  
FDAM; Verimlilik

Fotovoltaik (FV) sistemlerin ilk kurulum maliyeti yüksek iken genel sistem verimliliği düşüktür. Bundan dolayı kurulan sistemin maksimum verimlilik ile çalışması hedeflenmektedir. Verimliliği etkileyen unsurlardan biri de panel yüzeyinin toz/kar/kirlenme gibi çeşitli nedenlerle kaplanmasıdır. FV panele gelen ışınların geçmesine engel olan bu durumlarının giderilmesi için bir süpürücü mekanizma tasarlanmış ve tahrik elmanı olarak kullanılmak üzere Doğrusal Fırcasız Doğru Akım Motoru (FDAM) tasarımı yapılmıştır. Doğrusal FDAM'nin Sonlu Elamanlar Yöntemi (SEY) ile magnetostatik ve statik stres analizleri yapılmış ve tasarıma ait sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlar tasarlanan Doğrusal FDAM sistem için gerekli kuvveti üretebildiğini göstermiştir. Ayrıca sistem için öngörülen enerji tüketim hesabı yapılmıştır. Doğrusal FDAM'nin süpürücü mekanizması ile yapacağı enerji tüketiminin, sistem verimliliğine etkisinin yanında çok düşük kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

## Linear Motor and Mechanism Design for PV Panel Cleaning

## Abstract

## Keywords

Photovoltaic; Shading;  
Linear BLDC; Efficiency

Although the initial setup cost of photovoltaic systems is high, overall system efficiency is low. Therefore, the established system is aimed to work with maximum efficiency. One of the factors affecting efficiency is that the panel surface is covered for various reasons such as dust / snow / pollution. A sweeping mechanism has been designed to eliminate these situations that prevent the passage of the rays coming to the PV panel, and a Linear Brushless Direct Current Motor (BLDC) motor has been designed to be used as a drive element. Magnetostatic and static stress analyzes of Linear BLDC were made with Finite Elements Method (FEM) and design results were obtained. The results showed that the designed Linear BLDC motor is capable of generating the power required for the system. In addition, the energy consumption calculation foreseen for the system has been made. It has been concluded that the energy consumption of Linear BLDC with its sweeping mechanism remains very low in addition to its effect on system efficiency.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

## 1. Giriş

Fosil yakıtların rezervlerindeki sorunlarla birlikte çevreye verdiği zararlar sebebiyle alternatif enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. Son yıllarda enerji, üzerinde çalışma yapılan alanların başında gelmektedir. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal, biokütle, hidrolik, hidrojen ve su enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarından yararlanma üzerine birçok araştırma/çalışma yapılmaktadır. Güneş enerjisi de bu alternatif enerji kaynaklarından

biridir ve önem bakımından ilk sıralarda yer almaktadır. Ayrıca bazı alternatif enerji kaynaklarının da temelini oluşturmaktadır (Panwar *et al.* 2011). Güneş enerjisinden elektrik üretimi farklı yöntemlerle yapılmaktadır (Panwar *et al.* 2011, Mekhilef *et al.* 2011, Khatib *et al.* 2012). Fotovoltaik paneller, güneş enerjisinden elektrik üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerdendir (Kannan and Vakeesan 2016).

Enerji üretim alanında, FV sistem ile elektrik üretimi diğer kaynaklarla kıyaslandığında havayı kirletmemesi, tükenmeyen enerji kaynağı olması, iklim değişikliğini pozitif anlamda desteklemesi ayrıca su kullanılmadığı için sularda kirlenme oluşturmaması gibi birçok avantaja sahiptir. Fakat yüksek kurulum maliyeti ve düşük enerji verimliliği FV sistemlerinin dezavantajların başında gelmektedir. FV sistemlerinin verimliliği önemli olduğu için ilk kurulum aşmasında birçok alandaki (Kannan and Vakeesan 2016, Saleem *et al.* 2016, Boztepe 2017, Owusu and Asumade-Sarkodie 2016) tasarım kriterleri dikkatlice incelenmelidir. Enerji üretiminin yanı sıra enerjinin kullanımı da büyük önem taşımaktadır. FV sistemlerde de tasarlanan sistemden maksimum enerjinin elde edilmesi hedeflenmektedir. FV sistem verimliliği buldukları bölgedeki güneş ışınlarının yoğunluğuna ve ortam sıcaklığına bağlıdır. FV sistemde maksimum enerji elde etmek için paneller Maksimum Güç Noktasında (MGN) çalıştırılırlar (Premkumar *et al.* 2020). FV panellerden üretilen MGN farklılık göstermektedir. FV sistemden maksimum gücü elde edebilmek için maksimum güç noktası takip sistemleri kullanılmaktadır (Mei *et al.* 2011, Adly *et al.* 2012, Ibrahim 2013, Kuo *et al.* 2001, Webber and Riley 2013, Agarwal and Agarwal 2014). Bir FV sistemden elde edilen gücü maksimum düzeye çıkarmak için birçok farklı yaklaşım vardır, bunlar basit voltaj ilişkilerini kullanmaktan daha karmaşık çoklu örnek tabanlı analize kadar uzanmaktadır (Çanka Kılıç 2015).

Çeşitli faktörlerden dolayı güneş ışınlarının yoğunluğu farklılık göstermektedir. Bu faktörlerin başlıcaları; güneş ışınlarının geliş açısının günlük/yıllık bazda değişiklik göstermesi, panel yüzeyinin toz/kar/kirlenme gibi çeşitli nedenlerle kaplanması, bölgenin bulutluluk oranı ve ağaç/bina gibi etkenlerden panelin gölgelenmesi olarak söylenebilir. FV panellerde meydana gelen kısmi/tam gölgelenme güç çıkışını azaltmakta ve farklı MGN üretmektedir. Gölgelenme; kar, kir, toz veya farklı parçacıkların panel üzerini kaplaması ve panellerin yakınında bulunan binaların, ağaçların veya diğer nesnelerin panellerin üzerinde oluşturduğu gölge olarak iki durumda incelenebilmektedir (Maghami *et al.* 2016).

Gölgelenmenin oluşumu ve etkileri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda gölgelenme/kirlenme durumunun sistem verimliliğini %70'lere kadar etkilediği görülmüştür (Maghami *et al.* 2016, Ronnaronglit and Maneerat 2019, Vaghani *et al.* 2019). Günümüzde panellerin üzerinde biriken kalıntıların temizlenmesi için genellikle manuel ve su bazlı temizleme solüsyonları kullanılmaktadır (Deb and Brahmabhatt 2018). Gölgelenme FV panellerin güç çıkışını değiştirmekte ve dolayısıyla panel ömrünü de olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple FV panel sistemlerinde panel yüzeylerinin yılda en az iki kez temizlenmesi gerekmektedir (Vasiljev *et al.* 2013). Son yıllarda gelişen teknoloji ile FV panel temizliğinde otomatik sistemler veya robotlar kullanılmaktadır (Ronnaronglit and Maneerat 2019, Vaghani *et al.* 2019, Patil *et al.* 2018, Jawale *et al.* 2016, Saadsaoud *et al.* 2016). Yapılan çalışmalarda temizleme sisteminin panellerle beraber kurulduğu durumların yanı sıra ayrı bir temizleme robotu şeklinde kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Yapılan çalışmalar temizleme sistemlerinin %40 seviyelerine kadar enerji verimliliği sağlayabildiği görülmektedir. Geleneksel olarak kullanılan döner motorlar doğrusal hareket gerektiren durumlarda kasa, kayış, zincir vb mekanik dönüştürücülere ihtiyaç duyarlar. Bu şekilde oluşturulan mekanizmalara düzenli bakım yapılması gerekmektedir ve bu tür sistemlerde mekaniksel arızalarla daha sık karşılaşmaktadır (Fenercioglu and Avsar 2015). Doğrusal FDAM bu tür sistemler için alternatif oluşturmaktadır. Bu tarz motorlar herhangi ek sistem veya mekanik ekipmana gerek kalmadan doğrusal hareket yapabilmektedir. Doğrusal FDAM'nın rotorları farklı yapılarla üretilebilmektedir. Mıknatıs teknolojilerindeki gelişim ile mıknatıs içeren rotor yapılı Doğrusal FDAM kullanımı artmaktadır. Kullanılan mıknatıs sayesinde daha yüksek kuvvet-akım oranına sahip motorlar üretilmektedir (Demirci ve Tuncay 2013). Bu çalışmada FV sistemlerde verimliliği etkileyen tozlanma/kirlenme durumunun ortadan kaldırılması için temizleme sistemi tasarlanmıştır. Tahrik elemanı olarak Doğrusal FDAM kullanılmıştır. Tasarlanan sistemle motorun doğrusal hareketinden yararlanılarak temizleme işleminin yapılması

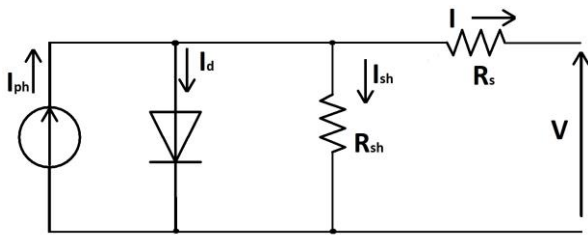
hedeflenmiştir. Sistemde dönme hareketini panel modüllerinin alt ve üst kısımlarına yerleştirilen kramiyer dişli mekanizması ile sağlanması planlanmıştır. Ayrıca yapılan sistemde doğrusal motorun üreteceği güç ve sistemin toplam güç gereksinimi hesaplanmıştır.

Bu makale 5 bölümden oluşmuştur. İlk olarak Giriş bölümü verilmiştir. Daha sonra FV panel güç çıkışı ve Doğrusal FDAM ile alakalı matematiksel denklemler verilmiştir. 3. Bölümde Tasarım ve Analiz aşamaları anlatılmıştır ve 4. Bölümde Deneysel Sonuçlar bölümü yer almaktadır. Son olarak Sonuç bölümü verilmiştir.

## 2. Panel Enerji Üretimi ve Doğrusal FDAM

### 2.1 Panel Enerji Üretimi

FV panellerin enerji üretiminde çıkışları etkileyen en temel etken ışınım miktarıdır ve dolayısıyla ışınım miktarını etkileyen faktörlerdir. FV panellerde hücrelerin seri paralel bağlanma durumuna göre farklı FV panel eşdeğer devreleri bulunmaktadır. Şekil 1'de tek diyotlu bir güneş hücresinin eşdeğer devre modeli verilmiştir (Adak vd. 2019).



Şekil 1. Güneş hücresinin eşdeğer devre modeli

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{-\frac{q(V+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \left( \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Şekil 1'de yer alan devre FV hücre çıkış akımı  $I$  Denklem (1) ile elde edilir. Denklem (1) de verilen  $I_{ph}$  güneş ışınları sonucu oluşan hücrede oluşan foton akımını,  $I_0$  ise diyotun ters doyma akımını temsil etmektedir. Denklemden verilen  $q$ ,  $k$  ve  $n$  ifadeleri sırasıyla elektron yükünü, Boltzmann Sabitini ve ideallik faktörünü göstermektedir.  $R_s$  seri direnç,  $R_{sh}$  paralel direnç değerlerini temsil etmek için kullanılmıştır (Adak vd. 2019).

FV hücrelerde meydana gelen foton akımları açık havada ve güneş ışınlarının dik geldiği durumlarda maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bazı durumlar da (bulutlu hava vb.) foton akımlarında azalmalar meydana gelmektedir. Ayrıca bu durumlar kısa devre akımı  $I_{sc}$  de düşüşe neden olmaktadır. Hücre sıcaklığı da panel verimliliği için önemli bir parametredir. Hücre sıcaklığını ışınım miktarı da etkilemektedir. Nominal hücre sıcaklık değeri  $T_{nom}$  ve  $T_{ortam}$  ortam sıcaklığına bağlı olarak  $T_c$  hücre sıcaklığı;

$$T_c = T_{ortam} + \frac{T_{nom}-20}{0,8} * G \quad (2)$$

eşitliği ile elde edilir. Denklem (2)'de yer alan  $G$  güneşten gelen ışınımı temsil etmektedir. Işınım miktarının artması ile düşük sıcaklıkta maksimum verim elde edilmektedir (Adak vd. 2019). Şekilde gösterilen  $R_{sh}$  değeri  $R_s$  değerine göre çok daha yüksektir.  $R_{sh}$  değeri açık devre ( $\infty$ ) alındığında,  $I$  akımı;

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{-\frac{q(V+IR_s)}{nkT_c}} - 1 \right) \quad (3)$$

olur. Panellerden elde edilen akımı artırmak için hücreler paralel bağlanırken, gerilimi artırmak için ise seri bağlanırlar. Panellerde kullanılan paralel hücre sayısı  $N_p$  ile seri hücre sayısı ise  $N_s$  ile gösterilir. Hücre üzerine ışın düşmesi sonucu hücre çıkış uçlarında bir gerilim endüklenir ve bu uçlara bir yük bağlanırsa yüke doğru akım akar. FV hücrenin gerilimi ( $V$ ) ve  $N_p$  ile  $N_s$  değerine bağlı panel akımı  $I_{panel}$  sırasıyla Denklem (4) ve Denklem (5) ile hesaplanır (Adak vd. 2019).

$$V = \frac{nkT_c}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}+I_0-I}{I_0} \right) - IR_s \quad (4)$$

$$I_{panel} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left( e^{-\frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{1}{N_p} \left( \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (5)$$

$R_{sh} = \infty$  alınır;

$$I_{panel} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left( e^{-\frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) \quad (6)$$

Panel akımı Denklem (6) ile hesaplanır. FV panel çıkış gerilimi  $V_{panel}$  ise;

$$V_{panel} = \frac{nkT_c}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_o - I + N_p}{I_o} \right) - IR_s \quad (7)$$

Denklem (7) ile hesaplanır. Panellerin çıkış güç değeri  $P_{panel}$ , panel akım ve gerilim ifadesinin çarpımı ile elde edilir. Bu nedenle Denklem (6) ve Denklem (7)'de yer alan eşitlerden;

$$P_{panel} = V_{panel} * I_{panel} = \left[ \frac{nkT_c}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_o - I + N_p}{I_o} \right) - IR_s \right] * \left[ N_p I_{ph} - N_p I_o \left( e^{-\frac{q \left( \frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)}{nkT_c}} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

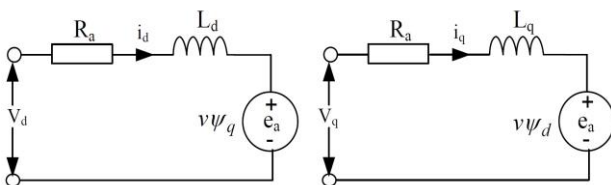
olarak elde edilir. Denklem (8) eşitliğince panellerden elde edilecek güç değerini  $I_{ph}$  değeri etkilemektedir. Bu değeri, güneş ışınlarının geliş açısı, yoğunluğu ve panel yüzeyinde ışınların geçişini etkileyecek etkenlerin bulunması direkt olarak etkilemektedir.  $V$  değeri,  $n$  tane hücreden oluşan panelde bütün hücrelerin güneşe maruz kaldığı durumda panel uçlarında oluşan panel gerilimi  $V_{panel}$  iken hücrelerin birinde gölge oluşması durumunda panel gerilimi  $V_g$  olacaktır. Gölge panel haricindeki hücrelerin üreteceği gerilim  $V_{n-1}$  ise;

$$V_g = V_{n-1} - (R_{sh} + R_s) * I \quad (9)$$

eşitliği ile bulunur (Adak vd. 2019).

## 2.2 Doğrusal FDAM

Doğrusal motorlar yapısal avantajlarından dolayı farklı uygulama alanlarında kendilerine yer bulmaktadır. Yapısal olarak farklı olmasına rağmen matematiksel olarak geleneksel fırçasız motorlara benzemektedir. Bu tip üç faz motorlarda iki fazlı d-q matematiksel model daha yaygın kullanılmaktadır. Şekil 2'de doğrusal fırçasız motora ait d-q eşdeğer devresi verilmiştir.



**Şekil 2.** Doğrusal Fırçasız motor d-q eşdeğer devresi (Dursun et al. 2015)

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v L_q i_q \quad (10)$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v (L_d i_d + \Psi_f) \quad (11)$$

Burada  $V_d$  ve  $V_q$  d-q eksen gerilimlerini  $i_d$  ve  $i_q$  d-q eksen akımlarını  $L_d$  ve  $L_q$  d-q eksen indüktanslarını,  $\Psi_f$  sabit mıknatıs akısını,  $\tau$  kutup adımını,  $R$  faz sargı direncini temsil etmektedir (Dursun et al. 2015). Devrelere ait manyetik denklemler ise Denklem (12) ve Denklem (13) verilmiştir.

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f \quad (12)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (13)$$

Eşitliklerde yer alan  $\Psi_d$  ve  $\Psi_q$  d-q manyetik akılarını göstermektedir (Dursun et al. 2015). Elektromanyetik itme kuvveti  $F_i$  ise;

$$F_i = \frac{3\pi}{2\tau} [\Psi_f + (L_d - L_q) x i_d] i_q \quad (14)$$

olarak verilmiştir. Eğer  $i_d = 0$  alınırsa elektromanyetik itme kuvveti;

$$F_i = \frac{3\pi}{2\tau} \Psi_f i_q \quad (15)$$

olarak elde edilir. Elektromanyetik itme kuvvetinin mekanik gücü dikkate alınırsa;

$$F_i = F_d + Bv + M \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

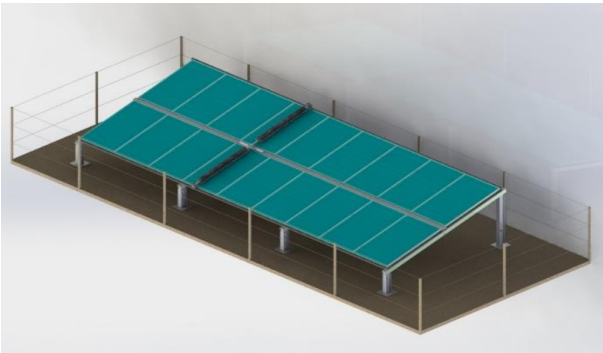
$$v = 2. f. \tau \quad (17)$$

Burada  $F_d$  harici olarak uygulanan dış kuvveti,  $B$  sürtünme katsayısını,  $M$  ve  $v$  sırasıyla hareketli alanın ağırlığını ve hızını,  $f$  frekansını temsil etmektedir (Dursun et al. 2015).

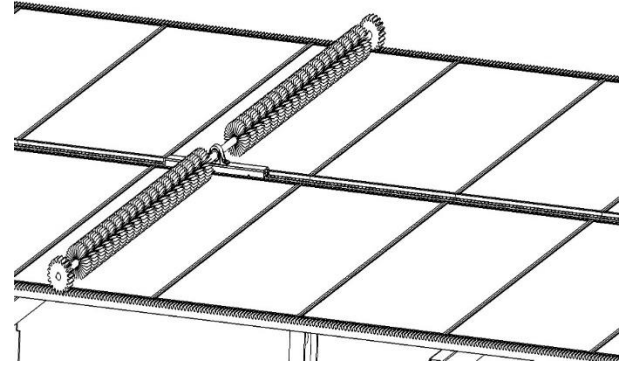
## 3. Tasarım ve Analiz

FV sistemlerde tozlanma/karlanma/kirlenme gibi kısmi gölgelenmeye neden olan maddelerin temizlenmesi için farklı yöntemler uygulanmıştır.

Uygulanan sistemlerin bazıları FV panel dizilerinden bağımsız iken bazıları FV panel dizleri üzerine montelenmiştir. Sisteme monte edilen temizleme sistemlerinde aktarma organları ile sistem verimliliği düşmektedir. Bu çalışma ile aktarma organlarına ihtiyaç duymadan panel temizliğinin yapılması hedeflenmektedir. FV paneller arasına yerleştirilmiş ve doğrusal hareket ile çalışan doğrusal FDAM tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanan sistemde süpürücü ve tertibatını panel yüzeylerine paralel olacak şekilde doğrusal olarak hareket ettirecek kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır. Panel temizliğini sağlayacak süpürücü ve tertibatının ağırlığı yaklaşık 3 kg olarak tasarlanmıştır. Ayrıca sistemin dışarıda çalışacağı ve olumsuz hava şartları dikkate alındığında yaklaşık olarak X ekseninde 200 N bir kuvvet üretebilecek motor gerekmektedir. Bu sebeple 350 W gücünde 21 oluklu 3 fazlı bir FDAM tasarımı öngörülmüştür. Motorun boyutlandırılması Maxwell Magnetostatik'de yapılan parametrik analizlere göre gerekli olan kuvvetten daha fazla kuvvet üretebilecek şekilde tasarlanmıştır. Temizlemede kullanılan fırçalara ise motorun ileri geri doğrusal hareketi ile panel bloğunun üst ve alt kısmına yerleştirilen kramiyer dişli mekanizması kullanılarak radyal hareket kazandırılmıştır. Sisteme ait 3D katı modeller Şekil 3'de yer almaktadır.



(a) Panel sisteminin genel görünüşü

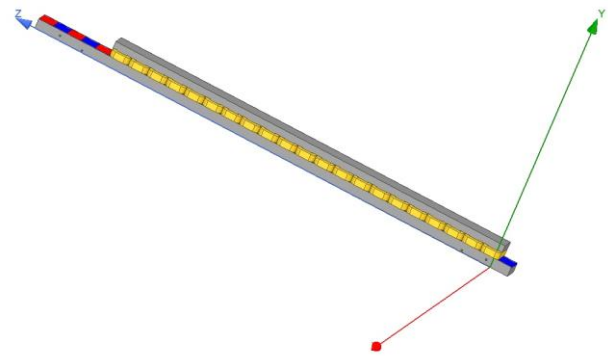


(b) Doğrusal FDAM ve süpürücü sistem

Şekil 3. Sistem 3D katı modeli

FV sistemin ilk olarak sistemin 3D katı modeli oluşturulmuştur. Sistemde 1675 x 997 x 35 mm boyutunda 18 adet panel kullanılmıştır. Sistem tasarımının en önemli parçası olan tahrik elemanı Doğrusal FDAM ise bu iki panel arasında hareket edecek şekilde konumlandırılmıştır.

Tasarımı yapılan Doğrusal FDAM üretebileceği güç Maxwell programında 3D magnetostatik analizi yapılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan Doğrusal FDAM sabit kısım rotor iken hareketli kısım statordur. Stator da 21 adet bobin bulunmaktadır. Maxwell programında oluşturulan Doğrusal FDAM ait 3D görüntüsü Şekil 4'de yer almaktadır.



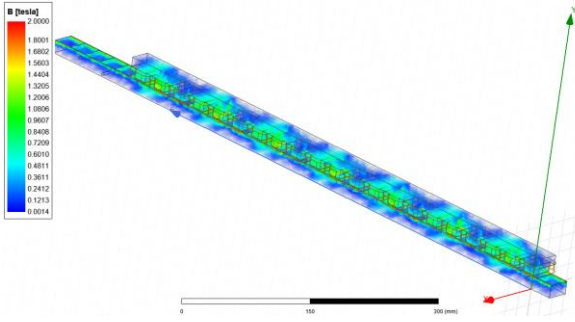
Şekil 4. SEY için oluşturulan Doğrusal FDAM

## 4. Deneysel Sonuçlar

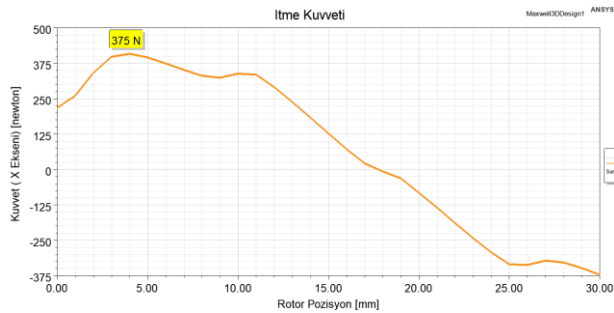
### 4.1 Magnetostatik analizi

Tasarlanan motorun sürme ve kontrol işlemleri (Aki ve Avşar 2016) belli bir sistem dikkat edilerek yapılmıştır. Bu sistemler Maxwell programında magnetostatik analizi gerçekleştirilen Doğrusal FDAM sürme ve kontrol işlemlerinde kullanılmıştır.

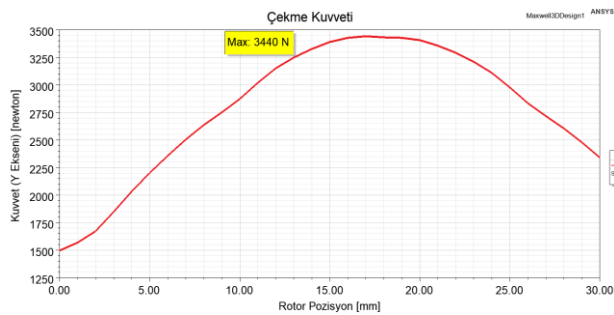
Programda malzeme tanımlamaları yapıldıktan sonra motor bobinleri üzerine uygulanacak referans akım değerleri tanımlanmıştır. Bir bobinde iletken kesit alanı  $0,35 \text{ mm}^2$  olan 500 sipir sarım bulunmaktadır ve doluluk oranı %65'dir. Sipirlere 900 At manyetomotiv kuvvet uygulanmıştır. Sistemin çalışması ve temizleme işleminin yapılabilmesi, uygun kuvvet aralığında olduğu sonucu elde edilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6'da SEY analiz sonucu motorda meydana gelen akı yoğunluğu ve ürettiği kuvvet yer almaktadır.



Şekil 5 . SEY sonucu Doğrusal FDAM akı yoğunluğu



(a) İtme kuvveti ( X Eksen)



(b) Çekme kuvveti ( Y eksen)

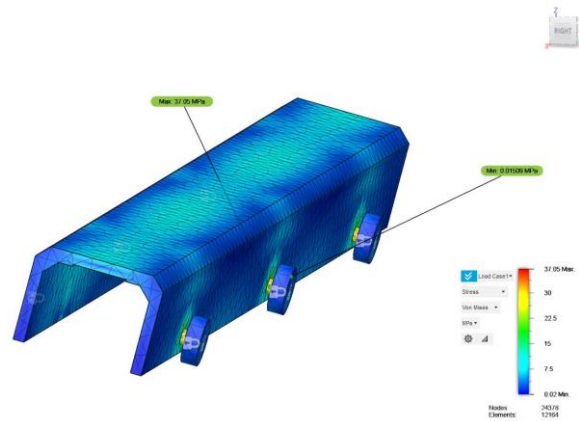
Şekil 6. SEY sonucu Doğrusal FDAM ürettiği kuvvet

Grafikler incelendiğinde stator ve rotorda meydana gelen akı yoğunluklarının maksimum 1.9 T değerine ulaştığı gözlenmektedir. Bu değer kullanılan malzemeler için sınır değer aralığında olup malzemelerin dirsek bölgesinde olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Şekil 6'ya bakıldığında Doğrusal

FDAM X ekseninde 375 N'luk itme kuvveti üretebilmektedir. Bu değer başlangıçta ihtiyaç duyulan kuvveti karşılamaktadır. Bununla birlikte sistemin Y ekseninde mıknatıslara doğru yaklaşık olarak 3500 N bir çekme kuvveti oluşmuştur. Oluşan çekme kuvveti sebebiyle sistemin yataklama elemanlarının yapısal olarak test edilmesi gerekmektedir.

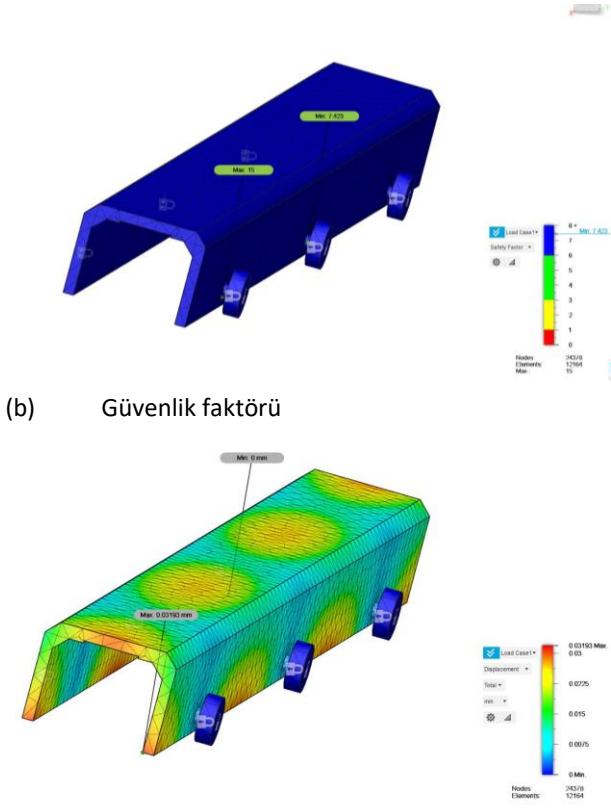
#### 4.2 Statik stres analizi

Yapılan Maxwell SEY analizleri sonucunda çekme (Y) ekseninde oluşan 3500 N değerindeki kuvvetin sistem üzerindeki etkisi Fusion 360 programı ile incelenmiştir. Buradaki en önemli etken mıknatıslar ile stator arasındaki hava aralığının değişmesidir. Stator ve rotor arasındaki hava aralığı 1 mm olarak tasarlanmış ve bu değer altına düşmesi hesaplamaları etkilemektedir. Ayrıca stator bloğunu tutan malzemenin alüminyum olması sistemin güvenlik faktörüne bakılmasını da gerektirmektedir. Yapılan çalışmada statorun sabitlendiği alüminyum malzemede yük, rulmanların üzerine bineceğinden rulman bölgelerinde sabitleme yapılmış ve stator bloğunun bağlandığı alanlarda 3500 N Y ekseninde yük tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada malzeme üzerindeki stres, yerdeğiştirme ve güvenlik faktörleri incelenmiştir. Şekil 7'de yapılan çalışmanın stress analizleri verilmiştir.



(a) Stres değeri





Şekil 7 Doğrusal FDAM yapısal analizi

Şekil 7-a'da malzemenin stres testi gerçekleştirilmiş en yüksek 37.05 MPa bir zorlama mevcuttur. Stres noktası AISI 1050 çeliği olduğundan AISI 1050 çeliğinin akma noktası 206 MPa'dır. Bu durumda malzeme üzerinde herhangi bir deformasyon gözlenmemektedir. Şekil 7-b malzemenin güvenlik faktörüne aittir ve en düşük durumda güvenlik faktörü 7,43 çıkmaktadır. 2,5 ve üstü güvenlik faktörü malzeme için uygulanabilir olduğundan bu değerde tasarımı başarılı kılmaktadır. Motor tasarım ve üretiminde hava aralığı hem akı geçişi hem de motor verimliliği açısından önemli bir kriterdir. Sistemdeki miktatlardan dolayı 3500 N'luk çekme kuvveti malzemenin hava aralığı ve sistemin yataklama elemanları üzerindeki yer değiştirmeler incelenmiştir. Sonuç olarak Şekil 7-c'de görüleceği üzere en yüksek noktada dahi 0,031 mm'lik bir yer değiştirme gözlenmiştir. Bu değer sistemin çalışması için engel teşkil etmemektedir.

#### 4.3 Sistem verimlilik öngörüsü

Yapılan çalışmada FV panel temizliği için süpürücü sistem tasarlanmış ve bu sistemde tahrik elmanı

olarak Doğrusal FDAM kullanılmıştır. 350 W gücüne sahip bu motorun her çalışmada 3 kez süpürme işlemi yaptığı, her bir süpürme işlemini 2 dk da tamamladığı ve ortalama günlük 3 kez çalıştığı varsayılırsa bu motor 1 ayda toplam 540 dk çalışacaktır. Tüketeceği enerji ise 3.2 kW/ay olacaktır. Bu değere motor sürücü ve kablolama değerleri de eklenince yaklaşık 5 kW/ay enerji tüketimi yapacaktır. Bu değer 300 W'lık bir panelin 17 saatlik enerji üretimine tekabül etmektedir. Türkiye de ortalama güneşlenme süresi 7.2 saat/gün olduğuna göre tasarlanan sistemin 1 enerji üretimi 1166.4 kW/ay olacaktır. Tozlanma kirlenme karlanma gibi faktörler gölgelenme ve ışınım miktarını da etkilediği için sistem verimliliğini ortalama %9 oranında düşürmektedir. Bu oran panel grubu için 105 kw/ay'lık bir değere karşılık gelmektedir. Sonuç olarak tasarlanan doğrusal motor ve süpürücü, sistemde olumsuz etkenlerden dolayı oluşan enerji kaybının sadece %4.7'sini kullanarak enerjini kaybının önüne geçmektedir.

#### 5. Sonuç

Enerji ihtiyacı günümüzde önemli sorunların başında gelmektedir. Bu sorunun çözümünde alternatif enerji kaynaklarından da faydalanılmaktadır. FV panel sistemleri de bu çözümlerin arasında sıklıkla karşılaşılan yöntemdir. FV panel sistemlerin kurulum maliyetleri yüksek verimlilikleri de düşük olduğundan dolayı bu sistemlerin maksimum verim ile çalışması hedeflenmektedir. Bu sistemin verimliliğini etkileyen unsurlardan biri de gölgelenme olayıdır. Gölgelenme olayı kirlenme/tozlanma ile aynı kategoride yer aldığına sistem verimliliğini yaklaşık %9 düşürmektedir. Yani gölgelenme olayının etkisini azaltmak veya tamamen ortadan kaldırmak sistem verimliliğinde %9'luk bir verim kazancı sağlayacaktır.

Bu çalışmada gölgelenme/kirlenme/tozlanma için süpürücü bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan motor 350 W gücünde ve 375 N'luk bir itme kuvveti üretebilmektedir. Doğrusal FDAM kasnak vb. ek ekipmana gerek kalmadan panel temizliğini gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış ve ortalama 5 kW/ ay enerji tüketimi yapmaktadır. Türkiye için yapılan örnek hesaplamada bahsedilen olumsuz

etkenlerden dolayı oluşması muhtemel %9'luk enerji kaybı, sistemin toplam enerjisinin yaklaşık %0,5'i kullanılarak önlenmiştir. Bu değer ortalama değerler olarak elde edilmiş olup yapılacak çalışma algoritması ile sadece kirlenme/tozlanma/karlanma gibi durumlarda çalışma imkânı sağlanabilmektedir. Bu durum sistemin daha az çalışmasına ve daha az enerji harcamasına da neden olacaktır. Fakat bu durum bölgeden bölgeye göre değişiklik göstereceği için bazı bölgelerde tozlanmaya/kirlenmeye gölgelenme daha fazla olacağından enerji tüketimi artacaktır. Tasarlanan doğrusal motorun FV panel sistemin kurulacağı bölgenin özelliklerine göre dizayn edilme ve çalışma aralığı belirleme imkânı bulunmaktadır. Sonuç olarak tahrik elemanın Doğrusal FDAM olduğu süpürücü sistemi ek kasnak, kayış, rulman gibi ek ekipmana ihtiyaç duymadığı için mekanik kayıpları ve bakım maliyetinin daha az olacaktır.

## 6. References

- Adak, S., Cangi, H. ve Yılmaz, A.S., 2019. Fotovoltaik sistemin çıkış gücünün sıcaklık ve ışıma bağlı matematiksel modellemesi ve simülasyonu. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, **11(1)**, 316-327.
- Adly, M., Ibrahim, M. and El Sherif, H., 2012. Comparative study of improved energy generation maximization techniques for photovoltaic systems, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC'12)*, pp. 2–6, Shanghai, China, March 2012.
- Agarwal, N. and Agarwal, A., 2014. Mismatch losses in solar photovoltaic array. *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, **4(1)**, 16–19.
- Aki, O. ve Avsar, Y., 2016. Doğrusal fırçasız DC motorun gömülü sistem ile kontrolü. *International Academic Reseach Congress - INES 2016*, **1**, 491-499.
- Boztepe M., 2017. Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. IV. *İzmir Enerji Verimliliği Günleri*, 14-17, İzmir, 19-20 Ocak 2017.
- Çanka Kılıç, F., 2015. Güneş enerjisi, Türkiye'deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, **56(671)**, 28–40.
- Deb, D. and Brahmabhatt, N. L., 2018. Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3306–3313.
- Demirci, R. ve Tuncay, M.T., 2013. Çift yanlı doğru akım lineer motor tasarımı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, **7 (2013)**, 42-54.
- Dursun, M., Saygın, A., Özden, S. and Fenercioğlu, A., 2015. A new design of single side brushless direct current linear motor. *Journal of Automation and Control Engineering*, **3(4)**, 336–342.
- Fenercioglu, A. and Avsar, Y., 2015. Design and analysis of EI core structured transverse ux linear reluctance actuator', *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, **23(4)**, 945–955.
- Ibrahim, T., 2013. Maximum power point tracking for photovoltaic systems in rapidly-changing environmental conditions. *The 8 Jordanian International Electrical and Electronics Engineering Conference, (JIEEC 2013)*, Jordan, April 2013.
- Jawale, J.B., Karra, V.K. , Patil, B.P., Singh, P., Singh, S. and Atre, S., 2016. Solar panel cleaning bot for enhancement of efficiency - An innovative approach. *Proceedings of the 3rd International Conference on Devices, Circuits and Systems, ICDCS 2016*, 103–108.
- Kannan, N. and Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **62**, 1092–1105.
- Khatib, T., Mohamed, A. and Sopian, K., 2012. A review of solar energy modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16(5)**, 2864–2869.
- Kuo, Y. C., Liang, T. J. and Chen, J. F., 2001. Novel maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **48(3)**, 594–601.
- Maghami, M.R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M.A., Rezadad, M.I. and Hajighorbani, S., 2016. Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **59**, 1307–1316.
- Mei, Q., Shan, M., Liu, L. and Guerrero, J.M., 2011. A novel improved variable step-size incremental-resistance MPPT method for PV systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **58(6)**, 2427–2434.
- Mekhilef, S., Saidur, R. and Safari, A., 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1777–1790.
- Owusu, P. A. and Asumadu-Sarkodie, S., 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and



climate change mitigation. *Cogent Engineering* (2016), **3(1)**, 1-14.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C. and Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 1513–1524.

Patil, P. A., Bagi, J. S. and Wagh, M. M., 2018. A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel. *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing, ICECDS 2017*, 250–256.

Premkumar, M., Subramaniam, U., Sudhakar Babu, T., Elavarasan, R.M. and Mihet-Popa, L., 2020. Evaluation of mathematical model to characterize the performance of conventional and hybrid PV array topologies under static and dynamic shading patterns. *Energies*, **13(12)**, 1-37.

Ronnaronglit, N. and Maneerat, N., 2019. A cleaning robot for solar panels. *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, ICEAST 2019*, 2019–2022.

Saadsaoud, M., Abbassi, H.A., Kermiche, S. and Ouada, M., 2016. Study of partial shading effects on photovoltaic arrays with comprehensive simulator for global MPPT control', *International Journal of Renewable Energy Research*, **6(2)**, 413–420.

Saleem, A., Rashid, A. and Mehmood, K., 2016. The Efficiency of Solar PV System. *Proceedings of 2nd International Multi-Disciplinary Conference 19-20 December 2016, Gujrat*.

Vaghani, M., Magtarpara, J., Vahani, K., Maniya, J. and Gurjwar, R.K., 2019. Automated solar panel cleaning system using IoT', *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, **06(04)**, 1392–1395.

Vasiljev, P., Borodinas, S., Bareikis, R. and Struckas, A., 2013. Ultrasonic system for solar panel cleaning. *Sensors and Actuators, A: Physical*, **200**, 74–78.

Webber, J. and Riley, E., 2013. Mismatch Loss reduction in photovoltaic arrays as a result of sorting photovoltaic modules by max-power parameters. *ISRN Renewable Energy*, **2013**, 1–9.