

# TAM HÜCRELİ FOTOVOLTAİK MODÜLLERİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Harun Kemal ÖZTÜRK<sup>1</sup>, Atilla KARADAVUT<sup>2</sup>

*Özet-Son yıllarda üretilen elektrik enerjisi, fosil yakıtlardan üretilmekte ve fosil yakıtlar üretim sırasında CO<sub>2</sub> salınımı yaparak çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları maliyet ve çevre kirliliği açısından tercih sebebi olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri güneş enerjisidir. Geleneksel fotovoltaik modüller, full cell (tam hücre) ile modellenmektedir. Tam hücre modelinin, Matlab programı ile matematiksel modellemesi yapılarak benzetimleri yapılmaktadır. Yapılan benzetimler, modellemeler ve çalışmalar, güneş enerjisinden yararlanılması ve güneş hücresinden alınan veriminin artırılması üzerine amaçlanmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Enerji, Güneş Hücresi, Güneş Hücre Modellemesi

## 1. GİRİŞ

Çağımızda teknoloji sürekli ilerleme göstermektedir. Bu ilerleme ile birlikte günlük yaşamda ve evlerde ve sanayileşmede çok fazla enerji tüketilmektedir. Bu durumun sonuçlarından biri de fazla salınım ve atık üretilmesidir. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa dünya genelinde harcanan toplam enerjinin üçte biri, elektrik enerjisinin ise üçte ikisi evlerde kullanılmaktadır. Bu yüzden konutların kullandığı enerji kaynakları ise hava ve çevre kirliliğinin sebeplerinden biri olmaktadır. Araştırmalara göre; sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>) salınımının %49'u ve nitroz oksit (N<sub>2</sub>O) salınımının %25'i parçacık salınımının %10'u konutlarda üretilmektedir. Hava kirliliğinin genel sebebinin karbondioksit (CO<sub>2</sub>) olduğu bilinmektedir. Bu karbondioksit salınımının %35'lik kısmı ise direk veya dolaylı bir şekilde konutlardan çıkmaktadır. Konutların ortaya çıkardığı bu zararlı durumu ortadan kaldırmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının gücüne başvurulması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması gerekmektedir. Bulunan enerjinin yararlı ve bilinçli kullanılması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda veya sahalarda kullanılabilen kısmı ise; güneş, rüzgâr ve yakıt hücreleri olarak sıralanır. Bu sıraladığımız enerji kaynaklarından kendine önemli bir yer oluşturan enerji kaynağı "güneş enerjisi" olmaktadır. Güneş enerjisi fosil enerji kaynaklarının en büyük alternatifleri arasındadır ve fosil yakıtlara oranla daha az salınım üretir. (Alkan 2016; Adulazez 2011; Şentürk 2018).

Yenilenebilir enerji kaynakları ülkemizde yalnızca çevre kirliliğinin azalması için değil ayrıca dışa bağımlı olduğumuz enerji kaynaklarının da dışa bağımlılığını azaltmak için büyük bir fırsat olmaktadır. Dışa bağımlılığı azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına teşvik edilmesi ve artırılması gerekmektedir. Ülkemiz, bölgeden bölgeye farklılık göstermekle birlikte güneş ve rüzgâr enerjisi bakımından önemli güce sahiptir (Şentürk 2018).

Dünya nüfusuna ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak elektrik enerjisi tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışla birlikte elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıt (kömür, doğalgaz vs.) rezervlerinin tükenmeye başlaması dünyanın dikkatini çekmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaya başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli iki kaynağı güneş ve rüzgârdır (Alkan 2016; Url-1).

PV hücreler, güneş ışığından aldığı enerjini direk elektrik enerjisine çeviren yarıiletken maddelerdir. İstenilen güce göre PV hücreler seri veya paralel bağlanır ve PV panel oluşturulur. PV paneller de seri veya paralel bağlanarak PV dizileri oluşturur. PV hücreler, PV paneller ve PV diziler ile birçok alanda tasarım yapılabilir. PV sistemler güvenilir, yakıt ve bakım maliyeti az ve çevre kirliliğine sebep olmaması bakımından çok avantajlıdır. Fakat PV sistemlerin ilk kurulum maliyetleri yüksektir. Bu yüzden PV sistemlerde hatanın az olması ve yapılan işlemlerden maksimum gücün elde edilmesi gerekmektedir (Url-1, 2019; Şentürk, 2018). PV hücrelerin yapımında yarıiletken malzemeler kullanılır. Sistem analizinde ve sistem tasarımında karakteristiği iyi bilinmelidir. Bu yüzden PV hücrenin modellenmesinde birçok model bulunmaktadır. Bu modellerden tek diyot, uygulamalarında daha gerçekçi sonuçlar elde edildiğinden en çok kullanılan modeldir.

<sup>1</sup> Harun Kemal ÖZTÜRK, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Denizli, Turkey, hkozturk@pau.edu.tr

<sup>2</sup> Atilla KARADAVUT, Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, Denizli, Turkey, hkozturk@pau.edu.tr

**Tablo 1.1:** Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı (Abdulazez, 2011)

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (Kwh/m <sup>2</sup> -Yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/Yıl)
G. Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

**Tablo 1.2:** Türkiye'nin Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Aylara Göre Dağılımı (Alkan,2016)

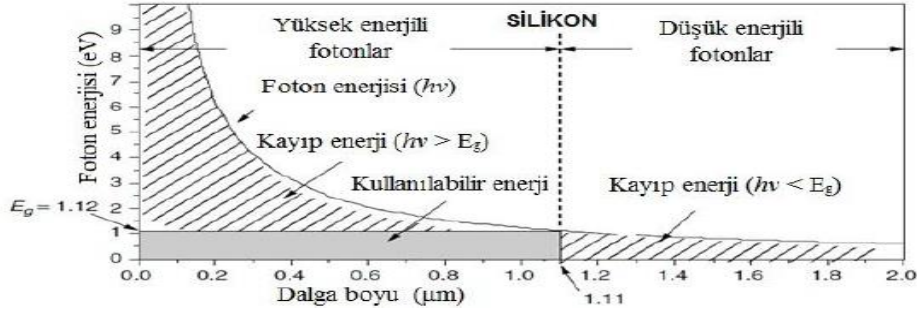
Aylar	Aylık Toplam Güneş Enerjisi		Güneşlenme Süresi
	(Kcal/cm <sup>3</sup> -Ay)	(Kwh/m <sup>2</sup> -Ay)	(Saat/Ay)
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 (Cal/cm <sup>2</sup> -Gün)	3,6 (Kwh/m <sup>2</sup> -Gün)	7,2 (Saat/Gün)

## 2. FOTOVOLTAİK ETKİ VE GÜNEŞ HÜCRESİ TANIMI

### 2.1 Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik (PV) sistemler, ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirmektedir. Burada "Foto" Yunancadaki karşılığı olan "phos" ışık anlamındayken, "volt" ise 1745-1827 yılları arasında yaşamış ve elektrik alanında öncü bir bilim adamı olan Alessandro Volta'dan gelir. "Foto-voltaik" kelimesi ise "ışık-elektriği" anlamına gelmektedir. Güneş hücresi, hiçbir hareketli parça olmadan gün ışığını doğru akıma dönüştüren bir sistemdir. Bu yolla elde edilen enerji temizdir ve herhangi bir zararlı atığa sahip değildir. Güneş hücreleri çoğunlukla dünyada en fazla bulunan elementlerden biri olan silisyumdan yapılır ve 20 yılın üstünde bir ömre sahiptir. Güneş hücrelerinin temel prensibi olan fotovoltaik etki, güneş ışığını oluşturan fotonların silisyum gibi bir yarıiletken malzemenin yüzeyine çarparak atomlarından elektronları serbest bırakmalarıyla ortaya çıkar. Fotovoltaik etki, fotovoltaik bir hücre tarafından güneş ışınımının elektriğe dönüştürüldüğü temel bir fiziksel işlemidir. Güneş ışınımındaki fotonların, silikon gibi yarıiletken malzemelerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakmaları ile ortaya çıkar. Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonların birleşiminden oluşur. Bu fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalga boylarına bağlı olarak farklı miktarlarda enerji içerirler. Fotonlar, fotovoltaik bir hücre üzerine geldiğinde; bir kısmı hücre tarafından soğurulur, bir kısmı yansıtılır, kalan kısmı da hücre içerisinden geçer. Fotovoltaik hücre tarafından soğurulan fotonlar elektrik üretir. Fotonun enerjisi yarı iletken bir malzemenin atomundaki elektrona transfer edilir. Elektron, yeni kazandığı bu enerji sayesinde, elektrik devresindeki akımın bir parçası olabilmek için yarıiletken malzemedeki bir ek atomun normal durumundan kurtulma yeteneği kazanır. Bir elektrik alanındaki PV hücrenin belirli elektriksel özellikleri, dış bir yükten gelen akımı karşılamak için gerekli gerilimi sağlar. (Öztürk, 2013).

Güç üretimi amacıyla kullanılan güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye bağlı olarak çalışırlar. Diğer bir deyişle, üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektriksel gerilim oluşur. Hücrenin verdiği elektriğin kaynağı yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Fotovoltaik etki, güneş ışınımındaki fotonların, silikon gibi yarıiletken malzemelerin yüzeyine çarparak, atomlardan elektronları serbest bırakmaları ile oluşur. PV sistemler, orta ve uzun vadede ekonomik olarak avantajlıdır. PV sistemler, diğer elektrik üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında çok daha az bakıma ihtiyaç duymaktadır. PV sistemler arttırılmış güç ihtiyaçları için var olan sisteme daha çok modül eklenerek genişletilebilir. PV sistemler, çevre dostu ve gürültüsüz olarak elektrik üretir (Alkan, 2016).



**Şekil 2.1:** Silikon Yapılı Güneş Hücrelerinin Çalışması Noktası (Abdulazez, 2011)

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi silikon yapılu güneş hücrelerinin, 1.11  $\mu\text{m}$  dalga boyundan büyük fotonlara maruz kaldıklarında bir elektronu uyarmak için gerekli olan 1.12-eV band aralığından daha az bir enerjiye sahiptirler. Dolayısıyla bu fotonların hiçbirisi akımı iletilmesini sağlayan elektron-boşluk çifti üretmezler. Böylelikle tüm enerji boşa gitmiş olur ve yalnızca hücrenin ısınmasına neden olur. Diğer yandan 1.11  $\mu\text{m}$  daha kısa olan dalga boyları bir elektronun uyarılması için gerekli olan enerjiden daha fazlasına sahiptir. Bir foton yalnızca bir elektronu uyarabildiği için, ihtiyaç duyulan 1.12 eV fazla olan foton enerjisi hücre içerisinde kayıp enerji olarak hücrenin ısınmasına neden olur. Farklı bant aralığı sahip olan güneş hücreleri Tablo 2.1’de verilmiştir (Abdulazez, 2011).

**Tablo 2.1:** Farklı Bant Aralığı ve Dalga Boylarına Sahip Olan Güneş Hücreleri (Abdulazez,2011)

PV Malzemeler	Si	GaAs	CdTe	Inp
Bant Aralığı (eV)	1,12	1,42	1,50	1,35
Kesim Dalga Boyu $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	1,11	0,87	0,83	0,92

Yalıtkan, iletken ve yarı iletken maddelerin özellikleri, maddelerin bant yapılarına bağlıdır. Günümüzde elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş hücreleri de yarıiletken maddelerden yapılırlar. Yarı iletkenlik gösteren birçok madde arasında güneş hücresi yapmak için en elverişli olanlar, Silisyum, Kadmiyum Tellür, Galyum Arsenit gibi maddelerdir. Tablo 2.2’de bu maddelerin periyodik cetvelde atomlarının yerleri gösterilmektedir (Abdulazez, 2011).

**Tablo 2.2:** Periyodik Cetvelde Bazı Elementlerin Özellikleri (Abdulazez, 2011)

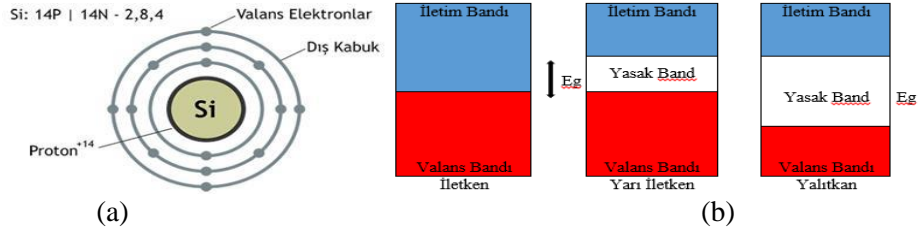
I	II	III	IV	V	VI
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

Malzemenin bant aralığı  $E_g$  veya  $V_g$ , hücrenin açık devre gerilimi  $V_{oc}$  ile doğru orantılıdır. Yani yüksek  $V_{oc}$  değerleri için büyük  $E_g$  gerekmektedir. Kısa devre akımı  $I_{sc}$  ise hücre yüzeyine gelen radyasyonla yaratılan elektron-boşluk çifti sayısı ile orantılıdır.  $E_g$ ’den daha büyük enerjiye sahip olan bu fotonlar elektron-boşluk çiftleri yaratırlar. Radyasyon kaynağı olarak güneş kullanıldığı zaman küçük  $E_g$  ve büyük  $I_{sc}$  elde edilir ve hücre yüzeyine gelen radyasyonla yaratılan elektron-boşluk çifti sayısı ile orantılıdır (Abdulazez, 2011).

## 2.2 Yarı İletken Maddeler

İletken ile yalıtkan arasında bir özelliğe sahiptirler. Dirençleri, ne iyi bir iletken kadar küçük ne de iyi bir yalıtkan kadar büyüktür. Silisyum ve germanyum, bu kategoriye giren ve yarı iletken devre elemanlarının

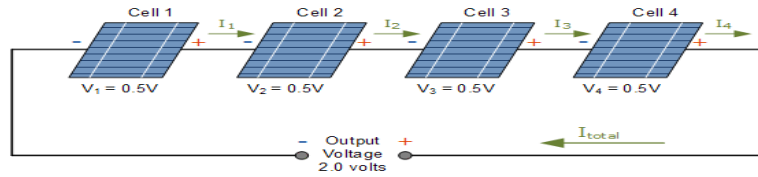
yapımında kullanılan maddelerdir. Yarı iletken grubundaki maddelerin valans elektronlarının sayısı ise 4'tür. Günümüzde yarı iletken devre elemanı yapımında en çok tercih edilen silisyumun her atomu 14 elektrona sahip olup son yörüngesinde ise 4 elektronu vardır. Şekil 2.2'de silisyum atomunun yapısı ve bu atomun basitleştirilmiş modeli görülmektedir. Silisyum ve germanyum içlerindeki yabancı atomlardan arıtılıp saflaştırıldıklarında oldukça düzgün bir kristal yapıya sahip olurlar (Ercan, 2008).



Şekil 2.2: Silisyum (Si) Atomunun Elektron Yapısı (a) (Url-2, 2019), Enerji Bantlarının Yapısı (b)

### 2.3 Güneş Hücrelerinin Birleştirilmesi ve Kapsüllemesi

Güneş hücrelerinin voltajı üzerlerine düşen güneş ışımına bağlı olarak 0.5 ile 0.7 V arasında değiştiği söylenebilir. Boyutu ne olursa olsun söz konusu gerilim değişmemektedir. Güneş hücrelerinin yüzey alanına bağlı olarak akımı yani amperi değişkenlik göstermektedir. Güneş hücreleri bir güneş paneli içerisinde seri olarak bağlandığında, uygun çıkış voltajı elde edildiğinde akım sabit kalmaktadır (Ceylan, 2017). Güneş hücrelerinin birbirlerine lehimlemek için "ribbon" telleri, birbirine bağlı hücrelerin kendi aralarındaki bağlantısında ise biraz daha kalın olan "busbar" kullanılmaktadır. Ribbon tellerini hücre üzerine lehimlemek için yüksek sıcaklık gerekmektedir. Bu yüzden lehim tabancası ve lehimini kolaylaştırmak için çam reçineli "flux" tercih edilmelidir.



Şekil 2.3: Seri Bağlı Güneş Hücreleri (Url-3, 2014)

Hücrelerin arkasından çıkan (+) kutuplu ribbon telleri diğer hücrenin (-) kutuplu ön tarafı ile Şekil 2.3'de görüldüğü gibi lehimle birleştirilir. Lehimleme işleminde çam reçineli flux kullanılması durumunda lehim teline ihtiyaç duyulmaz. Lehimleme de, lehim tabancası ucunun pirinç başlıklı olması tavsiye edilir (Ceylan, 2017).

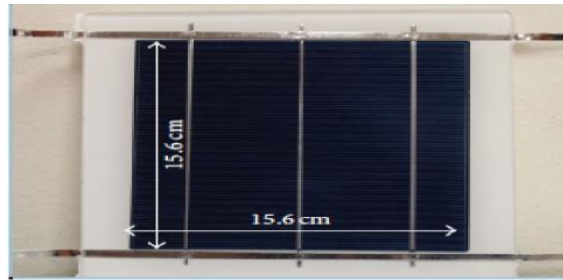
## 3. FULL CELL (TAM HÜCRE) İÇİN YÖNTEM VE MODELLENMESİ

### 3.1 Full Cell (Tam Hücre) Model Tanımlaması

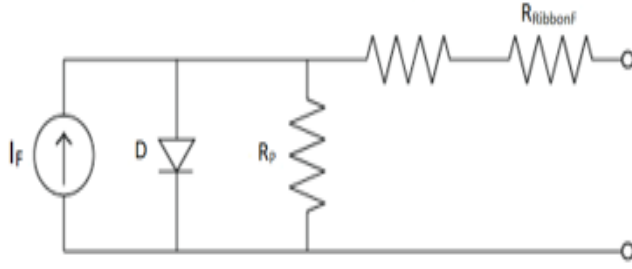
Full cell (tam hücre) fabrikasal üretiminde genellikle şu fiziksel özelliklere sahiptir;

Tablo 3.1: Longi Solar Full Cell (Tam Hücre) Verileri [Url-4]

Full Cell Parametre (STC)	Değer
Boyut	156x156 (mm <sup>2</sup> )
Kalınlık	200 $\mu$ m $\pm$ 20 $\mu$ m



Şekil 3.1: Bir Tam Güneş Hücresi (Guo ve diğ. 2013).



(a)



(b)

**Şekil 3.2:** (a) Bir Tam Hücre Modeli (Guo ve diğ., 2013) (b) 72 Tam Hücreli Referans Modülü (Hanifi, 2015).

Hücrelerin kısa devre akım yoğunluğundaki artışla dirençsel kayıpların arttığı bilinen bir gerçektir. Günümüzde bazı yüksek verimli güneş hücreleri için kısa devre akımı değişken yüksek değerlere sahiptir. Bu yüksek verimli güneş hücreleri için, şerit üzerindeki direnç kaybı nedeniyle hücreden modüle kayıp artmaktadır. Direnç kaybı, esas olarak hücre ve ara bağlantı şeridi arasındaki temas direncinden, kısacası ribbondan kaynaklanan dirençsel kayıplardır (Zhang ve diğ., 2017).

Ribbon direnci için;

$$R_{\text{ribbon}} = \left( \frac{2 \cdot \left( \frac{1}{A} \right) \cdot L_{bb}}{3 \cdot N_{bb}} \right) \quad (3.1)$$

modellemesi kullanılır. Burada;

$l$  = Her Uzunluk Başına Ribbon Direnci ( $\Omega \cdot m$ )

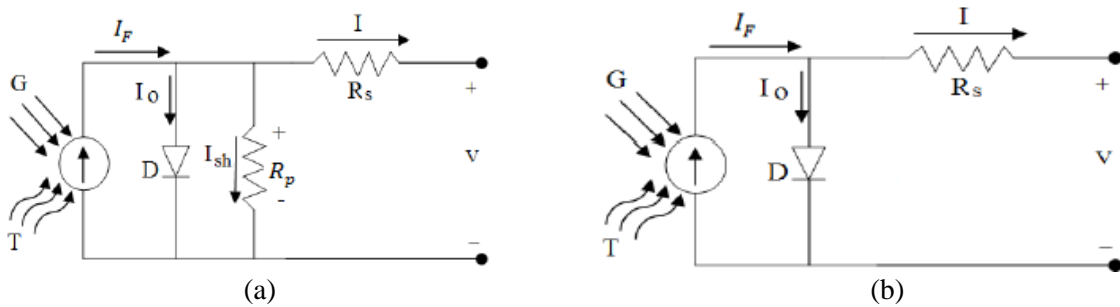
$A$  = Ribbon Alanı ( $mm^2$ )

$L_{bb}$  = Hücredeki Bara Uzunluğu (mm)

$N_{bb}$  = Hücredeki Bara Sayısı olarak tanımlanır.

### 3.2 Güneş Hücrelerinin Matematiksel Modeli

Güneş hücreleri p-n eklemiden oluşan ve p-n eklemi ışığa maruz kalan bir yarıiletken devre elemanıdır. Güneş hücrelerinin akım gerilim karakteristiğini matematiksel olarak modellenerek ve elektriksel davranışlarını yansıtacak farklı güneş hücresi modelleri geliştirmekle birlikte, simülasyon çalışmalarında elektriksel eşdeğer devresi sıklıkla kullanılan uygun bir yöntemdir. Güneş hücresinin modellenmesi için birden çok güneş hücresi modeli mevcuttur. Ancak en sık kullanılan model tek diyot elektriksel eşdeğer devre modelidir. Güneş hücresinin eşdeğer devre modeli bir akım kaynağı ve buna bağlı paralel bir diyottan oluşmaktadır. Burada seri direnç ( $R_s$ ) akım akışından kaynaklanan güneş hücresinin iç kayıplarını ifade etmektedir ve maksimum güç üretimi için küçük olması istenir. Diyota paralel bağlı ( $R_p$ ) direnç ise, paralel direnci temsil eder.



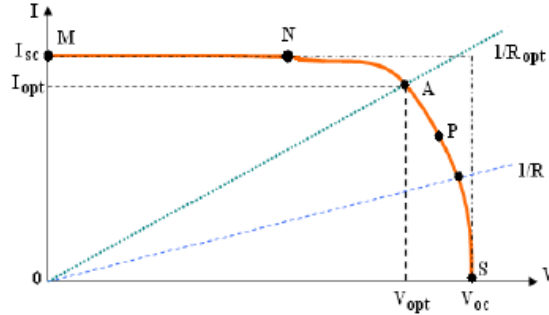
(a)

(b)

**Şekil 3.3:** (a) Güneş Hücresi Eşdeğer Devre Modeli (b) Basitleştirilmiş Eşdeğer Devre Modeli (Şahin ve Okumuş, 2013).

Güneş hücresinin I-V karakteristiği için, sabit sıcaklık (T) ve belirli bir ışık şiddetinde (G) Şekil 3.6'daki gibi grafik eğrisi oluşmaktadır. Yük karakteristiği doğrusal olarak  $I/V = I/R$ 'nin eğimi olarak bulunabilir. Yüke aktarılan gücün sadece dirence bağlı olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak R yükü çok küçük bir değerde ise güneş hücresi Şekil 3.4'deki M-N aralığında bir akım kaynağı olarak kısa devre akımına yakın bir akım değerinde

olacaktır. Eğer R yükü oldukça büyük değerlerde ise, güneş hücresi eğrinin P-S aralığında sabit bir gerilim kaynağı olarak açık devre gerilimine yakın bir gerilim değerinde çalışacaktır.



**Şekil 3.4:** Güneş Hücresinin Tipik Akım-Gerilim (I-V) (Şahin ve Okumuş, 2013)

Yüke aktarılan gücün maksimum olduğu noktaya maksimum güç noktası denir ve bu nokta Şekil 3.6’da A ( $I_{opt}$ ,  $V_{opt}$ ) veya A ( $I_{Max}$ ,  $V_{Max}$ ) noktası olarak adlandırılır. Bu nokta için yükün aldığı uygun değer  $R_{opt}$  veya  $R_{Max}$  olarak söylenebilir. Maksimum güç  $P_{max}$  ise Eşitlik 4.2’deki gibi yazılabilir (Şahin ve Okumuş, 2013).

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (3.2)$$

Maksimum gücün ( $P_{max}$ ), kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) ile açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ )’nin çarpımına bölümünden elde edilen ve Eşitlik 3.3’te gösterilen doldurma faktörüdür. Bu değer üretilen güneş hücreleri için hesaplanabilir ve ideal bir güneş hücresi için yaklaşık olarak 0,7 değerinden büyük olması istenir (Şahin ve Okumuş 2013).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.3)$$

Güneş hücresinin akımının hücresel çalışma sıcaklığı (T) ve güneş ışığı soğrulması (G)’ye bağlı ifadesi Eşitlik 3.4’deki gibi gösterilebilir. Burada G, güneş ışığı enerjisi soğrulma miktarı olup ışık şiddetine göre değişmektedir.  $K_I$  ise kısa devre akımına bağlı sıcaklık katsayısıdır. (Şahin ve Okumuş, 2013).

$$I_F = [I_{sc} + K_I(T - T_{ref})] \cdot G \quad (3.4)$$

Eşdeğer devre modelinde seri hücre sayıları  $N_s$ , paralel hücre sayıları ise  $N_p$  olarak alınıp modüler eşdeğer devre modeli oluşturulabilir. Ohm kanunu eşdeğer direnç kavramına göre seri hücre sayısı arttıkça hücre gerilimi artarken paralel hücre sayısı arttıkça hücrenin akımı artmaktadır (Şahin ve Okumuş, 2013).

### 3.3 Tek Diyot İçin $R_s$ Modeli

Gerçekte silikon ve elektrot yüzeyi arasındaki kontak direncinden dolayı oluşan kayıplar nedeniyle silikon ya da hücrenin ana malzeme direnci ve elektrot direncinin dikkate alınması önem kazanır. Bu kayıplar ideal diyot modeline seri bir direnç ( $R_s$ ) bağlanarak gösterilir. Tek diyot için  $R_s$  modeli bir akım kaynağı, bir diyot ve bir dirençten meydana gelir (Toprak ve diğ., 2016).

$I_F$  ışıkla üreyen akım (fotovoltaik akım),  $I_d$  diyot akımı,  $R_s$  seri direnç,  $R_p$  paralel direnç,  $I_0$  satürasyon (karanlık doyma) akımı ve n diyot idealite veya kalite faktöründen oluşan tek-diyot eşdeğer devresi gösterilmektedir. Böyle bir devreden geçen akımı tespit edilebilmesi için bu önemli parametrenin bilinmesi gerekmektedir (Abdulazez, 2011). Kirchhoff’un akım kuralına göre seçilen herhangi bir noktada devreden geçen akım için;  $I_F$  fotovoltaik akım,  $I_{sh}$  kaçak akım olmak üzere devreden geçen akım için; (Abdulazez, 2011).

$$I = I_F - I_d - I_{sh} \quad (3.5)$$

$$I_{sh} = \frac{V}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.6)$$

yazılabilir.  $I_d$  diyot akımı ve  $I_{sh}$  paralel direnç üzerinden geçen kaçak akım Eş. 3.7’de yerine koyarak akım-gerilim arasındaki ilişki (Abdulazez, 2011)

$$I = I_F - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V + I R_s}{n k T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (3.7)$$

ile ifadesi elde edilir.  $I_{sh}$  değeri çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Çıkış akımı Eş. 3.8 ile ifade edilmektedir (Abdulazez, 2011).

$$I = I_F - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V+IR_s}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.8)$$

$R_s$  seri direnci temelde p yarı iletken tabaka ile metal tabakanın temasıyla oluşan eklem direncine göre değişir. Dört parametre modeli olarak da adlandırılan bu modeldeki bilinmeyen parametreler fotoakım ( $I_F$ ), saturasyon akım ( $I_0$ ), seri direnç ( $R_s$ ) ve diyot idealite (kalite) katsayısı ( $n$ ) olarak tanımlanmaktadır (Toprak ve diğ., 2016).

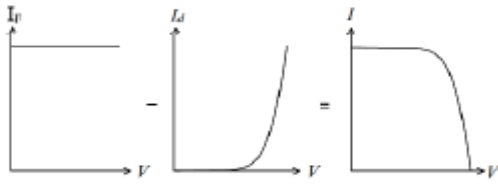
Shockley eşdeğer formülüne göre diyot akımı (Toprak ve diğ., 2016);

$$I_d = I_0 \left( \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.9)$$

Eşitlik 4.9'da  $V$  hücre gerilimi ( $V$ ),  $q$  elektron yükü ( $1,60 \times 10^{-19} \text{C}$ ),  $k$  Boltzmann sabiti ( $1,38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) ve  $T$  p-n eklem sıcaklığıdır ( $K$ ). Diyot idealite katsayısı  $n$ 'nin sınır koşulları  $1 \leq n \leq 2$  aralığındadır. Üretilen fotoakım ( $I_F$ ) ve diyot akımı ( $I_d$ ) arasındaki fark net akım " $I$ " ya eşittir ve

$$I = I_F - I_d \quad (3.10)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir.



**Şekil 3.5:** (I-V) Grafiği Net Akım Eğrisi (Toprak ve diğ., 2016)

Açık devre durumunda  $V_{oc} = V$  ve  $I=0$ , kısa devre durumunda  $I_{sc}=I$  ve  $V=0$ , maksimum güç durumunda olacağından akım denklemi sırasıyla şu şekilde yazılabilir.

Kısa Devre noktasında bir hücre tarafından üretilen akımın en büyük değeridir. Kısa devre koşulları tarafından üretilir:  $I=I_{sc}$ ,  $V=0$  (Toprak ve diğ., 2016)

$$I = I_F - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.11)$$

Açık Devre Noktasında  $I=0$ ,  $V=V_{oc}$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_F}{I_0} \right) = V_t \ln \left( \frac{I_F}{I_0} \right) \quad (3.12)$$

$V_t = \frac{nkT_c}{q}$  termal voltaj olarak bilinir ve  $T$  mutlak hücre sıcaklığıdır. Dolayısıyla;

$$0 = I_F - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{oc}}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.13)$$

Maksimum Güç Noktasında  $I=I_{Max}$ ,  $V=V_{Max}$  (Toprak ve diğ., 2016)

$$I_M = I_F - I_0 \left[ \exp \left( q \frac{V_{Max}+I_{Max}R_s}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (3.14)$$

olarak ifade edilmektedir. İdeal bir hücrede  $R_{s0} = R_s = R_{sh} = 0$  için;

$$I = I_F - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.15)$$

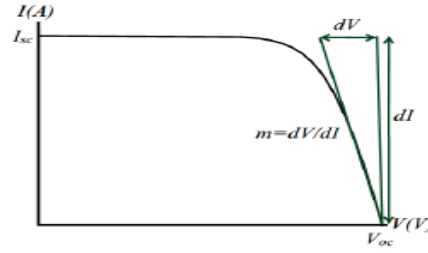
Model, foto-akım  $I_F$ 'nin sıcaklıkla değiştiğini ve diyotun  $I_0$  saturasyon (doyma akımı)'ni içermektedir.

$$I_F = I_{F_{T_1}} + K_0(T - T_1) \quad (3.16)$$

Seri direnç  $R_s$ 'nin modellenmesi ise şu şekildedir (Toprak ve diğ., 2016);

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{oc}} - \frac{1}{\frac{I_0 q}{nkT} \exp \left( \frac{qV_{oc}}{nkT} \right)} \quad (3.17)$$

Açık devre noktasında ( $V_{oc}, 0$ ) eğim Şekil 3.9'da olduğu gibi  $m = \frac{dV}{dV_{oc}}$  deneysel verilerden (reel veriler) geometrik olarak çıkarılır. Eğim  $0 \leq m \leq 1$  arasında kabul edilmektedir.



Şekil 3.6: Açık Devre Noktasında Eğimin Hesaplanması (Toprak ve diğ., 2016)

$$X_v = \frac{I_{0T_1} \cdot q}{n \cdot k \cdot T_1} \cdot \exp\left(q \cdot \frac{V_{ocT_1}}{n \cdot k \cdot T_1}\right) \quad (3.18)$$

Bu denklemden sadeleştirme ile  $R_s$  direnci;

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{V_{oc}}} - \frac{1}{X_v} \quad (3.19)$$

$G_{nom}$  değeri standart güneş ışınım değeri olarak  $1000 \text{ W/m}^2$  olarak kabul edilirse;

$$I_{FT_1} = I_{sc(T_1, nom)} \frac{G}{G_{(nom)}} \quad (3.20)$$

$I_{sc}$ ' nin sıcaklık katsayısı;

$$K_0 = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (3.21)$$

olarak hesaplanabilmektedir.  $I_0$  (Satürasyon akımı) ise;

$$I_0 = I_{0T_1} \cdot \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qV_q(T_1)}{nk\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right)}} \quad (3.22)$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{sc}(T_1)}{\left[ e^{\frac{qV_{oc}(T_1)}{nkT_1}} - 1 \right]} \quad (3.23)$$

olarak hesaplanır (Şahin ve Okumuş 2013; Toprak ve diğ. 2016).

### 3.4 Fotovoltaik Modülde Full Cell (Tam Hücre) İçin Matematiksel Modelleme

Standart panel verileri firmaların ürettiği panel kataloglarında mevcut olup her bir panel veya modül için ayrı ayrı parametrelere göre değişken değerleri verirler. Her bir panel katalogunda sistemde ne kadar hücre kullanıldığı ayrı ayrı açıklanmaktadır. Standart panel kataloglarında full cell (tam hücre) kullanıldığı ve ne kadar hücre kullanıldığını belirten parametreler mevcuttur. Standart panel kataloglarını incelediğimizde genellikle 60 ila 72 hücre kullanıldığını görebiliriz.

Matematik modellemesi için daha önceden verdiğimiz modeller kullanarak bir model geliştirilmiştir. Fakat burada değişken olarak ribbon direnci eklenerek daha diferansiyel sonuçlar elde edilebilir. Çünkü ribbon direnci ihmal edilemeyecek kadar sisteme direkt etki eden değişkenlerden biridir. Hücre direnç kaybının azaltılmasında oldukça önemli bir faktördür. Full cell (tam hücre) modelinde panel verileri mevcut olan modellemelerde,  $n$  (diyot kalite faktörü) 1 olarak kabul edilmiştir. Ribbon direnci için;

$$R_{ribbonF} = \left( \frac{\left(2 \cdot \left(\frac{1}{A}\right) \cdot L_{bb}\right)}{(3 \cdot N_{bb})} \right) \times 72 \quad (3.24)$$

formülü kullanılabilir (Gonzalez-Longatt, 2006). Burada ;

$l$ = Her Uzunluk Başına Ribbon Direnci ( $\Omega \times \text{mm}$ )

$A$ = Ribbon Alanı ( $\text{mm}^2$ )

$L_{bb}$  = Hücredeki Bara Uzunluğu (mm)

$N_{bb}$  = Hücredeki Bara Sayısı

olarak ifade edilir. Full cell (tam hücre) için bu parametreler literatür taramasında mevcut olup;



**Tablo 3.2:** Full Cell (Tam Hücre) Bara Ve Ribbon Parametreleri (Guo ve diğ., 2013)

l	1,728x10 <sup>-8</sup>
A	0,22x0,8
Lbb	155
Nbb	5

olarak alınır. 72 ile çarpmamızın nedeni ise, panel kataloglarına bağlı olarak 60 ya da 72 adet hücrenin kullanılmasıdır. Ayrıca literatürde mevcut olan diğer sabit parametreler ise;

k = Boltzmann Sabiti [J/K]      q = Elektron Yükü [C]      Vg = Kristal Silikonun Gerilimi [eV]

**Tablo 3.3:** Hücre İçin Gerekli Sabit Parametreler (Guo ve diğ., 2013)

k	1,38e-23
q	1,60e-19
Vg	1,12

$$T_{aK} = 273 + T_{aC}; \text{ Hücrenin sıcaklığını Santigrat'tan Kelvin'e Dönüşümü} \quad (3.25)$$

$$I_{FT_1} = (I_{scT_1} \cdot G); \text{ T}_1\text{'deki güneşe bağlı olarak } I_F \text{ foton akımı hesaplama} \quad (3.26)$$

$$I_F = I_{FT_1} + K_0 \cdot (T_{aK} - T_1); \text{ Foton akımının sıcaklık ile değişimi} \quad (3.27)$$

$$I_{0T_1} = \left( \frac{I_{scT_1}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{ocT_1}}{n \cdot k \cdot T_1}\right)} - 1 \right) \quad (3.28)$$

$$I_0 = \left( I_{0T_1} \cdot \left(\frac{T_{aK}}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot \exp\left(\frac{-q \cdot V_g}{n \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{aK}}\right) - \left(\frac{1}{T_1}\right)\right) \right) \quad (3.29)$$

$$X_v = \frac{I_{0T_1} \cdot q}{n \cdot k \cdot T_1} \cdot \exp\left(q \cdot \frac{V_{ocT_1}}{n \cdot k \cdot T_1}\right) \quad (3.30)$$

m =  $-\frac{dV}{dI_{Voc}}$  değeri için belirli bir parametrede alınan eğim sonucu alınmaktadır (Abdul Kareem ve diğ., 2016).

$$R_s = \left( \frac{-dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_v} \right) - R_{RibbonF} \quad (3.31)$$

modellemesi uygulanabilir (Gonzalez-Longatt, 2006).

### 3.4.1 Full Cell (Tam Hücre) İçin Ia Newton Raphson Method Yöntemi

Güneş hücresinin akım ve gerilimi arasındaki ilişki hem kapalı hem de doğrusal olmayan bir matematiksel ifade ile tanımlanır. Güneş hücresinin STC(Standart Test Koşulları), özgül sıcaklık ve güneş ışınımı koşullarındaki I-V eğrisini simüle etmek için verilen her gerilim için karşılık gelen bir akım değerinin hesaplanması gerekir. Bu denklemin çözümü için yaygın olarak bilinen kök bulma yöntemlerinden bir olan Newton-Raphson Yöntemi kullanılmıştır.

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \longrightarrow f(V, I) = 0 \quad (3.32)$$

Güneş hücresinin (I-V) karakteristiği kapalı bir biçimde verildiğinden aşağıdaki iterasyon işlemi bu çözümü bulmak için uygundur.

$$I_{a+1} = I_a - \frac{f(V_a, I_a)}{\frac{dI}{dV}} \quad (3.33)$$

$$I_{a+1} = I_a - \frac{I_F - I_a - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_a + I_a \cdot R_s}{V_{tT_a}}\right) - 1 \right]}{\frac{I_0 \cdot R_s \cdot \exp\left(\frac{V_a + I_a \cdot R_s}{V_{tT_a}}\right) - 1}{V_{tT_a}}} \quad (3.34)$$

$$I_a = I_a - \frac{\left( I_F - I_a - I_0 \cdot \left( \exp\left(\frac{V_a + I_a \cdot R_s}{V_{tT_a}}\right) - 1 \right) \right)}{-1 - \left( I_0 \cdot \left( \frac{\exp\left(\frac{V_a + I_a \cdot R_s}{V_{tT_a}}\right) - 1 \right) \cdot \frac{R_s}{V_{tT_a}} \right)} \quad (3.35)$$

modeli uygulanmıştır (Gonzalez-Longatt, 2006).

## 4. BENZETİM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

### 4.1 Full Cell (Tam Hücre) Matlab Programında Benzetim Sonuçları

Full cell (tam hücre) modelinde belirli parametrelere sahip firmaların fabrikasyon verilere dayanan sonuçları kullanılarak MATLAB programında simülasyon edilip geliştirilmiştir (Url-5, 2011). Her bir firmanın üretim verilerinden STC-Standart Test Koşulları ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ )’da bulunan parametreler kullanılmıştır. Güneş hücresi modülüne ait benzetimler ve firmaların panel katalogunda bulunan ( $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ , panel en, panel boy) parametreleri kullanılarak STC’de bulunan güneş hücresine ait akım-gerilim (I-V) ve güç gerilim (P-V) karakteristik eğrisi elde edilmiştir. Akım gerilim (I-V) eğrisine ait eğim ( $\frac{dV}{dI_{voc}}$ ) tekrar modellemede yerine koyularak birbirine eşit olana kadar iterasyon yapılmıştır. Her bir firma için gerekli  $\frac{dV}{dI_{voc}}$  değeri, genellikle 2 ya da 3 iterasyon sonucunda birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Bu eğim değerini bir excel dosyasında tanımlayabiliriz. (I-V) eğrisi için maksimum güç noktası belirlenmiştir. % sapma oranı için Eşitlik 4.1 uygulanmıştır.

$$\%Sapma = \frac{(Deneysel\ Veri - Teorik\ Veri)}{Teorik\ Veri} \times 100 \quad (4.1)$$

Modüle efficiency (modül verimliliği) için;

$$Module\ Efficiency\ (\eta) = \frac{P_{max}}{(Panel\ En \times Panel\ Boy \times 10)} \quad (4.2)$$

modellemesi uygulanmıştır. Panel en ve panel boy değerleri birimi (m) olup, panel kataloglarında mevcuttur.

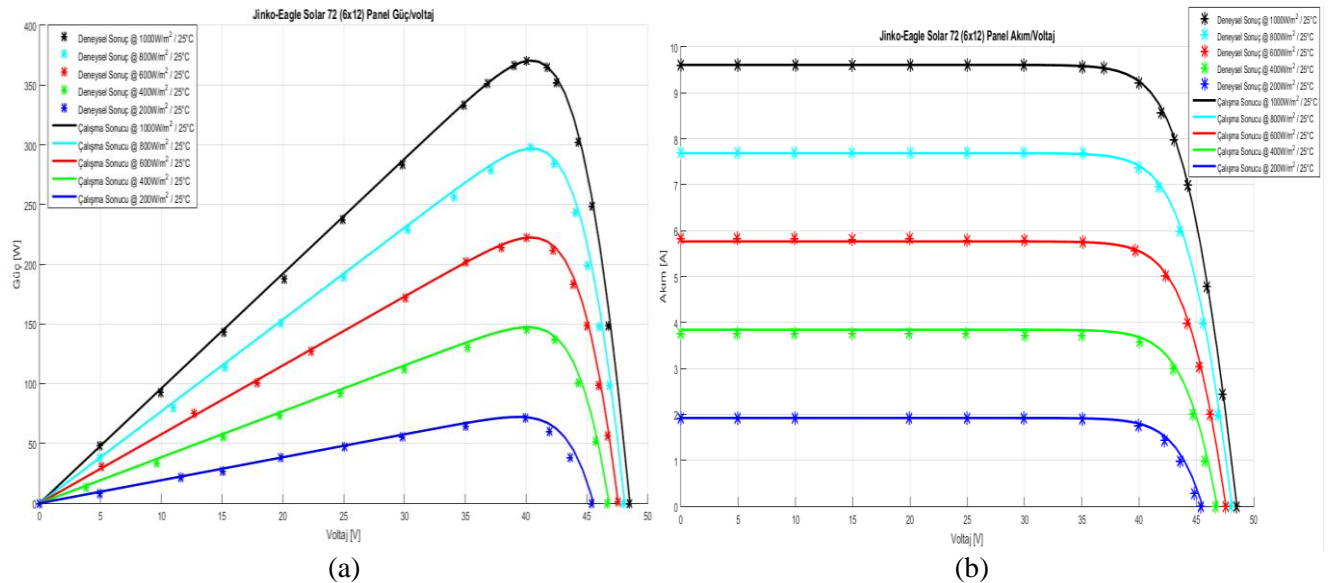
#### 4.1.1 Jinko-Eagle Solar Full Cell (Tam Hücre) Similasyonu (Pmax=370W)

Jinko-Eagle Solar firmasının tablo 4.1’de bulunan panel katalog verileri kullanılıp MATLAB programı ile simule edilmiştir.

**Tablo 4.1:** Jinko-EaglePerc JKM360-380M-72-A1-EN Panel Katalog Verileri [Url-6]

Modül Parametre	Değer
Isc (A)	9,61
Voc (V)	(48,5)/72
Imp (A)	9,28
Vmp (V)	39,9

“Çalışma Sonucu” isimli çalışma simülasyon çalışması ve “Deneysel Sonuç” isimli çalışma ise gerçek grafik sonuçlarından elde edilen verilerdir.



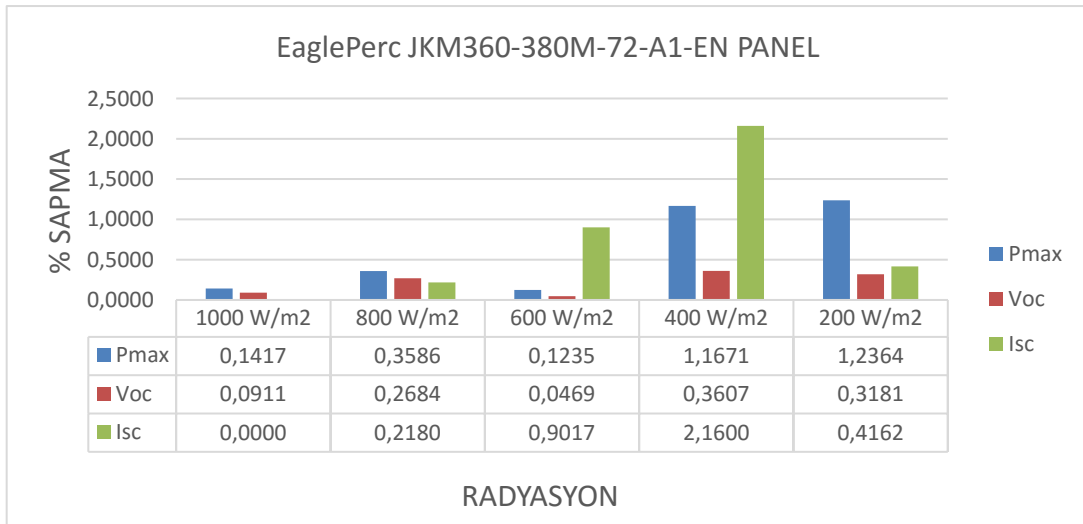
**Şekil 4.1:** (P-V) Grafığı (a), (I-V) Grafığı (b) ( $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

**Tablo 4.2:** Jinko-EaglePerc JKM360-380M-72-A1-En Panel Verileri (T=25 °C)

Radyasyon (W/m <sup>2</sup> )	Parametreler	Ölçülen Değer	Eagle Perc Değeri	%Sapma
1000	Pmax	370,52	370,00	-0,14
	Voc (P-V)	48,54	48,50	-0,09
	Voc (I-V)	48,54	48,50	-0,09
	Isc	9,61	9,61	0,00
800	Pmax	296,90	297,97	0,36
	Voc (P-V)	48,11	47,98	-0,27
	Voc (I-V)	48,11	47,98	-0,27
	Isc	7,69	7,71	0,22
600	Pmax	222,43	222,15	-0,12
	Voc (P-V)	47,58	47,56	-0,05
	Voc (I-V)	47,58	47,56	-0,05
	Isc	5,77	5,82	0,90
400	Pmax	147,27	145,57	-1,17
	Voc (P-V)	46,83	46,66	-0,36
	Voc (I-V)	46,83	46,66	-0,36
	Isc	3,85	3,77	-2,16
200	Pmax	72,15	71,27	-1,24
	Voc (P-V)	45,53	45,39	-0,32
	Voc (I-V)	45,53	45,39	-0,32
	Isc	1,93	1,92	-0,42

**Tablo 4.3:** Jinko-EaglePerc JKM360-380M-72-A1-En Panel Verileri

Modül Parametre	Ölçülen Değer
Module Efficiency	19,10
FF	79,42
I0	3,93e-11
Rs	0,26



**Şekil 4.2:** EaglePerc JKM360-380M-72-A1-En Panel %Sapma Verileri

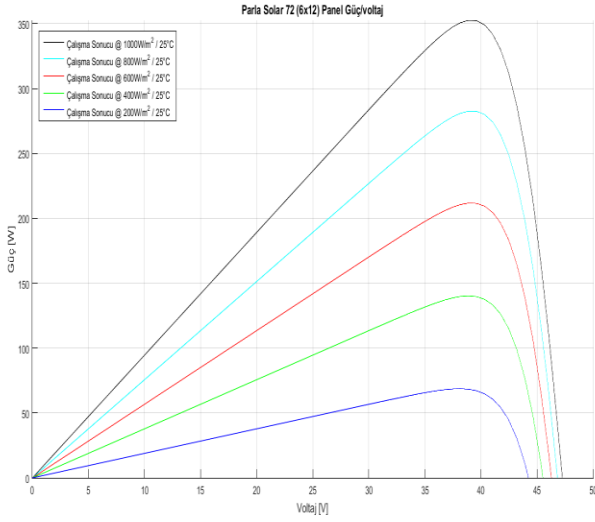
Şekil 4.2’de Jinko-EaglePerc JKM360-380M-72-A1-En panel verileri kullanılarak oluşturulan simülasyon sonucu ile gerçek grafik sonucu karşılaştırması ile % sapma verileri bulunmaktadır.

#### 4.1.2 Bereket Enerji-Parla Solar Full Cell (Tam Hücre) Similasyonu (72 Hücre Verisi)

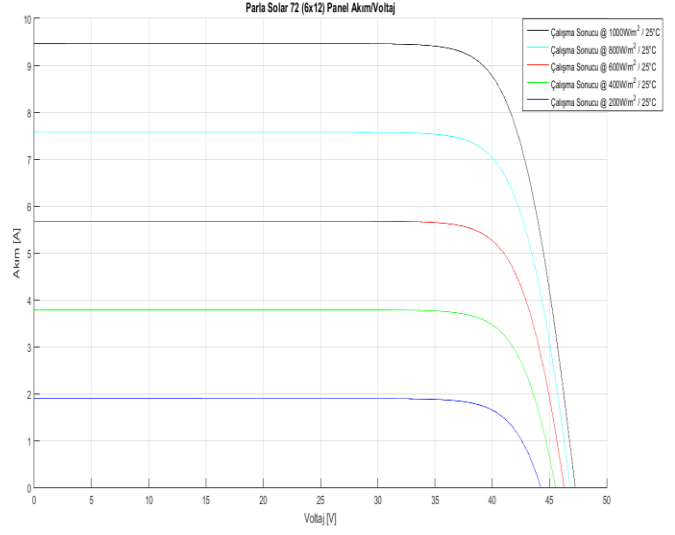
Bereket Enerji-Parla Solar firmasından alınan hücre verilerinden 72 adet hücre verileri (Tablo 4.4) ele alınıp, çıkan simülasyon sonucu verilmiştir. [Url-7]

**Tablo 4.4:** Bereket Enerji-Parla Solar 72 Adet Hücre Verileri

Modül Parametre	Değer
Isc (A)	9,456471
Voc (V)	(47,224990)/72
Rs ( $\Omega$ )	0,002387
Rp ( $\Omega$ )	151,118500
Imp (A)	8,636084
Vmp (V)	39,789350



(a)



(b)

**Şekil 4.3:** (P-V) Grafiği (a) , (I-V) Grafiği (b) (T=25 °C)**Tablo 4.5:** Parla Solar 1 Full Cell Panel Verileri (T=25 °C)

Radyasyon (W/m <sup>2</sup> )	Parametreler	Ölçülen Değer
1000	Pmax	352,61
	Voc (P-V)	47,23
	Voc (I-V)	47,23
	Isc	9,46
800	Pmax	282,57
	Voc (P-V)	46,82
	Voc (I-V)	46,82
	Isc	7,57
600	Pmax	211,74
	Voc (P-V)	46,28
	Voc (I-V)	46,28
	Isc	5,68
400	Pmax	140,29
	Voc (P-V)	45,53
	Voc (I-V)	45,53
	Isc	3,79
200	Pmax	68,71
	Voc (P-V)	44,23
	Voc (I-V)	44,23
	Isc	1,90

**Tablo 4.6:** Parla Solar 1 Full Cell Panel Verileri

Modül Parametre	Ölçülen Değer
Module Efficiency	17,83
FF	78,87
I0	7,7889e-11
Rs	0,27

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde, dünya üzerinde artan enerji taleplerinden dolayı ortaya çıkan çevreye olumsuz etkileri olan atık ve salınlara karşı en etkin çözümleri arasında yer alan güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmasıyla bir çözüm oluşturulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından daha verimli ve etkin şekilde yararlanabilmek için akıllı enerji sistemi kullanılmalıdır. Son günlerde dünya üzerinde enerji piyasasını etkileyen çalışmaların başında gelen fotovoltaik enerji, gün geçtikçe daha çok gelişmekte ve değer kazanmaktadır. Fotovoltaik enerjinin daha etkili kullanılması için birçok firma çeşitli yöntemler denemekte, kullanıcıya hem tasarruf hem de daha etkili verim ile bu enerjiyi kullanmalarını sağlamaktadır.

Çalışmamızda tam hücrelerde, tek diyot modeli kabul edilmiştir. Full cell (Tam hücre) modelinde kullanılacak hücrelerin birbirine seri olarak bağlandığı varsayılmıştır. MATLAB programı ortamında tam hücre için modelleme yapıp sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda genellikle güneş ışınımı  $G=200 \text{ W/m}^2$  değerinde iken, diğer güneş ışınım değerlerine nazaran daha fazla sapma oranı çıktığı görülmüştür. Bunun sebebi iç direnç değerindeki kayıpların, simülasyonda sabit alınmasından dolayı, gerçek verilerle azda olsa bir farklılık göstermektedir.

Bölüm 4.1.2'de, Bereket Enerji-Parla Solar firmasının verilerinden 72 adet full cell (tam hücre) seçilmiş ve bu hücre parametreleri kullanılmıştır. Bereket Enerji-Parla Solar firmasının verilerinden yararlanılarak yapılan ilk simülasyon çalışmasında 72 hücreye ait  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ,  $R_s$  ve  $R_p$  değerleri kullanılmıştır. Parametrelerden  $V_{oc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $R_s$  ve  $R_p$  değerleri için 72 adet hücreye ait bu değerlerin ortalaması alınmıştır.  $I_{sc}$  ve  $I_{mp}$  değerleri için 72 adet hücreye ait  $I_{sc}$  ve  $I_{mp}$  değerlerinden en küçük değerleri kabul edilmiş, benzetim sonucu bir (I-V) eğrisi oluşturulup full cell (tam hücre) için simülasyon sonuçlarına ulaşılmıştır.

Sonuç olarak full cell (tam hücre) modelinde, perc hücre verileri kullanılarak MATLAB programında yaklaşımlar yapılmıştır. İleriki çalışmalarda hem ekonomik yönden tasarruf elde edebilmesi, hem de modül güç çıkışının artırılması için, çeşitli hücreler üzerinde çalışılarak yöntem ve modellemeler yapılması planlanmaktadır.

## 6. SEMBOL LİSTESİ

<b>PV</b>	: Fotovoltaik Enerji
<b>c-Si</b>	: Kristal Silisyum Hücre Yapısı
$\lambda$	: Foton Dalga Boyu ( $\mu\text{m}$ )
<b>k</b>	: Boltzmann Sabiti ( $\text{JK}^{-1}$ )
<b>v</b>	: Foton Frekansı (Hz)
<b>eV</b>	: Elektronun Sahip Olduğu Enerji (J)
<b>q</b>	: Elektron Yüğü (C)
$V_g = E_g$	: Malzemenin Bant Aralığındaki Gerilimi (eV)
$V_{oc}$	: Açık Devre Gerilimi (V)
$I_{sc}$	: Kısa Devre Akımı (A)
$I_{sh}$	: Paralel Direnç Üzerinden Geçen Kaçak Akım (A)
$I_d$	: Diyot Akımı (A)
<b>T</b>	: Mutlak Hücre Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C} - \text{K}$ )
$I_F$	: Hücrenin Foton Akımı (A)
<b>I</b>	: Net Akım (A)

$I_0$	: Satürasyon Akımı (A)
$R_s$	: Seri Direnç ( $\Omega$ )
$R_p$	: Paralel Direnç ( $\Omega$ )
$I_{mp}=I_{Max}=I_{opt}$	: Maksimum Güçteki Akım (A)
$V_{mp}=V_{Max}=V_{opt}$	: Maksimum Güçteki Voltaj (V)
$P_{Max}$	: Maksimum Güç (W)
FF	: Doldurma Faktörü
G	: Radyasyon Enerji Miktarı (W)
$G_{nom}$	: Sabit Radyasyon Enerji Miktarı (1000 W/m <sup>2</sup> )
STC	: Standart Test Koşulu (25°C Ve G=1000 W/m <sup>2</sup> )
$K_0$	: Kısa Devre Akımına Bağlı Sıcaklık Katsayısı (%/K-°C)
$\eta$	: Modül Verimliliği
$V_t$	: Termal Voltaj (V)
n	: Diyot İdealite Katsayısı
l	: Her Uzunluk Başına Ribbon Direnci ( $\Omega.m$ )
A	: Ribbon Alanı (mm <sup>2</sup> )
Lbb	: Hücredeki Bara Uzunluğu (mm)
Nbb	: Hücredeki Bara Sayısı

## 7.KAYNAKLAR

Alkan, A., “Yenilenebilir Hibrit Enerji Kaynakları İle Beslenen Konutlar Akıllı Enerji Depolama Ve Yönetim Sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli, (2016)

Abdulazez, M. “Tek Diyot Modeline Dayanarak Gölgelemenin Güneş Pillerinin Çalışma Performansı Üzerindeki Etkinin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2011).

Şentürk, A., “Fotovoltaik Modüllerin Akım-Gerilim Eğrilerinin Simülasyonunda Kullanılacak Olan Yöntemin Seçimi”, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, DOI: 10.25092/baunfbed.411779, 20(1), 341-354, (2018).

Öztürk, H. H., Kaya, D., “Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji”, Kocaeli: Umuttepe Yayınları, (2013).

Ercan, Ö., “Analog Elektronik (Diyod, Bjt, Fet, Mosfet)”, İstanbul: Altaş Yayıncılık, (2008).

Ceylan, İ., Gürel, A., E., “Güneş Enerjisi Sistemleri Ve Tasarımı”, Bursa: Dora Basım Yayın Dağıtım, (2017).

Zhang, H., Zhuang, H., Gou, X., Huang, Q., Jiang, L., Chen, Z., “Study On The Benefit Of Half-Cut Cells Towards Higher Cell-To-Module Power Ratio”, *Power and Electrical Engineering (EPEE 2017)*, 978-1-60595-514-8, (2017).

Guo,S., Singh,J. P., Peters I. M., Aberle A. G., “Quantative Analysis Of Photovoltaic Modules Using Halved Cells”, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy*, 739374, 8, (2013).

Hanifi, H., “ Reduced Shading Effect On Half-Cell Modules-Measurement And Similation”, (eds: Hanifi, H., Schneider, J., Bagdahn, J.), *Conference: 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, At Hamburg, Germany*, (2015).

Şahin, M. E., Okumuş, H. İ., “Güneş Pili Modülünün Matlab/Simulink İle Modellenmesi Ve Simülasyonu”, *EMO Bilimsel Dergi*, Cilt 3, 17-25, (2013).

Toprak, A., Kılıç, H.Ş., Toprak, A., Kepceoğlu, A., “ Güneş Pilinin Tek Diyot Rs Model Parametrelerinin Hesaplanması Ve I-V İle P-V Karakteristiklerinin İncelenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 12, 13-22, (2016).

Gonzalez-Longatt, F., “ Model Of PhotovoltaicModule İn Matlab”, *2do Congreso Iberoamericano De Estudiantes De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Computación*, II Cibelec, (2006).

Abdul Kareem, M., Saravanan, M., “A New Method For Accurate Estimation Of PV Module Parameters And Extraction Of Maximum Power Point Under Varying Environmental Conditions”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 10.3906/elk-1312-268,(2016).

**Url-1**, Kırıcıoğlu, O., Yıldız, A.B., “Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Eşdeğer Devresine Ait Büyük Sinyal Analizi [online]”, (10 Nisan 2019), [http://www.emo.org.tr/ekler/4a7cb508ff0809f\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/4a7cb508ff0809f_ek.pdf), (2019)

**Url-2**, Elektrik Elektronik Robotik Biyomedikal, “Silisyum Özellikleri [online]”, (21 Mayıs 2019 ), <http://diyot.net/siliyum/>, (2019)

**Url-3**, Alternative Energy Tutorials, “Solar Photovoltaic Panel [online]”, (2 Haziran 2019),<http://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/pv-panel.html>, (2014).

**Url-4**, Longi Solar, “Longi Solar Monocrystalline Silicon Solar Cell M2E1L45B [online]”,[https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Cell/5b3f15e20a5c9.pdf?\\_ga=2.134937969.1451044086.1567797955-6183666.1567797937](https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Cell/5b3f15e20a5c9.pdf?_ga=2.134937969.1451044086.1567797955-6183666.1567797937), (2019)

**Url-5**, Leroy, T., “Simple function for I/V and P/V calculation for a Sunpower solar cell, frequently used in solar cars [online]”,(2011), <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/31305-simple-solar-cell-and-panel-model>, (2019)

**Url-6**, Jinko Solar, “Jinko-EaglePerc JKM360-380M-72-A1-EN Datasheet [Online]” <https://www.jinkosolar.com/ftp/EaglePerc%20JKM360-380M-72-A1-EN.pdf>, (2019)

**Url-7**, Parla Solar-Bereket Enerji, “Güneş Hücresi Teknik Bilgiler [online]”, <https://www.parlasolar.com/gunes-hucresi-uretimi/>, (2019)