



Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi

Investigation of the parameters affecting the total efficiency of solar energy panels designed with half and full photovoltaic cells

Sevgi Duman^{1,*} , Mustafa Alçı² 

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri Türkiye

Öz

Güneş enerjisi (GE), küresel çevre endişelerini azaltmak ve artan enerji talebini karşılamak için en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olmuştur. Güneş enerjisinden farklı şekillerde yararlanılmaktadır. Bunlardan biride fotovoltaik (PV) hücrelerdir. Fotovoltaik hücreler güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken malzemelerdir. Geleneksel fotovoltaik modüller tam PV hücreler ile modellenmektedir. Günümüzde ise yeni bir teknoloji olan yarım hücreli modül kullanımı hızla artmaktadır. Yarım PV hücrelerin tam PV hücrelere göre çeşitli avantajları olmasına rağmen, bazı üretim dezavantajları da vardır. Bu çalışmada kapsamlı bir literatür incelemesi sonucu yarım ve tam hücreli PV modüllerin toplam verimliliğini etkileyen parametreler karşılaştırılarak yarım hücreli PV modüllerin, düşük güç kaybı, azaltılmış gölge duyarlılığı, fiyat performans oranının yüksek olması, daha az sıcak nokta etkisi ve iyileştirilmiş ısı dağılımı gibi tam hücrelere göre üstünlüklerinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak yarım ve tam PV hücrelerinin verimlilikleri, üretim süreçleri ve diğer bazı dezavantajları hakkında da bilgiler verilmektedir.

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi paneli (GEP), Fotovoltaik, Yarım PV hücre, Sıcak nokta etkisi

Abstract

Solar power (SP) has been one of the most promising renewable energy sources to alleviate global environmental concerns and meet growing energy demand. Solar energy is used in different ways. One of them is photovoltaic (PV) cells. Photovoltaic cells are semiconductor materials that convert solar energy directly into electrical energy. Conventional photovoltaic modules are modeled with full PV cells. Today, the use of half-cell modules, which is a new technology, is increasing rapidly. Although half PV cells have several advantages over full PV cells, there are also some manufacturing disadvantages. In this study, as a result of a comprehensive literature review, the parameters affecting the total efficiency of half and full cell PV modules are compared. With this comparison, it is aimed to show the advantages of half-cell PV modules over full-cells, such as low power loss, reduced shade sensitivity, high price-performance ratio, less hot spot effect and improved heat dissipation. In addition to these, information is given about the efficiency, production processes and some other disadvantages of half and full PV cells.

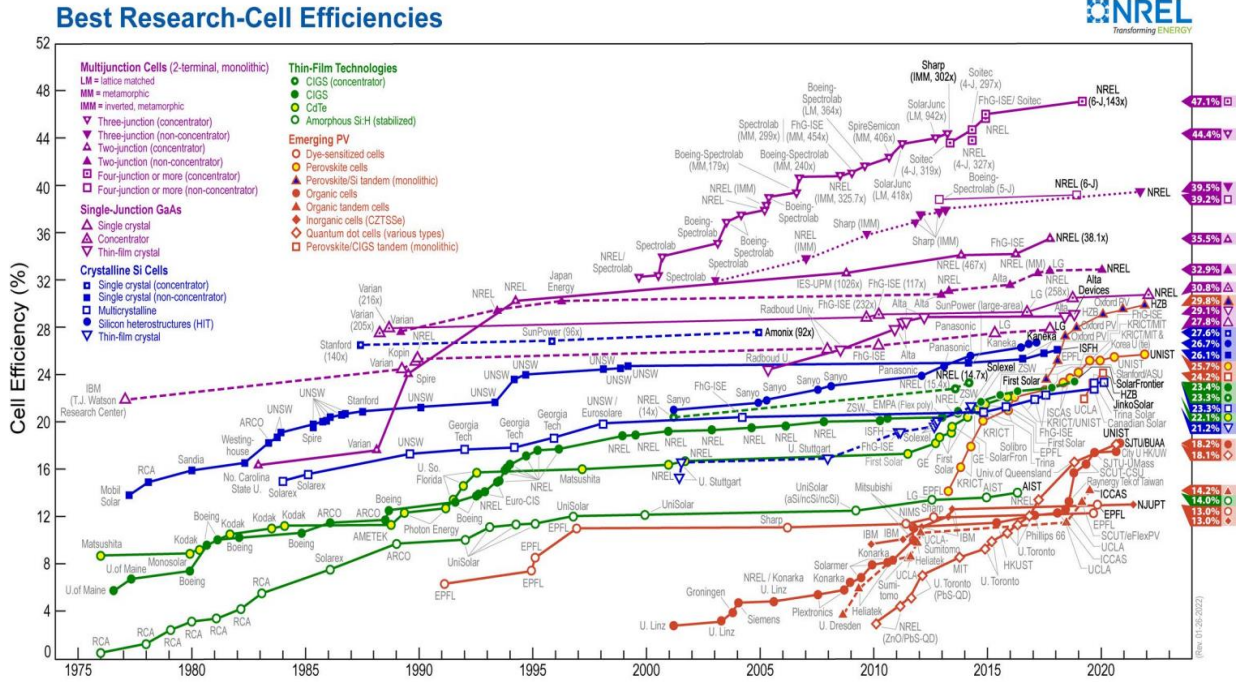
Keywords: Solar energy panel (SEP), Photovoltaic, Half PV cell, Hot spot effect

1 Giriş

Dünyada insan yaşamının vazgeçilmez bir parçası ve toplumsal refahın sağlanmasındaki en önemli faktör olan enerjiye yönelik ihtiyaç sürekli artmaktadır. Fakat ne yazık ki günümüzde üretilen enerjinin %85'i fosil yakıtlardan (petrol, kömür, doğalgaz vb.) elde edilmektedir. Fosil yakıtların neden olduğu aşırı CO₂ salınımı ise dünyadaki canlı yaşamını tehdit eden küresel ısınma sorununun başlıca nedeni olarak gösterilmektedir. Bunun yanında, bu yakıtların rezervlerinin sınırlı olduğu ve dünyayı yeni enerji krizlerinin beklediği düşüncesiyle tüm dünyada temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik ilgi ve araştırmalar her geçen gün hızla artmaktadır. Işık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemlerle güneşten elde edilen enerji, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir.

Fotovoltaik teknolojisindeki gelişmelerle hedeflenen en az maliyetle en fazla güç elde edebilmektir. Bu amaçla, araştırmacılar ilk güneş hücresinin ticarileştirildiği 1954 yılından bu yana çeşitli hücre teknolojileri geliştirmişlerdir [1]. Şekil 1'de bu güne kadar geliştirilen hücre teknolojilerinin verimliliklerini gösteren grafik verilmektedir. Görüldüğü gibi çok eklemlili yoğunlaştırılmış güneş hücrelerinin günümüzde verimlilikleri %47'lere kadar ulaşmıştır. Fotovoltaik sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan silisyum tabanlı polikristal güneş hücrelerinin verimlilik değeri ise %22 civarındadır [2].

Standart fotovoltaik modüller genellikle 15.6 x 15.6 cm² lik boyutlara sahip tam PV hücreler ile modellenmektedir [3]. Tam hücreli güneş panellerindeki hücreden modüle (CTM) güç kaybı faktörleri ve uyumsuzluk kayıpları modülün çıkış gücü üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır [4].



Şekil 1. Farklı güneş hücresi teknolojilerine ait verimlilik çizelgesi [2]

Bu olumsuz etkileri minimize ederek PV modülün güç çıkışını iyileştirmek amacıyla çoklu bara çözümlerinden, akıllı kablo ve birleştirilmiş arka kontak (IBC) tasarımlarına kadar birçok yenilikçi hücre tasarımı geliştirilmiştir. Yenilikçi hücre tasarımlarının yanı sıra bara gölgenmelerini azaltmak ve modül verimliliğini arttırmak için yenilikçi ara bağlantı tasarımları da geliştirilmektedir. Bu tasarımlardan biri de 2014 yılında REC tarafından tanıtılan [5] ve günümüzde kullanımı hızla artan yarım hücreli PV modüllerdir.

Yarım hücreli PV modüllerin daha düşük direnç kaybı ve artırılmış optik kazançları nedeniyle hücreden modüle enerji verim kaybını azalttığı bildirilmektedir [6]. Bu modüllerin 2018'de %5 olan pazar payının 2028'de %40'a çıkması beklenmektedir [7]. Yarım hücreli PV modüller, standart modüllere göre bir dizi avantaj sağlamaktadır. Bu modüllerin, az ışık koşullarında dahi yüksek performans sunması, gölgenmelerden diğer standart tam hücreli modüllere göre daha az etkilenmesi, daha yüksek güç çıkışı sağlaması ve çalışma sıcaklık değerlerinin daha yüksek olması sonucu sıcak bölgelerde dahi yüksek verim ile enerji üretmeye devam etmesi gibi avantajları vardır [8]. Bu avantajlar, onların PV hücreler ile elektrik üretiminde tercih edilmesine ve araştırılmaya değer bir konu olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, GEP tasarımında kullanılan yarım ve tam PV hücreler toplam verimlilik değerleri açısından karşılaştırılmalı olarak incelenmektedir.

2 Yarım ve tam PV hücrelerde ribon dirençleri ve hücre akımlarının incelenmesi

Fotovoltaik panellerdeki komşu hücreleri birbirine bağlayan ribonlar (şerit) boyunca taşınan akım nedeniyle modüllerde direnç güç kayıpları oluşmaktadır. PV

modüllerdeki direnç güç kayıplarını azaltmak için birçok yenilikçi hücre ve ara bağlantı tasarımı geliştirilmiştir. Bu tasarımlardan biride standart tam boyutlu hücrelerin lazer ile baralara dik bir yönde ortadan ikiye kesilmesiyle üretilen yarım PV hücrelerdir. Güneş hücrelerinden üretilen akım, hücrenin alanıyla orantılıdır. Yarım PV panellerdeki her bir hücre standart paneldeki tam hücreye nazaran yarı boyutta olduğu için aynı voltajda akımın yarısını üretmektedir [9].

Silikon tabanlı tam PV hücrelerdeki toplam seri direnç ($R_{s(tam)}$), ribonun seri direnci (R_r) ve hücrenin seri direncinin (R_c) toplamından oluşmaktadır [6]. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen çıkış gücünün en yüksek değere ulaşabilmesi için bu direnç değerinin mümkün olduğunca küçük olması istenmektedir. Bir güneş hücresinin seri direnci hücrenin alanıyla ters orantılı, ribon direnci ise ribonun uzunluğu ile doğru orantılı olduğundan, seri bağlı n tane kesik hücrenin seri direnci ve ribon direnci aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{c(kesik)} = nR_{c(tam)} \quad (1)$$

$$R_{r(kesik)} = \frac{1}{n} R_{r(tam)} \quad (2)$$

n parçaya kesilmiş hücrenin toplam seri direnci ($R_{s(kesik)}$), hücre ve ribonun seri dirençleri toplanarak bulunur;

$$R_{s(kesik)} = n[R_{c(kesik)} + R_{r(kesik)}]$$

$$= n[nR_{c(tam)} + \frac{1}{n} R_{r(tam)}] \quad (3)$$

Yukarıda verilen eşitliklerden yararlanarak iki parçaya kesilmiş ($n=2$) yarım PV hücrenin toplam seri direnci (R_n) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_h = [2^2 R_{c(tam)} + R_{r(tam)}] \quad (4)$$

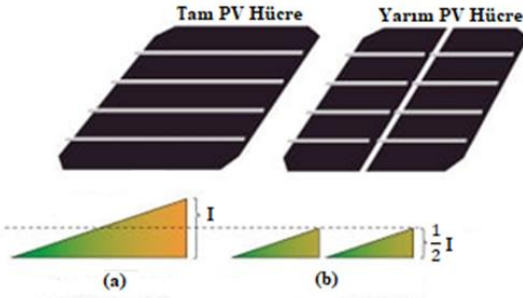
Şimdi de n parçaya kesilmiş hücrenin akım (I_c) formülünü elde edelim. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen akım hücrenin alanıyla doğru orantılı olduğundan n parçaya kesilmiş hücrenin akımı tam boyutlu hücrenin akımının (I), $\frac{1}{n}$ katına eşittir.

$$I_c = \frac{1}{n} I \quad (5)$$

Denklem (5)' den hareketle iki parçaya kesilmiş ($n=2$) yarım PV hücrenin akımı (I_h) aşağıda verilen Denklem (6) ile hesaplanır. Şekil 2' de tam ve yarım PV hücrelerin akımları gösterilmektedir.

$$I_h = \frac{1}{2} I \quad (6)$$

Görüldüğü gibi yarım hücrelerden elde edilen akım tam hücrelere göre yarı yarıya azalmaktadır [10]. Bu da, dört kat daha düşük omik kayıplara ve daha iyi bir doldurma faktörüne yol açmaktadır [11,12,13].



Şekil 2. Fotovoltaik hücrelerin akımları. (a) Tam PV hücrenin, (b) Yarım PV hücrenin

3 Yarım ve tam PV hücrelerin güç kayıplarının incelenmesi

Genellikle optik ve elektriksel kayıplar şeklinde karşımıza çıkan CTM kayıpları fotovoltaik modül üreticileri için sorunlu bir konu olmuştur [14]. Optik kayıplar iç gölgeleme, kaplama camı ve kapsül elemanlarındaki yansımaya ve emilim vb. nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Elektriksel kayıplar ise fotovoltaik modüllerdeki komşu hücreleri birbirine bağlayan ribonlar boyunca taşınan akım nedeniyle oluşan direnç güç kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bu kayıplar modülün çıkış gücünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Geçmişte ribonlardan kaynaklanan direnç kayıplarının azaltılmasına yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. Van Dyk ve Meyer [15] parazitik seri ve şönt dirençlerin PV modül performansı üzerindeki etkisini tartışmıştır. Caballero vd. [16] ön metal ızgara yapısını optimize etmek için PV modüllerin seri direnç modellemesini gerçekleştirmiştir. Kumar vd. [17] bakır şeridin kalınlığının artırılmasının ve hücreden hücreye boşluğun azaltılmasının direnç güç kaybını azaltmaya yardımcı olabileceğini göstermiştir.

Öte yandan, modüllerin yansımaya önleyici katmanlarının optimize edilmesi, bir arka levha reflektörü kullanılarak çıkış gücünün iyileştirilmesi gibi optik kayıpların olumsuz etkilerinin minimize edilmesi amacıyla çalışmalar yapılmıştır [17, 18].

Tüm bu çalışmalara ek olarak son birkaç yıldır güneş modülleri için yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin, hücreden modüle kayıpları azalttığı bildirilmektedir [19, 20, 21]. Bu teknoloji direnç kayıplarına neden olan akımı yarıya indirmektedir. Ayrıca yarım hücreli modüllerdeki ek hücre boşlukları ışık toplanmasını iyileştirerek optik kazancın artmasını sağlamaktadır [22, 23]. Mittag vd. [24] tarafından elen alınan çalışmada, yarım hücre kullanan bir PV modül için %3.6'ya varan güç kazancı ve %0.5'lik verimlilik artışı hesaplanmıştır

Yarım PV hücreler kullanılarak yapılan deneysel bir çalışmada direnç ve optik faydalarının birleşiminin hücreden modüle güç kazancını %4.7 arttırdığı gösterilmiştir [25]. Ayrıca hücrelerin direnç kaybının hücrenin kısa devre akım yoğunluğuna bağlı olması nedeniyle farklı kısa devre akım yoğunluğuna sahip hücreleri yarıya kesmenin faydası da farklı olacaktır. Özellikle günümüzde kısa devre akım yoğunluğu fazla olan yüksek teknoloji panellerde (Perc, 5 bb, 9 bb) yarım hücre teknolojisi kullanmanın faydası büyük olacaktır. Aşağıda verilen denklemlerde tam ve yarım PV hücrelerin güç kayıpları formülize edilmiştir.

Güneş hücrelerindeki direnç güç kaybı ($P_{kayıp}$), akımın karesinin toplam seri dirençle çarpımı olduğundan, n parçaya kesilmiş hücre için aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$P_{kayıp(tam)} = I^2 [R_{c(tam)} + R_{r(tam)}] \\ P_{kayıp(kesik)} = I^2 [R_{c(tam)} + (\frac{1}{n^2}) R_{r(tam)}] \quad (7)$$

Görüldüğü gibi, kesik hücreli modüller için hücre direnç (R_c) kaybında herhangi bir değişimin olmadığı ve güç kaybındaki azalmanın azaltılmış ribon direnci (R_r) kayıbandan kaynaklandığı gözlemlenmektedir. Böylece, ribon üzerindeki nispi güç kaybı düşüşü (P_{R_r}) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [6]. Burada P_{R_r} değerinin olabildiğince düşük olması istenmektedir.

$$P_{R_r} = \frac{P_{ribon\ kayıp\ (tam)} - P_{ribon\ kayıp\ (kesik)}}{P_{ribon\ kayıp\ (tam)}} \\ = 1 - \frac{1}{n^2} \quad (8)$$

Denklem (7), n parçaya kesilmiş hücre için ribondaki güç kaybının $\frac{1}{n^2}$ faktörü ile ölçüldüğünü göstermektedir. Böylece yarım hücreli PV modül için ribon direncinin güç kaybına katkısı $\frac{1}{4}$ olarak belirlenmektedir. Yani ribon direncinden kaynaklanan güç kaybında %75 azalma olmaktadır.

Denklem (7), bir hücre daha fazla parçaya bölünürse ribon üzerindeki güç kaybının daha da azaltılabileceğini göstermektedir. Ancak Denklem (8)'de görüldüğü gibi n büyüdükçe güç kaybı düşüşü artmaktadır. Dolayısıyla güç kaybı düşüşünün faydası azalmaktadır. Bunun sebebi

hücreden elde edilen çıkış gücünün hücre alanıyla orantılı olmasıdır [26]. Ayrıca kesilmiş hücre sayısının fazla olması hücreleri birbirine bağlayan ribon maliyetini arttırmakta ve hücreler arası uyumsuzluk sorunlarına sebep olmaktadır.

Ribon direncinin azalmasının yanı sıra ribon yapılarının optimize edilmesi de modül verimliliğini arttıran faktörler arasında yer almaktadır. Tam hücreli standart PV modüller referans alınarak, farklı ışınım seviyelerinde yarım hücreli PV modüllerdeki ribon yapısı ve ribon genişliğinin optimize edilmesi ile enerji verimliliğinde %1.52 ila %4.97'lik ekstra artışlar meydana geldiği saptanmıştır [27]. Çalışma [25] ile, farklı ribon yapılarının tam ve yarım hücreli PV modüllerin çıkış gücü üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda üçgen ribonlu yarım hücreli modülün çıkış gücünün dikdörtgen ribonlu tam hücreli modüle göre %4.74 lük bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir

4 Yarım ve tam PV hücrelerde gölge etkisinin karşılaştırılması

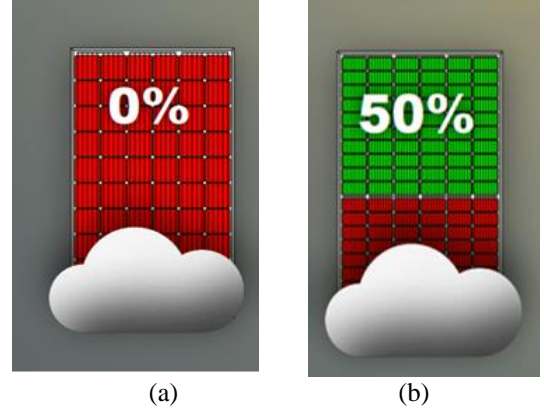
Fotovoltaik panellerin enerji verimi, modül sıcaklığının artmasının yanında en çok tam ve kısmi gölgelenmeden etkilenmektedir. Tam gölgeleme yalnızca enerji verimini azaltırken, kısmi gölgeleme ayrıca modüllerin bozulmasını hızlandırabilir ve erken arızalara yol açabilir. Açık ve geniş alanlara kurulan PV sistemlerde gölgelenme koşulları genellikle sorunlu değildir. Çünkü kendi kendine gölgelenme PV panellerin doğru konumlandırılmasıyla hafifletilebilmektedir [28, 29]. Ancak yerleşim alanlarındaki baca, çatı pencereleri, antenler veya ağaç gibi komşu nesnelerin oluşturduğu kısmi gölgelenmeler önlenemez ve bu gölgelenmeler PV panellerin performansını olumsuz etkilemektedir. PV modül performansı üzerine olumsuz etkileri olan bu gölgelenme davranışını minimize eden bazı alternatif panel teknolojileri sunulmuştur. Bu teknolojilerden bir tanesi yarım hücreli PV panellerdir.

Yarım hücreli PV paneller gölge etkilerine karşı geleneksel tam hücreli PV panellerden daha avantajlıdır. Bunun nedeni bir paneldeki yarım PV hücreleri bağlamak için kullanılan kablolama yöntemidir. Tam hücrelerle kurulmuş geleneksel güneş panellerindeki hücreler, seri kablolama olarak bilinen sıralar halinde birbirine bağlanmaktadır [30]. Geleneksel tam hücreli PV panellerde üç ayrı dizi yer alır ve her bir dizideki hücreler birbirine seri bağlıdır. Bu sebeple herhangi bir dizi içerisindeki tek bir hücrenin gölgelenmesi o dizinin tüm gücünün sıfırlanması demektir. Bu kayba modül bazında bakılacak olursa, modülün toplam gücünün bu üç diziden sağlandığı düşünüldüğünde dizilerden biri güç üretmediği durumda modülden elde edilen gücün üçte biri kaybolacaktır.

Yarım hücreli PV paneller, standart tam hücreli PV panellerle karşılaştırıldığında iki kat hücreye sahiptir. Bu sebeple panel içerisindeki hücre dizilerinin sayısı da iki katına çıkmaktadır. Yarım hücreli PV paneller alt yarım ve üst yarım olmak üzere iki kısımdan oluşur. Bu yarım bir birbirine paralel bağlıdır. Bu tür bir bağlantı şeması, yarım hücreli PV panellerde tek bir hücrenin gölgelenmesi durumunda daha az güç kaybına neden olacaktır (toplam

güç çıkışının yalnızca altıda biri). Çünkü gölgeli bir hücrenin voltajı akımına göre daha az etkilenmektedir.

Yukarıda tam ve yarım hücreli PV paneller için anlatılan gölgelenme davranışı, Şekil 3'de gösterilmektedir. Yarım hücreli PV paneller kısmi gölgelenme sırasında eğer dikey olarak konumlandırılmış ise tam hücreli panellere göre %50 güç tasarrufu sağlayabilmektedir [31, 32]. Bunun nedeni yarım hücreli PV panellerin hücre dizilerinin kısa olması ve aynı zamanda alt ve üst yarımalarının paralel bağlantısıdır. Şekil 3'de verilen panelin dikey olarak konumlandırıldığına dikkat edilmelidir.



Şekil 3. PV panellerin gölgeleme davranışı. (a) Tam hücreli, (b) Yarım hücreli

5 Yarım ve tam PV hücrelerde sıcak nokta etkisi ve iyileştirilmiş ısı dağılımı

Fotovoltaik güneş panelleri birbirine seri bağlandığında hücrelerden herhangi birinin ürettiği akım, diğer hücrelerin ürettiği akımdan daha düşük ise panel yük durumuna geçip ters gerilim oluşturarak güç üretmek yerine güç tüketerek hücrenin ısınmasına sebep olmaktadır. Bu durum sıcak nokta etkisi olarak adlandırılmaktadır. Dolu gibi doğa olayları ya da av mevsiminde saha dışından gelen yorgun bir kurşun darbesi gibi faktörler sonucunda PV modüllerde oluşan çatlak ya da kırıklar çevresel gerilim yaratır. Bu durum güneş hücrelerinin üzerindeki güç dağılımının dengesiz olmasına, bazı bölgelerde aşırı ısınmalara ve sıcak noktaları oluşmasına sebep olmaktadır [33]. Öte yandan hücreler gölgelendiğinde PV sistemde sıcak noktalar meydana gelebilir ki bu, diğer hücrelerin gölgeli hücreyi ters kutuplandırabilecek daha yüksek bir voltaj üretmesine neden olmaktadır. Gölgeli olmayan hücrelerden gelen güç daha sonra gölgeli hücrede dağılır ve hücrenin aşırı ısınmasına neden olur. Bu ısı modül üzerindeki hücrelerin çatlamasına, lehim erimesine ve kapsüllemenin bozulmasına neden olmaktadır [34, 35].

Sıcak nokta etkisi altında kalan hücrenin sıcaklığının 150 °C'nin üzerine çıkması durumunda hücre tamamen bozulabilir. Bu etki, fotovoltaik panellerin çalışma verimini olumsuz yönde etkileyerek modüle ciddi zarar verebilmekte ve modüllerin yanmasına dahi sebep olabilmektedir. Günümüzde hücreleri sıcak nokta etkisine karşı korumak için köprüleme diyotları yaygın olarak kullanılmaktadır, ancak hala sıcak noktalar PV paneller için önemli arıza modları arasında yer almaktadır.

Fotovoltaik alanında yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin düşük akım nedeniyle sıcak noktalara karşı daha az duyarlı olduğu bildirilmektedir [36]. Gölge koşullar altında yarım ve tam boyutlu iki modülün hücre sıcaklıklarını karşılaştırmalı olarak inceleyen bir çalışmada, gölge yarım hücre modülünün maksimum hot spot sıcaklığının, tam hücre modülünden 28 °C daha düşük olduğu görülmüştür [37]. Başka bir çalışmada ise aynı gölgeleme koşulları altında, paralel bağlı hücre alt dizilerinden oluşan yarım hücreli modüllerin sıcak nokta etkisi tam hücre modülleri ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve yarım hücreli modüldeki gölge hücrenin tepe sıcaklığının tam hücreli modüldekinden 19 °C düşük olduğu gözlemlenmiştir [38]. Yarım PV panellerdeki her bir hücre, standart paneldeki tam hücreye nazaran yarı boyutta olduğu için aynı voltajda akımın yarısını üretir. Bu sonuçtan hareketle yarım hücreli modül tasarımının kristal silikon fotovoltaik modüllerdeki sıcak nokta bozulmalarını azaltabileceği saptanmıştır.

6 Yarım ve tam PV hücrelerin ışıma verimliliklerinin karşılaştırılması

Bir güneş hücresinin verimi üzerine düşen ışımının ne kadarını elektrik enerjisine dönüştürdüğü ile ilgilidir. Bu durum Denklem 9 ile gösterilmektedir. Fotovoltaik sistemlerde hücre ve panel verimlilikleri birbirinden farklılık göstermektedir. Örneğin tek kristal silikon bir hücrenin verimi %24 iken, aynı hücreden oluşan panelin verimi %13-17 olabilmektedir. Bunun nedeni PV modüllerdeki CTM kayıplarıdır.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_{hücre}}{I_{ışınım} * A_{hücre}} \quad (9)$$

$P_{hücre}$: hücreden elde edilen çıkış gücü

$A_{hücre}$: hücrenin alanı

Araştırmacılar ilk güneş hücresi üretildikten bu yana hücre verimini arttırmak için teknoloji geliştirmektedir. PV modüllerin çıkış gücünü ve verimliliği arttırmak için hem hücre dönüşüm verimliliklerinde hem de hücre modül oranında iyileşmeler yapılabilmektedir [39].

Yarım hücreli PV modüller azaltılmış elektriksel kayıpları ve arttırılmış optik kazançları sayesinde tam hücreli modüllere göre daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Ayrıca bu modüller daha yüksek güce sahip güneş hücreleri kullanmadan panelin çıkış gücünü arttırabilmektedir. Yarım hücreli PV modüllerin verimlilik değerleri %19.76'lara ulaşmaktadır. Tablo 1'de aynı modül boyutuna, aynı aktif alana ve farklı hücre mesafelerine sahip aynı malzemenin yapılmış 60 tam ve 120 yarım hücreli PV modüllerden elde edilen çıkış gücü ve panellerin verimlilik değerleri verilmektedir. Tablodan hareketle yarım hücreli PV modülün tam hücreli modüle göre çıkış gücünde 8 W'lık ve verim değerinde ise %0.5'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Bu iyileşme, azaltılmış elektriksel kayıplar ve hücre mesafelerinden kaynaklanmaktadır [40]. Elde edilen bu verim değeri farklı hücre teknolojileri, ışınım, sıcaklık vb. gibi verimi etkileyen faktörlere göre artış gösterebilmektedir.

Tablo 1. Yarım ve tam hücreli modüllerin verimlilik değerleri [32]

	Tam PV Hücre	Yarım PV Hücre	
Güç (W)	305	313	+8 W
CTM gücü (%)	98.1	100.7	+%2.6
Verimlilik	18.25	18.73	+%0.5

Yukarıda verilen bilgilerden hareketle yarım hücreli PV modüller, tam hücreli PV modüllerle karşılaştırıldıklarında verimliliklerinin yüksek ve güç kayıplarının az olması nedeniyle metrekare başına daha fazla güç sağlamaktadır. Böylece bu paneller, tam hücreli PV panellerle aynı gücü üretmek için daha az panele ihtiyaç duymaktadır. Bu bağlamda yarım hücreli PV panellerin özellikle sistemin amortisman süresinin düşürülmeye çalışıldığı son yıllarda kullanıcılar tarafından tercih edilmesi ve enerji yatırımcılarının beklentisi olan daha kısa geri dönüş sürelerinin karşılanmasına yardımcı olması beklenmektedir.

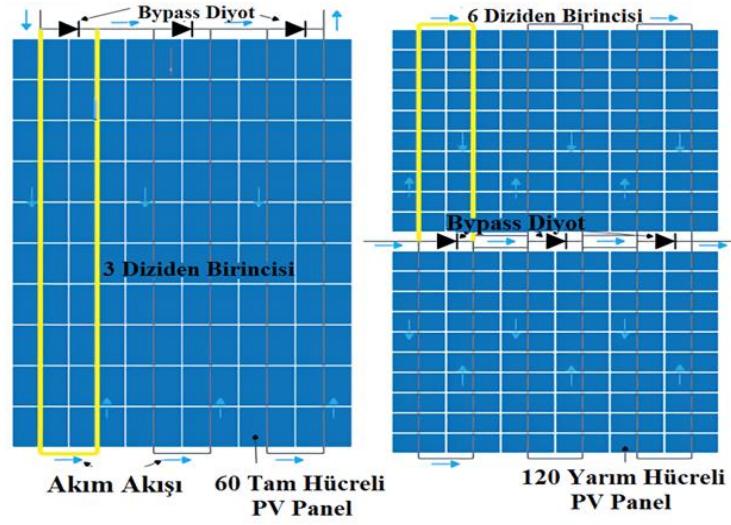
7 Yarım ve tam PV hücrelerin üretim süreçlerinin incelenmesi

Yarıya bölünmüş ve tam boyutlu PV hücreler için üretim süreci farklılık göstermektedir. Geleneksel fotovoltaik paneller tam PV hücreler ile modellenmektedir. Bu paneller genelde 60 ya da 72 adet tam hücrenin seri bağlanmasıyla oluşmaktadır. Ayrıca geleneksel paneller üç adet hücre dizisi içermekte ve her dizi panelin tek bir tarafında yer alan köprüleme diyotuna bağlanmaktadır.

Yarım PV hücreler, modülün görsel görünümünü açıkça değiştirmekte ve yeni bir modül tasarımı gerektirmektedir. Yarım PV hücreler kullanılarak oluşturulan güneş panelleri, yarım hücreli (half cell) veya yarı kesilmiş hücreli (half-cut cell) paneller olarak adlandırılmaktadır. Bu panellerin üretiminde silikon plaka tabanlı poli ve mono hücreler kullanılmaktadır.

Yarım PV hücreler, adından da anlaşılacağı gibi genel güç kayıplarını azaltmak ve daha iyi verimlilik sağlamak için silikon plaka tabanlı tam boyutlu bir hücrenin lazer aracılığıyla ortadan iki parçaya kesilmesi sonucu elde edilmektedir. Yarım hücreli PV paneller, tam hücreli panellerle karşılaştırıldığında iki kat hücreye sahiptir. Bu sebeple panel içerisindeki hücre dizilerinin sayısı da iki katına çıkmaktadır. Yarım hücreli PV paneller alt yarım ve üst yarım olmak üzere iki kısımdan oluşur ve bu yarım bir birine paralel bağlıdır. Ayrıca, paneli istenmeyen etkilere karşı koruyan köprüleme diyotu tam hücreli standart bir PV paneldeki gibi panelin tek bir tarafında değil orta kısımda yer almaktadır. Bu durum Şekil 4'te gösterilmektedir.

Yarım PV hücrelerde kesme işlemi yapılırken dikkat edilmesi gereken konulardan biri, hücrenin yatay ya da dikey olarak kesilmesidir. Hücrelerdeki bara sayısı önemlidir. Bu yüzden kesme işlemi baralara dik bir şekilde yapılmalıdır. Böylece hücrelerdeki bara sayısı etkilenmeden kalacaktır. Ayrıca hücre üretim sürecini standart üretimle uyumlu tutmak için kesme işlemi genellikle hücre üretiminin tamamlanmasından sonra gerçekleştirilir [41].



Şekil 4. GE modül konfigürasyonu

Öte yandan, yarım hücre tasarımı hücrenin verimliliğini ve dayanıklılığını artırmak için; artan bara sayısı, ayrılmış bağlantı kutusu ve hücre pasivasyon teknolojisi vb. gibi bir dizi başka teknikle de desteklenmektedir. Güneş hücreleri bara adı verilen ince şeritler ile metalize edilir. Bara, güneş hücrelerini birbirine bağlamak ve hücrelerde üretilen akımı iletmek için kullanılmaktadır [42]. Hücrelerde kullanılan bara sayısının artmasıyla elektronların ribona ulaşmak için kat etmesi gereken mesafe azalmaktadır. Bu da akım akışını ve panelin güvenilirliğini büyük ölçüde iyileştirmektedir. Ek olarak mesafedeki azalma iç direnci de düşürmektedir. Bu da akımı arttırmakta ve baraların genişliğinin azaltılmasına izin vererek, artan akım üretimi için daha fazla hücre alanını ışığa maruz bırakmaktadır.

Artan bara sayısı ile birlikte hücre direncindeki azalma, hücre verimliliğini hücre başına %0.2'nin üzerinde artırarak panel çıkışına 2 Wp'den daha fazla bir artış sağlayabilmektedir [43]. Beş veya daha fazla baraya sahip paneller, REC tarafından gerçekleştirilen, özellikle termal döngü ve mekanik yük testlerinde yapılan sağlamlık testleri sırasında dayanıklılıkta önemli gelişmeler göstermiştir. Bu durum, daha küçük boyutun izin verdiği daha düşük ribon kesitine atfedilmekte ve hücre üzerindeki mekanik stres miktarını azaltmaktadır.

Yarım hücreli PV modüllerde ayırt edici faktörlerden biride, her biri bir adet köprüleme diyotu barındıran ayrılmış üç bağlantı kutusunun kullanılmasıdır. Bu tasarım, tam hücreli standart panellerdekine kıyasla daha az metalizasyona yol açmakta ve direnç kayıpları sonucu güneş hücresinde meydana gelen ısıyı daha iyi bir şekilde dağıtmaktadır. Ayrıca yarım hücrelerin içerisinde yer alan ekstra boşluklar arka tabakadan hücre yüzeyine yansıyan ışık miktarını arttırmaktadır [44, 45].

Yarım hücreler, PV modülün panel dayanıklılığını artırarak daha uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu hücreler tam hücrelere göre boyut olarak daha küçüktür. Daha küçük hücreler daha az mekanik strese maruz kalmaktadır. Buda onları kırılmalara karşı fiziksel olarak daha dirençli yapmaktadır.

Schneider vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yarım ve tam hücrelerin arka tarafındaki kırılma gerilmelerinin birbirinden önemli ölçüde farklılık gösterdiği, yarım hücrelerin kırılma gerilmelerinin ortalama olarak 200 MPa'dan 150 MPa'ya düştüğü gösterilmiştir [3]. Daha küçük hücreler sayesinde günlük ısınma ve soğumaların sebep olduğu hücrelerdeki genleşme ve daralma miktarları da azaltılmaktadır. Bu sayede hücre çatlaklarıyla karşılaşma ihtimali düşürülmektedir.

8 Yarım ve tam PV hücrelerin fiyat ve performanslarının karşılaştırılması

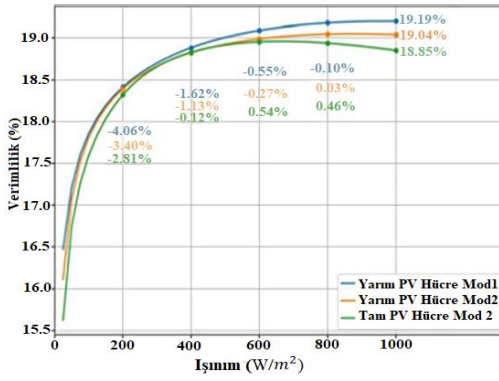
Yarıya bölünmüş hücreler kullanan PV modüller, modül maliyetlerini azaltmak için umut verici bir gelişmedir. Tam hücrelerden yarım hücrelere geçiş sırasında, modül başına düşen hücre sayısı, modül boyutu ve modül içerisindeki hücre aralıkları değişiklik göstermektedir.

Yarım hücreli modüller ek işlem adımları nedeniyle tam hücreli modüllere kıyasla daha yüksek maliyete sahiptir. Ancak, tam hücrelerden yarım hücrelere geçiş yapılırken aktif hücre alanı korunursa, yarım hücre modüllerinin CTM güç oranındaki artışın, ek üretim maliyetlerini fazlasıyla karşılayacağı bildirilmektedir [46].

Yarım hücreli paneller bazı teknik avantajlara sahip olmanın yanı sıra güneş enerjisi yatırımının geri dönüş süresini de azaltmaktadır. Özellikle gölgelenmeye maruz kalan ve alan kısıtlamaları olan yerlerde normal panellere göre çok daha kısa geri dönüş süreleri sağlamaktadır. Bu bağlamda, yarım hücreli paneller müşterilere kaliteden ve çıkış gücünden ödün vermeksizin uygun fiyatlı çözümler sunmaktadır.

Yarım hücreli PV modüllerin, yukarıda verilen avantajlarının yanında bazı üretim dezavantajları da vardır. Bununla birlikte, bu avantajlar yalnızca hücre ayırma işleminin neden olduğu kayıplar ihmal edilebilir olduğunda bir fayda sağlamaktadır. Chiodetti vd. [47] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yarım hücreli PV modüllerin verimliliğinin az ışık koşullarında tam hücreli modüllere göre daha düşük olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada yarım hücreli PV modüllerin her zaman en karlı seçenek olmayabileceği belirtilmektedir. Düşük ışınım ortamında tam hücreli modüllerin hala yarım hücreli modüllerden daha rekabetçi olduğu, ancak yüksek ışınım koşullarında yarım hücrelerin uygun bir seçim olacağı vurgulanmıştır. Çalışmada, aynı teknolojiye sahip iki tane yarım hücreli p-PERC modülü (STC'de 380 Wp) ve bir tane tam hücreli p-PERC modülü (STC'de 370 Wp) kullanılmıştır. Modüllerin verim değerleri çeşitli ışınım seviyelerinde değerlendirilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi yüksek ışınım olarak kabul edilen 1000 W/m² ışınımında baskın olan azaltılmış direnç kayıpları sayesinde yarım hücreli PV modülün verimlilik değeri (% 19.19) tam hücreli modüle (% 18.85) göre daha iyidir. Bununla birlikte, yarım hücreli modüller düşük ışınım olarak kabul edilen 200W/m² ışınımında daha güçlü bir nispi kayba sahiptir. Dolayısıyla verimlilikleri tam hücreli modüle göre daha azdır.



Şekil 5. Yarım ve tam hücreli PV modüllerin ışınım verimliliği eğrileri [47]

Hücreyi ikiye bölmek hücrenin kesilen kenarında ek rekombinasyon ve şönt kaynaklı kenar kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıplar, güneş hücresinin performansını özellikle doldurma faktörünü ve açık devre voltajını önemli ölçüde etkileyecek kadar güçlüdür [48, 49]. Bu nedenle, kesme adımının neden olduğu kenar kayıplarını azaltmak, yarım hücre modül mimarisi için kritik öneme sahiptir.

Bunlara ek olarak lazer ile yarıya bölünen hücreler daha kırılabilir olmakta ve hücreler arasında uyumsuzluk kayıpları ortaya çıkmaktadır. Hücreler arası uyumsuzluk, farklı performans özelliklerine sahip hücrelerin birbirine bağlanması nedeniyle oluşmaktadır. Bu durum iki zararlı etkiye neden olur. Bunlar güç kaybı ve güvenilirlik bozulması şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Güneş hücrelerini ikiye bölmek, hücre kaynaklı kusurların olasılığını artırabilir [50]. Bu dikkate alınması gereken bir sorundur. Ancak, uygun kalite kontrolüne sahip bir üretici bu durumdan büyük ölçüde etkilenmeyecektir. Yarım PV hücreler arasındaki boşluklar nedeniyle neredeyse iki kat daha fazla lehim ve bağlantı noktası gerekmektedir. Bu, hem maliyeti hem de daha fazla bağlantı hatasıyla karşılaşma olasılığını artırmaktadır.

Yukarıda verilen dezavantajlar kontrolün üst seviyede olduğu, üretimin ve hammaddenin denetimlerinin yapıldığı günümüz gelişmiş üretim tesislerinde kolaylıkla minimize edilmektedir. Ayrıca, kesme işlemi her ne kadar güneş

hücrelerinin verimini azaltsa da, bu kayıp ekstra optik kazançlar ve azaltılmış elektrik kayıpları nedeniyle modül imalatından sonra fazlasıyla telafi edilmektedir [51, 52].

9 Sonuçlar

Yapılan incelemeler ile yarım hücreli PV modüllerin tam hücreli modüllere göre ribon direnci, hücre akımı, gölgeleme, sıcak nokta etkisi, çıkış gücü, ışınım verimliliği vb. açısından birçok avantaj sağladığı gösterilerek, bu hücrelerin güneş enerjisi geleceğindeki rolü hakkında bir fikir sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca makalede, gelecek çalışmalara yol göstermesi açısından fotovoltaik alanında yeni bir teknoloji olan yarım PV hücrelerin dezavantajlarında belirtilmektedir. Bu dezavantajlara rağmen yarım PV hücrelerin toplam güç ve verimlilik açısından kazanımlarının oldukça fazla olduğu ve özellikle yüksek verimli güneş hücreleri kullanıldığında PV modüllerin maliyetini düşürme potansiyeline sahip olduğu saptanmıştır. Bunun yanında, yarım hücreli modüllerin düşük elektrik kayıpları nedeniyle, yüksek güneşlenme seviyelerine sahip yerlerde tam hücreli modüllere göre daha iyi performans gösterdiği ve daha düşük akım sayesinde hücrenin ön tarafındaki gölgelendirmeyi azaltan ve çıkış gücünü arttıran daha dar baraların kullanılmasını sağladığı sonucuna varılmıştır. Ek olarak, fotovoltaik panellerde yarım hücre kullanımının sağladığı daha düşük bir hot spot sıcaklığının kapsülleme hasarı, lehim erimesi ve termal stres kaynaklı hücre çatlamalarının neden olduğu modül arıza riskini azaltarak modül verimliliğini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında, yarım hücreli modül tasarımının kristal silikon fotovoltaik modüllerdeki hot spot bozulmasını azaltarak sıcak noktaların modül dayanıklılığı ve ömrü üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak için önemli bir tasarım aracı olabileceği söylenebilir.

Çıkar çatışması:

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] L. E. Chaar L.A. lamont, and N. E. Zein, Review of Photovoltaic Technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(5), 2165-2175, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.004>
- [2] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>, Erişim Tarihi: 21.01.2022
- [3] J. Schneider, S. Schoenfelder, S. Dietrich, and M. Turek, Solar module with half size solar cells. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 185-189, Amsterdam, Niederlande, 2014.
- [4] I. M. Peters, Y. S. Khoo, and T. M. Walsh, Detailed current loss analysis for a PV module made with textured multicrystalline silicon wafer solar cells. IEEE Journal of Photovoltaics, 4(2), 585-593,2014. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2295736>
- [5] <https://www.solarpowerworldonline.com/2018/10/wh-at-is-a-half-cell-solar-panel/>, Erişim Tarihi: 07.01.2022

- [6] S. Guo, J. P. Singh, I. M. Peters, A. G. Aberle, and T. M. Walsh, A quantitative analysis of photovoltaic modules using halved cells. *International Journal of Photoenergy*, 2013, 0-8, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/739374>
- [7] International technology roadmap for photovoltaic <http://www.itrpv.net/cm4all/>, Erişim Tarihi: 07.10.2021
- [8] A. Joshi, A. Khan, and A. Sp, Comparison of half cut solar cells with standard solar cells. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, pp. 10-12, Dubai, United Arab Emirates, 2019.
- [9] S. Guo, J. Schneider, F. Lu, H. Hanifi, M. Turek, M. Dyrba, and I.M. Peters, Investigation of the short-circuit current increase for PV modules using halved silicon wafer solar cells. *Solar Energy Material & Solar Cells*, 133, 240–247, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.11.012>
- [10] T. Tang, C. Gan, Z. Hu, H. Niu, J. Si, and X. Luo, A Quantitative Comparison Between Double Glass Photovoltaic Modules Using Half-Size Cells and Quarter-Size Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1298 – 1303, 2017. [10.1109/JPHOTOV.2017.2730358](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2730358)
- [11] H. Hanifi, M. Pander, U. Zeller, K. Ilse, D. Dassler, M. Mirza, M.A. Bahattab, B. Jaekel, C. Hagendorf, and M. Ebert, Loss analysis and optimization of PV module components and design to achieve higher energy yield and longer service life in desert regions. *Applied Energy*, 280, 116028, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116028>
- [12] H. Hanifi, D. Dassler, J. Schneider, M. Turek, S. Schindler, and J. Bagdahn, Optimized Tab Width in Half-cell Modules. *Energy Procedia*, 92, 52–59, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.009>
- [13] J. Muller, D. Hinken, S. Blankemeyer, H. Kohlenberg, U. Sonntag, K. Bothe, T. Dullweber, M. Kontges, and R. Brendel, Resistive Power Loss Analysis of PV Modules Made from Halved $15.6 \times 15.6 \text{ cm}^2$ Silicon PERC Solar Cells with Efficiencies up to 20.0%. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5, 189–194, 2015. [10.1109/JPHOTOV.2014.2367868](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2014.2367868)
- [14] V. Tyagi, N.A. Rahim, N. Rahim, and L. Selvaraj, Progress in solar PV technology: research and achievement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 443-461, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>
- [15] E. E. van Dyk and E. L. Meyer, Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 29(3), 333–344, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00250-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00250-7)
- [16] L. J. Caballero, P. Sanchez-Friera, B. Lalaguna, J. Alonso, and M. A. Vazquez, Series resistance modelling of industrial screen printed monocrystalline silicon solar cells and modules including the effect of spot soldering. *Proceedings of the 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 1388–1391, Waikolo, Hawaii, USA, 2006.
- [17] N. D. Kumar, C. Mounika, T. Sailaja, and D. Mounika, Design and reduction of wattage losses in solar module using AR coating, cell-to-cell gap and thickness. *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*, pp. 42–47, Hyderabad, India, 2011.
- [18] W. S. Su, Y. C. Chen, W. H. Liao, C. H. Huang, D. C. Liu, M. Y. Huang, Z. C. Wu, and S. J. Ho, Optimization of the output power by effect of backsheet reflectance and spacing between cell strings. *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3218–3220, Seattle, Wash, USA, 2011.
- [19] S. Roberts, K. C. Heasman, and T. M. Bruton, The reduction of module power losses by optimisation of the tabbing ribbon. *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 2378–2382, Glasgow, United Kingdom, 2020.
- [20] A. Thomson, M. Ernst, I. Haedrich, and J. Qian, Impact of PV module configuration on energy yield under realistic conditions. *Optical and Quantum Electronics*, 49(2), 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0903-0>
- [21] I. Haedrich, U. Eitner, M. Wiese, and H. Wirth, Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power. *Solar Energy Material Solar Cells*, 131, 14–23, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.06.025>
- [22] K. R. McIntosh, R. M. Swanson, and J. E. Cotter, A simple ray tracer to compute the optical concentration of photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics*, 14(2), pp. 167–177, 2006. <https://doi.org/10.1002/pip.647>
- [23] H. Yousuf, M.A. Zahid, M.Q. Khokhar, J. Park, M. Ju, D. Lim, Y. Kim, E.C. Cho, and J. Yi, Cell-to-Module Simulation Analysis for Optimizing the Efficiency and Power of the Photovoltaic Module. *Energies*, 15, 1176, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15031176>
- [24] M. Mittag, A. Pfreundt, J. Shahid, N. Wöhrle, and D. H. Neuhaus, Techno-economic analysis of half cell modules: The impact of half cells on module power and costs. *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, pp. 9-13, Marseille, France, 2019.
- [25] J. Jiang, J. Ni, Y. Zhang, D. Rong, Y. Li, T. Feng, Y. Geng, J. Zheng, F. Bo, and Y. He, Optimizing ribbons structure for power gain in half-cell modules. *IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 3442-3445, Chicago, USA, 2019.
- [26] A. Luque, and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2010.
- [27] M. Alçı ve S. Duman, Investigation of the effect of hot spot behavior and ribbon optimization on energy efficiency in half PV cells. *9th International Advanced*

- Technologies Symposium, pp. 156-161, Türkiye, 2021.
- [28] K. Brecl and M. Topic, Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays. *Renewable Energy*, 36(11), 3211–3216, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.011>
- [29] K. Brecl, M. Bokalic, and M. Topic, Annual energy losses due to partial shading in PV modules with cut wafer-based Si solar cells. *Renewable Energy*, 168, 195-203, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.059>
- [30] T. Tang, C. Gan, Z. Hu, H. Niu, J. Si, and X. Luo, A Quantitative Comparison Between Double Glass Photovoltaic Modules Using Half-Size Cells and Quarter-Size Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1298 – 1303, 2017. [10.1109/JPHOTOV.2017.2730358](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2730358)
- [31] H. Hanifi, J. Schneider, J. Bagdahn, H. Anhalt, and J. Bagdahn, Reduced shading effect on half-cell modules-measurement and simulation. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2529-2533, Hamburg, Germany, 2015.
- [32] <https://www.ise.fraunhofer.de/>, Erişim Tarihi: 24.12.2021
- [33] M. Sayed, and L. Partain, Effect of shading on CdS CuxS solar cells and optimal solar array design. *Energy Conversion*, 14(2), 61-71, 1975. [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(75\)90083-2](https://doi.org/10.1016/0013-7480(75)90083-2)
- [34] D. C. Jordan, T. J. Silverman, J. H. Wohlgemuth, S. R. Kurtz, and K. T. VanSant, Photovoltaic failure and degradation modes. *Progress in Photovoltaics*, 25(4), 18–326, 2017. <https://doi.org/10.1002/pip.2866>
- [35] M. C. Alonso Garcia, W. Herrmann, W. Bohmer, and B. Proisy, Thermal and electrical effects caused by outdoor hot-spot testing in associations of photovoltaic cells. *Progress in Photovoltaics*, 11(5), 293-07, 2003. <https://doi.org/10.1002/pip.490>
- [36] M. Waqar Akram, G. Li, Y. Jin, C. Zhu, A. Javaid, M. Zuhaib Akram, and M. Usman Khan, Study of manufacturing and hotspot formation in cut cell and full cell PV modules. *Solar Energy*, 230, 247-259, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.052>
- [37] J. Qian, A. Thomson, A. Blakers, and M. Ernst, Comparison of half-cell and full-cell module hotspot-induced temperature by simulation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(3), 834–839, 2018. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2018.2817692>
- [38] J. Qian, C.E. Clement, M. Ernst, Y.S. Khoo, A. Thomson, and A. Blakers, Analysis of hotspots in half cell modules undetected by current test standards, *IEEE Journal of Photovoltaics* 9(3), 842–848, 2019. [10.1109/JPHOTOV.2019.2898209](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2898209)
- [39] T. Jung, H. Song, H. Ahn, G. Kang, A mathematical model for cell-to-module conversion considering mismatching solar cells and the resistance of the interconnection ribbon. *Solar Energy*, 103, 253–262, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.032>
- [40] <https://www.pveasy.com.au/blog/2018/7/panels-with-half-cut-cells>, Erişim Tarihi: 2.02.2022
- [41] F. Gerenton, J. Eymard, S. Harrison, R. Clerc, and D. Munoz, Analysis of edge losses on silicon heterojunction half solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 204, 110213, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110213>
- [42] S. Braun, G. Hahn, R. Nissler, C. Pönisch, and D. Habermann, Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption. *Energy Procedia*, 38, 334–339, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.286>
- [43] https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/whitepaper_twinpeak_technology.pdf, Erişim Tarihi: 20.01.2022
- [44] S. Eiternick, F. Kaule, H.U. Zühlke, T. Kießling, M. Grimm, S. Schoenfelder, and M. Turek, High Quality Half-cell Processing Using Thermal Laser Separation. *Energy Procedia* 77, 340–345, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.048>
- [45] L. Xia, J. Chen, K. Liao, L. Huang, Q. Li, and X. Luo, Influence of laser cutting conditions on electrical characteristics of half-size bifacial silicon solar cells. *Materials Science Semiconductor Processing*, 105, 104747, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104747>
- [46] M.T. Sarniak, Modeling the Functioning of the Half-Cells Photovoltaic Module under Partial Shading in the Matlab Package. *Applied Sciences*, 10(7), 2575, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10072575>
- [47] M. Chiodetti, J. Dupuis, D. Boubilil, K. Radouane, and P. Dupeyrat, Half-cell module behaviour and its impact on the yield of a pv plant. 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1444-1448, Marseille, France, 2019
- [48] S. Eiternick, K. Kaufmann, J. Schneider, and M. Turek, Loss analysis for laser separated solar cells. *Energy Procedia*, 55, 326–330, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.08.094>
- [49] A. Fell, J. Schön, M. Müller, N. Wöhrle, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, Modeling of edge recombination losses in half-cells. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 8(2), 853–856, 2017.
- [50] D. Roche, H. Outhred, and R.J. Kaye, Analysis and control of mismatch power loss in photovoltaic arrays. *Progress in Photovoltaics*, 3(2), 115-127, 1995. <https://doi.org/10.1002/pip.4670030204>
- [51] Z. Yang, K. Liao, J. Chen, L. Xia, and X. Luo, Output performance analysis and power optimization of different configurations half-cell modules under partial shading. *Optik*, 232, 166499, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166499>
- [52] S. Malik, D. Dassler, J. Fröbel, J. Schneider and M. Ebert, Outdoor data evaluation of half/Full-Cell modules with regard to measurement uncertainties and the application of statistical methods. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 3269-3273, Amsterdam, Niederlande, 2014.

