

# FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİYE GİRİŞ

**Henry Kelly**

Derleyen:  
**Erkan Afacan**  
G.Ü. Müh. Mim. Fak.  
Elektrik-Elektronik  
Mühendisliği Bölümü

*“Bir on yıllık  
alan deneyimi,  
fotovoltaik  
sistemlerin  
onyıllar boyunca  
asgari bakım ve  
yüksek  
elverişlilikle  
işletilebileceğine  
açık kanıt  
sağlamaktadır”.*

**F**otovoltaik (FV) etki 1839'dan beri bilinmesine rağmen, pratik uygulamalar FV hücrelerin ABD uzay programında kullanıldığı 1970'lerin ilk yıllarında başladı. Program bir dizi buluşa yol açtı ve fiyatlar düşüktüce, ticari üreticiler artan sayıda kara tabanlı uygulama için FV sistemler satabildiler. 1990'da dünya çapında FV satışlar 48 Megawatt'a ulaşmıştır ve haberleşme sistemleri (yüzde 21), şamandıralar, diğer ulaşım ile ilgili sistemler (yüzde 9) ve pompalama istasyonları (yüzde 6) gibi daha büyük ölçekli pazarları olduğu kadar, 1989'da ABD satışlarının yüzde 22'sini temsil eden cep hesap makineleri ve diğer tüketim eşyaları gibi küçük ölçekli pazarları da içermiştir. Deneysel amaçlı şebekeye bağlı sistemler 1989'da ABD satışlarının yüzde 10'unu oluşturmuştur; müstakil evler ve diğer elektrik gücü uygulamaları için güç dizileri satışların yüzde 20'sini oluşturmuştur.

Bir on yıllık alan deneyimi FV sistemlerin onyıllar boyunca asgari bakım ve yüksek elverişlilikle işletilebileceğine açık kanıt sağlamaktadır.

## **FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİNİN TEMEL ÖZELLİKLERİ**

FV donanım, şimdi dünya elektriğinin çoğunu sağlamakta kullanılan fosil-yakıt-güçlü donanımdan köklü biçimde ayrıldığından, FV'lerin kendilerine özgü yararlar

ve problemler sunması şartıcı değildir.

FV güç, yalnızca güneş varken elektrik üretilebildiğinden kesintilidir. Fakat böylesi güneşli dönemler genellikle gücün en değerli olduğu zamanlardır. FV sistemlerinin çıktısı, tipik olarak özellikle sıcak yaz günlerinde soğutma sistemlerinin maksimum talep yarattığı güney bölgelerde yüksek elektrik talebinin ortaya çıktığı dönemlerle ilişkilidir. Sistem talebinin maksimum olduğu zamanlarda bir hizmetin maliyeti de yüksek olduğundan, FV güç, genellikle, sürekli olarak çalışması gereken santrallerin gücünden daha değerlidir.

Dahası, FV sistemler yapıları gereği modülerdirler ve elektriğin tüketildiği yerlerin yakınına yerleştirilebilirler. Son kullanıcının yakınındaki üreteç sistemleri iletim ve dağıtım maliyetlerini azaltabilir ve verilen elektrik hizmetlerinin güvenilirliğini artırabilir. FV teknolojinin modüler niteliği, aynı zamanda FV dizileri için hiçbir uygun yer sıkıntısı olmadığı anlamına da gelir; tek gereksinme güneş ışığına erişimdir. Açık alanların değerli olduğu kentsel bölgelerde bile, çatılar ve park alanları FV diziler için mükemmel yerlerdir. Dahası, birimlerin göze çarpmaması, bunların görsel etkisini en aza indirir. FV'lerin modüler niteliği şirketlerin gereksinme duyuldukça birimleri anında getirebilecekleri ve böylece uzun dönemli yük öngörüsünden kaynaklanan risklerin azalacağı anla-

mina gelir.

Olası problemlere karşı önlem almaya dikkat edilirse, FV donanımın yaygın kullanımının çevreye ya da güvenliğe zarar vereceğine inanmak için hiçbir ciddi neden yoktur. Bazı FV üretim yöntemlerinde hidrojen selenit gibi zararlı malzemeler ve diğer yarıiletken cihazların üretiminde kullanılanlara benzer çözücüler kullanılır. Eğer üretim sırasında modern atık minimizasyonu ve geri kazanma teknikleri kullanılırsa, riskler düşük düzeylere indirilebilir. Kadmiyum ve diğer ağır metalleri içeren modüllerin elden çıkarılması çevre problemleri yaratabilse de, kullanım dışı kalan modüller, atık problemlerini en aza indirmek üzere, ekonomik olarak geri kazanılabilir.

### SİSTEM BİLEŞENLERİ

Bütün FV sistemler iki temel öğeden oluşur: 1) Fotovoltaik modül 2) Modüle destek sağlayan ve bazı uygulamalarda güneşin görünür hareketini izleyen dayanak yapısı. Bir "modül", ışığa duyarlı hücrelerden ve hücreleri çevreden koruyan örtü malzemelerinden oluşur. Bazı modüllerde destek yapılarına bağlantı için katı çerçeve de vardır. Modüllerde ışığı FV hücrelere odaklayan aynalar ya da lensler de olabilir.

Uygulamaların çoğunda FV hücrelerin ürettiği doğru akım yerine alternatif akım gerektiğinden, FV sistemlerin çoğunda dönüştürme yapan çeviriciler de vardır. Ayrıca, bir hizmet şebekesine bağlı olmayan FV sistemler, tipik olarak, geceleyin ve bulutlu zamanlarda güç sürekliliğini sağlamak için depolama bataryaları da kullanılırlar. Ancak, elektrik taleplerinin gündüz maksimum olduğu bölgelerde, FV sistemler şebekeye bağlandığında, elektrik depolanmasının değeri gerçekten azalır.

### TASARIM STRATEJİLERİ

FV sistem maliyetlerini düşürmek için iki temel strateji izlenmektedir. Birincisi, düşük bir maliyetle geniş aktif malzeme alanları üreterek FV modüllerin maliyetini düşürmektir. Bunlar, "düz-plaka" sistemler olarak adlandırılır. İkinci strateji, ışığa duyarlı malzemelerin geniş alanlarını kullanmaktan kaçınır ve bunun yerine küçük bir aktif malzeme alanı üzerine güneş ışığını odaklayan lensler ya da diğer optik cihazlar kullanır. Bunlara "yoğunlaştırıcı" sistemler denir.

Bugün dünyada kullanılan FV sistemlerin hemen hemen tümü düz-plaka sistemlerdir. Bazı sistemler güneşi izlemek üzere dö-

nerken, çoğunun dayanağı sabittir ve hiçbir hareketli parçası yoktur. Esas problem, aktif FV malzemenin büyük miktarlarda kitlesel üretimin ve böylece maliyeti düşürmenin bir yolunu bulmaktır.

Düz-plaka maliyetlerini düşürme stratejileri iki ana kategoride incelenebilir: 1) Üretilen hücrelerin maliyetini düşürmek 2) Cama ya da diğer altaşlara FV malzemelerin küçük miktarlarda (bir mikrondan daha az) uygulanmasıyla üretilen ince film hücrelerin üretimini mükemmelleştirmek. 1990' da satılan modüllerin yaklaşık yüzde 45'i geleneksel kristal malzemelerden ve yüzde 35'i ince filmlerden yapılmıştı. Kristal malzeme maliyetlerini düşürme teknikleri, FV hücrelere çok benzeyen basit silisyum diyotlar gibi yarıiletken cihazların maliyetini düşürme stratejisine çok benzer. FV ince filmi, kitlesel üretmek üzere tasarlanan donanım, cam üzerine ince örtülerin yerleştirilmesinde kullanılan donanıma benzer.

Düz-plaka donanımın maliyeti, dizinin verimliliğinin bir ölçüsü olan dizinin metrekaresi başına üretilebilecek enerji miktarına son derece duyarlıdır. Hava şartlarına dayanıklılık için kullanılan cam ve örtü m<sup>2</sup> başına en azından

## GÜNEŞ FOTOVOLTAİK N E D İ R ?

Güneşfotovoltaik güneş ışığının doğrudan elektrik gücüne çevrilmesine olanak sağlar. Bu dönüşüm fotovoltaik etki ile ya da ısıyan güneş ışığı ile güneş hücresinin yarıiletken malzemesi arasındaki etkileşimle gerçekleşir. Bu, metal bağlantılarla iletilen elektriksel yükler üretir. Üretilen doğru akım, AC/DC çevirici bağlanarak şebeke için uygun alternatif akıma dönüştürülebilir. Fotovoltaik üretimin en önemli aşesi güneş hücresi ya da fotovoltaik hücredir. Bir dizi güneş hücresi bir elektriksel birimde, güneş modülünde seri ya da paralel olarak birleştirilir.

## FOTOVOLTAİK VERİMLİLİK YÜZDESİ

	ALAN DENEYİMİ (MODÜLLER)*	PROTOTİP MODÜLLER	DENEYSEL HÜCRELER*	TEORİK LİMİT
<b>DÜZ PLAKA</b>				
Kristal Silisyum	10-12	17,8	24,2	30-33
Çoklu kristal silisyum	8-9		18,2	
Tek-eklemlı α-Si	3-5	5*	6	27-28
Çok eklemlı α-Si	6*	10,2*	10*	
Mekanik olarak yığılmış α-Si ve CIS			15,6*	4,2
CIS		11,1	14,8	23,5
CdTe		10,0	15,8	27-28
<b>YOĞUNLAŞTIRICILAR</b>				
GaAs		22	28	
CdTe			34	

- a) Alanda karşılaşılan tozun ve diğer faktörlerin etkisi içerilmiştir. Verimlilikler, tersi söylenmedikçe karartı verimliliklerdir. (α-Si hücreleri çalışmalarının birinci yılında verimliliklerini kaybederler)
- b) Deneysel hücreler tipik olarak 1-4 cm<sup>2</sup>'dir. Alandaki modüller, örtü malzemeleri hücrelere ulaşan ışığı azaltıklarından, deneysel hücrelerden daha az verimlidirler.
- c) Mekanik olarak yığılmış α-Si ve CIS hücreleri için verimlilik, karartı verimlilik değildir.

15 dolar veya 20 dolar tutar; kurma ve yer maliyetleri gelişkin pazarlarda bile maliyeti m<sup>2</sup> başına 30-50 dolar artıracaktır. Böyleli maliyetler, aktif hücre malzemeleri ve hücre üretim maliyeti sıfır bile olsa, yüzde 10 verimli bir modülün kWh başına 2,5 ve 3,5 sente elektrik üreteceği anlamına gelir. Verimliliği yüzde 9 veya yüzde 10'dan daha düşük modüllerin uygun sınırlı pazarların ötesine uzanması olası görünmemektedir.

Düz-plaka sistemlerde maliyet indirimi hakkında iyimser olmak için iki neden vardır: 1) Test hücrelerinde teorik verimlilik sınırlarına çok yaklaşan, ticari sistemlerde sunulanlardan daha yüksek verimlilik elde edilebileceği gösterilmiştir. (Bkz. Tablo-1) 2) Var olan düz-plaka sistemlerinin çoğu emek-yoğun, toplu sistemlerle üretilmektedir. Kitle üretim yöntemleri kullanılırsa, belirgin maliyet düşmeleri ortaya çıkacaktır. Yoğunlaştırıcı sistemlerin maliyeti de sistem verimliliğine (bu durumda hem optik yoğunlaştırıcı-

ların verimliliğine ve hem de hücrenin verimliliğine) kritik olarak bağlıdır. Yoğunlaştırıcılar güneş ışığını, ışığı hücre malzemesinin görece küçük bir bölgesine odaklayan pahalı olmayan lens ya da ayna malzemeleriyle yakalarlar. Hücreler, sistemin yakaladığı alanın beşte biriyle yüzde birini kapladığından, yüksek çevirme verimliliği elde etmek için birim hücre alanı başına görece yüksek fiyat ödenebilir. (Bkz. Tablo-1)

Yoğunlaştırıcıların hareketli parçaları olabilmesine rağmen, günde yalnızca bir dönüş (30 yıldan daha uzun bir sürede 11.000 dönüş) yaparlar ve tümüyle güvenilir olabilirler. Düz-plaka sistemlerden farklı olarak, yoğunlaştırıcılar dağınık güneş ışığını (bulutlardan ya da nemden saçılan ışık) kullanamazlar. Sık sık bulut örtüsüyle kaplanan bölgelerde belirgin olan bu dezavantaj, yoğunlaştırıcı sistemlerin çoğunun güneşi izlemesi ve böylece günün erken ve geç saatlerinde, bu saatlerde yalnızca eğik ışık alan sabit sistemlerden daha çok enerji alması

gerçeği tarafından kısmen telafi edilir. Orta ve iyi iklimlerin çoğunda, yoğunlaştırıcılar için elverişli enerji, sabit düz-palaka sistemler için elverişli enerjinin yüzde 15'i civarındadır.

### FOTOVOLTAİK ELEKTRİĞİN MALİYETİ VE DEĞERİ

FV elektrikliğin maliyeti, yerdeki elverişli güneş ışığının miktarına, modüllerin ve diğer sistem parçalarının (kurma vb.) maliyetine, sistemi işletmenin ve parçaları değiştirmenin maliyetine dayanır. Donanım bir tarlaya kurulmuşsa, yer düzenleme, çit çevirme maliyeti ve tarla kiralari da düşünülmemelidir.

Maliyet indirimi üzerindeki çalışmaların çoğu modül maliyetleri üzerinde odaklanmıştır. Düz-plaka FV modüllerin ortalama satış fiyatı tepe değeri cinsinden watt başına (sabit dolar üzerinden), 1976'da 20 dolardan, 1984'te 7,1 dolara düştü. Tepe değeri cinsinden watt başına 6,2 dolar olan 1990 ortalama fiyatı, gerçekte, ta-

lep arzından daha hızlı büyüdüğünden, 1987'deki fiyattan hafifçe daha yüksektir. Fakat modül maliyetleri, tipik olarak, son zamanlarda kurulan FV sistemlerin tepe değeri cinsinden watt başına 10-15 dolarlık maliyetinin yalnızca yüzde 50-60'ına karşılık gelir. Hem modüller, hem de ilgili donanım için belirgin maliyet indirimlerinin olması gerekmektedir. FV elektriğin değeri yerel koşullara talep ile elverişli güneş ışığı arasındaki ilişkiye, hizmet verilen yüklerin niteliğine, güç üretimi için uygun diğer cihazların (benzin, kömür ve hidroelektrik donanım gibi) maliyetine ve performansına, diğer çeşitli faktörlere son derece duyarlıdır. FV sistemlerin, soğutma sistemlerinin FV gücün güvenilir biçimde elverişli olduğu sıcak yaz günlerinde maksimum elektrik talebi yarattığı ABD'nin güneyi gibi bölgelerde özellikle değerli olduğu kanıtlanmıştır.

FV sistemlerin hem maliyeti hem de değeri sistemin boyutuna ve yerine bağlıdır. FV sistemler, yapıları gereği, modülerdir ve tüketicilerin yakınına -hatta çatılara kolaylıkla yerleştirilebilirler. Kullanıcılara yakın sistemler iletim ve dağıtım cihazları gereksinimini azaltabilir ve yerel elektrik hizmetinin güvenilirliğini artırabilir. Çatıların ve diğer yapıların kullanılması, kurma maliyetlerini düşürebilir. Hatta, uzak bölgelerdeki daha büyük sistemler kurulurken ölçüde ekonomisinden yararlanabilirler, genel masrafları ve fiyat yükselmelerini de düşürebilirler. Pazarın bu faktörleri nasıl düzenleyeceğini öngörmek için şimdi vakit çok erkendir ve FV kurulumlarının optimum büyüklüğü hakkında hiçbir açık ifadelendirilmedi bulunulamaz.

1990 fiyatlarıyla, FV sistemler yalnızca büyük bir hizmet şebekesine bağlanmanın pratik olmadığı durumlarda ekonomiktir. Fakat ABD'de bile şebeke dışı sis-

temler için büyük pazarlar vardır. Yeni bir hizmet hattı çekmekle, bağımsız bir FV sistem kurmak arasındaki seçim, hem yerin enerji gereksinmesine hem de yeni bir hizmet hattının şebeke hizmeti sağlamak için uzanması gereken mesafeye bağlıdır. Yere çok az bir güç gerekiyorsa, yeni bir hat için gereken direkler ve trafolar makul değildir. Mevcut fiyatlarla aylık 8 kWh'den daha küçük yükü olan bir yer için 65 metrelik hizmet hattı uzatmaktansa, bağımsız bir FV sistem kurmak daha ucuzdur. Aylık 300 kWh güç gerektiren yerler için FV güç 3000 metre şebeke uzantısından daha az pahalı olacaktır. Pek çok yerin iyice gelişmiş hizmet şebekelerinden uzakta olduğu gelişmekte olan uluslarda potansiyel pazarlar özellikle büyüktür.

Ancak, ortalama ve iyi güneş ışığı alan bölgelerde şirket-finanslı FV sistemler 2000'den önce kWh başına 10-15 sente güç üretecektir (Bkz. Şekil-1). Bu fiyata, FV donanım, halihazırda şebekeye bağlı olan yerlerde bile bir dizi uygun pazarda yarışabilecektir. Orta ve uzun dönemde, ince film düz-plaka ve yoğunlaştırıcı sistem çeşitlerinden herhangi birinin, iklime

bağlı olarak kWh başına 3,5-7 sente güç sağlaması beklenebilir. Bu gerçekleşirse, muhtemelen FV pazarlar özellikle yaz maksimumlarının olduğu bölgelerde uzak veya uygun pazarlara hızlı biçimde genişleyebilecektir.

2000'e kadar FV donanım, yeni hizmet yatırımlarının belirgin bir parçası olacaktır. Yazın maksimumu çıkan bir hizmette, FV sistemler, FV donanım hizmet enerjisinin yüzde 10-15'ini sağlayana kadar maksimum ya da ortalama sistemlerle doğrudan yarışacaktır. Bu noktada, FV donanım hizmetin maksimumunu kaydırmaya başlar ve FV donanım daha az pahalı olan temel yük donanımıyla yarışmalıdır. Fakat pek çok bölgede, FV donanım katı, temiz hava standartlarına uyan temel yük donanımından elde edilen güçle (kWh başına 4-6 sent) yarışabilir. Temel yük gücünün maliyeti, gelişkin donanım kullanılsa azalacaktır.

\*Henry Kelly - Introduction To Photovoltaic Technology - s. 297 vd. Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity içinde (Edited by Thomas B. Johansson, Henry Kelly, Amulya K. N. Reddy, Robert H. Williams: Island Press



**Şekil-1:** Kamu şirketleri (yüzde 6 gerçek indirim oranı) ve özel yatırımcılar (yüzde 12 gerçek indirim oranı) için tipik sermaye maliyetleriyle finanse edilen FV sistemlerden üretilen elektriğin maliyeti. Yakın dönem sistemleri 2000'e kadar ve orta/uzun dönem sistemleri de 2000'den kısa bir süre sonra hazır olacaktır. Eğriler, gösterilen periyotlarda hazır olabilecek alternatif tasarımların maliyetini göstermektedir. Maliyetler, herhangi bir tür vergi ödenmediği varsayımıyla hazırlanmıştır.