

TEMİZ ENERJİ YAYINLARI

GÜNEŞ PİLLERİ

GİRİŞ.....	2
GÜNEŞ IŞINIMI.....	3
GÜNEŞ PİLLERİ	4
YARI-İLETKENLERİN KATKILANMASI.....	6
P-N EKLEM DİYOTLAR.....	7
GÜNEŞ IŞINIMI ALTINDA P-N EKLEM DİYOT	8
FOTOVOLTAİK DİYOTLARIN ÜRETİMİNDE TEMEL ÖLÇÜTLER.....	9
FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİ İÇİN MALZEMELER.....	11
· ÇOK KRİSTALLİ SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİ.....	11
İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİ.....	12
AMORF SİLİSYUM GÜNEŞ PİLLERİ	12
· KADMİYUM TELLÜR İNCE FİLM GÜNEŞ PİLLERİ	13
BAKIR İNDİYUM DİSELENİD GÜNEŞ PİLLERİ.....	15
GÜNEŞ PİLİ VERİMLİLİKLERİ.....	16
FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ	17
PV GÜÇ SİSTEMLERİNİN FİYATLARI	18
GELECEK VE ÖNERİLER	19

FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİ VE GÜÇ SİSTEMLERİ

GİRİŞ

Güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar) üzerine güneş ışığı düştüğünde, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren düzeneklerdir. Bu enerji çevriminde herhangi devingen (hareketli) parça bulunmaz. Güneş pillerinin çalışma ilkesi, Fotovoltaik (Photovoltaic) olayına dayanır. İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilim, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katlarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gösterilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyum a dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1, değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini %6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin et al . (1) tarafından silikon kristali üzerine gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960' lann başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

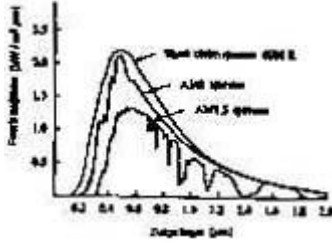
1970li yıllann başlarına kadar, güneş pillerinin uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'ler de başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki "1. petrol bunalımı" nı izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu neden ile daha ucuz üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklediği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek "sosyal maliyet" göz önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosile dayalı sistemlerdın daha ekonomik olarak değerlendirilebilir. İzleyen bölümlerde, önce bütünlüğün sağlanması amacı ile güneş ışınımı ile ilgili kavramlar ve terminoloji kısaca gözden geçirilecektir; ardından fotovoltaik sistemlerin kalbi olan güneş pilleri (fotovoltaik diyotlar) tanıtılıp bu diyotların yapılabileceği malzemeler ve öne çıkan teknolojiler özetlenecektir.

GÜNEŞ IŞINIMI

Yaşamın kaynağı olan güneş, doğal sistem enerjisinin büyük bir bölümünü sağlar. Çapı yaklaşık 1,4 milyon km olan ve iç çevresinde çok yoğun gazlar bulunan yaklaşık küresel geometrideki güneş dünyamızdan 150 milyon km uzaklıktadır. Güneşin merkezindeki sıcaklık milyonlarca dereceye ulaşırken, yayımlanan ışınımın spektrumunu belirleyen yüzey tabakasının (fotosfer) sıcaklığı olan 6000K'dır. Sıcak cisimlerden ışınım, elektromagnetik özelliğe sahip olup gücün spektral dağılımı (birim dalga boyunda birim alana birim zamana gelen enerji) sıcaklığın bir fonksiyonudur.

Yer yüzüne diğer yıldızlardan da elektromagnetik spektrumun değişik aralıklarında enerji gelmektedir; ancak, yer kürenin temel enerji kaynağı güneş olup, yer küreye gelen ışınımın büyükçe bir bölümü görünür bölgededir. Enerji taşıyan birimler gibi düşünebilecek "fotonlar", spektrumun görünür bölgesinin kırmızı yanında daha küçük enerji, mavi-mor yanında daha büyük enerji taşırlar. Seçilen bir dalga boyundaki fotonun taşıdığı enerji ve o dalga boyunda birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı, seçilen dalga boyundaki gücü tanımlar. Dünyamıza güneşten gelen ve spektrumun kırmızının ötesinde kalan kızıl-ötesi ve morun ötesinde kalan mor ötesi bölgelerinde bulunan ışınımın da toplam enerjiye önemli bir katkısı vardır. Güneşin gücü, yani bir saniyede güneş sistemine verdiği enerji, çok büyük olmasına karşın, yer küreni atmosferinin dışına ulaşan tutar yalnızca küçük bir bölümdür. Güneş ışınımının havaküreyi (atmosferi) geçer iken uğradığı değişimin bağlı olduğu değişkenlerin sayısı oldukça çok olmasına karşın, en önemli değilken, ışığın havakürede aldığı yolun uzunluğudur. Şekil 1. de 6000K sıcaklığında siyah bir cismin ışınımının spektrumunu, atmosferin hemen dışındaki ve yeryüzündeki güneş ışınımının spektral dağılımı karşılaştırılmaktadır.



Genellikle güneş ışınımı değerlendirilirken atmosfer dışındaki seçilen nokta başvuru noktası olarak ele alınıp buna hava kütle-sıfır (air mass 0) AM0 adı verilir. Havaküre dışında birim yüzeye gelen toplam güç, tüm spektrumun üzerinden entegre edilirse, ulaşılan değer 13267 W/m² olup bu değer "güneş değişmez" olarak kullanılır (2). Şekil 1. de görüldüğü gibi, güneş ışınları havaküreyi geçerken spektrumları önemli ölçüde değişikliğe uğrar.

Bulutsuz ve güneşli bir havada bile güneş ışınları havaküreyi geçerken su buharı, oksijen, karbondioksit, ozon, azot, metan gibi gaz moleküllerinin yanında, aerosol ve toz zerreciklerinde saçılarak yeryüzüne ancak havaküre dışındaki enerjinin %70 ulaşır. Dünya üzerindeki açık bir hava da deniz düzeyinde optiksel hava-kütle, güneş ışınlarının aldıkları gerçek yolun, güneş tam tepedeyken aldıkları yol oranı olarak tanımlanır. Örneğin güneş tam tepedeyken bu değer hava-kütle (air mass) 1 olarak verilir. yeryüzüne düşen güneş ışınları, doğrudan güneşten gelen ve havakürede saçıldıktan sonra yayınımına (difüzyona) uğramış ışınların toplamıdır.

Hava koşullarına bağlı olarak doğrudan güneşten gelen ışınların, saçılmış ışına oranı değişir; örneğin, bulutlu bir günde, güneş ışınımının önemli bir bölümü, saçılmış ışınlardan oluşurken, güneşli bulutsuz bir günde güneş enerjisinin büyük bir kısmı, doğrudan ışınlardan oluşacaktır. Doğrudan ve yayınık ışınımın toplamı, küresel ışınım olarak adlandırılır. Fotovoltaik sistemlerin seçiminde, güneş ışınımının verileri büyük önem taşır. Güneş pillerinin verimliliğinin yani, gelen güneş enerjisinin hangi oranda elektrik enerjisi elde edildiğinin belirlenmesi için yapılan ölçülerde kullanılan standart, güneş ışınımının hava kütle 1.5 (AM1.5) Spektrumunu sağlaması ve 1kW/m² Güç yoğunluğunda olması yanında modüllerin, ölçümler sırasında 25°C de tutulmasıdır

GÜNEŞ PİLLERİ

Güneş pilleri, güneş-elektrik çevriminin kalbi olup, optiksel ve elektriksel özellikleri bu dönüşüme uygun olarak seçilen yarı iletken malzemeden yapılmış diyotlardır. Bir önceki bölümde verildiği gibi, yeryüzünde herhangi bir bölgede birim alana gelen güneş enerjisinin tutarını ve spektrumunu etkileyen değişkenler, coğrafya dan başlayıp, topografya, iklim koşulları, hava kirliliğine kadar giden geniş bir aralıkta yer alır. Ancak, birim alana gelen güneş enerjisinin hangi oranda elektrik enerjisine dönüştürülebileceğini belirleyen, güneş pillerinin verimliliğidir. Verimliliği etkileyen değişkenleri tartışmadan önce, güneş pilleri ile ilgili temel kavramların kısaca ele alınması da uygun olacaktır.

Güneş pilleri, ilke olarak, bugün hayatın her kesimine girmiş olan elektronik düzeneklerin içerisinde kullanılan ve çok küçük boyutlara sahip olan yarı-iletken diyotların, geniş yüzey alanlara uygulanmış şeklidir. Kullanılan malzeme, üretim şekilleri ve diyotların çalışma ilkeleri, temelde benzerdir. Elektronik sanayinin gözde malzemesi silisyum kristali, bugün ticari olarak satın alınabilecek güneş pillerinin çoğunluğunun üretiminde kullanılmaktadır. Silisyum, teknolojik önemi nedeni ile en iyi bilinen yarı-iletken malzemelerden biridir. Bu noktada, yarı-iletken malzeme kavramına kısaca değinmek yararlı olacaktır.

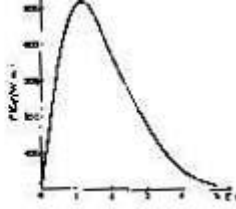
Madde içerisinde elektriksel yük taşıyıcılarının devinimleri (hareketleri) göz önüne alınarak malzemeler, üstün iletken, iletken, yarı-iletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılabilir. Bütün maddelerin atomlardan yapılmış olduğu gerçeğinden yola çıkarsak, malzemelerin özellikleri ve elektriği ne şekilde ilettiği, malzemeyi oluşturan atomların düzenlenişlerine sıkı-sıkı bağlıdır. Basite indirgenmiş bir anlatımla, atom, artı (+) elektrik yüküne sahip protonları ve elektrik yüküne sahip olmayan nötronları içerisinde bulunduran bir çekirdek ve onun çevresinde dolanan eksi (-) yüklü elektronlardan oluşmuş gibi düşünülebilir. Atomda, proton sayısı, elektron sayısına eşittir.

Ve dışarıya karşı elektrik yükü sıfır yani yüksüzdür. Atomda, çekirdekten uzaklaştıkça elektronların çekirdekle olan bağları zayıflar. Maddenin yapısını belirleyen, çekirdekten en uzakta bulunan elektronlardır. Değerlik elektronu olarak adlandıracağımız bu elektronlar, iyi bir iletken olan metallerde, komşu atomlar arasında kolayca hareket ederler. Buldukları enerji düzeyinden daha yüksek enerji düzeylerine çıkmadan metal içerisinde rahatça dolaşan bu elektronlara "serbest elektronlar" adı verilir. metal malzemedeki serbest elektronlar, elektrik yükünün iletilmesinde iyi birer taşıyıcı olmalarına karşın, fotovoltaik dönüşüm için uygun birer araç değildirler. Bunun temel nedeni, basit terimlerle, serbest elektronun, gelen ışığın frekansına kolayca cevap vererek ışığı geri yansıtması ve metallerde elektronları artı (+) yüklerden ayrı tutabileceğimiz bir enerji aralığının bulunmamasıdır.

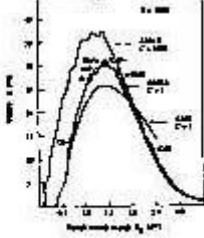
Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda değerlik elektronlarının bulunduğu enerji düzeyi ile bu elektronların bulunabileceği bir sonraki enerji düzeyi arasında bulunan enerji düzeyleri, elektronların bulunmasının yasak olduğu enerjilerdir. Değerlik elektronlarının bulunduğu enerji bandında "değerlik Bandı" ve yasak enerji aralığından sonra elektronların bulunabileceği ilk enerji düzeylerinden başlayan enerji bandına da "iletkenlik bandı" adı verilir. yasak enerji aralığının büyüklüğü, maddenin yarı-iletken ya da yalıtkan olarak sınıflandırılmasının ölçüsüdür.

Güneş ışınımında enerji taşıma birimleri olarak tanımladığımız fotonların enerjisi, yasak enerji aralığında eşit ya da ondan büyük ise, değerlik bandındaki bir elektrona enerjisini aktararak onu iletken bandına çıkarır. Yasak enerji aralığı 2.5eV (elektron volt) değerinden daha büyük ise madde yalıtkanlıdır. Güneş spektrumunda (şekil 1) enerji 2.5eV (dalga boyu 0,5um) değerinden daha büyük olan bölgedeki güneş ışınlarının tutarı çok az olduğundan, bu tür malzeme de fotovoltaik çevrimde soğurucu tabaka olarak kullanılmaya uygun değildir. Şekil 2 Hava kütle 1 için güneş ışınımını soğurucu malzemenin yasak enerji aralığına bağlı olarak güneş elektrik dönüşümü için var olan potansiyeli göstermektedir.

Şekil 2. AM1 Spektrumu için güneş-iletken dönüşümünde kullanılabilen potansiyel gücün güneş ışınımı soğurucu malzemenin yasak enerji aralığını bağımlılığı.

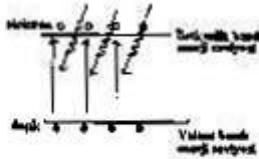


Yürütülen tartışmanın ışığında, fotovoltaik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji ağırlığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin biri birinden ayrılabilmesine izin verebilecek yarı-iletken malzemeden olmalıdır. Şekil 3 yasak enerji ağırlığına bağlı olarak çeşitli güneş ışınımı koşullarında elde edilebilecek en büyük verimlilik değerini özetlemektedir. Aynı şekil üzerinde çeşitli yarı-iletken malzemelerinin yasak enerji aralığı da işaretlenmiştir.



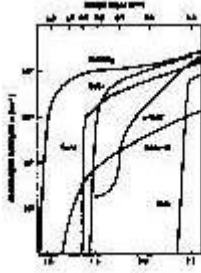
Şekil 3. Değişik güneş ışınımı şartlarında en büyük verimliliğin yasak enerji aralığına bağımlılığı.

Güneş enerjisini taşıyan enerji paketleri "fotonlar" tümüyle doğru bir olmasa da, kavramların anlaşılabilmesi için "bil yalar" gibi düşünülebilir. Güneş spektrumunun mavi yanında enerjisi yüksek fotonlar, bir benzetme ile büyük bil yalar ve kırmızı yanında düşük enerji fotonlar yani, küçük bil yalar var diye düşünülebilir. Fotonlar, bil yaların çarpışmasına benzer olarak enerjilerini madde içerisindeki elektronla bire-bir etkileşimidir. Fotonun aktardığı enerji ile elektron, enerjisini artırarak daha yüksek enerjilere tırmanmaya çalışır. Eğer aktarılan enerji, yasak enerji aralığını aşmaya yeterli ise, elektron, içinde bulunduğu değerlik bandından ayrılarak iletkenlik bandına çıkar. Elektron, ait olduğu atomu terk etmiş olduğundan, geride dengelenmemiş bir artı yük kalacaktır. Değerlik bandında kalan bu artı (+) yüke, "boşluk ya da deşik" adı verilir. sonuç olarak, değer yarı-iletken üzerine düşen fotonun enerjisi, enerji aralığına eşit ya da büyük ise, bir elektron-boşluk çifti yaratılmış olur. Yasak enerji aralığından daha küçük enerjiye sahip enerjiler elektron-deşik çifti yaratmaya yetmez ve fotovoltaik dönüşüme katkıları yoktur. Yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar iletkenlik bandı içerisinde yüksek enerjilere tırmanır ancak saniyenin milyon kare milyonda birden daha kısa sürede iletkenlik bandından en küçük enerjili bölgesine geri dönerek, fazla enerjisini ısı enerjisi olarak yarı-iletkene verirler. Şekil 4 elektron-boşluk çifti yaratılmasını göstermektedir.



Şekil 4. Fotonların yarı-iletken üzerine gelmesi ile elektron-boşluk çifti yaratılması.

Güneş ışınları kullanarak, maddede yaratacak elektron-boşluk sayısının en büyük değeri alması, güneş spektrumu ile yarı-iletkenin band aralığının uygun seçilmesi ile elde edilir. Şekil2 ve şekil 3 göz önüne alındığında, band aralığı 1.4eV ve 1.6eV arasındaki yarı-iletkenlerin fotovoltaik çevrimde en uygun malzeme olduğu açıktır. Ancak, yarı-iletkenin diğer optiksel özelliklerinin de bu seçimde büyük önemi vardır. Yarı-iletkenin soğurma katsayısı (güneş ışığının malzeme içerisinde birim uzunluk başına soğurulma miktarı) büyük ise, güneş ışınları daha küçük bir uzaklıkta soğurulacaktır. Böylece, daha az malzeme alınarak güneş elektrik dönüşümüne olanak sağlanacaktır. Şekil 5 çeşitli yarı-iletken malzemelerin soğurma katsayılarını enerjinin fonksiyonu olarak göstermektedir.



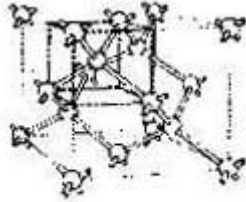
Şekil 5. Bazı yarı-iletken malzemenin soğurma katsayıları

Buraya kadar olan tartışmalarımızda güneş ışığı altında band aralığı uygun seçilmiş bir yarı-iletkende elektron-boşluk çiftlerinin ortaya çıkacağını gördük. Ancak, iletkenlik bandına çıkmış elektronlar, burada saniyenin milyonda biri basamağında bir süre kalıp, değerlik bandına geri dönme eğilimindedirler. Elektronların iletkenlik bandında kaldıkları süreye "ömür süresi" adı verilir. Eğer iletkenlik bandına çıkmış elektronlar (eksi yükler) ömür süreleri içerisinde boşluklardan (artı yükler) bir ekti nedeni ile ayrılmazlar ise, elektriksel akıma ve sonuçta güneş-elektrik dönüşüme katkısı olmayacaktır. Olayın anlaşılabilmesi için basit bir benzetme yapmaya çalışalım. Bahçemizde çimenlerin ortasına bir havuzun olduğunu düşünün. Havuzun üzerinde, yüksekte yerleştirdiğiniz fakat tabanın bir yanında delikler bulunan bir depomuz olsun. Havuzdan depoya sürekli su pompalıyoruz, ancak su aynı deliklerden havuza geri dönüyor. Eğer depoyu, delikli bölüm yukarıya gelecek şekilde eğimlendirip alt uçtan bir boru ile suyu çimenlere yönlendirirsek, havuzdaki suyu çimenleri sulamakta kullanabiliriz. Yarı-iletkenlerde, havuzdaki suyu depoya pompalama işin, yani değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkarma işini fotonlar yapmaktadır. Ancak depoya eğim vermekle oluşturduğumuz yerçekimi kuvveti etkisinin yerin alarak elektronlara bir kuvvet uygulama görevini yapacak ve suyun akmasına benzer bir biçimde elektronların akmasını sağlayacak bir sisteme gereksinimi vardır. Güneş pillerinde, elektron-boşluk çiftlerinin birbirlerinden ayrılarak, akımın oluşumunu sağlayacak kuvvet, elektriksel iletkenlik karakteristik özellikleri birbirlerinden farklı olan yarı-iletkenlerin bir araya getirilmesiyle yapılan yarı-iletken diyotların ara yüzey bölgesinde oluşan elektrik alanı ile oluşur. Fotovoltaik çevrimde en çok uygulanan, p-tipi yarı iletken ile n-tipi yarı iletkenin oluşturduğu p-n eklem diyotlardır. Bundan sonraki bölümlerin izlenebilmesi için yarı iletkenlerin katılanması ve iletkenlik tipleri kısaca özetlenecektir.

Yarı-iletkenlerin Katılanması

Yarı-iletkenin malzemenin içerisine, çok az tutarda uygun seçilmiş yabancı atom katılanması ile yarı-iletkenin elektriksel özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Saf yarı-iletkenin yapısal özelliklerini bozmayacak tutarda ve denetimli bir biçimde yarı-iletken kristale yerleştirilen yabancı atomlara "safsızlık-atomları" ve bu işlemede "katkılama" adı verilir.

Katkılamayı daha iyi açıklamak için çoğunlukla kullanılan örnek silisyum kristalidir. Saf silisyum kristalinde her atom 14 elektrona sahip olmakla birlikte, en dış yörüngedeki dört elektron, komşu atomlarla olan ilişkileri belirler. Değerlik elektronları adını verdiğimiz bu dört elektronun her biri, en yakınındaki dört silisyum atomu ile bağ yaparak silisyum kristalindeki ana yapı taşı oluşturur. Ana yapı taşı, küpün merkezindeki bir silisyum atomu ve küpün birbirine komşu olmayan köşelerinde birer silisyum atomu yerleşmesi ile kurulur. Silisyum kristali bu yapı taşlarının yinelenerek uzayı doldurması ile oluşur. Şekil 6



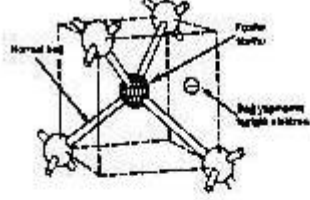
Şekil 6. Silisyum kristalindeki yapı taşı

Saf silisyum kristali içerisine değerlik elektron sayısı beş olan fosfor atomu katılanırsa, fosfor atomu, silisyum atomunun yerine oturup dört değerlik elektronu ile silisyum daha önce kristal içerisinde

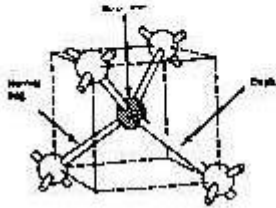
yaptığı bağları sağlar iken, fosforun beşinci değerlik elektronu açıkta kalacaktır. Fosfor atomuna çok zayıf olarak bağlı olan bu elektron çok küçük bir enerji ile atomundan ayrılarak silisyum kristalinin iletkenlik bandına çıkacaktır.

Fosfor atomunda olduğu gibi, katıldığı kristal yapıya elektron veren safsızlık atomlarına verici denir. Bu şekilde katılanmış yarı-iletkenlerde elektriksel yük, elektronlar ile, iletkenlik bandında taşınır ve bu nedenle bu yarı-iletkenler n-tipi olarak sınıflandırılır. Şekil 7a. Saf silisyum kristali içerisinde değerlik elektron sayısı üç olan boron atomu katladığımızı düşünelim (şekil 7b). Silisyum atomunun yerini alan boron atomu, silisyum kristalindeki üç atomla bağ yaparken dördüncü atomla paylaşacağı elektronu olmadığı için, bir eksik bağ ortaya çıkacaktır. Değerlik bandının kıyı enerjisine yakın bulunan bu enerji düzeylerine çok küçük enerjilerle bile değerlik bandından elektronla doldurularak değerlik bandında boşluklar oluşacaktır.

Bu şekilde katılanmış yarı-iletkenlerde değerlik bandındaki boşlukların sayısı iletkenlik bandındaki serbest elektron sayısından daha çok olduğundan, çoğunluk taşıyıcıları artı yükleri gibi düşünülen boşluklardır. Boşlukların çoğunluk taşıyıcısı olduğu bu tür malzemelere p-tipi yarı-iletken adı verilir. yarı iletken ister n-tipi isterse p-tipi olsun kendi içlerinden nötrdür. Yani dışarıya karşı herhangi net bir elektrik yükü göstermezler; ancak, dışarıdan bir elektrik alan uygulandığında elektrik alanına tepki veren çoğunluk taşıyıcılarıdır. N-tipi yarı-iletkendeki çoğunluk taşıyıcıları elektronlar ve azınlık taşıyıcıları boşluklar, p-tipi yarı iletkende rol değiştirirler. Elektronlar elektrik alan ile ters yönde hareket ederken, boşluklar elektrik alan doğrultusunda hareket ederler.



Şekil 7.(a) Fosfor atomunun silisyum atomu ile değiştirilmesi sonucu elde edilen n-tipi silisyum.

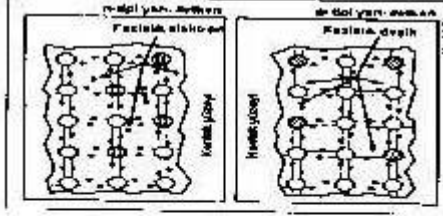


Şekil 7.(b) Boron atomunun silisyum atomu ile değiştirilmesi sonucu elde edilen p-tipi silisyum.

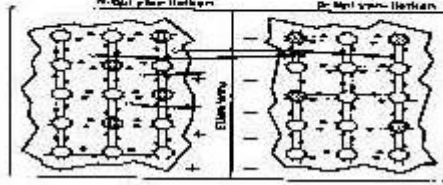
Yarı iletken tipleri ve yük taşıyıcıları konusundaki başlattığımız tartışmaları bu düzeylere bırakıp, fotovoltaik dönüşümde önemli olan p-tipi ve n-tipi yarı iletkenin bir araya gelmeleriyle oluşan p-n eklem diyotlara kısaca bakalım.

P-n Eklem Diyotlar

n-tipi yarı iletken ile p-tipi yarı iletken fiziksel olarak birbirlerine eklendiğinde n-tipi yarı iletkenin çoğunluk taşıyıcıları elektronlar p-tipi yarı iletken tarafına ve p-tipi yarı iletkenin çoğunluk taşıyıcıları boşluklar n-tipi tarafına akmaya başlar. Elektronların n-tipi bölgeden ayrılması ile geride artı (+) yükler kalırken boşlukların p-tipi bölgeyi terk etmesi ile birlikte geride eksi (-) yükler kalacaktır. Çoğunluk taşıyıcılarının eklem üzerinden akması, eklem çevresindeki bölgeyi etkileyecektir. Geride kalan (+) ve (-) yükler eklem çevresinde bir elektrik alan oluştururken, bu alan, iki ayrı bölgedeki taşıyıcıları farklı yönlere ittiği için doğal akışı engelleyici yönde olacaktır. Denge kurulduğunda, taşıyıcı akışı duracak ve eklem çevresinde bir elektrik alan kurulacaktır. Bu elektrik alanın büyüklüğü, kullanılan yarı-iletkenlere ve yarı iletkenlerin katılan malzemelerine bağlı olacaktır.



Şekil 8.(a) n-tipi ve p-tipi yarı-iletken bir araya gelmeden önce



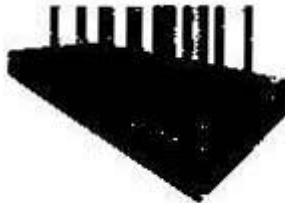
Şekil 8.(b) p-n eklem diyot oluşumunu göstermektedir

Şekil 8 de görüldüğü gibi eklem çevresinde taşıyıcılardan boşalmış bir bölge oluşmuştur ve bu bölgede bir elektrik alan vardır. Bu bölgeye giren azınlık taşıyıcıları elektrik alanının uygulayacağı kuvvetle hemen karşı tarafa iletirler. Daha önce verdiğimiz havuz üzerine asılmış tabanından delik olan depo örneğine geri dönersek, "boşaltılmış bölge" iki taraf arasında bağlantıyı sağlayan boru ve eklem üzerindeki elektrik alanı ise yerçekimi kuvvetinin yerine dönüşebilecek kavramlardır.

Güneş ışınımı altında p-n eklem diyot

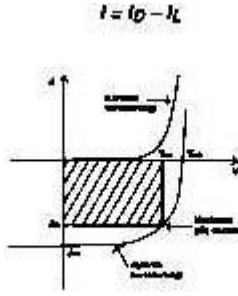
Eklem diyodun p- ve n- bölgelerinde gelen ışık soğurulduğunda, enerjisi band aralığından daha yüksek fotonların değerlik bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkararak bir elektron-boşluk çifti yaratacağını ve bu çiftin, bir dış etki olmadığı durumda saniyenin milyonda birinden daha küçük olan hayat süreleri içerisinde geliş güzel hareket ederek yeniden birleşeceğini geçen bölümlerimizde tartıştık.

p-n eklem diyodun eklem bölgesindeki elektrik alan nedeniyle, p-tipi yarı-iletkende üzerine ışık düşmesi sonucu iletkenlik bandına çıkarılmış ve boşaltılmış bölge sınırına ulaşmış azınlık taşıyıcıları elektronlar, hızla n-tipi bölgeye çekilirler. Aynı yaklaşımla, n-tipi bölgede elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile değerlik bandında kalan azınlık taşıyıcıları boşluklar boşaltılmış bölgenin kıyasına ulaştıklarında p-tipi bölgeye geçerler. Özet olarak, boşaltılmış bölge kıyasına ulaşmış azınlık taşıyıcıları çoğunluk taşıyıcısı olarak tanımlandıkları bölgeye geçerler. Bunun sonucu olarak fotonların diyod üzerine düşmesi sonucu yaratılmış elektronlar, diyodun bir tarafına; boşluklarda diğer tarafa itilirler.



Şekil 9. Üzümün güneş ışınımı düşen fotovoltaik diyotta elektron-boşluk oluşumu.

Bu biçimde birbirlerinden ayrılmış elektronlar ve boşluklar, bir dış devre üzerinden birleştirildiğinde, dış devre elemanlarından akan elektriksel yükler, doğrudan güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisinin kaynağıdır. Buraya kadar olan tartışmalarımızda p-n eklem diyodla ilgili herhangi bir matematiksel eşitlikten kaçınıldı. Ancak, kısaca ışınım altındaki diyodun akım-gerilim karakteristiği, karanlıktaki diyodun akım-gerilim eğrisinden ışınım altında üretilen I_L akımının çıkarılması olarak ele alınabilir.



Şekil 10. Karanlıkta ve ışınım altında p-n eklem diyodun akım-gerilim (voltage) eğrileri.

Bu eğrileri kullanarak fotovoltaik diyottan alınabilecek gücü hesaplamak olanaklıdır. Güneş ışınımı altında fotovoltaik diyodun güç çıkışı, şekilde gösterilen aşağıdaki değişkenlerde belirlenir;
Açık-devre gerilimi (open-circuit voltage, Voc): Diyodun uçları (terminalleri) arasındaki direnç sonsuz iken (açık devre) ölçülen gerilim.

Kısa devre akımı (short-circuit current, Isc): diyodun iki ucu arasındaki direnç sıfır iken (kısa devre) ölçülen akımdır. İdeal koşullarda bu değer, ışınım ile yaratılan akım değerine eşittir.

Dolum çarpanı (fill factor, FF): Işınım altındaki akım-gerilim eğrisinde, akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ oranı olarak tanımlanır.

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Güneş pilinin çıkış gücü, P çıkış, bu değişkenler cinsinden,

$$P_{\text{çıkış}} = V_{mp} \times I_{mp} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF$$

Şeklinde verilebilir.

Bir güneş pilinin verimliliği, η , fotovoltaik diyodun üzerine düşen güneş ışınım gücünün, diyodan alınabilecek güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}} \times I_{pm}}{V_{giriş} \times I_{sc}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{V_{giriş} \times I_{sc}}$$

Güneş pillerinin verimliliklerinin ölçüldüğü, "Standart Test Koşulları"ı yeniden anımsamak, güneş pili 25°C de iken, AM1.5 güneş spektrumuna sahip 1000W/m² güneş gücü altında yapılan ölçümdür. Bulutsuz ve güneşli bir günde 1200 W/m² ye varabilen bu değer, bulutlu günlerde 200-800W/m² arasında değişmektedir. Yağmurlu bir günde ise metre kareye düşen güneş ışınımı 50W değerine iner.

FOTOVOLTAİK DİYOTLARIN ÜRETİMİNDE TEMEL ÖLÇÜTLER

Güneş pili üretiminde en önemli seçimlerden biri, diyodun yapılacağı malzemedir. Fotovoltaik diyodda soğurucu tabaka olarak kullanılan yarı-iletken, güneş spektrumunun önemli bir bölümünü micron basamağındaki kalınlıkta soğurulmalıdır. Güneş spektrumunda kırmızı ışığın enerjisi 1,7eV dolayında iken mavi ışığın enerjisi 2,7eV dolayındadır; ancak bu değer altına 0,5eV ve üstünde 3,3eV değerine kadar spektrumda önemli derecede enerji vardır. Yasak enerji aralığı 0,5 -3,3 eV arasında olan malzeme, güneş pili yapımında kullanılabilir. Elementler kristaller arasında yalnızca silisyum (1,1 eV) ve germanyum (0,6 eV) elementlerin kristalleri bu koşulları sağlar.

Bu aralıkta kullanılacak diğer yarı-iletken malzemeler, birleşik yarı-iletken malzemelerdir. Örneğin, galyum ve arsenik elementlerinden oluşan GaAs kristalinin yasak enerji aralığı 1,43eV değerinde olup, bu enerjiye eşit ya da büyük enerjiye sahip fotonları soğurarak elektron-boşluk çifti yaratırlar. GaAs kristalinin diğer elektronik özellikleri, silisyumdan daha uygundur. Bu tartışmalardan, hemen güneş spektrumundaki en düşük enerjiyi soğuracak bir yarı-iletkeni kullanarak tüm spektrumun değerlendirilmesi önerilebilir. Ancak, band aralığı küçüldükçe sistemden elde edilebilecek açık devre geriliminin değeri de düşecektir. Güneş pilinden yüksek gerilim elde etmenin yolu, band aralığını

genişletmektedir. Ancak, bu da, akımın düşmesine neden olur. Daha önceki tartışmalarımızda en iyi band genişliğinin 1,5eV dolayında olduğunu belirlemiştik. Ancak, band aralığı 1eV-1.8eV arasında olan malzemeler fotovoltaik diyod yapımında etkin olarak kullanılmaktadır.

Fotovoltaik malzemenin seçiminde diğer ölçüt, yarı-iletken maddenin mikro yapısıdır. Yarı-iletken malzemedeki kusurlar, taşıyıcıların iletilmesini önemli ölçüde etkileyecektir. Tek kristalli malzemelerde yapısal özellikler tüm maddede aynıdır oysa çok kristalli malzemede yapısal özellikleri birbirlerinden farklı olan ve damar adı verilen bölgeler vardır. Bir damardan diğerine geçerken karşılaşılan süreksizlik ve buna bağlı olarak mikro-yapıda oluşan kusurlar, elektriksel iletkenliği olumsuz yönde etkiler. Sonuçta, tek kristalli malzemeden çok kristalli malzemeye geçildiğinde elde edilebilecek güneş-elektrik dönüşüm verimi düşerken, çok kristalli malzemede damar büyüklükleri verimle doğru orantılıdır.

Aynı yarı-iletkeni, p- ve n-tipi katkılarla elde edilen p-n eklem diyotların (homo-eklem diyot) yanında biri birinden farklı yarı-iletken kullanmakla elde edilen hetero-eklem diyotlarda fotovoltaik teknolojisinde başarı ile uygulanmaktadır. Bu uygulama da güneş ışınları, eklem bir tarafında yasak band aralığı uygun seçilen yarı iletkenle çoğunlukla soğurulmakta ve ikinci ve daha yüksek band aralığından yarı iletken diyottan yüksek gerilim elde edilecek şekilde seçilmektedir. Bu şekilde fabrika edilmiş yapılarda eklem ara yüzeyleri de taşıyıcıların yeniden birleşmesine neden olan kusurlarda aşılması gereken yeni sorunlar olarak gündeme gelmektedir. Yukarıda ölçütlerin yanında, seçilen malzemenin maliyeti, dünya üzerinde hangi bollukta bulunduğu ve çevre-dostu olması büyük önem taşımaktadır.

Özetlenirse, yüksek verimlikte fotovoltaik çevrim için, yasak enerji aralığı en iyileştirilmesi malzemenin yapısal ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesi ve hetero-eklem seçiminde en uygun kombinasyonun kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, seçilen malzemenin büyük ölçekte ekonomik olarak üretilebilmesi için de koşullardan birisi olarak karşımıza çıkarken, bu malzemenin kullanımında çevreye karşı olan duyarlılığın da gereken ağırlıkta olması arzulanmaktadır

FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PİLLERİ İÇİN MALZEMELER



· Tek Kristalli Silikon Güneş Pilleri

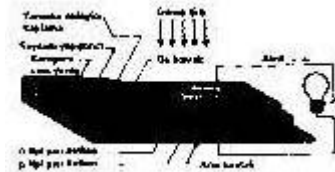
Tek-kristal silisyum malzeme, güneş pili üretiminde yüksek verim için kullanılan malzemelerden biri olmakla birlikte, üretim maliyetinin yüksek olması bu alanda değişik seçenek olarak çok kristalli malzemenin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur. Silisyum elektriksel, optiksel ve yapısal özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve silisyum üretim

Tek kristal silisyum Güneş Pili teknolojisinde elde edilen büyük başarılar bu malzemenin en popüler malzeme olarak öne çıkmasını sağlamıştır. Saf tek kristal üretimi oldukça zor ve pahalı bir teknolojiyi gerektirmektedir. Oksijenden sonra yer yüzündeki en çok bulunan element olan silisyum en çok bulunan biçimi kum ve kuartzdır. Kumun saflık derecesi çok düşük olduğundan, kullanılmaya uygun değildir. Ancak, kuartzın %90'ı silisyumdur. Kuartz işlenerek %99 silika elde edilir. Ardından, silikadan metalürji kalitesinde silisyum elde edilir. Bunu izleyen aşamada ise, silisyum saflaştırılarak yarı-iletken niteliğinde çok kristalli silisyum elde edilir. Poly-silisyum elde edilmesine kadar olan aşamaların her birisi oldukça enerji yoğun ve maliyeti yükselten işlemlerdir.

Yarı-iletken kalite saf poly-silisyum elde etmek için poly silisyum yeniden eritilir ve yöntemi ile büyütülür. Yarı çapı yaklaşık 10cm olarak büyütülmüş ignot daha sonra elmas testere ile 0.5 mm kalınlığında dilimlere ayrılır. Bu kesme işlemi sırasında oldukça pahalı tek-kristal silisyum malzemenin yaklaşık %20'si kadan boşa gitmektedir. Dilimlenmiş tek kristal silisyumun bir kilogramının yaklaşık değeri 900 ABD dolandır. Dilimleme işlemini devreden çıkaracak yeni teknoloji arayışları "şekillendirilmiş şerit" yönteminin geliştirilmesi ile sonuçlanmıştır. Dentiritik ağ yöntemi olarak da anılan bu yöntemde dendiritik çekirdekler çok düşük hızla ergimiş silisyum banyosundan çekilerek, ince tek-kristalli tabakaların büyümesi sağlanır. Bu şekilde, dilimleme işlemi gerekmemektedir.

Üretici firma tasarımına göre büyüme sırasında silisyum n- ya da p-tipi olarak katkılanır. Yaklaşıkça 0.5mm kalınlığında olan silisyum tabakaları elde edildikten sonra, örneğin, p-tipi katkılanmış ise üzerine 1nm n-tipi yüzey tabakası oluşturularak eklem diyod oluşturulur. Fotovoltaik diyodun tamamlanması, arka yüzeye metal kontak, ön yüzeye uygun metal ağ kontak konulduktan sonra, ön yüzeye bir anti yansıtıcı kaplanması ile gerçekleşir. Güneş pillerinin ön yüzeylerinde oluşturulan grid-kontak tasarımında, gölgelemeli %5 değerinin altında tutarak, kontak dirence optimize edilmektedir. Şekil 11'de grid tasarımı göstermektedir.

· Çok kristalli Silisyum Güneş Pilleri



Şekil 11: Tek kristal silisyum güneş pili tasarımı

Çok kristalli malzemede damarların kristal yapısının birbirlerine göre yönelmeleri dışında elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri özdeştir. Damarların büyüklükleri kristalin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcılarının aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynar. Çok kristalli malzemenin elektriksel özelliklerinin küçülen damar büyüklüğü ile orantılı olarak bozulması, elde edilebilecek verimliliğin tek kristalle karşılaştırıldığında küçük olmasına neden olur. Ancak çok kristalli silisyum üretim teknolojileri daha az enerji yoğun ve daha kolaydır, sonuç olarak çok kristalli silisyumun maliyeti önemli ölçüde düşüktür.

Çok kristalli silisyumun üretilmesinde en çok kullanılan yöntem "dökme" yöntemidir. Çok-kristalli silisyumda başlangıç malzemesi tek-kristalli silisyumda olduğu gibi hazırlanır. Aranılan saflık derecesi de

benzer basamakta olmalıdır. Erimiş yarı-iletken kalitesindeki silisyum, kalıplara dökülerek soğumaya bırakılır. Elde edilen bloklar daha sonra kare şeklinde kesilir. Bu teknoloji ile üretilen malzemelerden fabrika edilen güneş pilleri verimliliklerinin daha az almasına rağmen, bu pillerde maliyetler önemli ölçüde aşağıya çekilebilmektedir.

Tek kristalli ya da çok kristalli silisyum güneş pilleri, verimlilikleri ve kararlılıktan ile 1950'li yıllardan bu yana kendilerini ispatlamışlardır. Son yıllarda geliştirilen teknolojiler ile güneş-elektrik dönüşüm verimlilikleri, beklentilerin bile üzerinde seyretmektedir. Verimlilik ve fiyat incelemeleri, ilerdeki kesimlerde karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır.

İnce Film Güneş Pilleri



Cami Taban Üzerinde İnce Film Güneş Pilleri

Güneş pillerinde kullanılan malzemenin ve işçiliğin azaltılması, teknolojinin basitleştirilerek maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, yarı-iletken malzemenin geniş yüzeyler üzerine ince film şeklinde kaplanması yöntemi çekici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları güneş pilleri üretiminde kullanılabilecek bir çok yarı-iletken malzemenin düşük maliyetlerde cam, metal ya da plastik folyo gibi tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir. İnce film fotovoltaik malzeme genellikle çok kristalli malzemelerdir. Başka bir deyişle ince film yarı-iletken malzeme, büyütüldükleri bir milimetrenin binde birinden milyonda birine değin değişen damarlardan oluşmaktadır.

Yarı-iletken malzemenin elektriksel optiksel ve yapısal özellikleri her damar içerisinde fotovoltaik uygulamalar için çok uygun olsa da, damarlar arası sınırlar da yer alan mikro düzeydeki yapısal kusurlar, çok kristalli malzemede karşılaşılan en önemli problemdir. Optiksel özellikleri uygun seçilen bir yarı iletken malzemede milimetrenin binde biri kadar bir kalınlık içerisinde güneş ışınlarının tümüne yakın bir kısmı soğurulabilir. Dolayısı ile, ince film fotovoltaik malzemede kalınlık, silisyum üzerinde yapılan pillere göre çok daha azdır. Ayrıca ince-film yarı-iletken istenen bir biçimde çok farklı malzeme üzerinde ve geniş yüzeylere kaplanabilir, oysa silisyum piller büyütülen kristalin boyuttan ile sınırlıdır. İzleyen bölümlerde görülebileceği gibi, fotovoltaik-modül yapımında ince filmlerin kullanımı daha kolay ve uygundur. Bu ve buna benzer üstünlükler sırlamaya devam edilebilir, ancak uzunca bir süredir araştırma geliştirme çalışmalarının konusu olan ince film güneş pilleri, öngörülen ön görülen üretim hedeflerinin gerisinde kalmıştır. Bu gün laboratuvar verimlilikleri %18 lere değin çıkmış olan ince film güneş pillerinin uzun dönem kararlılıklarının arzulanan düzeylere ulaşmamış olması, üretici firmaların kararlılıklarını etkilemektedir. Anca, ulaşılan düzeyde bile ince film güneş pilleri için siemens, BP solar, conan gibi firmalar pilot üretim denemelerini sürdürmektedirler.

İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf, silisyum, kadmiyum, ve tellür elementlerinden meydana gelen birleşik yarı-iletken kadmiyum tellür ve bakır, iridyum, selenyum elementlerinin bir aralığı olan bakır iridyum-diselenid bileşik yarı-iletkenidir.

Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Soğurma katsayısı çok büyük olan amorf silisyum, 250°C dolayındaki sıcaklıklarda geniş yüzeylere düzgün bir şekilde kaplanabilmektedir. Amorf-silisyum malzemesini kristalli-silisyumdan ayıran özellik, silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde gelişigüzel olmasıdır. Malzeme içerisindeki yapı taşlarının bu gelişigüzel dizilişi amorf-silisyumun elektriksel iletim

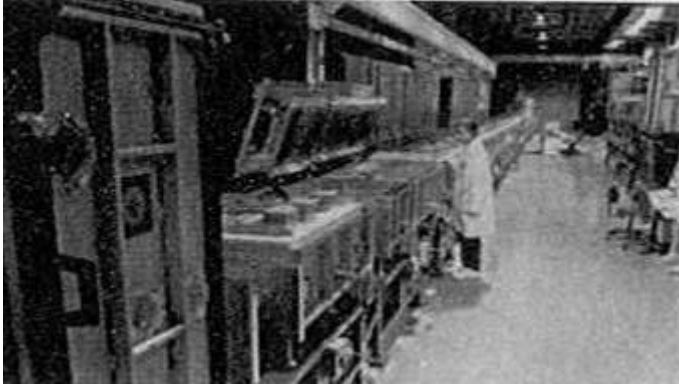
kalitesini düşürse de, uygun yaklaşımlara yarı iletken içerisine %5-10 oranında hidrojen katılarak elektriksel özellikler fotovoltaik çevirime uygun olan düzeyde tutulabilirler.

Amorf silisyum için kullanılan en yaygın teknoloji "ışık boşalım (glow-discharge)" dir. Bu teknikte silane (SiH_4) gazı ve hidrojen karışımı bir çift elektrod arasında geçirilerek elektrotların işaretleri yüksek frekanslarda değiştirilir; bunun sonucu olarak SiH_4 parçalanarak kararsız SiH_3 kökçesini (radikalini) oluşturur. İzleyen aşamada, kararsız SiH_3 elektrotlardan birine giderek bağlanır ve kararlı hale gelir; ardından hidrojen yüzeyden ayrılarak geride silisyum u bırakır; böylece yüzey silisyumla kaplanmış olur. Elektrot üzerinde büyüyen silisyum gazın içerisine boron ya da fosfor katılarak n- ya da p- tipi yapılabilir.

Karmaşık gibi görünen teknoloji, makaradan makaraya üretime uygundur. Şekil 12 "united solann" amorf silisyum üretim ünitesini göstermektedir.

Amorf silisyum 1980'li yıllarda ince film fotovoltaik alanının en gözde malzemesi olmuştu, 1982'de %10 verimlilik sınırı aşılmış ve 1987'de verimlilik %12,7'lere kadar çıkmıştır. Son yıllarda bu değer laboratuvarda %15 değerinin üzerine Japon-amerikan ortaklığı olan Uni-solar tarafından çıkarılmıştır. Fakat amorf silisyum pillerinin güneş altında verimliliklerinin hızla düşmesi bu tür pilleri büyük ölçekli güç üretiminde tasarım dışı bırakmıştır. 1980'lerin başında kararlı verimlilik değeri ancak %3.5 dolayında tutula bilinirken, bu gün bu değerin %6-6.5 dolayında olduğu belirlenmektedir.

Bu tür sorunlara karşın küçük ölçekli güç gerektiren uygulamada (saat pilleri, hesap mak. Vb.) amorf silisyum piller en gözde güç kaynaklarıdır. Yeni gelişimlerde bu piller büyük ölçekli güç gerektiren uygulamalarda da yerini almaktadır. Amorf silisyum alanında Solarex, New Jersey 10megawatt/yıl üretim kapasitesi ile başta giderken, onu 5megawatt/yıl kapasitesi ile Uni-solar izlemektedir. Bunun yanında 1megawatt/yıl üretim kapasitesine sahip bir alman firması olan ASE-GmbH önümüzdeki iki üç yıl içerisinde bu kapasiteyi 15-20 megawatt/yıl değerine çıkarmayı planlamaktadır.

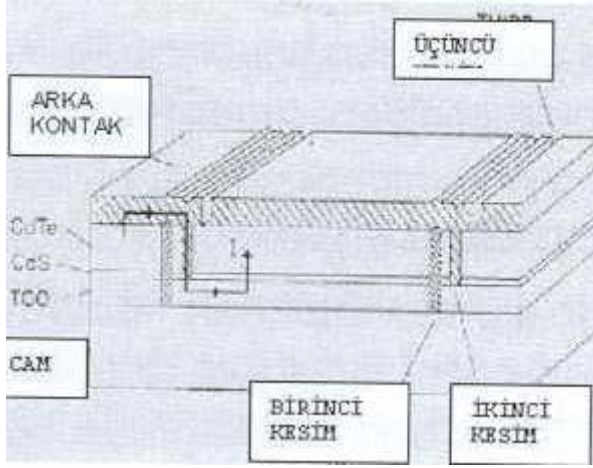


· Kadmiyum Tellür İnce film Güneş Pilleri

Periyodik tablonun ikinci gurubunda bulunan kadmiyum elementinin ve altıncı gurubunda bulunan tellür elementini bir araya gelmesiyle oluşan II-VI birleşik yarı-iletkeni kadmiyum tellürün, CdTe, oda sıcaklığında yasak enerji aralığı, $E_g=1,5\text{eV}$ değeri ile, güneş spektrumundan maksimum dönüşümü elde etmek için gerekli olan değere oldukça yakındır. (şekil 12) yüksek soğurma katsıyı yanında, ince film büyütme teknolojisinin bir çoğu ile kolayca üretime olanak tanınması, geniş yüzey alanlı güneş pili üretiminde CdTe birleşik yarı iletkeninin öne çıkmasının sağlamıştır. CdTe çoğunlukla kadmiyum sülfür, CdS, ile bir araya getirilerek hetero-eklem diyod üretilir. Yasak enerji aralığı yaklaşık 2,4eV olan CdS yarı iletkeni çok ince bir tabaka olarak uygulanır. Güneş ışınının çoğunu geçiren.

CdS, hetero-eklem de "pencere görevi yapar" . CdT ince film büyütmede üç teknoloji ortaya çıkmıştır. Bunlardan birincisi olan yakın mesafeden buharlaştırma (close space Sublimation, CSS) yöntemi ile en

yüksek kalitede CdTe malzeme üretilmektedir. Bu yöntemde sıcaklık farklılıkları çok az olan kaynak ve filmin büyüdüğü yüzey biri birine çok yakın tutularak malzemenin sublimasyon yoluyla büyümesi sağlanır. Bu yöntemi kullanan ANTEK firması (Almanya) geniş ölçekli üretime geçmenin ön çalışmalarını Erfurt-Almanya'da yapmaktadırlar. İkinci CdTe büyütme yöntemi olan elektrodepozisyon (elektrotta birikirim) yönteminde ise, kadmim ve tellür iyonu taşıyan elektrolitten akım geçirilerek CdTe yarı-iletkeninin katotta büyümesi sağlanır. Çok ucuz olan bu yöntemde büyüyen malzemenin denetimi CSS yönteminde olduğu kadar kolay değildir. BP solar firması bu yöntemde dayalı pilot üretime başlamış olup, 10 megawatt/yıl üretim kapasiteli bir fabrikayı Fairfield California-ABD kurma çalışmalarını sürdürmektedir. Bunlara rağmen BP solar, Solar Inc., ve Antek gibi ok uluslu şirketler büyük ölçekli üretimler için ciddi adımlar atmaktadır.

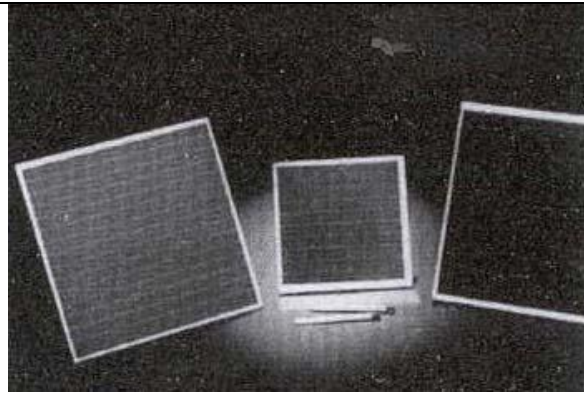


Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri

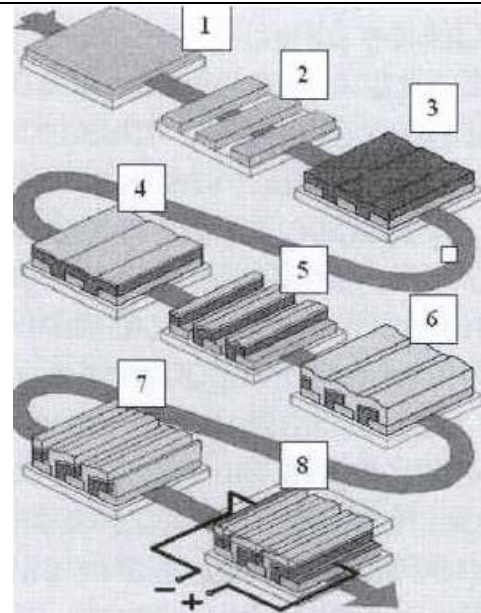
Periyodik tablonun birinci, üçüncü ve altıncı guruptan elementlerin üçüncünün ya da daha fazlasının bir araya gelemsi ile oluşan bu bileşik yarı-iletkenlerin soğurma katsayıları oldukça yüksek olup, yasak enerji aralıklan güneşin spektrumu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabilir. Bakır indiyum ve selenyum dan yapılan üçlü bileşik yarı-iletkenle başlayan bu grup (CIS) güneş pilleri olarak anılır. CdTe güneş pillerine en yakın rakip olarak gözükmektedir. Bu gün CIS ince film güneş pillerinin çoğunluğu içerisinde ga elementinin katılması ile daha yüksek verimlilikler elde edilir.

Ancak yarı-iletkeni oluşturan element sayısı artıka gereken teknoloji ve malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar karmaşık duruma gelmektedir. Laboratuardaki küçük alan pillerin verimliliği %18 dek ulaşırken, 900cm² yüzey alana sahip modüllerin verimlilikleri ancak %15 dolayındadır. CIS pillerde uygulanan teknolojilerden iki tanesi öne çıkmıştır. Bunlardan birincisi, elementlerin eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırılmasıdır. İkinci yöntem, herhangi bir yöntemle büyütülen bakır-indiyum ince film alaşımının uygun bir ortamda selenyumla tepkimeye sokulmasıdır (Selenizasyon). Her iki durumda da soğurucu olarak kullanılan CIS yarı-iletken, CdS ile bir araya getirilerek hetero-ekdem diyot oluşturulur. CdS tabakaların üretilmesinde ortaya çıkan yöntem CdTe tabakalarında olduğu gibi burada da kimyasal banyo yöntemidir.

Metal elementlerin buharlaştırılmasının ardından selenizasyonu seçen ISET, Shell-Showa ve Siemens Solar gibi firmalardan Siemens Solar 5-10watt değerinde küçük modül üretiminde ABD başlamıştır. CIS tabakaların büyütülmesinde Stuttgart Üniversitesi (Almanya) tarafından geliştirilen ve yine bir alman firması olan ZSW tarafından üretime hazır hale getirilen eş zamanlı olarak vakumda buharlaştırma üretim yönteminin adımları şekil 15 de verilmiştir. Bu ince film güneş pillerinde test altındaki uzun dönem modül verimlilikleri %10 değerinin altında kalmaktadır.



şekil 14



şekil 15



şekil 16

Güneş pili verimlilikleri

Fotovoltaik güneş pillerinin sürekli gelişimlerine bağlı olarak verimliliklerinin özetlendiği çizgilerin geçerlilik süreleri oldukça kısa olmaktadır. Ancak, karşılaştırılmalı bir kaynak olması amacı ile Fraunhofer Enstitüsü tarafından internette ISE PV Charts (<http://www.ise.fhg.de/kallab/welcome.html>) den yapılan en yüksek verimlilikleri gösteren özet aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Fotovoltaik Pilin Cinsi	Alan (cm ²)	Verimlilik (%)	Üretilen Birim
Tek Kristalli Silisyum	4,00	24	UNSW, Sydney Avustralya
Çok kristalli Silisyum	21,2	17,4	ISE, Freiburg, Almanya
Amorf Silisyum	1	14,7	United Solar
Cu/In, Ga)Se ₂	0,4	17,7	NREL, USA
CdTe/CdS		15,8	USA
GaAS Tek kristal	1	23,9	K.Univ, Nijmegen Hollanda

Çizelge 1. güneş pillerinde rapor edilmiş en yüksek verimlilikler.

Güneş pili yapımında kullanılan malzemenin rezerv durumları da oldukça önemli değişkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Silisyum, doğada en çok bulunan element olması nedeni ile rezerv konusunda geleceğe yönelik bir sorun yoktur. Diğer seçenek malzemeleri oluşturan elementlerin rezerv durumları dünya da ki yıllık üretim ve 500MW güç üretimi için gerekli miktar Çizelge 2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2

Element	Dünya Reserpleri	Dünya Yıllık Üretimi	500MW güç için gereken Miktar Ton
CD	970 000	20 000	25
Te	39 000	404	28
In	5 700	180	25
Se	130 000	2000	60
Ga	1 000 000	35	5



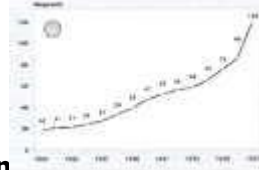
şekil 17

FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİ

Güneş pilinin, bir fotovoltaiik diyod olup, üzerine ışık düştüğünde iki uç arasında potansiyel farkı (voltaj) ortaya çıktığını tartıştık. Ancak, bir güneş pilinden elde edilebilecek gerilim çok küçük (0.5-1V dolayında) olduğundan, arzulanan gerilime uygun olacak sayıda güneş pili seri olarak bağlanır. Seri bağlı pillerin oluşturduğu birime PV modülü adı verilir. PV modüllerin laminasyonu genellikle güneş pillerinin ön yüzeyinde yüksek optiksel geçirgenliğe sahip cam ve arka yüzeylerinde EVA (ethlene viny acetate) kullanılarak geçirgenleştirilir. Ayrıca camı korumak ve sistemi daha kullanılabilir sağlam bir yapıya sokmak için modül, metal çerçeve ile çerçevelenir. Modüler yapının kullanım kolaylığı yanında, büyük bir üstünlüğü de, güç gereksinimine uygun olarak değişik boyutlarda "fotovoltaiik örgü" (PV Array) lerin kurulmasına uygun olmalıdır.



Güneş pillerine dayalı "fotovoltaiik, PV güç sistemleri" akım ve gerilim gereksinmelerine bağlı olarak düzenlenmiş PV modüller, sistemde depolanmaya gereksinim var ise, aküler ve denetim sistemi ile doğru akım/alternatif akım dönüşümünü sağlayan çeviricilerden (inverterlerden) oluşur. Yakın geçmişe kadar alışla gelmiş elektrik enerjisi üretim biçimleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olan PV sistemlerinin kullanımı yalnızca iletişim, uzay çalışmalarını gibi özel uygulama alanlarında sınırlı kalmıştır. Son yirmi yılda PV teknolojilerindeki gelişmelere ve PV pazarının büyümesine koşut olarak maliyetler sürekli bir düşüş eğilimindedir. Bu günkü gelinen durumda, PV güç üretiminin yılda %25-%30 dolayında artacağı tahmin edilmektedir. Ancak bu gün PV kurulu gücün, dünya güç gereksiniminin yalnızca yüz binde dört kadan olduğu gerçeği göz ardı edilmemelidir. Bu payın 2010 yılında %0.13 dolayına ve 2020 de %1 ve 2030 ile 2050 yılları arasında %5 ile %10 dolayında bir değere ulaşacağı



beklenmektedir. Yakın gelecekte güneş enerjisinin dünya enerjisi gereksiniminin %1 ile %10 kadar bir bölümünü sağlayabilmesi varsayımı, yeterince gerçekçi bir varsayımdır. Şekil 18 dünya genelinde üretilen PV gücünün yıllara göre değişimini vermektedir



Şebekeden bağımsız sistemler: şebekeye uzaklığı 1-2 km olan noktalardaki küçük yerleşim birimleri için güneş ışınım verileri yeterli olduğunda, PV güç sistemleri, yalnızca ilk yatırım giderleri bile göz önüne alındığında, şebekeye bağlanmak



için gerekli olan yatırımdan daha kazançlı olabilmektedir. Avusturya, İspanya gibi ülkelerin her birine bu şekilde kurulmuş PV sistemlerinin, iletişim, denizcilik, gözetleme kuleleri, su pompaları, kara/deniz/hava yolları ile ilgili sinyaller, petrol ve gaz hatlarında korozyondan korunma, vb. uygulamaları, gün geçtikçe artmaktadır.

Şebekeye Bağlı Sistemler: Bu tür sistemler iki başlık altında ele alınabilir. 1. şebekeye bağlı PV güç santralleri: güçleri 10kWp ile onlarca MWp arasında değişen PV sistemler olup, çoğunlukla yerel enerji gereksinimlerine destek olmak üzere kurulmuşlardır. Özellikle güç gereksiniminin arttığı saatlerde yerel PV sistemlerini devreye sokacak düzenlemeler için ticari olarak enerji hatlarının geliştirilmesinden daha çekici olabilmektedir. 2. şebekeye bağlı Dağıtılmış PV güç sistemleri: son yıllarda yaygın hale gelen kullanıcıların bina çatı ve yüzeylerine yerleştirilen bu sistemler tipik olarak 1kWp 50 kWp arasında değişmekte olup iki yönlü sayaç uygulaması ile kullanılan PV gücü şebekeye verilmektedir. Bu tür

uygulamalarda PV kurulu gücün 1995 yılı itibari ile 35MWp dolayında olduğu sanılırken , temmuz 1998 de Viyana da ikinci dünya fotovoltaik enerji konferansında özellikle evlerin çatılarına yerleştirilen PV sistemlerine ilginin hızla arttığı belirlenmiştir.

Avrupa Birliği'nin 2010 yılına kadar bir milyon küçük fotovoltaik sistem kuracağı açıklanmıştır. Japonya 2000 yılına kadar 70 000 çatıya PV sistem programını tamamlamayı planlamaktadır. Benzer olarak Hollanda, PV sistemlerini çatıda kur-işlet-sahip ol programını başlatmıştır.

1997 de PV Pazar hacmi 120MWp nin üzerinde gerçekleşirken, üretim kapasitesi buna cevap vermekte zorlanmaktadır. Bu gün PV sektöründe, üretilen modüllerin yaklaşık %90 kadannı silisyum kristalini taban alan sistemler oluşturmaktadır. PV modül üretiminin çoğunluğu ABD (%44), Japonya(%20) ve, Avrupa (%27) olarak bölüşürken %9 kadar bir bölümü de diğer ülkelerce gerçekleştirilmektedir. Artan isteme koşut olarak hızla büyüyen PV pazarının iş kapasitesi 1milyar dolar/yılı çoktan aşmış bir durumdadır. 2010 yılı itibari ile ABD fotovoltaik endüstrisi 60 milyon dolarlık bir kapasite ön görmektedir. Güneş pilleri üretiminde elektronik endüstride kullanılmayan (off-cut) silisyum malzeme kullanılmaktadır. Ancak bu kaynak, artan sistemi karşılamakta zorlanmaktadır; bu nedenle, örneğin Japonya nın önümüzdeki iki yıl için hedeflediği 70 000 çatıya PV sistemi programını gerçekleştirebilmesi için PV kalite silisyum üretecek bir fabrikayı kurması beklenirken, Avrupa nın da bunu izleyeceği sanılmaktadır. Bu gelişmelerin, raporun son bölümünde ayrıntıların tartışılacak olan, önemli maliyet düşüşlerini beraberinde getireceğine inanılmaktadır.

Güneş Pili Türü	Tipik Verimliliği	Modül	Maksimum Güneş Pili (Maksimum ölçülen) Verimliliği (laboratuvarda) % %
Tek kristal silisyum			12-15 (22,3) 24 BP Solar High-Teck 16-18
			Çok kristalli Silisyum 11-14 (15.3) 18.6
			Amorf Silisyum 6-7 (10.02) 14.7
			Kadmiyum Tellür 7-8 (10.01) 15.8
			Bakır İndiyum di Selenid - (14.1) 17.7

Çizelge 3 Fotovoltaik Modül verimlilikleri

Bunların yanında, kararlılığı ispatlanmış kristalli silisyum malzemenin ince film formunda kullanılması çalışmaların da önemli gelişmeler kaydetmiş olup, yakın gelecekte adaylar arasına girme yolundadır.

PV Güç Sistemlerinin Fiyatları

PV güç sistemlerinin fiyatlarının önemli bir bölümünü modül fiyatları oluşturur. Güç sistemlerinin büyüklüğüne ve kullanılan malzemeye bağlı olarak modül fiyatları dalgalanmalar gösterse de, fabrika çıkış fiyatı kristalli silisyum için 5,5\$/Wp ila 4,9\$/Wp arasında; amorf silisyum için 4.9\$/Wp ila 4,1\$/Wp arasında değişmektedir. Yalnızca 1993 ve 1995 yılları arasında modül fiyatları %20-39 arasında düşüşler göstermiş ve bu tür eğilim sürmektedir. yıllık modül üretim kapasitesi 1997 de 120MWp/yıl dolayında gerçekleşmiştir. 1996 da Madrid de yapılan "Avrupa için yenilenebilir Enerji Stratejileri" konferansında küresel boyutlarda gerçek PV güç isteminin 500MWp/yıl ile 1GW/yıl arasında olduğu belirtilmiştir. Üretim bu boyutlara ulaştığında, modül fiyatlarında hedef fiyat olan 1\$/WP değerinin altında hem kristalli silisyum , hem de ince film modüller için kolayca inilebileceği, Temmuz 1997 Barcelona da yapılan 14. Avrupa fotovoltaik güneş enerjisi konferansında sunulan iki özgün çalışma ile gösterilmiştir.

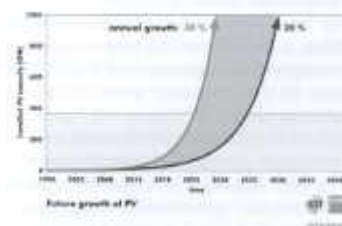
PV modüllerinde üretilen d.c. elektriğin, a.c. elektriğe dönüştürülmesinde gerçekleştirilen çeviriciler. Sistem fiyatına 0.88\$/VA ve 1.065\$/VA arasında değişen bir katkı getirmektedir.

PV güç sistemlerinin anahtar teslim \$/Wp fiyatları, sistemin büyüklüğüne, bulunduğu bölgeye, şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olmasına bağlı olarak, oldukça geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Örneğin, şebekeden bağımsız 100-500Wp büyüklüğündeki güç sistemlerinin fiyatı 14\$/Wp – 41\$/Wp arasında değişirken, 1-4 kWp sistemler için 10\$/Wp - 28\$/Wp arasında hesaplar çıkarılmıştır.

Sistemlerin büyüklüğü ile ters orantılı olan PV sistemleri için güç üretiminin fiyatı için en sağlıklı değerler, 1997 de başlayan bir Avrupa Topluluğu desteği ile yaşama geçirilen ve bu güne kadar en büyük PV güç sistemi projesi olan Grit adasının 50MW bir PV sistem ile elektrifikasyonunda ortaya çıkan rakamlardır. Çok kristalli silisyum modüllerin kullanıldığı projede 8.5 cent/kW-saat olan maliyet PV sektörü için oldukça isteklendiricidir.

Avusturya-Viyana da Temmuz 1998 de yapılan 2.dünya fotovoltaik enerji Konferansında belirtilen fotovoltaik gücün %30 -%40 arasındaki yıllık ortalama büyüme hızının (1997’de %40) sürmesi, fotovoltaik kurulu gücün 2030-2040 arasında 1000 gigawatt düzeye çıkmasını beraberinde getirecektir.

Şekil 2.1’de gösterilen bu değerlendirmede yatay çizgi, bu günkü kurulu nükleer gücü göstermektedir.



Yukarıda özetlenen fiyatların alışılagelmiş kaynaklarla karşılaştırılmasında, çevre etkileri ve sosyal maliyet, işin içerisinde katılmamıştır. Fraunhofer Enstitüsü tarafından Almanya için yapılan ayrıntılı bir çalışmada, fosil kaynaklarından elektrik enerjisi üretmenin getireceği toplam sosyal maliyetin en az 0,27\$/kW-saat olduğu ve nükleer santrallerin getireceği toplam sosyal maliyetlerin ise en az 0,04\$/kW-saat olduğu belirtilmektedir. PV güç sistemlerinin Sosyal maliyeti sıfıra çok yakın alınabileceğinden, fiyat karşılaştırılmalarında bu gerçeğin göz önüne

alınması gerekmektedir.

GELECEK VE ÖNERİLER

Dünya genelinde bu gün bile 2 milyar insan, elektrik enerjisinden yoksundur. Nüfus yoğunluğunun küçük olduğu bölgelerde “fotovoltaik enerji” bu günkü fiyatlarla bile çekici görünmektedir. Yukarıdaki tartışmalardan görüldüğü gibi, tasarım, alt yapı, aküler, çevrici ve bütün gerekli bağlantılar hesaba katıldığında maliyet 7\$/Wp değeri dolayında olmaktadır; bu ise birkaç kilowatt güç gereken bir noktaya 500m öteden güç bağlamanın maliyeti ile karşılaştırıldığında daha ucuzdur. Bunun yanında yeni enerji kaynağının hiçbir devingen parçası olmadığı için gürültüsüz çalışır.

Fotovoltaik modüllerin ömür sürelerinin 20 yıl olduğu düşünülürse, yapılan yatırımın kaç yılda geri alınabileceği sorusuna, literatürde verilen cevap, güneş kuşağındaki bölgeler için, tek kristal için, yaklaşık 5 yıl; çok kristaller için yaklaşık 2,5 yıl biçimindedir. Üretim kapasitesinin artışı ve teknolojik gelişmelerle birlikte bu değerlerin yakın gelecekte bir yılın altına ineceği sanılmaktadır. Böylece, yeni ve yenilenebilir enerjilere giderek artan ilgiye bağlı olarak PV güç sistemleri için “fiyatlarının çok yüksek olması” yönündeki inanış yerini fiyat farkının çok büyük olmadığı şeklindeki bir söyleme bırakmıştır. Özellikle çevre sosyal maliyetler göz önüne alınarak PV kullanımına önemli devlet destekleri verilmiştir. PV güç sistemlerinin iyi planlanmış mimari integrasyonunun sağlayacağı, %20 dolayındaki kazanım bu tür uygulamaları orta ve kuzey Avrupa bile çok çekici bir maliyetle aralığına taşımış olup, PV pazarının Büyümesine bu tür uygulamaların önderlik edeceği düşünülmektedir.

Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli göz önüne alındığında PV güç sistemleri bir çok farklı uygulamalarda çekici bir seçenek olma potansiyeline sahip olmasına rağmen, bu sistemlerin devlet otoritelerine ve toplumumuza geniş ölçüde sağlıklı verilerle tanıtılmaması nedeni ile ülkemizde

yeterince desteklenmemektedir. Yakın gelecekte yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya enerji dengelerinde küçümsenmeyecek katkılarının olacağı ve PV sistemlerinin bu katkıda önemli bir payı olacağı, genel kabul halindedir. Bu gelişmelere ayak uydurmak amacı ile "güneş pili teknolojileri" ve "PV sistemleri" ile ilgili bilgi-beceri birikiminin ülkemize taşınabilmesi için bu konuda bilimsel ve teknolojik projelerin üretilmesi devlet ve özel girişimce özendirilebilmelidir. Ayrıca, PV güç sistemlerinin mimari entegrasyonu ve çift yönlü sayaç kullanımı konusunda yasal düzenlemelerin yapılarak öncelikle kamu ya ait yeni projelerde, üniversite yerleşke planlamalarında, oto-yol inşaatlarında ve diğer yapılarda kullanımı isteklendirilmelidir.

PV konusunda toplumsal eğitime önem verilerek öncelikle orta öğretim kurumları ve üniversiteler hedef gurup olarak seçilip sağlıklı tanıtım kampanyaları ile "Güneş Pilleri" ve "PV Güç Sistemleri" abartısız anlatılmalıdır