



EVİNİZDEKİ GÜNEŞ

Büyük patlamadan bu yana evrendeki enerjinin ana kaynağı; yıldızların iç kısımlarındaki yüksek basınç ve sıcaklıklar altında çekirdeklerin, hidrojenen başlayarak kaynaştırılması suretiyle daha ağır elementlerin sentezlenmesi, yani füzyon süreci. Güneşimiz de bu yıldızlardan birisi olarak, bağında barındırdığı füzyon fırınlarında her saniye, yaklaşık 10^{26} Joule, yani yaklaşık 3 katrilyon ton kaliteli kömürün içerdiği kadar enerji üretiyor ve artık bir sıcaklık dengesine erişmiş olduğundan, ürettiği enerjinin tümünü radyasyon halinde uzaya ışınıyor. Bu ışınlar, Dünyamızın bulunduğu konuma, kayda değer bir kayba uğramaksızın ulaşıyor. Ancak Dünyamız, Güneş'ten yayılan toplam enerjinin, yerkabuğunun yüzölçümüyle orantılı çok düşük bir kısmını alabiliyor. Bu da, toplam enerjinin yaklaşık milyarda biri düzeyinde.

Gerçi bu ışınların bir kısmı geri yansıtılırken, bir kısmı atmosferde soğuruluyor ve ancak, yarısına yakını yerkabuğuna ulaşıyor. Yine de; güneşli bir günde yeryüzünün Güneş'e bakan yarısının her metrekaresine, saniyede yaklaşık 1500 Joule kadar enerji düşüyor. Bu varış hızı, metrekaresine başına 1,5 kW'lık bir güce eşdeğer ve yerkabuğuna toplam olarak her saniye, yaklaşık 200 katrilyon Joule (200×10^{15} Joule) enerji enjekte ediyor. İnsanlığın yılda tükettiği toplam birincil enerji miktarı 400 Hexa Joule (400×10^{18} Hexa Joule) olduğuna göre; güneş enerjisi bu tüketimin tamamını, güneşli bir günün yaklaşık 5 saatinde sağlayabilir.

Güneş enerjisinden yararlanmak amacıyla; pasif mimarlık yöntemleri kullanılarak, konut ve binaların ısıtılmasına veya ısı toplayıcı paneller aracılığıyla da, sıcak su gereksiniminin karşılanmasına katkıda bulunmak mümkün. Bu kullanımlar halen oldukça yaygın. Yıldaki bol güneşli gün sayısı açısından şanslı bir konuma sahip bulunan ülkemiz de, ısı toplayıcı panellerin üretimi ve kullanımı alanında dünyanın en önde gelen ülkeleri arasında.

Ancak, güneş enerjisinin çok daha yaygın olarak kullanılabilmesi için, hemen her amaca yönelik olarak kullanılabilen elektrik enerjisine dönüştürülmesi gerekir. Dünyamızda halen, yaklaşık 3 milyar kW'lık etkin kurulu güç var ve bu gücü, dönüşüm kayıplarını da hesaba katmak kaydıyla 10 milyar m²'lik, yani 10 000 km²'lik veya 100km x 100km'lik güneşli bir alandan sağlamak mümkün.

Fotovoltaik Güneş Panelleri

Güneş gözesi dizilerinden oluşan küçük panelleri, pile gereksinim duymayan hesap makinelerinde, daha büyükleriyse; acil durum yol işaretleri ve telefon kulübelerinde, açık deniz şamandıralarında ve hatta artık, bahçeleri aydınlatan lambalarda görüyoruz. Uydularda da, elektrikli sistemlere güç sağlamak üzere kullanılıyorlar. Bu sistemler üzerinde son 20 yıldır yoğun araştırmalar yapılıyor. Güneş ışığını doğrudan elektriğe çeviren ve bu nedenle, 'ışık-elektrik' anlamında 'foto-voltaik'ler de denilen bu aygıtlar, yarıiletken teknolojisine dayanıyor.

Yarıiletkenler

En çok tanınan ve yaygın olarak kullanılan yarıiletkenlerin başında silikon geliyor. Atom numarası 14 olan bu elementte, elektronların yörünge dizilimi $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ şeklinde. Atom 4 elektron daha bulup, en dış 3p orbitalini doldurabilecek olsa, daha istikrarlı bir yapıya kavuşacaktır. Bu nedenle ilave elektronlar almaya çalışır ve elektronlara karşı çekiciliği (affinity) olduğu söylenir. Silikon saf haliyle, elmasınki gibi bir kristal yapıya sa-



hiptir ve bu yapıda her atomun dört adet komşusu vardır. Atomlardan her biri komşularından elektron almaya çalışır; ancak diğerleri de aynı eğilimde olduklarından, sonuçta komşu atom çiftleri karşılıklı olarak, en dıştaki birer elektronlarını paylaşırlar. Yani her silikon atomu, dört komşusundan birer elektron ödünç almış gibi olur. Kristal yapıyı bir arada tutan bağları, bu elektron paylaşımı oluşturur.

Bu kristal yapıya, örneğin ısı şeklinde enerji verildiğinde, atomların kristal yapıdaki konumlarını merkez alan titreşimleri arttığından, bağlı elektronlardan bazıları kopabilir. Bu elektronlara, elektrik yükü taşıyıcısı anlamında, 'serbest taşıyıcılar' denir. Geride, elektron eksikliği anlamında 'deşik' denen birer artı yük kalmıştır. Ancak, elektronlar kristal yapıya güçlü bir şekilde bağlı olduklarından, olağan koşullar altında, 'serbest taşıyıcı' ve 'deşik' çiftlerinin sayısı, yok denecek kadar azdır. Dolayısıyla silikon, saf kristal haliyle kötü bir iletkenidir. Çünkü, iyi bir iletken olan bakırdaki gibi, atomundan kolayca ayrılıp ortalıkta dolaşarak iletkenlik sağlayacak elektronları yoktur. Ancak, bu kristal yapı içerisine, örneğin milyonda bir oranında fosfor ya da boron atomu serpiştirilirse, ortam biraz daha iletken, yani yarıiletken hale gelir.

Atom numarası 15 olan fosforun

dış (n=3) orbital kabuğunda, silikondan bir fazla, yani 5 elektron bulunur. Fosfor bu elektronlarından dördünü, kristal kafesteki dört komşu silikon atomuyla paylaşır. Beşinci elektron paylaşılmamış, dolayısıyla bir başka atomla bağ oluşturmamıştır. Adeta ortada fazlalık olarak kalan bu elektron, bağlı bulunduğu fosfor atomundan, görece daha kolay kopabilir ve geride 'deşik' bir artı yük bırakıp, kristal yapı içerisinde dolaşarak bir miktar iletkenlik sağlayabilir. Serbest taşıyıcıların sayısı çoğalmış, ortam yarıiletken bir hal almıştır. Silikon kristaline emdirilen yabancı atomlara 'safsızlık,' fosfor ilavesiyle elde edilen yarıiletkenlere de, serbest taşıyıcıları elektronlardan, yani 'negatif yüklü' unsurlardan oluştuğu için, n-tipi yarıiletken denir.

P-tipi yarıiletkenlerdeyse safsızlık olarak, örneğin atom numarası 5 olan ve elektronları $1s^2 2s^2 2p^1$ yörünge dizilimine sahip bulunan boron kullanılır. Bu atomun dış (n=2) orbital kabuğundaki 3 elektron, 4 komşu silikon atomunun üçüyle paylaşılır. Dördüncü komşuya, paylaşacak elektron bulamamıştır ve burada 'deşik' diye adlandırığımız bir elektron eksikliği vardır. Öyle ki; yakınından yabancı bir elektron geçecek olsa,deşik tarafından çekilip yakalanacaktır. Dolayısıyladeşik, artı yük taşıyor gibidir ve orta-



Bir "güneş fırını". Heliostat denen yüzlerce aynadan yansıyan güneş ışını, kulede küçük bir noktaya odaklanıyor. Ortaya çıkan enerji, çeliği eritebiliyor.

lıkta serbestçe dolaşıp, ortama bir miktar iletkenlik sağlayabilir. Bu durumda serbest taşıyıcılar artı yüklü deşiklerden oluştuğundan, yarıiletkenin p-tipi olduğu söylenir.

P-n Yonga

Özetle, serbest yük taşıyıcısı olarak; n-tipi yarıiletkende fosfor atomlarının fazlalık elektronları, p-tipi yarıiletkendeyse bor atomlarının elektron eksikliğinden kaynaklanan deşikler vardır ve bu elektronlarla deşikler bir araya gelebilseler, birleşip birbirlerinin elektrik yüklerini gidereceklerdir. Her iki tip yarıiletken de, olağan koşullar altında, ayrı ayrı yüksüzdür. Fakat, bu iki tip yarıiletken teması getirildiğinde; n-tipindeki elektronlardan sınıra yakın olanlar, sınırın hemen öte tarafındaki deşiklerin çekimine kapılır ve bazıları hızla sınırı geçip onlarla birleşmeye başlar. Sınırın n-tarafında

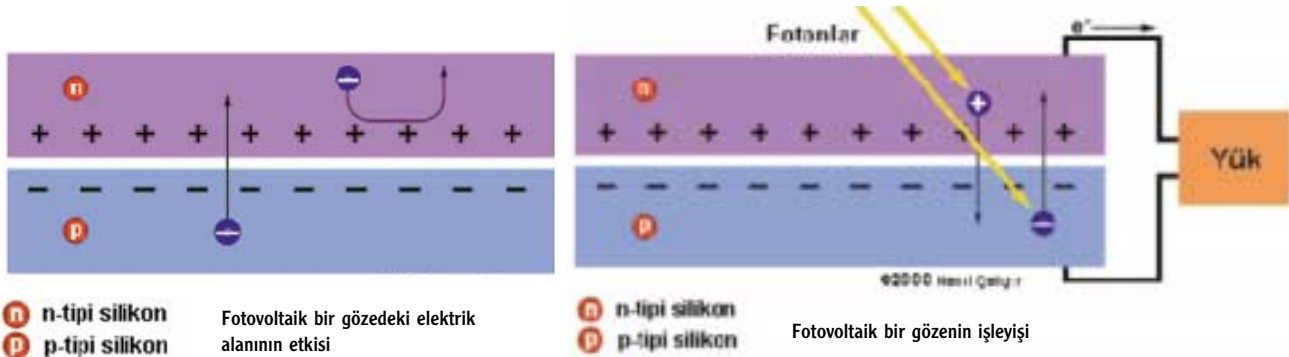
elektron eksikliği, yani artı yük; p-tarafında ise elektron fazlalığı, yani eksi yük birikmektedir. Bu birikim, şekilde görüldüğü gibi, artı yükten eksi yüke, yani n-tarafından p-tarafına doğru bir elektrik alanının oluşmasına yol açar. Bu elektrik alanı, sadece sınır çizgisinin yakın komşuluğunu kapsar ve sınırdan uzak dış bölgelere ulaşamaz. Elektronlar sınırı geçtikçe alanın şiddeti artmakta, arkadan gelen elektronların geçişi giderek zorlaşmaktadır. Çünkü, elektronlar için elektrik alanı yönünde hareket etmek, yerçekimi kuvvetiyle bir benzetme yapılabilir. Sonuç olarak, sınırın öte tarafına belli bir miktar elektron geçtikten ve sınır civarındaki elektrik alanı belli bir şiddete eriştikten sonra, elektron geçişi durur.

Gerçi n-bölgesindeki serbest elektronların hepsi değil, sadece küçük bir orana karşılık gelen bazıları, p-bölge-

sindeki deşiklerden bazılarıyla birleşmişlerdir. Ama her iki bölgenin de yüksüzlüğü bozulmuş ve artık yeni bir denge oluşmuştur. Bu denge çerçevesinde; sistemin n-tarafının sınıra komşu bölgesi artı, p-tarafınınsa, keza sınıra komşu bölgesi eksi yüklüdür. Sınırı köprüleyen elektrik alanı bir diyot oluşturur ve ortaya çıkabilecek yeni serbest elektronlara, p'den n'ye geçmeleri yönünde kuvvet uygularken, tersi yöndeki geçişlere izin vermez. Öte yandan bu elektrik alanı, iki yarıiletken arasında bir gerilimin var olduğu anlamına gelir. Eğer bu gerilim üzerinden yük akıtılabilecek olursa, yani akım geçirilebilirse; akım şiddeti çarpı gerilim ($V \times I$) kadar güç üretilmiş olacaktır. Sözkonusu akım, güneş ışınlarının yol açtığı serbest elektronlardan oluşacaktır.

Güneş Işınları

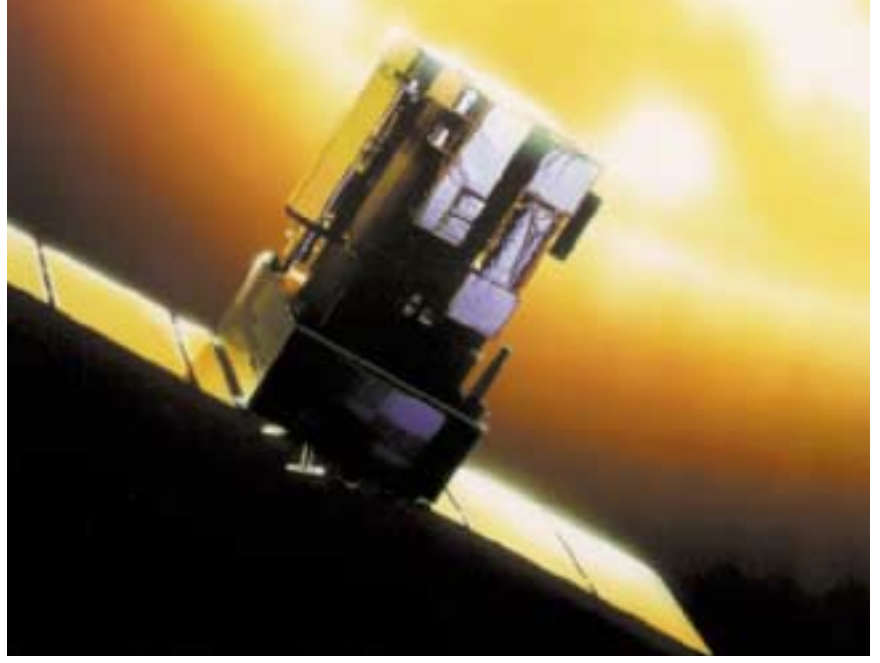
Işık bilindiği gibi, uzayda birbirine dik olarak seyahat eden, fakat bunu yaparken de; seyahat yönüne hep dik kalan yönlerini, sabit hızla dönen bir burğu üzerindeymişlercesine, yol boyunca sürekli olarak değiştiren elektrik ve manyetik alan salınımlarından, yani elektromanyetik dalgalardan oluşur. Kendisi dalga yapısına sahip olmakla beraber, enerji taşıma ve aktarım mekanizması, enerji paketçiklerinden oluştuğu düşünülen ve foton adı verilen parçacıklar modeli çerçevesinde irdelenir. Şöyle ki; belli ve tek bir frekansa sahip olan ışığın taşıdığı enerji, her biri bu frekansın belirlediği sabit miktardaki enerjiyi taşıyan paketçikler, yani fotonlar halindedir. Soğurgan bir malzeme üzerindeki belli bir noktaya odaklanması halinde böyle bir ışık, sözkonusu enerji paketçiklerini malzemenin o noktasına birer birer enjekte eder. Fakat güneş ışınla-



rı tek bir frekansa sahip olmayıp, bir prizmayla tayfına ayrılabilen çeşitli frekanslardaki ışınların bir karışımından oluşur. Bu ışınların yeryüzüne ulaşan büyük bir kısmı, görece düşük frekanslara sahiptir ve karşılaştıkları malzeme tarafından soğurulmaları, malzemeyi oluşturan atomların çekirdekleriyle değil, yörüngelerindeki elektronlarla etkileşmeleri yoluyla gerçekleşir. Çünkü çekirdeklerle etkileşim, çok daha yüksek enerjili fotonlar gerektirir. Halbuki bunlar, atmosferin dış katmanlarından geçerken hemen tamamen emilir.

Yeryüzündeki herhangi bir malzemeye ulaşan güneş ışınlarından, belli bir frekansa sahip olan biriyle, o malzemeyi oluşturan atomlardaki elektronlar arasındaki etkileşim, iki şekilde yer alabilir. Eğer bu tek frekanslı ışığın taşıdığı fotonların her birinin enerjisi, ancak atomdaki elektronlardan birini yörüngesinden çıkartıp serbest hale getirebilecek kadarsa, foton tümüyle soğurulurken bir elektron açığa çıkar ve bu olaya 'fotoelektrik etki' denir. Diğer olasılık; fotonun enerjisinin, sözkonusu elektronu yörüngesinden çıkarmak için gereken miktardan daha fazla olması. Böyle bir foton, soğurulma sırasında enerjisinin sadece, elektronu serbestleştirecek kadarki kısmını kaybeder ve daha düşük enerjili bir foton olarak yoluna, çoğu kez farklı bir yönde devam eder. Ortaya bir de serbest elektron çıkmıştır ve bu olaya 'Compton saçılması' denir. Çünkü etkileşime giren önceki foton, saçılarak yoluna devam etmiş gibidir. Saçılmadan çıkan sonraki foton, eğer enerjisi hala yeterliyse, bir başka atomla etkileşime girip, bir elektronu daha serbest hale getirebilir. Fakat böyle bir ikinci başarımın olasılığı, birincisine oranla çok düşüktür ve uygulama hesaplarında genellikle ihmal edilir. Son olarak; elektron koparmak için gerekenden daha az enerjiye sahip olan fotonlar, atomlarla etkileşime girmeksizin yollarına devam ederler. Yani bu fotonlar açısından, içinde yol aldıkları malzeme saydamdır. Şimdi dönelim yarıiletkenimize ve üzerine güneş ışınları düşürelim...

Frekansını uygun olup da, sistemin p- veya n-bölgesinde soğurulan fotonlar, elektron-deşik çiftlerinin oluşmasına yol açar. Sınırı köprüleyen elektrik



Uydulara güç sağlamak için güneş panellerinden yaygın olarak yararlanılıyor.

alanı, şekilde görüldüğü gibi; n- tarafındaki bir çiftin deşğini, p-tarafındaki elektronunu, sınırın diğer tarafına geçmeye zorlar. Fakat bu geçiş ancak, sınıra yakın olan yük taşıyıcıları başarabilir. Çünkü uzak bölgelerde oluşan taşıyıcılar, sınıra yaklaşıp da elektrik alanının etkisine girinceye kadar, görece uzun bir yol katetmek zorundadır ve bu arada karşılaştıkları zıt yüklü akranlarıyla birleşerek nötürleşirler (yüksüz hale gelirler).

Sınırdan bir taşıyıcının geçmesi halinde, az önceki yük dengesi bozulmuş olur. Arada çok kısa bir süre için dahi olsa, yeni bir fotonun soğurulmadığını, yani sınıra doğru yeni taşıyıcıların pompalanmadığını düşünecek olursak, sistem eski haline dönmeye yönelecektir. Dolayısıyla, sınırı geçmiş olan taşıyıcı, bir yolunu bulup sınırın geri tarafındaki zıt yüklü bir akranyla bir araya gelerek, tekrar nötürleşme eğilimindedir. Kendi haline bırakıldığı takdirde, bunu gerçekleştirebilmesi için zaman gerekecektir. Çünkü, örneğin taşıyıcının bir elektron olduğunu varsayar ve yerçekimi benzetmesine tekrar dönersek; bu taşıyıcı az önce, elektrik alanının oluşturduğu yokuşu tırmanmış, ancak artık bir düzlüğe ulaşmıştır. Yani elektron açısından sistem, arada bir yokuşla birbirine bağlı bulunan, biri yüksek biri alçak, iki vadeden ibarettir. Elektron az önce, sınırın öte tarafında soğurulan bir fotonun sağladığı enerjiyle yokuşu bir kez

tırmanmış olmuş, fakat daha yüksek olan vadiye vardıldıktan sonra, geri dönüp aynı yokuştan aşağı yuvarlanmak için artık bir nedeni kalmamıştır. Öte yandan, gelişigüzel çarpışmalar sonucu zamanla geri dönüp sınırı geçmesi de, düşük bir olasılıktır. Çünkü, bir yarıiletken olması nedeniyle iç direnci yüksek olan silikon, elektronların dolanımına güçlükle izin vermektedir ve büyük olasılıkla; sözkonusu elektronun potansiyel enerjisi, kullanılabilir güç oluşturmak yerine, seri direnç kayıplarına dönüşecektir. Ya da güç oluşturma işi, yokuşa yakın bir başka elektron tarafından, adeta vekaleten yapılacaktır.

Göze Tasarımı

Ancak; eğer bizim elektronumuzun bulunduğu noktadan başlayarak, sınırın öte tarafına iletken bir hat çekilecek olursa, elektronumuz yokuşun varlığını anında hissedecek ve iletken üzerinden diğer tarafa geçip, oradaki deşiklerden biriyle birleşecektir. Hem, sistem denge haline daha çabuk dönmüş, hem de iletken üzerindeki gerilimden aşağı yuvarlanan elektron güç üretmiş olur: $V \times I$. İletken hattın döşenmesi, tıpkı altı kapalı üstü açık olan ve içlerinde farklı yüksekliklerde su bulunan iki tüpün, altlarının açılarak birbirlerine ek bir boruyla bağlanması gibidir: Bileşik kaplar ilkesine göre; düzeyi yüksek olan tüpteki su



Georgia Teknoloji Enstitüsü'nün su sporları merkezinin çatısında bulunan 3000 fotovoltaik panel binanın elektrik gereksiniminin üçtebirini karşılıyor.

hemen, diğerine doğru harekete geçer ve bu akış, iki tüpteki su düzeyleri eşitlenene kadar devam eder. Yeni denge durumu inşa edilene kadar, iki yönlü bazı salınımlar da yer alır tabii...

Yarıiletken yonganın ne de olsa bir kalınlığı vardır ve fotonlar bu yonganın, diyelim ki geniş yüzeyinin herhangi bir noktasında ve o noktanın altındaki herhangi bir derinlikte soğurularak taşıyıcı çiftleri oluşturmaktadır. Dolayısıyla, sözkonusu iletken hattın nereden nereye döneceği sorusu önem taşır. Bu hat yonganın içine dönebileceğine göre; ki bu, sınırdaki elektrik alanını bozmak anlamına geleceğinden, zaten istenmez; alt ve üst geniş yüzeylerine dönebilir. Akla ilk gelen çözüm, her iki yüzeyi de tümüyle, iletken bir filmle kaplamaktır. Böylelikle, yonga hacminin herhangi bir noktasında ortaya çıkan bir taşıyıcı elektron, iletken yüzeylerden kendisine daha yakın olanına, mümkün olan en kestirme yoldan ulaşır, sınırın öte tarafına bu iletken film üzerinden geçebilecektir. Fakat, eğer iletken malzeme saydam değil de opak; her iki yüzeyin de film halinde kaplanması, güneş ışınlarının yarıiletken malzemeye ulaşmasını engelleyeceğinden, iyi bir fikir değildir. Opak iletken bu yüzden; üst

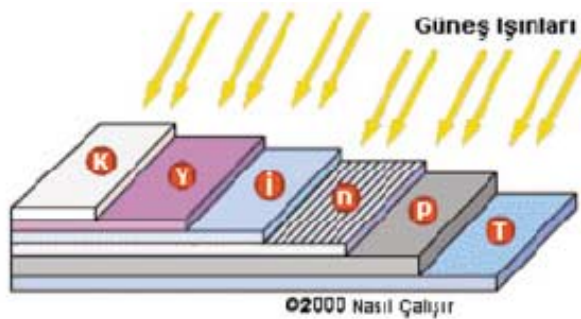
yüzeyde elek kafesine benzer bir ağ şeklinde, alt yüzeydeyse sürekli bir film halinde döşenir. Ki, güneş ışınları, üst yüzeydeki kafes aralıklarından geçip, yarıiletken malzemeye ulaşabilirler. Gerçi güneş ışınlarına saydam olan ve her iki yüzeye de film halinde dönebilen iletken malzemeler de vardır. Ancak bunlar, opaklarına oranla çok daha pahalı olduklarından, üretilen gözelerin pek azında kullanılırlar.

Yongamız bu haliyle üzerine düşen güneş ışınları enerjisinin, teorik olarak %25, uygulamadaysa ancak %15 kadarını soğurup elektrik enerjisine dönüştürebilir. Çünkü, güneş ışınlarını oluşturan frekansların çoğunun taşıdığı enerji, silikondan elektron koparmak için tam uygun düzeyde değildir. Bu işlem için gereken enerjiye, ge-

nelde 'bant aralığı enerjisi' denir ve atomun türüne bağlı olan bu miktar, silikon için 1,1 eV'tur. Halbuki, güneş ışınlarından bazılarının enerjisi bu düzeyin üstünde, çoğunun kiye altındadır. Bu ikinciler silikon yongadan, malzeme sanki saydammış gibi geçip giderler.

Güneş ışığı fotonlarının daha fazlasını soğurabilmek için; silikondan farklı, bant aralığı 1.1eV'tan daha dar olan, başka bir yarıiletken malzeme kullanmak mümkündür. Ancak, p-n sınırındaki elektrik alanının şiddeti, yani iki bölge arasındaki gerilim, ne yazık ki bu bant aralığı enerjisiyle doğru orantılıdır. Dolayısıyla; gerçi daha fazla soğurma sonucu sınırı geçen yük sayısı, yani akım artacak; fakat sınırdaki gerilim azaldığından $V \times I$, yani güç, artmak bir yana azalacaktır. Bu iki faktörü göz önünde bulunduran optimal bant aralığı enerjisi, tek bir yarıiletken malzemeden yapılan bir göze için 1.4eV kadar olup, silikonunkine yakındır. Yine de; farklı yarıiletken malzemelerden üretilmiş yonga katmanlarını üst üste yerleştirmek suretiyle, güneş ışınlarının daha fazlasını soğurmak ve daha fazla güce dönüştürmek mümkündür. Bu durumda; bant aralığı yüksek olan yonga, yüksek enerjili fotonları soğurması için üstte, diğeri ise; üst katmanı saydam olarak görerek içinden geçip giden düşük enerjili fotonları soğurması için alta konulur. 'Çoklu bağlantılı' (multi-junction) olduğu söylenen bu tür gözelerin farklı katmanları, p-n sınırlarında oluşan farklı şiddetlerdeki elektrik alanlarıyla çalışırlar.

Öte yandan, enerjisi uygun olan ışınlardan bazıları, iletken ağ hatlarına isabet edip ziyan olurlar. İletkenin soğurmasını azaltmak için, hatları inceltmek gerekir. Ancak bu durumda da, incelen iletkenin direnci artacağından, ısı kayıpları artar ve faydalı işe dönüştürülebilecek elektrik gücü azalır. Dolayısıyla, iletken hat kalınlığını optimal bir düzeyin altına indirmek, üretim süreci açısından mümkünse de, arzu edilmez. Bu iki neden yani; frekansa saydamlık ve iletken soğurması nedenleriyedir ki, fotovoltaik bir gözünün üzerine düşen güneş



- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| K Koruma camı | n n-tipi silikon |
| Y Yansıtma kaplama | p p-tipi silikon |
| İ İletken ağ | T Taban iletkeni |

Silikon bir fotovoltaik göze elemanın temel yapısı

ışınlarının %70'ten fazlası ziyan olur.

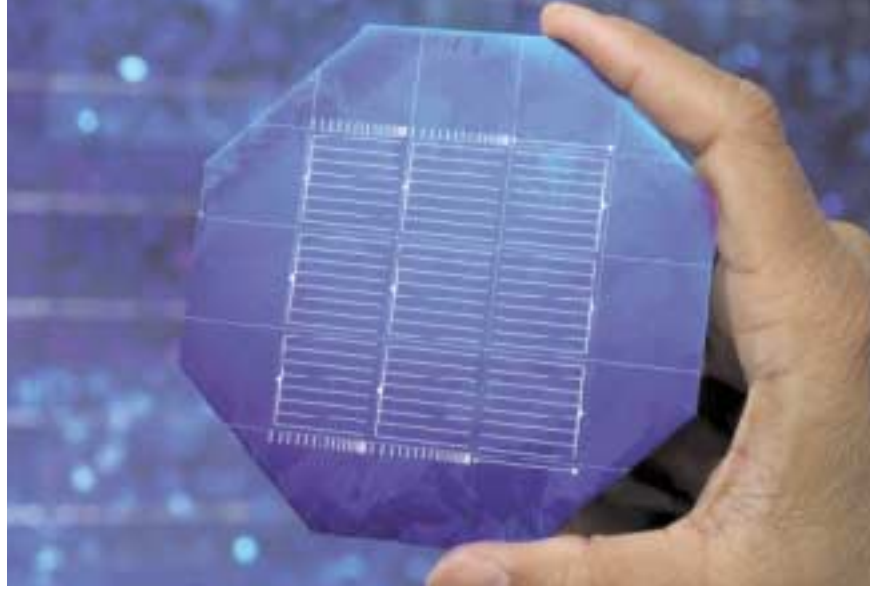
En verimli göze malzemesi, tek kristal halindeki silikondur. Maliyeti düşürmek amacıyla çok kristalli, hatta kristal bir yapıya sahip olmayan amorf silikon da kullanılır. Ancak bu malzemelerin verimi daha düşüktür. Göze yapımında kullanılan; galyum arsenid, bakır indiyum diselenid ve kadmiyum tellürid gibi diğer malzemeler de vardır. Ancak bu malzemeler, bilgisayar teknolojisinde yoğun olarak kullanılan silikon kadar yaygın olarak kullanılmaz, bolca üretilmezler. Dolayısıyla daha pahalıdır.

Gözenin kullanıma hazır hale gelmesinden önce, bir iki işlemin daha yapılması gerekir. Silikon parlak bir malzeme olduğundan, üzerine düşen ışınları güçlü bir şekilde yansıtır. Geri yansıyan ışınlar yonga tarafından emilemeyeceğinden, kayıp kalemlerinin içinde yer alır. Bu kayıp kalemini azaltmak için, gözenin üst yüzeyine, yansıtımcı bir kaplama uygulanır. Yansıma kayıpları böylelikle, %5'in altına kadar indirilebilir. Son olarak, gözeyi dış etkenlerden korumak için, en üst yüzeyi cam bir panelle kapatılır. Yan sayfadaki şekilde görülen gözemiz, artık tamamdır.

Gözelerden her birinin tek başına ürettiği akım ve gerilim, çoğu uygulama için fazla düşüktür. Gerilim düzeyini yükseltmenin yolu, gözeleri birbirine seri olarak bağlamak. Bu amaçla, genellikle 36 göze seri olarak birbirine bağlanıp, 'modül' denen göze grupları oluşturulur. Akımı artırmanın yoluysa, modülleri birbirine paralel olarak bağlamak. Bu amaçla, gereksinim duyulan akım düzeyinin belirlediği sayıda modül kullanılması gerekir. Bu modül grupları son olarak, sağlam bir çerçeve içerisine yerleştirilir. Çerçevenin arkasında, modül gruplarının ürettiği gücü kullanıma aktarabilmek için gereken artı ve eksi kutuplar bulunur.

Konut Uygulamaları

Modül gruplarımız hazır olduğuna göre artık; bir evin güç gereksinimini, güneş enerjisini elektrikle



Georgia Teknoloji Enstitüsü'nde üretilen düşük maliyetli, yüksek verimli bilgisayar ekranından basılmış çok kristalli silikon güneş hücresi.

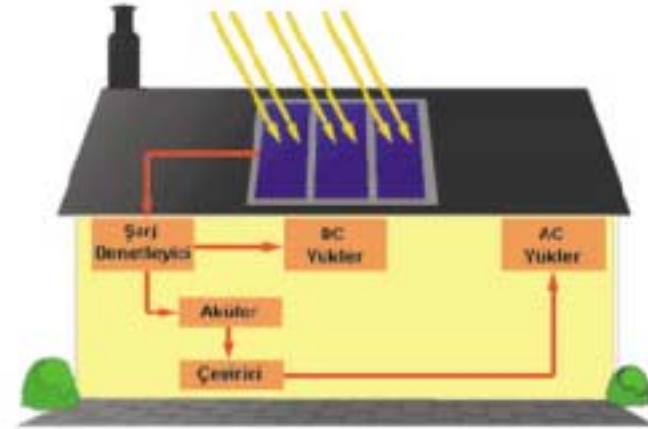
dönüştürerek karşılayabilmek için ne yapılması gerektiğine bakabiliriz.

Bir kere, panel üzerine en fazla miktarda güneş enerjisinin düşebilmesi için, panel yüzeyinin bu ışınlar dik olması gerekir. Halbuki güneş ışınlarının yeryüzündeki herhangi bir noktaya düşüş açısı, hem gün boyunca, hem de mevsimden mevsime değişmekte. Dolayısıyla, en ideal durumda, panelin güneş ışınlarını izlemesini sağlayacak bir 'açı ayarlama düzeneği'yle donatılmış olması gerekir. Ancak, panelin her an için gördüğü güneş enerjisi miktarının, o an için mümkün olan en yüksek düzeyde seyri sağlayan böyle bir düzenek, oldukça pahalı bir donanım. Kullanılmaması halinde yönelinecek ikinci en iyi tercih, panel açısını sabit tutmak ve bu açığı, panelin her an için gördüğü olmasa bile, hiç değilse gördüğü yıllık ortalama güneş enerjisi miktarının en fazla olmasını sağla-

cak değerinde seçmek. Bu seçim, ekvator'da gayet kolay. Çünkü çatıdaki panelin, evin bulunduğu noktada yerküreye teğet olan düzleme paralel olarak yerleştirilmesi yeterli. Diğer enlemlerdeyse, panelin yerküreye teğet düzlemle yaptığı açının, o enlemin ekvatorla yaptığı açığı eşit olması ve kuzey enlemlerdeki panellerin güneye, güneydekilerin de kuzeye bakması gerekir. Fakat bu sabit açı, evin elektrik ihtiyacı bir mevsimde diğerine göre veya öğleden sonra sabah saatlerine oranla daha fazla veya daha azsa, panelin hedeflenen mevsim veya saatlerde göreceği enerji miktarını en fazla kılacak şekilde, farklı seçilebilir.

Doğaldır ki modüllerin, hangi mevsim veya saatlerde olursa olsun, çevredeki ağaçlar veya yakındaki konutlar tarafından gölgelenmemesi gerekir. Çünkü bir modüldeki, örneğin 36 gözeden sadece birisi gölgelenmiş olsa dahi, o modülün güç üretimi %50'den fazla azalacaktır.

Panelin çatıdaki konum ve açısının belirlenmesinden sonra sıra, gereksinim duyulan sistemin büyüklüğüne geliyor. Bu büyüklüğün seçimi; bir hayli değişken olabilen ve her zaman da tam olarak öngörülemeden hava koşulları yanında, konutun elektrik gereksiniminin zamanla de-



Konut uygulaması için tasınılan akü depolamalı bir fotovoltaik sistemin genel şeması.

ğişken olması nedeniyle, karmaşık bir iş. Farklı coğrafya konumları için aylık ortalama güneş ışığı düzeylerini, meteoroloji verilerinden sağlamak mümkün. Bu veriler; yağmurlu ve bulutlu günleri, bulunulan enlemi, havadaki nem oranlarını ve ikincil diğer bazı faktörleri de hesaba katar. Bütün yıl boyunca yeterli elektriğin sağlanabilmesi için, en kötü ayın temel olarak alınması gerekir. Öte yandan evin ortalama güç gereksinimi, en azından elektrik faturalarına bakılarak çıkartılabilir. Tüm bu verilerin ışığında, tasarımda kaç adet modülün kullanılması gerektiği, parmak kuralı benzeri basit yöntemlerle hesaplanabilir. Bir de sistem voltajının seçilmesi gerekir ki, bu seri olarak bağlanacak modüllerin sayısını verir. Ayrıca, aletlerin çalışma voltajı panelinkinden farklıysa, trafolar da gerekir.

Öte yandan, evdeki aletlerin çoğu alternatif akımla çalışır. Şebekeden sağlanan güç de keza böyledir. Halbuki panel, doğru akım gücü üretmektedir. Dolayısıyla, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren bir 'çevirici'ye gereksinim olur. 'AC modülü' denen bazı modüllerin iç yapısında, böyle çeviriciler zaten bulunur. Bu, büyük ve merkezi bir çeviriciye gereksinimi ortadan kaldırır ve bağlantı şemasını bir hayli basitleştirir. Ancak büyük çeviricilerin, aynı zamanda sistem işleyişini otomatik olarak yönetme yeteneği de vardır.

Geriye kalan en önemli sorun, panelin üretim yapmadığı güneşsiz günlerde ve gece karanlığında da, evin güç gereksinimini sağlamaya devam edebilmek. Bu amaçla, şebekeye bağlanmak veya enerji depolayan aküler kullanmak gibi iki seçenek var. Şebekeye bağlanması halinde, panel üretiminin yetersiz kaldığı zamanlarda şebekeden enerji çekilecek, aksi halde fazlalık üretim şebekeye verilecek. Ancak, bölgedeki dağıtıcının buna izin vermesi gerekir. Dağıtıcılar, böyle kü-



Seri halde bağlanmış nikel kadmiyum aküler

çük çaptaki üretim miktarlarını çoğunlukla, kendi satış fiyatlarının çok altında fiyatlarla satın alırlar. Ayrıca, satın alacakları gücün, şebeke gücüyle 'senkronize' olması, yani geriliminin dalga şekli ve frekansının, şebekedekiyle aynı olması gerekir. Bu uyumu sağlayacak özel elektrik donanımının, evdeki sistemde bulunmasını şart koşarlar. Şebekeyle karşılıklı etkileşim açısından, göz önünde bulundurulması gereken bazı güvenlik sorunları da var. Örneğin, bölge şebekesinde bir güç kaybı halinde, hatların tamirinin güvenli bir şekilde yapılabilmesi için, konuttaki panel sisteminin, tamir sırasında şebekeye güç vermeye kalkışmaması gerekir. Konuttaki sistemin bağlı bulunduğu şebeke hattının ölü olduğunu belirleyip, panelin güç çıkışını kesen donanımın da bulundurulması, yani konut sisteminin 'adalanması' gerekir.

Şebekeye bağlanmak yerine akü kullanımının tercih edilmesi halinde, halli gereken başka sorunlar doğar. Örneğin, akülerin bakımına özen gösterilmesi ve ömürleri dolduğunda yenilenmeleri gerekir. Çünkü fotovolta-

ik modüller, 20 yıl veya daha fazla süreyle hizmet verebilirken, akülerin ömrü çok daha kısa olur. Ayrıca, hem enerji depoluyor ve hem de asitli elektrolitler içeriyor olmaları nedeniyle, metalden yapılmamış ve iyi havalandırılmış bir bölmede saklanmaları gerekir.

Kullanılacak akülerin, amaca uygun tipte olmaları da gerekir. Örneğin, otomobillerde kullanılan aküler, motorun çalıştırılması sırasında, çok kısa süreyle büyük akımlar sağlar. Bu sırada, depoladığı enerjinin küçük bir kısmı boşalmış ve otomobil hareket eder etmez, jeneratör tarafından yeniden doldurulmaya başlanmıştır. Yani içerdiği toplam enerji miktarındaki değişiklikler küçük, enerji düzeyindeki dalışlar sığdır. Böyle akülerin enerji döngüsünün 'sığ' olduğu söylenir. Halbuki panel sisteminde kullanılacak akünün, görece düşük düzeyde bir akımı, örneğin gece saatler boyunca sağlayabilmesi gerekir. Bu sırada, depoladığı enerjinin önemli bir kısmını yitirecek ve ancak güneş ortaya çıktıktan sonra, panel tarafından tekrar doldurulmaya başlanacaktır. Yani içerdiği enerji miktarındaki değişiklikler büyük, düzeyindeki dalışlar derindir. Böyle akülerin enerji döngüsünün ise 'derin' olduğu söylenir.

Panel sistemlerinde kullanılan çok çeşitli aküler bulunmasına rağmen, hepsinin ortak özelliği 'derin döngülü' olmaları. En yaygın olarak kullanılan derin döngülü aküler; kapalı veya



havalandırmalı tiplerde olabilen 'kurşun asit'lilerle, 'nikel kadmiyum' aküleri. Bu ikinciler daha pahalı olmakla beraber, daha uzun ömürlü olurlar. Bir akünün potansiyel ömrünü üretim sonundaki yapısı, bu potansiyel ömürün hangi oranda gerçekleşeceğini, yani uygulamadaki ömrünü, kullanılma biçimi belirler. Örneğin bir akünün, zaten doluyken doldurulmaya çalışılması veya enerji kapasitesinin, çok büyük oranlarda boşaltılması, uygulamadaki ömrünü kısaltır. Nikel kadmiyum akülerin içerdiği enerjinin çok daha büyük bir kısmı, dayanıklılıklarına zarar vermeksizin boşaltılabilirken, derin döngülü kurşun asitli akülerde dahi bu, ömürlerini kısaltmaksızın yapılamaz. Bu nedenle, kurşun asitli akülerin panel kullanımları genellikle; akünün enerji içeriğinin kapasitenin altına, %40-50'den daha fazla inmeyeceği biçimde tasarlanırlar. Ayrıca, akünün aşırı doldurulmaya çalışılması veya boşaltılmasını engelleyecek bir 'yük denetleyicisi'nin kullanılması, akünün uygulama ömrünü uzatır. Bu donanım, aküler dolduğunda, panelden akülere gelen akımı keser. Önceden belirlenmiş bir düzeyin altına indiğinde de; (ki bu akünün çıkış geriliminden anlaşılır), akü yeniden bir miktar dolduruluncaya kadar, aküden çekilen akımı keser. Yük denetleyicisi kullanımı, uzun akü ömrü için şarttır.

Sistemin hayata geçirilmesi için geriye artık; montaj elemanları, kablolar, bağlantı kutuları, topraklama donanımı, yüksek akım koruyucusu gibi aksesuar kalıyor. Montaj sırasında elektrik şartnamelerine uymak gerektiği gibi, bu işin fotovoltaik sistemler konusunda tecrübe kazanmış lisanslı bir elektrik ustası tarafından yapılması daha yerinde olur. Sistem montajdan sonra, özellikle eğer akü kullanılmıyorsa, çok az bakım gerektirir ve 20 yıldan fazla süreyle; sessiz, temiz ve ücretsiz elektrik üretir. Dolayısıyla, fotovoltaik paneller ideal bir enerji üretim aracıdır.

Ancak, sistem bir kez döşendikten sonra üretilen enerji ücretsiz olmakla beraber, donanım maliyeti bir hayli yüksek. Kurulu güç maliyetleri halen, Watt birimi başına 9 ABD doları düzeyinde. Örnek olarak, şebekeye bağlı küçük bir konut için, 4kW'lık bir sistem, toplam elektrik gereksiniminin



Fotovoltaik paneller, deneme amacıyla üretilen otomobillere güç sağlıyor.

yaklaşık yarısını karşılayabilir. Buysa, Watt başına 9 dolardan, toplam olarak 36,000 dolarlık yatırım gerektirir.

Bu görece maliyet yüksekliği, bir bakıma kaçınılmaz ve doğal. Çünkü, doğada bulunan enerji ne kadar yoğun formlarda olursa, kullanılabilirliğinin, yani kalitesinin o kadar yüksek olduğu söylenir. Örneğin bir kibriti çakarken, ucundaki maddenin içerdiği kimyasal enerjiyi ısı enerjisine dönüştürerek, bir nesneyi ateşlemeyi hedeflemekteyiz. İşlem tamamlandıktan sonra; açığa çıkmış olan ısı enerjisi kaybolmamıştır ve hala orada, fakat içinde bulunduğumuz hacime homojen bir şekilde dağılmış durumdadır. Bu enerjiyi toparlayıp, tekrar bir araya getirerek, başka bir amaçla daha kullanmayı düşünmeyiz. Çünkü bu, belli ki zahmetli, dolayısıyla da pahalı bir işlem olacaktır. Benzeri şekilde; 10 km²'lik güneşli bir alana saniyede düşen güneş enerjisi miktarı, 2 ton kömürün içerdiği kimyasal, veya sadece bir gram uranyumun içerdiği parçalanma enerjisine eşdeğer. Bu nedenle; enerjiyi yoğun formlarda içeren fosil ve nükleer yakıtları kullanmak yerine güneş enerjisine yönelmek, örneğin pilav yapmak için depodakini kullanmak yerine, kilometrekarelerce alana dağılmış bulunan bir çuval pirinci toplamayı tercih etmeye benzer. Ancak, fosil yakıtların eninde sonunda tükenen olmaları yanında, şimdiki kullanım teknolojileriyle yol açmakta oldukları çevre ve insan sağlığı hasarlarının giderek artan boyutları; güneş ve rüzgar gibi 'dağıtık' ve fakat yenile-

nebilir olan enerji formlarına yönelik bu tercihi, akılcı ve zorunlu kılar görünür: Ek maliyetleri göz önünde bulundurulup ödenmek kaydıyla...

Bu yüzdendir ki fotovoltaik sistemler şimdilik, alternatifleriyle yarışabilecek durumda değil ve genellikle, diğer elektrik kaynaklarından uzak yörelerde kullanılıyorlar. Daha yaygın kullanım için, maliyetlerin azalması, bunun için de üretimin büyük ölçeklerde yapılması, yani yaygın kullanım gerekiyor. Ancak, hem talep, hem de modül verimlilikleri sürekli olarak arttığından, fiyatlar düşmeye devam ediyor. Yapılan araştırmalar üretim maliyetlerini azaltmaya devam ettiğinden, zamanla büyük yerleşim merkezlerinde de maliyet etkin duruma geçeceklerine kesin gözüyle bakılıyor. Kamuoylarının bir yandan da, alışılmış güç kaynaklarının yarattığı çevre riskleri konusunda giderek daha bilinçleniyor olması, fotovoltaikleri geleceğin teknolojileri arasına yerleştiriyor.

Belki bir, kim bilir hangi gün; yaşadığımız hacimlerdeki tüm enerji gereksinimimizi elektrik enerjisi şeklinde ve bunu da, binalarımızın dış kaplama boyalarının içine yerleştirilmiş organik pigmentli gözeler aracılığıyla güneş enerjisinden sağlıyor olacağız. O zamana kadar, ve ondan sonra da, hepimize bol güneşli günler...

Prof. Dr. Vural Altın
Boğaziçi Üniversitesi, Nükleer Müh. Bölümü

Kaynaklar
<http://www.howstuffworks.com/solar-cell.htm>
http://www.re-energy.ca/t_solarelectricity.shtml