



# BELTEK

## *FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİ SİSTEM TASARIMI*

**1.Hafta  
2. Ders**

# İÇİNDEKİLER

- Giriş
- Güneş Bacaları ile Elektrik Üretimi
- Parabolik Oluk Kollektörlü Güç Santralleri
- Parabolik Çanaklı Güç Santralleri
- Merkezi Alıcılı Güç Santralleri
- Güneş Havuzları
- Güneş ile Su Damıtma Sistemleri
- Güneşle Sera Isıtma Sistemleri
- Güneş İle Kurutma Sistemleri
- Fotovoltaik Sistemler



# GİRİŞ

- Güneş enerjisinden iki yolla elektrik enerjisi elde edilmektedir.
- 1- Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerjisiyle güç üreten **ısı sistemler**.
- 2- Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren **fotovoltaik sistemler (PV-Güneş pilleri)**'dir.

## Isı Sistemler ile Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi

### Güneş Isıl Güç Santralleri

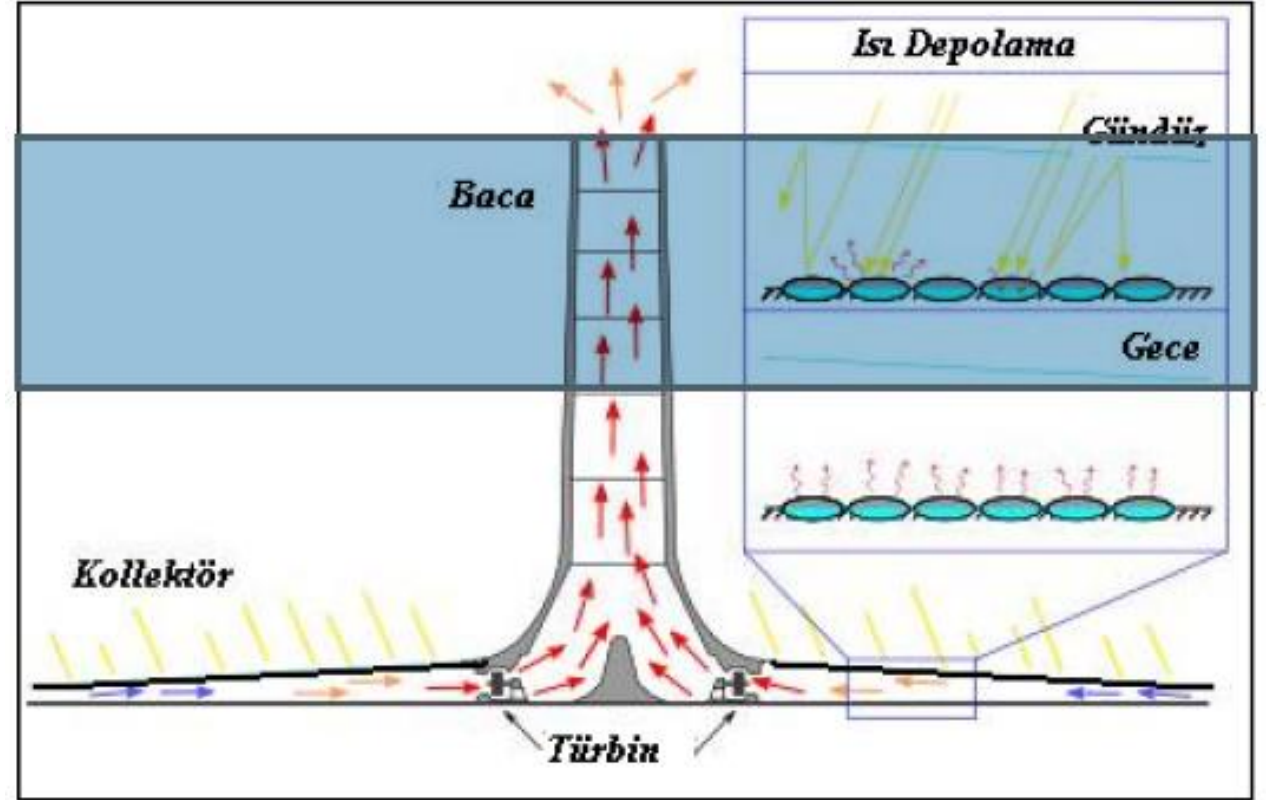
- 1- Parabolik oluk kollektörlü güç santralleri
- 2- Parabolik çanak kollektörlü güç sanstalleri
- 3- Merkezi alıcılı güç santralleri

### Güneş Bacaları



# Güneş Bacaları ile Elektrik Üretimi

- Güneş bacası, üzerine gelen güneş ışınımını, sera etkisi prensibiyle hareket enerjisine, daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürür.
- Güneş bacası basit olarak hidroelektrik bir güç tesisi gibi çalışır ancak, su yerine yükselen sıcak havayı kullanılır.
- Geniş bir cam sera (kollektör) altındaki hava ısıtılarak, bu cam seranın tavan merkezine yerleştirilmiş olan ve yukarıya doğru hareketi sağlayan bir düşey boruya (bacaya) girer ve borunun içerisinde elektrik jeneratörlerine bağlı olan bir rüzgar türbinini döndürür. Bu rüzgar türbinini vasıtasıyla elektrik üretilir.



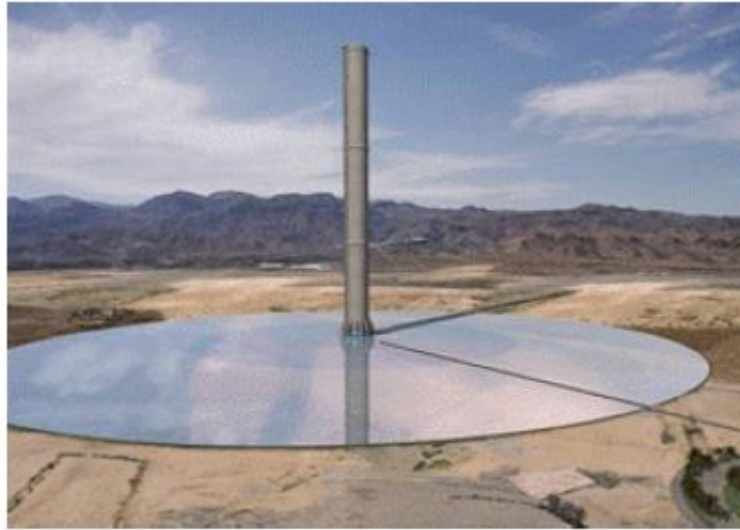
**Güneş bacasının çalışma prensibi**

# Güneş Bacaları ile Elektrik Üretimi

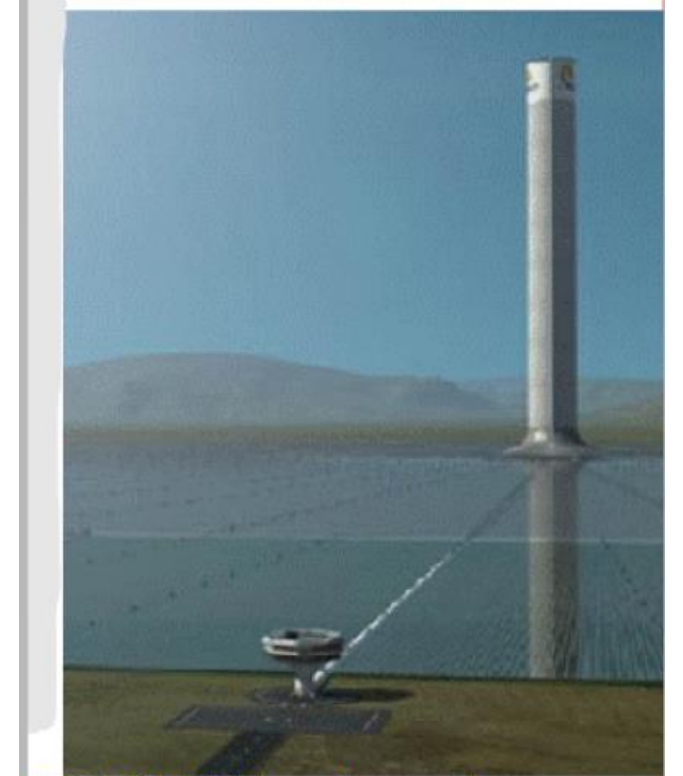
- Büyük güçte elektrik üretmek için, cam sera çap olarak çok geniş ve kullanılan boru (baca) mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.
- 50 ile 400 MW'a kadar güç çıkışı sağlayabilen geniş ölçekli güneş bacaları kurulabilir.



**50 kW'lık İspanyadaki  
protitip ilk güneş bacası**



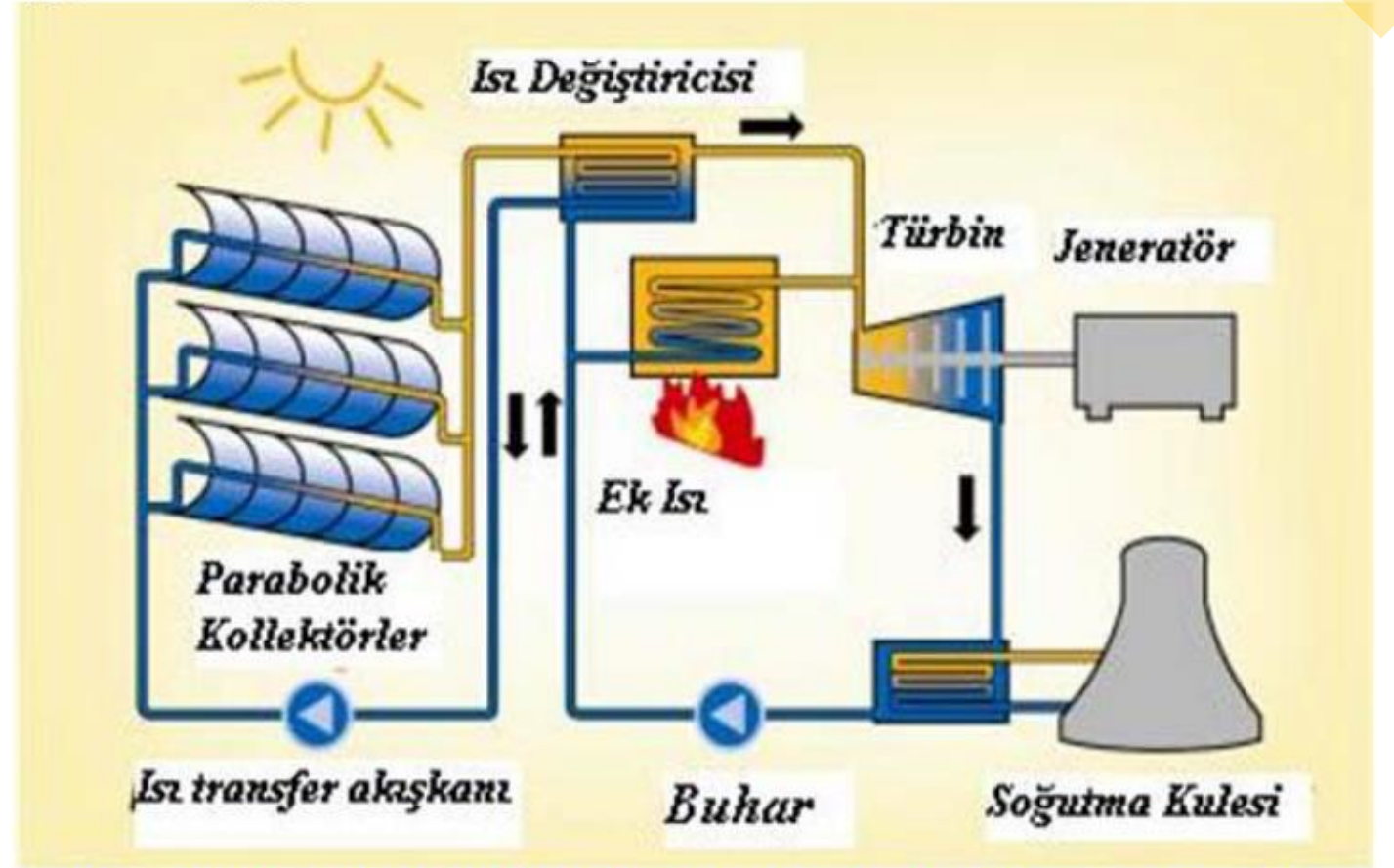
**5 MW'lık Stuttgart, Almanya**



**200 MW'lık güneş bacası  
santrali, Avusturalya**

# Parabolik Oluk Kollektörlü Güç Santralleri

- Temel teknolojisi, bir akışkanın güneş ışınımı ile ısıtılarak buharlaştırılması ve buharın bir turbo-jeneratör çevrimi yardımıyla elektrik enerjisi elde edilmesi kuralına dayanır.
- Günümüzde teknolojisi ispatlanmış, güneş enerjisinden elektrik elde etmenin en yaygın ısı uygulamasıdır.

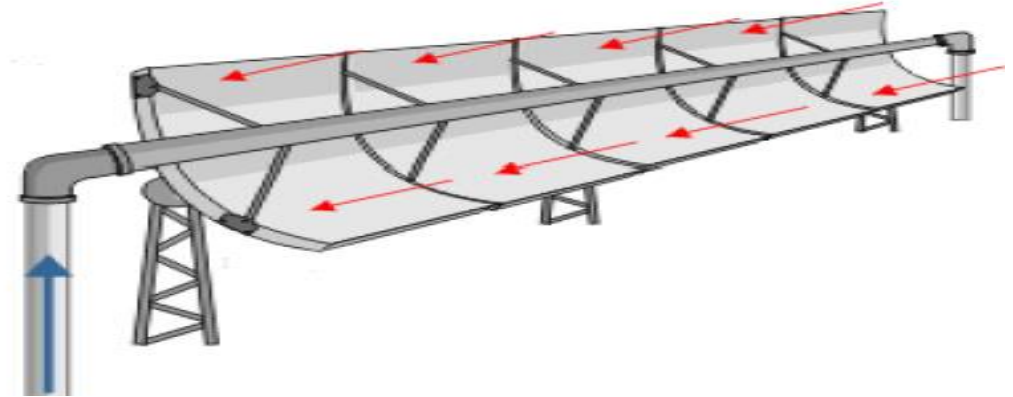
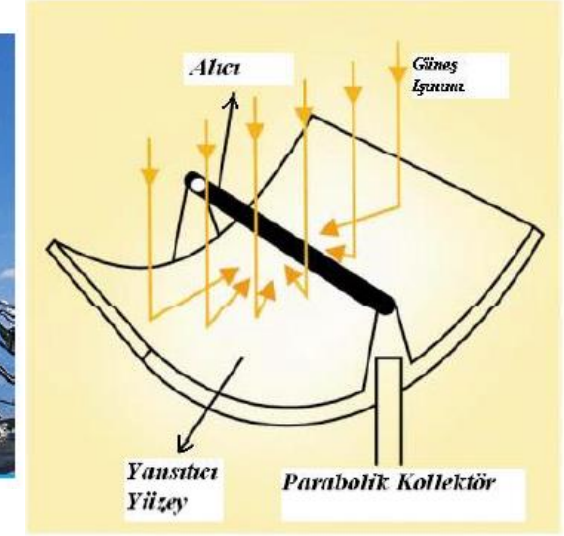


**Parabolik Oluk Kollektörlü Güç Santrali Çalışma Prensibi**



# Parabolik Oluk Kollektörlü Güç Santralleri

- Bu sistemlerde, silindirik doğrusal odaklı kollektörler kullanılmaktadır. Kollektörün iç kısmındaki yansıtıcı yüzeyler, güneş enerjisini, kollektörün odağında yer alan ve boydan boya uzanan siyah bir absorban boruya odaklarlar. Kollektörler genellikle, güneşin doğudan batıya hareketini izleyen tek eksenli bir izleme sistemi üzerine yerleştirilirler. Enerjiyi toplamak için boruda bir sıvı dolaştırılır. Toplanan ısı, elektrik üretimi için enerji santraline gönderilir.
- Bu sistemler 350-400°C sıcaklığa ulaşabilmektedir.



# Parabolik Oluk Kollektörlü Güç Santralleri

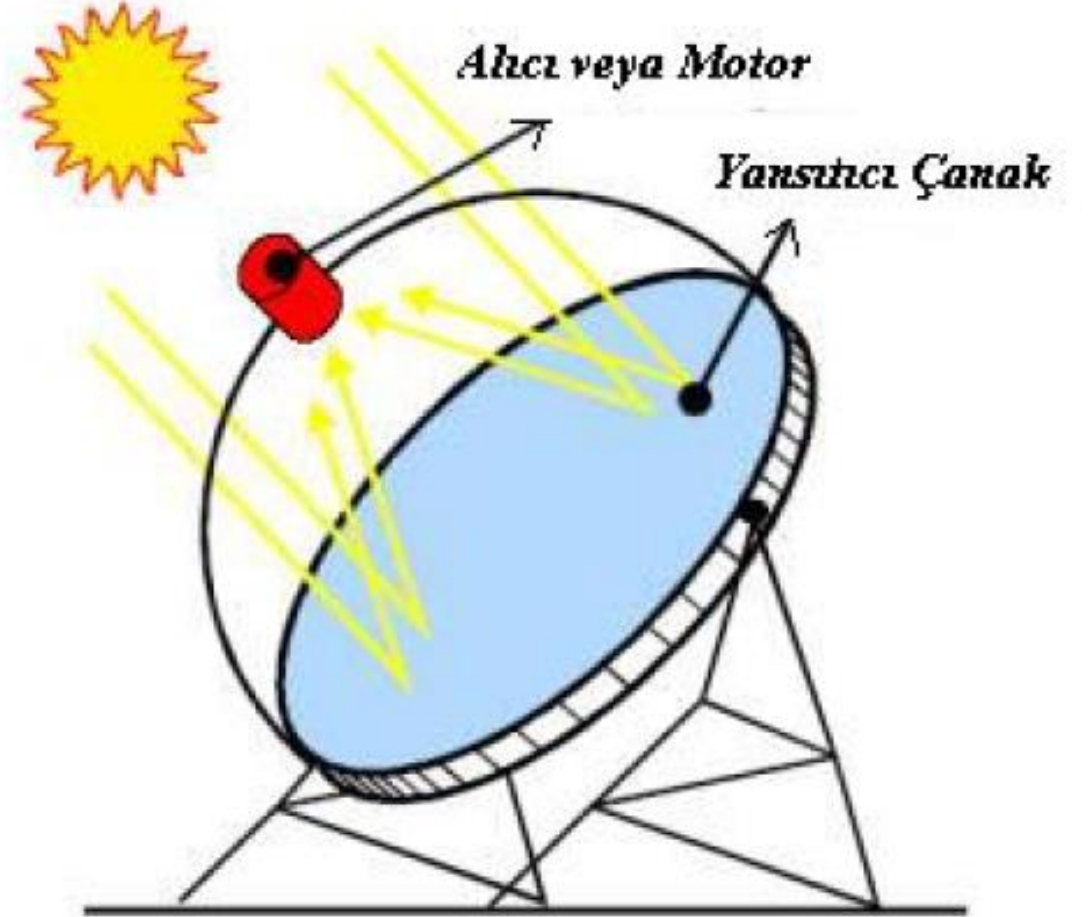
- Doğrusal yoğunlaştırıcı termal sistemler ticari ortama girmiş olup, bu sistemlerin en büyük ve en tanınmış olanı 350 MW gücü ile Kaliforniya'daki Kramer&Junction eski Luz International santralidir.





# Parabolik Çanaklı Güneş Güç Santralleri

- İki eksende güneşi takip ederek, sürekli olarak güneşi odaklama bölgesine yoğunlaştırırlar.
- Isıl enerji, odaklama bölgesinden uygun bir çalışma sıvısı ile alınarak, termodinamik bir dolaşıma gönderilebilir ya da odak bölgesine monte edilen bir Stirling motoru yardımı ile elektrik enerjisine çevrilebilir.
- Çanak-Stirling bileşimiyle güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülmesinde % 30 civarında verim elde edilmiştir.



## Parabolik Çanaklı Güneş Güç Santralleri

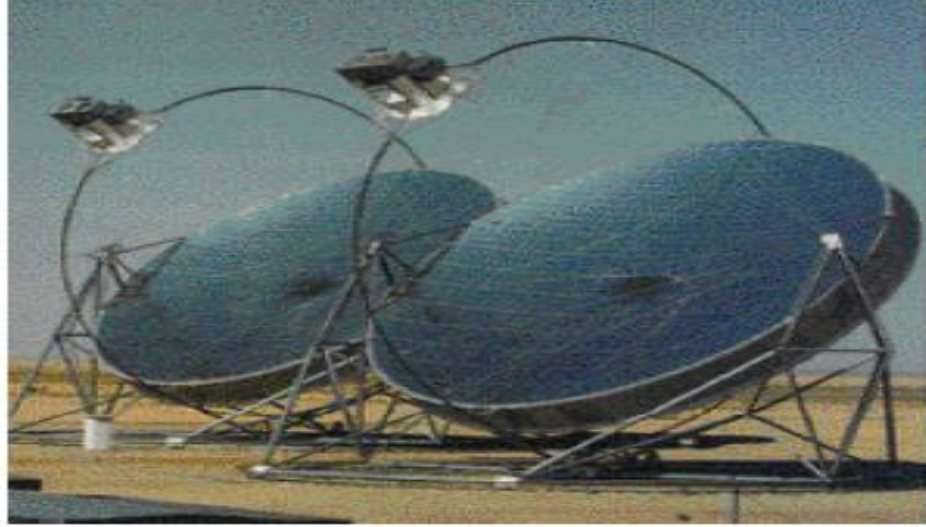
- 25 kW'lık modüller başarıyla yapılmış olup şebeke şeklinde 50 Mw'lık santrallerin yapılması üzerine çalışmalar sürmektedir.



**Parabolik çanaklı-stirling motorlu güneş güç santralleri**



# Parabolik Çanaklı Güneş Güç Santralleri

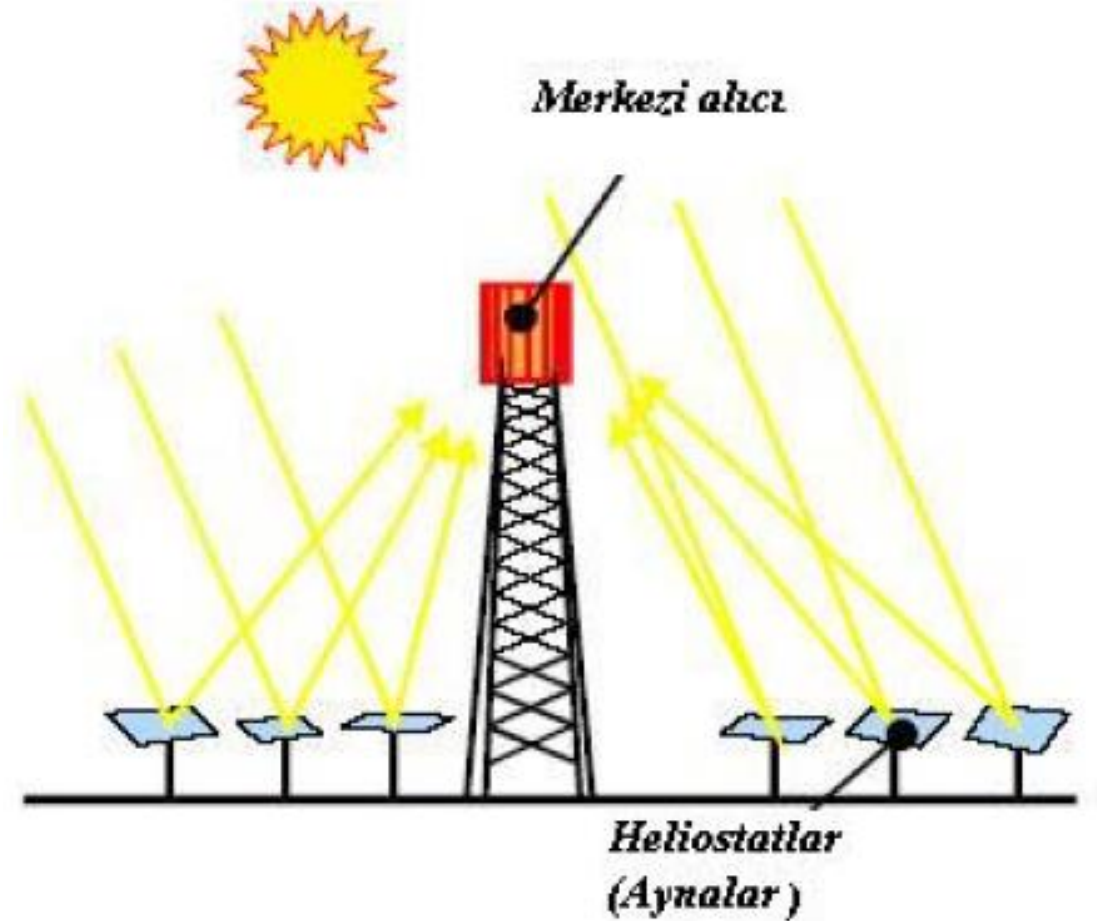


Parabolik çanaklı-stirling motorlu güneş güç santralleri

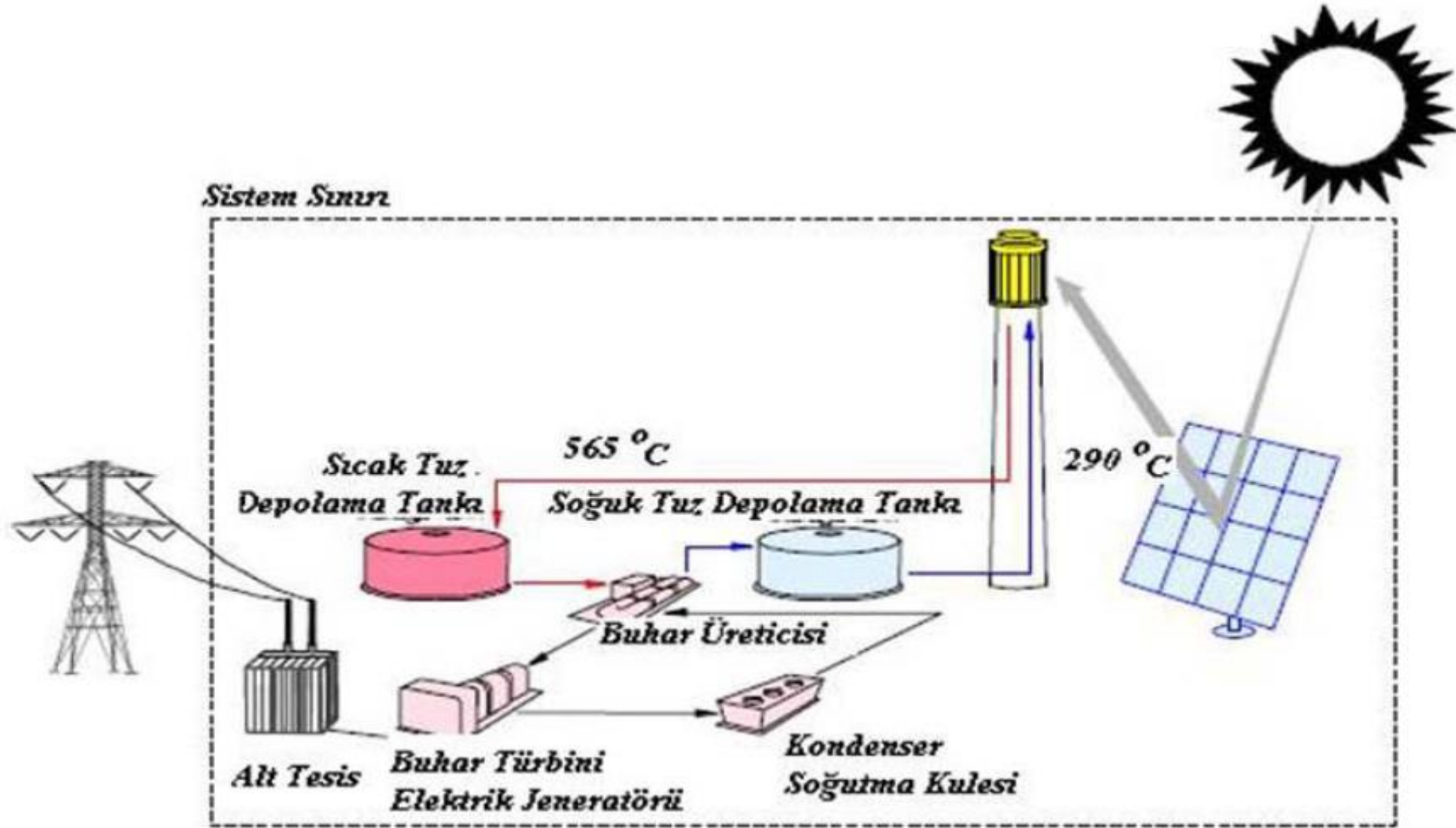


# Merkezi Alıcılı Güneş Güç Santralleri

- Tek tek odaklama yapan ve heliostat adı verilen aynalardan oluşan bir alan, güneş enerjisini, alıcı denen bir kule üzerine monte edilmiş ısı değiştiricisine yansıtır ve yoğunlaştırır. Alıcıda bulunan ve içinden akışkan geçen boru yumağı, güneş enerjisini üç boyutta hacimsel olarak absorbe eder. Bu sıvı, Rankine makinesinde (buhar güç santralinde) elektrik enerjisi üretiminde kullanılır.
- Bu sistemlerde ısı aktarım akışkanı olarak hava da kullanılabilir, bu durumda sıcaklık 800°C'ye çıkar. Heliostatlar bilgisayar tarafından sürekli kontrol edilerek, alıcının sürekli güneş alması sağlanır. Bu sistemlerin kapasite ve sıcaklıkları, sanayi ile kıyaslanabilir düzeyde olup Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Ticari santraller 50-200 MW elektrik üretim kapasiteleri arasındadırlar. Teknoloji ve gelişim olarak paraboliklere göre orta düzeydedir. İspanya, Japonya, Amerika, Rusya, İtalya ve Fransa'da örnek tesisler kurulmuştur.



# Merkezi Alıcılı Güneş Güç Santralleri



*Erimiş tuz ile çalışan merkezi alıcılı elektrik güç santrali çalışma şeması*



# Merkezi Alıcılı Güneş Güç Santralleri



İspanya, Seville

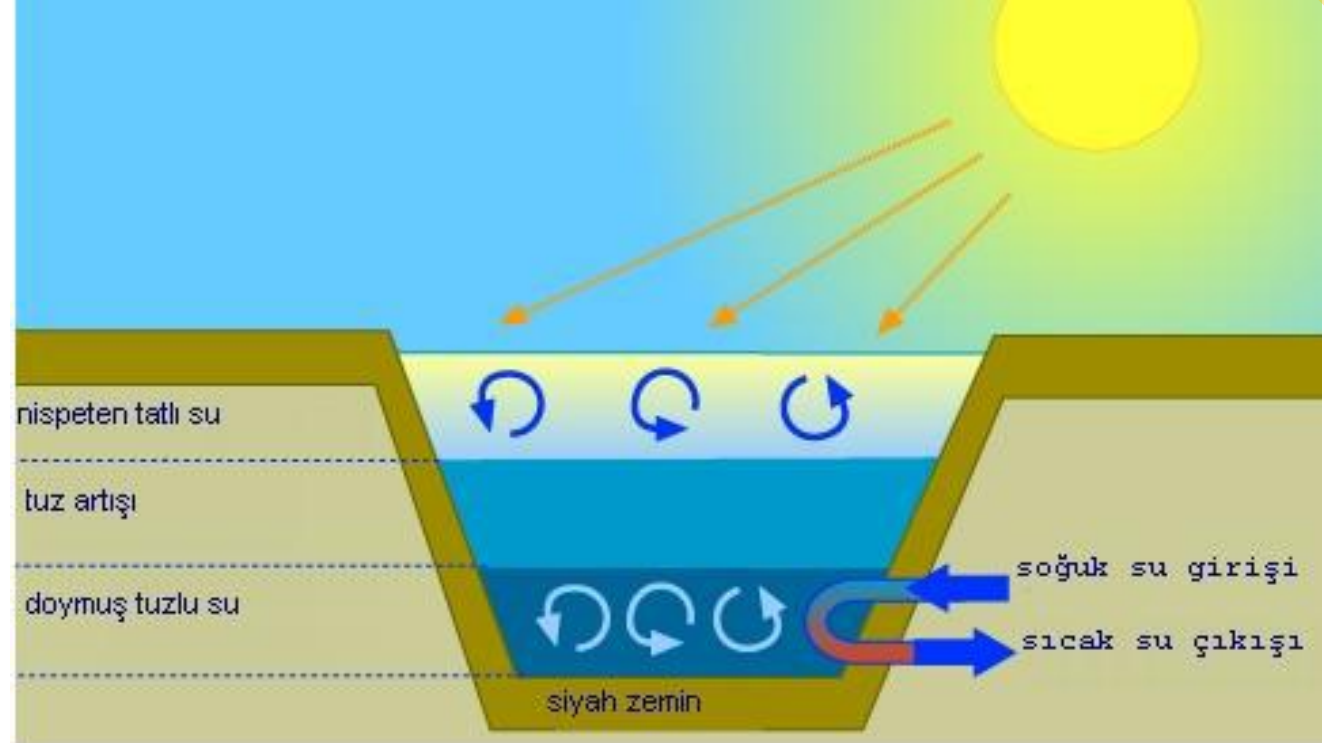


Amerika, Nevada



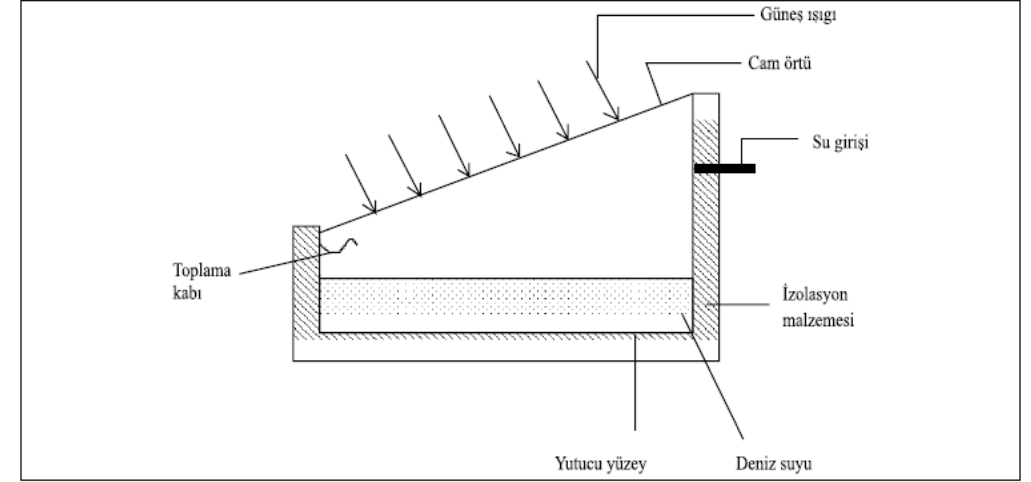
# Güneş Havuzları

- Güneş havuzları, güneş enerjisini ısı şeklinde toplayan ve depolayan sistemlerdir. Havuzlar genellikle 5-6 metre derinlikte olup suyla doludur. Havuzun zemini güneş ışınlarını tutması için siyah olarak imal edilmektedir. Burada 90°C'ye kadar sıcaklıkta su ısıtılabilir. Havuz içerisindeki sıcaklık değişimi farklı tuz konsantrasyonlarıyla elde edilmektedir. Tuz oranının düşük olduğu üst yüzeylerde soğuk su, tuz oranının yüksek olduğu alt kısımlarda da daha sıcak su elde edilmektedir. Havuzun alt kısımlarında bulunan sıcak su direk ısı amaçlı kullanılacağı gibi elektrik enerjisi eldesinde de yararlanılabilmektedir. Güneş havuz sistemlerinin verimi %20 civarındadır.
- Dünyada güneş havuzlarının en yaygın olduğu ülkeler; İsrail ABD ve Avustralya'dır. İsrail'de 150 kW ve 5 MW, ABD'de 400 kW ve Avustralya'da ise 15 kW büyüklüğünde havuz sistemleri kullanılmaktadır.



# Güneş ile Su Damıtma Sistemleri

- Güneş enerjisinden yararlanılarak içilebilir tatlı su elde edilmesi diğer sistemlere göre daha çevreci ve ucuz bir yöntemdir. Güneş yoğunluğu fazla olan denize yakın yerlerde güneş enerjisinden yararlanılarak su damıtılması oldukça kolay ve ekonomik olmaktadır.
- Deniz suyunun içilebilir suya dönüştürülmesinde iki ayrı sistem kullanılmaktadır. Bu sistemlerden birincisinde tuzun ayrılması için; sırasıyla buharlaştırma, dondurma, kristalleştirme ve filtreleme işlemleri uygulanmaktadır. İkinci sistemde ise; elektrodiyaliz, ekstraksiyon, iyon değişimi ve difüzyon işlemleri uygulanmaktadır.
- Su damıtılmasında kullanılan en basit sistem; sera tipi damıtma sistemidir. Damıtıcının tabanı daha fazla güneş ışınlarını absorbe etmesi için siyah renkte yapılmaktadır. Damıtıcının üst kısmı ise hava sızdırmayacak bir şekilde ve tatlı suyun toplandığı kanala doğru eğimli olacak şekilde düzenlenmiştir. Cam bölümden geçerek gelen ışınlar damıtıcı içerisinde bulunan deniz suyu ve siyah taban tarafından absorbe dilmektedir. Isınan su buharlaşarak yükselmekte ve oluşan su buharları daha soğuk olan cam yüzeyinde yoğunlaşmaktadır. Yoğuşan su eğimli yüzeyden kayarak toplama kabında birikmektedir. Damıtıcı içerisindeki su ne kadar ısınırse yoğuşan su miktarı da o kadar fazla olacaktır. Ayrıca dış çevre sıcaklığı azaldıkça da damıtma işlemi hızlanmaktadır.





# Güneş ile Sera Isıtma Sistemleri

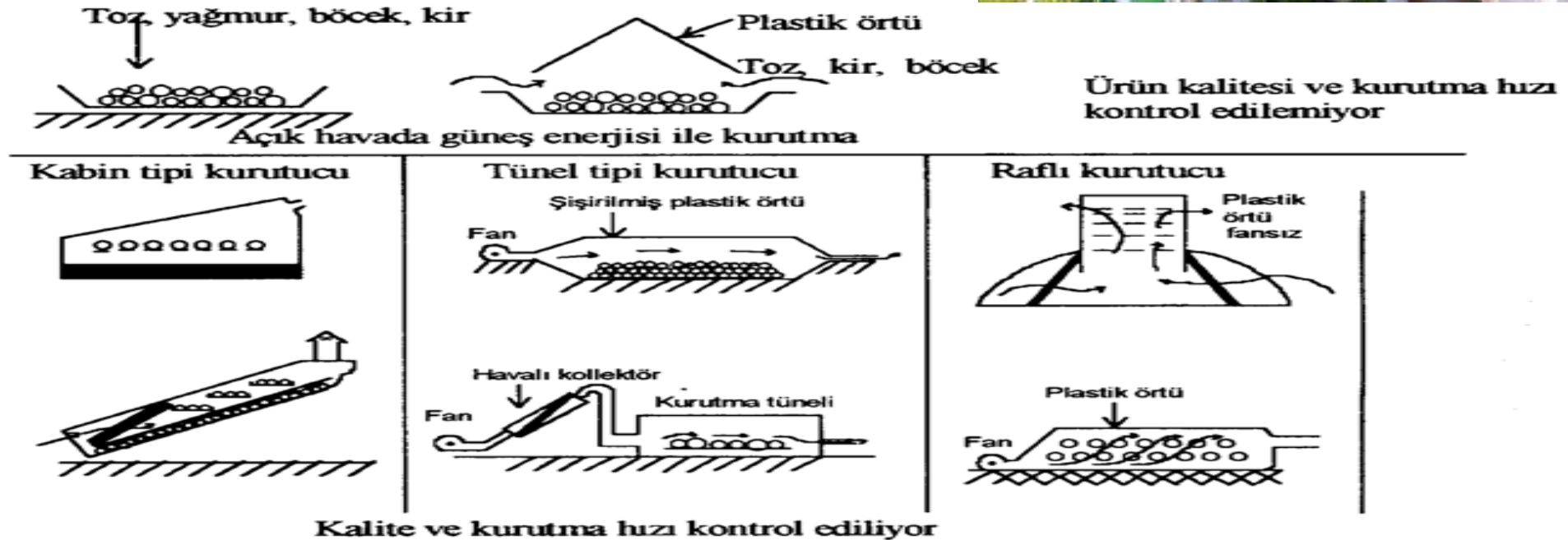
- Sera yetiştiriciliğinde, bitkilerin büyümesi, gelişmesi, verimin, kalitenin yüksek olması için en önemli koşul sıcaklık kontrolüdür.
- Yani seranın dışında kalan ortamın sıcaklığı düşük olsa bile iç sıcaklığının gereken değerin altına düşmemesi gerekir. Seraların ısıtılmasında fosil gibi geleneksel ısıtma yöntemlerinin maliyetinin fazla olması alternatif enerji kaynaklarına yönelime olanak sağlamıştır. Son yıllarda sera ısıtmasında güneş enerjisinden yararlanma payı oldukça artmıştır.
- Seranın plastik ya da cam örtüsü güneş ışınlarından en iyi şekilde faydalanılacak şekilde yapılır. Bu plastikten ya da camdan geçen güneş ışınları toprak tarafından emilir, ısıya dönüşür, ısıнын dağılması engellenerek yetiştirilen bitkilere gereken sıcaklıklar verilmiş olunur.





# Güneş ile Kurutma Sistemleri

- Güneşle çeşitli materyallerin kurutulması; direk güneş altında bırakılarak (açık havada kurutma) yada güneşle ısıtılmış havanın doğal olarak yada bir fan yardımıyla ürün üzerinden geçirilmesiyle sağlanmaktadır. Güneş enerjisiyle ısıtılmış havanın doğal yada zorunlu olarak hareketlendirilerek ürün kurutulmasının yapıldığı sistemler güneş kurutucusu olarak adlandırılmaktadır. Farklı özelliklere sahip kurutma sistemleri Şekilde verilmiştir.



# Fotovoltaik Sistemler

- Güneş enerjisi kullanarak elektrik enerjisi üretmeyi sağlayan sistemlere genel olarak **Fotovoltaik (PV) sistem** denilmektedir. PV sistemin en küçük yapı taşı elektrik akımının üretildiği kısım olan PV hücredir. PV hücre çok küçük değerli **doğru akım (DA)** üretir. Bu akım değerini arttırmak için PV hücreler birbirleri ile seri ya da paralel bağlanırlar ve böylelikle PV panel oluşturulmuş olur.
- Fotovoltaik dönüştürücüler dayanıklı, çok az bakım gerektiren ve basit tasarımları olan cihazlardır. Mekanik olarak hareket eden parçaları yoktur ve ses yapmazlar. Fotovoltaik piller herhangi bir salım yapmadıkları ve kirlilik yaratmadıkları gibi uzun kullanım ömrüne sahiptirler. En büyük avantajları ise mikrowatt değerlerinden megawatt değerlerine kadar güçlerde dizayn edilebilen bağımsız sistemler olmalarıdır. Ancak etkin ve verimli bir sistem kurulabilmesi için geniş bir alana ihtiyaç duyulmaktadır.





# Fotovoltaik Sistemler

- Fotovoltaik güç sistemleri; IEA-PVPS (International Energy Agency- Photovoltaic Power Systems Programme) tarafından 4 grupta tanımlanmaktadır.
- **1. Evsel bağımsız fotovoltaik güç sistemleri:** Şebekeden bağımsız olarak konut yada köy benzeri yerleşim alanlarının elektrik gereksinimini karşılamak üzere planlanan ve elektriğin bataryalarda depolandığı bağımsız enerji sistemleridir.
- **2. Evsel olmayan bağımsız fotovoltaik güç sistemleri:** Elektrik şebekesinin bulunmadığı yada uzak olduğu yerlerde kurulan, elde edilen enerjinin direk kullanıldığı yada depolandığı bağımsız sistemlerdir.



Arş. Gör. Oğuz Kaan ÇINICI





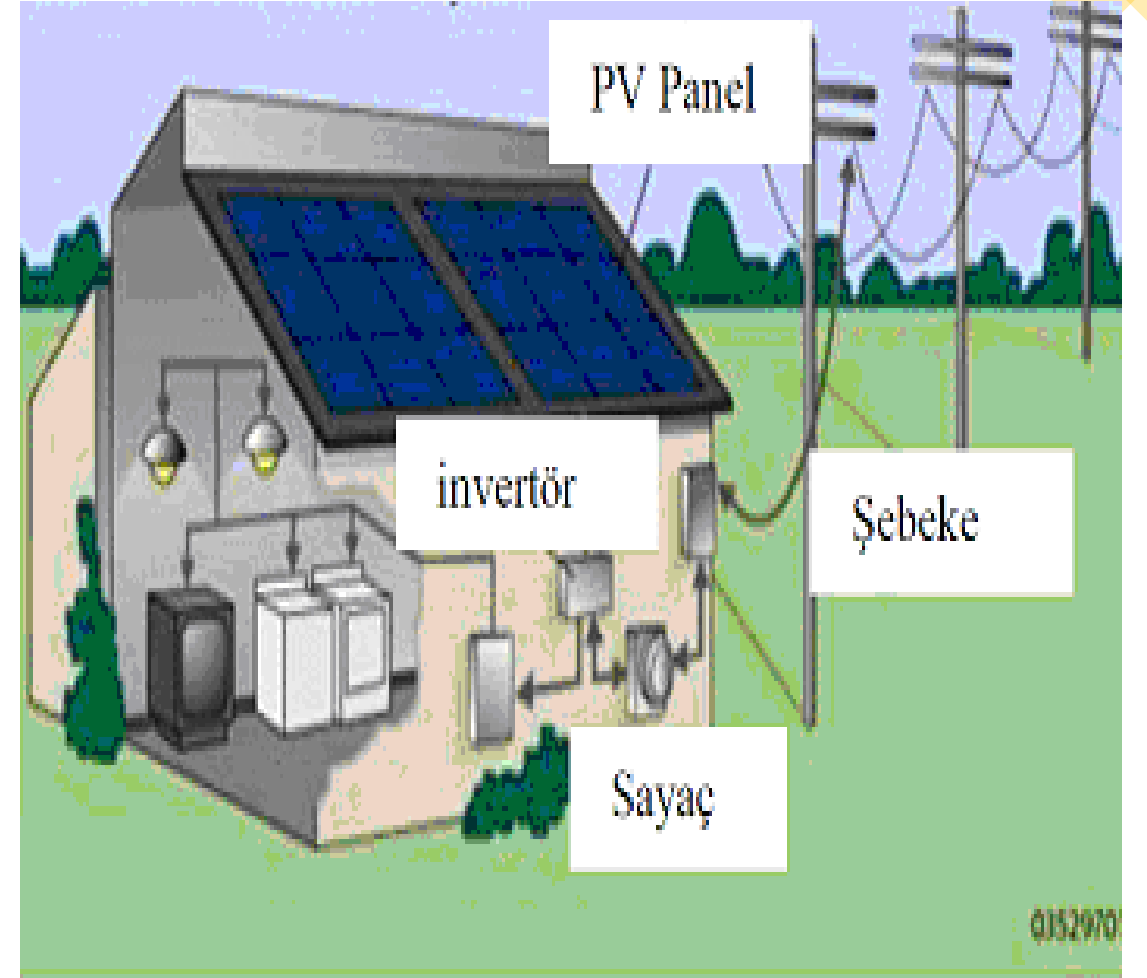
# Fotovoltaik Sistemler

- **3. Dağıtık şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri:**  
Şebekeye bağlı çeşitli konut yada binalar için düzenlenmiş enerji sistemleridir.
- **4. Merkezi şebeke bağlantılı fotovoltaik güç sistemleri:**  
Büyük alanlarda güneş tarlaları olarak düzenlenen şebekeye bağlı büyük enerji sistemleridir.



# Fotovoltaik Sistemler

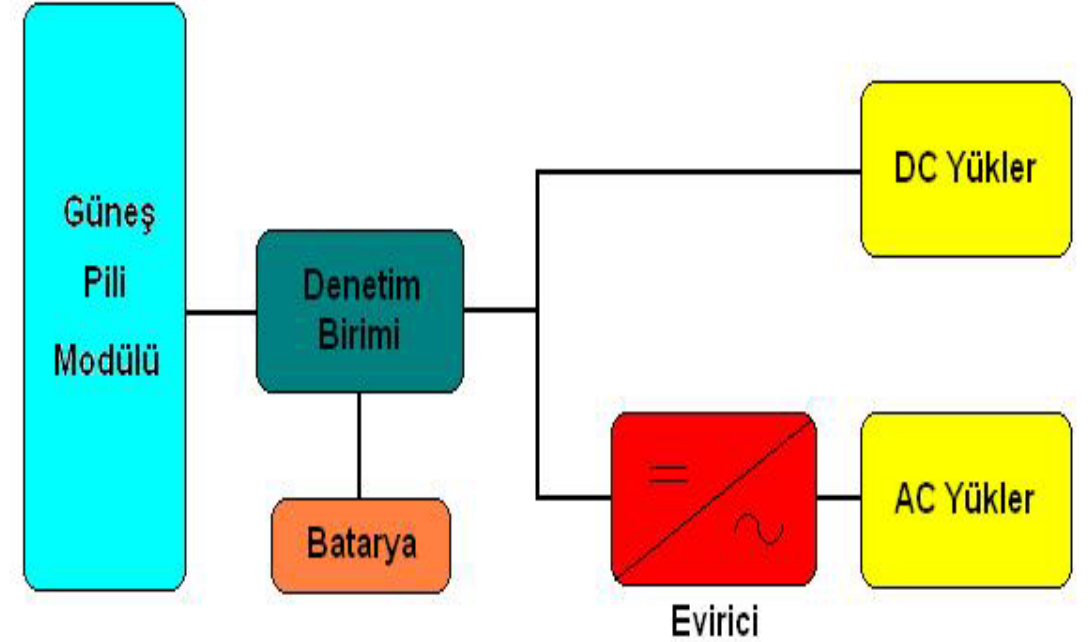
- Asıl amacı bir konutun elektriksel ihtiyacını karşılamak olan **evsel PV sistemler**, ürettikleri fazla elektrik enerjisini şehir şebekesine satabilir. Yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alırlar.
- Panellerden üretilen DC elektrik AC elektriğe çevrilir. Enerji depolamasına gerek duyulmaz, çünkü fazla enerjiyi doğrudan şehir şebekesine gönderebilir. Bu sistemlerin gücü 1-50 kW arasında çeşitlenmektedir.
- Evsel PV güç sistemlerini oluşturan yapılar aşağıdaki gibidir;
- Gerekli olan güce göre düzenlenmiş güneş panelleri,
- Çevirici (DC/AC dönüşümü),
- Elektronik kontrol cihazları,
- Çift Yönlü Sayaç





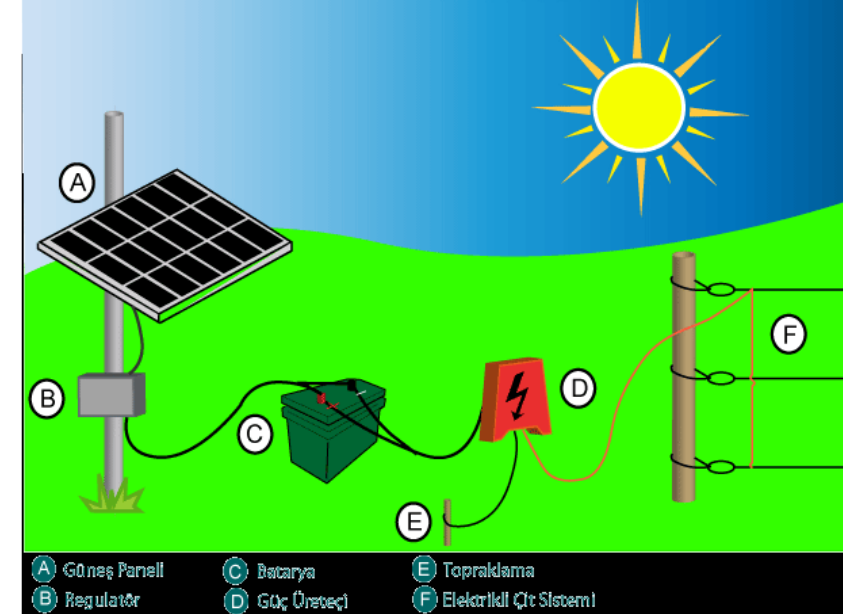
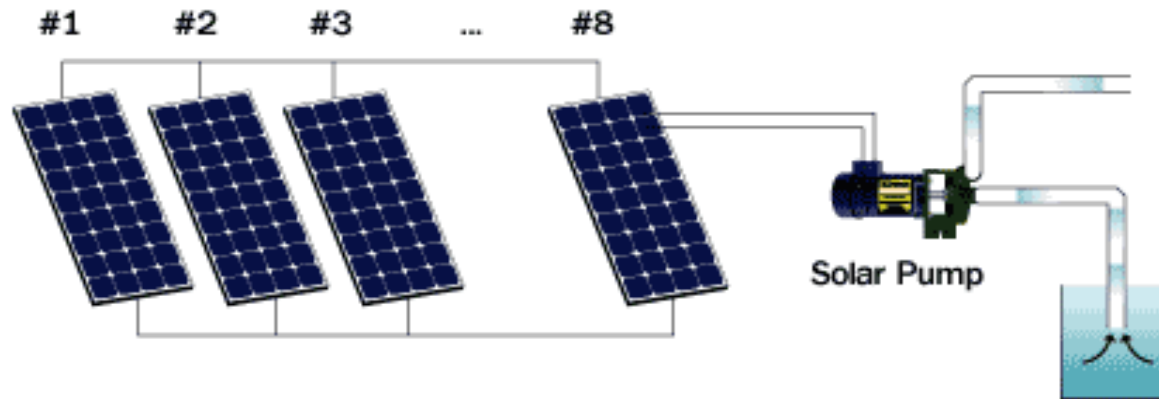
# Fotovoltaik Sistemler

- Şebekeden bağımsız sistemler genellikle şehir şebekesinden uzak enerji gereksinimi fazla olan yerlerde kullanılır. Sistemlerin ürettiği enerji aralığı çok geniş olup 1 W'tan 100 kW'lara kadar ulaşabilir. Şekilde görülen bağımsız PV sistemleri genel olarak güneş panelleri, şarj kontrol ünitesi, akü ve gerektiği takdirde eviriciden (invertör) oluşur. Sistemde üretilen elektrik güneş ışığının yetersiz olduğu zamanlarda kullanılmak üzere aküde depolanır. Akünün aşırı şarj ya da deşarj olmasını önlemek için şarj kontrol ünitesi mevcuttur. Eviriciler ise panellerin ürettiği DC elektriği gerekli yerlerde kullanmak üzere AC 'ye çevirirler. Böylece aynı anda hem doğru akımdan, hem de alternatif akımdan yararlanılabilir
- Şebekeden bağımsız sistemlerin birçok uygulama alanı vardır. Bunlardan bazılarını aşağıdaki şekilde sıralanabilir.
- Bina içi ve dışı aydınlatma, Kırsal radyo, telefon, telsiz sistemleri, Haberleşme istasyonları, Meteorolojik gözlem istasyonu, Tarımsal sulama pompaj sistemleri, Uzun çalışmalar, Deniz fenerleri.



# Fotovoltaik Sistemler

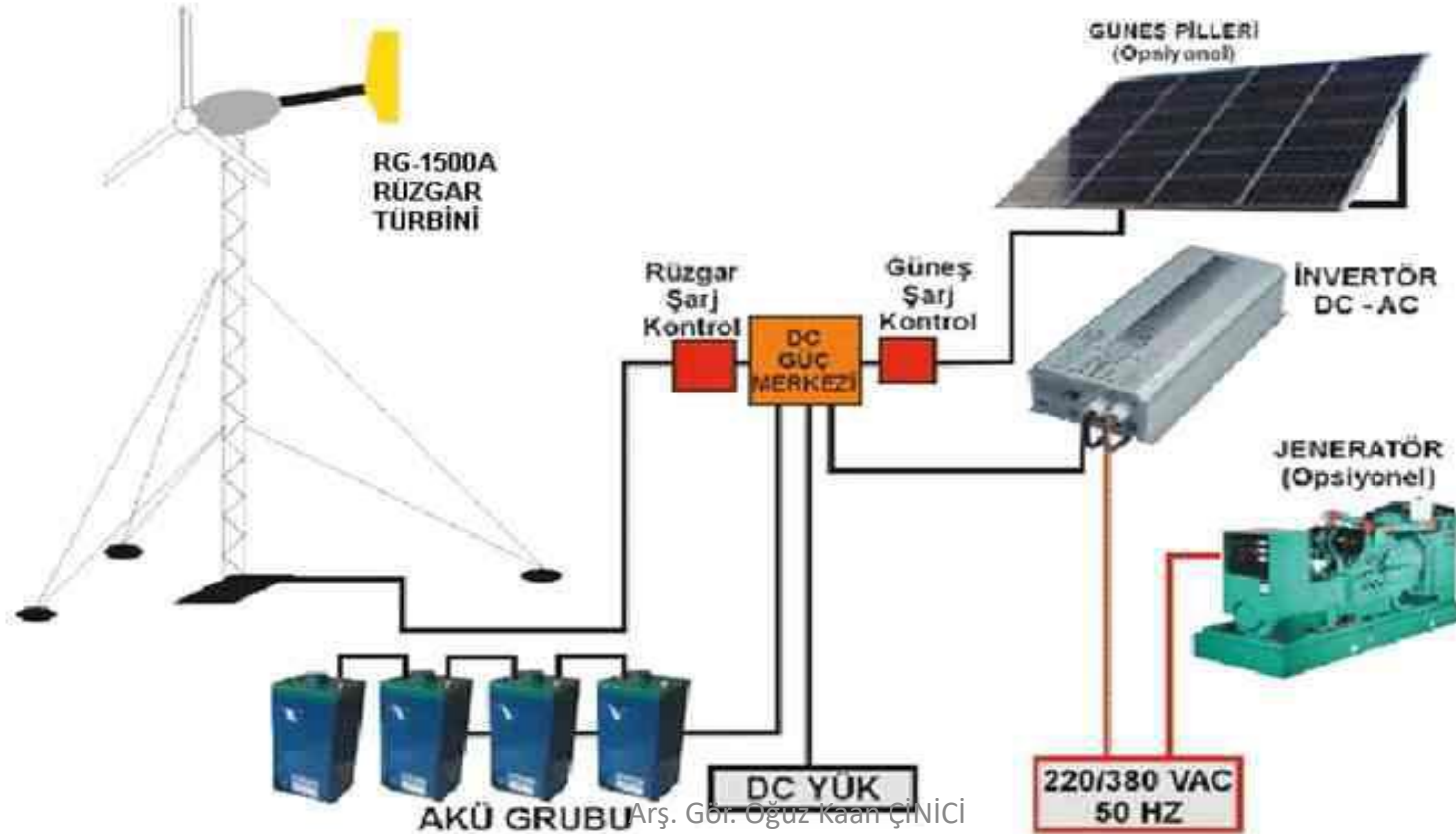
- Güneş pillerinin uygulama alanları; kırsal bölgelerin elektrifikasyonu, zirai uygulamalar (süt, gıda korunması), haberleşme cihazları, uyarı ve sinyalizasyon sistemleri, meteoroloji aletleri, park ve otoyolların aydınlatması, su pompalanması ve küçük tip el aletleridir.
- Güneş pillerle sulama sisteminin başlıca bileşenleri, pompa, pompayı çalıştıran elektrik motoru ile motora elektrik enerjisi temin eden fotovoltaik elemanların oluşturduğu fotovoltaik jeneratördür.





# Fotovoltaik Sistemler

- Hibrit Bağlı Sistemler olarak da adlandırılan karma PV sistemlerde panellerin dışında elektrik üreten başka sistemler de vardır. Birincil elektrik üreticisi panellerdir, bunlara ek olarak sisteme ikincil enerji sağlayan yenilenebilir enerji üreten rüzgar türbini ya da dizel jeneratör gibi tükenen enerji kaynağı kullanan bir sistem de olabilir.



# İÇİNDEKİLER ( Part 2)

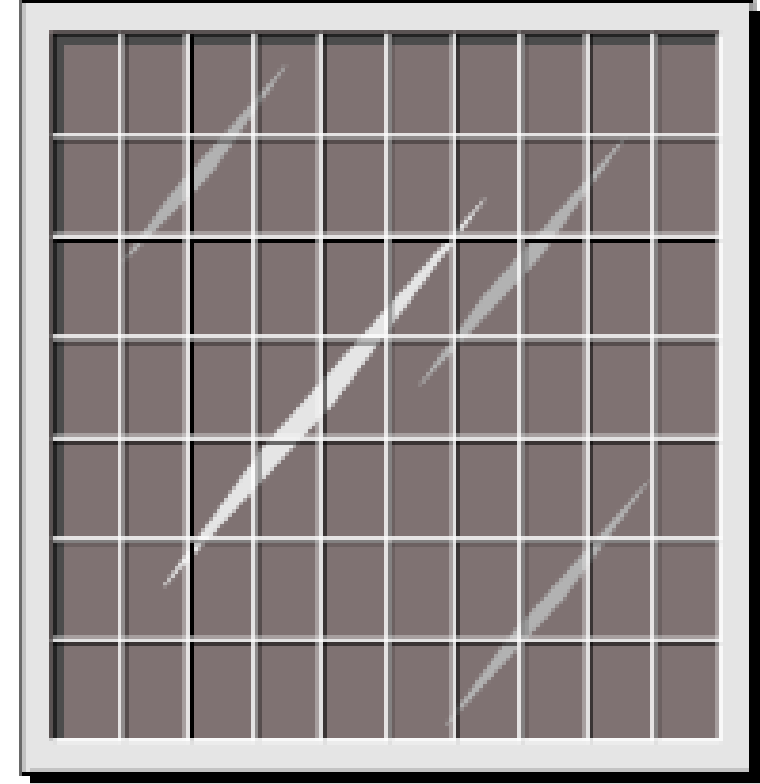
- Güneş Pillerinin (Fotovoltaik Pillerin) Tanımı
- Güneş Pillerinin Yapısı
- Güneş Pillerinin Çalışması
- Güneş Pillerine Işınım Şiddetinin Etkisi
- Güneş Pillerine Etkiyen Sıcaklığın Etkisi
- Fotovoltaik Pillerin İç Direnci
- Fotovoltaik Pillerde Elektromotor Kuvvet, Güç ve Verimi Etkileyen Faktörler
- Fotovoltaik Piller ile Diğer Piller Arasındaki Farklar
- Fotovoltaik Pillerin Seri Bağlantısı
- Fotovoltaik Pillerin Paralel Bağlantısı ve Sakıncaları
- Fotovoltaik Pillerin Kullanım Yerleri





# Güneş Pillerinin (Fotovoltaik Pillerin) Tanımı

- Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle  $100 \text{ cm}^2$  civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır.
- Bu pillerin seri ve paralel bağlanmaları ile yüksek güce sahip güneş panelleri elde edilmektedir. Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışır, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 10 ile % 35 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.
- Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan Megawatlara kadar sistem oluşturulur.



**Şekil 1.1: Güneş pili**

# Güneş Pillerinin (Fotovoltaik Pillerin) Çeşitleri

- Güneş panelleri, üretim şekillerine göre gruplandırıldığında en yaygın olanları; monokristalin, polikristalin ve ince film (amorfsilikon, thin film) paneller olmak üzere üçe ayrılır:
- Monokristalin güneş panelleri:** Monokristalin güneş panellerinde malzemenin atomik yapısı homojir. Monokristalin güneş pilleri verimlilik kapasitesi diğerlerine göre en yüksek olan %15-%20 arası güneş pili çeşididir. Monokristalin güneş panellerinin üretimi teknik açıdan daha zor olduğundan ve daha çok zaman aldığından bu tip güneş panellerinin fiyatları da diğer güneş panelleri çeşitlerinden daha yüksektir. Ancak uzun süreli kullanımlar için düşünüldüğünde monokristalin güneş panelleri dayanıklılık ve verimlilik açısından daha iyi bir seçenek olacaktır.



Mono



Poly



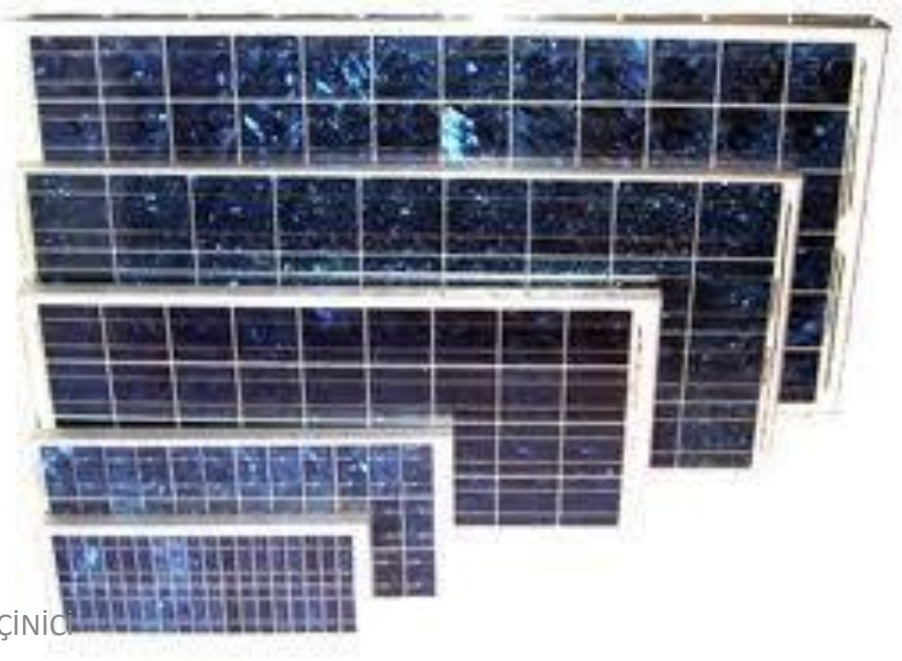
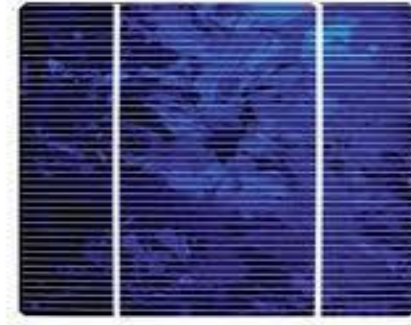
Thin Film





# Güneş Pillerinin (Fotovoltaik Pillerin) Çeşitleri

- **Polikristalin güneş panelleri:** Polikristalin güneş panellerinde malzeme birçok monokristalden oluşur ve atomik yapı homojen değildir. Polikristalin güneş panellerinin verimlilik kapasitesi yaklaşık %14-%16 arası olup monokristalin güneş panellerine göre daha düşüktür. Kalite ve verimlilik açısından polikristalin güneş pilleri monokristalin olanlardan biraz daha düşük verimli hücreler ile üretilmiştir. Buna rağmen kullanım alanı daha yaygındır. Bunun en büyük nedeni daha kolay ulaşılabilir ve buna bağlı olarak daha uygun fiyatla bulunabilmesidir. Polikristalin güneş panellerinin maliyeti monokristalin güneş pillerinden daha düşük olduğu ve verimlilik kapasitelerinin maliyete oranı yüksek olduğu için bu tip güneş panelleri en sık üretilen güneş panelleridir.



# Güneş Pillerinin (Fotovoltaik Pillerin) Çeşitleri

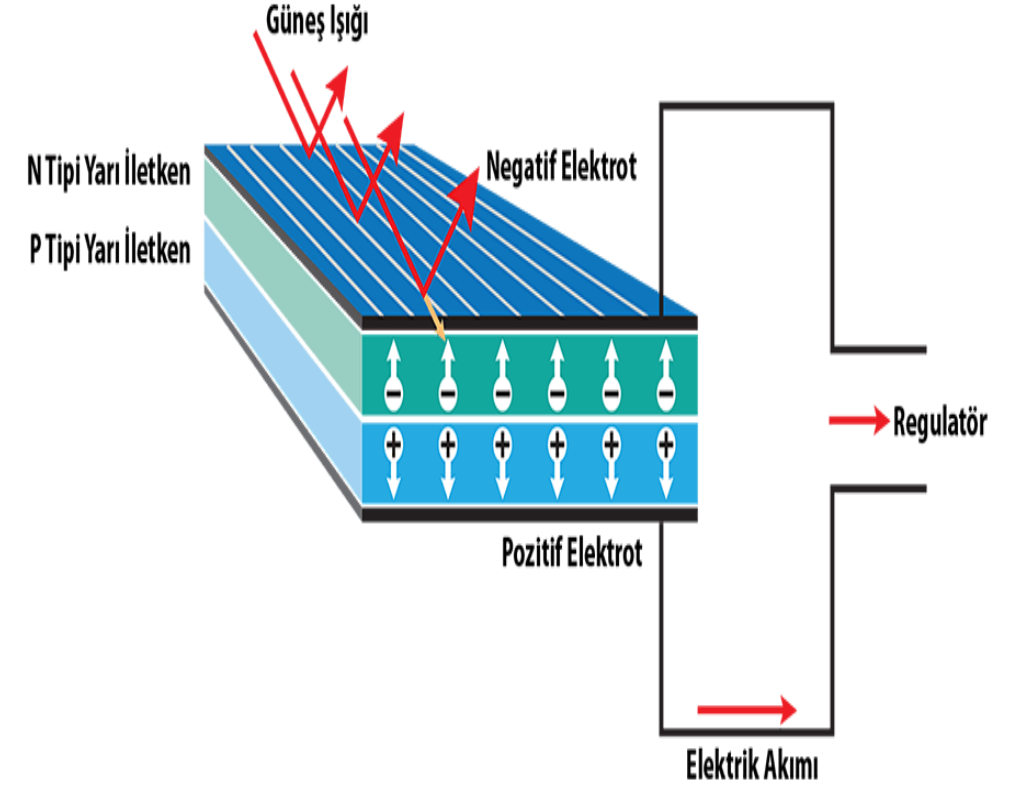
- **İnce film (amorfsilikon) güneş panelleri:** Işık yutma oranı yüksek olan bu hücreler, düşük verimlilikleri nedeniyle pazar payının küçük bir bölümünü oluşturur. Amorf silikon güneş panelleri kristal yapıya olmayan güneş panelleridir. Amorf güneş panellerinin yapısı nedeniyle verimlilik kapasiteleri %5 ile %10 aralığında diğer güneş panellerine göre düşük olan değerlere sahiptir.





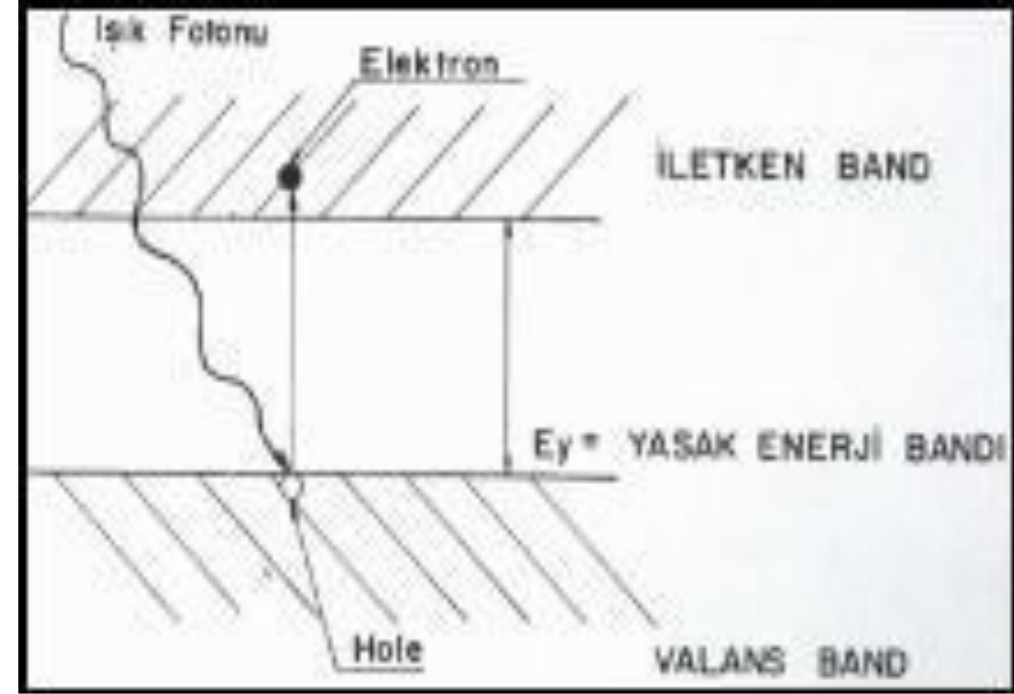
# Güneş Pillerinin Yapısı

- Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de yarı-iletken maddelerden yapılır. Yarı-iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.
- Yarı-iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için “n” ya da “p” tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin “n” ya da “p” tipi olması katkı maddesine bağlıdır.
- En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denir.
- P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de "p tipi" ya da "alıcı" katkı maddeleri denir.



# Güneş Pillerinin Yapısı

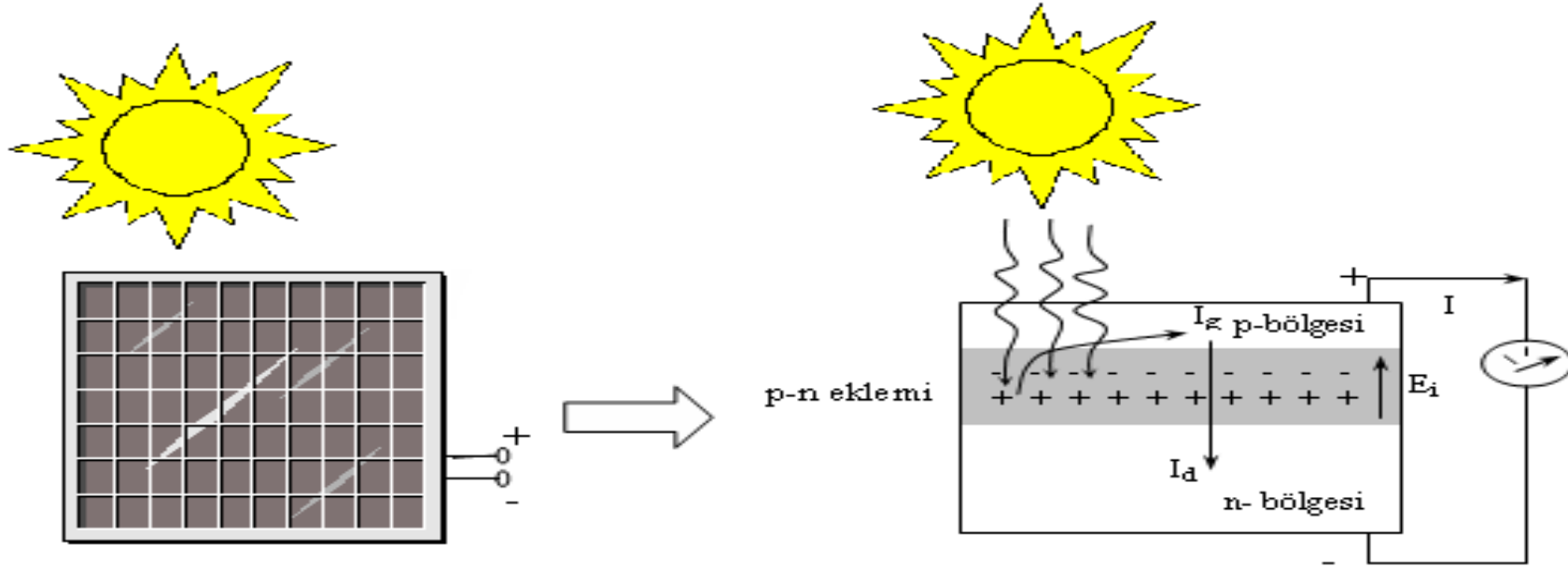
- “P” ya da “n” tipi ana malzemenin içersine gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarı iletken eklemeler oluşturulur. “N” tipi yarı iletkenlerde elektronlar, “p” tipi yarı iletkenlerde holler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve n tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir.
- PN eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluşturur. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Yarı iletken eklemesinin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılarak oluşturulur.





# Güneş Pillerinin Çalışması

- Enerji dönüşümü fotovoltaik olaya dayanmaktadır. Fotovoltaik olayda, ışık fotonları özellikle eklem bölgesine ulaştığında elektronlara çarparak serbest yük çiftleri oluşturur. Uyarılan negatif yüklü (-) her elektron, gerisinde pozitif yüklü (+) bir boşluk bırakır. Bu yük taşıyıcıları, eklemle kurulan doğal iç ters elektrik alanla ( $E_i$ ) akım katkısı oluşturmak üzere çoğunlukta oldukları bölgelere sürülür.
- Doğal  $E_i$  alanı, fotonla enerji kazanan yük taşıyıcılarının hareketlerinde hangi tarafa eğilimli olduklarını ifade eden bir enerji engeli olarak düşünülebilir. Böylece fotonlarla üretilen (-) yüklü elektronlar n-bölgesinde, (+) yüklü pozitif taşıyıcılar p-bölgesinde toplanarak bir gerilim üretilmektedir. Bu durum prensip olarak Şekil ile verilmektedir.

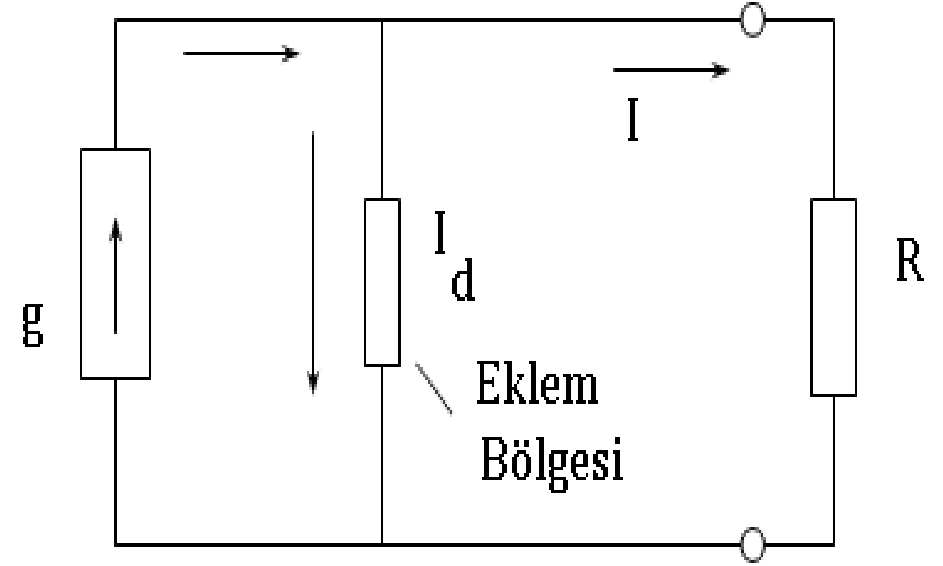


# Güneş Pillerinin Çalışması

- Işık uyarımı altındaki bir PV, ışınım şiddetine bağlı olarak daha büyük ters sızıntı akımı ( $I_g$ ) üretmektedir. Üretilen  $I_g$  akımı PV uçlarında bir gerilim oluşturmaktadır. Diğer yandan üretilen gerilim, p-n eklemine ileri yönde uyardığından  $I_g$  akımına ters yönlü bir  $I_d$  diyot akımına da neden olmaktadır. Dış devreye aktarılabilecek  $I$  akımı bu iki akımın farkı olmaktadır. Enerji dönüşüm sürecine uygun bir prensip eşdeğer devre Şekil ile tanımlanmaktadır.
- Bir güneş pili herhangi bir yüke bağlandığında güneş pili yükü beslemek için bir akım ve gerilim üretmekte ve yüke bir güç aktarmaktadır. Güneş pilinin ürettiği akım-gerilim (IV) karakteristiği denklem 1 ile ifade edilmektedir.

$$I = I_g - I_d = I_g - I_o \cdot \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

- Burada,  $I_g$  ışık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı (A),  $I_o$  ters sızıntı akımı (A),  $I_d$  eklemdeki diyot akımı (A),  $q$  elektron yükü ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C.),  $k$  Boltzman sabiti ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ ),  $T$  mutlak sıcaklık (K),  $n$  diyot faktörüdür.
- Denklem 1'e göre I-V değişimi doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Bu yüzden herhangi bir yük direnci için, denklemde ( $V=I.R$ ) bağıntısı düşünüldüğünde  $I$  veya  $V$  terimi doğrudan çözülememektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi güneş pillerinde üretilen akım ve gerilim ilişkisi ohm kanununa uymamaktadır.





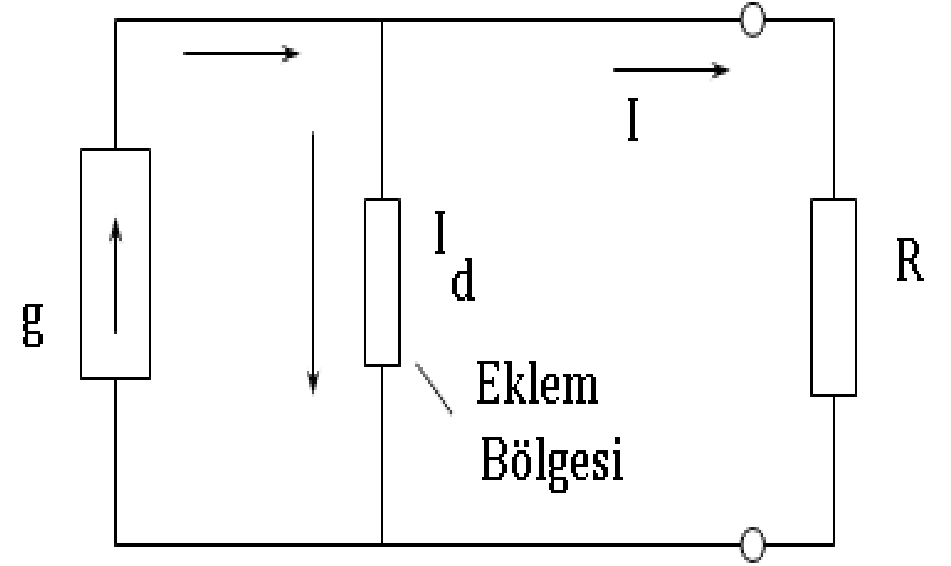
# Güneş Pillerinin Çalışması

- Denklem 1'deki  $V=0$ 'da güneş pilinin kısa devre akımı,  $I=0$ 'da güneş pilinin açık devre gerilimi ( $V_o$ ) tanımlanabilmektedir. Açık devre gerilimi denklem 2'de verilmektedir.

$$V_o = \left( \frac{nkT}{q} \right) \ln \left[ \frac{I_g + I_o}{I_o} \right] \quad (2)$$

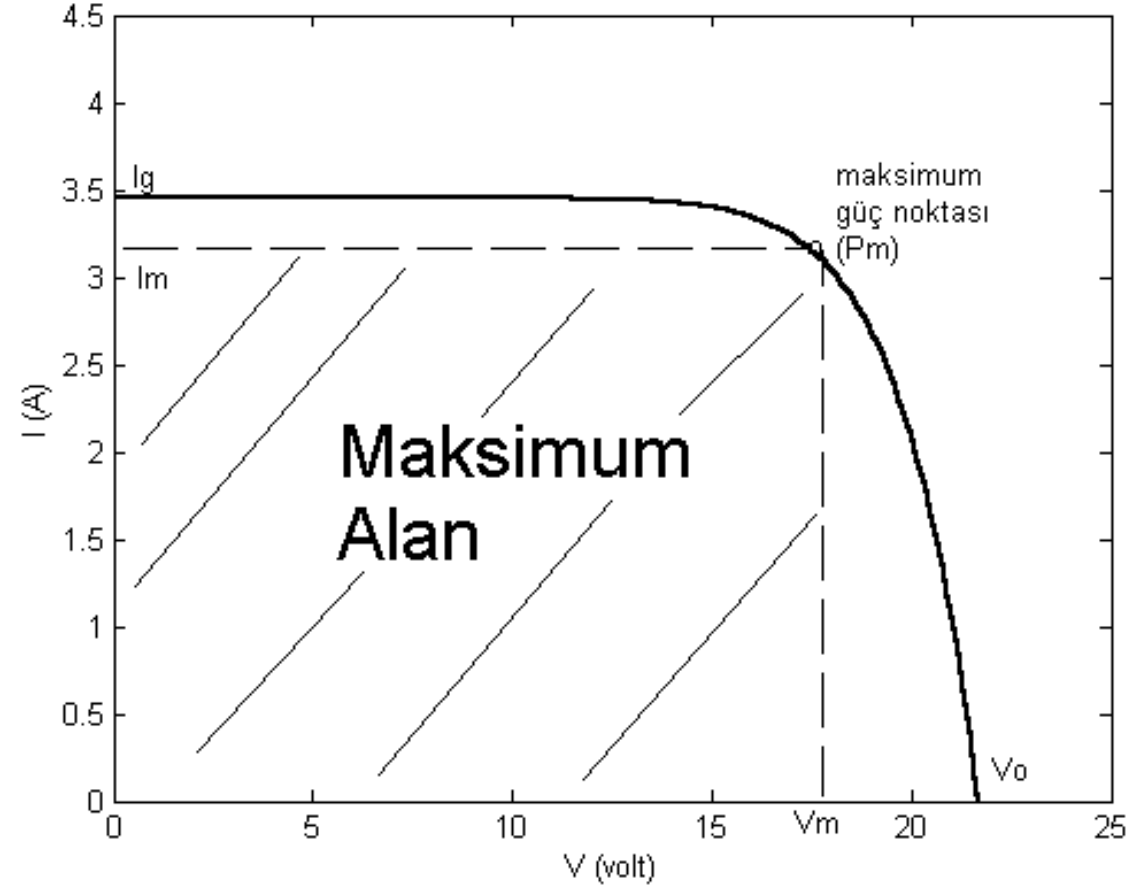
- Güneş pillerine bağlanacak yükün gücüne göre üretilecek akım ve gerilimin şiddetini artırmak için birden fazla sayıda güneş pili birbirine seri veya paralel ya da hem seri hem de paralel bağlantı yapılarak gerçekleştirilir.  $N_s$  kadar seri ve buna  $N_p$  kadar paralel bağlı paket PV'lerden oluşan sistemin akım-gerilim ( $I_p$ - $V_p$ ) ilişkisi denklem 3 ile verilmektedir.

$$I_p = N_p \cdot I_g \cdot s - N_p \cdot I_o \left( e^{\frac{qV_p}{N_s nkT}} - 1 \right) \quad (3)$$



# Güneş Pillerinin Çalışması

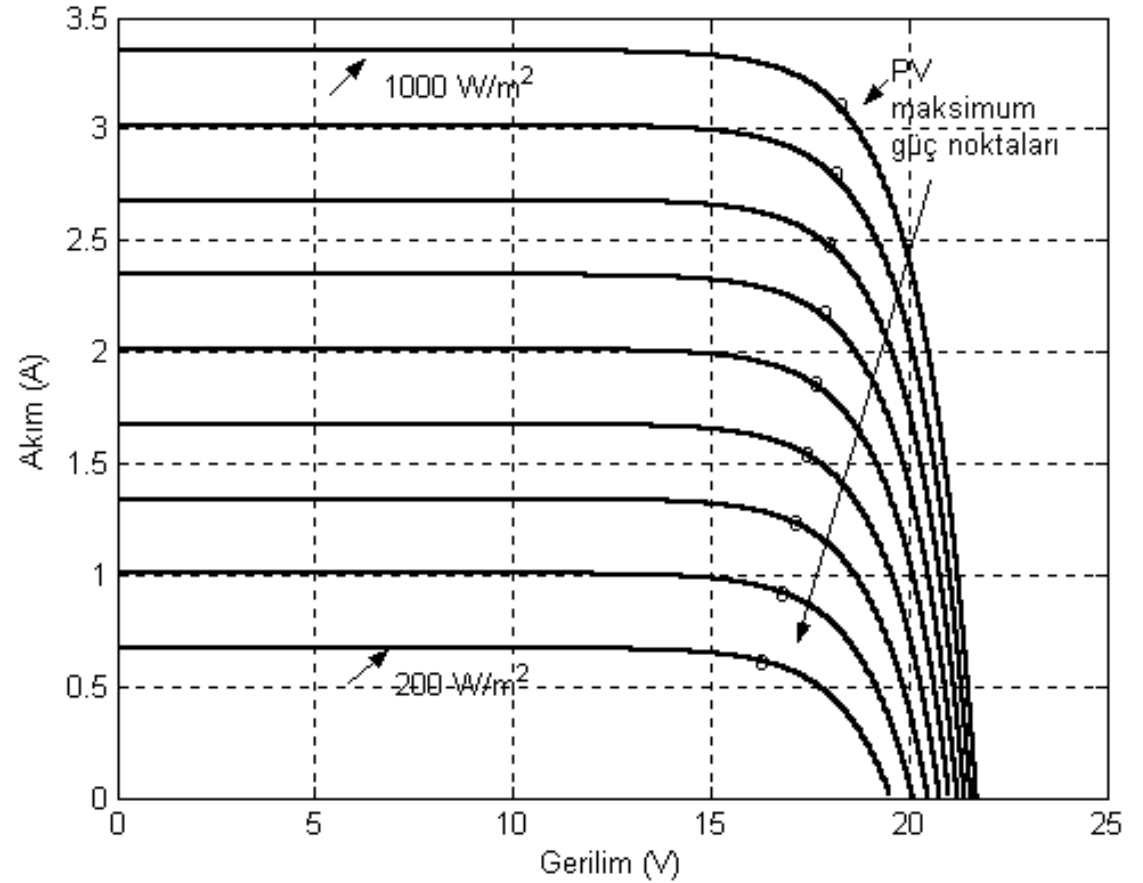
- Şekilde gösterilen eğri, tipik bir güneş pilinin herhangi bir sıcaklık ve ışınımdaki karakteristik eğrisi olan I-V eğrisidir.
- I-V eğrisinin altındaki maksimum dikdörtgen alanı güneş pilinin o anda üretmiş olduğu maksimum gücü ( $P_m$ ) verir ve bu güçteki akım  $I_m$ , gerilim ise  $V_m$  ile gösterilmektedir. Maksimum güç ( $P_m$ ) ise oluşan I-V eğrisinin altına sığabilen en büyük dikdörtgen alanıdır.





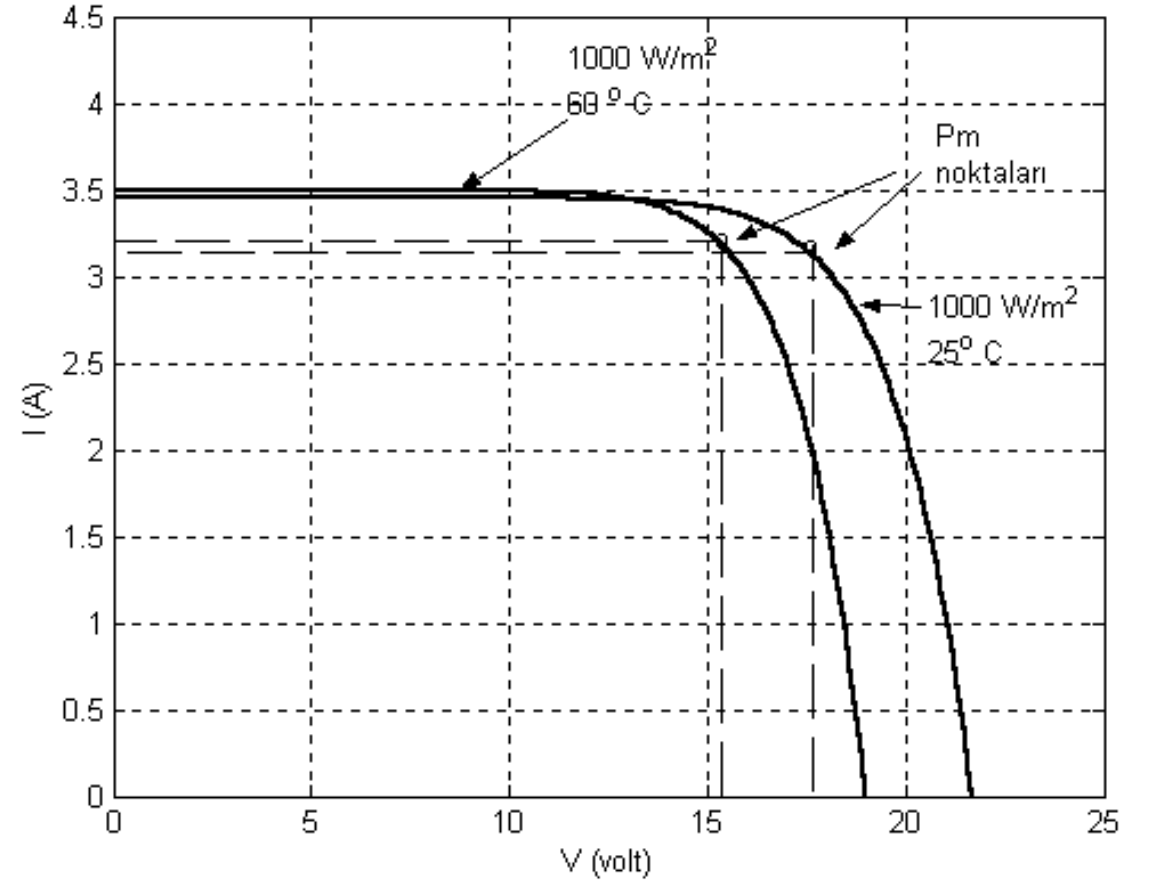
# Güneş Pillerine Işınım Şiddetinin Etkisi

- Bir güneş pilinin I-V karakteristiği ışınım şiddeti ( $\text{W/m}^2$ ) ile değişmektedir (Şekil). Böylece güneş pilinin ürettiği maksimum güç ışınım ile değişmektedir.
- Bu durumda ışınım şiddeti pilin ürettiği kısa devre akımını doğrudan etkilemektedir. Açık devre gerilimi ise kısa devre akımına oranla daha düşük bir oranda değişmektedir.
- Değişik ışınım şiddeti altında çalışan bir güneş pilin performansı güneş pili ile beslenecek güç sistem tasarımlarında göz ardı edilemeyecek bir öneme sahiptir.
- Değişken ışınımlardaki PV performans tanımlamaları, fotovoltaik güç sistem tasarımlarında önemli bir yer teşkil etmektedir.



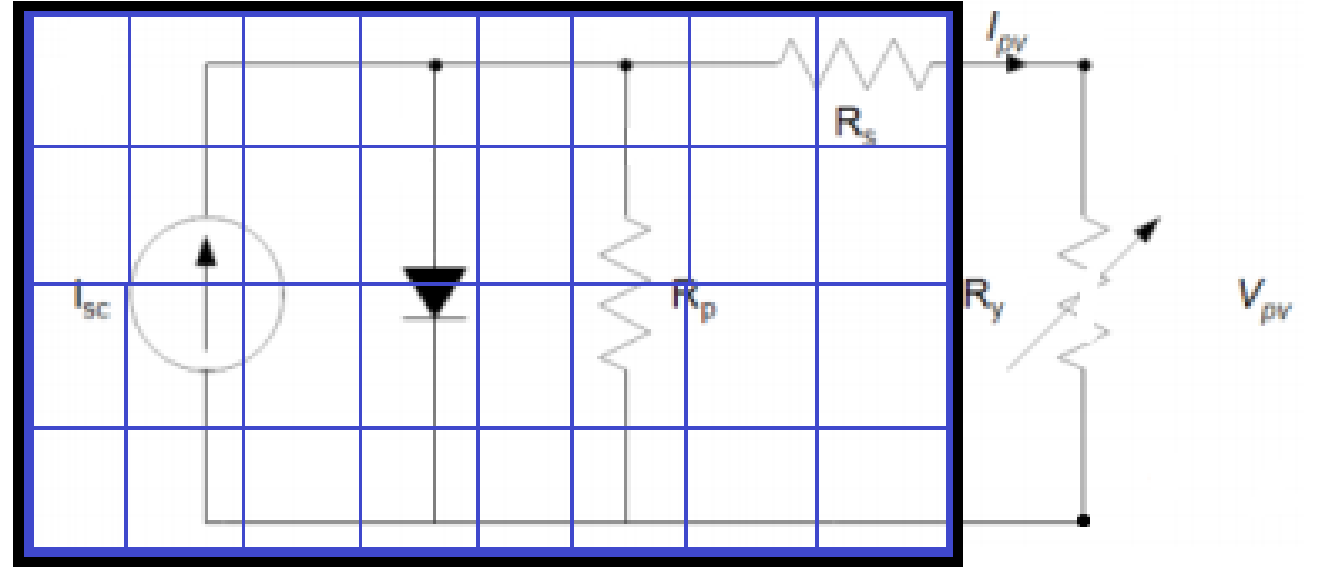
# Güneş Pillerine Etkiyen Sıcaklığın Etkisi

- Fotovoltaik pillerde ışınım şiddetinin etkisi yanında diğer bir önemli etki ise sıcaklıktır. Belirli bir sıcaklıkta, ışınım ile güneş pilinin kısa devre akımı doğru orantılı olarak artar. Güneş pillerinin çalışma performansına sıcaklık da etki etmektedir.
- Sabit bir ışınım altında, sıcaklık artışı kısa devre akımının artması yönünde bir etkide bulunurken açık devre geriliminin azalmasına neden olmaktadır.
- Her ne kadar denklem 2'ye göre  $T$  sıcaklığı ile  $I_g$  'nin,  $V_o$  'ı yükseltebileceği düşünülse de gerçekte sıcaklık,  $I_o$  sızıntı akımını üstel olarak değiştirmekte ve desteklemektedir. Sıcaklığın PV'ye olan etkisi, Şekilde prensip olarak verilmektedir.



# Güneş Pillerinde İç Direnç

- Tüm kaynakların bir iç direnci vardır. Bu nedenle elektronik bir malzeme olan fotovoltaik pillerinde iç dirençleri vardır.
- Fotovoltaik pillerdeki iç direnç verimliliği etkileyen en büyük faktör olduğundan bu direnç ne kadar düşük olursa o kadar iyi ne kadar yüksek olursa o kadar verim düşecektir.
- Fotovoltaik pillerin iç direnci atmosferik koşullar (ışınım şiddeti, rüzgâr vs.) ve üretim kalitesinden dolayı değişmektedir.
- Fotovoltaik piller Şekilde de görüldüğü gibi seri ve paralel dirençlere sahiptir.



Tek Diyotlu Fotovoltaik Pıl Modeli



# Fotovoltaik Pillerde Elektromotor Kuvvet, Güç ve Verimi Etkileyen Faktörler

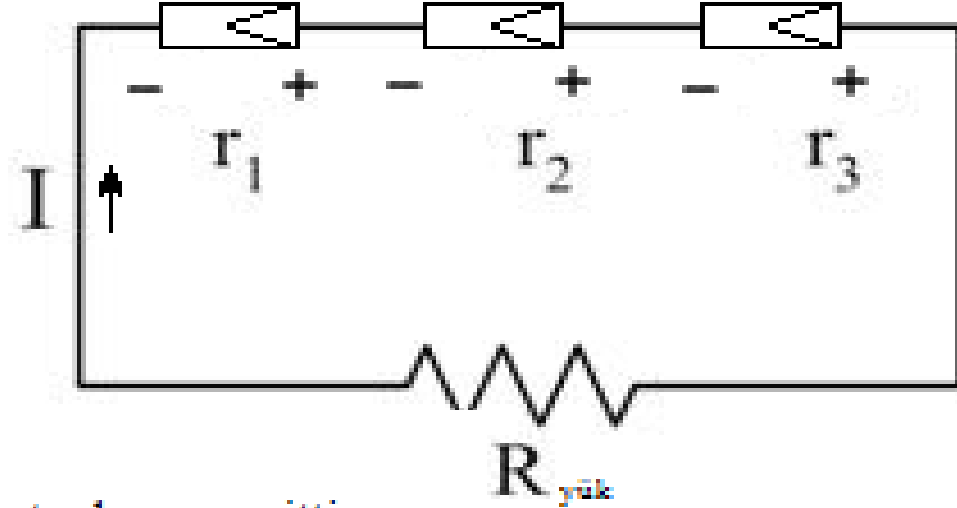
- Elektromotor kuvveti (Kısaca EMK denir  $\epsilon$  ile gösterilir.) devrede oluşan yüklerin potansiyel enerjisini artıracak olan (batarya, fotovoltaik pil, jeneratör gibi) herhangi bir ayardır.
- EMK, elektrik yüklerini düşük potansiyelden yüksek potansiyele (tepeye doğru) hareket ettirir.
- Fotovoltaik emk; silisyumdan yapılmış güneş pilleri için yaklaşık 0.5 volt, germanyum malzeme kullanılarak yapılmış piller için yaklaşık 1 volt düzeyindedir.
- Fotovoltaik pillerde güç ortamın ışınlamına göre değişmektedir. Ortamın ışınlam değeri ne kadar yüksekse verim o kadar yüksek, ışınlam değeri ne kadar düşük ise güç o kadar düşük olacaktır. Fotovoltaik pillerde verim; pillerden alınan gücün, pillerden alınabilecek güce oranından oluştuğu için güç ve verim birlikte değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle fotovoltaik pillerde gücü etkileyen tüm faktörler aynı zamanda verimi de etkilemektedir.
- Fotovoltaik pillerde güç ve verimi etkileyen faktörler; atmosferik koşullar (ışınlam şiddeti, sıcaklık, nem vs.) ve yük direncidir.

## Fotovoltaik Piller ile Diğer Piller Arasındaki Farklar

Fotovoltaik piller normal pillere göre çalışma esnasında üzerlerine düşen ışınlam şiddetine bağlı olarak akım ve gerilimleri değişen elektronik malzemelerdir. Bu nedenle fotovoltaik piller bir devreye sabit gerilim sağlayabilmeleri için elektronik devrelere ihtiyaç duyarlar. Fakat normal piller bir devreye sabit gerilim vermesi için herhangi bir devreye gerek yoktur.

# Fotovoltaik Pillerin Seri Bağlantısı

- Şekildeki devrede görüldüğü gibi fotovoltaik pillerin EMK'ları  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ , ve iç dirençleri  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , olan üreteçlerin birinin (+) kutbu, diğerinin (-) kutbuna birleştirilerek yapılan bağlamaya seri bağlama denir.



Seri bağlı bir devrede:

- Potansiyel farkı, üreteçlerin potansiyel farkları toplamına eşittir.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

- Bütün üreteçlerden geçen akımın değeri aynıdır.

$$I = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{R + r_1 + r_2 + r_3} \quad \text{ya da} \quad I = \frac{\sum \varepsilon}{\sum R}$$

# Fotovoltaik Pillerin Seri Bağlantısı

**Örnek 1.1:** Standart test koşulları altında ( $25^{\circ}\text{C}$  ,  $1000 \text{ W/m}^2$  ) gerilimi 18 volt olan 3 tane fotovoltaik pil seri olarak bağlanmıştır. Üretcin verebileceği toplam gerilimi bulunuz.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 18 \text{ V} + 18 \text{ V} + 18 \text{ V} = 54 \text{ voltur.}$$

**Örnek 1.2:** Birbirine seri bağlı üç tane fotovoltaik pilin iç direnci  $0,5 \Omega$ 'dur. Toplam iç direnci bulunuz.

$$r_{iT} = r_1 + r_2 + r_3 = 0,5 + 0,5 + 0,5 = 1,5 \Omega' \text{dur.}$$

**Örnek 1.3:** Standart test koşulları altında ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $1000 \text{ W/m}^2$ ) gerilimi 18 volt olan üç tane fotovoltaik pilin iç direnci toplamı  $1,5 \Omega$ 'dur. Seri bağlı üç pilin uçlarına bağlı lambanın (yükün) iç direnci  $3,9 \Omega$  ise devreden geçen akımı hesaplayınız.

Seri bağlı üç fotovoltaik pilden standart test koşulları altında alınabilecek gerilim;

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 18 \text{ V} + 18 \text{ V} + 18 \text{ V} = 54 \text{ voltur.}$$

Devrenin toplam direnci;

$$R_T = r_1 + r_2 = 1,5 + 3,9 = 5,4 \Omega' \text{dur.}$$

Devrenin akımı;

$$I = \frac{\varepsilon_T}{R_T} = \frac{54 \text{ V}}{5,4 \Omega} = 10 \text{ amperdir.}$$



# Fotovoltaik Pillerin Paralel Bağlantısı ve Sakıncaları

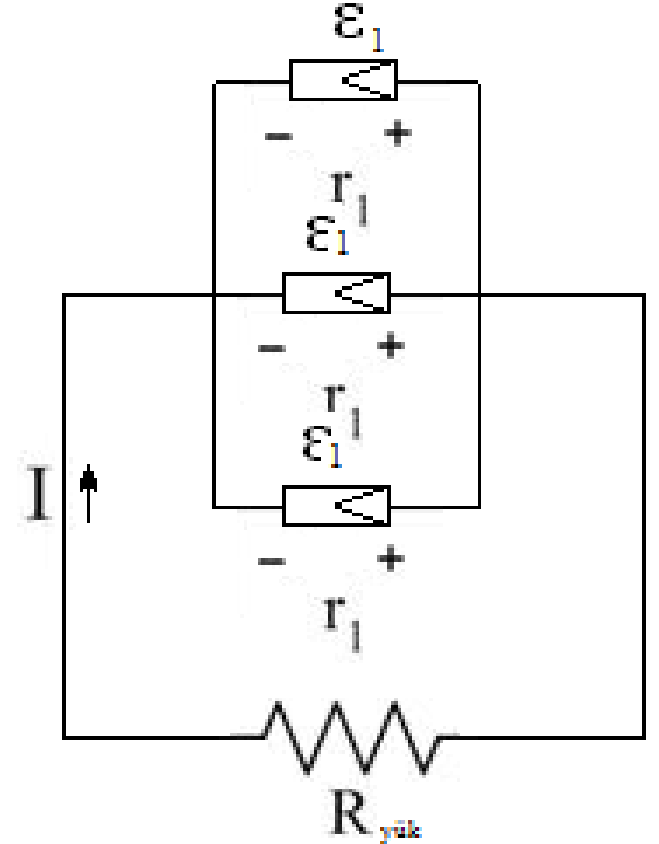
- EMK'ları  $\varepsilon_1$  ve iç dirençleri  $r_1$  olan  $n$  tane fotovoltaik pilin (+) ve (-) kutuplarının şekildeki gibi kendi aralarında birleştirilerek yapılan bağlantıya paralel bağlantı denir.
- Paralel bağlamada fotovoltaik pillerin EMK'leri eşit olmalıdır. Aksi takdirde "R" direncinden geçmesi gereken akım EMK'leri küçük olan ara devrelerden geçerek istenmeyen durumlara neden olabilir.
- Paralel bağlı üreteç devresinde eşdeğer EMK, üreteçlerden birinin EMK'ine eşittir.  $\varepsilon = \varepsilon_1$

EMK'leri,  $\varepsilon_1$  ve iç dirençleri  $r_1$  olan özdeş  $n$  tane üreteç paralel bağlanırsa eşdeğer

direnç  $r_{es} = \frac{r_1}{n}$  olur.

Devreden geçen akım şiddeti,

$$I = \frac{\varepsilon}{\sum R} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r_1}{n}} \quad \text{olur.}$$



# Fotovoltaik Pillerin Paralel Bağlantısı ve Sakıncaları

- **Örnek:** Birbirine paralel bağlı standart test koşulları altında (25 °C, 1000 W/m<sup>2</sup>) 18 volt gerilime sahip 3 fotovoltaik pilin her birinin iç direnci 0,3 Ohm'dur. Buna göre üreteç devresinin toplam gerilimini ve pillerin iç dirençleri toplamını bulunuz.

$\varepsilon = \varepsilon_1$  olduğundan toplam gerilim 18 voltur.

$$\frac{1}{r_{eş}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,3} \Rightarrow r_{eş} = 0,1 \, \Omega \text{ veya}$$

$$r_{eş} = \frac{r_1}{n} = \frac{0,3}{3} = 0,1 \, \Omega \text{ olarak bulunur.}$$

# Fotovoltaik Pillerin Kullanım Yerleri

- Fotovoltaik pillerin kullanıldığı yerler başlıca; şebekeye bağlı (On grid) ve şebekeden bağımsız (Off grid, Stand Alone) olarak ikiye ayrılmaktadır.
- Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler yüksek güçte-santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi binalarda küçük güçlü olarakta uygulamada görülmektedir. Bu tür binalarda çatı üzerine kurulan sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine verilir, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DC elektriğin, AC elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.





# Fotovoltaik Pillerin Kullanım Yerleri

- Fotovoltaik sistemlerin şebekeden bağımsız (Off grid, Stand Alone) olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.
- Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Petrol boru hatlarının katodik koruması
- Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan koruması
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağ evleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompası
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlk yardım, alarm ve güvenlik sistemleri
- Deprem ve hava gözlem istasyonları
- İlaç ve aşı soğutma
- Karayolları gece aydınlatma ve ışıklandırma sistemleri vs.



# DİNLEDİĞİNİZ İÇİN TEŞEKKÜRLER

Arş. Gör. Oğuz Kaan ÇİNİCİ

Gazi Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği