GÜNEŞ ENERJİSİ: TEORİ VE UYGULAMA

Dr Murat DURAK (Meteoroloji Mühendisi)

Nisan 2016

GÜNEŞ ENERJİSİ:
TEORİ VE UYGULAMA

Dr Murat DURAK (Meteoroloji Müh.)

Nisan 2016

ÖNSÖZ

Bu kitabın tek amacı vardır: Güneş enerjisini anlatmak, gerek iş ve gerekse de akademik araştırmalar için daha önce yazılan kaynakların üzerine biraz daha kapsamlı bilgileri içeren bir kaynağı yayınlamaktır. Kitap sadece formül veya genel bilgiler içermemekte, aynı zamanda tecrübe ve güncel konuları kapsamaktadır. Bunu yaparken temel ilke ise, okunabilir ve anlaşılabilir olmak olmuştur. Çok karmaşık gibi görünen teknik konuları bile açık ve özlü bir şekilde anlatarak şekil, fotoğraf ve grafikler ile konunun daha iyi kavranması sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu kitap, yazarın sadece iki yıllık emeği değil; aynı zamanda yirmi yıllık sektör tecrübelerinin bir sonucudur.

Kitaptaki fotoğrafların büyük bir çoğunluğu yazar tarafından çekilmiştir. Şekillerin çoğu yine yazar tarafından çizilmiş, bazı çizimler çeşitli kaynaklardan alınmıştır.

Kitabın herkese yararlı olması dileği ile...

Nisan 2016

Dr Murat Durak

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ……v
İÇİNDEKİLER……vii
KISALTMALAR…….. xi

1. GİRİŞ VE TARİHÇE…. 1

2. GÜNEŞ ENERJİSİ METEOROLOJİSİ 9
2.1. Güneş Işığının Özellikleri 9
2.1.1. Bir Fotonun Enerjisi 10
2.1.2. Spektral İrradiyans 11
2.1.3. Radyant Güç Yoğunluğu 12
2.1.4. Siyah Cisim Radyasyonu 12
2.2. Güneş 13
2.3. Yer Yüzeyindeki Radyasyon 16
2.3.1. Gelen Güneş Işığının Saçılmasından Dolayı Direkt ve Difüz Radyasyon 17
2.3.2. Hava Kütlesi (Air Mass) 17
2.4. Güneşin Hareketi 19
2.4.1. Güneş Zamanı 19
2.4.2. Güneşin Denklinasyon Açısı 21
2.4.3. Yükseklik Açısı 22
2.4.4. Azimut Açısı 24
2.5. Güneşin Pozisyonu 25
2.5.1. Yüksek Doğrulukta Güneşin Pozisyonunu Belirleme 26
2.5.2. Eğimli Yüzey Üzerindeki Güneş Radyasyonu 26
2.5.3. Güneş Yönünü Hesaplamada Vektör Kullanımı 27
2.6. Güneş Radyasyon (Enerjisinin) Belirlenmesi 28

3. GÜNEŞ RADYASYONU ÖLÇÜM TEKNİKLERİ 37
3.1. Güneş Radyasyon Ölçümleri 37
3.2. Güneş Ölçüm İstasyonunda Kullanılan Meteorolojik Sensörler 39
3.2.1. Piranometre (Pyranometer) 39
3.2.2. Albedometre 46
3.2.3. Pirhelyometre 46
3.2.4. Güneşlenme Süresi Ölçümü (Sun Shine Duration Measurement) 47
3.2.5. Global Radyasyon Algılayıcısı 48
3.3. Güneş Ölçüm İstasyonunda Kullanılan Diğer Yardımcı Meteorolojik Sensörler 49
3.3.1. Anemoetre 49
3.3.2. Yön Sensörü 49
3.3.3. Sıcaklık 51
3.3.4. Basınç Sensörü (Barometre) 52
3.3.5. Nem Sensörü 53
3.4. Güneş İrradiyans Veri Seti Analizi 55

4. GÜNEŞ PANELLERİ (PV GES SİSTEMLERİ) 59
4.1. PV Sistem ve Uygulamaları 59
4.1.1. Ada PV Sistemleri (Stand Alone System veya Off-grid System) 60
4.1.2. Şebekeye Bağlı Sistemler (Grid Connection Systems) 61

4.2. Güneş İzleme Sistemi (Tracking Systems) 62
4.3. Fotovoltaik Etkisi 65
4.4. Güneş Hücre Tipleri 69
4.4.1. Kristalin Silikon Hücreler 69
4.4.2. İnce Film (Thin Film) Teknolojisi 71
4.5. Yoğunlaştırılmış Fotovoltaikler (Concentrated Photovoltaics, CPV) 72
4.6. Sistem Boyutu ve Modül Seçimi 75
4.6.1. PV İç Bağlantıları 76
4.6.2. PV Hücresinden PV Serisine Süreç 77
4.6.3. PV Modüllerinin Özellikleri 78
4.7. PV GES Saha Seçimi 80
4.7.1. PV GES Santral Sahası Seçimi Yapılırken Dikkat Edilmesi Gerekenler 81
4.7.2. Çeşitli PV GES Sahalarına Ait İşletme Tecrübeleri 81
4.7.3. PV Montajındaki Riskler 84
4.7.4. Panel Yerleşimi 85
4.7.5. Bazı Avrupa Ülkelerindeki PV GES Tecrübeleri 87
4.8. PV Diğer Uygulamalar 92
4.8.1. Uzay Gemileri 92
4.8.2. Askeri Uygulamalar 92
4.8.3. Sivil İletişim Sistemlerinde Kullanım 93
4.8.4. Diğer Son Kullanıcı Uygulamaları 94
4.9. Güneş Enerjisi Binalarda Kullanım (BIPV) 94
4.9.1. BIPV Uygulamaları 95
4.10. Fotovoltaik GES Sistemlerde Kullanılan Yazılımlar ve Standartlar 98
4.10.1. Simülasyon Yazılımları 99
4.10.2. Ekonomik Değerlendirme Yazılımları 99
4.10.3. PV Sanayi İlgili Yazılımlar 99
4.10.4. PV Sistemler Analizi ve Planlanması 99
4.10.5. İzleme ve Kontrol Yazılımları 100
4.10.6. Saha Analizi Yazılımları 100
4.10.7. PV Standartları 100
4.10.8. Günei Hücreleri ve Modülleri Referans Eden Standartlar 101
4.10.9. PV Sistemleri İçin Standartlar 101
4.10.10. PV Sistemlerinin Diğer Parçaları ve Bileşenleri Standartları 101
4.10.11. ASTM Standartları 102
4.10.12. PV Modül Testi 102

5. YOĞUNLAŞTIRICI SİSTEMLER (CSP SİSTEMLER) 105
5.1. CSP'lerdeki Ana Üniteler 106
5.2. Parabolik Oluk Teknolojisi (Solar Parabolic Trough, CSP) 107
5.2.1. Toplayıcı (Collector) 108
5.2.2. Alıcı (Receiver) 108
5.2.3. Isı Toplama Elemanı (Absurber Tube, Heat Collection Element) 109
5.2.4. LS-3 İşletme Tecrübesi 113
5.2.5. Fresnel CSP GES 115
5.3. Güneş Enerjisi Kule CSP Sistemi (Solar Power Tower) 121
5.4. Güneş Çanak Sistemi (Soılar Dish Engine) 130
5.5. CSP Maliyetleri 136
5.6. Dünyadaki Bazı CSP Test Merkezleri 136
5.6.1. Plataforma Solar de Almeria (PSA) 137
5.6.2. Sandia Ulusal Laboratuvarı (Ulusal CSP Test Merkezi-NSTTF) 147
5.6.2. Jülich CSP Test Merkezi 147
5.6.3. THEMIS Güneş Kulesi CSP Test Merkezi 149
5.7. İşletmedeki Bazı CSP GES'lere Ait Bazı Bilgiler 149
5.7.1. Andasol CSP GES'ler 149
5.7.2. Hawaii Keahole Solar CSP GES 153
5.8. CSP GES Proje Uygulama 151
5.8.1. Toplayıcı (Collector) 154
5.8.2. Alıcı (Receiver) 155
5.8.3. Ulaşım Yolu (Anayol-GES Arası Yol) 155

5.8.4. Santral İçi Servis Yolu (Service Roads) 156
5.8.5. Saha Düzenlemesi 156
5.8.6. CSP GES Kollektör Nakliyesi ve Montajı 157
5.9. CSP İşletme ve Bakım 162
5.10. CSP GES'lerde Kullanılan Yazılımlar 177
5.11. CSP GES Saha Seçilmesi 179
5.12. CSP Sistemlerinin Kıyaslanması 180

KAYNAKLAR… 193

EK I: Çevrimler…..... 187

EK II: Sözlük…..... 191

ÖZGEÇMİŞ…..... 195

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
BoP	: Balance of Plant
CSP	: Concentrating Solar Power
CPV	: Concentrating Photovoltaics
dB	: Desibel
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EPC	: Engineering Procurement and Construction
EPDK	: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ESA	: Enerji Satış Anlaşması
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EWEA	: Avrupa Rüzgar Enerjisi Birliği (European Wind Energy Association)
GES	: Güneş Elektrik Santralı
GW	: Giga Watt
kW	: Kilo Watt
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
MTİ	: Mühendislik Tedarik ve İnşaat
MW	: Mega Watt
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
PV	: Photovoltaics
PTC	: Production Tax Credit
RES	: Rüzgar Elektrik Santralı
RT	: Rüzgar Türbini
TEAŞ	: Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TM	: Trafo Merkezi
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YES	: Yenilenebilir Enerji Santralları

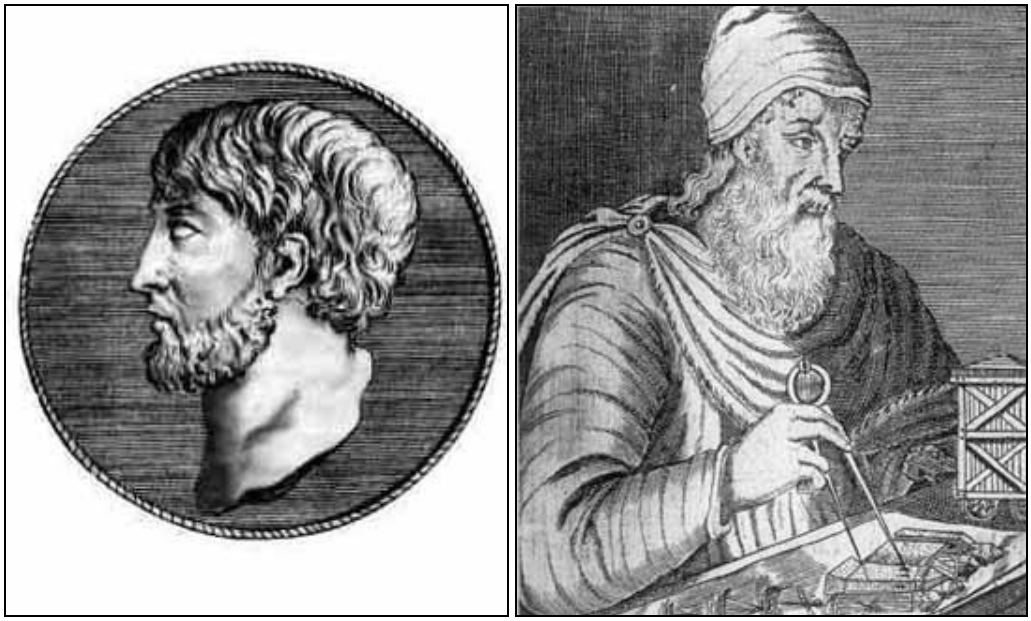
BÖLÜM 1: GİRİŞ VE TARİHÇE

Güneş, Güneş Sisteminin merkezinde yer alan yıldızın adıdır. Tek başına Güneş Sisteminin kütlesinin % 99.8'ini oluşturur. Geri kalan kütle güneşin çevresinde dönen gezegenler, asteroidler, göktaşları, kuyrukluyıldızlar ve kozmik tozdan oluşur. Günışığı şeklinde Güneş'ten yayılan enerji, fotosentez yoluyla dünya üzerindeki hayatın aşağı yukarı tamamının var olmasını sağlar ve dünyanın iklimiyle hava durumunun üzerinde önemli etkilerde bulunur. İnsanoğlu çok eski dönemlerden bu yana güneş enerjisini kullanmaktadır. Bilinen yazılı kayıtlara göre, M.Ö. 7. Yüzyıldan itibaren günümüze kadar kullanılagelmiştir. Günümüzde evlerde elektrik üretim amaçlı kullanımdan arabalara kadar geniş bir yelpazede güneş enerjisi uygulamaları bulunmaktadır. İzleyen sayfalarda tarihsel gelişimine göre güneş enerjisi kullanımı verilmiştir.

M.Ö. 7. Yüzyıl
Güneş ışınları, odaklanarak ateş yakılmasında kullanılmıştır.

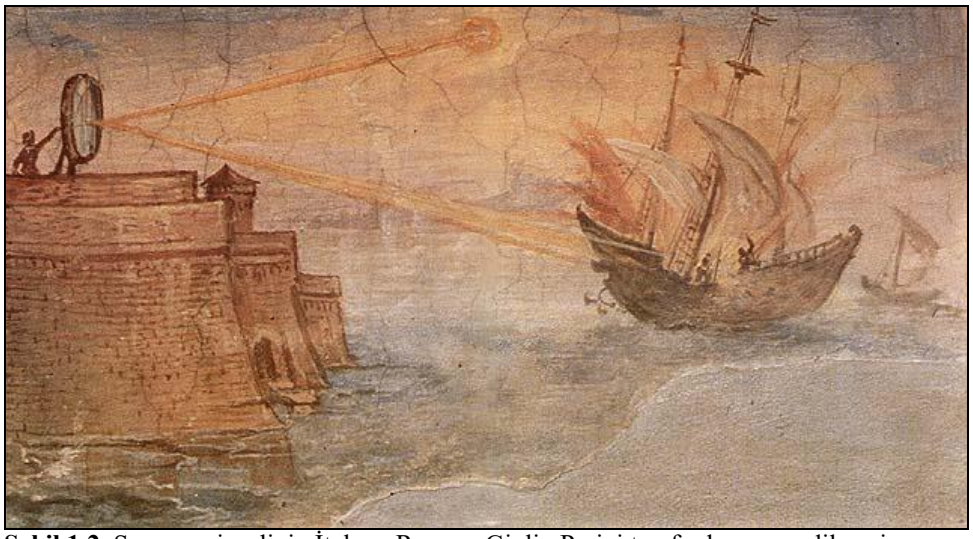
M.Ö. 3. Yüzyıl
Yunanlılar ve Romalılar dini ayinlerinde güneş ışınlarını kullanarak meşale yakmışlardır.

M.Ö. 2. Yüzyıl
M.Ö. 212 yılında Yunanlı Arşimed, güneş ışınlarının yansımasını kullanarak Syracuse'yi işgale çalışan tahta gemileri yakmıştır (Bu konu ile ilgili bazı kaynaklarda yapılmadığı da belirtilmektedir. Fakat 1973 yılında Yunanistan'da tekrar canlandırma yapmış olup 50 m mesafeden gemi yakılabilmiştir).



Şekil 1.1. Arşimed.

Konuyu 1571-1635 yılları arasında yaşamış olan İtalyan Ressam Giulio Parigi Şekil 1.2'de görüldüğü gibi resmetmiştir. Konu ile ilgili çeşitli filmlerde çekilmiştir.



Şekil 1.2. Syracuse işgalinin İtalyan Ressam Giulio Parigi tarafından resmedilmesi.

M.S. 20 Yılları

Çin'de bulunan bazı dökümanlarda güneş ışığı kullanarak dini ayinlerde meşale yakıldığına dair bilgiler bulunmuştur.

M.S. 1. Yüzyıl – 4. Yüzyıl Arası

Romalılara ait büyük hamamlarda, güneşi etkin bir şekilde kullanan tasarımlar göze çarpmaktadır. Bu tasarımlarda hamamın yüzü güneye dönük şekilde yapılarak güneş enerjisinden faydalanılmıştır. Şekil 1.3 ile bu tasarım hamam görülmektedir.

Şekil 1.3. Roma hamamı.

M.S. 6. Yüzyıl

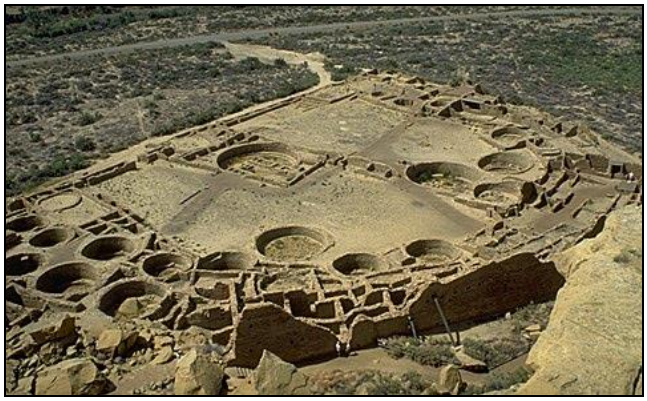
Roma'da Justinian Yasası'na göre heryerde güneş odaları yapılarak, her bir ferdin güneşe erişimi garanti altına alınmıştır.

M.S. 1200'lü Yıllar

Pueblo'nun ataları olan ve Anasazi olarak bilinen Kuzey Amerika'da yaşayan bir halk güneşten pasif kullanım için yararlanma amacıyla kayalıklara özel bir yerleşim kurmuşlardır.

Şekil 1.4. Anasaziler tarafından güneş enerjisinin pasif kullanımı.

Eski şehirler, genellikle güneşten maksimum faydalanabilmek için ana cephelerini güneye doğru kurmuşlardır (Şekil 1.5).

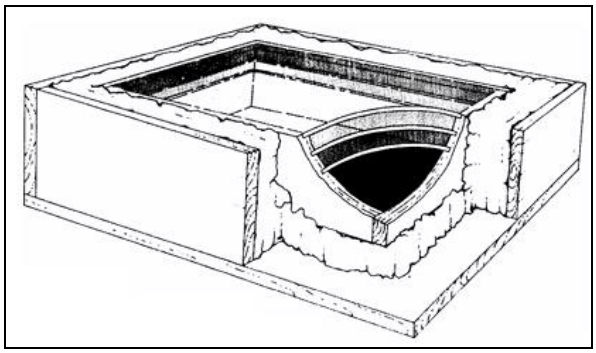


Şekil 1.5. Güney cepheli antik bir kent.

Buradan sonra 1797-1891 yılları arasında olan gelişmeler anlatılacaktır.

1767

İsviçreli bilimadamı Horace de Saussure, dünyanın bilinen ilk güneş kollektörünü yapmıştır. Bu tasarım, daha sonraları 1830'larda Sir John Herschal tarafından Güney Afrika'da yemek pişirme amaçlı kullanılmıştır. Bu tasarımda o yıllarda gittikçe gelişen optik teknolojisinin bilim adamları tarafından yansıtılma özelliğinin keşfedilmesi de önemli bir rol oynamıştır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Horace de Saussure sıcak kutusu.

1816

27 Eylül 1816'da Robert Stirling tarafından Edinburgh Chancery'de patent başvurusu yapılmıştır. İskoçya Kilisesi'nde papaz olan Stirling, evindeki atölyesinde boş zamanlarında ısı makinası (heat

engine) üzerinde çalışmalarda bulunmuştur. Lord Kelvin, Stirling'in modelini daha sonraları üniversitede geliştirerek çanak/Stirling (dish/Stirling) sistemini geliştirmiştir. Bu teknoloji, günümüzde de kullanılmaktadır.

1839
Fransız bilimadamı Edmond Becquerel fotovoltaik etkisini keşfetmiştir. İki metal elektrot ile çalışırken elektrolit hücreler ile etkileşimde olduğu görülmüştür.

1860
Fransız matematikçi August Mouchet, güneş enerjisi ile çalışan buhar makinalarını teklif etmiştir. Daha sonraki 20 yılda asistanı Abel Pifre, güneş enerjisi ile çalışan ilk buhar makinasını imal etmiştir ve farklı amaçlar için kullanılmıştır. Bu makinalar, günümüzdeki modern parabolik çanak (dish) kollektörlerin öncüsü olmuştur.

1873
Willoughby Smith selenyumun fotoiletkenliğini keşfetmiştir.

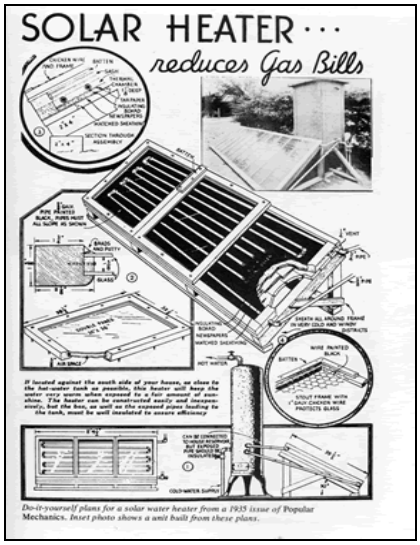
1876
William Grylls Adams ve Richard Evans Day selenyumun güneş ışığına maruz kaldığında elektrik ürettiğini keşfetmişlerdir. Her ne kadar selenyum güneş hücreleri yeterli miktarda güneş ışığını elektrik enerjisine çevirmese de en azından hareket etmeyen bir sistemin de elektrik üretebileceğini ispat etmesi açısından önemlidir.

1880
Bolometreyi icat eden Samuel P. Langley güneş ışınlarının ölçümünü yapmayı başarmıştır. Elektrik devresine bağlı bir tel ile bu ölçümü yapmıştır. Güneş radyasyonu tel üzerine düştüğünde sıcaklığı artarak devre üzerindeki elektrik direncinin artmasına yol açmıştır.

1883
Amerikalı mucit Charles Fritts, selenyum dilim (wafer) kullanarak ilk güneş hücrelerini tarif etmiştir.

1887
Heinrich Hertz ultraviyole ışıklarını iki metal elektrot arasındaki düşük voltajın yerini değiştirdiğini keşfetmiştir.

1891
Baltimorlu mucit Clarence Kemp ilk ticari güneş su ısıtıcısının patentini almıştır. Aşağıda Şekil 1.7, aldığı ekipmanın gazete haberi görülmektedir.



Şekil 1.7. Horace de Saussure sıcak kutusu.

İzleyen sayfalarda 1900'lü yıllardaki gelişmelerden bahsedilecektir.

1904
Wilhelm Hallwachs bakır ve cuprous oksit kombinasyonunun ışığa karşı duyarlı olduğunu keşfetmiştir.

1905
Albert Einstein izafiyet teoremi ile birlikte fotovoltaik etki teoremini açıklamıştır.

1908
William J. Bailey günümüzdeki tasarıma çok yakın olan güneş kollektörlerini icat etmiştir.

1918
Polonyalı bilimadamı Jan Czochralski tek kristal silikonu geliştirmiştir.

Şekil 1.8. Polonyalı bilimadamı Jan Czochralski.

1932
Bilimadamı Audobert Stara Cadmium Sulfide (CdS) üzerindeki fotovoltaik etkiyi bulmuştur.

1947
2. Dünya Savaşı'nın etkileri yüzünden enerji sıkıntısı çeken Amerika'da Libby-Owens-Ford Şirketi 49 Eyalet için en büyük güneş kollektörlerinin nasıl olacağı konusunda bir çalışma yapmıştır.

1953
Wayne State University'den Dr Dan Trivich, farklı materyallerin güneş ışığındaki verimi ile ilgili ilk teorik hesaplamaları yapmıştır.

1954
Darly Chaplin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson tarafından Amerika'da silikon fotovoltaik (PV) geliştirilerek güneşten elektrik üretiminde bir devrim meydana gelmiştir. Amerika Bell Laboratuvarında yapılan çalışmalar sonucu güneş enerjisini yeterli miktarda elektrik enerjisine çevirebilen PV'ler geliştirilmiştir. Bell Telephone Laboratuvarı, önceleri %4, daha sonraları da %11 verim ile çalışabilen silikon güneş hücreleri üretmiştir.

1955
Western Electric firması silikon fotovoltaik için ticari lisanslar satmaya başlamıştır.

1957
Hoffman Elektrik Şirketi %8 verimli PV hücreleri üretmeyi başarmıştır.

1958
U.S. Signal Corps Laboratuvarından T. Mandelkom n-on-p silikon fotovoltaik hücreler geliştirmiştir. Bu hücreler özellikle uzay çalışmalarında çok önemlidir, çünkü radyasyona dayanıklı hücrelerdi.

1959
Hoffman Elektronik Şirketi %10 verimli PV hücrelerine ulaşmıştır. Ayrıca şebeke bağlantısı hususunda da çeşitli bilgiler kullanılmaya başlanmıştır.

1959
7 Ağustos tarihinde Explorer IV uydusu fotovoltaik hücreler ile (9600 adet ve her biri 1cm x 2cm) uzaya fırlatılmıştır. 13 Kasım tarihinde de Explorer VII uydusu fırlatılmıştır.

1960
Hoffman Elektronik firması, %14 verime ulaşmıştır.

1963
Japonya'daki bir deniz fenerine o zamanki en büyük kurulu güç olan 242 Watt PV monte edilmiştir.

1964
NASA Nimbus uzay aracını 470 Watt PV ile uzaya fırlatmıştır.

1969
Fransa Odeillo bölgesinde 8 katlı apartman yüksekliğinde parabolik ayna dikmiştir.

1970
Dr. Elliot Berman, Exxon Corporation desteği ile daha ekonomik güneş hücresi tasarlayarak fiyatı 100$/W'tan 20$/W'a düşürmüştür. Güneş hücreleri artık deniz feneri, denizüstü platformlar, demiryolu geçişleri vb gibi birçok yerde görülmeye başlanmıştır.

1972
Delaware Universitesi Energy Conversion Enstitüsü ince film PV ile ilgili bir bölüm kurarak bu konudaki ilk bilimsel ar-ge faaliyetlerine başlamıştır.

1973
Delaware Üniversitesi "Solar One" isimli dünyadaki ilk PV/termal hibrid sistemi bir evin çatısına monte etmiştir. Bu sistem, şebeke ile çalışabilen özel bir sayaçla birlikte monte edilmiştir.

1976
NASA Lewis Araştırma Merkezi Avustralya kıtası hariç dünyadaki her yere toplam 83 adet PV sistemi montajına başlamıştır. Bu PV'ler aydınlatmadan iletişim sistemlerine kadar farklı projelerde uygulamaları olmuştur.

1976
David Carlson ve Christopher Wrenski, ilk amorphous silikon PV hücrelerini RCA laboratuvarında geliştirmişlerdir.

1977
Dünyada elektrik üretim amaçlı toplam güneş enerjisi kurulu gücü 500 kW'yı aşmıştır.

1978
NASA Lewis Araştırma Merkezi, Arizona'da Papago Indian Reservation kapsamında 3.5 kW PV'ler kullanmaya başlayarak dünyada PV sistem kullanan ilk köy olmuştur. Sistem, köye su temini ve elektrik üretimi için toplam 15 evin ihtiyacını giderecek şekilde 1983 yılına kadar çalışmıştır. Bu tarihten sonra şebeke köye ulaştığında PV sistemi sadece su pompalama amacı ile kullanılmıştır.

1980
ARCO Solar Şirketi, yıllık 1 MW'tan fazla üretim yapan ilk şirket olmuştur.

1980
Delaware Üniversitesi, ince film teknolojisinde sulfide/cadmium sulfide kullanarak %10 verimi aşmıştır.

1981
Paul MacCready güneş enerjisi ile uçabilen ilk uçağı geliştirerek Fransa'dan İngiltere'ye uçuşu tamamlamıştır. Bu uçakta 16000 adet güneş hücresi bulunmakta olup toplam 3000 W kurulu güce sahipti.

Şekil 1.9. Güneş enerjisi ile uçan ilk uçak.

1982
ARCO solar tarafından Kaliforniya Hisperiya'da ilk MW sınıfı PV santralı kurulmuştur. 1 MW kurulu gücündeki sistem 108 çift eksenli izleyen sisteme (tracking) sahipti.

1982
Avustralyalı Hans Tholstrup "The Quiet Achiever" isimli ilk güneş enerjisi ile çalışan araç ile Sidney-Perth arası 2800 millik mesafeyi 20 günde gitmiştir.

Şekil 1.10. The Quiet Achiever.

1982
Amerikan Enerji Bakanlığı, endüstriyel bir konsorsiyum ile birlikte Solar One isimli bir proje başlatarak 10 MW kurulu gücünde GES'i işletmeye açmıştır. Güç kulesi (power tower) teknolojisi kullanılarak yoğunlaştırıcı (odaklayıcı) güneş enerjisi teknolojisi (concentrating solar power) kullanılmıştır.

Şekil 1.11. Odaklayıcı bir güneş santralı (Solar One).

1982
Dünya toplam kurulu gücü 10 MW'ı aşmıştır.

1983
ARCO Solar 6 MW PV GES'i Kaliforniya'da devreye alarak 2500 eve yetecek enerji üretmeye başlamıştır ve dünya toplam kurulu gücü 21.3 MW'a ulaşmıştır.

1986
Dünyanın en büyük GES projesi Kaliforniya Kramer Junction'da devreye alınmıştır. Proje sahasında bulunan aynalar güneş ışınlarını yoğunlaştırarak borular üzerine doğru odaklamakta ve borudaki akışkanın sıcaklığını artırarak buhar elde edilmesine yol açmaktadır. Elde edilen buhar, türbine verilerek elektrik üretilmektedir.

1992
South Florida Üniversitesi %16 verimle çalışan ince film PV hücresi geliştirerek %15 verim seviyesini aşmıştır.

1993
Pacific Gas&Electric Şirketi, şebeke destekli ilk 500 kW kurulu güçlü GES'i devreye almıştır.

1996
Almanya'da güneş enerjisi ile çalışan Icare Sunseeker isimli uçak Stutgart'ta uçurulmuştur. 21m^2 alandaki 3000 adet yüksek verimli güneş hücresi kullanılmıştır.

Şekil 1.12. Icare Sunseeker uçağı.

1999
Dünya toplam kurulu gücü 1000 MW'ı aşmıştır.

2000
First Solar Şirketi, Ohio'da o tarihteki dünyanın en büyük PV fabrikasını kurarak yıllık 100 MW üretim kapasitesine sahip olmuştur.

2001
BP firması, güneş enerjisi ar-ge çalışmalarına başlamıştır.

2004
Birçok AB ülkesi güneş enerjisini teşvik etmeye başlamıştır.

2009
Özellikle PV GES projelerinde AB Ülkelerinde ciddi bir yükseliş yaşanmıştır.

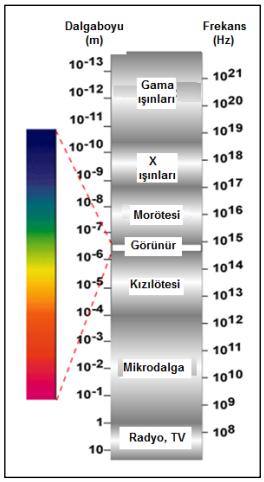
2010
Ülkemizde YEK Kanunu çıkarılmış olup güneş enerjisine verilen tarife yükseltilmiştir. Ayrıca yerli teçhizat üretimi için çeşitli teşvikler getirilmiştir.

BÖLÜM 2: GÜNEŞ ENERJİSİ METEOROLOJİSİ

Güneş enerjisi değişik biçimlerde yer yüzeyindeki tüm enerjinin kaynağını oluşturmaktadır. İnsanlar, diğer bitki ve hayvanlar gibi besin ve ısı için güneşe ihtiyaç duymaktadır. Bununla beraber, insanlar güneşin enerjisinden birçok farklı şekilde de yararlana gelmişlerdir. Örneğin, geçmiş jeolojik devirlerdeki bitki özlerinden oluşan fosil yakıtlar aslında milyonlarca yıl öncelerinde güneş enerjisinin depolanmış şeklini oluşturmakta olup ulaşım ve elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Benzer şekilde, biokütle güneşin enerjisini yakıta dönüştürmekte ve daha sonra ısı, ulaşım ve elektrik için kullanılabilmektedir. Hidroelektrik enerji bile güneşin bir türevi olarak karşımıza çıkmaktadır. Hidroelektrik güç, güneşle suyun buharlaşmasına bağlıdır. Yer yüzeyine yağış olarak geri dönen buharlaşmalar barajlara su sağlayan en önemli hidrolojik döngü elemanıdır. Güneş dünya arası mesafe yaklaşık 93 milyon mil olup güneşten dünyaya ulaşan enerji miktarı 4×10^{18} Joule'dir. Dünya nüfusu tarafından tüketilen yıllık enerji miktarı 3×10^{14} Joule'dir. Günümüzde güneş enerjisinden çok farklı biçimlerde ve alanlarda yararlanılmasıyla birlikte elektrik enerjisi üretiminde genelde iki farklı teknoloji kullanılmaktadır. Bunlar fotovoltaik (PV) ve güneş termal güç üretim teknolojileridir (CSP; Concentrating Solar Power). Fotovoltaik teknoloji, güneş enerjisinden yararlanmanın basit ve zarif bir yöntemidir. PV cihazları (güneş hücreleri) gelen güneş radyasyonunu direkt bir şekilde elektrik enerjisine gürültüsüz, kirlilik yaratmadan, hareketli parça kullanmadan sağlıklı, güvenilir ve uzun süreli bir şekilde dönüştüren bir teknolojidir. Güneş termal güç sistemleri ise, güneş radyasyonundaki termal enerjiyi toplar ve bu enerjiyi düşük veya yüksek sıcaklıklarda kullanır. Düşük sıcaklık uygulamaları su veya ortam ısıtma amaçlı değerlendirilirken yüksek sıcaklık uygulamaları ise elektrik jeneratörünü çalıştırmada kullanılan buharı üretmek için güneşin ısı enerjisi yoğunlaştırılarak (odaklanarak) kullanılmaktadır.

2.1 Güneş Işığının Özellikleri

Her gün gördüğümüz ışık güneşten yayılıp yer yüzeyine gelen toplam enerjinin yalnızca bir bölümüdür. Güneş ışığı elektromanyetik radyasyonun bir formudur ve görebildiğimiz görünür ışık aşağıda görülmekte olan elektromanyetik spektrumun küçük bir alt kümesidir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum.

Elektromanyetik spektrum, ışığı belirli bir dalga boyuna sahip olan bir dalga olarak tanımlamaktadır. Işığın bir dalga olarak tanımlanması 1800'lü yılların ilk zamanlarında Young, Arago ve Fresnel tarafından yapılan deneylerle anlaşılabilmiştir. 1860'lı yılların sonlarında ışık, elektromanyetik spektrumun parçası olarak görülmeye başlanmıştır. 1900 yılında Max Planck ve 1905 yılında Albert Einstein tarafından yapılan çalışmalar, ışığın karakteristiklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Planck ışığın toplam enerjisinin birbirinden ayırt edilemeyen enerji elemanlarından (veya bir enerji paketleri) oluştuğunu teklif etmiştir. Einstein, fotovoltaik etki (ışığın çarpması ile belirli metal ve yarı iletkenlerden elektronların serbest kalması) üzerinde çalışırken doğru bir şekilde bu kuantum enerji elemanlarının değerlerini ayırt etmeyi başarmıştır. Bundan sonra ışığın foton adı verilen enerji partikülleri veya paketlerinden teşekkül olduğu şeklinde bir görüş kabul edilmiştir. Bu çalışmalar aynı zamanda Planck ve Einstein'e Nobel ödülü de kazandırmıştır.

Günümüzde, ışığın parçacık ve dalga doğası gözlemlerinin her ikisi kuantum mekaniği ile açıklanmaktadır. Kuantum mekaniğinde foton, elektron ve proton gibi diğer tüm kuantum mekaniği parçacıkları bir dalga paketi olarak en doğru bir şekilde resmedilmektedir. Bir dalga paketi dalga yığını olarak tanımlanır ve dalga paketleri hem mekansal olarak lokalize olmuş hem de alternatif bir şekilde basit dalga olarak görünmektedir. Mekansal olarak lokalize olmuş dalga paketi durumunda bir parçacık gibi davranır. Bu nedenle duruma bağlı olarak bir foton hem parçacık hem de dalga olarak görünebilmekte ve bu kavram "dalga-parçacık ikiliği" olarak adlandırılmaktadır.

Işığın özelliklerini doğru bir şekilde tanımlamak için kuantum mekaniği analizi gerekmektedir. Çünkü ışık, foton olarak bilinen kuantum mekaniği parçacığının bir şeklidir. Güneş enerjisi uygulamaları için bu seviyede bir analiz çok nadir durumlarda gerekli olmaktadır.

Fotovoltaik dönüştürücüler veya diğer her hangi bir nesne ile gelen güneş ışığının nasıl etkileşime girdiğini belirlemede kritik olan birkaç anahtar karakteristik bulunmaktadır. Gelen güneş enerjisinin önemli karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir. Bunlar;

- Gelen ışığın spektral içeriği,
- Güneşten gelen radyant güç yoğunluğu,
- Gelen güneş radyasyonunun PV modüle çarpma açısı,
- Belirli bir yüzey için bir yıl veya gün boyunca güneşten gelen radyant enerjidir.

Bu konunun sonuna kadar yukarıda belirtilen kavramlarla ilgili olarak gerekli bilgiler ilerleyen sayfalarda verilecektir.

2.1.1 Bir Fotonun Enerjisi

Bir foton λ ile gösterilen hem dalga boyu ve hem de eşdeğer bir şekilde *E* ile gösterilen enerji ile karakterize edilmektedir. Fotonun enerjisi ve ışığın dalga boyu arasında aşağıda verilen eşitlikte olduğu gibi ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

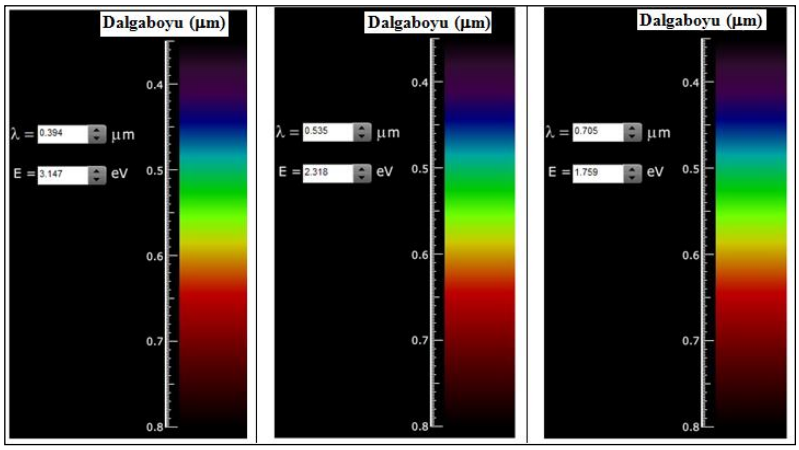
Burada;

h: Planck sabiti (6.626×10^{-27} erg·s; 6.626×10^{-34} joule·s)
c: Işık hızını göstermektedir (2.998×10^{8} m/s).

Yukarıda belirtilen ters orantılı ilişki, yüksek enerjili fotonlar ihtiva eden ışığın (mavi ışık gibi) kısa dalga boyuna sahip olduğu anlamına gelmektedir. Düşük enerjili fotonlar ihtiva eden ışık ise (kırmızı ışık gibi) daha uzun dalga boyuna sahip olmaktadır. Fotonlar veya elektronlar gibi parçacıklar söz konusu olduğunda Joule (J)'den daha yaygın bir şekilde enerjinin elektron-volt (eV) birimi kullanılmaktadır. Elektronun bir voltluk potansiyel farkıyla yaratılmış elektrik alanı içinde hızlanmasından kazanacağı kinetik enerji miktarına denk gelir ve 1 eV = 1.602×10^{-19} J değerine eşittir. Bir fotonun dalga boyu ve enerji ilişkisini eV ve μm cinsinden ortaya koyan nihai bağıntı aşağıdaki gibi düzenlenebilmektedir.

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu m)}$$

Belirli bir dalga boyundaki bir fotonun enerjisinin görsel bir ifadesi aşağıdaki Şekil 2.2 ile açıklanmaktadır. Bu gösterimlerde dalga boyunun artmasına karşın foton enerjisinin azaldığı elektromanyetik spektrumdan izlenebilmektedir.



Şekil 2.2. Dalgaboyu ve foton enerjisinin değişimi.

Güneş veya herhangi bir ışık kaynağından yayılan ışınlar, enerji taşıyan fotonların teşkil ettiği enerji akımıdır. Foton akısı, ışık demetine birim yüzeyden, birim zamanda geçen foton sayısı olarak tanımlanır ve aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\Phi = \frac{Foton\ Sayısı}{sn\ m^2}$$

Foton akısı üretilen elektron sayısını ve buradan da bir güneş hücresinden üretilebilecek akımı belirlemede önem taşımaktadır. Verilen bir dalga boyunda, foton dalga boyu veya enerjisinin ve o dalga boyundaki foton akısının kombinasyonu belirli dalga boylarındaki fotonların güç yoğunluğunu hesaplamak için kullanılabilmektedir. Güç yoğunluğu, tek bir fotonun enerjisi ile foton akısını çarparak hesaplanmaktadır. Foton akısı verilen bir zamanda bir yüzeye çarpan fotonların sayısını verdiğinden foton akısının ihtiva ettiği fotonların enerjileri ile çarpılarak güç yoğunluğuna denk gelen birim zamanda bir yüzeye çarpan enerjiyi verir. Güç yoğunluğunu W/m² birimi cinsinden belirlemek için fotonların enerjilerinin J biriminde olması gerekir. Sonuçta güç yoğunluğunu belirlemede kullanılan eşitlik aşağıda verilen forma getirilmiş olur:

$$H\left(\frac{W}{m^2}\right) = \Phi \times \frac{hc}{\lambda}(J) = q\Phi\frac{1.24}{\lambda(\mu m)}$$

Bu eşitlikteki Φ foton akısını ifade etmektedir. q ise, değeri 1.602×10^{-19} Coulomb (C) olan elektron yükü sabitidir.

2.1.2 Spektral İrradyans

Foton dalga boyunun (veya enerjisi) bir fonksiyonu olarak spektral irradyans bir ışık kaynağını karakterize etmenin en yaygın yoludur ve *F* ile gösterilmektedir. Spektral irradyans, belirli bir dalga boyundaki güç yoğunluğunu verir. Spektral irradyansın birimi $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ dir. Wm^{-2} terimi λ(µm) dalga boyundaki güç yoğunluğudur. Bu yüzden m^{-2} ışık yayıcısının yüzey alanına ve μm^{-1} ise ilgilenilen dalga boyuna tekabül eder.

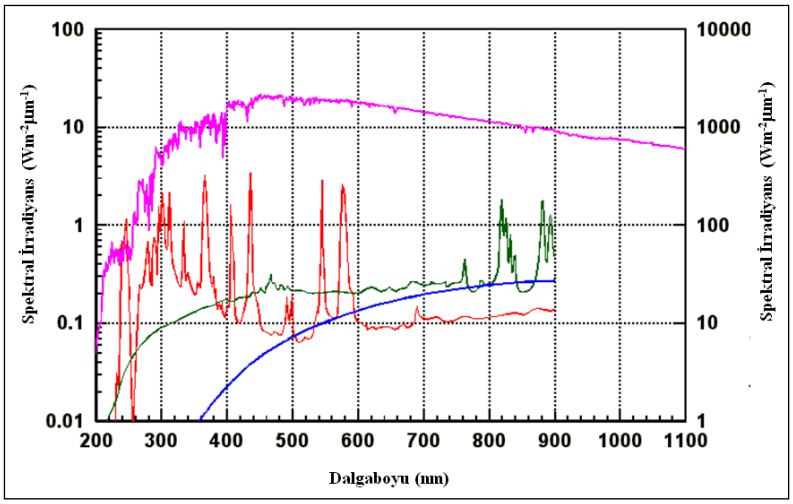
Güneş hücrelerinin analizinde spektral irradyans kadar foton akısına da ihtiyaç duyulur. Spektral irradyans, foton akısı başlığı altında gösterildiği gibi verilen bir dalga boyundaki foton akısını, W/m^2 ye dönüştürerek belirlenebilir. Elde edilen sonuç, aşağıdaki formulasyonda gösterildiği gibi daha sonra verilen dalga boyuna bölünür.

$$F = \left(\frac{W}{m^2 \mu m}\right) = q\Phi \frac{1.24}{\lambda^2(\mu m)} = q\Phi \frac{E^2(eV)}{1.24}$$

Burada;

F: $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ olarak spektral irradyansı, Φ: $m^{-2}sec^{-1}$ cinsinden foton akısını, E ve λ ise eV ve µm cinsinden enerji ve dalga boyunu, q, h ve c ise daha önce açıklanan sabitleri ifade etmektedir.

Ksenon (yeşil), halojen (mavi) ve civa (kırmızı) ışık ampullerinin (sol eksen) spektral irradyansının güneşin (pembe) spektral irradyansı (sağ eksen) ile karşılaştırılması aşağıdaki Şekilde görülmektedir.



Şekil 2.3. Dalgaboyu ile spektral irradiyans değişimi.

2.1.3 Radyant Güç Yoğunluğu

Bir ışık kaynağından yayılan toplam güç yoğunluğu ilgilenilen tüm dalga boyları veya enerjiler için spektral irradyansın integrali alınarak hesaplanabilir. Ancak bir ışık kaynağı için spektral irradyansın kapalı formdaki eşitliği ekseriyetle mevcut olmaz. Bunun yerine ölçülen spektral irradyans ölçüldüğü dalga boyu aralığı ile çarpılmalıdır ve daha sonra tüm dalga boyları üzerinden hesaplanmalıdır. Aşağıda verilen eşitlik bir ışık kaynağından yayılan toplam güç yoğunluğunu hesaplamak için kullanılabilir:

$$H = \int_0^\infty F(\lambda) d\lambda = \sum_{i=0}^{\infty} F(\lambda) \Delta\lambda$$

Burada;

H: Bir ışık kaynağından yayılan toplam güç yoğunluğunu (Wm^{-2}),
F(λ): Spektral irradyansı (Wm^{-2} λm^{-1}),
d λ: Dalga boyunu ifade etmektedir.

2.1.4 Siyah Cisim Radyasyonu

Güneş ve akkor ışık ampullerini de kapsayan çok yaygın bir şekilde karşılaşılan ışık kaynakları siyah cisim neşredicileri (yayıcıları) olarak modellenmektedir. Bir siyah cisim yüzeyine gelen tüm radyasyonu absorbe eder ve sıcaklığına bağlı olarak radyasyon yayar. Siyah cisimler, görünür dalga boylarında (visible) radyasyon yaymasalardı tüm dalga boylarını absorbe ettiklerinden dolayı siyah olarak görüneceklerdi. PV'ler için ilgili olan siyah cisim kaynakları görünür bölgede ışık yayar. Siyah bir cisimden oluşan spektral irradyans aşağıdaki eşitlikte gösterilen Planck Radyasyon Kanunu ile verilmektedir:

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1\right)}$$

Burada:

λ: Işığın dalga boyu (µm),

T: Siyah cisim sıcaklığı (K),
F: Spektral irradyans ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$),
h ve c: sabitler,
k: Boltzmann sabiti (1.380×10^{-16} erg/K; 1.380×10^{-23} joule/K).

Bir siyah cismin toplam güç yoğunluğu spektral irradyansı tüm dalga boyları üzerinden entegre ederek belirlenir ve sonuç olarak aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

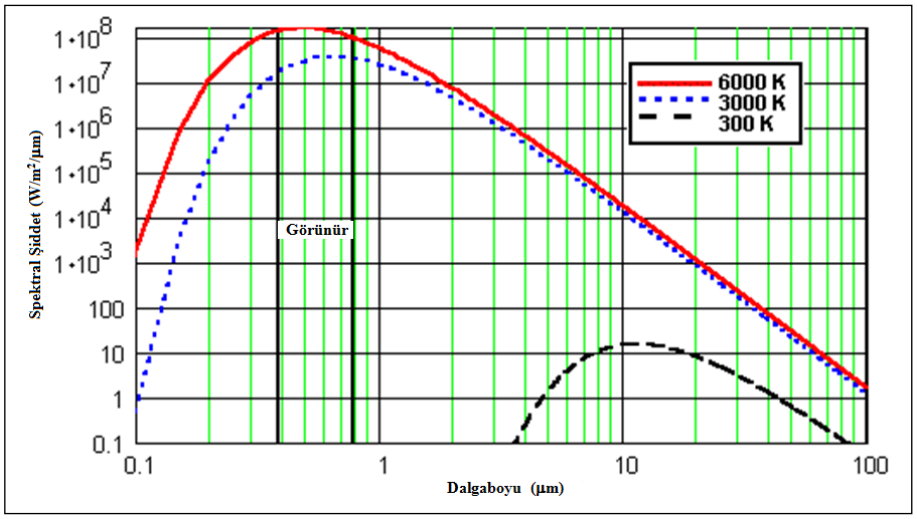
$$H = \sigma T^4$$

Burada, σ Stefan-Boltzmann sabiti (5.67×10^{-8} $J/m^2 s K^4$) ve T ise siyah cisim sıcaklığıdır (°K).

Bir siyah cisim kaynağının ilave önemli parametrelerinden biri de spektral irradyansın en yüksek olduğu dalga boyudur. Diğer bir ifade ile en fazla gücün yayıldığı dalga boyudur. Spektral irradyansın pik dalga boyu, spektral irradyansın diferansiyeli alınarak ve türevi sıfıra eşitlenerek belirlenir. Bu işlemin sonucu Wien kanunu olarak bilinir ve aşağıdaki eşitlikle gösterilir:

$$\lambda_p(\mu m) = \frac{2900}{T}$$

Burada; λ_p pik spektral irradyansın yayıldığı dalga boyunu ve T ise siyah cisim sıcaklığını (°K) göstermektedir. Yukarıda verilen eşitlikten de anlaşılacağı gibi siyah cisim sıcaklığının artması ile birlikte spektral dağılım ve yayılan ışığın gücü değişmektedir. Örneğin, oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta, bir yayıcı (insan bedeni veya kapatılmış bir ampul gibi) çoğunlukla 1µm'den daha büyük dalga boylarında daha düşük güçlerde radyasyon yayacaktır ve dolayısıyla insan gözünün algılayamayacağı görünür bölgenin dışında kalacaktır. Eğre siyah cisim 3000 °K civarlarına kadar ısıtılırsa kırmızı kor haline gelecektir; çünkü yayılan ışığın spektrumu daha yüksek enerji seviyelerine kaymaktadır ve görünür spektruma düşer yani insan gözüyle görülebilir duruma gelir. Eğer sıcaklık 6000 °K dolaylarına kadar yükseltilirse dalga boylarından yayılan radyasyon görünür bölgeyi aşarak kızıldan mora doğru geçecektir ve ışık beyaz bir şekilde görülecektir. Aşağıdaki grafik bu üç sıcaklıktaki siyah cismin spektral irradyansını karşılaştırmaktadır. 300 °K'lik oda sıcaklığı durumunda (siyah noktalı çizgi) grafikte gösterilen spektrumun görünür ve yakın infrared kısımlarında önemli bir güç yaymamaktadır.

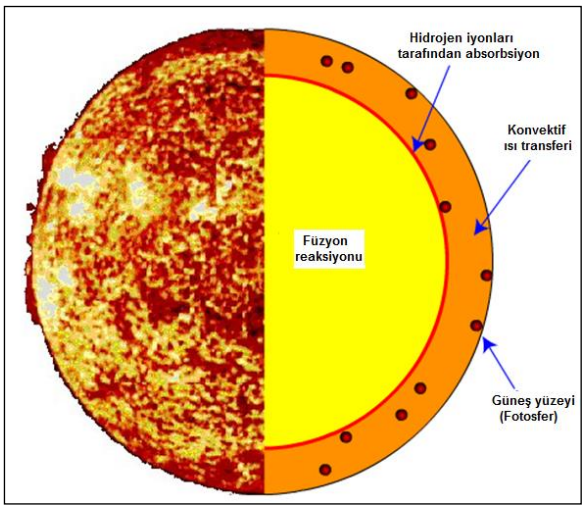


Şekil 2.4. Dalgaboyu ve spektral şiddetin değişimi.

2.2. Güneş

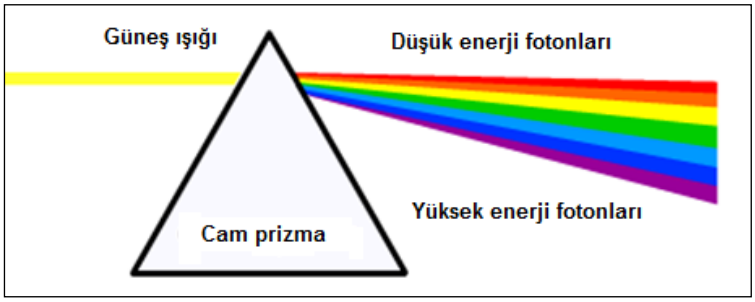
Güneş, çekirdeğinde hidrojeni helyuma dönüştüren iç sıcaklığı nükleer füzyon reaksiyonundan dolayı 20 milyon °K ulaşan kızgın bir gaz küresidir. İç çekirdeğinde oluşan radyasyon, güneşin yüzeyine yakın hidrojen atomları tabakası tarafından güçlü bir şekilde absorb edildiği için görünür bantta değildir. Isı bu tabaka üzerinden konveksiyonla transfer edilmektedir. Fotosfer olarak bilinen güneşin yüzeyi yaklaşık 6000 °K'lik bir sıcaklığa sahiptir. Daha doğru bir şekilde ifade etmek gerekirse 5762±50 °K

sıcaklık oluşmakta ve bu da siyah cisim sıcaklığına çok yakın bir değerdir. Şekil ile güneşin tabakaları görülmektedir.



Şekil 2.5. Güneşin tabakaları.

Güneşten yayılan toplam güç, güneşin yüzey alanını, yayılan güç yoğunluğu ile çarparak hesaplanmaktadır. Bu işlemin sonucu da 9.5 x 10^{25} W olmaktadır. Güneşten yayılan toplam güç sadece bir dalga boyundan ibaret değildir; bir çok dalga boyundan oluşmaktadır. Bu yüzden güneşi insan gözü beyaz veya sarı görmektedir. Bu farklı dalga boyları ışın bir prizmadan veya gök kuşağında olduğu gibi bir su damlasından geçirildiğinde görülebilmektedir. Fakat yine de insan gözü ile görülemeyen dalga boyları bulunmaktadır.



Şekil 2.6. Güneş ışığının enerjili fotonlara ayrılımı.

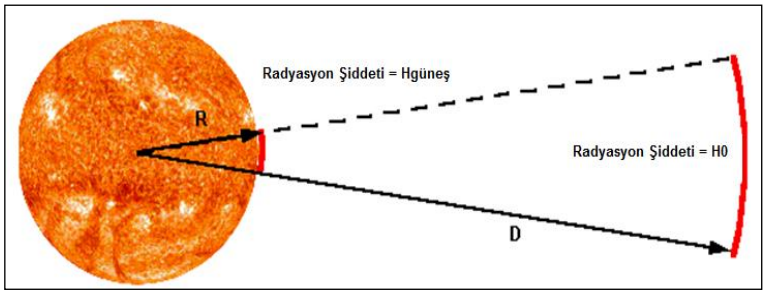
Güneşten yayılan toplam gücün sadece küçük bir kısmı güneşten belirli bir uzaklıkta olan bir cisim üzerine çarpar. Güneş irradyansı (H_0,W/m^2), güneşle oluşan aydınlatmadan ötürü cisim üzerine gelen güç yoğunluğudur. Güneşin yüzeyinde, güç yoğunluğu yaklaşık 6000 °K'de siyah cismin güç yoğunluğudur ve güneşte oluşan toplam güç bu değer ile güneş yüzey alanının çarpılması ile elde edilir. Buna rağmen, güneşten bazı uzaklıklarda, güneşte oluşan toplam güç daha geniş alanlar üzerine yayılır ve bu yüzden uzaydaki bir cisim üzerindeki güneş irradyansı cisim uzaklaştıkça azalır.
Güneşten D gibi bir uzaklıkta bulunan bir cisim üzerine gelen güneş irradyansı, güneşin üzerine düştüğü yüzey alanı ile güneşten yayılan toplam güç bölünerek bulunur. σT^4 ile verilen güneşten yayılan toplam güneş radyasyonu güneş yüzey alanı ($4\sigma R^2_{sun}$) ile çarpılır. Buradaki R_{sun} güneşin yarıçapıdır. Güneşten gelen gücün üzerine düştüğü yüzey alanı ise $4\sigma D^2$ olacaktır. Buradaki D cismin güneşten uzaklığını göstermektedir. Bu nedenle bir cisim üzerine gelen H_0 (W/m^2) güneş radyasyonu yoğunluğu aşağıdaki eşitlikte verildiği şekli ile açıklanmaktadır:

$$H_0 = \frac{R_{sun}^2}{D^2} H_{sun}$$

Burada:

H_{sun}: Stefan-Boltzmann siyah cisim eşitliği ile tanımlanan güneşin yüzeyindeki güç yoğunluğunu (W/m^2),
R_{sun}: Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi güneşin yarıçapını (m),
D: yine aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi güneşten olan uzaklığı (m) ifadeetmektedir.

Aşağıdaki Şekil ile bu durum şematize edilmiştir.



Şekil 2.7. Güneş yoğunluğu ve aradaki mesafe.

Güneşten D uzaklığında çok geniş alanlar üzerine aynı miktarda güç yayılmaktadır ve bu yüzden güneş radyasyonu güç yoğunluğu azalır. Aşağıdaki tabloda her bir gezegen için standardize edilmiş radyasyon değerleri verilmektedir. Bu değerler, yukarıda verilmiş olan formulasyonla kullanılarak da yaklaşık olarak elde edilebilir.

Tablo 2.1. Bazı gezegenlerin güneşten uzaklığı ve güneş sabiti değeri.

Gezegen	Uzaklık ($x10^9$ m)	Güneş Sabiti (W/m^2)
Merkür	57	9228
Venüs	108	2586
Dünya	150	1353
Mars	227	586
Jüpiter	778	50
Satürn	1426	15
Uranüs	2868	4
Neptün	4497	2
Plüton	5806	1

Yeryüzeyi atmosferinin dışındaki güneş radyasyonu, güneşin yüzeyindeki (5.961×10^7 W/m^2) radyant güç yoğunluğu (H_{sun}), güneşin yarıçapı (R_{sun}) ve güneş ile yer yüzeyi arasındaki mesafe kullanılarak hesaplanır. Yeryüzeyi atmosferinde hesaplanan güneş irradyansı yaklaşık 1.36 kW/m^2'dir. Güneş irradyansı en yüksek değerine Ocak, en düşük değerine ise Haziran ayında ulaşır. Yeryüzü atmosferinin dışında yıl boyunca olan değişimi ifade eden eşitlik aşağıda verilmektedir:

$$\frac{H}{H_{constant}} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360(n-2)}{365}\right)$$

Burada:

H: Yeryüzü atmosferinin dışında radyant güç yoğunluğu (in W/m^2),
$H_{constant}$: Güneş sabiti değeri (1.353 kW/m^2),
n: Yılın günüdür.

Bu değişimler genellikle küçük olup PV uygulamaları için güneş irradyansı sabit olarak düşünülebilir. Güneş sabitinin değeri ve onun spektrumu air mass zero (AM0) olarak tanımlanan ve değeri 1.353 kW/m^2 olan standart bir değer olarak tanımlanır. AM0, güneş radyasyonunun atmosferik olarak azaltılmadığı yeryüzü atmosferinin üzerindeki bölge olarak tanımlanır.

2.3. Yer Yüzeyindeki Güneş Radyasyonu

Yerküre atmosferinin üzerine gelen güneş radyasyonu nispeten sabitken yer yüzeyindeki güneş radyasyonu geniş çapta değişiklik gösterir. Bu değişikliğin nedenleri arasında;

- Saçılma ve absorbsiyonu içeren atmosferik etkiler,
- Su buharı, bulutlar ve kirlilik gibi atmosferdeki lokal değişkenlikler,
- Lokasyonun enlemi,
- Yılın mevsimi ve günün zamanı sayılabilmektedir.

Yukarıda verilen nedenler yeryüzeyi tarafından algılanan güneş radyasyonu üzerinde birkaç türlü etki göstermektedir. Bu değişimler yüzey üzerine gelen ışığın açısını, ışığın spektral içeriğini ve toplam algılanan güçteki değişkenlikleri ihtiva etmektedir. Ayrıca, ana değişimlerden bir tanesi de; belirli bir lokasyondaki güneş radyasyonunun değişkenliğinin önemli ölçüde artmasıdır. Bulutlar ve mevsimsel değişimler gibi lokal etkilerden meydana gelen değişkenlikler kadar belirli bir enlemdeki gün uzunluğu gibi diğer etkilerden dolayı da bu değişkenlikler olabilmektedir.

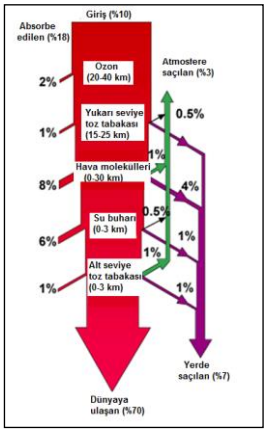
Yer yüzeyindeki güneş radyasyonu, yerküre atmosferinin üzerine gelen güneş radyasyonundan farklılıklar gösterir. Bulut kapalılığı, hava kirliliği, lokasyonun enlemi ve yılın zamanı gibi birçok etki yer yüzeyindeki güneş radyansında değişkenliklere neden olur. Her bir saatte yer yüzeyine ulaşan enerji miktarı bir yıl boyunca tüm dünya nüfusu tarafından kullanılan enerji miktarından daha fazladır.

Atmosferik Etkiler

Atmosferik olaylar yer yüzeyindeki güneş radyasyonu üzerinde çeşitli etkiler yapmaktadır. Fotovoltaik uygulamalar için temel etkileri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- Atmosferdeki absorbsiyon, saçılma ve yansımalardan dolayı güneş radyasyonunun gücündeki değişim,
- Güneş radyasyonunun spektral içeriğinde bazı dalga boylarının daha büyük saçılma ve absorbsiyonundan dolayı değişim,
- Güneş radyasyonuna difüz veya indirekt bileşenlerin sokulması,
- Gelen güneş gücü, spektrumu üzerine atmosferdeki lokal değişimlerin (su buharı, bulutlar ve kirlilik gibi) ilave etkileri.

Bu etkileri aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi özetlemek mümkündür.



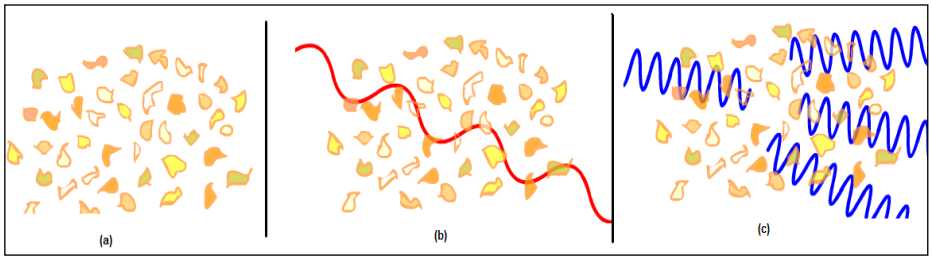
Şekil 2.8. Gelen güneş ışığının açık gökyüzü absorbsiyon ve saçılımı.

Güneş radyasyonu, atmosferi geçerken gazlar, tozlar ve aerosoller gelen fotonları absorbe eder. Belirli gazlar, özellikle ozon (O_3), karbondioksit (CO_2) ve su buharı (H_2O), bu atmosferik gazları bir arada tutan enerjilere yakın enerji değerlerine sahip çok yüksek foton absorblama özellikleri gösterirler. Bu absorblamalar spektral radyasyon eğrisinde derin oluklar meydana getirir. Örneğin 2 μm üzerindeki kızıl ötesi ışığın çoğu su buharı ve karbondioksit tarafından absorbe edilir. Benzer şekilde 0.3 μm değerinin altındaki mor ötesi ışığın önemli bir kısmı da ozon tarafından absorbe edilir.

Atmosferdeki belirli gazlar tarafından yapılan absorblama karasal güneş radyasyonunun spektral içeriğini değiştirirken bu gazlar toplam güç üzerinde nispeten küçük bir etki yapabilmektedir. Bunun yerine, güneş radyasyonundan gelen gücü azaltan ana faktör hava molekülleri ve tozlardan dolayı ışığın saçılması ve absorblanmasıdır. Bu absorblama, spektral irradyansta derin oluklar meydana getirmez; fakat daha çok atmosferde alınan yol uzunluğuna bağlı olarak bir güç azalmasına neden olur. Güneş tepedeyken bu atmosferik elemanlardan dolayı olan absorbsiyon görünür spektrumu geçerken nispeten üniform bir azalmaya sebebiyet verir ve bu yüzden gelen güneş ışığı beyaz bir şekilde görünür. Bununla birlikte daha büyük yol uzunlukları için yüksek enerjili ışık (düşük dalga boylu) daha etkin bir şekilde absorblanır ve saçılır. Bu nedenden dolayı sabah ve akşamlarda daha kırmızı görünür ve gün ortasından daha düşük bir yoğunluğa sahiptir.

2.3.1 Gelen Güneş Işığının Saçılmasından Dolayı Direkt ve Difüz Radyasyon

Işık atmosferden geçerken absorblanır ve aynı zamanda saçılmaya maruz kalır. Işığın saçılma mekanizmalarından birisi olan ve Rayleigh saçılması olarak bilinen duruma atmosferdeki moleküller neden olur. Rayleigh saçılması özellikle kısa dalda boylu ışık (mavi ışık) için etkin olmaktadır. Çünkü bu saçılma σ^{-4} bağımlılığına sahiptir. Atmosferik partiküller, aşağıdaki Şekil (a) ile (b) ile kırmızı ışık birçok partikülden daha büyük bir dalga boyuna sahiptir ve bu partiküllerden etkilenmez. (c) ile görülen mavi ışık atmosferdeki partiküllerin boyutuna yakın dalga boyuna saptir ve dolayısıyla saçılmaya maruz kalır.



Şekil 2.9. Rayleigh saçılması.

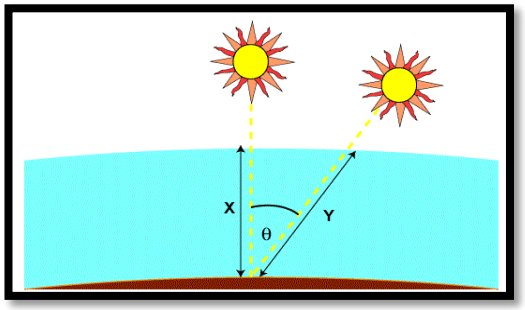
Saçılan ışık yönsüzdür ve bu yüzden gökyüzünün her hangi bir bölgesinden geliyormuş gibi görünür. Bu ışık, difüz ışık olarak adlandırılmaktadır. Difüz ışık, esasında mavi ışık olduğundan dolayı güneşin bulunduğu yerden ziyade gökyüzünün diğer kısımlarından gelen ışık mavi görünmektedir. Atmosferde saçılmanın olmadığı durumlarda gökyüzü siyah ve güneşte bir ışık kaynağı diski olarak görünürdü. Açık bir günde toplam gelen güneş radyasyonunun yaklaşık %10'u difüz radyasyondur.

2.3.2 Hava Kütlesi (Air Mass)

Hava Kütlesi, muhtemel en kısa yola (yani güneşin direkt olarak tepeden olduğunda) göre normalize edilen ışığın atmosferde almış olduğu yol uzunluğudur. Hava Kütlesi (Air Mass), atmosferden geçerken ve hava ve toz ile absorblanarak Hava Kütlesi aşağıda verilen formulasyonla tanımlanabilir.

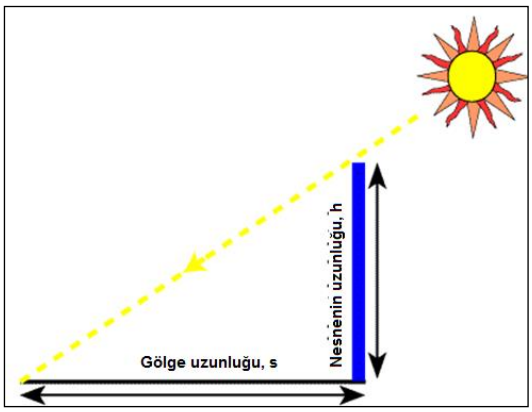
$$AM = \frac{1}{cos(\theta)}$$

Burada Θ düşeyle yapılan açıyı ifade eder (zenit açısı). Güneş tam tepede olduğunda Hava Kütlesi 1 değerini alır.



Şekil 2.10. Hava kütlesi.

Hava kütlesini belirlemede kullanılan kolay bir yöntem düşey bir direğin gölgesinden yararlanarak yapılan hesaplamadır.



Şekil 2.11. Hava kütlesinin belirlenmesi.

Hava kütlesi, Pisagor Teoremi'nden yararlanılarak hipotenüs uzunluğunu nesnenin yüksekliğine (h) bölümü ile elde edilir.

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

Hava kütlesini belirlemek için yukarıda verilen hesaplamada atmosferin yatay düz bir tabaka olduğu kabul edilir. Fakat atmosferin eğriliğinden dolayı hava kütlesi, güneşin ufka yakın olduğu zaman atmosferik yol uzunluğuna tamamıyla eşit değildir. Güneşin doğuşunda, güneşin düşeyle olan açısı 90°'dir ve hava kütlesi sonsuzdur ve bu açık bir şekilde yol uzunluğu değildir. Yer kürenin eğriliğini de dikkate alarak geliştirilen formulasyonla hava kütlesi aşağıda verildiği şekli ile tanımlanabilmektedir.

$$AM = \frac{1}{\cos\theta + 0.50572\,(96.07995 - \theta)^{-1.36364}}$$

Bir güneş hücresinin verimliliği, gelen güneş ışığının spektrumu ve gücünün her ikisindeki değişimlere duyarlıdır. Güneş hücrelerinin farklı zaman ve mekanlardaki ölçümler arasında doğru bir karşılaştırma yapabilmeye yardımcı olmak için standart bir güneş spektrumu, güç yoğunluğu, yer yüzeyi ve atmosferin dışındaki radyasyon için tanımlanmıştır.

Yer yüzeyindeki standart spektruma AM1.5G (G, global radyasyonu ifade etmekte olup difüz ve direkt radyasyonu içerir) veya AM1.5D (sadece direkt radyasyonu) adı verilir. AM1.5D radyasyon yoğunluğu AM0 spektrumunu %28 kadar azaltarak tahmin edilebilir (%18 absorbsiyon ve %10 saçılmadan dolayı). Global spektrum direkt spektrumdan %10 daha yüksektir. Bu hesaplamalar, AM1.5G için yaklaşık olarak 970 W/m^2 değerini vermektedir. Ancak standart 1.5G spektrumu, gelen güneş radyasyonunun yapısı ve yuvarlak bir sayıya uygunluğundan dolayı 1kW/m^2 değerini verecek şekilde normalize edilmektedir. Atmosferin dışındaki standart spektrum AM0 olarak adlandırılmaktadır. Çünkü ışığın atmosferi geçerken herhangi bir seviyede değişimine neden olacak bir hal bulunmamaktadır. Bu spektrum, uzayda kullanılan hücrelerin beklenen performansını tahmin etmede kullanılmaktadır.

Her bir gün genelindeki güneş ışığının direkt bileşeninin yoğunluğu deneysel olarak belirlenen eşitlikler yardımıyla hava kütlesinin bir fonksiyonu olarak belirlenebilmektedir:

$$I_D = 1.353 \cdot 0.7^{(AM^{0.678})}$$

Burada I_D, kW/m^2 olarak güneşin ışınlarına dik bir düzlem üzerindeki yoğunluğu *AM* ise hava kütlesini göstermektedir. 1.353 kW/m^2 değeri güneş sabitini ve 0.7 değeri ise, atmosfere giren radyasyonun yaklaşık %70'inin yeryüzeyine iletildiğini ifade etmek için kullanılmaktadır. 0.678 üssü ise gözlemlenen veri ve atmosfer tabakalarındaki düzensizlikleri hesaba katmak için ampirik bir uygunluğu ifade eder. Güneş ışığının yoğunluğu deniz seviyesinin üzerinde yükseklikle artmaktadır. Güneş ışığının spektral içeriği de yüksek dağlar üzerinde gökyüzünü daha mavileştirerek değişmektedir. Deniz

seviyesinden birkaç km yükseklikler için gözlemlenen verilere göre elde edilen ampirik bir formülasyon aşağıdaki şekli ile ifade edilmektedir:

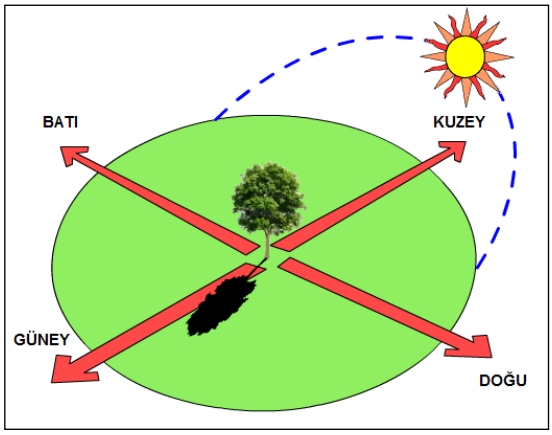
$$I_D = 1.353 \cdot \left[(1 - ah)0.7^{(AM^{0.678})} + ah\right]$$

Burada; *a:* 0.14 ve h: km olarak deniz seviyesinden ilgilenilen yerin yüksekliğini ifade etmektedir. Açık bir günde bile difüz radyasyon direkt bileşenin hala %10'u civarındadır. Böylece, açık bir günde güneş ışınlarına dik bir modül üzerindeki global irradyans aşağıda verilen formül ile tanımlanabilmektedir:

$$I_G = 1.1 \cdot I_D$$

2.4 Güneşin Hareketi

Dünya'nın kendi ekseni etrafındaki hareketinin bir sonucu olarak ortaya çıkan Güneş'in görünüşteki hareketi, yer yüzeyine çarpacak olan ışığın direkt bileşeninin açısını değiştirmektedir. Yer yüzeyindeki sabit bir noktadan, güneşe bakıldığında gökyüzünde hareket ediyormuş gibi görünür. Güneşin pozisyonu, yer yüzeyinde bulunulan noktanın lokasyonuna, yılın ve günün zamanına göre değişiklik göstermektedir. Güneşin görünüşteki hareketi aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Güney yarıkürede güneşin izlediği yol.

Güneşin görünen bu hareketi bir güneş kollektörü tarafından algılanan gücün miktarı üzerinde ana etkiye sahip olmaktadır. Güneş ışınları absorblama yüzeyine dik geldiklerinde yüzey üzerindeki güç yoğunluğu gelen güç yoğunluğuna eşit olmaktadır. Bununla birlikte, güneş ve absorblama yüzeyi arasındaki açı değiştiğinde yüzeydeki yoğunluk azalmaktadır. Modül güneş ışınlarına paralel bir konuma geldiğinde (modül normali ile yapılan açı 90°) ışık yoğunluğu esas itibarıyla sıfıra düşer. Ara açılar için bağıl güç yoğunluğu cos(Θ) olarak belirlenir. Burada Θ güneş ışınları ile modül normali arasındaki açıyı ifade etmektedir. Yer yüzeyindeki sabit bir lokasyon ve güneş arasındaki açı bulunulan lokasyona (lokasyonun boylamı), yılın zamanı ve günün zamanına bağlıdır. Ayrıca, güneşin doğuş ve batış zamanı lokasyonun boylamına bağlıdır. Bu yüzden yer yüzeyindeki sabit bir pozisyon için güneş açısının tam olarak modellenmesi enlem, boylam, yılın zamanı ve günün zamanının bilinmesi ile mümkün olabilmektedir.

2.4.1 Güneş Zamanı

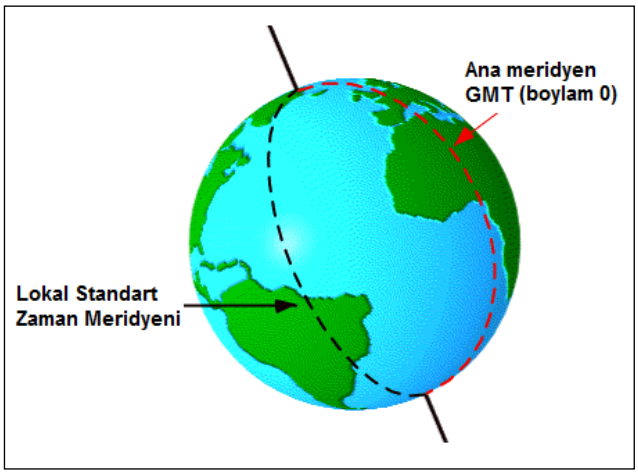
İki adet güneş zamanından bahsedilebilir.

Lokal Güneş Zamanı (LST) ve Lokal Zaman (LT)

Öğlen 12 lokal güneş zamanı (LST) gökyüzünde güneşin en yüksekte olduğu zaman olarak tanımlanır. Lokal zaman (LT) genellikle lokal güneş zamanından (LST) farklıdır. Bu durum yer kürenin yörüngesinin dış merkezliliği (eccentricity), gün ışığından daha fazla yararlanmak için kullanılan saat ayarlamaları ve zaman zonlarından dolayı meydana gelmektedir.

Lokal Standart Zaman Meridyeni (LSTM)

Lokal standart zaman meridyeni (LSTM) belirli bir zaman zonu için kullanılan referanstır ve Greenwich Ortalama Zamanı (GMT) için kullanılan ilk meridyendir. LSTM aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi tasvir edilebilir.



Şekil 2.13. GMT ve lokal zaman.

LSTM aşağıda verilen eşitliğe göre hesaplanmaktadır:

$$LSTM = 15° \cdot \Delta T_{GMT}$$

Burada ΔT_{GMT}: Saat olarak GMT zamanından olan LT zaman farkını göstermektedir. 15°= 360°/24 saat.

Zaman Eşitliği (EoT)
Zaman eşitliği Yerkürenin eksenel eğikliği ve yörüngesinin dış merkezililiği nedeniyle dakika olarak zamanın düzeltilmesinde kullanılan ampirik bir formülasyondur.

$$EoT = 9.87\sin(2B) - 7.53\cos(B) - 1.5\sin(B)$$

Burada;

$$B = \frac{360}{365}(d - 81)$$

Bu eşitlikte kullanılan B'nin birimi (°) ve d yıl başından başlayarak sayılan gün sayısıdır.

Zaman Düzeltme Faktörü (TC)
Zaman düzeltme faktörü (TC, dakika olarak), zaman eşitliğini de ihtiva edecek şekilde zaman zonu içerisindeki boylam değişimlerinden dolayı verilen bir zaman zonu içerisinde LST değişimlerini ifade eder.

$$TC = 4(LSTM - Longitude) + EoT$$

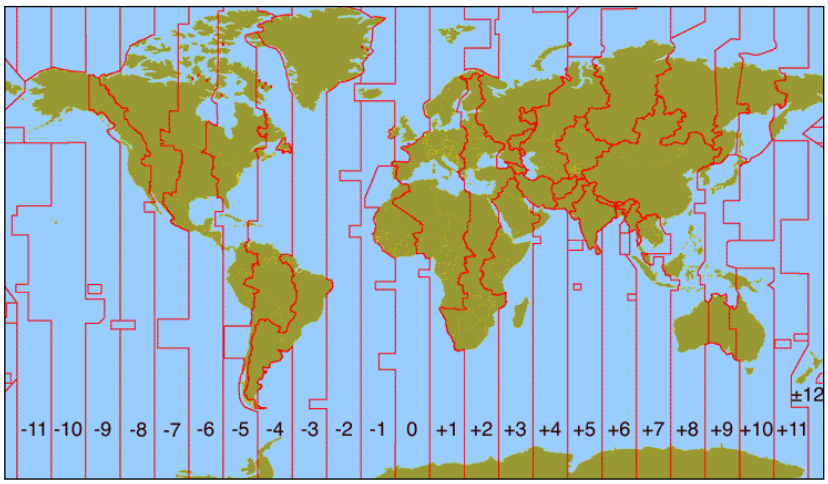
4 dakika faktörü, yerkürenin her 4 dakikada 1° dönmesinden kaynaklanan durumu ifade etmekte kullanılan bir katsayıdır.

Lokal Güneş Zamanı (LST)
LST, LT ve TC düzeltmeleri kullanılarak LT ayarlamaları için hesaplanabilmektedir.

$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

Günümüzde, bir çok ülke Sir Fleming tarafından önerilen zaman zonları değişimleri ile çalışmaktadır. Aşağıda verilen şekilde şu anda yeryüzünde kullanılmakta olan değişik zaman zonları görülmektedir. Bu sistemde, değişik zonlardaki zaman, başlangıç meridyenindeki eşgüdümlü evrensel zaman (Coordinated Universal Time, **UTC**) standardına bağlı olarak ölçülür. Eşgüdümlü evrensel zaman 1972 yılında tüm dünyada standard legal referans zaman olmuştur. UTC, Fransa'da bulunan Uluslararası

Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu tarafından koordine edilen 6 primer atomik saatle saptanmaktadır. Aşağıda verilen şekilde görülmekte olan sayılar her bir zonun eşgüdümlü evrensel standart zamandan kaç saat önce (negatif sayılar) ve kaç saat sonra (pozitif sayılar) olduğunu belirtmektedir. Politik nedenler ve ulusal sınırların zaman zonu sınırlarını etkilediği dikkat çekmektedir. Örneğin, Çin'de 5 farklı zaman zonu yerine tek bir zaman zonu (UTC+8) kullanılmaktadır. **UTC** (*Coordinated Universal Time*), yani eşgüdümlü evrensel zaman (yahut saat) anlamına gelir. Teknik olarak aynı olmasa da, GMT ile aynı anlamda da kullanıldığı olur. İngilizce kısaltma **CUT** (*Coordinated Universal Time*) ve Fransızca kısaltma **TUC** (*Temps universel coordonné*) arasında seçim yapılamadığından orta yol olarak **UTC** kısaltması seçilmiştir. İngiltere'de Greenwich'ten geçen meridyen referans kabul edilerek hesaplanır. Türkiye, Doğu Avrupa Zaman Dilimi'ndedir; bu yüzden Türkiye saati UTC+2, yani UTC'den iki saat ileridedir. Fakat saatlerin bir saat ileri alınmasıyla Türkiye saati UTC+3'tür.



Şekil 2.14. Eşgüdümlü evrensel zamana (UTC) bağlı olarak ölçülen modern modern standard zaman zonları.

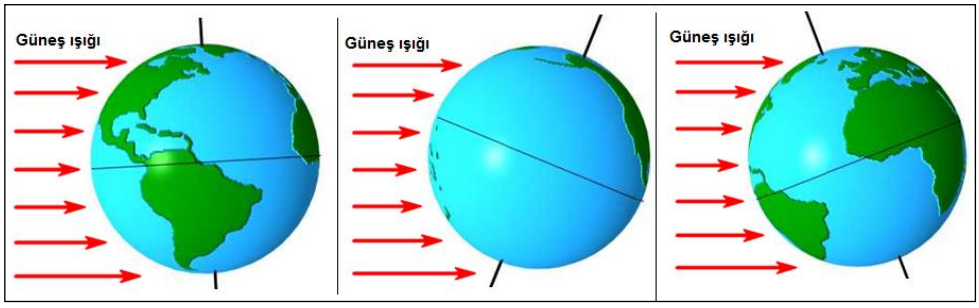
Saat Açısı (HRA)

Saat açısı, LST zamanını güneşin gökyüzündeki hareketine bağlı olarak derece sayılarına dönüştürür. Bu tanımlama ile güneş öğlesinde saat açısı 0° olmaktadır. Yerküre saatte 15° döndüğünden dolayı güneş öğlesinin ötesinde her bir saat güneşin gökyüzünde 15°'lik bir açısal hareketine karşılık gelmektedir. Saat açısı sabah saatlerinde negatif; öğleden sonraki saatlerde ise pozitif değerler alır.

$$HRA = 15°(LST - 12)$$

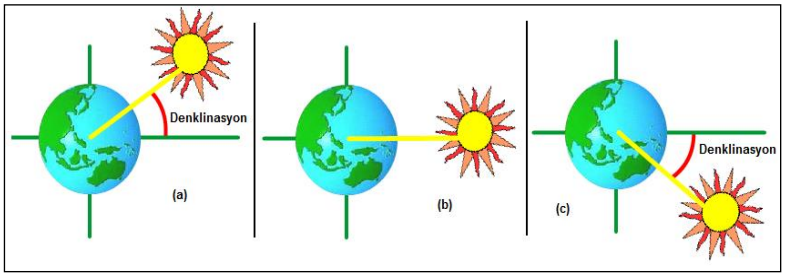
2.4.2 Güneşin Denklinasyon Açısı

Θ ile gösterilen denklinasyon açısı, yerkürenin güneşin etrafında dönüşü ve dönme ekseni üzerindeki eğiminden dolayı mevsime bağlı olarak değişmektedir. Eğer dünyanın dönme ekseni üzerinde eğimi olmasaydı denklinasyon açısı her zaman 0° olurdu. Buna rağmen, yerküre 23.45° eğimlidir ve denklinasyon açısı bu rakam civarında az veya çok değişiklik gösterir. Yalnızca sonbahar ve ilkbahar ekinokslarında (gündönümü, gece-gündüz eşitliği) denklinasyon açısı 0°'a eşit olmaktadır. Güneşin denklinasyonu, ekvator ve yerkürenin merkezinden güneşin merkezine çizilen bir çizgi arasındaki açıdır. Denklinasyon açısının mevsimsel değişimi aşağıda verilen şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Denklinasyon açısının mevsimsel değişimi.

Yerkürenin güneş etrafında dönmesine rağmen güneşin sabit yerküre etrafında döndüğünü düşünmek daha kolay tasavvur edilebilir. Bu durumda koordinat dönüşümü yapılması gerekmektedir. Alternatif bu koordinat sistem şartları altında güneş yerküre etrafında hareket eder. Aşağıdaki Şekil (a) da; kuzeyyarımküredeki yaz solstisi görülmektedir. Denklinasyon açısı maksimum olup 23.45° dir. (b) ile kuzeyyarımküredeki ilkbahar, güneyyarımkürede sonbahar ekinoksu görülmektedir. Denklinasyon açısı 0° dir. (c) ile denklinasyon açısı 23.45° dir. (c) ile ise, kuzeyyarımkürede kış solstisi ve güney yarımkürede yaz solstisi görülmekte olup denklinasyon açısı (δ) 0° dir.



Şekil 2.16. Denklinasyon açısının mevsimsel değişimi.

Denklinasyon açısı için aşağıda verilen eşitlik kullanılmaktadır:

$$\delta = 23.45° \sin\left[\frac{360}{365}(d - 81)\right]$$

Burada kullanılan;

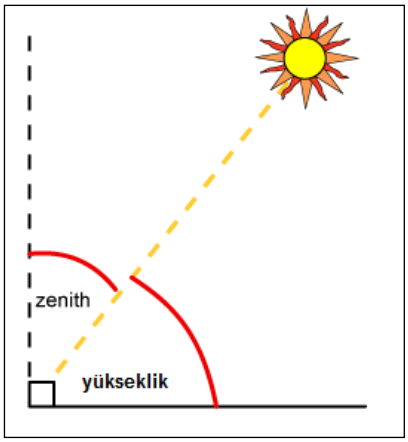
d: Ocak 1'den itibaren sayılan gün sayısını ifade etmektedir. Ocak 1 için d=1 olmaktadır. Denklinasyon açısı için daha doğru bir yaklaşıma ise aşağıda verilmekte olan eşitlikle varılabilir:

$$\delta = \sin^{-1}\left\{\sin(23.45°) \sin\left[\frac{360}{365}(d - 81)\right]\right\}$$

Denklinasyon açısı ekinokslarda (22 Mart ve 22 Eylül) sıfır değerini alır. Kuzey yarıküre için yaz boyunca pozitif ve kış boyunca da negatif değerler alır. Denklinasyon açısı 23.45° maksimum değerine 22 Haziran'da (kuzey yarıküre için yaz solistisi) ve -23.45° minimum değerine ise 22 Aralık'ta (kuzey yarıküre için kış solistisi) erişir.

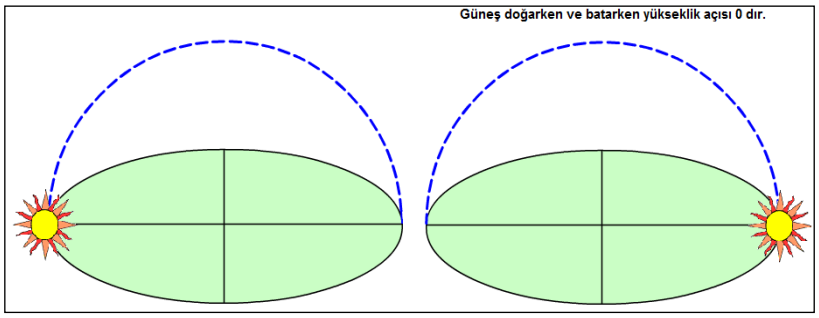
2.4.3 Yükseklik Açısı

Yükseklik açısı, güneşin gökyüzünde yataydan itibaren ölçülen açısal yüksekliğidir. Yükseklik açısı, güneşin doğuşunda 0° ve güneşin tam tepede (bu durum ekvatorda ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında olur) olduğu zaman 90° olur. Zenit açısı, yükseklik açısına benzerdir fakat yataydan ziyade düşeyden itibaren ölçülür. Bu şekilde zenit açısı (90° - yükseklik açısı) şeklinde belirlenir.



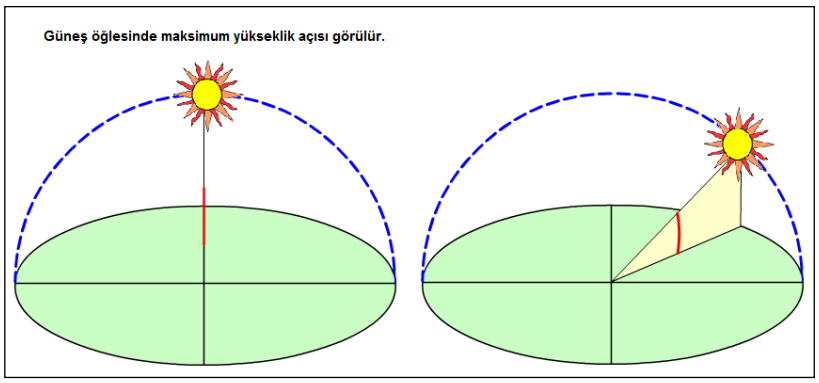
Şekil 2.17. Yükseklik açısı.

Yükseklik açısı gün boyunca değişiklik gösterir ve ayrıca belirli bir yerin enlemi ve yılın gününe bağlı olarak değişmektedir.



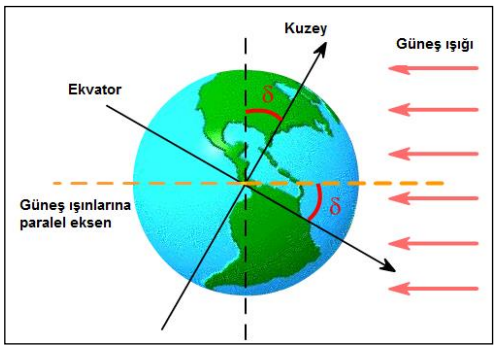
Şekil 2.18. Yükseklik açısı 0.

Güneş öğlesinde görülen maksimum yükseklik açısı ile günün diğer zamanlarında görülen yükseklik açıları aşağıda görülmektedir.



Şekil 2.19. Maksimum ve diğer zamanlarda güneş açısı.

Güneş elektrik santrallerini dizayn etmede kullanılan en önemli parametrelerden bir tanesi maksimum yükseklik açısıdır. Yani yılın belirli bir zamanında gökyüzünde güneşin yükselebileceği maksimum yükseklik açısıdır. Bu maksimum yükseklik açısı aşağıda verilen Şekilde gösterildiği gibi güneş öğlesinde meydana gelir; enleme ve denklinasyon açısına göre belirlenebilir. Güneş ile kıyaslandığında dünyanın tilt açısı denklinasyon açısına bağlıdır yani mevsimsel değişim gösterir. Aşağıdaki şekilde yaz solstisinde kuzey yarımkürede; kış solstisinde de güney yarımkürede maksimum denklinasyon açısı görülmektedir.



Şekil 2.20. Maksimum denklinasyon açısı.

Güneş öğlesindeki maksimum yükseklik açısı (δ), enlem ve denklinasyon açısının (δ) bir fonksiyonudur. Konu ile ilgili verilen şekilsel açıklamalardan kuzey yarıküre için güneş öğlesindeki yükseklik açısının hesaplanmasına yönelik bir formülasyon verilebilir:

$$\alpha = 90 - \phi + \delta$$

Güney yarıküre için:

$$\alpha = 90 + \phi - \delta$$

Burada kullanılan:

α: İlgilenilen yerin enlemini göstermektedir. Kuzey yarıküre için verilen eşitlikte kuzey yarıküre lokasyonları için pozitif güney yarıküre lokasyonları için negatiftir. Güney yarıküre için verilen eşitlikte ϕ güney yarıküre lokasyonları için pozitif kuzey yarıküre lokasyonları için negatiftir.

δ: Yılın gününe bağlı olarak değişen denklinasyon açısıdır.

Yaz solstisindeki yengeç dönencesinde (yeryüzünün kuzey yarıküresinde Ekvator'un 23° 27' kuzeyinden geçtiği varsayılan enlem), güneş hemen hemen tepededir ve yükseklik açısı 90° dir. Yazın, ekvator ve yengeç dönencesi arasındaki enlemlerde güneş öğlesindeki yükseklik açısı 90° den büyüktür. Bu durum kuzey yarıkürenin çoğunda güneyden daha çok güneş ışığının kuzeyden geldiğini ifade eder. Benzer şekilde ekvator ve oğlak dönencesi (yeryüzünün güney yarıküresinde Ekvator'un 23° 27' güneyinden geçtiği varsayılan enlemdir) arasındaki enlemlerde yılın bazı periyodları süresince güneş ışığı kuzeyden daha çok güneyden gelmektedir. Yükseklik açısının saat açısına göre hesaplanması aşağıda verilen eşitlikle yapılabilmektedir:

$$Elevation = \sin^{-1}[\sin\delta \sin\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos(HRA)]$$

Zenit açısı ise düşey ile güneş arasındaki açı şeklinde tanımlanmaktadır ve aşağıda verilen basit bir eşitlikle hesaplanmaktadır. Zenit Açısı = 90° - Yükseklik Açısı

Güneşin Doğuşu ve Batışı

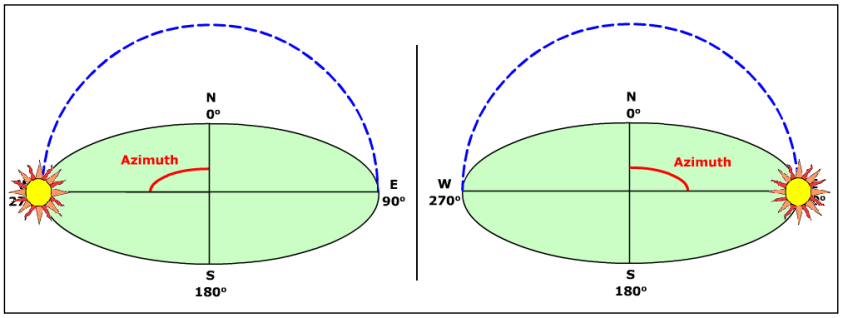
Güneşin doğuşunu ve batışını hesaplamak için yükseklik açısı eşitliğinde yükseklik açısı yerine sıfır konularak hesaplanır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen güneş doğuşu ve batışı formülasyonları aşağıda verilmiştir:

$$Sunrise = 12 - \frac{1}{15^0}\cos^{-1}\left(\frac{-\sin\varphi \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta}\right) - \frac{TC}{60}$$

$$Sunset = 12 + \frac{1}{15^0}\cos^{-1}\left(\frac{\sin\varphi \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta}\right) - \frac{TC}{60}$$

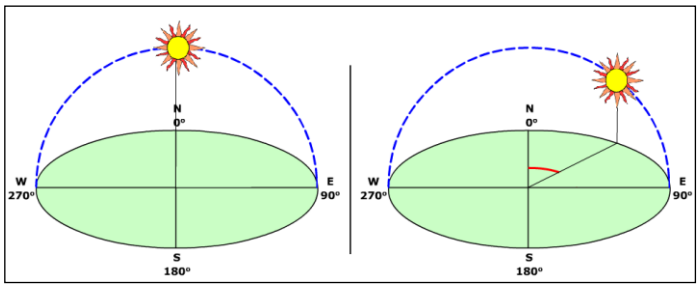
2.4.4 Azimut Açısı

Azimut açısı, güneş ışıklarının geldiği yöndeki pusula istikameti (pusulanın kuzeyden saat yelkovanı yönünde ölçülen açısal mesafe şeklinde ifade edilen yatay yön) olarak tanımlanmaktadır. Güneşin doğu-batı görünen yeri ile gerçek batı arasındaki yere azimut denmektedir ve gerçek güney ile doğu veya batı arasında yaptığı açı olarak ifade edilmektedir. Aşağıdaki Şekil ile bu tanım açıklanmaya çalışılmıştır. Güneş öğlesinde, kuzey yarıkürede güneş, her zaman neredeyse güneyde, güney yarıkürede ise kuzeyde bulunmaktadır. Azimut açısı aşağıda verilen Şekilde görüldüğü gibi gün boyunca değişmektedir. Ekinokslarda (gece ve gündüzün birbirine eşit olduğu tarihler), enleme bakmaksızın güneş tam olarak doğudan doğmakta ve batıdan batmaktadır. Böylece, azimut açısı güneş doğuşunda 90° ve batışında 270° olmaktadır. Genel olarak azimut açısı enleme ve yılın zamanına göre değişiklik göstermektedir. Güneş doğarken ve batarken ilkbahar ve sonbahar ekinokslarında azimut açısı 90° dir.



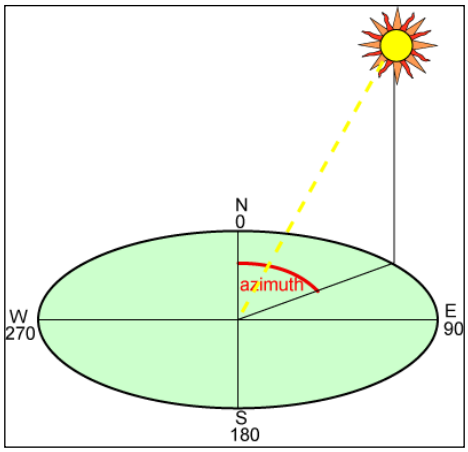
Şekil 2.21. Azimut açısı.

Güneş öğlesinde azimut açısı 0° dir.



Şekil 2.22. Azimut açısı.

Azimut açısı pusula yönü gibi düşünülebilir (Kuzey=0° ve Güney=180°). Bu açı için Güney=0 ° ve ± 180° uygulamaları da yapılmaktadır.



Şekil 2.23. Azimut açısı.

Azimut açısı yukarıda verilen parametrelerin ışığında aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir:

$$Azimuth = \cos^{-1}\left[\frac{\sin\delta\cos\phi - \cos\delta\sin\phi\cos(HRA)}{\cos\alpha}\right]$$

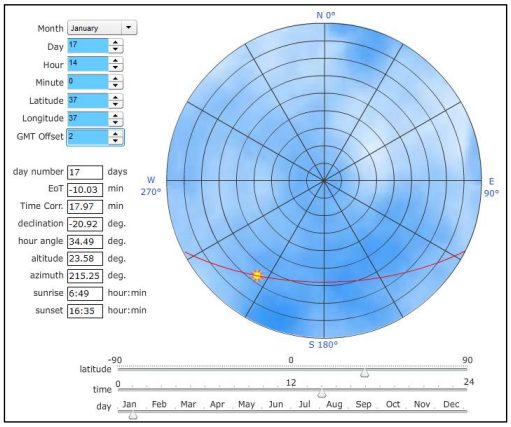
Yukarıda verilen eşitlik sadece güneş sabahında doğru azimut açısı sonuçları vermektedir. Dolayısıyla günün saatine göre aşağıda verilen düzeltmelerin yapılması gerekmektedir:

Azimut Açısı = Azimut, LST <12 veya HRA < 0
Azimut Açısı = 360° - Azimut, LST > 12 veya HRA >0

2.5 Güneşin Pozisyonu

Güneş öğlesindeki azimut ve yükseklik açısı, PV modüllerinin yönlendirilmesinde kullanılan iki anahtar açıdır. Buna rağmen, gün boyunca güneşin pozisyonunu hesaplamak için yükseklik ve azimut açılarının her ikisinin de gün boyunca hesaplanmasını gerektirir. Bu açılar güneş zamanı kullanılarak hesaplanmalıdır. Yer yüzeyindeki bölgeler bazı zaman zonlarına ayrılmıştır. Bu zonlarda öğlen saatlerindeki güneşin konumunun gökyüzünde en yüksekte olmasını göstermez. Zaman zonları arasındaki mesafelerden dolayı aynı şekilde güneşin doğuş ve batış saatleri de yanıltıcı olabilmektedir. Sonuç olarak güneşin pozisyonunu hesaplamak için öncelikle ilgilenilen noktadaki lokal güneş zamanının belirlenmesi ve bunu takiben de yükseklik ve azimut açılarının belirlenmesi gerekir.

Aşağıda verilen Şekillerde iki boyutlu düzlem üzerinde güneşin azimut ve yükseklik açıları görülmektedir. Güneş tam tepede olduğu zaman güneşin yükseklik açısının 90° karşılık gelir şeklin merkezinde görünür. Güneş tam yatay horizonda olduğu zaman yükseklik açısı 0° olur ve şeklin dış sınırında görünür. Azimut açıları şeklin dış sınırları etrafında gözlemlenebilmektedir.



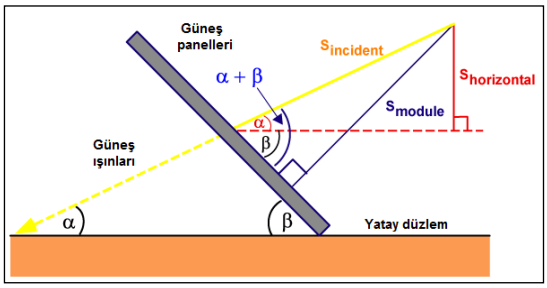
Şekil 2.24. Azimut açısı.

2.5.1 Yüksek Doğrulukta Güneşin Pozisyonunu Belirleme

Güneşin pozisyonunu belirlemeye yönelik verilen algoritmaların doğruluğu yaklaşık 1° civarındadır ve bir çok PV uygulaması için yeterli doğruluğu sağlayabilmektedirler. Düz plaka modüller için konuşlandırmada yalnızca birkaç derecelik hata lokasyondaki atmosferik etkiler gibi diğer etkilerle karşılaştırıldığında kabul edilebilir limitler içerisinde kalmaktadır. Güneşi izleyen ve ışığı yoğunlaştırarak konsantre eden yoğunlaştırıcılı modüller (CPV, Concentrated PV) dikkate alındığında ise bu hata limitleri kabul edilemeyecek sevilerde kalmaktadır. Konsantrasyonun artması için güneşin çok doğru bir şekilde takip edilmesi gerekir. Güneş takibi için astronomik almanaklar, bilgisayarlı uygulamalar veya kullanılabilmektedir. Bu türdeki bir almanağa ABD Deniz Rasatları Kuruluşundan erişilebilmektedir. Bu imkanlara rağmen bu şekilde bir uygulama takip sistemlerinde kullanılan mikro kontrolörler için kullanılışlı olmamaktadır. Bu tip uygulamalar için geliştirilmiş olan bir çok ticari bilgisayar uygulaması bulunmakta ve daha çok bu sistemler tercih edilmektedir. Bu algoritma mikro kontrolörler için bir C++ kodu haline getirildi. Bu koda http://www.psa.es/sdg/sunpos.htm adresinden erişmek mümkündür. PSA algoritması lokal zaman zonlarından kaynaklanan hataları minimize etmek ve belirsizlikleri gidermek için Evrensel Zamanı kullanmaktadır. Lokasyon enlem ve boylam şeklinde dakika ve saniyeleri içerecek bir şekilde derecenin ondalıkları şeklinde girilebilmektedir. Azimut açısı, manyetik kuzey yerine gerçek kuzeyden, zenit açısı ise düşeyden itibaren ve yükseklik açısı da yataydan itibaren alınmaktadır.

2.5.2 Eğimli Yüzey Üzerindeki Güneş Radyasyonu

Bir PV modülü üzerine gelen güç, sadece güneş ışığının içeriğindeki güce bağlı değildir; aynı zamanda güneş ve modül arasındaki açı da gücü etkilemektedir. Absorblama yüzeyi ve güneş ışığı birbirlerine dik pozisyonda olduğunda yüzeydeki güç yoğunluğu gelen güneş ışığının gücüne eşit olmaktadır (diğer bir ifade ile güç yoğunluğu, PV modülü güneşe dik konumda olduğu durumda her zaman maksimum seviyede olacaktır). Bu durumların yanı sıra, güneş ve sabit yüzey arasındaki açı sürekli olarak değişiklik göstermektedir. Bu şekilde sabit PV üzerindeki güç yoğunluğu da gelen güneş ışığının gücünden daha düşük seviyelerde kalacaktır. Eğimli bir modül yüzeyine gelen güneş radyasyonu miktarı, modül yüzeyine dik olarak gelen güneş radyasyonunun bileşenidir. Aşağıda verilen Şekil'de eğimli bir yüzey (S_{module}) üzerine gelen güneş radyasyonunun, yatayda ölçülen güneş radyasyonu (S_{horiz}) veya güneşe dik bir pozisyonda ölçülen güneş radyasyonuna ($S_{incident}$) göre nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir.



Şekil 2.25. Güneş ışınlarının eğimi.

S_{module}, S_{horiz} ve $S_{incident}$ arasındaki ilişkileri aşağıda verilen eşitliklerle tanımlanmaktadır:

$$S_{horizontal} = S_{incident} \sin\alpha$$
$$S_{module} = S_{incident} \sin(\alpha + \beta)$$

Burada; α yükseklik açısı, β modülün yataydan itibaren ölçülen eğim açısıdır. Yükseklik açısı daha önce verildiği gibi aşağıda verilen eşitlikle hesaplanabilmektedir:

$$\alpha = 90 - \phi + \delta$$

Bu eşitlikte;
ϕ enlemi, δ önceki konularda verildiği şekliyle denklinasyon açısını ifade eder. Bu eşitlikteki d yılın kaçıncı gün olduğunun sayısıdır.

$$\delta = 23.45^{\circ} \sin\left[\frac{360}{365}(284 + d)\right]$$

Bu eşitliklerden faydalanarak S_{module} ve S_{horiz} arasındaki bağıntı aşağıda verildiği gibi belirlenebilmektedir:

$$S_{module} = \frac{S_{horizontal} \sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha}$$

Bir yüzey üzerine gelen güneş radyasyonuna en önemli etkiyi eğim açısı yapmaktadır. Sabitleştirilmiş bir eğim açısı için, yıl boyunca alınabilecek maksimum güç, eğim açısının lokasyonun enlemine eşit olduğu zaman elde edilir. Bu duruma rağmen kış aylarında daha dik eğim açıları optimum olurken yaz aylarında daha düşük eğim açıları optimum gücü elde etmede kullanılmaktadır. Aşağıda verilen Şekil'de eğim açısı ve enlemin bir fonksiyonu olarak güneş radyasyonunun maksimum değerleri verilmektedir. Gelen güç, güneş ışınlarına dik güneş radyasyonunu ve güneşi tam olarak takip edilebilseydi modül üzerine gelebilecek radyasyonu göstermektedir. Yataydaki güç, yer yüzeyine çarpan güneş radyasyonunu ve yer yüzeyinde tamamen yatay bir şekilde duran modül üzerine gelen radyasyonun ifadesidir. Grafiklerde görülen değerler herhangi bir noktadaki muhtemel maksimum değerler olarak düşünülmelidir. Bu değerlerden bulutlar veya diğer etkiyen etmenlerden dolayı olabilecek azalmalar dikkate alınmamıştır. Modülün kuzey yarımküreden güneye, güney yarımkürede ise kuzeye yönlendirilmiş olduğu kabul edilmiştir. Bazı açılarda modül gücünün sıfıra düşme ihtimali bulunmaktadır.

Modüller duruma göre herhangi bir yöne eğimli veya yönelimli olduğunda modül üzerine gelen güneş radyasyonunu hesaplamada kullanılan eşitlikler biraz daha karmaşık hale gelmektedir:

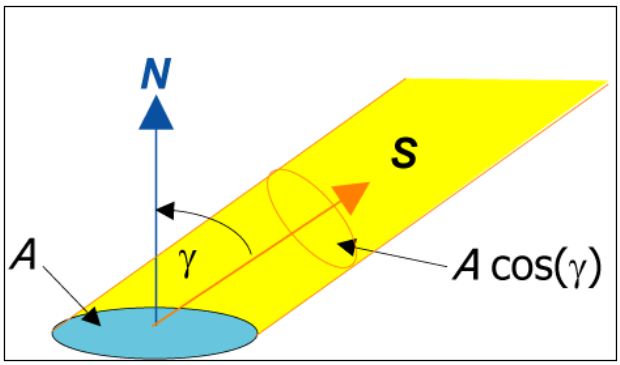
$$S_{module} = S_{incident}[\cos\alpha \sin\beta \cos(\psi - \Theta) + \sin\alpha \cos\beta]$$

Bu eşitlikte α: güneş yükseklik açısını, Θ: güneş azimut açısını, β: modül eğim açısını ifade etmektedir. Modül yer yüzeyinde tamamen yatay bir pozisyonda ise β=0° ve dik bir pozisyonda ise β=90° değerlerini almaktadır. ψ: modülün baktığı yönün azimut açısını göstermektedir. Kullanılan modüllerin büyük bir çoğunluğu ekvatora doğru bakacak bir şekilde yönlendirilmektedir. Güney yarıkürede modül ψ=0° açı ile kuzeye yönlendirilir. Kuzey yarıkürede ise ψ=180° açı ile bu yönlendirme güneye doğru olmaktadır. S_{module} ve $S_{incident}$ sırasıyla W/m² olarak modül üzerindeki ve gelen ışık yoğunluğunu göstermektedir. $S_{incident}$ yalnızca direkt bileşen olmaktadır. Direkt olarak güneşe bakan bir modül, gelen güneş ışınlarının modül yüzeyine dik olabilmesi için modül eğim açısının güneşin zenit açısına eşit olasını gerektirir (90 - α = β). Ve bu durumda da modül azimu açısı güneşin azimut açısına eşit olur (Θ = ψ).

2.5.3 Güneş Yönünü Hesaplamada Vektör Kullanımı

Eğim ve yönlendirmelerde kullanılan rakamların karmaşık olmasından dolayı genellikle azimut ve yükseklik açılarını vektörlere dönüştürerek kullanmak daha kolay olmaktadır. Örnek olarak bir bina üzerindeki eğimli modül çatının durumuna göre eğimli ve yönlendirilmiş durumdadır. Vektör

kullanımının basitliği, eğimli yüzey üzerindeki ışığın yoğunluğunu azaltmada, gelen ışın ve modül normali arasında basit çarpan şeklinde olmasındandır.



Şekil 2.26. Modül yüzeyindeki açılar.

Herhangi bir açıda yüzeye çarpan ışık geniş bir alana yayılır. Yoğunluktaki azalma, birim vektörler S ve N'nin nokta çarpımıdır (a . b = |a| |b| cos(alpha)).

$$S_{module} = S_{incident} \cos\gamma = S_{incident} \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{N}$$

Burada kullanılan,

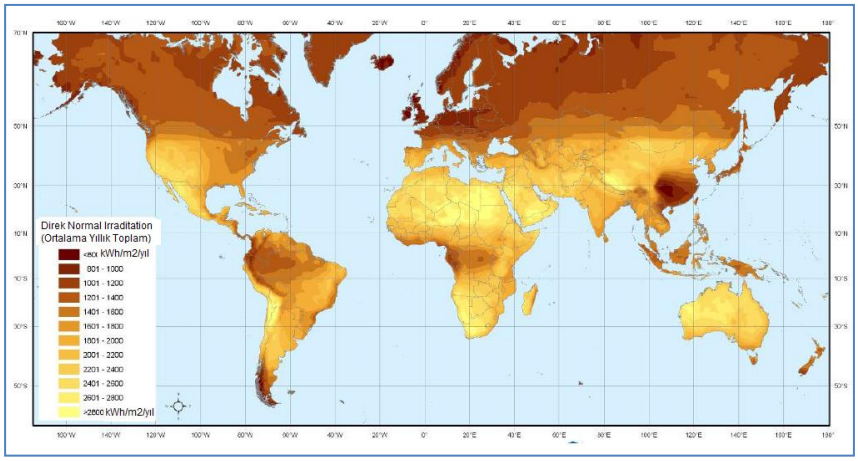
S: güneşe doğru olan birim vektör noktası,
N: modül yüzeyine dik birim vektörü simgelemektedir,
γ: iki vektör arasındaki açıdır.

2.6. Güneş Radyasyon (Enerjisinin) Hesaplanması

Güneşin yıl boyunca gökyüzündeki pozisyonunu tanımlayan eşitliklere dayalı olarak belirli bir eğim açısındaki yüzey üzerine gelen maksimum güneş enerjisi miktarı enlem ve yılın gününün bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar güneşlenme süresi kaydedicilerinden alınan deneysel verilerin kullanımında da gerekli olmaktadır. Aşağıda verilen Şekil'de günlük güneş irradyansı, güneş radyasyonu ve güneşlenme sürelerinin enlem ve zamana göre değişimleri gösterilmektedir. Bu gösterimlerde lokal atmosfer etkileri dikkate alınmamıştır ve bu yüzden bu teorik gösterimler sistem boyutlandırmada ve işletme tahminlerinde kullanılamaz.

Güneş Enerjisi Potansiyeli Belirlemesi

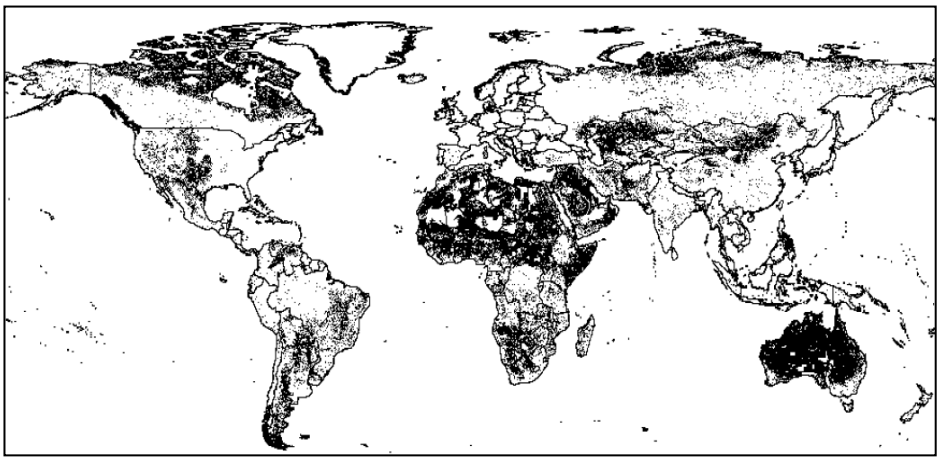
NASA SSE 6.0 programından alınan direk nominal irradiyasyon verileri kullanılarak 100 km alan çözünülürlüklü ve 22 yıllık veriyi kapsayan bir çalışmanın sonucu olarak Şekil ile verilen harita ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.27. Dünya yıllık direk normal irradiyasyon (kWh/m2/yıl).

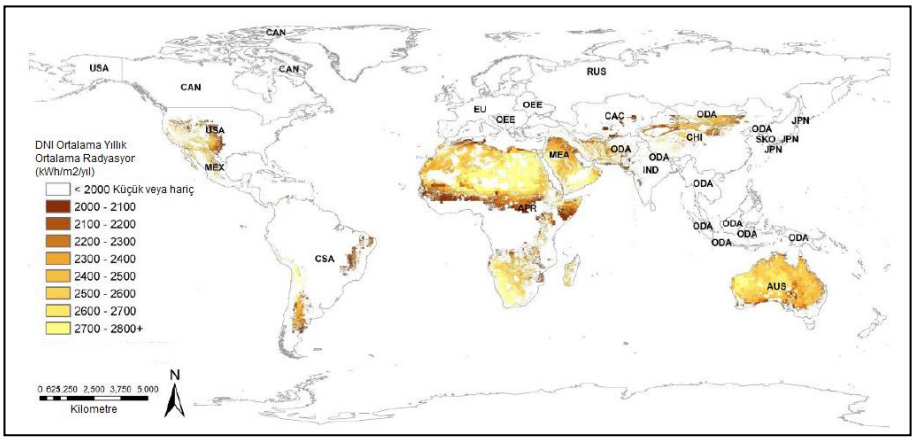
Şekil ile de dünyada CSP için uygun olmayan bölgeler görülmektedir. Koyu gösterilen bölgeler CSP için uygundur. Burada hariç bırakılan bölgeler için aşağıdaki kriterler uygulanmıştır.

a) Eğim > %2.1,
b) Arazida su, orman, tarım yapılması,
c) Havaalanı, petrol arama bölgeleri, madenler,
d) Koruma ve yasak bölgeler.



Şekil 2.28. CSP yapılamayacak bölgeler (açık renkli alanlar).

Her iki harita süperpoze edildiğinde (üstüste çakıştırılma) aşağıdaki Şekil elde edilmektedir.



Şekil 2.29. CSP haritası.

Bu şekilden yola çıkılarak CSP kurulabilecek alanlar ile ilgili kıtalara göre dağılım aşağıdaki Tabloda görülmektedir.

Tablo 2.2. CSP GES kıtalara göre dağılımı (1. Tablo).

DNI Sınıfı	**Afrika**	**Avustralya**	**Orta Asya, Kafkaslar**	**Çin**	**Orta ve Güney Amerika**	**Hindistan**
kWh/m^2/yıl	km^2	km^2	km^2	km^2	km^2	km^2
2000-2009	1082050	70164	151109	88171	334096	83522
2100-2199	1395900	187746	3025	184605	207927	11510
2200-2299	1351050	355188	3594	415720	232678	5310
2300-2399	1306170	812512	1642	263104	191767	7169
2400-2499	1862850	1315560	569	99528	57041	3783
2500-2599	1743270	1775670		96836	31434	107

2600-2699	1468970	1172760		17939	42139	976
2700-2800+	2746100	393850		24435	93865	120
Toplam (km^2)	**12956360**	**6083450**	**159939**	**1190338**	**1190948**	

Tablonun devamı aşağıda görülmektedir.

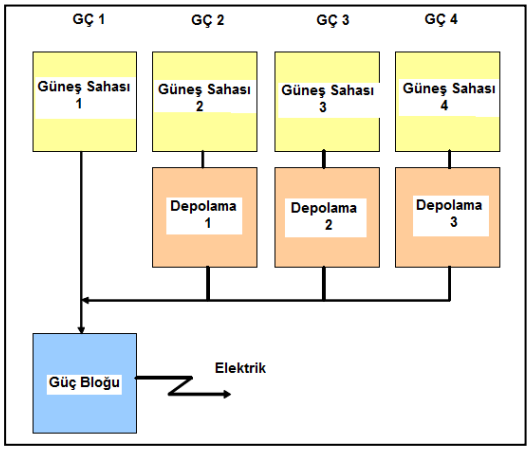
Tablo 2.3. CSP GES kıtalara göre dağılımı (2. Tablo).

DNI Sınıfı	**Orta Doğu**	**Meksika**	**Diğer Gelişen Ülkeler (Asya)**	**Doğu Avrupa**	**AB 27**	**ABD**
$kWh/m^2/yıl$	km^2	km^2	km^2	km^2	km^2	km^2
2000-2009	36315	16999	47520	59	9163	149166
2100-2199	125682	34123	52262	129	5016	172865
2200-2299	378654	35263	105768	23	6381	210128
2300-2399	557299	53765	284963		1498	151870
2400-2499	633994	139455	172043		800	212467
2500-2599	298755	60972	60972		591	69364
2600-2699	265541	12628	12628		257	19144
2700-2800+	292408	14903	14903		270	
Toplam (km^2)	**2588648**	**368108**	**703577**	**211**	**23975**	**985005**

Yukarıdaki tablolardan da görüldüğü gibi Afrika, Avustralya, Amerika ve Ortadoğu'da yıllık 2000 kWh/m^2 güneş irradiyasyonu görülmektedir. Daha sonra da Çin ve merkez ve güney Amerika kıtası bunu takip etmektedir.

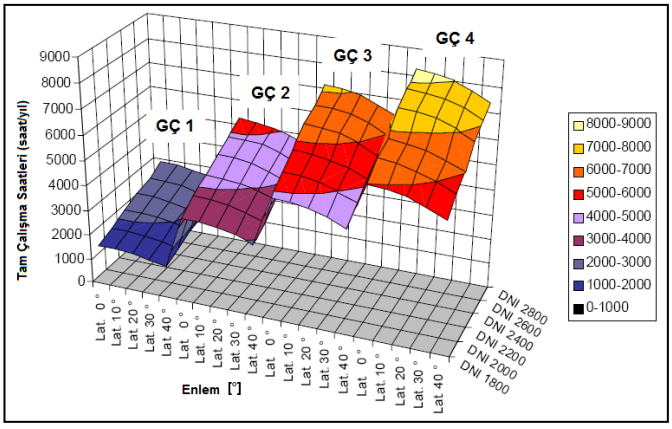
CSP Performans Modeli

Bilindiği gibi, depolamasız bir CSP yıllık 2000 kWh/m^2 direkt normal irradiyasyonda %25 civarında bir kapasite faktörü ile ve yılda 2000 tam kapasite ile çalışmaktadır. Herhangi bir CSP GES'in konfigürasyonunu tanımlayabilmenin uluslararası literatürdeki en yaygın yolu Güneş Çarpanı (Solar Multiple) (GÇ) olarak bilinen yöntemin kullanılmasıdır. Örneğin GÇ 1 buhar türbini demek, CSP'de 1 adet güneş sahası bulunmasıdır. GÇ2 CSP, güneş sahası bulunmasıdır. GÇ 2 CSP, güneş sahasının 2 kat daha geniş olduğu termal enerji depolamasının büyük olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile GÇ 1'de herhangi bir buhar türbininin olmadığı yeni depolamanın bulunmaması GÇ2'de depolama, GÇ 3 ve GÇ 4 gibi ifadelerde de depolamanın gittikçe büyüdüğü ifade edilmektedir. Şekil 2.30 ile bu durum özetlenmiştir.



Şekil 2.30. Güneş Çarpanına göre CSP tanımlamaları.

Tanımlanan modelde GÇ 1 ve MW için 6000 m^2 arazi gerekmektedir. Herbir depolama ünitesinin 6 saat tam kapasite çalışmaktadır. Aşağıdaki şekil ile değişen konfigürasyon ve enlemlere göre yıllık güneş irradisyasyon değerleri görülmektedir. Örnek olarak Güneş Çarpanı 4 olan bir CSP, 4x600 m^2 = 24000 m^2/MW ve 3x6=18 saat depolama kapasitesine sahiptir. Böyle bir CSP 35 derece enlemde İspanya'da 5900 saat tam kapasite 2000 kWh/m^2/y çalışmakta iken Mısır'da (25 derece enlem) 8000 saat tam kapasite ve 2800 kWh/m^2/y yıllık güneş irradiyasyona sahiptir.

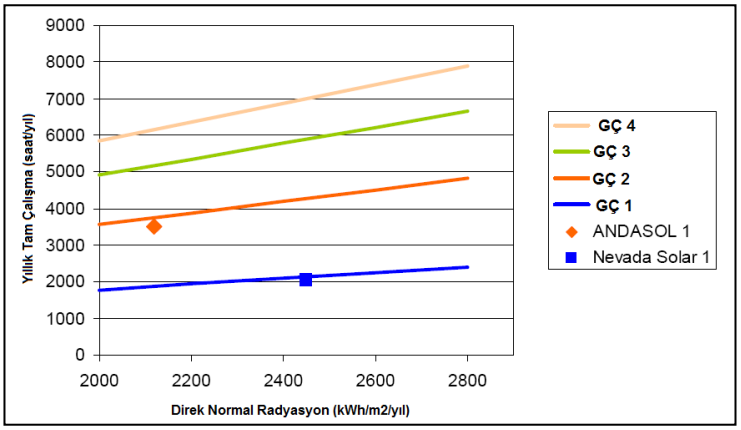


Şekil 2.31. Enlemlere ve DNI değerlerine göre.

Aşağıda verilen basitleştirilmiş eşitlik ile farklı irradiyasyon koşullarında farklı CSP GES'lerin performanslarının analizinde kullanılabilmektedir. Yıllık elde edilebilir tam yük işletme saati (Flh, full load operating hours), Güneş Çarpanı (GÇ) ve yıllık direkt normal irradiyasyonun (DNI) fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

$$Flh = (2{,}571DNI - 694) \cdot (-0{,}0371\ GÇ^{2} + 0{,}4171\ GÇ - 0{,}0744$$

Enlemlere bağımlılık bu eşitlikte ihmal edilmiştir. Aşağıdaki şekil bu basitleştirilmiş modelin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 2.32. Basitleştirilmiş modele göre sonuçlar.

Bu model, benzer direkt normal irradiyasyona sahip yerlerdeki iklim ve enlem değişiklilerini dikkate almamaktadır.

Global CSP Potansiyeli

Aşağıdaki eşitlikler güneşten elektrik enerjisine çevrildiğindeki verimi göstermektedir:

$$\text{Güneş Elektrik Verimliliği} = \frac{\text{Yıllık Net Elektrik Üretimi}}{\text{Yüzeye Gelen Yıllık Direk İrradiyasyon}}$$

$$\text{Arazi Kullanım Faktörü} = \frac{\text{Yansıtıcıların Yüzey Alanı}}{}$$

Gerekli Toplam Alan

Arazi Kullanım Verimi = Güneş Elektrik Verimliliği * Arazi Kullanım Faktörü

Kullanılan modelde parabolik oluk sistem CSP kabulü yapılmıştır. Ayrıca buhar çevrimi olan depolama ünitesininde bulunduğu varsayılmıştır.

Aperture alanı olarak ıslak (wet) soğutma kulelerinin parabolik sistemdeki verimi %15 olsa da, çöl bölgelerindeki çevre etkileri yüzünden kullanılan modeilde %12'ye düşürülmüştür. Kullanılan alan olarak, parabolik oluk ayna sahası toplam alanın %37 sini kapsamaktadır.

Güneş Radyasyonu

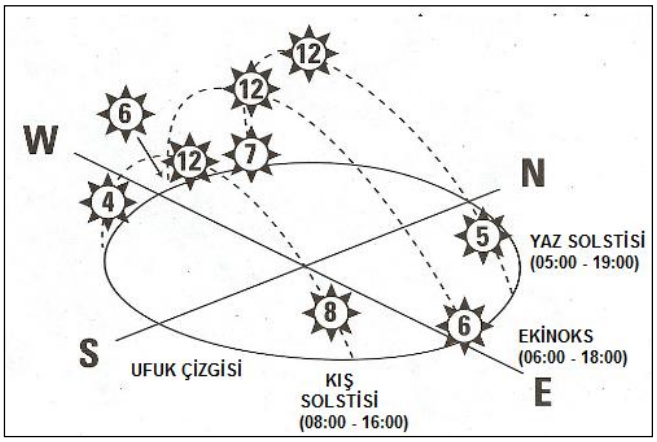
Herhangi bir yer veya bölgedeki yüzey çarpıp yansıyan güneş radyasyonuna insolation denmektedir. Insolation güç birimi olarak ifade edilmek istendiğinde metrekareye düşen Watt olarak ifade edilmektedir ve genellikle ortalama günlük değerdir. Açık bir günde dünyadaki metrekareye 1000 Watt insolation gelir. Bununla beraber, bazı parametreler nedeni ile bu değerin hepsi alınamaz. Insolationi metrekareye düşen kilowatt olarak da ifade edilebilir. Aşağıdaki eşitlikler incelenebilir:

1 kWh/m² = 3.412 BTU (ft ²)
= 3.6MJ/m ²
= 1 Langley/85.93
= 1 pik güneş saati

Dünya yüzeyine ulaşan güneş radyasyonu aşağıdaki sebeplerden dolayı değişime uğrarlar;

a) Hava molekülleri, su buharı ve toz yüzünden saçılma,
b) Ozon, su buharı ve CO2 yüzünden absorbsiyon.

Örneğin 5 pik güneş saatinin anlamı, 5 kWh/m² dir. Dünyanın güneşten olan mesafesi emreamade güneş radyasyonu etkilemektedir. Kuzey enlemlerde Haziran-Ağustos arası güneşe yakınlaştığından yaz oluşmaktadır. Kuzey enlemlerde güneş gökyüzünde güney tarafında olduğundan güneş kollektörleri (modüller) güneye doğru yönlendirilmektedir. Kuzey enlemlerde güneşin yörüngesi aşağıdaki Şekil ile verilmiştir.



Şekil 2.33. Kuzey enlemlerde güneşin yıllık yörüngesi.

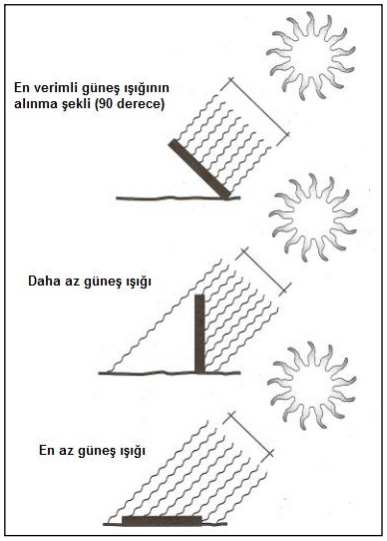
Tilt Açısı

Güneşin ufuktan olan mesafesine yükseklik denir ve ufkun üzerindeki açı ile ifade edilir. Güneş doğduğu veya battığı zaman yükseklik 0 derecedir ve o gün içerisindeki en yüksek azimut değeridir. Buna güneş vakti (solar noon) denmenktedir. Herhangi bir sahanın enlemi, güneş vakti ufkun üzerinde güneş yüksekliğini de belirlemektedir. Dünyanın dönüşünün güneşin yörüngesinin etrafındaki dönüşü, sebebi ile güneş farklı enlemlerde farklı yüksekliklerde olmaktadır. PV GES sisteminin optimizasyonu için güneş yüksekliğinin mevsimsel değişimi göz önüne alınmalıdır. Aşağıda verilen genel kurallar, PV GES'ler için dizilimdeki optimizasyon açısından değerlendirilmelidir:

a) Yıllık yükler: Tilt açısı yüksekliğe eşit,

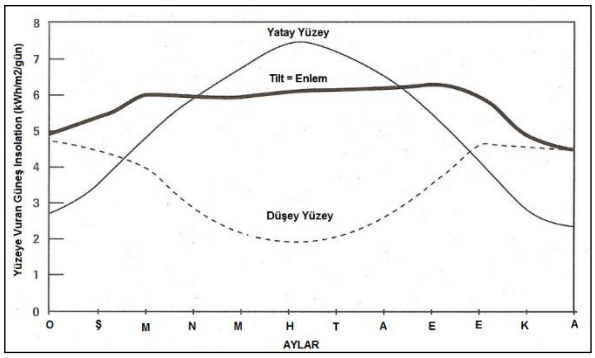
b) Kış yükleri: Tilt açısı, yükseklikten 15° fazla,
c) Yaz Yükleri: Tilt açısı, yükseklikten 15° eksik.

Şekil ile görüldüğü gibi, PV diziliminde, güneş ışınlarının tam dile geldiği anda en yüksek verim alınmaktadır.



Şekil 2.34. Tilt açısının etkisi.

Aşağıda verilen Şekil ile de tilt açısının aylık insolationa etkisi görülmektedir.



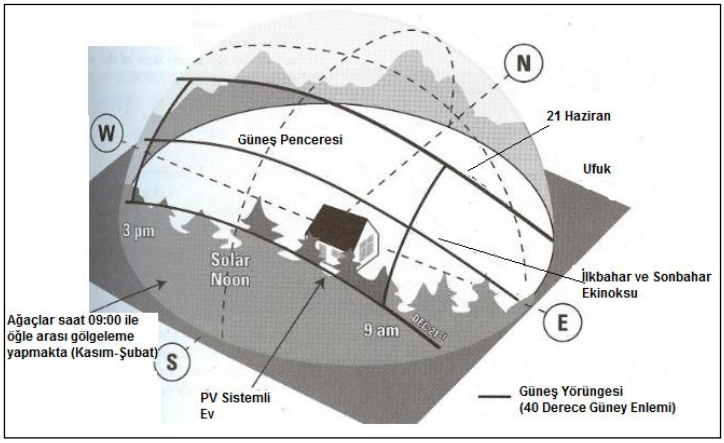
Şekil 2.35. Enerji üretimine tilt açısının etkisi.

Saha Verisinin Toplanması

PV GES sistemlerinde saha seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar bulunmaktadır. Özellikle uzak bölgelerde ada sistemi çalışan (stand alone system) PV GES'lerin yerleşimi yapılırken çok dikkat edilmelidir. Ada sistemi planlanırken yılın hangi zamanında en fazla elektrik tüketiminin yapıldığına dikkat edilmelidir. Insolation verisi, herbir ay için ortalama olarak verilmektedir. Sistemin büyüklüğü belirlenirken doğru insolation ayını belirlemek büyük önem arz etmektedir. Eğer gerekli yük bütün yıl boyu sabit ise, en düşük insolation meydana geldiği ay sistem için baz alınır. PV serisi, ay boyunca en yüksek verimi alacak şekilde tasarlanmalıdır.

Insolation Veri Toplanması

Herhangi bir bölgede PV GES tasarlanırken bazı meteorolojik verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer sahada bu veriler mevcut değil ise, civar meteoroloji istasyon verisi kullanılabilir. Toplanan verilerin gerekli analizi yapıldıktan sonra PV modüllerinin montajı yapılmalıdır. Modül montaj yeri seçilirken gölgeleme hususu göz önünde bulundurulmalıdır. Küçük miktardaki bir gölgeleme bile PV panelin verimini ciddi bir biçimde etkileyebilmektedir. İstenmeyen bazı gölgeleme; ağaçlar, tarım, yapılar vb gibi engeller yüzünden meydana gelebilmektedir. Genel bir kural olarak saat 09:00 ile akşam 15:00 arasında PV modülleri herhangi bir gölgelemeye maruz kalmamalıdır. Bu optimum zaman ölçeğine güneş penceresi (solar window) denmektedir. Şekil ile güneş penceresi görülmektedir.



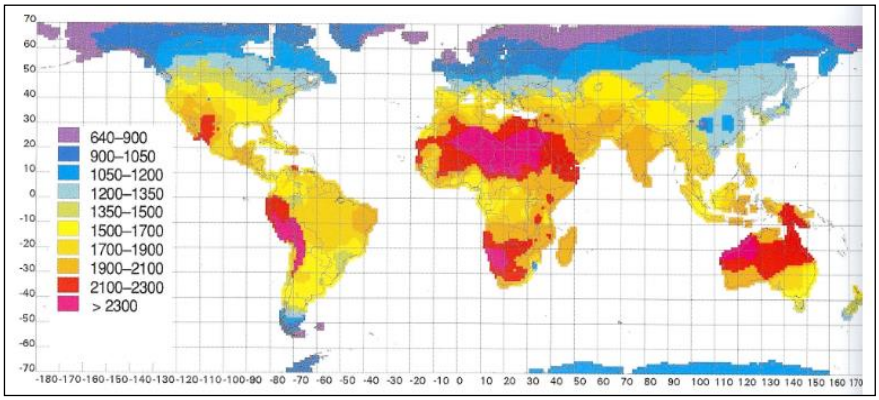
Şekil 2.36. Güneş penceresi (solar window).

Güneş Radyasyonu

Güneş oluşumunun temel kaynağı hidrojen atomunun helyuma parçalanmasıdır (fusion). Bu parçalanma sırasında hidrojen kütlesinin bir kısmı enerji açığa çıkarmaktadır. Yani, güneş büyük bir nükleer reaktördür. Dünyaya olan uzak mesafesi nedeni ile, çok küçük bir kısmı ulaşabilmektedir. Bu ulaşan kısmın elektriksel değeri ise 1x 10^{18} civarındadır. Dünyaya gelen güneş radyasyonunun şiddeti, dünya ile güneş arasındaki mesafeye göre değişmektedir. Dünya ile güneş arasındaki mesafe 1.47x 10^{8} ile 1.52 x 10^{8} km arasında yol içerisinde değişim göstermektedir. Bunun neticesinde irradiyans Eo değeri 1325 W/m^2 ile 1412 W/m^2 arasında değişmektedir. Bu değerin ortalamasına "güneş sabiti" denir. Güneş sabiti,

Güneş sabiti: Eo= 1367 W/m^2

Bu değerdeki irradiyasyonun tamamı dünya yüzeyine ulaşmamaktadır. Buna sebep ise, bulutlar tarafından yansıtılma, absorbsiyon (ozon, subuharı, oksijen ve karbondioksit tarafından) ve saçılma (hava molekülleri, toz parçacıkları veya kirlilik yüzünden) nedeni iledir. Açık bir havada öğle vaktinde irradiyans 1000 W/m^2 ye kadar ulaşabilir. Bu değer, bulunan enleme göre değişim göstermektedir. Maksimum değer, güneşli ve parçalı bulutlu havalarda meydana gelir. Bunun nedeni yeryüzünden yansıyan radyasyonun buluta çarparak tekrar yeryüzüne dönmesidir ve birkaç saatliğine de olsa 1400 W/m^2 yi bulabilir. Aşağıdaki Şekil ile yapılan bir çalışma sonucuna göre global güneş radyasyon değerleri kWh/m^2 olarak görülmektedir. Kaynak olarak Meteotest yazılımı kullanılarak METeonorm tarafından hazırlanmıştır. Şekilden de görüleceği gibi ekvator yakınlarında 2300 kWh/m^2 olabilmektedir.

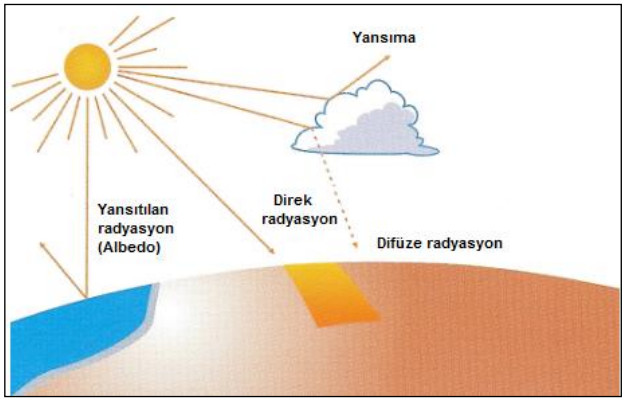


Şekil 2.37. Global radyasyon dağılımı.

Direk ve Difüze Radyasyon

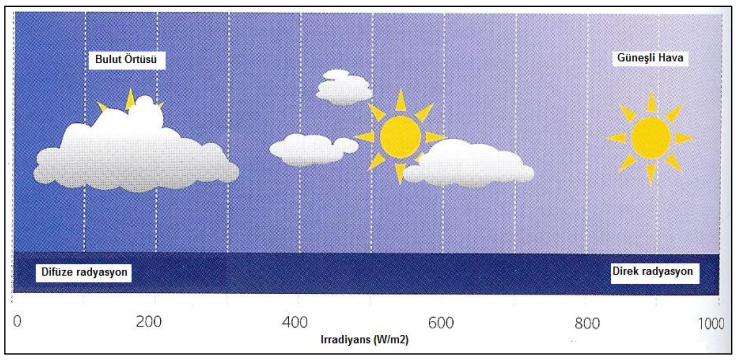
Güneş, dünyaya direk ve difüze radyasyon olarak ulaşmaktadır. Direk radyasyon, güneşten doğrudan gelen ve belirli bir yönü olan radyasyon iken; difüze radyasyon yeryüzünden yansıtılan radyasyonun buluta çarptıktan sonra tekrar yeryüzüne ulaşan ve belirli bir yönü bulunmayan radyasyondur.

Aşağıdaki Şekil ile bu durum şematize edilmiştir.



Şekil 2.38. Direk ve difüze radyasyon.

Aşağıdaki Şekil ile bulutluluk durumuna göre difüze ve direk radyasyon görülmektedir.

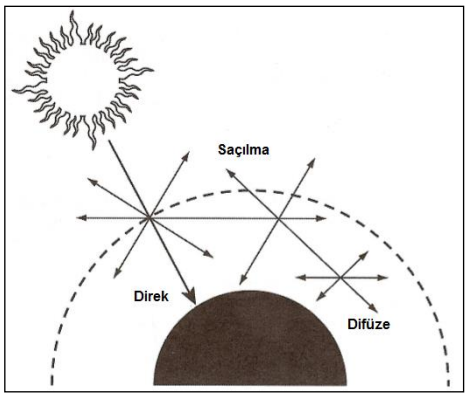


Şekil 2.39. Farklı bulutluluk yapısına göre radyasyon.

Dünyanın atmosferine ulaşan radyasyonun %30'luk kısmı çeşitli nedenler ile kayba uğramaktadır. Bu nedenler arasında;

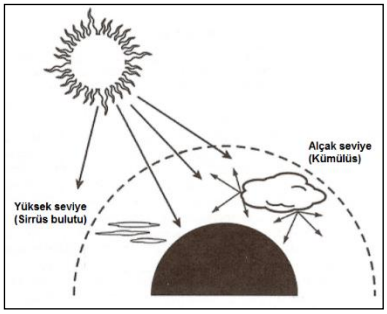
- Özellikle kısa dalga boylarında olan atmosferdeki Rayleigh saçılımı ($\sim\lambda^{-4}$),
- Aerosol ve toz parçacıklarından dolayı meydana gelen saçılma,
- Oksijen, ozon, subuharı ve CO_2 den meydana gelen absorbsiyon.

Bilindiği gibi, 0.3 μm den kucuk dalga boyları ozon tarafından absorblanmaktadır. 1 μm dalga boyu civarındaki absorbsiyon su buharı ve CO_2 tarafından absorblanmaktadır. Şekil ile atmosferik saçılma görülmektedir. Şekilde gelen güneş radyasyonunun gökyüzü içerisinde her yönde olan saçılım görülmektedir.



Şekil 2.40. Atmosferik saçılma.

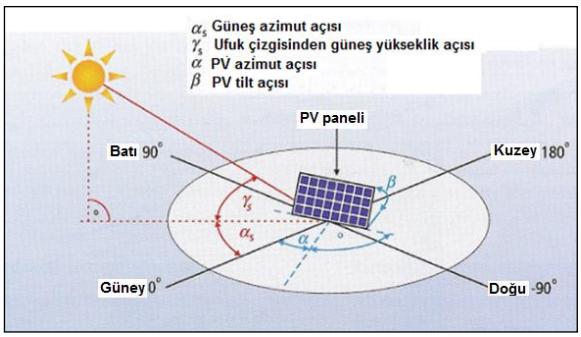
Bulutluluğun radyasyon azalması ve saçılma üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Örneğin alçak seviyelerdeki kümülüs bulutlarının güneş ışığını bloke edici etkisi bulunmaktadır. Bununla beraber, kümülüs bulutlarının bloke ettiği güneş radyasyonunun yarısı difüze radyasyon etkisi ile tekrar kazanılır. Yüksek seviye ve ince yapıya sahip sirrüs bulutlarının güneşi bloke etkisi çok yüksek değildir.



Şekil 2.41. Bulutluluğun radyasyona etkisi.

Açı tanımları

Güneşin yörüngesinin bilinmesi, radyasyon hesaplamalarında kullanıldığından dolayı bazı açı tanımlarının bilinmesi gerekir. Şekil ile bu açılar görülmektedir.



Şekil 2.42. Güneş ve açılar.

BÖLÜM 3: GÜNEŞ RADYASYONU ÖLÇÜM TEKNİKLERİ

Güneş enerjisine dayalı güç sistemlerinin tasarımında (PV veya CSP) verilen bir zamanda belirli bir lokasyonda mümkün olabilecek güneş radyasyonu miktarının bilinmesi gerekmektedir. Güneş radyasyonunu karakterize etmede kullanılan iki yaygın model güneş radyansı (radyasyonu) ve yer yüzeyi üzerine gelen elektromanyetik güneş radyasyonu miktarıdır (solar insolation). Güneş radyansı veya radyasyonu kW/m^2 olarak anlık güç yoğunluğunu ifade eder. Güneş radyansı geceleyin 0 kW/m^2 değerinden gündüz 1 kW/m^2 maksimum değerine kadar gün boyunca değişir. Güneş radyansı büyük oranda lokasyon ve yerel hava şartlarına bağlıdır. Güneş radyasyonu ölçümleri gün boyunca periyodik olarak alınan global ve/veya direkt radyasyon ölçümlerini kapsamaktadır. Ölçümler piranometre (global radyasyonu ölçer) ve/veya pirheliyometre (direkt radyasyonu ölçer) biri veya her ikisinin kullanımıyla yapılmaktadır.

3.1 Güneş Radyasyon Ölçümleri

PV santralları toplam güneş radyasyonu ile çalışırken güneş termik (CSP) ve odaklayıcılı PV santralları direkt güneş radyasyonu işe çalışmaktadır. Güneş elektrik santrallarından (GES) üretilecek olan enerji miktarı direkt olarak radyasyon ile orantılı olduğundan dolayı lokal sahadaki güneş radyasyonunun doğru bir şekilde ortaya konulması güç santralarının planlanması ve geliştirilmesi açısından gerekli olmaktadır. Bununla birlikte, toplam güneş radyasyonu daha çok ölçülmesine rağmen direkt güneş radyasyonu ile ilgili ölçümler daha az bulunmaktadır. Bu yüzden özellikle güneş termal santrallarının yapılması planlanan sahalarda gerekli ölçümlerin alınması gerekmektedir. Güneş elektrik santralı (GES) kurmak amacıyla güneş radyasyonu ölçümü yapmak sadece radyasyon değerlerinin ölçümü ile sınırlı değildir. Güneş santrallarının planlanması, geliştirilmesi ve işletilmesini etkileyen diğer meteorolojik parametrelerin de ilave olarak ölçülmesi zaruri olmaktadır.

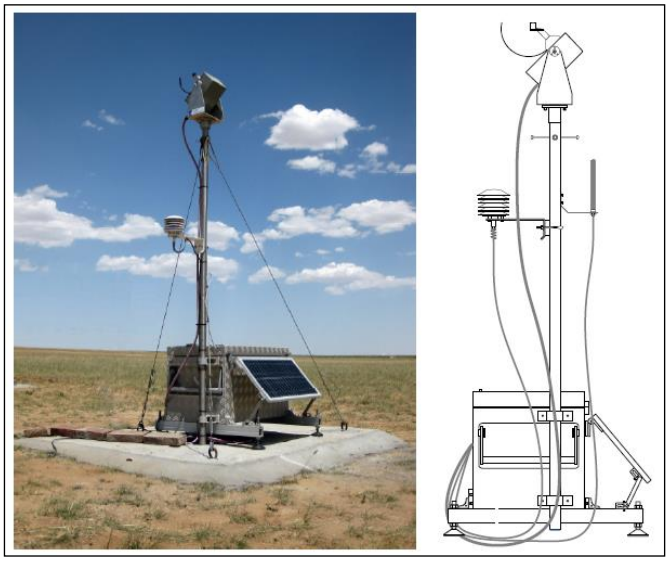
GES kurmak amacıyla yapılacak olan ölçüm sisteminin içerisinde ölçülmesi gereken meteorolojik parametreler, konfigürasyonu, teknik özellikleri, saha hazırlanması, dokümantasyonu ve işletilmesi konularında projelerin daha kolay finanse edilmesi ve daha sağlıklı proje geliştirilebilmesi için dikkate alınması gerekli konulara değinilecektir. Ölçüm cihazları Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından yayınlanan Meteorolojik Aletler ve Gözlem Yöntemleri Kılavuzu'nda belirtilen karakteristikleri sağlamak durumundadır.

GES Ölçüm İstasyonunun Ana Özellikleri

Ölçüm istasyonu, güneş enerjisini kullanarak uzaktan operasyonlarla birlikte veri transferini desteklemelidir. Ölçümü yapılan parametrelerin daha sonra bazı düzeltmelere tabi tutulabilmesi için ham verilerin saklanmasına ve diğer ölçüm parametreleri ile birlikte değerlendirilebilmesine imkân tanınmalıdır. Bu işlemler verinin güvenilirliğini artırmak için yapılmaktadır. Güneş radyasyonu ölçüm istasyonu aşağıda verilen parametreleri ölçebilmeli ve kayıtlarını tutabilmelidir;

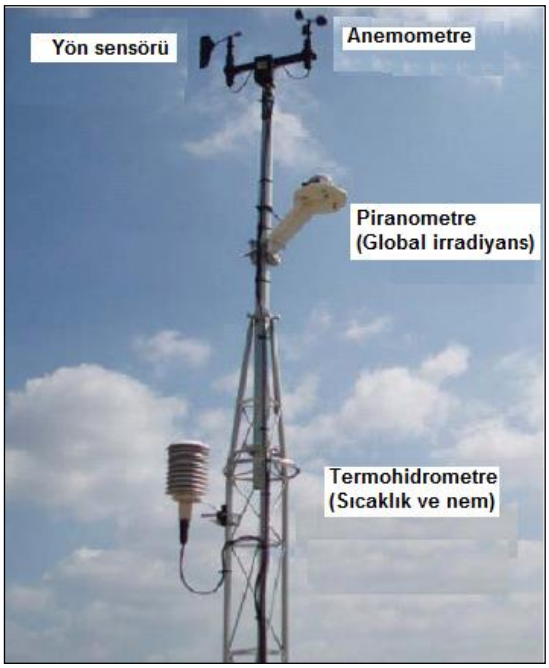
- Toplam yatay radyasyon (GHI),
- Difüz yatay radyasyon (DHI),
- Direkt normal radyasyon (DNI),
- Çevre sıcaklığı,
- Bağıl nem,
- Rüzgar hız ve yönü.

Güneş ölçüm istasyonu yukarda verilen parametrelerin yanı sıra ihtiyaç duyulması halinde genişlemeye müsait olmalı ve gerektiğinde barometrik basınç, yağmur miktarları gibi meteorolojik değişkenleri ölçebilmelidir. Güneş ölçüm istasyonu gerekli ekipmanlarla birlikte taşınımı, kurulumu ve bakımı kolay olacak bir şekilde olmalıdır.



Şekil 3.1. Güneş ölçüm istasyonu.

Aşağıdaki Şekil 3.2 ile yukarıdaki güneş ölçüm istasyonunun tepe konfigürasyonu görülmektedir.



Şekil 3.2. Güneş ölçüm istasyonu tepe konfigürasyonu.

Güneş ölçüm istasyonu bünyesinde bulunan tüm ölçüm cihazları yetkili kurumlar tarafından kalibre edilmeli ve belgeleri saklanmalıdır. Güneş ölçüm istasyonunun bir parçası olan alüminyum veri kontrol kutusu içerisinde veri toplayıcı (data logger), GSM modem, 12 V akü, şarj kontrolü, elektrik tesisatı ve sigortalar bulunmaktadır. Kutu 4 ayaklı ayarlanabilir düz bir zemin üzerine oturtulur ve beton zemine şekilde görüldüğü gibi bağlanır. Veri kontrol kutusuna ilgili bileşenler su sızdırmayacak bir şekilde monte edilir. Veri toplayıcı (data logger), ölçüm istasyonunun beynidir. Yapılan ölçümleri depo eder. Her saniyede bir tüm sensörleri taramaya programlıdır ve ölçümü yapılan değişkenlerin genellikle 10ar dakikalık aralıklarda toplam, maksimum, minimum ve ortalamaları kayıt edip depolamakta ve üretmektedir.

Güneş radyasyonu ölçüm istasyonunda yer alan pirhelyometre direkt güneş radyasyonunu 500 W/m^2'den büyük değerler için %2.3; 300 W/m^2'den büyük değerler için ise %2.9 standart sapma ile belirleyebilmelidir. Aylık direkt radyasyon toplamının doğruluğu ise <±%1.5 olmalıdır. Toplam yatay radyasyonun doğruluğu da ±%5 mertebesinde olmalıdır. Sensör kablolarının 2.5 m'den daha fazla olmaması önerilmektedir. Ölçüm cihazlarının kalibrasyonu her iki yılda bir tekrarlanmalıdır.

Güneş ölçümü 2-3 m yükseklikte ve yere halatlarla bağlı bir direk üzerinde yapılmalıdır. Ölçüm istasyonunun topraklama ve yıldırımdan korunma tertibatı bulunmalıdır ve Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) ölçüm tekniklerine uyulmalıdır. Tüm kablolama tertibatlarında su sızdırmazlık sağlanmalıdır. Güneş radyasyonu ölçüm istasyonunun enerjisi güneş enerjisi ile karşılanmalıdır. Sahanın bulunduğu enleme göre optimum açıda yerleştirilecek PV güneş pili ile 12 V güç temin edilebilmekte ve istasyonun enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Sahadaki çevre sıcaklığını ve nemi ölçmek için kombine sensörler kullanılabilmektedir. Güneş radyasyonundan dolayı olabilecek sensör ısınmalarından kaçınmak için siperler içerisine monte edilirler. Çevre sıcaklığı ±0.4°C hassasiyette ve -40 °C ile 70 °C aralığında çalışabilmelidir. Bağıl nem cihazı ise ±%2 doğrulukta 0-%95 aralığında veri alabilmelidir. Rüzgar ölçümünde rüzgar hızı ve yönü değerleri kayıt edilir. WMO standartlarına göre yer seviyesinden 3 m yüksekte bu ölçümler alınmalıdır. Rüzgar sensörleri kablo uzunlukları 10 m'yi aşmamalıdır. Rüzgar hızı 0.1 m/s doğrulukta 1-96 m/s aralığında; rüzgar yönü ise %1 doğrulukta 0-360° aralığında ölçümler alabilmelidir.

Daha az doğrulukta fakat daha ucuza mal olan diğer bir alternatif güneş radyasyonu ölçüm yöntemi de güneş ışığı kaydedicilerinin kullanılmasıdır. Bu güneş ışığı kaydedicileri (Campbell-Stokes kaydedicileri olarak da bilinir) gün içindeki güneş ışığının seviyesinin belirli bir değerden yüksek olduğu (200 W/cm^2) saatlerin sayısını ölçer. Bu yolla toplanan veri güneş radyasyon miktarını hesaplamada kullanılabilmektedir. Fakat bu tip bir ölçüm verisinin güneş radyasyonu miktarına dönüştürülebilmesi için bazı düzeltmelerin yapılmasını gerektirmektedir. Güneş radyasyon miktarını belirlemede kullanılan diğer bir yöntem de uydu görüntülerinden elde edilen bulut kapalılığı verisi kullanılarak geliştirilen yöntemdir.

3.2 Güneş Ölçüm İstasyonunda Kullanılan Meteorolojik Sensörler

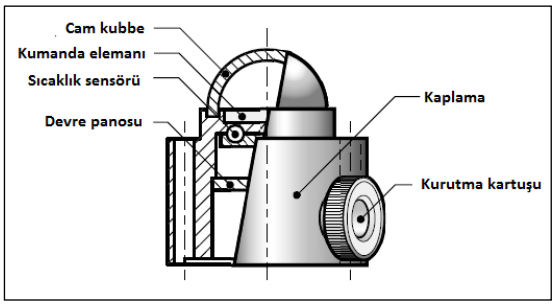
Güneş ölçümleri için normal bir meteoroloji istasyonunda bulunması gereken sensörler izleyen sayfalarda verilmiştir.

3.2.1 Piranometre (Pyranometer)

Piranometre yer yüzeyine gelen toplam global güneş radyasyonunu ölçmek için kullanılır. Genellikle direk üzerinde 2 m yüksekliğe kurulur. 300 ile 3000 nm arasındaki spektrumdaki global güneş radyasyonunu ölçmede kullanılan bir sensördür.

Şekil 3.3. Piranometre.

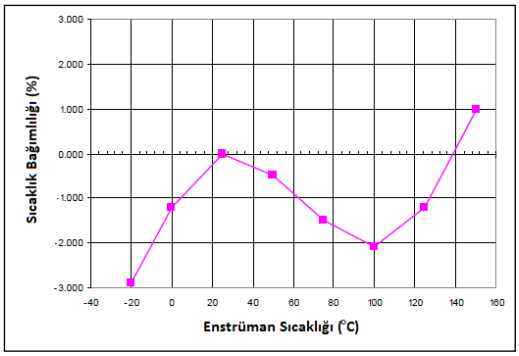
Birçok farklı marka piranometre bulunmaktadır. Alman Kipp & Zonen firmasına ait TCM4 High Temperature Piranometre incelenecektir. Bu piranometre -40 ºC ile +150 ºC arasında değişmekte olup 4000 W/m^2 ye kadar ölçüm yapılabilmektedir. Bu tip piranometreler hem dışarıda hem de kapalı ortamlarda (suni ışık için) kullanılmaktadır.
CM4 Piranometre, termofil dedektör, alüminyum kaplama, sıcaklık sensörü ve cam kubbeden (glassdome) oluşmaktadır. Aşağıdaki Şekil ile CM4 piranometre teknik resmi görülmektedir.



Şekil 3.4. CM4 Piranometre teknik çizimi.

Termofil yüzey, siyah absorber boya ile boyanmıştır. Absorbe edilen radyasyon, ısıya çevrilerek termofil direncinin termal akışı üzerinde akar. Reaktörün termal direnci üzerindeki sıcaklık farkı (ΔT) voltaja çevrilir. Piranometrelerin özellikleri, termofilin elektrik ve fiziksel özellikleri ile belirlenmektedir. Termofil ve kubbenin özellikleri spektral durumu belirlemektedir. Cam kubbe ve termofilin geometrisinin optimizasyonu sayesinde piranometrenin 180^o açı ile çalışabilmelidir.

Piranometrenin önemli özelliklerinden birisi de; sabit irradyans değerinde detektörün hassasiyeti enstrümanın sıcaklığı ile değişmesidir. Piranometrenin performansını dengelemek için çıkış sinyali elektrik ile dengelenmektedir. CM4 piranometrenin termo elektrik özelliği gereği, -20 ºC ile 0 ºC arası %3, 0 ºC ile 100 ºC arası %2, 100 ºC ile 150 ºC arası %3 sapma görülmektedir. Üretimden sonra her bir piranometrenin sıcaklık bağımlılık testi yapılmalıdır. Şekil ile piranometre sıcaklığı ile sıcaklık bağımlılığının değişimi görülmektedir.

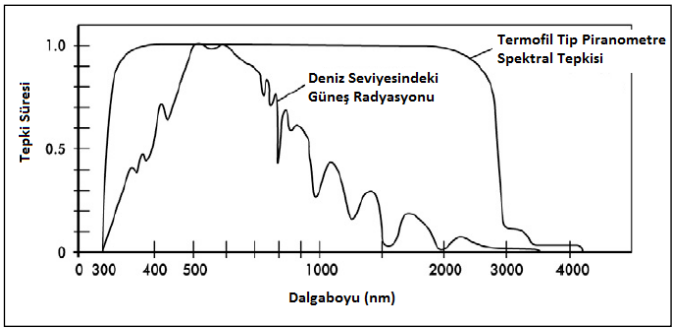


Şekil 3.5. CM4 Piranometre sıcaklık bağımlılık eğrisi.

Uzun dönemli stabiliteyi garanti etmek için CM4 piranometre devresi yüksek sıcaklık direnç malzemeden oluşmaktadır.

Cam Kubbenin Spektral Özellikleri

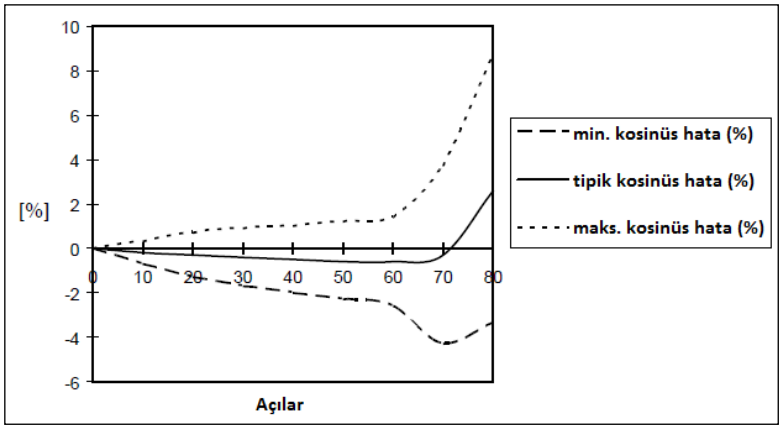
Piranometrelerin spektral özellikleri, cam kubbe ve siyah absorber boyanın özelliklerine bağlıdır. Aşağıdaki Şekilde spektral özellikleri görülmektedir. Burada deniz seviyesindeki güneş radyasyonunun eğrisi ve termofil tip piranometrenin spektral tepkisinin eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.6. CM4 Piranometre sıcaklık bağımlılık eğrisi.

Yönsel / Cosinüs Tepki

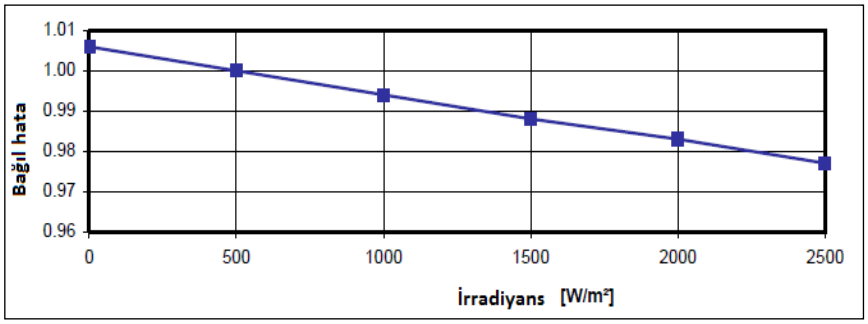
Düz bir yüzeye düşen radyasyon (irradyans veya radyotif akım olarak da bilinir) ölçümü 2 varsayıma dayanmaktadır: Yüzeyin siyah olduğu (dolayısıyla bütün dalga boylarında radyasyonu absorbe edebilir) ve görüş açısının 180º olduğudur. Bu yönsel özelliğin diğer bir açıklaması da sensörün ideal cosinüs tepkisine sahip olduğudur. Mükemmel cosinüs tepkisi, 0º açıda maksimum hassasiyeti; 90º açıda sıfır hassasiyeti göstermelidir. 0º-90º arasında gelen açının cosinüsüne bağlıdır. Şekil ile CM4 Piranometrenin tipik eğrisini göstermektedir.



Şeki 3.7. Piranometre cosinüs tepki eğrisi.

Non-Lineerlik

Non-lineerlik, irradyasyondaki değişimin fonksiyonu olarak hassasiyet farkının hatasıdır. Lineerlik, piranometre tasarım ve gövdesine bağlı olarak değişim gösterir. Detektördeki sıcak ve soğuk bağlantı noktalarındaki termal gradyan nedeniyle non-lineerlik oluşur. Termal gradyanın düşük olması arzu edilmektedir. Piranometre şiddetli radyasyona maruz kalsa bile sensör hassasiyetinin non-lineerliğinin küçük olması gerekmektedir. Non-lineerlik grafiği Şekil ile görülmektedir.



Şekil3.8 . Non-lineerlik.

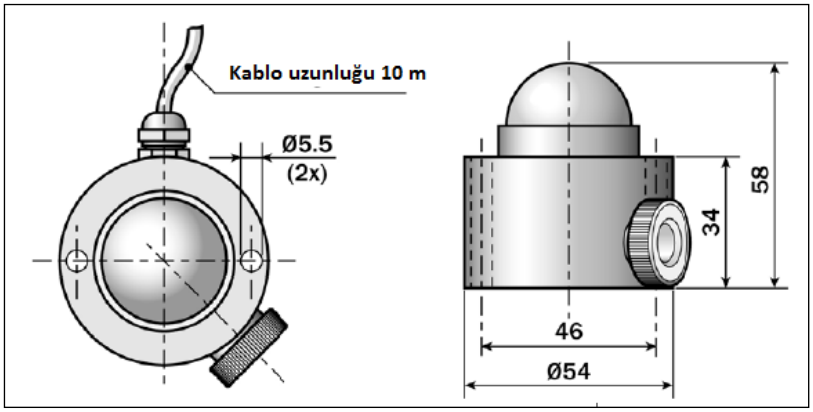
CM4 Piranometrenin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 3.1. CM4 Piranometrenin bazı özellikleri.

Özellik	**Açıklama**
Spektral aralık	300-2800 nm
Hassasiyet	7 MV/ Wm^2 (nominal)
Empedans	500-2000 Ω
Non-lineerlik	Maks %3 (0-2500 W/m^2)
Yönsel Hata	± 20 W/m^2
Tilt açı hatası	%1
İşletme sıcaklığı	-40 ºC ile 150 ºC
Maksimum irradyasyon	4000 W/m^2
Non-stabilite	± %1 yıllık değişim
Alıcı rengi	Siyah
Kubbe Malzemesi	Cam
Kablo	6 dal kablo

Ağırlık	200 gram
Kablo boyu	10 m
Boyutlar	Yükseklik: 5,8 cm Çap : 5,4 cm

Aşağıdaki Şekil ile CM4 Piranometreye ait boyutlar görülmektedir.



Şekil 3.9. CM4 Piranometre boyutları.

Piranometre Montajı

Piranometre siparişi verildiği zaman aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

- Kalibrasyon sertifikası
- Manuel ve diğer teknik dökümanlar

Paket dikkatlice açılmalı ve piranometrenin neme maruz kalmadığı ve kuru olduğuna dikkat edilmelidir. Montajın nasıl yapılacağı, piranometrenin ne amaçla kullanılacağı ile de ilgilidir. İlerleyen sayfalarda farklı montaj çeşitleri anlatılacaktır.

Dış Montaj

Dış ortamda montaj yapılacaksa bir yan kol ile ilgili yükseklikte bir boru veya kafes konstrüksiyon direk üzerine tutturulmalıdır. Böyle bir direk üzerine montaj yapıldığında dikkat edilmesi gereken nokta gün boyunca piranometrenin herhangi bir gölgelenmeye maruz kalmadığının sağlanmasıdır. Kuzey yarım kürede, piranometre direğin güneyinde kalmalıdır.

Piranometre, yerden yansıyan radyasyon ölçümü için de kullanılabilir. Bunun için cam kubbenin yönü yere doğru bakmalıdır. Yansıyan radyasyonun ölçümü yapıldığında (yani albedometre kullanımı) yerden 1.5 m yükseklikte monte edilmelidir. Bu yükseklikte gölgeleme ve yüzey mesafesi kuralı uygun olmaktadır.

Piranometre İşletme ve Bakımı

İrradyans değeri (E), çıkış sinyalinin (U_{emf}) hassasiyete ($S_{sensitivity}$) bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$E = \frac{Uemf}{Ssensitivity}$$

Piranometreler, fazla bakım gerektirmeyen meteorolojik sensöerlerdir. Piranometre temiz tutulmalıdır. Nemi önleyen silika jel (silica gel) turuncu renkte olmalıdır. Kurulama kartuşundaki silika jel tamamı ile şeffaf hale gelince yenisi ile değiştirilmelidir (şeffaf hale gelmesi birkaç ay sürer). Genellikle piranometre satılırken yedek silika jel konulmaktadır. Kurak bölgelerde yılda 2 kez silika jel değiştirilmektedir.

Kalibrasyon

İdeal bir piranometre irradyans seviyesine göre değişen voltaj çıkışına sahip olmalıdır. Bu orana hassasiyet ($S_{sensitivity}$) denir. Kalibrasyon (hassasiyet) faktörü her bir piranometre için ayrıdır. Üreticinin laboratuarındaki referans piranometreye göre belirlenmektedir. Ayrıca bağımsız laboratuarlar tarafından da kalibrasyon yapılabilmektedir. Burada önemli olan referans piranometre ve kalibrasyonu

yapılan piranometrenin aynı siyah kaplama ve cam kubbeye sahip olmalıdır. Kalibrasyon koşulları genellikle aşağıdaki gibidir:

- Civar hava sıcaklığı 20 ^{o}C
- Normal anlık radyasyon 500 W/m^2
- Açık gökyüzü koşulları

Rekalibrasyon (Tekrar Kalibrasyonu)
Piranometrenin hassasiyeti; radyasyona maruz kaldığında zamanla değişmektedir. Bu durum non-stabilite olarak bilinir. Piranometrelerin periyodik olarak en az 2 yılda bir tekrar kalibrasyonunun (rekalibrasyon) yapılması tavsiye edilmektedir.

Ölçümler boyunca bazen negatif değerler görülebilmektedir. Bunun nedeni genellikle cam kubbenin sensörün dış kısmındaki soğuk bağlantılarından farklı sıcaklığa sahip olduğunda görülmektedir. Pratikte bu duruma piranometreye yakın, büyük ve soğuk bir nesne bulunması halinde rastlanılmaktadır. Cam kubbe tarafından yayılan radyasyon sonucunda sensörden cam kubbeye iletim yoluyla ısı transferi meydana gelirken; civar havadan konveksiyon ve ısı iletimi ile de ısı transferi meydana gelir. Soğuyan cam kubbe sensör gövdesinden ısı transferi alır ve ayrıca sensörden net infrared radyasyon alır. Negatif ofset veya değerler her zaman görülebilir fakat termofil sinyalinde gizlidir. Piranometrelere nem girişi kartuş ve kablodan girebilmektedir. Ayrıca kubbenin yapıştırıldığı yapışkan da tamamı ile hava geçirmez değildir. Yukarıdaki sebeplerden dolayı piranometreler sıklıkla anlamsız değerler gösterebilmektedir. Ayrıca böyle bir durumda aşağıdaki kontroller yapılmalıdır:

- Kablo bağlantıları kontrol edilmelidir,
- Kubbe ve kurutma kartuşunun temiz olduğu kontrol edilmelidir. Eğer sensöre su sızmış ise temizlenmelidir,
- Sensör empedansı kontrol edilmelidir,
- Kubbe üzerine nemlenme veya buzlanma olmuş ise temizlenmelidir.

Dünya Meteoroloji Teşkilatı (World Meteorological Organization) Guide 1996'ya göre Piranometre sınıflandırılması aşağıdaki tabloda görülmektedir.

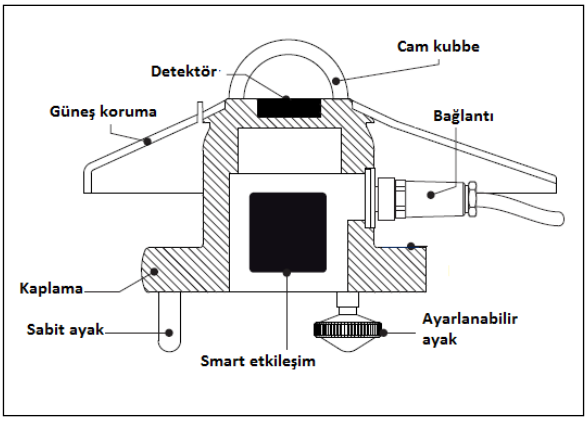
Tablo 3.2. Piranometre sınıflandırması.

Özellikler	**Yüksek Kalite**	**İyi Kalite**	**Orta Kalite**
ISO 9060 Sınıflandırılması	Secondary Standard	First Class	Second Class
Reaksiyon zamanı (%95)	<15s	<30s	<60s
Sıfır Ofset: a) 200 W/m^2 net termal radyasyon reaksiyon b) 5 K/h değişim civar sıcaklığında	 ± 7 W/m^2 ± 2 W/m^2	 ± 15 W/m^2 ± 4 W/m^2	 ± 30 W/m^2 ± 8 W/m^2
Çözünürlük	± 1 W/m^2	± 5 W/m^2	± 10 W/m^2
Stabilite	± 0.8	± 1.5	± 3.0
Radyasyona yönsel reaksiyon (Normali 1000 W/m^2)	± 10 W/m^2	± 20 W/m^2	± 30 W/m^2
Sıcaklık reaksiyon (50 ^{o}C içinde)	± 2	± 4	± 8
Non-lineerlik yüzdesi	± 0.5	± 1	± 3
Spektral Hassasiyet (0.3 ile 3 Um arası)	± 2	± 5	± 10

Kipp & Zonen Smart Piranometre
Bu bölümde bazı piranometreler incelenecektir. Şekil ile bu piranometre görülmektedir.

Şekil 3.10. Smart Piranometre.

Teknik resmi aşağıda görülmektedir.

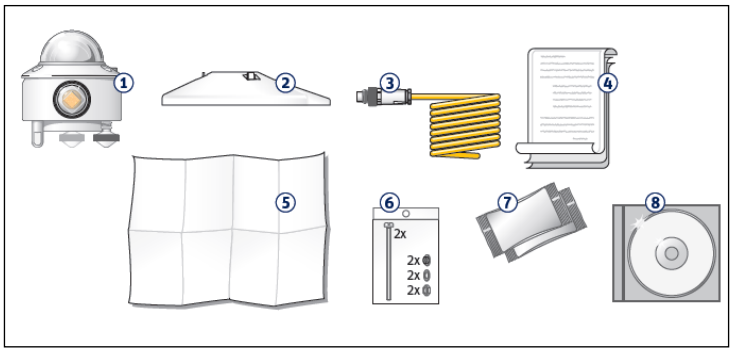


Şekil 3.11. Smart Piranometre teknik resmi.

Piranometrenin kutusu açıldığında aşağıdakilerin bulunması gerekmektedir:

1) Piranometre
2) Güneş Ekranı
3) Kablolar
4) Kalibrasyon Sertifikası
5) Tanıtım Şeması
6) Piranometre sabitleyici kiti
7) 2 nem alıcı torba
8) Yazılım CDsi.

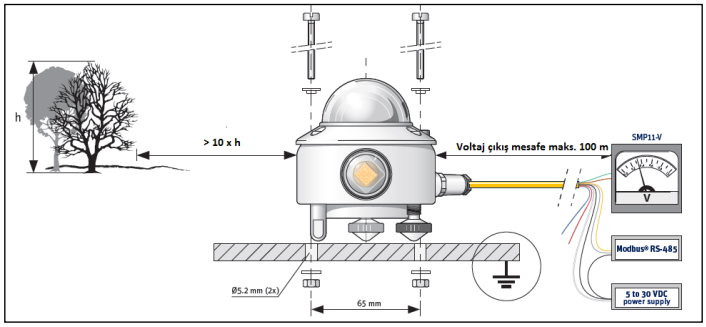
Yukarıda anlatılanlar aşağıda şematize edilmiştir.



Şekil 3.12. Piranometre konfigürasyonu.

Piranometrenin montajı yapılırken dikkat edilmesi gereken kurallar vardır. İlerleyen sayfalarda bunlar anlatılacaktır. İdeal olarak radyometrenin monte edileceği yer, detektörün görüş alanını etkileyecek

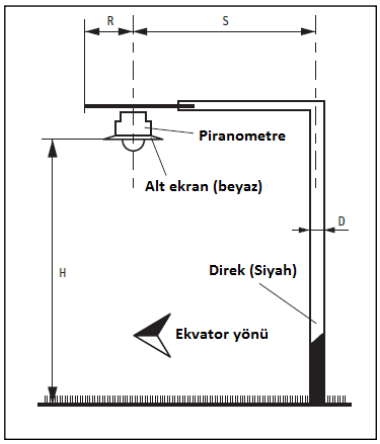
engellerden uzakta olmalıdır. SMP tipi piranometreyi monte ederken civar engellerin durumuna da dikkat edilmelidir. Civarda h yüksekliğinde bir ağaç var ise, piranometre en az 10xh mesafede olmalıdır.



Şekil 3.13. Piranometre montaj esasları.

Yansıyan Global İrradyasyon Ölçümü

Piranometre, ters çevrildiği zaman yansıtılan global irradyasyon (reflected global irradiance) ölçümleri yapılabilmektedir. Yerden ölçüm yüksekliği yüzeyin pürüzsüzlüğüne göre değişmektedir. Dünya Meteoroloji Teşkilatı, 1-2 m arası ölçüm yüksekliği önermektedir. Eğer hafif çimle kaplı bir arazi ise Şekil ile ölçüme ait çizim görülmektedir.

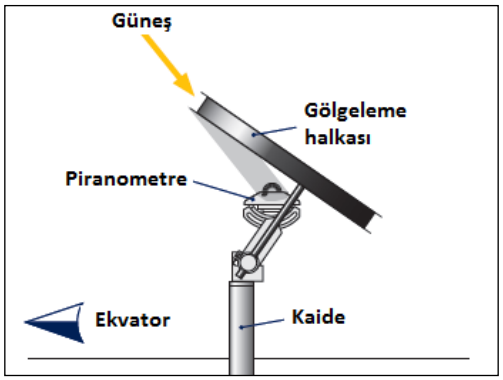


Şekil 3.14. Yansıtılan global irradyans ölçümü.

Ölçüm direği üzerindeki herhangi bir aksam, piranometre ile etkileşime neden olmamalıdır.

Yatay Difüze Radyasyon Ölçümü

Gökyüzünden gelen radyasyon ölçümünün yapılabilmesi için piranometrenin kubbesi Şekilde görüldüğü gibi bloke edilmelidir. Statik bir gölgeleme halkası bu amaç için kullanılabilir.

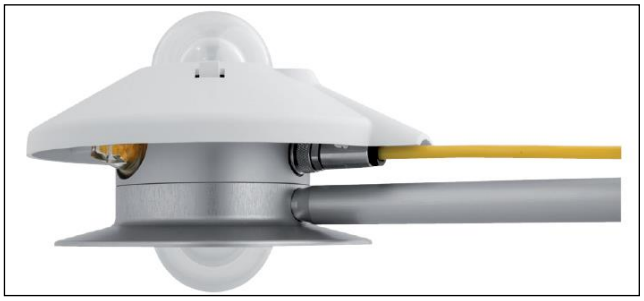


Şekil 3.15. Yatay difüze radyasyon.

Gölge halkasına diğer bir alternatif güneş izleme sisteminin kullanılmasıdır.

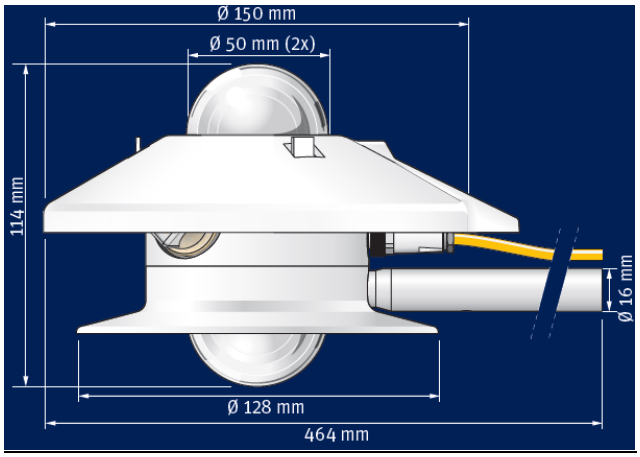
3.2.2 Albedometre

Albedo ölçümü için 2 adet piranometre kullanılmaktadır. Piranometrelerden bir tanesi gelen global radyasyonu (incoming global radiation); diğeri de yeryüzünden yansıtılan radyasyonu ölçmede kullanılmaktadır



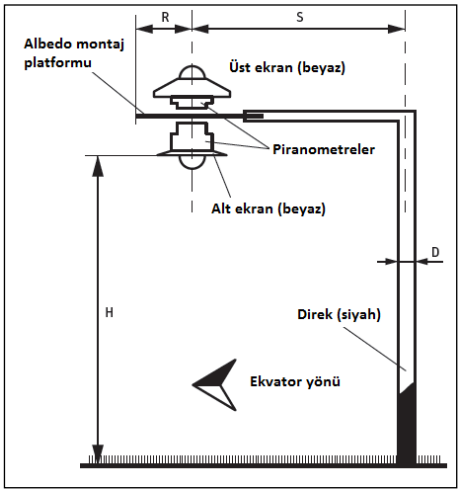
Şekil 3.16. Albedometre.

Tipik bir Albedometre boyutları aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.17. Albedometre boyutları.

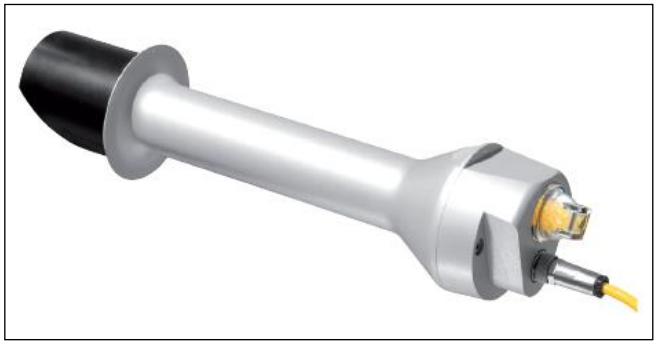
Albedo her iki irradyasyonun arası olup 0 (kapalı) ile 1(açık) arasında değişmektedir. Şekil ile albedo ölçüm sistemi görülmektedir.



Şekil 3.18. Albedo ölçüm sistemi.

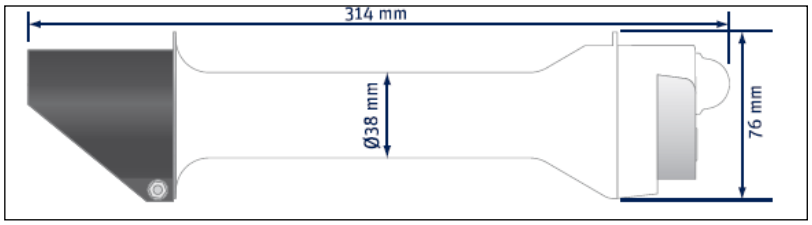
3.2.3 Pirhelyometre

Pirhelyometre, 300 ile 3000 nm arasındaki direk global radyasyon ölçümünde kullanılan meteorolojik sensördür. Pirhelyometre, Şekil ile görülmektedir.



Şekil 3.19. Pirhelyometre.

Pirhelyometreler su geçirmez ve atmosfer koşullarına dayanıklı olmakla birlikte hassas bazı aksamları vardır. Tipik boyutları aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 3.20. Pirhelyometre boyutları.

Pirhelyometredeki irradyasyon değeri, çıkış sinyalinin (U_{emf}), hassasiyete (S) bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Direk güneş radyasyonunun hesaplanması aşağıdaki formülledir.

$$E_{DS}= \frac{Uemf}{S}$$

Eşitlikte kullanılan parametreler;

E_{DS}: Güneş radyasyonu (W/m^2)
U_{EMF}: Radyometre çıkışı (UV)
S: Radyometre hassasiyeti ($UV/W/m^2$)

Pirhelyometre ölçüsünün yüksek kalitede olabilmesi için radyometrenin bakımının muntazam yapılması önemlidir. Genellikle bakım her sabah yapılmaktadır. Ayrıca sensör içerisinde bulunan nem ölçerinde kontrolü düzenli birşekilde yapılmalıdır.

Pirhelyometredeki pencere, gelen radyasyonun %97-98 civarını yansıtır ve detektör tarafından gelen radyasyon absorbe edilir.

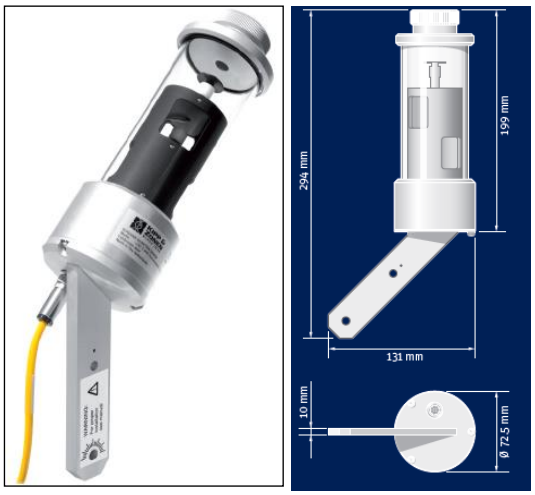
Detektör, birçok termokuplaj çiftinin elektriksel bağlantısından meydana gelmiştir. Termokuplaj bağlantı boktasının termal radyasyonu absorbe etmesi aktif (veya sıcak) olarak adlandırılır ve sıcaklığın artmasına sebep olur.

Aktif birleşme ve referans (soğuk) birleşme noktaları arasındaki sıcaklık farklılığının diferansiyeli sabit sıcaklık ortamında tutularak elektromotive bir kuvvet oluşturulur. Oluşan bu kuvvet, sıcaklık farkının diferansiyeli ile doğru orantılıdır. Buna termoelektrik etki denmektedir. Pirhelyometrenin hassasiyeti termofile ve monjına göre değişmektedir. Her bir termofilin özelliği aynı olduğundan dolayı, bütün radyometrelerin kalibrasyon değerleri aynıdır.

Pirhelyometrelerin kaplaması genellikle anodize alüminyum ile yapılmaktadır ve bunun sonucunda hafif ancak zor koşullara dayanıklı sağlam bir yapı oluşmaktadır.

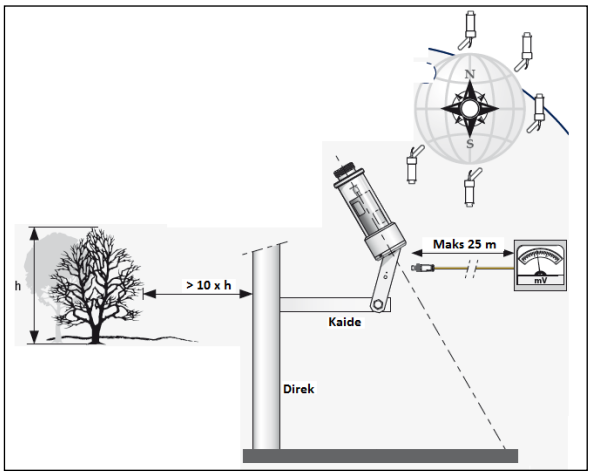
3.2.4 Güneşlenme Süresi Ölçümü (Sun Shine Duration Measurement)

Dünya Meteoroloji Organizasyonu tarafından yapılan tanıma göre, güneş radyasyonunun 120 W/m^2 seviyeyi geçtiği saatler güneşlenme süresi (sunshine duration) olarak kabul edilmektedir. Şekil ile görülmektedir.



Şekil 3.21. Güneşlenme süresi ölçüm sensörü (Sunshine duration measurement sensor).

Güneşlenme süresi ölçüm sensörü, montaj kuralları aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.22. Güneşlenme süresi ölçüm sensör montajı.

3.2.5 Global Radyasyon Algılayıcısı

Bilindiği gibi, güneşten elektromanyetik dalgalar halinde yayılan kısa dalga boylu radyasyondur. Bu radyasyonun atmosferde soğurulma, dağılma ve yansıma gibi işlemler sonucunda yere ulaşan kısmı ikiye ayrılır:

- Direk Radyasyon: Güneşte, paralel ışınlar halinde yere ulaşan radyasyona doğrudan (direkt) güneş radyasyonu denir.
- Difüz Radyasyon: Güneşten atmosfere girmiş olan güneş radyasyonun bulutlar, kuru hava ve toz molekülleri tarafından çeşitli şekilde yansıtılıp dağıtıldıktan sonra tekrar yansıma sonucu yeryüzüne dönen kısmına yayılan (difüz) radyasyon denir.

Yeryüzüne ulaşan doğrudan ve yayılan radyasyon toplamına global güneş radyasyonu denir. Güneş radyasyonu (Güneşlenme şiddeti) üç farklı metotla ölçülür:
a) Termal Resistans: Güneş enerjisi, sıcaklıkla direnci değişen siyaha boyalı disk tarafından soğurulur. Diskteki direnç değişimi ölçülerek güneşlenme miktarı ölçülmüş olur.
b) Termoelektrik: Birbirine bağlı farklı iki tipteki metallerin bağlantı noktasında güneş radyasyonu toplanır. Isı etkisiyle metallerin bağlantı noktasında mV seviyesinde voltaj üretilir. Radyasyon şiddeti arttıkça voltaj artar. Voltaj ölçülerek radyasyon ölçülmüş olur.
c) Fotoelektrik: Işığa duyarlı fotoelektrik malzeme güneş radyasyonu ile voltaj üretirler. Üretilen voltaj ölçülerek global radyasyon ölçülmüş olur.

Güneşlenme süresini ölçen aletler; güneş ışınlarının süresini veya günün ne kadar kısmının güneşli geçtiğini kaydeden aletlere helyograf denir. Helyograf aleti, güneşten gelen direkt güneş ışınlarını bir diyagram üzerine kaydetme prensibine göre çalışmaktadır.

Şekil 3.23. Helyograf.

Güneş irradyansı en çok ölçülen parametre olmasına rağmen PV sistem tasarımında kullanılan daha yaygın parametre ise güneşlenme miktarıdır (solar insolation). Güneşlenme miktarı belirli bir lokasyonda belirli bir zaman boyunca algılanan güneş enerjisi toplamıdır. Genellikle kWh/m^{2}gün birimi ile kullanılır. Güneşlenme miktarı güneş irradyansından farklı olarak verilen bir zaman periyodunda ortalaması alınır. Güneşlenme miktarı genellikle PV sistemlerinin tasarımında kullanılırken güneş irradyansı PV sistemlerinin performansını test etmek için kullanılmaktadır. Belirli bir lokasyon için güneş radyasyonu tipik meteorolojik ortalama yıl verisi, güneşlenme miktarları (günlük, aylık, yıllık), eş akı konturları, güneş ışığı saatleri, uydu bulut kapalılığına dayalı güneşlenme miktarları ve güneş radyasyonu hesaplamaları gibi değişik yollarla verilebilmektedir. GES projelerinin veriye dayalı projelendirilmesi ve finansman çalışmalarında saha, meteoroloji istasyonu ve uydu görüntülerinden elde edilen verilerin birlikte kullanılması gerekmektedir. Saha güneş radyasyonu verilerinin uzun dönemli değişkenlikleri, zaman ve mekan çözünürlükleri birlikte kullanım ile ancak istenilen doğruluk seviyesine gelmektedir. Bir çok uygun güneş santralı sahasında yeteri uzunluk ve istenilen zaman ve mekan çözünürlüğünde veri bulunmadığından sahada yapılacak 1-3 yıl arasındaki ölçüm sonuçlarının yukarda verilen veri kaynakları ile beraber kullanılması önem arz etmektedir.

3.3 Güneş Ölçüm İstasyonunda Kullanılan Diğer Yardımcı Meteorolojik Sensörler

Güneş ölçüm istasyonunda diğer meteorolojik parametrelerin de ölçümnün yapılması gerekmektedir. Bunlar arasında rüzgar hız ve yönü, sıcaklık, basınç ve nem gelmektedir.

3.3.1 Anemometre

Anemometre kelimesi Yunanca'dan gelmektedir. Yunanca'da "anemos" rüzgar anlamına gelmektedir; metre de ölçüm demek olduğundan, anemometre en basit anlamı ile "rüzgar ölçer" demektir. Rüzgar ölçümlerinde kullanılan kepçe (cup) anemometre en yaygın olarak kullanılan tiptir. Şekil, farklı firmalara ait tipik 3-kepçeli anemometrelerini göstermektedir. Bu tip anemometrelerin 2 özelliği vardır: birisi yönden bağımsız (omni-directional) olması, diğeri de sadece düşey eksenine dik olarak yerleştirilmesidir. Rüzgar enerji potansiyeli belirleme amaçlı ölçümlerde çoğunlukla kepçe anemometreler kullanılmaktadır.

Şekil 3.24. Kepçe anemometreler.

3.3.2 Yön Sensörü

Ölçüm yapılan bölgedeki rüzgar, belirli hakim bir yönden esebileceği gibi, farklı yönlerde ve farklı yüzdelerde de esebilmektedir. Rüzgar yönlerinin değişen frekanslarını ve rüzgar hızlarının dağılımını göstermek için, rüzgar hızı ve yönünün meteorolojik gözlemleri esas alınarak, rüzgar gülü şeklinde bir çizim yapılmaktadır. Bir rüzgar gülü 8 veya 16 yöne göre olabilir, ya da Avrupa Rüzgar Atlası'nda esas

alındığı gibi 12 yöne, 30'ar derecelik yön aralıklarına göre de olabilir. Şekil ile NRG Inc firmasına ait bir yön sensörü verilmiştir.

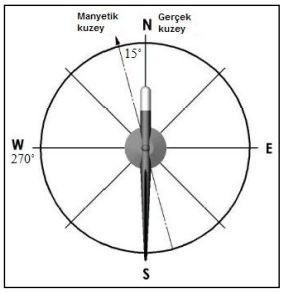
Şekil 3.25. NRG #200P yön sensörü.

Tablo ile NRG #200P yön sensörüne ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.3. NRG #200P yön sensörü.

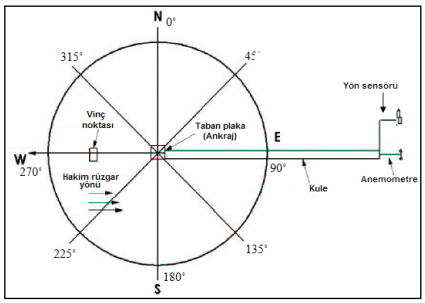
Özellik	**Açıklama**
Çıkış gerilimi	1V – 15V DC
Çıkış sinyal aralığı	0 Hz - 125 Hz
Ömür	50 milyon dönme (2-6 yıl)
Rotor süpürme çapı	27 cm
Montaj	13 mm çapında yankol üzerinde
Gerekli malzemeler	5 cm vida anahtarı, elektrik bandı
İşletme sıcaklık aralığı	-55 °C - 60 °C
İşletme bağıl nem aralığı	0 - 100% RH
Ağırlık	0.14 kg
Boyutlar	21 cm uzunluk, 12 cm yükseklik

Yön sensörü hareketinin daha iyi anlaşılabilmesi için manyetik denklinasyon kavramı açıklanmalıdır. Bilindiği gibi, dünyanın manyetik alanı uniform olmadığından, manyetik kutuplarla gerçek coğrafi kutuplar üst üste gelmez. Ayrıca pusula da gerçek kutbu değil, manyetik kutbu göstermektedir. Coğrafik kutup ile manyetik kutup arasındaki bölgeden bölgeye değişen bu farka "manyetik denklinasyon" denir. Yani, manyetik denklinasyon, gerçek kuzey (coğrafi kuzey) ile pusulanın gösterdiği yön olan manyetik kuzey arasındaki yatay açıdır. Manyetik denklinasyon, pusulanın arazide gösterdiği hata açısı olarak ölçülmektedir. Gerçek kuzeyden batı ile yaptığı açı manyetik kuzeyin derecesini gösterir. Örneğin İstanbul 15 derece batı manyetik denklinasyon vardır. Yani manyetik kuzey İstanbul'da gerçek kuzeyin 15 derece batısındadır. Mersin'de manyetik kuzey 27 derece doğu da denildiğinde, manyetik denklinasyonun 27 derece doğu olduğu anlaşılmalıdır. Dünyanın manyetik alanı, zamanla çok az bir değişim gösterir. Dolayısıyla ölçüm yapılan arazideki manyetik denklinasyon da zamanla değişir. Bu farklılıktan dolayı, rüzgar yön sensörünün montajını yaparken manyetik kuzeyi gösteren güncel denklinasyon haritalarından (isogonic map) yararlanılmalıdır. Daha sonra, analiz için hesaplamalar yapılırken gerektiğinde kullanılan yazılım programına yön düzeltme faktörü girilebilir. Yön sensörü montajı yapılırken pusula ile manyetik kuzey yönlerinden birisine ayarlanarak konulabilir. Genellikle manyetik yön tercih edilir. Şekil ile gerçek kuzey ve manyetik kuzey yönü gösterilmiştir. Manyetik kuzey, gerçek kuzeyin 15 derece batısındadır.



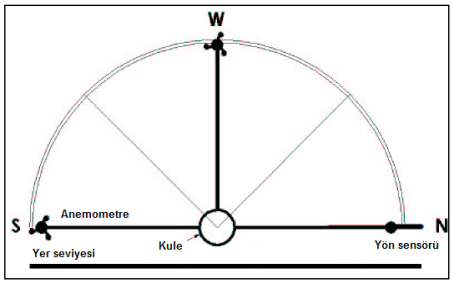
Şekil 3.26. Gerçek ve manyetik kuzey.

Ölçüm direği doğu-batı yönünde yatırıldığında, pusula ile yön sensörünün isteğe bağlı olarak manyetik kuzey veya gerçek kuzey yönünü gösterecek şekilde montajı yapılır ve anemometrede, rüzgarın hakim yönüne doğru monte edilmiştir.



Şekil 3.27. Anemometre ve yön sensörü montajı.

Yön sensörünün üzerindeki kuzey işareti ile aynı konuma getirilerek sensörü tutan çelik pim takılır. Direk kaldırıldığında yön sensörü gerçek kuzeyi gösterecektir. Anemometre, ölçüm direğine dik bir şekilde, yön sensörü de yan kola monte edilmelidir.



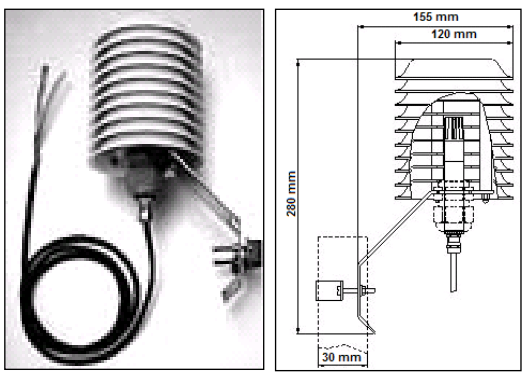
Şekil 3.28. Yan kola monte edilen yön sensörü.

3.3.3 Sıcaklık Sensörü

Termometre olarak da bilinen sıcaklık sensörü genellikle ölçüm direğinin 2. veya 3. metresine monte edilir.

Şekil 3.29. Sıcaklık sensörü.

Amerikan NRG firmasına ait sıcaklık sensörü Şekil ile verilmiştir. Bu sensörler direk güneş radyasyonundan korunacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.30. NRG marka sıcaklık sensörü.

NRG #110S marka sıcaklık sensörüne ait özellikler Tablo ile verilmştir.

Tablo 3.4. NRG #110S sıcaklık sensörü özellikleri.

Özellik	**Açıklama**
Sensör ölçüm aralığı	-40 °C ile 52.5 °C arasında (-40 °F - 126.5 °F)
Sinyal tipi	Lineer analog gerilim
Doğruluk seviyesi	+/- 0.33 °C
Çıkış sinyal aralığı	0 V – 2.5 VDC
Malzeme	Sensör alüminyum epoksi Radyasyon koruma UV-dayanıklı termoplastik
Ömür	10 yıl
Montaj	13 mm çapında yankol üzerinde
Gerekli malzemeler	5 cm vida anahtarı, elektrik bandı
İşletme bağıl nem aralığı	0 - 100% RH
Ağırlık	0.47 kg
Boyutlar	Sensör 30.5 mm (yükseklik) ve 12.7 mm (çap) Radyasyon koruma ile 127 mm (h) 127 mm (çap)

3.3.4. Basınç Sensörü (Barometre)

Basınç, meteorolojik elemanların en önemlilerindendir. Barometrik basınç bir yüzey üzerindeki, bu yüzeyden atmosferin tepesine kadar olan hava sütununun her birim alanı etkileyen kuvvettir. NRG firmasına ait #BP20 barometrik basınç sensörü Şekil ile verilmiştir.

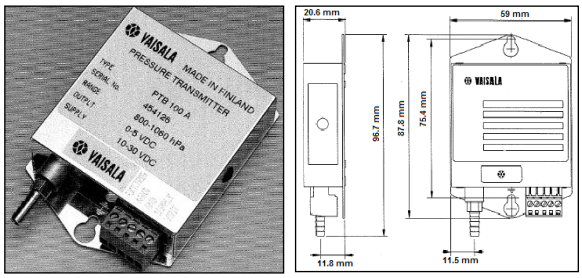
Şekil 3.31. NRG #BP20 basınç sensörü.

NRG #BP20 basınç sensörüne ait teknik özellikler Tablo 3 ile verilmiştir.

Tablo 3.5. NRG #BP20 basınç sensörü teknik özellikleri.

Özellik	**Açıklama**
Uygulama alanları	Rüzgar enerji uygulamaları Meteorolojik amaçlar Çevre amaçlı
Sinyal tipi	Lineer analog gerilim
Doğruluk	+/- 1.5 kPa
Gerekli gerilim	7 V .. 35 V DC
Gerekli akım	15 mA maksimum, 8 mA tipik
Bağlantı	Kablo renklerine göre: Kırmızı: Sensör güç kaynağı Beyaz: Çıkış sinyali Siyah: Sensör topraklaması
Kablo uzunluğu	1.5 m Kablo çapı: 4.8 mm
Ağırlık	0.1 kg
Boyutlar	57 mm çap 112 mm uzunluk

Çift silikon tabakasının arasına cam bir tabaka konularak ayrıştırılması ile yapılan Vaisala PTB 100 marka basınç sensörü Şekil 3.40 ile verilmiştir.



Şekil 3.32. Vaisala basınç sensörü.

Vaisala PTB 100 marka basınç sensörüne ait diğer teknik özellikler Tablo ile verilmiştir.

Tablo 3.6. Vaisala basınç sensörüne ait özellikler.

Özellik	**Açıklama**
Ölçüm aralığı	0 hPa..2000 hPa
Doğruluk	± 0.3 hPa
Çözünürlük	0.1 hPa
Çalışma gerilimi	10 - 30 V DC ve 4 mA
Çalışma aralığı	-40 °C ... + 60 °C
Koruma	IP 30 / IP 65
Ağırlık	0.130 kg
Boyutlar	97 mm (yükseklik) 21 mm (kalınlık) ve 50 mm (en)
Çıkış sinyal aralığı	0..5 V DC

3.3.5. Nem Sensörü

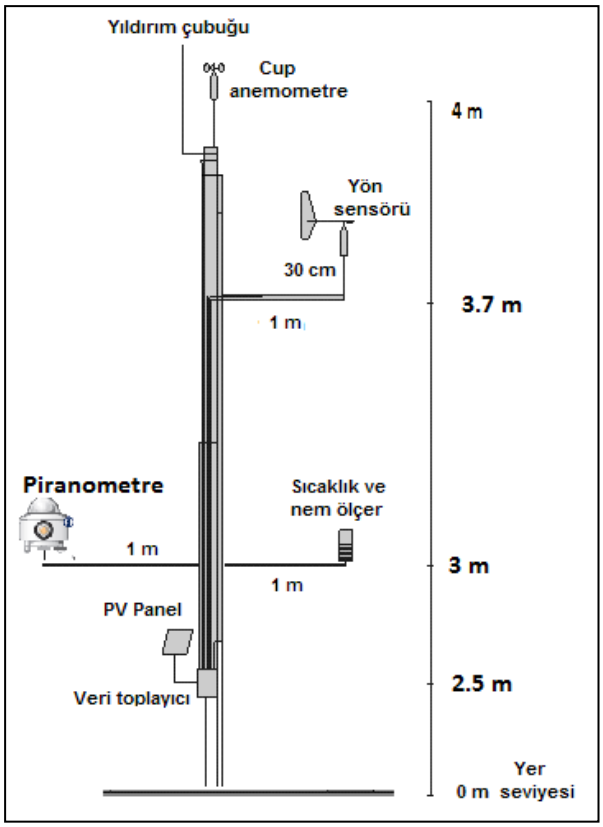
Bağıl nem, verilen bir sıcaklıkta havanın içerdiği nem miktarının, aynı sıcaklıkta içerebileceği maksimum nem miktarına oranı olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle bağıl nem, havanın buhar içeriğinin kapasitesine oranıdır ve yüzde olarak ifade edilir:

Bağıl Nem (RH) = (Aktüel Subuharı Miktarı / Maksimum Subuharı Miktarı) * 100

Rüzgar ölçüm amaçlı kullanılan nem sensörleri, tek veya bazen de sıcaklık sensörü ile beraber kombine olabilmektedir. Neme karşı duyarlı olan materyal karbondan yapılmış olup nem değişiminde direnci değişmektedir, bu direnç değişiminden yararlanılarak bağıl nem ölçülmektedir.

Şekil 3.33. Nem sensörü.

Şimdiye kadar anlatılanlar ışığında tipik bir güneş ölçüm istasyonu aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.34. Tipik bir güneş ölçüm istasyonu.

Güneş Ölçüm Zorunluluğu

Kitabın yazıldığı tarihlerde EPDK tarafından 22 Şubat 2012 tarih ve 28212 sayılı Resmi Gazete'de "RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİNE DAYALI LİSANS BAŞVURULARINA İLİŞKİN ÖLÇÜM STANDARDI TEBLİĞİ" yaynlanmıştır. Tebliğin 3. Bölümü Güneş Ölçümlerine ayrılmış olup aşağıdaki koşulları içermektedir:

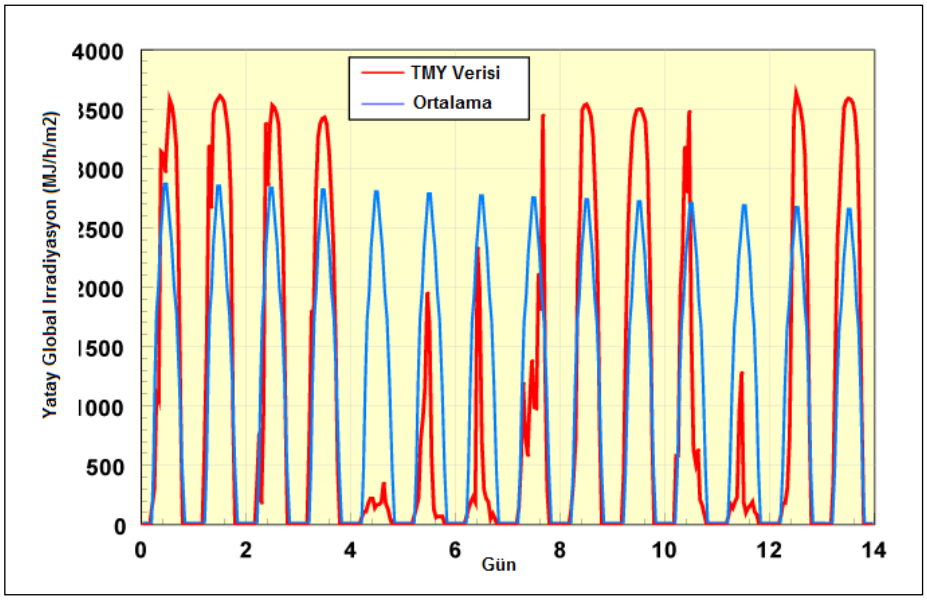
- Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi kurmak üzere lisans başvurusunda bulunan tüzel kişiler tarafından, tesisin kurulacağı saha üzerinde, bu Tebliğ kapsamında düzenlenen şartlara uygun olarak elde edilmiş en az altı ayı yerinde ölçüm yapılmış olmak kaydıyla asgari bir yıl süreli veri sunulması zorunludur. Lisans başvurusu esnasında Güneş Ölçüm İstasyonu Kurulum Raporu ve Güneş Ölçüm Sonuç Raporu Kuruma sunulur,
- Ölçüm istasyonu kurulması için gerekli olan izinlerin alınması ilgili tüzel kişinin sorumluluğundadır,
- Ölçüm istasyonu, güneş enerjisine dayalı üretim tesisinin kurulacağı lisans başvurusu yapılan santral sahası alanında yer almalıdır,
- Güneş Ölçüm İstasyonu Kurulum Raporunu onaylama yetkisi yerinde inceleme yapılması kaydıyla Meteoroloji Genel Müdürlüğünde olup raporun onaylandığı tarih güneş ölçümüne başlama tarihi olarak kabul edilmektedir,
- Güneş Ölçüm Sonuç Raporu, Meteoroloji Genel Müdürlüğü ve lisans başvurusunda bulunacak tüzel kişi tarafından müştereken onaylanır,
- Güneş enerjisine dayalı lisans başvurularında lisans başvurusu kapsamındaki tesisin kurulacağı alandaki güneş ölçüm istasyonunda TS ISO 9060 standardına uygun ve kalibrasyon sertifikalı piranometre kullanılarak dakikalık bazda kayıt edilen, yer yüzünün yatay düzlemindeki bir metrekaresine gelen toplam güneş radyasyonu ölçülür. Ölçüm istasyonunda ayrıca sıcaklık sensörü, bağıl nem sensörü, rüzgar hızı sensörü ile ölçüm kayıt cihazı bulunmalıdır,
- Ölçüm istasyonda kullanılan piranometrenin TS ISO 9060 standardı kapsamındaki sertifikası, kalibrasyon sertifikası vb. belgeler başvuru dosyasında yer alır,
- Güneş ölçüm istasyonunda, en az altı ayı yerinde ölçüm yapılmış olmak kaydıyla asgari bir yıl süreli veri sunulması zorunludur,

- Yerinde yapılan en az altı aylık ölçüm süresi içerisinde, işletme ve/veya bakım veya sair nedenlerle veri kaybı yüzde 20'den daha fazla olamaz. Veri kaybının yüzde 20'ye kadar olduğu durumlarda kayıp veriler, mevcut veriler veya en yakın meteoroloji istasyonu verilerinden faydalanılarak istatistiki metotlar (enterpolasyon vb.) kullanılarak elde edilir.

3.4 Güneş İrradyans Veri Seti Analizi

Güneş radyasyonunun en doğru ölçümleri ilgilenilen sahaya yerleştirilen piranometre ile birkaç yıl süre ile alınacak değerlerle yapılmaktadır. Ölçüm süresinin 10 yıl veya daha fazla olması daha doğru planlamaların yapılmasına katkıda bulunur. Fakat bu uzunlukta saha verisi bulmak kolay değildir. Bu yüzden uzun dönemli verisi olan meteoroloji istasyonları veya uydu görüntülerinden çıkarılmış veriler ile yapılacak korelasyonlarla uzun dönemli güneş verisinin değişimi hakkında bilgi edinilebilmektedir. Fakat bu yollarla elde edilmiş veri pratik görülmemektedir. PV sistemlerinin dizaynında bunun yerine güneş radyasyonunun değişimini elde etmek için başka yöntemlerin kullanılması daha pratik olmaktadır.

Veri boyutunu azaltmada kullanılan en basit yöntem verinin ölçüm süresi üzerinden ortalamasını almaktır. Bu formda kullanılan veri, günlük, aylık ve yıllık radyasyon verisi olarak adlandırılır. Basit sistem tasarımında bu tip veri kullanışlı olurken güneş radyasyonu verisinin günlük ve daha küçük zaman ölçeklerindeki değişimleri kaybolmaktadır. Günlük değişimlerin kaybolması sistem tasarımı ve performans analizleri için kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden hemen hemen her gün 5kWh/gün değeri, 8 kWh/gün değerinden veya bulutlu günlerdeki 2 kWh/gün oldukça farklı durmaktadır.



Şekil 3.35. Tipik meteorolojik yıl (TMY) verisinin ortalama güneş radyasyonu verisi ile karşılaştırılması.

Güneş radyasyonu verileri için en yaygın kullanılan format, verideki günlük değişimleri ihtiva eden tipik ortalama meteorolojik yıl verisidir. Tipik ortalama meteorolojik verisi bir sonraki bölümde açıklanmıştır. Bununla birlikte yılın her bir ayı için ortalama güneş radyasyonu verisi geniş bir şekilde güneş enerjisi uygulamalarının kaba tahminlerini yapmak için kullanılmaktadır. Büyük veri setlerinden çıkarılan diğer bir önemli veri azaltma yöntemi -az kullanılmasına rağmen- belirli kapalılıkta bulutlu günlerin meydana gelme olasılığının belirlenmesidir.

Tipik Meteorolojik Yıl Verisi (TMY)

Lokal güneş iklimini tanımlamada kullanılan en yaygın yöntem tipik meteorolojik yıl (TMY) verisinin belirlenmesine dayanır. TMY verisini belirlemek için uzun yıllar boyunca saatlik aralıklarda değişik ölçümler yapılmaktadır. Yıllık verinin basit ortalaması verideki değişim miktarı olduğundan daha az tahmin eder. Bu yüzden lokasyonu daha iyi temsil eden aylık değerler seçilir. Her bir ay için, ölçüm periyodu süresince her bir aydaki ortalama radyasyon değerleri ile birlikte tüm ölçüm periyodu üzerinden ortalama radyasyon belirlenir. Bir yılı tamamlamak için bu işlem tüm aylar için yapılır. Daha sonra tüm aylar bir araya getirilerek saatlik örneklemeli tam bir yıllık veri elde edilir. TMY verisi için katı bir standart mevcut değildir. Bu yüzden kullanıcı yapılacak uygulamaya uygun olacak veriyi

ayarlayabilmektedir. Örnekleme periyodlarına gerekli özen gösterilerek bu işlem güneş enerjisi uygulamaları için kolaylıkla yapılabilmektedir. Aşağıda örnek bir TMY verisi görülmektedir.

Ay	Gün	Saat	Global Irradyasyon x100MJ/h/m^2	Takipli Direkt İrradyasyon x100MJ/h/m^2	Sıcaklık (x10°C)	Rüzgar Hızı (x10 m/s)	Islak Hazneli Termometre Sıcaklığı (x10°C)	Rüzgar Yönü	Bulut Kapalılığı
1	1	1	0	0	130	0	99	00	7
1	1	2	0	0	127	10	98	04	0
1	1	3	0	0	118	7	94	04	0
1	1	4	0	0	109	3	90	04	1
1	1	5	0	0	100	0	86	00	1
1	1	6	33	106	117	3	96	14	1
1	1	7	110	260	133	7	106	14	0
1	1	8	186	311	150	10	115	14	0
1	1	9	257	342	183	7	133	14	0
1	1	10	317	351	217	3	151	14	0
1	1	11	356	353	250	0	167	00	0
1	1	12	381	357	272	14	166	12	0
1	1	13	387	362	293	27	165	12	0
1	1	14	365	359	315	41	164	12	0
1	1	15	324	355	314	43	164	13	0
1	1	16	267	348	314	45	163	13	0
1	1	17	198	336	313	46	162	14	0
1	1	18	120	277	307	38	162	14	0
1	1	19	44	147	300	29	160	15	0
1	1	20	2	12	294	21	159	15	0
1	1	21	0	0	274	26	154	15	0
1	1	22	0	0	253	31	148	16	0
1	1	23	0	0	233	36	143	16	0
1	1	24	0	0	235	36	142	16	0

TMY verisi meteorolojik uygulamalarda çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Buna rağmen güneş enerjisi uygulamalarında özellikle PV sistemlerinde bu boyutta bir veri seti ile çalışmak gerekli değildir. Verilen parametrelerden genellikle zaman ve radyasyon verileri kullanılmaktadır. Bununla birlikte daha ileri modeller sıcaklık ve rüzgar hızını da hesaplamalara katarak çalışma yapabilmektedir. Genellikle PV uygulamalarında gerekli olan ilave bir parametre de difüz radyasyon miktarıdır. Yatay yüzeye düşen difüz radyasyon (D_h) miktarı global radyasyon (G_h), direkt normal takip sistemindeki radyasyon (I_t) ve yükseklik (el) bilgilerinden yararlanılarak aşağıda verilen formülasyonla hesaplanabilmektedir.

$$D_h = G_h - I_t \sin(el)$$

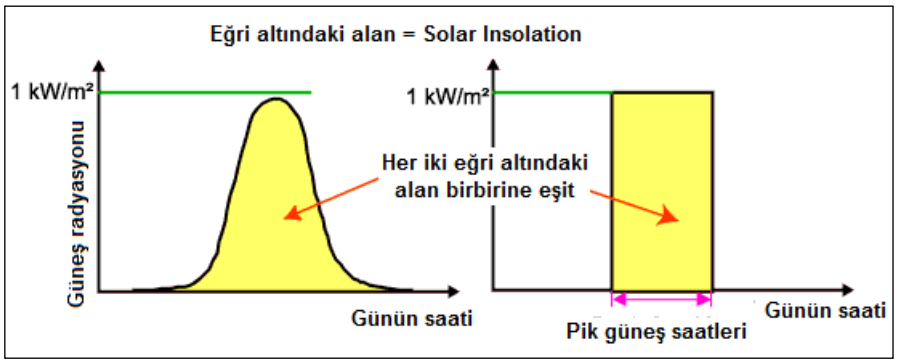
Difüz radyasyon gökyüzünde üniform bir dağılım göstermez. Örneğin, güneş etrafındaki alan (*circumsolar)* önemli ölçüde geri kalan gökyüzü alanından daha parlaktır. Difüz bileşeni hesaplamak için yaygın bir şekilde Perez Modeli olarak adlandırılan model kullanılır. Model gökyüzünü belirli bileşenlere ayırarak ölçülen radyasyon değerleri ile bu bölgelerin boyutları ve bağıl yoğunluklarını hesaplar.

Ortalama Güneş Radyasyonu

TMY verisi PV sistem simülasyonunda yaygın olarak kullanılmasına rağmen verilen her hangi bir lokasyondaki ortalama günlük güneş radyasyonu basit sistem analizleri için genellikle yeterli görülmektedir. Bu veri, yatayda veya dik yüzeyde (güneşi izleyen) ölçülmüş şekliyle ifade edilebilmektedir. Her iki durumda da modülün eğim açısını hesaba katmak için bazı düzeltmelerin yapılması gerekir. Çünkü modül eğim açısında modül üzerindeki radyasyon değerlerinin ortaya konulması gerekir.

Pik Güneş Saatleri, kWh/m^{2}gün birimindeki ortalama günlük güneş radyasyonu (güneşlenme miktarı) bazen "pik güneş saati" olarak tanımlanır. Pik güneş saati terimi, belirli bir yerdeki güneşin belirli saatlerde maksimum oranda ışıması neticesinde oluşan güneşlenme miktarına (güneş radyasyonuna) karşılık gelir. Pik güneş radyasyonu, 1 kW/m^2 olduğundan pik güneş saatlerinin sayısı ortalama günlük güneşlenme miktarıyla nümerik olarak benzerdir. Örneğin, günde 8 kWh/m^2 güneş radyasyonu gelen

bir lokasyon için günde 8 saat 1 kW/m^2 değerinde ışımaya maruz kaldığı söylenebilir. Pik güneş saatlerini hesaplamak PV modüllerinin performanslarının değerlendirilmesi açısından standart şartları oluşturduğu için önem taşır.



Şekil 3.36. Pik güneş saati.

Dünya çapında yapılmış güneş radyasyonu ölçümleri derlendiği zaman bu değerlerin küresel olarak nasıl değiştiği hususunda bilgi sahibi olunabilir.

Büyük ölçekli güneş enerjisi uygulamalarında saha seçimi yapılırken dikkate alınması gereken en önemli konulardan birisi de; santral sahasının topoğrafik koşullarıdır. Yapılacak güneş santralı uygulamasına ve kullanılacak teknolojiye göre değişik özelliklerde topoğrafik şartlar gerekli olmaktadır. Büyük ölçekli güneş termik santralı uygulamalarında arazi eğiminin maksimum %4-5 civarında olması istenirken; PV santral uygulamalarında arazinin eğiminin uygun olması durumuna göre bu durum aranmamaktadır. Uygun eğimde çalışma yapılacak santral sahasında yere monteli sabit sistemler için optimum eğim açısına kadar olan eğimlerde çalışılabilmektedir. Güneşi 1 eksende veya iki eksende takipli PV uygulamalarında bu durumlar geçerli olmamaktadır. Güneş enerjisi santrallarında dikketle incelenmesi gereken diğer bir durum da belirlenen santral sahasının topoğrafyasından veya yakın çevre engel durumlarından kaynaklanan gölgelenme etkilerinin minimize edilmesini sağlamaktır.

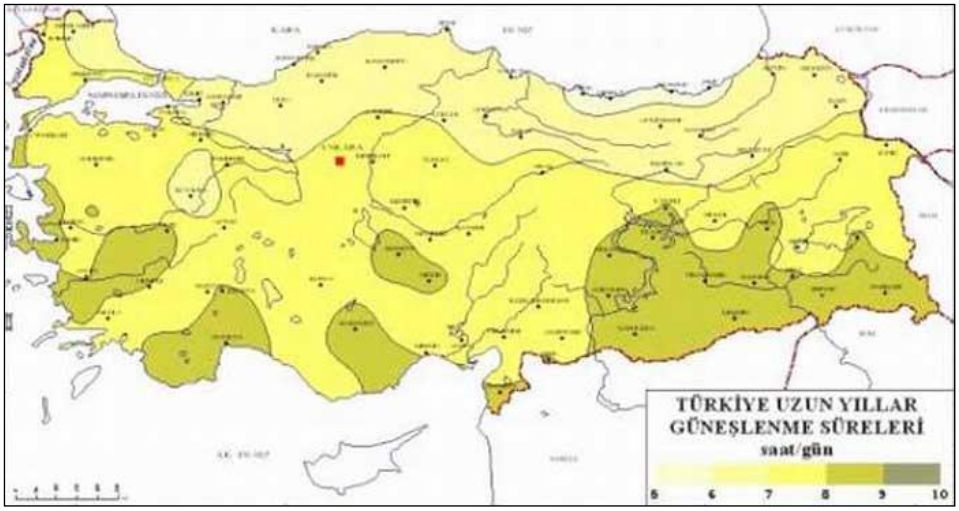
Güneşlenme Süresi Verileri
Güneş radyasyonunun ölçülmesi en doğru sonuçları ortaya koymasına rağmen bu ölçümlerin elde edilmesi ve yapılması her zaman mümkün olamamaktadır. Güneşlenme sürelerini ölçmek için basit bir kart sistemi kullanılır. Güneş ışığı zaman ölçekli bir kayıt kartı üzerine odaklanır. Güneş ışığının şiddeti yaklaşık 200 W/m^2'den büyük olduğunda kayıt kartı üzerine yanık izi bırakır. Yanık saatlerin toplam sayısı ilgilenilen zaman ölçeğindeki güneşlenme sürelerini verir. Güneşlenme sürelerinin lokal atmosferik şartları tanımlayan bilgilerle birleştirilmesi ile aşağıda verilen formülasyon ile aylık ortalama güneş radyasyonu hesaplamak mümkün olabilmektedir.

$$H = H_0\left(a + b\frac{n}{N}\right)$$

Burada verilen;

a ve ***b:*** lokasyona ve atmosferik şartlara göre belirlenen sabitleri,
Ho: ilgilenilen ay için açık bir gündeki ortalama güneş radyasyonunu
n: ölçülen güneşlenme süresini
N: gün uzunluğunu ifade etmektedir.

a sabiti 0.25 – 0.4 aralığında bir değişim gösterir. ***b*** sabiti ise 0.4-0.6 aralığında değerler almaktadır. Aşağıda verilen Şekil'de Türkiye'deki güneşlenme süreleri verilmektedir



Şekil 3.37. Türkiye güneşlenme süreleri haritası

Güneşlenme sürelerinin coğrafi bölgelere göre aldığı değerler ise, Tabloda verilmiştir.

Tablo 3.7. Coğrafi bölgelerin güneşlenme süreleri.

Bölge Adı	**Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)**
G.DOĞU ANADOLU	2993
AKDENİZ	2956
DOĞU ANADOLU	2664
İÇ ANADOLU	2628
EGE	2738
MARMARA	2409
KARADENİZ	1971

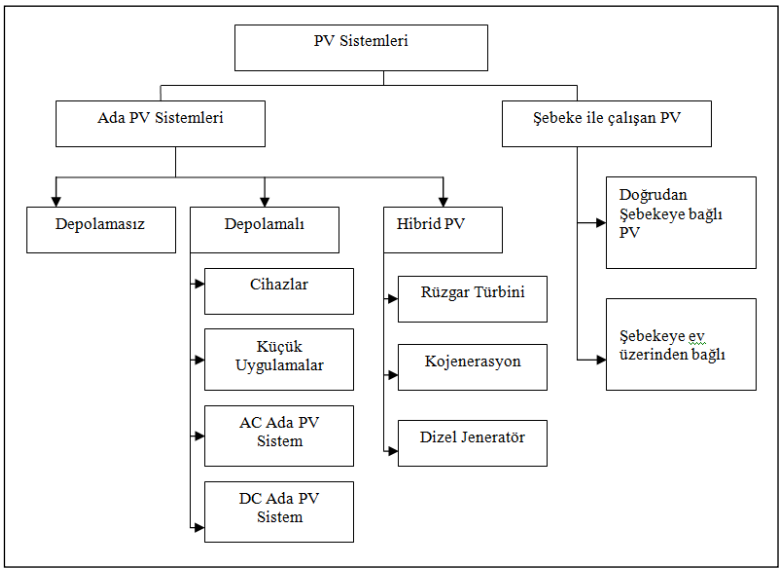
BÖLÜM 4: GÜNEŞ PANELLERİ (PV GES SİSTEMLERİ)

Bu bölümde fotovoltaik (photovoltaic) olarak bilinen PV GES sistemleri anlatılacaktır. PV GES sistemleri, dünyanın birçok ülkesinde yaygın olarak kullanılan sistemlerdir. Birçok kişi GES deyince aslında PV sistemleri kastetmektedir. *Photovoltaic* kelimesi, Yunanca ışık anlamına gelen *photos* ile *volt* kelimesinin birleşiminden oluşmaktadır. Volt kelimesi elektronların hareketini ifade eder ve pili icat eden İtalyan fizikçi Alessandro Volta'ya izafeten verilmiştir. Dolayısıyla photovoltaic terimi ışıktan elektrik üretimi anlamını taşımaktadır. Konunun anlaşılmasını sağlayan fotovoltaik etkisi fizikçi Edmond Becquerel tarafından 1839 yılında yayınlanan bir makalede belirtilmiştir. Becquerel, ıslak hücrelerden oluşan pillerin güneş ışığına mazur kaldığında voltajının arttığını fark etmiştir. Fotovoltaik etkisi ile ilgili ilk rapor ise, Cambridge'li bilim adamı olan Adams ve Day tarafından 1877 yılında Royal Society Journal'da çıkarılmıştır. Selenyumun güneş ışığına maruz kaldığında elektriksel özelliklerinin değiştiğini gözlemlemiştir. Selenyum, sülfüre benzeyen metal olmayan bir elementtir. 1883 yılında New York'lu elektrikçi olan Charles Edgar Fritts, günümüzdeki silikon güneş hücrelerine benzer selenyum güneş hücreleri üretmiştir. 1884 yılında patent başvurusunda bulunduğu bu hücreler, ince selenyum dilimlerinden (wafer) oluşmaktaydı ve verimlilik açısından çok düşüktü. Bu ilk kuşak güneş hücreleri, üzerlerine düşen güneş ışığının %1'inden daha az kısmını elektriğe çevirebilmekte idi. İlk kuşak güneş hücrelerinin verimsizliğinin düzeltilmesi yıllar sonra fizikçi Max Planck tarafından yapılacak olan çalışmalar neticesinde olacaktı. Fakat güneş hücrelerinde asıl ilerleme, 1950'li yıllarda geliştirilen yüksek verimli güneş hücreleri sayesinde olmuştur. Bell Telephone Laboratories (New Jersey, USA) tarafından Darrly Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson isimli bilimadamlarının yarı iletken malzemelerin üzerine ışığın etkilerini anlamak için yapılan çalışmalar çok önemlidir. Elektrik üretim amaçlı çalışmaların ilerleyebilmesi için yarıiletkenlerle çalışılmaya başlanmıştır. Yarıiletkenler, metal olmayan malzemelerdir. Germanyum ve silikon malzemenin karakteristikleri elektrik akımının akışına karşı büyük direnç göstermediğinden iletken; akımın akışını da bloke ederek yalıtkan gibi davrandığından yarı iletken (semiconductor) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmalardan birkaç yıl evvel 1948 yılında Bardeen Brattain isimli araştırmacı, yarı iletken malzemeleri kullanarak transistör adını verdiği cihazı üretmiştir. Transistör, yarıiletken malzemeden (genellikle silikon) yapılır ve boron veya phosphorus maddelerinin eklenmesiyle iletkenliği arttırılır. Bu işleme doping denilmektedir.

1953 yılında Chain-Fuller-Pearson ekibi, doping işlemini silikonlar üzerinde de kullanarak %6 verimliliğe ulaşabilen güneş hücreleri üretmeyi başarmışlardır. 1950'lerin ortalarında Bell şirketi, kırsal telefon kulelerinde güneş enerjisi kullanmıştır. 1958 yılında güneş hücreleri Vanguard I isimli uydunun küçük radyo vericilerinde kullanılmıştır ve başarıya ulaşan bu uygulamadan sonra bütün uzay istasyonlarında güneş enerjisi kullanılmaya başlanmıştır.

4.1 PV Sistem ve Uygulamaları

PV sistemleri iki ana gruba ayrılabilir. Birincisi ada şeklinde çalışan sistem yani şebekeden bağımsız olarak çalışan (stand alone system veya off-grid system) ve şebeke ile birlikte çalışan (grid connected system) sistemdir. Ada PV sisteminde genellikle ihtiyaç kadar üretilir ve depolama ünitesi de bulunur. Eğer PV sistemi rüzgar veya dizel bir jeneratör ile birlikte çalışıyor ise buna "hibrid sistem" denilmektedir. Örneğin Almanya'daki PV sistemlerini büyük çoğunluğu şebeke ile beraber çalışmaktadır. PV elektrik alım tarifesi Almanya'da yüksek olduğundan PV montajı hızla devam etmekte olup önümüzdeki 40 yıl içerisinde toplam elektriğin %25'inin PV'lerden sağlanacağı tahmin edilmektedir. Özellikle Avrupa ve Kuzey Amerika'da önümüzdeki yıllarda PV montajı artarak devam etmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde ada PV sisteminin yaygınlaştığı görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.1 ile PV sistemlerinin çeşitleri görülmektedir.



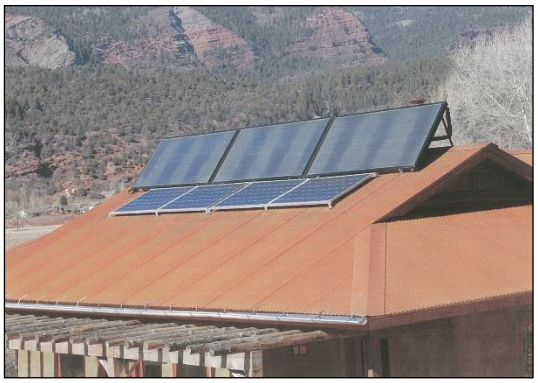
Şekil 4.1. PV sistemlerinin sınıflandırılması.

4.1.1 Ada PV Sistemleri (Stand Alone System veya Off-grid System)

PV Sistemlerde, genellikle şebekeden uzak bölgelerde ada PV sistemleri kullanılmaktadır. Ada PV sistemlerinin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.2 ile ada PV sistem uygulamaları görülmektedir.

Şekil 4.2. Ada PV sistemleri.

Ada PV sistem tasarımı, bulunulan yer, iklim, saha karakteristikleri, elektrik ihtiyacı ve kullanılan ekipmana bağlıdır. Ayrıca son yıllarda bazı günlük kullanılan cihazlar; ada PV sistemi olarak değerlendirilebilir. Bu cihazlara hesap makinası, bahçe lambası, şarj makinası, meyve suyu karıştırıcı (mikser), SOS telefonu ve bazı arabalar örnek verilebilir. Aşağıdaki Şekil 4.3 ile diğer bir ada sistemi görülmektedir.

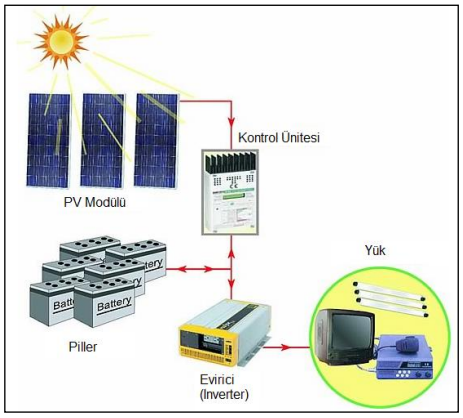


Şekil 4.3. Diğer bir ada PV sistem.

Ada PV sistemi genellikle depolama ünitesi ile birlikte çalıştırılmaktadır. Çünkü hava karardığında enerji üretilememektedir. Bu yüzden tekrar şarj edilebilir piller kullanılarak elektrik bir miktar saklanabilmektedir. Tipik bir ada sistemi ile çalışan PV GES'te aşağıdaki ekipmanlar bulunur:

1) PV modüller (genellikle paralel olarak bağlanmıştır),
2) Şarj kontrol ünitesi,
3) Pil veya pil ünitesi,
4) Evirici (inverter).

Şekil 4.4 ile Ada PV GES sisteminin temel elemanları görülmektedir. Bu sistemde, kısa devreye karşı koruma diodlar tarafından yapılmaktadır.



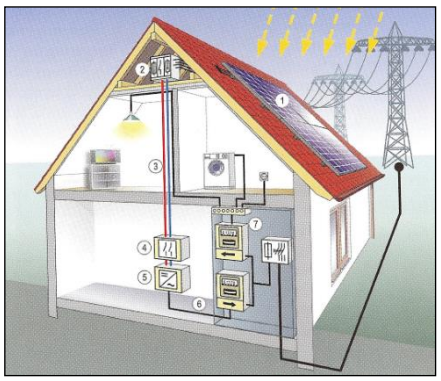
Şekil 4.4. Ada PV sistem elemanları.

4.1.2 Şebekeye Bağlı Sistemler (Grid Connected Systems)

Şebekeye bağlı ev tipi PV GES sistemleri bir çok Avrupa ülkesinde ve özellikle Almanya'da kullanımı gittikçe artmaktadır. Şebekeye bağlı bir PV GES aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır:

1) PV modülleri,
2) PV birleştirme kutuları,
3) Doğru akım kabloları,
4) Evirici (inverter),
5) Alternatif akım kabloları,
6) Dağıtım sistemine uygun elektrik sayacı,
7) Doğru akım izalatör switch.

Aşağıdaki Şekil 4.5 ile şebekeye ev üzerinden bağlanmış olan bir sistem görülmektedir. Buradaki sistem şöyle çalışmaktadır. PV modüllerinden (1) üretilen elektrik enerjisi PV DC elektrik birleştirme kutusuna (2) gelmekte ve doğru akım kabloları (3) yardımı ile eviriciye (4) gelerek burada alternatif akıma çevrilmektedir. Daha sonra alternatif akım kabloları (5) ile dağıtım sistemine uygun elektrik sayacına (6) gönderilmekte ve oradan da izalatörlere giderek (7) kullanıma hazır hale getirilmektedir.



Şekil 4.5. Şebekeye bağlı ev PV sistem bileşenleri.

Avrupa'da güneş enerjisinin kullanımı çok farklı alanlarda olabilmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.6 ile de İsviçre Domat bölgesinde otoyol kenarında 100 kW kurulu güçlü bir PV GES görülmektedir.

Şekil 4.6. Otoyol kenarındaki PV GES.

Almanya Erkelenz'de otopark otomatlarında güneş enerjili sistemler kullanımı Şekil 4.7'de görülmektedir.

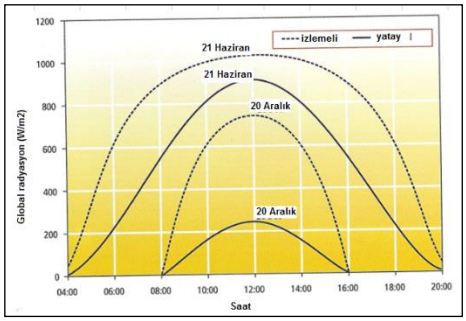
Şekil 4.7. Almanya Erkelenz'de bulunan otopark otomatı için kullanılan bir sistem.

Almanya Erkelenz'de Vergi Dairesi'nde (Finanzamt) güneş enerjisi kullanımı Şekil 4.8'de görülmektedir.

Şekil 4.8. Almanya Erkelenz'de vergi dairesinde güneş enerjisi kullanımı.

4.2 Güneşi İzleme Sistemi (Tracking Systems)

Son yıllarda GES projelerinin verimini artırabilmek için panellerin güneşin yörüngesini izleyen şekilde sistemler geliştirilmiştir. Güneşin geldiği PV yüzeyi güneşi takip ederse üretim artış göstermektedir. Yazın güneş izleme sistemi yardımı ile %50; kışın ise %30 civarında daha fazla bir radyasyon kazanımı meydana gelmektedir. Özellikle yıllık radyasyonun düşük olduğu orta enlemlerin üzerindeki bölgelerde güneşi izleme sistemi kulllanımı çok yaygındır. Aşağıdaki Şekil 4.9 ile 50 derece enlemlerinde bulunan bir projede izleme sistemli ve yatay sabit PV'den elde edilen enerjiyi göstermektedir.



Şekil 4.9. İzleme ve izleme sistemsiz PV üretimi.

Güneşi izleyen sistemde en büyük enerji kazanım yaz aylarında gelir. Bunun nedeni, enerjinin kıştan daha fazla olmasının yanısıra bulutluluğun da daha fazla olmasıdır. Birkaç tip güneş izleme sistemi bulunmaktadır. En önemli fark tek eksenli ve çift eksenli sistem olmasıdır. Çift eksenli izleme sisteminde güneş optimum şekilde takip edilmektedir. Fakat tek eksenli sisteme göre daha karmaşıktır ve bu yüzden tek eksenli sistem tercih edilmektedir. Tek eksenli sistem güneşin günlük yörüngesini bir program dahilinde takip etmektedir. Yapılan bazı araştırma sonuçları ve pratik işletme bilgilerine göre tek eksenli sistem ile %20 kazanç; çift eksenli izleme sistemi de %30 kazanç elde edilmektedir. Bu değer merkez Avrupa'da olup bölgelerde daha da artış göstereceği düşünülmektedir. İtalya'da bu değer çift eksenli sistemde %34'tür. İzleme sistemlerinin kullanımı hem zordur hemde ek maliyet getirmektedir. Hareketli bir sistem olduğundan rüzgar yükü ve fırtınalara dayanacak bir sistem olmalıdır. Sürücü sistemi, elektrik motorlu veya termo-hidrolik kontrol sistemli olabilmektedir. Termo-hidrolik kontrol sistemi, akışkanın ısınması neticesinde ortaya çıkan basınç farklılıklarından oluşmaktadır. Geçmişte merkez Avrupa'da izleme sistemi için yapılan ek maliyet, kendisini geri ödeyemediğinden kullanımı pek yaygın değildi. İzleme sistem maliyetlerinin biraz düşmesi, son yıllarda kullanımını yaygınlaştırmaya başlamıştır. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise, izleme sistemi arızalandığında tamirinin hemen yapılmasıdır. Aksi takdirde GES için ciddi üretim kaybuna neden olmaktadır. İzleme sistemleri pasif izleme (passive tracking) ve aktif izleme (active tracking) olarak da sınıflandırılabilmektedir.

Pasif İzleme (Passive Tracking)

Aşağıdaki Şekil ile verilen termo-hidrolik sistem pasif izlemeye örnektir. İki adet tüp tankı PV modülün yanlarında bulunmaktadır. Eğer PV yüzeyi güneşle birlikte hareket etmez ise, tankın içindeki akışkan orantısız olarak ısınacağından dolayı ortaya çıkacak basınç farkı akışkanı sıcaklığın düşük olduğu bölgeye hareket ettirecektir. Bu değişimden meydana gelecek olan ağırlık farkı PV modülünü güneşe doğru yöneltecektir. Termo-hidrolik sistemin cevap vermesi özellikle sabahları çok yavaştır. Bu başlangıç ataleti yüzünden biraz kayıp meydana gelebilmektedir. Zira akışkanın ısınabilmesi için 1 saat gerekmektedir.

Şekil 4.10. Pasif izleme sistemi.

Aktif İzleme Sistemi (Active Tracking)

Elektronik olarak kontrol edilen aktif izleme sistemi kullanıldığında, atalet momenti, pasif izleme sistemindekine benzer bir sorun yaratmamaktadır. Genellikle 2 tip elektronik kontrollü izleme sistemi bulunmaktadır.

Astronomik Sistem (Astronomical): Bu sistem, güneşin mevcut pozisyonunu hesaplar ve daha önceden belirlenen koordinatlara göre güneşe dik olarak sistemi ayarlar.

Sensör Kontrollü (Sensor – Controlled) Sistem: Astronomik sistemde koordinatlar ve sistemin hangi açıya geleceği önceden bellidir. Fakat sensör kontrollü izleme sistemi, PV modülünü güneşin en parlak ve canlı kısmına anlık olarak yönlendirir. Bunun için DC (doğru akım) motoru kullanılmaktadır. Günümüzde büyük PV GES'ler sensör kontrollü izleme sistemi kullanılmaya başlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 4.11 ile bu izleme sistemine örnek bir sistem görülmektedir.

Şekil 4.11. Sensör-kontrollü izleme sistemi.

İzleme sisteminin daha yakın fotoğrafı ise Şekil 4.12 ile verilmiştir.

Şekil 4.12. Sensör-kontrollü izleme sistemi.

Şekil 4.13 ile de çift eksenli bir güneş izleme sistem görülmektedir.

Şekil 4.13. Çift eksenli bir izleme sistemi.

Şekil 4.14 ile yukarıdaki çift eksenli sistemin önden görünüşü görülmektedir.

Şekil 4.14. Sensör-kontrollü izleme sistemi.

4.3 Fotovoltaik Etkisi

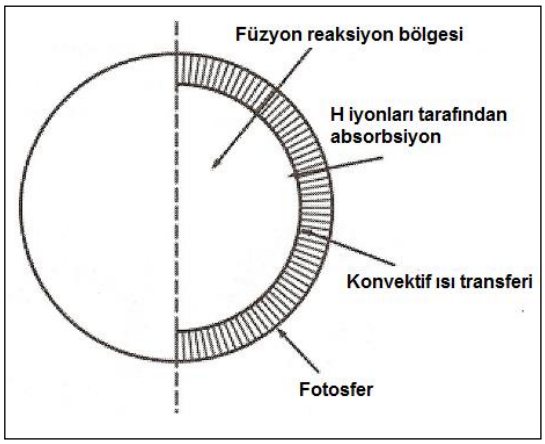
Işığın doğasını anlayabilmek için 2 ana teori geliştirilmiştir. 1600'lü yılların sonunda Newton'un mekanistik yaklaşımları gereği, ışığın küçük partiküllerden oluştuğu üzerinde durulmuştur. 1800'lü yılların başında Young ve Fresnel ışık hüzmelerinin etkileşimini açıklamaya çalışmıştır. Maxwell'in elektromanyetik radyasyon teorileri kabul görmeye başlamıştır. 1905 yılında Einstein fotovoltaik etkiyi açıklamaya çalışmıştır. Aşağıdaki eşitlik bu amaçla geliştirilmiştir:

$$E = hf = hc/\lambda$$

Eşitlikte kullanılan parametreler aşağıda açıklanmıştır:

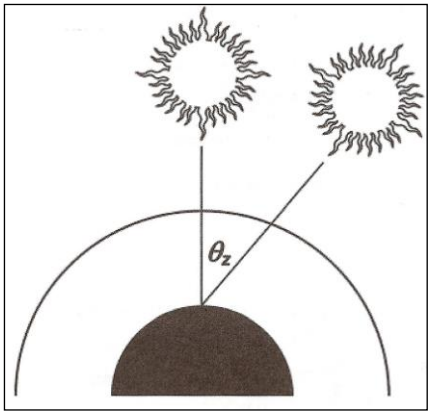
E: Enerji
f: Frekans
h: Planck sabiti (6.26×10^{-34} Js)
c: Işık hızı (3×10^{8} m/s)
λ: Dalga boyu

Güneş, merkezinde nükleer füzyon reaksiyonlarının meydana geldiği sıcak bir küredir. İç sıcaklığı 20 milyon °K'e kadar çıkabilir. Şekil 4.15 ile görüldüğü gibi, iç kısımdaki yoğun radyasyon hidrojen iyonlarının absorbsiyonu, güneş yüzeyine yakın yerlerde meydana gelmektedir. Buradaki enerji konveksiyon yolu ile fotosfer tabakasına ulaştırılır.



Şekil 4.15. Güneşin iç tabakaları.

Güneşten dünyaya gelen radyasyon miktarı aslında sabite yakınken; dünyaya ulaştıktan sonra absorbsiyon ve saçılma sebebi ile değişkenliğe uğramaktadır. Hava açık ve güneş en tepede oduğu zaman maksimum güneş radyasyonu ulaşmaktadır. Bu anda güneş ışığı ile dünya ulaşım mesafesi en kısadır. Bu yörünge yolu, 1/CosΘz ile ifade edilmektedir. Θz, güneşin tam tepede olduğu zaman ile güneşin aktüel geldiği açıdır. Şekil 4.16 ile Θz açısı görülmektedir.



Şekil 4.16. Θz açı tanımı.

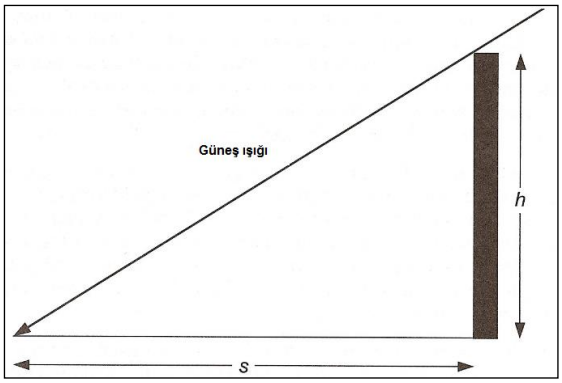
Güneşin dünyaya gelirken izlediği bu yola Hava Kütlesi, HK (Air Mass) denmektedir. Hava kütlesi;

$$HK = 1/\text{Cos } \Theta z$$

ile formülize edilmektedir. Bu yaklaşım, homojen ve yansıma olmayan bir atmosfer yapısı kabulü yapılarak geliştirilmiştir. Θz=0 ise, HK, 1'e eşittir veya HK1 radyasyon alınır. Θz=60° ise, HK2 radyasyon koşulları oluşmaktadır. HK1.5 durumu (yani açının 48.2°) PV GES uygulamaları için standart kabul edilmeye başlanmıştır. HK değeri, herhangi bir lokasyonda aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$HK = \text{Karekök } 1+(s/h)^2$$

Eşitlikte verilen s, h yüksekliğindeki engelin mesafesidir (Şekil 4.17).

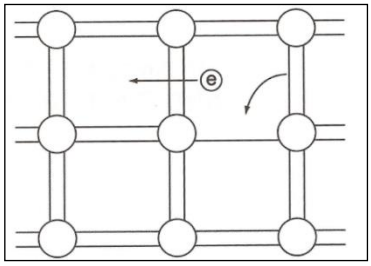


Şekil 4.17. HK hesap parametreleri.

Fotovoltaik etkisi (PV effect), ışık enerjisinin elektrik enerjisine güneş hücreleri (solar cells) yardımı ile dönüşümüne denir. 1836 yılında Becquerel tarafından PV etkisinin bulunması günümüzdeki güneş hücrelerinin çalışma prensibini oluşturmuştur. PV etkisi ile anlaşılan en önemli husus ise, yarıiletken malzemesinin davranışıdır. Bunun anlamı, yarıiletkenler, düşük sıcaklıklarda yalıtkan olarak davranmakta iken; yüksek sıcaklıklarda iletken olarak davranmaktadır. Günümüzdeki güneş hücrelerinin çoğu silikon tabanlıdır. Yarı iletken malzemelerin elektriksel karakteristikleri, bond ve band model olmak üzere 2 model kullanılarak açıklanmaktadır.

Bond Modeli

Bond modeli, silikon atomları ile birleşen covalent bondların hareketlerini inceleyerek olayı açıklamaya çalışmaktadır. Şekil 4.18 ile kristal silikon kafes yapı içerisindeki bonding olayı ve elektron hareketini göstermektedir.



Şekil 4.18. Silikon kristal içerisinde covalescent bond olayı.

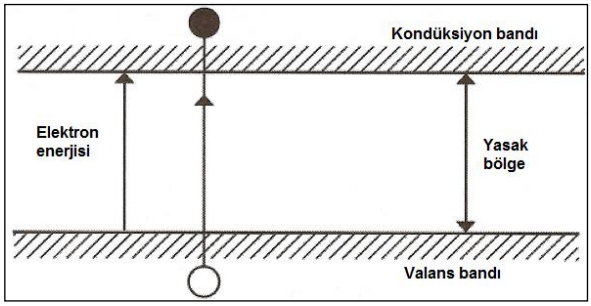
Düşük sıcaklıklarda bondlar hareketsiz (intact) olup silikon yalıtkan olarak davranmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bazı bondlar kırılır ve iletim iki sebeple başlar:

- Kırılan bondlardan olan elektronlar serbestçe hareket ederler,
- Kırılan bondun içindeki elektronların oluşturduğu boşluklara komşu bondların elektronları hareket etmeye başlar.

Hareket eden bondlar, su içerisindeki kabarcıklara benzer bir hareket sergilerler.

Band Modeli

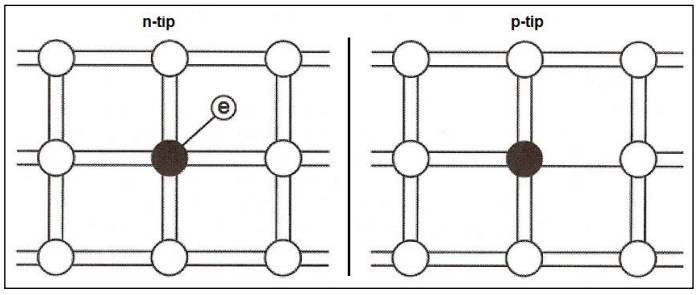
Band modeli, yarı iletken davranışın valans (valence) ile iletim bandları arasındaki enerji seviye farkına göre açıklamaktadır (Şekil 4.19). İletim bandında (conduction band) elektronlar serbesttir. Yasak bölgede covalent bonddan iletim bandına geçebilmek için gereken minimum enerji miktarı bulunmaktadır. Valans band içerisindeki elektronların enerji miktarı, covalent banddakiler ile aynıdır.



Şekil 4.19. Elektron için enerji bandı.

Doping

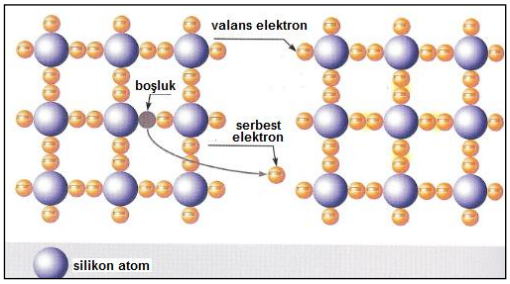
Silikon kristal kafes yapıdaki elektron ve boşlukları (holes) ”doping” işlemi ile yer değiştirerek dengesizliğe uğratmak mümkündür. 1 valans (valance) elektronu fazla atoma ”n-tip” materyal; 1 valans elektron az atom”p-tip” materyal olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.20 incelenmelidir.



Şekil 4.20. n-tip ve p-tip yarı iletken.

Yarı iletken malzemelerden silikon, gallium arsenide, cadmium telluride veya balır indium diselenit güneş hücresi yapımında kullanılmaktadır. Kristalin güneş hücresi dünyada en yaygın olarak kullanılan yarı iletken malzemedir. 2008 sonu itibari ile dünyadaki payı %85 idi. Güneş hücresinin çalışma prensibi ise, kristalin silikon hücreler ile açıklanabilir. Yüksek saflıkta silikon ile yüksek kalite kristal bir araya geldiğinde güneş hücresi meydana gelmektedir. Silikon atomları, kararlı kafes kristal oluştururlar. Herbir silikon atomunda dört adet elektron bulunmaktadır. Bu atomlar silikonun dört bir yanında toplanmaktadır. Kararlı bir elektron konfigürasyonu oluşabilmesi her durumda kristal kafesin etrafındaki atomlar yan elektronun atomları ile komşu olup temas halindedir. Bu yapıdaki bir elektron,

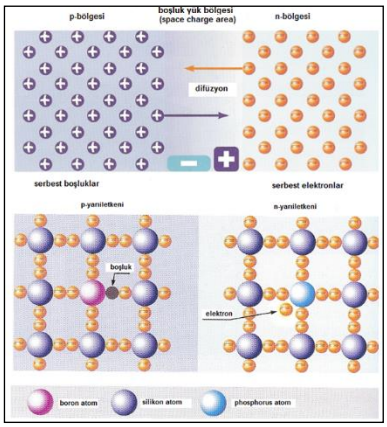
ısı veya ışık ile yapısı bozulabilir. Daha sonra serbest kalan elektron, kristal kafesin içindeki delikten ayrılır. Bu ayrılmaya reel iletken (intrinsic conductivity) adı verilmektedir. Şekil 4.19 ile gösterilen kristalin yapıdaki reel iletkenlik, elektrik üretemez. Bu yüzden silikon malzeme elektrik üretemez, sadece silikon malzeme elektrik üretiminde kullanılır ve saflığı bozan atomlar kristal kafes yapıya tanıtılır. Karakteristik olarak silikondan bir atom fazla (phosphorus) veya bir atom eksik (boron) olabilirler. Bir atom fazla durumunda kafesteki her elektronda 1 fazla atom bulunur (n-doped). Bu elektron kristal içerisinde serbestçe dolaşarak elektrik yükünü iletir. Bir atom eksik durumda her elektronda 1 eksik atom bulunur (p-doped). Komşu elektronlar bu boşlukları doldurmaya çalışarak başka yerlerde eksik yeni çukurlar bırakırlar. Bu doping atomları yolu ile yapılan bu iletkenliğe reel veya bozucu iletkenlik denir.



Şekil 4.21. p-doped ve n-doped silikondaki reel iletkenlik.

Eğer n-doped ve p-doped yarı iletken tabakaları yanyana gelir ise, p-n (pozitif-negatif) kesişme hattı oluşur. Bu kesişme noktasında artık elektronlar n-yarı iletkenden p-yarı iletken tabakaya doğru gider. Bu durum aşağıdaki Şekil de görüldüğü gibi, birkaç serbest taşınım meydana getirir. Bu bölge, boşluk yük bölgesi (space charge region) olarak bilinir (Şekil 4.22). PV hücreleri, temelde farklı yapıdaki ince yarı iletken malzemelerin birleşiminden meydana gelmiştir. Bu yarı iletken malzeme p-tipi (positive) yarıiletken ve n-tipi (negative) yarıiletkendir. Bu yarıiletkenler silikondan yapılmaktadır. N-tipi yarıiletkenlerin doping işlemi ile yapısının değiştirilmesi için phosphorus malzemesi eklenmektedir, bu yolla doping yapılmış materyalda elektron sayısı artmaktadır. Elektronlar, atomların alt parçalarıdır ve negatif yüklüdürler. Dolayısı ile elektron yüklemesi (doping) yapılan silikon n-tip yarıiletken olarak adlandırılmaktadır. P-tip yarı iletkenlerde kristalin silikon malzemeden üretilmektedir. P-tipi yarı iletkene doping işlemi için boren malzemesi eklenmektedir. Bu durum elektron açığı meydana getirmektedir. Bu eksik elektronlar "holes" olarak adlandırılmaktadır. Negatif yüklü elektronlar eksildiginden dolayı bu silikon pozitif yüklü olacağı varsayıldığından p-tipi yarıiletken olarak adlandırılmaktadır.

Güneş ışığının p-n birleşimi üzerine düştüğünde ne olur? Bilindiği gibi ışık, foton denen çok küçük enerji parçacıklarının oluşturduğu bir olaydır. Fotonlar p-n birleşimine uygun dalga boyunda düştüğünde enerjiyi elektronlara transfer etmektedir.



Şekil 4.22. Boşluk yük bölgesi oluşumu.

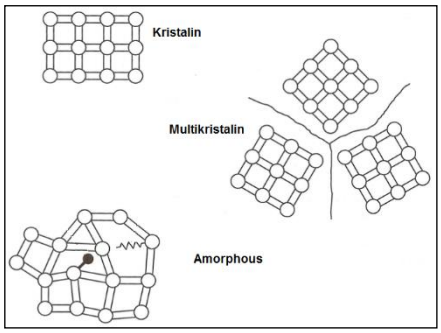
Pozitif yüklü doping atomları bu geçişte n-bölgesinde (negatif bölge); negatif yüklü doping atomlarda p-bölgesinde (pozitif bölge) kalmaktadır. Eğer bu p-n yarı iletken (solar cell, güneş hücresi) ışığa maruz kalır ise, fotonlar elektronlar tarafından absorblanır. Bu serbest kalan elektronlar, n-bölgesine çekilir ve

bu durum fotovoltaik etkisi olarak adlandırılır. Farklı yapıda olan p ve n yarıiletkenleri birleştirilirse bir elektrik alanı meydana gelir. Bu oluşan elektrik alanı; tarağın kazağa sürttüğünde oluşan elektrostatik alana benzerdir. Bu süreç negatif ve pozitif yüklü parçacıkların yer değiştirmesine yol açmaktadır.

Güneş hücresi yapımında kullanılan silikon veya diğer yarıiletken malzemeler, kristalin, multikristalin (polikristalin) ve amorphous (mikrokristalin) yapıda olabilirler. Bu malzemelerin birçok sınıflandırması varsa da 1993 yılında Basore tarafından yapılan ve yaygın kabul gören tanımlamaya göre;

- Amorphous (mikrokristalin) < 1 μm
- Polikristalin < 1mm
- Multikristalin < 10 cm

kabul gören bir yaklaşım olmuştur. Şekil 4.23 ile bu farklı yapıdaki malzeme tipleri görülmektedir.



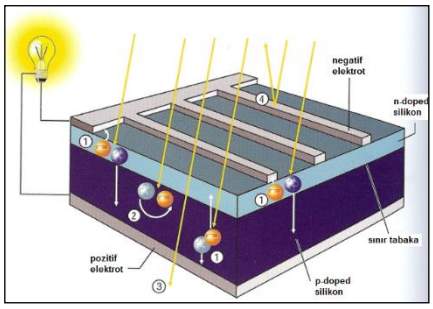
Şekil 4.23. Kristalin, multikristalin ve amorphous yapılar.

4.4 Güneş Hücre Tipleri

Günümüzde farklı tipte güneş hücreleri kullanılmaktadır. Bunlar ilerleyen sayfalarda detaylı olarak incelenmiştir.

4.4.1 Kristalin Silikon Hücreler

Klasik silikon malzemenin düzenli bir yapısı bulunmaktadır. Bu yüzden daha tahmin edilebilir bir uniform davranış sergilemektedir. Bununla beraber, dikkatli ve ağır işleyen üretim süreci olduğundan dolayı hala en pahalı silikon tipidir. Klasik kristal silikon güneş hücresi iki farklı doped silikon tabakasından oluşmuştur. Güneş ışığına maruz kalan yüzey negatif doped olup 1 atom fazlası bulunmaktadır. Alttaki tabaka pozitif doped olup 1 atom eksiği vardır. Sınır tabakada güneş ışığı tarafından meydana getirilen elektriksel alan bulunmaktadır. Güneş hücresinden elektriği alabilmek için, hücrenin ön ve arka yüzeyine metalik kontaklar konulması gerekmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.24 incelendiğinde konu daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 4.24. Kristal silikon güneş hücresi.

Bölgelerin açıklaması:

1) Yük ayrım tabakası,
2) Tekrar birleşme,
3) Kullanılmamış foton enerjisi,
4) Yansıma ve gölgeleme.

Yukarıdaki şekilden de görüleceği gibi, güneş ışığı, güneş hücresinin üzerine düştüğünde yükler ayrılır ve akım başlar. Güneş hücresinde yansıma, gölgeleme ve tekrar birleşme nedenleri ile bazı kayıplar meydana gelir. Ek olarak, büyük bir kısa ve uzun dalga boylu radyasyondaki enerji kullanılamamaktadır. Meydana gelen bu kayıplar ile ilgili detaylı bilgi aşağıda verilmiştir. 100 birim güneş enerjisinden kayıplar:

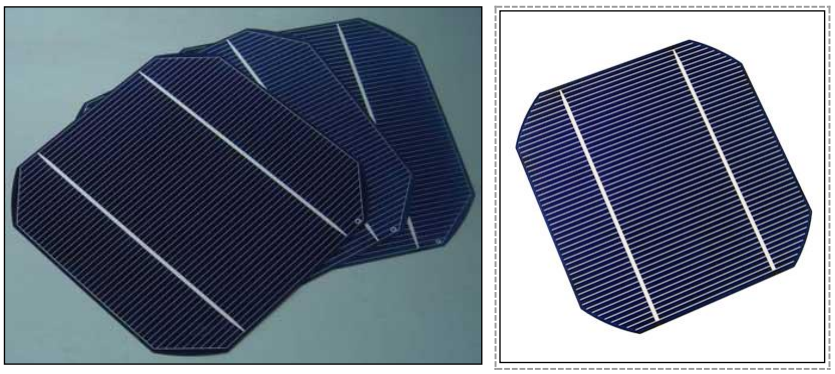
a) % 3 yansıma ve gölgeleme kayıpları,
b) % 23 çok düşük foton uzun dalga boyu radyasyonu,
c) % 32 çok yüksek foton kısa dalga boyu radyasyonu,
d) % 8.5 tekrar birleşme kayıpları,
e) % 20 hücredeki farklılık özellikle boşluk yük bölgesinde,
f) % 0.5 rezistans (omik kayıp) kaybı.

Yukarıdaki rakamlar toplanıp 100 birimden çıkarıldığında ancak %13-20 arasında elde edilebilir elektrik enerjisi kalmaktadır.

Kristalin güneş hücrelerinde en fazla kullanılan materyal silikondur. Oksijenden sonra, dünyadaki en fazla bulunan element silikondur. Doğada saf olarak bulunmakta olup kimyasal olarak kuartz ve kumdan elde edilir. Üretim sürecinde öncelikle istenmeyen oksijenden arınmaktadır. Bunun için karbon pudrası ile yakılarak 1800 °C'de ısıtılır. Bu süreç sonunda karbon monoksit ve metalurji ile silikon oluşur ve %98'i saftır. Geriye kalan %2 silikonun elektronik amaçlı kullanımı için hala çok yüksektir. Şekil 4.25 ile silikon malzeme görülmektedir.

Şekil 4.25. Silikon malzeme.

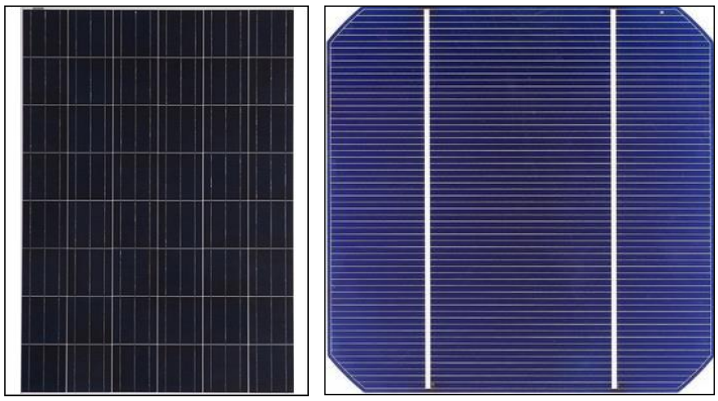
Geçmiş yıllara kadar güneş hücrelerinin büyük bir çoğunluğu saf monokristalin silikondur. Bu yapı, sürekliliği olan kristal kafes yapıdadır. En verimli monokristalin güneş hücreleri BP Solar ve AEG tarafından imal edilmiş olup %16 civarında verime sahiptir (Şekil 4.26). Fakat Czochralski sürecine göre üretilen monokristalin güneş hücreleri, oldukça pahalı ve aynı zamanda yavaş ilerleyen bir süreçtir.



Şekil 4.26. Monokristal silikon güneş hücreleri.

Multikristalin (Polikristalin) Silikon Hücreler

Multikristalin (polikristalin), monokristallerin birleşmesinde oluşan bir yapıdır. Üretim süreci daha hızlı ve az dikkat gerektirdiğinden bu malzeme maliyeti daha düşüktür. Güneş hücre dilimleri (wafer) doğrudan polikristalin silikon hücrelerden yapılmaktadır. Üretim süreci, monokristalinden daha kısa ve ucuzdur (Şekil 4.27).



Şekil 4.27. Polikristal silikon güneş hücreleri.

4.4.2 İnce Film (Thin Film) Teknolojisi

İnce film teknolojisinin kullanımı 2000'li yıllardan sonra artmıştır. Bu teknolojinin en temel özelliklerinden bir tanesi, aynı kurulu güç için diğer teknolojilere göre daha fazla alan gerektirmesidir.

Galyum Arsenide Hücreler (GaAs)

Silikon malzemesi PV yapımı için kullanılan tek malzeme değildir. Diğeri de Galyum Arsenittir (GaAs) ve birleşik yarıiletken olarak adlandırılmaktadır. GaAs, silikona benzer bir yapısı vardır fakat değişken galyum ve arsenik atomlardan oluşmaktadır. PV üretimi için oldukça uygundurlar, yüksek ışık absorbsiyon katsayısına sahip olduğundan ince tabakalı malzeme gerektirmektedir. GaAs silikondan daha yüksek dalga boyu bandında güneş ışınlarını enerjiye çevirebilmektedir. Bu yüzden verimleri de oldukça yüksektir. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda da çalışabilmektedir. Bunun anlamı da GaAs CPV sistemleri için uygundur. Diğer yandan, GaAs güneş hücreleri oldukça pahalıdır ve üretim süreci henüz ticari olamamıştır. Ayrıca galyum ve arsenik; silikon kadar yaygın bulunan bir malzeme değildir.

Amorphous Silicon (a-Si)

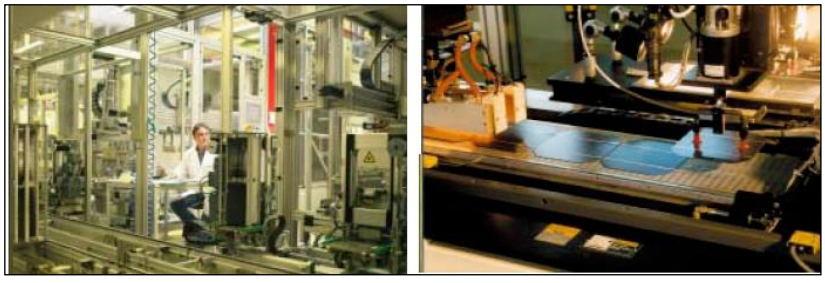
Silikon sadece mono ve polikristalin yapıda PV projelerinde kullanılmamaktadır. Daha az yapısal olan amorphous silikon (a-Si) olarak da kullanılır. Bu yapıda silikon atomları daha az olduğundan küçük bir kristalin yapı mevcuttur. Amorphous silikonun avantajları arasında ucuz ve ışığı daha iyi absorbladığından daha ince yapıda olması sayılabilir. Üretim sürecinde daha soğuk bir ortamda olduğundan daha az enerji gerektirmektedir. Dezavantajları arasında veriminin daha düşük olması gösterilebilir. A-Si, sadece ince film PV için uygundur.

Copper Indium Diselenide (CID)

Copper Indium Diselenide (CID), bakır, indium ve diselenit karışım olup yarıiletken karaktere sahiptir. Ince film CIS malzemesi laboratuvar koşullarında %12.5 verime sahiptir. Verimi yüksek ama indium pahalı bir malzeme olduğundan CID pahalıdır.

Cadmium Telluride (CdTc)

İnce film PV için diğer bir yarıiletken malzeme, Cadmium Telluridedir (CdTe). BP solar bu teknoloji üzerine yoğunlaşmıştır. CdTe hücresinin basit yapıda düşük maliyete sahip olması en büyük avantajıdır. Verimi biraz daha düşüktür. Üretim sürecinde Cadmium kullanıldığından ve Cadmiumun yüksek seviyede toksik madde olduğundan üretim sürecinde dikkat edilmektedir. Şekil 4.28 ile güneş hücresi üretim süreci görülmektedir.



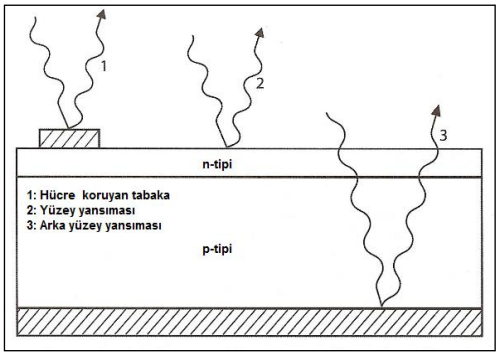
Şekil 4.28. Güneş hücresi üretim süreci.

Hücre Özellikleri ve Tasarımı

Laboratuvar koşullarında kristal silikon güneş hücrelerinin verimi %24 civarında olmakla beraber; pratikte bu değer, %15 civarında olmaktadır. Laboratuvar değeri ile gerçek verimlilik değerleri arasındaki fark bazı kayıpların meydana gelmesi nedeni iledir.

Optik Kayıplar

Optik kayıplar, güneş hücre güç çıkışının ideal değerini düşürmektedir. Optik kayıplar ile ilgili olarak Şekil 4.29 incelenmelidir.



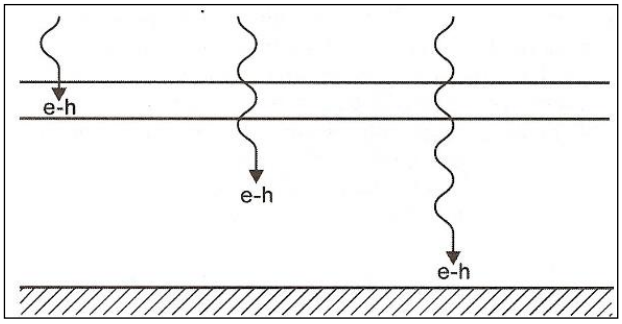
Şekil 4.29. Güneş hücresinde optik kayıp kaynakları.

Optik kayıplar aşağıdaki yöntemler ile azaltılabilmektedir:

- Güneş hücresini koruyan tabakanın inceltilmesi,
- Antiyansıtıcı koruma bandı kullanımı.

Rekombinasyon Kayıpları

Elektron ve boşlukların rekombinasyonu da bazı kayıplar meydana getirmektedir. Şekil 4.30 ile bu kayıplar görülmektedir.



Şekil 4.30. PV hücresi içerisinde muhtemel rekombinasyon kayıpları.

4.5 Yoğunlaştırılmış Fotovoltaikler (Concentrated Photovoltaics, CPV)

CPV teknolojisinin tarihsel gelişimi, 1970'li yıllara dayanmaktadır. İspanya'da bulunan IES ve UPM (**I**nstituto de **E**nergia **S**olar ve **U**niversidad **P**olitecnia de **M**adrid) 1976 yılında yaptıkları işbirliği çerçevesinde konu ile ilgili çalışmalar yapmaktadır. 1990'lı yıllarda IES-UPM ve BP Solar tarafından önerilen yoğunlaştırıcı (concentrator), Avrupa Komisyonu tarafından fonlanarak EUCLIDES adı verilen bir prototip geliştirilmiştir. Madrid'de montajı yapılan bu prototipin büyüklüğü 60 m^2 olmuştur. Güneş takip sistemi ile aynaların dizaynı IES-UPM tarafından yapılmıştır. EUCLIDES prototipinin başarısından sonra 480 kW kurulu gücündeki ikinci demonstrasyon CPV GES, Tenerife'de kurulmuştur. Bu CPV GES, 2003 yılına kadar dünyadaki kurulu gücü en büyük CPV GES olarak kalmıştır.

CPV'ler verimi daha yüksek olan sistemlerdir. III-IV yarıiletken malzemeler olan indium gallium arsenide (InGaAs), indium gallium phosphide (InGaph) veya germanyum; Group III ve Group V elementlerinden oluşmaktadır ve bu elementler yüksek verimliliğe sahip güneş hücreleri üretimini mümkün kılmaktadır. Bu sistemlerin enerji verimliliği %30 civarında olmakla beraber; en yüksek verim

%39 olmuştur. Modüller içerisinde bulunan Fresnel lensleri, 500 kat yoğunlaştırabilmektedir. Bu yüzden, yoğunlaştırılmış fotovoltaikler direk radyasyonun yüksek miktarda olduğu bölgelerde kullanılmamaktadır. Bazı PV şirketleri, artık CPV üretimine başlamıştır. CPV teknolojisindeki en önemli geliştirilmesi gereken husus ise, termal sistemin yönetimdir. Bu sistemdeki pasif soğuma, termal dissipator veya termal sink teknolojisi ile yapılmaktadır. Hücre teknolojisindeki en önemli gelişim, III ve IV Grup yarıiletken kullanımı ile sağlanmıştır. Bu teknolojinin kullanımı sebebi ile, farklı spektrumdaki radyasyonlar da alınabilmiştir. Spektral reaksiyon gereği, silikon hücrelerin teorik verimi %40 civarındadır. Dünyadaki önemli laboratuvarların yaptıkları çalışmaların sonucu olarak Spektrolab %40.7; NREL ise %40.8 olarak hesaplamıştır. Bu yüksek verimlilik rakamları, hücre boyutunun 1 cm^2 ve hatta 1 mm^2 lere düşmesine yol açmıştır. Bu boyut küçülmesi, termal verimliliği artırarak seri direnç (serial resistance) düşmesine neden olmaktadır. Termal verimin arttırılması için aliminyum plaka kullanılmaktadır. Hücrenin etrafı plaka ile kaplanmaktadır. Büyük parabolik aynalarda da aktif soğutma sistemi kullanılmaktadır. NREL'e ait (National Renewable Energy Laboratory) New Mexico'da bulunan test merkezindeki CPV paneller aşağıdaki şekillerde görülmektedir (Şekil 4.31).

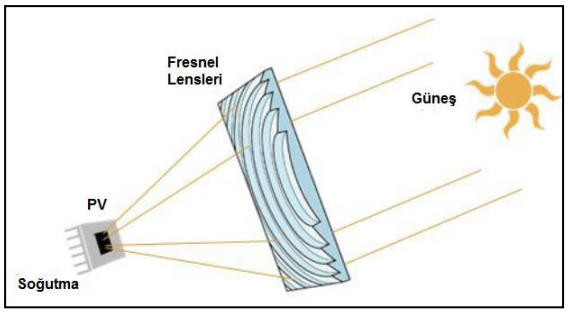
Şekil 4.31. NREL'de bulunan CPV panelleri.

CPV panellerinin daha yakından fotoğrafı Şekil 4.32 ile görülmektedir.

Şekil 4.32. Yoğunlaştırılmış PV (CPV) panelleri.

Yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemlerin, güneşten elekrik üretme prensibi, yoğunlaştırılmış güneş termik santrallarından (CSP) tamamı ile farklıdır. CSP sistemlerde güneş ışığı yansıtıcı veya Fresnel lensleri yardımı ile yoğunlaştırılır. Fakat CPV sistemlerde ısı alıcısı yerine PV hücresi bulunur ve ışığın elektriğe çevrilmesini sağlar (Şekil 4.33).

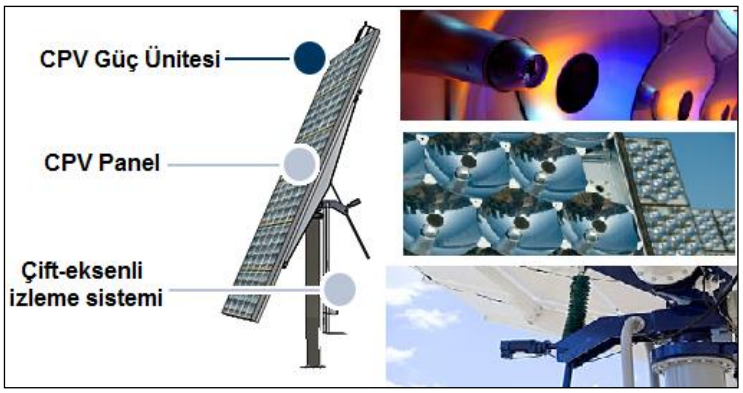
CPV optik konseptindeki en önemli hususlardan birisi, optik verimin arttırılmasıdır. Geleneksel olarak Fresnel lensleri veya aynaları kullanılmaktadır. Dünyadaki Concentrix, Amonix, Guascor, Emcore, Arima ECO, Renovalia CPV, Spl 3G ve Entech gibi CPV üreticileri Fresnel teknolojisini kullanmaktadırlar. Kolay tasarım ve düşük maliyet, bu teknolojinin kullanılmasındaki en önemli etkendir.



Şekil 4.33. Fresnel lensleri kullanımı ile temel CPV tasarımı.

CPV'lerde CSP'lerde olduğu gibi herhangi bir termodinamik süreç bulunmamaktadır. Bazı özellikleri ise Çanak CSP ile benzerdir. Örneğin 5-100 kW arasında modüler tasarım, yüksek verim, üç eksenli güneşi izleme ve enerji depolamasının bulunmaması sayılabilir. CPV sistemlerinin en belirgin özelliği, yüksek yoğunlaştırmadır; 10 ile 2000 kat arasında bir yoğunlaştırma yapabilmektedir. Bunun anlamı klasik PV sistemlerine kıyasla daha küçük düz panel kullanımı gerekmektedir. CPV sistemleri yüksek aydınlıktan elektrik elde edebilmek için tasarlanmıştır. CPV'ler, 100-900 kat arası yoğunlaştırmada %30-40 arası bir verimliliğe sahiptir.

CPV GES projelerinde güneşi izleyen sistem kullanımı çok yaygındır. İzleme sistemi, lineer olabildiği gibi; son yıllardaki uygulamalarda olduğu gibi 2 eksenli de olabilmektedir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34. CPV ana elemanlar.

İspanya'da bulunan ISFOC Enstitüsü (Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentracion) 2006 yılında İspanya Eğitim ve Bilim Bakanlığı, Castilla La Mancha Bölgesel Hükümeti ve IES-UPM tarafından kurulmuştur. ISFOC, toplam kurulu gücü 3 MW'a varan CPV projeleri üzerinde çalışmaktadır. İspanyol Isofoton, Sol 3G, Renovalia; Alman Concentrix; Amerikalı Emcore ve Solfocus ile Tayvanlı Arima ECO bu çalışmalara destek veren üreticilerden bazılarıdır. Şu anda 1.1 MW CPV GES şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. Aralık 2007 tarihinde CPV ile ilgili ilk standart (IEC 62108) çıkarılmıştır. Bu standartlarda aşağıdaki hususlar üzerinde durulmuştur:

Elektrik Testleri: Elektrik performans ölçümü, topraklama, izolasyon testi, ıslak izolasyon testi.

İklim Testleri: Termal çevrim testi, nem donma testi.

Mekanik Testler: Dolu etkisi testi ve mekanik yük performans ölçümü, topraklama, izolasyon testi, ıslak izolasyon testi.

Çevresel Koşullar Testleri: Su sprey testi, dış hava testi.

Çeşitli laboratuvarlar, bu testlerin akreditasyonunu alabilmek için çalışmalar yapmaktadırlar. ISFOC projesine destek veren şirketlerin ürünlerinin montajı öncesi bu testleri sağlaması gerekmektedir. Yoğunlaştırıcı (concentrator) için standart test şartı, 850 W/m^2 ve 60 °C hücre sıcaklığıdır. Ölçüm koşulları ise;

- En az 700 W/m^2 direk radyasyon,

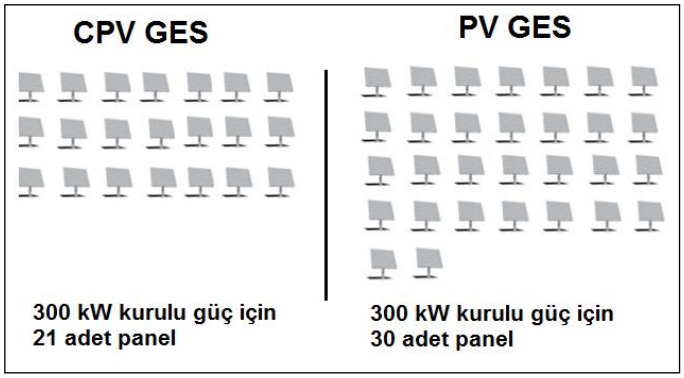
- Açık atmosfer,
- Rüzgar hızı 3.33 m/s den düşük.

Tablo 4.1 ile çeşitli CPV üreticileri verilmiştir.

Tablo 4.1. CPV üreticileri.

Üretici	Ülke	Fabrika Yeri	Yıllık Üretim (MW)
Abengoa Solar	İspanya	İspanya	-
Guascor Foton	İspanya	İspanya	15
Isofoton	İspanya	İspanya	5
Renovalia CPV	İspanya	İspanya	11
Sol 3G	İspanya	İspanya	12
Concentrix	Almanya	İspanya	25
Solfocus	ABD	İspanya	50
Emcore	ABD	İspanya	10
Amonix	ABD	ABD	-
Arima ECO	Tayvan	İspanya	7.5
Solar Systems	Avustralya	Avustralya	5

CPV GES'ler için gerekli saha alanı PV GES'lerden daha küçüktür (Şekil 4.35).



Şekil 4.35. CPV ve PV GES için saha kıyaslaması.

4.6 Sistem Boyutu ve Modül Seçimi

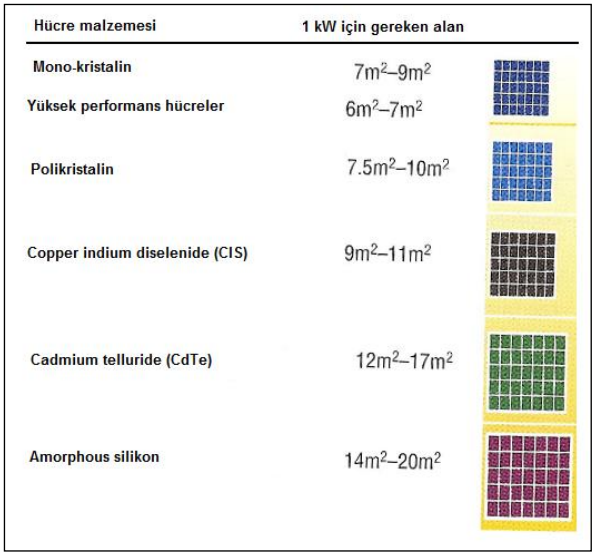
PV GES sistemlerin konsepti, evirici (inverter) sistemin özelliklerine bağlıdır. Bu durum merkezi ve merkezi olmayan modüllerin bağlantısı ve yapısı evirici sistemi ile birlikte optimize edilmektedir. Evirici sistem, bütün PV GES için merkezi, belirli bir sayıda PV modülü için veya herbir modül için olmak üzere 3 çeşittir. PV GES sahası için saha ziyaretleri yapılmalıdır. Bunun için birçok kritere dikkat edilmektedir. Modül seçimi yapılırken de aşağıdaki hususlara dikkat edilmektedir:

a) Hücre malzemesi. Bunlar mono kristalin, polikristalin, amorphous, CdTe veya ince film teknolojisi
b) Modül tipi. Standart modül, Çerçeveli modül, cam modül vb.

Modülün tipi genellikle bu kriterlere göre belirlenmektedir. Bununla beraber, genel kural olarak

1 kW= 10 m^2 alan

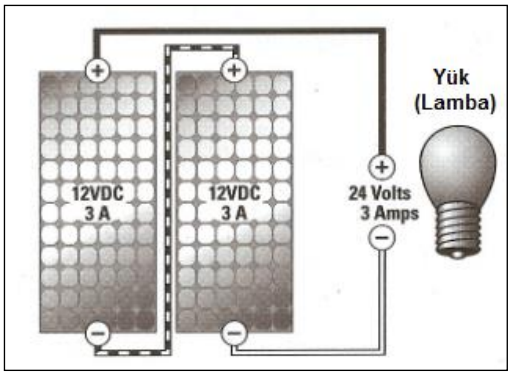
Aşağıdaki Şekil 4.36 ile farklı materyallere göre gereken alanlar görülmektedir.



Şekil 4.36. PV sistemleri için gerekli arazi miktarı.

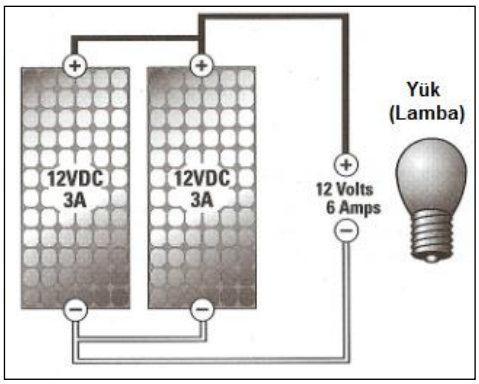
4.6.1 PV İç Bağlantıları

PV GES sistemlerinin elektriksel özelliklerine gelince; PV modülleri seri, paralel veya seri ve paralel olarak birbirine bağlanmaktadır. Aşağıda verilen Şekil 4.37 PV modüllerinin seri bağlanmasına örnektir.



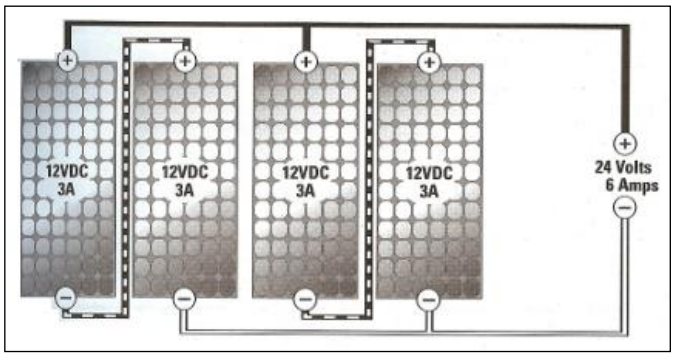
Şekil 4.37. Seri bağlı PV modülleri.

Seri bağlantıda ilk modülün negatif (pozitif) noktası ile son modülün pozitif (negatif) bağlantı ucu birbirine bağlanmaktadır. Yukarıdaki şekildeki bağlantıda 12 V'luk 2 modülün bağlantısı verilmiştir. Seri bağlantıda amper artmadığından 24V ve 3A bir devredir. Paralel bağlantıda da voltlar sabit kalırken amperlerin toplamı alınmaktadır. Bağlantılar pozitif uçların kendi aralarında bağlanması ile sağlanmaktadır (Şekil 4.38). Paralel bağlı PV modülleri 12V ve 3A iki modülün paralel bağlantısında 12V ve 6A bir devre meydana gelmektedir. Piller genellikle paralel bağlanmaktadır. Böylelikle depolama kapasitesi ve işletme süresi de artmaktadır.



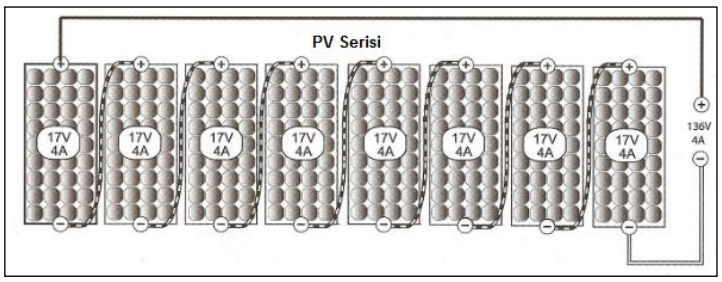
Şekil 4.38. Paralel bağlı PV modülleri.

Seri ve paralel bağlı devrelerde olabilmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.39'dan da görüldüğü gibi 4 adet 12V ve 3A pil seri bağlandığında 24V ve 6A devre oluşmaktadır.



Şekil 4.39. Seri ve paralel bağlı sistem.

Günümüzde şebekeye bağlı çalışan PV GES'lerde yüksek voltaj doğru akım giriş istenmektedir ve bu 75 ile 600 V DC arasında değişmektedir. Evirici yüksek voltaj giriş gerektirdiği için yüksek voltaj DC gerektirmektedir. Bu yüzden PV'ler birbirine Şekil 4.40'da görüldüğü gibi bağlanarak voltajı yükseltmektedirler.

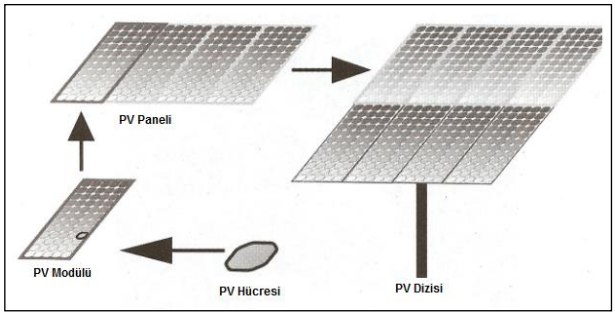


Şekil 4.40. Yüksek voltaj PV serisi.

Seri bağlantıda yükler, voltaj düşüşüne neden olmaktadır. 2 PV modülü de seri bağlanarak kontrol edildiğinde 1 PV modülü arıza yaparsa, diğeri de devre açık hale geldiğinden çalışmayacaktır. Bu yüzden seri bağlantılı PV sistemleri tercih edilmemektedir. Paralel bağlandığında ise, 1 PV modülünün arıza yapması durumunda diğer PV modülleri çalışabilmektedir. PV modülleri, elektrik devrelerinde olduğu gibi bu yüzden paralel olarak bağlanmaktadır.

4.6.2 PV Hücresinden PV Serisine Süreç

Fotovoltaik modüller, hücrelerin seri, paralel veya seri/paralel bağlanması ile oluşan sistemdir. Fotovoltaik sistemin en temel yapıtaşı güneş hücresidir (solar cell). Hücreler, santimetrenin 1/250 oranında bir boyuta sahiptir ve güneş ışığını doğru akım elektrik enerjisine çevirirler. Birçok hücre 0.5 Volt elektrik üretmektedir. Bu yüzden 36 hücreli bir modül 18 Volt üretmektedir. Modüller çeşitli kurulu güçlere sahiptir. Genellikle 5 Watt- 400 Watt arası değişmektedir. Panel veya modül bazen birlikte aynı anlamda kullanılmakla beraber, panel birkaç modülün bir araya gelerek oluşturduğu sistemin adıdır. Şekil 4.41 ile hücreden PV serisine kadar olan akış görülmektedir.



Şekil 4.41. PV hücresinden PV dizisine.

4.6.3 PV Modüllerinin Özellikleri

PV modüllerinin özellikleri az da olsa çeşitli değişimler gösterebilmektedir. Bunlar, hücre malzemesi ve elektrik bağlantılarının değişikliğidir. En çok kullanılan hücre malzemesi kristalin silikondur (mono veya poli). Kristalin silikon; monokristalin veya polikristalin olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Herhangi bir PV modülün elektriksel açıdan performansını etkileyen 5 faktör bulunmaktadır. Bunlar;

a) Hücre malzemesi,
b) Yük rezistansı,
c) Güneş ışın yoğunluğu,
d) Hücre sıcaklığı,
e) Gölgeleme.

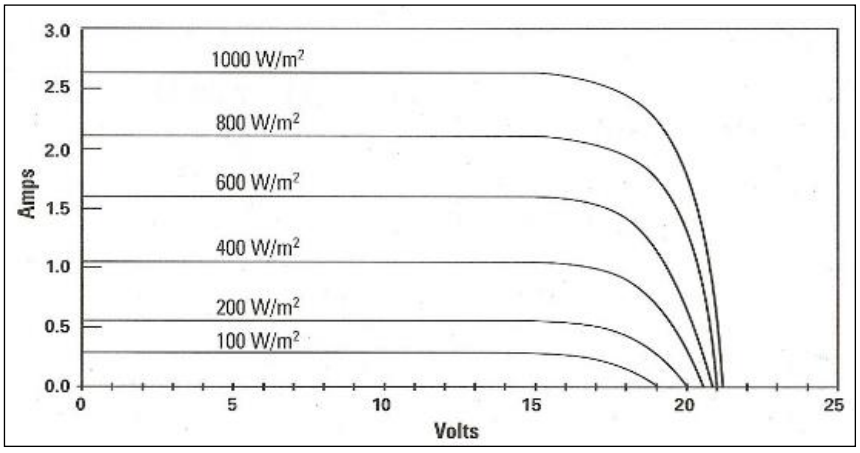
Hücre malzemesi ile ilgili daha önceden bilgi verildiğinden diğer faktörler incelenecektir.

Yük Rezistansı

PV modül, direk kuplaj yapıldığında yük veya piller, modülün işletme gerilimini belirlemektedir. Örneğin nominal 12 V pil sisteminin, pil voltajı 11.5-15 V arasındadır. Pillerin şarj edilebilmesi için, modüllerin voltajının pil voltajından daha yüksek olması gerekmektedir. Direk kuplaj sistemlerinde yapılan çalışmalarda, PV sistemlerinin daha yüksek voltajda çalışması gerekmektedir. Eğer yük rezistansı, modülün I-V eğrisi (akım-gerilim eğrisi) ile uyuştuğunda, modül maksimum veya maksimuma yakın noktada işletme yaptığında en yüksek verim alınmaktadır. Yük rezistansı arttığında, modüller maksimum güç noktasından daha yüksek voltajlarda çalışarak güç çıkışının azalmasına neden olur. Verim ayrıca maksimum güç noktasının altındaki voltaj düşüşlerinde de azalmaktadır. Yük ile PV dizisi arasındaki ilişki indüktif bir yük durumunda (motor veya pompa gibi) özellikle önem arz etmektedir.

Güneş Işın Yoğunluğu

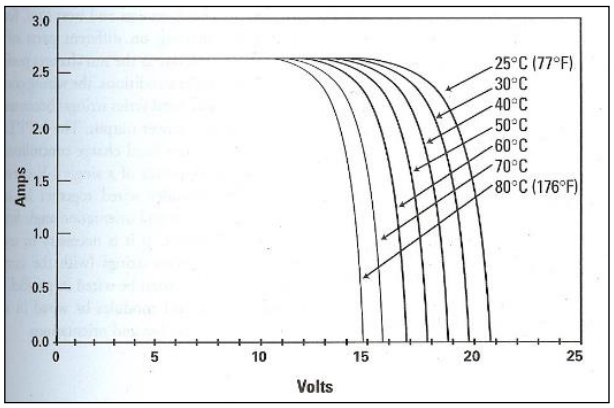
Herhangi bir modülün akım çıkışı, üzerine gelen güneş radyasyonu ile doğru orantılıdır. Daha fazla güneş ışığı, daha fazla elektrik enerjisi demektir. Şekil 4.42'de görüldüğü gibi, güneş ışığı seviyesi düştükçe I-V eğrisinin şekli aynı kalmakta iken; fakat verim azalmaktadır.



Şekil 4.42. Modül performansına insolation etkisi.

Hücre Sıcaklığı

Hücre sıcaklığı, standart işletme sıcaklığı olan 25° C'nin üzerine çıktığında modül verimliliği düşmekte ve gerilim azalmaktadır. Aşağıdaki Şekil 4.44, 25° C nin üzerindeki sıcaklıklarda (hücre sıcaklığı, civar atmosfer sıcaklığı değil) I-V eğrisinin değişimini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, yüksek sıcaklıklarda akım sabit kalmakta iken, gerilim azalmakta ve bu durumda modülün performansının düşmesine neden olmaktadır.

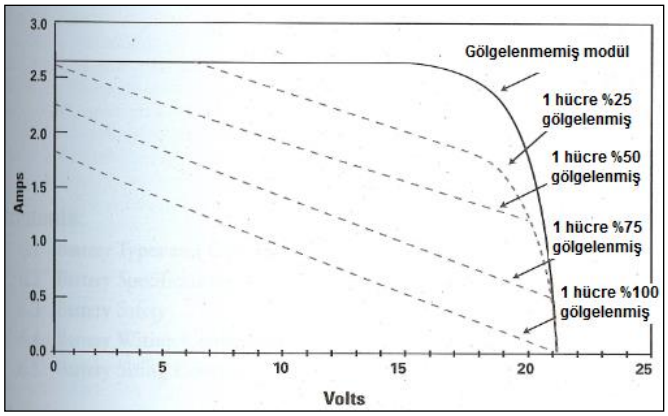


Şekil 4.43. Hücre sıcaklığının modül performansına etkisi.

Hücre sıcaklığının PV modülüne etkisi ile ilgili olarak üretici firmanın ürün broşürü veya kataloglarından bakmak gerekir fakat genel bir kural olarak 25° C'nin altındaki ve üstündeki sıcaklıklarda her bir °C derece azalma/artış için PV modül performansı % 0.5 azalmaktadır.

Gölgeleme

PV modüllerin performansını etkileyen en önemli parametredir. Kısmi bir gölgeleme bile ciddi üretim düşüşüne neden olmaktadır. Bazı modüller, diğer modüllerden daha fazla etkilenebilmektedir. Aşağıda verilen Şekil 4.44 ile gölgelemenin dramatik etkileri görülmektedir.



Şekil 4.44. Modül performansına gölgeleme etkisi.

Şekilde verilen değerlerden aşağıdaki Tablo 4.2 çizilebilir.

Tablo 4.2. Gölgelemenin modüle etkisi.

Bir Hücrenin Gölgelenen Yüzdesi	Modülün Güç Kayıp Yüzdesi
25	25
50	50
75	66
100	75
3 hücre gölgelenmiş	93

Yukarıdaki şekil ve tablo bize, saha seçimi yapılırken gölgeleme etkilerinin ne derecede önemli olduğunu göstermektedir. Aşağıdaki Şekil 4.45 ile Çin Pekin'de Tiannenmen Meydanı'nda gölgelemeye maruz kalmış bir trafik ışık PV sistem görülmektedir.

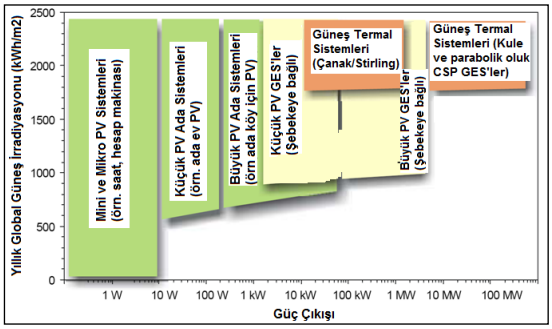
Şekil 4.45. Gölgelemeye maruz bir PV.

Şekil 4.46 ile de Almanya Grevenbroich bölgesindeki bir PV GES görülmektedir.

Şekil 4.46. Gölgelemeye maruz bir PV GES.

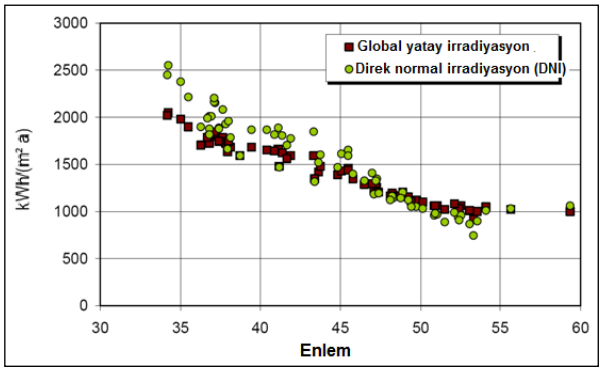
4.7 PV GES Saha Seçimi

Güneş elektrik santrallerinin enerji kaynağı güneş radyasyonu olması nedeniyle güneş radyasyonunun miktarı ve özellikleri kurulacak tesisin verimliliği ve teknolojisi üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. PV sistemleri ve güneş termal güç santrallerinin (CSP) işletilebileceği alanlar Şekil'de de görüldüğü gibi çok dar bir aralıkta örtüşmektedir. Modüler bir yapıda olmalarından dolayı, PV operasyonu Watt seviyesinden MW seviyesine kadar geniş bir alanda olabilmektedir ve PV sistemleri tekil sistem olarak çalıştırılabildiği gibi şebeke bağlantılı olarak çalışabilmektedir. Çanak/Stirling sistemleri ise kW seviyesinde küçük ünitelerdir. Parabolik oluk ve güneş kulesi santralları ise ancak MW seviyesinde çalıştırılmaktadır. Toplam güneş radyasyonu difüz ve direkt olmak üzere iki bileşene sahiptir. Gökyüzü kapalı olduğunda yalnızca difüz radyasyon mevcut olmaktadır. Güneş termal santralleri (CSP GES) güç üretimi için yalnızca direkt radyasyonu kullanabilmelerine rağmen PV sistemleri ise, difüz radyasyonu da kullanabilmekte ve elektriğe dönüştürebilmektedir. Yani, gökyüzünün tamamen bulutla kapalı olduğu durumlarda bile az da olsa enerji üretebilmektedirler. Orta ve Kuzey Avrupa göreceli olarak düşük oranda direkt radyasyon payına sahip olması nedeniyle buralarda güneş termal güç sistemlerinin kurulması ekonomik olarak uygun değildir. Bunun yerine Güney Avrupa ve Kuzey Afrika direkt radyasyon bakımından zengindir ve buralarda güneş termal santrallerinin kurulması daha anlamlı olmaktadır. Ülkemizde ise Güney Avrupa benzeri ve daha iyi direkt radyasyon değerleri bulunmaktadır. Sistemlerin kurulmasında etkili olan diğer parametrelerle birlikte değerlendirmek şartıyla güneş termal güç sistemleri için uygun alanlar ülkemizde de bulunmaktadır. Ayrıca PV güç santrallarinin de kurulabilmesi için yeterli radyasyon ve uygun arazilerde ülkemiz şartlarında mevcuttur.



Şekil 4.47. Yıllık toplam güneş radyasyonu ile CSP ve PV kurulabilecek yerler ve değerler.

Şekilde direk normal radyasyondaki artış (güneşe dik bir alan üzerine gelen radyasyon) ve toplam radyasyonun enleme göre değişimini göstermektedir. Ülkemizin bulunduğu enlemleri de (36-42 N enlemleri) kapsayan radyasyon değişim durumuna göre direkt normal radyasyondaki artış toplam radyasyondan daha fazladır. Sonuç olarak güney bölgelerdeki güneş termik güç santrallerinin karlılığı ve enerji üretimi PV güç santrallerinden daha yüksek olacaktır. PV teknolojilerinin piyasaya çok agresif bir şekilde girmeleri fiyatlarının daha hızlı bir düşüş göstereceğini kanıtlamaktadır. Fiyat düşüşlerinin %50 civarlarında bile gerçekleşeceği düşünülse dahi güney bölgelerde güneş termal güç santrallerinin daha maliyet etkin kalacağını göstermektedir.



Şekil 4.48. Enlemlere göre toplam yatay radyasyon ve direkt global radyasyonun değişimi.

Güneş radyasyon değerlerinin yanı sıra güneş santralı geliştirme aşamalarında dikkate alınması gereken diğer meteorolojik parametreler de bulunmaktadır.

4.7.1 PV GES Santral Sahası Seçimi Yapılırken Dikkat Edilmesi Gerekenler

Meteorolojik değerlerin araştırılmasının yanında PV güneş santrallarının saha seçiminde dikkate alınması gereken diğer parametreleri de aşağıda gibi sıralamak mümkündür.

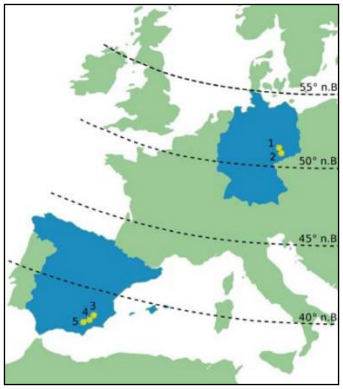
- Saha Özellikleri
  - Konum Bilgileri
  - Arazi sınıfı ve bedeli
  - Toplam ve kullanılabilir alan
  - Eğim ve bitki örtüsü
  - Gölgeleme

- Çevresel Riskler
  - Dereler
  - Yangın
  - Taşkın
  - Tozlanma
  - Deprem

- Altyapı İmkanları
  - Ulaşım ve güvenlik
  - Trafo ve dağıtım merkezlerine uzaklık
  - İletişim altyapısı
  - Su ve elektrik

4.7.2 Çeşitli PV GES Sahalarına Ait İşletme Tecrübeleri

Çift eksenli (dual axis) güneşi izleyen MW kurulu gücündeki PV GES'lerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu GES'lerden meydana gelen üretimin daha yüksek olması bu ilginin nedenidir. Bu sistemin maliyeti daha yüksek olduğu gibi; birim MW için gereken santral sahası da daha büyüktür. Almanya ve İspanya'da yapılan bazı çalışma sonuçlarına göre bazı çift eksenli güneş izleme sistemli PV GES'ler seçilerek çalışmalar yapılmıştır. İncelenen PV GES'lerin yeri harita da Şekil 4.49 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.49. İncelenen PV GES'lerin yerleri.

Almanya'dan seçilen PV GES'ler 51° Kuzey Saksonya Eyaleti civarında, İspanya'dan seçilen PV GES'ler de 37-38° Kuzey Andalusia Granada gölgesinden seçilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan 2 adet PV GES Almanya'da (Borna ve Penig), diğer üçü de İspanya'da (Alqueria, Ventanas, Guadix) bulunmaktadır. Tablo 4.3 ile de incelenen PV GES'ler ile ilgili olarak detaylar görülmektedir.

Tablo 4.3. İncelenen PV GES'lere ait detaylar.

PV GES	**Kurulu Gücü (MW)**	**İzleyici Sayısı**	**İzleyici Markası**
Borna 1	3.44	438	SOLON
Penig 2	0.665	89	DEGER
Alqueria 3	1.02	110	SOLON
Ventanas 4	1.01	110	SOLON
Guadix 5	0.612	72	SOLON

Kullanılan güneş izleme sistemlerinin farkı montaj ve uygulanan izleme algoritması farklılıklarından kaynaklanmaktadır. SOLON ve DEGER marka güneş izleme sistemleri kullanılmıştır. Her iki izleme sistemi de beton temel üzerine oturtulmutur. SOLON marka izleme sistemi, 12 adet geniş OEM Solon marka modül ile kaplanmış olup toplam modül alanı 52.7 m^2 dir (Şekil 4.50).

Şekil 4.50. SOLON güneş izleme sistemi (Ventanas PV GES, İspanya).

İspanya'daki PV GES'lerdeki kuzey/güney ve doğu/batı yönlerindeki izleme sistem mesafesi 20 m x 25 m; Almanya Borna PV GES'te ise 17.5 m x 21 m dir. Alman DEGER güneş izleme sistemi tek bir çelik kaide üzerinde durmaktadır (Şekil 4.51).

Şekil 4.51. DEGER güneş izleme sistemi (Penig PV GES, İspanya).

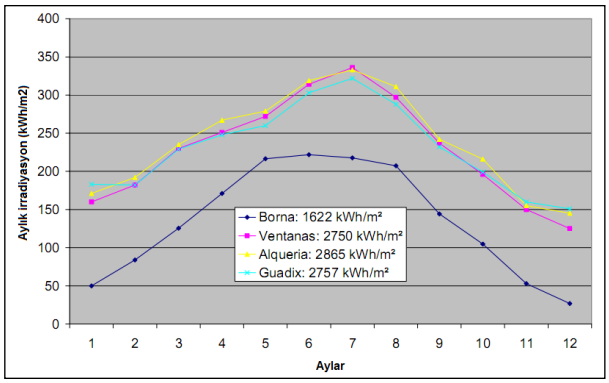
DEGER güneş izleme sisteminde modül alanı 53.6 m^2 dir. İzleme sistemleri arasındaki mesafe de; 25 m x 18 m dir. Projelere ait diğer özet bilgiler, Tablo 4.4 ile verilmiştir.

Tablo 4.4. İzleme sistemleri ve gerekli alanlar.

PV GES	Kurulu Gücü (MW)	Kapladığı Alan (m^2)	1 kW İçin Alan (m^2)	Modül Alanı (m^2)
Borna	3.44	210000	61	23082
Penig	0.665	69400	104	4470
Alqueria	1.02	125000	122	5797
Ventanas	1.01	102000	101	5797
Guadix	0.612	-		3794

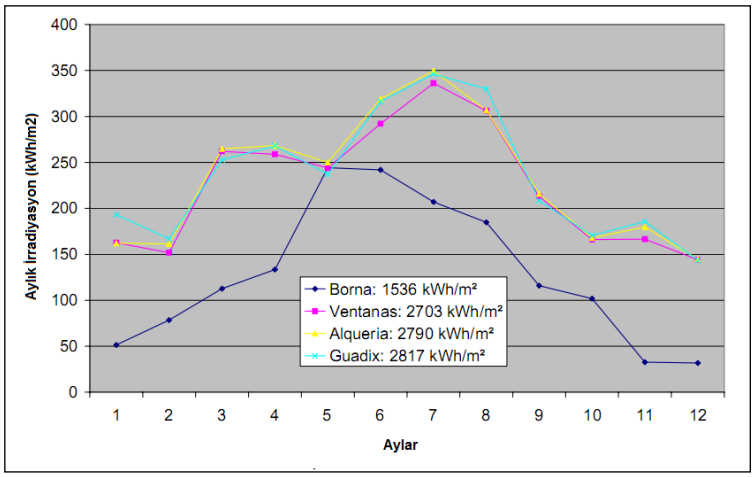
İşletme Sonuçları

İncelenen Almanya'daki PV GES'ler arasında 30 km mesafe bulunmakta olup yıllık ortalama global irradiyasyonu 1060 kWh/m^2 dir. 30° eğimli modüllerin üzerine düşen güneş radyasyonu verilerine göre tek eksenli izleme sisteminde sabit sisteme göre %17; çift eksenli izleme sisteminde de %54 daha fazla üretim alınmıştır. İspanya'daki PV GES'ler arasındaki mesafe ise, 70 km civarındadır. İncelenen 5 saha için yapılan aylık radyasyon değerleri Şekil 4.52 ile görülmektedir.



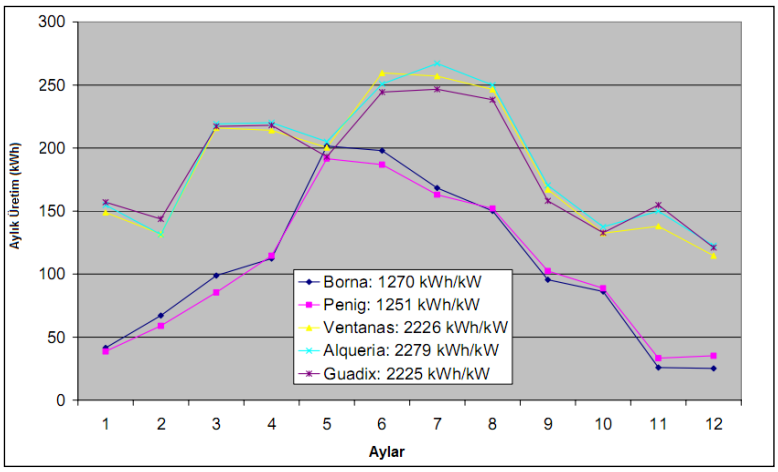
Şekil 4.52. İncelenen sahalara ait aylık radyasyon tahmini.

Aşağıda verilen Şekil 4.53 ile ise, ölçülen aylık radyasyon değerleri görülmektedir. Almanya'da en yüksek aylık irradiyasyon 244 kWh/m^2 ile Mayıs ayında meydana gelirken; İspanya'daki ölçümü yapılan PV GES proje sahalarında Mayıs ayında düşük değerler seyretmiştir.



Şekil 4.53. 2008 yılı ölçülen değerler.

Şekil 4.54 ile incelenen 5 PV GES projesine ait 2008 yılı üretim verisi görülmektedir. Almanya'daki PV GES'lerden yıllık 1260 kWh üretim meydana gelirken; İspanya'daki PV GES'lerden de 2250 kWh üretim meydana gelmiş olup aradaki fark %78'dir.



Şekil 4.54. 2008 yılında yıllık üretim değerleri.

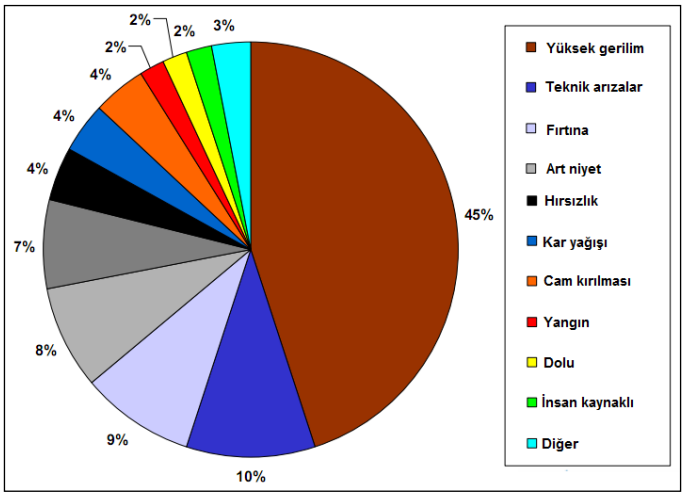
Yapılan çalışmalardaki ilk sonuç, irradiyasyon farklılıklarının yıllık üretim değeri üzerinde ne kadar etkili bir parametre olduğunu ve tek eksen ile çift eksenli izleme sistemi kullanıldığında yıllık üretimde ciddi farklılıkların bulunduğunu bize göstermektedir.

4.7.3 PV Montajındaki Riskler

İncelenen PV GES'lerin montaj aşamasında da bazı sıkıntıların olabileceği ve bunun sonucu olarak gecikmelerin yaşanabileceğini bize göstermiştir. Bunların meydana gelmemesi için montaj öncesi planlamanın dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Montaj aşamasında aşağıdaki sıkıntılar yaşanmıştır:

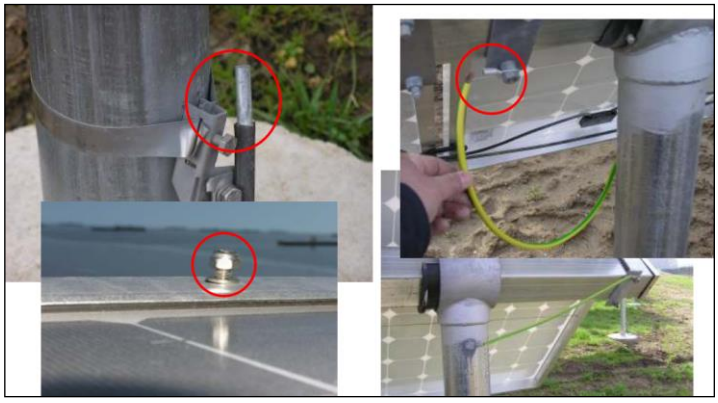
- Teslimatta gecikmeler,
- Arıza ve enerji kayıpları,
- Hırsızlık ve vandalizm,
- Yangın,
- Statik arızalar
- Fırtına ve yıldırım,
- Kar, buz ve dolu,
- Deprem, heyelan, taşkın ve sel.

Şekil 4.55 ile Almanya'daki bir sigorta şirketi verilerinden yola çıkılarak hazırlanmıştır. Buradan da görüleceği gibi; PV GES sistemlerinde en fazla arıza %45 yüksek gerilim kaynaklı meydana gelirken onu %10 ile teknik arızalar ve onu da takiben meteorolojik kaynaklı bazı arızalar bunları izlemektedir.



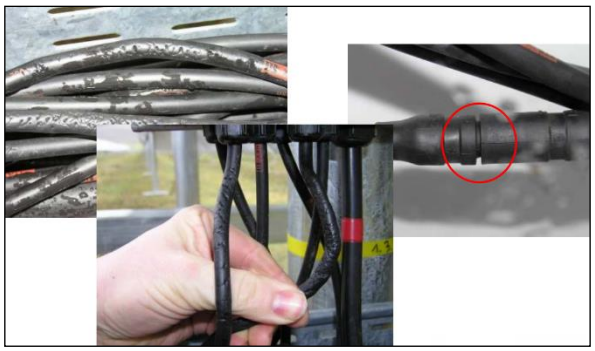
Şekil 4.55. Almanya'da PV arıza sebepleri.

Aşağıdaki Şekilde Almanya Münih civarında bir PV GES'te meydana gelen modül bağlantıları arasındaki arızalar görülmektedir.



Şekil 4.56. Modül bağlantı arızaları.

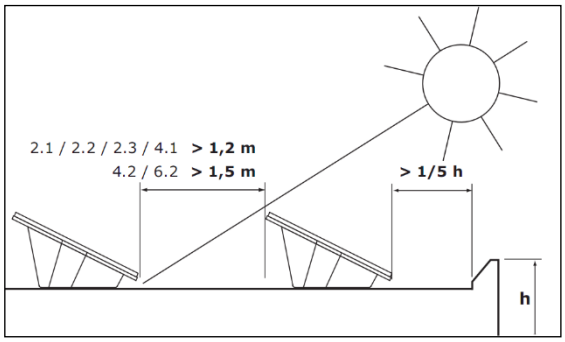
Panel için kısımlarında meydana gelen kablo arızaları ise, aşağıda görülmektedir.



Şekil 4.57. Modül iç kısmı kablo arızaları.

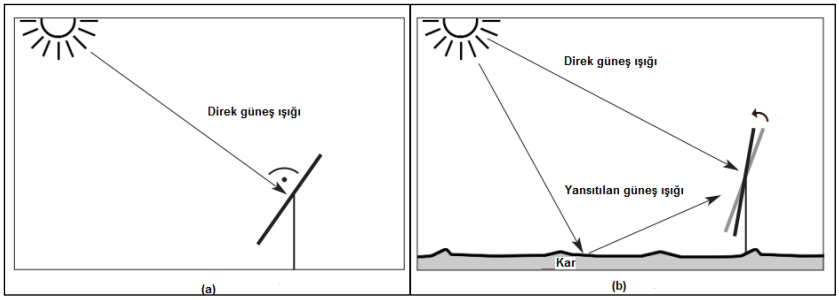
4.7.4. Panel Yerleşimi

Panel yerleşimi PV GES projesinde en önemli meteoroloji mühendisliği çalışmalarından birisidir. Burada birçok meteorolojik parametrenin de dikkate alınması gerekmektedir.



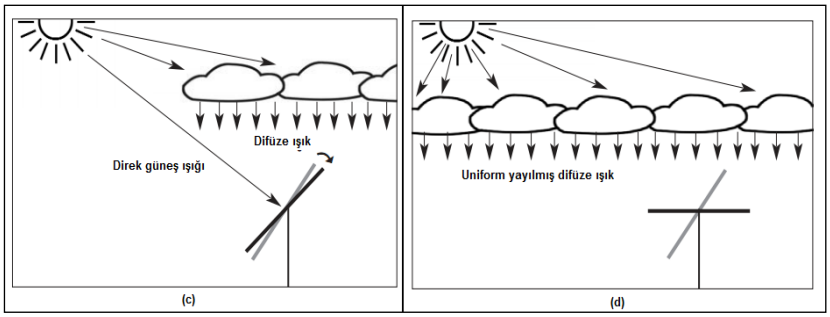
Şekil 4.58. Panel yerleşimi.

Güneş izleme sistemi kullanıldığında ise, panel yerleşimi dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Şekil 4.59 (a) ile açık gökyüzü koşullarında gelen direk güneş ışığı PV modülüne vurmaktadır. Şekil 4.59 (b) ile kar yağdığında hem direk hem de yerden yansıyarak modüle çarpan güneş ışığı tarafından elektrik üretimi gerçekleşmektedir.



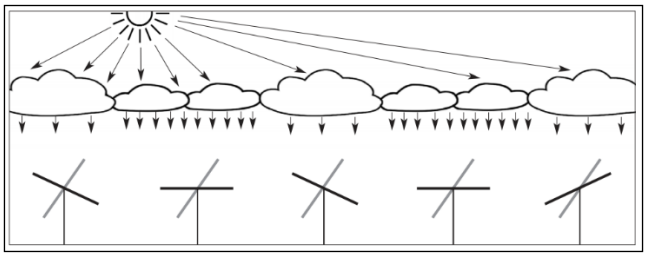
Şekil 4.59. Direk ve kara çarparak yansıtılan güneş ışığı.

Şekil 4.60 (c) ile az bulutlu gökyüzü koşullarında hem direk hem de bulutlardan difüzyon yoluyla olan güneş ışığı PV modül üzerine gelmektedir. Şekil 4.60 (d) gökyüzünün uniform olarak kapalı olduğu koşullarda difüzyona uğrayan ışınlardan PV modülü elektrik üretebilir. Böyle bir durumda güneşi izleyen sistemin yatay pozisyona geçebilmektedir.



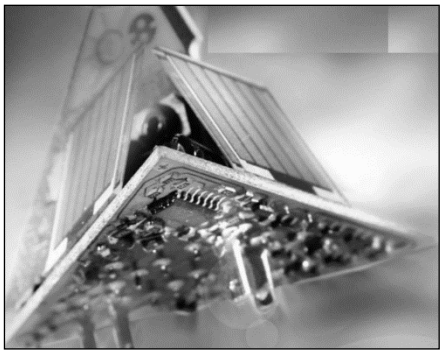
Şekil 4.60. Direk, difüze ve uniform yayılmış difüze ışık.

Farklı bulutluluk koşullarında PV modülünün alacağı pozisyon Şekil 4.61 ile görülmektedir. Burada siyah PV modül normal pozisyonunu; gri renk ise güneşi izleyen sistem ile birlikte PV modül pozisyonunu vermektedir.



Şekil 4.61. Direk, difüze ve uniform yayılmış difüze ışık.

Yeni jenerasyon güneş izleme sistemleri güneşin en aydınlık olduğu noktaya doğru çevirmesi gerekmektedir. Böylelikle maksimum üretimin meydana gelmesi sağlanmış olmaktadır. Bu sistemlerdeki en önemli ünite ise kontrol sistemidir. Kontrol sistemi, izleme ünitesinin büyüklüğüne göre değişmektedir. Kontrol sisteminin fotoğrafı Şekil 4.62 ile görülmektedir.



Şekil 4.62. İzleme sisteminin kontrol ünitesi.

Kontrol ünitesine ait bazı bilgiler ise;

- 18..50 V DC,
- Kontrol modunda güç tüketimi 0.1 W,
- Ağırlık 90 gr.

Aşağıdaki tabloda büyük kurulu güçlü sisteme ait bazı özellikler görülmektedir.

Tablo 4.5. Büyük kurulu güçlü izleme sistemi özellikleri.

PV kurulu gücü	**2000 – 3800 W**	**4000 – 6400 W**	**6000 – 9000 W**
Modül alanı	25 m^2	40 m^2	60 m^2
Doğu-batı rotasyon açısı	360°	360°	360°
Kontrol modunda elektrik tüketimi	1 W	1 W	1 W
İşletme modunda elektrik tüketimi	7 kWh	8 kWh	9 kWh
Yükseklik (m)	3.5 – 5.5	3.5 – 5.5	3.5 – 5.5
Ağırlık (kaide hariç)	480 kg	650 kg	1090 kg

4.7.5 Bazı Avrupa Ülkelerindeki PV GES Tecrübeleri

İzleyen sayfalarda çeşitli sempozyumlarda çeşitli çalışmalarda güneş izleme sistemi kullanıldığında üretimin %40 civarında arttığı saptanmıştır.

İspanya Kanarya Adaları'nda bulunan Tenerife'de yapılan bir çalışmada ITER (The Technological Institute for the Renewable Energy) tarafından bazı sonuçlar bulunmuştur ve ilerleyen sayfalarda bunlar ile ilgili bilgiler verilecektir. ITER tarafından 3 yıl önce planlaması başlanan bu PV GES'lerin inşaatı da ITER tarafından yapılmıştır. Bu PV GES'lerin ilki 20 MW kurulu gücünde olan SOLTEN I isminde ve Granadilla de Abona'da; ikincisi de 4 MW SOLTEN II isminde ve Arico'da 12.6 MW; Santa Cruz 200 kW; Laguna 100 kW ve La Cuesta'da 880 kW olarak çalışmaktadır. Şekil 4.63 ile SOLTEN I ve II görülmektedir.

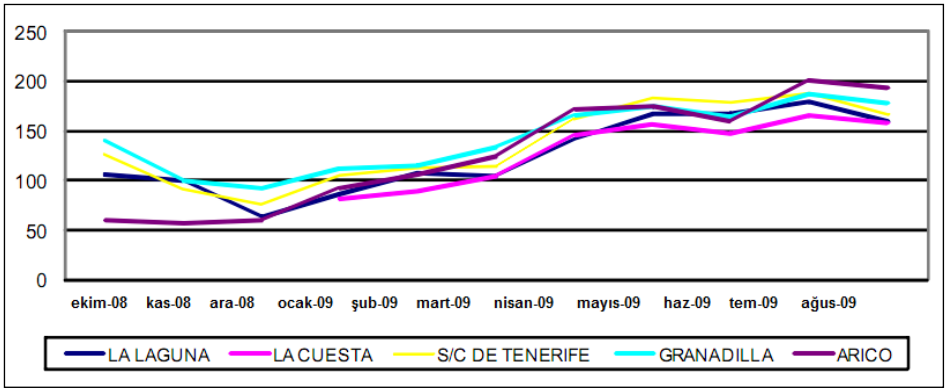
Şekil 4.63. SOLTEN I ve II PV GES.

Kullanılan Güneş Modülleri

Her bir PV GES için farklı modül markaları kullanılmıştır. Bunlar arasında Solarworld, Yingli ve ITER'in kendi markası bulunmaktadır. Modüller, mono veya polikristalindir. 162 W – 200 W arasında kurulu güçleri bulunmaktadır. İspanya'daki teşvik mevzuatı gereği 100 kW olarak 100 kW evirici üzerinden bağlanmıştır. 100 kW GES için yaklaşık 820 m^2 alan gerekmekle beraber, kullanılan modül markasına göre bazı değişimler gösterebilmektedir. Şebeke bağlantıları için 2 MW olarak gruplanmış ve 2000 kVA trafo kullanılmıştır. Güneş modülleri, hafif alüminyum yapı üzerine monte edilmiştir. IEC 61215 standardına göre kristalin solar modüller 25 yıl çalışması gerektiğinden destek yapıları da 25 yıl için planlanmıştır.

Farklı Kuşaklardaki Güneş Saatleri

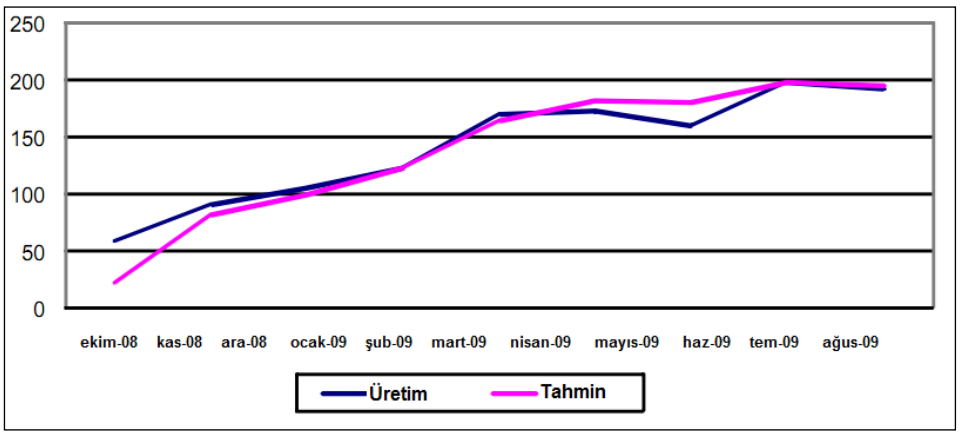
İrradiyasyon verileri incelendiğinde ve sistem kayıpları göz önüne alındığında Solar Equivalent Hours (SEH) ITER tarafından tanımlanmıştır. Aslında bu tanım, Güneş Saatleri (Sun Hours) olarak da tanımlanabilir. Bu tanımla, GES'in pik gücü kaç saat üretebileceği ifade edilmektedir. Bu yöntemle aynı tasarıma sahip fakat farklı bölgelerde bulunan GES'lerin üretim değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 4.64 ile adadaki farklı kuşaklardaki değerler görülmektedir.



Şekil 4.64. Farklı kuşaklardaki SEH sonuçları.

SEH Tahminleri

Bilindiği gibi, YEK önündeki en önemli hususlardan birisi de tahmin edilebilirliktir. ITER, özel meteoroloji şirketlerinden profesyonel yardım alarak bu sorunu aşmıştır. Hizmeti alınan meteorolojik parametreler arasında radyasyon, nem, rüzgar hızı, sıcaklık ve yağış yağma olasılığıdır. Yapılan meteorolojik tahminler sayesinde üretim tahmini mümkün olmuştur. Şebeke işleticisine 48 saat öncesinden bu veriler tedarik edilmiştir. Bu husus, Kanarya Adası gibi ada sistem çalışan bir yapıda büyük önem arz etmektedir. Şekil 4.65 ile Ekim 2008 – Ağustos 2009 arasındaki üretim ile tahminlerinin kıyaslaması verilmiştir.



Şekil 4.65. PV GES üretim tahminleri ve gerçek üretim karşılaştırılması.

Yukarıdaki grafikten de görüldüğü gibi, gerçek ile tahmini üretim arasında oldukça yüksek bir korelasyon bulunmaktadır. ITER'in öncülüğünde Kanarya Adası Tenerife Şehrinde 1990'lardan bu yana rüzgar elektrik santralları yapılmıştır. 2005 yılından sonra ise, PV GES'ler Tenerife'de kurulmaya başlanmıştır. 2009 sonu itibarı ile de 40 MW kurulu güçte PV GES bulunmaktadır. Bunlar arasında SOLPV GES (20 MW) ve Finca Verde PV GES (9 MW) verilebilir (Şekil 4.66).

Şekil 4.66. SOLTEN (a) ve Finca Verde (b) PV GES'ler.

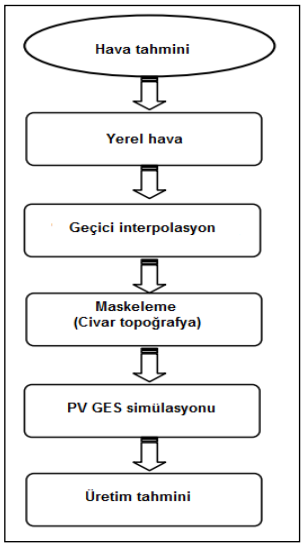
Kazanılan Tecrübeler

Projeler yapılırken lokal ve kamu ahalinin davranışı, finansal ve mali konular, montaj, işgücü, iletişim ve bakım gibi konularda çeşitli tecrübeler kazanılmıştır. Bunlar ilerleyen sayfalarda verilmiştir. Diğer

birçok projede olduğu gibi, kamu ve yerel halkın desteği, PV GES projelerinde çok önemlidir. Projenin önündeki avantaj ve dezavantajlar ile daha sonra oluşabilecek engellerin tahlilinin yapılması gerekmektedir. İdari süreç ve yerel halkla ilişkiler projenin gerçekleştirilmesinde hayati öneme sahiptir. Ayrıca idari mevzuatta daha sonra yapılabilecek değişiklilere de dikkat edilmelidir. Mali ve finansal konular, projenin yapılmasındaki en önemli husustur. Finansal gücün olması, her ne kadar projeyi garanti etmese de; proje realizasyonu için büyük önem taşımaktadır. PV GES projeleri bankacılar tarafından artık anlaşıldığından proje kredisi de mümkündür. Projenin finansman ve inşaat kısımlarına başlamadan evvel PV piyasası ile ilgili ciddi bir araştırma yapılmalıdır. Sadece PV modülleri değil; diğer teçhizatın da emre amadeliği ve bulunabilirliğine dikkat edilmelidir.

PV modüllerinin montajı toprağın üzerine konulduğundan toprak düzenlemesi ve hafriyat yapılmaktadır. Bununla beraber, topoğrafyayı fazla da bozmamak gerekmektedir. Çünkü arazinin profili değiştirildiğinden suyun akış yolları ciddi değişime uğramaktadır ve bu durum ileride ciddi sel tehlikesi ortaya çıkarabilmektedir. Drenaj sistemi, ne kadar planlanır ise planlansın; yine de sel riski bulunmaktadır. Dolayısı ile arazinin su konturları mümkün mertebe bozulmamalıdır. PV GES sisteminin planlaması ve montajı mümkün mertebe modüler olmalıdır. İnşaat ve montaja başlanıldığında nakliye hususuna büyük önem addedilmelidir. Bilindiği gibi, PV GES'ler genellikle yerleşimden uzak ve yerleşim olanaklarının da nisbeten kısıtlı olduğu yerlere yapılmaktadır. Nakliye, inşaat ve montaj programına göre ayarlanmalıdır. Herhangi bir ekipmanın gecikmesi (ister küçük ister büyük) PV GES'in işletmeye alınmasını geciktirebilir. PV GES inşaatı ve montaj işleri, nitelikli ve tecrübeli işgücü ile yapılmasını gerektirmektedir. Bazı işler, taşere edilebilir fakat burada tecrübeye dikkat edilmelidir. İşletme bakım sırasında sağladığı kolaylıklar düşünülerek PV GES içerisinde bulunan bütün tesisler, birbirine olabilecek en yakın mesafede planlanmalıdır. Büyük kurulu güçlü PV GES'ler planlanırken saha optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Zira sigorta ve güvenlik konuları açısından da tecrübeler bu yönde olması gerektiğini göstermiştir. İşletme ve bakım aktiviteleri sırasında veya parça değiştirilmesi gerektiğinde modüler sistemin büyük kolaylıkları bulunmaktadır. İşletme ve bakım yapılırken PV GES'te önleyici bakım (preemptive maintenance) konseptine göre yapılmalıdır.

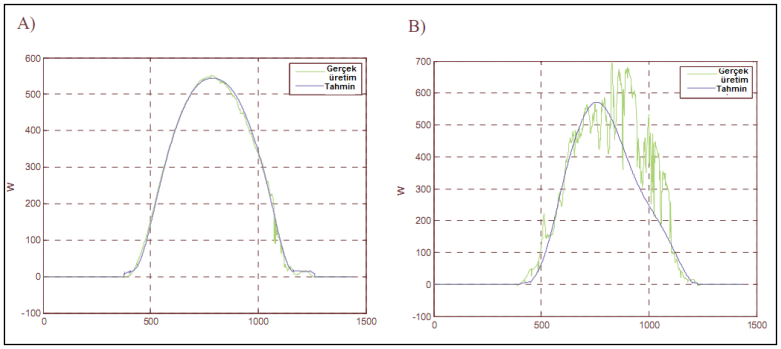
Fransa'da 2020 yılı için 4 GW PV GES planlandığından, önümüzdeki yıllarda PV GES'lerin sayısının artacağı düşünülmektedir. Şebeke işleticisi açısından PV GES'ten üretilen elektriğin tahmin edilebilmesi önemli hale gelecektir. Konu ile ilgili olarak bir çok çalışma yapılmaktadır. Burada French Solar Energy Institute (INES) tarafından geliştirilen bir tahmin programı tanıtılacaktır. Bu tahmin için bazı veriler gerekmektedir. Bunlar, günlük meteorolojik veriler, PV GES'in bulunduğu yerdeki mikroklima, pik güç, modülün tilt açısı, modül verileri, bulunulan enlem ve boylam olarak verilmektedir. Bu veriler kullanılarak bir sonraki gün için tahmin yapılabilir. Şekil 4.67 ile metodoloji şematize edilmiştir.



Şekil 4.67. Tahmin modeli basitleştirilmiş akış şeması.

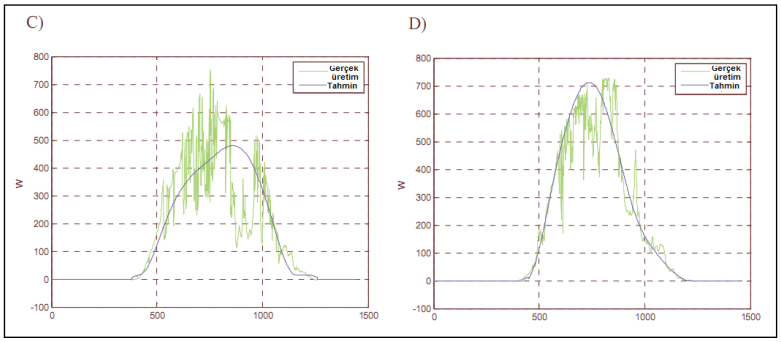
Şemadan da görüldüğü gibi, öncelikle meteorolojik tahmin verileri alınarak lokal hava verilerine eklenir. Daha sonra interpolasyon yöntemi uygulanarak PV GES simülasyonuna bu veriler gönderilir ve üretim tahmini oradan alınır. Civar topoğrafya girilerek bölge verisi de eklenmiş olunur.

Yukarıda anlatılan model sonuçları Fransa Alpleri ve güney Fransa'daki bir sahada denenmiştir. 1 kW GES için bu çalışma yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, Şekil 4.68 ile bazı günlere ait gerçek ve tahmini üretim verileri görülmektedir. Şekildeki (A) ile güneşli bir güne ait olduğundan dolayı tahmin doğrudur ve korelasyon da büyüktür. (B) grafiği biraz daha bulutlu bir güne aittir ve korelasyon daha düşüktür.



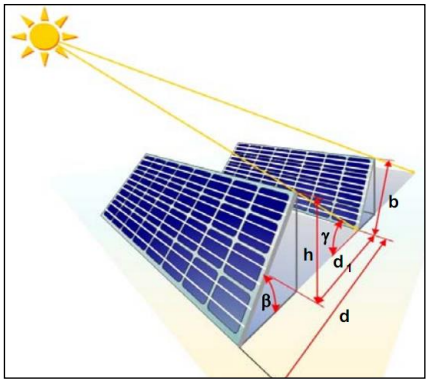
Şekil 4.68. Tahmin sonuçları 1.

(C) ve (D) grafiği ile gösterilen günler daha yoğun bulutlıu günler olduğundan dolayı korelasyon daha düşük olmakla birlikte; yine de iyi bir yaklaşımdır.



Şekil 4.69. Tahmin sonuçları 2.

Almanya'da yapılan çalışma sonuçlarına göre, PV'den elde edilen üretim, PV modül yerleşimi, tilt açısı ve PV modül destek yapısının montajına bağlıdır. PV modülleri optimum bir şekilde yerleştirilse dahi; gölgeleme etkisi yüzünden ciddi üretim kayıpları meydana gelebilmektedir. PV'lerin gölgelenmesi, ağaçlar, binalar vb gibi kontrol edilemeyen engellerden olabileceği gibi; aslında kontrol edilebilecek olan PV yerleşimi nedeni ile de olabilmektedir. Gölgeleme kayıpları, PV sistemlerindeki en önemli kayıplardır. Almanya'daki 100000 Çatı Programı (100000 Roof Program) ile ilgili yapılan çalışmalarda, PV sistemlerinin büyük bir çoğunluğunun tahmin edilenden daha düşük bir üretim yaptığı görülmüştür. Burada özellikle PV modüllerin kendi kendini gölgelediği saptanmıştır. Kendi kendine gölgeleme (self-shading), öndeki PV modüllerinin sebebiyet verdiği bir hususdur ve tam anlamı ile bundan kurtulmanın yolu yoktur; ancak kayıplar minimize edilebilir. PV montajı yapılırken modüller arası minimum uzaklık (d) doğru analiz edilmelidir (Şekil 4.70).

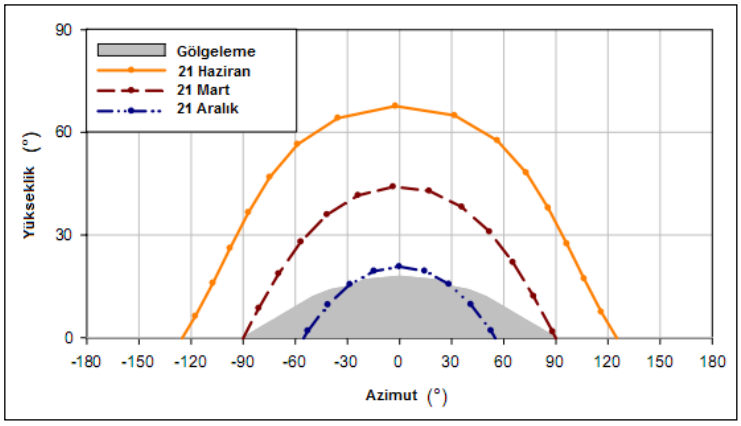


Şekil 4.70. Gölgelemenin azaltılması için gerekli mesafeler.

Şekilde verilen parametreler:

γ_{min}: Yılın minimum güneş yükseklik açısı (tam öğle vakti veya en kısa gündeki 21 Aralık)
Seçilen tilt açısı β için mesafe faktörü F=d/b

olarak verilmektedir. Şekil 4.71 ile Slovenya Ljubljana'daki 21 Aralık tarihinde saat sabah 10 ile öğleden sonra 14 arasındaki gölgelenme grafiği görülmektedir. Bu ekliptik diyagramdan da görüleceği gibi, gölgeleme kayıpları sadece Aralık ayında değil bütün kış aylarında da meydana gelebilmektedir. Bu çalışma kristakin silikon hücrelerin kullanıldığı PV sistemleri ile yapılmıştır.

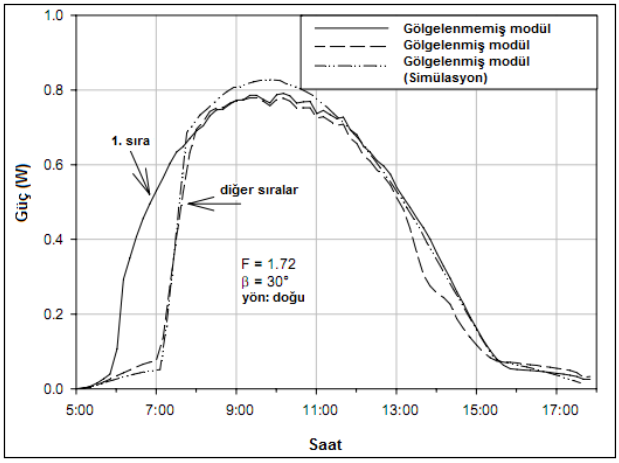


Şekil 4.71. Slovenya Ljubljana 21 Aralık kayıpları.

Şekil 4.72 ile testi yapılan PV'lerin nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir. Modüller doğuya doğru 30° açı ile yerleştirilmiştir ve mesafe faktörü (spacing factor) 1.72 alınmıştır.

Şekil 4.72. Testi yapılan modüller.

Kendi kendine gölgelemenin üretim değeri üzerine etkisini doğru bir şekilde gösterebilmek için çalışmada kullanılan her iki modül önceden standart test koşullarında (Standard Test Conditions, STC) test edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan özellikle sabah vaktindeki üretimin normal test koşullarına göre düştüğü görülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda da üretimin normal değerinden %11 daha düşük olduğu görülmüştür Şekil 4.73 ile gölgelemenin etkileri günün güneşli saatleri içerisinde standart test koşulları ile kıyaslanarak verilmiştir.



Şekil 4.73. Standart ve gölgeleme etkisi ile gerçek üretim değer grafiği.

4.8 PV Diğer Uygulamalar

Bu kısımda PV GES system uygulamalarına ait diğer projeler üzerinde durulacaktır. Çok çeşitli küçük çaplı PV GES uygulamaları olsa da; burada en yaygın kullanılan sistemler üzerinde durulacaktır.

4.8.1 Uzay Gemileri

PV hücreleri ilk geliştirildiğinde sadece uzay gemisi uygulamaları için kullanılacağı düşünülmüştür. PV hücreleri uzay gemilerinde günümüzde de kullanılmaya devam edilmektedir. Marsa gönderilen son uzay gemisinde de birçok PV hücresi kullanılmıştır. Uzayda kullanılan PV hücreleri, dünyanın manyetik alanı ve atmosfer tarafından korunmadığından dolayı kullanım ömrü 7 yıldır.

Şekil 4.74. Uzay gemisinde kullanım.

Yukarıdaki verilen fotoğraf International Space Station'a aittir. 109 metre uzunluğunda bir kaide üzerine yerleştirilmiştir ve dünya yüzeyindan 400 km yükseklikte bulunmaktadır.

4.8.2 Askeri Uygulamalar

Bazı uzak bölge askeri tesislerde PV hücreleri kullanılmaktadır. Haberleşme, ikaz ışığı gibi askeri amaçlar için kullanılmaktadır. Aşağıda örnek olarak askeri bir kamptaki sistem görülmektedir.

Şekil 4.75. Askeri amaçlı kullanım.

Bu tip sistemler, aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır:

- 100 W – 1000 W arası güneş hücreleri,
- Düşük bakım gerektiren piller,
- Çevreye dayanıklı sistemler.

4.8.3 Sivil İletişim Sistemlerinde Kullanım

Ülkemizde de konu ile ilgili birçok uygulama bulunmaktadır. İlk akla gelen uygulamalar, orman yangın gözetleme kuleleri, cep telefonu baz istasyonu ve radyo link istasyonları sayılabilir.

Şekil 4.76. Cep telefonu baz istasyonu.

Güneş ve rüzgar enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrid sisteme ait fotoğraf aşağıda görülmektedir.

Şekil 4.77. Hibrid cep telefonu baz istasyonu.

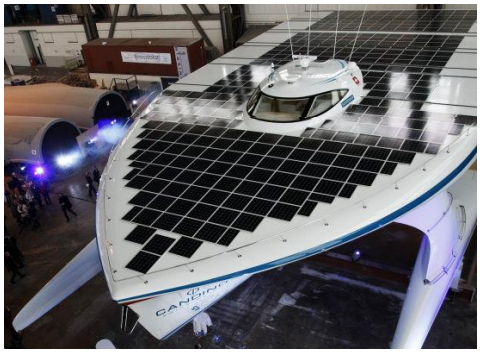
Ülkemizde birçok orman yangın gözetleme istasyonunda güneş panelleri kullanılmaktadır. Aşağıdaki fotoğraf, Çanakkale Lapseki İlçesi Şap Dağı Mevkiinde bulunan orman gözetleme kulesine ait bir güneş paneli görülmektedir.

Şekil 4.78. Orman gözetleme kulesinde kullanım.

4.8.4 Diğer Son Kullanıcı Uygulamaları
Güneş enerjisi kullanılarak çeşitli prototip arabalar üretilmiştir.

Şekil 4.79. Güneşle çalışan araba.

Bazı teknelerde de güneş panelleri sıklıkla görülmektedir.



Şekil 4.80. Teknelerde kullanım.

Güneş enerjisi kullanılarak çeşitli prototip bisikletler de üretilmiştir.

Şekil 4.81. Bisiklette soğutma için kullanım.

4.9 Güneş Enerjisi Binalarda Kullanım (BIPV)
Son yıllarda binalara entegre PV sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Birçok ülkede bu sistemlerin kullanımı da teşvik edilmeye başlanmıştır. Uluslararında Building Integrated Photovoltaics (BIPV) olarak bilinen bu sistemler aslında 2 çeşittir. Birincisi, bina yapıldıktan sonra montajı yapılan Building Adopted Photovoltaics (BAPV) ve bina yapılmadan evvel projelendirilen ve bina ile birlikte yapılan ve binanın bir parçası olan Building Integrated Photovoltaics (BIPV). Son yıllarda artık her iki konsepte de BIPV denmektedir. Aşağıdaki Şekil 4.82 ile BAPV görülmektedir.

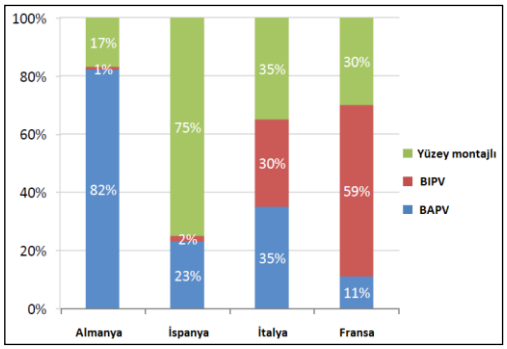
Şekil 4.82. BAPV sistemi.

Birçok ülkede Building Integrated PV (BIPV) olarak adlandırılan bu sistem en yüksek teşviği almaktadır. BAPV, 2000'li yıllardan sonra yerini BIPV kullanımına bırakmaya başlamıştır. Bunun nedenleri arasında;

- Sistemin boyutunun renginin ve görünüşünün bina ile uyunlu olması,
- Sistemin hava koşullarına daha dayanıklı olması,
- İşletme ve bakım kolaylıkları,
- Sistem ağırlık ve statik hesapların bina yapılmadan hesaplanması,

gibi çeşitli nedenler sayılabilir.

Dünyadaki PV GES toplam kullanımında BIPV sistemlerinin oranı çok küçük olsa da; kullanımı gittikçe artmaktadır. Özellikle Avrupa ülkelerinde yaygın bir kullanım olduğu görülmektedir. 2009 yılında AB'de PV kullanımı 16 GW'a ulaşmış olup özellikle Almanya'da BIPV kullanımı ciddi boyutlardadır. Yapılan tahminlere göre, AB'de yaklaşık 400 MW BIPV kullanımı bulunmaktadır. Almanya'daki PV kurulu gücünün yaklaşık %80'i BIPV olduğundan en yüksek kullanım bu ülkede görülmektedir. Almanya'yı %35 kullanım ile İtalya ve %23 kullanım ile İspanya takip etmektedir. Şekil 4.83 ile bu oranlar görülmektedir.



Şekil 4.83. Çeşitli Avrupa ülkelerinde BIPV kullanım oranları.

AB Ülkelerinde BIPV kullanım oranı %9 civarında iken tüm dünyada bu oran ancak %6 civarındadır. Avrupa'dan sonra Japonya ve Amerika'da kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

4.9.1 BIPV Sınıflandırması

Yapılış şekli ve kullanım biçimine gore BIPV 5 alt bölüme ayrılabilir Bunlar;

- Standart Çatı sistem BIPV,
- Yarışeffaf Sistem BIPV,
- Cladding Sistem BIPV,
- Solar Tiles ve Shingles,
- Esnek Laminasyon (Flexible Laminate)

Standart Çatı Sistem (Standard Roof System)

BIPV sistemleri içerisinde standart çatı sistemi, kullanımı en basit ve yaygın olan sistemdir. Dünyada en yaygın kullanılan kristalin silikon malzemesi kullanılır ve çatıya kolayca monte edilir. Aşağıdaki Şekil 4.84 ile bu sisteme örnek verilmiştir.

Şekil 4.84. Standart Çatı Sistem BIPV.

Sistemin Avantajları

- Eski ve yeni binalara uygulanabilir,
- Oldukça iyi bilinen ve kendini ispatlamış bir uygulamadır,
- Maliyeti düşüktür ve verim yüksektir.

Sistemin Dezavantajları

- Estetik olarak pek ideal değildir,
- Ancak belirli çatı tiplerine uygulanabilir.

Yarışeffaf Sistemler

Cam veya güçlendirilmiş camın kullanıldığı bu sistemler, güneş ışığının bir kısmını geçirirler. Bu tip sistemlerin planlaması yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır. Şekil 4.85 ile örnek bir yarışeffaf BIPV sistem görülmektedir.

Şekil 4.85. Yarı şeffaf BIPV sistemi.

Sistemin Avantajları

- Estetik olarak güzeldir,
- Prestijli binalarda tercih edilir.

Sistemin Dezavantajları

- Üniteler ağır olabilir,
- Fiyatları yüksektir,
- Bina ile oldukça iyi entegre olduğundan kamuoyunun dikkatinden kaçabilir,

- Elektrik kablajını saklamak pek kolay değildir ve belirli bir boyutta olabilmektedir.

Cladding System
Güneş panelleri, binalara olarak entegre (cladding) edilebilir. Binaların dış cephelerine de bu sistem uygulanabilmektedir. Şekil 4.86 ile örnek bir cladding sistem görülmektedir.

Şekil 4.86. Cladding sistemi.

Sistemin Avantajları

- Binaya entegre edilmeleri kolaydır,
- Farklı renklerde olabilirler ve estetik açıdan güzel görünürler,
- Yüksek verimliliğe sahiptir.

Sistemin Dezavantajları

- Montajı biraz pahalıdır,
- Binanın düşük seviyelerinde kullanımı (gölgeleme sebebi ile) verim düşmesine neden olabilir.

Solar Tiles ve Shingles
Çeşitli çatı tiplerine uygulanabilen bir sistemdir (Şekil 4.87).

Şekil 4.87. Solar tiles.

Sistemin Avantajları

- Yüksek verimliliğe sahiptir,
- Estetik olarak idealdir,
- Hafif olduğundan montajı kolaydır.

Sistemin Dezavantajları

- Küçük üniteler olduğundan dolayı montajı uzun zaman alabilir,
- Maliyet biraz yüksektir,
- Kırılma riski bulunmaktadır.

Esnek Laminasyon (Flexible Laminate)
Metal ve eğrisel çatılara uygulabilinmesi için geliştirilmiştir. Çeşitli geometrik formları alabildiğinden dolayı bu ismi taşımaktadır. Hem düz hem de eğrisel çatılarda kullanılabilir. Şekil 4.88 ile bu sisteme örnek görülmektedir.

Şekil 4.88. Esnek laminasyon.

Sistemin Avantajları

- Hafiftir, bu yüzden zayıf çatılarda kullanılabilir,
- Montajı kolaydır,
- Eğimli yüzeylerde de kullanılabilir.

Sistemin Dezavantajları

- Düşük sistem performansı.

BIPV uygulamalarında kullanılan ana malzeme kristalin silikondur. Yaklaşık %70'i kristalin silikon malzemeden yapılmıştır. Bunun nedenleri arasında PV şirketlerinin kolayca kristalin silikonu adapte edebilmesi en başta gelmektedir.

Diğer bir BIPV kullanımı da Almanya Münih havaalanına giderken otoyol kenarında görülmektedir.

Şekil 4.89. Almanya Münih havaalanı yolu üzerinde BIPV.

4.10 Fotovoltaik GES Sistemlerde Kullanılan Yazılımlar ve Standartlar
PV alanında kullanılan yazılımlar planlama, proje geliştirme ve ölçüm gibi birçok amaca yönelik olarak hizmet verebilmektedir. Projelerin enerji üretim analizleri, bu tip yazılımların ilgi alanına girmekte ve bu tip hizmet sunan bir çok yazılım bulunmaktadır. Bu bölümde PV çalışmalarında kullanılan bazı yazılımlar tanıtılmaya çalışılacaktır.

4.10.1 Simülasyon Yazılımları

TRNSYS – Bir enerji simülasyon yazılımıdır. Modüler yapısı geniş bir şekilde kullanılmasına yol açmaktadır. Grafik ara yüzü, simülasyon motoru ve değişik ekipmanları içeren kütüphanesi yenilenebilir enerji alanına ve diğer alanlara uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yeni bileşenlerin oluşturulmasına imkan tanımaktadır. 25 yılı aşkın bir süredir kullanılmakta olan bu yazılım boyutlandırma, çoklu zon hava akımı analizleri, güneş dizaynı, bina termal performansları gibi bir çok alana uygulanabilir bir özelliği vardır. PV sistemleri, bataryalar, rüzgar türbinleri ve yakıt hücreleri çalışmalarında da kullanılabilmektedir.

INSEL – Enerji sistemlerinin planlanması, izlenmesi ve görüntülenmesi için kullanılmaktadır. Bu amaçla INSEL en modern fonksiyonları sunmakat ve meteorolojik verilerin, elektrik ve termal sistemlerin simülasyonunun yapmada kullanılabilmektedir.

HOMER – şebeke bağlantılı, şebeke bağlantısız, tekil ve dağıtık üretim yapan güç santrallerinin tasarım alternatiflerinin değerlendirmesini yapan bir yazılımdır.

4.10.2 Ekonomik Değerlendirme Yazılımları

GREENIUS – güneş termal parabolik oluk, fotovoltaik, rüzgar santralları, yakıt hücreleri veya çanak/Stirling sistemlerinin simülasyonunu yapan çok güçlü bir ortam sunmaktadır. Yenilenebilir enerji sistemlerinin inşaatı ve tasarımında ihtiyaç duyulan detaylı teknik ve ekonomik hesaplamaların kombinasyonunu sağlamaktadır.

SOLInvestment – PV sistem planlaması için kullanılan profesyonel bir yazılımdır. Teklif edilen PV sistemi için veri ve hesaplanan sonuçlar raporlanıp yayınlanabilmektedir. Tasarım raporları amaca göre düzenlenebilmekte ve ayarlanabilmektedir.

RETScreen® - Yazılımın çekirdeğinde standart ve entegre temiz enerji proje analizi modülü bulunmakta ve enerji üretimini, ekonomik analizleri, sera gazı emisyon azaltımlarını ve enerji verimliliği projelerini değerlendirmek için çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır.

4.10.3 PV Sanayi İlgili Yazılımlar

APOS photovoltaic StatLab – PV modüllerinin istatistiksel analizi ve kalite değerlendirmeleri için kullanılan bir yazılım aracıdır. İstatikçi olmayanlar için ileri düzeyde istatistik yöntemler ortaya koyar. Aachen Üniversitesi ve TÜV Rheinland Grup arasındaki ortak çalışmaya dayalı olarak modüllerin güç çıktısı kalitesini değerlendirmek için kabul örnekleme planlarını hesaplamaktadır. Veri tablolarını dikkate alan yeni prosedürler kadar standart yaklaşımları da gözeterek işlemleri yapmaktadır. Yazılım kolay bir şekilde veri işlemesinin yanında laboratuar ölçümleri için kolaylıklar sunmaktadır.

PV Cost Simulation Tool – PV maliyet simülasyon aracı, her bir yapım aşamasının, ekipmanının ve malzemesinin belirlendiği sanal bir fabrika yazılım aracıdır. Malzeme ve ekipman tedarikçileri kendi üretimlerini simüle edebilir ve sanal proses akışındaki etkilerini ölçebilirler. Yenilikçi imalat çözümleri modellenebilir ve geri dönüşüm ve maliyet üzerindeki sonuçları anında simüle edebilirler.

4.10.4 PV Sistemler Analizi ve Planlanması

PV F-CHART – kapsamlı bir PV sistem analizi ve tasarım yazılımıdır. Yazılım günün her bir saati için aylık ortalama performans tahminlerini sağlayabilmektedir. Wisconsin Üniversitesi tarafından geliştirilen yöntemlere dayalı olarak hesaplamlar yapılmaktadır. Yük ve radyasyonun saatlik değişimi güneş radyasyonundan yararlanmada dikkate alınabilmektedir. Şebeke seviyesinde sistemler, batarya depolama sistemleri ve tekil sistemler analiz edilebilmektedir. Tek eksen veya çift eksende takip ve odaklayıcılar da yazılımın kullanım alanlarına girmektedir. Nakit akışları ve geri dönüşümler gibi ekonomik analizlere de imkan tanımaktadır.

Laplace System – Laplace Sistem Şirketi yüksek teknolojili güneş ve rüzgar yazılımları geliştirmektedir. En çok bilinen ürünü PV simülasyon yazılımı SolarPRO'dur. Gölgeleme analizlerinde de kullanılmaktadır. Diğer yazılımları ise Solar Link, Kaze PRO ve Wind Link'tir.

PV*SOL – PV sistemlerinin tasarımı, planlaması ve simülasyonunun yapan bir yazılımdır. Hesaplamalar saatlik veri balansına dayanmaktadır ve sonuçlar grafik formda ve detaylı raporlar şeklinde sunulabilmektedir. Şebeke ölçeğinde ve tekil sistemlerde de kullanılabilmektedir. Her sayıdaki panel değişik açılarda kullanılabilmekte, yatay ve diğer nesnelerden gelen gölgelenmeler dikkate

alınabilmektedir. Modül, evirici ve meteorolojik veri kütüphaneleri bulunmaktadır. Profile göre elektrik tüketimi de ortaya konulabilmektedir. Güç üretimi, tüketimi maliyetler ve finansal dönüşlerle ilgili bilgiler de verebilmektedir.

PVSYST – Komple PV sistemlerinin çalışılması, boyutlandırılması, simülasyonu ve veri analizi için kullanılan bir yazılımdır. Şebeke bağlantılı, tekil ve DC şebekeler için uygundur. Geniş bir PV bileşen ve meteorolojik veri kütüphanesi bulunmaktadır. Mimarlar, mühendisler, araştırmacılar ve eğitim çalışmaları gibi geniş bir alanda kullanılmaktadır.

PV Professional – Düz veya eğimli çatılarda PV sistemlerinin planlamasını yapan bir yazılımdır.

4.10.5 İzleme ve Kontrol Yazılımları
Meteocontrol – PV sistemlerinin lokal ve/veya uzaktan izlenmesini yapan bir yazılımdır.

SPYCE - EU PVSAT projesinin bir ürünüdür (SPYCE, Uydudan PV Üretimi Kontrolü ve Değerlendirmesi). Uydular aracılığı ile PV sistemlerinin üretim analizlerinin ve izlenmesinin yapıldığı bir yazılımdır. Sistemde meydana gelen hatalar uzaktan algılanarak sistem çökmeleri çok yakından takip edilebilmektedir. Garanti süresinin dolmasından önce hatalar algılanabilmekte ve yerinde radyasyon ölçümüne gerek kalmamaktadır. WEB sunucusu ile sistemin üretimi, referans değerler ve analizler her zaman sunulabilmektedir. Meteorolojik veriler son nesil uydular yardımıyla elde edilmekte, veri akışı, değişik PV modülleri, eviriciler ile web portalı adapte edilebilmektedir.

4.10.6 Saha Analizi Yazılımları
ECOTECT – Üç boyutlu olarak bina PV tasarımcılarına kolaylık sağlayan bir yazılımdır. PV tasarımı için bütün bileşenler yazılımda mevcuttur.

Shadow Analyser – B uyazılım, güneş enerjisi mühendisliği ve mimarisi ileri parametrik bir CAD yazılımıdır.

Shadows – Güneş zamanlarının tahmin ve pozisyonunu belirlemede ve güneş enerjisi mühendisliğinde çok kullanışlı olan bir yazılımdır. Güneş diyagramlarının oluşturulması, PV yönlendirilmesi gibi işlemlerde de kullanılmaktadır. Çıktılarını değişik resim ve dxf formatında almak mümkündür.

GOSOL – Bina şekli ve bitki örtüsüne göre gölge analizinde kullanılan bir yazılımdır. Planlama ve detaylı mimarı çalışmalarda kullanılmaktadır.

METEONORM – Uygulamalı meteoroloji ve güneş enerjisi için geliştirilen bir meteorolojik ver tabanıdır. METEONORM güneş enerjisi uygulamaları yer kürenin her noktasında kapsamlı bir iklimsel veri tabanına sahiptir. PV ve CSP uygulamalarında gerekli olabilecek veri setlerine erişmek için büyük kolaylık sağlamaktadır.

Horizon – Değişik yer ve zamanlarda güneşin yörüngesini hesaplamada kullanılır.

Sombrero - Değişik yönelimdeki yüzeylerdeki gölgeleri hesaplamada kullanılan bir bilgisayar yazılımıdır. PV çalışmalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

4.10.7 PV Standartları
1981'de TC82 teknik komitesi oluşturulmuştur. Bu komisyon en önemli uluslar arası PV standartizasyon komitesidir. TC82'nin en önemli görevi, tüm PV sistemler ve elekkriksel dönüşüm için standartlar hazırlamak olmuştur. Standartlar kolay araştırılabilmesi için orijinal isimleri ile verilmiştir. Bu bölümde güneş radyasyonu ölçüm prosesleri, ölçüm ekipmanları kalibrasyonu ile ilgi standartlar bulunmaktadır.

ISO 9845-1, Solar energy - Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions, Part 1: Direct normal and hemispherical solar irradiance for air mass 1.5
DIN 5034-2, Daylight in interiors; principles.
IEC 61725, Analytical expression for daily solar profiles
RReDC: Standard Solar Spectra
World Radiation Center: The World Radiometric Reference (WRR)

4.10.8 Güneş Hücreleri ve Modüllerini Referans Eden Standartlar

Güneş hücreleri karakteristik ölçümleri, güneş hücreleri ve modül testleri, güneş hücreleri üretimleri ve testleri, üretim prosedürü, mekanik veya elektronik PV modül testleri, I-U modül karakteristik ölçümleri ile ilgili standartlar bulunmaktadır.

EN 50380, Datasheet and nameplate information of photovoltaic module
IEC 60891, Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices
IEC 60904-1, Photovoltaic devices. Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics
IEC 60904-2, Photovoltaic devices. Part 2: Requirements for reference solar cells
IEC 60904-2/A1, Photovoltaic devices. Part 2: Requirements for reference solar cells, Amendment 1
IEC 60904-3, Photovoltaic devices. Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data
IEC 60904-5, Photovoltaic devices - Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method
IEC 60904-6, Photovoltaic devices - Part 6: Requirements for reference solar modules
IEC 60904-6/A1, Photovoltaic devices - Part 6: Requirements for reference solar modules, Amendment 1
IEC 60904-7, Photovoltaic devices - Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device
IEC 60904-8, Photovoltaic devices - Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device
IEC 60904-10, Photovoltaic devices - Part 10: Methods of linearity measurement
IEC 61277, Terrestrial photovoltaic (PV) power generating systems
IEC/PAS 62011, Specifications for the use of renewable energies in rural decentralised electrification
IEC 61215, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
IEC 61345, UV test for photovoltaic (PV) modules
IEC 61646, Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
IEC 61701, Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules
IEC 61721, Susceptibility of a photovoltaic (PV) module to accidental impact damage (resistance to impact test)
JRC-ISPRA 503, Qualification Test Procedures for Crystalline Silicon Photovoltaic Modules
EC 61829, Crystalline silicon photovoltaic (PV) array - On-site measurement of I-V characteristics
IEEE 929, Recommended practice for utility interface of residential and intermediate PV systems
IEEE 1262, Recommended practice for qualification of PV modules
IEEE 1513, Recommended practice for qualification of concentrator photovoltaic modules

4.10.9 PV Sistemleri için Standartlar

Bu bölümde, PV sistem fonksiyonları, planlaması ve kurulumu ile ilgili standartlar bulunmaktadır. Ayrıca PV sistem kurulumunda dikkate alınacak güvenlik düzenlemelri ile ilgili bilgiler de bulunmaktadır.
IEC 60364-7-712, Electrical installations of buildings - Part 7-712: Requirements for special installations or locations - Solar photovoltaic (PV) power supply systems.
IEC 61194, Characteristic parameters of stand-alone photovoltaic (PV) systems
IEC 61702, Rating of direct coupled photovoltaic (PV) pumping systems
IEC 61724, Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and analysis
IEC 61727, Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface
IEC 61683, Photovoltaic systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency
IEC/TR2 61836, Solar photovoltaic energy systems - Terms and symbols
IEC 62124, Photovoltaic Stand-Alone Systems – Design Qualification and Type Approval.
IEEE 928, Recommended criteria for terrestrial PV power systems
IEEE 1373, Recommended practice for field test methods and procedures for grid-connected PV systems
IEEE 1374, Guide for terrestrial PV power system safety

4.10.10 PV Sistemlerinin Diğer Parçaları ve Bileşenleri Standartları

PV sistemlerinin diğer bileşenleri (pil, yüksek voltaj koruma bileşenleri, v.b.) ile ilgili standartlar verilmiştir.

IEC 61173, Overvoltage protection for photovoltaic (PV) power generating systems
IEC 61683, Photovoltaic systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency
IEC 61427, Secondary cells and batteries for solar photovoltaic energy systems - General requirements and methods of test
IEEE 937, Recommended practise for installation and maintenance of lead-acid batteries for PV systems
IEEE 1144, Sizing of industrial nickel-cadmium batteries for PV systems
IEEE 1145, Recommended practise for instalation and maintanance of nickel-cadmium batteries for PV systems
IEEE 1361, Recommended practise for determining performance characteristics and suitability of batteries in PV systems

4.10.11 ASTM Standartları
ASTM E 927, Standard Specification for Solar Simulation for Terrestrial Photovoltaic Testing.
ASTM E 948, Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using Reference Cells Under Simulated Sunlight.
ASTM E 973, Standard Test Method for Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell.
ASTM E 973M, Standard Test Method for Determination of the Spectral Mismatch Parameter Between a Photovoltaic Device and a Photovoltaic Reference Cell.
ASTM E 1021, Test Methods for Measuring Spectral Response of Photovoltaic Cells.
ASTM E 1036, Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
ASTM E 1036M, Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells.
ASTM E 1038, Standard Test Method for Determining Resistance of Photovoltaic Modules to Hail by Impact with Propelled Ice Balls.
ASTM E 1040, Standard Specification for Physical Characteristics of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Reference Cells.
ASTM E 1125, Standard Test Method for Calibration of Primary Non-Concentrator Terrestrial Photovoltaic Reference Cells Using a Tabular Spectrum.
ASTM E 1143, Standard Test Method for Determining the Linearity of a Photovoltaic Device Parameter with Respect To a Test Parameter.
ASTM E 1171, Standard Test Method for Photovoltaic Modules in Cyclic Temperature and Humidity Environments.
ASTM E 1328, Standard Terminology Relating to Photovoltaic Solar Energy Conversion.
ASTM E 1362, Standard Test Method for Calibration of Non-Concentrator Photovoltaic Secondary Reference Cells.
ASTM E 1462, Standard Test Methods for Insulation Integrity and Ground Path Continuity of Photovoltaic Modules.
ASTM E 1596, Test Methods for Solar Radiation Weathering of Photovoltaic Modules.
ASTM E 1597, Standard Test Method for Saltwater Pressure Immersion and Temperature Testing of Photovoltaic Modules for Marine Environments.
ASTM E 1799, Standard Practice for Visual Inspections of Photovoltaic Modules.
ASTM E 1802, Standard Test Methods for Wet Insulation Integrity Testing of Photovoltaic Modules.
ASTM E 1830, Standard Test Methods for Determining Mechanical Integrity of Photovoltaic Modules.
ASTM E 2047, Standard Test Method for Wet Insulation Integrity Testing of Photovoltaic Arrays.
ASTM E 2236, Standard Test Methods for Measurement of Electrical Performance and Spectral Response of Nonconcentrator Multijunction Photovoltaic Cells and Modules.
ASTM G 173, Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface.

4.10.12 PV Modül Testi
TÜV Rheinland – Kalite ve güvenlik konularında teknik çalışmalar ve teknik süreçler tayin etmektedir. PV çalışmalarında kullanılan süreçler de tanımlamaktadırlar. Almanya orijinli bir kurumdur.

Photovoltaic Testing Laboratory - PTL – 1991 yılında Arizona devlet üniversitesi'nde kurulmuştur. PV sanayisi için modül kalite testi servisi ve araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmaktadır.

JRC ISPRA – İtalya'da kurulu bir enstitüdür. Sürdürülebilir gelişmeye katkı koymak amacıyla çevrenin korunması için Avrupa Birliği ülkelerine bilimsel ve teknik destek sağlamaktadır.

PV GAP – İsviçre'de kurulu kar amacı gütmeyen bir organizasyondur. PV sistem ve bileşenlerinin kalitesini sertifiye eder. Uluslar arası kabul görecek standartların geliştirilmesini teşvik etmek ve PV enerji üretimindeki tüm bileşenlerin kalite entegrasyonunu sağlamak için çalışmaktadır.

NREL Photovoltaic Research – Birimin amacı tanımlama desteği, ortak araştırma ve PV enerji üretiminin geliştirilmesi için yeni ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi konularında çalışmalar yapmaktır. Bu konularda teknikler geliştirmek ve teşhislerde bulunmakla da görevlidir.

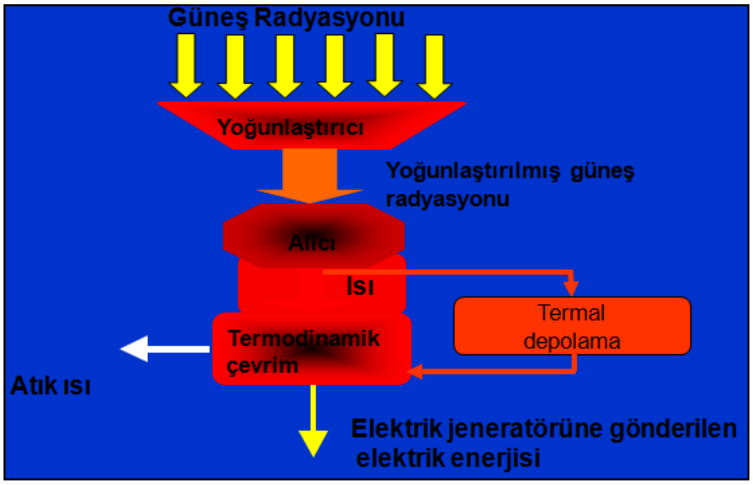
BÖLÜM 5: YOĞUNLAŞTIRICI SİSTEMLER (CSP SİSTEMLER)

Bu bölümde uluslarası literatürde CSP (Concentrating Solar Power veya Concentrated Solar Power) olarak bilinen yoğunlaştırıcılı (odaklayıcı) güneş sistemleri anlatılacaktır.

Üç çeşit ana CSP teknolojisi bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verilmiştir:

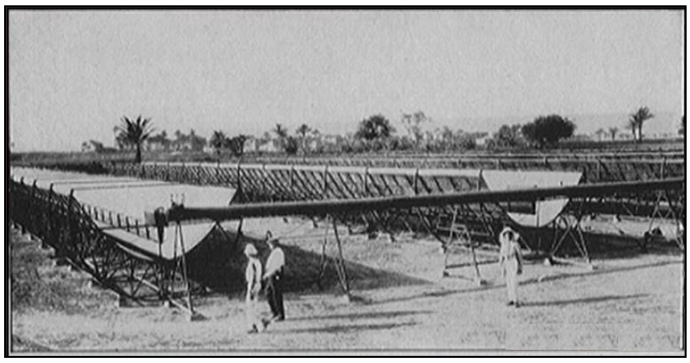
- Parabolik oluk CSP (Parabolic Trough CSP),
- Çanak/Stirling Sistem CSP (Dish/Stirling CSP),
- Güneş kule CSP (Solar Tower CSP).

İlerleyen sayfalarda hep yukarıdaki terminoloji kullanılacaktır. Bilindiği gibi, güneş enerjisi dünyadaki en büyük enerji kaynağıdır. Bununla beraber, elektrik enerjisi çevriminin bazı kriterleri bulunmaktadır. Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, güneş enerjisinin bir yerde yoğunlaştırarak sıcaklığın artması sonucu ısınan akışkanın buhar türbini tarafında çevrilmesi ile çalışan ve geleneksel termik santrallara benzer bir şekilde elektrik üretimi gerçekleştiren bir sistemdir. Termal CSP teknolojisi, fotovoltaiklerde (PV) olduğu gibi silikon kristalin malzemeden yapılmış ve güneş foton enerjisini direk kullanan bir teknolojiye sahip değildir. Termodinamik süreçlerden oluşan ve geleneksel termik santral ilkelerine göre çalışan temiz bir enerji kaynağıdır. CSP GES'lerde yoğunlaştırma (veya odaklama) işlemi, yansıtıcılar ve aynalar tarafından yapılmaktadır. Bu yansıtıcılar paraboliktir ve güneş ışığını 25 ile 2000 kat yoğunlaştırabilirler. CSP GES'lerdeki (PV veya CPV'de de aynı) en büyük teknik sorun, güneşin sabit bir açı ile gelmeyerek gün içerisinde bilinen değişimine uğramasıdır. Bu durum güneşi izleyen sistemin (tracking system) kullanımı ile bertaraf edilebilmektedir. PV GES'lerde olduğu gibi, CPS GES'lerde proje sahasının seçimi çok önemlidir. Enerji üretimi, doğrudan irradiyasyon ile orantılıdır ve kuzey-güney enlemlerle değişim göstermektedir. Tercih edilen direk güneş ışığı olduğundan dolayı, bulutluluğun az olduğu çöl bölgeleri tercih edilmektedir. Şekil 5.1 ile CSP GES sisteminin basitleştirilmiş çalışma şeması görülmektedir.



Şekil 5.1. CSP GES basitleştirilmiş çalışma şeması.

CSP'ler ile ilgili bilinen ilk kayıt M.Ö. 212 yılında Arşimet tarafından güneşin aynalarla yoğunlaştırılmaya çalışması olarak karşımıza çıkmaktadır. İlk mekaniksel kayıt ise, 1615 yılında Salomon de Caux tarafından icat edilen güneşle çalışan bir cihazdır. 1860'lı yıllarda Fransız Matematikçiler olan Mouchot ve Pifre ilk güneş enerjisine dayalı buhar makinasını teklif edip tasarımını yapmışlardır. Bu çalışma, daha sonra 19. yüzyıl sonlarında John Ericcsson ve 20. yüzyılda da diğer araştırmacılar için ilham kaynağı olmuştur. Ucuz fosil kaynakların 20. yüzyıl başlarda kullanımının artmaya başlaması, CSP teknolojisinin gelişimini yavaşlatmıştır. Fakat 1970'lerdeki petrol krizi ile özellikle ABD Hükümetinin verdiği teşvikler ile CSP çalışmaları tekrar başlamıştır. ABD'de 1977-1986 yılları arasında 500 milyon dolarlık bir ar-ge çalışması yapılmıştır. 1980'lerde ilk geniş parabolik oluk aynalar, çanaklar ve kuleler dikilmeye başlanmıştır ve bazıları hala işletmededir. Petrol krizi bittikten sonra CSP'ye olan ilgi tekrar azalmaya başlamıştır. 1990'lardaki Çernobil faciası özellikle AB ülkeleri tarafından güneş enerjisine olan ilgiyi tekrar gündeme getirerek, çeşitli ar-ge fonlamalarının yapılmasına yol açmıştır. Son 10 yılda ise 50 MW'tan büyük CSP'ler inşa edilmeye başlanmıştır. Aslında ilk CSP GES projesi, ABD tarafından 1906 Mısır Kahire Maadi yakınlarında denenmiştir (Şekil 5.2). O dönemde İngiliz kolonisi olan Mısır'daki CSP GES'ler günümüzdekine çok benzer yapıdaydı. Bununla beraber, o zamanki teknik koşullar ve malzeme tedariğindeki zorluklar yüzünden 1914 yılında çalışmalar durdurulmuştur.



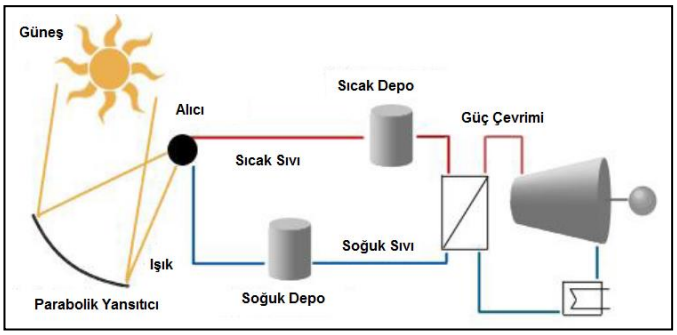
Şekil 5.2. Mısır'daki ilk CSP GES.

1968 yılında ABD, CSP GES için devrim sayılabilecek bir adım atmıştır. Public Utilities Regulatory Policy Act ile açıkça belirlenmiş tarife üzerinden alım garantisi vermiştir. Özellikle petrol krizinde fiyatların iki katına çıkması ile beraber, Southern California Edison'un (SCE) uzun dönemli alım anlaşması yapmıştır. Bunun akabinde 1969 yılında kurulan Luz firması, SCE ile 30 yıllık anlaşma yaparak CSP GES ile ilgili ticari çalışmalara başlamıştır. İlk CSP GES, 1984 yılında işletmeye alınmıştır. Bu tarihten sonra ise hızlı bir gelişim gösteren projeler, 1980'li yılların ortalarında petrol fiyatlarının düşmesi ile CSP GES'lere verilen teşvikler kaldırılmış ve 10 CSP GES projesini yapan Luz firmasının iflasına yol açmıştır. Her ne kadar CSP teknolojisi PV teknolojisinden ucuz olsa da; 1991 yılına kadar herhangi yeni bir CSP GES yapılmamıştır. 2000'li yıllardan sonra tekrar bir ilgi başlamıştır. Dünya Bankası 200 milyon USD kaynak ayırarak CSP GES projelerini desteklemiştir. Bu kaynağı doğal gaz ile hibrid olarak çalışan Mısır, Meksika, Hindistan ve Fas'ta kullanılacağını belirtmiştir. İspanya'da CSP GES için yüksek bir tarife ödenmekte olup diğer güney Avrupa ülkeleri de benzer teşvikler üzerinde çalışmaktadır. Şimdiye kadar özellikle parabolik oluk CSP GES'ler ticari olabilmiştir. Petrol krizi ile birlikte California Mojave Çölü'nde 1984-1991 yılları arasında 9 adet parabolik oluk CSP GES inşa edilmiştir. Toplam yüzey alanı 6 km² den fazla olan bu CSP GES'lere SEGS (Solar Electric Generation System) adı verilmiştir. Toplamda 354 MW kurulu güce sahip olup yıllık 800 milyon kWh elektrik üretimi yaparak yaklaşık 60000 evin ihtiyacını karşılamaktadır. 9 CSP GES'ten 8'i doğal gaz ile birlikte hibrid olarak çalıştırılarak geceleri de elektrik üretimi yapabilmektedir. Toplamda 1.2 milyar USD'ye mal olan bu santrallerden şimdiye kadar 12 milyar kWh elektrik üretilmiştir. Elektrik tarife fiyatı 26 USDc/kWh'tan başlayarak 12-14 USDc/kWh'a kadar düşmüştür.

5.1 CSP'lerdeki Ana Üniteler

Parabolik oluk CSP GES'lerin çalışma prensibi ise oldukça basittir. Parabolik şekilde üretilen kollektörler, güneş ışığını üzerlerinde bulunan tüpe (absorber tube) odaklayarak tüp içerisinde bulunan ısı transfer akışkanının (heat transfer fluid) sıcaklığını yükseltirler. Sıcaklık, parabolik oluk tip CSP GES'lerde 500°C'lere kadar çıkabilmekte olup ısınan sıvı buhar türbinine giderek buhar oluşturma için kullanılmakta ve buhar da elektrik jeneratörüne türbin vasıtası ile iletilerek elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir. Modern CSP GES'lerde 4 ana ünite veya sistem bulunmaktadır. Bunlar, toplayıcı (collector veya reflector), alıcı (receiver), ısı transfer/depolama (heat transfer/storage) ve güç

çevrim (power cycle veya power block) üniteleridir. Aşağıdaki Şekil 5.3 ile bu temel üniteler görülmektedir.

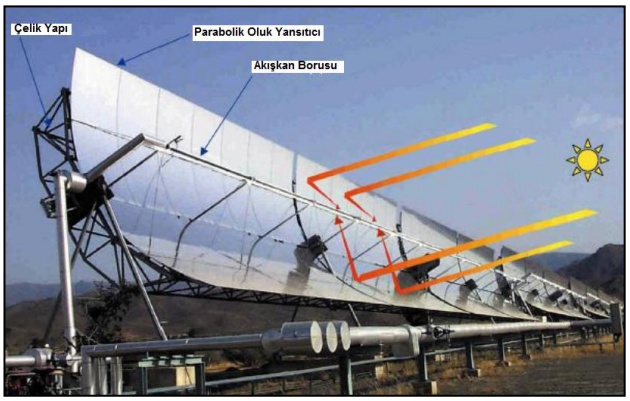


Şekil 5.3. Temel CSP üniteleri.

Gösterilen elemanların detaylı açıklamaları ilerleyen sayfalarda verilmiştir.

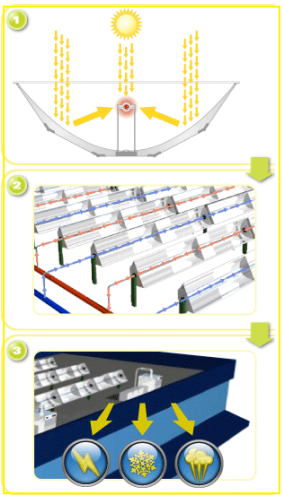
5.2 Parabolik Oluk Teknolojisi (Solar Parabolic Trough CSP)

Günümüzde parabolik oluk güneş enerjisi teknolojisi (solar parabolic trough) en yaygın ve kendini ispatlamış yoğunlaştırıcı (odaklayıcı) güneş enerjisi teknolojisidir. Daha da doğrusu ticari olabilmiştir. Bunun temel nedeni, Kaliforniya Mojave Çölünde bulunan 9 adet CSP GES yüzündendir. Kurulu güçleri 14-80 MW arasında değişen bu CSP GES'lerin toplam kurulu gücü 354 MW'tır. Bu sistemler, Rankine (buhar türbini/jeneratör) çevrimine göre çalışırlar. Aşağıdaki Şekil 5.4 ile parabolik oluk CSP GES'lere ait temel bir fotoğraf görülmektedir.



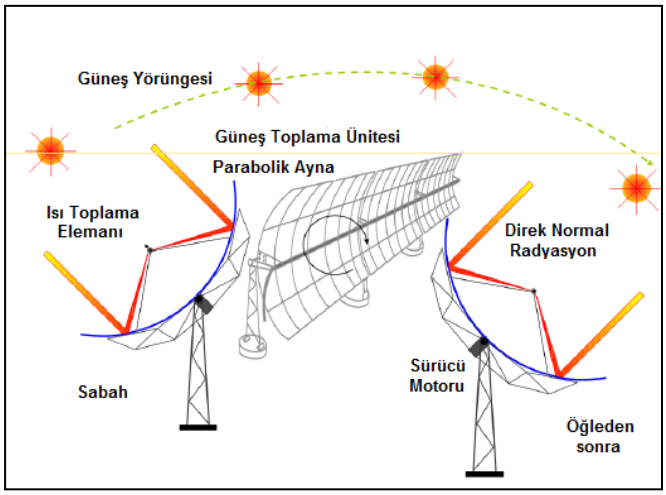
Şekil 5.4. Parabolik oluk CSP.

Aşağıdaki Şekil 5.5 ile parabolik oluk CSP GES şematize edilmiştir.



Şekil 5.5. Parabolik oluk CSP.

Yukarıdaki fotoğraftaki ekipmanlar ilerleyen sayfalarda detaylı olarak anlatılacaktır. Güneş yörüngesini izleyen sistem (tracking system) kullanıldığında ise, aşağıdaki Şekil 5.6 ile görüldüğü gibi çalışmaktadır.



Şekil 5.6. Güneşi izleyen parabolik oluk CSP GES.

Burada dikkat edilmesi gereken husus, sanılanın aksine, güneşi izleyen sistem doğal olarak değil; daha önceden belirlenmiş bir program dahilinde çalışmasıdır. Yani güneşi anlık olarak takip etmemektedir, belirli bir yörüngesi bulunmaktadır.

5.2.1 Toplayıcı (Collector)

Toplayıcı (collector; veya bazen yansıtıcı, reflector), termal CSP GES'lerde parabolik oluk şeklinde olup, gelen güneş ışığını yoğunlaştırmak için kullanılmaktadır. Parabolik oluk şeklinde olabileceği gibi, çanak şeklinde de olabilmektedir. Tek eksenli veya çift eksenli olarak da tasarlanabilirler. Tek eksenli ile çift eksenli sistemler arasındaki fark ise, tek eksenli sistemde toplayıcının sadece bir eksende (örneğin güneşin doğuş-batış eksenini takip etmesi gibi) hareket etmesidir. Çift eksenli sistem, uzayda her açıda hareket kabiliyetine sahip olup gelen güneş enerjisini yansıtması daha verimli olmaktadır.

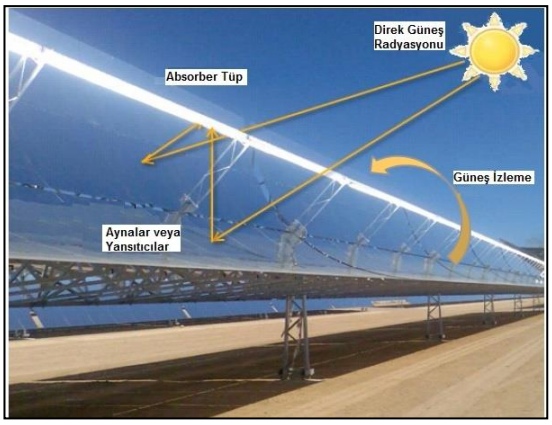
Tablo 5.1 ile farklı kollektörlerin yoğunlaştırma ve çalışma sıcaklığı ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 5.1. Farklı CSP kollektörlerinin özellikleri.

Kollektör Tipi	**Güneş Işığı Yoğunlaştırma Oranı (Concentration Ratio)**	**Çalışma Sıcaklığı (°C)**
Düzlemsel toplayıcı	1	≤ 70
Sabit yoğunlaştırıcı	2 – 5	100 – 150
Parabolik oluk	10 – 50	150 – 350
Çanak tipi	200 – 2000	250 – 700
Güneş kulesi	200 – 2000	400 – 1000

5.2.2 Alıcı (Receiver)

Alıcının en temel işlevi, üzerine yoğunlaştırılan güneş radyasyonunu ısıya dönüştürmesi olarak açıklanabilir. Bu dönüştürdüğü ısıyı akışkan ortama göndermektedir. Normal bir enerji çevriminin yoğunlaşabilmesi için; deniz suyu, soğutma kuleleri veya diğer su bazlı soğutma sistemleri kullanılmaktadır. CSP GES'ler genellikle çölün ortasında ve suyun az olduğu yerlerde yapıldığından su azdır ve kulelerden çıkan su buharı kollektörlerin üzerinde gölgeleme yapabilmektedir. Bunun yerine kuru hava soğutma (dry cooling) kullanılabilir. Kuru hava soğutma, inşaat maliyetlerini %3-6 arasında artırmaktadır. İşletme verimi ise, %5-9 arasında düşmektedir. Kuru hava soğutma kullanılsa da, kollektör yıkaması, buhar vb için su işletme zamanında da gerekmektedir. Şekil 5.7 ile yansıtıcı, ayna, absorber tüp kombinasyonunun parabolik oluk CSP GES içerisindeki görünümü verilmiştir.



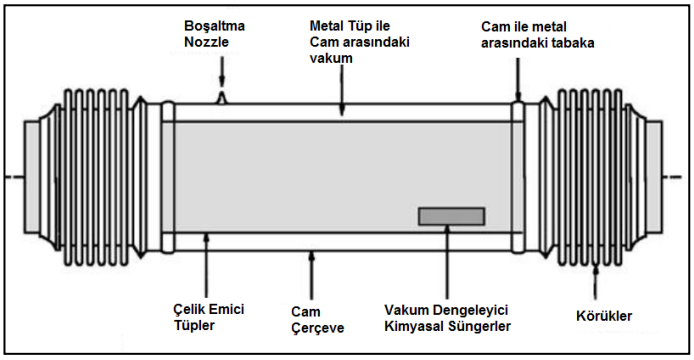
Şekil 5.7. Parabolik oluk sistemi.

CSP GES'lerde normal termik santraller gibi soğutma işlemine tabi tutulmaktadır. Bunun anlamıda su gereksinimidir. Ancak CSP GES'ler suyun az olduğu çöl arazilerine yapılmaktadır. Soğutma için 2 teknik kullanılmaktadır. Bunlar once-through ve evaporative soğutma yöntemidir. Once-through soğutmada MW başına 87-102 m^3 su gerekmektedir. Bu yüzden bu teknoloji için su kaynaklarına yakın lokasyonlar seçilmektedir. Su alınıp kapalı çeşmeden geçirildikten sonra belirli bir kayıpla tekrar kaynağa sıcak olarak verilmektedir ancak bu sistemin bazı çevresel sıkıntıları bulunmaktadır.
Evaporative soğutma daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemde soğutma suyu atomize edilir ve eşanjöre (heat exchanger) üzerinde geniş alan kapsayacak şekilde püskürtülür. Once-through sisteminin aksine, su atmosferde buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Su buharlaşırken yüksek miktarda ısı açığa çıkaracağından dolayı soğutma için gereken su miktarı da buna bağlı olarak düşecektir. Şimdiye kadar CSP GES'ler genellikle bu yöntemle soğutulmuştur. Bu sistemde 2-3 m^3/MWh kullanılmaktadır. Aslında pratikte daha fazla kullanılmaktadır. Örneğin 50 MW kurulu güçlü Andasol 1 yılda 900000 m^3 su kullanmakta olup 165000 MWh üretim yaptığı düşünüldüğünde 5.45 m^3/MWh su gerektiği görülmektedir.

İdeal CSP lokasyonlarında su fazla bulunan bir şey değildir ve suya erişim sadece teknik olarak değil aynı zamanda çevresel bazı parametreler yüzünden pek kolay değildir. Bu yüzden soğutma için en uygun yol hava kurutmalı sistem gibi görülmektedir. Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından yapılan bir çalışmada 250 MW CSP GES için hava soğutma ile %4.6 daha az elektrik üretimi yapılmaktadır. Bu fark, özellikle çok sıcak havanın olduğu dönemlerde meydana gelmektedir. German Aerospace Center tarafından yapılan bir araştırmada ise %4 civarında bir üretim kaybı olduğu görülmüştür. Kitabın yazıldığı tarihlerde hava soğutmalı çalışan herhangi bir CSP GES mevcut olmamasına karşın bu yapılan çalışmalar geleneksel termik santral konsepti ile benzer olduğundan dolayı yapılan çalışmalardan alınan sonuçlardır. Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından kule CSP GES'ler ile ilgili yapılan bir ise bu düşüşün yıllık %1.3 civarında olduğu bulunmuştur.

5.2.3 Isı Toplama Elemanı (Absorber Tüp, Heat Collection Element)

Parabolik oluk CSP GES'lerdeki alıcılar, ısı toplama elemanı (heat collection element, absorber tube) veya absorber tüp olarak bilinirler. Bu alıcılar, ısı transfer akışkanını içeren borulardır ve tipik olarak çelik konstrüksiyon ve yüksek derecede seçici absorbsiyon özelliğine sahiptir. İçindeki ortamın havası alınmıştır. Şekil 5.8 ile absorber tüp görülmektedir.



Şekil 5.8. Isı toplama elemanı tipik konstrüksiyonu.

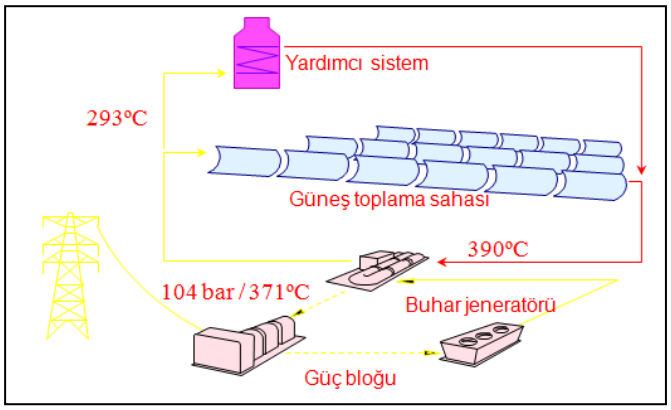
Parabolik oluk CSP GES'lerdeki en önemli ekipmanın absorber tüp olduğunu söylemek yanlış olmaz. Dünyada özellikle Alman Schott ve İsrailli Solel Ltd (kitabın yazıldığı tarihlerde Solel Ltd firması Alman Siemens tarafından satın alınmıştır) absorber tüpleri üreten 2 ana firmadır. Şekil 5.9 ile de ısı toplama elemanının fotoğrafı görülmektedir.

Şekil 5.9. Isı toplama elemanı fotoğrafı.

İspanya Almeria'da bulunan Plataforma Solar de Almeria (PSA) isimli CSP test merkezindeki parabolik oluk CSP GES'e ait ısı toplama elemanının fotoğrafı da Şekil 5.10 ile görülmektedir.

Şekil 5.10. Parabolik oluk CSP GES ısı toplama elemanı.

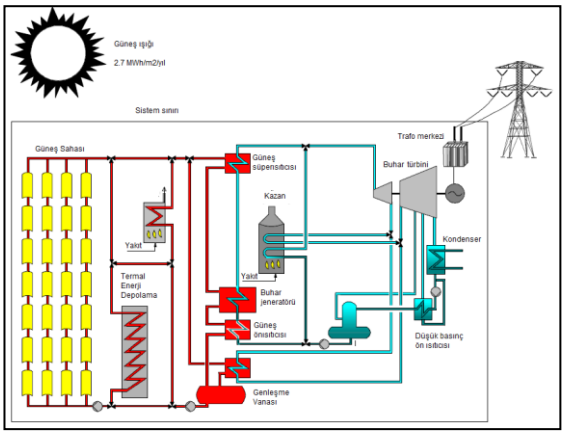
Isıtılmış akışkan veya buhar, parabolik olukların içerisinden merkezi buhar üretim ünitesine gönderilmektedir. Parabolik oluk sistemi, fuel-oil, mineral yağ, erimiş tuz veya buharı ısı transfer akışkanı olarak kullanabilmektedir. Sayılan akışkanlar herhangi birisinin kullanımındaki fark çok büyük değildir. Fakat yağ ve tuz kullanıldığında ısıtılan akışkanı buhara çevirebilmek için eşanjöre (heat exchanger) ihtiyaç duyulmaktadır. Parabolik oluk CSP GES'lerin çalışma sıcaklığı 400-500 °C civarındadır. Parabolik kollektörler, toplam GES sahası içerisinde %30-40 arasında bir arazi işgal etmektedir. Parabolik sistem CSP'lerin en büyük avantajı basitlik ve maliyetin biraz daha düşük olmasıdır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Parabolik oluk CSP GES akış diyagramı.

Güneş enerji kulesi CSP GES gibi, parabolik oluk CSP GES'lerde de enerji depolaması yapabilir. Diğer CSP GES'ler içerisinde en fazla ticari olan sistem parabolik oluk CSP'lerdir. Aşağıdaki Şekil 5.12 ile CSP GES projesine ait bir diyagram görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, güneş sahasında ısıtılan ısı transfer akışkanı, buhar ünitesine gönderilir. Besleme suyu ön ısıtmadan önce yüksek basınca çıkarılır ve daha sonra buharlaştırılarak ısı transfer akışkanı vasıtasıyla süper ısıtılır (superheated). Süperısınan buhar, buhar türbine gönderilir ve jeneratöre bağlı türbinden de elektrik enerjisi üretilir. 2

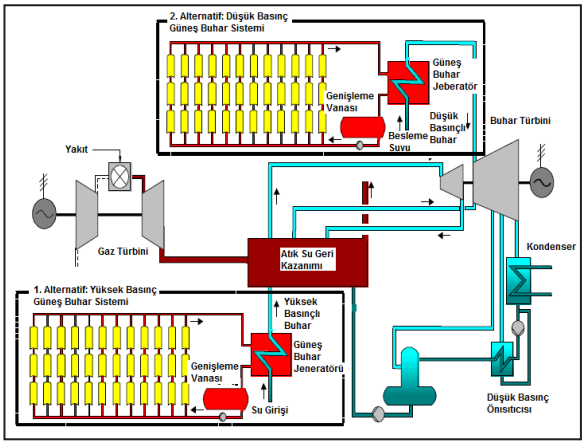
fazlı türbin (yüksek ve düşük basınçlı) yolu ile tekrar ısıtılarak bu çevrim devam eder. Türbinden ayrılan buhar, genişler ve daha sonra yoğunlaştırılarak suya dönüştürülür ve buradan da besleme suyu pompasına gönderilir. Güneşsiz veya gece koşullarında da fosil bir yakıt ile beraber sistem hibrid olarak işletilebilir. CSP GES'lerde depolama imkan dahilindedir. Burada görülen sistemin termal enerji depolaması da mümkündür.



Şekil 5.12. CSP genel tasarımı.

Yukarıdaki şekil, böyle bir sistemdeki süreçlerin akış diyagramını göstermektedir. Kollektör bölgesinde lineer parabolik ve tek eksenli güneş kollektörleri bulunmaktadır. Kuzey-güney yönünde uzanan ve birbirlerine paralel olarak yerleştirilen kollektörlerin herbiri, lineer parabolik şekle sahip olup güneşten gelen direk radyasyonu paraboliğin odağı içerisindeki lineer alıcıya odaklamaktadır. Kollektörler, güneşi doğudan batıya takip ederek günboyu güneş radyasyonunun sürekli lineer alıcıya odaklanmasını sağlamaktadır. Isı transfer akışkanı (heat transfer fluid), alıcıdan sirkülasyon yaparak yüksek basınçlı ısınmış buhar halini alır (superheated steam). Kullanılan buhar, diğer termik santrallarda olduğu gibi, standart kondenserde yoğunlaştırılır ve eşanjörler (heat exchanger) ve besleyici su pompaları (feed waterpump) yardımı ile tekrar buhar haline dönüştürülür. Kondenser soğutması, soğutma kuleleri (cooling tower) yoluyla oluşur. Isı transfer akışkanı eşanjör tarafında geçtikten sonra, soğuyan ısı transfer akışkanı güneş sahası boyunca tekrar sirkülasyona girer. Tarihsel olarak parabolik oluk GES'ler, güneş enerjisinden en fazla verim alınan teknolojidir. Sadece güneş enerjisi ile çalıştığında bile yeterli elektrik enerjisini üretebilmektedir. Özellikle yaz aylarında 10-12 saat tam kapasite çalışabilmektedir.

Bununla beraber, bu tip GES'ler fosil yakıtlar ile birlikte çalıştırılarak hibrid sistem oluşturulabilir ve böylelikle güneş radyasyonunun az olduğu saatlerde yüksek kapasitede elektrik enerjisi üretilmeye devam edilebilir. Şekil 5.13 ile hibrid bir sistem görülmektedir. Bu GES, doğalgaz ile birlikte çalışabilme yeteneğine sahip olup Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) olarak da bilinmektedir. Bu sistemin Şekil 5.12 ile verilen sistemden en büyük farkı, güneş sahasına paralel olarak doğalgaz yakıtlı ısı transfer akışkanı konulmuş olmasından fosil yakıtlı yedek ünite, gece veya hava kapalı olduğu zaman kullanılabilmektedir.



Şekil 5.13. Doğalgaz ile çalışan hibrid CSP (ISCCS).

Yukarıdaki tasarımda güneş enerjisi ek buhar üretimi için, gaz türbini de atık ısıyı tekrar kullanabilecek bir tasarıma sahiptir. Buradaki buhar türbini, normal CSP'lerden %100 daha büyüktür.

CSP GES teknolojisi ilk olarak 1970'li yıllarda Amerika'da kullanılmaya başlanmıştır. Amerikan Enerji Bakanlığı'na bağlı olarak kurulan Enerji Araştırma ve Geliştirme İdaresi tarafından yapılan çalışma ve destek ile CSP teknolojisinin gelişimi ivme kazanmıştır. Parabolik oluk kollektörlerinin 500°C dereceye kadar çıkabilmesi sonucu endüstriyel alanda kullanılmıştır. İlk teknik çalışmalar Amerikan Sandia Ulusal Laboratuvarı tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda birçok ısı prosesi denenmiştir; 100 m^2 alandan 5000 m^2 alana kadar muhtelif büyüklüklerde kollektör alanı üzerinde deneyler yapılmıştır. Acurex, SunTec, Solar Kinetics gibi çeşitli üreticiler bu dönemde etkin olmuşlardır. Parabolik olup teknolojisinin gelişimi Avrupa'da da gözlemlenmiştir. 1981'de İspanya Almeria bölgesinde bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu tesiste iki parabolik oluk güneş sahası toplam 760 m^2 alanda yayılmıştır. Tek eksenli güneşi takip eden sistem (Acurex tarafından üretilen) ile MAN (Almanya) tarafından üretilen çift eksenli sistemler kullanılmıştır. Bu çalışmalar 70'lerde ve 80'lerde yapılmasına karşın ticari olamamasının iki temel nedeni bulunmaktadır. Birincisi; büyük miktarlarda mühendislik ve emek çok küçük projelerde bile gerekiyordu. İkincisi; tam anlamı ile ticari olamadığından pazarlamada ciddi sıkıntılar yaşanmaktaydı. Yine de CSP ile ilgili önemli sayılabilecek bir gelişme 1983 yılında yaşanmıştır. Southern California Edison (SCE) Acurex Şirketi ile CSP GES yapımı için anlaşma imzalamıştır. Acurex şirketinin proje için finansman bulamaması nedeni işe Luz firması işe anlaşma yenilenerek SEGS I ve II adında 2 adet GES yapılmıştır ve toplam kurulu güç 30 MW'tır. Daha sonra 80 MW'a çıkarılmıştır. Aşağıdaki Tablo 5.2 ile bu projelere ait bilgiler görülmektedir.

Tablo 5.2. SEGS CSP GES'lerin özellikleri.

SEGS No.	**İşletmeye Geçiş Yılı**	**Kurulu Güç (MW)**	**Güneş Saha Sıcaklığı (°C)**	**Güneş Saha Alanı (m^2)**	**Güneş Türbin Ver. (%)**	**Gaz Türbin Ver.(%)**	**Net Üretim (kWh/yıl)**
I	1985	13.8	307	82960	31.5	-	30100
II	1986	30	316	190338	29.4	37.3	80500
III & IV	1987	30	349	230300	30.6	37.4	92780
V	1988	30	349	250500	30.6	37.4	91820
VI	1989	30	390	188000	37.5	39.5	90850
VII	1989	30	390	194280	37.5	39.5	92646
VIII	1990	80	390	464340	37.6	37.6	252750
IX	1991	80	390	483960	37.6	37.6	256125

Kaliforniya Mojave Çölü'nde bulunan 9 adet Solar Electric Generating Systems (SEGS) CSP GES, Luz International Limited tarafından geliştirilmiş dünyanın en eski CSP GES projeleridir. Kurulu güçleri 14-80 MW arasında değişmektedir ve yaklaşık 25 yıldır işletme halindedir. Bölgede 1990 yılından bu yana yeni bir CSP GES yapılmamış olsa da,;bu 9 GES projesinden çok önemli bilgi ve tecrübe edinilmiştir. Projelerin gelişmesi, 1983 tarihinde LUZ firması Southern California Edison (SCE) firması arasında yapılan elektrik satış anlaşması sonucu başlamıştır. 1991 yılında Luz firmasının iflas etmesi sonucu X nolu SEGS CSP GES yapılamamıştır. Fakat bu 9 CSP GES başkalarına devredildiğinden çalışmalara devam etmiştir.

Kollektör Teknolojisi

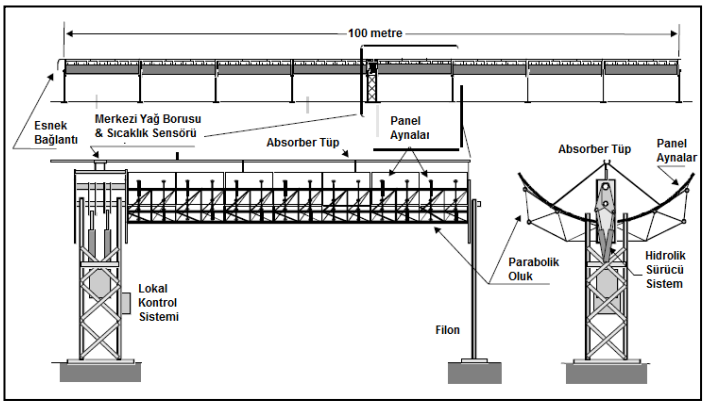
GES'lerdeki en temel eleman güneş köllektörleridir. Herbir kollektör, bağımsız olarak güneşi takip eden sistem, parabolik ayna ve alıcı tüplerdan oluşmaktadır. Aşağıdaki Tablo 5.3 ile SEGS CSP GES'lerde kullanılan kollektör özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.3. Güneş kollektör özellikleri.

Kollektör	**Luz LS-1**	**Luz LS-2**	**Luz LS-3**	**Euro Trough ET-100/150**	**Solargenix DS-1**
Yıl	1984	1988	1989	2004	2004
Alan (m^2)	128	235	545	545/817	470
Yüzey uzunluğu (m)	2.5	5	5.7	5.7	5
Length (m)	50	48	99	100/150	100
Alıcı çapı (m)	0.042	0.07	0.07	0.07	0.07

Yoğunlaştırma oranı	61:1	71:1	82:1	82:1	71:1
Optik verimlilik	0.734[a]	0.764[a]	0.8[a]	0.78[b]	0.78[b]
Alıcı absorberliği	0.94	0.96	0.96	0.95	0.95
Ayna yansıtıcılığı	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Alıcı yayma	0.3	0.19	0.19	0.14	0.14
Sıcaklık (°C/°F)	300/572	350/662	350/662	400/752	400/752
Çalışma sıcaklığı (°C/°F)	307/585	391/735	391/735	391/735	391/735

Solar kollektörler, uluslararası terminolojide Solar Collector Assembly (SCA) olarak bilinmektedir. Luz System Three (LS-3) olarak bilinen bu kollektörler ile ilgili özellikler aşağıdaki şekilde görülmektedir. Bu LS-3 kollektörler, 80 MW CSP GES'te kullanılmıştır. Oldukça gelişmiş bir parabolik ayna yapısına sahiptir.



Şekil 5.14. LS-3 özellikleri.

Yukarıdaki şekille görülen LS-3 kollektörü, yüksek sıcaklığa dayanıklı cam aynalardan meydana gelmektedir. Parabolik yansıtıcıların genişliği 5.76 m ve boyu da 95.2 m'dir (net cam uzunluğu). Aynalar, düşük demir içerikli camdan yapılmıştır. İletim oranı %98 olup arka tarafı gümüşle kaplanmıştır. Ardından da koruyucu bazı materyaller ile sağlamlaştırılmıştır. Isı toplayıcı element (heat collection element) olarak da bilinen lineer alıcı, LS-3 kollektörlerinin yüksek veriminde önemli rol oynamaktadır. Lineer alıcı, 700 mm çelik tüp ve cermet seçici (selective) yüzeyden oluşmaktadır. Çevresini ise içi boşaltılmış bir cam tüp sarmaktadır. Kollektörler, yatayda kuzey-güney ekseninde güneşi izleyerek çalışmaktadırlar. İzleme sistemindeki elektrik tüketiminin minimize edilme amacı için, rotasyonun ekseni, kollektör merkezini referans almaktadır. Hidrolik sistemle çalışan sürücüler vasıtası ile bu işlem gerçekleşmektedir. İzleme sistemi, herbir kollektör tarafından lokal olarak yapılmaktadır. Lokal kontrol sistemi aynı zamanda ısı transfer akışkanının sıcaklığını da gözleyerek işletme durumu, acil durum, alarm vb gibi hususlar hakkında GES kumanda odasına bilgi göndermektedir. Solar kollektörler; normal işletme koşullarında 40 km/s ile 56 km/s arasında çalışmakta ve maksimum 113 km/s'a kadar dayanmaktadır.

5.2.4 LS-3 İşletme Tecrübesi

İşletmedeki 9 adet SEGS GES'ten bazı tecrübeler edinilmiştir. Bunlar izleyen sayfalarda verilmiştir.

Güneş Saha Ekipmanları (Solar Field Components):

GES'teki herhangi bir ekipmandaki basit problem, diğer yüzlerce ekipmanın fonksiyonlarını bozabilmektedir. Güneş kollektörleri 30 yıl için tasarlanmış olup, her türlü montaj, bakım ve işletmesi tasarım özelliklerine göre yerine getirilmelidir. Mojave Çölü'nde bulunan SEGS CSP GES'lerde 3 farklı kuşak kollektör kullanılmıştır. Herbir kuşakta farklı arıza ve tecrübeler edinilmiştir. En önemli kazanım ise, problem meydana geldiğinde hemen nasıl tepki verileceği öğrenilmiştir. Meydana gelen problemler başlıca tasarım ve yanlış montaj yüzünden kaynaklanmıştır. Özellikle 3 ekipmandan bahsedilmelidir: Kollektörler, aynalar ve esnek hortumlar (flexhoses).

Kollektörler

Isı toplayıcı element (heat collection element), arızaları ile zaman zaman karşılaşılmıştır. Bu arızalar zamanla kazanılan işletme tecrübesi ile giderilerek en aza indirilmeye çalışılmıştır. Vakum kaybı, cam kırılması, seçici yüzey defermasyonu, paslanmaz çelik tüpün eğilmesi başlıca meydana gelen arızalar

arasındadır. Bu arızalar, özellikle termal verimi düşürmüştür. Mevcut SEGS GES'lerde yüksek oranda ısı toplayıcı element cam kırılması, atmosferik koşullara maruz kalması nedeni ile seçici yüzey deformasyonu sıkça görülmüştür. Bir sonraki kuşakta kullanılan ekipmanlar için daha gelişmiş tasarımlar kullanılarak arızalar azaltılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, doğru montaj ve işletme kurallarının uygulanması bu ekipmandaki arızaların minimize edilmesinde oldukça yararı olmuştur. Gelecekteki ısı toplayıcı elementte aşağıdaki tasarım kriterleri verimliliğin artmasını sağlayacaktır:

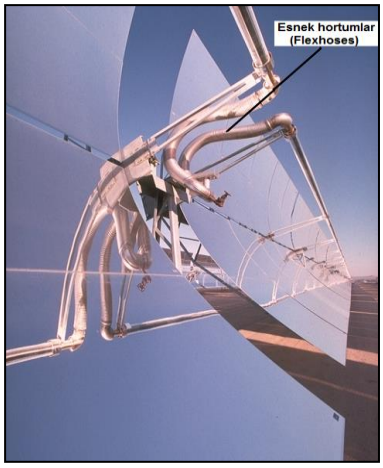
a) Eğilme problemlerini minimize edebilecek yeni tüp tasarım ve ekipmanları,
b) Kırılan camların sahada değişiminin hızlı bir şekilde mümkün olması,
c) Açık hava koşullarında seçici yüzey absorpsiyonu, yayma ve uzun dönem stabilitenin arttırılması.

Aynalar (Mirrors)

Düşük yoğunluklu demire sahip cam aynalar, Luz firmasının kollektörlerindeki en güvenilir ekipmanlardandır. Farklı termal yayılımlar sebebi ile, aynalar ile üzerinde durdukları kaide arasında bazı sorunlar yaşanmış ve bu durum termal verimliliğin azalmasına yol açmıştır. Bu problem, seramik kaide kullanımı ile giderilmeye çalışılmıştır. Ayrıca işletme ve bakım ekibi tarafından eski aynalara yapılan bazı güçlendirme çalışmaları arızaların sayısını azaltmıştır. Yüksek rüzgarlar sebebi ile GES proje sahasının sınırını oluşturan aynalarda bazı kırılmalar ve hasarlar meydana gelebilmektedir. Bunu önleyebilmek için güçlendirilmiş cam aynalar veya ince plastik film kullanımı ile bu sorun azaltılmaya çalışılmıştır. Genellikle aynaların temizlenmesi gerekmektedir. Özellikle 10. yıldan sonra bütün aynalara ciddi bir bakım gerekmekte ve bu bakım sonucu aynalar yeniymiş gibi yansıtma özelliklerine kavuşabilmektedir. Cam aynalar pahalı olup, kollektör maliyetinin düşürülebilmesi için alternatif aynalar gerekmektedir. Kullanılacak her ayna tipinde zarar verilmeden yıkanabilme özelliği bulunmalıdır.

Esnek Hortumlar (Flexhoses)

Esnek hortumlar, herbir aynanın kablo uçlarına ve herbir parabolik oluk aynanın diğer ayna ile birleşimini sağlayan ekipman olup içerisinden ısı transfer akışkanı geçmektedir. CSP GES'lerin ilk zamanlarında ciddi sorunlar meydana gelmiştir ancak burada oluşan tecrübelerden sonra daha sonra kurulan CSP GES'lerde arızalar gittikçe azaltılmıştır. Ayrıca, yeni tasarım CSP GES'lerde esnek hortumlar yerine daha sert borulara bırakmıştır. Yeni sistem, hem fiyat, hem de termal verimlilik üzerinde daha olumlu işletme şartları sergilemiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Esnek hortumlar.

Ayna Temizliği ve Yansıtmanın İzlenmesi

Aynalardan yapılan yansıtma ile aynaların yıkanarak temizlenmesi işletme için büyük önem arz etmektedir. Aynaların mevsim ve hava şartlarına göre farklı oranlarda tozlanması esnek işletme prosedürlerine sebep olmaktadır. Örneğin %0.5/gün gibi yüksek tozlanma oranına sahip günler, daha çok yaz aylarında görülmektedir. İşletme tecrübesinden sonra, yıkamanın basınçlı su, sprey vb gibi hangi tozlanma durumunda kullanılacağı öğrenilmektedir. Kullanılan su demineralize edilmiş sudur. Aynanın yansıtmasının sürekli izlenmesi, aynaların ne zaman yıkanması gerektiği hakkında önemli veriler sunmaktadır. İyi bir yıkamadan sonra cam aynaların yansıtması, tasarımındaki seviyeye gelebilmektedir.

Bakım İzleme Sistemi

Geçtiğimiz yıllarda bilgisayar destekli bakım yönetim yazılımı (Computerized Maintenance Management Software-CMMS), geleneksel fosil yakıtlı elektrik santrallarında başarı ile kullanılmasına karşın CSP GES'lerden aynı verim alınamamıştır. Bu yüzden her bir GES için özel bakım planlama sistemi geliştirilmektedir.

Kollektör Yönetim Kontrolu

İşletme tecrübeleri kollektör yöneliminin (collector alignment) periyodik olarak kontrol edilmesinin gerekli olduğu ve yanlış yönelmiş kollektörlerin düzeltilmesinin termal verim üzerinde hayati öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Proje Başlangıç Desteği (Project Start-up Support)

CSP GES'lerin işletmesi diğer santralların işletmesinden farklılıklar gösterdiğinden proje başlangıcından evvel işletmede çalışacak personele gerekli eğitimin verilmesi gerekmektedir.

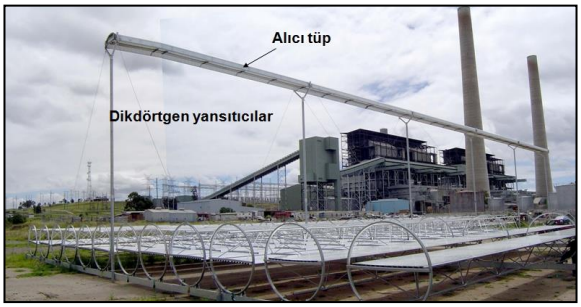
Termal Çevrim ve Günlük Devreye Alma

CSP GES'ler yeterli güneş radyasyonu mevcut olduğunda verimli bir şekilde çalışırlar ve güneşin olmadığı gün içinde yani geceleri yedek fosil yakıt ile çalışabilirler. Eğer yedek fosil yakıtı olmayan bir CSP GES ise, gece devreden çıkacak ve sabah tekrar devreye girecektir. Dolayısı ile CSP GES'lerin devreye çabuk girebilme özelliğinin de bulunması gerekmektedir. Yüksek rüzgarlarda aynalar kendisini koruyabilmesi için ters çevrilmektedir (Şekil 5.16).

Şekil 5.16. Aynaların ters dönmesi.

5.2.5 Fresnel CSP GES

Parabolik oluklara alternatif olarak lineer Fresnel yansıtıcıları teklif edilip test edilmeye başlanmıştır. Lineer Fresnel yansıtıcılarda tek eksenli ve lineer bir alıcısı vardır. Parabolik oluklara kıyasla daha ucuz ve az yer kaplamaktadır. Bununla beraber, lineer Fresnel sistemler uzun yıllar çalışmakta olan ve kendini teknolojik olarak ispatlamış bir sistem değildir. İspanya Almeria'daki PSA CSP test merkezinde The Solar Power Group ve MAN Ferrostaal tarafından 1 MW test CSP GES kurulmuştur. Ausra isimli üretim şirketi Kalifornia Kimberline'de 5 MW lineer Fresnel CSP GES kurulumunu gerçekleştirmiştir. Anahtar teslim GES projesi geliştiren NOVATEC firması, Murcia'da (İspanya) 1.4 MW lineer Fresnel CSP GES kurulumu yapmıştır. İspanya, İtalya, Mısır, Cezayir, Fas ve Abu Dabi'de CSP GES'ler için projeler yürütülmektedir.

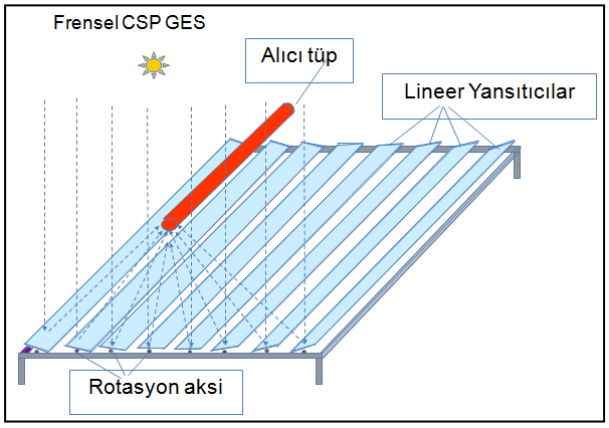


Şekil 5.17. Lineer Fresnel CSP GES.

Aşağıdaki fotoğrafta İspanya Almeria'da bulunan lineer Fresnel CSP GES görülmektedir (Şekil 5.18). MAN Ferrostaal tarafından testleri yapılmaktadır.

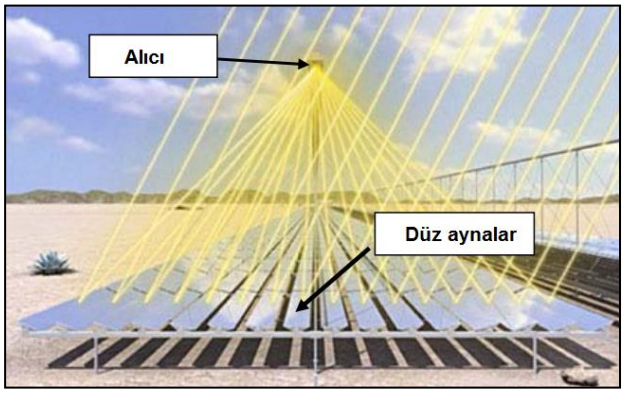
Şekil 5.18. İspanya Almera'da lineer Fresnel CSP GES.

Ausra'nın geliştirdiği teknolojide parabolik oluk CSP GES'lerde ısı transfer akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Buradaki enerji içi sıcak su dolu tanklarda depolanarak gece veya bulutlu havalarda kullanılmaktadır. Lineer Fresnel CSP GES diyagramı aşağıda görülmektedir (Şekil 5.19).



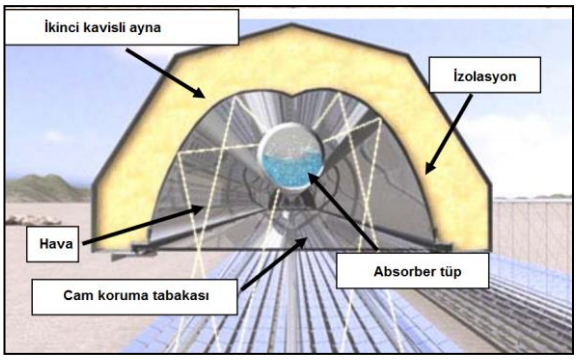
Şekil 5.19. Lineer Fresnel CSP GES çalışma diyagramı.

Fresnel sisteminde aynalar kuzey-güney doğrultusunda uzanmaktadır ve güneş ışığını alıcıya yoğunlaştırarak ve tüp içerisinden geçen suyu ısıtmaktadır (Şekil 5.20). Bu sistemler, kum fırtınası ve dolu yağışı durumunda kendini kapatmaktadır.



Şekil 5.20. Lineer Fresnel CSP GES çalışma diyagramı.

Fresnel sistemindeki alıcı, yüksek basınçlı tüp olup özel seçici bir tabaka ile kaplanmıştır. Kısa dalga boylu radyasyonu absorbe ederek uzundalga boylu radyasyonu yayma özelliğine sahiptir. Bu tüp, ikinci bir tabaka ile kaplanmıştır (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Lineer Fresnel CSP GES çalışma diyagramı.

Lineer Fresnel CSP GES'te bütün aynalar ortada bulunan ve ısı transfer akışkanının geçtiği absorber tüpe güneş ışığını yoğunlaştırmaktadır.

5 MW Kimberlina Fresnel CSP GES
California Bakersfield bölgesinde 5 MW kurulu gücünde Ausra firması tarafından yapılan ve lineer Fresnel teknolojinin kullanıldığı CSP GES aşağıda görülmektedir (Şekil 5.22).

Şekil 5.22. California Bakersfield 5 MW lineer Fresnel CSP GES.

Parabolik oluk CSP GES'lerle kıyaslandığında Fresnel tip CSP GES'lerin önemli özelliklerinden birisi de, daha az arazi gereksinimine ihtiyaç duymasıdır.

Puerto Errado CSP GES
Novatec Solar Espana tarafından işletilen Puerto Errado Fresnel CSP GES, İspanya Murcia Bölgesi Calasparra kenti yakınlarındadır. Mart 2008 tarihinde işletmeye açılmış olup yaklaşık 7 hektar üzerinde kurulmuştur (Şekil 5.23).

Şekil 5.23. Puerto Errado Fresnel CSP GES.

Puerto Errado Fresnel CSP GES'e ait diğer özellikler ilerleyen sayfalarda verilmiştir.

Genel Özellikler

Kurulu güç	: 2 MW
Yıllık üretim	: 2800000 kWh
Yıllık güneşlenme	: 2015 kWh/m^2
Tarife	: 26.94 EUROc/kWh (25 yıl alım garantisi)
Toplam santral alanı	: 40000 m^2

Ayna Genel Özellikleri

Ayna sayısı	: 4608 adet
Ayna alanı	: 18662 m^2
Ayna boyutları	: 0.75 m x 5.4 m
Ayna yüksekliği	: 1.2 m

4 ayrı sıra ve her bir sırada da 8 adet ayna serisi bulunmaktadır.

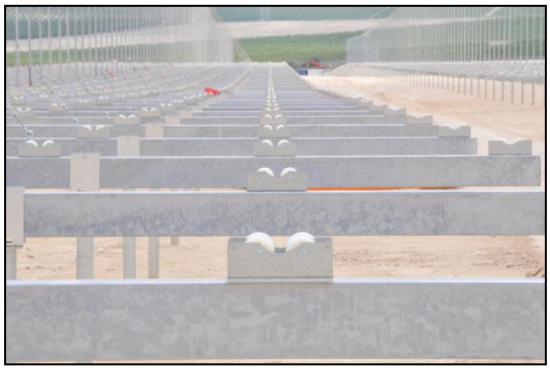
Alıcılar

- 70 mm kollektör çapı
- Yerden yüksekliği 7 m
- Sıcaklık 270 °C
- Basınç 55 bar

Güneş Toplama Sahası

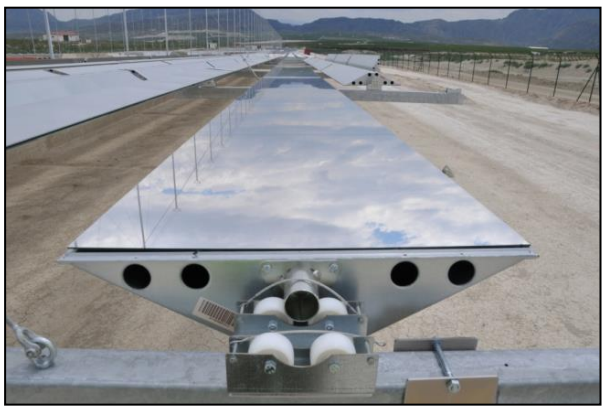
- Maksimum optik verim %67
- Yıllık güneş irradyasyon dönüşüm oranı %37
- Güneş sahası ortalama ağırlığı 28 kg/m^2 (parabolik oluk CSP GES'lerde bu değer 135 kg/m^2 dir).

İnşaata başlandıktan sonra öncelikle aynaların üzerine oturacağı kaideler yerleştirilmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Puerto Errado Fresnel CSP GES kaidelerin yerleştirilmesi.

Daha sonra da aynalar yerleştirilir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. Puerto Errado Fresnel CSP GES aynaların yerleştirilmesi.

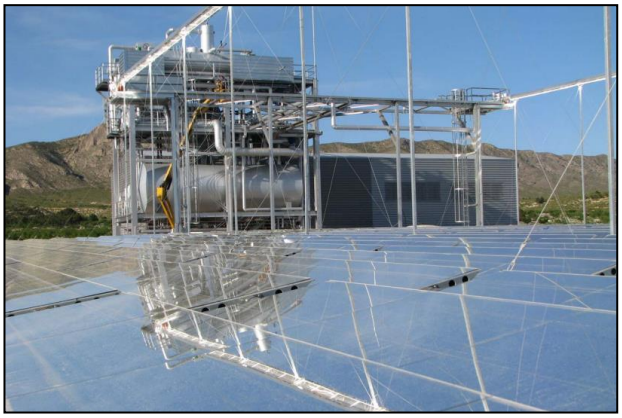
Santralın inşaatının bitmiş hali aşağıda görülmektedir.

Şekil 5.26. Puerto Errado Fresnel CSP GES.

Güç Bloğu

- Siemens jeneratör ünitesi,
- Resirkülasyon pompası,
- Hava soğutmalı kondenser.

Şekil 5.27 ile Puerto Errado Fresnel CSP GES güç bloğu görülmektedir.



Şekil 5.27. Puerto Errado güç blok ünitesi.

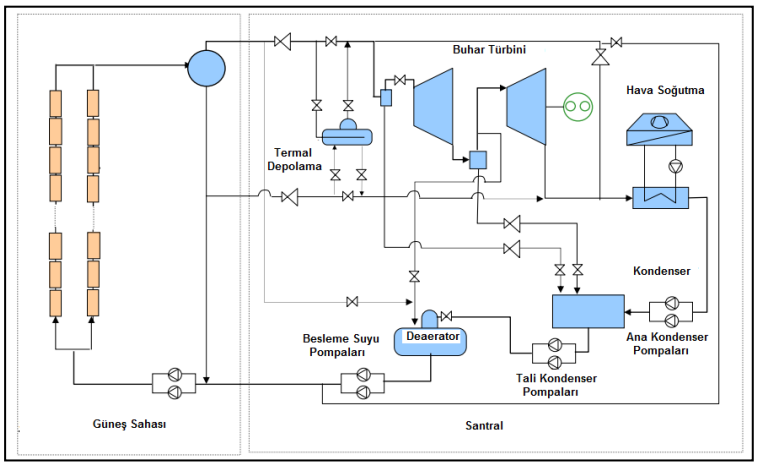
Santralın arka tarafından güç bloğunun görünümü Şekil 5.28 ile görülmektedir.

Şekil 5.28. Puerto Errado güç blok ünitesi.

Aynı santralın güç bloğunun içerisine ait bir fotoğraf aşağıda verilmiştir (Şekil 5.29).

Şekil 5.29. Puerto Errado güç blok ünitesi iç kısım.

Santralın diyagramı ise Şekil 5.30 ile görülmektedir.



Şekil 5.30. Puerto Errado basitleştirilmiş diyagram.

Temizleme

- Otomatik robotla temizleme,
- Düşük su tüketimi (0.2 lt/saat),
- Temizleme için 0.50 m^3/yıl/MW (Parabolik oluk CSP'lerde 1600 m^3/yıl/MW).

Aşağıdaki Şekil ile temizlik robotu görülmektedir.

Şekil 5.31. Puerto Errado Fresnel CSP GES ayna temizliği.

Fresnel Aynaların Üretim Süreci

Fresnel Aynalar Novatec Biosol AG tarafından üretilmektedir. Firma aynı zamanda ar-ge çalışmaları da yapmaktadır (Şekil 5.32).

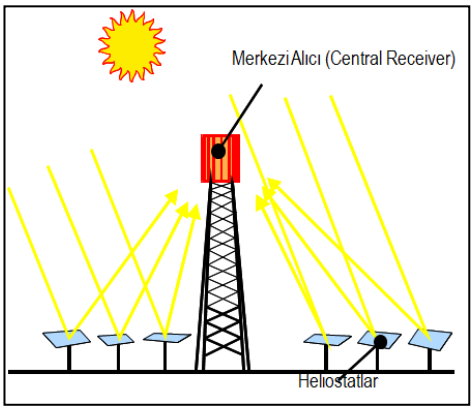
Şekil 5.32. Fresnel aynaların ar-ge çalışmaları.

Fresnel aynaların üretim süreci Şekil 5.33 ile görülmektedir.

Şekil 5.33. Fresnel aynaların üretim süreci.

5.3 Güneş Enerjisi Kule CSP Sistemi (Solar Power Tower)

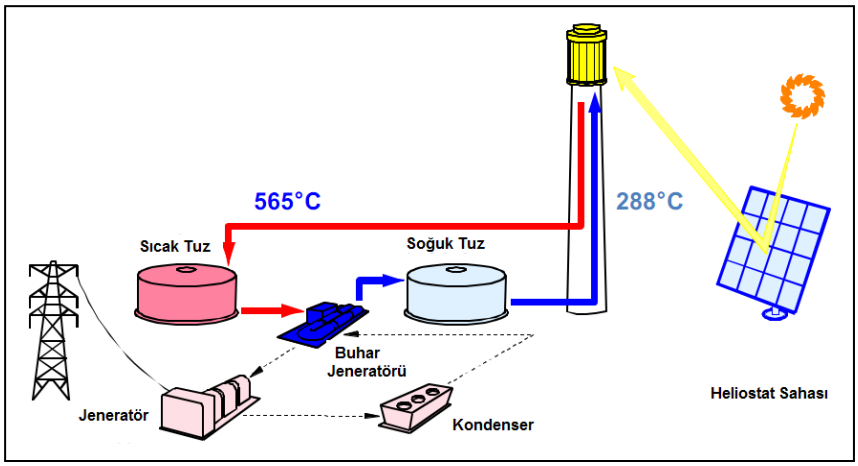
Yoğunlaştırıcı sistemler içerisinde incelenmesi gereken ikinci teknoloji olan güneş enerjisi kuleleri (solar power tower), elektriği güneş ışınlarını kule şeklinde yapılmış alıcıya (receiver) yansıtarak elde etmektedir. Bu sistem heliostat denen binlerce aynayı kullanarak güneş ışınlarını kuleye yansıtmaktadır. Bu tip CSP GES'ler genellikle 30-400 MW arasında olup şebeke ile beraber çalışan sistemlerdir. Kurulu güçleri büyük olduğundan dolayı şebekeden bağımsız olarak kullanılamamaktadır.



Şekil 5.34. Kule sistemi genel diyagramı.

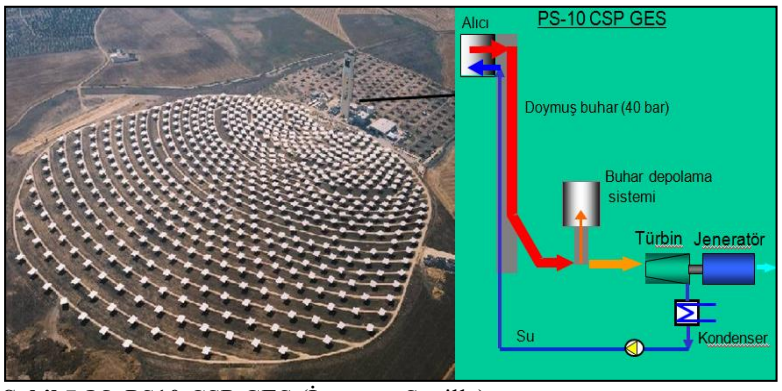
Uluslararası terminolojide kule sistemi CSP GES'ler, aynı zamanda güneş enerji kuleleri (power towers) veya merkezi alıcılar (central receiver) olarak da bilinir. Kulenin etrafını çevreleyen güneş ayna tarlasına da heliostat denilmektedir. Kule sistemlerinin konsantrasyon faktörü 200 ile 2000 kat arasında değişmektedir. Herbir heliostat diğerlerinden bağımsız olarak güneşin yörüngesini takip etmektedir. Güneş ışınlarının yoğunlaştırıldığı kulenin tepesinde yeralan alıcı içerisinde termodinamik süreçlerden

geçen ısı transfer akışkanı, kulede doymuş buhar haline getirilir ve kuleden aşağıya indirilerek buhar türbini ve oradan da jeneratöre verilerek elektrik üretimi yapılmış olunur.



Şekil 5.35. Kule sistemi basitleştirilmiş akış şeması.

Kule sistemleri, maliyet bakımından avantajlı olmakla birlikte, yüksek kule gerektirmesi, karmaşık bir alıcıya sahip olması ile 2 eksenli izleme sistemi gerektirmesi sebebi ile proje yapımında zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bununla beraber, son 5 yılda özellikle İspanya ve ABD'de güneş enerji kuleleri projelerinin sayısı artmaktadır. Şekil 5.36 ile İspanya Sevilla'da bulunan PS10 isimli CSP GES projesinin fotoğrafı ve basitleştirilmiş diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.36. PS10 CSP GES (İspanya, Sevilla).

İspanya Sevilla yakınlarında bulunan ve 10 MW kurulu gücündeki bu PS10 CSP GES, Haziran 2007'den bu yana işletmededir. Abengoa Solar tarafından geliştirilen proje, 40 milyon €'ya mal olmuştur. 33.8 milyon € özkaynak, 5 milyon Euro Avrupa Birliği 5. Çerçeve Programı kapsamında ve 1.2 milyon Euro'da Andalusia Bölgesel Hükümeti Yenilenebilir Enerji Programı çerçevesinde verilmiştir. Sevilla'nın 15 km batısında Sanlucar la Mayor bölgesinde yer almaktadır. Proje için 624 adet herbiri 120 m² olan Sanlucar 120 heliostatları kullanılmıştır. Toplam alanı 75000 m² olmakta ve çift eksenli olarak çalışmaktadır. Güneş kulesinin yüksekliği 115 m²'dir. Proje, Abengoa Solar tarafından geliştirilmiştir. 5.5 m x 12 m boyutunda olup yarı silindirik bir şekle sahiptir. Güneşten buhara dönüşüm verimi %95'tir. PS10 GES'in elektrik üretiminin %15 civarında hibrid olarak çalıştığı doğal gazdan meydana gelmektedir. Yıllık 24.3 GWh elektrik üretimi yapılmaktadır.

PS 10 CSP GES'in hemen yanına yeni bir proje geliştirilerek PS 20 adında 20 MW kurulu gücünde bir güneş enerji kule CSP GES projesi geliştirerek 2008 yılının ikinci yarısında işletmeye alınmıştır. Herbiri 120 m² olan 1255 adet heliostattan oluşmuştur ve toplam alanı 150600 m²'dir. Kulenin yüksekliği 165 m olup, yıllık 50.6 GWh elektrik enerjisi üretilmesi planlanmıştır. Şekil 5.37 ile her iki kule CSP GES yan yana görülmektedir.

Şekil 5.37. PS10 ve PS20 CSP GES (İspanya, Sevilla).

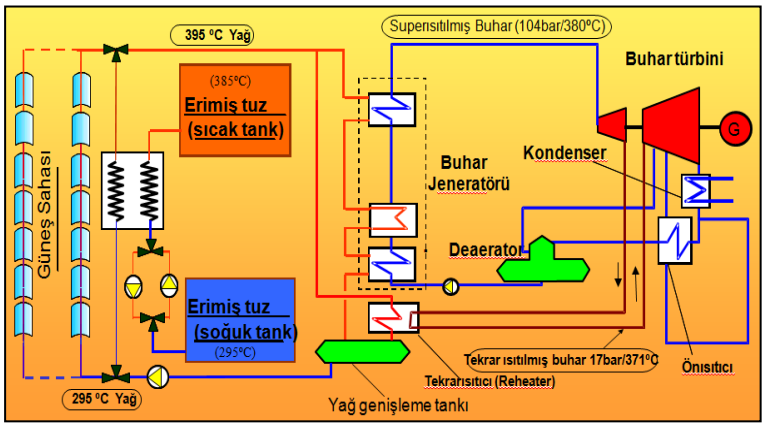
Farklı bir açıdan çekilen hava fotoğrafı Şekil 5.38'te verilmiştir.

Şekil 5.38. PS10 ve PS20 CSP GES (İspanya, Sevilla).

Kule sistemlerindeki farklılıklar, heliostat sahası mimarisi, alıcı inşaatı, ısı transferi ve depolama sistem tasarımlarında kendini göstermektedir. Isı transfer akışkanı olarak erimiş tuz kullanılmaktadır. Şekil 5.39 ile İspanya Almeria'da Plataforma Solar de Almeria (PSA) test merkezinde bulunan CESA-1 isimli CSP GES görülmektedir.

Şekil 5.39. CESA-1 CSP GES kulesi.

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, alıcı akışkan olarak erimiş tuzu kullanmaktadır. Geleneksel termik santrallarında olduğu gibi toplamın içerisinden geçen akışkan yanma odasına gelmektedir. Isınmış bu akışkan depolama tankları veya eşanjörlere (heat exchanger) iletmekte ve oradan da enerji çevrimine devam etmektedir (Şekil 5.40).



Şekil 5.40. CESA-1 CSP GES diyagramı.

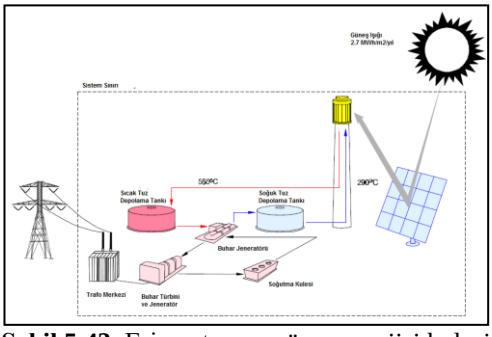
Termal enerji depolama ünitesi ile birlikte kullanılan parabolik oluk CSP teknolojisi, güneşin olmadığı zamanlarda da elektrik üretimine devam edilmesini sağlamaktadır. Termal enerji depolama ünitesinin en kritik hususu, çalışma akışkanının optimizasyonudur. Bu akışkan, ısı transfer akışkanı olduğundan seçimi çok önemlidir. Son yıllarda kullanılmaya başlayan erimiş tuz, gittikçe sentetik yağın yerini almaktadır. 100 MW ile 200 MW arası bir kurulu güç için çok büyük miktarda (milyonlarca kg) ısı transfer akışkanı gerektirmektedir. Bu yüzden ısı transfer akışkanının optimizasyonu GES üzerinde maliyet optimizasyonu açısından önemlidir. Şimdiye kadar kullanılan CSP GES projelerinde kullanılan sentetik yağ, diphenyl oksit ve biphenyl oksit karışımıdır. Donma noktası 12 °C ve üst sıcaklık limiti de 393 °C'dir. Sentetik yağ kullanımının yerine yeni ısı transfer akışkanı aranmasının iki ana nedeni bulunmaktadır. Birincisi, sıcaklık üst limiti Rankine çevriminin verimini düşürmektedir. İkincisi de CSP GES projelerinde termal enerji depolama ünitelerinin kullanımının yaygınlaşması sentetik yağ kullanımını çok pahalı hale getirmiştir. Depolama sisteminin kullanımı, GES'in yıllık kapasite faktörünün artmasına da büyük katkıda bulunmaktadır. Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda yapılan çalışmalar sonucunda daha ucuz ve 500 °C'lere kadar çalışabilen inorganik erimiş tuz geliştirilmiştir. Erimiş tuz 10 MW Solar Two (Kaliforniya Barstow) ve İspanya Andasol GES projelerinde kullanılmıştır. Şekil 5.41 ile Solar Two projesinde bulunan tank ve pompalar görülmektedir.

Şekil 5.41. Solar Two GES sıcak ve soğuk tank ve pompalar.

CESA-1 CSP GES projesine ait alıcı sistemin arka plan fotoğrafı da aşağıda görülmektedir.

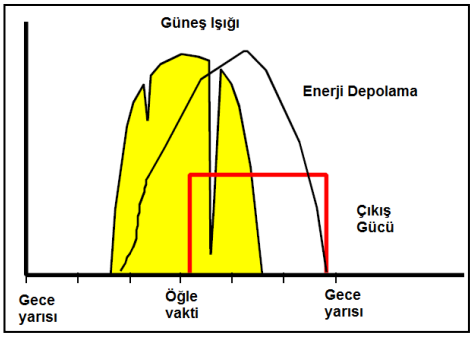
Şekil 5.42. CESA-1 CSP GES alıcısı.

CSP GES'lerdeki en yüksek sıcaklık 400-600 °C'dir. Örneğin Solar Two CSP GES projesinde sıcak tankta eriyik tuz için 565 °C sıcaklık gerekmektedir. Soğuk tankta ise, 288 °C'dir. Yansıtıcı aynaların toplam CSP GES sahası içindeki oranı ise %22'dir. Güneş enerjisi kulesi eriyen tuz ile (molten salt) kullanılabilmektedir. Sıvı tuz 290 °C'de soğuk depo tankından güneş akışı tarafından 565 °C'ye getirilir ve pompalanarak sıcak depo tankına gönderilir ve burada depolanır. CSP GES'ten elektrik üretimi gerektiğinde sıcak tuz buhar üretim sistemine gönderilerek süper ısınmış (superheated) buhar üretir ve bu buhar Rankine çevrimine girerek jeneratörü döndürür. Buhar jeneratöründen tekrar soğuk depo tankına giden tuz, buradan tekrar alıcıya gider ve çevrim böylelikle devam eder. Aşağıdaki Şekil 5.43 konuyu özetlemektedir.



Şekil 5.43. Eriyen tuz ve güneş enerjisi kulesi kullanımı.

Depo olarak kullanılan tankların tasarımı, önemli bir süreçtir ve genellikle 10 saate kadar yapılabilmektedir. Kuleyi çevreleyen heliostat sahasının da optimizasyonu gerekmektedir. Güneş kollektör sistemi (heliostat sahası ve alıcı) tarafından sağlanan termal gücün, jeneratör tarafından verilen pik termal güce oranına güneş çarpanı (solar multiple) olarak adlandırılmakadır. Kaliforniya Mojave çölünde bulunan güneş enerji kule sisteminin güneş çarpanı yaklaşık 2.7 olup yıllık %65 kapasite faktörüne göre tasarımı yapılmıştır. Depolama ünitesi olmadığında kapasite faktörü %30 civarındadır. Bu sistemden elde edilecek olan elektriğin gün içerisindeki dağılımı aşağıdaki şekilde verilmiştir. Şekil 5.44, güneşin yoğunluğu ve sıcak tank içerisinde depolanan enerjiyi günün saatlerine göre göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi GES'te güneş doğduktan sonra termal enerji sıcak tankın içerisinde depolanmaya başlanır ve gün boyunca enerji tank içerisinde biriktirilir. Gece saat 11'e kadar enerji GES'ten alınabilir.



Şekil 5.44. Erimiş tuz ile çalışan CSP.

Solar One Projesi

1982-1988 yılları arasında işletmede olan Solar One GES dünyasındaki en büyük güneş enerjisi kulesi CSP projesi olup büyük kurulu güçlü CSP GES'in güneş enerjisi kulesinden üretilebileceğini göstermesi açısından önemli bir proje idi. Bu projede su alıcının içerisinde buhar haline dönüştürülerek doğrudan Rankine çevrim buhar türbine veriliyordu. Heliostat sahası, herbiri 39.3 m^2 yansıtma alanına sahip 1818 adet heliostattan oluşmaktaydı. Proje planlanan hedeflerine ulaşmıştır. Öncelikle kule yolu ile elektrik üretimi fizibl idi; yaz ayları boyunca 8 saat 10 MW üretebilmekte idi. Solar One projesinde depolama sıcak tank içindeki kayalar ve toprakla sağlanıyordu. Isı transfer akışkanı olarak da yağ kullanılmaktaydı. Fakat bu depolama sistemi termodinamik olarak düşük verime sahipti. Solar One projesi, kule güneş enerjisinin başarı ile çalışabildiğini göstermiş olması ve sistemdeki hem zayıf hemde verimsiz noktaların açığa çıkarılması açısından önemli tecrübeler kazandırmıştır. Buradan elde edilen tecrübeler ile Solar Two projesi geliştirilmiştir.

Solar Two Projesi

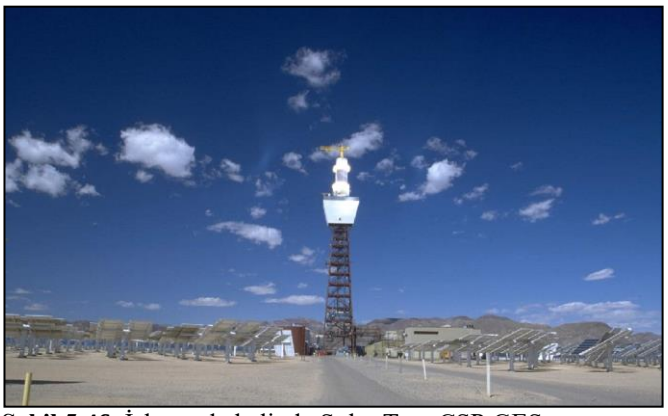
Erimiş tuz ile güneş enerjisi kullanımının geliştirilmesi amacı ile Southern California Edison Şirketi ile Amerikan Enerji Bakanlığı, Solar One projesini tekrar tasarlayarak Solar Two isimli ikinci bir proje yapmışlardır. Burada nitrat tuz teknolojisi kullanılarak kulelerin ekonomik ve teknik riskleri azaltılmaya çalışılmıştır. Solar Two projesi güneş battıktan sonra 3 saat 10 MW tam kapasite çalışabilmekteydi. Projenin dünüşümü için yeni erimiş tuz transfer sistemi (alıcı termal yedekleyici, boru ve buhar jeneratörü de dahil) ve yeni kontrol sistemi eklenmiştir. Solar Two 1990'da şebekeye bağlanmış ve 1997 yılı içinde de işletmeye alınmıştır. Solar Two alıcısı Boeing firmasının Rocketdyne Bölümünde yapılmıştır. Alıcı, termal verim olarak optimum çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Örneğin bir bulut kümesi geçişi sırasında alıcıdaki sıcaklık değişimi 290 °C'den 570 °C'ye güvenli bir şekilde değişebilmektedir. Depolanan tuzun %60'ı sodyum nitrat, %40'ı da potasyum nitrattan oluşmaktaydı. 220 °C derecede eriyebilen tuz, 290 °C'deki sıcaklık şartlarında depolanabilmekteydi. Düşük viskozitesi sebebi ile erimiş tuz ile çalışmanın birçok zorluğu da bulunmaktaydı. Enerji depolama sistemi 875000 litre kapasiteye sahipti ve proje sahası içerisinde Pitt Des Moines Şirketi tarafından montajı yapılmıştı. Tanklar, dışarıdan izoleli ve paslanmaz çelikten yapılmıştı. Sıcak ve soğuk tanklar için karbon çelikte kullanılmıştı. 110 MW termal kapasiteye sahip tanklar için doğal soğutma sistemi ile çalıştırılmakta idi. Sıcak tank için kullanılan bütün borular, vanalar ve mekanik aksam korozyona dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilmiştir.

Soğuk tank için kullanılan aksamlarda karbon ile karışık çelikten yapılmıştır. 10 MW kurulu gücündeki Solar Two bu tip bir CSP GES için oldukça küçük olduğundan dolayı, işletme ve bakım maliyetleri oldukça yüksek kalmaktaydı. Bu sistem için diğer bir husus ise, çok yüksek su ve arazi gereksinime ihtiyaç duymasıydı. Özellikle su hususu önemlidir, çünkü bu tip GES'ler genellikle çöl tipi iklim bölgelerinde kurulmakta olduğundan su tedariğinde sıkıntı yaşanılabilmektedir. Arazi ihtiyacı ise GES ve termik santrallar ile kıyaslandığında daha küçüktür.

Günümüzde parabolik oluk CSP GES işletme giderlerini azaltabilmek için dünya genelinde çeşitli ar-ge çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmalarda çalışma akışkanı olarak sentetik yağın yerine daha düşük maliyetli ve daha yüksek sıcaklıkta çalışabilen erimiş tuzun kullanılması öncelikli gelen araştırma konuları arasındadır. Yeni akışkana geçiş, daha yüksek sıcaklık anlamına geldiğinden Rankine çevrim değişmekte ve termal enerji depolama sisteminin maliyeti de azalmaktadır. Bu maliyet azalmasının nedeni, depolama maliyetinin sıcaklık ile ters orantılı olarak değişmesi sebebi ile meydana gelmektedir. Çalışma sıcaklığı 390 °C'den 500 °C'lere gelebilmektedir. Yani sıcaklıktaki bu artış depolama maliyetini yarıya indirmektedir. Bu CSP GES'lerde solar çarpan (solar multiple) 2.8 (normal CSP GES'lerde bu değer 1.5) olup 2 kat daha yüksektir. Kapasite faktörünün ise, %60'a yaklaşabileceği tahmin edilmektedir. Bütün bu olumlu hususlar, 1990'ların sonunda yapılan Solar Two projesinde gözönüne alınarak erimiş tuz kullanan kule CSP GES deneme projesinin hayata geçmesine ön ayak olmuştur. Erimiş tuz teknolojisi kullanıldığında, işletme ve bakımı zor olan eşanjör kullanılmamaktadır. Depolama ise, 16 saate kadar çıkabilmektedir. Şekil 5.45 ile Solar Two CSP GES projesinin işletmeye alınmaya hazır hale getirilmesi görülmektedir.

Şekil 5.45. İşletmeye hazır hale getirilen Solar Two CSP GES.

İşletme halindeki Solar Two CSP GES ise aşağıda görülmektedir (Şekil 5.46). Alıcının olduğu kısım güneş odaklamasından dolayı aydınlatılmış gibi görülmektedir.

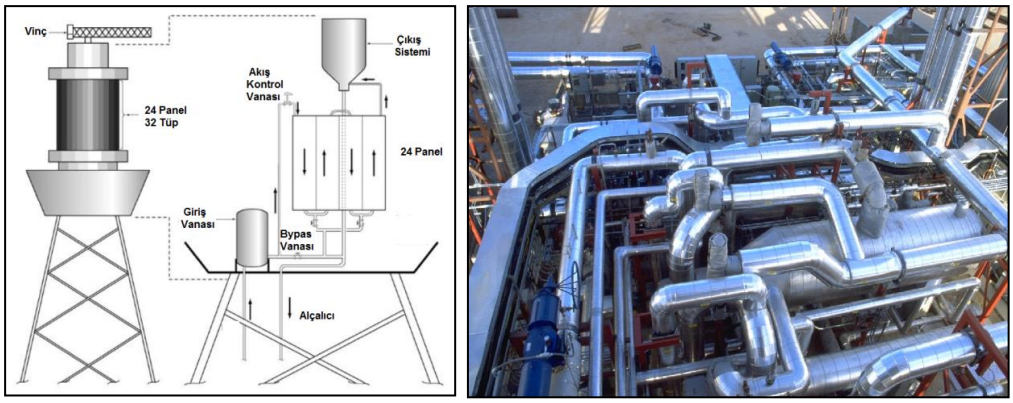


Şekil 5.46. İşletmede halinde Solar Two CSP GES.

Solar Two CSP GES'in kontrol odası ise aşağıda verilmiştir (Şekil 5.47).

Şekil 5.47. Solar Two CSP GES kontrol odası.

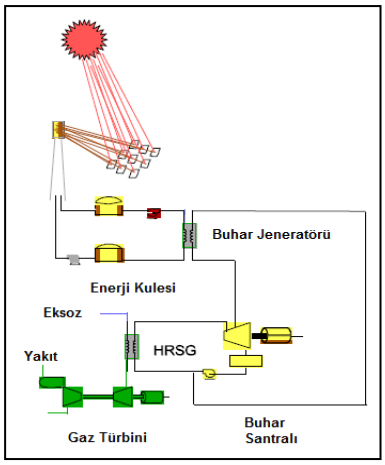
Solar Two projesine ait erimiş tuz alıcısının diyagramı ve buhar jeneratör sistemi Şekil 5.48 ile görülmektedir.



Şekil 5.48. Solar Two GES erimiş tuz alıcısı ve buhar jeneratör sistemi.

Hibrid Uygulamalar

Bu tip projelerin ekonomik olarak yapılabilir olabilmesi için en az 50 MW üstü olması gerekmektedir. Dolayısı ile geleneksel bir termik yakıt ile hibrid sistem çalıştırılabilme özelliği de gündeme gelebilir. Aşağıdaki Şekil 5.49 ile bu hibrid sistem görülmektedir. Bu CSP GES'te doğalgaz yakıtı kullanılmaktadır. Bu GES'te güneş enerjisi, doğal gaz yakıt kullanılmaktadır. Bu GES'te güneş enerjisi, doğal gaz yakıt kullanımını azaltmak amacı için kullanılmaktadır. Sadece doğal gaz değil, kömür yakıtlı veya fuel-oil yakıtlı sistemlerde yapılabilmektedir.



Şekil 5.49. Hibrid CSP GES.

Bu tip CSP GES'lerde güneş enerjisi toplam yıllık elektrik enerjisinin %20-30 arasında bir kısmını karşılayabilmektedir. Aşağıdaki Tablo 5.4 ile bu tip GES'lerdeki enerji depolama ünitelerinin bazı özellikleri görülmektedir.

Tablo 5.4. Depolama sistemlerinin kıyaslanması.

Malzeme	**200 MW CSP GES İçin Maliyet ($/kWh)**	**Sistem Ömrü (Yıl)**	**İşletme Sıcaklığı (°C/°F)**
Erimiş Tuz	30	30	567/1053
Sentetik yağ	200	30	390/734
Akü Depolama	500 – 800	5 - 10	-

Heliostatlar

Şimdiye kadar birkaç nesil heliostat üretimi gerçekleştirilmiş olup fiyatı ise, 250 USD/m^2'dir ve oldukça pahalıdır. GES projeleri ve buna paralel olarak heliostat ar-ge çalışmaları arttıkça fiyatın daha aşağılara çekileceği varsayılabilir. Solar Manufacturing Technology (SolMaT), konu ile ilgili çalışmalar yapmaktadır. Heliostat maliyeti, güneş enerji kulelerindeki en önemli kalemi oluşturmaktadır. Heliostatların yakından görünümü Şekil 5.50 ile görülmektedir.

Şekil 5.50. Heliostatların yakından görünümü.

Heliostatlardaki güneşi izleme sisteminin yakından görünümü Şekil 5.51 ile görülmektedir.

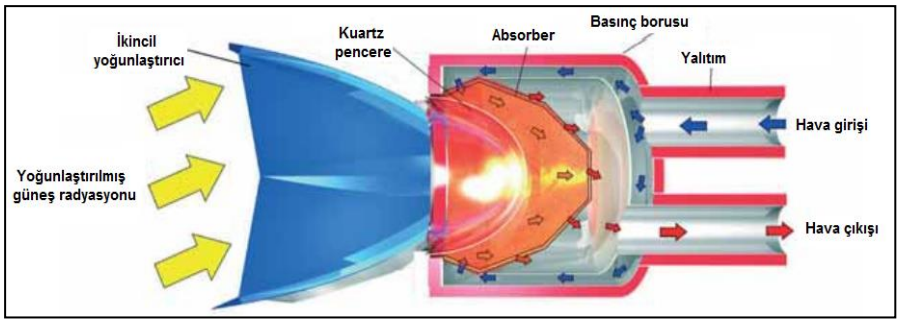
Şekil 5.51. Güneşi izleme (tracking) sistemi.

Alıcı (Receiver)

Güneş kule enerji CSP GES sisteminde bulunan alıcılar, genellikle boyut olarak büyüktür. Daha küçük, verimli ve bakımı kolay alıcılar ile ilgili ar-ge çalışmaları devam etmektedir (Şekil 5.52).

Şekil 5.52. Alıcılar.

Şekil 5.53 ile alıcı sistemi basitleştirilmiş diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.53. Alıcı sistemi basitleştirilmiş diyagramı.

Alıcı kulesi, çoğunlukla betondan yapılmaktadır. Daha önce de değinilen ABD California Barstow'daki projelerde çelik kafes kullanılmıştır. Ayrıca Sandia Laboratuvarına ait CSP Test Merkezi'ndeki kulelerde çelikten yapılmıştır. Kule CSP GES sisteminde ısı transfer akışkanının içinden geçtiği borulara ait bir fotoğraf, Şekil 5.54 ile verilmiştir.

Şekil 5.54. Akışkanın içinden geçtiği borular.

Alıcının içerisine buhar haline getirilmek için kullanılan boru girişinin kuledeki resmi Şekil 5.55 ile görülmektedir.

Şekil 5.55. Alıcıya boruların girişi.

Farklı bir açıdan aynı sisteme ait resim aşağıda görülmektedir (Şekil 5.56).

Şekil 5.56. Alıcıya ısı transfer akışkanının girişi.

Erimiş Tuz

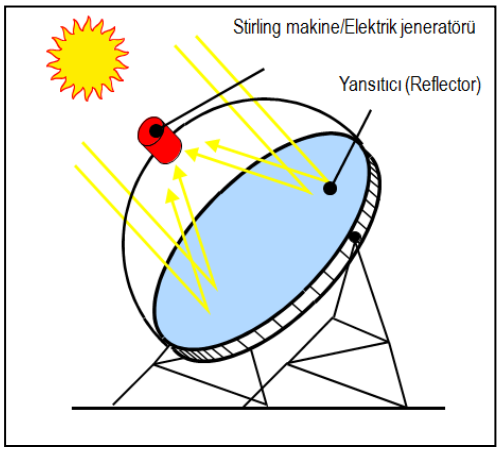
Her ne kadar mükemmel bir enerji depolayıcısı olsa da erimiş nitrat tuz 220 °C gibi yüksek donma noktasına sahip olduğundan dolayı çalışması zor bir sıvıdır. Tuzu eriyik halinde tutabilmek için oldukça kompleks bir ısı transfer sistemi kurulmuştur. Erimiş tuzların bulunduğu sistem Şekil 5.57 ile görülmektedir.

Şekil 5.57. Erimiş tuz tesisi.

5.4 Güneş Çanak Sistemi (Solar Dish Engine)

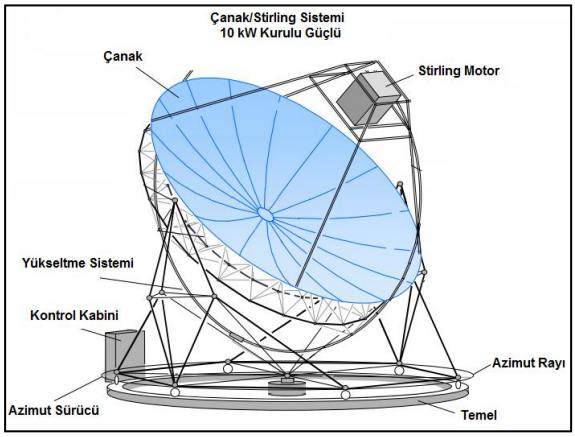
Çanak sistemleri güneş radyasyonundaki temel enerjiyi önce mekanik daha sonra da elektrik enerjisine çevirmektedir. Bu çevrim, termik santrallardakine oldukça benzer bir sistemdir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi bu sistemler ayna düzeninde olup gelen güneş radyasyonunu alıcıya yansıtarak gerekli sıcaklığa ulaşılmasını sağlar. Bu sistem güneşi çift eksenli takip eden bir yapı gerektirmektedir. Yoğunlaştırılan güneş radyasyonu alıcı tarafından emilerek makinaya enerji dönüşümü için transfer edilmektedir. Çanak/makina teknolojisi CSP GES'ler içerisindeki en eski teknolojidir. 1800'li yıllara kadar giden bir geçmişi bulunmaktadır. O yıllarda bazı şirketler Rankine ve Stirling bazlı teknolojileri kullanarak güneşten enerji elde etmeye çalışmışlardır. Modern teknolojisi ise, 1970 ve 1980'lerde çeşitli şirketler ve Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilerek ticari yapılmaya çalışılmıştır. İlk kuşak makinalar %12 civarında verime sahipken günümüzdeki sistemlerde %35 civarındadır. 1990'ların başında Cummins Engine Şirketi, Çanak/Stirling sistemini Stirling makina teknolojisi ile birleştirilmeye çalışmıştır. Bu teknoloji daha çok şebekeden uzak bölgelerde ve ada sistemi olarak çalıştırılmak için geliştirilmeye çalışılmıştır. Kurulu güçler 5 kW-10 kW arasında düşünülmüştür. Daha sonra konu ile ilgili araştırmalara ara verilmiştir. Parabolik oluk ve güneş kule CSP GES sistemleri, genellikle büyük kurulu güçlü (MW seviyesi) olurken çanak/Stirling CSP GES sistemleri daha küçük kurulu güçlerde (kW seviyesi) olmaktadır. Bu sistem şebekeden bağımsız ada sistemlerinde de kullanılabilir. Bu sistemde konkav (içbükey) ayna merkezde bulunan alıcıya güneş ışığını yoğunlaştırmaktadır. Bu alıcı

içerisinde bulunan Stirling makinası ısıyı kinetik enerjiye çevirerek (içten yanmalı motor) jeneratör yoluyla elektrik üretmektedir. Bazı prototip çanak/Stirling sistemler İspanya, Amerika ve Suudi Arabistan'da monte edilerek çalıştırılmıştır. Maliyet bakımından diğer iki sistemden daha pahalıdır (Şekil 5.58).



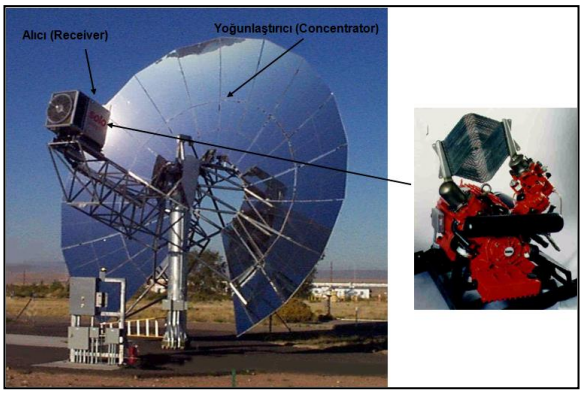
Şekil 5.58. Çanak/Stirling CSP GES basitleştirilmiş diyagramı.

Çanak/Stirling sistem CSP GES'leri, kule ve oluk sistem CSP GES'lerden ayıran en önemli fark, küçük ölçek ve bağımsız modüllerin olmasıdır. Diğer 2 tür CSP GES'te daha çok merkezi bir yoğunlaştırma ve üretim bulunmaktadır. Çanak CSP GES'lerde parabolik yansıtıcı, alıcı ve enerji çevrim ünitesi bulunmaktadır.



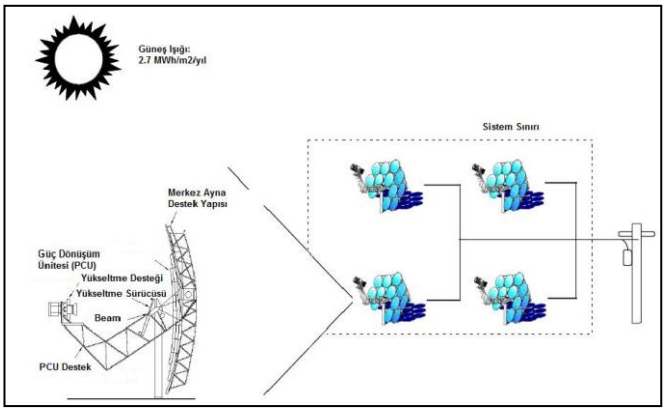
Şekil 5.59. Çanak/Stirling CSP GES basitleştirilmiş diyagramı.

Çanak/Stirling sisteminde alıcı ve enerji üreten makina doğrudan temasta olup tek bir ünite gibi davranmaktadır. Bu sistem, aynı zamanda enerji dönüşüm ünitesi (power conversion unit, PCU) olarak adlandırılmaktadır. Yansıtıcı ve PCU pozisyonlarını birbirlerine göre sabitlediklerinden güneşi takip ederler. Bu tasarımın en klasik sistemi, Stirling makinası olduğundan genellikle çanak/Stirling (dish/Stirling) olarak adlandırılmaktadır. PCU ünitesinin tasarımı aşağıda görülmektedir. Burada yoğunlaştırılmış güneş ışığı alıcı yüzeye çarpan akışkanın buharlaştırılmasına neden olmaktadır. Bu tasarımda sodyum buharı kullanılmıştır. Buhar, Stirling makinasına verilir ve burada işlevini görerek tekrar yoğunlaşır. Sıvı formunda sodyum alıcıya tekrar döner ve bu çevrim böylelikle devam eder (Şekil 5.60).



Şekil 5.60. Çanak/Stirling CSP GES.

Çanak/makina sistemleri (dish/engine systems), güneş radyasyonundan aldığı termal enerjiyi önce mekanik enerjiye daha sonra da elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. Geleneksel termik santral konseptine çok benzerdir. Şekil 5.61 ile görüldüğü gibi, bu sistemler aynalar serisinde oluşmakta ve alıcıya gelen güneş radyasyonunu yansıtmaktadır. Bunun için bu sistemlerin çift eksenli olmaları gerekmektedir. Yoğunlaştırılan güneş radyasyonu alıcı tarafından absorbe edilerek (emilerek) makinaya transfer edilir. Şekilde 5 adet 25 kW ünite görülmektedir. Çanak/makina sistemlerinin, yüksek verimlilik, modülarite, bağımsız işletme ve hibrid kapasite gibi bazı özellikleri bulunmaktadır. Diğer CSP teknolojileri ile kıyaslandığında en yüksek güneşten elektrik üretim verimine sahiptir (%30 civarında). Modülarite imkanının olması, uzak bölgelere de kurulumunu kolaylaştırmaktadır. Çanak/makina sisteminde bulunan makina, ısıyı mekanik enerjiye çevirmektedir. Tipik bir termik santralda kullanılan makina ile aynı özelliklere sahiptir. Bu mekanik enerji de jeneratör tarafından elektrik enerjisine çevrilmektedir. Bazı termodinamik çevrim süreçleri bu sistemde yer almaktadır. Bunlar Rankine çevrimi, Brayton (açık ve kapalı) ve Stirling çevrimleridir. Stirling ve Brayton çevrimleri sıkça kullanılmaktadır.

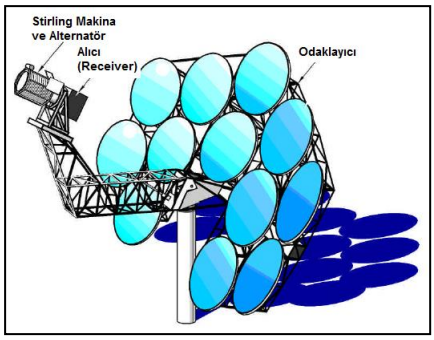


Şekil 5.61. Çanak/makina CSP GES sistemi.

Bu sistemler, yüksek verimlilik, modülerlik, otonom işletme gibi birçok avantajı da içinde barındırmaktadır. CSP GES'ler içerisinde çanak CSP GES'ler %30 civarındaki kapasite faktörü ile en yüksek verime sahiptir. Sistemin modüler olması uzak bölgelerde kurulumunu kolay hale getirmektedir.

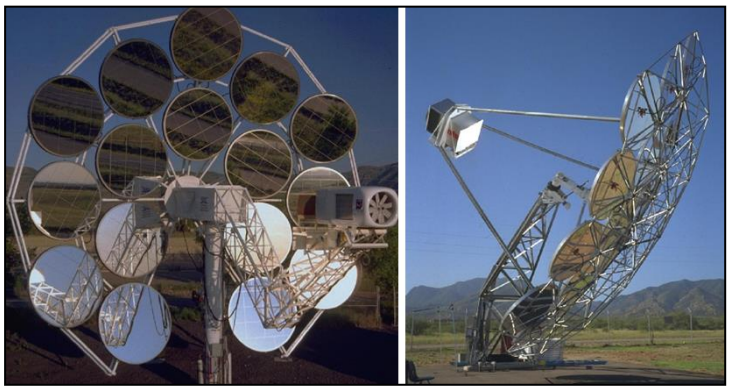
Yoğunlaştırıcılar

Çanak tipi CSP GES'lerde güneş kollektörleri, güneşi çift eksenli takip ederek çalışırlar. Metalle güçlendirilmiş cam veya plastik yansıtıcı yüzey, gelen güneş radyasyonunu odağa doğru yansıtmaktadır. Güneş yoğunlaştırıcının boyutu makina tarafından belirlenmektedir. Örneğin 100 W/m^2 güneş radyasyonunda 25 kW çanak/Stirling sistemi için 10 m çaplı yoğunlaştırıcı gerekmektedir. Yoğunlaştırıcılar aliminyum veya gümüş yansıtıcı yüzey kullanmaktadırlar. En dayanıklı yansıtıcı yüzeyler gümüş veya cam aynalardır. Yansıtıcı olarak polimer film kullanımı pek başarılı olmamıştır. En ideal yoğunlaştırıcı geometrisi ise paraboloid olmuştur. Aşağıdaki Şekil 5.62'te görülen çanak/Stirling sistemi bu tasarımı kullanmıştır.

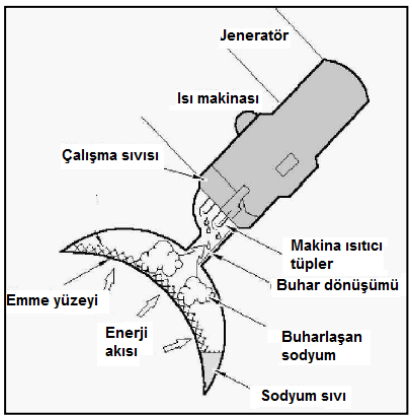


Şekil 5.62. Çanak/Stirling sistemi.

Bu tasarım daha çok Amerika'da kullanılmıştır. SOLO 161 marka ve Ft. Huachuca, Arizona'da çalışan bir çanak/Stirling Şekil 5.63 ile görülmektedir.


Şekil 5.63. Ft. Huachuca'da (Arizona) çalışan bir çanak/Stirling CSP.

Alıcılar (Receivers)
Alıcı yansıtıcı tarafından yansıtılan enerjiyi akışkana transfer etmektedir. Şekil 5.64 ile alıcının şeması görülmektedir.

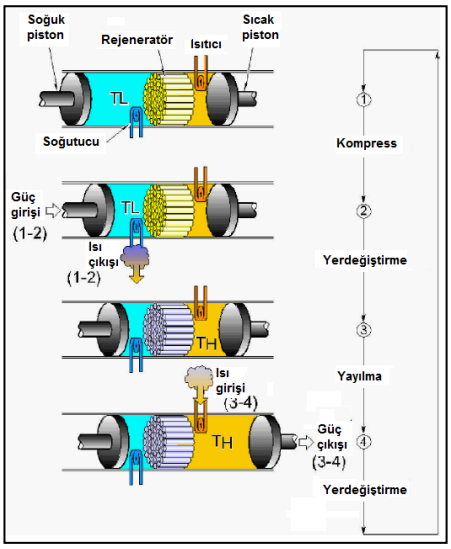


Şekil 5.64. Alıcı (receiver).

Makinalar (Engines)
Çanak/makina sistemindeki makina, geleneksel makinalar gibi çalışmakta olup ısı enerjisini mekanik enerjiye çevirmektedir. Bu mekanik enerji ise, elektrik enerjisine jeneratör ile çevrilmektedir. Çeşitli termodinamik süreçler çanak/makina sisteminde meydana gelmektedir. Bunların arasında Rankine çevrimi, Brayton süreci ve Stirling çevrimi de bulunmaktadır. Günümüzde kullanılan çanak/makina sisteminden çanak/Stirling 25 kW; Brayton sisteminde de 30 kW çıkış elde edilebilmektedir. Çanak/Brayton sistemi daha az gelişmiş bir sistemdir.

Stirling Çevrimi (Stirling Cycles)
Stirling çevrimi, Çanak/Stirling sisteminde kullanılmakta olup yüksek sıcaklık, yüksek basınç koşullarında ve hidrojen veya helyum çalışma gazlarını kullanan bir sistemdir. Gaz çalışma sıcaklığı

700 °C civarındadır. Aşağıda verilen Şekil 5.66 Stirling çevriminin çalışmasını göstermektedir. Çanak/makina sisteminde kullanılan Stirling çevrimi, yüksek sıcaklık ve basınçta çalışan hidrojen veya helyum gazları ile çalışmaktadır. Gaz sıcaklığı 700 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Stirling çevriminde, çalışma gaz sabit hacimde ısıtılıp daha sonra soğutulmaktadır. Stirling makinalarında ısıyı sabit hacimde soğuturken verimi artıran rejeneratör bulunmaktadır. Şekil 5.65, Stirling çevriminin dört temel sürecini göstermektedir. Sabit sıcaklık ve hacimde gerçekleşen süreçte bazı mekanik konfigürasyonlar yer almaktadır. Ana elemanlar piston ve silindirden oluşmaktadır. Stirling makinalarının termal elektrik dönüşüm verimi %40 civarındadır.

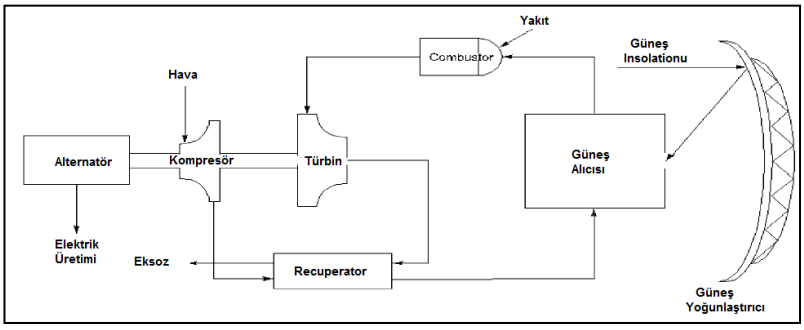


Şekil 5.65. Stirling çevrimi.

İyi bir Stirling çevrimi, %40 civarında verime sahiptir. Şimdilerde Stirling makinalarında birkaç firma üretiminde bulunmaktadır. Bunlar arasında SOLO 161, Kockums ve Stirling Thermal Motors (STM) firmaları ile akla gelenlerdendir. Solo 161 Almanya'da kojenerasyon tesisleri için; Kockums İsveç Deniz Kuvvetleri Komutanlığı'na ait denizaltılar için STM ise hibrid araçlar için geliştirilen ve çanak/makina CSP GES'lerde de kullanılan teknolojilerdir.

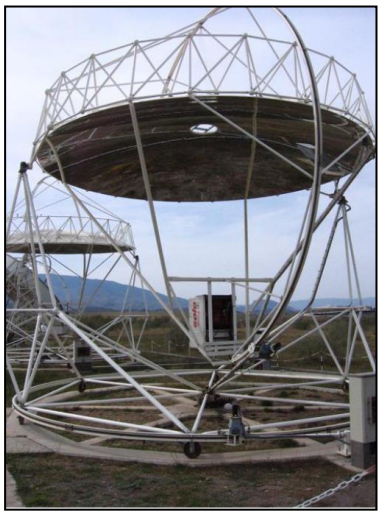
Brayton Çevrimi

Brayton makinası, aynı zamanda jet motoru, gaz türbini olarak da bilinir. Bu tip makinalar yakıtın yanması ile elektrik üretir. Brayton çevriminde (OTTO ve Diesel çevriminde olduğu gibi) hava sıkıştırılarak yakıt eklenir ve bu karışım yakılır. Çanak/Brayton sisteminde güneş radyasyonu yakıtın yerini almaktadır. Gaz türbininde yakıt sürekli olduğundan yanma da süreklilik arz etmektedir. Şekil 5.66 ile Çanak/Stirling sisteminin şeması görülmektedir. Aynı zamanda jet makinası (jet engine), yanma makinası veya gaz türbini olarak da adlandırılan Brayton çevrimi, içsel yanmalı, yakıt eklenip yanma ile havanın sıkıştırılması sonucunda çalışmaktadır. Otto ve Diesel çevrimine göre çalışan makinalarda olduğu gibi, Brayton çevriminde de hava sıkıştırılır, yakıt eklenir ve bu karışım yakılır. Çanak/Brayton sisteminde güneş enerjisi bu yakıtın yerini almaktadır. Bu sürecin sonunda oluşan sıcak gaz, hızlı bir şekilde genişleyerek güç üretilmektedir. Gaz türbininde yanma süreklidir ve genişleyen gaz türbini çevirmektedir.



Şekil 5.66. Çanak/Brayton Sistemi.

Türbinin iç kısmında sıcaklık 850 °C'yi bulabilmekte ve termal/elektrik çevriminin verimi %30 civarındadır. Bu sistemde türbin iç sıcaklığı 850 °C'ye kadar çıkabilmekte ve termal-elektrik dönüşüm verimi %30 civarındadır. Bu sistemi üreten firmalara örnek olarak Allied Signal, Williams International, Capstone Turbines Corp verilebilir.



Şekil 5.67. Parabolik çanak/Stirling.

İspanya Almeria'da bulunan PSA CSP Test Merkezindeki çanak/Stirling sistemine ait bazı özellikler aşağıda görülmektedir:

Yoğunlaştırıcı çapı : 8.5 m
Yoğunlaştırma alanı : 56.6 m²
Odak uzaklığı : 4.5 m
Ortalama odaklama oranı : 2500
Kurulu güç : 9 kW
Yansıtıcılık oranı : % 94
Çalışma gazı : Helyum
Gaz basıncı : 20-1150 bar
Maksimum çalışma rüzgar hızı: 65 km/h

Çanak sistemleri, geniş bir parabolik ünite olabileceği gibi, küçük üniteler halinde de olabilmektedir. CSP GES'lerdeki en yüksek verim %31.5 ile Çanak Stirling sisteminden elde edilmiştir. Bu verim, Ocak 2008'de New Mexico'da Sandia Laboratuarı ve Stirling Energy Systems ortak projesinde olmuştur. Stirling makinasının çevirim verimlilik oranı %30-40 civarındadır ve yoğunlaştırma faktörü de 200-2000 kat arasında değişmektedir. Çanak CSP GES konseptinin en büyük avantajı modüler ve küçük kurulu güçlere izin verebilmesidir. Her bir modülün kurulu gücü 15-70 kW arasında değişmektedir. Bu sistemin en büyük dezavantajı ise, maliyetin daha yüksek olması ve termal depolamanın fizibl olmamasıdır. Bu yüzden çanak/Stirling sistemler, şimdiye kadar 10 MW'ın altında yapılmış olup, henüz diğer CSP GES Sistemleri kadar ticari olamamıştır.

5.5 CSP Maliyetleri

Dünyada yaklaşık 800 MW'a yaklaşan CSP maliyetleri göz önüne alındığında gittikçe azalan bir trend olduğu gözlemlenmektedir. 2000 MW'a yakın bir kurulu güçte inşa halindedir. The Global Concentrated Solar Power Industry Report sonuçlarına göre büyük kurulu güçlü (örneğin 400 MW) CSP GES projelerinde 8 USDc/kWh civarında bir tarifenin yeteceği belirtilmiştir. 50 MW kurulu güçlü CSP GES için de 11 USDc/kWh civarında yeteceği belirtilmiştir.

5.6 Dünyadaki Bazı CSP Test Merkezleri

Bu bölümde bünyada bulunan bazı CSP test merkezleri tanıtılacaktır. Bu test merkezleri içerisinde en büyük ve en eski olanı İspanya'da bulunmaktadır. Test merkezlerinin bazıları yazarlar tarafından bizzat ziyaret edilmiştir. Konu ile ilgili olarak aşağıdaki CSP test merkezleri hakkında bilgi alınabilmiştir:

- İspanya Almeria'da bulunan Plataforma Solar de Almeria (PSA),

- Amarika'da bulunan "Sandia National Laboratories for the U.S. Department of Energy (DOE), the National Solar Thermal Test Facility (NSTTF)",
- Almanya Jülich'te bulunan Güneş Kule CSP Test Merkezi,
- Fransa'da bulunan THEMIS Güneş Kulesi CSP Test Merkezi,
- İsrail Sede Boder Ulusal Güneş Enerji Merkezi.

5.6.1 Plataforma Solar de Almeria (PSA)

Plataforma Solar de Almeria (PSA), İspanya'nın Almeria şehri yakınlarındaki Tabernas Çölü'nde 1972 yılında kurulmuş bir CSP test merkezidir. Yıllık 1900 kWh/m² insolation almakta ve 17 °C ortalama sıcaklığa sahip bir bölgededir. Resmi adı "Plataforma Solar de Almeria (PSA)" olup CSP teknolojisinde halihazırdaki Avrupa'daki en eski ve büyük araştırma merkezidir. PSA'daki ana tesisler;

- CESA-1 (7 MW) ve SSSP-CRS (7.2 MW) 2 adet güneş kule CSP sistemi,
- SSPS- DCS (1.2 MW) parabolik oluk CSP GES (termal depolama ve tuzlu su arıtma tesisi ile beraber),
- DISS (1.8 MW) test çevrim sistemi (iki fazlı akış ve elektrik üretim amaçlı direk buhar üretim tesisi),
- HTF test çevrimi (ısı transfer akışkanı için yağ çevrim ünitesi),
- FRESDEMO lineer Fresnel teknolojisi,
- 6 ünite DISTAL çanak/Stirling makinası,
- 60 kW güneş ocağı (solar furnace),
- Yüzey radyasyonu ölçümünde kullanılan meteoroloji istasyonu.

Aşağıdaki Şekil 5.68 ile PSA ve içinde bulunan sistemlerin planı görülmektedir.

Şekil 5.68. Plataforma Solar de Almeria (PSA).

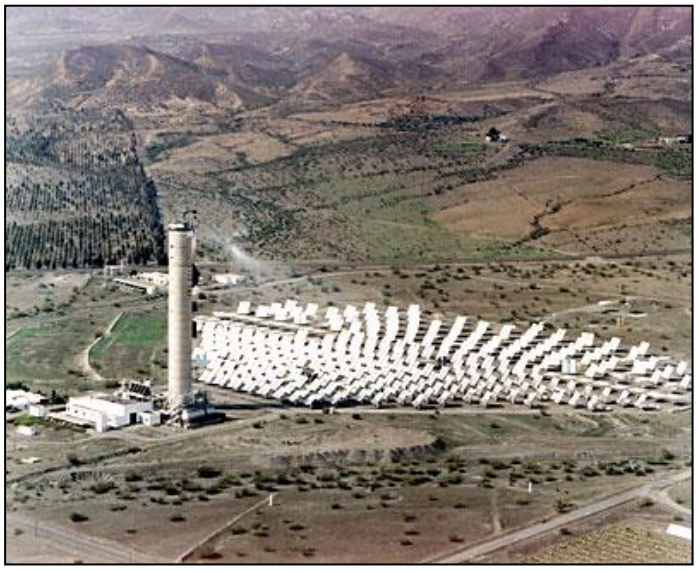
İlerleyen sayfalarda PSA test merkezinde bulunan sistemler detaylı olarak anlatılmaktadır.

CESA-1 ve CRS Merkezi Alıcı Sistemleri

CESA-1 ve CRS güneş kule (solar tower) tipi CSP GES'ler merkezi alıcılar (central receiver) ile birlikte çalışarak test edilmektedir. 7 MW CESA-1 projesi, Mayıs 1983 yılında İspanya Sanayi Bakanlığı'nın desteğiyle başlatılmış bir projedir. Merkezi alıcı sistemli güneş kule CSP GES'in teknolojisinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Merkeze yazarlar tarafından yapılan ziyaretin yapıldığı Elim 2009 tarihinde elektrik üretmemekte olup heliostat ve diğer sistemlerin test edilmesinde kullanılmaktadır. Testleri yapılan diğer sistemler, merkezi alıcı, termal depolama, gaz türbini, kontrol sistemi ve yoğunlaştırılmış güneş radyasyon akı ölçümleridir. Şekil 5.69 ile CESA-1 görülmektedir.

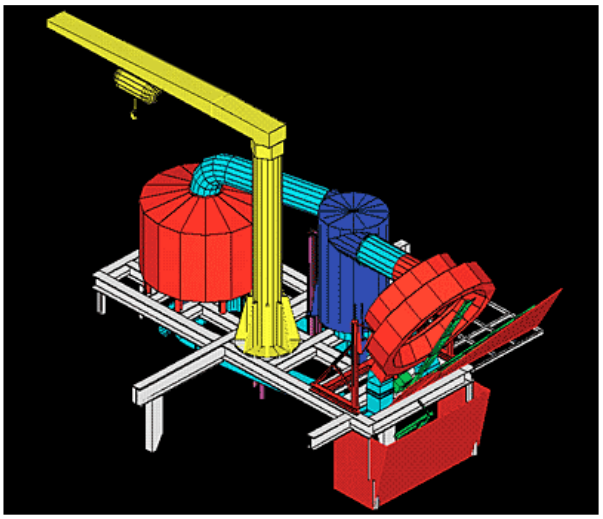
Şekil 5.69. CESA-1 CSP GES.

CESA-1 CSP GES'e ait havadan çekilmiş fotoğrafı ise Şekil 5.70 ile gösterilmiştir. Kullanılan kule, betondan yapılmıştır.



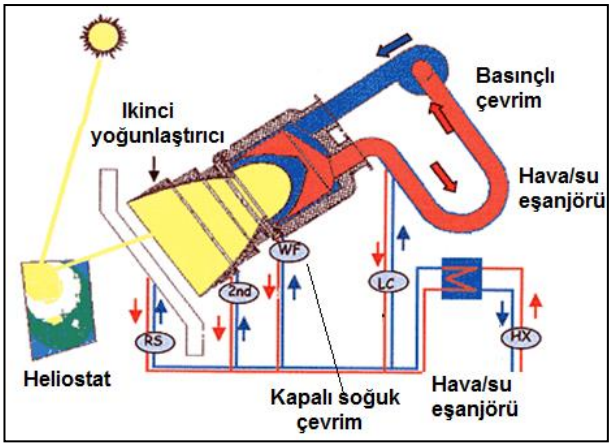
Şekil 5.70. CESA-1 CSP GES hava fotoğrafı.

Direk güneş radyasyonu, güneye doğru yönlenmiş 330 m x 250 m arazi üzerinde ve herbiri 40 m² olan 300 adet heliostat tarafından toplanmaktadır. Heliostatların %90 nominal yansıtma oranı bulunmaktadır. CESA-1 GES'te kullanılan heliostatlar, dünyadaki en fazla tecrübe edilen heliostatlardır. İlk kuşak heliostatlar, SENER ve CASA tarafından ikinci kuşak ise CIEMAT ve SOLUCAR tarafından geliştirilmiştir. 20 yıllık olmasına rağmen, sürekli yapılan bakım ve ayna değişimi sayesinde hala verimli bir şekilde çalışmaktadır. Alıcı yüzeyine (aperture) düşen radyasyonun maksimum termal üretimi 7 MW'tır. Tipik bir dizayn değeri olarak 950 W/m² güneş irradiyasyonunda 3.3 MW elde edilmektedir. 80 m yüksekliğe sahip güneş kulesi vardır ve 100 ton ağırlık taşıma kapasitesi bulunmaktadır. Kulenin tepesinde 5 ton kaldırma kapasiteli bir vinç bulunmaktadır. Güneş radyasyonunu, 16 sıra halinde dizilmiş olan 300 adet ve herbiri 39.6 m^2 alana sahip heliostatlar ile toplanmaktadır. CESA-1 güneş kule CSP GES'in 80 m de bulunan alıcı sistemin teknik resmi Şekil 5.71 ile verilmiştir.



Şekil 5.71. CESA-1 CSP GES alıcı teknik resmi.

Sistemin 60 m yükseklikteki basınçlı teknik resmi ise, aşağıda verilmiştir (Şekil 5.72).

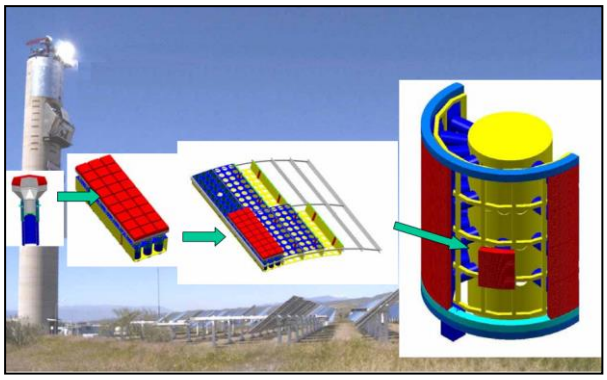


Şekil 5.72. CESA-1 CSP GES sistem genel teknik resmi.

CESA-1 kule CSP GES merkez alıcısının (central receiver) yakın fotoğrafı aşağıda verilmiştir (Şekil 5.73).

Şekil 5.73. CESA-1 kule CSP GES merkezi alıcı yakın fotoğrafı.

CESA-1 kule CSP GES merkez alıcısının (central receiver) kule kesiti Şekil 5.74 ile görülmektedir.



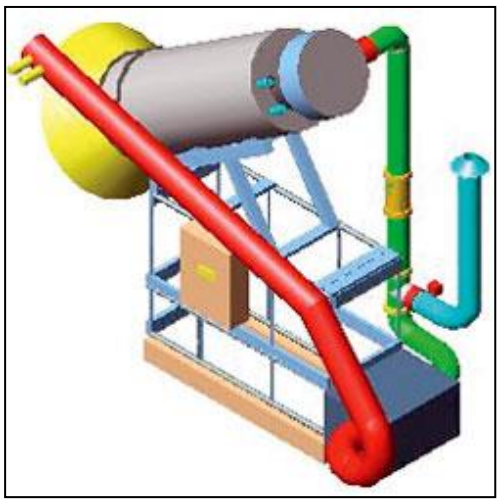
Şekil 5.74. CESA-1 kule CSP GES merkezi alıcı kule kesiti.

2.7 MW SSPS-CRS Tesisi

Eylül 1981 yılında Uluslararası Enerji Ajansı tarafından SSPS (Small Solar Power Systems) projesi başlatılmıştır. Sıvı sodyum ile soğuyan merkezi alıcı ile çalışmaktadır. Aynı zamanda termal depolama olarak da sıvı sodyum kullanılmaktadır. Kullanılan ilk heliostatlar Martin-Marietta, ikinci kuşak ise, MBB ve Asinel heliostatlar olmuştur. Nominal yansıtma oranı %87 civarındadır ve tipik olarak 950 W/m² güneş irradiyasyonunda 2.7 MW üretim yapılabilmektedir. 43 m yükseklikte metal kule kullanılmaktadır. Şekil 5.75 ile SPSS-CRS CSP'ye ait heliostatlar görülmektedir.

Şekil 5.75. SPSS-CRS heliostat sahası.

SPSS-CRS CSP GES volumetrik alıcısının teknik resmi aşağıda görülmektedir (Şekil 5.76).

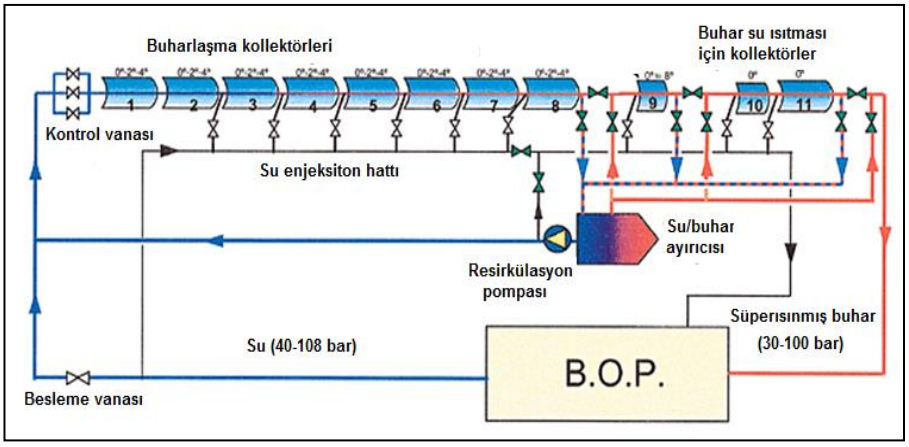


Şekil 5.76. SPSS-CRS güneş enerji kule CSP GES volumetrik alıcısı.

DISS Parabolik Oluk CSP GES

PSA test merkezinde parabolik oluk CSP GES olarak 2 adet GES bulunmaktadır. Bunlardan birisi DISS test santralıdır. 1998 yılından bu yana yüksek basınç ve sıcaklık (100 bar/400 °C) koşullarında parabolik oluk CSP GES test işletmesindedir.

DISS test sistemi, parabolik oluk kollektörler ve güç bloğu olmak üzere 2 alt sistemden oluşmuştur. Güneş sahasında su önceden ısıtılır, buharlaştırılır ve süper ısıtılarak buhar haline getirilir ve absorber tüp içinden geçerek (665 m uzunluğundan) 3838 m² yüzeyinde parabolik oluklardan geçer. Şekil 5.77 ile DISS çevriminin başitleştirilmiş akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.77. PSA DISS diyagramı.

PSA'da Avrupa'da ilk kurulan parabolik oluk CPS GES'ler bulunmaktadır. DISS test CSP, 1998 yılında işletmeye alınmıştır. DISS çevrimi, 2 alt sistemden oluşmaktadır. Birincisi, kollektörleri içeren güneş sahası; ikincisi de güç bloğu (power block).

LS-3 (HTF) Test Çevrimi

LS-3 test çevrimi, 1997 yılında işletmeye alınmıştır. Aynı zamanda HTF (heat transfer fluid) test çevrimi olarak adlandırılan bu tesis, parabolik oluk kollektör ekipmanlarının gerçek işletme sırasındaki davranışını anlayabilmek için kullanılmaktadır. Aynalar, absorber tüpler, güneşi izleyen sistem testleri monte edilerek bu sistem üzerinde testi yapılmaktadır (Şekil 5.78).

Şekil 5.78. LS-3 test çevrimi.

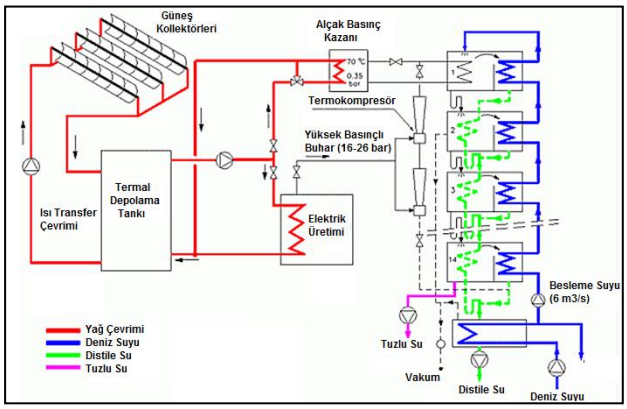
Bu test sistemi, 12 m uzunluğunda 5.7 m genişliğinde LS-3 parabolik oluk modüllerden oluşmaktadır. Kapalı çevrim içerisinde termal yağ sirküle edilmektedir. Maksimum 400 °C işletme sıcaklığına sahip Syltherm 800 termal yağı kullanılmıştır. Yağın diğer özellikleri ise;

- Çalışma sıcaklığı 16 bar,
- 1 m^3 kapasiteli yağ genişleme tankı,
- 40 kW, 3 x 380 V elektrikli yağ ısıtıcısı,
- 0-2.8 lt/s akış oranlı yağ pompası.

SSPS-DCS Tuzlu Su Arıtma Sistemi (Desalination System)
1.2 MW kapasiteli tesiste 4 alt sistem bulunmaktadır. Tesisteki diğer üniteler:

- 10 paralel kolda 40 ACUREX 3001 güneş kollektörleri. Toplamda 2672 m^2 alanda ve doğu-batı yönünde eksenli olarak dizilmiştir. Maksimum çalışma sıcaklığı 300 °C olan Santotherm 55 yağ kullanılmıştır,
- 140 m^3 termoklin yağ tankında 5 MWht termal depolama kapasitesi bulunmaktadır,
- 500kW su/buhar Rankine çevrim elektrik üretim sistemi bulunmaktadır,
- SOL-14 olarak adlandırılan bir MED tuzlu su arıtma ünitesi bulunmaktadır.

Şekil 5.79 ile bu tesisin diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.79. SSPS-DCS tesis genel diyagramı.

SOL-14 tesisine ait bazı özellikler aşağıda verilmiştir. Şekil 5.80 ile tesis görülmektedir.

Kapasite	: 3 m^3/s
Elektrik tüketimi	: 3 kWh/m^3
Güneş sahası kapasitesi	:1.2 MW
Güneş saha performansı	: %50
Kollektör alanı	: 2672 m^2
Maksimum yağ sıcaklığı	: 300 °C

Şekil 5.80. SOL-14 tesisi.

Isı Transfer Akışkanı (Heat Transfer Fluid, HTF) Çevrimi
1997 yılında LS-3 (Luz System-3) kollektör modeline göre HTF test çevrimi montajı yapılmıştır. Bu test, gerçek koşullarda parabolik oluk kollektörlerin testi için yapılmaktadır. Aynalar, absorber tüpler, güneşi izleme sistemi ve diğer gerekebilecek sistemlerin testleri yapılmaktadır. HTF test ünitesi aşağıda Şekil 5.81 ile görülmektedir. Bu sistem, kapalı çevrim yağın güneş toplama ünitesine bağlıdır. 12 m

uzunluğunda ve 5.7 m genişliğinde 247 m² toplama yüzeyine sahip LS-3 parabolik oluk modüllerden oluşmuştur. Kullanılan termal yağ (Syltherm 800), -40 °C donma noktası ve maksimum 420 °C çalışma sıcaklığına sahiptir.

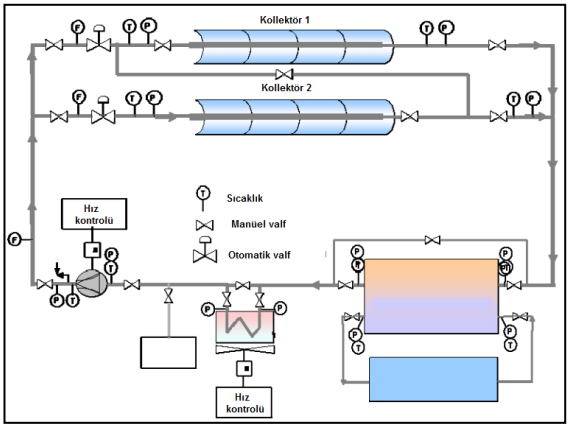
Şekil 5.81. HTF test ünitesi.

16 bar maksimum çalışma basıncına sahiptir. Diğer özellikleri:

- 1 m³ kapasiteli yağ genişleme tankı,
- 40 kW, 3x380V elektrikli yağ ısıtıcısı,
- Mekanik yağ soğutucu sistemi,
- Daha sonraları Euro Trough marka kollektörler inşa edilmiştir.

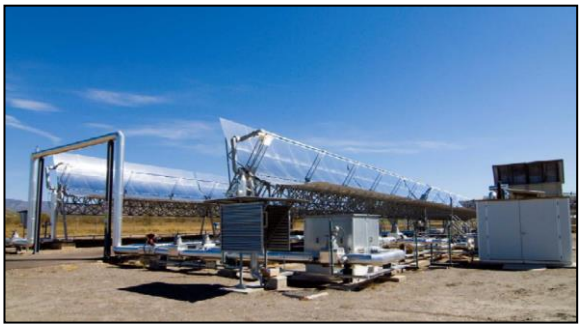
Yeni Akışkan Test Çevrimi

Innovative Fluids Test Loop olarak adlandırılan bu test çevriminde maliyetin düşürülerek verimin artırılabilmesi için yeni ısı transfer akışkanı bulmak gerekmektedir. Şimdiye kadar termal yağ, su/buhar ve erimiş tuz kullanılmıştır. Fakat yeni bazı ısı transfer akışkanlarının da denenmesi gerekmektedir. Şekil 5.82 ile bu test ünitesinin basitleştirilmiş diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.82. Isı transfer akışkanı test ünitesi.

Yukarıdaki sistemin fotoğrafı ise, Şekil 5.83'te görülmektedir.



Şekil 5.83. Isı transfer akışkanı test ünitesi.

100 bar basınçta 400 °C sıcaklığa kadar çalışabilen bu ünitenin diğer özellikleri:

- Doğu yönünde uzanmış Euro Trough parabolik oluklar, herbiri 50 m uzunluğunda ve 274 m² toplama yüzeyine sahip,
- 400 kW hava soğutma,
- Sıcaklık, akış oranı, irradiyasyon ve nemi kontrol eden sistem,
- Otomatik kontrol vanaları bulunmaktadır.

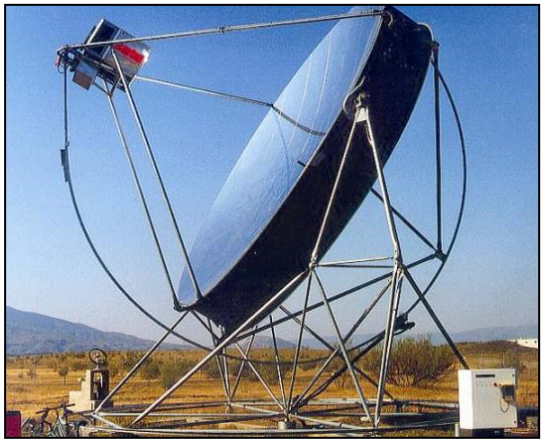
FRESDEMO Çevrimi

Fresdemo çevrimi, lineer Fresnel teknolojisinin test edilmesi amacı için yapılmaktadır. MAN Ferrostaal (Alman) şirketine ait bu tesiste çeşitli test ve değerlendirmeler yapılmaktadır. 100 m uzunluğunda ve 21 m enindeki modüllerin yüzey alanı 1433 m² dir. 9 Temmuz 2007 tarihinde işletmeye açılmıştır (Şekil 5.84).

Şekil 5.84. Lineer Fresnel test sistemi.

Çanak/Stirling Sistemi: DISTAL ve EURODISH

PSA test merkezinde Çanak/Stirling (Dish/Stirling) ile ilgili de çalışmalar bulunmaktadır. DISTAL adı verilen proje kapsamında 1996 yılında çalışmalara başlanmıştır. 8.5 m çapında çanak sistemde 50 kW kurulu gücünde motor bulunmaktadır. 4.1 m odak mesafesi olup odaklama oranı 16000'i bulabilmektedir. Şekil 5.85 ile DISTAL ünitesi görülmektedir. Kullanılan Stirling motor 10 kW çıkış yamaktadır. SOLO V161 marka olan motor ile çalışan sistem, güneşi takip etmektedir. 1992 yılından bu yana işletmededir.



Şekil 5.85. DISTAL ünitesi.

Çanak/Stirling sistemi için ikinci girişim de İspanyol-Alman ortak projesi olan EURODISH projesidir. Şekil 5.86 ile bu sistem görülmektedir. 2000 yılından bu yana çalışmaktadır.

Şekil 5.86. EURODISH ünitesi.

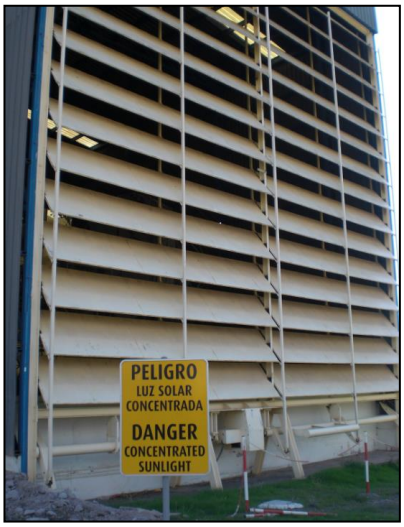
Çanak/Stirling sistemi, yoğunlaştırıcı (concentrator) ve alıcıdan (receiver) oluşmuştur. Alıcı, dışarıda bulunan ve içten yanmalı olan bir motordur. Bu sistemin diğer özellikleri:

- Yanma dışarıda olduğundan gelen güneş enerjisi, yoğunlaştırıcı tarafından odak noktasına doğru yansıtılır,
- Yüksek performanslı bir termodinamik çevrimdir.

PSA'da bulunan ve testleri yapılan tüm dish/Stirling sistemler, Şekil 5.87 ile görülmektedir.

Şekil 5.87. PSA'daki dish/Stirling üniteleri.

Güneş Ocağı (Solar Furnace)
Güneş ocağı sistemi henüz ticari olamamış sadece PSA test merkezinde üzerinde çalışılan bir sistemdir. Giriş kapısı Şekil 5.88 ile görülmektedir.

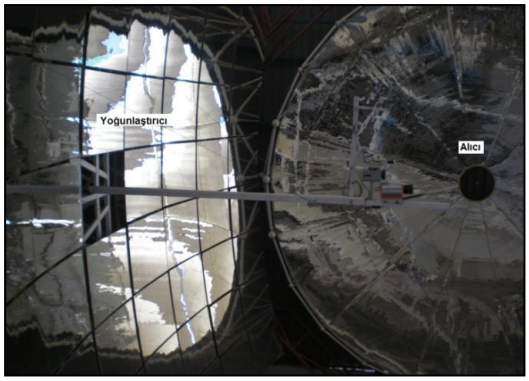


Şekil 5.88. PSA'daki güneş ocağı kapısı.

Güneşi izleyen sistem, düz heliostatlar, parabolik odaklayıcı aynadan oluşmaktadır. PSA'da bulunan güneş ocağında 2 ayrı seviyede bulunan 4 heliostat bulunmaktadır. Güneş ocağının ana maddesi yoğunlaştırıcı disktir (concentrator disc). Heliostattan gelen ışığın radyant enerjisini çoğaltarak odak bölgesine göndermektedir (Şekil 5.89).

Şekil 5.89. Güneş ocağı.

Güneş ocağı, güneş yoğunlaştırıcı sistemler içerisinde güneş ışığını 10000 kata kadar yoğunlaştırabildiğinden; en yüksek enerji yoğunlaştırabilen sistemdir. Bu sistem, güneşi izleyen düz heliostat, parabolik yoğunlaştırıcı aynadan oluşmaktadır. Düz heliostat, güneş ışığını parabolik çanağa doğru yönlendirmektedir (Şekil 5.90). Heliostattan gelen ışığı odak bölgesine yoğunlaştırmaktadır. 98.5 m^2 toplam yüzeye sahip %92 yansıtıcılık oranına sahiptir. Odak nokta uzaklığı 7.45 m dir.



Şekil 5.90. Güneş ocağının çalışması.

Bu sistemden yoğunlaştırılarak 3 cm kalınlığındaki bir çelik levhayı deldikten sonra fotoğrafı Şekil 5.91 ile görülmektedir.

Şekil 5.91. Güneş ışığının çeliği delmesi.

5.6.2 Sandia Ulusal Laboratuvarı (Ulusal CSP Test Merkezi-NSTTF)

Amerikan Enerji Bakanlığı'na bağlı Sandia Ulusal Laboratuvarına (Sandia National Laboratories, National Solar Thermal Test Facility-NSTTF) Ulusal CSP Test Merkezi, New Mexico Eyaleti Albuquerque'de yer almaktadır. Şekil 5.92 ile genel görünümü verilmiştir.

Şekil 5.92. Sandia Laboratuvarı Ulusal CSP Test Merkezi.

Kule CSP ve çanak/Stirling CSP'lerin test santralları bulunmaktadır. ABD Enerji Bakanlığı Sandia Ulusal Laboratuvarı tarafından işletilmekte olup, ABD'deki tek CSP test merkezidir. Temel amacı, büyük kurulu güçlü CSP GES'lerin mühendislik, teknik ve tasarım konularında ar-ge çalışmaları yapmaktır. Bazı üniversite, eyalet, yatırımcı ve mühendislik şirketleri, çeşitli anlaşmalar ile bu tesisi kullanabilmektedir.

Merkezi Alıcı Test Ünitesi (Güneş Kulesi-Solar Tower)

NSTFF'deki en büyük tesis olma özelliğini taşımaktadır. Bu teknolojinin ileride ticari olarak diğer enerji kaynakları ile rekabet edebileceği düşünülmektedir. Aşağıdaki temel özelliklere sahiptir:

- Kurulu gücü 5 MW,
- Pik akış 260 W/cm^2,
- Yoğunlaştırma alanı 2800 m^2,
- Termal akı kontrolü zamana bağımlıdır.

Şekil 5.93 ile merkez alıcı sistem görülmektedir.

Şekil 5.93. Merkezi alıcı sistem.

Aynı merkezde çanak/Stirling sistem CSP teknolojilerinde çalışmaları sürmektedir.

5.6.3 Jülich CSP Test Merkezi

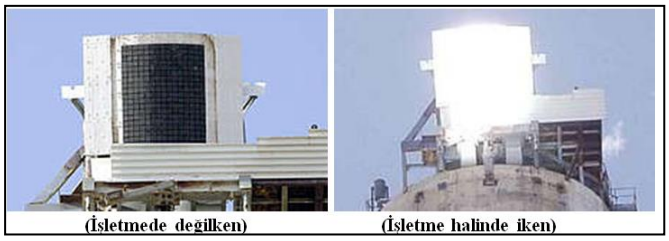
Almanya'nın Jülich kasabasında (Aachen Şehri yakınlarında) 2005 yılında Jülich Belediyesi ve German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt-DLR) tarafından başlatılan bir proje ile Kraftanlagen München (KAM) tarafından yapılan fizibilite sonucu, 1.5 MW kurulu gücünde güneş kule CSP GES projesi hayata geçirilmiştir. 20 Ağustos 2009 yılında işletmeye alınmıştır (Şekil 5.94).

Şekil 5.94. Güneş kule CSP GES inşaatı.

Toplam 18 000 m^2 alanda kurulmuştur (Şekil 5.95).

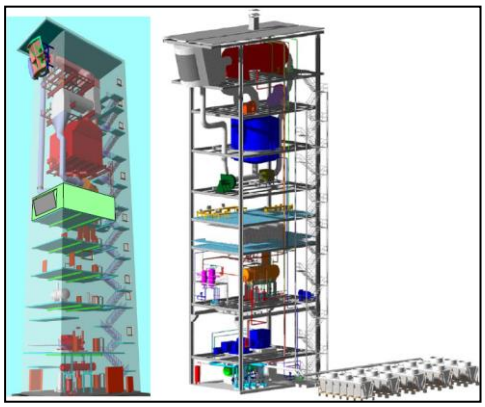
Şekil 5.95. Jülich güneş kule CSP GES.

Kule yüksekliği 60 m olup, alıcı sıcaklığı 700 °C dir (Şekil 5.96).



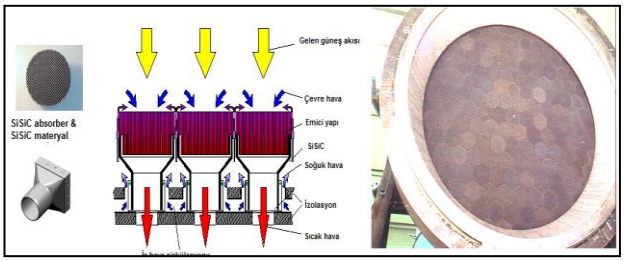
Şekil 5.96. Jülich güneş kule CSP GES.

Merkezi alıcıya ait sistemin diyagramı Şekil 5.97 ile görülmektedir.



Şekil 5.97. Jülich güneş kule CSP GES'e ait merkezi alıcı.

Güneş alıcısının yakın plan diyagramı Şekil 5.98 ile görülmektedir.



Şekil 5.98. Merkezi alıcı yakın fotoğrafı.

5.6.4 THEMIS Güneş Kulesi CSP Test Merkezi

THEMIS güneş kule CSP GES test merkezi, Fransa Targassone Köyü yakınlarında bulunmaktadır. 2 MW kurulu gücünde ve 1983 yılında kurulmuş olup toplam 201 adet heliostat kullanılmıştır. Kulenin yüksekliği 100 m dir. Depolama olarak erimiş tuz kullanılmaktadır. Tuzun içeriği ise, %53 potasyum nitrat, %40 sodyum nitrat ve %7 sodyumdur. Soğuk tankın sıcaklığı 250 °C, sıcak tankın sıcaklığı ise 450 °C dir. Jeneratöre gelen buhar basıncı 50 bar, sıcaklığı ise 430 °C dir. İlk THEMIS GES, 1979 yılında inşaata başlamış olup politik ve finansal destekten yoksun olmasından dolayı inşaat uzun sürmüştür. 1983-1986 yıllarında Electricite de France tarafından işletilmiştir ve 45 milyon EURO'ya mal olmuştur. Daha sonra tesis, 20 yıl kadar terk edilmiştir. 2004 yılında tekrar rehabilite edilerek çalışır hale getirilmiştir. 201 adet güneşi izleyen heliostat (her birinin alanı 53.70 m^2) toplamda 11800 m^2 alan kaplamaktadır (Şekil 5.99).

Şekil 5.99. Themis CSP GES.

5.7 İşletmedeki Bazı CSP GESlere Ait Bazı bilgiler

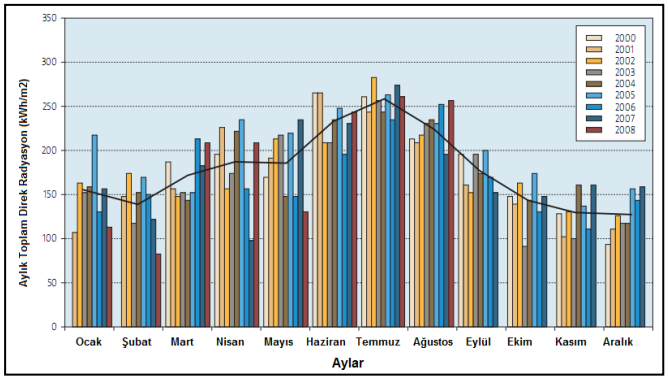
Bu bölümde dünyada işletmede bulunan bazı CSP GES'lere ait aktüel bilgiler verilecektir. Alınan bilgiler, internetten ve sahaya yapılan ziyaretler sonucunda alınan bilgiler derlenerek verilmiştir. CSP'ler ile ilgili olarak internet ve diğer kaynaklarda çok çeşitli ve çelişkili bilgiler bulunduğundan dolayı bu bölümün konulması uygun görülmüştür. Ülkemize yakınlığı ve projenin yeni olması nedeni olması açısından özellikle İspanya Andasol projesi incelenmiştir.

5.7.1 Andasol CSP GES'ler

İspanya Granada bölgesinde bulunan Andasol CSP GES'ler Andasol-1, Andasol-2 ve Andasol-3 projeleri olmak üzere 3 safhaya ayrılmıştır. İspanya'nın Andalucia bölgesinde Granada şehri yakınlarında Guardia Platosu içerisinde ve Alderie Belediye sınırları içerisinde bulunmaktadır (Şekil 5.100). Almeria şehrinden A92 otoyolu takip edildiğinde Guadiz yönündedir. Denizden yüksekliği 1100 m civarındadır. İlk yapılan proje Andasol 1'dir. 50 MW kurulu gücünde olup yaklaşık 600000 kişinin elektrik ihtiyacı karşılanacak olup 450000 ton CO_2 emisyonu doğaya verilmeyecektir.

Şekil 5.100. Andasol 1-3 CSP GES sahası uzaktan görünüşü.

Andasol projesinin güneş radyasyonu, Alman Meteoroloji İşleri (German Meteorology Service, DLR) tarafından ölçülmüştür ve 1'er dakika aralıklı ortalamalar alınarak kayıt tutulmuştur. Ayrıca DLR tarafından 1983 ile 2001 arasındaki uydu verileri de kullanılmıştır. Sahadaki ölçümler ise, Mart 2000'den bu yana devam etmektedir. Uydu verisi ve saha verisi ile yapılan çalışmalarda yıllık 2144 kWh/m^2 DNI (Direct Normal Irradiation) bulunmuştur. Saha verisinin aylık değişiminin 2000-2008 yılları arasındaki değişimi Şekil 5.101 ile görülmektedir.



Şekil 5.101. Andasol proje saha ölçüm verileri.

İzleyen sayfalarda Andasol CSP GES santral verileri verilmiştir.

<u>Güneş Sahası Verileri</u>

Kullanılan parabolic teknoloji	: Skal-ET
Güneş sahası alanı	: 510120 m^2
Parabolik ayna sayısı	: 209664
Parabolik ayna sıra sayısı	: 312
Alıcı (absorber tube) sayısı	: 22464 (her biri 4 m uzunluğunda)
Kullanılan güneş sensor sayısı	: 624
Yıllık güneş radyasyonu (DNI)	: 2135 kWh/m^2
Güneş sahası verimi	: %70 pik; %50 ortalama
Termal depolama kapasitesi	: 7.5 saat (28500 ton tuz)

<u>Santral Verileri</u>

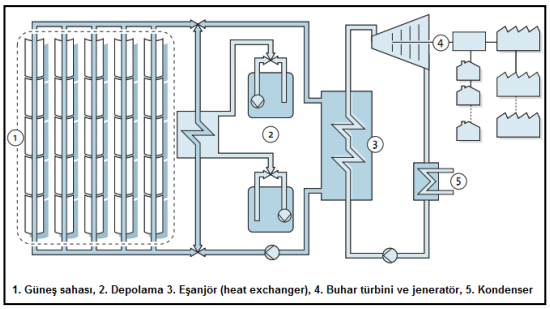
Kurulu güç	: 50 MW
Yıllık işletme saati	: 3500 saat
Yıllık elektrik üretimi	: 180 GWh
Santral ömrü	: 40 yıl

<u>Su Verileri</u>

Su kaynağı	: Sierra Nevada Dağları
Yıllık su ihtiyacı	: 870000 m^3

Andasol CSP GES projesinde kullanılan suyun büyük bir kısmı buhar çevriminin soğutulmasında kullanılmaktadır ve sahada açılan kuyulardan tedarik edilmektedir.

Andasol 1 CSP GES projesinde alan 195 hektar (1300 m x 1500 m) olup kuzey-güney ekseni yönünde uzanmıştır. Güneş ışığı alıcıda 80 kat yoğunlaştırılmaktadır. Boruların içerisinden geçen ısı transfer akışkanı 400 °C GES içerisinde dolaşmaktadır. Şekil 5.102 ile Andasol 1 CSP GES diyagramı görülmektedir.

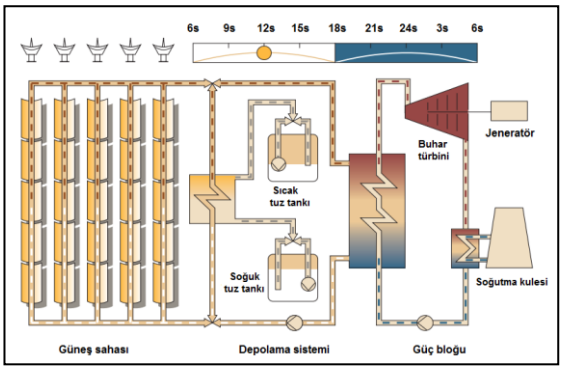


Şekil 5.102. Andasol CSP GES proje saha dizaynı.

Andasol 1 CSP GES'in güneş sahası (solar field) 510120 m^2 olup 312 sıra halinde uzanan borulardan tasarlanmıştır. Borular kuzey-güney yönünde uzanmış olup herbir ünitenin kendi güneş sensörü ve hidrolik sürücüleri bulunmaktadır. Bunlar, kollektörlerin güneşi takip etmesini de (tracking) sağlamaktadır. Herbir kollektör ünitesinde 12 adet kollektör bulunmaktadır. Boyutları 6 m (en) ve 12 m (boy) olmaktadır. Her kollektörde 28 adet ayna ve 3 absorber tüp bulunmaktadır. Andasol CSP GES'te 7488 kollektör bulunmaktadır (Şekil 5.103).

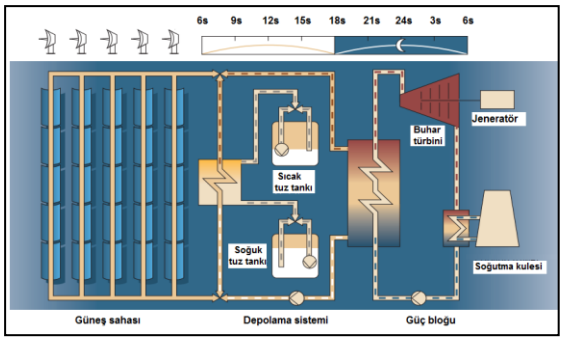
Şekil 5.103. Andasol CSP GES kollektörleri.

Andasol CSP GES projesi, termal depolama sistemine sahiptir. Üretilen ısının bir kısmı, buhar çevriminde değil de sıvı tuz içerisinde depolanmaktadır. Yaklaşık 28500 ton potasyum sodyum ve nitrat karışımı olan bu tuz kütlesi, gün boyunca ısıtılarak gece kullanılmak üzere biraz ısı depolamaktadır. 290 °C olan tuzun soğuk tank içerisindeki sıcaklığı, sıcak tank içerisinde 390 °C ye çıkarılmaktadır. GES dizaynı yapılırken 2 adet tank bulunmakta olup bunlar sıcak ve soğuk tanklardır. Güneş battıktan sonra 7.5 saat çalışabilmektedir. Gündüz depolanan termal enerji, Şekil 5.104 ile görüldüğü gibi biriktirilmektedir.



Şekil 5.104. Andasol CSP GES termal depolama sistem.

Gündüz depolanan termal enerji gece kullanılmaktadır (Şekil 5.105).



Şekil 5.105. Andasol CSP GES gece kullanımı.

Andasol projesinin gerçekleştiren Solar Millennium, California Mojave Desert'te bulunan 9 adet CSP GES (SEGS 1-9) projelerinden kazanılan tecrübelerden faydalanmıştır. Daha önce de değinilen 1984-1990 yılları arasında yapılan SEGS'lerin toplam kurulu gücü 354 MW olup, %99 emreamadeliğe sahiptir. Andasol CSP GES yaklaşık 195 hektar (2 km^2) üzerine kurulmuştur. 312 adet kollektör serisine sahip olup 510120 m^2 alanda kurulmuştur. Kullanılan absorber tüplerin uzunluğu 90 km dir. Kollektörlerin tasarımı, Solar Millennium firmasına ait ve Köln merkezli Flagsol GmbH tarafından yapılmıştır. Yapılan tasarım gereği, CSP GES 13.5 m/s (49 km/h) rüzgar hızında normal olarak çalışabilmektedir. Eğer rüzgar hızı bu değeri aşar ise, bazı kollektörler (özellikle dış kısımdakiler) rüzgar korumalı "sleep" pozisyonuna geçmektedir (Şekil 5.106). Rüzgar hızı 20 m/s üzerine çıktığında ise, işletme durmaktadır.

Şekil 5.106. Kollektörlerin aşırı rüzgardan "sleep" pozisyonu.

Andasol CSP GES'te kullanılan türbinler, MAN Turbo firmasına aittir ve termik santrallarda kullanılan türbinlere çok benzerdir. Absorber tüp ise, Andasol için özel üretilmiştir. Almanya Mainz merkezli Schott Solar AG ve İsrailli Solel Systems Ltd tarafından üretilmiştir. Parabolik aynalar, 4 mm kalınlığında gümüşle kaplı, kavisli beyaz camdan yapılmıştır. Gümüş kaplama içerisinde ek malzemesi bulunmaktadır. Almanya Furth-im-Wald merkezli Flabeg Grup tarafından üretilmiştir. %93 yansıtma verimine sahip olup RP-3 tip aynalar kullanılmıştır. RP-3 aynaları iç kısma monte edilen (2.79 m^2) ve dış kısma monte edilen (2.55 m^2) olmak üzere iki tip ayna kullanılmıştır. Toplamda 209664 adet ayna kullanılmıştır. Montajı yapılan her bir ayna çelik kaideye 4 noktadan tutturulmuştur.

Depolama Tankı

Andasol projesinde 2 adet (sıcak ve soğuk) depolama tankı kullanılmıştır. Gündüz elde edilen sıcaklık erimiş tuz içerisinde depolanmaktadır. Tuzun %60'ı sodyum nitrat ($NaNO_3$) ve %40'ı potasyum nitrattır (KNO_3). Her iki madde de gıda sanayinde gübre olarak da kullanılmaktadır. Soğuk tankın içerisindeki tuzun sıcaklığı 290 °C; sıcak tankın içerisindeki tuzun sıcaklığı 390 °C olup güneş battıktan sonra 7.5 saat CSP GES'i çalıştırabilmektedir. California Barstow'da bulunan Solar Two projesinde kullanılan erimiş tuz sistemi Andasol için örnek alınmıştır (Şekil 5.107).

Şekil 5.107. Andasol CSP GES sıcak ve soğuk tank.

Andasol GES Şebeke Bağlantısı

Andasol GES projesinin şebeke bağlantısı yüksek gerilim (YG, 154 kV) üzerinden olmuştur. İspanya'nın TEİAŞ'ı Red Electrica de Espana tarafından uygun görülmüş ve tahmin edilebilir bir santral olarak değerlendirilmiştir. Hueneja yakınlarında 154 kV trafo merkezine bağlantısı yapılmıştır. Elektrik dağıtım şirketi Endesa ile yapılan elektrik santral anlaşması gereği satış işlemi yapılmaktadır.

Proje Geliştirici: Solar Millennium AG

Andasol CSP GES projelerini Solar Millennium AG geliştirmiştir. 1998 yılında Münih'te kurulmuş olup 2005 yılında Frankfurt Borsası'nda işlem görmeye başlamıştır. Solar Millennium AG ve ona bağlı şirketler CSP GES projeleri üzerine çalışmaktadırlar. Solar Millennium AG'ye ait bir şirket olan Flagsol; projenin mühendislik, teknik, inşaat, planlama ve inşaat sürervizyonunu gerçekleştirmiştir. Solar Millennium AG'ye bağlı İspanya'da kurulan Milenio Solar Desarrollo de Proyectos SL, İspanya'daki yerel işleri halletmiştir. Alderia kasabasında kurulan bir ofis ile bu yerel işler gerçekleştirilmiştir. Andasol 1, Avrupa'daki ilk CSP GES projesi olduğundan konu bu proje üzerinden özellikle İspanyol şirketlere önemli bir knowhow kazandırmıştır. İspanyol ACS Cobra Group, Andasol 1 proje şirketinin hisselerini satın almıştır. Andasol 1 ve 2'nin inşaat işlerini Cobra Instalaciones y Servicios SA ile Sener Ingenieria y Sistemas SA konsorsiyumu gerçekleştirmiştir.

5.7.2 Hawaii Keahole Solar CSP GES

Hawaii Doğal Enerji Laboratuvarı'nda Sopogy Inc tarafından 2 MW kurulu gücünde parabolik oluk CSP GES kurulmuştur (Şekil 5.108).

Şekil 5.108. Keahole Solar parabolik oluk CSP GES.

Kona Çölü'nde 3.8 acre alanda 1000 adet ayna kullanılarak proje gerçekleştirilmiştir. Termal depolama ünitesi de bulunmakta olup 2015 yılına kadar kurulu gücün 30 MW'a çıkarılması planlanmaktadır.

5.8 CSP GES Proje Uygulama

GES projelerinde uygulama safhasında yapılacak işler 5 kısımda incelenebilir. Bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- İnşaat işleri,
- Nakliye işleri,
- Montaj işleri,
- Elektrik işleri,
- Devreye alma ve testler.

İlerleyen sayfalarda bunlar detaylı olarak anlatılacaktır.

5.8.1 İnşaat İşleri

GES proje uygulamasında, diğer elektrik santrallarında olduğu gibi, birçok iş aynı anda paralel olarak yapılabilir. Burada Andasol projesinden alınan bilgilere göre bir iş akışı oluşturulmuştur. Bu iş akışının ilk safhası inşaat işleridir. İnşaat işlerinde alt sınıflandırma ise aşağıdaki şekilde yapılabilir:

- Saha mobilizasyonu,
- Ulaşım yolu,
- Santral içi yollar (servis yolu),
- Kablo kanallarının hazırlanması,
- Şalt sahasının hazırlanması,
- Kontrol binasının hazırlanması,
- Diğer inşaat işleri.

5.8.2 Saha Mobilizasyon

Saha mobilizasyonu, inşaat işini alan taşeron firmanın veya GES'i kendi yapmak isteyen yatırımcı firmanın sahada şantiye yerini belirlemesi, gerekli şantiye ve hizmet binalarının (çoğunlukla prefabrik) yapılmasıdır. Şekil 5.109 ile Andasol 1 CSP GES projesine ait saha mobilizasyon işleri görülmektedir.

Şekil 5.109. Parabolik oluk CSP GES saha mobilizasyonu (Andasol 1).

Andasol 2 saha mobilizasyon işleri Şekil 5.110'da görülmektedir.

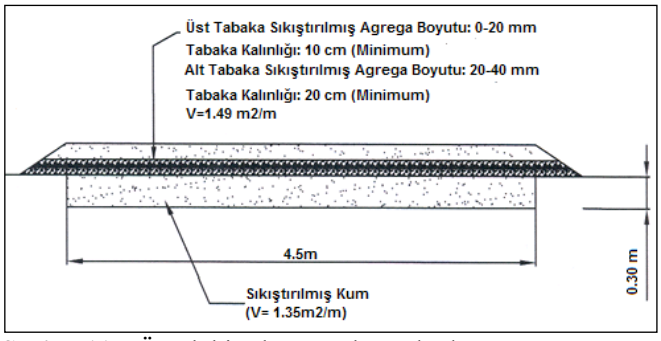
Şekil 5.110. Parabolik oluk CSP GES saha mobilizasyonu (Andasol 2).

CSP GES proje sahasının düz bir topoğrafyada olması gerektiğinden dolayı saha düzenlemesi için ciddi inşaat maliyeti gerektirmemektedir.

Şekil 5.111. Parabolik oluk CSP GES saha mobilizasyonu (Andasol 1).

5.8.3 Ulaşım Yolu (Anayol-GES Arası Yol)

İngilizce "access road" olarak bilinen ulaşım yolu, anayol ile GES'in kurulmak istendiği saha arasındaki yoldur. Ulaşım yolu ile kastedilen şey, en yakın karayolu veya otoyol ile GES sahası girişi arasındaki yoldur. GES projelerinde bazı sahalarda ulaşım yolu düzgündür ve nakliye işleri için uygundur. Genellikle belirli bir noktaya kadar otoyol veya karayolu mevcut olmakla beraber, belirli bir bölgeden sonra artık yol düzgün olmayabilir ve bu tip yollar için düzeltme yapılmalıdır. Bu düzeltme için de belli bir yol standardı bulunmaktadır. Bu standartlara örnek olarak Şekil 5.112 verilmiştir. Görüldüğü gibi, ulaşım yolu genellikle 4.5-5 m eninde olmaktadır. En alttaki tabakada dolgu malzemesi kullanılmaktadır. En üst tabakada sıkıştırılmış agrega (yaklaşık 20 mm), en alt tabakada bulunan dolgu malzemesinin hemen üzerindeki tabakada da 20-40 mm kalındığında bir agrega olmalıdır.



Şekil 5.112. Örnek bir ulaşım yol standardı.

Şekil 5.113 ile verilen standartlar en ideal şartlar için verilmiştir. İspanya Andasol 2 projesine ait örnek bir ulaşım yolu görülmektedir.

Şekil 5.113. İspanya'dan örnek bir ulaşım yolu.

Ulaşım yolu için öncelikle güzergah etüdü yapılmalıdır. Genelikle kötü de olsa mevcut bir stabilize veya toprak yol GES sahasına kadar bulunmaktadır ve bu yol düzeltilmektedir. Dikkat edilmesi gereken hususlar ise, ulaşım yolu üzerinde köprü, geçit vb gibi yapıların belirli bir yükseklik, genişlik ve dayanım kapasitesine sahip olmalıdır. Ayrıca keskin dönüşlere dikkat edilmelidir. Bu tip keskin dönüşlü

yerlerde bazen yol genişletme çalışması gerekebilir. Bu tip keskin dönüş devlet veya karayolunda ise, ilgili bölge karayolu idaresinden yol genişletme için gerekli izinler alınmalıdır. Konu ile ilgili diğer bir yol da alternatif bir yol güzergahı bulunmasıdır. Ulaşım yolunun yapılmasının veya hazırlanmasının proje zaman planı ve bu zaman planına uyulması bakımından büyük önem taşımaktadır.

5.8.4 Santral İçi Servis Yolu (Service Roads)

CSP GES içerisindeki servis yolu, işletme sırasında işletme ve bakım faaliyetlerini yürütürken kullanılacak olan yoldur. Plataforma Solar de Almeria (PSA) CSP test merkezindeki servis yolu Şekil 5.114 ile görülmektedir.

Şekil 5.114. PSA içindeki servis yolu.

Servis yollarının yapımı da ulaşım yolu ile aynı süreci kapsamaktadır. Andasol 1 projesine ait santral içi servis yolu Şekil 5.115 ile görülmektedir.

Şekil 5.115. Andasol 1 CSP GES servis yolu.

İspanya Andasol 1 CSP GES kolektörler arasındaki servis yolu Şekil 5.116 ile görülmektedir

Şekil 5.116. Andasol 1 CSP GES kolektörler arasındaki servis yolu.

5.8.5 Saha Düzenlemesi

Bilindiği gibi, CPS GES yapılacak sahaların mümkün mertebe düz olması gerekmektedir. Bu amaçla bazı saha tesviye işlemleri yapılmalıdır (Şekil 5.117).

Şekil 5.117. Saha tesviyesi.

Andasol 1 CSP GES projesine ait saha düzenleme çalışmaları Şekil 5.118 ile görülmektedir.

Şekil 5.118. Saha düzenlemesi.

Saha düzenlemesinden sonra, CSP GES için kullanılacak kollektörlerin kurulacağı arazi üzerinde temel sondajları yapılmaktadır.

5.8.6 CSP GES Kollektör Nakliyesi ve Montajı

CSP GES projelerinde nakliye büyük önem taşımaktadır ve nitelikli bir maliye ve montaj işleri gerekmektedir. Gerek aynalar ve gerekse de kollektörler kırılmaya karşı hassas parçalardır (Şekil 5.119).

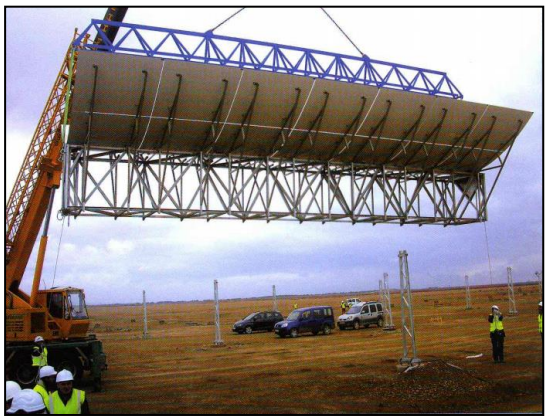
Şekil 5.119. Kollektör nakliyesi.

Montaj İşleri

Montaj işinde özellikle kollektörlerin montajı oldukça hassas bir konudur. Sahaya nakliye yapılan kollektörlerin montajına başlanır (Şekil 5.120)

Şekil 5.120. Kollektör montajı.

ABD'de bulunan diğer bir CSP GES'e ait montaj fotoğrafı Şekil 5.121 ile görülmektedir.



Şekil 5.121. Kollektör montajı.

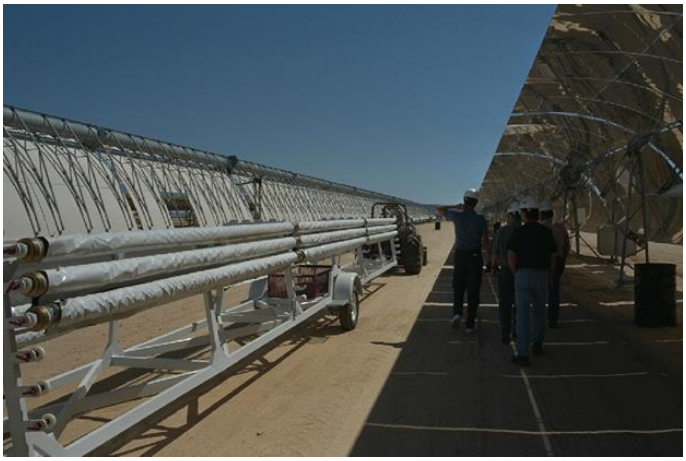
Andasol 1 projesindeki kollektör montajı Şekil 5.122 ile görülmektedir.

Şekil 5.122. Andasol 1 (50 MW) CSP GES kollektör montajı.

ABD Mojave Çölü'ndeki SEGS CSP GES'lere ait kollektör montajı Şekil 5.123 ile verilmiştir.

Şekil 5.123. Kollektör montajı.

Kollektör montajı bitirildikten sonra ısı toplama elemanlarının (absorber tüp) nakliyesi yapılmaktadır. California Kramer Junction'da bulunan CSP GES proesinde yeni ısı toplama elemanlarının nakliyesi görülmektedir.



Şekil 5.124. Isı toplama elemanı nakliyesi.

Absorber tüplerin nakliyesi bitirildikten sonra montajına başlanmaktadır (Şekil 5.125).

Şekil 5.125. Isı toplama elemanı montajı.

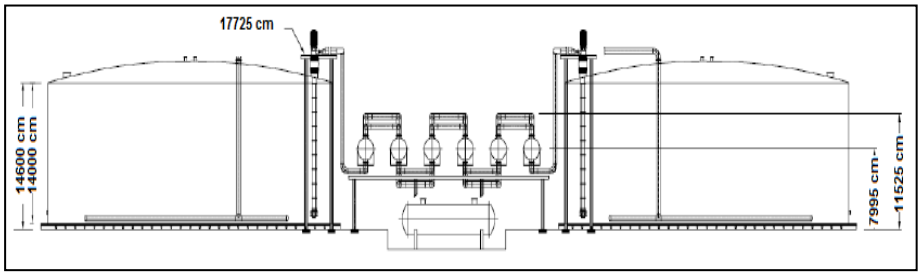
Eğer CSP GES'te termal depolama bulunacaksa diğer işler yapılırken bunlarında inşa işlerine paralel olarak başlanabilir. Andasol 1 CSP GES projesine ait erimiş tuzun depolandığı soğuk ve sıcak tank inşaat başlangıcı aşağıda Şekil 5.126 ile verilmiştir.

Şekil 5.126. Soğuk ve sıcak tank inşaat işleri başlangıcı.

Kazılan temellere beton dökülerek betonun kuruması beklenmektedir (Şekil 5.127)

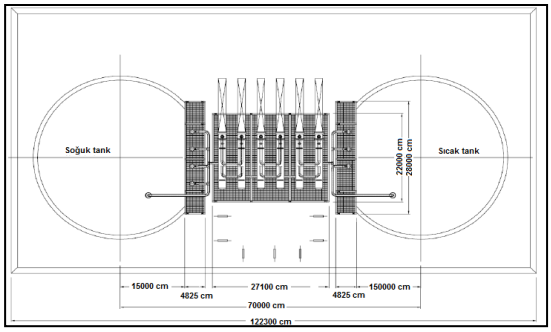
Şekil 5.127. Soğuk ve sıcak tank temel beton işleri.

Andasol 1 CSP GES projesine ait erimiş tuzun depolandığı soğuk ve sıcak tankların teknik resmi aşağıda görülmektedir (Şekil 5.128).



Şekil 5.128. Soğuk ve sıcak tank teknik resmi.

Andasol 1 CSP GES projesine ait erimiş tuzun depolandığı soğuk ve sıcak tankların kuşbakışı teknik resmi görülmektedir (Şekil 5.129).



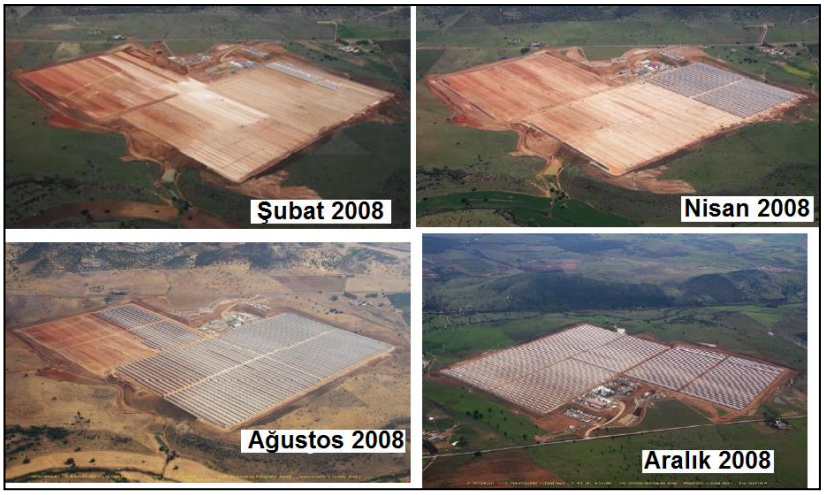
Şekil 5.129. Soğuk ve sıcak tank kuşbakışı teknik resmi.

Andalusia'da bitmiş bir tesis Şekil 5.130 ile görülmektedir.

Şekil 5.130. Soğuk ve sıcak tank kuşbakışı teknik resmi.

Örnek İnşaat: İspanya Puertollano 50 MW CSP GES

Puertollano 50 MW CSP GES'e ait 1 yıllık inşaat safhaları Şekil 5.131 ile görülmektedir.

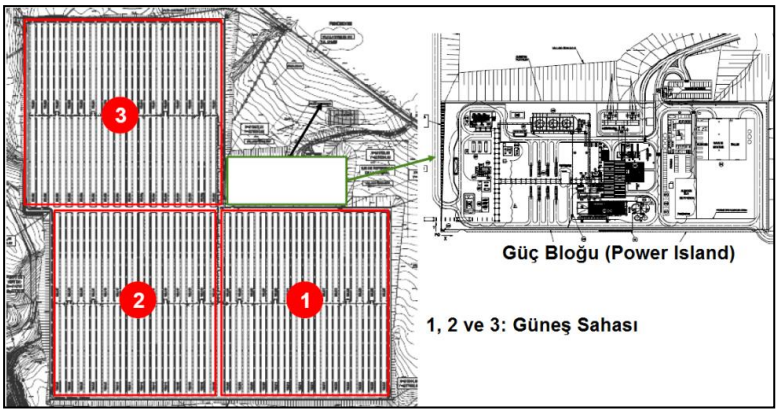


Şekil 5.131. Puertollano 50 MW CSP GES inşaat aşamaları.

Puertollano 50 MW CSP GES'in bitmiş hali aşağıda görülmektedir (Şekil 5.132).

Şekil 5.132. Puertollano 50 MW CSP GES bitirildikten sonra.

Projenin 1:25 000 ölçekli haritada gösterimi aşağıda görülmektedir (Şekil 5.133).



Şekil 5.133. Puertollano 50 MW CSP GES 1:25000 haritada gösterimi.

5.9 CSP İşletme ve Bakım

CSP GES projelerinin işletme ve bakımı ile ilgili fazla çalışma bulunmamaktadır. İzleyen sayfalarda verilen bilgiler Sandia National Laboratories (SNL) ile KJC Operating Company (KJCOC) ait %50 ortak oldukları Kaliforniya'daki Mojave Çölü'nde bulunan 9 adet CSP GES projelerine ait (SEGS I-IX) 6 yıllık tecrübenin sonucu olarak ortaya çıkan bilgiler derlenmiştir. Kramer Junction bölgesinde (Boron, Kaliforniya) 5 adet ve herbiri 30 MW kurulu gücünde olmak üzere toplam 150 MW CSP GES mevcuttur. Bu GES'ler hibrid olarak değerlendirilebilir, zira doğal gaz yakıtlı kazanları bulunmakta idi ve bu teknoloji Solar Electric Generating Systems (SEGS) olarak bilinmekteydi. Daha önce de belirtilmesine rağmen, Tablo 5. ile bu parabolik oluk CSP GES'lere ait temel özellikler görülmektedir.

Tablo 5.5. Kramer Junction CSP GES özellikleri

CSP GES	Devreye Alındığı Yıl	Kurulu Güç (MW)	Güneş Saha Sıcaklığı (°C)	Kollektör Teknolojisi	Güneş Sahası Büyüklüğü (m²)
III	1987	30	349	LS-2	230300
IV	1987	30	349	LS-2	230300
V	1988	30	349	LS-2/ LS-3	250560
VI	1988	30	390	LS-2	188000
VII	1989	30	390	LS-2/ LS-3	194280

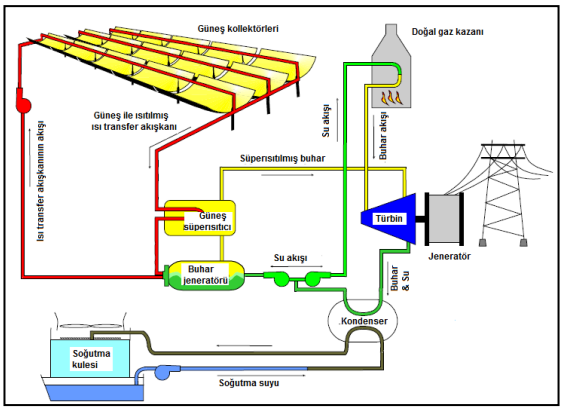
İşletme ve bakımın verimliliğinin artırılarak maliyetlerinin de azaltılabilmesi için aşağıdaki hususlar dikkate alınmıştır:

a) Güneş enerji toplama veriminin artırılması,
b) İşletme ve bakım bilgi sisteminin iyileştirilmesi,
c) Güneş sahasındaki akış çevriminin veriminin artırılması,
d) Çevresel konular ile ilgili maliyetlerin azaltılması,
e) Optimum santral işletme stratejisinin geliştirilmesi,
f) Gelecekte yapılan GES'ler için optimum planlar yapılması.

Yukarıda anlatılanlar ilerleyen sayfalarda detaylı olarak açıklanacaktır. Burada anlatılan hususlar daha çok parabolik oluk CSP GES'ler için geçerli olsa da; güneş kuleleri ve çanak/makina tip CSP GES'ler içinde bazen geçerlidir.

<u>Güneş Enerji Toplama Veriminin Arttırılması</u>

Kramer Junction'da bulunan 30 MW kurulu gücünde parabolik oluk CSP GES'e ait çalışma diyagramı Şekil 5.134 ile görülmektedir.



Şekil 5.134. 30 MW kurulu gücünde tipik parabolik oluk CSP GES.

Rankine buhar türbin/jeneratör çevrimine göre çalışan bu sistemde 1000 adet güneş toplama ünitesi (solar collector assembly) bulunmaktadır. Gümüşle karıştırılmış düşük demir içerikli cam yansıtıcılar direk güneş radyasyonunun alıcı veya ısı toplayıcı elemente veya akışkana (heat collection element) yoğunlaştırmaktadır veya yansıtılmaktadır. Herbir güneş toplama ünitesi birbirinden bağımsız olarak güneşi takip ederek yoğunlaştırma işlemini gerçekleştirmektedir. Güneş toplama ünitesinin iki kuşak üretimi olan LS-2 ve LS-3 Kramer Junction'da kullanılmıştır. Aşağıdaki Tablo 5. ile bu iki kuşak üniteye ait bazı bilgiler görülmektedir.

Tablo 5.6 Güneş toplama üniteleri (LS-2 ve LS-3).

Açıklama	**LS-2**	**LS-3**
Güneş Toplama Ünitesi		
Menfez Alanı (m²)	235	545
Menfez Mesafesi (m)	5	5,76
Uzunluk (m)	47.1	95.2
Güneş Yoğunlaştırma Oranı	71	82
Ayna Yansıma Verimi (%)	94	94
Optik Verimi	0.74	0.80
Isı Toplama Elementi		
Boru Çapı (m)	0.070	0.070
Uzunluk (m)	4	4
Güneş Toplama Ünitesi Başına Düşen Isı Toplanma Elementi	12	24

Güneş sahası içerisinde termal kayıpların minimumda tutulması gerekmektedir. Şekil 5.135 ile termal kayıpların giderilmesi için yapılan bakımlar görülmektedir.

Şekil 5.135. Isı kayıplarının azaltılması.

CSP GES'lerin performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisi, aynaların yansıtma özelliğinin verimidir. Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde yansıtma verimi %90 civarındadır. Bu durumun sürekliliğinin sağlanabilmesi için aynalar sürekli yıkanmalıdır. Kramer Junction'daki CSP GES'te

500000 ayna parçası bulunmaktadır. Aşağıdaki Şekil 5.136 ile demineralize edilmiş su ile aynaların yıkanması görülmektedir. Buradaki su yüksek basınçlı ve düşük miktardadır.

Şekil 5.136. Yüksek basınçlı demineralize su ile aynaların yıkanması.

CSP GES'lerin işletme bakım sürecinde güneş toplama veriminin artırılması için ısı toplayıcı elementin verimli bir şekilde çalışması sağlanmalıdır. Doğru bir odaklanma için izleme sistemi ile toplayıcı ünitesi arasında mükemmel bir uyum gerekmektedir. LS-2 ve LS-3 kollektörleri yüksek optik veriminde tasarlanmıştır. Fakat bu verim, montaj ve üretim süreci tarafından önemli ölçüde etkilenmektedir. Montajdan sonra kollektörlerin başlangıçtaki verimde çalışması rüzgar yükleri, ses patlamaları (sonic boom) gibi faktörlerden dolayı azalmaktadır. SEGS IV'teki LS-2'ler ile SEGS VII'de bulunan LS-3 kollektörlerinde odaklanmada bazı sorunlar tespit edilmiş ve bunlar daha sonra düzeltilmiştir. LS-2'lerde ayna destek sisteminin tork tüp kısmında arızalar tespit edilerek giderilmiştir. LS-3'lerde ise, dişli kutu freni ve güneş sensör düzenlemesi gibi daha ciddi problemler düzeltilmiştir. Kramer Junction'daki CSP GES'lerdeki aynaların yüzeyleri gümüşle kaplanmış olup; gerekli dayanıklılık ve gerekse de kolay temizlenebilmesi açısından mükemmel bir performans sergilemiştir. Zayıf noktası ise; GES'in sınırlarında yani uç kısımlarında bulunan aynaların yüksek hızlı rüzgarlarda kırılmalarıdır. Bu durum gerek bakım maliyetini artırmakta ve gereksede enerji üretiminin düşmesine neden olmaktadır. Bu sorunu aşabilmek için CSP GES'in uç kısımlarında bulunan yerlere güçlendirilmiş panel aynalar konulmuştur. Bunun için üç önlem alınmıştır. İlk olarak, birkaç yüz adet cam olmayan aliminyum/plastik kompozit panel konulmuştur. Güneş katılmış Teflon film ile kaplanarak da yansıtıcı gibi davranması sağlanmıştır. Bu paneller, yüksek rüzgarlarda mükemmel bir mekanik bütünlük sağlamış olsa da bu yaklaşım Teflon filmin deforme olması sonucu terkedilmiştir. İkinci ve üçüncü önlem olarak mevcut cam aynalar köpük şeridi (foam strip) ve cam fiber reçine ile güçlendirimiştir. Bu güçlendirme işlemi, camın arka tarafına uygulanmıştır. Şimdiye kadar bu güçlendirme işlemi tercih edilmiştir.

Kontrol odasından CSP GES'lerin parametreleri sürekli izlenmektedir (Şekil 5.137).

Şekil 5.137. SEGS VI/VII CSP GES'lere ait kontrol odası.

Teknisyenler, kollektörlerde yansıtma oran ölçümü yapmaktadır (Şekil 5.138).

Şekil 5.138. Kollektör yansıtma oran ölçümü.

Kramer Junction'daki CSP GES'lere ait güneş sahasındaki borular Şekil 5.139 ile verilmiştir.

Şekil 5.139. SEGS CSP GES'e ait borular.

Kramer Junction'daki CSP GES'lere ait güneş sahasındaki boruların diğer bir açıdan fotoğrafı da Şekil 5.140 ile verilmiştir.

Şekil 5.140. SEGS CSP GES'e ait borular.

LS-2 kollektörünün teknisyenler tarafından kontrolünün yapılması Şekil 5.141 ile görülmektedir.

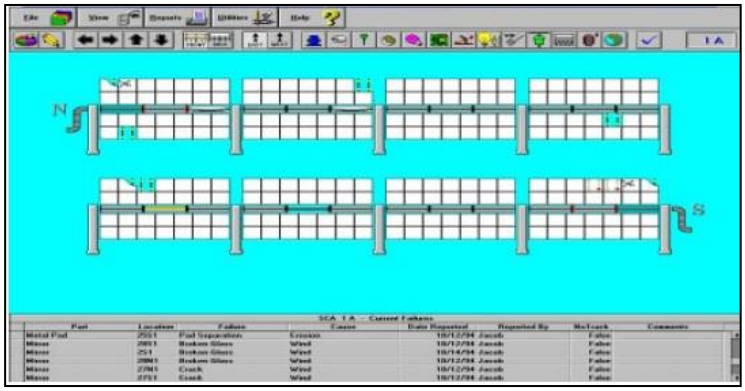
Şekil 5.141. LS-2 kollektörünün teknisyenler tarafından kontrolü.

İşletme ve Bakım Bilgi Sisteminin İyileştirilmesi

Kramer Junction'da bulunan 5 adet 30 MW kurulu CSP GES'ler, güneş elektrik parkını (solar power park) oluşturmaktadır. Park, burada birden fazla elektrik santrallarının bulunduğu projeler için kullanılmaktadır. Bu tip parkların en büyük avantajı, işletme ve bakım için aynı ekip kullanılmaktadır. Bu paylaşım, işletme ve bakım organizasyonunun kolaylaşması ve maliyetin azalmasına olanak tanımaktadır.

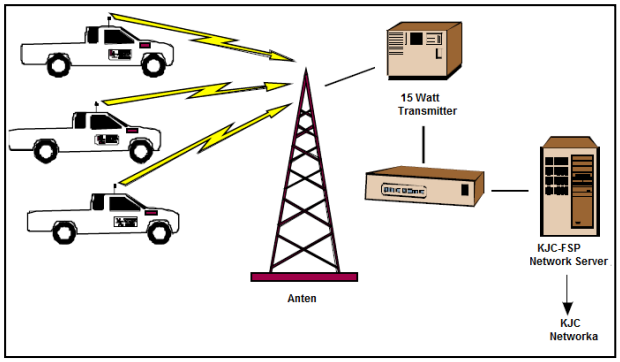
Bakım

Kişisel bilgisayarların gelişmesi ile bakımlar artık Computer Maintenance Management System (CMMS) yardımıyla planlanmaya başlanmıştır. Bu sistemlerin yardımıyla ekipman listesi, ekipman işletme kayıtları, sipariş listesi, stok durumu, yedek parça yönetimi gibi planlamalar da yapılabilmektedir. KJC Operating Company, MPAC (Maintenance Planning and Control) programını seçerek, işletme ve bakım yönetimini gerçekleştirmiştir. Daha sonraları KJCOC kendisi FSP (Field Status Program) modelini geliştirmiştir. Aşağıda verilen Şekil 5.142 ile FSP programının ekranı görülmektedir.



Şekil 5.142. FSP model ekranı.

FSP modeli, MPAC yazılımı ile etkileşim halinde çalışmaktadır. Ayrıca FSP modeline teknisyenler SCADA yardımıyla uzaktan erişilebilmekte ve müdahalede bulunulabilmektedirler. Buna ek olarak KJCOC firması Şekil 5.143 ile görülen radyo sistemini de eklemiştir.



Şekil 5.143. Radyo sistemi.

Geleneksel elektrik santrallarında olduğu gibi, Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde kontrol odasındaki teknisyenler yapılan işlemleri manuel olarak seyir defteri veya veri tabanına kayıt etmektedirler. Bu kayıtlar arasında türbin devrede ve devre dışı olduğu zamanlar, servis dışı kalan ekipmanlar, gaz, elektrik ve su tüketimi sayılabilir.

Pompalar

Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde ısı transfer akışkanının pompalarının giriş kısımlarında bazı arızalar görülmüştür. Örnek olarak SEGS V GES'ten pompa girişi 12 ay içerisinde 42 kez bozulmuş olup, materyal ve işçilik ile birlikte 250 bin USD zarar meydana gelmiştir. Bu bedele elektrik kayıpları dahil değildir. Bu sorunu aşabilmek için öncelikle grafit fiber kapaklar monte edilmiş fakat başarısız olunmuştur. Daha sonra mekanik kapak denenmiş ve daha başarılı olunmuştur. Yenilenen

kapakların yanısıra eşanjör eklenmiş ve daha düşük sıcaklıkta çalıştırılmıştır. Daha sonra pompaların basıncı yeniden dengelenerek 1993 yılından sonra sorunsuz çalışmaya başlamıştır.

30 MW kurulu gücündeki CSP GES'te 1000 adet güneş toplama ünitesi birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bu bağımsız rotasyon, bazı aynalar bakımda iken diğer aynaların çalışmasına olanak vermektedir. Bu yüzden, her bir güneş toplama ünitesi arasındaki kablo ve akışı sağlayan ekipman esnek olmalıdır. Buna akışkanın geçtiği esnek hortum (flexhose) dahildir. Aşağıdaki Şekil 5.144 ile bunlar görülmektedir.

Şekil 5.144. Esnek hortum (flexhose) ve diğer ekipman.

CSP GES'i optimum verimde çalıştırmak için, kontrol odasındaki operatörlerin, CSP GES proje sahası içerisinde ısı transfer akışkanının akış oranının bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla akış ölçerler (flowmeters) kullanılmaktadır. Bu akış ölçerlerin güvenilir olması ve sürekli kontrol edilmesi gerekmektedir; aksi takdirde yapılacak hatalar GES'in devre dışı kalmasına sebebiyet verebilir. Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde 4 tip akış kullanılmıştır.

Optimum Santral İşletme Stratejisinin Geliştirilmesi

Sürekli değişen hava koşullarına göre CSP GES'i verimli bir şekilde işletmek kolay değildir. Bu yüzden hava tahmininin önceden mümkün mertebe doğru şekilde bilinmesi gerekmektedir. Özellikle bakım çalışmalarının planlanabilmesi için birkaç gün önceden hava tahminine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tahminin doğru bir şekilde bilinmesi sadece bakım için değil; hibrid CSP GES'lerde gaz kullanımı açısından da büyük önem taşımaktadır. Tarihsel olarak KJCOC firması yetkilileri, bunu havaya bakarak ve kendi gözlemlerine dayanarak hava tahmininde bulunmuşlardır. Bu amaçla, üç aylık 1 ve 2 gün öncesinden saatlik veri tahmini ile ilgili olarak meteorolojik hizmetler veren bir şirketle çalışmışlardır. CSP GES'ler çalıştırılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da rüzgar hızıdır. Özellikle yüksek hızlı rüzgarlar estiğinde bu durum önemli bir hal almaktadır. Aynalar yüksek rüzgar hızlarında kırılabilmektedirler. CSP GES'i koruyabilmek için 35 mil/saat yüksek rüzgar hızlarında aynalar emniyetli pozisyona getirilmektedirler. Yüksek hızlı rüzgarlarda CSP GES'i optimum çalıştırabilmek için kollektörler üzerinde rüzgar yüklerini doğru bir şekilde anlamak gerekmektedir. Özel hücre yük koruma sistemi geliştirilerek kollektörlere uygulanmıştır.

Çevresel Konular ile İlgili Maliyetlerin Azaltılması

CSP GES'ler çevre ile uyumlu ve çevre dostu bir teknolojidir. Bu imajın devam edebilmesi için yapıldıkları çevre ortamı olan çöllerde çevresel bir soruna neden olmamalıdır. Hava kalitesi ve kullanılan su konusunda kazan-kazan durumu hep sürdürülmelidir. Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde sentetik yağ ısı transfer akışkanı olarak kullanıldığından uçuculuk özelliği bulunmaktadır. İşletme ve her akşam GES'in devre dışı kalması sırasında kullanılan yağın bir kısmı uçmaktadır. Bu kaçan emisyonlara uçucu organik bileşenler (Volatile Organic Compounds, VOCs) denilmektedir. Bu bileşenlerin yıllık kaybı %1 civarındadır.

Su kullanımı

Su, CSP GES projelerinin yapıldığı çöl bölgelerde pek fazla değildir. Bu husus Kramer Junction'da da geçerlidir. Su ve suyun çeşitli kimyasal işlemlere tabi tutulması ile işletme ve bakımın önemli bir bütçesi bu iş için kullanılmaktadır. Yıllık 1 milyon USD civarında tutmaktadır. Bunun optimizasyonu için yapılan çalışmalarda yıllık kullanılan suyun %1.5 kısmı ayna yıkaması, %90'ı da Rankine çevrimi için kullanılmaktadır.

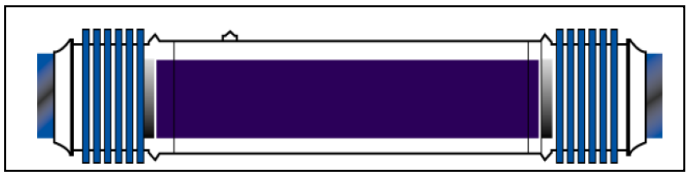
Optimum İşletme ve Bakım Planı Geliştirilmesi

Santral işletmesinde önemli hususlardan birisi daha az personel ile işletme ve bakımın yapılmasının sağlanmasıdır. Bu husus, proje ve bölgeye ve hatta ülkeye göre de değişmekle beraber 50 MW CSP

için; 13 ile 30 kişi arasında değişen bir personel istihdam edilmektedir. Personel maliyetleri eklendiğinde yılda 0.8 $c/kWh ile 1.2 $c/kWh arasında değişmektedir. Daha büyük CSP GES'ler için bu değer 0.5 $c/kWh'tir.

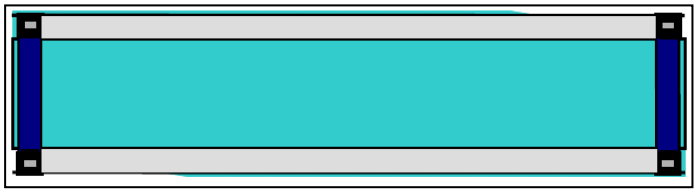
Isı Toplama Elemanı

Isı toplama elemanı (heat collection element), gelen güneş radyasyonunun aynalar tarafından yansıtılarak ısı transfer akışkanının ısıtıldığı yerdir. Solel Ltd tarafındanüretilen ve Kramer Junction'daki CSP GES'lerde kullanılan ısı toplama elemanı aşağıda görülmektedir (Şekil 5.145).



Şekil 5.145. Isı toplama elemanı.

Isı toplama elemanında dış kısım ile içteki ısı transfer akışkanının arasındaki hava boşaltılmıştır. Böylelikle kondüksiyon ve konveksiyon yolu ile ısı kaybı minimuma indirilmiş olunmaktadır. Seçici yüzey (selective surface) tarafından da radyasyon kayıpları büyük oranda azaltılmış olmaktadır. 1996 yılında Israilli Solel Solar Systems firması, ısı kollektör elementini biraz değiştirerek cermet seçici yüzeyin yapısında bir takım iyileştirmeler yapmıştır ve 350 °C'de emisyon iletme oranı %15'ten %10'a düşmüştür. Seçici yüzey üzerinde yapılan bu iyileştirmeler sonucunda KJC Operating Company vakumu alınan ısı transfer elementini kullanarak işletme ve bakım sırasında çeşitli avantajlara sahip olmuşlardır. Ayrıca tasarım da oldukça basitleştirilmiş ve vakumu alınmış olan ısı toplama elementi Şekil 5.146 ile görülmektedir.

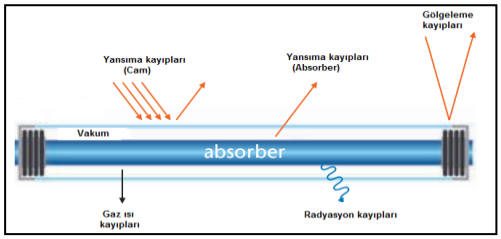


Şekil 5.146. Vakumsuz ısı toplama elemanının şekli.

Şekildeki tasarımın avantaj ve dezavantajları ise;

a) Performansı %3-4 artırmaktadır,
b) Daha düşük maliyet,
c) Ticari olarak kendini tam anlamı ile ispat edememesi,

sayılabilir. Isı toplama elemanından oluşan kayıplar Şekil 5.147 ile görülmektedir.



Şekil 5.147. Isı toplama elemanının yakından fotoğrafı.

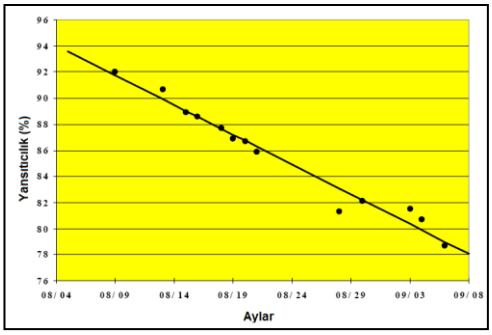
Ayna Temizliği

Güneş sahasının performansını etkileyen önemli parametrelerden birisi de ayna yansıtma oranıdır. Bu yüzden güneş sahasındaki aynalar düzenli olarak yıkanır. Bu durum, ek maliyet, emek ve demineralize su kullanımını gerektirmektedir. KJC Operating Company, ayna yıkama ile GES verimi arasındaki ilişkiyi daha iyi kılabilmek için sürekli strateji geliştirmektedir. Bu değerlendirme özellikle yazın pik saatler öncesinde büyük önem taşımaktadır. Kaliforniya Kramer Junction'da 546624 adet ayna parçası bulunmaktadır. Yıkamaların verimi, aynaların bulunduğu yere ve zamana göre değişim göstermektedir; örneğin yol kenarları, soğutma kulesi yakınları, yılın zamanı vb gibi parametrelere bağlı olarak toz

miktarlanmı değişim göstermektedir. Soğutma kulelerine yakın yerlerde bulunan aynalar özellikle fazla tozlanmaktadır. Aynaların tozlanmasına etki eden diğer faktörler, yılın zamanı, yağmur yağma frekansı, aynaların ulaşım veya sık kullanılmayan yola yakınlığı ve atmosferde çeşitli yollarla meydana gelen hava partikülleri sayılabilir. Burada önemli olan husus, santralı verimli ve karlı bir şekilde işletebilmek içinhangi sıklıkta aynalar yıkanmalıdır? Bunun cevabı, yıkamanın maliyeti ve performans kazanımı arasındaki bağlantı anlaşılarak yapılabilir. Genellikle enerji tüketimi yaz aylarında GES'lerden en yüksek verim alındığından toz ve kumlu çevre koşulları nedeni ile aynaların en kirli olduğu dönem yaz aylarına denk gelmektedir. Kış aylarında elektrik satışı biraz daha düşer ve enerji üretimi de düşmektedir. Fakat kış aylarında yağmur nedeni ile doğal ayna temizliği meydana gelebilmektedir. Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde ayna yansıtma oranı % 90 civarındadır. Yeni bir aynada bu oran %94 civarında olduğundan oldukça yüksek bir verimde işletildiği söylenebilir. CSP GES'lerde kullanılan aynalar, çok zor iklim koşullarında da çalışmaları gerektiğinden dolayı sağlam olarak yapılmaları gerekmektedir. California Mojave Çölü'nde kurulan CSP GES'lerdeki aynalar bir bakıma bu teknolojinin sürdürülebilirliğini göstermiştir. Flabeg marka olan bu aynalar, koruyucu bir tabaka ile güçlendirilerek 1980'lerden bu yana çalışmasını sürdürmektedir. Bu aynalara yapılan en önemli bakım ise düzenli yıkamalardır.

Tozlanma oranı

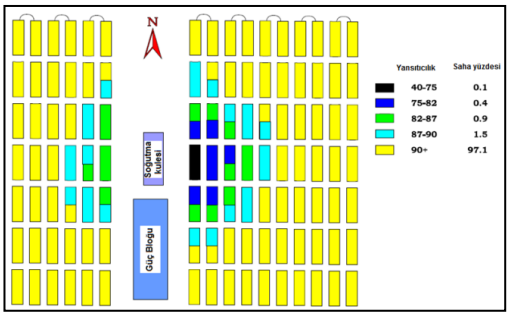
Aşağıdaki grafik, yaz ayları boyunca tozlanmanın ayna yansıması oranına negatif etkisi Şekil 5.148 ile görülmektedir. Kramer Junction'da bulunan SEGS projelerindeki 16 adet güneş toplama ünitesinden alınan veriler esas oluşturmuştur.



Şekil 5.148. Yaz aylarında ayna yansıması ve tozlanma.

Bu test için haftada iki kez olmak üzere toplam 150 okuma yapılmıştır. Test içerisinde olan bazı aynalar 3 ay boyunca yıkanmamıştır. Tozlanmanın güneş sahası üzerindeki termal verime etkisi araştırılmış ve ayna yansıtmasında %1'lik kısmın güneş sahası termal verimi üzerinde %1.2 gibi bir negatif etkisi olduğu saptanmıştır. 5 CSP GES projesi için %1'lik yansıma kaybı yılda 200 bin USD kar kaybına yol açtığı tespit edilmiştir. Bu GES'ler hibrid olarak çalıştığından etkisi daha azdır. Eğer doğal gaz ile yedek yakıtlı çalışmamış olursa kar kaybı daha da artacağı düşünülmektedir.

Aynaların tozlanması soğutma kuleleri yakınlarında ciddi bir sorun oluşturmaktadır. Bu kulelerden çıkan nem, normal tozlanmadan daha yüksek oranda verim düşüşüne neden olmaktadır. Bu tozlanma, CSP GES sahası içerisindeki hakim rüzgarın yönü ve nem miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Soğutma kulelerinde bulunan nem eliminasyon (yoketme) sistemi yardımı ile bu olumsuz durumun etkileri azaltılabilmektedir. Şekil 5.149 ile Kramer Junction'da bulunan CSP GES'teki tozlanma ve bunun yansıma ve verim üzerindeki etkileri görülmektedir.



Şekil 5.149. Ayna tozlanması üzerine soğutma kulesinin etkisi.

Ayna Yıkama Yöntemleri

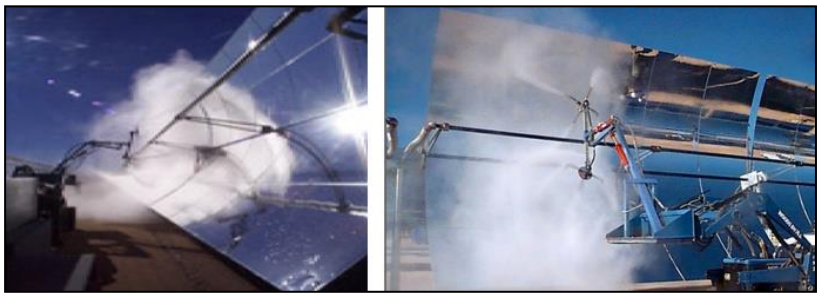
Kramer Juntion'da bulunan SEGS CSP GES projelerindeki aynalar normal yıkama ve özel yıkama olmak üzere iki yöntemle temizlenmiştir.

Normal yıkama

Normal yıkamada 3 çeşit olmuştur. Her çeşit yıkamada demineralize su kullanılmıştır. Operation and Maintenance Improvement Program (O&MIP) kapsamında geliştirilen modele göre yıkama yapılmıştır. Kar veya yağmur yağma olasılığı olduğunda güneş toplama üniteleri, yukarı doğru kendini çevirerek bu durumdan faydalanmıştır. Özellikle kar yağışı sonrası yansıtma oranı %94'ü bulabilmektedir. Yüksek basınçlı su püskürtme işlemi Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde 207 bar (3000 psi) basınçta yapılmıştır. İki sprey kullanılmış olup ve bunun içinde 3 personel kullanılmıştır. Bir kişi suyu taşıyan traktörde, diğer 2 kişi basınçlı suyu püskürtme için çalışmıştır. Diğer yıkama yönteminde sulama kamyonu kullanılarak yüksek miktarda su kullanılmıştır. Şekilde görülen kamyon 15.1 m^3 (4000 galon) demineralize edilmiş suyu kullanmaktadır.

Şekil 5.150. Yüksek basınç ve yüksek miktar sulama.

Kramer Junction'da bulunan SEGS CSP GES projelerindeki aynalar normal yıkama ve özel yıkama olmak üzere iki yöntemle temizlenmiştir. Bazen kollektöre özel yıkama yapılmaktadır (Şekil 5.151).

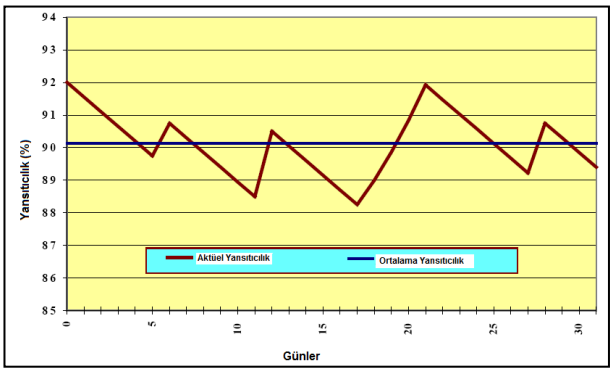


Şekil 5.151. Yüksek basınçlı özel yıkama.

Traktörler ile yapılan sulama Şekil 5.152 ile verilmiştir.

Şekil 5.152. Traktör ile yapılan yüksek basınç düşük miktar sulama.

Yüksek hacim sulama yönteminde herbir 2S-2 model güneş toplama ünitesi 0.207 m^3 su; herbir metrekareye de 0.00086 m su düşmekteydi. Yüksek hacim sulama yöntemi, basınçlı su ile sulama yöntemine göre %20 daha fazla suya gereksinim duymaktaydı. Fakat 4 kat daha hızlı bir yöntemdir. Yüksek basınçlı su temizleme işleminde yansıtma %3; yüksek hacimli su temizleme yönteminde de %1 yansıtma artmaktaydı. SEGS CSP GES'lerde yıkama ve sonrasında yansıtma oranının 1 ay içerisinde değişim grafiği Şekil 5.153 ile gösterilmiştir. Görüldüğü gibi ortalama yansıtma %90 civarındadır.



Şekil 5.153. Aynaların yıkanması sonucu günlere göre yansıtma değişimi.

Yüksek basınçlı su ile yıkama 3 haftada bir; yüksek hacimli su ile yıkama 2 haftada bir yapılmaktadır. Bu agresif yıkama özellikle pik üretim değerlerinin yaşandığı yaz aylarında görülür. Yüksek basınçlı su ile yıkamanın maliyeti 0.66 $/m² iken yüksek hacimli suyun yıkama maliyeti 0.14 $/m² olmuştur.
Ayna yıkaması O&MIP işletme ve bakım programının geliştirilmesi ile farklı bir hal almıştır. Bu yeni yıkama yöntemi Mr. Twister olarak adlandırılmıştır. Bu yeni yöntemde traktörün çektiği bir su tankı ve hidrolik olarak dönen basınçlı su püskürtülmüştür. Bu yöntemle hem personel olarak 1 kişi kullanılmıştır hem de daha verimli bir ayna temizliği yapılmıştır (Şekil 5.154).

Şekil 5.154. Mr. Twister.

Bu traktörde 5.7 m^3 su taşınarak dakikada 3500 psi basınçta 0.17m^3 su püskürtmektedir. Bu üç çeşit sulama yöntemleri ile ilgili aşağıdaki parametreler önem arz etmektedir:

a) Dönen kolun dizaynı ve püskürten baş sayısı,
b) Püskürtme başı (nozzle) tipi ve boyutları,
c) Su basıncı,
d) Su akışı,
e) Suyun püskürtülme mesafesi,
f) Rotasyon hızı,
g) Temizleme frekansı.

Yapılan ve denenen çeşitli sulama yöntemlerinden sonra aşağıdaki hususların maksimum verime katkıda bulunduğu belirlenmiştir:

a) 3000 psi basınçta su,
b) Çift yöne dönen dört püskürtme başlı sistem,
c) Aynaya mümkün mertebe yakın püskürtme sistemi.

30 MW bir CSP GES için 1 kişi 3 gece içerisinde yıkamayı bitirebilmektedir.

22 MW bir CSP GES için su kullanımına ait veriler aşağıda verilmiştir. CSP GES'lerde gerekli su miktarı termik santrallardaki miktara yakındır. Eğer sulu soğutma sistemi (wet cooling system) kullanılır ise 276 milyon litre/yıl; eğer kuru sistem soğutma (dry cooling system) kullanılır ise yıllık 36 milyon litre su gerekmektedir. 80 GWh/yıl bir CSP GES için gereken su miktarı aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Tablo 5.7. 80 GWh/yıl CSP GES için su verileri (milyon litre/yıl).

Kullanım Alanı	**Sulu Soğutma**	**Kuru Soğutma**
Kondenser Soğutma	240	-
Genel Hizmetler	16	16
Reflektör temizliği	20	20
Toplam	276	36

Özel Temizleme

Yıllar ilerledikçe aynaların alt kısımlarının yansıtma oranları %6-12 arası düşüş görülebilmektedir. Bu yüzden her 2 yılda daha detaylı temizlemeler yapılmalıdır. Bu temizlik, demineralize edilmiş su ve bez ile elle bastırarak yapılmalıdır.

Tork Tüpü Ayarlaması

Herhangi bir CSP GES'teki termal performansa etki eden en önemli parametrelerden birisi de kollektörlerin alıcıya (receiver) odaklanabilmesinin doğru bir şekilde yapılabilmesidir. Bunun için, izleme sistemi (tracking system), kollektör ünitesi, ve yansıtıcı yüzeyin arasında mükemmel uyumda bir çalışma gerekmektedir. Kramer Junction'daki SEGS'lere ait güneş sensörü, tork tüpü ve aynaları destekleyen kolların uyumlu çalışması gerekmektedir. Parabolik oluk CSP GES'te ısı toplama elemanı da bu yapıya eklendiğinden diğer kritik bir faktör olmaktadır. SEGS IV CSP GES, 1986 yılında inşa edilmiştir. Kullanılan LS-2 kollektörleri, yüksek optik verimliliğe göre tasarlanmıştır. Fakat üretim süreci ve montajında çeşitli yapılan çeşitli hatalar yüzünden çeşitli sorun ve verim düşüklükleri ile karşılaşılmıştır. Dolayısı ile tork tüpünün ayarlanması ile ilgili SEGS IV GES'te çeşitli çalışmalar ve düzeltmeler yapılmıştır. İlerleyen sayfalarda bu düzenlemeler ile ilgili bilgi verilmiştir. Yapılan çalışmalarda rastgele fakat istatistiki olarak düzenli bazı ölçümler yapılmıştır. SEGS III, IV CSP GES'lerde tork tüpü ile yeniden ayarlanma arasındaki ilişkiler incelenmiştir. LS-2 kollektöründe 6 adet tork tüpü bulunmaktadır. Bunlar 1S, 2S, 3S, 1N, 2N ve 3N olarak adlandırılmıştır. N ve S, kuzey (north) ve güney (south) yönlerini sürücü pilona göre işaret etmektedir. Numaralar ise sürücü pilona yakınlık (1 en yakın) ve uzaklık durumuna göre belirtilmektedir. Güneş sensörü ve 1S tork tüpü izleme sisteminin doğru bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Tork tüpü ayarlanmasının sebebi, bütün tork tüplerinin 1S tüpüne en yakın şekilde ayarlayabilmektir.

Güçlendirilmiş Aynalar

SEGS CSP GES'lerdeki aynalar iyi bir performans göstermiştir. Tek zayıf nokta ise, GES'in sınırına yakın bölgelerdeki kırılan aynalardır. Bu durum işletme ve bakım maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu masrafları azaltmak için farklı tasarımlar geliştirilmiştir. İlki, kompozit materyalden yapılma yeni ayna paneli ve polimer yansıtıcı konularak, diğer yöntemde mevcut aynaların tasarımında değişiklik yapılarak güçlendirilmiştir.

Polimer/ Kompozit Yansıtıcı

Industrial Solar Technologies firmasından metal olmayan ayna paneller sipariş edilmiştir. Bu aynalar gümüş Teflon filmden yapılmış olup kompozit aliminyumlu ve plastik yapıdaydı. Bu amaçla 1500 adet yeni panel sipariş edilmiştir. Yüksek hızlı rüzgarlarda iyi bir mekaniksel bütünlük göstermişse de gümüşle kaplı yansıtıcı film deforme olmaya başlamıştır. Bu deformasyon problemi ancak 1 yıl sonra çözülebilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.155 ile bu deformasyon görülmektedir.

Şekil 5.155. Ayna deformasyonu.

Mevcut Aynalarda Modifikasyon

Bu yöntemde, mevcut aynalar güçlendirilmeye çalışılmıştır. Bunun için aşağıdaki hususlar dikkate değerdir:

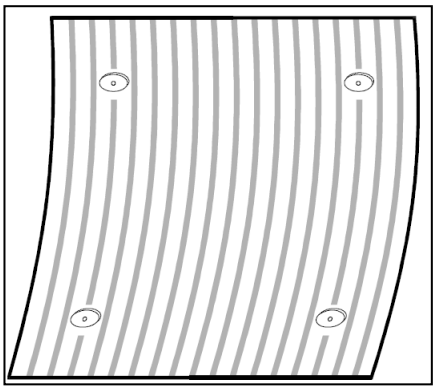
a) Güçlendirilmiş ayna panelleri konsepti geliştirme,
b) Güneş sahasındaki aynaların testi.

Toplamda 270 adet ayna paneli sahada test için kullanılmıştır. Bunlar ile ilgili özellikler Tablo 5 ile görülmektedir.

Tablo 5.8 Ayna panel özellikleri.

Panel Sayısı	Tip	Yapılan Güçlendirme
90	LS-3 iç kısım	Splinter prof
90	LS-3 dış kısım	Splinter prof
25	LS-2 iç kısım	Splinter prof
25	LS-2 dış kısım	Splinter prof
10	LS-2 iç kısım	Camfiber/ reçine
10	LS-2 dış kısım	Camfiber/ reçine
10	LS-2 iç kısım	Camfiber/ reçine
10	LS-2 dış kısım	Camfiber/ reçine

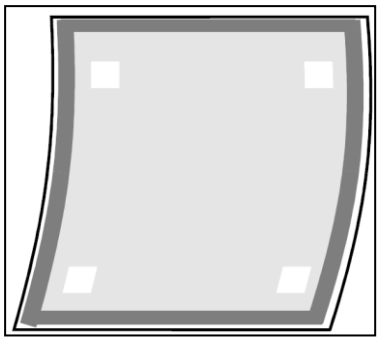
Kıymık geçirmez (splinter proof) tabakanın güçlendirme için seçildiğinde aynalar yapışkan köpük şeritler ile kaplanarak aliminyum ile güçlendirilmiştir. Yapışkan polietilen köpük dayanıklı bir malzeme olup sıcaklık, yıpranma vb gibi olumsuz koşullardan oldukça az etkilenmektedir. Ayrıca vibrasyona karşı dayanıklı olup ultraviyole ışığa karşı da dayanıklıdır. Bu köpük şeritleri aşağıdaki Şekil 5.156 ile görülmektedir.



Şekil 5.156. Splinter proof ayna.

Güçlendirilmiş Ayna Panelleri

Aynaları güçlendirmek için ayna yüzeyi üzerinde güçlendirme bölgeleri seçilerek KJCOC tarafından Mart 1997'de işlem yapılmıştır. Cam fiber tabaka ile ultraviyole ışık geçirmez tabaka ile kaplama yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 5.157 ile bu güçlendirilmiş panel teknik resmi görülmektedir.



Şekil 5.157. Tabaka ile güçlendirilmiş panel.

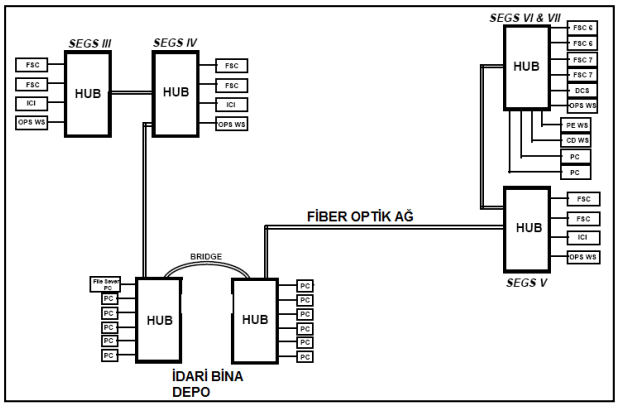
CSP GES Veri Ağı Yönetimi

CSP GES'lerin kompleks bir sistem olduğu göz önüne alınırsa veri yönetiminin ne kadar önemli olduğu da anlaşılabilir. Hızlı veri erişimi, bilgi yönetimi ve bu verilere göre GES'in işletme bakımının planlanması oldukça önemlidir. Bu entegre sistemde veri eksikliği ciddi sıkıntılara yol açabilir. Böyle bir sistemde merkezi veri alma sistemine ulaşılıp bunların değerlendirilmesi ve geçmiş verilerle kıyaslanarak gelecekteki tahmin ve planlamaları da basitleştirmektedir. Bu sistemin kurulabilmesi için KJCOC şirketi etkili bir bilgisayar ağı kurmuştur ve GES verilerini çeşitli yazılımlarla sürekli kontrol etmektedir. Bunun için Sandia National Laboratories ile aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

a) Operatör seyir defteri,
b) Bilgisayarlı bakım yönetim sistemi,
c) Güneş sahası bakım yönetimi,
d) Personel emniyet, çevre yönetim sistemi.

Ağ Tasarımı

Kramer Junction'da bulunan CSP GES ağı için Ethernet Protokol donanımı kullanılmıştır. Düşük maliyet, esneklik, genişleme imkanı ve iletişim hızı gibi avantajları olduğu için bu sistem seçilmiştir. Uzak mesafeler bulunduğu için fiber optik kablolama tesis edilmiştir. Bu fiber optik kablolar HUB denilen yerlerde toplanmıştır. HUB denilen yer kontrol odası ve idari binanın bulunduğu yerdir. Herhangi bir fiber optik kablo arızasına karşı ise sistemin çalışabilmesini teminen çevrim (loop) oluşturulmuştur. Fiber optik kabloların izlenmesi için özel bir yazılım ve ağ planı kullanılmıştır. Ağ işletim sistemi olarak Nowell yazılımı seçilmiştir (Şekil 5.158).



Şekil 5.158. Kramer Junction veri ağı planı.

Isı Transfer Akışkanı Akış Ölçümü

Kramer Junction'da bulunan SEGS CSP GES'lerde ısı transfer akışkanı olarak yağ veya su kullanılmaktaydı. Isı transfer akışkanı ne olursa olsun, kontrol altında tutulabilmesi için belli aralıklarla ölçümleri yapılmalıdır. Bunun dört önemli nedeni bulunmaktadır. Birincisi; yapılan ölçüm GES içinde yakılacak gazın miktarını belirleme açısından büyük önem taşımaktadır. İkincisi, doğru bilgi ile GES optimum şekilde çalıştırılabilir. Üçüncüsü akış ölçümünün bilinmesi ısı transfer akışkanının kontrolü açısından önemlidir. Son olarak da ısı transfer akışkanın güneş sahası içerisinde çevriminin termal veriminin artırılması için çok önemlidir. Önceleri dört farklı akış ölçerler kullanılmıştır. Bunlar, annubar tip ölçer, insertion türbin, orifice ve düşük kayıp akış nozzledir. Kramer Junction'da bulunan SEGS

CSP GES'lerde ısı transfer akışkanı 3 ayrı bölgede ölçülmüştür. Fakat ilk dört çeşit akış ölçerde bakım ve emre amadelikte ciddi sıkıntılarla karşılaşıldığından bunlardan vazgeçilmiştir. Bu yüzden yeni akış ölçerler geliştirilmiştir. Bunun için birçok firma ile temasa geçilmiştir ve aşağıda özellikleri verilen bir akış ölçer talep edilmiştir:

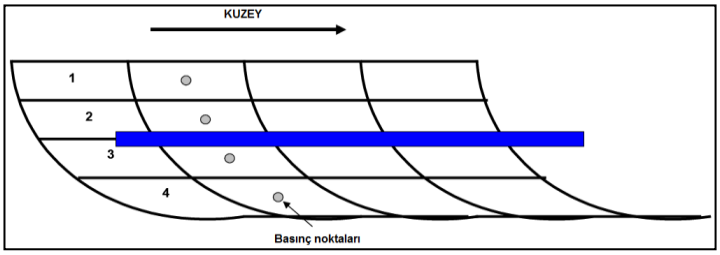
a) Akış oranı hata oranı %0.5,
b) 400 °C'ye kadar çalışabilen,
c) Soğuk havalarda fonksiyonel,
d) İşletme ve bakımı kolay.

Hava Tahminleri ile İşletme & Bakımın Planlaması

Doğru hava tahminleri ile çalışmak CSP GES'ler için hayati öneme sahiptir. Bu durum sadece üretim tahmineri için değil; aynı zamanda işletme ve bakım aktivitelerinin planlaması içinde çok önemlidir. Hibrid çalışan CSP GES'lerde doğal gaz planlaması hava tahminine göre yapılmaktadır. Özellikle üç günlük hava tahminlerine göre, kazanın yakılıp yakılmaması ve gerekecek yakıt miktarının bilinmesi son derece önemlidir. Verilecek kararlar santralin verimi üzerinde önemli etkilere sahip olmaktadır. Güneş tahminleri için direkt normal insolation (DNI) verileri dikkate alınarak NREL ile birlikte günlük olarak yapılmıştır. Bu deneme tahminler Mayıs ve Haziran 1996'da yapılmıştır.

Yüksek Rüzgar Hızında İşletme Stratejisi

CSP GES sahasındaki işletme koşulları, yüksek rüzgar hızlarında oldukça zor olmaktadır. Sıkça ayna kırılmaları meydana gelmektedir. Saatte 56 km hızla esen rüzgar hızlarında GES'in kenar ve uç kısımlarında bulunan aynalar ciddi hasarlar görmüştür. Sonuç olarak bazı kollektörler, uyku (sleep) moduna geçerek bu sorun çözülmeye çalışılmıştır. Uyku modunda 120 km/saat rüzgar hızlarına kadar dayanımı sağlanabilmiştir. Parabolik oluk kollektörlerin etrafında rüzgar yüklerinin hesaplanabilmesi için 1980 yılında Colorado State University'de çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmanın ana amaçlarından biri de kollektörlerin farklı açılarda olduğunda rüzgarın etkisinin araştırılması olmuştur. Kramer Junction'da bulunan CSP GES'lerde ayna kırılması için bazı testler uygulanmıştır. Burada saatte 40 ile 60 km hızındaki rüzgarlarda on farklı koruma testi uygulanmıştır. Yapılan testlerde pik rüzgar hızı, rüzgar frekansı ve kollektör açısı gibi ana parametreler dikkate alınmıştır. Bu test SEGS V nolu CSP GES'te uygulanmıştır. Şekil 5.159 ile 22 nolu güneş toplama ünitesi civarında görülen test sahası verilmiştir.



Şekil 5.159. Test lokasyonu.

Şekil 5.160 ile 1 Aralık 1995 yılında meydana gelen yüksek rüzgar hızlarından dolayı SEGS CSP GES'in kenar kısımlarında bulunan bazı kırılmış aynalar görülmektedir.

Şekil 5.160. Rüzgardan dolayı kırılan aynalar.

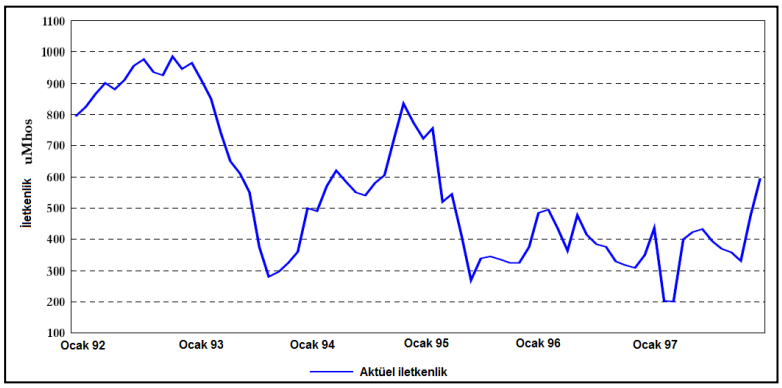
Test sahası, Kramer Junction'daki CSP GES'lerin ortasındaki bir GES'e aittir. Farklı güneş radyasyonununa göre, Rankine çevrimindeki buhar türbinine belirli bir sıcaklıkta olması gereken ısı transfer akışkanı gönderilmektedir.

Meteoroloji İstasyonu Veri Yönetimi

Kramer Junction'daki 5 adet GES'te herbirisinin kendisine ait meteoroloji istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonda, hava sıcaklığı, rüzgar hız ve yönü ile direkt normal irradiyasyon ölçümleri yapılmaktadır. Bu istasyonlarda global irradiyans verisi için piranometreler kullanılmaktadır. Toplanan veriler 5 veya 10 dakika ortalamalar halindedir. Fakat sonraları bu istasyonlara, bağıl nem, basınç, difüze radyasyon ölçüm sensörleri de eklenmiştir.

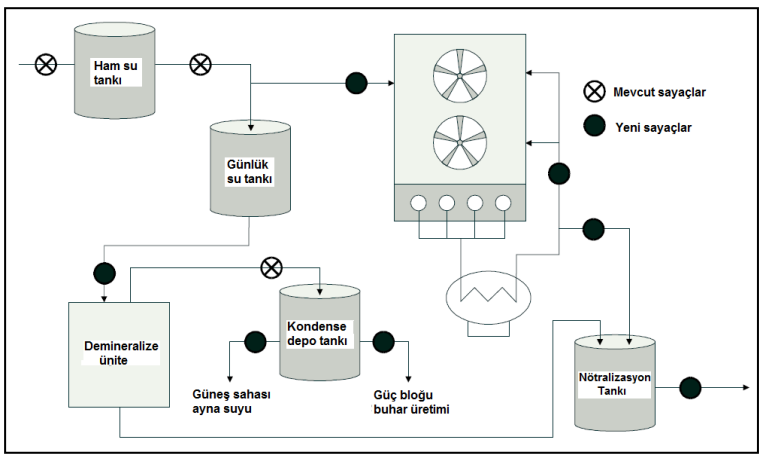
Su Kullanımı

Kramer Junction'daki SEGS CSP GES'lerin su ihitycaı Antelope Valley East Kern Water Agency (AVEK) tarafından sağlanmıştır. Su, pompalanarak borular ile 7 SEGS CSP GES'teki herhangi bir su deposunda tutulmuştur. AVEK'in sağladığı suyun kalitesi, CSP GES'teki kullanılan suyun miktarını etkilemektedir. Düşük su kalitesi (yüksek iletken – conductivity- özelliğe haiz), kullanılan su miktarının artırılmasına yol açmaktadır. AVEK'in su kalitesi büyük değişimler gösterebilmektedir. Şekil 5.161 ile 5 yıllık su iletkenliğinin grafiği görülmektedir.



Şekil 5.161. Su iletkenliği.

Su kalitesindeki değişimin temel nedeni, hava koşullarının değişmesidir. CSP GES'teki su kullanımını anlayabilmek için santrala su sayaçları takılmıştır. Ancak toplam santralın su kullanımı verisi elde edilebilmiştir; santral içerisindeki herbir sistemin kullanımı ile ilgili herhangi bir veri mevcut değildir. Daha sonra çeşitli yeni su sayaçları montajı yapılmıştır. Şekil 5.162 ile yeni ve eski su sayaçlarının pozisyonu görülmektedir.



Şekil 5.162. SEGS CSP GES'lerde su sayaçlarının yeri.

Kramer Junction'da bulunan 5 adet CSP GES için 1995 yılı için suya 450000 $ ödenmiştir. Su ve kimyasallar için yıllık 1 milyon USD ödenmektedir. Kimyasal kullanımı ve dolayısıyla da maliyeti demineralize ve soğutma kulesi işletmesinin verimli yapılması sonucu düşmüştür.

Tasviye Edilen İşletme ve Bakım Planı

Büyük CSP GES'ler genellikle bir güneş sahası ve merkezi türbin jenaratör sisteminden oluşmaktadır. Fakat bu tasarım, parabolik oluk ile heliostatlardan oluşan kule tip CSP GES'ler için geçerlidir. Çanak/Stirling sistemi merkezi üretim olmadığından bu konseptin dışındadır. Parabolik oluk sistem CSP GES için 2 ana sistem olan güneş sahası ve termik proseslerin olduğu durum geçerli olduğundan işletme ve bakım 2 ana kısma ayrılabilir. Güneş sahası dışında kalan soğutma sistemi, buhar ünitesi ve jeneratör, pompalar ve valfler gibi sistemlerin bakım konsepti çok farklıdır. Bu sistemlerin bakımı geleneksel termik santrallar gibi yapılırken; güneş sahası bambaşka bakım konsepti gerektirmektedir.

5.10 CSP GES'lerde Kullanılan Yazılımlar

Değişik teknolojilere sahip odaklayıcılı CSP GES güç sistemlerinin analizinde kullanılan çeşitli yazılımlar ve modeller bulunmaktadır. Bu modeller ve yazılımlar güç kuleleri, çizgisel odaklayıcıları ve çanak/Stirling sistemlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Model ve yazılımların listesi kullanılacakları teknoloji türüne göre tanıtılmaya çalışılacaktır.

Yazılım ve modeller, karmaşık sistemlerin modellenmesi için doğal hiyerarşiyi tanımlayan bir modelleme piramidine göre gruplandırılabilmektedir. En üst seviyede, güç çıktısı veya aynı seviyeye indirgenmiş enerji maliyetleri gibi toplam performans metriklerini değerlendirmede kullanılabilen toplam sistem modelleri bulunmaktadır. Bu toplam sistem modelleri, toplam sistem içerisindeki her bir bileşenin performansı hakkında bilgi sağlayan daha detaylı süreç modellerinden girdilere dayanmaktadır. Proses modelleri; test, literatür, etüt ve/veya profesyonel karar gibi değişik vasıtalar gerektiren girdi parametreleri ve dağılımlara (belirsizlik ve duyarlılık analizleri için) ihtiyaç duyar. Bu modelleme piramidi genellikle karmaşık sistemleri modelleme için kullanılan çerçeveyi kullanmaktadır. Çünkü mantıksal akışlar ve organizasyon bilgisi gibi modelleme aktiviteleri için kullanılan imkanları sağlayabilmektedir. Detaylı proses modelleri ve parametrelerinden yukarı doğru bilgi sağlamanın yanı sıra, çerçeve modelleme ve nitelendirmede öncelik tanıma gibi işlemlere de olanak tanımaktadır.

Takip eden bölümlerde üç ayrı CSP teknolojisine göre gruplandırılan yazılımlar modelleme piramidinde gösterilen sistematikte verilecektir. CSP teknolojilerinin genel bir tanımlaması yapılarak temel bileşenleri konusunda bilgi sunulacak ve ilgili yazılımların erişilebileceği referanslar ve internet adresi linkleri de gösterilecektir.

ASAP: ASAP, değişik geometriler ve sistemlerin optik simülasyonlarını yapan ticari bir ışın izleme yazılımıdır. Sistem geometrisi, ışın izleri ve ışık kaynaklarını açıklamada kullanılır ve görünür, infrared ve ultraviyole radyasyonu modeller. Optimizasyon ara yüzü ile optik sistemleri optimize eder ve değişik çizim yazılımlarından geometrik şekiller açabilir. Güneş irradyasyonunun yönlere göre olan değişimi modellenebilmekte ve ayna yüzeylerinin rastlantısal ve tanımlanmış eğim hataları dalga boyuna bağlı olarak yansıtma, kırılma, saçılma ve absorblama için hesaplanabilmektedir.

DELSOL: DELSOL optik ve ekonomik analizleri içeren bir performans ve dizayn yazılımıdır. Analitik yöntemleri kullandığından dolayı benzer yazılımlardan daha hızlı çalışır. Yazılım, güneşlenme, gölgeleme ve bloklama, atmosferik zayıflatma, tesisat kayıpları gibi birçok durumu hesplayabilmekte ve dikkate alabilmektedir. Yazılımla sistem seviyesinde seviyelendirilmiş enerji maliyetleri, algılayıcı boyutları, kule yüksekliği gibi birçok parametre boyutlandırılabilmekte ve bunlara göre maliyetler hesaplanabilmektedir. Yazılım FORTRAN ile geliştirilmiştir ve girdiler kullanıcı isteğine bağlı olarak tanımlanmış metin dosyalarından girilebilmektedir. Yazılım SANDIA laboratuarlarında ve birçok sanayi şirketinde hala kullanılmaktadır.

HELIOS: HELIOS, 1-559 arasında değişen tekil heliostat alanından meydana gelecek akı yoğunluğunu değerlendirebilmek için koni optiğini kullanmaktadır. Parabolik, çanak ve diğer kollektör şekilleri de HELIOS ile değerlendirilebilmektedir. Yazılım, gölgelenme, saçılma, bloklama, güneşin denklinasyonu, yer küre yörüngesinin eksantiritesi, kırılma, gelen güneş ışınlarının açısal dağılımı, yansıtıcılık, odaklanan yüzeyin şekli, şekil eğriliği hata dağılımları, yönlenme, gibi değişkenleri hesaba katmaktadır. Girdi verileri metin dosyası şeklinde kullanıcı tanımlı verilebilmektedir. SANDIA laboratuarları ve araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır.

MIRVAL: MIRVAL, tekil heliostat ve merkezi algılayıcılı sistemler için akı haritaları ve verimlilik alanlarının hesaplayan bir Monte Carlo ışın izleme programıdır. Gölgeleme, bloklama, heliostat hareketleri, gelen güneş ışınının açısal dağılımı, saçılma, helyostat ve algılayıcı arasındaki zayıflama,

yansıtıcılık, hedefleme gibi birçok değişken hesaplanabilmektedir. Üç kısmi algılayıcı konfigürasyonu ve dört heliostat tipi programda mevcuttur. Girdiler kullanıcı tanımlı metin dosyaları ile girilebilmektedir. Yazılımın geliştiricileri artık SANDIA'da çalışmamaktadır ve burada kullanılmamaktadır.

SOLTRACE: SOLTRACE, güneş enerjisi optik sistemlerini dizayn ve analiz etmek için kullanılan ve NREL tarafından geliştirilen bir ışın izleme modelidir. Parabolik oluk kolektörler ve şekillerdeki kolektörleri modelleyebilmektedir. Optik geometri; şekil, kontur ve optik kaliyeti içeren belirli özellikler ile optik özelliklerin kompozisyonu olarak modellenebilmektedir. Sonuçlar, saçılım grafikleri, akı haritaları ve performans grafikleri şeklinde görüntülenebilmekte ve kaydedilebilmektedir.

Stres Analiz Yazılımları: Heliostatlardan yansıtılan güneş akısı dağılımı, yer çekimi ve rüzgar gibi harici kuvvetler tarafından neden olunan yapısal deformasyonlarla etkilenebilmektedir. CosmosWork veya ANSYS gibi ticari yazılımlar, yer çekimi ve/veya rüzgar yüklerine maruz kalan heliostatların yer değiştirmesi ve stresi modellemede kullanılabilmektedir. Algılayıcı tübün detaylı bir geometrik modelinin geliştirilmesine ve iç içe geçmesine ihtiyaç duyulur. Uygun sınır koşulları (yükler ve baskılar) uygulanır ve yazılımlar stres dağılımı ve sonlu eleman analizi kullanılarak yer değiştirmeleri çözer. CosmosWorks, SolidWorks ile entegre edilebilmekte ve sistem SolidWorks'te modellenebilmektedir. ANSYS ve CosmosWorks ticari olarak satılan yazılımlardır. Bu yazılımlarla ilgili detaylı bilgilere www.ansys.com ve www.cosmosm.com bağlantılarından erişilebilmektedir.

CAVITY: CAVITY, konkav (içbükey) bir şekli olan güneş algılayıcı için enerji dengesi eşitliklerini çözer. Aynı zamanda algılayıcı tüp ve kullanılan çalışma akışkanı ve konkav şekilli algılayıcı arasındaki ısı değişimlerini de hesaplayabilmektedir. Radyatif ve konvektif kayıplarda bu yazılım ile hesaplanabilmektedir. Kullanıcı tüp için giriş ve istenen çıkış sıcaklıklarını tayin edebilmekte ve yazılım pozisyonun fonksiyonu olarak akışkan sıcaklıklarını ve debileri hesaplayabilmektedir. Yazılım girdileri metin dosyaları şeklinde kullanıcı ara yüzü ile girilebilmektedir. Yazılım günümüze güncelleştirilmemiştir.

TRAC ve TOPAZ: DRAC, TOPAZ için bir sürücü yazılımıdır. Isı ve kütle transferinin her ikisini de tek boyutlu akışkan akımlarında borularda simüle eder. Zaman bağımlı olarak ısı akısı profili ve debi değişimlerini tayin edebilmekte ve radyatif ve konvektif kayıpları dikkate alabilmektedir. Tek bir tüpteki akış için tüp duvarları ve akışkan sıcaklıklarını ortaya koyabilmektedir. Girdiler metin dosyası şeklinde verilebilmektedir. Yazılımda yeni değişiklikler yapılarak NETFLOW adı verilmiştir

FLUENT: FLUENT, bir hesaplamalı akışkan dinamiği yazılımıdır. Yazılım; laminer ve türbülanslı akışkanlar, kondüksiyon, konveksiyon, radyasyon ve ısı transferi gibi olayları simüle edebilmektedir. FLUENT, ayrıklaştırılmış alanlardaki her bir sonlu hacim için süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözer. FLUENT farklı radyasyon transfer modellerini de kapsadığından değişik bantlardaki kırılma, yansıma, saçılma ve emisyonlarını tanımlamada da kullanılabilmektedir. FLUENT, merkezi alıcılı sistemlerin çok değişik bileşenlerine uygulanabilmektedir. GAMBIT isimli bir kullanıcı ara yüzü mevcuttur ve bunun üzerinden kurulup çalıştırılabilmektedir. FLUENT ticari bir yazılım olup ANSYS Şirketi tarafından satılmaktadır. Yazılımla ilgili bilgilere www.fluent.com internet bağlantısından erişilebilir.

RADSOLVER: RADSOLVER, değişik konkav şekillerdeki algılayıcıların radyasyon enerji transferini hesaplamada kullanılır. RADSOLVER, konkav şekiller için belirlenen zonları içerisindeki termal emisyon ve yansımayı, termal absorblama ve güneş radyasyonunu da hesaplayabilmektedir. Konkav içerisindeki hava konveksiyonu ihmal edilmektedir. Girdiler kullanıcı tanımlı metin dosyaları üzerinden yapılır. Yazılım günümüzde kullanılmamaktadır.

SAM: SAM, termal depolama ve tesisatlandırma ısı kayıpları işlemleri için yüksek seviye modellerini kapsamaktadır. Bu bileşenler komple sistem için kullanılmaktadır. Alt sistemlerin bileşenleri içerisinde zaman-mekan ve termal işlemleri kapsamamaktadır.

SOLERGY: SOLERGY, tüm sistemin enerji dengesini hesaplamada kullanılabilmekte ve her bir bileşenin ısı kayıplarını dikkate alabilmektedir.

IPSEPRO: IPSEPRO, ısıtma sistemleri ve güç santrallerindeki ısı ve kütle dengesini simüle etmek için bir dizi modülleri ihtiva eden ticari bir yazılımdır. Yazılım, dizayn ve dizayna ilave sistemlerin

performansını tahmin etmede kullanılabilmektedir. Aynı zamanda kavramsal tasarım esnasında maliyetleri de tahmin edebilmektedir. IPSEPRO kullanıcılara yeni model kütüphaneleri oluşturma veya yeni model bileşenleri ekleme konusunda olanak tanımaktadır. Modeli oluşturma ve veri girişi için bir grafik ara yüzü bulunmaktadır. IPSEPRO, SimTech tarafından dağıtılmakta ve servis edilmektedir. Yazılımla ilgili detay bilgilere www.simtechnology.com/IPSEpro/english/IPSEpro.php internet adresinden erişilebilmektedir.

5.11 CSP GES Saha Seçilmesi

Bütün enerji projelerinde saha seçimi büyük önem arz etmektedir. Herhangi bir GES Aday Proje Sahası ararken birçok kriterlere bakılmaktadır. Bu kriterler izleyen sayfalarda verilmektedir. Bu kriterleri 4 ana başlık altında toplanarak incelenebilir. Bunlar Arazi Karakteristikleri, Arazi İdari/Mülkiyet Durumu, Arazi Çevresel Risk Durumu ve Teknik Altyapıdır.

Arazi Karakteristikleri

Arazi karakteristikleri, arazinin bulunduğu coğrafya, topoğrafik yapı ve çevre özellikleri kasdedilmektedir. Aşağıdaki tabloda bu özellikler görülmektedir.

Tablo 5.9. GES arazi karakteristikleri.

Özellik	**Açıklama**
Lokasyon	Koordinatlar, enlem, boylam, yükseklik
Güneş Radyasyonu	Bulunan bölgeye gelen yıllık güneş radyasyonu
Arazi sınıflandırması	Topoğrafya, pürüzlülük, tarım arazisi
Topoğrafya	Arazi eğimi
Toprak yapısı	Geçirimli kayalık, toz
Arazi Gölgelemesi	Arazi civarındaki yükseltiler

Arazi İdari/ Mülkiyet Yapısı

Arazinin idari/mülkiyet yapısı da ülkemizde GES saha seçimi yapılırken dikkat edilmesi gereken hususların başında gelmektedir. Aşağıdaki tabloda verilen hususlara dikkat edilmelidir.

Tablo 5.10. GES arazi idari/mülkiyet yapısı.

Özellik	**Açıklama**
Arazi Mülkiyeti	Şahıs? Kamu?
SİT Durumu	Arazi SİT sınırlarında mı kalmaktadır
ÇED Durumu	Arazi ÇED, ÖÇK konusunda sorun var mı?
TOKİ Durumu	Arazi TOKİ arazisi mi?
TARIM	Arazide tarım yapılıyor mu?
Askeri Araziler	Arazi askeri sınırlarında kalmamalıdır

Arazi Çevresel Risk Durumu

GES proje sahasındaki çevresel riskler aşağıdaki tablo ile özetlenmiştir.

Tablo 5.11. GES çevresel risk durumu.

Özellik	**Açıklama**
Nehir, akarsu	Civardaki en yakın akarsuların bilinmesi gerekir.
İtfaiye	GES sahasına en yakın itfaiye mesafesi
Kimyasal tesir/fabrika	Aday GES sahasına en yakın kimyasal tesis ve fabrika mesafesi
Hava nemliliği ve tuzluk oranı	Sahaya en yakın deniz, büyük su kütlesi mesafesi, hava nemliliği ve tuzluluk oranı
Rüzgar	Aday proje sahasının rüzgar durumu
Diğer meteorolojik koşullar	Yağış, kar, sis vb.
Yıldırım, şimşek	Sahaya yıldırım ve şimşek düşme frekansı
Toz	Sahadaki toz durumu
Saha güvenliği	Sahanın yerleşim yerlerine mesafesi, vandalizm tehlikesi
Havaalanı	Sahanın en yakın havaalanı ile etkileşimi
Sel, heyelan vb	Arazi sel havzasında olmamalıdır

Saha Teknik Altyapısı

Sahanın teknik altyapısı ile dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki tablo ile görülmektedir.

Tablo 5.12. GES saha teknik altyapısı.

Özellik	**Açıklama**
Mevcut Yollar	Sahaya ulaşım
Trafo Merkezi ve enerji nakil hattı mesafe	GES şebeke bağlantısı
İletişim	GES iletişim için gereklidir
Şebeke suyu	GES için gerekli su kullanımı

5.12 CSP Sistemlerinin Kıyaslanması

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan CSP teknolojileri, parabolik oluk (parabolic trough), kule sistemi (solar tower, central receiver) ve çanak/makina (dish/engine) sistemleridir. Herbir CSP teknolojisinin kendine has avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki tabloda özetlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 5.13. CSP teknolojilerinin genel kıyaslanması.

	Parabolik Oluk	**Kule (Merkezi Alıcı)**	**Çanak/Makina**
Uygulama	- Şebekeye bağlı	- Şebekeye bağlı	- Şebekeye bağlı - Ada sistemi (şebekeden bağımsız)
Avantaj	- Ticari olarak en fazla kanıtlanmış - Güneş toplama verimi %60 - Hibrid çalışmaya ve depolamaya uygun	- Verimi yüksek - Hibrid çalışmaya uygun	- Verimi en yüksek - Modülarite - Hibrid çalışmaya uygun - Küçük güçlü de olabilir.
Dezavantaj	- Düşük sıcaklıklar verimi azaltmakta	- Maliyet yüksek Tam anlamıyla ticari olamadı	- Hibrid sistemlerin verimi düşük - Tam anlamıyla ticari olamadı

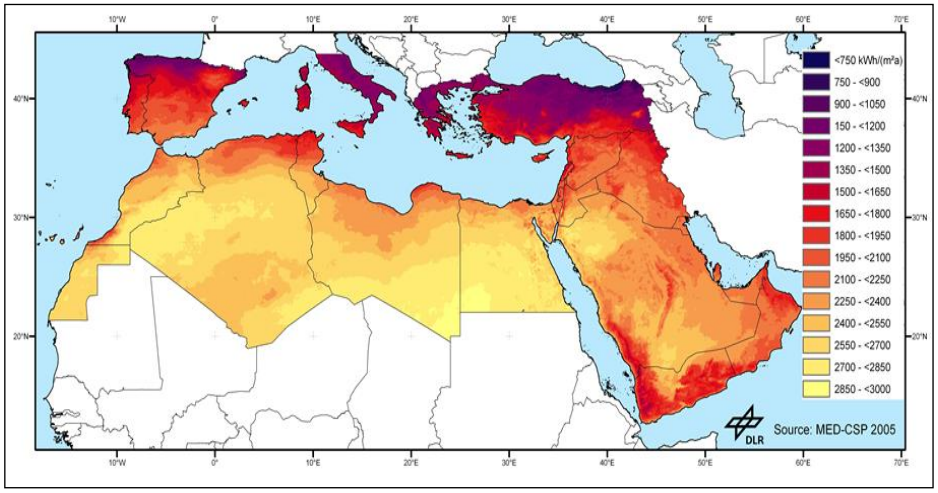
Tablo 5 ile farklı CSP sistemlerine ait teknik kıyaslamalar görülmektedir.

Tablo 5.14. CSP teknolojilerinin teknik kıyaslanması.

Yoğunlaştırma Metodu	**Düz Hat Yoğunlaştırma Sistemli**		**Nokta Yoğunlaştırma**	
CSP Teknolojisi	Parabolik Oluk	Lineer Fresnel	Güneş Kulesi	Çanak/Stirling
Ticari Durumu	Ticari	Yarı ticari	Ticari	Yarı ticari
Güneş Saha Maliyeti (€/m^2)	200 – 500	150 – 200	250 – 300	> 350
Tipik Kurulu Güç (MW)	5 – 200	1 – 200	10 – 100	0.010
İnşaat İşleri	Zor	Kolay	Zor	Kolay
İşletme Sıcaklığı (°C)	390 – 550	270 – 550	550 – 1000	800 – 900
Isı Transfer Akışkanı	Sentetik yağ, su/buhar	Sentetik yağ, su/buhar	Hava, erimiş tuz, su/buhar	Hava
Termodinamik Çevrim Sistemi	Rankine	Rankine	Brayton, Rankine	Brayton, Stirling
Güç Ünitesi	Buhar türbini	Buhar türbini	Gaz türbini, buhar türbini	Stirling makina
İşletme Tecrübesi	Yüksek	Düşük	Orta	Orta
Güvenlik	Yüksek	Orta	Orta	Yüksek
Termal Depolama Malzemesi	Erimiş tuz	Erimiş tuz	Erimiş tuz, seramik	Erimiş tuz, seramik
Arazi Gereksinimi	Yüksek	Düşük	Yüksek	Orta

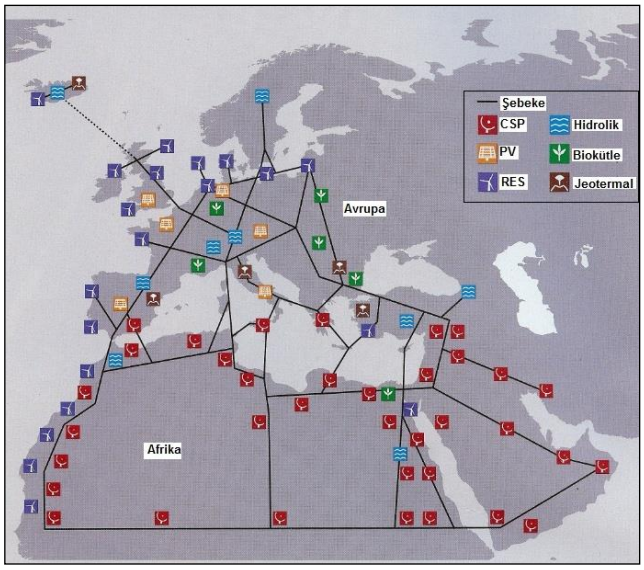
Desertec Projesi

Desertec projesi, başta güneş enerjisi olmak üzere Afrika'daki enerji kaynaklarının Avrupa'ya naklini hedefleyen bir projedir. Güneş enerjisi teknolojisi olarak CSP GES düşünülmektedir. Desertec projesinin düşünüldüğü ülkeler ve güneş potansiyeli aşağıdaki Şekil 5.163 ile görülmektedir.



Şekil 5.163. Desertec ülkeleri güneş potansiyeli.

Desertec projesi, şema ve kullanılacak kaynaklar Şekil 5.164 ile görülmektedir.



Şekil 5.164. Desertec projesi.

KAYNAKLAR

Ahrens, D.C., 1988. Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment, West Publishing Company, USA.

Altony, F., Dürscher, C. ve Remmers, K.H., 2006. Photovoltaics for Professionals, Solarpraxis AG.

Antonopoulos, A., 2009. Canada: The World's Next Booming PV Market? 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

Arya, S.P.S., 1988. An Introduction to Micrometeorology. Academic Press Inc. San Diego, California, 307 p.

Balçık, B., 2003. Yatırım Projelerinin Hazırlanması ve Değerlendirilmesi, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Barry, R.G. and Chorley, R.J., 1998. Atmosphere, Weather & Climate. Routledge Press, USA.

Basore, P.A., 1994. Defining Terms for Crystalline Silicon Solar Cells, Progress in Photovoltaics: Research & Applications, 2, pp. 177-179.

Bayazıt, M, 1996. İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri. İTÜ Yayınları.

Borhan, Y., 1996. Dinamik Meteoroloji Ders Notları, İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Borhan, Y., 1998. İleri Dinamik Meteoroloji Ders Notları, İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Box, G.E.P. ve Jenkins, G.M., 1976. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San Francisco.

Boyle, G., 1996. Renewable Energy Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, New York.

Bradshaw, R.W. ve Siegel, N.P., 2008. molten Nitrate Salt Development for Thermal Energy Storage in Parabolic Trough Solar Power Systems, Proceedings of ES 2008, Jacksonville, Florida, USA.

Breck, K., Kurnik, J. ve Topic, M., 2009. Evaluation of Losses on Energy Yield due to Free Standing PV Systems, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

Brito, M.C., 2009. Evaluation of the Implementation of PV Feed-in Law in Portugal, 24th Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

Building Integrated Photovoltaics: An Overview of the Existing Products and their Fields of Application, Report Prepared by Sunrise.

Castello, S. ve et. al, 2009. PV Market, Industry and Research in Italy, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

Cohen, G.E., Kearney, D.W. ve Kolb, J.G., 1999. Final Report on the Operation and Maintenance Improvement Program for Concentrating Solar Power Plants.

Deger Energie Tracking Systems Product Guide, 2009, Germany.

Duffie, J.A., ve Beckman, W.A., 2006. Solar Engineering of Thermal Proceses. Published by John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.

Durak, M., 2000. Rüzgar Enerji Teknolojisi ve Türkiye Uygulaması: Akhisar Rüzgar Elektrik Santralı. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EPCD, 2001. European Parliament and of the Council Directive 2001\77\EC `On the Promotion of Electricity Produced from Renewable Energy Sources in the Internal Electricity Market`, Official Journal of the European Communities, s. 33-40. Brussel, 2001.

EPK, 2001. 4628 Sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 03/03/2001 tarih ve 24335 Sayılı Resmi Gazete.

EPLY Yönetmelik, 2002. Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, 04/08/2002 tarih ve 24836 Sayılı Resmi Gazete.

Fröding, V., 2009. Photovoltaics in France-An Emerging Market, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

Geyer, M. 2007. Solar Paces Annual Report. Solar Power and Chemical Energy Systems.
Global Market Outlook for Potovoltaics Until 2014, EPIA. Mayıs 2010.
Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008. World Meteorological Organization, WMO No.8.
Instruction Manual SMP Series, Smart Pyranometer, Kipp & Zonen.
Large Utility Scale Solar Generating Facilities (>3MW). Technology, Contractors, Builders, Operators, PV Suppliers, Utilities Financing Prince, B. 2009. Texas.
Kadığolu, M., 1996. Fiziksel Meteoroloji Ders Notları, İTÜ Meteoroloji Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
Kolb, J.G. ve Diver, R.B. 2008. Conceptual Design of an Advanced Trough Utilizing a Molten Salt Working Fluid. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA.
Linares, et. al.., 2009. Three Years Operating 24 MW Grid Connected Facilities in Tenerife (Canary Islands, Spain), 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Linares, et. al.., 2009. Lessons Learned While Installing Multi MW PV Grid-Connected Facilities in Canary Islands (SPAIN), 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Mariyappan, J.,2001. Solar Thermal Thematic Review Draft Report Prepared for the Global Environmental Facility (GEF), Washington, DC.
Market Report 2011. EPIA. February 2012.
Environmental Facility (GEF), Washington, DC.
Özgün, M.N., 1965. Osmanlıca-Türkçe Sözlük, İnkılap ve Aka Kitabevi, 4. Basım, İstanbul.
Photon International, The Solar Power Magazine, 11-2009.
Photovoltaics: Design and Installation Manual, Renewable Energy Education for a Sustainable Future, Solar Energy International, New Society Publishers, 2008.
Pietruszko, S.M., 2009. Status of Photovoltaics (2008) in the European Union New Members, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Pihl, E., Concentrating Solar Power, Royal Swedish Academy of Sciences, Chalmers University, April 2009.
Pirhelyometer Instruction Manual. Kipp & Zonen.
Pivert, L.X., Sicot, L., ve Merten, J., 2009. A Tool for the 24 Hours Forecast of PV Production, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Planning & Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers, The German Energy Society, 2008.
Plataforma Solar de Almeria, Annual Report 2007. Tabernas, İspanya.
Price, A.D.F., 1995. "Financing International Projects", International Labor Organization, Geneva.
PV Status Report 2008, Arnuf Jager Waldan, Joint Research Centre, European Commission, 2008.
Reiche, D., 2002. Handbook of Renewable Energies in the European Union: Case Studies of All Member States, Peter Lang GmbH Press, Almanya.
Reiche, D. and Bechberger, M., 2004. Policy Differences in the Promotion of Renewable Energies in the EU Member States, *Energy Policy*, **32**, 843-849.
Rindelhardt, U., Dietrich, A. ve Rösner, C., 2009. Tracked Megawatt PV Plants: operation Results 2008 in Germany and Spain, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Rubia, F. ve Barda, P., 2008. Concentrated Photovoltaics: The Path to High Efficiency, ISFOC, İspanya.
Sayigh, A., 1999. Renewable Energy – The Way Forward. *Appl. Energy*, **64**, Sep-Dec, 15-30.
Semancik, P. ve Koval, F. 2005. Solar Dish Engine, Technical University of Kosico, Slovak Republic.
Solar Generation 6, Solar Photovaltaic Electricity Empowering The World 2011, EPIA.
Solar Generation V- 2008, Solar Elektricity for Over One Billion People and Two Million Jobs by 2020, European Potovoltaic Industry Association.
Solar Thermal Markets in Europe, Trends and Market Statistics 2008, European Solar Thermal Industry Federation, Mayıs 2009.
Sonvilla, J., Chometza, T., ve et al. 2009. PV Legal – Reduction of Bureaucratic Barriers for Succesful PV Deployment in the EU, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
Stull, R.B., 1998. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishing, The Netherlands.
Sun and Wind Energy, The Magazine for Renewable Energies, 12/2009.

Sun & Wind Energy, The Magazine for Renewable Energies, 1/2011
Sunshine Duration Sensor, Instruction Manual. Kipp & Zonen.
Şen, Z., 2002. Temiz Enerji ve Kaynakları. Su Vakfı Yayınları. İstanbul.
The Parabolic Trough Power Plants Andasol 1 to 3, The Largest Solar Power Plants of the World-Technology Premiere in Europe, Solar Millennium.
Taylor, D., 1995. Energy Resources Package, Open University Publication, England.
Trieb, F., Schillings, C., Sullivan, O., Pregger, M.T. ve Klick, C.H., 2009. Global Potential of Concentrating Solar Power, Solarpaces Conference Berlin, Germany.
Tselepis, S., 2009. The Current State of the PV Market and Industrial Activities in Greece. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
US Solar Industry Year in Review 2008, Solar Energy Industries Association.
U.S. Solar Market Insight, 2010 Year In Review Solar Energy Industries Association, 2010
Waldau, A.J., 2009. PV Status Report 2009. Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics. European Commission Joint Research Center Institute for Energy.
Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., Corkish, R., 2009. Applied Photovoltaics, Earthscan, UK.
Winkler, J. ve Lohr, M., 2009. The German PV Market 2009-Solid Rock in Turbulent Waters, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.

FAYDALI LINKLER:

1. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı http://www.enerji.gov.tr
2. Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu, EPDK http://www.epdk.gov.tr
3. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, EİE http://www.eie.gov.tr
4. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, TEİAS http://www.teias.gov.tr
5. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü www.dmi.gov.tr
6. Uluslararası Enerji Ajansı - International Energy Agency : http://www.iea.org
7. Avrupa Güneş Enerjisi Birliği (www.epia.org)
8. www.gensed.org.tr
9. www.gunese.org

EK I: ÇEVRİMLER

1 metre / saniye (m/s) = 2.237 mil saat (mph)
1 metre / saniye (m/s) = 1.9426 knots (kts)
1 metre / saniye (m/s) = 3.60 kilometre saat (kph)

1 knot = 0.515 metre / saniye (m/s)
1 knot = 1.152 mil saat (mph)
1 knot = 1.85 kilometre saat (kph)

1 mil saat (mph) = 0.447 metre / saniye (m/s)
1 mil saat (mph) = 0.868 knot
1 mil saat (mph) = 1.61 kilometre saat (kph)

	m/s	**km/s**	**mil saat**	**knot**
1 m/s	1.000	3.600	2.237	1.944
1 km/s	0.278	1.000	0.622	0.540
1 mil saat	0.447	1.609	1.000	0.869
1 knot	0.514	1.852	1.151	1.000

Fahrenhayt – Derece Çevrimi = F =1.8 C + 32 = 9/5 C + 32

Derece – Fahrenhayt Çevrimi = C = 0.56 (F -32) =5/9 (F-32)

Hız

Birim	**Çevrilecek Birim**	**Eşitlik**
Meters Per Second (mps)	Miles Per Hour (mph)	mps x 2.24
Miles Per Hour (mph)	Meters Per Second (mps)	mph x 0.447
Knots	Miles Per Hour (mph)	knots x 1.15
Meters Per Second (mps)	Kilometers Per Hour	mps x 3.6

Uzunluk

Birim	**Çevrilecek Birim**	**Eşitlik**
Metre	Feet	Metre x 3.28
Feet	Meters	feet x 0.305
Kilometre	Mile	Kilometre x 0.621
Mil	Kilometre	Mil x 1.609

Alan

Birim	**Çevrilecek Birim**	**Eşitlik**
Square Meters	Square Feet	sq. meters x 10.76
Square Feet	Square Meters	sq. feet x 0.093

Enerji

Birim	**Çevrilecek Birim**	**Eşitlik**
Kilowatts	Watts	Kilowatts x 1000
Watts	Kilowatts	Watts x 0.001

Megawatts	Kilowatts	Megawatts x 1000
Kilowatts	Megawatts	Kilowatts x 0.001
Watts	Btu/hour	Watts x 3.413
Btu/hour	Watts	Btu/hour x 0.293
Kilowatts	Btu/hour	Kilowatts x 3414
Btu/hour	Kilowatts	Btu/hour x 0.000293
Watts	Horsepower	Watts x 0.00134
Horsepower	Watts	Horsepower x 746
Kilowatts	Horsepower	Kilowatts x 1.34
Horsepower	Kilowatts	Horsepower x 0.746

DİĞER BAZI DÖNÜŞÜMLER

Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^{9}
Mega	M	10^{6}
Kilo	k	10^{3}
Milli	m	10^{-3}
Micro		10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Atto	a	10^{-18}

Hecto h 10^{2}
Deca da 10
Deci d 10^{-1}
Centi c 10^{-2}

- **Lenght: m, m/s**
  1 ft = 0.3048 m*
  1 in = 25.4 mm*
  1 mile = 1.609 km
  1 ft/min = 0.00508 m /s*
  1 mile/h = 0.4770 m/s
  1km/h = 0.27778 m/s
- **Area: m^2**
  1 ft^2 = 0.09290304 m^2*
  1 $in.^2$ = 0.00064516 m^2*
  1 $mile^2$ = 2.590 km^2

- **Volume: m^3, m^3/kg, m^3/s**
  (Note: 1 Liter = 10-3 m3.)
  1 ft^3 = 28.32 liters
  1 U.K gal = 4.546 liters
  1 U.K gal = 3.785 liters
  1 ft^3 / lb = 0.006243 m^3 / kg
  1 cfm = 0.4719 liters / s
  1 U.K gpm = 0.07577 liter / s
  1 U.K gpm = 0.06301 liter / s
  1 cfm / ft^2 = 5.080 liters / m^2 s

- **Mass: kg, kg / m^3, kg/s, kg / m^2s**
  1 lb = 0.45359237 kg*
  1 oz = 28.35 g
  1 lb / ft^3 = 16.02 kg / m^3
  1 g / cm^3 = 103 kg / m^3
  1 lb / h = 0.0001256 kg / s

1 lb / ft2 h = 0.001356 kg / m^2s

- **Force: Newton N = kg m / s2, N / m**
- Pascal Pa = N /m2
  1 lbf = 4.448 N
  1 lbf / ft = 14.59 N/ m
  1 dyne / cm = 1 (mN)/m
  1 mm H_2O = 9.80665 Pa*
  1 bar = 105 Pa
  1 psi = 6.894 kPa
  1 in. = H_2o = 249.1 Pa
  1 mm Hg = 3.378 kPa
  1 atm = 101.325 kPa*

- **Energy: Joule J = Nm = Ws, J / kg, J /kg ^{0} C**
  1 kWh = 3.6 MJ*
  1 Btu = 1.055 kJ
  1 therm = 105.5 MJ
  1 kcal = 4.1868 kJ*
  1 Btu / lb = 2.326 kJ / kg*
  1 Btu / lb F = 4.1868 kJ / kg* ^{0}C*
  1 Btu / ft^2 = 0.01136 MJ / m^2
  1 cal / cm^2 = 1 langley = 0.04187 Mj / m^2

- **Power: Watt W = J / s = Nm / s, W/ m^2, W/ m^2 ^{0}C, W / m ^{0}C**
  1 Btu / h = 0.2931 W
  1 kcal / h = 1.163 W*
  1 hp = 0.7457 kW
  1 ton refr. = 3.517 kW
  1 W / ft^2 = 10.76 W / m^2
  1 Btu / h ft^2 ^{0}F = 5.678 W/ m^2 ^{0}C
  1 Btu / h ft^2 ^{0}F / in. = 0.1443 W/ m^2 ^{0}C
  1 Btu / ft^2 h = 3.155 W / m^2

- **Viscosity: Pa s = N s / m^2 = kg / m s**
  1 cP (centipoise) = 10^{-3} Pa s
  1 lbf h / ft^2 = 0.1724 MPa s

1kWh	3.6 × 10^6 J
1 hp (beygir gücü)	746 W
1 Btu	1.055 kJ
1 yıl	8765.8 saat
1 saat	3600 saniye
1 yıl	3.157 x 10^7 saniye
1 kWh/m^2	1 Pik Güneş Saati
1 kWh/m^2	3.6 MJ/m^2
1 kWh/m^2	0.0116 Langley
1 kWh/m^2	860 cal/m^2
1 MJ/m^2/gün	0.01157 kW/m^2
1 kW/m^2	100 mW/cm^2
1 ft^2	0.093 m^2

EK II: SÖZLÜK

Absorber: 1. Fotovoltaik modülün içindeki fotonları emen (absorbe) materyaldir.
2. Güneş termik santrallarında (CSP) güneş ışığının yansıttığı ve içerisinden ısı transfer akışkanının (heat transfer fluid) geçtiği tüptür.

Ambient Temperature: Civar Sıcaklığı

Amorphous: Yunanca "şekilsiz" anlamına gelmektedir. Amorphous materyalde atomlar düzensiz haldedir ve dolayısı ile Kristal bir yüzey oluşamamaktadır.

Amorphous Semiconductor: Kristalin olmayan yarı iletken

Amorphous Silicon: İnce film silikon PV hücresi olup kristalin yapısı bulunmamaktadır.

Azimut Açısı: Gerçek güney ile güneşin altındaki ufuk noktası arasındaki açıdır.

BAPV (Building Adapted Photovoltaics): Binaların dış cephelerine bina yapıldıktan sonra uygulanan PV sistemlerine verilen addır.

BIPV (Building Integrated Photovoltaics): Binaların dış cephelerini bina yapılmaya başlarken planlanan ve bina ile birlikte uygulanan PV sistemlerine verilen addır.

Boron: PV modül veya hücrelerde Dopant olarak kullanılan kimyasal elementtir.

Cadmium (Cd): Bazı tip güneş hücreleri yapabilmek için kullanılan kimyasal elementtir. Pil üretimi ile galvanizli koruma da kullanılır.

Cadmium Telluride (CdTe): Polikristalin incefilm PV materyalidir. Yüksek derecede absorbe etme özelliği bulunan yarı iletkendir.

Cell: Hücre. Kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren tek ünite elektromekanik elemandır. DC (doğru akım) üretirler. Herhangi bir pil, birkaç hücreden oluşarak daha yüksek voltaj üreten bir sistemdir.

Collector: Kollektör. Güneş enerjisini toplayan sistemin adıdır.

Concentrating Photovoltaics (CPV): Yoğunlaştırıcı fotovoltaik sistem klasik fotovoltaik sistemlerinin yerini alacağı düşünülmektedir. Verimi daha yüksektir.

Concentrating Solar Power (CSP): Yoğunlaştırıcı Güneş Enerjisi. 2 ana temel güneşten elektrik enerjisi elde eden teknikten birisidir. Termik santrallardaki prensiplere göre çalışır.

Converter: Doğru akım (DC) voltajın diğer bir doğru akım voltajına çeviren cihazdır.

Cooling Tower: Soğutma kulesi.

Diffuse Insolation: Güneş ışığının indirek olarak yansıtılmasından dolayı alınan radyasyondur. Örneğin bulutlar tarafından saçılma, sis, toz vb gibi olaylar neticesinde meydana gelen ışınımdır.

Diffuse Radiation: Atmosfer ve yeryüzü tarafından saçılan ve yansıtılmadan sonra alınan radyasyon.

Direct Radiation (veya Direct Beam Radiation): Güneş ışınları tarafından direkt olarak gelen radyasyondur. Pirheliyometre (pyrheliometer) tarafından ölçümü yapılmaktadır.

Direkt Insolation: Doğrudan Kollektör üzerine düşen güneş ışınlarıdır.

Doped: Yarı iletken materyallere küçük miktarda eklenen kimyasal elementtir. Konulduğu maddenin elektriksel özelliklerini değiştirme özelliğine sahiptir. İki türlü dopant bulunmaktadır. n-doped, daha fazla elektron; p-doped, elektron boşluğu yaratmaktadır.

Doping: Güneş hücresi üretimi sürecinde yarıiletken (örneğin silikon) doping olmasının anlamı; kimyasal elementler eklenerek pozitif veya negative yükle yüklenmeleridir. Pozitif yüklenme durumunda "p-doped" adını alırken; negative yüklenme durumunda da "n-doped" olarak adlandırılmaktadır. Elektrik bu p ve n tip tabakalar arasındaki birleşimden (junction) meydana gelmektedir. Doping işlemi olmaz ise elektrik üretilemez ve yarıiletken malzeme yalıtkan olarak davranır.

Down time: PV sistemin elektrik üretmemesidir. Yıl içerisinde saat veya yüzde olarak verilmektedir.

Equinox: Ekinoks. Yılda iki kez meydana gelen ve güneşin ekvatoru kestiği gün ve gecenin eşit olduğu durumdur. 21 Mart ilkbahar ekinoksu; 23 Eylül sonbahar ekinoksudur.

Fill Factor: PV hücresinin aktüel üretiminin kurulu gücüne oranı olup, hücre performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametredir.

Fixed Tiltaway: Yatay olarak sabit açıya ayarlanmış PV serisidir.

Flat Plate Array: Yoğunlaştırıcı (CPV) dizisi olmayan PV'lerdir.

Flat Plate Module: PV hücrelerinin katı yüzey üzerine ve güneş ışığına doğrudan maruz kalacak şekilde yerleştirilmiş halidir.

Flexhoses: Esnek hortumlar.

Fresnel Lens: Güneş ışığını optik mercek gibi büyütme özelliğine sahip sistemdir.

Full Sun: Tam öğle vaktinde ve açık gökyüzü koşullarında güneş ışığından elde edilebilen güçtür ve yaklaşık değeri 1000 W/m^2 dir.

Gallium: Bazı güneş hücre ve yarı iletken malzemelerin yapımında kullanılan kimyasal elementtir.

Gaillium Arsenide (GaAs): Yüksek verimli kristalin karışım olup, bzı güneş hücre ve yarı iletken malzeme yapımında kullanılmaktadır.

Ground Mounted: PV GES sistemlerinin bina değil de toprak üzerinde olan sistemlerine denilmektedir.

Heat Collection Element: Isı toplama elemanı. Özelliklerde parabolik oluk CSP GES'lerde absorber tübe denir.

Heat Exchanger: Eşanjör. Eşanjör, ısı enerjisini bir ortamdan diğer bir ortama transfer edebilen sistemdir.

Heat Pump: Isı pompası. Isıyı atmosfer, su veya topraktan alan sistemdir.

Heat Transfer Fluid (HTF): Isı transfer akışkanı. Özelliklerde parabolik oluk CSP GES'lerde absorber tüp içerisinde güneş sahası boyunca ısıtılarak alıcıya verilen ısıtılmış akışkandır ve sıcaklığı 400 °C olabilmektedir. Isıyı kollektörden eşanjöre taşır.

Incident Light: Solar hücre veya modülün üzerine düşen ışıktır.

Insolation: Watt/m^2 olarak verilen ve herhangi bir yüzey üzerine etkiyen anlık güneş enerjisi yoğunluğudur.

Inverter: Doğru akımı alternatif akıma çevirmeye yarayan cihazdır.

Ion: Elektrikle yüklenmiş atom veya atom gruplarıdır. Elektron kazanmış veya kaybetmiş olabilirler. Elektron kaybı pozitif yükleme, elektron kazanımı da negatif yüklenmeye sebep olmaktadır.

Irradiance: Herhangi bir yüzeye çarpan direk, diffüze ve yansıtılmış güneş radyasyonudur. Genellikle kW/m^2 olarak verilir. Zaman ile çarpımı insolationu verir.

Isohel: Eş güneşlenme sürelerini gösteren eğridir.

Isorad: Eş solar radyasyon eğrisidir.

ISPRA Guidelines: İtalya İspra'da Joint Research Centre of the Commission of the European Communities tarafından yayınlanan PV GES'ler ile ilgili kuralları içeren rehberlerdir.

I-V Curve: PV'nin akım ile geriliminin gösterildiği grafiktir. Eğrinin şekli hücre performansının karakteristiklerini göstemektedir.

Langley (L): Güneş irradiyans birimidir; santimetrekareye 1 gram kaloridir.

$$1\ L = 85.93\ kWh/m^2$$

Maximum Power Tracking: İşletmedeki PV GES'e ait pik enerji üretim noktasıdır.

Modularity: Birden fazla inverterin paralel olarak bağlanarak farklı yüklerde çalışması halidir.

Molten Salt: Erimiş tuz.

Multicrystalline: Farklı yönlerde konulmuş, küçük ve bağımsız kristallerin oluşturduğu yarı iletkenlerdir. PV GES'lerde kullanılır. Bazen polycrystalline veya semiorystalline olarak da anılır.

Panel: Güneş modüllerinin birleşmesinden meydsns gelen yapıdır.

Parabolic Trough CSP: Parabolik oluk CSP GES.

Photon: Bağımsız enerji birimi olarak hareket eden ışık parçacığıdır. Elektromanyetik radyasyonun miktarıdır.

Photovoltaics (PV): Işık enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümüdür.

Photovoltaics Array: Birbirine bağlı PV sistemlerinin oluşturduğu PV modülleridir. Tekbir elektrik üretim ünitesi gibi davranırlar.

Photovoltaic Conversion Efficiency: PVden üretilen elektriğin güneş ışığındaki güce oranıdır.

Photovoltaic Device: Güneş enerjisinin elektrik enerjisine çeviren sistemdir. Doğru akım elektrik üretmektedir. Yarı iletken maddeler olan silicon, cadmium sulfide, cadmium telluride ve gallium arsenide elementlerinden imal edilmektedirler. Tek kristalin, multi kristalin veya amorphous formlarında olmaktadırlar.

Photovoltaic Effect: Işık hüzmesinde bulunan fotonların elektronlarla çarpışması sonucu atom kaybetmeleridir. Işığın bu yapısı, yarı iletkenler ile birleştirildiğinde gerilim oluşur ve bu gerilim daire içinde döndürüldüğünde de akım akışı başlayarak elektrik üretimi mümkün hale gelir.

Photovoltaic Module: Solar hücre ve diğer kablo, terminal vb gibi diğer parçaların oluşturduğu PV GES'teki en küçük elektrik üretim birimidir.

Photovoltaic Panel: Genellikle PV Modülü ile karıştırılmaktadır. PV Modüllerin fiziksel olarak birleştirilmesi halidir.

Photovoltaic system: Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren komple sistemdir.

Photovoltaic Thermal (PV/T) System: Güneş enerjisini elektrik enerjisi ve su ısıtma için (ısı enerjisi) kullanılan hibrid sistemdir.

Piranometre: 300 ile 3000 nm arasındaki spektrumdaki global güneş radyasyonunu ölçmede kullanılan sensördür.

Pyrheliometer (Pirhelyometre): 300 ile 3000 nm arasındaki spektral aralıkta direk güneş radyasyonunu ölçen sensördür.

Pyrgeometer: Pirgeometre, 5 ile 50 nm arasındaki spektral aralıkta global güneş ve atmosferik radyasyonunu ölçmeye yarayan sensördür.

PSA: Plataforma Solar de Almeria.

SEGS: Solar Electricity Generation System.

Solar Cell (PV Cell): Güneş hücresidir. Güneş enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan en küçük birimdir.

Solar Collector Assembly (SCA): Güneş kollektör unitesi.

Solar Constant: Güneş sabiti.

Solar Field: Güneş sahası.

Solar Multiple: Güneş çarpanı. Güneş kollektör sistemi (heliostat sahası ve alıcı) tarafından sağlanan termal gücün, jeneratör tarafından verilen pik termal güce oranına güneş çarpanı olarak adlandırılmakadır.

Solar Thermal Electric Systems: Güneş enerjisi elektrik enerjisine çevriminde termodinamik süreçlerinde bulunduğu sistemlerdir. Bu sisteme en iyi örnek Concentrating Solar Power (CSP) verilebilir.

Stand Alone System: Şebekeden bağımsız ve genellikle uzak bölgelerde kullanılan sistemlerdir.

Termophile : Termofil, termal algılayıcı sensördür

Thin Film: İnce film.

Ultraviolet: Dalgaboyu 4 ila 400 nanometre arasında olan elektromanyetik radyasyon

Wafer: Çok ince dilimli haldeki yarı iletkendir. Tek bir kristal veya ingottan kesilir.

Zenith Angle: Çalışılan yön ile (örneğin güneş) tam tepedeki hiza arasındaki açıdır.

Dr Murat Durak Özgeçmiş

Murat Durak 1971 yılında Urfa'da doğmuştur. 1997 yılında İTÜ Meteoroloji Mühendisliğinden mezun olmuştur. Aynı bölümde rüzgar enerjisi konusunda yüksek lisans ve doktora yapmıştır.

Profesyonel anlamda iş kariyerine 1997 yılında AKEN Akhisar Enerji Uretim San. ve Tic. A.Ş.'de Rüzgar Enerjisi Koordinatörü olarak başlayıp 4 yıl süre ile görev yapmıştır. 2001 yılında Almanya merkezli uluslararası bir şirket olan Umweltkontor Renewable Energy AG'nin Türkiye'de açmış olduğu Umweltkontor Yenilenebilir Enerji A.Ş.'ye Ülke Müdürü olarak işe başlamış ve Kıdemli Proje Müdürü olarak yurtdışı görevlendirmelerinde çalışmıştır. Başta Almanya olmak üzere; Yunanistan, Belçika ve Fransa'da rüzgar proje geliştirme konusunda çalışmıştır. 2004 -2008 yıllarıa arasında GAMA Güç Sistemleri AŞ'de proje müdürü olarak çalışmış ve GAMA Enerji AŞ'nin rüzgar elektrik santral projelerini geliştirmiştir.

2008 yılından bu yana Enermet Enerji Meteoroloji Mühendislik AŞ'yi kurarak aynı şirkette Genel Müdür olarak çalışmalarına devam etmektedir.

Dr Murat Durak, bir çok rüzgar elektrik santral projesi geliştirmiş ve yönetmiştir. Çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluş ve organizasyonlarda aktif olarak görev alan Durak, rüzgar enerjisi alanında Türkiye'nin en büyük sivil toplum kuruluşu olan Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği'nin 2007-2011 yılları arasında Yönetim Kurulu Başkanlığı'nı yürütmüştür. Almanya, Kazakistan ve Suudi Arabistan'da çalışmıştır.

Mesleği ile alakalı bir çok makale ve rüzgar ve güneş enerjisi ile ilgili kitapları bulunmaktadır.

Evli ve 2 çocuk babasıdır.