

**T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TÜRKİYE'DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN
ÜRETİM POTANSİYELİNİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ
AÇISINDAN BELİRLENMESİ**

YÜSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Anıl KAYA

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

OCAK 2016

T.C.

İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TÜRKİYE'DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN
ÜRETİM POTANSİYELİNİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ
AÇISINDAN BELİRLENMESİ

YÜSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Anıl KAYA
Y1413.080015

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

OCAK 2016



T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı **Y1413.080015** numaralı öğrencisi **Ahmet Anıl KAYA**'nın "**TÜRKİYEDEKİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİ ÜRETİM POTANSİYELİNİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN BELİRLENMESİ**" adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 19.01.2016 tarih ve 2016/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından *aybır.13* ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak *kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

İmzası

Tez Savunma Tarihi : 28.01.2016

1)Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zafer UTLU

Zafer UTLU

2) Jüri Üyesi : Prof. Dr. H. Erol AKATA

H. Erol AKATA

3) Jüri Üyesi : Prof. Dr. Olcay KINCAJ

Olcay KINCAJ

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.



YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “**TÜRKİYE’DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN ÜRETİM POTANSİYELİNİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN BELİRLENMESİ**” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (28/01/2016)

Aday / İmza



Sözlüme ve Aileme,



ÖNSÖZ

Fotovoltaik etki uzun zamandan beri biliniyor olmasına rağmen, işlevi olan ilk silisyum fotovoltaik hücre ancak 1957 yılında, Bell laboratuvarların da üretilmiştir. İlk uygulama deneyleri hayal kırıklığına uğratmıştır. Fotovoltaik ile ilgili yaygın görüş şuydu:sunduğu enerji çok az, güvenli değil ve her şeyden önce çok fazla maliyetli. Ayrıca kuş pisliklerinin modüllerin çalışmasını fazla etkileyeceği gibi görüşler önü sürülmüştür.

Ancak fosil ve nükleer enerji kaynaklarının tükenebilir oluşu ve çevreye verdiği zararları hakkındaki bilincin gelişmesi ile birlikte fotovoltaik hücrelere duyulan ilgi yeniden artmaya başlamıştır. Yeryüzündeki kullanımın başlangıcı yinede çok zordu; hücreler çok pahalıydı, ancak uzay uygulamalarında yaygınlaşmasını sağlayan özellikler sayesinde küçüğe olsa bir piyasa oluşmuştur. O yıllarda, fotovoltaik teknolojinin şebekeye bağlı diğer enerji türlerine rekabet edebileceği duruma geleceği kimsenin aklına gelmezdi. Fakat o güne kadar kullanılan nükleer ve fosil enerji kaynaklarının sürdürülebilir kaynaklar olmadığı anlaşılınca, fotovoltaik sektöründe bir dönüm noktası meydana gelmiştir.

Fotovoltaik teknolojinin günümüzdeki durumu,daha çok ileri gidecek bir büyümenin sadece başlangıcıdır. Bunun böyle olduğu çok sayıda çalışmayla belgelenmiştir. Bu çalışmalardan bir tanesi, Avrupa da 2030 yılı için 200 Gigawatt'lık kurulu güç olacağı tahmininde bulunmaktadır. Buna göre dünya çapında aynı yıl toplam kurulu gücün 1000 GW sınırını geçeceği bekleniyor. Ancak o tarihten sonra da gelişim aynı hızla devam edecektir. Bu çalışmamda Türkiye'deki Fotovoltaik enerji santrallerinin enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında ve tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Yenilenebilir enerji uzmanı Sayın Kurtuluş BOY'a,Yazılım mühendisi Yiğit NUHUZ'a, Mekatronik mühendisi Barış İLDAŞ'a ayrıca bu tez konusunu araştırmam için bana veren ve güneş enerjisi hakkında bilgilenmemi sağlayan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Zafer UTLU'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ocak 2016

Ahmet Anıl Kaya
(Makine Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	Viii
İÇİNDEKİLER	X
KISALTMALAR	XIV
ÇİZELGE LİSTESİ.....	XVI
ŞEKİL LİSTESİ.....	XVIII
ÖZET.....	XXii
ABSTRACT	XXIV
1 . GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	1
1.2 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Santralleri	2
1.3 Fotovoltaik Teknolojisi	3
1.3.1 Fotovoltaik teknolojinin tarihi.....	3
1.3.2 Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi	5
1.3.3 Fotovoltaik hücre türleri	6
1.3.3.1 Kristal yapıli silisyum hücreleri	7
1.3.3.2 İnce film hücreleri	27
1.3.3.3 Nano dokulu fv hücreleri.....	37
1.4 Tezin Amacı	41
2. FOTOVOLTAİK TESİSLERİN BİLEŞENLERİ	43
2.1 Fv Modüller	43
2.1.1 Hücre dizilmesi	43
2.1.1.1 İnce film hücrelerinde entegreli seri bağlantılı dizilim	46
2.1.2 Cam ve hücre kapsüllenmesi	47
2.1.2.1 Etilen vinil asetat (eva) ile kaplama	50
2.1.2.2 Poli vinil butiral (pvb) ile kaplama.....	51
2.1.2.3 Poli tetra fluor etilen (ptfe) ile kaplama	52
2.1.2.4 İyonomer ile kaplama	52
2.1.2.5 Döküm reçine (tpu, akrilat) veya silikon (tpse) ile kaplama	52
2.1.2.6 Yeni modül yaklaşımları	53
2.1.2.7 Modül bağlantı kutusu ve modül bağlantı kablosu	54
2.1.3 Fv modüllerin tasarım olanakları	55
2.1.3.1 Hücre tipi ve biçimi	57
2.1.3.2 Hücre düzeni ve saydamlık	58
2.1.3.3 Arka yüz folyosu ve ön kontaklar	58
2.1.3.4 Cam ebadı ve biçimi	58
2.1.3.5 Cam türü: bina dış cepheleri için çok fonksiyonlu modüller	59
2.1.3.6 Akrilik veya poli karbonat camdan oluşan özel yapıli modüller.....	60
2.1.4 Devre sembolü	61
2.1.5 Modül karakteristikleri	61
2.1.6 Modül parametreleri	63

2.1.7	Işınım ve sıcaklığa bağlılık	64
2.1.8	Hot spot, köprüleme diyotları ve gölgelenme etkisi	66
2.1.9	İnce film modüllerinin elektrik özellikleri	69
2.1.10	FV modüllerin birbirine bağlanması	72
2.2	Jeneratör Bağlantı Kutusu, Dizi Diyotları ve Dizi Sigortaları	72
2.3	Eviriciler	75
2.3.1	Devre sembolü ve işlevi	75
2.3.2	Şebeke etkileşimli eviriciler	77
2.3.3	Şebeke etkileşimsiz eviriciler	79
2.3.4	Eviricilerin anma parametreleri, karakteristikleri ve özellikleri	80
2.3.4.1	Evirme verimi / η_{UM}	80
2.3.4.2	Statik verim / η_{WR}	80
2.3.4.3	Euro verimi η_{Euro}	81
2.3.4.4	Kaliforniya verimi η_{cec}	83
2.3.4.5	Toplam verim (tot)	83
2.3.4.6	Çalışma verilerinin toplanması	85
3.	ŞEBEKEYE BAĞLI TESİSLERİN PLANLANMASI VE TASARLANMASI	87
3.1	Tesis Büyüklüğü ve Modül Seçimi	87
3.2	Tesis Konseptleri	88
3.2.1	Merkezi değişim eviricisi konsepti	89
3.2.1.1	Küçük gerilim konsepti	89
3.2.1.2	Yüksek gerilimli konsept	90
3.2.1.3	Asıl-bağımlı (master-slave) konsepti	90
3.2.2	Dizi eviricileri ve kısmi jeneratör konsepti	91
3.2.2.1	Takım konsepti	92
3.2.3	Çoklu mpp regülatörü konsepti	93
3.2.4	Modül eviricisi konsepti	93
3.2.4.1	Dc-bus konsepti	95
3.3	Eviricinin Kurulum Yeri	96
3.4	Evirici Boyutlaması	97
3.4.1	Güç boyutlaması	97
3.4.2	Gerilim boyutlaması	99
3.4.2.1	Bir Dizi İçinde Maksimum Modül Sayısı	100
3.4.2.2	Bir Dizi İçinde Minimum Modül Sayısı	101
3.5	Tesis Konseptleri	102
3.5.1	Dizi sayısının belirlenmesi	102
3.6	Kazanç Tahmini	103
3.7	Uluslar arası Standartlar	106
4	TÜRKİYE'DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ	107
4.1	Türkiye'de Güneş Enerjisi Uzerine Araştırma Yapan Üniversite, Kurum ve Kuruluşlar	109
5	ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ	111
5.1	Enerji Analizi (Birinci Kanun)	111
5.1.1	AC çıkış gücü	112

5.1.2	Performans oranı.....	113
5.2	Ekserji Analizi (İkinci Kanun)	113
5.2.1	Ekserjiye sebep olan faktörler.....	113
5.2.1.1	İş transferine bağlı ekserji	113
5.2.1.2	Isı transferine bağlı ekserji	114
5.2.1.3	Maddenin Kararlı Akışına Bağlı Ekserji	114
5.2.2	Ekserjinin bileşenleri	115
5.2.2.1	Kinetik ekserji	115
5.2.2.2	Potansiyel ekserji.....	116
5.2.2.3	Fiziksel ekserji.....	116
5.2.2.4	Kimyasal ekserji	117
5.2.2.5	Ekserjitik verim	118
5.2.3	Kapalı sistemler için ekserji analizi	118
5.2.4	Ekserji verimi.....	120
5.2.4.1	Giren ekserji	120
5.2.4.2	Çıkan Ekserji	121
5.3	Türkiye'deki Güneş Enerjisi Santrallerinin Enerji ve Ekserji Analizi Programının Çalışma Prensipleri.....	123
5.3.1	Ekserji verimi.....	125
5.3.1.1	Giren ekserji	126
5.3.1.2	Çıkan ekserji.....	126
5.4	Türkiye'nin Güneş Enerjisi Verilerinin Analizi.....	129
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	146
	KAYNAKLAR	148
	ÖZGEÇMİŞ.....	150



KISALTMALAR

%	:Yüzde
µm	:Mikrometre
V	:Volt
°C	:Santigrad derece
AC	:Alternatif akım
DC	:Doğru akım
A	:Amper
I	:Akım
M	:Metre
M²	:Metre kare
Mm²	:Milimetre kare
W	:Watt
MW	:Megawatt
kW	:Kilowatt
K	:Kelvin
TÜBİTAK	:Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
DME	:Devlet Meteoroloji Enstitüsü
EİEİ	:Elektrik İşleri Etüt İdaresi
CIS	:Bakır-İndiyum-Diselenid
TEDAŞ	:Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEİAŞ	:Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
DSİ	:Devlet Su İşleri
GES	:Güneş Enerji Santrali
GRD	:Güneş Radyasyon Dağılımı
PV	:Fotovoltaik
YEGM	:Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Sıcaklık faktörleri için dönüşüm formülleri	102
Çizelge 4. 1: Türkiye'nin aylık güneşlenme süresi ve güneş enerji potansiyeli.....	108
Çizelge 5. 1: Marmara Bölgesi'nin Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü	131
Çizelge 5. 2: Ege Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü	132
Çizelge 5. 3: Akdeniz Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü.....	133
Çizelge 5. 4: İç Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü	134
Çizelge 5. 5: Karadeniz Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü.....	135
Çizelge 5. 6: Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü.....	136
Çizelge 5. 7: Güney Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü.....	137
Çizelge 5. 8: Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m ² - yıl olarak karşılaştırılması[3]	137
Çizelge 5. 9: Marmara bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi	139
Çizelge 5. 10: Ege bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi.....	140
Çizelge 5. 11: Akdeniz bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi	141
Çizelge 5. 12: İç Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi	142
Çizelge 5. 13: Karadeniz bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi	143
Çizelge 5. 14: Doğu Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi	144
Çizelge 5. 15: Güney Doğu Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi.....	145



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Tekli kristal hücrelerin renk çeşitleri	11
Şekil 1.2: Serigrafik baskı yöntemi ve saturn teknolojisinin karşılaştırılması: ön yüz kontakları ve yüzey dokusu üretimi	12
Şekil 1.3: Serigrafik ön yüz kontaklı çoklu kristal yapıları bir FV hücre.....	13
Şekil 1.4: Elli mikrometre kalınlığında silisyum dilimi. Bu dilim tekli kristal yapıları bir dilimden "kopartılarak" meydana getirildi.	14
Şekil 1.5: İyileştirilen hücre yapısı	16
Şekil 1.6: Pluto FV hücresi [Suntech Power]	18
Şekil 1.7: MWT hücresinin yapısı	20
Şekil 1.8: Maxis BC+ MWT arka kontak hücresi, 5 inç [Photovoltch].....	20
Şekil 1.9: EWT hücresinin yapısı	21
Şekil 1.10: Arka yüzey kontaklı (IBC) FV hücrenin yapısı.....	22
Şekil 1.11: Beyaz ve gri arka folyolu, ön kontaklı modüller [SunPower]	23
Şekil 1.12: Sun Power hücresinin kontak çizgili arka yüzü ve koyu renkli	23
Şekil 1.14: Transparan Sunvays Solar Celi hücresinin frezeli çukurlu	25
Şekil 1.13: Farklı yansıma önleyici kaplamalı, frezeli çoklu kristal yapıları	25
Şekil 1.15: Küresel hücrenin yapısı[1]	26
Şekil 1.16: Sliver Cells şerit hücreleri ve modüllerinin üretimi	27
Şekil 1.17: ince film modüllerine mahsus tipik şerit görünümü, örnek: CdTe'li modül [First Solar]	29
Şekil 1.18: Amorf bir hücrenin katman yapısı.....	30
Şekil 1.19: Metal folyo bazlı, trapez sac profillerine yapıştırılmış olan, esnek amorf modüller [Hoesch Contecna; modül üreticisi: United Solar].....	31
Şekil 1.20: CSG FV hücrelerinde katman yapısı.....	34
Şekil 1.21: Bir CIS hücresinin katman yapısı.....	35
Şekil 1.22: İspanya'da, odaklayıcı FV hücreli, 500 kW kapasiteli santral [Concentrix]	40
Şekil 2.1: Standart modüllerde dolambaçlı hücre bağlantısı	43
Şekil 2.2: Kristal yapıları FV hücrelerde harici seri bağlantısı.....	43
Şekil 2.4: Dizilerin lehimlenmesi	44
Şekil 2.3: Otomatikleştirilmiş hücre dizme İşlemi [Scheuten Solar]	44
Şekil 2.5: Dizi otomatından bir görünüş [Solarwatt].....	45
Şekil 2.6: polimere gömülü bakır tel ızgaralı hücre kontaklaması; sağda: Day4 hücrelerinde gölgelenme duyarlılığını düşüren hücre dizilmesi [Day4 Energy]	45
Şekil 2.7: Amorf silisyum ya da CIS malzemeden İnce Film hücrelerinin entegreli seri bağlanması.....	46
Şekil 2.8: Yansıma önleyici camlar: Solda: desenli Albarino P camı, derin piramit biçimli yüzeyli; sağda: dokulamalı desenli Albarino S camı [Saint-Gobain Glass]..	48

Şekil 2. 9: Çift camlı modül (EVA).....	50
Şekil 2.10: Üçlü camlı modül (dökme reçineli ince katman hücreleri).....	53
Şekil 2.11: Köprüleme diyodu bulunmayan bağlantı kutusu [Speisberg].....	55
Şekil 2.12: Tam otomatik modül kontaklaması için modül bağlantı kutusu [PhoenixContac].....	55
Şekil 2.13: Özel yapılı bükümlü cam modülü: soğuk bükümlü çift cam modülü (dökme reçine) ankrajlarla bu biçimde tutulur.....	57
Şekil 2.14: Yalıtımlı cam yapısına dahil edilmiş olan FV modüller [Scheuten Solar].....	59
Şekil 2.15: Frankfurt 1999 Uluslararası Otomobil Fuarı Akrilik cam modül üreticisi: Sunovation	60
Şekil 2.16: Seri bağlı üç tane FV hücrenin akım ve gerilim karakteristiği.....	61
Şekil 2.17: Tekli kristal yapılı 50 W kapasiteli bir modülün karakteristiği.....	62
Şekil 2.18: Farklı ışınım ve sabit sıcaklık koşulları altında geçerli modül.....	64
Şekil 2.19: Farklı modül sıcaklıklarında ve 1.000 W/m ² 'lik sabit ışınımında geçerli modül karakteristikleri	65
Şekil 2.20: Bir tüketicinin bağlı olduğu bir FV modül.....	66
Şekil 2.21: 36 hücreli ve iki köprüleme diyotlu standart bir modülde bir hücrenin gölgelenmesi	67
Şekil 2.22: Bir adet köprüleme diyotlu modül bağlantı kutusu [Multi-Contact].....	68
Şekil 2.23: Bir modülün köprüleme diyotlu bağlantı kutusu.....	68
Şekil 2.24: Amorf ince film modüllerinin tipik karakteristikleri	70
Şekil 2.25: İnce film modüllerinin kristal yapılı modüllere ile karşılaştırılan gölgelenme duyarlılığı [Solarpraxis].....	71
Şekil 2.26: FV modüllerin seri bağlanması	72
Şekil 2.27: Jeneratör bağlantı kutusunda yer alan dizi diyotları ve dizi sigortaları...	73
Şekil 2.28: Jeneratör bağlantı kutusu ve toplayıcı kutu.....	75
Şekil 2.29: FV tesislerin tek ve üç fazlı eviricilerle şebekeye.....	76
Şekil 2.30: Şebeke etkileşimli evirici	78
Şekil 2.31: Şebeke etkileşimsiz evirici	79
Şekil 2.32: NT4000 modeli trafosuz ve IG 30 modeli trafolu bir eviricide farklı giriş gerilimlerinde ölçülen toplam verimler.....	84
Şekil 2.33: Çalışma verisi toplama fonksiyonlu ve bilgisayar arayüzlü modül eviricisi [Dorfmueller]	85
Şekil 3.1: Dört bağlantı kablosuna sahip modüllerin paralel devresi	89
Şekil 3.2: Münih fuar binasının 1 MW FV tesisi [Siemens]	91
Şekil 3.3: Herne'deki eğitim akademisinde bulunan 1 MVV'lık FV tesisinde dizi eviricisi [Scheuten Solar]	92
Şekil 3.4: Çoklu MPP Regülatörü Konsepti	93
Şekil 3.7: Berlin'de modül eviricilerine sahip ön	94
Şekil 3.5: Modül eviricisi konsepti	94
Şekil 3.6: Modül eviricisi [NKF].....	94
Şekil 3.8: Entegre MPP izleyicilerine sahip modül bağlantı kutuları solda: SolarEdge firmasının Powerbox kutusu ve sağda: National Semiconductor firmasının Solar Magic Box kutusu	95

Şekil 3.9: Evirici için genelde en uygun kurulum yeri bodrumdur	96
Şekil 3.10: PV jeneratörü eğrileri ve eviricinin çalışma.....	100
Şekil 3.11: Şebeke bağlantılı bir FV tesisin enerji akış diyagramı.....	103
Şekil 4.1: Türkiye Ortalama Güneşlenme Süreleri.....	107
Şekil 4.2: Türkiye'nin güneş haritası (kWh/(m ² .yıl)).....	108
Şekil 5. 1: Sistem Sınırından Girip Çıkan Madde Akışının Ekserji Bileşenleri.....	115
Şekil 5. 2: Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının.....	123
Şekil 5. 3: Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının seçilen ile göre kurulu gücün girilmesi	124
Şekil 5. 4: Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının seçilen ile göre kurulu gücün girilmesinden sonraki analiz sonuçları.	124
Şekil 5. 5: Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası	129



TÜRKİYE'DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN ÜRETİM POTANSİYELİNİN ENERJİ VE EKSERJİ VERİMLİLİĞİ AÇISINDAN BELİRLENMESİ

ÖZET

Güneş enerjisi santrallerinin verimliliği enerji ve ekserji analizi yaklaşımı ile belirlenecektir. Verimlilik değerleri ve geri dönüşüm süreleri hesaplamaları, tesisin kurulacağı alanın güneşlenme süresi ve güneş ışınımına bağlı olarak değişmektedir. Yaptığımız yazılım programında, seçtiğiniz bölgedeki değerleri temel alarak enerji performans verimi, ekserji verimi, ortalama panel sıcaklığını, gerekli güneş panel alanını, panel sayısını ve yıllık toplam Alternatif akım (AC) güç çıkışını hesaplamaktadır. Yapılan bu hesaplama ile santralin kurulmadan önce verimlilikleri belirlenerek uygun bir kurulum olup olmadığına karar verilmektedir.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün kaynaklarına göre, referans olarak aldığımız Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m²- yıl olarak karşılaştırılması yapıldığında ilk. Sırada yer alan bölgemiz 1460 kWh/m²- yıl ile Güney Doğu Anadolu, İkinci sırada 1390 kWh/m²- yıl ile Akdeniz, Üçüncü sırada 1365 kWh/m²- yıl ile Doğu Anadolu, dördüncü sırada 1314 kWh/m²- yıl ile İç Anadolu, beşinci sırada 1304 kWh/m²- yıl ile Ege, altıncı sırada 1168 kWh/m²- yıl ile Marmara, yedinci sırada 1120 kWh/m²- yıl ile Karadeniz bölgesi yer almaktadır.

Yaptığım bu çalışmadaki amacımız, referans olarak aldığımız Türkiye'deki 7 bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün kaynaklarından yararlanarak, enerji ve ekserji analizlerini yapıp, Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin performans analizleri ve termodinamik verimliliklerinin karşılaştırılmasıdır.

Anahtar Kelimeler: *Güneş enerjisi santrali, enerji, ekserji, verim, fotovoltaik*



DETERMINATION OF THE PRODUCTION POTENTIAL OF SOLAR POWER PLANTS IN TURKEY IN TERMS OF ENERGY AND EXERGY EFFICIENCY

ABSTRACT

The efficiency of solar power plants will be determined by the energy and exergy analysis approach. Efficiency values and calculation of recycling times, the area where the facility and sunshine duration varies are depending on solar radiation. In our software, based on values in the area you choose, energy performance efficiency, exergy efficiency, the average panel temperature, essential solar panel area, panel number and the total annual alternating current (AC) calculates the power outlet. With these calculations made before the establishment of the plant efficiency is judged by determining whether an appropriate setup.

According to the General Directorate of renewable energy sources, we get invoke the 7 regions in Turkey kWh / m²-year comparison. Our region ranks 1460 kWh / m² in the South-East Anatolia, second place in 1390 kWh / m² in the Mediterranean, the third row 1365 kWh / m²-year with Eastern Anatolia, fourth in 1314 kWh / m²-year with Anatolia, fifth in 1304 kWh / m²-year Aegean, sixth in 1168 kWh / m² in the Marmara, seventh in 1120 kWh / m²-year located in the Black Sea region.

What I aim of this study, we received invoke the seven regions of the solar energy potential in Turkey benefiting from Renewable Energy General Directorate of resources, energy, and make the Exergy analysis of solar power plants in Turkey is to compare the performance analysis and thermodynamic efficiency.

Key Words: *Sun Power Plant, Energy, Exergy, Efficiency, Photovoltaic*



1. GİRİŞ

Fotovoltaik tesisleri, kuruluş açısından ada sistemleri ve şebeke bağlantılı sistemler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Ada sistemlerinde , fotovoltaik enerji kazancı enerji ihtiyacına göre ayarlanır. Fotovoltaik enerji üretimi, çoğunlukla tüketicilerin o anki enerji ihtiyaçlarına eşit olmadığından, genellikle ayrıca aküler kullanılır. FV tesis, örn. Bir rüzgar ya da dizel jeneratörü gibi başka bir elektrik kaynağıyla destekleniyorsa, bu tesis türüne fotovoltaik-hibrit tesisi denir.

Şebeke bağlantılı sistemlerde, elektrik şebekesi enerji depolayıcısı olarak görev yapar. Dünya çapındaki FV tesislerin çoğu şebeke bağlantılı tesisler olarak işletilmektedir. Bu tür tesislerde güneş enerjisinden elde edilen elektrik için ödenen daha yüksek ücret nedeniyle üretilen enerji çoğunlukla genel elektrik şebekesine beslenmektedir. Almanya'da 2050 yılına kadar enerji ihtiyacının üçte biri fotovoltaik kaynaklardan temin edileceği tahmin edilmektedir.

Halihazırda dünyadaki FV tesislerin %90'ı kadar şebeke bağlantılı tesislerken, orta vadede özellikle gelişmemiş olan ülkelerde daha çok ada sisteminin kullanılacağı beklenmektedir. Halen dünya nüfusunun %30 'u elektrik enerjisi olmadan yaşamaktadır. Bu bölgelerde fotovoltaik teknolojisi, elektrikleşme sürecinde önemli bir rol oynayabilir. Eysel ihtiyaçlara yönelik küçük bağımsız tesislerle, örn. aydınlatma, radyo veya televizyon, bir buzdolabı veya bir pompanın çalıştırılması düşünülebilir. Bu tür sistemlere 'Güneş Evi Sistemi' denir.

1.1 Literatür Taraması

Sivasankari Sundaram ve Jakka Sarat Chandra Babu çalışmalarının asıl amacı Hindistan'ın Tamilnadu'daki sivagangai bölgesindeki yerleşik halde bulunan 5 MW şebekeye bağlantılı fotovoltaik tesiste gözlenen sonuçlarla birlikte yıllık performans analizlerini yapmaktır. Üretilen toplam yıllık enerji 8495296.4 kWh bu da aylık ortalama 707941.4 kwh olmaktadır. Bunlara ek olarak, istihdam gerileme analizinin onayı için gerçek zamanlı performans için tesisin içerisinde Retscreen plus adında sistem yazılımı bulunmaktadır.5 MW sistemden üretilen yıllık ortalama enerji

24116.61 kWh'dir. Bu da Retscreen tarafından tahmin edilen yıllık ortalaması 24055.25 kWh enerjiye çok yakın olduğu bulunmuştur. Örnek olarak verilen ortalama yüzde hatası, karekök ortalama hatası ve sapma eğilimi ortalama hatası gibi istatistiksel göstergelerin değerleri tarafından tahmin edilen tepkiler doğrulanmıştır. Yıllık ortalama günlük dizi verimi, doğrulanmış referans verimi, son verim , modül etkisi, dönüşüm etkisi ve sistem etkisi sırasıyla 5.46 saat/gün, 5.128 saat/gün, 4.810 saat/gün, % 6.08 ve % 5.08 bulunmuştur. İnceleme altındaki belirli bir sistemin günlük yakalanan kaybı ve sistem kaybının genel mutlak ortalaması sırasıyla 0.384 ve 0.65'tir. Literatürden yayınlanan diğer lokasyonlarda bulunan fotovoltaik güneş sistemlerindeki performans endeksleri arasında bir karşılaştırma yapıldı. Ayrıca sistemin çıkışı üzerindeki giriş faktörlerinin etkisi, gerileme analizinin içerisinde elde edilen gerileme katsayıları tarafından önemi belirtildi. Derinlemesine analiz, çalışmaları güçlendirmek için enerji ve ekserjinin içerisinde yer almaktadır.

1.2 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Santralleri

Güneş enerjisi santralleri, güneş ışığından gelen enerji parçacıklarını elektrik enerjisine çeviren santrallerdir. Santrallerde, hesap makinelerine benzer fakat büyük ebatlarda güneş pilleri kullanılır. Güneş pilleri fotovoltaiktir. Üzerine gelen güneş ışınlarını elektriğe çevirirler. Bu pillerin ana maddesi *kristal silisyum* ve *galyum arsenit*dir.

Bireysel amaçlı kullanılan güneş panellerinden ölçüt olarak farklı olan güneş santralleri ürettiği güç bakımından yerleşim birimlerinin enerjisini sağlamak, şehir şebekesine güç aktarmak gibi amaçlarla kullanılır. Türkiye'de bulunan Güneş Enerji Santrallerinin toplam kurulu gücü 248,80 MW'dır. Güneş enerjisi santralleri yapım- işletme maliyetleri ve verim açısından kârlı bir enerji yoludur. Bu gerekçelerle yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğaya zararının minimum olması açısından geleceğin enerji üretim sistemlerinden birisidir.

Türkiye Dünya üzerinde 36°-42° kuzey enlemleri ve 26°-45° doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Türkiye'nin yıllık ortalama Güneş Işınımı 1303 kWh/m²yıl, ortalama yıllık güneşlenme süresi ise 2623 saattir. Bu rakam günlük 3,6 kWh/m² güce, günde yaklaşık 7,2 saat, toplamda ise 110 günlük bir güneşlenme süresine denk gelmektedir. 9,8 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) ısıl uygulamalara olmak üzere yıllık 26,2 milyon TEP enerji potansiyeli mevcuttur. Yılın 10 ayı

boyunca teknik ve ekonomik olarak ülke yüzölçümünün %63'ünde ve tüm yıl boyunca %17'sinden yararlanılabilir. üzerine gelen güneş enerjisinin bütününe enerji üretim amacıyla kullanılması söz konusu olamaz. Ancak genel enerji bilançosu için brüt güneş enerjisi potansiyeli, alınan güneş enerjisinin % 2,5'i kadar olup, 24 x 1015 kWh/yıl düzeyindedir. Teknolojik kısıtlar altında teknik potansiyel ise 278 milyar kWh/yıl olarak tahmin edilmektedir.

Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m²- yıl olarak karşılaştırılması yapıldığında ilk. Sırada yer alan bölgemiz 1460 kWh/m²- yıl ile Güney Doğu Anadolu, İkinci sırada 1390 kWh/m²- yıl ile Akdeniz, Üçüncü sırada 1365 kWh/m²- yıl ile Doğu Anadolu, dördüncü sırada 1314 kWh/m²- yıl ile İç Anadolu, beşinci sırada 1304 kWh/m²- yıl ile Ege, altıncı sırada 1168 kWh/m²- yıl ile Marmara, yedinci sırada 1120 kWh/m²- yıl ile Karadeniz bölgesi yer almaktadır. Bu verileri baz alarak yapılan hesaplamalara göre uygun ile güneş santrali kurulabilmektedir.

1.3 Fotovoltaik Teknolojisi

1.3.1 Fotovoltaik teknolojinin tarihi

Fotovoltaik teknolojisi uzun bir geçmişe sahiptir. Hikayesi 1839 yılında, kendisi gibi ünlü fizikçiler olan Antoine-Cesar Becquerel'in oğlu ve Henry Becquerel'in babası Edmond Becquerel'in buluşuyla başladı. Buna göre bir eriyikte bulunan iki platin elektrotuna güneş ışığı düştüğünde, elektrik akımı meydana gelir. Ancak bu etki çok küçüktü ve o zamanlar günlük hayat için herhangi bir faydası yoktu.

Ayrıca nedeni bilinmiyordu. Ta ki Albert Einstein 1904 yılında fotoelektrik etki ve ışığın kuantum doğası hakkındaki ünlü çalışmasını tanıtana kadar. Ancak Einstein'ın bu açıklamalarından sonra da bu fiziksel etki uzun bir süre boyunca pratik herhangi bir getirisi olmayan, ilginç bir fizik deneyi olmanın ötesine geçememişti.

Gerçekten kullanılabilen bir fotovoltaik hücrenin yapımı, ancak yarı iletken teknolojisi geliştirildikten sonra mümkün olmuştur. Özellikle yüksek derecede arı silisyumun bulunması bunun için şarttır. Silisyum günümüzde de fotovoltaik hücre üretiminde kullanılan en önemli malzemedir.

İlk silisyumlu fotovoltaik hücre ABD'de, Chapin, Fuller ve Pearson adlı bilim adamlarının Murray Hill'deki laboratuvarlarında, 1954 yılında tanıtılmıştı. Bu hücre

henüz % 6 oranında bir verime sahipti ve kısa süre içinde bu verim % 10'a kadar yükseltilebilmişti.

En önemli kullanım alanı o zamanlarda uzay teknolojisinde yatıyordu. İlk kullanımı, Vanguard adlı uyduda kullanılan 108 tane fotovoltaik hücre ile, 1958 yılında gerçekleştirilmişti. Bu hücreler tüm beklentileri aşarak uyduya beklenenden çok daha uzun süreyle elektrik sağlamıştı. Böylelikle, kısıtlı ama yüksek kaliteli bir fotovoltaik hücre piyasası gelişmişti. Sovyetler Birliği de fotovoltaik hücre kullanımı konusunda aynı şekilde ileriye, ancak son derece gizli tutulduğu için bu gerçek çok daha sonra ortaya çıktı.

Yüksek maliyetler nedeniyle, fotovoltaik teknolojisinin uzay teknolojisi dışındaki alanlarda kullanılması uzun zaman hayal perestlik olarak görülüyordu. Yine de bu hücrelerin sağladığı avantajlar hem bilim adamlarını, hem de toplumun hayal gücünü tetiklemeye devam ediyordu. Bu nedenle konuyla ilgili araştırmalar hiçbir zaman tamamiyle durmadı. Fotovoltaik hücreler yavaş yavaş şebekeden bağımsız elektrik tedarik sistemlerinde kullanılmaya başlandı. Uygulamalar hesap makineleri ve saatlerle başlayıp zamanla daha büyük cihaz ve tesislere yayıldı, örn. Park bileti otomatları gibi.

Silisyum nispeten düşük ışık soğurma özelliği nedeniyle fotovoltaik hücreler için ideal bir malzeme sayılmazsa da, başından beri bu malzeme piyasaya hakimdi. Bunun önemli bir nedeni, yarı iletken teknolojisinin gelişmişliği idi. Fotovoltaik hücre sanayi yıllar boyunca silisyum üretiminde arta kalan atıklarla rahat bir varlık sürdürmüştür: mikro işlemci endüstrisinin yüksek kalite kriterlerine uygun olmayan silisyum kristalleri, fotovoltaik hücreler için son derece uygundu. Ancak son yıllarda karşılıklı fayda sağlayan bu durum, fotovoltaik piyasasının büyümesi önünde bir engel haline gelmiştir; silisyum ihtiyacı önemli ölçüde arttığı ve sadece özel olarak üretilen silisyumla karşılanabildiği için. Yüksek arılığa sahip silisyum üreticileri bu artan talebe yanıt vermek için fotovoltaik silisyum üretimlerini artırmıştır.

Uzun yıllardan beri, silisyumun başka bir malzeme ile değiştirilmesi çabaları devam etmektedir. Bunun için hücreleri daha ince ve bununla birlikte daha ucuz yapmak için ışık soğurma özelliği yüksek olan malzemeler aranıyor. Bunun sonucunda ortaya çıkan hücre türü, kristal yapılı silisyum hücrelerden 100 kat kadar daha ince olabilen, ince film hücreleri meydana geldi. Amorf silisyum günümüzde tüketici ürünleri ve

cephe uygulamaları gibi özel uygulama alanlarında önemli bir yere sahiptir. Standart tesislerde de kullanılsa da, piyasadaki payı hala düşüktür.

Fotovoltaik teknolojinin tarihçesi ile ilgili teoriyi de unutmamak gerekir. Shockley ve Queisser adlı araştırmacıların 1961 yılında yayınladıkları temel bir çalışmada ilk kez termodinamik temeller bazında fotovoltaik hücrelerle elde edilebilecek verim hesaplanmıştı. Bu sonuçlar günümüzde hala geçerliliğini korumaktadır. Günümüzde verimi artırmak için birçok yeni fikir ve konsept vardır. Bununla birlikte araştırma yapmak için geniş imkanlar söz konusudur.

Almanya’da fotovoltaik teknolojinin gelişmesi için piyasa teşvikleri önemli bir rol oynadı. Bu teşvikler, 1990 yılında, oldukça başarılı geçen ve sonraları birçok ülke tarafından taklit edilen ‘1.000 Çatı’ programıyla başlamıştı. Kısa bir aradan sonra 1998-1999 yıllarında bu programın yerine ‘100.000 Çatı’ programı başlatılmış, daha sonra 2000 yılında Yenilenebilir Enerji Kanunu yürürlüğe girmiştir. YEK’in fotovoltaik teknolojinin desteklenmesi için en uygun gereç olduğu anlaşıldı: piyasa çok hızlı bir gelişim yaşayarak fotovoltaik teknolojinin Almanya’ya geri dönmesi sağlandı.[1]

1.3.2 Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi

Klasik kristal silisyum fotovoltaik hücre, iki tane farklı katkılanmış silisyum katmanından oluşur. Güneş ışığına bakan katman fosfor ile negatif katkılanmış, altındaki katman ise bor elementi ile pozitif katkılanmış olur. Geçiş bölgesinde, güneş ışığının etkisi ile serbest bırakılan yüklerin (elektronlar ve delikler) ayrılmasını sağlayan bir elektrik alanı oluşur. Fotovoltaik hücreden elektrik akımını elde edebilmek için, ön ve arka tarafına metal kontaklar yerleştirilmelidir. Bunun için genellikle serigrafi yöntemi kullanılır. Hücrenin arka yüzünde, alüminyum veya gümüş macun kullanılarak tüm alanı kapsayan bir kontak katmanının uygulanması mümkündür. Ön taraf ise olabildiğince çok ışık geçirebiliyor olmalıdır. Bu nedenle bu taraftaki kontaklar çoğunlukla çok ince bir ızgara yada ağaç deseni halinde tatbik edilir. Fotovoltaik hücrenin ön yüzüne, termal buharlaştırma yada biriktirme yöntemleri ile ince bir silisyum nitrid yada titanyum oksit katmanı (yansıma önleyici katman) tatbik edilirse, ışığın (soğurulmadan) yansıması azaltılabilir.

Işınım söz konusu olduğunda, daha önce tarif edildiği üzere elektron bağları kırılır. Devreye bir de tüketici bağlanırsa, elektrik akımı oluşur. FV hücrelerde,

rekombinasyon olgusu, ışığın soğrulmadan yansıyan kısmı ve ön yüzdeki kontaklardan kaynaklanan gölgelenme nedenli kayıplar söz konusudur. Bunun dışında, çok uzun ve çok kısa dalga boylu ışınım enerjisinin büyük bir kısmı değerlendirilememektedir. Kullanılmayan enerjinin diğer bir kısmı, soğrularak ısıya dönüştürülür. Aşağıdaki enerji bilançosunda kristal silisyum FV hücre örneğinde kayıp oranları belirtilmiştir:

% 100 Etki eden güneş ışınımı

-% 3,0 Ön yüzdeki kontaklar nedenli gölgelenme ve yansıma etkisi

-% 22,0 Uzun dalga boylu ışınımın fazla düşük foton enerjisi

-% 30,0 Kısa dalga boylu ışınımın fazla foton enerjisi

-% 8,5 Rekombinasyon

-% 20,0 Başta tükenim bölgesinde olmak üzere gerilim düşüşleri

-% 0,5 Seri direnci (akımsal ısı kayıpları)

= % 16,0 Kullanılabilen elektrik enerjisi

1.3.3 Fotovoltaik hücre türleri

Fotovoltaik hücre teknolojileri üç ayrı gruba bölünebilir: Bunlardan birincisi, yaklaşık 200 mikrometrelilik dilimler olarak modül halinde birbirlerine lehimlenen kristal silisyum hücrelerdir. İkinci grup, sadece birkaç mikrometre kalınlığındaki hücre katmanlarının çoğunlukla termal buharlaştırma yöntemiyle modülün ön camına tatbik edildiği ince katmanlı hücrelerdir. Üçüncü grubu, piyasaya yeni girmekte olan nano hücreler oluşturur. Bu teknolojiye sadece birkaç nanometre büyüklüğünde komple FV hücreler üretilip modüller halinde birleştirilir. Halihazırda %90'lık bir piyasa payıyla kristal silisyum hücreler en yaygın olarak kullanılan hücre türüdür. Ancak önümüzdeki yıllarda ince katmanlı hücre teknolojisinin kullanımında güçlü bir artış olacağı ve bu tür hücrelerin piyasa payının orta vadede yaklaşık %30'a kadar yükseleceği beklenmektedir. Aynı şekilde nano yapıları hücreler de uzun vadede hatırı sayılır piyasa payları elde edecektir.

1.3.3.1 Kristal yapılı silisyum hücreleri

Kristal FV hücreler için en önemli malzeme, silisyumdur. Silisyum, oksijenden sonra dünyadaki en yaygın ikinci element olup neredeyse sınırsız miktarda temin edilebilmektedir. Doğada arı halde değil ancak oksijen ile bağlı olarak kuvars yada kum halinde bulunur. Öncelikle istenmeyen oksijen, silisyum dioksitten ayrılmalıdır. Bunun için kuvars kumu, bir ark fırınında kömür tozu, kok ve odun kömürü ile 1,800 ila 1,900 °C 'ye kadar ısıtılır. Bu şekilde karbon monoksit ve arılık derecesi yaklaşık %98 olan metalürjik silisyum elde edilir. Yine de silisyumun %2 oranında bir arızsızlık, elektronik uygulamalar için çok fazla yüksektir. FV uygulamaları için en fazla milyarda bir ve yarı iletken endüstrisi içinse bunun onda birine izin verilir. Ham silisyum bu nedenle kimyasal yöntemlerle daha da arılaştırılır. İnce bir toz haline öğütülerek, hidroklorik asit ile tepkimeye girerek, hidrojen ve 31 °C'de kaynayan triklörür silan sıvısını meydana getirir. Bu sıvı ise, birkaç aşamada arızsızlık değeri istenen sınırın altına düşene kadar arılaştırılır.

Bazı FV silisyum üreticileri, akışkan yatak reaktörleri ile çalışır. Bu üretim yönteminde, reaktöre son derece ufak silisyum partikülleri beslenir. Sonrasında triklörür silan ya da silan gazı, hidrojen ile birlikte reaktöre püskürülür. Silisyum, triklörür silandan 1,000 °C'de, silandan ise 700°C'de partiküllerin üzerine ayrışır ve bu şekilde topakların meydana gelmesine neden olur. Bu topakların ağırlığı arttığında reaktörün dibine çöker ve oradan granül halinde alınabilir. Bir diğer yöntem olan boru reaktörü yöntemi ise, Siemens yöntemine benzerdir. Ancak bu yöntemde silisyum çubuklar yerine, içi boş silisyum silindirleri kullanılır ve bunlar, çıkış maddesi olarak silan kullanıldığı için sadece 800°C'ye kadar ısıtılmak zorundadır. Japonya'da geliştirilmiş olan VLD-yöntemi (Vapor to Liquid Deposition-Buhar-Sıvı tortulaşması) ile silisyum maddesi, hidrojenle birlikte reaktöre beslenen triklörür silandan 1.500°C'ye kadar ısıtılmış olan bir grafit borunun üzerine ayrıştırılır. Bu şekilde ayrışan 1.410 ila 1.420°C sıcaklığındaki sıvı silisyum, reaktör dibine damlar ve orada katılarak granül haline gelir. Başka yöntemlerde, örneğin çinko ile indirgenen silisyum tetraklörür kullanılır ya da plazma meşaleleri ile rafine edilen metalürjik silisyum meydana getirilip silisyum karbür ile indirgeme yoluyla arı silisyum meydana getirilir. Farklı üreticiler, bu alternatif üretim yöntemlerinin endüstriyel çapta uygulanabilir bir hale getirilmesi üzerinde çalışmaktadır.

Tekli kristal yapılı silisyum hücreler

Tek kristal yapılı silisyumun üretimi için Czochralski prosesi (potada çekme prosesi) yaygınlaşmıştır. Bu yöntemde, çoklu kristal yapıya sahip çıkış maddesi (poli silisyum) bir kuvars potasında yaklaşık 1.420°C'de eritilir. Tanımlı yönelimli bir kristal çekirdeği, silisyum eriyiğine daldırılır ve yavaşça döndürülmek suretiyle yukarıya doğru dışarıya çıkartılır. Bu şekilde kristal, çapı 30 cm'ye uzunluğu birkaç metreyi bulabilen silindir biçiminde tekli bir kristal halinde büyür. Bu yuvarlak tekli kristal silindirleri, kenarları düzleştirilerek kesitleri kare ya da kenarları yuvarlak kare biçimine getirilir ve sonrasında tel testerelerle yaklaşık 0,2 mm kalınlığında dilimler haline getirilir. Kenar düzleştirme ve dilimleme işlemlerinde silisyumun önemli bir kısmı kaybolur. Bu kesim artıkları ve silindirlerin konik uçları, yeniden eritmek zorundadır. Dilimler aşındırma ve durulama banyolarında kimyasal yolla kesim atıkları ve hasarlardan arındırılır. Bu temizleme sürecinde dilimlerin her iki yüzünde yaklaşık 0,01 mm kadar malzeme aşındırılır. Daha önce bor ile p katkılanmış ham dilimler kullanılarak, fosfor yayınması ile ince n katkılanmış tabaka meydana getirilir. Yayınım ocağında fosfor gazı 800 ila 900°C'lik sıcaklıklarda yayınarak üst tarafın katkılaması tersine çevrilir. Bunun sonucunda FV hücrenin kalbi olan pn geçiş bölgesi meydana gelir. Yansıma önleyici (YÖ) tabaka da tatbik edildikten sonra, serigrafik baskı yöntemiyle hücrenin ön kısmına elektrik kabul hatları ve arka kısmına kontaklar basılır. Arka yüzündeki kontaklar, yansımayı önleyici tabakayı geçecek şekilde ön tarafa temas etmeleri için fırınlanmalıdır. Sonunda FV hücrelerin kenarları, aşındırıcı sıvıyla işlenerek, p ile n katkılanmış katmanların arasındaki geçişlerin temiz olması ve kısa devre oluşmasının önlenmesi sağlanır. Tekli ve çoklu kristal yapılı FV hücrelerdeki açık devre gerilimi 0,6 V iken, kısa devre akımı hücre büyüklüğü ve teknolojisine bağlı olarak 3 ila 16 A arasında değişir. Verimleri % 15-18,8 arasındadır.

Çoklu kristal yapılı silisyum hücreler

Çıkış malzemesi olan poli silisyum, bir kuvars potasında eritilir, bor ile katkılanır ve dikdörtgen kesitli bir kalıp halinde dökülür. Dökülen blok, kontrollü bir şekilde değişmeli olarak ısıtılıp soğutulur, malzeme katılaşırken kristal yapısında belirli bir yönelimin oluşması sağlanır. Bu şekilde yönelimli katılaşmada çok sayıda, olabildiğince büyük ve homojen silisyum kristalleri oluşur; bunların tane büyüklükleri birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar varabilir. Tane sınırları,

rekombinasyon riski yüksek kristal kusurları teşkil ederek çoklu kristal yapıları FV hücrelerin verimini olumsuz yönde etkilediğinden, bu hücre türünün verimi, tekli kristal yapıları FV hücrelere göre biraz daha düşüktür.

Çoklu kristal yapıları umg silisyum hücreler

2008 yılından beri, gittikçe daha çok üretici çoklu kristal yapıları UMG silisyumdan imal edilen FV hücreler sunmaktadır. Bu tür FV hücreler, doğrudan arındırılmış silisyum kullanılarak üretilmektedir. Bu şekilde arı silisyum üretmek için kullanılan enerji gereksinimi ve maliyeti yüksek klasik Siemens ve de akışkan yataklı reaktörlü hadde fırınlamalı yöntemlerin kullanılmasından kaçınılmaktadır.

UMG hücrelerin avantajları, daha düşük üretim maliyetinin yanı sıra, özellikle silisyum üretimindeki enerji sarfiyatının % 90 oranında düşmesi sayesinde modüllerin enerji geri dönüşüm sürelerinin yaklaşık üçte bir oranında azalmasında yatmaktadır. Verimleri %14-16 arasındadır.

Şerit çekmeli silisyum hücreler

Kristal yapıları silisyum dilimlerin üretilmesinde, malzeme disk haline getirilene kadar ham silisyumun yaklaşık % 40'ı kesim atıkları olarak kaybolur. Yüksek malzeme kayıplarını azaltmak ve malzeme yararlanımını ve hücrelerin üretim hızını arttırmak için, farklı şerit çekme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde silisyum eriyiğinden doğrudan folyolar elde edilir. Silisyum şeritler henüz üretilmesi istenen dilimin kalınlığına sahip olup lazerlerle istenen büyüklükte parçalar haline getirilir. Pota çekim yöntemi ya da blok döküm yöntemi ile dilim üretiminden farklı olarak şerit çekme yöntemleri daha az enerji ve malzeme gerektirir ve dolayısıyla maliyeti düşürmek için önemli potansiyele sahiptir.

Çoklu kristal yapıları efg silisyum hücreler

EFG yöntemi henüz 1990'lı yıllardan beri endüstriyel seri üretiminde uygulanmaktadır. Bu yöntemde, biçim verici sekizgen biçimli grafit bir çerçeve silisyum eriğine daldırılır ve yavaşça yukarıya doğru kaldırılır. Böylece yaklaşık 6,5 m uzunluğuna kadar ortalama çeper kalınlığı 0,27 mm, kenar uzunlukları 10 yada 12,5 cm olan sekizgen bir boru meydana getirilir. Sekiz yüzeyinden hazır dilimler kesilir. Bu şekilde malzemede %10'dan daha az kayıp söz konusu konusudur. Fosfor katkılanması yapıldıktan ve arka kontak katmanı tatbik edildikten sonra, dilimlerin ön yüzlerine elektrik kabul şeritleri ve yansımayı önleyici katman tatbik

edilir. EFG silisyum her ne kadar çoklu kristal yapısına sahipse, yine de çok az tane sınırı ve kristal kusurlarına sahiptir. Bu nedenle, dış görünümü ve elektrik kalitesi açısından bu hücre türü daha çok tekli kristal yapıli hücrelere benzemektedir. EFG hücre üretiminde, sıradan çoklu kristal yapıli hücrelerden % 30 daha az malzeme harcanmaktadır. Verimleri % 14,5'dir.

Çoklu kristal yapıli string ribbon silisyum hücreler

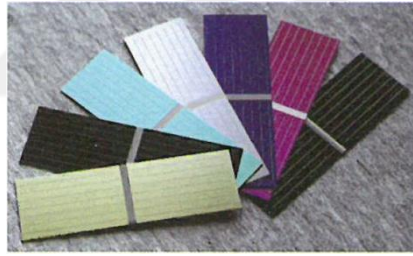
String-Ribbon yöntemi, 1994 yılında Jack Hononka tarafından geliştirilmiş olup 2000 yılından beri Evergreen şirketi tarafından FV hücre üretiminde kullanılmaktadır. 2005 yılında, Q-Cells şirketi ile String-Ribbon hücre üretimi için kurulan yapılan ortak bir teşebbüsten EverQ şirketi meydana gelerek, 2008 yılında bu şirketin adı Sovello olarak değişmiştir.String-Ribbon yönteminde yüksek sıcaklığa kadar ısıtılan karbon veya kuvars lifleri dikey olarak silisyum eriyiği bulunan yassı bir potanın içinden çekilir. Sıvı silisyum, liflerin arasında bir zar oluşturup yaklaşık 8 cm kadar geniş bir şerit halinde kristalleşir. Çekme işlemi, sürekli devam eden bir işlemdir. Lifler rulolardan açılır ve potaya sürekli ham silisyum ilave edilirken uzayan şeridin ucu dikdörtgen dilimler halinde kesilir. Şeritlerin düşük genişliği nedeniyle daha sonra modül üretiminde iki kat hücre kullanması zorunludur. 3 kere 28 String-Ribbon hücrenin paralel bağlanması suretiyle, Sovello şirketinin ürettiği modüllerde gölgelenme kayıpları standart kristal modüllere göre en düşük bir düzeye kadar düşürülmektedir. Verimleri %13- 15 arasındadır.

Dokulandırma ve yansıma önleyici kaplama

Yansımayı önlemek ve tayfsal duyarlılığı artırmak için hücre üretiminde farklı yüzey dokulandırma yöntemleri (kimyasal veya mekanik) geçerlilik kazanmıştır. Hücrenin dış yüzeyinin işlenmesine ve yüzeye belirli bir yapının kazandırılmasına dokulandırma (İng. texturizing) denir. Dilimler kesildikten sonra kimyasal aşındırma banyolarıyla kesim artıkları giderilir ve aynı zamanda pürüzlü ve az yansıtıcı bir hücre yüzeyi meydana getirilir. Bunun için çoğunlukla alkalik ya da asidik dokulandırma kullanılır. Asidik dokulandırılmalı çoklu kristal yapıli hücreler, daha koyu mavi olup yaklaşık %0,5 oranında daha yüksek bir verime sahip olur. Tekli kristal yapıli hücrelerde ise alkalik dokulandırma ile verim yine yaklaşık %0,5 olarak artırılabilmiştir. Burada alkalik hücreler daha koyu görünür. Yine de yansıtıcı

özelliklerin modül içindeki kaplamaya bağlı olarak da değişim göstereceği dikkate alınmalıdır. Asidik dokulandırılmalı çoklu kristal yapıları FV hücrelerden oluşan modüllerin yıllık enerji getirileri, aynı özellikte, ancak alkalik dokulandırılmalı hücrelere göre belirgin ölçüde daha yüksek olur. Dokulandırma sonucunda hücrenin yüzeyinde mikroskopik ölçüde küçük piramit ya da dalga biçimli yapılar meydana gelerek, sonra bu doku ışık kapanı olarak görev görerek yansımayı önleyici özelliktedir. Dokulandırmanın lazer ya da kesici aletler kullanılarak mekanik yolla gerçekleştirilmesi daha zordur. Yüksek verimli hücrelerde kullanılan bu yöntemde piramit, yiv ya da oluk biçimli dokular meydana getirilir.

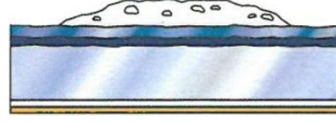
Hücreye olabildiğince fazla ışığın girebilmesi için, hücrenin üzerine silisyum nitrit ya da titanyum oksitten oluşan yansımayı önleyici bir tabaka tatbik edilir. Bu tabaka, ışığın hücrenin dış yüzeyinde yansımalarını azaltır ve böylece yansıma nedeniyle kayıpları düşük bir yüzdeye kadar düşürür. Silisyum nitrit aynı zamanda yüzeydeki kristal yapı bozukluklarını telafi eden bir özelliğine sahiptir. Bu sayede elektron çiftlerinin yeniden birleşmesi (rekombinasyon) önlenmektedir.



Şekil 1.1: Tekli kristal hücrelerin renk çeşitleri

Bu yansımayı önleyici (YÖ) tabaka, aslında gri renkli dilimlerin mavi (çoklu kristal yapıları hücreler) ya da koyu mavi - siyah arası (tekli kristal yapıları hücreler) bir renk almalarına neden olur. Verimi artırmaya yönelik yansımayı önleyici bu tabakanın dışında, katman kalınlığı farklılaştırılarak farklı renk tonları elde edilebilmektedir. Renkler, ışığın ışık tayfinin belirli renk aralıklarında yansımaları sonucu meydana gelir. Halihazırda bu şekilde yeşil, altın sarısı, kahve ve mor renkleri gerçekleştirilebilmektedir. Ne var ki, bu görsel etki için hücrelerin daha düşük verimi kabul edilmek zorundadır. Bunun dışında, yansımayı önleyici tabakadan tamamen vaz geçilerek dilimlerin doğal gümüş gri (çoklu kristal yapıları hücreler) ya da koyu gri

(tekli kristal yapılı hücreler) renkli halde bırakmak da mümkündür. Yansımaya önleyici tabakası bulunmayan hücreler zaman zaman bina cephesi entegrasyonunda kullanılmaktadır. Bunların üretimi basit olduğu gibi, sade renkleri nedeniyle de mimarlar tarafından tercih edilebilmektedir. Bu uğurda, güneş ışığının %30 gibi büyük bir kısmının yüzeyde yansımaya kabul edilmektedir.

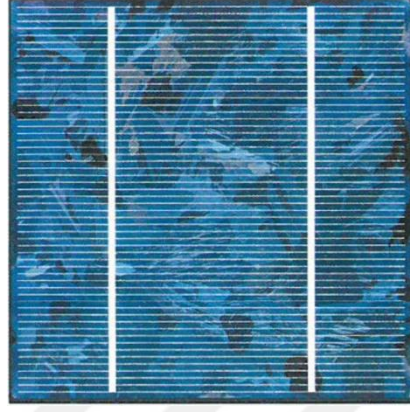


Şekil 1.2: Serigrafik baskı yöntemi ve saturn teknolojisinin karşılaştırılması: ön yüz kontakları ve yüzey dokusu üretimi

Ön yüz kontakları

Hücreleri bir elektrik dolaşımına dahil edebilmek için, her iki yüzüne metal kontaklar tatbik edilmek zorundadır. Gölgeleme alanını küçük tutmak için hücrenin güneşe bakan tarafında ince bir metal ızgara kullanılır. Bu ön yüz kontakları genellikle serigrafik baskı yöntemi ile tatbik edilir. Bunun için içeriğinde gümüş bulunan bir macun silisyum dilimine basılır. Bu şekilde oluşan, kalınlıkları yaklaşık 0,1 ila 0,2 mm arası çizgiler, toplayıcı kontakları meydana getirir. Bunların üzerinde, kalınlıkları 1,5 ila 2,5 mm arası değişen, toplayıcı kontak şeritleri (busbars) geçirilir. Bunlar, hücreler daha sonra modül halinde birleştirildiğinde, üzerine lehimlenen bakır tellerle bir sonraki hücrenin arka yüz kontaklarına bağlanır. Kontak ızgarası ve toplayıcı kontaklar, 800 ila 900°C'lik sıcaklıkta fırınlanarak sinterleme sonucu altında bulunan yansımaya önleyici tabakanın içine yerleştirilir. Yüksek performanslı FV hücreler için iletim özelliğinin artırılması ve hücre yüzeyindeki yansımaya azaltmak için özel teknolojiler geliştirilmiştir. Gömülü kontak (İng. buried contact) teknolojisinde, hücrenin dış yüzeyine yivler açılır ve içine kontak şeritleri yerleştirilmeden önce yivler yoğun olarak n katkılanır (n⁺⁺). BP Solar tarafından geliştirilmiş olup ancak üretimden 2009 yılında kaldırılmış olan Saturn yönteminde, hücreye lazerle V biçiminde bir yiv kesilir. Bu şekilde kontak ızgarası şeritlerinin genişliği, serigrafik yöntemine göre önemli ölçüde 0,02 mm'ye kadar inceltilebilmektedir. Bu sayede kontaklar nedenli gölgeleme kayıpları azalır. Ayrıca çok küçük piramitler biçimindeki özel tekstürlü bir dış yüzeyle yansımaya kayıplarının düşük olması sağlanır. Yüzeye düşen ışık, piramitlerde defalarda yansıtılır ve kırılır.

Böylece hücreye daha çok ışık girebilir ve hücre tarafından soğrulabilir. Kullanılan yöntem ve üreticiye bağlı olarak farklı yüzey yapıları veya tekstürleri oluşturulabilir, örn. gömülü piramit biçimleri gibi. 2009 yılından beri Çinli üretici Suntech Power, piramit biçimli yüzey yapıları ve gömülü iletken teknolojisine sahip "Pluto" hücrelerini üretmektedir.



Şekil 1.3: Serigrafik ön yüz kontaklı çoklu kristal yapıları bir FV hücre

Arka yüz kontakları

Ön kontaklardan farklı olarak, hücrenin arkasındaki metal kontakların geniş alana yayılarak tatbik edilmesi bir sorun teşkil etmez. Bu kontaklar, arka yüzeyleri yarı saydam olan standart modüllerde görülmezken, bina entegrasyonu için kullanılan saydam arka yüzü hücrelerde görüleceğinden bunlardan tasarım unsuru olarak yararlanılabilir. Verimi en yüksek düzeye çıkarmak için, kalınlıkları 2,5 ila 6 mm arası olan nokta ya da şerit biçimli serigrafik kontakların arasına hücrenin tüm arka yüzeyini kapsayacak şekilde bir alüminyum tabaka bastırılır.

Sonrasında kontaklar sinterlendiğinde ise, alüminyum katmanla birlikte, ilave elektrik bir alana oluşturan ve 'arka yüzey alanı' (İng. *back surface field*) denen güçlü p+ katkılamalı bir yüzey meydana gelir. Arka yüzey alanını oluşturmanın gayesi, yüzeyde mevcut kristal doku bozukluklarının düzeltilmesi ve hücrenin arka yüzeyinde elektronların yeniden birleşmesinin (rekombinasyon) azaltılmasıdır. Elektrikli bir ayna gibi bu şekilde elektronlar hücrenin içine geri atılır. Daha geniş akım toplayıcı hatlar (İng. *busbars*), modül içindeki hücrede meydana gelen ısı gerilmeleri azaltmak amacıyla günümüzde genellikle boydan boya değil de, kısaltılmış olarak tatbik edilmektedir.

Silisyum dilimi üretimi için alternatifler

Bilim adamları, kalınlıkları sadece 30 ila 50 μ m olan silisyum dilimlerinden oluşan FV hücrelerin üretilmesi üzerinde çalışmaktadır. Bu ince dilimlerin üretilmesi için halihazırda birden fazla farklı yöntem deneme aşamasında bulunmaktadır. Bu yöntemlerden birinde, yüksek derecede vakum altında hidrojen iyonları, bir iyon hızlandırıcısı vasıtasıyla tekli kristal yapılu bir sütuna çarptırılır ve bu şekilde 30 ila 60 μ m derinlikte bir kırılma yeri meydana getirilir. Sonraki adımda bu ince silisyum dilimleri kırılma yerinden koparılarak ayrılır.

Bir diğer yöntemde, tekli kristal yapılu bir silisyum diskinde gümüş bir tabaka bastırılıp sonrasında 900°C'de metalleştirilir; gümüşün farklı ısıl genleşme özelliğine bağlı olarak gümüş katman soğurken, kalınlığı sadece birkaç mikrometre olan bir silisyum tabaka dışarıya atılır. Gümüş tabaka ise daha sonra asitle giderilir.

Almanya'daki Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Araştırma Enstitüsü (ISE) araştırmacıları, lazer teknolojisi kullanarak birkaç mikrometre kalınlığında silisyum dilimlerinin üretilmesi üzerinde çalışmaktadır. Bunun için lazer ışını potasyum hidroksit çözeltisi ile koşullanır (odaklanır). Silisyum kalıbı bu şekilde ısıtılarak dilimlere ayrılması mümkün olmaktadır [Hop08]. Rekombinasyon önleyici ve ışık soğurucu hücre yüzeyleri uygulamalarıyla, hücrelerin daha ince olmasına rağmen daha yüksek verimlerin elde edilmesi bile mümkündür. Ancak son derece ince olan bu hücrelerin işlenmesi ve kontaklarla donatılması, endüstriyel olarak kullanılabilmesi için hala aşılması gereken teknolojik sorunlardır.



Şekil 1.4: Elli mikrometre kalınlığında silisyum dilimi. Bu dilim tekli kristal yapılu bir dilimden "kopartılarak" meydana getirildi.

Silisyum kalıplarının kesilmesi için farklı bir alternatif ise Sharp şirketi tarafından izlenmektedir. Bu şirketin üzerinde çalıştığı yöntemde, geniş dış yüzeye sahip tanecikler halindeki hammadde bir silisyum eriyiğine daldırılarak, taşıyıcı hammaddeden bir silisyum tabakasının salgılanması ve kristalleşmesi sağlanır. Elde edilen yaklaşık 300 μm kalınlığındaki silisyum tabaka taşıyıcı, maddeden ayrılır ve lazerlerle standart dilim ebadında (6 inç) kesilir.

Yüksek performanslı fv hücreler

Araştırma laboratuvarlarında, verim oranları %25'e varan yüksek verimli kristal yapıları silisyum hücreler meydana getirilmiştir. Dilim optimizasyonu, daha iyi iletim özelliğine sahip ve daha ince toplayıcı kontaklar, arka yüz kontaklaması ve hücre yüzeyine strüktür verilmesi gibi elektrik ve görsel kayıpları azaltan araştırma sonuçları üretimde uygulanmaya konulmuştur. Bu konseptlerin birçoğu Avustralya'nın New South Wales Üniversitesi'nden bilim adamı Martin Green'in 1986 tanıttığı PERC hücresi (İng. passivated emitter, rear cell) ve 1995 yılında bu hücrenin devamı olarak geliştirdiği PERL hücresine dayanılarak meydana getirildi. Bazı üretim yöntemleri ise oldukça pahalı olduğu için sadece laboratuvar hücrelerinde uygulanmaktadır. Birçok süreç endüstriyel seri üretimine yansıtıldı.

Çin hücre üreticisi Magi Solar, bor elementi yerine galyum ile katkılanmış tekli kristal yapıları FV hücreler üretmeyi amaçlamaktadır. Bu şekilde tekli kristal yapıları standart hücrelerde ışıksal başlangıç degradasyonu nedeniyle olan ve %5'e kadar varabilen verim düşüşleri önlenir. Yüksek performans hücreleri için daha başka üretim yöntemleri, bundan sonraki sayfalarda anlatılacaktır.

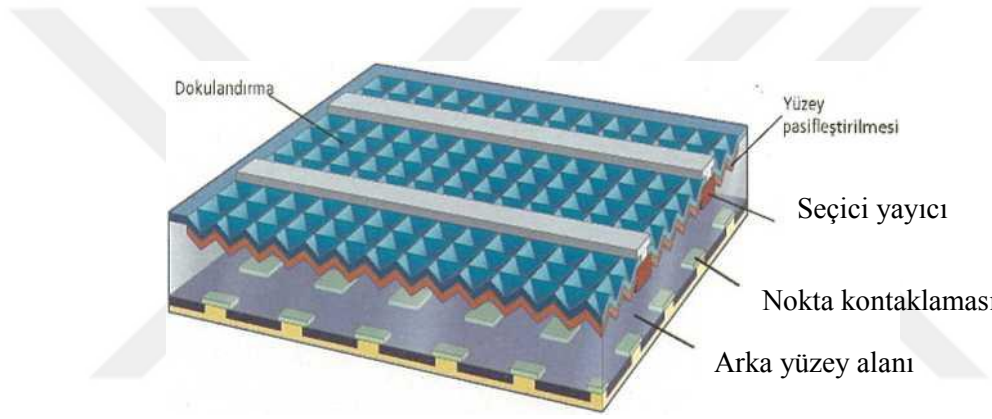
Yüzmeli bölge yöntemi

Birçok yüksek performanslı hücre için ham madde olarak kullanılan yüksek kaliteli n katkılamalı dilimlerin üretilmesi için örn. yüzmeli bölge yönteminden istifade edilmektedir. Bu yöntemle tekli kristal yapıları FV hücreleri daha yüksek aralıkla ve böylelikle %1-2 kadar daha yüksek verimle üretilmektedir. Ancak bunun için gereken, ucunda tekli kristal yapıları bir silisyum çekirdeği bulunan n katkılamalı çoklu kristal yapıları bir silisyum çubuğu, oldukça maliyetlidir. Bu çubuk elektro manyetik bir bobin içinden indirilerek geçirilir ve yüksek frekanslı alanlar yardımıyla, tekli kristal yapıları uçtan başlayarak dairesel olarak eritilir. Kristal

bozuklukları, sıvı bölgede çubuğun ucuna taşınır. Çubuk soğurken, yüksek arılığa ve kristal kalitesine sahip, tüm çubuğu kapsayan tekli kristal bir yapı oluşur.

İyileştirilen hücre yapıları

FV hücrelerindeki kayıpları azaltmak için, hücre üretiminde farklı teknolojik üretim süreçleri uygulanmaktadır. Görsel kayıplar, daha önce tarif edilen dokulanmış hücre yüzeyleri ve hücreyi en az örten gömülü kontak biçimleri kullanılarak optimize edilmektedir. PERL hücrelerinde (İng. passivated emitter, rear locally diffused celi), hücre yüzeyine ters piramit biçimli bir doku bastırılır. Kontak tatbiki için, toplayıcı kontaktların kısmen gömüldüğü küçük oyuklar oluşturulmuştur.



Şekil 1.5: İyileştirilen hücre yapısı

Rekombinasyon önleyici yüzey uygulaması: Hücre yüzeyine Si_xN_x ya da amorf silisyum gibi malzemelerden oluşan dielektrik bir katman tatbik edilerek, hücre yüzeyindeki rekombinasyon olgusu azaltılır ve ışığın arka yüzey alanı ile birlikte yansıtıldık elde edilir. Kontak tatbiki için dielektrik katmana lazerle oyuklar kesilmek zorundadır.

Seçici yayıcı: Güneşe dönük yarıiletken katmanı olan yayıcı katmanı, çoğu kristal yapıllı FV hücrelerde n katmanıdır. Bu yayıcı katmanın olabildiğince ince olması sağlanırsa, rekombinasyon kayıpları azalır. Standart hücrelerdeki yayıcılar yüksek fosfor konsantrasyonu gösterir. Buysa yayıcının soğurduğu ışığın büyük bir kısmının ısıya dönüştürülmesine ve bu nedenle FV hücrenin içerisinde elektrik üretimine katkıda bulunamamasına neden olur. Ancak fosfor oranı düşürülürse, ön kontaklara karşı direnç artar. Seçici bir yayıcı katmanının oluşmasında, toplayıcı kontaktların

altındaki n katmanı yüksek oranda katkılandırırken, aralarındaki alanlarda katkılama oranı düşük tutulur. Bu şekilde kontakların dirençleri düşük tutulur, kısa dalga boylu ışıklara karşı iyi bir duyarlılık sağlanır ve n katmanında rekombinasyonların az olması temin edilir. Bununla birlikte verim %0,8 oranında artar. Seçici yayıcılar, farklı üretim süreçleri ile (bir ya da birden fazla aşamalı difüzyon, ıslak kimyasal ya da plazma destekli maskeli asit oyma yöntemleri, lazer destekli aşırı katkılama, vs.) üretilebilmektedir.

Kenar yalıtımı: Hücre kenarlarında, hücrenin paralel direncini düşürerek kayıplara neden olan kaçak akımlar meydana gelebilir. Lazerli kesim ya da hücre kenarına yakın yüzeylerin ıslak asitle oyulması yoluyla, kenarlar yalıtılarak bu tür kayıpların önüne geçilebilmektedir. Bazı hücre üreticileri standart hücrelerinde kenar yalıtımı uygulamaktadır.

Arka yüzey alanı: Özellikle kalınlıkları $200 \mu\text{m}$ 'den düşük olan ince hücrelerde, uzun dalga boylu ışığın arka yüzey kontakta yansıtılması faydalı olur. Arka yüzeyin 70 ila 300 nm kalınlığında silisyum oksit, silisyum nitrit ya da silisyum karbitten oluşan dielektrik bir katmanla kaplanması suretiyle, yüzeye yakın elektronların yeniden birleşmesinin önüne geçilir ve ek bir elektrik alan meydana gelir, bu alana ise Arka Yüzey Alanı denir (İng. Back Surface Field). Pasifleştirici bu katman, yoğunluğu doyurarak rekombinasyonu etkili bir şekilde önler. Bu katman ayrıca uzun dalga boylu ışık için ayna vazifesi görerek ışığın hücrenin içinde daha fazla elektron çifti oluşturmasını ya da hücrenin üst yüzeyinden tekrar hücrenin içine yansıtılmasını sağlar. Nokta Kontaklar arka kontakta metal kısımları, rekombinasyon önleyici katmanın üzerine PVD yöntemi (İng. Physical Vapour Deposition" = fiziksel buhar çökeltimi) ile tatbik edilir ve iletken olmayan rekombinasyon önleyici katmanda bulunan kontak delikleri üzerinden silisyuma temas eder. Bu delikler arka yüzey alanının sadece çok küçük bir kısmını kapladıkları için, arka tarafın iyi görsel ve elektriksel özellikleri neredeyse hiç olumsuz etkilenmemektedir. Nokta kontakların etrafında yoğun bir p^{++} aşırı katkılaması yapılırsa, verim daha da artar. Rekombinasyon önleyici katmanlı nokta kontaklı FV hücre arka yüzü üretmenin basit, düşük maliyetli ve endüstriyel açıdan uygulanabilir bir yöntemi, lazer yakmalı kontak (İng. laser fired contacts) - LFC yöntemidir.

PERL konseptinin birçok yeniliği, BP-Solar üreticisinin ürettiği Satürn hücresinde 2003 ila 2009 yılları arasında ve Suntech üreticisinin ürettiği Pluto hücresinde 2009 yılından beri seri üretimde uygulanmaktadır. Pluto hücresinde, hücre yüzeyine 20 ila 25 mikrometre kadar ince oyuklar kesilir ve bu kesikler daha yoğun olarak n katkıları ve kontak olarak bir gümüş alaşımı ile doldurulur. Standart hücrelerde kontak nedeniyle görülen kapatma oranı %10 civarındayken, bu yöntemle sadece %4 oranında bir gölgelenme elde edilebilir. Bunun sonucunda tekli kristal yapılu Pluto hücreleri için % 18,8, çok kristal yapılu Pluto hücreleri için ise %17,2 gibi yüksek bir verim oranı elde edilir. Tarif edilen bu hücre iyileştirici yöntemlerin başka üreticiler tarafından da uygulamaya konması beklenmektedir.



Şekil 1.6: Pluto FV hücresi
[Suntech Power]

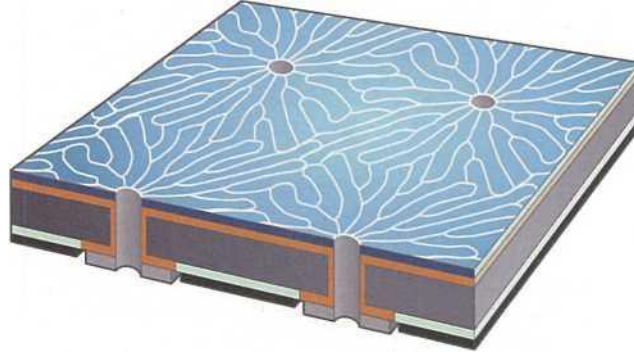
Arka yüzey kontaklaması

Bu hücre türlerinde, hem artı, hem de eksi kutup hücrenin arkasında diğer hücrelerle birleştirilir. Bu şekilde ışığa bakan ön yüzde bulunan kontaktların daha ince olması veya hiç bulunmaması sonucu gölgelenme etkisi düşer ve aynı zamanda hücrelerin daha sonra bir FV modül haline getirilmesi daha kolay olur. Böylece hücre araları daha sık daha homojen bir modül görünümünü halini alır. Hâlihazırda aşağıda tarif edilen üç ayrı yöntem uygulanmaktadır: Bunlar MWT, EWT ve IBC yöntemleridir.

MWT FV Hücresi en kolay olarak üretilebilen arka yüzey kontaklamalı hücre, MWT hücresi (İng.Metal-Wrap-Through) denen hücredir. Bu yöntemde, sadece modül haline birleştirme için gereken toplayıcı kontak şeritleri hücrenin arka yüzeyine tatbik edilir. Bunlar dilime delinen, metal kaplamalı az sayıda delik üzerinden ön

yüzde kalan az ince ön kontaklarla birleştirilir. Verim bu yöntemle ancak bugüne kadar sadece yaklaşık %0,3 oranında artırılabilmiştir. Belçikalı Photovoltech şirketi 2006 yılından beri bu yöntemi uygulayarak FV hücreler üretmektedir. Hollandalı Solland Solar şirketi, 2010 yılından beri Avusturyalı AT&S şirketi ile birlikte Sunweb ismini verdikleri ve karakteristik kontak deseni bulunan MWT hücrelerinden oluşan FV modüller için bir prototip üretimine geçmiştir. Ticari amaçlı tekli kristal yapıları MWT hücrelerinde en yüksek verimi, % 17,3 ile Bosch Solar şirketi, Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Araştırma Enstitüsü (ISE) araştırmacıları ile birlikte elde etmeyi başarmıştır. Japonlu üretici Kyocera ise, 2010 yılında 54 adet MWT hücresinden oluşan, hücre verimi %17,5, modül verimi ise % 16,6 olan bir modülü tanıtmıştır.

Photovoltech şirketinin Maxis BC+ adlı arka yüzey kontaklamalı MWT hücresinin ön tarafta ince bir kontak ızgarası varken, toplayıcı kontaklara bağlantı sadece arka yüz üzerinden gerçekleşir. Bunun için dilimler daha sonra tatbik edilecek toplayıcı kontak şeritlerinin hatları boyunca lazer ile delinir. Bu hücreler, yüzeylerine homojen olarak dağıtılmış belirli bir yönü olmayan oyukların kesildiği, çoklu kristal yapıları dilimlerden üretilmektedir. Bu dokulama ile tane sınırları birbirlerine karışır ve yüzey mat bir görünüm alır. Yansımayı önleyici tabaka tatbik edildikten sonra 5 inçli hücrelere ince baklava desenli kontak ızgarası bastırıldı. Ne var ki Photovoltech, bu hücrelerin üretimini tamamen bırakarak bugün artık sadece standart kristal yapıları hücrelerin ön kontak ızgarasına benzeyen bir ızgaraya sahip 6 inçli hücreler üretmektedir. Standart hücrelere fark olarak sadece biraz daha ince kontak şeritleri ile iki arka yüzde akım toplayıcı hatlar yerine metal çevreli delikli bağlantılar dikkat çeker. Arka yüzey kontaklaması, boydan boya tatbik edilen iki adet negatif kontak şeridi ve daha kısa olan 16 tane pozitif kontak üzerinden gerçekleştirilir. Bugüne kadar bu yöntemle %16,4'e varan hücre verimleri ve %14,9'a varan modül verimleri elde edilebilmiştir. Homojen görünümleri ve aynı zamanda yüksek performans verimi sayesinde bu modüller özellikle bina entegrasyonuna uygundur.

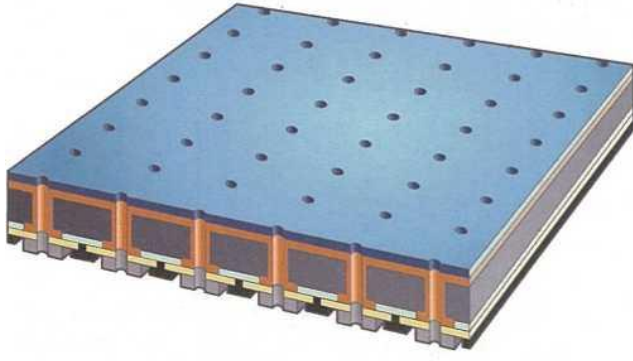


Şekil 1.7: MWT hücresinin yapısı



Şekil 1.8: Maxis BC+ MWT arka kontak hücresi, 5 inç [Photovoltech]

EWT fv hücresi: EWT (İng. Emitter-Wrap-Through) hücresi ile, tamamen gölgelenmeden arındırılmış bir ön yüzey elde edilmektedir. Ancak bu yöntemde uygulanan delikler, aktif hücre malzemesinin alanını azaltır. Almanya'daki Fraunhofer ISE ve ISFH enstitüleri tarafından geliştirilmiş olan EWT hücreleri, %18 ile çoklu kristal yapıları standart bir hücreye göre yaklaşık %4 oranında daha yüksek bir hücre verimini elde eder. Bunun için elektron toplayici katman (n yayıcı) çok sayıda, lazer ile delinmiş (yakl. 1 delik/mm²) delikle ön yüzden hücre arkasına uzatılır. Bu şekilde elektronların arka yüzdeki kontaklara ulaşmak için kristal bozuklukları yoğun olan yarıiletken malzemesini geçmesine gerek kalmaz, deliklerin yüksek oranda katkılanmalı kenarları üzerinden düşük kayıplarla arka yüzeyine hareket ederler.

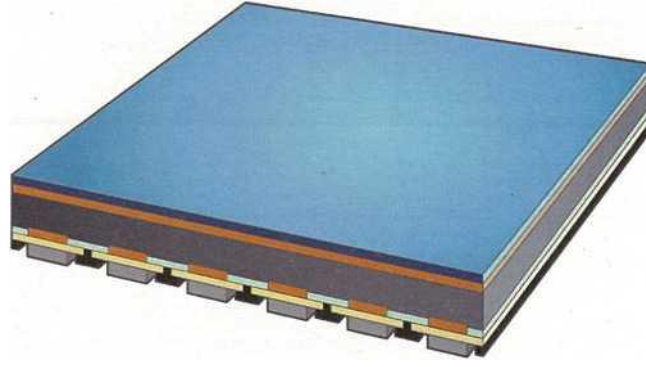


Şekil 1.9: EWT hücresinin yapısı

Bu yöntemle elektron toplayıcı özellikten yararlanılarak, düşük arılığa sahip silisyum malzemenin fazla kayıp olmaksızın kullanımı mümkün olmaktadır. Verimi daha da artırabilmek için, yukarıda tarif edildiği gibi arka yüzeye rekombinasyon önleyici bir uygulama, yerel nokta kontaklaması veya benzeri yöntemler uygulanır. 2008 yılından beri tekli ve çoklu kristal yapıları ve UMG hücrelerden oluşan EWT hücreleri, 2009 yılının sonunda Applied Materials şirketi tarafından satın alınan ABD'li üretici AdventSolar tarafından seri üretimde üretilmektedir. Q-Cells ve Stiebel Eltron adlı üreticiler de EWT FV hücre üretimi için endüstriyel uygulama adaptasyonlarını geliştirmiştir.

Arka yüzey kontaklamalı (ibc) fv hücreler:

Tamamen arka yüzey kontaklamalı FV hücreler (İng. *back junction* veya *Interdigitated Back Contact = IBC*), sadece n katkılanmalı yüzmele bölgesi (İng. floatzone) silisyum dilimleriyle uygulanabilir. Elektronlar, arka yüzdeki pn geçişine ulaşabilmek için tüm hücreyi difüzyonla geçmek zorunda olduğu için, yüksek bir silisyum arılığı gereklidir. Tekli kristal yapıları standart dilimlerinde (Cz silisyum), silisyum malzemesinin düşük arılığı nedeniyle yüksek kayıplar meydana gelirdi. Bu nedenle klasik olarak p katkılanmalı dilimlerden oluşan hücrelerin delinerek elektronların düşük kayıplarla arka yüzdeki p yüzeyine ulaşmalarını sağlamak için nokta kontaklarla donatılması gerekir.



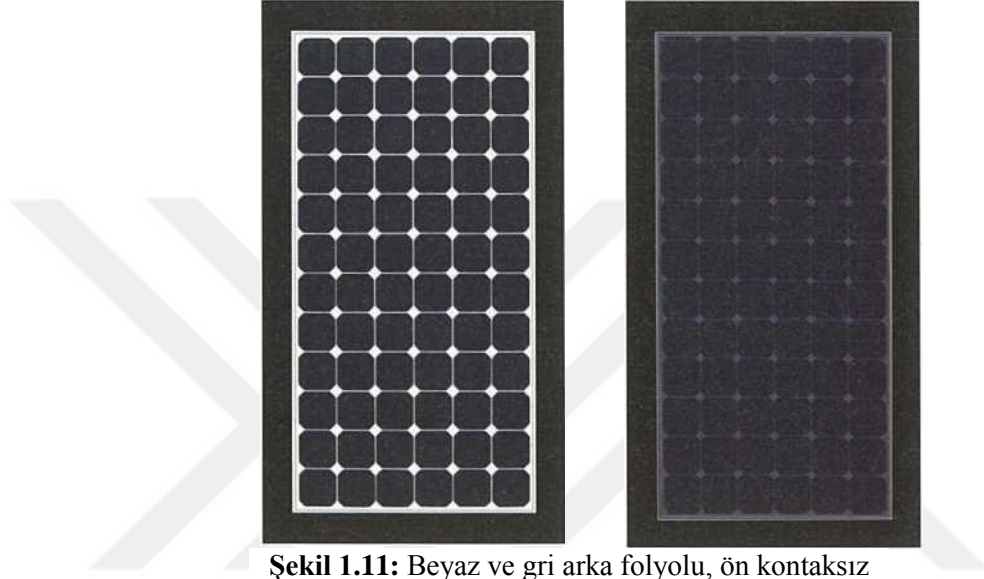
Şekil 1.10: Arka yüzey kontaklamalı (IBC) FV hücrenin yapısı

Amerikan şirketi SunPower'a ait FV hücrelerde ön yüzlerde herhangi bir kontaklama görülmez. SunPower hücreleri, Amerikan uzay ajansı NASA için uzay uygulamalar amacıyla üretilmiş olan hücrelerin, ticari amaçla maliyeti düşürmek üzere geliştirilmiş türevleridir. Bu hücreler için kullanılan dilimler, standart FV dilimlerden farklı olarak n katkılanmalı tekli kristal yapılı, yüzmeli bölgesi silisyumdan üretilmektedir, pn geçişi, şerit halinde n ve p katkılanmasıyla elde edilir ve aynı zamanda yansıtıcı görevini gören toplayıcı metal şeritlere bağlanır. Hücrenin her iki yüzü, rekombinasyon önleyici katman olarak silisyum oksit ile kaplanır. Kontaklardaki rekombinasyon olgusunun azaltılması için, elektrotlar sadece rekombinasyon önleyici katmanda nokta halinde bulunan kontak delikleri üzerinden p ve n katmanlarına bağlanır.

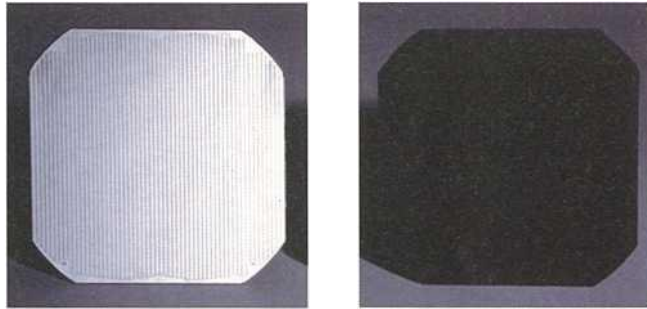
Bu hücrelerle SunPower'da en yüksek verim oranlarına ulaşan seri üretimli modüller üretilir. Bu hücrelerin verimleri seri üretimde %22,4'e kadar ulaşarak, %20'ye varan modül verimlerini mümkün kılmaktadır. Bunlar güneş tayfının geniş bir aralığında yüksek tayfsal duyarlılığa sahiptir (bkz. Şek. 2-158). Ön yüzdeki hafif n katkılanması sayesinde kısa dalga boylu mavi tayf aralığındaki duyarlılık artmakta ve bu sayede zayıf ışınımına karşı iyi bir duyarlılık elde edilmektedir. Kristal yapılı standart hücrelere göre hücre gerilimi biraz daha yüksek olup açık devre gerilimi 0,67 V'tur. Die SunPower hücrelerindeki çöküm gerilimi 5,5 V dolayında olup, bu sayede hücreler modül haline getirildiğinde köprüleme diyodu sayısı azaltılabilmektedir. Kutuplaşma Etkisi SunPower hücrelerinde, modüllerdeki artı kontak topraklanmadığında bir kutuplaşma etkisi meydana gelir. Bu geri döndürülebilir degradasyon etkisi, performansın önemli ölçüde düşmesine neden olur.

Bu olgu henüz planlama aşamasındayken ve hatta modül konseptinin seçiminde de dikkate alınmak zorundadır. Kutuplaşma etkisi, farklı olarak eksi kutbun

topraklanması gerektiği başka kristal hücre konseptlerinde de görülebilir (örn. String Ribbon gibi). Bu etkinin oluşma etkenleri, uzmanlar tarafından hala tartışılmaktadır. Söz konusu etki, elektronların modülün cam yüzeyinde dolaşarak karşı sodyum iyonları ile birlikte topraklamaya karşı statik bir yükün oluşmasıyla meydana gelir. Bu statik yük ise FV hücrenin elektrik alanına karşı etki ederek onun verimini düşürür. İlgili kutup topraklanarak bu statik yükün oluşması etkili bir şekilde önlenmektedir.



Şekil 1.11: Beyaz ve gri arka folyolu, ön kontaklı modüller [SunPower]



Şekil 1.12: Sun Power hücresinin kontak çizgili arka yüzü ve koyu renkli

Hibrit hücreler - hit fv hücreleri

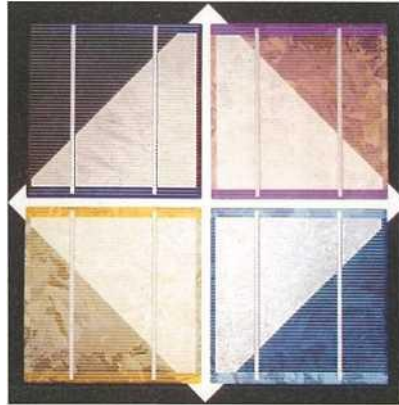
Üretim: HIT FV hücresi, kristal yapılı ve ince katmanlı FV hücrelerin kombinasyonudur. HIT'in İngilizce açılımı olan "heterojunction with intrinsic thin-layer" (düzensiz geçişli katkılanmamış ince katmanlı), bu hibrit FV hücrenin yapısını tarif eder. Söz konusu hücre, kristal yapılı silisyum ve amorf silisyumdan oluşur. Bu iki silisyum katmanı, ek olarak katkılanmamış ince bir katmanla birbirine bağlıdır. HIT hücresinin çekirdeği ise, tekli kristal yapılı bir silisyum dilimidir. Bu dilim her iki yüzünde ince olarak amorf silisyum ile kaplanır. Ara katman olarak i katmanı (İng. intrinsic) da denen, son derece ince, katkılanmamış bir amorf silisyum katmanı kristal yapılı dilimi amorf silisyum katmanına bağlar. Ön tarafta, p katkılanmalı bir a-Si katmanı tatbik edilir, bu katman ise n katkılanmalı tekli kristal yapılı dilim ile pn geçişini oluşturur. Standart silisyum FV hücrelerinde pn geçişini oluşturmak için aynı yarıiletken malzemesi farklı şekilde katkılanırken, bu HIT FV hücrelerinde pn geçişi tamamen farklı yapıya sahip iki yarıiletken katmanı arasında meydana gelir. Bu nedenle düzensiz geçişten bahsedilir (İng. heterojunction). Amorf p/i katmanı ve n katkılanmalı dilim, amorf ince katmanlı hücrelerdeki gibi bir p-i-n yapısı oluşturur. Dilimin arkası, güçlü olarak n katkılanmalı silisyum ile kaplanarak, bağlı olmayan elektronların arka yüz elektrodunda birleşmesi önlenir. Hücre yüzeylerinde ise yansıma önleyici katman ve dilim dokulanması uygulanarak, yansıma nedenli kayıplar minimum düzeyde tutulur.

Amorf ince film hücrelerinde normalde görülen ışıksal başlangıç degradasyonu nedenli verim düşüşü bu hücre türlerinde görülmez. Kristal yapılı FV hücrelere göre HIT hücreleri yüksek sıcaklıklarda daha yüksek enerji verimi ve daha geniş bir tayf aralığının değerlendirilmesi ile öne çıkar. Sıcaklık artışına bağlı performans düşüşü bu hücrelerde santigrad derece başına %0,33 iken, salt kristal yapılı silisyumdan oluşan hücrelerde bu oran yakl. %0,45 dolayındadır. Amorf silisyumda kaplama için gereken buharlaştırma sıcaklığı sadece 200°C'dir. Bu sayede dilimler daha az ısıl yüklenmeye tabi olduğu için kalınlıkları 0,1 mm'ye kadar düşürülebilmektedir. Daha düşük hücre kalınlığı ise hücrelerin iyi esnek yapıya sahip olmalarını sağlar. HIT modüllerinin pratik uygulama sonuçları standart kristal yapılı modüllere göre belirgin ölçüde kazanç artışları göstermiştir. Örneğin 100 cm²'lik bir laboratuvar hücresi ile %23 oranında bir verim elde edilebilmiştir. Seri üretiminde elde edilen modül verimleri ise %17,4 düzeyindedir.[1]

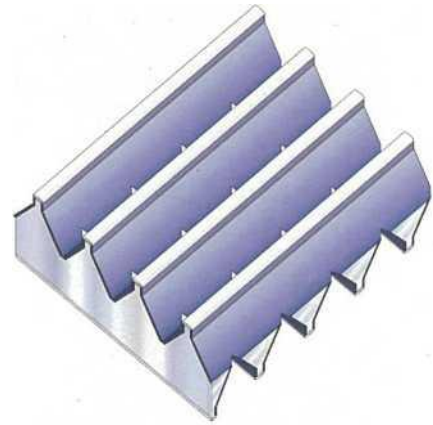
Transparan kristal yapılı fv hücreler

Üretim: Hücre üreticisi Sunways, iki farklı transparan hücre türü sunmaktadır. Daha eski, çoklu kristal yapılı türü (eski adıyla POWER hücresi), mekanik bir dokulama yöntemi ile işlenen çoklu kristal yapılı dilimlerden üretilmektedir. Hızlı dönen bir merdane yardımıyla silisyum dilimlerinin ön ve arka yüzlerine çukurlar frezelenir. Bu şekilde ön ve arka yüze işlenen çukurlar, birbirlerine 90°'lik açıyla döndürülerek konumlandırılır. Çukurların kesiştiği noktalarda, ancak mikroskopla görülebilen küçük delikler meydana gelir. Bu deliklerde FV hücre ışık geçirir. Düzenli delik yapısı hücrenin transparanlığını oluşturur. Delik büyüklüğüne göre transparanlık derecesi %0 ile %30 arasında ayarlanabilir. Teknik nedenlerle, hücrenin kenarında ince, ışık geçirmeyen bir kenar şeridi arta kalır. Hücre iki taraflı olarak ışığa duyarlı olacak şekilde de üretilebilir.

Yeni geliştirilmiş olan transparan Sunways Solar Celi hücrelerinde, tekli kristal ya da isteğe göre çoklu kristal yapılı dilimler lazer yardımıyla aynı şekilde düzenli ama daha kaba delikli bir yapıyla donatılabilir. Delikler müşteri isteğine bağlı olarak kare, yuvarlak ya da farklı biçimli olabilir. Dokulu yüzeyi sayesinde hücre homojen siyah görümlü olur. Modül içinde hücre aralıkları serigrafik yöntemle karartıldığı için, transparanlık için sadece hücrelerin delik yapısı belirleyici olur.



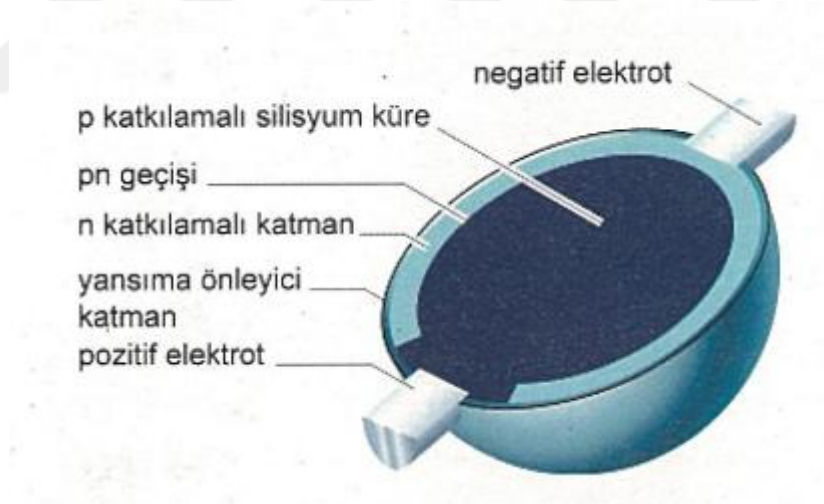
Şekil 1.14: Farklı yansıma önleyici kaplamalı, frezeli çoklu kristal yapı



Şekil 1.13: Transparan Sunvways Solar Celi hücresinin frezeli çukurlu

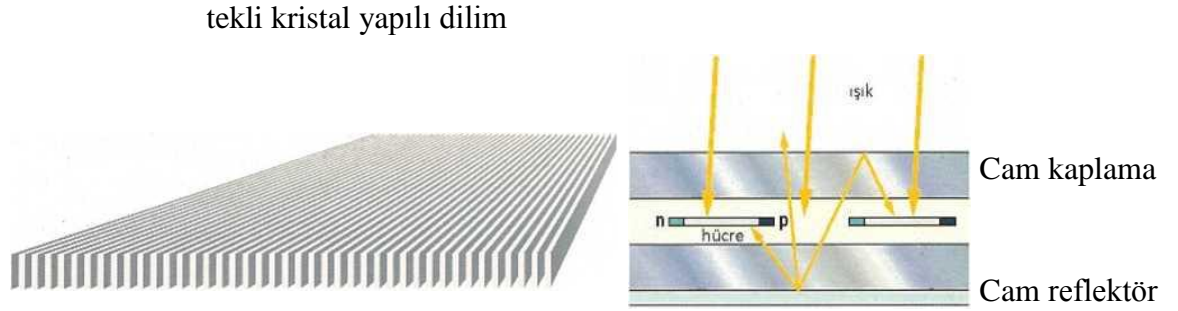
Küresel fv hücreler

Henüz 1990'lü yıllarda, Texas Instruments şirketi küresel silisyum hücreleri üzerinde araştırmalar yapmıştır*. Henüz 1990'lı yıllarda, Texas Instruments şirketi küresel silisyum hücreleri üzerinde araştırmalar yapmıştır. Taşıyıcı malzemesi olarak Alüminyum trapez sacına tatbik edilerek üretilen bu küresel FV hücre modülleri, neredeyse %9,5 oranında bir verimi yakalamıştı. Ancak bunların üretimi artık durdurulmuştur. Japon Kyosemi Corp. şirketi, 2006 yılından beri çok küçük modülleri küresel hücreler kullanarak üretmektedir. Çapları 1 ila 1,2 mm arasında değişen küresel FV hücreler p katkılamalı sıvı silisyum damlalarından üretilmektedir. Bunlar vakum ortamda düşerken küreler haline dönüşür. Kürelerin yüzeyleri n katkılanır ve gerekirse yansıma önleyici bir katmanla kaplanır. Kontakları bakır tellerden oluşan küresel hücreler, transparan yapay reçineye daldırılarak küçük dikdörtgen ya da yarımküre biçimli modüller haline birleştirilir. Neredeyse tüm hücreyi çepeçevre saran pn geçişi sayesinde küresel FV hücre, eğik olarak düşen ışınları da en iyi şekilde yakalayabilecek yapıdadır.



Şekil 1.15: Küresel hücrenin yapısı[1]

Şerit biçimli "sliver" hücreleri



Şekil 1.16: Sliver Cells şerit hücreleri ve modüllerinin üretimi

Avustralyalı Origin şirketi tarafından üretilen Sliver hücreleri, 1 mm kalınlığında, tekli kristal yapılı, yüzmeli bölgesi silisyum dilimlerinden oluşur. Bu dilimler, yüzeye dik olarak asitle oyularak, çok sayıda, 0,05 mm genişliğinde şeritler ve aynı genişlikte aralıklar bırakılır. Bu şekilde taranan dilimin bir yüzü fosfor ile n katkılanır, diğer yüzü ise bor ile p katkılanır. Sonra dilim dokulanır, rekombinasyon önleyici ve yansıma önleyici birer katmanla donatılır. Bu şekilde oluşan hücre şeritleri, birbirlerine mesafe bırakılarak iki cam tabakanın arasına sıkıştırılarak yarı saydam modüller haline getirilir. Testlerde, tam alanlı modüllerde %17,7, %50 oranında alanlı modüllerde ise %13 düzeyinde verimler elde edilmiştir. Verim, Sliver hücreleri arasında modüle entegre edilen, arka taraflı veya çubuk biçimli görsel reflektörler ya da prizmalarla artırılabilir. Sliver hücreleri ile silisyum ihtiyacı, standart dilimlerin yaklaşık yedide birine kadar düşürülebilir. Karmaşık modül imalatı ise bu yöntemin dezavantajıdır. Bugüne kadar Sliver modülleri henüz seri üretiminde üretilmemektedir.

1.3.3.2 İnce film hücreleri

1990'lı yıllardan beri FV hücrelerin üretimi için gittikçe daha çok ince katman yöntemi geliştirilmektedir. Bunda fotoaktif yarıiletkenler ve kontaklar ince şeritler halinde taşıyıcı bir malzemeye (çoğunlukla cam), çoğu kez fiziksel buhar çökeltimi ile (magnetron püskürtmesi ya da katotlu buhar püskürtmesi) veya kimyasal buhar çökeltimi ile ince katmanlar halinde tatbik edilir. Yarıiletken malzemesi olarak amorf silisyum (ASi), bakır-iridyum-diselenür (CIS) ve kadmiyum-tellürür (CdTe) kullanılır. Bu malzemelerin yüksek ışık soğurma özelliği nedeniyle 0,001 mm'den düşük katman kalınlıkları güneş ışığının döndürülmesi için yeterli olmaktadır. Bu

malzemeler, yabancı atomlarla kirlenmeye karşı daha toleranslıdır. Kristal yapılı silisyum hücrelerin üretiminde erişilen 1.500°C gibi yüksek sıcaklıklar yerine, buharlı çökeltim için sadece 200 ila 600°C arası sıcaklıklar gereklidir. Daha düşük olan malzeme ve enerji sarfiyatı ve üretimde erişilmiş olan yüksek otomatikleşme derecesi ve verimlilik sayesinde, kristal silisyum teknolojisine göre önemli ölçüde maliyet düşürme potansiyellerini beraberinde getirir.

İnce katmanlı hücreler, kristal yapılı hücrelerden farklı olarak biçimleri açısından standart dilim ebatlarına bağlı değildir. Böylece modül ebatları daha esnek bir şekilde seçilebilir. İnce katmanlı hücrelerin kristal yapılı hücrelere göre bir diğer ayırt edici özelliği, hücrelerin modül halinde bağlanma şeklidir. Kristal yapılı FV hücrelerde, hücreler tek tek birbirlerine lehimlenir ve hücre imalatı ile modül imalatı birbirlerinden ayrı süreçlerdir; ince katmanlı hücreler ise henüz hücre imalatında birbirleriyle içten bağlanır. Hücrelerin elektrik bakımından ayrılması ve birbirlerine bağlanması, her hücrenin şerit biçimli tekli hücrelere kesildiği dokulama işlemleriyle gerçekleşir.

Hücrenin içinde ışınların soğurulduğu alanları oluşturmak için, taşıyıcı cam öncelikle asitle oyulabilir. Sonrasında ön kontakların tatbiki yapılıır. İnce katman modüllerinde, bu görevi yüksek derecede saydam ve iletken bir metal oksit katmanı görür. Bu katmana TCO katmanı (İng. transparent conductive oxide) denir. Yaygın TCO malzemeleri, çinko oksit (ZnO), kalay oksit (SnO₂) veya kalay katkılamalı indiyum oksit'tir (In₂O₃:Sn ya da ITO). TCO katmanlarının üretilmesi, ince katmanlı hücre üretiminde en önemli maliyet faktörüdür. SnO₂ üretimi için atmosferik basınç altında buharlı çökeltim (APCVD) süreci en uygun yöntemdir. ZnO bazlı TCO, alçak basınçlı buhar çökeltimi (İng. low pressure chemical vapour deposition, LPCVD) ya da magnetron püskürtmesi yöntemiyle üretilir. ITO kontağı farklı buhar çökeltim yöntemleri ile üretilebilir. TCO kontağı dokulandırılarak, ışın kapanı fonksiyonu gerçekleştirilebilir. TCO sonrasında lazerle yaklaşık 0,5 cm genişliğinde şeritler halinde kesilir. Sonrasında münferit hücre katmanlarının çökeltimi yapılıır. Burada kimyasal veya fiziksel buhar çökeltimi devreye girer. Daha sonra lazer hücreyi TCO kesiklerine denk gelmeyecek şekilde keser. Arkasında yapılan arka kontak kaplaması, çoğunlukla püskürtme yöntemi ile gerçekleştirilir. En son yine biraz kaydırılarak yapılan bir lazer kesimi ile hücre şeritleri birbirlerinden ayrılır ve aynı zamanda dahili hücre bağlantılarını meydana getirir.

Çoğu ince katman hücreleri düşük bir verime sahip olmasına rağmen, en yüksek performanslı ince katman hücreleri %12 düzeyinde bir modül verimine ulaşabilir ve böylece kristal modüllere göre bir alternatif olabilir. Verimleri daha düşük olduğu halde, ince katman hücrelerinden alınan enerji kazanımı belirli koşullar altında oldukça yüksek olabilir. Özellikle yayınlık veya zayıf ışınların değerlendirilmesi ince katman hücrelerinde daha iyi olabilir. Ayrıca ısı geçirgenlik katsayısı daha iyidir, yani daha yüksek işletim sıcaklıklarındaki güç düşüşü, kristal bazlı teknolojilere göre daha azdır. İnce katman hücreleri, hücre biçimleri nedeniyle (ince uzun şeritler), gölgelenme etkisine karşı daha az duyarlıdır.

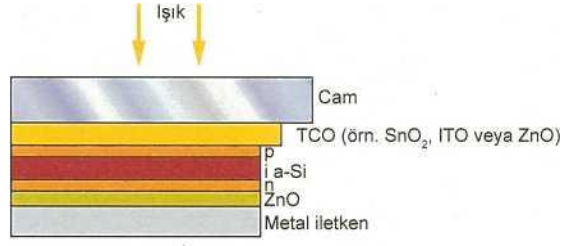
Hücrelerin arasındaki ince, saydam ayırıcı kesikler, enerji kazanımının yüksek tutulması için olabildiğince küçük ve çıplak gözle neredeyse görülmeyecek kadar ince olarak gerçekleştirilir. Yine de birer tasarım unsuru olarak isteğe göre daha geniş tutulabilirler. Hücrelerin arasındaki ayırıcı kesikler ne kadar geniş olursa, saydamlık derecesi de o denli yüksek olur. Yarı saydam görsellik, hücre şeritlerine dik ve ilave olarak uygulanan ek kesiklerle ayarlanabilir.



Şekil 1.17: ince film modüllerine mahsus tipik şerit görünümü, örnek: CdTe'li modül [First Solar]

İnce katman hücrelerinde %12 dolayında modül verimleri gerçekleştirilebildiğinden beri gittikçe daha çok üretici bu teknolojiyi benimsemektedir. İnce katman hücreleri alanındaki dinamik gelişmeler ve yeni şirket kuruluşları, özellikle kaplama teknolojisi konusunda başka sektörlerde (elektronik, makine üretimi, vs.) elde ettikleri ilerlemeleri fotovoltaik sektörüne de uyarlayan, Oerlikon Cooperated, Applied Materials ve Centrotherm gibi üretim tesisleri üreticileri sayesinde mümkün olmuştur.

Amorf silisyum hücreler



Şekil 1.18: Amorf bir hücrenin katman yapısı

Üretim: İnce katman teknolojisinin klasik malzemesi, amorf silisyumdur. Henüz 1974 yılında araştırmacılar ilk işlevsel amorf hücreleri geliştirmiştir. İyi suni ışık duyarlılığı sayesinde bu ilk ince katman hücresi neslinin özellikle tüketim eşyası alanındaki başarı öyküsü, kısa süre sonra başlamıştır. O tarihten beri amorf mini modüller, hesap makineleri, saatler, el fenerlerinde vb. ürünlerde milyonlarca kez kullanılmaktadır. Amorf (düzensiz yapı) silisyum, düzenli bir kristal yapı oluşturmaz, atomlar düzensiz bir yapı halinde bulunur. Bu yüzden çok sayıda açık bağlar oluşur ve bu bağlara doymak için hidrojen çöker. Bu şekilde hidrojenleşen amorf silisyum (kısaca: a-Si:H), kimyasal buhar çökeltimi ile gaz halindeki Silan'dan (SiH₄) bir plazma reaktöründe (İng. plasma enhanced Chemical vapour deposition, PECVD) üretilir. Plazma ise, reaktöre yüksek frekanslı bir gerilim verilerek meydana getirilir. Bunun için proses sıcaklığı olarak 200°C ila 250°C arası sıcaklıklar yeterlidir. Buysa taşıyıcı camın daha az ısıl yüklenmeye tabi olmasını sağlar. Daha düşük proses sıcaklıkları sayesinde, metal veya plastik folyolar gibi farklı malzemelerin kullanımı da mümkündür.

Katkılanma, ilgili katkılanma maddelerini içeren gazlar katılarak gerçekleştirilir (örn. p katkılanma için B₂H₆ veya n katkılanma için PH₃). Katkılanmış amorf silisyum çok kısa bir difüzyon uzunluğuna sahiptir; yani önlem alınmazsa serbest elektronlar hemen yeniden birleşir (rekombinasyon) ve elektrik üretimi bu haliyle neredeyse hiç mümkün olmazdı. Bunun önlenmesi için, elektronların çok daha uzun ömürlü oldukları, katkılanmamış (İng. intrinsic) bir i katmanı n ile p katkılanmalı katmanların arasına yerleştirilir. Burada p ve n katmanları serbest elektronları ayıran elektrik alanını oluştururken, ışık soğurular ve elektrik enerjisi üretilir. Bu yapıya p-i-n yapısı denir, p ve n katmanları, sadece serbest elektronları ayıran elektrik alanını

oluşturur. TCO ön kontaklar olarak çoğunlukla düşük maliyetli alüminyum katkılanmalı çinko oksit (ZnOAl), ve zaman zaman da kalay oksit (SnO₂) ya da indiyum kalay oksit (ITO) kullanılır. Alt TCO katmanı, metalik arka yüz kontağı ile reflektör işlevini görür. Hücre Şek. 2-117'de gösterildiği gibi ön taraflı cama çökeltirse, karakteristik p-i-n yapısı meydana gelir. Alternatif olarak ters n-i-p katman sıralaması uygulanarak çökeltme işlemi arka yüze yapılabilir. Bu şekilde, çatı sistemlerine mükemmel bir şekilde entegre edilebilen, örn. metal veya plastik folyolar gibi saydam olmayan, hafif taşıyıcı malzemelerin üzerinde FV modüller gerçekleştirilebilir. Amorf hücrelerin performansı, ışıksal başlangıç degradasyonu (bu olguya Staebler-Wronski etkisi de denir) nedeniyle ilk 6 ila 12 aylık çalışma süresince yaklaşık %20-30 oranında düşüş göstererek bu dönemden sonra anma performansı olarak kararlı bir değerde kalır. Amorf hücrelerin dezavantajı ise, düşük dirençleridir. Verimi artırmak için birden fazla p-i-n yapısı dizgi halinde hücreler olarak üst üste çökeltilir. Bu şekilde çift veya üçlü hücre dizgileri mümkündür. Her hücre güneş ışığı tayfının farklı bir aralığı için ayarlanabildiğinden, örn. germanyum ilave edilerek (a-SiGe), daha yüksek verimler elde edilebilir. Ayrıca münferit i katmanları daha ince ve dolayısıyla ışıksal degradasyona karşı daha az duyarlı olduğu için, dizgili hücrelerdeki eskime etkisi azalır.



Şekil 1.19: Metal folyo bazlı, trapez sac profillerine yapıştırılmış olan, esnek amorf modüller [Hoesch Contecna; modül üreticisi: United Solar]

Amerikan United Solar şirketi, henüz 1994 yılında 30 cm x 30 cm ebadında üçlü dizgili bir modül ile o zaman rekor sayılan %10,2 oranında bir modül verimini elde etmeyi başarmıştı. Ancak seri üretimdeki modüllerin verimleri sadece %5-7

arasındadır. UniSolar modüllerinin özelliği, hücrelerin kaplayıcı cam olmadan bir flüor polimer ve EVA bileşiminde esnek bir metal folyonun üzerine çökeltilebilmeleri ve böylece en farklı malzemelere tatbik edilebilmeleridir. Modül içinde boydan boya hücre şeritleri yerine, UniSolar ayırık, büyük alanlı, örn. 34 cm x 12 cm ebadında hücre alanları kullanır. Bu hücre alanlarının her birinde birden fazla hücre şeridi bakır tellerle birbirleriyle bağlı olur. Hücre alanları köprüleme diyotları üzerinden büyük modüller halinde birleştirilir. Ayrı hücre alanlarına bölünmesi ve köprüleme diyotlarının kullanılmasıyla, bu modüllerin gölgelenmeye karşı daha az duyarlı olmaları sağlanır. Almanya piyasasında Biohaus, Corns, Rheinzink ve Alwitra şirketleri, UniSolar modüllerini temin etmektedir. Biohaus tedarikçisi, çatıya entegreli ya da çatı üstü uygulama için, bu hücreleri çerçeveli modüller olarak ya da trapez saçlı veya bitüm kaplamalı çatılara yapıştırılmak ya da benzeri uygulamalar için büyük çatı levhaları sunmaktadır. Plastik çatı şeridi üreticisi Alwitra, UniSolar hücrelerini doğrudan rulodan açılabilen plastik çatı folyolarına tatbik etmiştir. Böylece, örn. alüminyum karkaslı çatılar gibi standart modüller için uygun olmayan çatılar da FV teknoloji için değerlendirilebilir. Çatı şeritlerinin döşenmesi ve yapıştırılması normal plastik çatı kurulumu gibidir, sadece elektrik bağlantısı uygun soket bağlantılarıyla temin edilmek zorundadır. Corus ve Rheinzink şirketleri ise folyo modülleri kendi sac çatı sistemlerine entegre etmektedir. 2007 yılından beri Iowa Thin Film, Fuji Electric ve VHF şirketleri de esnek malzemelere tatbik edilen amorf FV hücreler üretmektedir.[1]

Mikromorf fv hücreler

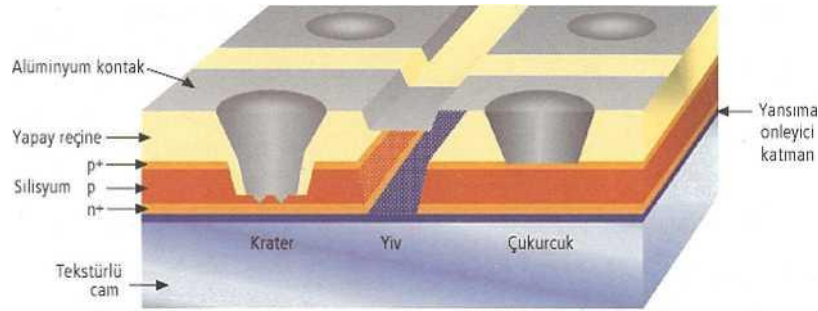
Üretim: Çoklu kristal yapıları silisyum ile amorf silisyumun çift dizgili hücreler halinde kombine edilmesiyle, daha yüksek verim elde edilebilir. Bu tür çift dizgili hücreler, mikro kristal ile amorf kelimelerinin birleşmesinden türetilen mikromorf terimi ile adlandırılır. Mikromorf hücrelerin üretiminde, cam üzerine yakl. 0,3 mikrometre kalınlığında amorf bir katman çökeltilir. Sonrasında, amorf silisyumun cama bitişik olmayan tarafına, plazma destekli kimyasal buhar çökeltmesi ile enerji akışı sağlanarak, amorf katmanın yaklaşık 0,25 mikrometre kalınlığındaki kısmının mikro kristal yapıya dönüşmesi sağlanır.

Cama bitişik geriye kalan tabaka, amorf silisyum halinde kalır. Bu şekilde oluşan çift dizgili hücrenin güneş ışığı tayfını değerlendirme özelliği, uzun dalga boylu ışınları

da soğurabildiği için daha iyi değerlendirebilir ve salt amorf hücrelere göre iki kat kadar daha yüksek bir verime sahiptir. Amorf katman, salt amorf hücrelere göre çok daha ince olduğu için, ışıksal başlangıç degradasyonu bu hucelerde yaklaşık %10'luk verim duşuşleri ile sınırlıdır. Mikro kristal yapılı silisyumun daha kotu olan soğurma kapasitesine rağmen 10 μ m'den daha ince katman kalınlıklarını gerçekleştirebilmek için, ışıksal kısıtirma (İng. light trapping) olgusu ışık kaparı görevi gören dokularla artırılmak zorundadır. Bunun için silisyum ve kontak katmanlarının yüzeyleri dokulanır. Üretim zorlukları, iki katman için elektriksel dengeyi sağlamak amacıyla mevcut dar aralığa göre düzenli bir okeltimin temin edilmesinde, TCO katmanının tayfsal tutumunun iyileştirilmesinde ve arka kontağın yansımada yatmaktadır.

2004 yılından beri Japon Kaneka şirketi, 1,2 m x 1 m buyukluğunde, verim oranları %9,1 olan mikromorf standart modüller üretmektedir. Adı geçen üretici 0,91 m x 0,46 m ebadında % 12 ile maksimum bir verimi elde etmiştir. Bu modüllere zaman zaman hibrit modüller dense de, dilim bazlı HIT huceleri ile karıştırılmamalıdır. 2008 yılından beri birçok diğer üretici mikromorf teknolojisini benimsedi, bunların arasındaki kristal yapılı huce üreticisinin sayısı ise gittikçe artmaktadır, mesela BoschSolar, Q-Cells, Schott Solar ve Sharp gibi. Bugüne kadar mikromorf standart modüllerin verimleri çoğunlukla %9 dolayındadır. Mitsubishi Heavy ve Sharp şirketleri, Kaneka şirketinden sonra 2008 yılında, toplam kapasitesi iki basamaklı megawatt düzeyine ulaşan, mikromorf teknolojisine dayanan huceler üretmiştir. Q-Cells şirketinin alt kuruluğu olan Sunfilm ve merkezi Almanya'nın Dresden şehrinde bulunan Signet Solar şirketi, 2008 yılında mikromorf ince katman modüllerinin seri üretimine başlamıştı. En yüksek kapasiteli, 490 Watt'hk Sunfilm modülü, 2,6 m x 2,2 m ebadıyla %8,5 düzeyinde bir verim sağlamaktadır. Alman Inventux şirketi, 30 MW kapasiteli üretim tesislerinde, %9,1 verimli mikromorf modüller üretmektedir.

Csg fv hücreleri

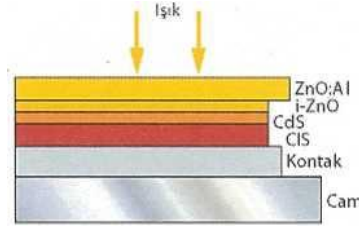


Şekil 1.20: CSG FV hücrelerinde katman yapısı

Avustralya'nın New South Wales Üniversitesinde geliştirilmiş olan CSG (İng. crystalline silikon on glass = cam üzeri kristal yapılı silikon) ince katman yöntemini kullanan tek salt mikro kristal modüller, Q-Cells üreticisinin alt kuruluşu olan CSG Solar'ın 2006 - 2009 yılları arasında ürettiği ticari amaçlı modüllerdi. Adından da anlaşılacağı üzere, bu modül türünde kristal yapılı silisyum doğrudan cama tatbik edilir. Ancak bunun için cam üzerine önce n ve p katkılmalı amorf silisyum tabakaları çökeltilir ve bu tabakaların daha sonra fırında 600°C'lik bir sıcaklıkta kristalleşmesi sağlanır. Sonrasında oluşan çoklu kristal yapılı silisyum katmanı lazer ile yaklaşık 6'şar mm'lik şeritler halinde kesilir ve yalıtıcı yapay reçine ile kaplanır. Diğer ince katman teknolojilerine göre bu yöntemin en belirgin farkı, hücrelerin yalıtıcı yapay reçine katmanına asitle oyulan yuvarlak ve kavis biçimli çukurlar üzerinden gerçekleştirilen nokta kontaklamasıdır. Bu yöntemle üretilen modüller en fazla %7,6 düzeyinde bir verim yakaladı. Şirket, verimi daha da artırmayı başaramadığı için üretim şimdilik durdurulmuştur. Bir araştırma ve geliştirme ekibi bu teknoloji üzerinde araştırma yapmaya devam etmektedir.

Bakır-indiyum-diselenür hücreleri (CIS)

Üretim: CIS FV hücrelerindeki aktif yarıiletken malzemesi, bakır-indiyum-diselenürdür. CIS alaşımı bazen ayrıca galyum ve/veya kükürt ile birleştirildiğinde, CIGS ya da CIGSSe FV hücrelerinden bahsedilir. Hücrelerin üretilmesi için önce taşıyıcı cam katodik püskürtme yöntemiyle arka kontak olarak ince bir molibden katmanıyla kaplanır.



Şekil 1.21: Bir CIS hücrenin katman yapısı

Soğurucu p iletken CIS tabakası, bakır, indiyum ve selen elementlerinin aynı anda bir vakum odacığında 500 ila 600°C'lik sıcaklıklarda buharlaştırılması suretiyle oluşturulur (Würth şirketi). Bir diğer yöntemi, anılan elementleri münferit katmanlar halinde oda sıcaklığında çökeltmesi ve sonrasında kısa süreli 500°C'ye kadar ısıtılarak CIS katmanı haline birleştirilmesidir (Avancis şirketi). Transparan ön kontak olarak n iletken alüminyum katkılamalı çinko oksit (ZnO: Al) görev görür. Bu katman bir i-ZnO ara katmanı olarak çökeltilir. CIS ve ZnO katmanlarındaki kristal yapılarındaki bozukluklar sonucu oluşabilen kayıplar, kimyasal banyoya tatbik edilen, n iletken özellikli bir CdS (kadmiyum sülfür) tampon katmanı ile önlenir. CIS FV hücrelerinde, amorf silisyum hücrelerinde görülen ışıksal degradasyon görülmez. Yine de çinko oksit katmanının neme karşı duyarlı oluşundan dolayı hücrenin iyi bir şekilde kapsüllenmesine (rutubete karşı korunmasına) dikkat edilmelidir.

Tüm bilinen ince katman teknolojileri arasında, halihazırda CIS modülleri en yüksek verime sahiptir. Laboratuvar koşulları altında küçük CIS hücreleri ile %20'lik verimler elde edilebilmiştir. Ancak büyük alanlara homojen bir çökeltimin gerçekleştirilmesi bilim adamları için hala büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle modül üretiminde en fazla %12,3 düzeyinde modül verimleri elde edilebilmektedir. Seri üretiminin yaygınlaşmasıyla, üretim maliyetinin kristal yapıli silisyum modüllerine göre çok daha düşük olacağı beklenmektedir. CIS modülü üreticileri iki gruba ayrılabilir:

FV hücrelerini geniş alanlı olarak cama çökeltilen üreticiler ve hücreleri çoğunlukla metal folyolara küçük parçalar halinde çökeltip sonra daha büyük modüller haline birleştiren üreticiler.

İlk grup üreticileri arasında Avancis, Daystar, Johanna, Showa Shell, Solibro, Sulfurcell ve WürthSolar şirketleri sayılabilir. 2009 yılında CIS hücreleri alanında lider üretici 30 MW'lık bir üretim ile WürthSolar idi. Selenyum kullanılmayan, bakır-indiyum-disülfüre dayanan CIS modülleri, 2005 yılından itibaren Alman Sulfurcell şirketi tarafından yılda 10 MW'ı geçmeyen bir kapasite ile üretilmiştir. Bu modüllerde seri üretiminde %8'den yüksek verimler, gerçekleştirilemediği için, Sulfurcell 2010 yılından beri yeni üretim tesislerinde yıllık 35 MW'lık kapasitede klasik CIGS modüllerinin üretimine başlamıştır.

İkinci grup üreticilerinden ABD'nin Tucson merkezli GlobalSolar 1998 yılından beri ve Almanyalı ortağı Solon ile birlikte 2008 yılından paslanmaz çelik folyolarına çökeltim yaparak CIS modülleri üretmektedir. Bu hücreler standart silisyum dilim hücreleri gibi birbirlerine lehimlenebilir ve modüller halinde kaplanabilir. Bugüne kadar esnek CIS modülleri sadece küçük ebatlarda askeri veya açık hava uygulamaları için seri üretiminde üretilmiştir. Solon ile birlikte 2009 yılından beri bu CIS hücreleri kullanılarak cam-EVA kompozit folyolar halinde standart modüller üretilmektedir. GlobalSolar bu esnek FV hücreleri Dow Solar Solutions (bir Dow Chemical kuruluşu) ile birlikte çatı kiremitlerine de dahil etmeyi planlamaktadır. Amerikan Daystar şirketi de benzeri bir konseptle piyasaya giriş yapmıştır. Daystar artık standart CIGS çift cam modülleri üretmektedir.

Yeni bir diğer CIS hücre konsepti, 2007 yılının ortalarında 10 MW pilot üretim tesisinin açılışını yapmış olan, Hollandalı Scheuten üreticisinin "Sunrise" adı altında geliştirdiği yöntemdir. "Sunrise" konseptinin özelliği, Scheuten'in 0,2 mm çapında küçük cam kürelere CIS katmanı uygulamasıdır. Bu CIS cam kürecikleri, FV hücreleri oluşturur ve binlerce küre halinde delikli bir metal folyoya tatbik edilip kontaklanır. Kürelerle donatılan metal folyo kare biçimli parçalara kesilir. Bu şekilde oluşturulan CIS küre yapısının ebatları, standart silisyum hücrelerine paralel olarak 156 mm x 156 mm olarak seçilerek, aynı modül üretim hatlarında modüller haline getirilmelerinin mümkün olması sağlandı. Yine Alman bir diğer üretici olan Leipzig merkezli Solarion şirketi, pilot üretim olarak rulodan-ruloya prensibiyle poli amid folyosu üzerinde CIS hücreleri üretmektedir. Bu hücrelerin öncelikle cam-cam modülleri haline getirilmeleri planlanmaktadır. Ancak daha sonra esnek CIS modüllerin üretimi de amaçlanmaktadır.

Kadmiyum – tellürür hücreleri (cdte)

Üretim: CdTe FV hücreleri, üretilirken ön kontak olarak çoğunlukla indiyum-kalay oksitten (ITO) oluşan transparan bir iletken katmanının tatbik edildiği taşıyıcı bir cam üzerine tatbik edilerek üretilir. Bu camın üzerine, olabildiğince ince, n iletken saydam CdS katmam ve sonrasında p katkılanmalı CdTe soğrucu katman tatbik edilir. Yarıiletken katmanları basit bir çökeltim yöntemiyle, standart vakum koşulları altında üretilir. Çökeltim kaynağı yaklaşık 600°C'ye kadar ısıtılır. 500°C ile biraz daha az sıcak olan taşıyıcı cam kaynağın yakınına getirilerek, yarıiletken malzemesinin cama "buhar" olarak düşmesi sağlanır. Çökeltimden sonra CdS ve CdTe katmanları klorürlü bir atmosfer altında temperlenerek (belirli parametrelerle ısıtılarak) 400°C altında CdS/CdTe kompozit bir katman halinde aktifleştirilir ve katmanın kristal yapı alması sağlanır. Daha sonra bir püskürtme prosesi ile metal arka kontak tatbik edilir. CdTe teknolojisi, günümüzde bilinen ince katman teknolojileri arasında en düşük maliyetli üretim yöntemidir. Büyük çapta seri üretime geçilmesi halinde, daha fazla maliyet düşürme potansiyelleri gerçekleştirilebilir. Ancak ağır metallere kadmiyumun piyasa tarafından kabul görmesi hususu yoğun tartışmalara neden olmaktadır. Yine de kadmiyum madencilikte bir yan ürün olarak meydana geldiği için, kadmiyum maddesinin zararsız CdTe FV modüller halinde işlenmesi ekolojik açıdan olumlu olarak değerlendirilebilir. CdTe, bileşim olarak zararsız olup son derece kararlıdır. Sadece 1.000°C ve üzeri sıcaklıklarda bozunur. Bu ağır metal çok daha düşük sıcaklıklarda eriyen camın içine kaplandığı için, yangın durumunda çevre ve sağlık için riskler söz konusu değildir. Amerikan First Solar şirketi, 2000 yılından beri seri üretimde CdTe modülleri üretmektedir. Üretimin ABD, Almanya ve Malezya'da hızlıca yayılmasıyla, FirstSolar 2008 yılında FV modül sektöründe lider olmayı başarmıştır. FirstSolar ayrıca FV modül üretiminde maliyet düşürme konusunda da liderdir. Şirket kullanım ömürleri tükenen modülleri geri alarak, çevreye uygun bir dönüşüme aktarmaktadır. 2009 yılından beri başka şirketler de CdTe modül üretimine başlamıştır.

1.3.3.3 Nano dokulu fv hücreleri

Gelecekte nano dokulu hücrelerin piyasadaki payı artacaktır. Dünya çapında farklı anorganik ve organik malzemelerden yararlanılan nano teknolojileri üzerinde çalışılmaktadır. Organik fotovoltaik alanındaki en önemli bilimsel başarıyı, Kaliforniya Üniversitesinde fizik profesörü olan Alan Heeger tarafından elde

edilmiştir. Bu başarısından dolayı 2000 yılında Nobel Kimya Ödülü'ne layık görülmüştür. Haziran 2007'de Nobel ödülü sahibi Koreli bilim adamı Kwanghee Lee ile birlikte, verimi %6,5 düzeyinde olan organik bir FV hücreyi tanıtmıştı. Organik hücreler için rekor sayılan bu verim, çift polimerli bir hücre ile elde edilmiştir. Anorganik malzemelerle yapılan nano dokulu FV hücrelerde silisyum ve CIS gibi klasik malzemeler kullanılır. Örneğin California Institute of Technology'de, BP Solar ile işbirliği halinde silisyum nano borucuklardan oluşan, yüksek verimli FV hücreler üzerinde çalışılmaktadır.

Nano dokulu cis hücreleri

CIS nano dokularının meydana getirilmesiyle, Amerikan Nanosolar şirketi, standart CIS üretiminde gerekli vakum süreçlerinden kaçınmayı başarmıştır. Nanosolar 2009 yılında 0,5 cm² büyüklüğünde bir laboratuvar hücresiyle % 15,3 oranında bir verimi elde edilebilmiştir. Adı geçen şirket, nano dokulu CIGS mürekkebinin doğrudan rulodan-ruloya prensibiyle alüminyum folyoya bastırabilmektedir. Sadece TCO ile ince molibden arka contağının üretiminde hala vakum süreçleri gereklidir. Her iki katmanın kalınlığı sadece 50 nm'dir. Hücreler metal folyolara bastırılır ve sonrasında standart silisyum hücreler gibi yaklaşık 6 inç büyüklüğünde parçalar halinde kesilir. Hücre parçaları delinir ve Geçişli Metal Sarım (İng. Metal-Wrap-Through - MWT) teknolojisi ile arka kontaklama yapılarak birleştirilir. Sonrasında modüller cam-EVA kompozit folyolarla kaplanır. Nanosolar, kontaklama ve modüllerde gerçekleştirilen yüksek üretim hızlarını vurgulamaktadır. Şirket 2009 yılında Almanya'nın Luckenwalde şehrinde ayda 1 MW'lık kapasiteli CIS nano hücreli modül üretimine başlamıştır. Üretilen modüllerin kapasitesi 160 ila 220 W arasında olup verimleri en fazla %11'e çıkmaktadır. Başka ince katman modüllerinden farklı olarak, nano FV modüllerinde 6 A gibi yüksek bir akım ve 1.500 V gibi yüksek bir gerilim söz konusudur. Bu sayede özellikle büyük tesislerde belirgin avantajlar doğmaktadır.

Organik fv hücreler: boyar madde hücreleri ve polimer hücreleri

Boyar madde hücresi İsviçreli bilim adamı Prof. Michael Grätzel, 1991 yılında yeni bir FV hücre türünü tanıtmıştır. "Grätzel Hücresi" olarak da adlandırılan bu hücrenin temel malzemesi, titanyum dioksit yarı iletkenidir. Bu hücre türü, yarıiletken bir p-n geçişine dayanarak çalışmaz, hücrede ışık organik bir boyar maddede soğurulur.

Doğada buna benzer bir yöntem, bitkilerin klorofil boyar maddesi ile güneş ışığından enerji elde ettikleri fotosentez sürecidir.

TCO ile kaplı iki camın arasına, renklendirilmiş bir titanyum dioksit katman ve elektrolitik olarak iletken özellikli bir tuz çözeltisi bulunur. Titanyum oksit serigrafik baskıyla macun halinde üst elektroda tatbik edilir. 450°C altında bu katman 10 pm kalınlığında, kalın ve sert bir film haline fırınlanır. Bu şekilde 10 ila 30 nano metre büyüklüğünde parçalardan oluşan, pürüzlü, mikro gözenekli bir doku meydana gelir. Bu ışık süngerinin iç yüzey alanı, düz filmlerden 1000 kat daha büyüktür. TiO₂ sadece mor ötesi ışık soğurduğundan, TiO₂ yüzeyi son derece ince olarak rutenyum içeren bir boyar madde ile kaplanır. Sıvı elektrolitik madde gözenekli katmanı tamamen geçerek, boyar maddeyi elektrik iletken özelliğiyle alt elektroda bağlar.

Bu hücrelerin işlevsel prensibi klasik FV hücrelerinden önemli ölçüde farklıdır. Işık hücreye düştüğünde, boyar madde uyarılır ve titanyum dioksit'e bir elektronu bırakır. Elektron TiO₂ parçacıklarının arasından üst elektroda kadar yürür. Harici elektrik devresi üzerinden ise alt elektroda ulaşır. Bu elektrot elektronu platin katalizörü yardımıyla elektrolitik çözeltisine aktarır. Elektrolitik elektronu yeniden boyar maddeye taşır ve kapalı dolaşım tamamlanmış olur. Organik FV hücrelerin özelliği, ışığın soğurulması ve elektronların taşınmasının ayrı medyumlarda gerçekleşmesidir. Elektrik yükleri, boyar maddede ışık soğurulması sonucu meydana getirilir, elektronların taşınması ise yarıiletken malzeme olan TiO₂ ile elektrolitikte çözünmüş iyonlar üstlenir.[1]

Odaklayıcı fv hücreler ve odaklanma sistemleri

Odaklama sistemlerinde, tekli kristal yapılı ve çoğunlukla dizgiler halinde birleştirilmiş, III-V grubu yarıiletkenlerinden yapılmış hücreler kullanılmaktadır. Modüllerde özellikle görsel odaklama için fresnel mercekleri kullanılarak 500 kata kadar odaklama faktörleri uygulanmaktadır. Bu hücrelerde yeterli ölçüde bir ısı tahliyesi temin edilmelidir. Sadece doğrudan ışınımın odaklanabildiğinden dolayı odaklayıcı modüller, güneşi takip etmek zorundadır. Bu nedenle odaklama sistemleri daha çok doğrudan güneş ışınımının yoğun olduğu bölgelerde kullanılmak üzere uygundur. İndiyum-galyum-arsenür (InGaAs), indiyum-galyum- fosfür (InGaP) gibi III-V grubu yarıiletkenleri ya da periyodik tablonun III. ve V. ana grubundan germanyum gibi elementlerden, yüksek verimli FV hücreler imal edilebilir. Bunun

için güneş tayfının farklı aralıkları için uygun, farklı malzemeden birden fazla hücre üst üste dizilir (İng. *multi junction cells*). Ancak bu hücreler oldukça maliyetli olduğu için, güneş ışığını daha geniş bir alanda toplayıp çoğunlukla sadece birkaç milimetre karelik alanlara odaklayan düşük maliyetli merceklerden istifade edilir. ABD'nin Delaware Üniversitesinde GaInP/GaAs, tekli kristal yapıli silisyum ve GaAsP/GaInAs olmak üzere üç tane hücreden oluşan dizgili bir hücre ve 20 kat odaklama ile %42,8 gibi halihazırda dünya rekoru sayılan bir verim elde edilmişti [Hoe08], Daha önceki rekoru, Amerikan Boeing-Spectrolab şirketi üçlü bir GaInP/GaInAs/Ge dizgili hücre ve 240 kat odaklama ile elde ettiği %40,7'lik bir verim ile elinde tutuyordu. Dört veya beş dizgi katmanlı FV hücreleri yapılarak, verim daha da artırılabilir. 2005 yılına kadar odaklayıcı modüller sadece uzaycılık uygulamalarında veya deneysel projelerde kullanılmaktaydı.

2008 yılından beri, dünya çapında ticari amaçlı sayılabilecek odaklama modülleri ve sistemleri sunulmaktadır. Bunlar hala çoğunlukla pilot tesislerinde üretilmektedir. Ancak bazı üreticiler henüz seri üretimine geçmiş bulunmaktadır. Örneğin Alman Concentrix Solar şirketi 2008 yılından beri tam otomatik 25 MW kapasiteli bir üretim hattında odaklayıcı modüller üretmektedir. Conctrix teknolojisi Fraunhofer Güneş Enerjisi Araştırmaları Enstitüsünde geliştirilmiştir. Concentrix, İspanya'da birden fazla odaklayıcı FV enerji santralini işletmektedir. Fransız Soitec holdingi, 2009 yılının sonunda Concentrix'i satın alarak, gelecekte ticari üretimini geliştirmeyi amaçlamaktadır. İspanyol üretici Guascor, yıllık kapasitesi birkaç megawatt bulan tekli kristal yapıli odaklayıcı silisyum modüllerini üretmektedir.

Bu modüllerle bugüne kadar güney İspanya'da iki tane FV parkı (500 kW ve 950 kW) kuruldu. Bunlarda 25 kW kapasiteli odaklayıcı izleyici birimler kullanıldı.



Şekil 1.22: İspanya'da, odaklayıcı FV hücreli, 500 kW kapasiteli santral [Concentrix]

1.4 Tezin Amacı

Türkiye'nin, yıllık 2640 saatlik güneşlenme kapasitesinin ve yıllık ortalama güneş ışınımı 1303 kWh/m² olduğu bilinmektedir. 380 milyar kWh/yıl elektrik üretme potansiyeli ile Avrupa'da 2. Ülke olarak yer almaktadır. Ancak Avrupa ülkeleri ile karşılaştırma yapıldığında var olan potansiyelin kullanılmadığı görülmektedir. Son yıllarda özellikle fosil yakıtların çevreye olan zararları ve bu tür enerji kaynaklarının gittikçe azalmasıyla beraber, küresel ısınma ve iklim değişiklikleri sebebiyle temiz enerji kaynaklarına duyulan gereksinim giderek artmıştır. Öte yandan enerji kullanımındaki artışın karşılanması, tükenmekte olan fosil yakıtlar ve kullanılsa da kullanılsa da yalnız nükleer yakıtlarla mümkün görülmemekte ve ancak yenilenebilir enerjilerin kullanılması ve enerji kullanımı veriminin artırılması şartlarına bağlı olmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde en çok kullanılan yöntem kömür gibi fosil yakıtların yakılması ile gerçekleştirilir. Fakat fosil yakıtların yakılması ile ortaya çıkan karbondioksit gazı sebebiyle meydana gelen sera etkisi nedeniyle küresel ısınma olayı ortaya çıkar. Fotovoltaikler çevre kirlenici etki oluşturmayan enerji üretim seçeneklerinin başında gelmektedir. Fotovoltaik teknolojisinin büyümesi, şu zamandaki durumundan çok daha ileriye gideceği yapılan araştırmalar sonucu bilinmektedir. Avrupa'da 2030 yılı için 200 Gigawatt'lık, Dünya'da ise 1000 GW sınırlarında kurulu güç olacağı yapılan bu çalışmalar sonucu beklenmektedir. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün kaynaklarına göre, Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m²- yıl olarak karşılaştırılması yapıldığında 1. Sırada yer alan bölgemiz 1460 kWh/m²- yıl ile Güney Doğu Anadolu, 2. Sırada 1390 kWh/m²- yıl ile Akdeniz, 3. Sırada 1365 kWh/m²- yıl ile Doğu Anadolu, 4. Sırada 1314 kWh/m²- yıl ile İç Anadolu, 5. Sırada 1304 kWh/m²- yıl ile Ege, 6. Sırada 1168 kWh/m²- yıl ile Marmara, 7. Sırada 1120 kWh/m²- yıl ile Karadeniz bölgesi yer almaktadır.

Yaptığım bu tez çalışmasındaki amacım, Türkiye'deki 7 bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün kaynaklarından yararlanarak, enerji ve ekserji analizlerini yapıp, Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin performanslarını değerlendirmektir.

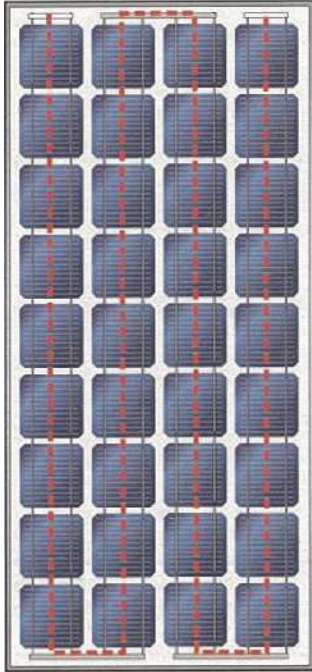


2. FOTOVOLTAİK TESİSLERİN BİLEŞENLERİ[1]

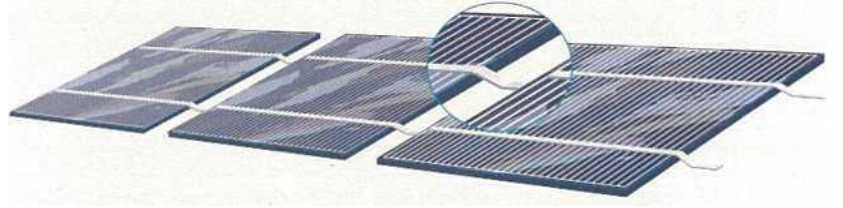
2.1 Fv Modüller

2.1.1 Hücre dizilmesi

Kristal yapılı hücrelerden oluşan bir FV modülün üretilmesi, FV hücrelerin düşük münferit gerilimleri nedeniyle birbirlerine seri olarak dizi halinde bağlanmasıyla (hücre dizilmesi) başlar. Bunun için bir hücrenin ön yüz kontakları, bir sonraki hücrenin arka yüz kontaklarına lehimlenir. Bazı üreticiler bunun için çoğunlukla kurşun içermeyen lehim ya da alaşımlar kullanır. Eksi kutbun (ön yüz) arka kutba (arka yüz) bağlanmasıyla, hücreler seri bağlanır. Hücrelerin birbirlerine olan mesafesi, birkaç milimetre kadardır.



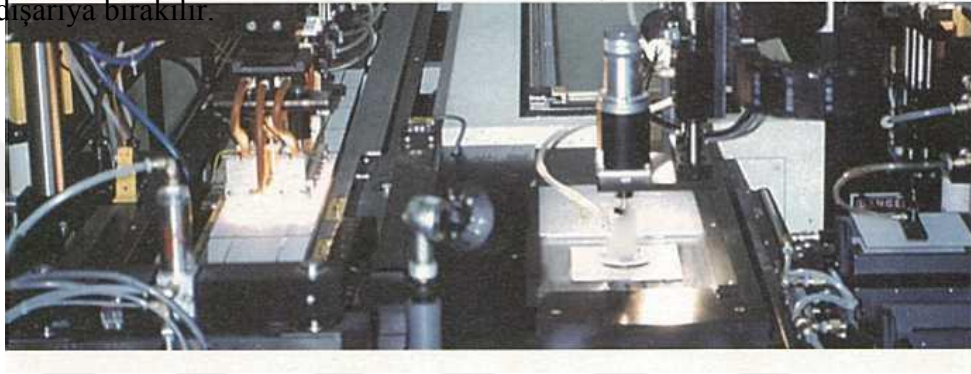
Şekil 2.1: Standart modüllerde dolambaçlı hücre bağlantısı



Şekil 2.2: Kristal yapılı FV hücrelerde harici seri bağlantısı

Seri üretiminde, dizi otomatları denen makineler kullanılır. Sadece özel yapıli modüllerde hücreler kısmen el ile birbirlerine lehimlenir. Standart modüllerde çoğunlukla 36 ila 72 hücre bir dizi halinde seri bağlanır. Modül içindeki bağlantı, uzunlamasına yapılarak, çoğunlukla 9 ila 12 hücre, 4 ila 6 geometrik hücre sırası (bunlara hücre dizisi de denir) dolambaçli bir şekilde birbirlerine bağli olması sağlanır. Bazen de 18 ila 20 hücre, elektrik olarak iki ya da üç dizi halinde bağlanır.

Dizi ya da paralel dizilerin başli ve sonu ve köprüleme diyotlarının bağlanacağı kontaklar, çoğunlukla arka yüz folyosunun bir yerinde, elektrik bağlantı yapılmak üzere dışarıya bırakılır.



Şekil 2.3: Otomatikleştirilmiş hücre dizme İşlemi [Scheuten Solar]

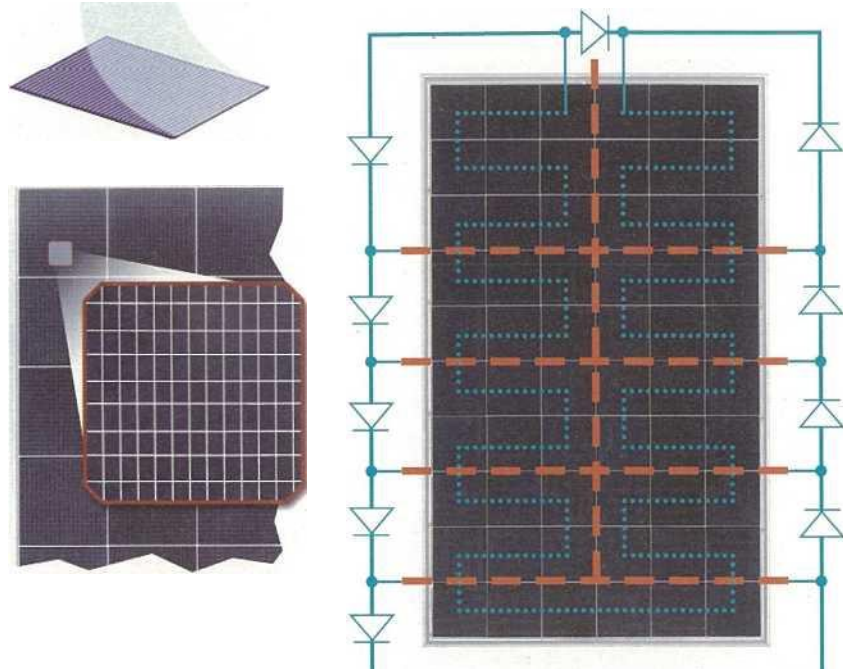


Şekil 2.4: Dizilerin lehimlenmesi



Şekil 2.5: Dizi otomatından bir görünüş [Solarwatt]

Farklı bir hücre ve modül dizme konsepti Amerikan Day4 Energy şirketi tarafından uygulanmaktadır. Bu konseptte ön kontaklar, özel kaplamalı, ızgara biçimli bakır tellerin gömülü olduğu bir polimer katmanından oluşur. Day4 bu şekilde hücre birleştirme prosesindeki lehim işlemini ortadan kaldırmaktadır. Bu kontaklama türünün beraberinde getirdiği düşük ısı ve mekanik yüklenme sayesinde, daha ince hücrelerin işlenmesi de mümkün olmaktadır. Bir diğer avantajı ise, hücre kontaklaması ve hücre dizilmesinde meydana gelen düşük seri dirençtir. Bu kontaklama sayesinde, hücre dizilmesi isteğe bağlı yapılabilir ve üretici belirli hücre kısımlarını köprüleme diyotları kullanarak bağımsız bölümlere ayırabilir. Bu şekilde modüllerin gölgelenmeye karşı duyarlılığı önemli ölçüde iyileştirilmektedir.



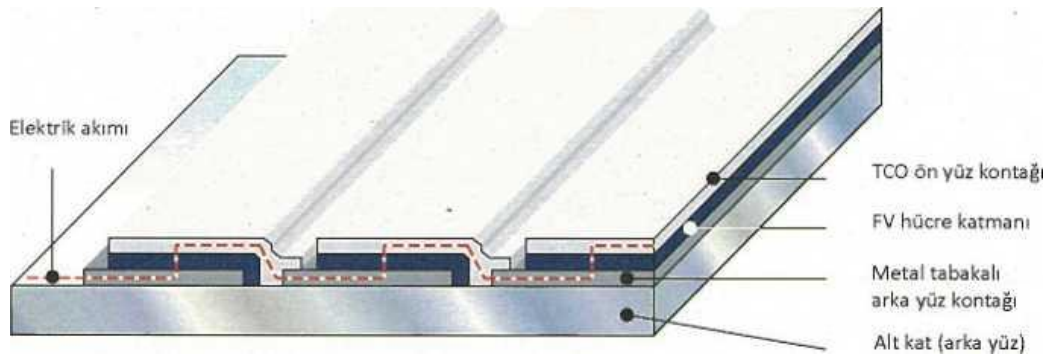
Şekil 2.6: polimere gömülü bakır tel ızgaralı hücre kontaklaması; sağda: Day4 hücrelerinde gölgelenme duyarlılığını düşüren hücre dizilmesi [Day4 Energy]

Arka yüz kontaklamalı hücrelerde, hücre arası mesafeler çok daha dar olabilir. Hücrelerin birbirlerine bağlanması için farklı yöntemler kullanılabilir. Örneğin lehim işlemini ortadan kaldırmak için, arka yüz kontaklamalı hücreler birbirlerinden ayrı iletken şeritlerine bastırılır veya yapıştırılır ya da hücre kenarları üzerinden birbirlerine kontaklanırlar. Bu yöntemle hücrelerin ısıl ve mekanik yüklenmesi azaltılır. Hücre dizilmesinde de bu şekilde daha çok seçenek söz konusudur. Modül boyunca yılan şeklinde uzanan uzunlama hücre dizileri yerine, çapraz ve daha farklı dizime seçenekleri de uygulanmaktadır.

2.1.1.1 İnce film hücrelerinde entegreli seri bağlantılı dizilim

Kristal yapılı hücreler, tek tek, özel bir üretim aşamasında birbirlerine bağlanır. Buna karşın İnce Film hücrelerinin elektrik bağlantıları henüz hücre üretimine dahil olarak ilgili katmanlara ayırıcı kesikler yapılarak gerçekleştirilir. Bu işlemde malzemeler 0,5 cm ila 2 cm genişliğinde hücre şeritleri halinde kesilir. Kesme işlemi lazerle ya da mekanik aşındırma yoluyla gerçekleşir.

Hücrelerin ön cama (taşıyıcı) çökeltildiğinde görülen hücre katmanlarını göstermektedir. Bu durum, CdTe modülleri ve çoğu amorf silisyum modüllerinde görülür. Önce TCO katmanı paralel şeritler halinde bölünür ve sonrasında FV hücre katmanı çökeltilir. İlk çizgiye paralel ama biraz kaydırılarak ikinci kesik yapılır. Son olarak arka kontak tatbik edilir ve üçüncü bir kesikle dokulanır. CIS hücreleri çoğunlukla ters sırayla molibden kaplamalı cama (taşıyıcı) çökeltilir; bu nedenle ön cam olarak ikinci bir camın kullanılması gerekir. Molibden burada arka yüz kontağı olarak işlev görür. Bazı üreticiler CIS hücrelerini ya da amorf hücreleri metal ya da polimer folyolara çökeltir. Bu FV hücre kaplamalı folyolar daha sonra saydam ön folyolarla birleştirildiğinde, esnek modüller meydana gelir.



Şekil 2.7: Amorf silisyum ya da CIS malzemenen İnce Film hücrelerinin entegreli seri bağlantılı dizilimi

2.1.2 Cam ve hücre kapsüllenmesi

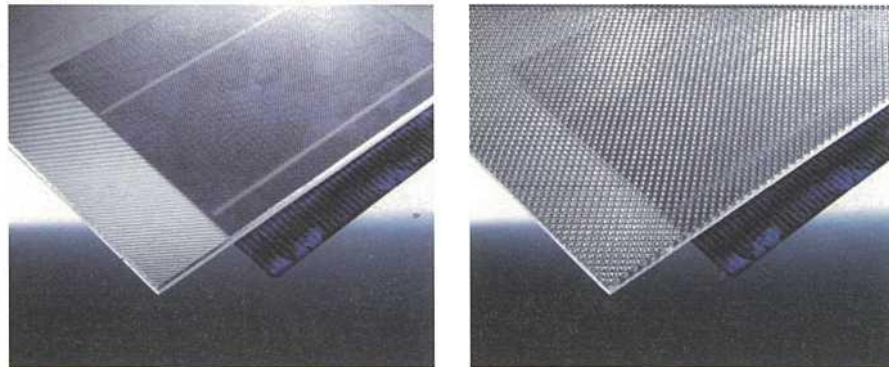
Hücre dizileri, mekanik yüklenmeye, olumsuz hava koşullarına ve rutubete karşı korumak için, saydam bir kaplama malzemesiyle kaplanır. Bu malzeme aynı zamanda hücrelerin elektrik yalıtımı görevini görür. Bu şekilde kaplanan hücreler, sağlamlaştırılmak için taşıyıcı bir malzemeye tatbik edilir. Taşıyıcı malzeme olarak çoğunlukla cam kullanılırken, aklilik cam, metal ya da plastik folyoların kullanımı da mümkündür. FV hücreler kullanılan yöntemle bağlı olarak taşıyıcı malzemenin üstüne, arkasına ya da arasına yerleştirilir. Işığa duyarlı taraftaki kaplamanın saydamlık derecesi yüksek bir malzemedan oluşuyor olması, güneş ışınımının olabildiğince büyük bir kısmının geçirilmesi için önemlidir. Bu nedenle ön taraflı taşıyıcı malzeme olarak, ışığın %96'sını geçirme özelliğine sahip, demir oksit oranı düşük renksiz cam kullanılır, %0,015'ten az demir oram sayesinde renksiz camın saydamlığı daha yüksek olup sıradan camlarda gözle görülebilen yeşile çalarlık söz konusu olmaz. Camın yüksek ısıl yüklenmelere dayanabilmesi için, ön gerilme işlemine tabi tutulur Bu şekilde ön gerilimli renksiz cama, güneş enerjisi camı da denir.

Cam üretimi için yüzdürme (İng. *float glass*) ya da haddeleme (İng. *rolled glass*) yöntemleri uygulanır. Yüzdürme cam yönteminde, cam eriyiği bir çinko banyosunun üstünde yüzdürülerek pürüzsüz düz cam levhalar meydana getirilir. Düz camların %95'i bu şekilde üretilir. Fotovoltaik alanında yüzdürme camlar özellikle İnce Film modülleri için kullanılır. Bunun için cam üretiminde çoğu zaman camın üst yüzeyi asitle işlenir ve TCO kontağı ya da molibdenden oluşan bir arka yüz kontağı ile kaplanır. Kristal yapıli modüller için çoğunlukla haddelenmiş cam (dökülmüş cam da denir) kullanılır. Üretimde eritilmiş cam iki merdanenin arasından geçirilir. Bu işlemde cama belli bir yüzey dokusu kazandırılması mümkündür.

Güneş enerjisi camının standart kalınlığı, modül büyüklüğüne bağlı olarak 3 ila 6 mm arasında olur. Çok büyük modüllerde ve/veya özel yapısal gereksinimler söz konusu olduğunda, 10 mm kadar kaim cam levhalar kullanılır. Meydana gelen kayıplar, büyük oranda yansıma sonucu meydana gelmektedir. Bu nedenle üreticiler FV modüller için daha çok ışığın hücreye ulaşmasına izin veren, farklı yansıma önleyici özellikli camlar geliştirmiştir. FV modüller için farklı yansıma önleyici cam türleri sunulmaktadır. Güneş enerjisi camları örneğin, bir daldırma banyosuna daldırılarak gözenekli bir silisyum dioksit (SolGel) katmanıyla kaplanır. Başka yansıma önleyici

katmanlar, püskürtmeli silisyum dioksit ve silisyum nitrit (PV-lite) malzemesinden oluşur ya da camın gözenekli dış katmanı olarak asitle işlenerek meydana getirilir (Sunarc). AFG üreticisinin sunduğu, "Solartex" isimli matlaştırılmış güneş enerjisi camında yaklaşık 20 µm'lik gözenek büyüklüğüne sahip ince tekstürlü bir dokuya sahiptir ve silisyum nitrit ile kaplıdır. Güneş enerjisi camlarının bir diğer çeşidi, piramit biçimli ya da yivli veya ince dokulu yüzeyli haddeli döküm camlarıdır (Albarino desenli cam). Yansıma önleyici camlara göre bu camların ışığı geçirgenliği %5'e kadar daha yüksektir. Centrosolar Glas şirketi, 2009 yılında güneş ışığının %97'sini geçiren yansıma önleyici bir camı tanıtmıştır. Ancak kaplama malzemesi yüzey dokulamasıyla modül yapımında kombine edildiğinde, ışığı geçirgenlik özelliğinde değişimler meydana gelir. Q-Cells ve Solon şirketlerinin gerçekleştirdiği bir araştırma, çoklu ve tekli kristal yapıları hücrelerde alkalik asitle işlenerek inceden matlaştırılmış camların yatay düzeçlenmiş bir FV tesisinde kazancı yakl. %3 oranında artırırken, daha kaba dokulu camların verimin azalmasına bile neden olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Yüzeğe eğimli düşen güneş ışınları söz konusu olduğunda verim artışı en yüksektir. Buna göre enerji kazancı kurulum yerine ve eğimine bağlıdır. Yansıma önleyici camlarla elde edilen kazanım çok cüzi olduğu gibi, dokulu yüzeylerin uzun vadeli dayanıklılığı ve daha yoğun kirlenme meyli ile ilgili elde yeterli bulgu bulunmadığından, bu güne kadar ancak çok az sayıda modül üreticisi bu tür camlardan faydalanmaktadır.



Şekil 2.8: Yansıma önleyici camlar: Solda: desenli Albarino P camı, derin piramit biçimli yüzeyli; sağda: dokulamalı desenli Albarino S camı [Saint-Gobain Glass]

Kristal yapılı standart modüller sadece ön camlarla yetinirken, İnce Film hücreli birçok standart modülde ön ve arka cam bulunur. Kristal yapılı standart modüllerde genellikle kullanılan arka yüz folyoları, düşük su buharı geçirgenliğine sahip olsalar da, TCO katmanı ya da çoğu İnce Film modülün hücre katmanları suya karşı çok duyarlı olduğu için, yetersiz kalmaktadır. Şu anda ön ve arka cam olarak çoğunlukla 3 ila 4 mm kalınlığında düz cam kullanılır. Çift cam yapısı nedeniyle, çoğu İnce Film hücre, kristal yapılı modül ağırlığının neredeyse iki katına sahip olmaktadır, buysa montaj için bir dezavantaj sayılır. Ağırlığı düşürmek ve aynı zamanda camın geçirgenlik kayıplarını da azaltmak için, daha ince, 1,5 mm kalınlığında düz camlar gittikçe daha çok kullanılmaktadır.

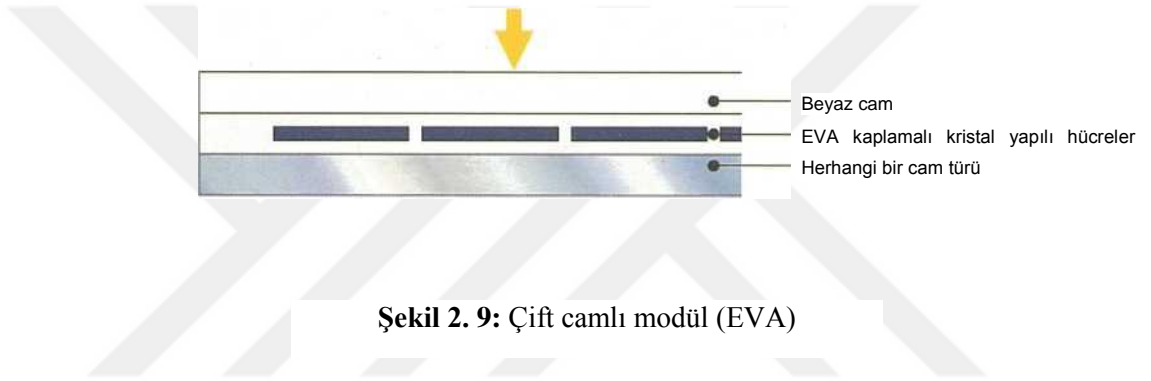
Taşıyıcı cam için temperli camın kullanılması mümkün değildir, aksi takdirde yarıiletken tabakasında oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle camın ön gerilimi yine yok olacaktır. İnce Film modülünün sertlik ve kırılma dayanıklılığı bakımından özellikle yüksek gereksinimlere uygun olması istendiğinde (örn. soğuğa maruz kalan bina cepheleri için), modülün ayrıca tek kat güvenlik camı ile kapatılması gereklidir.

FV hücrelerin gömülmesi için özellikle etilen vinil asetat (EVA) ve son zamanda artarak poli vinil butiral (PVB) kullanılmaktadır. Ancak termoplastik poli uretanlar (TPU), iyonomerler, poliakril reçineler, teflonlar ve silikonlar da kullanılan malzemeler arasındadır.

Standart modüllerin kaplanması için çoğunlukla vakum laminatörleri kullanılır. Kaplama malzemesi olarak İnce Film modüllerinde EV A, bazen de PVB ve nadir olarak iyonomerler kullanılır. Bu kaplama malzemelerinde rulolu bir laminatör cihazı ve ardıl olarak bağlı bir otoklav ünitesi kullanılabilir. Üretim sürecinde işleme hızı, bu şekilde dörde katlanarak otomasyon derecesinin artması sağlanabilir. Özel yapılı modüller, bazen de reçineler (TPU, akrilatlar) gibi sıvı elastomerler veya elastomer özelliklere sahip termoplastik silikonlar dökülerek kaplanır. Malzemenin dökülmesi ve sertleştirilmesi ek işlemler olup otomasyon sürecine dahil edilmesi son derece zordur. Bundan sonraki bölümde, farklı kaplama türleri ve bunların uygulama şekilleri tanıtılacaktır.

2.1.2.1 Etilen vinil asetat (eva) ile kaplama

FV modüllerin %95'inden fazlası hâlihazırda EVA ile kaplanır. Bunun için kristal yapılu hücreler iki EVA folyo katının arasına bir ön cam ve bir arka folyoyla birlikte yerleştirilir, sonra bir vakum odasında alçak ve aşırı basınç uygulanarak, 150°C'ye varan sıcaklıklarda bir laminat halinde birleştirilir (vakum laminasyon yöntemi). EVA bu proseste erir ve FV hücreleri çepeçevre kapsar. EVA malzemeyi ön tarafta olumsuz hava koşullarına karşı koruyan, mor ötesi ışınlar (UV) dayanıklı bir koruma gereklidir. Çoğu uygulamalarda bunun için saydamlık özelliği yüksek renksiz cam levha (güneş enerjisi camı) kullanılır. Arka yüzün dış katı genellikle saydam olmayan (opak) kompozit bir folyodan oluşur, nadir durumda da temperli sıradan bir cam kullanılır.



Şekil 2. 9: Çift camlı modül (EVA)

EVA kaplaması, yüksek geçirgenlik özelliğine sahip, sıcaklığa ve tuzlu suya karşı oldukça dayanıklı, uzun ömürlü ve denenmiş bir malzemedir. Ancak işlenmemiş EVA folyolarının kısıtlı depolanabilirliği, üretim sürecinde dezavantaj olabilmektedir. EVA ile oluşturulan bu yapı çok sağlam olduğu için onarmalar zorlaşır ve modüllerin sadece ısı geri dönüşüme kazandırılması mümkün olmaktadır. EVA kaplaması her şeyden önce standart modüllerin üretimi için kullanılmaktadır. Daha büyük modül ebatlarında, hücrelerin laminasyon işleminde yüzmeye başlaması ve bunun sonucunda hücre aralarının düzensiz olması söz konusu olabilir. Farklı taşıyıcı malzemeler kullanılarak, farklı kaplama çeşitleri gerçekleştirilebilir:

İnce film hücre üretiminde kullanılan farklı kaplama teknolojileri sayesinde taşıyıcı camın ön veya arka yüz olmasına bağlı olarak yarıiletken malzeme ön camın altında ya da arka camın üstünde bulunur. Yarıiletken malzemenin konumu, modüller için gerçekleştirilebilen yapısal seçenekleri belirler.

Amorf, mikromorf ve CdTe hücreleri, ön camlara çökeltilir. Bu şekilde taşıyıcı cam aynı zamanda ön tarafta olumsuz hava koşullarından koruyan tabaka olarak görev

görebilir. Amorf ve mikromorf hücrelerde, arka yüz tedlar folyosu ya da arka cam ile kaplanabilir. CdTe modülleri çift camlı modüller halinde üretilir. CIS hücreleri çoğunlukla molibden kaplamalı (arka kontaklı) arka cama çökeltilir. CIS modülünün ön tarafına, olumsuz hava koşullarından koruyucu olarak ilave bir cam yerleştirilir; bu cam ihtiyaca göre kısmen temperli cam veya tek kat güvenlik camı olabilir. CIS hücrelerinde kaplama malzemesi rutubete karşı yüksek bir yalıtım özelliğine sahip olmak zorundadır; aksi takdirde hücreye sızan rutubet yıpranmasına neden olur.

Metal folyolar üzerine tatbik edilen CIS hücreleri veya amorf hücreler ve polimer veya polimid folyolara tatbik edilen amorf hücrelerle esnek modüller üretilebilir. Folyolu modüllerin esnekliği ve düşük ağırlığı çok sayıda farklı kullanım alanına izin verir. Amerikan Unisolar üreticisi, üçlü dizgili amorf hücre alanlarını 34 cm x 12 cm ebadında paslanmaz çelik folyolara çökeltmektedir. Bu hücre alanlarının her biri birer köprüleme diyonu ile kontaklanır ve etilen tetra fluor etilenden (marka adıyla: tefzel) oluşan bir ön folyo ile polimerden bir arka folyo arasında EVA malzeme ile kaplıdır.

2.1.2.2 Poli vinil butiral (pvb) ile kaplama

Özellikle İnce Film modülleri ve kristal yapılu çift camlı modüller çoğu zaman PVB ile kaplanır. Modül üretiminde yaygın vakum teknolojisinin yanı sıra PVB ile birlikte, rulolu bir laminatör cihazı ve ardıl bir otoklav ünitesi gibi cam endüstrisinde kullanılan başka kaplama teknolojileri de kullanılabilir. PVB malzemesinin saydamlık özellikleri EVA malzemesininkine benzerdir. Ancak rutubete karşı daha duyarlı olduğu için, PVB'li kaplamalarda kenarların iyice kaplanmasına dikkat edilmelidir. FV modüllerin, kompozit güvenlik camı kullanımı şart koşulan, altından geçilen cam tavanlar veya cam bina cepheleri gibi yüzeylere entegre edilmesi isteniyorsa, kaplama malzemesi olarak PVB kullanımı tavsiye edilir. PVB cam endüstrisinde uzun zamandan beri kompozit güvenlik camları için ara folyo olarak kullanılmaktadır. PVB'li çift cam modülleri bu nedenle bina entegrasyonuna yapı onayı almak için gereken özellikleri haiz olur.

2.1.2.3 Poli tetra fluor etilen (ptfe) ile kaplama

İnşaat sektöründe, cam elyaf dokuları PTFE (marka adı: teflon) ile kaplanarak, bunlara hava koşullarına ve mor ötesi ışınlarla dayanıklılık kazandırılmaktadır. Teflon malzemesinin FV hücrelerin kaplanması için de kullanılması mümkündür. EVA ile yapılan kaplamadan farklı olarak bu kaplama türünde kaplanan FV hücreler bir taşıyıcı levha üzerinde bulunduğundan ön taraflı ayrıca örtücü bir katmana gerek yoktur. Teflon malzemesi, MÖ ışınlarına karşı dayanıklı ve yüksek derecede saydam olup, kir tutmaz, sararmaz ve ayrıca yansıma özelliği düşük bir yüzeye sahiptir. Teflon modüllerinde, hücre katmanlarının üzerinde ısıyı çok iyi iletebilen, sadece 0,5 mm kalınlığında bir katman bulunur. Bu sayede her türlü kurulum koşullarına bakılmaksızın hücrelerin ısı tahliyesi temin edilmektedir. Taşıyıcı olarak, statik gereksinimlere uygun, temperlenmiş bir cam kullanılabilir, aynı şekilde metal, yaprak kayaç, beton veya seramik gibi saydam olmayan, malzemelerin kullanımı da mümkündür. Teflon kaplama, özellikle küçük formatlı özel modüller için (örn. FV kiremit modülleri) için kullanılır.

2.1.2.4 İyonomer ile kaplama

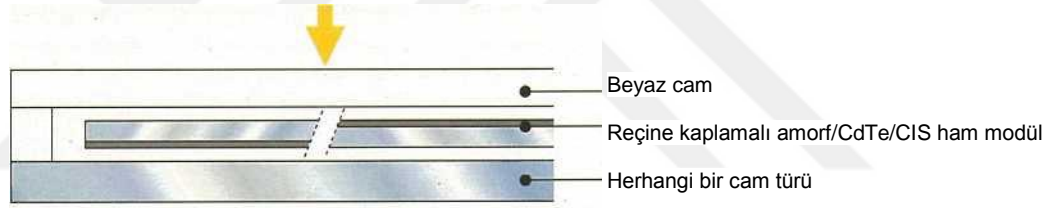
Bazı modüller de iyonomerlerle kaplanır; örn. çift cam modülleri ya da cam- seramik modülleri gibi. İyonomer kaplamaları, EVA kaplamalarına göre daha saydam, mekanik açıdan daha sağlam ve daha az esnektir. Ancak bunlar yaygın arka yüz folyolarına tutunmaz ve MÖ ışınlarına karşı daha az dayanıktır.

2.1.2.5 Döküm reçine (tpu, akrilat) veya silikon (tpse) ile kaplama

Döküm reçine veya termoplastik silikon ile kaplamada, dökme yöntemi uygulanır. FV hücreler, yapışkan pedler yardımıyla iki camın arasında sabitlenir ve sonrasında camlar çepeçevre çift taraflı yapışkan özellikli bir ayırıcı şerit ile birbirlerine bağlanır. Ön cam saydam özelliği yüksek renksiz camdan, arka cam ise statik gereksinimlere göre uyarlanmış, temperli camdan oluşur. Bu şekilde camların arasında meydana gelen boşluk, saydamlığı yüksek dökme reçine veya silikon malzeme ile doldurulur ve sonrasında bu malzeme sertleşmeye bırakılır. Bazı dökme reçine türlerinde, MÖ ışık ile sertleştirme işlemi gereklidir. Bu yöntemle neredeyse tüm istenen modül ebatlarının üretilmesi mümkündür.

Reçineli dökme yöntemi, özellikle bina entegrasyonunda (cepheler, cam tavan konstrüksiyonları, güneş siperlikleri gibi) kullanılan özel ebatlı modüller için uygulanır. Dökme yöntemiyle FV hücreler iki poli karbonat plakası arasında, camsız ve istenirse bükümlü bir modül halinde kaplanması da mümkündür. Modül üretiminde kullanılan dökme reçinelerin esas kullanım alanı ses yalıtımlı camlardır. Bu nedenle dökme reçine kaplamalı bir modül aynı zamanda ses yalıtıcı özelliklere sahiptir.

Bina entegrasyonu için kullanılacak olan dökme reçineli İnce Film modüllerinde, ne ön camın ne de arka camın taşıyıcı olarak kullanılması mümkün değildir, zira bunlar kısmen temperli camlardan oluşur. İnce Film ham modülleri, tekli ve çoklu kristal yapıları hücreler gibi iki modül camının arasında sabitlenir ve dökme reçine ile kaplanır. Bu tür çift camlı modüller böylelikle toplam üç camdan oluşur ve bu nedenle tekli veya çoklu kristal yapıları dökme reçineli hücreli çift cam modüllerinden daha ağır ve daha kalın olur.



Şekil 2.10: Üçlü camlı modül (dökme reçineli ince katman hücreleri)

2.1.2.6 Yeni modül yaklaşımları

EVA kaplamasına alternatif olarak, daha basit, daha hızlı ve daha düşük maliyetli üretim süreçlerine izin veren en farklı elastomer ve termoplast malzemeler denenmektedir. Bu bağlamda, örn. rulolu laminatör cihazlarında işlenebilen termoplastik PU folyoları (TPU) da kullanılmaya başlanmıştır. Poli üretan (PU), 20 yıldan beri otomobillerde ön cam kaplaması için kullanılan plastik bir malzemedir. EVA ve TPU malzemelerinin mekanik ve görsel özellikleri birbirine benzerdir. Hasarlı modüllerde TPU kaplaması ısıtıldıktan sonra yeniden açılabilir.

Bazı İnce Film ve özel modül üreticileri bu yeni malzeme ile çalışmaya başladı bile. Ancak TPU malzemesi, EVA malzemesinden daha maliyetli olup su buharını tecrit özelliği daha düşük olduğu için uzun ömürlülüğü konusunda sıkıntı yaşanması söz konusu olabilir. Çerçeve ile arka kaplamanın da PU malzemedan yapılması, yani tek

bir parça halinde üretilmesi, bu geliştirme sürecinde bir sonraki adımı teşkil ediyordu. Bunun için EVA ile kaplamalı FV hücrelerin ön camı bir kalıbın içine yerleştirilir ve bu kalıp koyu sıvı PU elastomer malzeme ile doldurulur. Malzeme birkaç saniye içerisinde sertleştikten sonra çerçeve, arka yüz ve bağlantı kutusu dahil FV modül kullanıma hazır olur. PU standart modülleri 2009 yılında Solon adlı üretici tarafında çatıya dahil edilen modüller olarak piyasaya sürülmüştür.

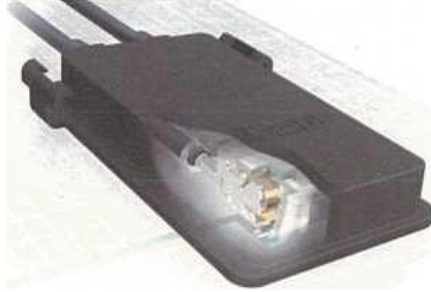
Alt kat olarak ince seramik levhaların kullanıldığı modüller, İtalyan üretici System Photonics tarafından üretilmektedir. Bunların üretiminde FV hücreler saydam iyonomer folyodan oluşan iki katın arasında, doğrudan yaklaşık 1 metre genişliğinde bir seramik levhası ve ön cam ile kaplanır. Bu modüller geniş alanlı FV özellikli çatı kiremitleri ve bina entegrasyonu için kullanılır.

2.1.2.7 Modül bağlantı kutusu ve modül bağlantı kablosu

Hücre dizisinin elektrik bağlantı hatlarının kaplama malzemesinden dışarıya verilmesi için, delikli bir arka yüz camı kullanılır ya da arka yüz folyosuna delikler açılır. Bu durumda geçiş noktasının üzerine bir bağlantı kutusu yapıştırılır. Bağlantı kutusunda modül bağlantı kabloları ve köprüleme diyotlarının kontakları bulunur. Köprüleme diyotları olarak sıradan silisyum diyotlarının dışında gittikçe artarak Schottky diyotları da kullanılır. Gölgeleme olduğunda, diyotların 0,4 ila 1 V arası geçiş gerilimleri nedeniyle yoğun ısı meydana geldiği için, ısının yeterli derecede tahliye edilmesi sağlanmak zorundadır. Modül bağlantı kutuları en az IP 55 (TS 3033 EN 60529'e göre kategori 1) koruma derecesine ve "FV modüller için bağlantı kutuları" başlıklı EN 50548 sayılı Avrupa standardı istemlerine uygun yapıda olmak zorundadır. Su girişini engellemek için, montajda kablolarda kıvrımlar oluşturularak suyun en alçak noktada damlaması sağlanmalıdır. Modül bağlantı kutuları bazen de sızdırmazlık için silikonla doldurulur. Buysa hasarlı köprüleme diyotlarının değiştirilememesi dezavantajını beraberinde getirir. Piyasada satılan neredeyse tüm modüller, yanlış kutuplamaya ve dokunmaya karşı korunmuş soketler ile bağlantı hatlarıyla donatılmış olarak temin edilmektedir.

2007 yılında, Almanya'nın Fraunhofer Güneş Enerjisi Araştırmaları Enstitüsü (ISE), geliştirmiş olduğu, köprülemenin elektronik güç şalterleriyle yapıldığı, diyotsuz bir bağlantı kutusu modelini tanıtmıştır. Bu çözümün avantajı, bağlantı kutusunda meydana gelen kayıplarla gölgeleme durumundaki ısınmanın asgari bir düzeyde

tutuluyor olmasıdır. Bağlantı kutusu aynı zamanda başka koruma ve denetleme fonksiyonlarını da üstlenebilmektedir, Speisberg şirketi, bu buluşu seri üretime dönüştürmüştür.



Şekil 2.12: Tam otomatik modül kontaklaması için modül bağlantı kutusu [PhoenixContac]



Şekil 2.11: Köprüleme diyodu bulunmayan bağlantı kutusu [Speisberg]

Kabloyu dışarıya çıkarmanın bir diğer yöntemi, kabloları alın taraflı ya da yan taraflı olarak camdan dışarıya salınmasıdır. Bu seçenek özellikle arka taraflı bağlantı kutularının görsel açıdan istenmediği, özel modüllerde kullanılır, örn. cam cephelerde. Polonyalı üretici AİT, negatif ve pozitif kontağı ayrı ayrı olmak üzere kabloları modüllerin ön tarafında dışarıya çıkarmaktadır. Bu şekilde modüllerin bağlanması daha kolaydır ve kablolar daha kısa olur.

2.1.3 Fv modüllerin tasarım olanakları

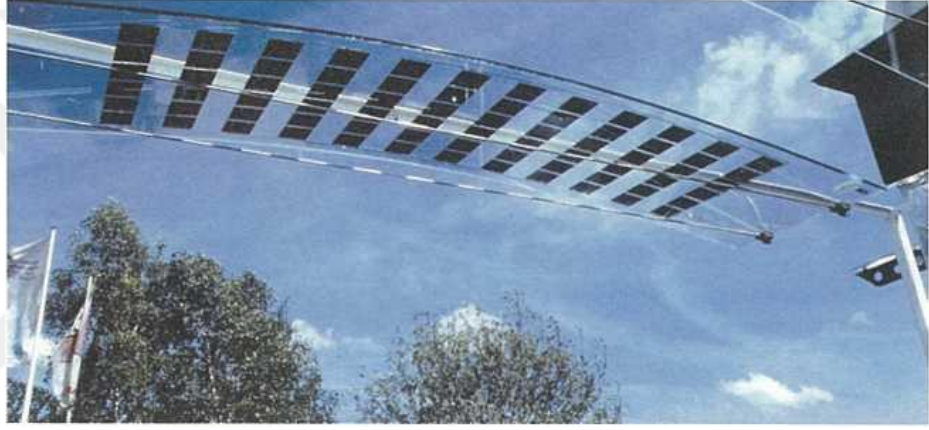
FV modülleri tercihen bina yapılarına entegre edilir veya binalara monte edilir. Bu nedenle FV modül sadece elektrik üretimine yarayan teknik bir bileşen olarak görülmemelidir, FV modül daha ziyade bina ile uyum içinde olması gereken ve yapı

yönetmeliklerinin koşullarına uyularak binanın dış yüzeyine entegre edilebilen, çok yönlü bir yapı bileşeni olarak görülmelidir. Bunun için farklı bina çeşitleri ve kullanım alanları için farklı görsel ve teknik özelliklere sahip modüller gereklidir. Günümüzde FV piyasasında, bir yapı bileşeni olarak bir FV modülden beklenen özellikleri yerine getirebilmek için geniş tasarım olanakları sunulmaktadır. Farklı standart ve özel amaçlı modüller seri olarak üretilmektedir. Standart modüllerde, planlamayı yapan mimar veya inşaat mühendisi farklı hücre türleri, ebatlar ve kenar yapıları arasından tercihini yapabilir. Özel amaçlı modüller ise kullanım alanlarına bağlı olarak daha çok veya daha az seçeneklere sahip olur. İki modül tülünün ortak özelliği, hazır birer ürün olarak piyasaya sunulmalarıdır. Böylelikle tercihi yapan planlamacı, görsel özellikleri konusunda herhangi bir istekte bulunamaz. Buna karşın özel yapıllı modüller, sipariş üzerine fason olarak üretilmektedir. Bunlarda, bir FV modülü oluşturan iki bileşen olan FV hücre ile taşıyıcı cam ya da folyo, planlamayı yapan kişiye çok sayıda farklı tasarım olanağı sunar. Kullanılan kaplama malzemesi ise, ilgili modülün bina cephelerine veya cam tavanlara entegre edilebilirliği açısından önemli bir rol oynar. Hücre seçimi ve düzenlemesinin dışında, farklı cam türlerinin ürün özellikleri kombine edilebilir, böylece çok fonksiyonlu hücreler meydana getirilebilir ve binanın mimarisiyle uyumlu, fason üretilmiş çözümler gerçekleştirilebilir. Özel yapıllı modüllerde tasarım seçenekleri şunlardır:

- hücre türü
- cam ebadı ve biçimi
- cam türü
- kaplama malzemesi
- arka yüz folyosu
- hücre dağılımı
- hücre biçimi
- hücre kontaktması

Bu parametrelerin toplamı, modüllerin görünümü belirler. Böylece planlamayı yapan kişi modül üreticisi ile birlikte bireysel özelliklere sahip modüller tasarlayabilir. Değişken özellikler şunlardır:

- renk (hücre türü, hücrenin arka yüzü, hücrenin kontaklama türü ve cam türüne bağlı)
- saydamlık
- parselleme
- yapısal işlev (örn. ısı yalıtımı, cam tavan uygulamaları)
- esneklik: kristal yapılı FV hücrelerden meydana getirilen esnek modüller, hücreler kıvrımlı camların arasına gömülerek en fazla 0,9 m yarıçapına kadar bükülebilir. İnce katman modülleri esnek taşıyıcı malzemelere çökeltirse kalıcı olarak esneklik ve dürülebilirlik özelliğine sahip olur.



Şekil 2.13: Özel yapılı bükümlü cam modülü: soğuk bükümlü çift cam modülü (dökme reçine) ankrajlarla bu biçimde tutulur.

2.1.3.1 Hücre tipi ve biçimi

Piyasada çok sayıda farklı hücre temin edilebilmektedir. Çeşitliliğini ilk bakışta belli etmeyen ürün yelpazelerinin aslında ne kadar çok çeşitten oluştuğu çoğunlukla ancak ikinci bakışta fark edilir. Kristal yapıklı hücreler, üretim yöntemine bağlı olarak doku, biçim, ebat ve renk bakımından farklılık gösterir. Bunun dışındaki çeşitlemeler, farklı desenler ile ve bağlantı ve ön kontaklara farklı renkler verilerek gerçekleştirilebilir. İnce katman modülleri belirli dilim ebatlarına bağlı kalmadan, sadece taşıyıcı camın ebatlarına bağlı olarak üretilir Cam ebatları ise isteğe göre seçilebilmektedir. Taşıyıcı malzeme tüm alanı boyunca FV hücrelerle kaplandığı için, kristal yapıklı modüllerde hücre ve kontak şeritleri yüzünden meydana gelen tipik ızgara görünümü ortadan kalkar. Bundan farklı olarak bu tür modüllerde FV yüzeyi

homojen ve tek renkli olur. Sadece hücre şeritlerinin arasındaki boşluklar, dikkatle bakıldığında belli olur. Renk oluşumu, kullanılan hücre malzemesine (a- Si, CIS veya CdTe) bağlıdır.

2.1.3.2 Hücre düzeni ve saydamlık

Çift cam modüllerinde, hücrelerin düzenlenmesi ve bununla birlikte doku, ışık ve gölgelerle gerçekleştirilebilen çeşitlendirmeler, büyük bir tasarım potansiyelini beraberinde getirmektedir. Kristal yapıları modüllerde hem hücrelerin birbirlerine olan mesafesi, hem de kenar uzaklığı isteğe bağlı olarak tanımlanabilir. Bu şekilde saydamlık (hem görsel açıdan, hem de enerji geçirgenliği açısından) isteğe göre belirlenebilir. Kristal yapıları bir modülün saydam olması isteniyorsa, özel saydam FV hücrelerin kullanımı tavsiye edilir.

İnce katman modüllerinde, yarı saydam görsellik, hücre şeritlerine dik olarak ilave olarak uygulanan ek kesiklerle ayarlanır. Diğer bir deyişle, ışığın modülü geçebilmesi için FV hücre malzemesi çöktüldükten sonra şerit halinde yeniden kaldırılır. Bu şekilde, ince katman modülüne düzenli ve renksiz bir saydamlık sağlayan, ince kareli bir desen oluşur. Alternatif olarak hücre aralıkları büyütülerek de şerit şeklinde saydamlık elde edilebilir.

2.1.3.3 Arka yüz folyosu ve ön kontaklar

Hücre aralıkları daha büyük tutulursa, hücre araları da tasarım açısından ilginç alanlar haline getirilebilir. Cam-folyo laminasyonlu veya salt folyo laminasyonlu modüllerde, arka folyo (tedlar folyosu) renkli veya saydam olarak seçilebilir. Gümüş renkli standart kontaklar yerine, hücre rengine uygun renkte kontak şeritleri seçilebilir.

2.1.3.4 Cam ebadı ve biçimi

Standart modülleri çok sayıda farklı format ve ebatlarda satılmaktadır. Sıkça tercih edilen büyüklükler, 0,8 m² ile 6,0 m² arasındadır. Özel yapıları modüllerde modül ebatları müşteri tarafından belirlenebilir. Böylelikle mimarinin gerektirdiği ebatların gerçekleştirilmesi ve karmaşık bina geometrilerinin özel yapıları modüllerle donatılması mümkündür.

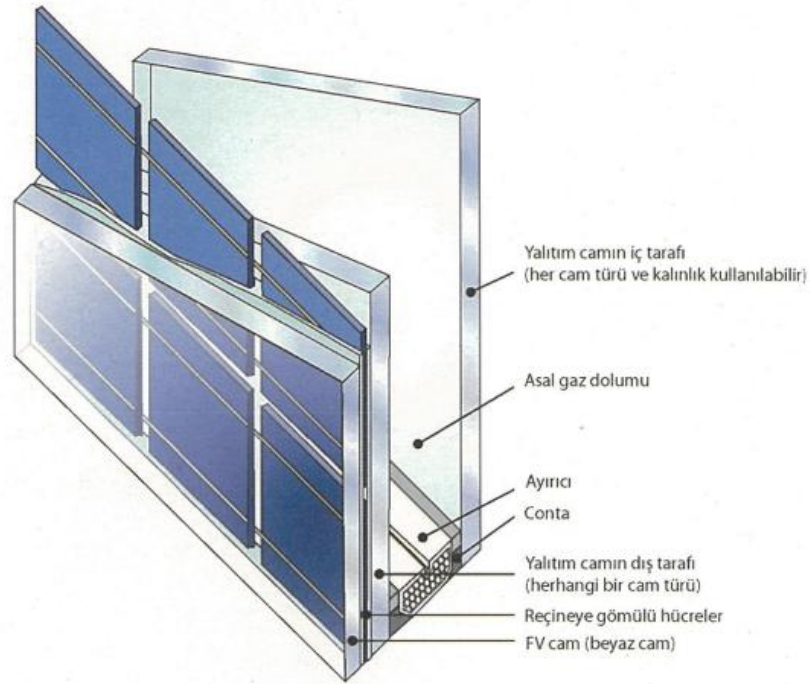
Sıradışı cam formatlarında (üçgenler, trapezler, yuvarlaklar), modül üretimi ve elektrik bağlantısının yapılması zordur.

2.1.3.5 Cam türü: bina dış cepheleri için çok fonksiyonlu modüller

Çift camlı modüllerde, pratik olarak cam endüstrisi tarafından üretilen tüm cam türleri kullanılabilir. Buna göre fotovoltaik modüller bir yandan görsel olarak değişimlere tabi tutulabilir ve diğer yandan yağmurluk, gölgelik, ısı ve ses yalıtımı, koruyucu fonksiyon ve elektro manyetik yalıtım gibi yapısal işlevlerle donatılabilir. Böylelikle bu modüllere bina cepheleri için aranan tüm özellikler kazandırılabilir. Bunun için ön taraflı kaplama camı ileri derecede saydam olmak zorundadır. Kullanılabilen cam türleri için bazı örnekler şunlardır:

- seramik boyanın camın arka yüzüne fırınlanan, renkli kaplamalı camlar
- desenin yanı sıra renk seçimi de yapılabilen serigrafik baskılı camlar
- arka yüzde yansıtıcı metal oksit katmanları bulunan aynalı camlar
- arka yüzde seçici yansıtma özelliğine sahip metal oksit katmanları bulunan ve bu şekilde güneş ışınlarında bulunan uzun dalga boylu kısmını yansıtan, güneşten koruyucu camlar.

PVB folyo ile birbirine bağlı iki cam levhadan oluşan, kompozit güvenlik camı. Kırılma durumunda kompozit katman cam kırıklarını bir arada tutar ve cam levha yuvasında kalarak dağılmaz. Güvenlik camı olması sayesinde kompozit güvenlik camı, altında insanların yürüdüğü yerlerde kullanım için uygundur.



Şekil 2.14: Yalıtımlı cam yapısına dahil edilmiş olan FV modüller [Scheuten Solar]



Şekil 2.15: Frankfurt 1999 Uluslararası Otomobil Fuarı Akrilik cam modül üreticisi: Sunovation

- Her türlü iç ve dış cam levhalardan oluşan, cam arası boşlukta asal gazla doldurulan ve böylece binanın ısı yalıtımını sağlayan yalıtıcı camlar. İç mekana bakan cam levhanın seçiminde neredeyse sınır yoktur.

2.1.3.6 Akrilik veya poli karbonat camdan oluşan özel yapıli modüller

Saydam akrilik veya poli karbonat camın kullanımıyla, ilginç tasarım olanakları doğur; zira bazı modül uygulamalarında kırılğan bir malzeme olan camın kullanılması istenmez, örn. denizcilikte veya özel mimari uygulamalarda bükümlü modüller için. Akriklik cam uygun aletlerle kolayca kesilebilir, delinebilir, zımparalanabilir veya parlatabilir; bu da çok sayıda biçimlendirme opsiyonlarını beraberinde getirir. Akriklik cam soğukken bükülebilir ve sıcaklık altında biçimlendirilebilir. Akriklik camla üretilen 10 cm x 10 cm ebadında bir hücrenin en düşük bükülme yarıçapı, en kalın akrilik cam levha kalınlığının 350 katıdır. Isıl biçimlendirme ise, hücrelerin bulunduğu bölgelerin dışında uygulanır. Akriklik camın arka yüzünde istenen renk uygulanabilir, serigrafik baskı veya boya tatbik edilebilir. Makrolon adıyla da bilinen, hava koşullarına dayanıklı bir plastik malzeme olan poli karbonat cam da benzeri avantajlara sahiptir. Makrolon darbelere karşı esnek özellik gösterir ve masif ya da karkaslı levhalar halinde kullanılabilir.

2.1.4 Devre sembolü

Bu devre sembolü, şu elektronik bileşenler için kullanılır:

Fotovoltaik hücre

Fotovoltaik modül

Fotovoltaik jeneratör bileşeni



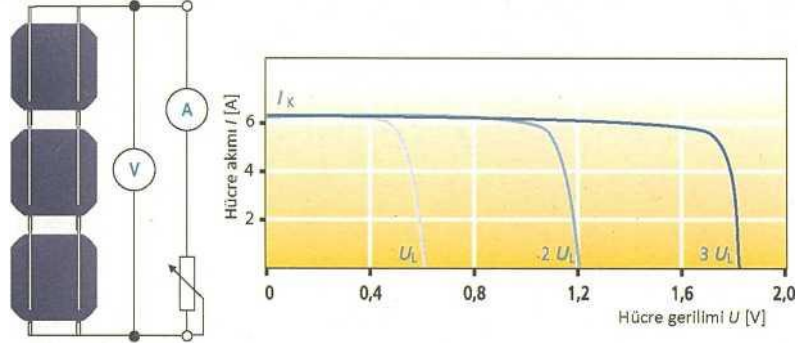
Fotovoltaik hücre dizisi

Fotovoltaik modül dizisi

Fotovoltaik jeneratör

2.1.5 Modül karakteristikleri

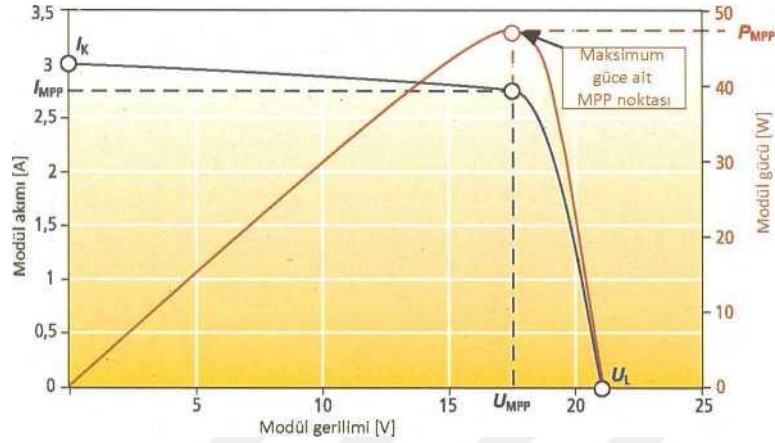
Daha önce tarif edildiği üzere, daha yüksek verimler elde etmek amacıyla birden fazla FV hücre birbirine bağlanarak modüller meydana getirilir. Modül oluşumunda prensip olarak iki yöntem uygulanabilir: hücrelerin seri veya paralel bağlanması. Bir FV modülde, FV hücreler çoğunlukla daha yüksek gerilimler elde etmek için seri bağlanır. Sonraki şekilde, üç tane FV hücrenin birbirine seri bağlanmasıyla elektrik parametreleri ve karakteristikte meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Hücre gerilimlerinin toplanarak arttığı ve akımın sabit kaldığı görülebilir.



Şekil 2.16: Seri bağlı üç tane FV hücrenin akım ve gerilim karakteristiği

Fotovoltaik elektrik enerjisi üretiminin başlarında, FV tesislerin ekonomik açıdan anlamlı ilk kullanımı ada tesisleri halinde gerçekleştirilmiştir. Bu ada tesislerinde çoğunlukla modüllerle şarj edilen, yaygın 12 V aküler kullanılmaktaydı.-Bu nedenle FV modüller için başta yakl. 17 V'luk bir gerilim düzeyi seçilmiştir. Bu gerilim, aküleri en iyi şekilde şarj etmeyi temin etmek için akü geriliminden yüksek olarak seçilmiştir. 17 V gerilimi elde etmek için, silisyum FV hücrelerde yaklaşık 36-40 adet FV hücrenin seri olarak birbirlerine bağlanması gerekmektedir. O zamanki FV piyasası öncelikle bu özelliklere sahip FV modüller üzerinde yoğunlaştığı için, bu modüllere standart modüller denmiştir. Sonraki şekilde, bir 50 W modülünün akım-

gerilim karakteristiği ve güç-gerilim karakteristiği verilmiştir. Karakteristikler, 36 tane FV hücrenin seri bağlanmasıyla meydana gelmektedir.



Şekil 2.17: Tekli kristal yapı 50 W kapasiteli bir modülün karakteristiği

Günümüzde neredeyse tüm modül tipleri şebeke bağlı tesisler için üretildiği için, çoğunlukla 54, 60 ya da 72 tane kristal yapı hücre seri bağlanarak buna göre daha yüksek gerilimler meydana gelir. Bu yeni standart modüller büyük çapta EVA kaplamasıyla üretilmekte ve 500 W'lık kapasitelere kadar ulaşabilmektedir.

FV hücrelerin seri bağlanmasının yanı sıra, daha yüksek kapasiteli modüllerde birden fazla hücre dizisinin paralel bağlanması da yaygın bir uygulamadır. Şek. 3-75 de, karakteristiğin üç tane FV hücrenin paralel bağlanmasıyla meydana gelen karakteristik değişimi gösterilmektedir. Buna göre gerilim sabit kalırken, akımlar toplanarak artar. İki veya sadece az sayıda hücreyi paralel bağlamak, düşük gerilimler nedeniyle pek yaygın değildir. Bunun için çoğunlukla önce birden fazla FV hücre birbirlerine seri bağlanarak hücre dizileri oluşturulur ve bu hücre dizileri daha sonra paralel bağlanarak bir modül haline getirilir. Böylelikle, iki veya daha fazla hücre dizisinden oluşan, daha büyük FV modüllerde hep 36 tane FV hücreden oluşan hücre dizileri birbirine paralel bağlanır. Paralel bağlantı, bazen de modüllerin gölgelenmeye karşı duyarlılığını azaltmak için kullanılan bir yöntemdir.

2.1.6 Modül parametreleri

FV modüllerin elektrik parametreleri için, üreticiler tarafından standart test koşulları belirlenir. Kristal yapılu modüllerde en fazla \pm %5 ve ince katman modüllerinde en fazla + %10'luk bir toleransla, FV modülün maksimum gücü, P_{max} ya da P_{Mpp} olarak belirtilir. Kısa devre akımı I_K ve açık devre gerilimi U_L verileri için geçerli olan tolerans aralıkları biraz daha geniş olabilir.

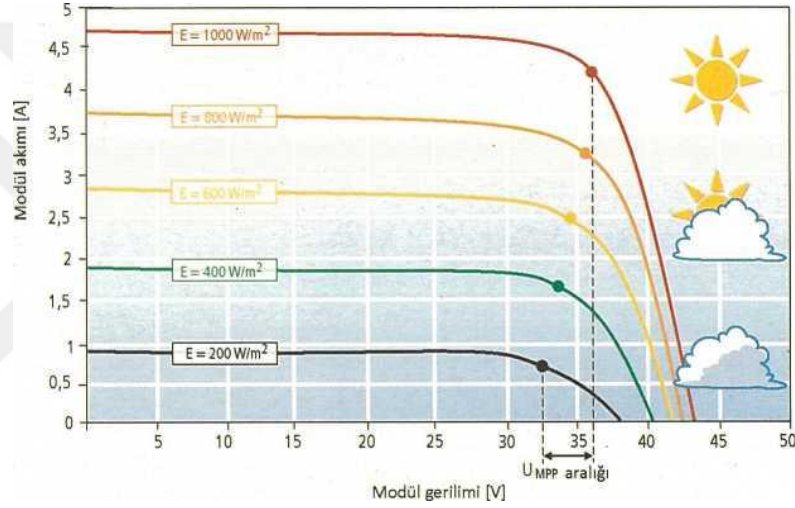
Ancak pratikte bu standart koşullar, çok nadir olarak görülmektedir. Zira güneş ışınımının gücü 1.000 W/m^2 olduğunda, hücre sıcaklığı çoğunlukla 25°C 'den yüksek olur. Bu nedenle çoğu zaman hücrenin anma çalışma sıcaklığı NOCT (İng. *Nominal Operating Cell Temperature*) de belirtilir. Bu tipik çalışma sıcaklığı, 800 W/m^2 'lik ışınım, 20°C 'lik ortam sıcaklığı ve 1 m/sn 'lik bir rüzgar hızı koşulları altında belirlenir.

FV tesislerin simülasyonu için, FV tesisin düzgünce planlanabilmesini kolaylaştıran, U/I karakteristiklerini içeren farklı ışınım ve sıcaklık koşulları için hazırlanmış daha fazla diyagram gereklidir. Kapsamlı bir veri formu, planlama için gereken önemli parametreleri içerir ve yatırımcılar ile planlamacılar için güven sağlar. Ne yazık ki kimi üretici, ürettiği FV modülü ile ilgili EN 50380 standardında "Fotovoltaik Modüllerde Veri Formu ve Model Levhası Bilgileri" başlığı altında belirtilmesi şart koşulan verileri eksiksiz olarak temin etmemektedir. İhmal edilen verilerin arasında, örn. düşük ışınımda geçerli elektrik parametreleri, ısıl katsayıları ve ters akım yüklenebilirliği vardır.

DGS (Alman Güneş Enerjisi Topluluğu), RAL enstitüsü ile birlikte "Güneş Enerjisi Teknolojisi için Kalite Koruma Kriterleri"ni geliştirmiştir . FV modüller için belirlenen kalite kriterleri altında, diğer bazı istemlerin dışında veri formlarında tam kapsamlı verilerin belirtilmesi ile kurulum talimatlarının temin edilmesi talep edilmektedir. Modüllere ait teknik çizimlerin temin edilmesi, hücre dizilmesi, köprüleme diyotlarının bağlantısı, NOCT ve 200 W/m^2 'lik ışınım koşullarında geçerli akım ve gerilim değerleri ve TS EN 13501 (Yanıcılık Sınıfları) standardına göre yapı malzemesi sınıfı bilgilerinin sağlanması ayrıca tavsiye edilmektedir. Modüle ait veri formunda veya kurulum kılavuzunda, modülün güvenli ve gerilimsiz şekilde nasıl monte edilmesi gerektiği konusunda bilgilerin (nokta askılı montajlarda: bağlantı noktalarının sayısı ve konumu hakkında bilgilerin) verilmesi tavsiye edilmektedir.

2.1.7 Işınım ve sıcaklığa bağlılık

FV tesisler, çoğu diğer teknik cihazlardan farklı olarak çok nadir olarak anma koşulları altında çalışır. Anma koşulları altında çalışma, standart test koşulları (STC) altında çalışmadır. FV modüllerin elektrik parametreleri ve karakteristik eğrileri, sıcaklığa ve ışınımına bağlı olduğundan, modüllerin kısmi yük altında çalışması pratikte standart çalışma şekli olarak kabul edilmelidir. Işınım çoğunlukla gün boyunca değişim gösterir. Işınım değişikliği modül akımını en çok etkileyen faktördür. Modül akımı doğrudan ışınımına bağlıdır. Işınım yarı yarıya düştüğünde, üretilen akım da yarı yarıya düşer.

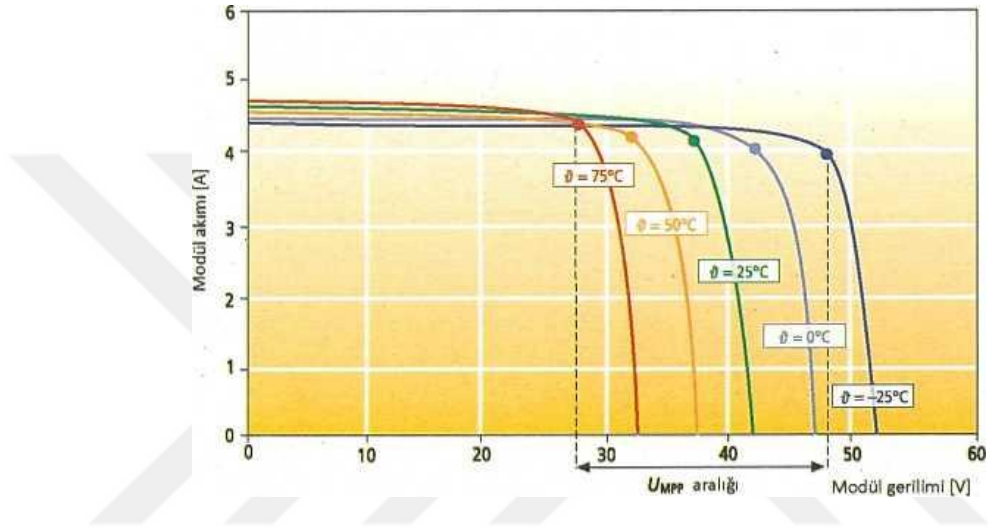


Şekil 2.18: Farklı ışınım ve sabit sıcaklık koşulları altında geçerli modül

MPP gerilimi ise, ışınım değişimleri karşısında nispeten sabit kalır. Yukardaki şekilde, çoklu kristal yapıları 150 W'lık bir standart modülde ışınım dalgalamaları nedeniyle meydana gelen maksimum MPP gerilim farkı yaklaşık 4 V ile sınırlı olduğunu gösterir. Ancak çok sayıda FV modül seri halinde bağlandığı için, MPP geriliminde ışınım değişikliği nedeniyle görülen bu küçük dalgalama, hemen 40 V veya daha fazlasına kadar toplanabilir. Işınım birkaç W/m^2 kadar düştüğünde ise, gerilim kopar. Ardıl bağlı eviriciler böyle bir durumda sabit gerilimle çalışır, yani eviricinin çalışma gerilimi, modüllerin düşük ışınımında geçerli MPP gerilimiyle aynı olmaz.

Modül gerilimi en fazla modül sıcaklığından etkilenir. MPP geriliminin STC değerinden sapması, arkadan havalandırılmalı 150 W'lık bir modülde yaz aylarında -10 V'a kadar ve kış aylarında +10 V'tan fazla olabilir. Modüllerin gerilim değişimi

sistem gerilimi için ve dolayısıyla tüm FV tesisin planlanması için belirleyicidir. Özellikle düşük sıcaklıkta meydana gelen gerilim yükselmeleri dikkate alınmalıdır. Bu yükselme birden fazla modülün seri bağlanması durumunda 100 V'tan fazla olabilir ve böylece gerilim ardıl bağlı bileşenlerin gerilim sınırını aşacak bir seviyede olabilir. Bu nedenle FV tesisler planlanırken, bu duruma özellikle dikkat edilmek zorundadır. Elektrik akımı ise, modül sıcaklığının değişmesi karşısında neredeyse değişiklik göstermez. Sıcaklık arttığında akımda çok küçük bir artış görülür.



Şekil 2.19: Farklı modül sıcaklıklarında ve 1.000 W/m²'lik sabit ışınlımda geçerli modül karakteristikleri

Bir modülün güç düşüşü yaz aylarında yüksek sıcaklıklarda STC koşullarına göre %35'e kadar varabilir. Bu güç düşüşünü asgari düzeyde tutmak için, FV modüllerinin ısıyı iyi bir şekilde tahliye edebilmeleri sağlanmalıdır.

FV modüllerin veri formlarında anma değerlerinin (STC) dışında, çoğu zaman santigrad derece (°C) ya da fiziksel açıdan daha doğru olan kelvin (K) başına gerilim ve akım değişimi için geçerli katsayıları yüzde veya mV/mA olarak belirtilir. Bunlarla belirli bir sıcaklık için geçerli olan elektrik parametreleri hesaplanabilir. Sıcaklık katsayıları kısa devre akımı a , açık devre gerilimi (3 ve MPP gücü 5 için belirtilir. Çok nadir olarak, optimizasyonlu bir planlama için aslında gerekli olan MPP gerilimi ve MPP akımı için de sıcaklık katsayıları belirtilir

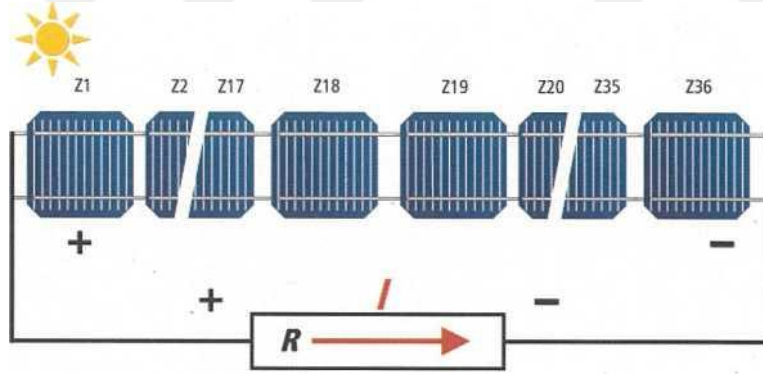
Yaklaşık planlama ve kristal yapı silisyum modülleri için aşağıdaki diyagram da kullanılarak, farklı sıcaklıklarda geçerli parametreler tespit edilebilir. Kristal yapı

modüllerde açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı çoğu zaman $-0,35/^\circ\text{C}$ dolayında, güç katsayısı ise $-0,4$ ile $-0,5/^\circ\text{C}$ arasında olur. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımı için geçerli sıcaklık katsayıları. IEC 61215 uyarınca modül sertifikası verilirken ölçülür. MPP gücü için geçerli sıcaklık katsayısı ise çoğunlukla ölçülerek değil, IEC 60891 uyarınca hesaplama yöntemi ile tespit edilir.

2.1.8 Hot spot, köprüleme diyotları ve gölgelenme etkisi

Belirli çalışma koşulları altında, bir FV modülü oluşturan bazı hücreler enerji üretmek yerine, tüketici olabilmektedir. Bunun nedenleri, gölgelenmeler veya kırılma gibi hücre hasarları olabilir. Gölgelenen bir FV hücre, hücre malzemesi zarar görebilecek derecede ısınabilir. Gölgelenen yerde bir Sıcak Leke (İng. *Hot Spot*) meydana gelir. Sıcak leke, bağlantı telleri tahrip olmadıkça FV hücrenin verimini sadece düşük oranda azaltır. Ancak sıcak leke nedeniyle hücrenin ve dolayısıyla modülün hasar görme olasılığı her yeni gölgelenmede artar.

Sıcak leke etkisini anlamak için, önce aşağıda verilen normal çalışma durumuna bakalım. 36 hücreden oluşan standart bir modül güneş ışınımına tabidir. FV hücrelerde üretilen akım, bir tüketici tarafından (R direnci) tüketilir:



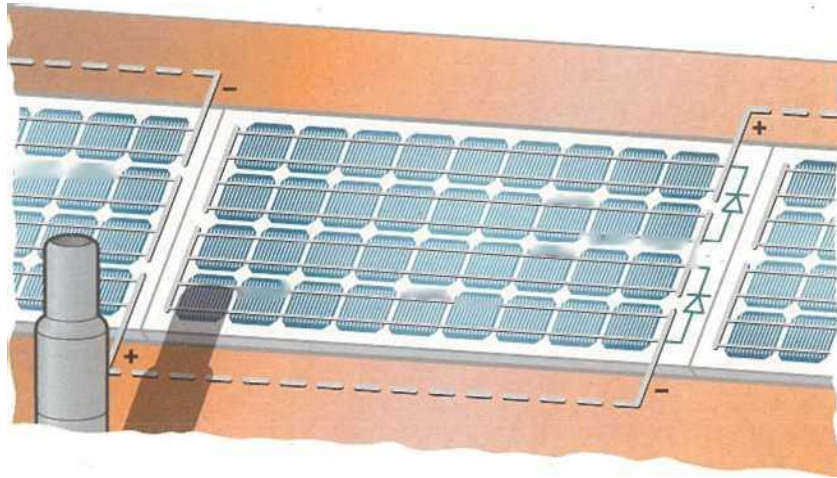
Şekil 2.20: Bir tüketicinin bağlı olduğu bir FV modül

FV modüle bir FV hücre karartılacak şekilde bir yaprak düştüğünde, bu FV hücre tüketici durumunda olur. Aydınlatılan iki hücre tarafından üretilen akım, karanlıkta kalan bu hücrenin de içinden geçer. Bu durumda aydınlatılan hücreler (diyagramda) 1. çeyrekte jeneratörler olarak akım üretirken, karanlıkta kalan hücrenin çalışma noktası 2. çeyreğe kayar. Gerilim tersine dönerek negatif bir değer aldığı için, karanlıkta kalan hücre aydınlatılan hücrelerin ürettiği enerjiyi tüketir ve ısıya dönüştürür.

Akım yeteri kadar yüksek olursa, yukarıda tarif edilen Sıcak Leke etkisi görülebilir. Akması mümkün olan en yüksek akım, kısa devre akımıdır. Kısa devre yük regülatörlü bir FV ada tesisinde, bu durum normal çalışma durumudur. MPP akımı, kısa devre akımından sadece %20 oranında daha düşük olduğu için, gölgelenme şebeke bağlı sistemlerde de çok yüksek sıcaklıklara neden olabilir. Bu ısınmalar 100°C'yi aştığında, hücre hasarlarının dışında, arka yüz folyosunda tahribatlar ve dolayısıyla yalıtım kusurları meydana gelir. Güneş ışığı gören 18 ila 20 hücrenin ürettiği gerilim yaklaşık 12 V dolayında olabilir. Daha önce tarif edildiği gibi, bir FV hücrenin çöküm gerilimi 12 ila 50 V arasındadır. Buysa, bu gerilim altında FV hücrenin içinden bir ters akımın akmasının mümkün olacağı anlamına gelir.

Sıcak leke oluşumunu önlemek için, akıma baypas yapılarak FV hücrenin yanından geçirilir. Bu baypas, 18 ila 20 FV hücreye anti paralel olarak bağlanan bir köprüleme diyodu (baypas veya yangeçit diyodu da denir) ile gerçekleştirilir. Bu şekilde gölgelenen hücrede bloke yönünde daha büyük bir gerilimin meydana gelmesi önlenir. 36 ila 40 hücreli modüllerde iki tane köprüleme diyodu, 72 hücreli modüllerde ise dört köprüleme diyodu kullanılır.

Sıcak leke korumasının dışında, köprüleme diyotlarıyla gölgelenmede meydana gelen güç kayıpları da azaltılabilir. Gölgelenmeye karşı en düşük duyarlılık, her hücrenin birer köprüleme diyodu ile donatılması durumunda elde edilebilirdi. Ancak pratik nedenlerle üretimde bir köprüleme diyodu çoğunlukla 18 ila 20 hücre için kullanılır. Gölgelenmenin etkisi köprüleme diyodunun sayısına, gölgelenmenin şekline ve eviricinin kontrol karakteristiğine bağlıdır.

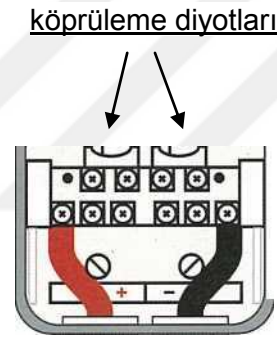


Şekil 2.21: 36 hücreli ve iki köprüleme diyotlu standart bir modülde bir hücrenin gölgelenmesi

Modülün yakınında bulunan bir nesne (baca, çanak anten gibi) gölgelenmesi söz konusu olursa, modül karakteristiği önemli ölçüde değişime uğrar. Köprüleme diyodu olmazsa, modülün tüm akımı, gölgelenen hücre tarafından belirlenir. Bu durumda daha yüksek gerilimlerde, hücrenin gölgelenmesi arttıkça akım düşer.



Şekil 2.22: Bir adet köprüleme diyotlu modül bağlantı kutusu [Multi-Contact]



Şekil 2.23: Bir modülün köprüleme diyotlu bağlantı kutusu

Gölgesiz hücrelerin akımı, çöküm geriliminin üzerinde gölgelenen hücreden akabildiği için, düşük gerilimlerde akım yeniden gölgesiz durumdaki değerini alır. Bir köprüleme diyodu kullanıldığında, bu kırılma noktası birkaç Volt daha yüksektir, ancak karakteristiğin gidişatı prensip olarak aynı kalır. Gölgelene hücre kısmından düşük akım geçer, köprüleme diyodu ise gölgesiz hücre akımına olan farkını iletir. Köprüleme diyotları çoğunlukla modül bağlantı kutularına yerleştirilmektedir. Modül bağlantı kutuları bazen silikonla doldurulur. Bazı üreticiler, modüllere "bant" halinde köprüleme diyotlarını laminasyon usulü ile dahil etmeye başlamıştır. Bu uygulama şeklinde, modül bağlantı kutusuna yerleştirilme şeklinden mümkün olduğundan daha çok köprüleme diyodu kullanılır. Böylece modülün gölgelenmeye karşı duyarlılığı önemli ölçüde azaltılır. Ancak bu çözümde hasarlı köprüleme diyotlarının

değiştirilmesi sorun teşkil etmektedir. Silikonla doldurulmayan modül bağlantı kutularında diyodun servis elemanı tarafından kolayca değiştirilmesi mümkünken, içi dolu modül bağlantı kutuları ve lamine bant halinde köprüleme diyotlarının değiştirilmesi ya mümkün değil ya da sadece üretici tarafından gerçekleştirilebilmektedir. Yine de köprüleme diyotlarının hasarlanması oldukça nadir görülür. Bunun nedenleri sık sık yaşanan modül gölgelenmesi sonucu ısıl sorunlar, modülün hatalı kutuplarla bağlanması veya etrafa düşen yıldırımlar sonucu meydana gelen gerilim pikleri olabilir. Kutup yönü karıştırılmayan modül bağlantı kabloları kullanılarak, bağlantı kutusunun ısı tahliyesini yeterli derecede temin ederek ve kullanılan diyotlar kapasite bakımından beklenen yüke fazlasıyla cevap verebilecek ölçüde seçilerek diyot bozulması olasılığı asgari düzeyde tutulabilir.

Diyotlar IEC 61215 ya da IEC 61646 standartlarına göre teste tabi tutularak, bu standartlara göre sertifikalı modüllerde hata olasılığının ayrıca düşmesine sebep olur.

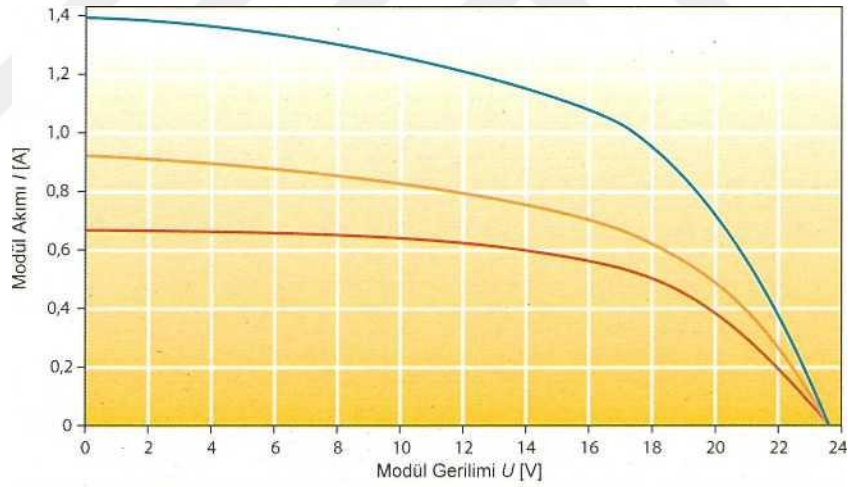
2.1.9 İnce film modüllerinin elektrik özellikleri

Prensip olarak piyasada temin edilebilen FV modüllerin tamamı benzer özelliklere sahiptir. Kristal yapıli modüllerle ince film modülleri arasındaki farklar, verimliliğın dışında, özellikle ışınım, sıcaklık, tayf ve gölgelenme duyarlılıklarında bulunur. İnce film modüllerinin düşük verimliliğı nedeniyle istenen kazanımın elde edilmesi için daha büyük alanların kullanılması gerekir. Daha düşük verimin ince film modüllerinin kW başına özgül enerji kazanmama bir etkisi yoktur. Bu konuda amorf siliyum modülleri özel bir konuma sahiptir. Malzemenin teknolojik nedenli ışıksal eskime (Staebler-Wronski degradasyonu) ilk 6 ila 12 aylık dönemde, verimin sabit bir değere kadar düşmesine neden olmaktadır. Bu değeri üretici tarafından anma gücü olarak belirtilen değerdir. Bu demektir ki, modüller başta anma gücünden daha yüksek bir güçle çalışırlar. Bunun tesis planlanırken, örneğın evirici seçiminde dikkate alınması gerekir.

Başlangıç degradasyonuna ilave olarak, çalışma sürecinde kış aylarında tersinir bir degradasyon meydana gelir. Bu etki yaz aylarında görülen daha yüksek sıcaklıklarla yeniden bertaraf edilir (ısıl rejenerasyon, İng. *annealing effect* = gerilim çözme etkisi). Bu nedenle amorf modüllerin verimi yaz ve kış aylarında anma değeri civarında dalgalanma gösterirken yüksek kazanımların sağlanabildiğı yaz aylarında özellikle yüksektir.

Modül karakteristikleri:Farklı verimin dışında, başta CdTe modülleri olmak üzere ince film modüllerinin daha düz bir seyir gösteren akım-gerilim karakteristiği dikkat çekiyor. Daha az belirgin MPP noktası nedeniyle daha yüksek performanslı MPP kontrol teknolojisinin kullanımı gerekmektedir. Daha düz seyreden karakteristikler, kristal yapıli modüllere göre daha düşük doluluk faktörleri ortaya çıkmaktadır.

Bunun dışında ince film modüllerinde geometrik ebatlar genellikle daha esnek bir şekilde uyarlanabilir. Kristal yapıli modüllerde modül ebatları, kullanılan silisyum dilimlerin geometrisi ile belirlenir. Anma gerilimi, seri bağıli hücrelerin sayısınca katlanır. Daha önce tarif edildiğı üzere, ince film teknolojisi ile üretilen hücreler çoğunlukla 0,5 ila 2 cm kalınlığında hücre şeritlerinden oluşur. İnce film teknolojisini kullanan hücre ve aynı zamanda çoğı modül üreticileri, dizilen hücre şeridinin uzunluğu ve sayısını farklılaştırarak modül tasarımında daha çok esnek davranabilmektedir. Modül tasarımı ise modüllerin gücü ve dolayısıyla akım ve gerilim gibi parametreleri için belirleyicidir. Modül alanı büyütülerek, gücün neredeyse kademesiz olarak arttırılması mümkündür.



Şekil 2.24: Amorf ince film modüllerinin tipik karakteristikleri

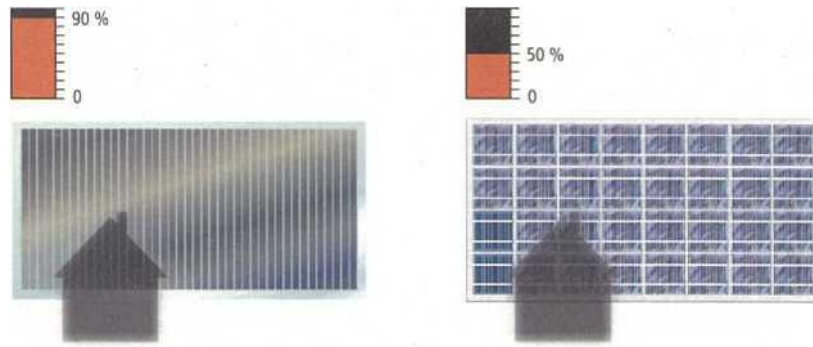
[Uni-Solar]

Modül içinde boydan boya uzanan hücre şeritleri yerine, bazı ince film üreticileri, metal folyolarına tatbik edilen, ayrı, örn. 34 cm x 12 cm gibi büyük alanlı hücre alanları kullanır. Bu hücre alanlarının her birinde birden fazla, yakl. 0,5 cm genişliğinde hücre şeridi birbirleriyle bağıli olur. Hücre alanları köprüleme diyotları üzerinden büyük modüller halinde birleştirilir. Ayrı hücre alanlarına bölünmesi ve

köprüleme diyotlarının kullanılmasıyla, bu modüllerin gölgelenmeye karşı daha az duyarlı olmaları sağlanır.

Gölgelenme: Kristal yapıli modüllerle karşılaştırıldığında, ince film modüllerinin gölgelenmeye karşı daha az duyarlı oluşu dikkat çekiyor. Bir hücrenin tamamen gölgede kalması, silisyum dilimlerinden üretilen standart modüllerde genellikle modülün yarısının devre dışı kalmasına neden olmaktadır. Buna karşın ince film modüllerinin şerit halindeki münferit hücrelerle birleşik hücrenin tamamen gölgelenmesi olasılığı daha düşük olur. Bu nedenle güç çoğunlukla sadece gölgelenen alana orantılı olarak düşer. Gölgelenme kayıpları bu yüzden kristal yapıli silisyum modüllerine göre çoğunlukla çok daha azdır.

İnce film modüllerinde, her hücre kenar bölgesi üzerinden kolaylıkla köprüleme diyotlarıyla bağlanabilir. Bunun bazı ince film üreticileri, kristal yapıli modüllerde yaygın olduğundan daha çok köprüleme diyodu kullanarak, gölgelenmeye karşı duyarlılığın daha da düşmesini sağlamaktadır. İnce film hücreleri bazen kristal yapıli modüllere göre daha düşük bir çöküm gerilimine sahip olabilir. Bu değer genellikle 3 ila 12 V düzeyindedir. Bu nedenle, gölgelenme durumunda görülen ters güç kristal yapıli modüllere göre çok daha düşük olabilmektedir. Bu güç düşük çöküm gerilimlerinde sıcak leke oluşu için yeterli değildir. Bu yüzden bazı üreticiler, sıcak lekelerin önlenmesi için de kullanılan köprüleme diyotlarından tamamen vazgeçerek üretim yapmaktadır.



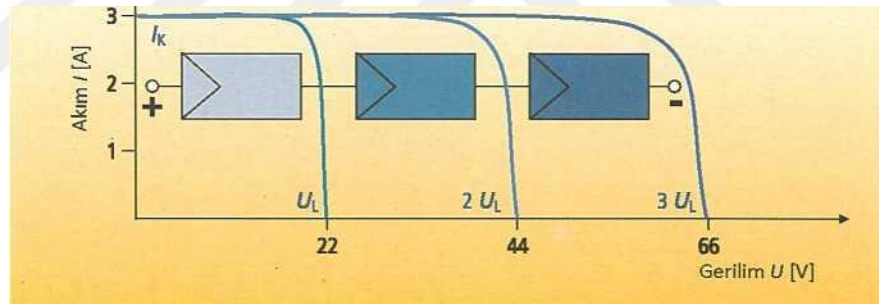
Şekil 2.25: İnce film modüllerinin kristal yapıli modüllere ile karşılaştırılan gölgelenme duyarlılığı [Solarpraxis]

2.1.10 FV modüllerin birbirine bağlanması

FV modüller, seri ve paralel bağlantı halinde elektrik ve mekanik bakımından daha büyük bir birim olan FV jeneratör halinde birleştirilir. Burada seri bağlı modüllere dizi (İng. *string*) denir. Sistemde güç kayıplarının meydana gelmesini önlemek için, sadece aynı modül tiplerinin kullanılması şarttır. Aşağıdaki resimde üç modülden oluşan bir dizi ve bu dizinin getirdiği akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Elektrik bakımından aynı özelliklere sahip modüllerde akım sabit kalırken gerilimler toplanır.

Seri bağlı modüllerin sayısı, şebeke bağlı FV tesislerdeki sistem gerilimini belirler. Ancak modüllerin açık devre gerilimlerinin daima çalışma gerilimi, anma gerilimi veya MPP geriliminden daha yüksek olacağı da dikkate alınmalıdır. Ayrıca sıcaklık arttığında gerilim de artacaktır. Bu nedenle evirici gibi tesise bağlı ardıl birimlerin gerilim limitlerinin aşılması söz konusu olabilir.

Dizi başına tek bir FV modüllü paralel bağlı sistemler, genellikle ada tesislerinde kullanılır. Elektrik bakımından aynı özelliklere sahip modüllerde gerilim sabit kalırken akımlar toplanır.



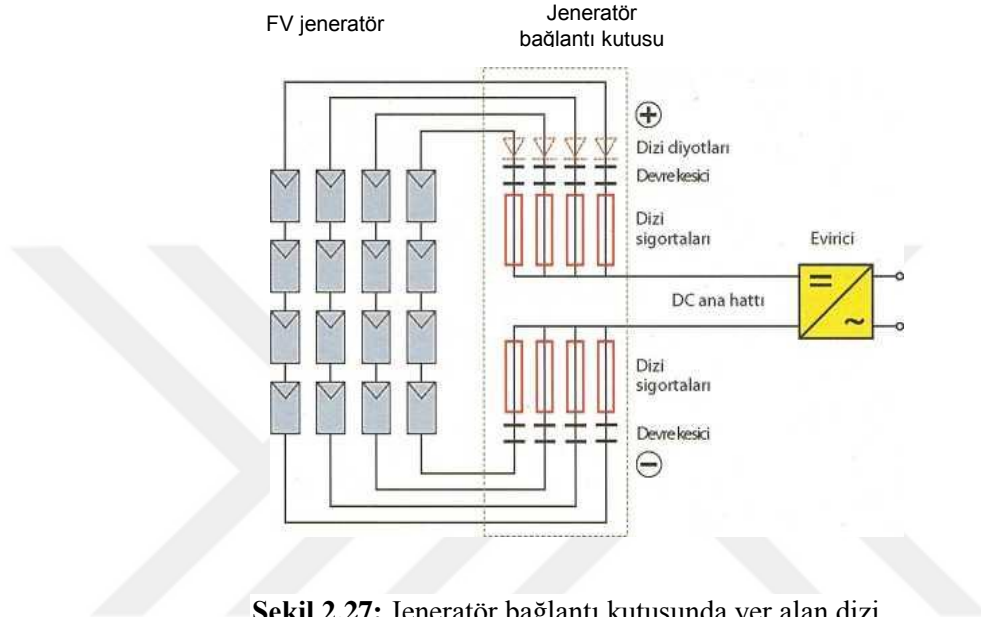
Şekil 2.26: FV modüllerin seri bağlanması

2.2 Jeneratör Bağlantı Kutusu, Dizi Diyotları ve Dizi Sigortaları

Diziler jeneratör bağlantı kutularında birbirine bağlanır. Dizi hatları, doğru akım ana hattı ve gerekirse potansiyel dengeleme hattı bağlanır.

Jeneratör bağlantı kutusunda bağlantı kısıkaçları ve ayırıcı ünitelerin dışında dizi sigortaları ve dizi diyotları da bulunabilir. Jeneratör bağlantı kutularına çoğu zaman aşırı gerilimleri toprağa iletmek için topraklama iletkenleri de ilave edilir. Bu nedenle potansiyel dengeleme veya toprak hattı da jeneratör bağlantı kutusuna kadar getirilir. DA ana şalteri veya hat koruma şalterleri bazen jeneratör bağlantı kutularına

yerleştirilir. Büyük tesislerde dizi denetim ünitelerinin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bunlar veri denetim sistemine dizi arızalarını bildirerek hata gideriminin yaptırılmasına izin verir. Jeneratör bağlantı kutusunun koruyucu sınıf II'ye uygun, kutunun içinde artı ile eksi kutupları belirgin bir şekilde birbirlerinden ayrılmış olmalıdır. Kutu açık mekanda monte edilirse, en az IP 54 koruma derecesine sahip olmalı ve hava koşulları ile MÖ ışınlarına karşı dayanıklı olmalıdır.



Şekil 2.27: Jeneratör bağlantı kutusunda yer alan dizi diyotları ve dizi sigortaları

Modül ve dizi hatlarının aşırı yüklenmeye karşı korunması için, topraksız tüm hatlara (artı ve eksi hatlar) dizi sigortaları ilave edilir. Daha büyük tesislerde jeneratör bağlantı kutularının dışında, birden fazla jeneratör bağlantı kutusu çıkışının birleştirildiği, toplayıcı kutular da kullanılır.

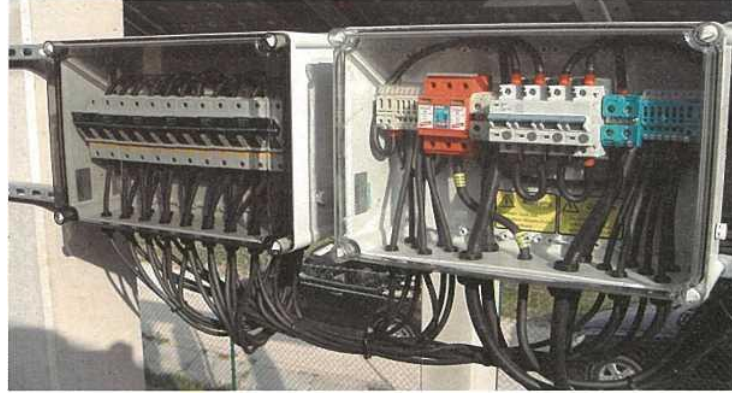
Dizi sigortaları hatları aşırı yüklenmelere karşı korur. Bunlar doğru akım için uygun olmalıdır. Ne var ki FV tesislerde kullanılan sigortaların farklı çalışma koşullarını dikkate alan standart, şu ana kadar sadece taslak halinde mevcuttur. Dizi sigortaları olarak geçmişte zaman zaman uygunsuz doğru akım sigortaları kullanıldı. Akımda bulutlanma nedeniyle büyük dalgalamalar söz konusu olabildiğinden, sıradan bir doğru akım sigortasında, tecrit edici malzemeyi eritebilecek bir ışık arkı meydana gelebilir. Bunun sonucunda sigortanın yüklenme durumunda tetiklememesi veya sigorta kutusunda yangına neden olabilecek şekilde ısınması söz konusu olabilir. Bazı üreticiler artık uygun özelliklere sahip FV sigortalar geliştirmiştir. Yine de

sigortalar yıpranabildiği ve bu durumun ısıl sorunlara neden olabildiği için, bunları uzaktan denetlemekte fayda vardır.

Mümkünse, sigorta kullanmaktan kaçınılmalıdır. Dizi sayısı dörtten az olursa, sigortaların tetiklenmesi için kısa devre akımının en az iki katının akması gerektiği için, sigorta kullanımının faydası olmaz. FV jeneratör koruyucu sınıf II özelliklerine sahip ise ve dizideki kablo kesitleri yeterli derecede büyük olursa, çoğu durumda dizi sigortaları kullanımından vazgeçilebilir

Modül dizilerini birbirinden ayırmak için eskiden dizi diyotları seri bağlanıyordu. Böylece bir dizide bir kısa devre ya da gölgelenme meydana geldiğinde, diğer diziler aksamadan çalışmaya devam edebilir. Dizi diyotları olmadan, aksayan diziden tüketici yönüne bir akım (ters akım) akardı. Alman VDE 0100 göre dizi diyotlarının blokaj gerilimi, FV dizinin STC koşulları altındaki açık devre geriliminin iki katı olarak hesaplanmalıdır. Sistem çalışırken dizi akımının tamamı dizi diyotlarının içinden geçer (bu nedenle çoğunlukla ısı tahliyesi için soğutma gövdesi gerekli). Bu akım geçişinin sonucunda, dizi diyotlarında meydana gelen geçiş gerilimi düşüşü (0,5 ila 1 V arası) nedeniyle %0,5 ila %2 arasında güç kayıpları meydana gelebilir. Bu nedenle, dizi diyotları kullanıldığında elde edilen enerji kazanımı, gölgelenen tesislerde bile diyotsuz tesislere göre çok daha büyük olmaz. Ters akımlar nedeni kayıplar, gerilim düşüşü nedeni kayıpları dengeler. Dizi diyotlarının arızalanması, büyük sorunlara neden olabilir. Almanya'da uygulanan FV teşvik programı, arızalanan dizi diyotları ve bununla birlikte komple FV dizilerin alazlanması bazen çok geç fark edildiği ve giderildiğini göstermiştir.

Günümüzde, neredeyse tüm şebeke bağlı FV tesisler dizi diyotları kullanılmadan kurulur. Fraunhofer Güneş Enerji Sistemleri Araştırma Enstitüsünün (ISE) gerçekleştirmiş olduğu daha eski incelemeler, modüllerin modül kısa devre akımının 7 katı seviyesindeki ters akımlarına zarar almadan dayanabildiğini göstermiştir. Bugün satılan modüller de izin verilen ters akım genellikle 10 ila 20 Amper olarak belirtilir. Aynı model, koruma sınıfı II, tüketici yönünde izin verilen akım kısa devre akımının yarısı olan modüllü ve FV jeneratörün modül dizileri arasındaki açık devre gerilim sapması %5'i geçmeyen tesisler, dizi diyotlarının kullanılmaması için uygundur.

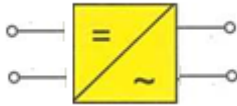


Şekil 2.28: Jeneratör bağlantı kutusu ve toplayıcı kutu

2.3 Eviriciler

2.3.1 Devre sembolü ve işlevi

Fotovoltaik evirici, FV jeneratör ve alternatif akım şebekesi/alternatif akım tüketicisi arasındaki bağlantıyı kuran bileşendir. Onun başlıca görevi, FV jeneratör tarafından üretilen doğru akımı alternatif akıma çevirmektir. Bunu yaparken, şebekeye beslenen gerilim, şebekenin frekansına ve gerilim şiddetine uygun hale getirilmelidir.



Devre sembolü olarak solda görülen sembol kullanılır.

Evirciye DA-AA çeviricisi, DA-AA konvertörü ya da invertör de denir. Modern güç teknolojisiyle gerilimin şebekeye uygun hale dönüştürülmesi, düşük kayıplarla mümkün olmaktadır.

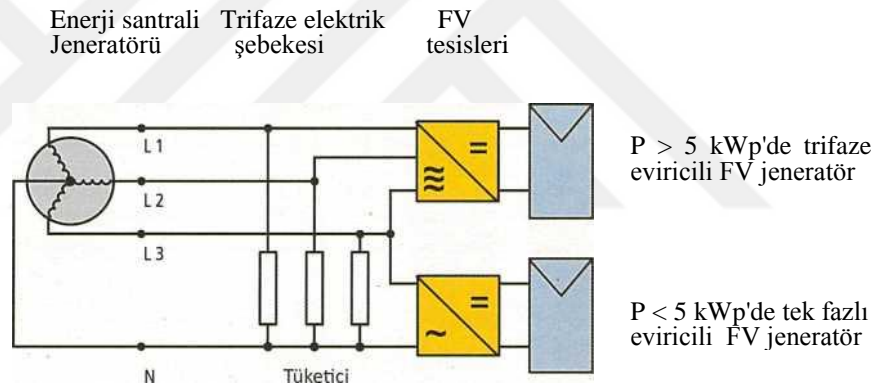
Eviriciler, şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılan eviriciler (şebeke eviricileri) ve ada sistemlerinde kullanılan eviriciler (ada eviricileri) olmak üzere ikiye ayrılır. Ada sistemlerinde kullanılan eviriciler, standart alternatif akım tüketicilerinin çalıştırılmasına izin verir. Ada sistemleri için kullanılan eviriciler. Bundan sonra, şebeke bağlantılı sistemlere ait eviriciler incelenecektir.

Şebeke bağlantılı FV sistemlerde, evirici kamu elektrik şebekesine doğrudan ya da evin elektrik tesisatı üzerinden bağlı olur. Üretilen elektrik enerjisinin beslenmesi,

evirici doğrudan şebekeye bağlı olduğunda sadece kamu elektrik şebekesine gerçekleşir. Bağlantı evin elektrik tesisatı üzerinden gerçekleştirildiğinde, güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi öncelikle evde tüketilir ve artan kapasiteler varsa kamu elektrik şebekesine beslenir.

Kapasiteleri 5 kW_p'ye kadar olan FV tesisler (yakl. 50 m² alan kapsayan tesisler) çoğunlukla tek fazlı olarak uygulanır. Daha büyük tesislerde, besleme üç fazlı yani trifaze olarak yapılır. Trifaze eviricilerde yük simetrik olarak üç faza dağıtıldığı, daha basit bir devre düzeni söz konusudur. Bu şekilde beslenen elektrik enerjisinin şebeke kriterlerine yüksek uygunluğu ve aynı zamanda yüksek bir verim oranı elde edilir. Ancak birden fazla tek fazlı eviricinin kullanımı da mümkündür. Bu durumda bunlar üç faza eşit olarak dağıtılır.

Aşağıdaki şekil, FV tesislerin tek ve üç fazlı eviricilerle elektrik şebekesine bağlantısını gösterir.



Şekil 2.29: FV tesislerin tek ve üç fazlı eviricilerle şebekeye

Elektrik şebekesine maksimum gücü besleyebilmek için, eviricinin FV jeneratörün MPP noktasında çalışmak zorundadır. Daha önce anlatıldığı üzere, MPP noktası hava koşullarına bağlı olarak değişim gösterir. Eviricide bulunan bir MPP izleyicisi (İng. *MPP tracker*) eviricinin ilgili MPP noktasına uymasını sağlar. Bunun için evirici çalışma noktasını sık sık değiştirmek zorundadır.

Bu amaçla elektronik bir devre, gerilimi jeneratör karakteristiği etrafında dalgalandıracak şekilde kontrol eder ve bu şekilde ilgili MPP noktasını tespit eder. MPP regülatörü belirli bir gerilime kadar bir güç köprüsüyle çalışabilir. Daha yüksek gerilim farklarında, elektronik kontrol sistemli bir doğru akım dönüştürücüsü (gerilim düşürücü ya da artırıcı) kullanılır.

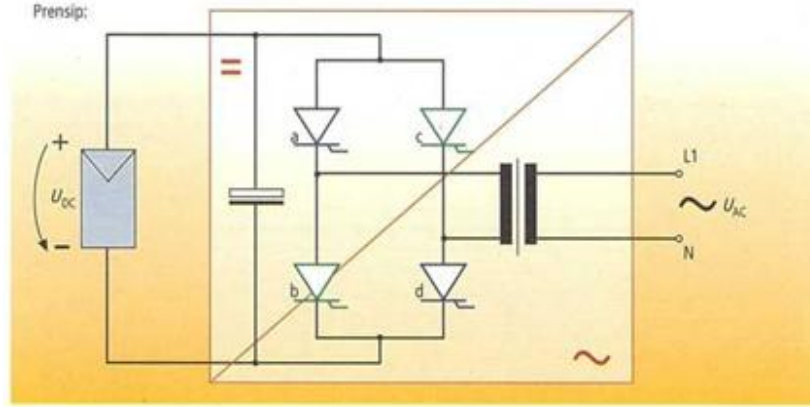
FV eviriciler aşağıdaki kriterleri yerine getirmelidir:

- FV jeneratör tarafından üretilen doğru akımın şebeke parametrelerine uygun alternatif akıma dönüştürülmesi
- Eviricinin çalışma noktasının FV jeneratörün MPP noktasına uyarlanması (MPP kontrolü)
- Çalışma verilerinin toplanması ve iletilmesi (örn. gösterge, veri kaydı)
- DA ve AA koruma devresi
- şebeke denetimi, gerekirse şebeke yönetimi (örn. reaktif güç üretimi)

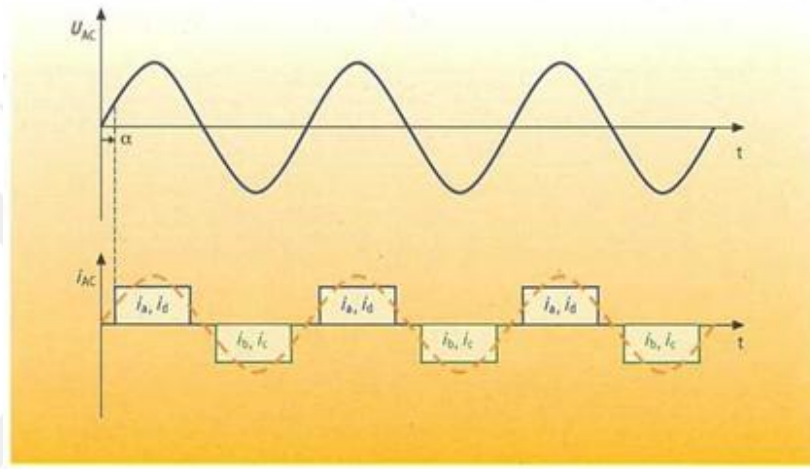
Eviriciler ayrıca işlev prensiplerine göre şebeke etkileşimli ve etkileşimsiz eviriciler olarak ikiye ayrılır.

2.3.2 şebeke etkileşimli eviriciler

şebeke etkileşimli evirici, temel bileşen olarak tristörlerden oluşan bir köprü devresine sahiptir. Tristörlü eviricilerin otomasyonda öteden beri kullanılıyor olması (tahrik teknolojisi, motor kontrolü), ilk FV eviricilerin tristörlü cihazlar olarak tasarlanmış olmasına neden olmuştur. Günümüzde ise sadece çok az sayıda üretici eviricilerini bu prensibe göre üretmektedir.



Akım ve Gerilim Karakteristikleri:



Şekil 2.30: Şebeke etkileşimli evirici

Şebeke etkileşimli evirici, şebeke gerilimi geçişinin sıfırlandığı anı tespit ederek, elektronik güç şalterleri için açma ve kapama sinyali gönderme zamanını belirler. Köprü halinde bağlı ikişer tane tristör, doğru akımı değişmeli olarak 50 Hz'lik bir frekansla (saniyede 50 kez) bir bu yönde, bir o yönde çalıştırır. Yön değişimi esnasında enerji, DA girişine paralel bağlantılı elektrolit kondansatörlerinde ara depolanır. Tristörler akımı sadece açabildiği ancak kapatamadığı için, şebeke gerilimi geçişinin sıfırlandığı nokta tristörlerin kapatılması (komütasyon) için gereklidir. Tristörler, şebeke gerilimi olmadan işlev göremediğinden, şebeke etkileşimli eviricilerin ada sistemlerinde kullanılması mümkün değildir. İşlevleri sonucu meydana gelen, kare dalgalı akımlar nedeniyle, bu eviricilere kare eviriciler de denir. Eviricinin alternatif akıma dönüştürdüğü akımın, şebeke akımının sinüs dalga şeklinden farklı oluşu nedeniyle, nispeten yüksek dalga uyuşmazlıkları meydana gelirken, öte yandan şebekeden yüksek oranda reaktif güç çekilir. Dalga

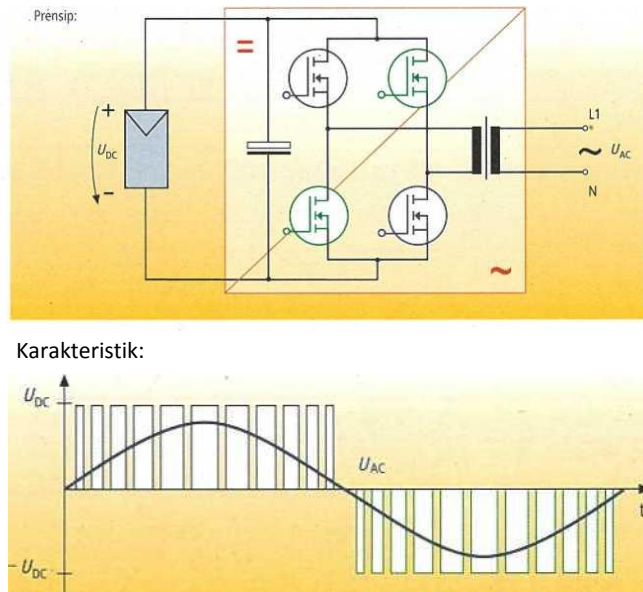
uyuşmazlıklarını kısıtlamak için, dengeleme düzenekleri ve çıkış filtreleri gereklidir. Sistemin şebekeden tecriti, 50 Hz'lik bir şebeke transformatörü ile gerçekleşir. Tristörlerin tetikleme zamanı ayarlanarak, MPP kontrolü gerçekleştirilir.

2.3.3 Şebeke etkileşimsiz eviriciler

Şebeke etkileşimi olmayan öz güdümlü eviricilerde, açılıp kapatılabilen köprü halinde bağlı olan yarıiletken elemanlarından yararlanır. Sistem gücü, gerilim seviyesi ve devre topolojisine bağlı olarak farklı çeşitleri kullanılır:

- MOSFET (metal oksit alan etkili transistörler)
- Bipolar transistörler
- JFET (eklem alan etkili transistörler, İng. *junction field effect transistor*)
- GTO (kapıdan tıkanabilen tristörler, 1 kHz'e kadar, İng. *gate turn off*)
- IGBT (yalıtılmış kapılı bipolar transistörler, İng. *isolated gate bipolar transistor*).

Bu güç şalterleriyle, darbe genişlik modülasyonu yardımıyla sinüs dalga şekli iyi bir şekilde meydana getirilebilmektedir.



Şekil 2.31: Şebeke etkileşimsiz evirici

Güç şalterleri 10-100 kHz gibi yüksek bir frekansla hızlıca açılıp kapatılarak, darbe süresi ve darbe arası sinüs dalgasına uygun bir şekilde birleştirilebilen darbeler meydana getirilir. Bu şekilde, ardıl bağlı alçak iletimli bir filtre ile dalga şekli düzleştirilerek beslenen akımın şebekenin sinüs akımına iyi bir uyumu temin edilir. Bunun için beslenen akımda sadece az miktarda ve düşük frekanslı dalga uyuşmazlıkları vardır. Şebeke etkileşimsiz eviricilerin reaktif güç sarfiyatı da ayrıca düşüktür.

Bu cihazlar darbe modülasyonu için kullanılan yüksek tetikleme frekansları nedeniyle yüksek frekanslı girişimler (parazit) oluşturduğu için, sistem içindeki elektromanyetik uyumluluk (EMU) konusuna özellikle dikkat edilmek zorundadır. Uygun türde koruyucu devreler ve yalıtımlarla, elektromanyetik girişimler önlenebilir. CE işaretli ve AB uyumluluk beyanlı şebeke etkileşimsiz eviriciler, AB mevzuatında öngörülen EMU limitlerine uygun olur.

Şebeke etkileşimsiz eviriciler, prensip olarak ada sistemlerinde kullanım için uygundur. Eviriciler şebekeye bağlandığı takdirde, köprüleme devresinin tetiklemesi beslenen akımın frekansı, şebeke frekansına senkron olacak şekilde ayarlanmalıdır.

2.3.4 Eviricilerin anma parametreleri, karakteristikleri ve özellikleri

2.3.4.1 Evirme verimi / η_{UM}

Evirme verimi, doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesinde meydana gelen kayıpları tarif eden bir katsayıdır. Bu kayıplar eviricilerde transformatör (trafolu cihazlarda), güç şalteri, filtre ve kontrol ünitesi, regülatör ve denetim sistemi için gerekli güç gereksinimi gibi kayıplardan meydana gelir.

$$\eta_{UM} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (2.1)$$

Evirme verimi, önemli oranda giriş gücüne bağlıdır. Evirme verimi aynı zamanda eviricinin giriş gerilimine bağlı olarak birkaç yüzde (%) oranında artar.

2.3.4.2 Statik verim / η_{WR}

Statik verim, evirme verimi ile izleme verimlerinin çarpımı olarak elde edilir:

$$\eta_{WR} = \eta_{UM} \times \eta_{AN} \quad (2.2)$$

Bu statik verim, farklı yük durumları için hesaplanabilir.

Veri formlarında belirtilen verimler çok farklı olabilir. Çoğunlukla sadece anma geriliminde geçerli maksimum verim belirtilir. Ancak anma durumu, sadece belirli ışınım ve sıcaklık koşulları altında elde edilir. Değişen ışınım nedeniyle evirici sadece çok nadir durumlarda anma durumuyla çalışır.

Yıl boyunca elde edilen fotovoltaiik kazanım, verimin farklı FV güçlerine ve bununla birlikte eviricinin farklı yüklenme durumlarına bağlılığı esastır. Bu nedenle, tek bir verim değeri belirtilmek yerine verim eğrilerinin verilmesi daha anlamlıdır.

Verim karakteristikleri, eviricinin belirli ortam sıcaklığı için geçerli olup giriş gerilimine bağlıdır. Fraunhofer Güneş Enerjisi Enstitüsünden Heribert Schmidt yönetimindeki çalışma grubu, eviricilerin farklı gerilimlerdeki çalışma özelliklerini inceleyerek simülasyon için modeller üzerinde çalışmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen bilgilere dayanarak oluşturulan aşağıdaki grafik, farklı evirici teknolojilerinin giriş gerilimine bağlı olarak maksimum verimlerini gösterir.

2.3.4.3 Euro verimi η_{Euro}

Farklı eviricilerin verim bakımından karşılaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla Alman enerji tedarikçisi RWE'den araştırmacı Rolf Hotopp tarafından Euro verimi η_{Euro} tanımlanmıştır. Bu verim, orta Avrupa iklimine göre uyarlanan, dinamik bir verimdir. Hotopp, ağırlıklandırma Almanya'nın Trier kentinde 1951 ile 1970 yılları arasında tespit edilen ortalama saatlik değerleri esas almıştır.

Aşağıdaki şekilde, Almanya'nın Berlin kentinde kurulu 30° meyilli bir FV tesis bazında elde edilen farklı ışınım sınıflarının sıklığı ve enerji gücü gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, 100 ila 900 W/m² arasındaki ışınım sınıfları nispeten dengeli bir şekilde yıllık ışınımın %5'i dolayında seyretmektedir. Dakikalık verilerde ise 1.000 W/m²'nin üzerinde belirli enerji miktarları görülmektedir. Bundan farklı olarak Almanya'nın güneyinde %6 ile en yüksek enerjiler 700 ila 1.000 W/m² arasında görülürken, 200 ila 600 W/m² arasındaki ışınım sınıflarında bu rakam %4'e kadar düşer. Fotovoltaiik jeneratöre etki eden ışınım değişim gösterdiği için, evirici sürekli farklı yükler altında çalışmak zorundadır. Daha önce tarif edildiği üzere, eviricinin verimi, cihazın anlık giriş gücüne bağlıdır.

Farklı yüklenme koşullarına yanıt verebilmek için, enerji ağırlıklaması için farklı karakteristik parametreler kullanılır. Euro veriminin EN 50524 standardına göre saptanması için farklı güçler için geçerli aşağıdaki altı farklı verim kullanılır.

Ortalama olarak eviricinin yılın %20'sinde %100'lük yük altında çalıştığı varsayılır ($0,2 \times \eta \% 100$). $\eta \%100$ değeri, anma koşulları altındaki verimdir. Bu durumda FV jeneratörün gücü, eviricinin anma gücüne eşit olur ($P_{PV} = P_N WR$). Yarım jeneratör gücündeki verim, Euro verimine ağırlıkça en fazla giren bileşendir. Eviricinin yılın %48'i boyunca %50'lik yük altında çalıştığı varsayılır. Diğer dört yük koşulları da buna paralel olarak hesaba katılır. Orta Avrupa ikliminde en fazla enerji FV jeneratörün orta güç aralığında meydana getirilir. Bu nedenle ortalama bir verim, aşağı yukarı Euro verimine eşdeğer olur. Ancak yıllık ışınım, Güney Almanya'da sıkça görüldüğü gibi 1.200 kWh/m^2 'yi geçerse, verim belirgin ölçüde Euro veriminden farklı olur. Araştırmalara göre Güney Almanya için %50 veriminin katsayısı, %100 veriminkine göre fazla yüksektir.

Modern eviriciler, %92 ila %97 arası bir Euro verimine ulaşır. Ne var ki üreticiler Euro verimini çoğunlukla sadece en yüksek verimin elde edildiği anma gerilimi için belirtir, MPP çalışma aralığı ise geniş bir gerilim aralığını kapsar. Verimler çevre sıcaklığına ve giriş gerilimine bağlıdır. Bu nedenle üreticilerin verimleri "Fotovoltaik sistemlerde kullanılan eviricilerde verim ölçüm yöntemleri" başlıklı IEC 61683 standardı ya da FV eviricilerinin genel verimleri" başlıklı EN 50530 standardına göre yapmaları gerekir.

Anılan standartlara göre verim ölçümü $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 'lik bir çevre sıcaklığı ve aşağıdaki üç gerilimle yapılmalıdır:

- 1) minimum giriş gerilimi
- 2) anma gerilimi
- 3) maksimum giriş geriliminin %90'ı (EN 50530 standart taslağına göre %80).

Alman standartlaştırma komitesi DKE 373, eviricilerin verim tespiti için standartlaştırılmış yöntemlerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Buna göre IEC 61683 standardında öngörülen güç sınıflarının dışında anma gücünün %5'i ve %110'undaki değerlerin saptanması öngörülmektedir. %5 değeri, Euro veriminin tanımına göre gereklidir; %110 değerinin hesaba katılması ise, şebekeye anma gücünün %110'unun beslenmesine izin verildiği için mantıklıdır. Bu nedenle bu

değerin Euro veriminin yeniden tanımlanmasında hesaba katılmak zorundadır. Verim tespitinde MPP izlemesi ve bununla birlikte izleme verimi de dikkate alınır. Bunun için EN 50530 standart taslağında belirli ölçüm düzenekleri ve gerilim sınıfları önerilmektedir.

Işınım koşulları farklı iklim bölgelerinde belirgin farklılıklar gösterdiğinden, Euro veriminin ifade gücü sadece ışınım toplamları 1.000 kWh/m^2 dolayında olan yerlerle sınırlıdır. Yıllık ışınım enerjileri daha yüksek olan yerlerde, özellikle 700 ila 1.000 W/m^2 arası enerji sınıflarındaki en önemli enerji miktarları %10'un üzerinde olduğu görülür. Bu nedenle, Orta Avrupa'dan farklı olarak ışınımın daha yoğun olduğu Türkiye gibi bölgelerde, daha yüksek güç aralıklarında iyi bir verime sahip olan eviricilerin kullanılması daha mantıklıdır.

2.3.4.4 Kaliforniya verimi η_{cec}

ABD'li Sandia National Laboratories fotovoltaik laboratuvarı ve California Energy Commission 2004 yılında, Kaliforniya verimi de denen CEC veriminin tanımlandığı, evirici deneyleri için standart bir test protokolünü yayınlamıştır. Grafikte görüldüğü üzere ABD'nin Kaliforniya eyaletinde, Orta Avrupa'ya göre belirgin ölçüde daha yüksek ışınım enerjileri görülür. Buna göre en fazla %75 değeri ağırlıkça en fazla hesaba katılmaktadır. Ayrıca gerilime bağlılık dikkate alınmıştır. Verimler U_{MPPmin} , U_{Mppn} ve $U_{MPPmaks}$ giriş gerilimleri için tespit edilir. Euro verimi ile Kaliforniya verimi arasındaki fark, modern eviricilerde çoğunlukla %0,5 dolayındadır. Örnekte ele alınan SMC 8000TL modeli evirici, REFU 11K modeli eviriciden daha yüksek bir Euro verimine sahiptir. Gerilime bağlı olmayan Euro verimi η_{Euro} iki eviricide eşit düzeydeyken, REFU 11K modeli eviricide Kaliforniya veriminin η_{CEC} daha yüksek olduğu görülür.

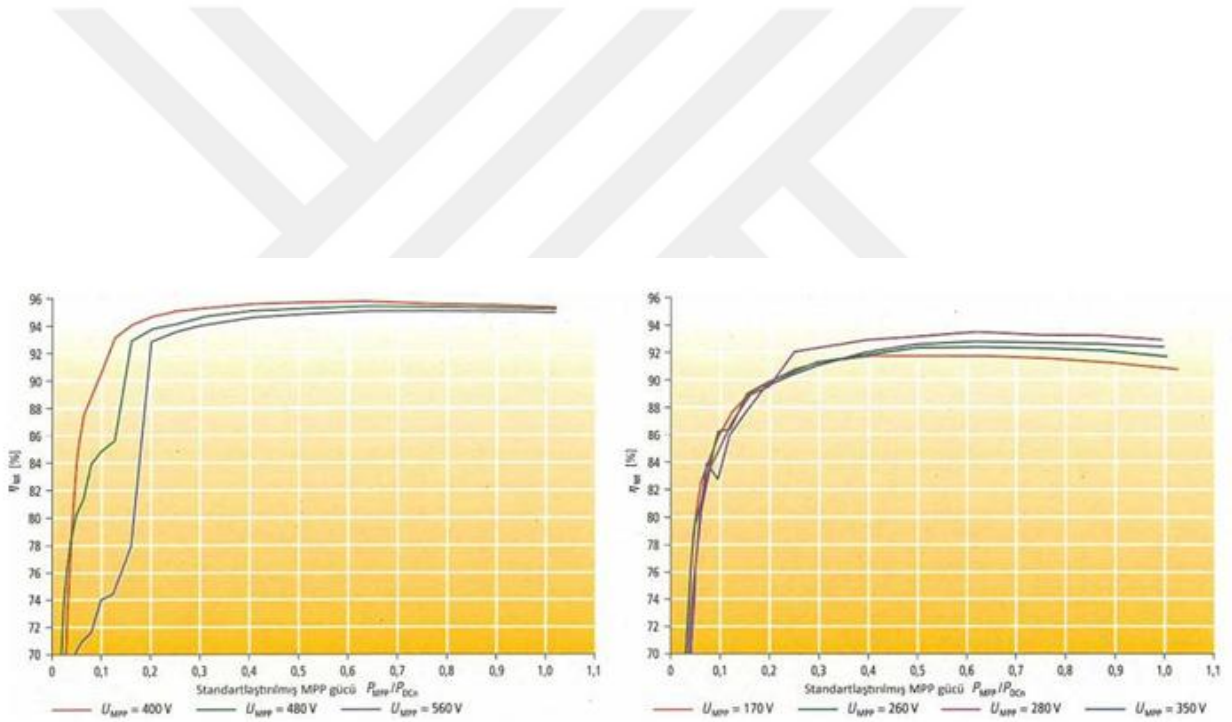
2.3.4.5 Toplam verim (tot)

Farklı eviricilerin karşılaştırılması için Euro ile Kaliforniya verimleri çok kullanışlıdır. Tesisler planlanırken ve optimize edilirken, farklı gerilim ve çevre sıcaklıklarındaki güç ağırlıklı verimler, MPP izleme karakteristiği ve aşırı yük karakteristiği önemlidir. Farklı evirici deneylerinin dışında bu tür incelemeleri gerçekleştirebilen bağımsız laboratuvarlar şunlardır:

- Fraunhofer Rüzgar Enerjisi ve Enerji Sistem Teknolojisi Enstitüsü (IWES) - Kassel/Almanya

- Avusturya Teknoloji Enstitüsü (AIT) - Viyana/Avusturya
- Bern Yüksekokulunun (BFH) fotovoltaik laboratuvarı - Burgdorf/İsviçre
- Photon Labs - Aachen/Almanya

Özellikle Benoit Bletterie (AIT) ve Heinrich Haberlin (BFH), eviricilerin MPP izleme tutumu ile izleme veriminin ölçümü için farklı algoritmalar ve η_{tot} toplam veriminin belirlenmesi için standartlaştırılmış yöntemler geliştirilmiştir (gerçek Euro verimi ya da toplam eta) . Bu yöntemler Avrupa standardı EN 50530'un taslağında dikkate alınmıştır.



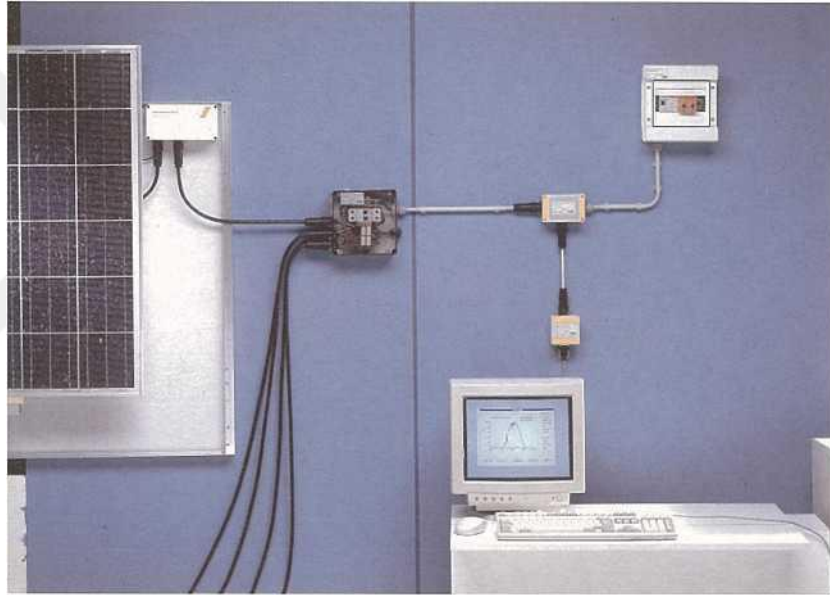
Şekil 2.32: NT4000 modeli trafosuz ve IG 30 modeli trafolu bir eviricide farklı giriş gerilimlerinde ölçülen toplam verimler

İsviçre'de Bern Yüksekokulunda yapılan evirici ölçümler sonucunda, giriş gerilim aralığında 200 V'luk farklarda evirme veriminde geniş bir güç aralığında %2'ye varan sapmalar tespit edilmiştir. Eviricilerin MPP izleme kalitesinin ölçümünde, özellikle küçük güç aralıklarında (%20'den küçük) cihazların gerilime bağlılıklarının %10'a kadar yüksek bir seviyede olduğu saptanmıştır. Evirme verimi %20'lik güç aralığında %100'e yakındı. Toplam verim, cihazların gerilim aralıklarının dikkate alınarak elde edilen gerçek çalışma verimine oldukça yakındır. Bu parametrelerle, planlamacı tesis

konfigürasyonu için en iyi sistem gerilimini tespit edebilecektir. Bu şekilde eviriciler için en iyi modül düzeni belirlenebilir. Bu nedenle, üreticilerin verimleri veri formlarında farklı gerilimler ve güçler için belirtmeleri, planlamacılar için önem taşır.

2.3.4.6 Çalışma verilerinin toplanması

Neredeyse tüm evirici üreticileri, cihazlara doğrudan tümleşik veya sonradan donatılabilir şekilde veri toplama olanağı sunmaktadır. Veriler ya bir ekranda okunabilir, LED ışıklarıyla gösterilir ve/veya bir bilgisayar vasıtasıyla değerlendirilebilir. FV tesisin işlevi bu şekilde denetlenebilir ve değerlendirilebilir.



Şekil 2.33: Çalışma verisi toplama fonksiyonlu ve bilgisayar arayüzlü modül eviricisi [Dorf Müller]

Toplanan çalışma verileri çoğunlukla şu parametreleri kapsar:

- giriş tarafında: gerilim U_{DC} , akım I_{DC} ve güç P_{DC} ,
- çıkış tarafında: gerilim U_{AC} , akım I_{AC} ve güç P_{AC} ve frekans/,
- eviricinin çalışma süresi,
- üretilen elektrik enerjisi miktarı,
- cihazın durumu ve arıza bildirimleri.

Bazı cihazlar sadece günlük değerler toplar, bazılarıysa saniye bazında veri toplar. Çalışma süresi ve enerji miktarı günlük, haftalık, aylık ve/veya yıllık değerler olarak tespit edilir. Veriler bazı evirici modellerinde cihazın içinde kaydedilirken, bazı cihazlarda bunun için harici bir veri toplama cihazı ya da bir bilgisayar veya internet bağlantısı gereklidir. Verilerin değerlendirilmesi, üreticilerin cihazla birlikte verdiği özel yazılımlarla gerçekleşir. Eviricilerde bilgisayar ya da internete bağlanmak için farklı arayüzler bulunur, örn. seriyel veya paralel portlar, dahili ağ portları, CAN bus bağlantısı, Bluetooth, USB veya analog GSM bağlantısı... Bazı cihazlarda verileri doğrudan internete aktarmak için modem de dahil edilmektedir. Eviricilerin gittikçe daha çok modül biçiminde olması nedeniyle, birçok üretici, birden fazla iletişim arayüzlü harici veri toplama cihazlarını sunmaktadır. Bu cihazlarla birden fazla eviricinin verileri merkezi olarak toplanabilir ve değerlendirilebilir.

3 ŞEBEKEYE BAĞLI TESİSLERİN PLANLANMASI VE TASARLANMASI

3.1 Tesis Büyüklüğü ve Modül Seçimi

FV tesisin gücü ve dolayısıyla büyüklüğü, Alman yenilenebilir enerji yasasına göre yapılan doğrudan beslemede uygun çatı alanına ve yatırım kapsamına bağlıdır. FV akımı tesis içinde kullanılacaksa (EE9 2009'a göre maks. 30 kW mümkün), elektrik tüketimi de tesisin büyüklüğü tespit edilirken göz önünde bulundurulur. Bu esnada özellikle günlük akım tüketicileri ve bunların çektiği güç tespit edilmeli ve dikkate alınmalıdır. Güneş enerjisi akımının dahili kullanım oranı yakl. %50'yi aştığında bu EEG türünde, direkt beslemeye kıyasla genelde daha yüksek bir ekonomik verim elde ediliyor. Yerinde ziyaret yaparken müşteriyle mutabık kalınarak FV tesisi için uygun alan tespit edilir. Modüller şuna göre seçilir:

- A) Hücre malzemesi: Mono, polikristal yapı, amorf, mikromorf, CdTe veya CIS ve
- B) Modül çeşidi: Çerçevesiz/çerçevesiz standart modül, cam-cam modülü, FV çatı kiremitli, özel modül vs.

Bu bilgiler doğrultusunda belirli bir modül tipi seçilir. Modülün teknik verileri, tesisin ebatlarını tespit ederken birinci öneme sahiptir. Söz konusu alana yerleştirilebilen modül sayısı belirlenir. Bu sayıdan yola çıkılarak FV tesisin yaklaşık toplam gücü elde edilir.

Ana formül: 1 kWp = yakl. 10 m² FV alanı

Somut çatı planlaması yapılırken şu hususlar dikkate alınmalıdır:

- Mevcut çatı genişliğini veya yüksekliğini dikkate alarak modül genişliğinin veya yüksekliğinin çarpanına göre modül sayısı
- Modülün çatı kenarı mesafesi, modül alanıyla çatı arasındaki dikey mesafesinin beş katına eşit olmalıdır.
- Modüller arasındaki genişleme fugası genelde altı ila on milimetredir.

- Çatının üstündeki yapıların (örn. bacalar, havalandırmalar, antenler,...) ve buların gölgesi
- Gölgeleme bakımından yer çevresinin dikkate alınması
- Yangın kısımlarına dikkat edin ve üzerine montaj yapmayın, mesafelere riayet edin; tesisatı geçirirken de dikkate alın.
- Çatı üzerinde büyük FV jeneratörleri olması durumunda bunlar bölünmelidir; tesisin boyu veya genişliği 10 metreyi aşmamalı ve bir sonraki jeneratör kısmına en az 1 metrelik bir ara bölme bırakılmalıdır. Böylece binada bir yangın anında itfaiye, elektrik tesislerinde yangınla mücadele için güvenlik mesafelerine riayet edebilir.

Planlama için FV jeneratörünün montajı ve binaya mimari bakımından entegre edilmesi önemli bir role sahiptir.

3.2 Tesis Konseptleri

Tesis konseptleri, eviriciler tarafından belirlenir. Böylece merkezi olan ve olmayan tesis konseptleri elde edilir. Modüllerin dizilerle olan devresi ve bunların paralel devresi optimum şekilde eviriciyle ayarlanmış olmalıdır. Modülleri dizilere bağlarken modül toleranslarından dolayı az ya da çok oranda uyumsuzluk kayıpları söz konusu olabilir. TÜV-Rheinland'daki FV sertifikasyon laboratuvarında çalışan Werner Herrmann modül gücü toleransına ve modülerin sıralamasına bağlı uyumsuzluk kayıplarını tespit etmiştir.

+%1-5'lik bir üretim toleransında modüller sıralamadan seri biçimde bağlanırsa kayıplar %1'in altındadır. MPP akım sıralaması yapılarak uyumsuzluk kayıpları yakl. %0,2'ye düşürülebilir, %8'in üzerinde üretim dağılımında MPP akımına göre sıralama yapılması öneriliyor. Birden fazla diziye sahip büyük tesislerde ayrıca gerilim toleransları da hesaba katılmalıdır; dolayısıyla uyumsuzluk kayıpları daha da artar.

Toplu bir tesis için merkezi evirici olarak eviriciler, dizi değişim eviricisi olarak eviriciler ve modül değişim eviricisi olarak eviriciler sunuluyor. Tesisin büyüklüğüne ve uygulama durumuna göre konseptlerden biri seçilir.

Farklı yönlerde ve eğimlere sahip kısmi jeneratör alanlarından oluşan tesislerde veya kısmen gölgede kalan tesislerde merkezi olmayan değişim eviricisi konseptlerini incelemenizde yarar var.

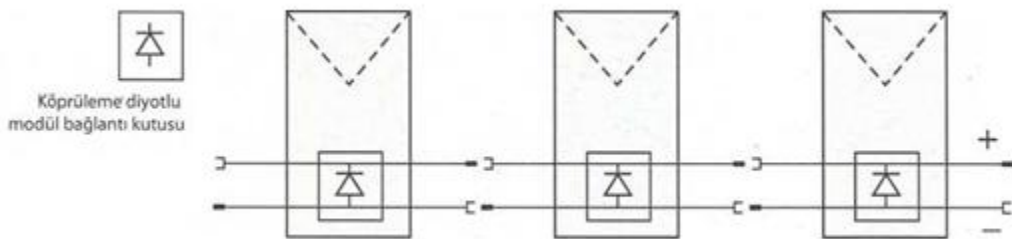
3.2.1 Merkezi değişim eviricisi konsepti

3.2.1.1 Küçük gerilim konsepti

Küçük gerilim aralığında ($U_{DC} \leq 120$ V) sadece az sayıda modül (3 ila 5 standart modül) bir dizide seri olarak bağlanır. Uzun dizelere kıyasla bu kısa dizelerin bir avantajı da, gölgelenmelerin daha az etkide bulunmasıdır; çünkü bir dizide bulunan ve üzerine büyük gölge düşmüş modül tüm dizi akımını belirler. Kayıplar ayrıca gölgede kalan dizilerin sayısına bağlıdır. Gölgede kalan modüllerin sayısı burada fazla önemli değildir. Gölgede kalmış az sayıda dizi varsa, kayıplar düşük olur.

120 Volttan düşük bir gerilimde SK III koruma sınıfı tipleri mümkündür. Bu da sadece sınırlı sayıda üretilen ve IEC 61730 uyarınca koruma sınıfı II sertifikası giderlerinden çekildiği özel modüllerin kullanılmasında avantaj sağlar. Konseptin dezavantajıysa yüksek akımların olmasıdır. Ohm direnci kayıplarını azaltmak için oldukça büyük kesitlere sahip kablolar kullanılmalıdır. Ayrıca küçük gerilimlerde ve yüksek akımlarda eviricilerin etkinlik dereceleri düşüktür. Konsept bu nedenle nadiren kullanılır. Tipik uygulamalar arasında özel modüllere sahip binaya entegre tesisler vardır.

Özellikle ince film modüllerinde bazen münferit modüller paralel şekilde bağlanır. Devrenin basitleştirilmesi için bazı ince film modülleri dört bağlantı kablosuyla sunuluyor.



Şekil 3.1: Dört bağlantı kablosuna sahip modüllerin paralel devresi

Hollanda'daki OKE-Service firması, çerçevesiz kristal yapılı modüllerin baypas diyotları olmadan paralel bağlandığı bir konsept geliştirdi. Buradaki püf nokta, metalik modül altyapısı hem akım taşımak için, hem de modüllerin paralel bağlanması için kullanılmasıdır. Böylece DC hatlarına ve diğer DC bileşenlerine (sigortalar, GAK ...) bu "kablolu FV" (PV-Wirefree) olarak adlandırılan konseptte gerek kalmaz. Gölgeleme kayıpların azaltılması ve koruma sınıfı II'nin tercih edilmemesi diğer avantajlarıdır. Kablolu FV dolayısıyla bina entegrasyonuna ve yakın gölgelemenin olduğu yerlerde oldukça uygundur. Ancak bu zamana kadar pek kullanılmamıştır. Bunun nedeni de Modül-Montaj İskeleti elemanının sadece prototip olarak mevcut olması ve düşük gerilim aralığına sahip uygun modüllerine ve eviricilerin neredeyse hiç üretilmemesidir.

3.2.1.2 Yüksek gerilimli konsept

Uzun dizilere ve dolayısıyla yüksek gerilimlere ($U_{dc} > 120 \text{ V}$) sahip bir konseptte SKII koruma sınıfı gereklidir. Bu konseptte akımların düşük olması nedeniyle küçük kesitli kablolar kullanılabilir. 1.000 Volta varan sistem gerilimine ve merkezi eviricilere sahip bu konseptler genelde orta ve büyük boy tesislerde kullanılır. Dizilerin uzun olmasından dolayı gölgelemelerde kayıpların yüksek olması ise bir dezavantaj teşkil ediyor. Planlamada modüllerin hangi maksimum sistem gerilimine uygun olduğuna dikkat edilmelidir. Dört kristal yapılı modül ve birkaç ince film modül tipleri 1000 Volt sistem gerilimine kadar kullanılabilir. Yüksek etkinlik derecelerinden dolayı daha fazla sayıda trafosuz evirici, her tür küçük cihazdan tutun megawatt sınıfı tesislere kadar kullanılıyor. İnce film modülleri veya SunPower hücreli ya da String-Ribbon hücreli kristal yapılı modüller kullanıldığında trafosuz eviricilerin uygunluğuna ve topraklama seçeneklerine dikkat edilmelidir.

3.2.1.3 Asıl-bağımlı (master-slave) konsepti

Büyük FV tesislerinde genelde asıl-bağımlı (İng. *master-slave*) prensibine uygun merkezi bir evirici konsepti kullanılır. Bu konseptte birden fazla merkezi evirici (genelde üç ila dört) kullanılır. Bir evirici Master cihazdır ve küçük ışınım aralığında çalışır. Işınım arttığında Master cihazın güç sınırına ulaşılır ve sonra evirici (Slave) devreye sokulur. Eviricilere eşit biçimde yüklenmek için belirli bir döngüde Master ve Slave değiştirilir (dönen Master).

Bu konseptte düşük ışınımlarda sadece bir evirici (Master) çalışır ve dolayısıyla sadece bir merkez evirici kullanılmasına kıyasla etkinlik derecesi küçük güç aralığında daha yüksektir 1 ila 2 MW güce kadar olan Master-Slave kombinasyonları %98'in üzerinde bir Euro verimine ulaşıyor. Master-Slave konseptine bir örnek de 1997 yılında Münih'teki fuar binasının çatısına kurulan 1 MW kapasiteli FV tesisidir.



Şekil 3.2: Münih fuar binasının 1 MW FV tesisi [Siemens]

3.2.2 Dizi eviricileri ve kısmi jeneratör konsepti

Küçük ve orta güç aralığında genelde dizi eviricilerine sahip tesisler kurulur. Çoğu zaman FV jeneratörünün tamamı sadece bir dizi oluşturur. Böylece örn. 200'er Watt güce sahip 12 modül bir diziye bağlanır; böylece toplamda 2,4 kW gücünde bir FV jeneratör elde edilir.

Farklı kısmi jeneratörlere sahip bir tesiste veya gölgelenme olması durumunda kısmi jeneratörlü veya dizi eviricili bir konsept, ışınım koşullarına daha iyi bir uyum sağlar. Kısmi jeneratör başına veya dizi başına bir evirici kullanılır. Yalnızca benzer çevre koşullarına (yön, gölgeleme) sahip modüllerin birlikte bir dizi içinde toplanabileceğine dikkat edilmelidir. Uzun dizilerde gölgelenme sonucu aşırı güç kayıpları söz konusu olabilir; çünkü en düşük ışınımına sahip modül toplam dizi akımını belirler.



Şekil 3.3: Herne'deki eğitim akademisinde bulunan 1 MVV'lık FV tesisinde dizi eviricisi [Scheuten Solar]

Dizi eviricileri kullanılarak FV tesislerin kurulumu kolaylaşır; kurulum giderleri büyük oranda azaltılabilir. Eviriciler sıklıkla FV jeneratörünün yakınına monte edilir ve dizi şeklinde bağlanır.

Eviricilere modül dizileri doğrudan bağlandığı için, jeneratör bağlantı kutularına ve doğru akım ana hatlarına gerek kalmayabilir. Seri devre sayesinde modül kablo tesisatı azalır.

Kuzey Ren Vestfalya eyaletinde bulunan eğitim akademisinin 1 MW'lık FT tesisi, kısmi jeneratörlerden ve dizi eviricilerden oluşan konseptte bir örnektir. Burada 569 adet dizi eviricisi kullanılıyor. Mimari konsept, 6 farklı FV modülünün kullanımını öngörüyordu. 16 farklı dizi yapılandırması oluşturuldu; böylece gerilim düzeyleri arasında kısmen büyük farklar oluştu. Dizi eviricileri sayesinde dizilerde farklı MPP gerilimlerine uyarlama yapmak mümkündür.

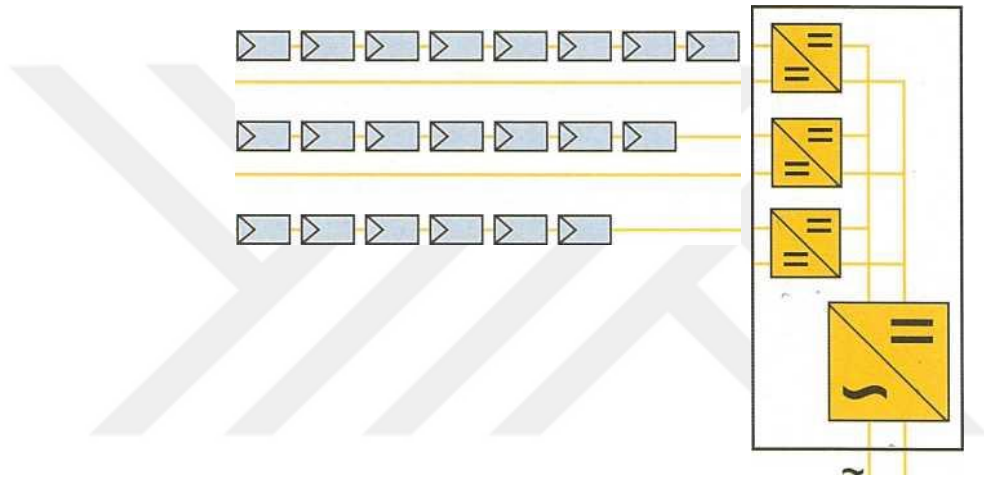
3.2.2.1 Takım konsepti

Takım konsepti Master-Slave ve kısmi jeneratör konseptinden oluşuyor. Burada her evirici ünitesi tesisin bir kısmından, yani bir kısmi jeneratörden sorumludur. Otomatik bir DC bağlantı şalteri üzerinden bunlar ortak jeneratörler olarak bağlanabilir. Küçük ışınımlar esnasında kısmi jeneratörler ortak şekilde bağlanabilirken, orta ışınım düzeyinde bunlar ayrılabilir. Küçük ve orta ışınım aralığında %1'e varan verim kazançları elde edilebilir. Kısmi jeneratörler ayrıca izin verilen izolasyon direncinin altında kaldığında ayrılabilir ve bunun sonucunda izolasyon direnci tekrar artar. Kurulum esnasında ve regülasyonun karmaşıklığına bu

ek eforlar olumsuz etkide bulunabilir. Bu konsept küçük güç aralığına sahip eviricilerde de (örn. dizi eviricileri) kullanılabilir.

3.2.3 Çoklu mpp regülatörü konsepti

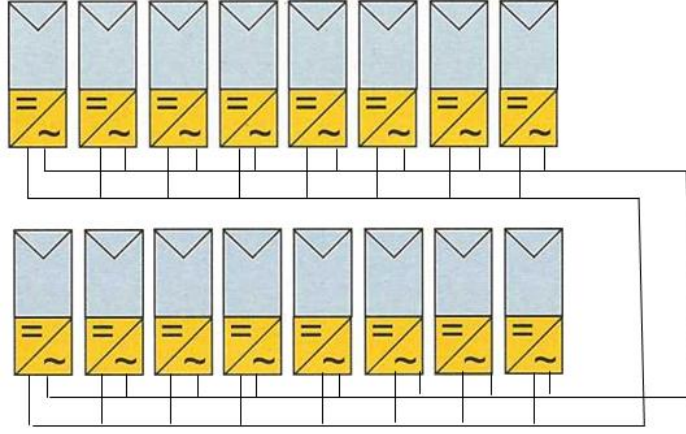
Birden fazla dizi eviricisinin yanında, şayet gölgeleme veya farklı hizalama nedeniyle modül dizileri farklı ışınımlara sahipse, birden fazla MPP izleyicisine sahip bir evirici de kullanılabilir. Ayrıca dizi eviricilerine kıyasla giderler daha düşüktür. Çoklu MPP regülatörü konseptiyle farklı modül sayısına veya farklı modüllere sahip modül dizilerini, herhangi bir verim kaybı yaşamadan bağlamak mümkündür.



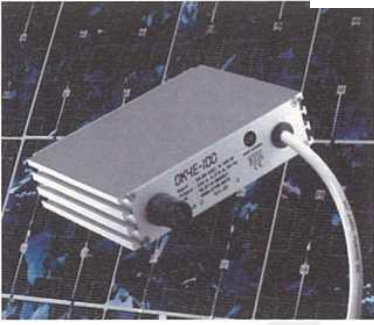
Şekil 3.4: Çoklu MPP Regülatörü Konsepti

3.2.4 Modül eviricisi konsepti

Sistemin yüksek verimde çalışmasının ön koşulu, eviricilerin FV modüllerine optimum şekilde ayarlanmış olmasıdır. Her modül için maksimum güç noktasında sürekli çalışma en avantajlısı olurdu. FV modülü ve evirici bir ünite tipinde olduğunda MPP uyarlaması daha iyi olur. Bu modül evirici ünitesine aynı zamanda alternatif akım modülü de denir. Kullanılacak eviricilere modül eviricileri denir. Bazı cihazlar, modül bağlantı kutularına konulacak kadar küçüktür.



Şekil 3.5: Modül eviricisi konsepti



Şekil 3.6: Modül eviricisi [NKF]



Şekil 3.7: Berlin'de modül eviricilerine sahip ön cepheye entegre FV tesisi

Başka konseptlerde herhangi bir şey yapmadan genişletme yapmak mümkündür. Modül eviricileriyle bir FV tesisi istenildiği kadar genişletilebilir (sadece tek bir alternatif akım modülüyle).

Bu zamana kadar modül eviricileri çok sık kullanılmazdı. Nedenleri arasında %86 ila %93'lük düşük Euro verimleri, yüksek giderler ve modüllerin arkasında bulunan cihazların sıcaklıktan dolayı eskimesi sayılabilir. Başka evirici konseptlerine kıyasla verimdeki bu fark, ilgili modülün MPP noktasına daha iyi uyarlanabilmesinden elde edilen ek verimle dengelenir. Bu sayede FV jeneratörünün uyumsuzluk kayıpları minimize edilir. Büyük eviricilere kıyasla %9'a varan verim farklarında bu konsept çoğu zaman yüksek kazanç sağlamaz. Piyasada yüksek sayıda alternatif akım modülü ve dolayısıyla modül eviricileri bulunduğu fiyat bakımından avantajlı olabilir. Alternatif akım modülleri monte edilirken, bir evirici arızası olduğunda eviricinin kolay değiştirilmesine dikkat edilmelidir. Bu konseptte aynı zamanda ilgili çalışma verileri okunarak, arızalar tespit edilerek ve veriler kaydedilerek münferit eviricileri denetlemek önemlidir. Bu amaçla üreticiler uygun sistemler sunuyor.

Ön cepheye entegre edilmiş tesislerde modül eviricisi konsepti yararlıdır (özellikle de çevreden veya cephenin ileri geri oynamasından kaynaklanan gölgelenmeler varsa). Berlin'in Moritz meydanında bulunan bir binada ön cepheye entegre edilmiş yalıtım camlı modüller ve modül eviricileri kullanılıyor; bunlar dağıtılmış halde evlerin enerji beslemesini sağlıyor.

3.2.4.1 Dc-bus konsepti

Uyumsuzluk kayıplarını azaltmanın diğer bir yolu da DC-Bus konseptidir. MPP izlemesi her modülde DC/DC konvertörleriyle sağlanır. Konvertör, sabit bir DC gerilimini DC-Bus'a verir. Alternatif gerilime dönüştürme işlemi daha sonra merkezi bir evirici ünitesinde yapılır. DC/DC konvertörlerinin verimi yaklaşık %98,5 düzeyindedir; dolayısıyla önlenebilen uyumsuzluk kayıplarıyla kazanç dengelenir. Bu nedenle aynı tipte ve gölgelenme olmadığı durumlarda maksimum +/- %5'lik bir modül gücü toleransında, başka tesis konseptlerine kıyasla daha düşük verim elde edilir. Ancak güçlü gölgelenmelerde veya farklı hizalanmış modüllerde ya da farklı modüllerde kazanç artışı elde edilebilir.



Şekil 3.8: Entegre MPP izleyicilerine sahip modül bağlantı kutuları solda: SolarEdge firmasının Powerbox kutusu ve sağda: National Semiconductor firmasının Solar Magic Box kutusu

Dolayısıyla konseptin en büyük avantajı değişken olmasıdır: Farklı modüller birleştirilebilir ve farklı hizalamalar veya gölgelenme durumları kontrol edilebilir. Diğer avantajları arasında DC kablosu ve DC jeneratör kutusu tasarrufu yapmak ve gölgelenme durumunda çatıdan daha iyi faydalanabilmektir.

Amerikan National Semiconductor firması ve İsrail-Japon ortaklı Solar Edge firması bu zamana kadar bu konseptlerle ilgili bileşenler sunuyordu. National Semiconductor firmasının SolarMagic Box kutusu mevcut tesislere sonradan entegre edilebilirken, Solar Edge firmasının Powerbox kutusu ancak modüler çalışma bilgileri izlemesi gibi ek fonksiyonlarla ve hırsızlık ve yangın korumasıyla genişletilebilir. Bu sayede

bir ışık arkı algılandığı anda veya evirici kapatıldığında modüller gerilimsiz hale getirilir. Cihazların yüksek fiyata sahip olmasıyla bir dezavantajdır. Seri üretim yapılırsa, fiyatların düşeceği düşünülüyor.

3.3 Eviricinin Kurulum Yeri

Kurulum yerinin seçilmesi üretici tarafından talep edilen ortam koşullarına (nem ve sıcaklık aralığı) uyulması çok önemlidir. Eviricilerin kurulacağı yer serin, kuru, tozsuz ve kapalı olmalıdır. Sayaç panosunun yanında veya yakınında kurulması yararlıdır. Ortam koşulları izin verirse, eviriciyi alternatör bağlantı kutusunun yakınına kurmak mümkündür. Bu sayede doğru akım ana kablosunun uzunluğu düşürülür ve kurulum giderleri düşürülür.[1]



Şekil 3.9: Evirici için genelde en uygun kurulum yeri bodrumdur

Optimum bir soğutma olması için havalandırma aralığı ve soğutma gövdesi açık olmalıdır. Aynı sebepten dolayı cihazlar sıkı şekilde üst üste monte edilmemelidir. Eviriciler ahşap duvarlara veya başka yanıcı malzemelere sabitlenmemelidir. Evirici ile ahşap duvar arasında yalıtım olarak bir metal sac kullanılması önerilmiyor; çünkü sacın kendisi eviriciden gelen ısıyı iletir, ahşaba olan hava alışverişini sınırlar ve bu nedenle de tutuşmaya neden olabilir. Cihazlar aşındırıcı buharlardan, su buharından ve ince tozdan korunmalıdır. Örn. ambarlarda veya ahırlarda amonyak buharları oluşabilir ve bu buharlar eviriciye zarar verebilir. Kurulum yeri seçilirken eviricinin oluşturduğu gürültü de dikkate alınmalıdır. Büyük merkezi eviriciler genelde ayrı bir evirici panosuna veya konteynıra monte edilir (koruyucu, sayaç ve devre düzenekleriyle birlikte).

Çatıda veya dış alanda artan sayıda eviriciler kullanılmaya başlandı. Dışarıda kullanılan cihazlar, dış hava koşullarına dayanmaları için en az IP 54 sınıfındadır. Yine de eviricileri direkt güneş ışığından ve yağmurdan korumak gerekir; böylece çalışma ömürleri uzar. Ayrıca olası arıza veya onarım durumları için eviricilere erişimin kolay olmasına dikkat edilmelidir.

3.4 Evirici Boyutlaması

Eviricinin teknik açıklamasında tasarım ve kurulumla ilgili önemli uyarılar açıklanmıştır. Bunlara mutlaka riayet edilmelidir. Sistem ve devre konseptine göre eviricilerin sayısına, gerilim düzeyine ve güç sınıfına karar verilir.

3.4.1 Güç boyutlaması

FV tesisin belirlenen toplam gücünden ve seçilen tesis konseptinden yola çıkılarak eviricilerin sayısı ve gücü belirlenebilir.

Sag = 4,6 kVA değerinde zahiri bir besleme gücüne kadar VDEW yönetmeliğine göre tek fazlı bir paralel beslemeye izin verilmiştir; eviricinin anma çıkış gücü Pac buna göre bu değere uygun olmalıdır. 4,6 kVA'nin üzerinde çok fazlı besleme yapılmalıdır. Bu da eşit biçimde üç faza (maksimum 4,6 kVA) dağılmış birçok sayıda tek fazlı eviriciyle yapılabilir. Bu esnada, eviricilerin anlık çıkış gücünün farklı hizalı kısmı jeneratörlerle değiştiği göz önünde bulundurulmalıdır. VDEW yönetmeliğine ait 03/2004 sayılı VDN bilgi sayfasına göre eviricinin anma çıkış gücünün %10 üzerinde maksimum bir gücü 10 dakika süreyle elektrik şebekesine verilmesine izin verilmiştir, Evirici üreticileri bu değerleri garanti eder ve bunları bahsi geçen uygunluk beyanında belgeler.

$$\text{Maks. Evirici Çıkış Gücü (AC)} = S_{\text{maks}} 10 \text{ dk} \leq 1,1 \times S_N$$

(3.1)

Fotovoltaik jeneratörler ve eviriciler güç değerleri bakımından birbirine uygun olmalıdır. Eviricilerin AC anma gücü, fotovoltaik jeneratör gücünün \pm %20'si arasında (STC) olabilir - (eviriciye, modül teknolojisine ve modüllerin yerel güneş ışınımı ve yönü gibi yerel koşullara bağlıdır). Geçmişte evirici boyutunun %40 oranında küçük seçilmesi öneriliyordu. Bununla enerji bakımından zengin aralıkta ve 1.000 W/m^2 değerinin üzerinde kısa süreli ama sık meydana gelen güç pikleri göz ardı edilirdi.

Geçmişte evirici boyutunun %40 oranında küçük seçilmesi öneriliyordu. Bununla enerji bakımından zengin aralıkta ve 1.000 W/m² değerinin üzerinde kısa süreli ama sık meydana gelen güç pikleri göz ardı edilirdi.

Günümüzde referans değer olarak en uygun teknik değerler için FV jeneratörüyle AC evirici gücü arasında 1:1'lik bir oran isteniyor. Belirli güç seviyelerinde eviriciler bulunduğu için ve modüllerin sayısı ve dolayısıyla fotovoltaiik jeneratörün gücü kullanılabilir alana bağlı olduğu için 1:1 oranında sapmalar söz konusu olabilir.

Evirici üreticilerinin verdiği, bağlanabilir maksimum FV gücü bilgisine her zaman güvenilmemelidir. Tecrübelerimiz bize, yüksek değerlerin verildiğini ve cihazların çoğu zaman aşırı yük bölgesinde çalıştığını göstermiştir. Bunun sonucunda gücün düşürülmesinden kaynaklanan enerji kayıpları ve cihazların erken eskimesi söz konusu olur. Evirici üreticisi uygunluk beyanında AC anma gücünü belirtmelidir. AC anma gücünü evirici 25 °C (+1-2 °C) ortam sıcaklığında sürekli olarak düşürmeden şebekeye verebilir. Verimi uygun düzeye getirmek ve şebekeyi yönetebilmek için 1:1,1'lik bir oran öneriliyor.

FV jeneratör gücünün eviriciye ait AC anma gücüne oranına eviricinin teknik boyut

$$SR_{AC} = \frac{P_{FV}}{P_{WRAC}} \quad (3.2)$$

oranı SR_{AC} (İng. *sizing ratio*) denir:

Teknik boyut faktörü eviricinin yük kapasitesini açıklar. Tipik olarak 1 değerinde bir teknik boyut faktörü ve şu aralık elde edilir:

$$0,83 < SR_{AC} < 1,25 \quad \text{öneri: } SR_{AC} = 0,9 \quad (3.3)$$

Eviriciler dışarı veya çatıya kurulursa, yüksek termik yüklenmeler nedeniyle düşük bir teknik boyut faktörü seçilmelidir. Bu husus, sıcak iklim bölgelerinde kullanılan tesisler için de geçerlidir. Bu bölgelerde ayrıca ışınlamalar yüksektir ve 1.000 W/m²'nin üzerindeki değerler saatlerce söz konusu olabilir. Evirici bu nedenle jeneratör gücüne kıyasla %10 ila %20 daha yüksek bir AC gücüne sahip olmalıdır (eviriciler için özel

soğutma konseptleri kullanılırsa buna gerek yoktur). Fraunhofer ISE'de Bruno Burger'in yaptığı araştırmalar 1,1 ila 1,2 değerinde bir SR_{Ac} faktöründe, 1:1 'lik orana kıyasla kısa süreli ışınlam piklerinde eviricinin gücü düşürmesinden dolayı %0,5 ila % 1 arasında ek kayıplar olduğunu göstermiştir. Faktörün 1,2 ila 1,3 olması durumunda ek kayıplar %1 ila %3 olmuştur.

Araştırmalarda 30° eğimli, güneye bakan ve arkadan havalandırılan bir FT jeneratörü ele alınmıştır. Trafolu ve trafosuz eviricilerin teknik boyut faktörüne bağlı olarak yıllık verimleri tespit edilmiştir. Bu esnada anlık değerlerin, dakikalık ve saatlik ortalama değerlerin eğrileri gösterilmiştir. Simülasyon programı eğer saat bazında yapılırsa, yüksek SR_{Ac} değerlerinde maksimum verim 1 olarak tahmin edilir. Ancak FH-München'in ve Siemens'in yaptığı araştırmalar en yüksek verimin Tin altındaki SR_{Ac} değerlerinde olduğunu göstermiştir. 1.000 W/m^2 'nin üzerinde kısa süreli ışınlam piklerinin yıllık enerji payı Almanya'da (Münih) %8'e varabilir, çok nadir durumlarda uygun hizalanmamış olan tesislerde veya kısmi gölgelerin olduğu tesislerde eviricinin boyutlarını düşürmek teknik ve ekonomik bakımdan yararlı olabilir. Bu esnada eviricilerin aşırı yükte farklı davranışları göz önünde bulundurulmalıdır. Aşırı yüklenmenin sık olduğu durumlarda cihazın ömrü oldukça kısadır.

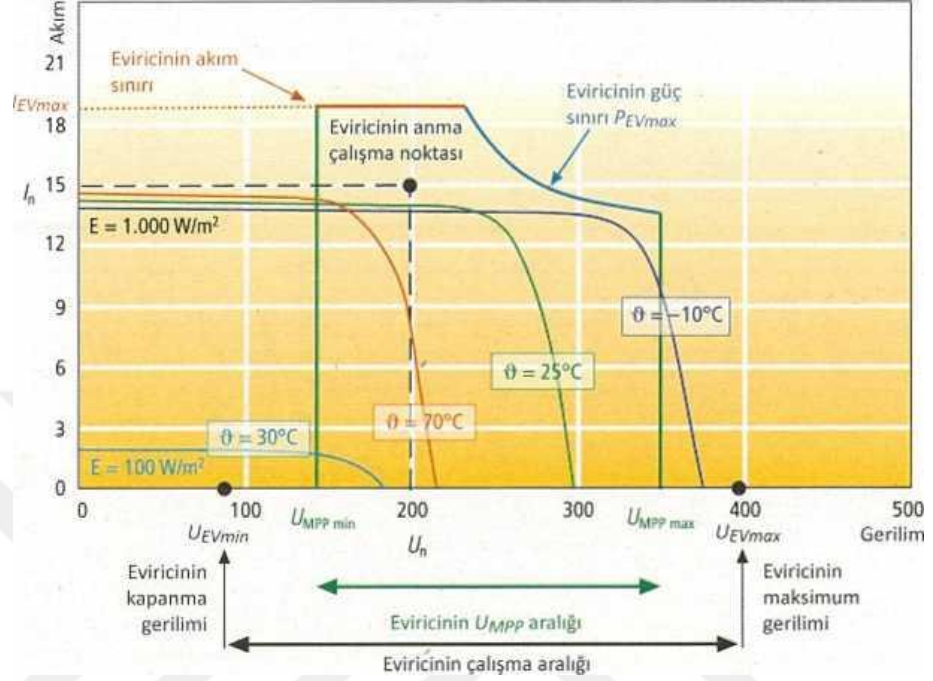
Amorf modüller kullanıldığında teknik tasarım yapılırken modüllerin degradasyonu dikkate alınmalıdır. Başlangıçtaki ışık eskimesi nedeniyle güç sabit anma değerine ayarlanana kadar amorf modüller kullanıldıkları ilk aylarda %20 ila %30 ve mikromorf modüller de yakl. %10 daha fazla güce sahip olabilir.

Eviricinin şu gerilim ve akım boyutları için de bu etki göz önünde bulundurulmalıdır. Bu zaman aralığında çalışma gerilimi yakl. %30 ve çalışma akımı yakl. %5 normal değerlerden yüksek olabilir.

3.4.2 Gerilim boyutlaması

Eviricideki gerilimin yüksekliği bir dizi içine seri halde bağlanmış modüllerin toplam voltajından elde edilir. Modül voltajı ve dolayısıyla tüm FV jeneratörünün voltajı özellikle sıcaklığa bağlı olduğu için, kış ve yaz gibi aşırı çalışma koşulları boyutlandırmada kullanılır. Evirici tasarımında modüllerin sıcaklığa ve ışınlama bağlılıkları dikkate alınmalıdır. Jeneratör gerilimi sıcaklığa son derece bağlıdır. Eviricinin çalışma aralığı FV jeneratörünün eğrisine göre ayarlanmalıdır. Eviricinin

MPP aralığı yukarıda gösterildiği gibi farklı sıcaklıklarda jeneratör eğrinin MPP noktalarını kapsamalıdır. Ayrıca eviricinin kapatma gerilimi ve gerilim mukavemeti dikkate alınmalıdır.



Şekil 3.10: PV jeneratörü eğrileri ve eviricinin çalışma aralığı

3.4.2.1 Bir Dizi İçinde Maksimum Modül Sayısı

Orta düzeyli iklim bölgelerinde kışın -10 °C sıcaklıkta birinci sınır değeri elde edilir. Düşük sıcaklıklarda modüllerin gerilimi artar. Bir çalışma durumunda meydana gelebilen en yüksek gerilim, düşük sıcaklıklardaki açık devre gerilimidir. Güneşli bir kış gününde bir evirici kapatmasından sonra (örn. şebeke hatasından dolayı) tekrar devreye sokarken yüksek açık devre gerilimi söz konusu olabilir. Bu gerilim, eviricideki maksimum DC giriş geriliminden küçük olmalıdır; aksi takdirde evirici zarar görebilir. Böylece seri devrede bulunan maksimum modül sayısı, eviricilere ait maksimum giriş geriliminin ve -10 °C'de modüle ait açık devre geriliminin çarpımından elde edilir.

$$n_{maks} = \frac{U_{evirici maks.}}{UL (modül - 10^{\circ}C)}$$

(3.4)

Modül üreticilerin veri sayfalarında modülün -10 °C'deki açık devre gerilimi her zaman belirtilmemiştir. Modülün veri sayfasında açık devre gerilimi p_L için olan sıcaklık çarpanı, kısa devre akımı cck için olan sıcaklık çarpanı bilgisi ve MPP gücü y standart olarak öngörülmüştür.

3.4.2.2 Bir Dizi İçinde Minimum Modül Sayısı

Yazın modüller tavan üzerinde yakl. 70 °C'ye kadar kolayca ısınabilir. Genelde bu sıcaklıktan yola çıkılarak bir dizideki minimum modül sayısı tespit edilir. Serbestçe dik kurulmuş tesislerde Almanya'da maksimum 60 °C sıcaklıktan yola çıkılabilir. Yazın tam ışınım olduğu zamanda bir FV tesisi yüksek sıcaklıktan dolayı, STC koşullarına göre daha düşük bir gerilime sahip olur (modülün veri sayfasındaki anma gerilimi). Tesisin çalışma gerilimi eğer eviricinin minimum MPP geriliminin altına düşerse, artık mümkün olan maksimum güç verilemez ve hatta uygunsuz şartlar altında kapatmaya neden olur. Bu nedenle seri bağlı modüllerin bir dizi içindeki minimum sayısı, MPP'deki eviricinin minimum giriş geriliminden ve 70 °C'deki MPP'de modül geriliminin çarpımından elde edilecek şekilde boyut seçimi yapılmalıdır.

Aşağıdaki formülden, seri devredeki modül sayısını belirlemek için alt sınır değeri elde edilir:

$$n_{\min} = \frac{U_{\text{mpp}} (\text{evirici min.})}{U_{\text{mpp}} (\text{modül } 70^{\circ}\text{C})} \quad (3.5)$$

Çoğu durumda modül veri sayfalarında modülün 70 °C'deki MPP gerilimi belirtilmemiştir. Ayrıca genelde sadece açık devre gerilimi için sıcaklık çarpanı belirtilir; pratik uygulamada sıklıkla bu çarpan 70 °C değerini hesaplamak için kullanılır. MPP-Sıcaklık çarpanı $/3_{\text{mpp}}$ kısmen de olsa sıcaklık çarpanının 6i kesin biçimde farklı olur. Aşağıdaki tablolarda dönüşüm için tablolar mevcuttur. Polikristal ve monokristal yapıları ve ASI modüllerinin değerlerini Toro ve Laschinski, modül ölçüm verilerini analiz ederek önermiştir. Diğer modüllerin değerleri yazar tarafından üreticinin ölçüm verilerine ve ölçüm eğrilerine dayanarak tespit edilmiştir.

Çizelge 3.1: Sıcaklık faktörleri için dönüşüm formülleri

	β_{MPP}	α_{MPP}
Polikristal yapılı	$\beta_L - 0,11$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,05$ [%/°C]
50°C'de EFG	$\beta_L + 0,08$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,08$ [%/°C]
50°C'de String Ribbon	$\beta_L - 0,14$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,08$ [%/°C]
Monokristal yapılı	$\beta_L - 0,10$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,07$ [%/°C]
50°C'de monokristal yapılı SunPower	$\beta_L + 0,07$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,07$ [%/°C]
Amorf	$\beta_L - 0,02$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,08$ [%/°C]
Üçlü amorf	$\beta_L + 0,07$ [%/°C]	α_K
50°C'de CIS	$\beta_L - 0,05$ [%/°C]	α_K
45°C'de CdTe	$\beta_L - 0,03$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,15$ [%/°C]
60°C'de CdTe	$\beta_L - 0,01$ [%/°C]	$\alpha_K - 0,15$ [%/°C]

3.5 Tesis Konseptleri

Meydana gelen maksimum sıcaklık, tesisin yerine ve montaj türüne bağlıdır. Bu da gerilim değişimi tespit edilirken dikkate alınmalıdır. Arka havalandırması olmayan FV tesislerinin çatıya veya ön cepheye entegre edildiği durumlarda sıcaklıklar 100 °C'ye kadar artabilir. Bu durumda 100 °C'deki Umpp gerilimi, bir dizi içindeki minimum modül sayısını tespit etmede kullanılır. Uzun dizilere sahip tesis konseptlerinde aşırı gölgelenme nedeniyle MPP geriliminde çok ciddi bir düşüş söz konusu olabilir. Bu da gerektiğinde boyut tespitinde dikkate alınmalıdır.

3.5.1 Dizi sayısının belirlenmesi

Boyutlandırmayı tamamlarken maksimum FV jeneratör akımının, maksimum giriş akımını aşıp aşmadığı kontrol edilmelidir. Dizi sayısı maksimum, eviricinin izin verilen maksimum DC giriş akımının ve maksimum dizi akımının çarpanı kadar büyüktür.

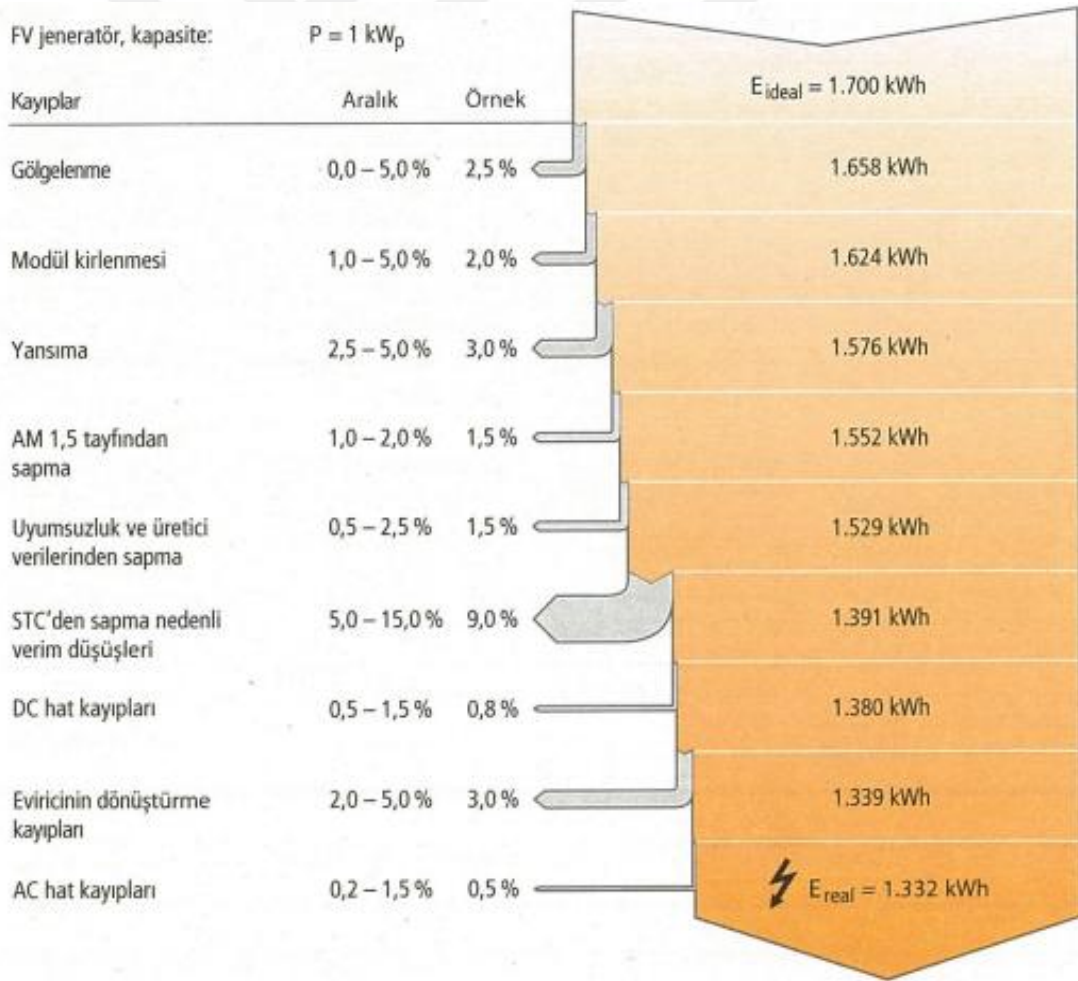
$$ndizi \leq \frac{I_{maks\ evirici}}{I_{maks\ dizi}} \quad (3.6)$$

Maksimum dizi akımı olarak genelde STC'de kısa devre akımı kullanılır. Ancak 1.000 W/m² değerinin üzerinde ışınlımlar da söz konusu olabilir ve bu nedenle de MPP akımının 1,25 katı önerilir.

Eviricinin boyutu azaltılırken eviricinin ne sıklıkla yüksek akım aralığında bulunduğu kontrol edilmelidir. Bu sayede düşük veya yüksek bir aşırı yüklenme olup olmadığı tahmin edilebilir. Bu da uygun simülasyon programlarının yardımıyla yapılabilir. Aşağıdaki şekilde örnek bir simülasyon da eviricinin aşırı yüklenmesi yüksek olarak değerlendirilmelidir. Bu da eviricinin erken eskimesine veya elektronik parçaların zarar görmesine neden olabilir.

3.6 Kazanç Tahmini

Kazanç tahmininde bulunmak için FV tesisin yeri ve sistemin kalitesi doğru tahmin edilmelidir. Bunun için FV jeneratörünün teorik olarak beklenen enerji eldesinden (E_{ideal}) FV tesisin tüm kayıpları çıkarılır. Aşağıdaki jeneratörden gelene enerjiye (E_{ideal1}) göre şekilde her bir kayıp ve bunların ortalama yüzde oranı gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Şebeke bağlantılı bir FV tesisin enerji akış diyagramı

Sistemin kalite ölçüsü olarak performans oranı (performance ratio) PR denen bir sayı kullanılır. Performans oranı kullanılan fotovoltaiik enerjinin nominal elektrik enerjisi üretimine (verimin ve yıllık güneş ışınımının çarpanı) bölümü olarak tanımlanmıştır. PR, kayıpsız çalışan bir tesise kıyasla tesisin verimini gösterir.

$$PR = \frac{E_{reel}}{E_{ideal}} \quad (3.7)$$

FV jeneratörünün teorik olarak beklenen enerji performansına ideal enerji verimi de denir. FV jeneratörünün ideal enerji eldesi jeneratör yüzeyine (A_{pv}) güneş ışınımının (g_{pv}) ve FV modüllerinin verimi çarpımından elde edilir.

$$E_{ideal} = A_{pv} \times g_{pv} \times \eta \quad (3.8)$$

Şu nedenle:

$$\eta = \frac{P_{pv}}{1000 \frac{W}{m^2} \times A_{pv}} \quad (3.9)$$

İle PR kolayca hesaplanabilir:

$$PR = \frac{e_{reel}}{g_{pv}} \times \frac{kW_p}{m^2} \quad (3.10)$$

Burada;

e_{reel} = besleme sayacına yıllık spesifik fotovoltaiik verim, kWh/kW_p cinsinden. Burada g_{pv} , eğimli jeneratör alanına spesifik ışınımı gösterir ve yatay global ışınımı temsil etmez. Bu nedenle farklı hizalamak tesisler sınırlı şekilde karşılaştırılabilir.

Eğik yüzeye olan ışınım bir kazanç tahmini yapılırken yatay global ışınımın uzun yıllara dayanan ortalama değerlerinden ve sonrasında jeneratör alanına dönüştürülerek oluşturulur. Böylece simülasyon programlarında çoğu kez yirmi yıla dayanan aylık değerler (uygun yöntemlerle saatlik değerlere dönüştürülür) kullanılır.

Meteorolojide tespit edilmiş ortalama değerler meteoroloji istasyonlarının ve uyduların ölçüm değerlerini ve ölçümlerini baz alır.

Tesis denetiminde kısmen eğimli yüzeye olan ışınımı ölçülür ve PR belirlenir. Bu esnada sıklıkla sıcaklığı dengelenmiş FV ışınım sensörleri kullanılır. Bir FV sensörünün spektral özelliklerinden dolayı piranometre kullanımına karşın daha düşük ışınımlar ölçülür. FV hücreli standart sensörlerde yıllık ışınım enerjisinin sapması %-2 ila %-5 arasındadır. Böylece bu PR tespiti, lokal ışınım tespitine rağmen, meteoroloji ölçüm değerleri üzerinden yapılan tespite kıyasla daha az doğrudur ve yüksek performans oranları vermeye meyillidir. Işınım tespiti için pahalı piranometreler kullanıldığında, düzenli olarak temizlenip ve kalibre edildiğinde daha doğru sonuçlar elde edilir. Arızalar bakımından tesisin denetimi için FV sensörleri, FV modüllerine benzer özelliklere sahip olduğu için oldukça uygundur. FV tesislerinin farklı lokasyonlarda teknik tesis kalitesini karşılaştırmak için birçok kayıp faktörü (gölgelenme kayıpları, iklimsel sıcaklık etkileri, AM sapmaları, yansıma) belirlenmeli ve gerekirse performans oranından hesaplanmalıdır.

Performans oranıyla PR çarptıktan sonra FV tesisinin yıllık enerji eldesi ortaya çıkar (kW_p başına kWh cinsinden):

$$e_{reel} = g_{pv} \times PR \times \left[\frac{m^2}{kW_p} \right] \quad (3.11)$$

Performans oram için sistemin kalitesi için %70 ile %85 talep edilebilir. İyi bir FV tesisi daha yüksek değerlere ulaşır.

Farklı tesislerin çalışma sonuçlarını karşılaştırmak için performans oranının yanında kW_p ve yıl başına özel verim kWh cinsinden belirlenir. Almanya'daki tipik spesifik verimler bölümünde gösterilmiştir. Tesisin tahmininde kullanılan diğer bir büyüklük de İngilizce Faktor Final Yield FY olarak adlandırılmış tam yük saatleridir. Tam yük saatleri belirli bir süre devam eden verimin jeneratör anma gücüne bölümünden elde edilir. Süre olarak gün, hafta, ay veya yıl kullanılabilir.

$$FY = \frac{E_{reel}}{pn_{pv}} \quad (3.12)$$

FV ada tesislerinin olduğu bölgede tam yük saatlerinin tespiti, söz konusu ay üzerinden ortalama gün olarak yapılıyor. Tüm yılın tam yük saatleri tespit edilirse, bunlar tesisin spesifik verimiyle aynı olur.

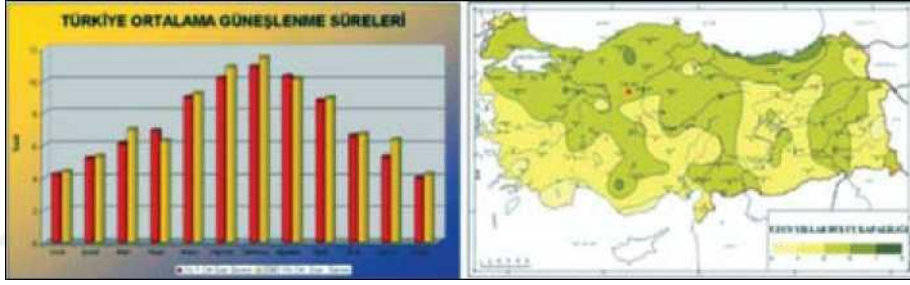
3.7 Uluslararası Standartlar

Avrupa'da CENELEC (Comité Européen de Normalisation Électrotechnique) standart organizasyonu AB komisyonu tarafından AB standartları alanında tek yetkili olarak kabul edilmiştir. CENELEC, Avrupa için bağlayıcı olan EN standartlarını yayınlıyor. CENELEC, IEC'ye ait yeni standart projeleri hazırlanma tarihiyle birlikte belirterek Uluslararası Elektrik Komisyonu'yla (IEC) işbirliği yapılmış olunur. Fotovoltaik alanı için CENELEC'te "CLC4/TC 82" adlı teknik komite mevcuttur.

Dünya çapındaki standartlar ise Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) ve Uluslararası Elektrik Komisyonu (IEC) tarafından yapılır. IEC içinde fotovoltaik alanından sorumlu kurul TC 82 'Solar Photovoltaic Energy Systems' adlı teknik komitedir. IEC çalışmasının sonuçları IEC standartları olarak yayınlanır. [1]

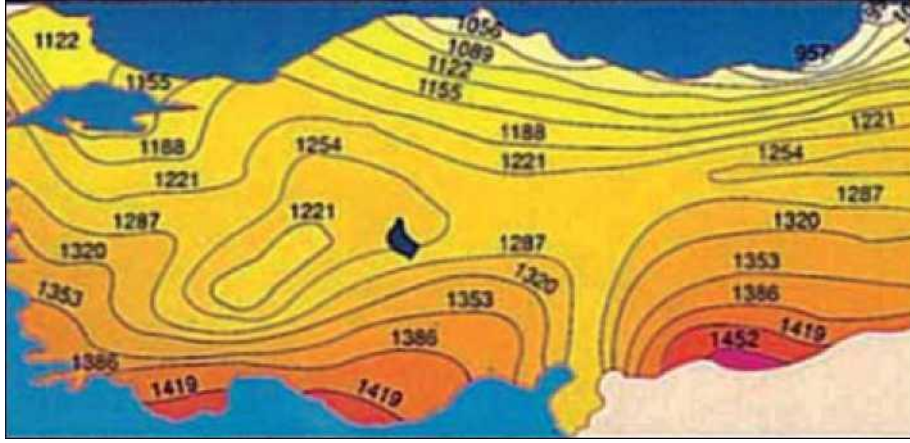
4 TÜRKİYE'DEKİ GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ [2]

Türkiye, coğrafi konumu ile güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre çok daha iyi durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden faydalanarak EİE tarafından yapılan araştırmalara göre Türkiye ortalama güneşlenme süresinin günlük toplam 7,2 saat, ışınım şiddetinin günlük toplam 3,6 kWh/m² olduğu saptanmıştır.



Şekil 4.1: Türkiye Ortalama Güneşlenme Süreleri

Türkiye güneş enerjisi potansiyeli açısından coğrafi olarak çok iyi bir konumda bulunmaktadır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi resmi raporlarına göre Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2.640 saat ve yıllık yatay güneş ışınım şiddetinin 1.311 kWh/m²'dir.



Şekil 4.2: Türkiye'nin güneş haritası (kWh/(m2.yıl))

Türkiye'nin güneşlenme süresi ve güneş enerji potansiyeli aylara göre aşağıdaki Tablo'da verilmiştir.

Çizelge 4. 1: Türkiye'nin aylık güneşlenme süresi ve güneş enerji potansiyeli

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
OCAK	4,45	51,75	103,0
ŞUBAT	5,44	63,27	115,0
MART	8,31	96,65	165,0
NİSAN	10,51	122,23	197,0
MAYIS	13,23	153,86	273,0
HAZİRAN	14,51	168,75	325,0
TEMMUZ	15,08	175,38	365,0
AĞUSTOS	13,62	158,40	343,0
EYLÜL	10,60	123,28	280,0
EKİM	7,73	89,90	214,0
KASIM	5,23	60,82	157,0
ARALIK	4,03	46,87	103,0
TOPLAM	112,74	1311	2640
ORTALAMA	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

Güney Doğu Anadolu Bölgesi Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Tabloda güneşlenme süresi değerleri ve güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı verilmiştir. [2]

Türkiye'nin gerçek potansiyelinin, bu değerlerden daha fazla olduğu daha sonra yapılan araştırmalar ile anlaşılmıştır. EİE ve DMI, 1992 yılından beri güneş enerjisi ölçüm istasyonları sayesinde daha sağlıklı ölçümler almaktadır . Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin devam eden çalışmalar sonucunda tablodaki verilerden % 20-25 daha fazla olması beklenmektedir.

4.1 Türkiye’de Güneş Enerjisi Üzerine Araştırma Yapan Üniversite, Kurum ve Kuruluşlar

Türkiye'deki üniversitelerde güneş enerjisine yönelik birçok araştırma geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu üniversiteler;

- Abant izzet baysal üniversitesi
- Afyon kocatepe üniversitesi
- Akdeniz üniversitesi
- Bahçeşehir üniversitesi
- Bilkent üniversitesi
- Dicle üniversitesi
- Ege üniversitesi
- Ulusal pv teknoloji platformu
- Fırat üniversitesi
- Gazi üniversitesi
- Hacettepe üniversitesi
- Haliç üniversitesi
- Harran üniversitesi
- İtü
- Karadeniz teknik üniversitesi
- Kocaeli üniversitesi
- Muğla üniversitesi
- Odtü
- Pamukkale üniversitesi
- Rize üniversitesi

- Sakarya üniversitesi
- Uludağ üniversitesi
- Yaşar üniversitesi

Üniversiteler haricinde devlet kuruluşlarında da çalışmalar yapılmaktadır. Bu devlet kurumları;

- Devlet meteoroloji işleri genel müdürlüğü
- Elektrik işleri etüt idaresi
- Tübitak

Ayrıca Türkiye’de bulunan özel sektör kuruluşlarında bu çalışmalarını destekleyerek geliştirmeye devam etmektedir.

5 ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

Bu bölümün hazırlanması için [4] ile [12] numara arasındaki kaynaklar incelenmiştir. Bu kaynakların ayrı ayrı incelenmesi sonucunda bu tez çalışması yapılmıştır. Ekserji ifadesi “kullanılabilir enerji” olarak 1871 yılında Maxwell tarafından kullanılmıştır ve ilerleyen zamanlarda Gibbs, Gouy’s, Stodola ve Kenan tarafından geliştirilmiş ve 1956 yılında ise Rant tarafından “ekserji” literatüre kazandırılmıştır.

Enerji kaynaklarını en verimli şekilde kullanabilmek için, termodinamiğin I ve II kanunundan oluşan analiz tekniklerini kullanarak “kullanılabilirlik” yani “Ekserji Analizi” ortaya çıkmıştır. Ekserji analizi enerji veriminde olumlu yönde olan değişiklikler sağladığı için yapılması gereken bir analiz türüdür.

5.1 Enerji Analizi (Birinci Kanun)

Enerji; kinetik, potansiyel, kimyasal, elektrik, ısı, manyetik, mekanik ve nükleer enerji gibi değişik biçimlerde olabilir. Tüm bunların toplamı sistemin toplam enerjisini oluşturur.

Termodinamiğin birinci kanunu, enerjinin termodinamik bir kavram olduğunu ve enerjinin korunumunu ve dönüşümünü ifade etmektedir. Bu kanuna göre enerji yok edilemez ve yoktan var edilemez, ancak başka bir enerji formuna dönüşebilir.[4]

Kapalı bir sistemde Termodinamiğin Birinci Yasası;

$$Q_{12} + W_{12} = \Delta U + \Delta PE + \Delta KE \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Yani, bir sistem termodinamik durum değişikliğine uğradığında enerji, ısı veya iş olarak sistem sınırlarını geçebilir; ısı ve iş pozitif veya negatif olabilir, sistemin sahip olduğu enerjideki net değişme tam olarak sistemin sınırlarını geçen net enerjiye eşittir.

Denklemden maddenin yapısına bağılı iç enerji(U), seçilen koordinat eksenlerindeki konumu ile alakalı potansiyel enerji (PE) ve hız ile ilgili kinetik enerji (KE) şeklinde ifade edilmiştir.

V hızındaki bir cisimin kinetik enerjisi;

$$KE = \frac{1}{2}mV^2 \quad (5.2)$$

Bir referans noktasına göre z yüksekliği bulunan m kütleli cismin potansiyel enerjisi;

$$PE = mgz \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Denklem (5,1) i en genel şekilde ifade edecek olursak;

$$Q_{12} + W_{12} = (U_2 - U_1) + mg(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) \quad (5.4)$$

Açık bir sistemde Termodinamiğin Birinci Yasası;

$$\sum_{giren} \dot{m} + \left(h + \frac{1}{2}V^2 + gz \right) - \sum_{çıkan} \dot{m} + \left(h + \frac{1}{2}V^2 + gz \right) + \dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5.5)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Bu eşitliğin sol tarafı kontrol hacmi içindeki enerji transferini, sağ taraf ise kontrol hacmi içindeki enerji miktarı değişimini ifade eder. Sürekli akışlı açık sistemlerde kontrol hacmi içerisindeki enerji miktarı değişimi sıfırdır. Sürekli akışlı açık sistemler için termodinamiğin birinci kanunu şu formu alır;

$$\sum_{giren} \dot{m} + \left(h + \frac{1}{2}V^2 + gz \right) - \sum_{çıkan} \dot{m} + \left(h + \frac{1}{2}V^2 + gz \right) + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \quad (5.6)$$

5.1.1 AC çıkış gücü

Kurulan güneş enerjisi santralinin bölgesel olarak yıllık toplam DC elektrik üretimini ek'teki excell dosyasından öğrenebiliriz.

$$Yıllık toplam AC çıkış gücü = (Yıllık toplam DC giriş gücü) \times 0,83 \times 1 \quad (5.7)$$

5.1.2 Performans oranı [12]

Sistemin toplam Performans oranı ; yıllık toplam AC çıkış gücünün,yıllık ışınım,güneş paneli alanı ve panel veriminin çarpımının oranına eşittir.

$$PO = \frac{\text{Yıllık toplam AC çıkış gücü}}{\text{Yıllık ışınım değeri} \times \text{Güneş paneli alanı} \times \text{panel verimi}} \quad (5.8)$$

Yıllık ışınım değeri: kWh/ m²-yıl

Güneş paneli alanı: m²

Panel verimi : %

5.2 Ekserji Analizi (İkinci Kanun)

Termodinamiğin ikinci yasası, enerjinin kalitesi bağlı olduğunu ve gerçek hal değişimlerinin enerji kalitesinin azalacağını ifade etmektedir. Ekserji analizi, enerjinin kalitesini veya iş yapma potansiyelini sayısal olarak ifade etmek için kullanılır ve enerjinin işe çevrilebilir potansiyeli olarak tanımlanır. Hal değişimi sırasında kaybedilen iş potansiyeli tersinmezlik veya ekserji kaybı olarak adlandırılır. Ekserji kayıpları ne kadar az ise üretilen iş o kadar fazladır. Sistemin performansı, ekserji kayıplarının en aza indirilmesiyle maksimum noktaya ulaşması beklenmektedir.[5] Ekserji verimleri gerçek sistem performansını maksimum performans ile karşılaştırıldığında, ekserji analizi ile termodinamik kayıpların yerleri, miktarları ve nedenleri bulunur. [6,7]

Özetle ekserji sistemin sahip olduğu kullanılabilir iş potansiyelini ,termodinamik yasaya aykırı olmadan sağlayabileceği maksimum işi ifade eder.

5.2.1 Ekserjiye sebep olan faktörler

5.2.1.1 İş transferine bağlı ekserji

Verilen bir enerji formunun eşdeğer işi, onun ekserjisinin bir ölçüsü olarak tanımlandığından, iş her durumda ekserjiye eşittir. Bundan dolayı ekserji transferi büyüklük ve doğrultu olarak iş transferi ile aynı büyüklük ve doğrultuya sahiptir [8].

$$W_{maks} = E_{güç} \quad (5.9)$$

5.2.1.2 Isı transferine bağlı ekserji

Kontrol yüzeyindeki ısı transferinin ekserjisi; çevrenin sıfır kalitedeki termal enerji rezervuarı olarak kullanılmasından elde edilebilen maksimum işe göre bulunur. Q_r birim zamandaki ısı transferi, T_r ısı transferinin meydana geldiği kontrol yüzeyindeki sıcaklık olarak seçildiğinde termal enerjiden maksimum işe dönüşüm hızı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{E}_Q = \dot{Q}_r \left[1 - \left(\frac{T_0}{T_r} \right) \right] \quad (5.10)$$

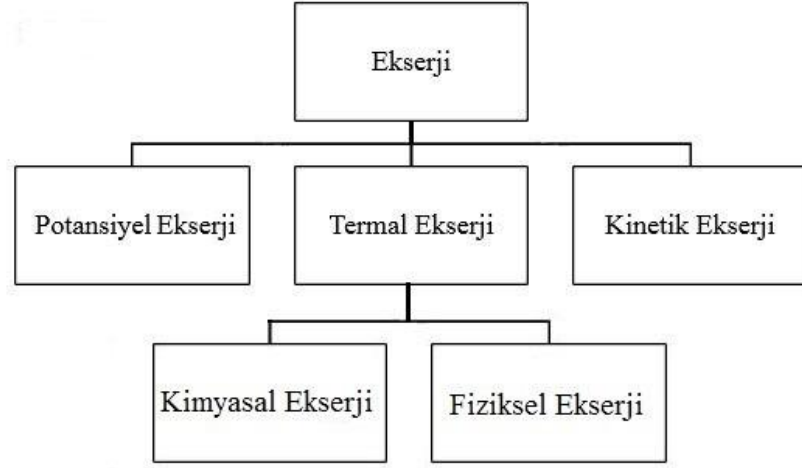
$$t = 1 - \left(\frac{T_0}{T_r} \right) \quad (5.11)$$

Burada t 'ye "boyutsuz ekserjik sıcaklık" denir ve T_0 sıcaklığındaki çevrenin termal enerji rezervuarı olarak kullanıldığı özel durum Carnot verimliliğine eşittir. Birim zamandaki ısı transferine bağlı ekserjiye "termal ekserji akısı" denir ve açık sistem analizinde E_Q ile gösterilir. Eşitlik (5.10) 'deki Q_r 'ın işareti, ısı transferi sisteme yapıldığı zaman pozitifdir. Yani, ısı transferi çevre sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta meydana gelmiştir. Bu yüzden de t pozitifdir ve kontrol bölgesinde yapılan ısı transferi kontrol bölgesinin ekserjisini artırmaktadır.

5.2.1.3 Maddenin Kararlı Akışına Bağlı Ekserji

Kararlı akış halindeki bir maddenin ekserjisi, sadece çevreyle etkileşebilen akış sırasında akışın prosesler vasıtasıyla başlangıç durumundan çevrenin ölü durumuna getirildiği zaman elde edilebilen maksimum iş miktarına eşittir.[9]

5.2.2 Ekserjinin bileşenleri



Şekil 5. 1: Sistem Sınıırından Girip Çıkan Madde Akışının Ekserji Bileşenleri
Nükleer, magnetizma ve elektrik etkileri ile yüzey geriliminin ihmal edildiği durumda \dot{E} ; ekserji toplamı, bu dört bileşenin toplamı şeklinde yazılabilir;

$$\dot{E} = \dot{E}_k + \dot{E}_p + \dot{E}_f + \dot{E}_{kim} \quad (5.12)$$

5.2.2.1 Kinetik ekserji

Düzenli bir enerji formudur, tamamen işe dönüştürülebilir. Kinetik enerji, çevresel referans düzeyine göre hesaplanırsa kinetik ekserji akımına eşit olur.

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 \quad (5.13)$$

\dot{m} Akışkanın kütleli debisi ve V akış halinde akışkanın kütle hızıdır.

5.2.2.2 Potansiyel ekserji

Potansiyel enerji, çevresel referans düzeyine göre hesaplanırsa potansiyel ekserji akımına eşit olur. Tamamen işe dönüştürülebilir.

$$\dot{E}_p = \dot{m}gz_0 \quad (5.14)$$

\dot{m} Akış halinde ki akışkanın kütsel debisi, g yer çekimi ivmesi, z_0 deniz seviyesinden olan kot farkını temsil etmektedir.

5.2.2.3 Fiziksel ekserji

Akış halindeki bir madde, tersinir fiziksel prosesler ile ilk koşullarından, “ P_0, T_0 ” ile belirli çevre koşullarına getirildiğinde elde edilebilen maksimum iş miktarına eşittir. Moran and Sciubba’ya göre, “ h ” ve “ s ” terimleri entalpi ve entropi olmak üzere birim kütle için fiziksel ekserji;

$$E_f = [(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (5.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Buradaki $h-h_0$ terimi değişken özgül ısılar ile entalpiyi ifade eder;

$$h_{T_2} - h_{T_1} = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT \quad (5.16)$$

Sabit özgül ısılar ile entalpi;

$$h_{T_2} - h_{T_1} = C_p(T_2 - T_1) \quad (5.17)$$

$s - s_0$ terimi ise değişken özgül ısılar ile;

$$S_{(T,P)} - S_{(T_0,P_0)} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p(T)}{T} dT - R \ln \frac{P}{P_0} \quad (5.18)$$

$$S_{(T,P)} - S_{(T_0,P_0)} = \int_{T_0}^T \frac{C_v(T)}{T} dT - R \ln \frac{V}{V_0} \quad (5.19)$$

şeklinde ifade edilebilir.[10]

ideal gaz kabul edilen, sabit basınçta özgül ısıya sahip hava ve yanmış gazların fiziksel ekserjisi, birim kütle için;

$$\dot{E}_f = C_{(T,P)} \left[T - T_0 - T \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] + RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (5.20)$$

denklemden elde edilebilir. Burada Cp sabit basınçta özgül ısı, “R” evrensel gaz sabiti “T” sıcaklık ve “P” basıncı temsil etmektedir.[6]

5.2.2.4 Kimyasal ekserji

Çevre ile madde ve ısı transferi içeren proseslerin, çevresel durumdan ölü duruma getirildiğinde elde edilebilecek en fazla iş miktarına “kimyasal ekserji” denir [10]. Gündüz’e göre; “ T_0, P_0 ” konumundaki madde, “ T_0, P_0 ” şartlarındaki çevrenin bileşenleri ile dengeye geldiğinde, elde edilen en fazla iş miktarına “kimyasal ekserji” denir.

Ahredts’e ve Szargut et al.’a göre; standart kimyasal ekserjiler, çevresel sıcaklık $T_0 = 298$ K ve basınç $P_0 = 1$ atm standart değerleri esas alınarak hesaplanan ekserjidir. Kaynaklarda iki referans ekserji çevresi vardır. Bunlar gaz fazındaki kimyasal bileşiklerin, atmosfer bileşenlerine yakın olduğu Model 1 ve ekserji referans çevresinin kimyasal bileşiminin, doğal çevre bileşimine yakın olduğu Model 2 olarak bilinir. Çevre havasındaki gaz için standart kimyasal ekserjiiyi veren denklem aşağıdaki gibi verilebilir [10].

$$E_{kim} = -\bar{R}T \ln \left(\frac{y_k^e P_0}{P_0} \right) \quad (5.21)$$

Çevre havasındaki gaz için standart kimyasal ekserji hesabı aşağıdaki gibi verilebilir. Burada, “ T_0 ” ve “ P_0 ” çevre koşulları sıcaklığı ve basıncı, “k” gaz çeşidi, “ y_k^e ” k gazının çevre içindeki mol kesridir. Bu formülden,

$$E_{kim} = -\bar{R}T \ln y_k^e \quad (5.22)$$

$$E_{kim} = -\bar{R}T \ln \left(\frac{1}{y_k^e} \right) \quad (5.23)$$

denklemler elde edilebilir [10].

5.2.2.5 Ekserjitik verim

Köktürk ve Yılbaşı tarafından yapılan analizlerde; enerji ve ekserji değerleri, bir referans çevreye göre hesaplanmaktadır. Bu referans çevre, normal şartlar altında 25 °C sıcaklıkta ve 1 atm basınçtır.

Kullanılan referans çevresinin entalpisi ise, o çevrenin ekserjisine eşittir ve bu değer sıfırdır [11].

$$\psi = \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{E}_{yakıt}} \quad (5.24)$$

Bir sistemde verimin yüksek olması için, kayıpların en aza indirilmesi gerekir. Eğer içten yanmalı bir motorda yanma havası çevre şartlarında motora giriyorsa ekserjisi sıfırdır ve bu yüzden giren ekserji olarak sadece yakıt ekserjisi yazılır. Çıkan ekserji ise, yanma sonucu oluşan ekserji ve yanma ürünlerinin ekserjisidir [10].

5.2.3 Kapalı sistemler için ekserji analizi

Sadece çevre ile ısı alış-verişine müsaade edilen, hareketsiz bir kapalı sistem için termodinamiğin ikinci kanunu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_{üretim} = (S_2 - S_1)_{sistem} + \frac{Q_{çevre}}{T_{çevre}} \quad (5.25)$$

Burada $T_{çevre}=T_0$, $Q_{çevre}=-Q$ olup, $S_{üretim}$ hal değişimi sırasındaki toplam entropi üretimi, başka bir deyişle toplam entropi değişimidir. Bu iki eşitlik arasında ısı geçişi terimi yok edilir ve W çözümlerse,

$$W = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) - T_0S_{\text{üretim}} \quad (5.26)$$

elde edilir. W , hal değişimi sırasında gerçekleşen toplam iştir. Hal değişimi sırasında sistemin hacmi değişirse, bu işin bir bölümü çevreye karşı (veya tarafından) yapılacaktır. Bu durumda gerçek işle çevre işinin arasındaki fark olan yararlı iş aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$W_y = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2) - T_0S_{\text{üretim}} \quad (5.27)$$

W_y , 1-2 hal değişimi sırasında kapalı sistem tarafından (veya üzerinde) yapılan yararlı iş olup, yukarıdaki eşitlikte ilk ve son hallerdeki sistem özellikleri, çevre özellikleri (P_0, T_0) ve hal değişimi sırasında üretilen entropiyle ifade edilmiştir [11].

Sistemle çevre arasında ısı alışverişinin tersinir olarak gerçekleştiği ve sistem içinde sürtünme ve benzeri tersinmezliklerin olmadığı durumda; entropi üretimi yoktur, bu nedenle $S_{\text{üretim}}=0$ 'dır. Bu hal değişimi sırasında yapılan yararlı iş, tersinir iştir ve (4.25) numaralı eşitlikten;

$$W_{tr} = (U_1 - U_2) - T_0(S_1 - S_2) + P_0(V_1 - V_2) \quad (5.28)$$

elde edilir. Bu denklem, çevresiyle ısı alışverişi olan kapalı sistemin 1 ve 2 halleri arasındaki hal değişimi sırasında yapabileceği en çok yararlı işi vermektedir. Kapalı sistem kullanılabilirliği \emptyset ise (4.26) numaralı eşitlikte 1 halini verilen hal (indissiz) ile 2 halini de ölü hal (0 indisi) ile değiştirerek aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\emptyset = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + P_0(V - V_0) \quad (5.29)$$

Bu eşitliklerden, kapalı sistemin ölü haldeki ($u=u_0, s=s_0, v=v_0$) kullanılabilirliği sıfırdır. Başka bir deyişle, çevresiyle dengede bulunan bir sistemden iş elde etmek olanaksızdır [11].

1 ve 2 halleri arasındaki bir hal değişimi için tersinir iş, kullanılabilirlikle \emptyset aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$W_{tr} = \emptyset_1 - \emptyset_2 \quad (5.30)$$

Yani, kapalı bir sistemle ilgili tersinir iş, kapalı sistemin kullanılabilirliğindeki azalma (veya sıkıştırma durumunda artma) olmaktadır. Bunun için (5.27) numaralı

eşitliği ilk ve son haller için yazıp, bulunan iki eşitliğin farkını alarak göstermek olasıdır. Son halin ölü olması durumunda ($\Phi_2=0$), kapalı sistemin ilk haldeki kullanılabilirliği (Φ_1) ve hal değişimi sırasındaki tersinir iş (W_{tr}) eşit olurlar. Kullanılabilirliğin hal ile tersinir işin ise hal değişimi ile ilişkili olduğu vurgulanmalıdır.

Kapalı bir sistemin hal değişimiyle ilişkili tersinmezlik aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$I = W_{tr} - W_y = T_0 S_{\text{üretim}} \quad (5.31)$$

Güneş paneli sıcaklığı:[12]

$$T_{\text{Modül}} = \text{Ortalama çevre sıcaklığı} + (NOCT - 20) \times \frac{\text{Ortalama günlük ışınım değeri}}{800} \quad (5.32)$$

Ortalama çevre sıcaklığı: °C

Noct: °C

Ortalama Günlük ışınım değeri: W/ m²-gün

5.2.4 Ekserji verimi[12]

Ekserji verimi Çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı ile bulunabilir.

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{(\text{çıkan})}}{Ex_{(\text{giren})}} \quad (5.33)$$

5.2.4.1 Giren ekserji

$$Ex_{(\text{giren})} = AG \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}} \right)^4 \right] \quad (5.34)$$

A: Güneş paneli alanı (m²)

G: Ortalama Günlük ışınım değeri (W/ m²-gün)

T_{çevre}: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

T_{güneş}: Güneş sıcaklığı 6000 K

5.2.4.2 Çıkan Ekserji

$$Ex_{(çıkan)} = Ex_{termal} + Ex_{elektrik} \quad (5.35)$$

$$Ex_{termal} = Q \left[1 - \frac{T_{çevre}}{T_{modül}} \right] \quad (5.36)$$

T_{çevre}: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

T_{modül}: Güneş paneli sıcaklığı (K)

$$Q = UA(T_{modül} - T_{çevre}) \quad (5.37)$$

$$U = h_{konv} + h_{rad} \quad (5.38)$$

$$h_{konv} = 2.8 + 3V_W \quad (5.39)$$

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(T_{gökyüzü} + T_{modül})(T_{gökyüzü}^2 + T_{modül}^2) \quad (5.40)$$

$$T_{gökyüzü} = T_{çevre} - 6 \quad (5.41)$$

V_W: Rüzgar hızı (m/s)

stefan Boltzmann sabiti (σ): $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Panel emisivitesi (ϵ): 0.89

T_{gökyüzü}: Gökyüzü sıcaklığı (K)

T_{çevre}: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

T_{modül}: Güneş paneli sıcaklığı (K)

$$Ex_{elektrik} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (5.48)$$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5.49)$$

Kullandığımız panele göre;

V_{oc} = Açık devre gerilimi (35,1 V)

I_{sc} = Kısa devre akımı (7,05 A)

FF= fill factor (güç dönüşüm faktörü)

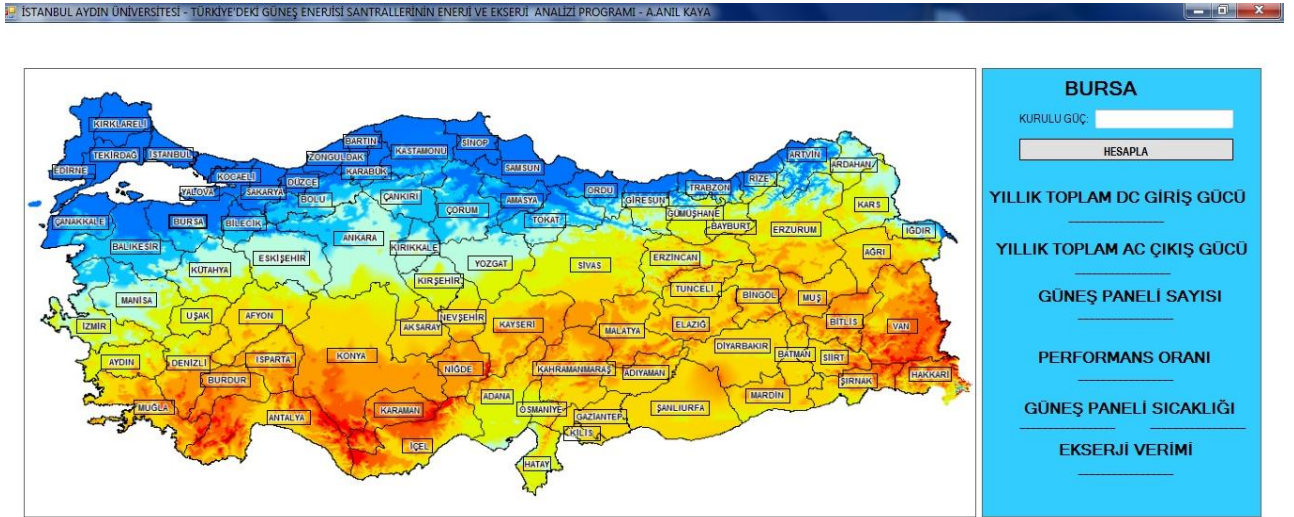
V_m = maksimum güç için gerilim (28 V)

I_m =maksimum güç için akım (6,54 A)

$$Ex_{çıkan} = Ex_{ternal} + Ex_{elektrik}$$

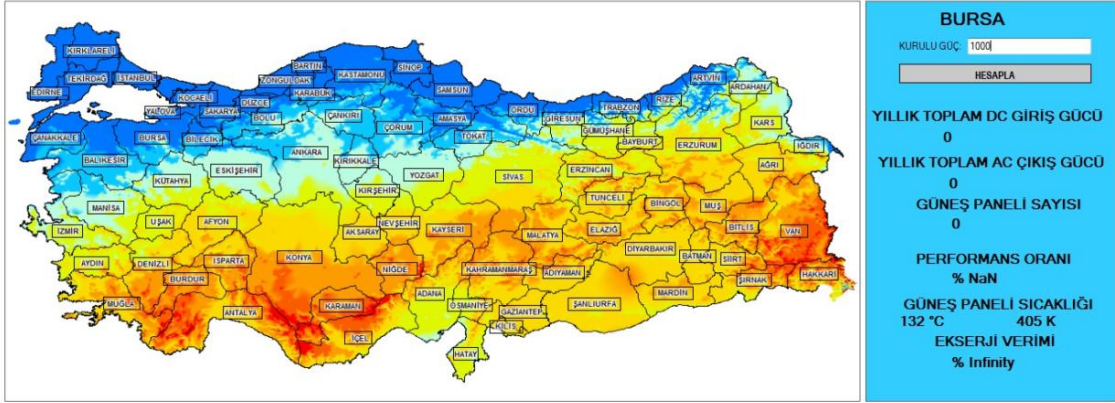
(5.50)[12]

5.3 Türkiye’deki Güneş Enerjisi Santrallerinin Enerji Ve Ekserji Analizi Programının Çalışma Prensipleri



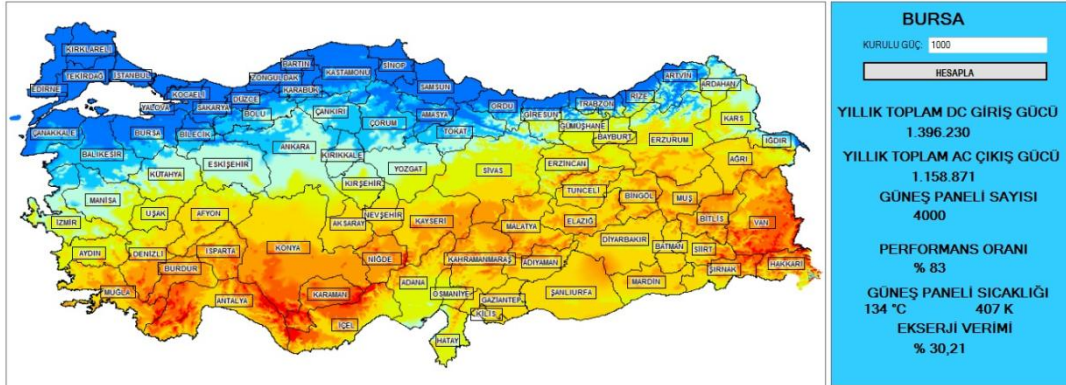
Şekil 5. 2: Türkiye’deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının

Yapmış olduğumuz yazılımda, tüm illerin yıllık ortalama güneş ışınım değerleri, ortalama sıcaklıkları, rüzgar hızları ve panel boyutları,panel açık devre gerilimi,panel kısa devre akımı, panelin maksimum güç için gerilimi, panelin maksimum güç için akımı yazılımın kütüphanesine kaydedilmiştir. Hangi ilin değerlerini hesaplamak istiyorsanız o ilin üzerine Mouse yardımıyla tıklayarak seçebilirsiniz.



Şekil 5. 3: Türkiye’deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının seçilen ile göre kurulu gücün girilmesi

Hesaplanacak il seçildikten sonra santralin kurulu gücü girilir ve hesapla butonuna basılır. Böylelikle yazılımın kütüphanesine girilmiş olan değerlerle gerekli işlemler yapılır. Bu işlemleri bir sonraki enerji ve ekserji analizi bölümünde anlatmış olacağım.



Şekil 5. 4: Türkiye’deki güneş enerjisi santrallerinin enerji ve ekserji analizi programının seçilen ile göre kurulu gücün girilmesinden sonraki analiz sonuçları

Seçilen ilin kurulu gücü girildikten sonra hesaplamasını yazılımın kütüphanesindeki bilgiler kullanılarak işlemleri yapılır ve analiz sonuçlarını size bildirir.

ÖRNEK UYGULAMA

Örnek olarak aldığımız Bursa ilinin ortalama çevre sıcaklığını 15 °C, Kullandığımız panelin noct değerini 45 °C ve ortalama günlük ışınım değerini 3825 W/ m²-gün olarak aldığımızda ;

Güneş paneli sıcaklığı:[12]

$$T_{Modül} = \text{Ortalama çevre sıcaklığı} + (NOCT - 20) \times \frac{\text{Ortalama günlük ışınım değeri}}{800} \quad (5.32)$$

Ortalama çevre sıcaklığı: °C

Noct: °C

Ortalama Günlük ışınım değeri: W/ m²-gün

$$T_{modül} = 15 \text{ °C} + (45-20) \times \frac{3825 \text{ W/ m}^2\text{-gün}}{800}$$

$$T_{modül} = 134 \text{ °C} + 273 = 407 \text{ K}$$

5.3.1 Ekserji verimi[12]

Ekserji verimi Çıkan ekserjinin giren ekserjiye oranı ile bulunabilir.

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{(çıkan)}}{Ex_{(giren)}} \quad (5.33)$$

5.3.1.1 Giren ekserji

$$Ex_{(giren)} = AG \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{güneş}}} \right)^4 \right] \quad (5.34)$$

A: Güneş paneli alanı (m²)

G: Ortalama Günlük ışınım değeri (W/ m²-gün)

T_{çevre}: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

T_{güneş}: Güneş sıcaklığı 6000 K

Örnek aldığımız Bursa ilinin ortalama günlük ışınım değeri (G) 3825 W/ m²-gün, ortalama çevre sıcaklığı 15°C +273 = 288 K , ve 1 MW kurulu güç için 250 Watt'lık panellerden 4000 adet gerektiğinden ve 1 adet güneş panelinin alanı 1,67 m² olduğuna göre 4000 x 1,67 = 6680 m² toplam gereken güneş paneli alanı olarak alabiliriz.

$$E_x (giren) = 6680 \times 3825 \times \left[1 - \left(\frac{4}{3} \right) \times \left(\frac{288}{6000} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \times \left(\frac{288}{6000} \right)^4 \right]$$

$$E_x (giren) = 23915781$$

5.3.1.2 Çıkan ekserji

$$Ex_{(çıkan)} = Ex_{\text{termal}} + Ex_{\text{elektrik}} \quad (5.35)$$

$$Ex_{\text{termal}} = Q \left[1 - \frac{T_{\text{çevre}}}{T_{\text{modül}}} \right] \quad (5.36)$$

T_{çevre}: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

T_{modül}: Güneş paneli sıcaklığı (K)

$$Q = UA(T_{\text{modül}} - T_{\text{çevre}}) \quad (5.37)$$

$$U = h_{\text{konv}} + h_{\text{rad}} \quad (5.38)$$

$$h_{\text{konv}} = 2.8 + 3V_W \quad (5.39)$$

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{gökyüzü}} + T_{\text{modül}})(T_{\text{gökyüzü}}^2 + T_{\text{modül}}^2) \quad (5.40)$$

$$T_{\text{gökyüzü}} = T_{\text{çevre}} - 6 \quad (5.41)$$

V_W : Rüzgar hızı (m/s)

stefan Boltzmann sabiti (σ) : $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Panel emisivitesi (ε): 0.89

$T_{\text{gökyüzü}}$: Gökyüzü sıcaklığı (K)

$T_{\text{çevre}}$: Ortalama çevre sıcaklığı (K)

$T_{\text{modül}}$: Güneş paneli sıcaklığı (K)

V_W : Rüzgar hızı ; 5 (m/s)

stefan Boltzmann sabiti (σ) : $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Panel emisivitesi (ε): 0.89

T_{sky} : Gökyüzü sıcaklığı (K) Bursa ili için 282 K

T_a : Ortalama çevre sıcaklığı (K) Bursa ili için 288 K

T_m : Güneş paneli sıcaklığı (K) Bursa ili için 407

$$T_{\text{gökyüzü}} = T_{\text{çevre}} - 6 \quad (5.42)$$

$$T_{\text{gökyüzü}} = 288 - 6 = 282 \text{ K}$$

$$U = h_{\text{konv}} + h_{\text{rad}} \quad (5.43)$$

$$h_{konv} = 2.8 + 3V_W \quad (5.44)$$

$$h_{konv} = 2.8 + (3 \times 5)$$

$$h_{konv} = 17,8$$

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{gökyüzü} + T_m) (T_{gökyüzü}^2 + T_m^2) \quad (5.45)$$

$$h_{rad} = 0,89 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} K \times (282 + 407) \times (282^2 + 407^2)$$

$$h_{rad} = 8,52$$

$$U = 17,8 + 8,52 = 26,32$$

$$Q = U \times A \times (T_{modül} + T_{çevre}) \quad (5.46)$$

$$Q = 26,32 \times 6680 \times (407 - 288)$$

$$Q = 20922294$$

$$Ex_{termal} = Q \left[1 - \frac{T_{çevre}}{T_{modül}} \right] \quad (5.47)$$

$$Ex_{termal} = 20922294 \left[1 - \left(\frac{288}{407} \right) \right]$$

$$Ex_{termal} = 6117329$$

$$Ex_{elektrik} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (5.48)$$

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (5.49)$$

Kullandığımız panele göre;

V_{oc} = Açık devre gerilimi (35,1 V)

I_{sc} = Kısa devre akımı (7,05 A)

FF= fill factor (güç dönüşüm faktörü)

V_m = maksimum güç için gerilim (28 V)

I_m =maksimum güç için akım (6,54 A)

$$FF = \frac{28 \times 6,54}{35,1 \times 7,05} = 0,74$$

$$Ex_{elektrik} = 35,1 \times 7,05 \times 0,74 = 183,12$$

$$Ex_{çıkan} = \text{External} + \text{Exelektrik}$$

(5.50)[12]

$$Ex_{çıkan} = 6117329 + 183,12$$

$$Ex_{çıkan} = 6117512$$

$$\eta_{ex} = \frac{6117512}{23915781} = 0,25 = \%25$$

5.4 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Verilerinin Analizi

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nün hazırladığı Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

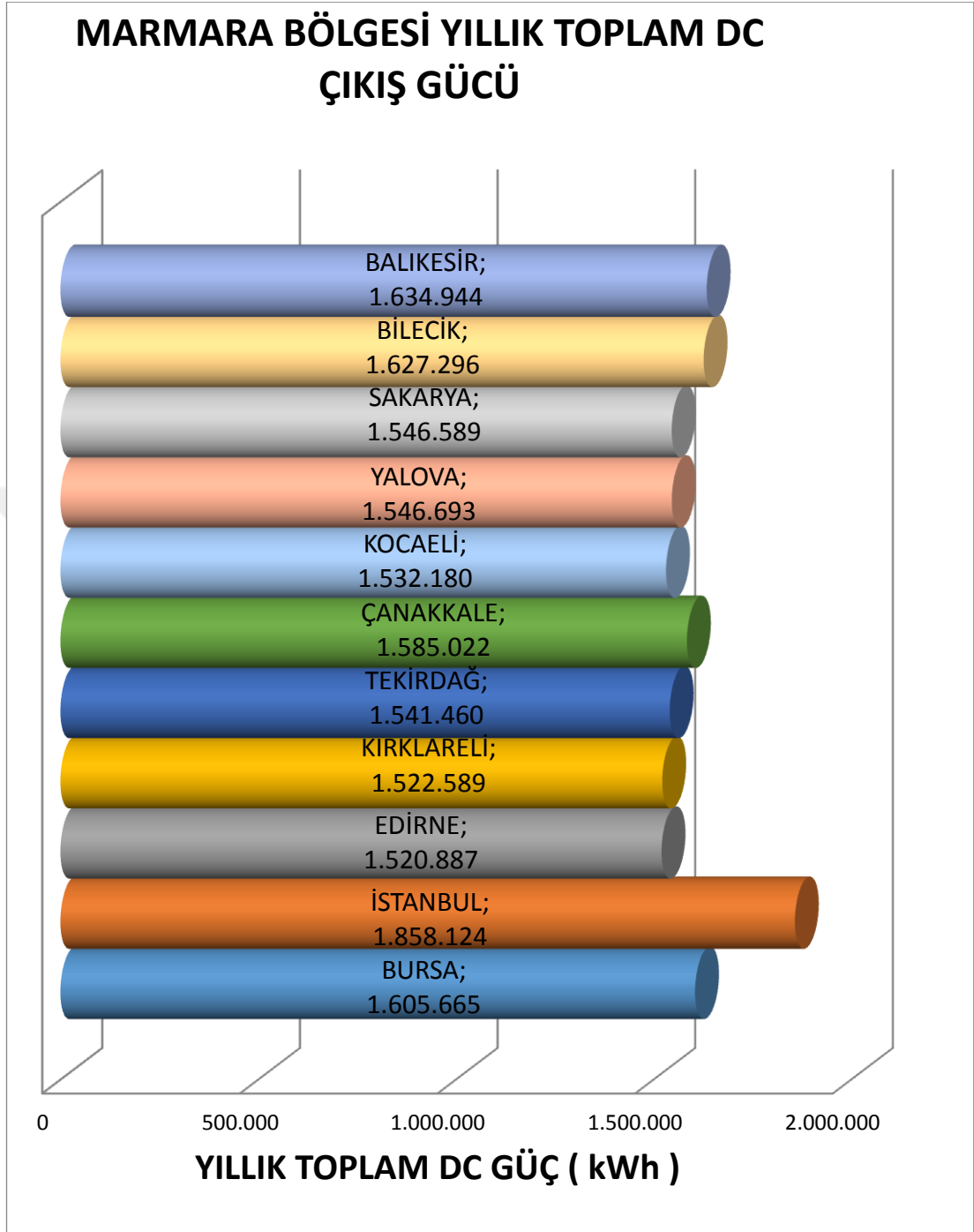


Şekil 5. 5: Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası

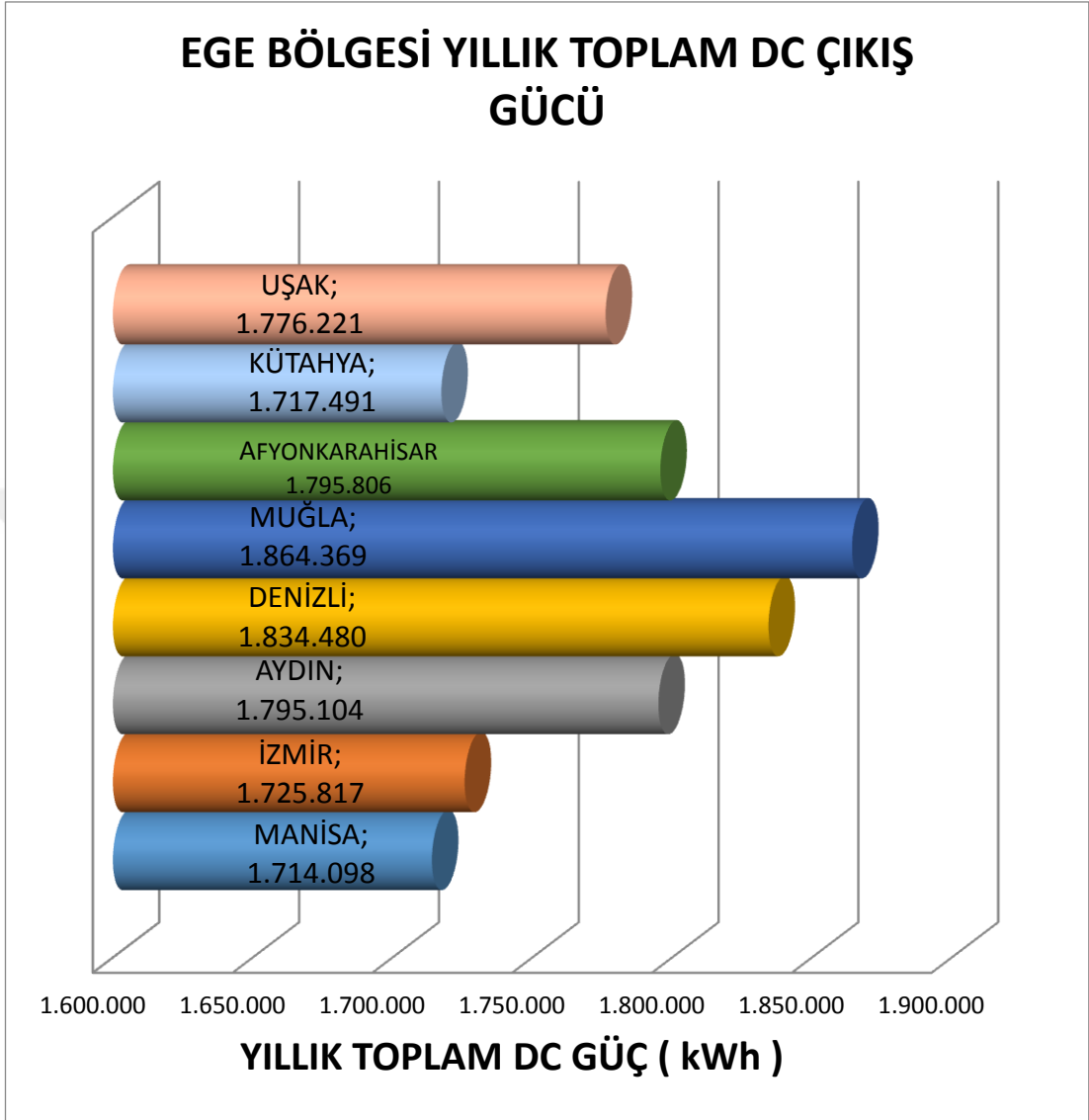
Bu konuyla ilgili EİE'den alınan verilere göre yapmış olduğum çalışma, Türkiye'deki illerin global radyasyon değerlerini kullanarak 1 MW güneş enerjisi santrali kurulumundaki yıllık toplam üretilen enerjinin karşılaştırılması aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



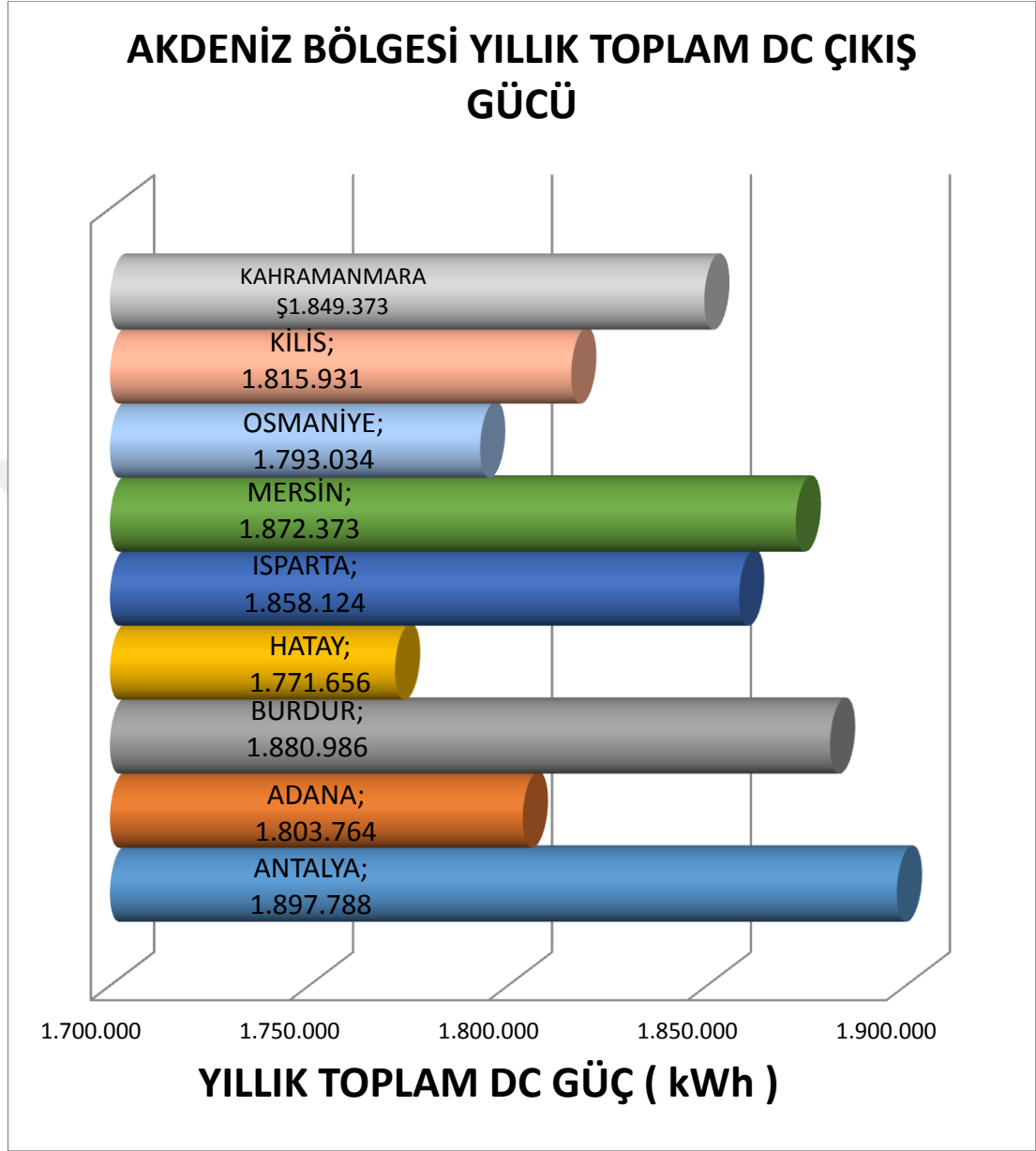
Çizelge 5. 1: Marmara Bölgesi'nin Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



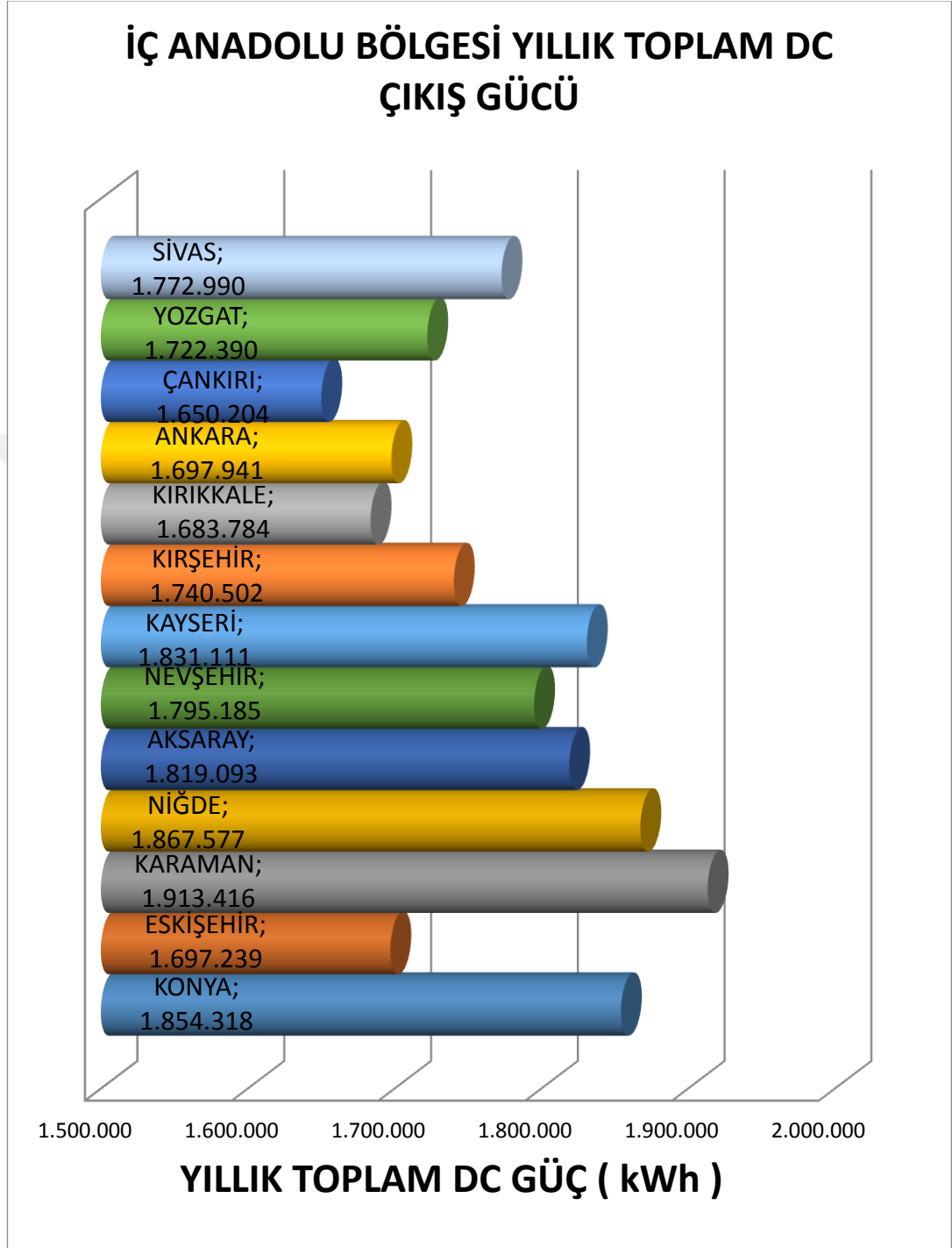
Çizelge 5. 2: Ege Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



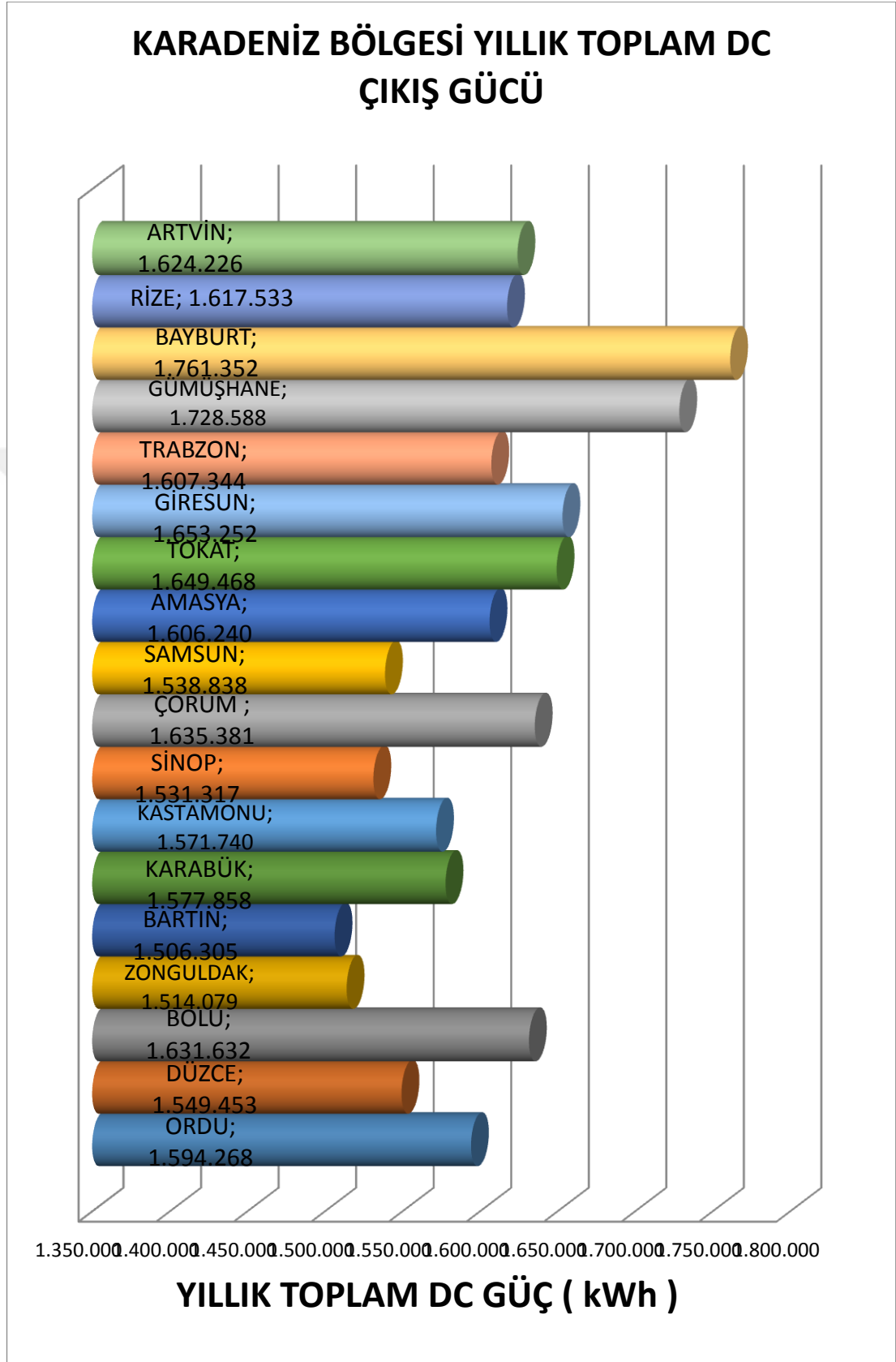
Çizelge 5. 3: Akdeniz Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



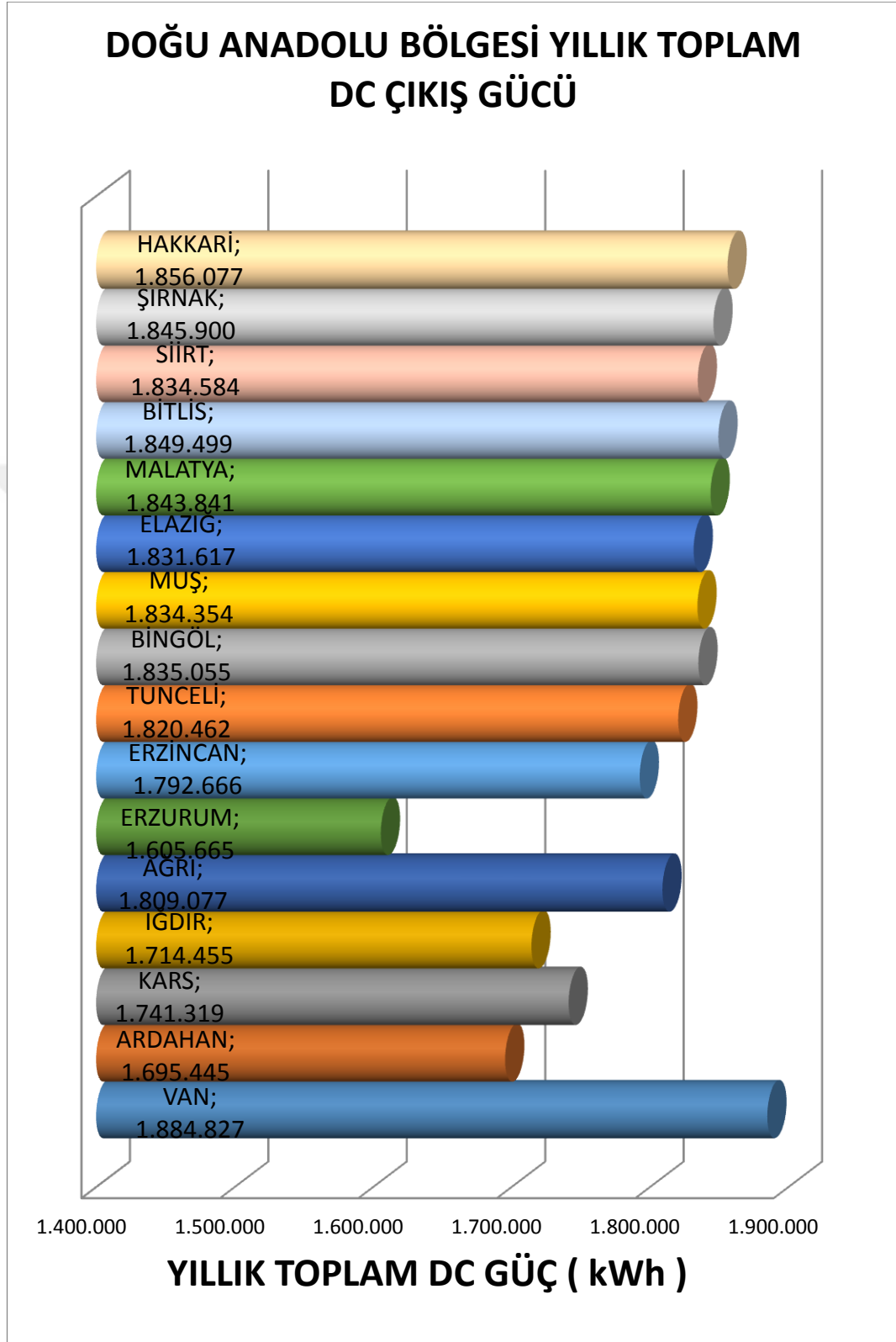
Çizelge 5. 4: İç Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



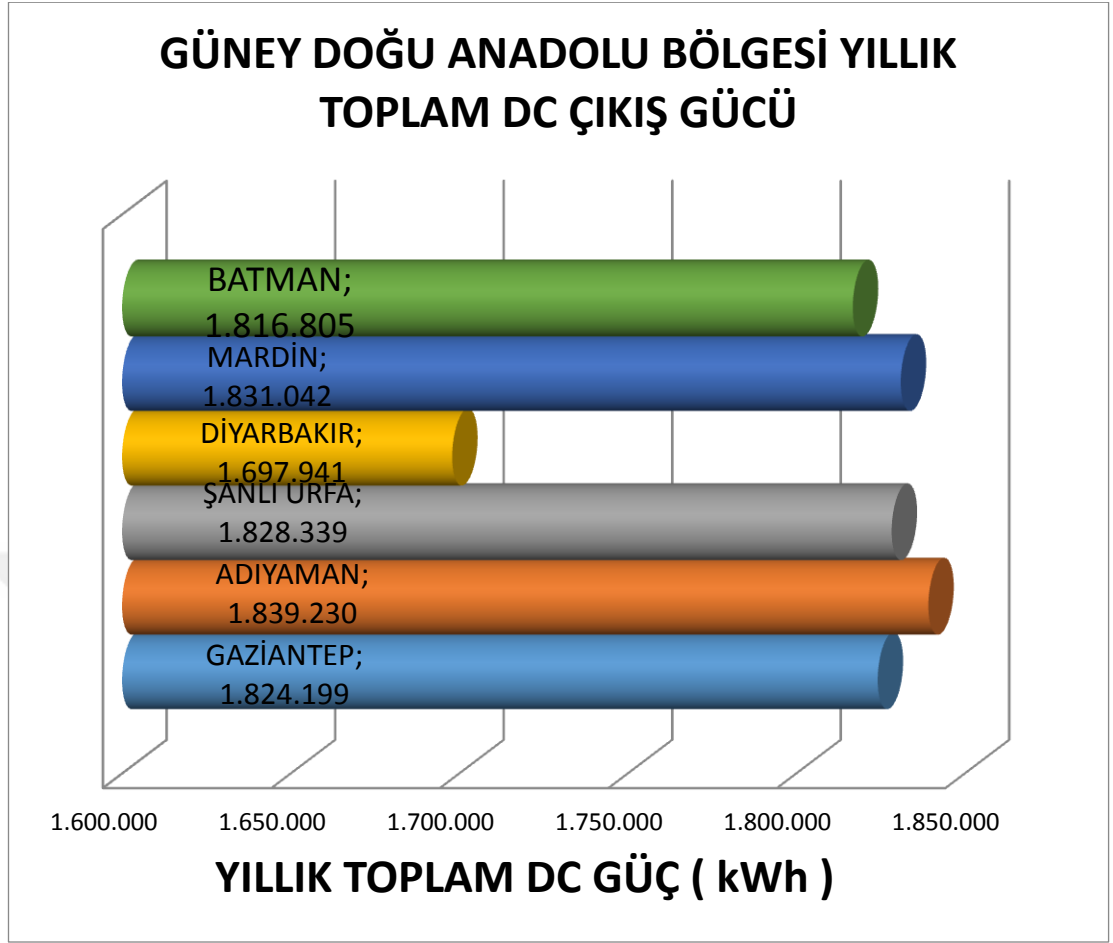
Çizelge 5. 5: Karadeniz Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



Çizelge 5. 6: Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



Çizelge 5. 7: Güney Doğu Anadolu Bölgesi Yıllık Toplam Dc Çıkış Gücü



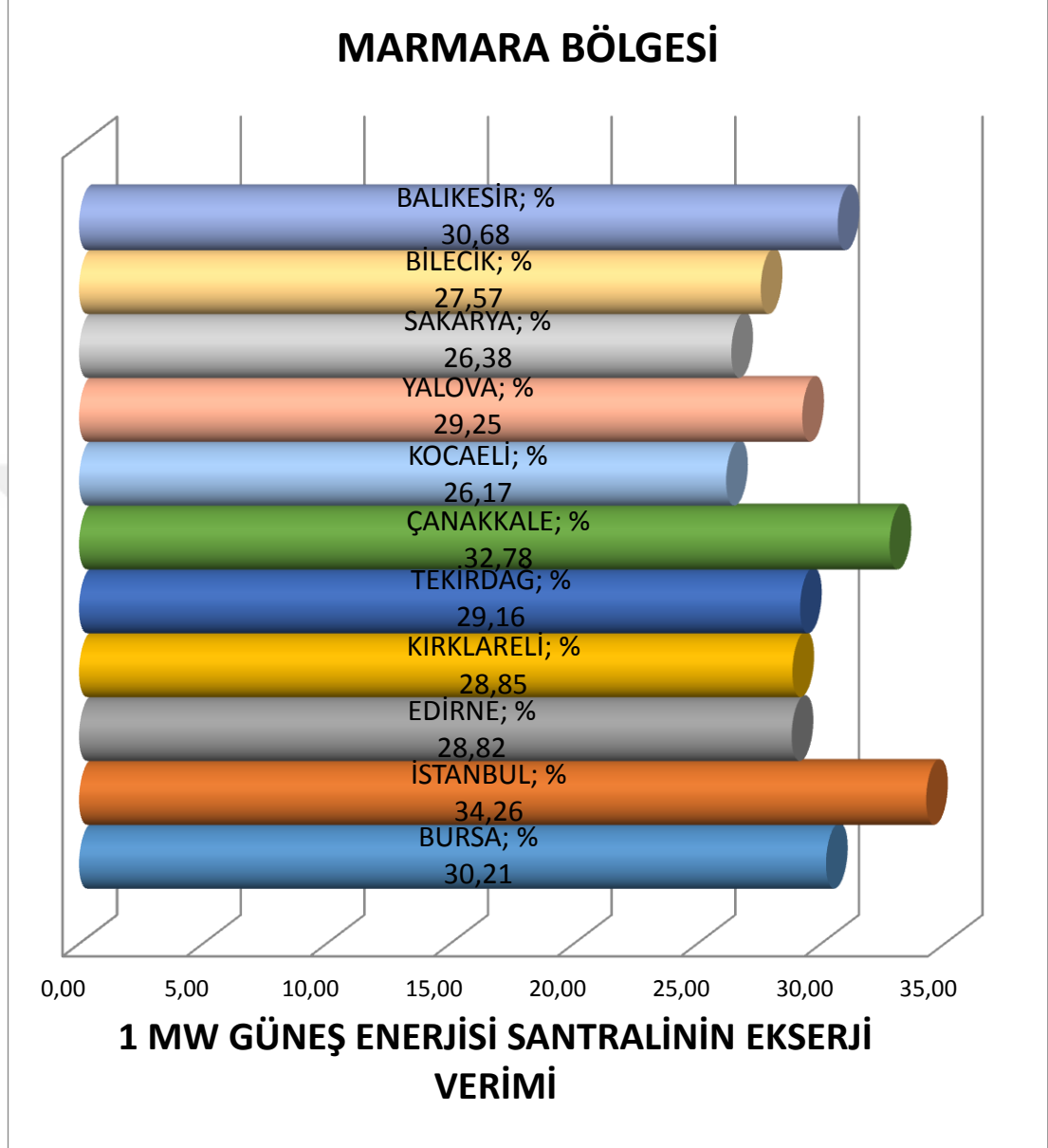
Çizelge 5. 8: Türkiye’deki 7 bölgenin kWh/m2- yıl olarak karşılaştırılması[3]

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m2-yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (saat/yıl)
G.DOĞU ANADOLU	1460	2993
AKDENİZ	1390	2956
DOĞU ANADOLU	1365	2664
İÇ ANADOLU	1314	2628
EGE	1304	2738
MARMARA	1168	2409
KARADENİZ	1120	1971

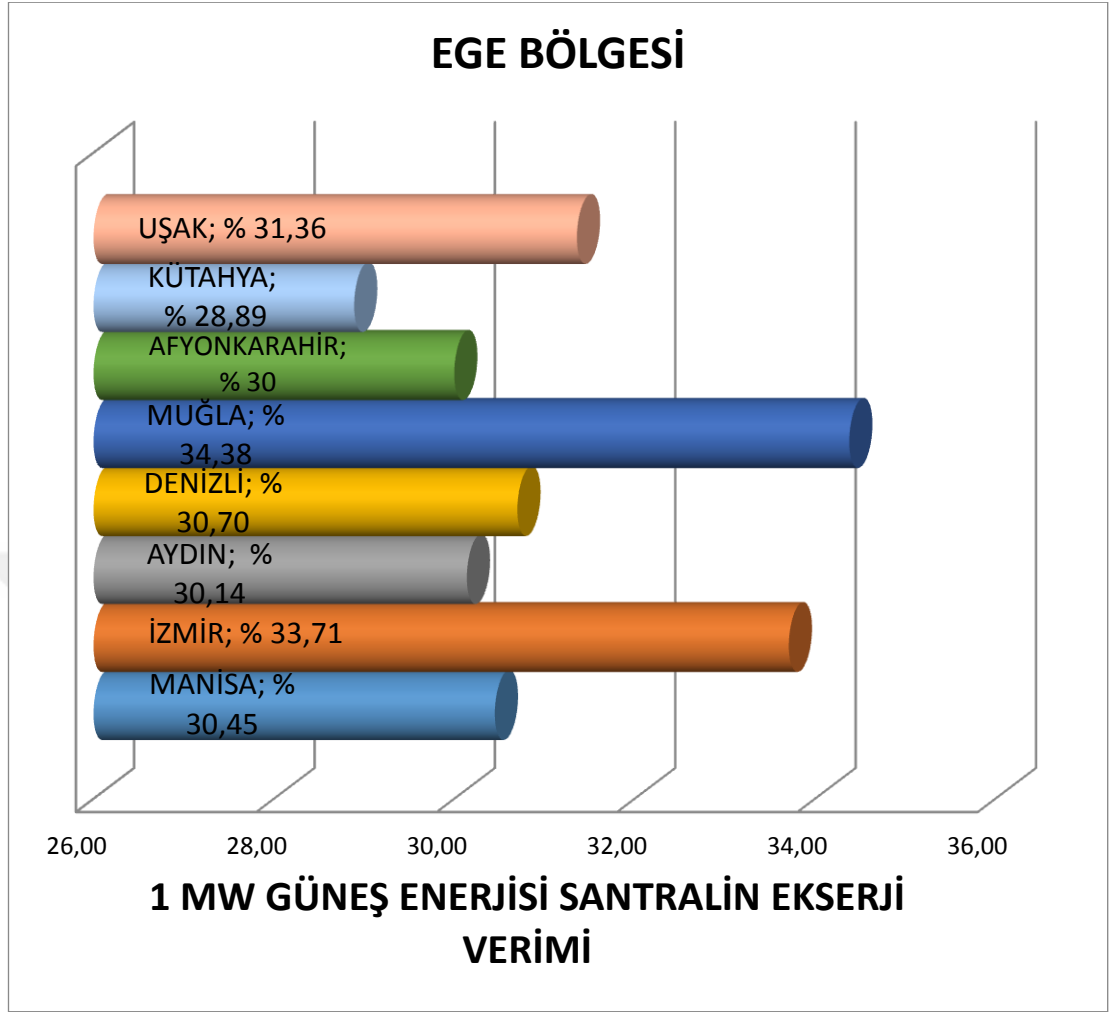
Görüldüğü gibi Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m²- yıl olarak karşılaştırılması yapıldığında ilk. Sırada yer alan bölgemiz 1460 kWh/m²- yıl ile Güney Doğu Anadolu, İkinci sırada 1390 kWh/m²- yıl ile Akdeniz, Üçüncü sırada 1365 kWh/m²- yıl ile Doğu Anadolu, dördüncü sırada 1314 kWh/m²- yıl ile İç Anadolu, beşinci sırada 1304 kWh/m²- yıl ile Ege, altıncı sırada 1168 kWh/m²- yıl ile Marmara, yedinci sırada 1120 kWh/m²- yıl ile Karadeniz bölgesi yer almaktadır.



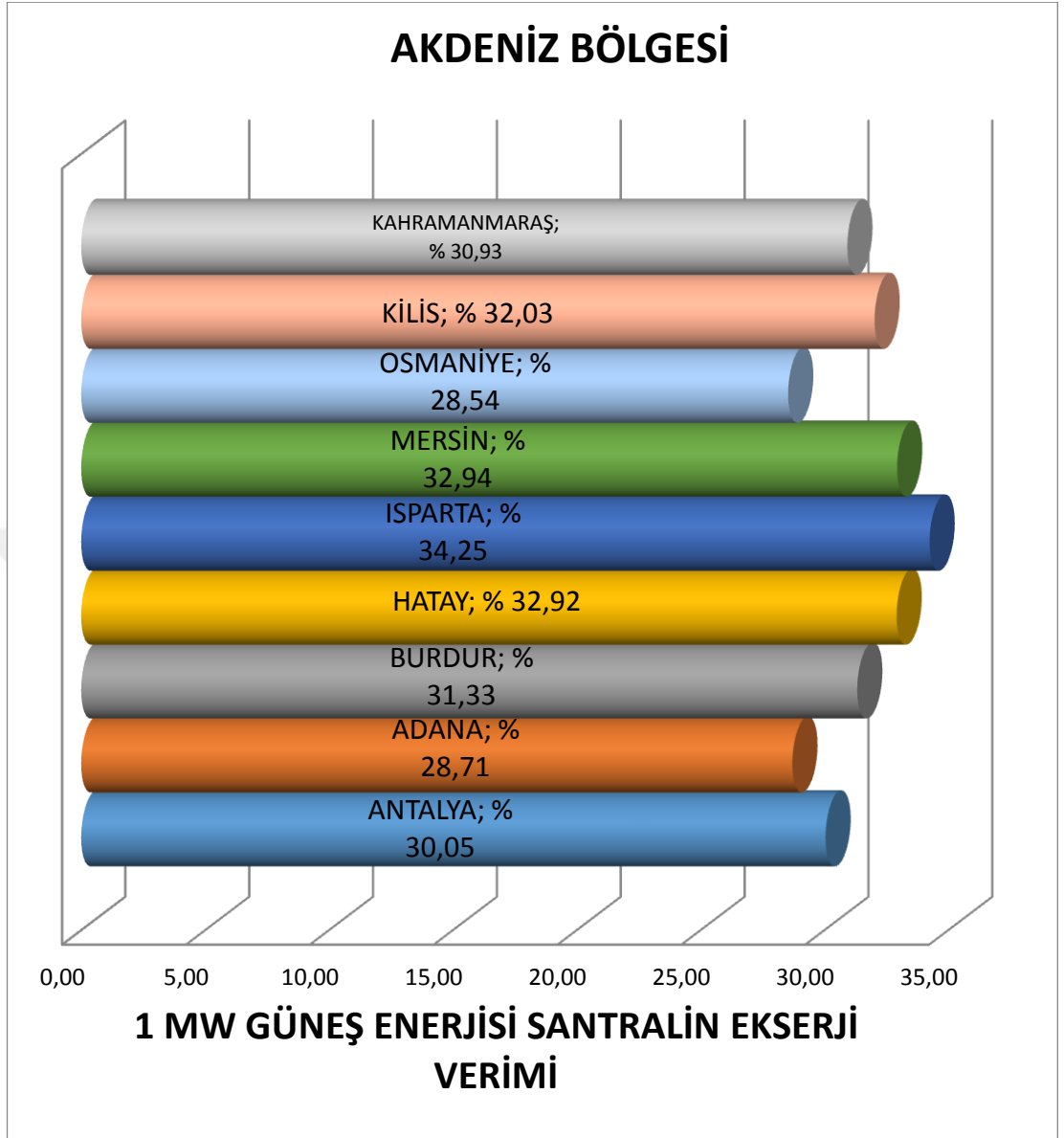
Çizelge 5. 9: Marmara bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



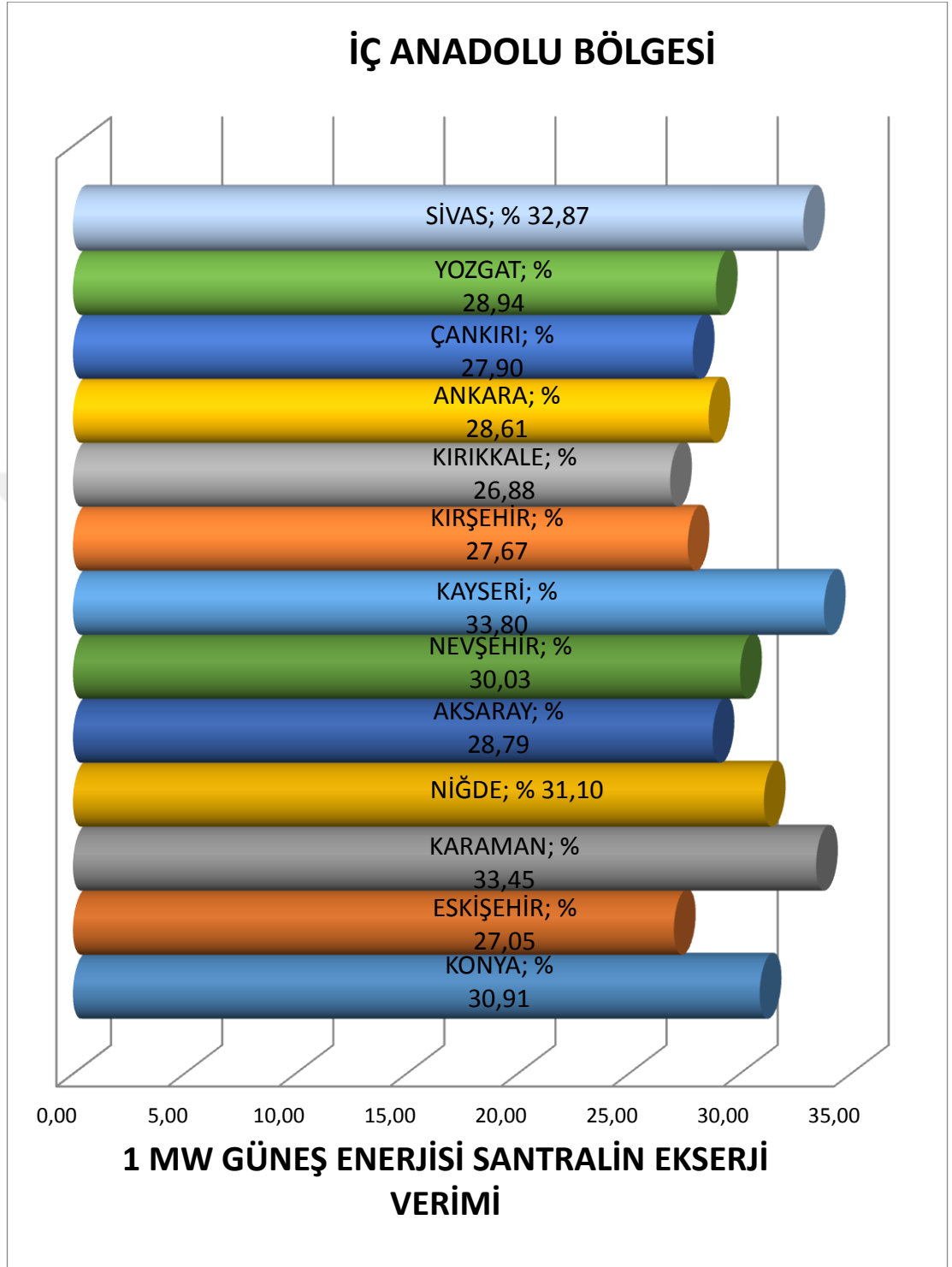
Çizelge 5. 10: Ege bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



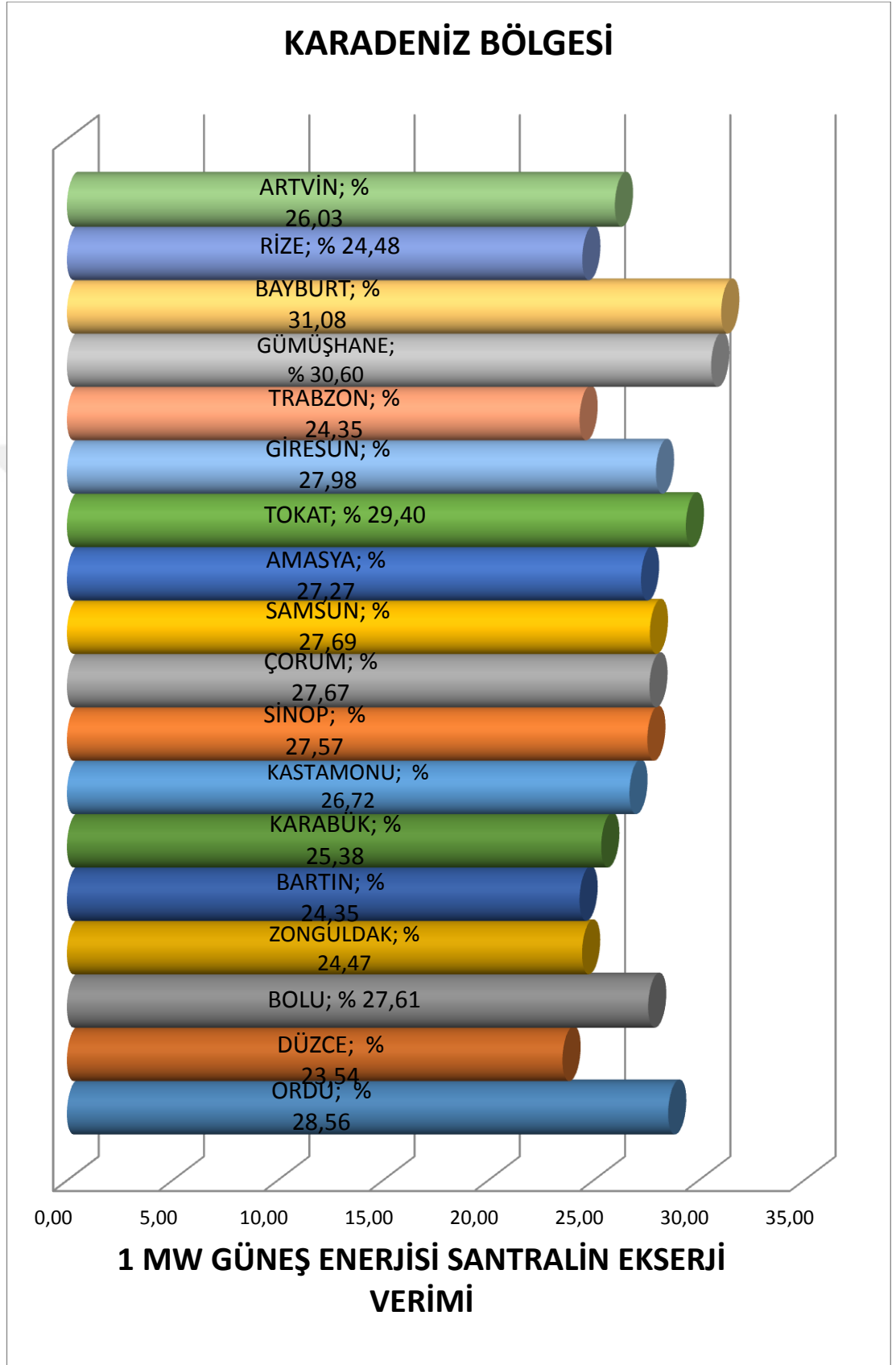
Çizelge 5. 11: Akdeniz bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



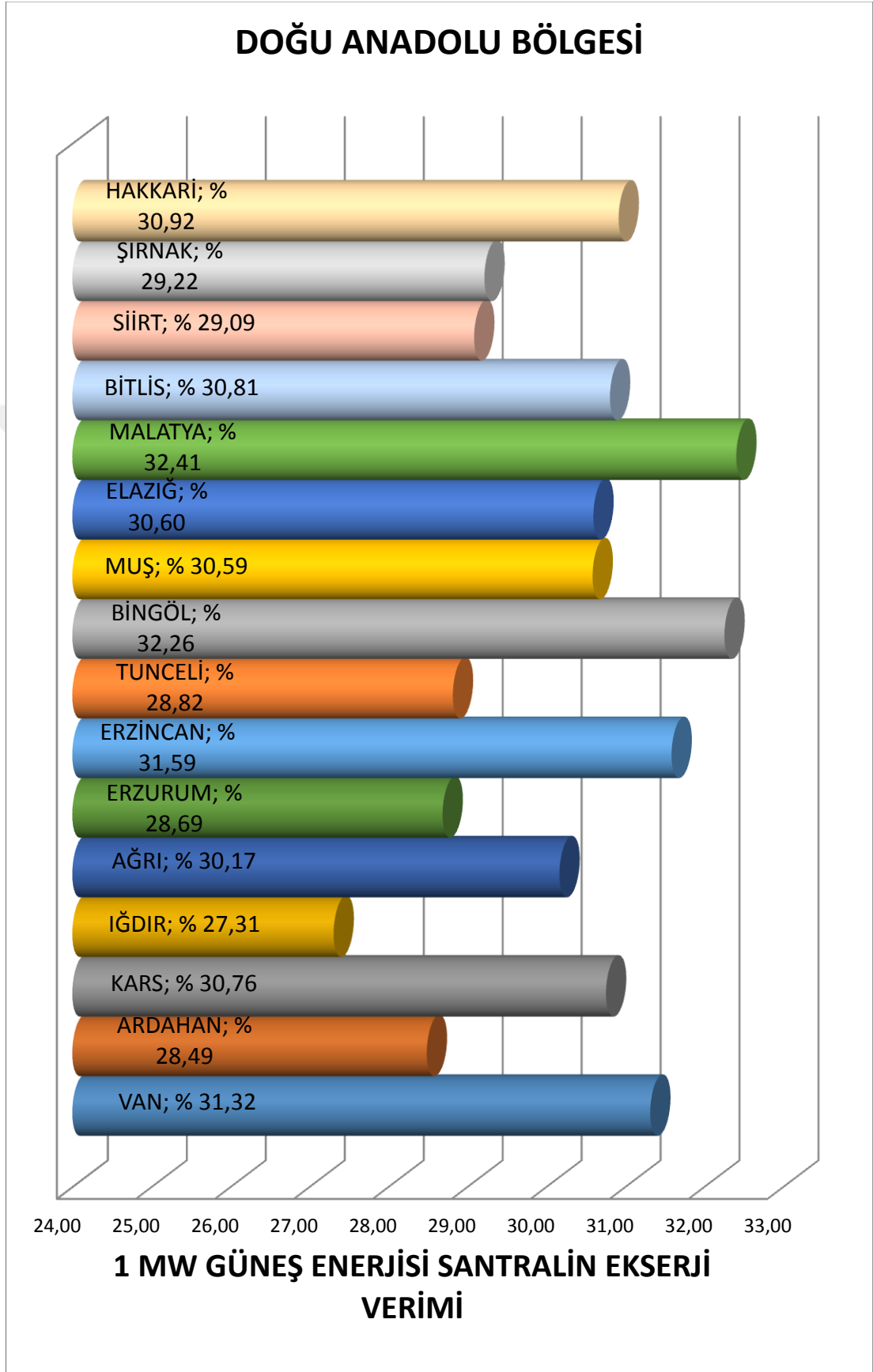
Çizelge 5. 12: İç Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



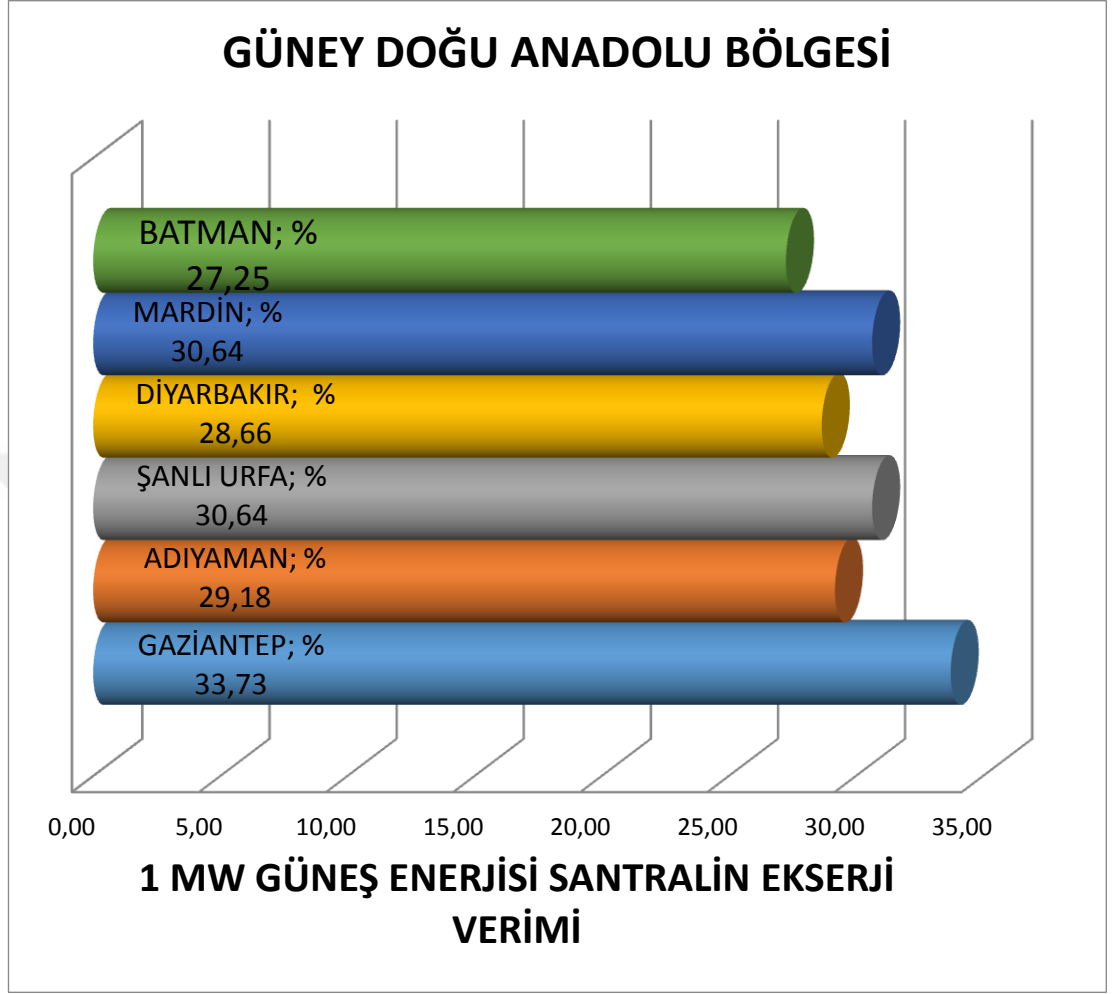
Çizelge 5. 13: Karadeniz bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



Çizelge 5. 14: Doğu Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



Çizelge 5. 15: Güney Doğu Anadolu bölgesi için 1 MW güneş enerjisi santralının ekserji verimi



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaptığım bu çalışmada, referans olarak aldığımız Türkiye'deki 7 bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün kaynaklarından yararlanarak, enerji ve ekserji analizlerini yapıp, Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin performans analizleri ve termodinamik verimliliklerinin karşılaştırılmasıdır.

Bu çalışmalar doğrultusunda yaptığımız yazılım programı ile, seçtiğiniz bölgedeki değerleri temel alarak enerji performans verimi, ekserji verimi, ortalama panel sıcaklığını, gerekli güneş panel alanını, panel sayısını ve yıllık toplam Alternatif akım (AC) güç çıkışını hesaplamaktadır.


Bu çalışmanın sonucunda; Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nden alınan veriler doğrultusunda, yapılan hesaplamalara göre Türkiye'deki 7 bölgenin kWh/m²- yıl olarak karşılaştırılması yapıldığında ilk. Sırada yer alan bölgemiz 1460 kWh/m²- yıl ile Güney Doğu Anadolu, İkinci sırada 1390 kWh/m²- yıl ile Akdeniz, Üçüncü sırada 1365 kWh/m²- yıl ile Doğu Anadolu, dördüncü sırada 1314 kWh/m²- yıl ile İç Anadolu, beşinci sırada 1304 kWh/m²- yıl ile Ege, altıncı sırada 1168 kWh/m²- yıl ile Marmara, yedinci sırada 1120 kWh/m²- yıl ile Karadeniz bölgesi yer almaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Haselhuhn, R., Hemmerle, C., Çataklı, M.** (2012). Fotovoltaik Sistemler-Çataklı Enerji Eğitim Yayıncılık Danışmanlık ve Tic. Ltd. Şti. 1.Baskı (Türkiye)
- [2] **Ateş, M.B., Demir, H., Üresin, E., Tunç, Ş., Erdi, H.** (2009). Dünya’da Ve Türkiye’de Güneş Enerjisi- Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi
- [3] **Dinçer, F.** (2011). Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli - Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme
- [4] **Cengel, Y.A. and Boles, M.A.,** (1996). Thermodynamics: An Engineering Approach, First Edition, McGraw-Hill, New York.
- [5] **Demircioğlu, A.,** (2010) R22 ve alternatifleri R407C ile R410A soğutucu akışkanlarının ısı pompasındaki performanslarının teorik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [6] **Oflaz, R. D.,** (2007). Enerji verimliliği ve özellikli binalarda sistem dizaynı, Türk Tesisat Mühendisliği Derneği Dergisi, (50): 23-25.
- [7] **Kotas, T.J.,** (1985). The Exergy Method of Thermal Plant Analysis ButterWorths, London.
- [8] **Yılbaşı, Z.** (2007). Bir Dizel Motorun Performansının Ekserji Analizi İle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Z.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- [9] **Çalışkan, H.** (2009). İçten Yanmalı Motorlarda Ekserji Analizi, Yüksek Lisans Tezi, O.G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [10] **Çengel, A. Y. and Boles, A. M.** (2008) Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Güven Bilimsel Yayınları, İzmir.
- [11] **Çengel, Y.A. and Boles, M.A.,** (1996). Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Literatür Yayıncılık. İstanbul, 20, 162-163, 529.
- [12] **K. Sudhakar & Tulika Srivastava,** (2013). Energy and exergy analysis of 36 W solar photovoltaic module



 <p>KİŞİSEL BİLGİLER</p>	<p style="text-align: center;">ÖZGEÇMİŞ</p> <p>Adı Soyadı : AHMET ANIL KAYA Doğum Tarihi: 08/05/1991 Doğum Yeri : Şişli /İSTANBUL Cinsiyet : Bay Medeni Hali : Bekar Ehliyet Sınıfı : B Sınıfı Adres :Boğaziçi cad. kuru mah. Çamlık çıkmazı no:2 daire: 2 istinye Sarıyer/İstanbul İrtibat Tel : 0212 277 48 44 GSM Tel : 0536 781 27 21 E-mail : ahmetanilkaya@hotmail.com</p>
<p>EĞİTİM</p>	<p>Yüksek Lisans 2014-2016 İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Lisans 2009-2014 İstanbul Aydın Üniversitesi Makine Mühendisliği Lise 2005-2009 Bursa Hasan Ali Yücel Lisesi</p>
<p>DENEYİM</p>	<p>Deneyim Türü: İş (Tam Zamanlı) Tarih: Nisan 2015 Süre: 5 ay Kurum: SAHA ENERJİ Birim: Proje Bitiş Nedeni: Devam</p> <p>Deneyim Türü: İş (Tam Zamanlı) Tarih: Ocak 2015 Süre: 3 ay Kurum: Tms Endüstriyel Soğutma Ve İşlem Tek. Ltd. Şti. Birim: Satış Bitiş Nedeni: Şehir değişikliği</p>

<p style="text-align: center;">DENEYİM</p>	<p>Deneyim Türü: Staj Tarih: 2012 Süre: 30 iş günü Kurum: Öztuğ Otomotiv Yan San.Mam.A.Ş. Birim: Kalite Bitiş Nedeni: Staj süremin sonlanması Not: 2011 yılında çalıştığım firmada 30 iş günü stajımı yapma imkanım oldu</p>
	<p>Deneyim Türü: Staj Tarih: 2010 Süre: 3 ay Kurum: Six Flags Magic Mountain-A.B.D Birim: Ride operator Bitiş Nedeni: Work And Travel programının sonlanması Not: Bu uluslar arası programa katılarak 3 ay boyunca amerikada çalışma imkanı sağladım. İngilizcemin ve kişisel gelişimimde hayatımdaki rolü oldukça önemlidir.</p>
<p style="text-align: center;">YABANCI DİL VE SEVİYELERİ</p>	<p>Yabancı Dil: İngilizce (10 Üzerinden Değerlendirilmiştir) Konuşma:5/10 Anlama: 5/10 Yazma: 4/10</p>
<p style="text-align: center;">BİLGİSAYAR PROGRAMLARI</p>	<p>Microsoft Office Programları,PV SOL Güneş Enerjisi Tasarım programı,Autocad</p>
<p style="text-align: center;">ALINAN EĞİTİMLER VE SERTİFİKALAR</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 2009-2010 - İstanbul Aydın Üniversitesi – Hazırlık okulu bitirme sertifikası • 2010-Six Flags Magic Mountain – Work And Travel program sertifikası • 2011-TSE-ISO 9001 temel eğitim,iç tetkik ve Dokümantasyon eğitim sertifikaları • 2012-TSE- Takım çalışması ve kurumsal iletişim sertifikası • 2012-İstanbul Aydın Üniversitesi-Teşekkür Belgesi • 2012-2013-2014 Tübitak-Teşekkür belgesi(Formula G güneş enerjili ve Elektromobil elektrikli araba projeleri) • 2014-ICAT-Test,ayar ve dengeleme bilgilendirme eğitimi • 2014- İstanbul Aydın Üniversitesi-Ev Aletleri Enerji Verimliliği Dönüşüm Projesi • 2015- Çataklı Eğitim-Yenilenebilir enerji uzmanlığı eğitimi ve sertifikası

<p>TAKİP ETTİĞİNİZ MESLEKİ YAYINLAR</p>	<p>TÜBİTAK Bilim ve teknik (dergi), Mühendis ve Makine (dergi)</p>
<p>MESLEKİ İLĞİ ALANLARI</p>	<p>-ARGE -Enerji ve İmalat Yönetimi -İmalat Bakım Destek Hizmeti</p> <p>- Yenilenebilir Enerji - Kalite</p>
<p>KİŞİSEL BECERİLER</p>	<p>-Ekip liderliği -Organizasyon -Satış Disiplinli çalışmam nedeniyle verilen görevi hızlı ve güvenli bir şekilde yerine getirebilirim. Kendime özellikle bu konuda çok güvenirim ve çalışacağım firmanın gelişmesi için elimden geleni yapmaya hazır olarak beklemekteyim.</p>
<p>ÜYESİ OLUNAN KULÜP/ DERNEK</p>	<p>-TMMOB -İstanbul Aydın Üniversitesi Enerji Kulübü</p>
<p>KAZANILAN BİLGİ VE BECERİLER (TEZ VE DAHİL OLDUĞUM PROJELER)</p>	<p>TEZ: GÜNEŞ ENERJİLİ ELEKTRİK ÜRETİM SANTRALİ Not: Almış olduğum tez sayesinde güneş enerjisinden elde edilen elektriğin ev sistemine uygulanışını ve 1 MW gücündeki elektrik santral kurulumu hakkında bilgi sahibi oldum. Okulumuzda yapmış olduğum güneş enerjisinden elektrik üretim santrali prototipini evde kullanılan araç ve gereçleri çalıştıracak şekilde uygulamasını yapma fırsatı buldum.</p> <p>PROJE: GÜNEŞ ENERJİSİ VE ELEKTRİKLE ÇALIŞAN ARABA Not: 3 yıl önce kurmuş olduğum ekip ile birlikte 2 adet güneş enerjili araba yapma fırsatı buldum. Tübitak tarafından düzenlenen Formula-G Alternatif enerjili araba yarışlarına katılarak 2013 yılında Türkiye 6.sı ve 7.si olarak yarışı tamamladık. Geçtiğimiz yıl takım kaptanlığı yaptığım ekibimle tamamen elektrikli 2 kişilik binek araç yaptık ve verimlilik konusunda gayet başarılı sonuç elde ettik. Bu yıl ise yine aynı ekipte Akademik danışmanımız Prof. Dr. Zafer UTLU'nun yardımcısı olarak Akademik sorumlu görevinde bulundum. Geçtiğimiz yıllarda da sponsorluk ekibi başkanlığı yaparak bir çok firmayı bu yarışlar hakkında bilgilendirerek araçlarımız için sponsor desteği arama çalışmalarım olmuştur.</p>

REFERANSLAR	<p>ADI SOYADI: <u>ABDURRAHMAN ADA</u></p> <p>KURULUŞ: ESENYURT BELEDİYESİ GÖREVİ: BELEDİYE BAŞKAN YARDIMCISI TELEFON: 533-523-6805 E-MAİL: abdurrahman.ada@gmail.com</p>
	<p>ADI SOYADI: <u>EROL ÇELİK</u></p> <p>KURULUŞ: ÖZTUĞ OTOMOTİV MAM. A.Ş. GÖREVİ: YÖNETİM KURULU BAŞKANI TELEFON: 532-482-4545 E-MAİL: ecelik@oztugotomotiv.com</p>
REFERANSLAR	<p>ADI SOYADI: <u>BEKİR ARAS</u></p> <p>KURULUŞ: TOYOTA BOSHOKU TÜRKİYE GÖREVİ: SATINALMA TELEFON: 532-553-4464 E-MAİL: bekir.aras@toyota-boshokutr.com</p>
	<p>ADI SOYADI: <u>PROF.DR. ZAFER UTLU</u></p> <p>KURULUŞ: İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ GÖREVİ: MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜM BAŞKANI / SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜ MÜDÜRÜ TELEFON: 532-554-7827 E-MAİL: zaferutlu@aydin.edu.tr</p>