



**TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI**

RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİSİ RAPORU 2022

ANKARA

RAPORU HAZIRLAYANLAR

DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİNİN GENEL GÖRÜNÜMÜ

Göksan GÜL / Fizik Yüksek Mühendisi

Burçin NEKAYA / Fizik Mühendisi

GÜNEŞ ENERJİSİ TEKNOLOJİLERİ

Prof. Dr. Aynur ERAY / Fizik Mühendisi

Doç. Dr. Selin PIRAVADILI / Fizik Mühendisi

KRİSTAL TABANLI FOTOVOLTAİK GÜNEŞ PANELLERİ KALİTE KONTROL UYGULAMALARI VE ÖNEMİ

Cenk YILDIRIM / Fizik Mühendisi

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER

Göksan GÜL / Fizik Yüksek Mühendisi

Burçin NEKAYA / Fizik Mühendisi

ISBN: 978-605-01-1493-5

TMMOB FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

Mart 2022, Ankara

Mithatpaşa Cad. 44/16 Kızılay/Ankara

Tel: 0.312 431 55 42 Faks: 0.312 435 75 24

E-Posta: fmo@fmo.org.tr

Tasarım ve Baskı

TEK SES OFSET MATBAACILIK YAYINCILIK

ORG. SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.

Kazım Karabekir Cad. Kültür İş Hanı No: 7 / 11-60

İskitler/ANKARA

Tel: 0312 341 66 19

• teksesofset@gmail.com • www.teksesofset.com

SUNUŐ

Kamu kurum niteliğinde bir meslek örgütü olan Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği'ne (TMMOB) bağlı Odamız meslek alanlarıyla ilgili çalışmalar yaparak hem meslektaşlarımızı hem de kamuoyunu bilgilendirmekle görevlidir. Bu kapsamda farklı zamanlarda kongre, sempozyum, çalıştay, söyleşi ve toplantılar düzenlemekte ve raporlar hazırlamaktadır. Bu etkinlikleri bünyesinde oluşturduğu uzmanlık çalışma grupları marifetiyle yapmaktadır.

Bu çalışma, meslektaşlarımızın hem Ar-Ge hem de uygulama alanlarında yer aldığı yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar ve güneş enerjisinde kullanılan teknolojileri ve kalite temini alanlarında son gelişmeler ve gelecekte öngörülen uygulamaları içermektedir.

Rapor Odamız Yenilenebilir Enerji Çalışma Komisyonu tarafından hazırlanmış ve meslektaşlarımızın ve kamuoyunun bilgisine sunulmuştur.

ÖN SÖZ

Ülkemizde Yenilenebilir Enerji sektörünün birincil kaynaklarından olan Güneş ve Rüzgar Enerjilerinin genel görünümünün yansıtılması amacıyla hazırlanmış olan bu raporda, enerji piyasası paydaşlarından olan kamu kurum ve kuruluşlarında yayımlanan veriler ile güvenilir olarak kabul edilen kaynaklardan elde edilen güncel veriler kullanılmıştır.

Raporda yer alan görüşler ve öngörüler, rapor kapsamında belirtilen ve kullanılan sonuçları yansıtmakta olup bu verilerin tamlığı ve doğruluğundan Fizik Mühendisleri Odasının herhangi bir sorumluluğu bulunmamaktadır.

Raporda yer verilen değerlendirme, görüş, düşünce ve öngörüler, Fizik Mühendisleri Odası nezdinde açık ya da gizli bir garanti ve beklenti oluşturmaz. Raporda yer alan tüm bilgi ve verileri kullanma ve uygulama sorumluluğu, doğrudan veya dolaylı olarak, kişilere aittir.

Bu doküman verilere dayalı olarak ileriye dönük tahminleri de kapsamaktadır.

Bu raporun tüm hakları saklıdır.

İÇİNDEKİLER

ÖN SÖZ	4
GİRİŞ	6
DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ.....	10
1.1 Dünyada Güneş Enerjisi Görünümü.....	12
1.2 Dünyada Rüzgâr Enerji Görünümü	14
1.3 Türkiye'de Güneş ve Rüzgar Enerji Görünümü.....	17
1.3.1 Yenilenebilir Enerji Sektör Görünümü	17
1.3.2 Türkiye'de Rüzgâr Enerji Görünümü	20
1.4 Yenilenebilir Enerji Düzenlemeleri ve Yatırım politikaları (<i>Yatırım Destekleme Mekanizmaları- YEKDEM ve YEKA Gelişmeleri</i>).....	23
2 GÜNEŞ GÖZE TEKNOLOJİLERİ	34
2.1 Yonga Formunda Kristal Silikon Güneş Gözeleri	38
2.2 İnce Film Güneş Gözeleri.....	45
2.2.1 Amorf Silisyum Güneş Gözeleri.....	46
2.2.2 CdTe İnce Film Güneş Gözeleri.....	49
2.2.3 Cu(InGa)Se ₂ (CIGS) İnce Film Güneş Gözeleri.....	51
2.3 Yeni Nesil Güneş Gözeleri.....	55
2.3.1 Boya Bazlı Güneş Gözeleri (Dye-Sensitized Solar Cell -DSSC).....	55
2.3.2 Perovskit Güneş Gözeleri.....	57
2.3.3 Çift katmanlı organik güneş gözesi (Bilayer Organic Solar Cell)	59
2.3.4 Hacimli Heteroeklem Organik Güneş Gözeleri (<i>Bulk Heterojunction Solar Cells, BHJ</i>).....	60
2.3.5 Tandem Organik Güneş Gözeleri.....	61
2.3.6 Organik Güneş Gözelerin (OPV) Çalışma Prensibi.....	62
3 GÜNEŞ ENERJİSİ PANELLERİNDE KALİTE KONTROL SÜREÇLERİ	84
3.1 Laboratuvar Testleri ve Sertifikasyon	85
3.2 Kullanılan Hammaddelerin Kalitesi ve Birbiriyle Uyumluluğu	86
3.3 Fabrika ISO 9001 ve Kalite Kontrol Prosedürleri.....	88
3.3.1 Fabrikada Test Aşamaları	88
4 RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER	102
5 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	116

GİRİŞ

Ülkemizde petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanılabilir rezervlerinin yetersiz olması, çevresel ve sosyal kısıtlar nedeniyle, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Özellikle rüzgar ve güneş enerjisi alanında büyük yatırımlar yapılmaktadır.

Ülkemiz coğrafi konumu nedeniyle güneş ve rüzgar enerji potansiyeli bakımından bir çok ülkeye göre yüksektir. Türkiye'nin Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2.735 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1.530 kWh/m² yıl (günlük toplam 4,2 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Rüzgar enerjisi uygulamalarını etkileyen tüm parametreleri göz önüne alınıp dikkate alınarak (kullanılamaz alanlar) ve yapılan bazı kabuller sonucunda rüzgar sınıfı orta ile sıra dışı arasında olan rüzgarlı arazilerin 131.756,40 MW rüzgar enerjisi potansiyelini desteklediği görülmüştür. Potansiyel içerisinde derinliği 50 m'ye kadar olan deniz alanları da bulunmaktadır. Bu araziler Türkiye yüzölçümünün toplamının 3,57'lik kısmına denk gelmektedir.

Özellikle güneş enerjisi konusunda ilk çalışmalarını başlatan saygı ve rahmetle andığımız değerli hocamız Prof. Dr. Demir İNAN'ın kurduğu Temiz Enerji Vakfı, ülkemizde yenilenebilir enerji kullanımında öncülük yapmış ve pek çok öğrenci yetiştirmiştir. Hocamızın öncüsü olduğu bu yolda pek çok meslektaşımız görev almış ve sektöre önemli katkılar koymuşlardır.

Dünyada ve ölkemizde güneş ve rüzgar enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesi ve kalite kontrolü görev alan meslektaşlarımız bu alandaki son gelişmeleri kamuoyunu bilgilendirmek amacıyla bu raporu hazırlamışlardır.

Rapor; odamız Yenilenebilir Enerji Çalışma Komisyonunda görev alan Prof. Dr. Aynur ERAY, Doç.Dr. Selin PIRAVADILI, Cenk YILDIRIM, Burçin NEKAYA ve Göksan GÜL tarafından hazırlanmıştır.

FMO Yenilenebilir Enerji Çalışma Komisyonu üyelerine ortaya koydukları emeklerinden dolayı FMO olarak teşekkür ederiz.

Rapor dört ana kısımdan oluşmuştur. Birinci kısım Sn. Burçin NEKAYA ve Sn. Göksan GÜL tarafından "Dünyada ve Ölkemizde Güneş ve Rüzgar Enerjisi Görünümü", ikinci kısım Prof. Dr. Aynur ERAY ve Doç.Dr. Selin PIRAVADILI tarafından "Güneş Göze Teknolojileri", üçüncü kısım Sn. Cenk YILDIRIM tarafından "Güneş Enerjisi Panellerinde Kalite kontrol Süreçleri" ve dördüncü kısım Sn. Göksan GÜL ve Sn. Burçin NEKAYA tarafından "Rüzgar Türbinlerindeki Teknolojik Gelişmeler" ve beşinci kısım "Sonuç ve Değerlendirme" konularından oluşmaktadır.

Bu raporun rüzgar ve güneş enerjileri sektöründe çalışanlar ve karar vericiler için iyi bir kaynak olacağını değerlendiriyoruz.

Dr. Abdullah ZARARSIZ
32. Dönem Yönetim Kurulu Başkanı



TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

1 DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ

Burçin NEKAYA / Fizik Mühendisi

Göksan GÜL / Fizik Yüksek Mühendisi



1. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ

Burçin NEKAYA / Fizik Mühendisi

Göksan GÜL / Fizik Yüksek Mühendisi

Bu bölümde Dünyadaki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının mevcut durumu ile birincil yenilenebilir enerji kaynakları olan güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli, güncel hedefler, geçtiğimiz yıl itibariyle yenilenebilir enerji ile elektrik üretiminde ulaşılan seviye, bilinen kaynaklardan elde edilen güncel veriler ışığında değerlendirilmektedir.

Konuya dikkat çekmek ve etkileyici bir giriş için bazı haber ve güncel veriler ile başlamak yanlış olmayacaktır.

“Yenilenebilir Enerji Kaynakları Avrupa Birliği’nde Elektrik Üretiminde Fosil Yakıtları İlk Kez Geride Bıraktı”

“25 Ocak Pazartesi yayımlanan verilere göre, 2020’de AB’de üretilen elektriğin %38’i yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılandı. 2019’da bu oran %34 idi. Yenilenebilir enerji kaynakları kömür ve gazı geride bırakarak Avrupa’da ilk kez ana elektrik kaynağı haline geldi [1].

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) yeni verilerine göre;

COVID-19'un etkisine rağmen 2020'de tüm dünyada 260 GW'ın üzerinde yenilenebilir enerji kapasitesi eklendi. Yenilenebilir enerjinin tüm yeni üretim kapasitesindeki payının art arda ikinci yılda önemli ölçüde arttığı belirtildi.

Geçen yıl eklenen elektrik kapasitesinin %80'inden fazlası yenilenebilir kaynaklardan sağlanmış ve bunun %91'ini güneş ve rüzgar oluşturmaktadır.

Yeni güneş enerjisi kurulumlarının toplamı 127 GW olurken, rüzgar enerjisinin 111 GW olduğu belirlenmiştir..

“Tükenmek bilmeyen enerji ihtiyacı, tükenmek üzere olan kaynaklar!”

Yenilenebilir enerji ile geleneksel enerji üretimi ile karşılaştırıldığında yenilenebilir enerjinin giderek daha fazla sektörde yer bulduğunu söylemek yanlış olmaz. Temiz enerji yatırımları sadece üretim kapasitesinin artmasına değil aynı zamanda iklim değişikliği ile mücadelede önemli katkılar sağlamaktadır.

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminde önemli ilerleme ve gelişmeler gözlenmekle beraber bu kaynakların toplam enerji talebindeki payı istenilen seviyelerde artış göstermemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının payı elektrik üretiminde yüzde 26'ya yükselirken, bu oranın ısıtma ve soğutma sektörlerinde yüzde 11, ulaşımda ise yüzde 3,5 seviyesinde olduğu görülmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklı üretimler 2019'da dünya elektriğinin tahmini %13,4'ünü, 2018'de %12,4 ve 2010'da ise sadece %6,1'ini üretmiştir [2].

Yenilenebilir Enerji Kaynakları içinde “Güneş Enerjisi Santralleri” (GES) ve “Rüzgar Enerjisi Santralleri” (RES) önemli bir yer tutmaktadır. Temiz Enerji kaynaklı üretim potansiyelinin artması için yenilenebilir enerjiye yönelik istikrarlı politikaların daha fazla ön plana çıkması gerekmektedir. 2020 yılında Küresel Rüzgar Sektöründe ciddi bir büyüme ve gelişme yaşanmış olup (>%50) bu gelişme geçmiş yıllara göre en iyi yıl olarak kayıtlara geçmiştir.

Hükümetler, fosil yakıt kaynaklı üretimin desteklenmesi yerine maliyetleri her geçen gün düşen yenilenebilir enerjiyi daha fazla destek olurlar ise, güvenilir bir iklim mücadelesi ile beraber sağlıklı bir dünyaya doğru büyük bir adım atabilirler.

Yenilenebilir enerjilerin teşvik edilmesi, içinde bulunduğumuz zorlu koşullarda ekonominin güç kazanması için yeni fırsatlar yaratacaktır.

1.1 Dünyada Güneş Enerjisi Görünümü

Hızlı bir şekilde yaygınlaşan güneş enerjisi kullanımı dünyanın birçok yerinde en ucuz yeni elektrik üretimi kaynağı haline geldi. Güneş enerji santralleri tarafından üretilen elektriğin maliyeti 2010 ile 2018 arasında yüzde 77 azalırken, kümülatif güneş enerjisi (PV) kapasitesi 2005 ile 2018 arasında 100 kat arttı. Sonuç olarak, güneş enerjisi uygun fiyatlı ve güvenilir enerjiye erişimi teşvik etmek, Paris Anlaşması ve 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemi hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olmak için gereken düşük karbonlu sürdürülebilir enerji sisteminin önemli bir ögesi haline geldi.

Hızlı yaygınlaşan Güneş Enerjisi pazarı, yongalar, hücreler, modüller, invertörler ve birleştirici kutular gibi PV bileşenlerinin yanı sıra bunları üreten makinelerin rutin olarak dünyayı dolaştığı küresel olarak entegre bir pazar haline geldi. Diğer sektörler ile kıyaslandığında daha hızlı büyümekte olan Güneş Enerjisi Pazarı, bu büyümeye ayak uydurabilen tüm dünya ülkeleri için, sürdürülebilir enerji de kilit bir aktör haline gelmiştir.

Ülkelere Göre Güneş Enerjisi

Dünya üzerindeki hemen hemen tüm ülkelerde güneş enerjisi ile az ya da çok elektrik üretimi yapıldığı söylenebilir. Fakat resmi istatistiklerde ulusların enterkonnekte sistemine bağlı olmayan diğer bir ifadeyle off-grid santraller genel olarak istatistik dışında bırakılır. Dünyada şebeke bağlantılı başka bir ifadeyle on-grid sistemlerin ülkelere dağılımına bakıldığında, Çin 78 GW'yi aşan kurulu gücü ile lider konumdadır. Çin Halk Cumhuriyeti'ni sırasıyla Japonya, Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, İtalya, Birleşik Krallık (İngiltere ile Krallığa bağlı diğer ülkeler) ve Hindistan takip etmektedir [4].

Enerji Atlası web sitesinin yayımladığı verilere göre 2020 Aralık ayı itibarıyla dünya genelinde en fazla güneş enerji santrali bulunan 20 ülke şu şekildedir.

	Ülke	Kurulu Güç (MW)
1	Çin	254.355
2	Amerika Birleşik Devletleri	75.572
3	Japonya	67.000
4	Almanya	53.783
5	Hindistan	39.211
6	İtalya	21.600
7	Avusturalya	17.627
8	Vietnam	16.504
9	Güney Kore	14.575
10	İspanya	14.089
11	Birleşik Krallık	13.563
12	Fransa	11.733
13	Hollanda	10.213
14	Brezilya	7.881
15	Türkiye	7.170
16	Güney Afrika	5.990
17	Tayvan	5.817
18	Belçika	5.646
19	Meksika	5.644
20	Ukrayna	5.360

1.2 Dünyada Rüzgâr Enerji Görünümü

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından, dünya rüzgâr enerji potansiyelini belirleyebilmek amacıyla yapılan araştırmalarda, 5,1 m/s üzerinde rüzgâr kapasitesine sahip bölgelerin, uygulamaya dönük ve toplumsal kısıtlar nedeni ile %4'ünün kullanılacağı öngörüsüne dayanarak, dünya karasal teknik rüzgâr potansiyeli 53.000 TWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Açık deniz (offshore) bölgelerinin potansiyeli ise 420.000 TWh/yıl olarak öngörülmektedir.

Dünya genel elektrik tüketiminin 2018 yılında 26.203 TWh olduğu dikkate alındığında, önümüzdeki yıllarda bu büyük potansiyelin daha etkin değerlendirilmesine yönelik çalışmaların artarak devam edeceği açıktır.

Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği tarafından yayımlanan ve aşağıdaki şekilde özeti sunulan değerlendirmede COVID-19 pandemi süreci ile beraber tüm dünya için zorlu bir yıl olan 2020 yılında gerçekleşen yaklaşık 93 GW rüzgâr enerjisi kurulumu, sektörün yaşanan zorluklara rağmen ne kadar hareketli ve gerekli olduğunu göstermiştir. Bu zorlu dönemde-özellikle tedarik zincirinde yaşanan sorunlara rağmen- gerçekleşmiş olan kapasite artışları ile beraber global rüzgar enerjisi kapasitesi 744 GW'a çıkmıştır [5].

Küresel rüzgar enerjisi kapasitesi Kovid-19'a rağmen arttı

Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (WWEA) tarafından hazırlanan rapora göre, mevcut rüzgar enerjisi kapasitesiyle küresel elektrik talebinin yüzde 7'si karşılanabilecek



KÜRESEL RÜZGAR ENERJİSİ KAPASİTESİ (2020)

744 GIGAVAT



Küresel rüzgar enerjisi kapasitesi geçen yıl **93 gigavat arttı**

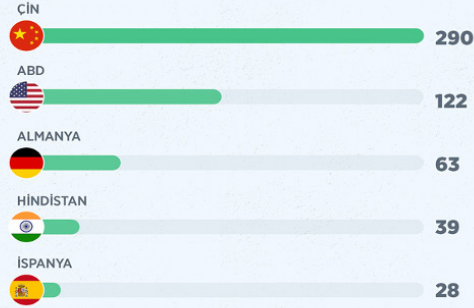


Mevcut rüzgar enerjisi kapasitesiyle küresel elektrik talebinin **%7'si karşılanabilecek**

1.

Geçen yıl elektrik sistemine dahil ettiği 52 gigavat kapasite sayesinde **Çin, rüzgar enerjisi** kurulu gücünü yaklaşık **290 gigavata çıkararak**, kurulu güç artış lideri ve toplam kurulu güçte lider konumunu korumayı başardı

RÜZGARDA EN FAZLA KURULU GÜCE SAHİP ÜLKELER (GIGAVAT)



TÜRKİYE'NİN DURUMU



Türkiye geçen yıl **1 249 megavat** rüzgar gücünü sisteme dahil etti



Türkiye'nin kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 2020 sonu itibarıyla **9 bin 305 megavat** oldu



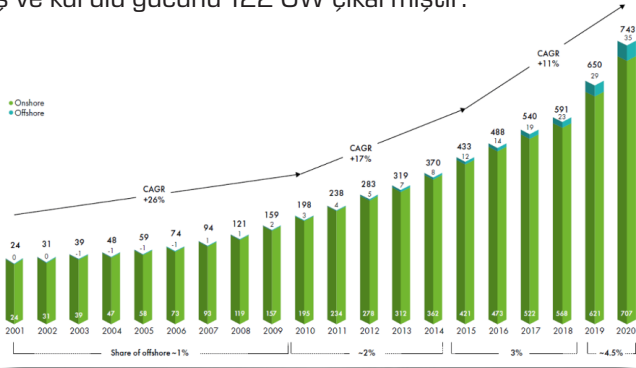
Türkiye toplam kurulu güç kapasitesiyle dünyada **11. sırada**



Türkiye, rüzgar enerjisi **kurulu kapasitesini güçlendirmeyi** kararlılıkla sürdürmeye devam ediyor

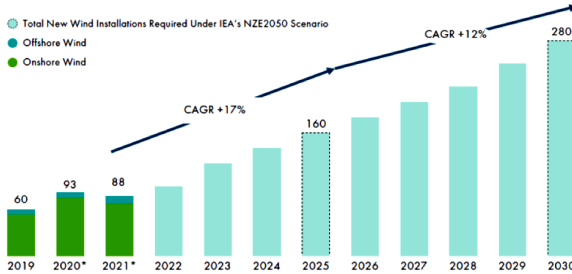
Şekil 11. Küresel Rüzgar Enerji Kapasitesi ve Rüzgarda En Fazla Kurulu Güce Sahip Ülkeler
Kaynak; Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği

Çin ve ABD, geçtiğimiz dönemlerde olduğu gibi karasal rüzgar santrali kapasite artışında lider pazarlar olarak dünyanın iki büyük ekonomisi olmuşlardır. (Şekil 1.1.) Çin geçtiğimiz yıl gerçekleştirdiği 52 GW kapasite artışı ile beraber Rüzgar Enerjisi Kurulu gücünü 290 GW'a artırarak bu konudaki liderliğini sürdürmüştür. Çin'i 17 GW artışla ABD takip etmiş ve kurulu gücünü 122 GW çıkarmıştır.



Şekil 1.2. Toplam Rüzgar Kurulum Kapasitelerinin Tarihsel Gelişimi
Kaynak; Global Wind Report 2021", GWEC

Şekil 1.2' de görüleceği gibi, Rüzgâr Enerjisi, son 10 yılda yaklaşık dört kat büyüme göstermiş ve dünya çapında maliyet açısından en rekabetçi ve dayanıklı enerji kaynaklarından biri haline gelmiştir. Küresel ölçüde yapılan değerlendirmeler, teknolojik yenilik ve gelişmeler ile beraber rüzgar enerjisinin en önemli yenilenebilir kaynaklardan biri olduğunu/olacağını göstermektedir. Yapılan piyasa araştırmaları önümüzdeki 5 yıl içinde Karasal (onshore) ve açık denizde-deniz üstü (offshore) rüzgar kapasitesinde toplam yaklaşık 460 GW artış olacağını göstermektedir. Maliyetlerin azalması, kurulum / işletme-bakım alanındaki yenilikler ile beraber kapasite artışlarının daha da hızlanması beklenmektedir.



Şekil 1.3. 2030'ye Kadar Olması Gerekli Yeni Küresel Rüzgar Kurulumları (GW)
Kaynak; Global Wind Report 2021", GWEC

1.3 Türkiye’de Güneş ve Rüzgar Enerji Görünümü

1.3.1. Yenilenebilir Enerji Sektör Görünümü

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın Şekil 1.4’te verilen haber paylaşımında ülkemizde yenilenebilir enerjinin gelişiminin hızlanarak artması amacıyla daha fazla yenilenebilir enerji kaynağının sisteme entegre edilebilecek şekilde güçlendirilmesinin amaçlandığı ifade edilmiştir.

Elektrik üretiminde ithal/fosil kaynakların payının azaltılması ve bunun yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının getirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda ülkemizde meyvelerini vermeye başlamıştır, (Çizelge 1.1, Çizelge 1.2).



Şekil 1.4. "Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Fatih Dönmez, yenilenebilir enerji kaynakları istatistikleri ile ilgili paylaşımında bulundu."- ETKB Haber

Londra merkezli iklim ve enerji odaklı bağımsız düşünce kuruluşu Ember'in "Küresel Elektrik Görünümü 2021" rapora göre, Türkiye güneş ve rüzgardan sağlanan elektrik üretiminde, yüzde 12'lik pay ile G20 ülkelerinin arasında 5. sırada yer almıştır. Rapora göre Türkiye, Yenilenebilir Enerji Kaynakları arasında rüzgar ve güneş enerjisinde son beş yılda toplam elektrik üretimdeki payını yüzde 4'ten yüzde 12'ye çıkarmıştır. Rüzgar enerjisi, 2020'de eklenen 1,2 GW'lık kurulu güç ile güçlü bir büyüme gösterirken; güneş enerjisinde ise, 2020'de eklenen kurulu güç 2019'a göre yüzde 28 azalmıştır.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan Haziran 2021 Elektrik Piyasası Sektör Raporunda yer alan Lisanslı Elektrik Kurulu Gücü verilerine bakıldığında da Yenilenebilir Enerji Sektörümüzün lokomotifleri olan Güneş ve Rüzgar kurulu gücümüzdeki artış görülecektir.

Türkiye enerjide bağımsız, global anlamda bir merkez konumda, teknoloji üreten bir ülke olma hedefiyle merkezinde üretim ve istihdama yönelik bir strateji izlemektedir. Ar-Ge, tasarım ve yerli üretim çalışmaları ile beraber Türkiye'nin bu hedefine ulaşabileceği düşünülmektedir. Bu amaçla yenilenebilir enerji alanında önemli teşvikler sağlanarak, enerji üretimi ve üretim için gerekli ekipmanların ülkemizde üretilmesinin de önü açılmaktadır.

Çizelge 1.1. 2021 Yılı Haziran Ayı Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı ve 2020 Yılı Haziran Ayı Değeriyle Karşılaştırılması [6]

KAYNAK TÜRÜ	2020 HAZİRAN		2021 HAZİRAN		DEĞİŞİM (%)
	KURULU GÜÇ (MW)	ORAN (%)	KURULU GÜÇ (MW)	ORAN (%)	
DOĞAL GAZ	25.621,06	29,93	25.681,03	28,22	0,23
BARAJLI HİDROLİK	21.265,48	24,84	23.272,20	25,58	9,44
LİNYİT	10.097,31	11,79	10.119,92	11,12	0,22
RÜZGÂR	7.806,11	9,12	9.747,85	10,71	24,87
İTHAL KÖMÜR	8.966,85	10,47	8.986,85	9,88	0,22
AKARSU	7.879,97	9,20	8.147,60	8,95	3,40
JEOTERMAL	1.514,69	1,77	1.650,17	1,81	8,94
BİYOKÜTLE	754,87	0,88	1.266,54	1,39	67,78
TAŞ KÖMÜRÜ	810,77	0,95	810,77	0,89	0,00
GÜNEŞ	179,75	0,21	647,40	0,71	260,16
ASFALTİT	405,00	0,47	405,00	0,45	0,00
FUEL ÖİL	305,93	0,36	251,93	0,28	-17,65
NAFTA	4,74	0,01	4,74	0,01	0,00
LNG	1,95	0,00	1,95	0,00	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	1,04	0,00	0,00
TOPLAM	85.615,51	100,00	90.994,98	100,00	6,28

1. DÜNYADA VE ÜLKEMİZDE GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİSİ GÖRÜNÜMÜ

Çizelge 1.2. 2021 Yılı Ocak Ayı Sonu İtibariyle Lisanslı Elektrik Kurulu Gücünün Kaynak Bazında Dağılımı ve 2020 Yılı Ocak Ayı Değeriyle Karşılaştırılması [7]

KAYNAK TÜRÜ	2020 OCAK		2021 OCAK		DEĞİŞİM (%)
	KURULU GÜÇ (MW)	ORAN (%)	KURULU GÜÇ (MW)	ORAN (%)	
DOĞAL GAZ	26.828,67	31,56	25.654,26	28,71	-4,38
BARAJLI HİDROLİK	20.645,69	24,29	22.933,89	25,67	11,08
LİNYİT	9.935,03	11,69	10.119,92	11,33	1,86
İTHAL KÖMÜR	8.821,85	10,38	8.986,85	10,06	1,87
RÜZGÂR	7.538,51	8,87	8.936,54	10,00	18,55
AKARSU	7.853,72	9,24	8.051,26	9,01	2,52
JEOTERMAL	1.514,69	1,78	1.623,94	1,82	7,21
BİYOKÜTLE	729,42	0,86	1.061,57	1,19	45,54
TAŞ KÖMÜRÜ	377,50	0,44	810,77	0,91	114,77
ASFALTİT	405,00	0,48	405,00	0,45	0,00
GÜNEŞ	174,72	0,21	445,85	0,50	155,18
FUEL OİL	165,49	0,19	305,93	0,34	84,86
NAFTA	4,74	0,01	4,74	0,01	0,00
LNG	1,95	0,00	1,95	0,00	0,00
MOTORİN	1,04	0,00	1,04	0,00	0,00
TOPLAM	84.998,02	100,00	89.343,50	100,00	5,11

Yenilenebilir enerji alanında her geçen gün olumlu gelişmeler olan ülkemizde kurulu gücün yaklaşık yüzde 49'unu hidrolik, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır, (Çizelge 1.4). Yıllara göre bakıldığında yenilenebilir enerji miktarında artışın meydana geldiği görülmektedir.

Çizelge 1.4. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji kurulu gücü (2018-2019, GW) [Kaynak: EPDK]

	Güneş	Rüzgar	Hidrolik	Biyokütle	Jeotermal	Toplam
2018	5.098,65	6.994,22	28.292,61	670,10	1.282,52	42.338,10
2019	5.995,16	7.591,16	28.503,01	801,59	1.514,69	44.405,61
2018-2019 Değişim Oranı (Yüzde)	17,58	8,53	0,74	19,62	18,10	4,65
Genel Kurulu Güç İçindeki Oranı (Yüzde)	6,57	8,32	31,23	0,88	1,66	48,65

1.3.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerji Görünümü

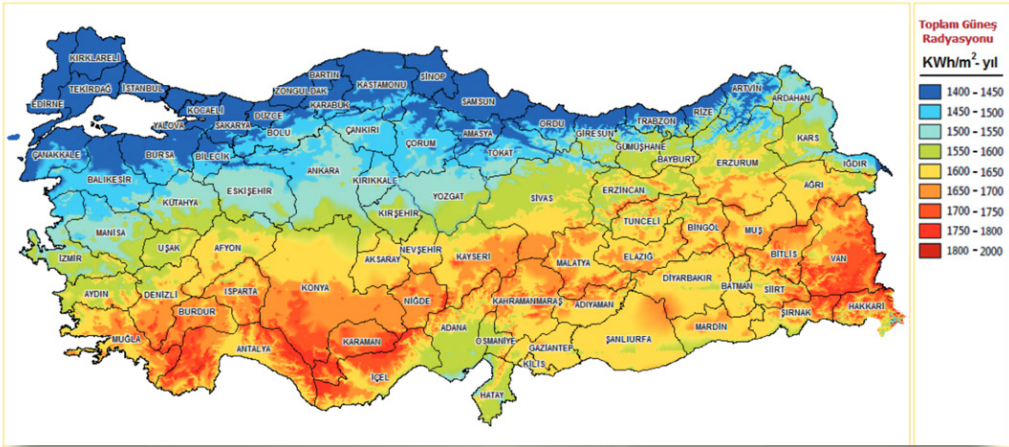
Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği (WWEA) verilerine göre;

Türkiye geçen yıl 1.249 MW rüzgar gücünü sisteme dahil ederek, kurulu rüzgar kapasitesini 9 bin 305 MW’a çıkardı. Ağustos 2021 itibariyle ülkenin doğusunda yer alan rüzgar santralının devreye alınmasıyla birlikte rüzgar enerjisi gücünün 10GW’ı aştığı bildirildi. Kurulu rüzgar gücü kapasitesiyle dünyada 11. sırada yer alan Türkiye, rüzgar enerjisi kurulu kapasitesini güçlendirmeyi kararlılıkla sürdürmeye devam etmektedir.

• Türkiye’nin Güneş Enerji Potansiyeli

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre (Şekil 1.5), ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741,07 saat olup ortalama yıllık toplam ışınlam değeri 1527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.

GEPA’da yer alan genel potansiyel görünümü ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.5. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)

[Kaynak: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.]

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre; Aralık 2020 sonu itibariyle güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz 6.667 MW ve toplam elektrik üretimi içerisindeki payı %3,6 olarak gerçekleşmiştir.

• Türkiye'nin Rüzgar Potansiyeli

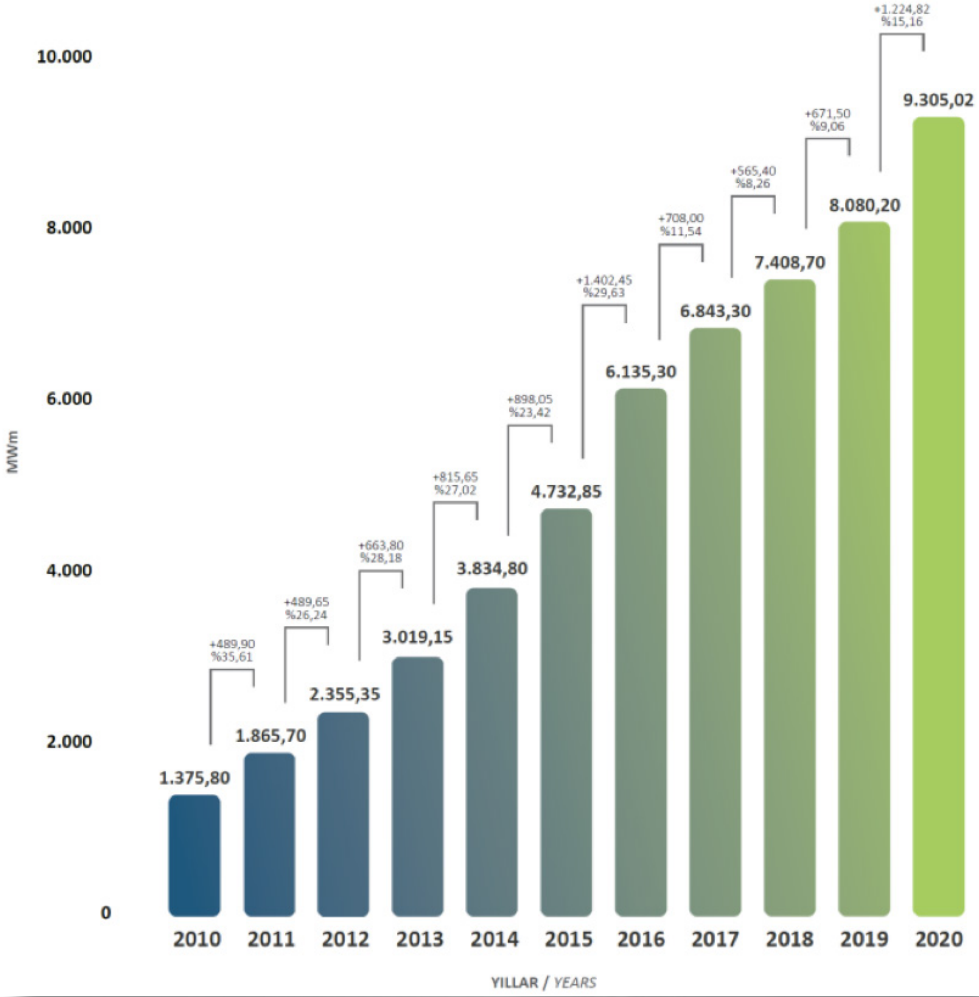
Türkiye'de yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri rüzgâr hızlarına sahip alanlarda kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. Bu kabuller ışığında 2007 yılında, orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgâr akış modeli kullanılarak üretilen rüzgâr kaynak bilgilerinin verildiği Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) hazırlanmıştır. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli 48.000 MW olarak belirlenmiştir. Bu potansiyele karşılık gelen toplam alan Türkiye yüz ölçümünün %1,30'una denk gelmektedir. *[Kaynak: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.]*

Türkiye'de rüzgâr gücü, 2005 yılında devreye giren YEK (Yenilenebilir Enerji Kanunu) ile hızlı bir gelişime girmiştir. Devletin, 2023 yılına kadar 20.000 MW (megawatt) kurulu rüzgâr gücü kapasitesine ulaşma hedefi vardır. *[Kaynak: Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB)]*

Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği(TÜREB) Ocak 2021 istatistik raporu verilerine göre ülkemizde bir önceki yıla göre 2 kat artış ile rüzgar Enerji Tesis kurulumu yapılmış ve 2020 sonu itibariyle 9.305,2 MW kurulu güce ulaşılmıştır (Şekil 1.6).

• Türkiye'nin denizüstü (offshore) rüzgâr enerjisi potansiyeli

Denizüstü Rüzgâr Enerjisi Derneği verilerine göre, Türkiye'nin toplam deniz üstü (Offshore) rüzgâr enerjisi potansiyelinin 75 GW seviyesinde olup, deniz üstü rüzgâr enerjisi santrali projesinin gerçekleştirilmesi için Marmara ve Ege Bölgesi'ndeki bazı limanlarda çalışmalar yapılmaktadır. Türkiye'de en büyük açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelinin Ege Bölgesi olduğu ve bu bölgedeki teknik kapasitenin yaklaşık 25 GW olduğu belirlenmiştir. Ege Bölgesi'ni rüzgâr hızı bakımından Marmara Bölgesi takip etmektedir.



Şekil 1.6. Türkiye'deki Rüzgar Enerjisi Santralleri için Kümülatif Kurulum
Kaynak TUREB Ocak 2021 İstatistik Raporu

Karasal alanlarda kurulan rüzgâr enerjisi santralleriyle kıyaslandığında deniz üstü rüzgâr santralleri daha maliyetli olmak ile beraber daha fazla enerji üretimi gerçekleştirilmektedirler. Deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelimiz düşünüldüğünde bu kaynakların kullanılması gerekmektedir birlikte ülkemizin deniz üstü rüzgar tesisleri konusunda daha fazla deneyime sahip olması gerektiği bir gerçektir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Stratejik Planında, yakın gelecekte toplam 10 bin MW kapasiteli deniz üstü rüzgâr enerjisi projelerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Araştırmalar, Türkiye'nin toplam açık deniz rüzgâr enerjisi potansiyelinin 50 metreden daha az derinlikte 12 GW sabit santral, 50 ile 1000 metre derinlikte de 57 GW yüzer santral potansiyeli bulunduğunu göstermektedir. Diğer küçük potansiyeller ile birlikte Türkiye'nin toplam deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyelinin 75 GW seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Denizde rüzgârın daha yüksek şiddette olması sebebiyle deniz üstü santrallerde enerji üretiminin karasal santrallere oranla yüksek olduğu bilinmektedir. Rüzgârın sürekliliğinin daha fazla olması ve pürüzsüzlüğün düşük olması enerji üretiminde bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca kara projelerinde yaşanan imar sıkıntılarının bu projelerde olmaması, kamulaştırma bedeli olmaması, gürültü ve görüntü kirliliği yaratmaması da diğer avantajları arasında sayılabilir.

Denizüstü Rüzgar potansiyelimizin belirlenmesine yönelik bir başka çalışma, İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) tarafından yürütülmektedir. Türkiye'de ilk olacak olan ve yaklaşık bir yıldır devam eden çalışmada deniz üstüne kurulan rüzgâr ölçüm direği sayesinde toplanacak verilerle İzmir'in deniz üstü rüzgâr enerjisi potansiyeli tespit edilecektir. Tamamlayıcı çalışmalar ile uygun lokasyonların da belirlenmesi ile beraber bu bölgede yeni yatırım fırsatları doğacaktır.

1.4 Yenilenebilir Enerji Düzenlemeleri ve Yatırım politikaları

(Yatırım Destekleme Mekanizmaları- YEKDEM ve YEKA Gelişmeleri)

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Elektrik Üretimini Destekleme Mekanizması (YEKDEM) ilk olarak 2011 yılında uygulanmaya başlamıştır. O dönemlerde yüksek maliyetleri olan yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretiminin desteklenmesi hedeflenmiş ve sisteme dahil olan tesislerin 10 yıl boyunca yüksek alım fiyatları (I sayılı Cetvel) ile alım garantilerinden yararlanması sağlanmıştır (Çizelge 1.5). Ayrıca lisanslı tesislerde kullanılan yerli üretim ekipmanlar için de 5 yıl süre ile ilave teşvikler (II sayılı cetvel) sağlanmıştır (Çizelge 1.6).

Çizelge 1.5. YEKDEM Kapsamında uygulanan fiyatlar

I Sayılı Cetvel (29/12/2010 tarihi ve 6094 sayılı Kanunun hükmüdür.)	
Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi	Uygulanacak Fiyatlar (ABD Doları cent/kWh)
Hidroelektrik üretim tesisi	7,3
Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi	7,3
Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi	10,5
Biyokütleyle dayalı üretim tesisi (çöp gazı dahil)	13,3
Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	13,3

Çizelge 1.6. YEKDEM Kapsamında ilk 5 yıl boyunca uygulanan yerli katkı fiyatları

II Sayılı Cetvel (29/12/2010 tarihi ve 6094 sayılı Kanunun hükmüdür.)		
Tesis Tipi	Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat	Yerli Katkı İlavesi (ABD Doları cent/kWh)
A- Hidroelektrik üretim tesisi	1- Türbin	1,3
	2- Jeneratör ve güç elektroniği	1,0
B- Rüzgar enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Kanat	0,8
	2- Jeneratör ve güç elektroniği	1,0
	3- Türbin kulesi	0,6
	4- Rotor ve nasel gruplarındaki mekanik aksamın tamamı (Kanat grubu ile jeneratör ve güç elektroniği için yapılan ödemeler hariç.)	1,3

C- Fotovoltaik güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- PV panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2- PV modülleri	1,3
	3- PV modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4- İnvvertör	0,6
	5- PV modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme	0,5
D- Yoğunlaştırılmış güneş enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Radyasyon toplama tüpü	2,4
	2- Yansıtıcı yüzey levhası	0,6
	3- Güneş takip sistemi	0,6
	4- Isı enerjisi depolama sisteminin mekanik aksamı	1,3
	5- Kulede güneş ışınını toplayarak buhar üretim sisteminin mekanik aksamı	2,4
	6- Stirling motoru	1,3
	7- Panel entegrasyonu ve güneş paneli yapısal mekaniği	0,6
E- Biyokütle enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Akışkan yataklı buhar kazanı	0,8
	2- Sıvı veya gaz yakıtlı buhar kazanı	0,4
	3- Gazlaştırma ve gaz temizleme grubu	0,6
	4- Buhar veya gaz türbini	2,0
	5- İçten yanmalı motor veya stirling motoru	0,9
	6- Jeneratör ve güç elektroniği	0,5
	7- Kojenerasyon sistemi	0,4
F- Jeotermal enerjisine dayalı üretim tesisi	1- Buhar veya gaz türbini	1,3
	2- Jeneratör ve güç elektroniği	0,7
	3- Buhar enjektörü veya vakum kompresörü	0,7

Çizelge 1.7, Çizelge 1.8, Şekil 1.7 ve Şekil 1.8'den görüleceği üzere yerli üretim ekipmanların kullanım koşulunun sağlanması ile beraber artan döviz kaynaklı elektrik alım fiyatları, YEKDEM sistemine dahil olan Yenilenebilir Enerji Kaynaklı üretim tesis yatırımlarını arttırmış ve bu sayede üretimde de artışlar kaydedilmiştir.

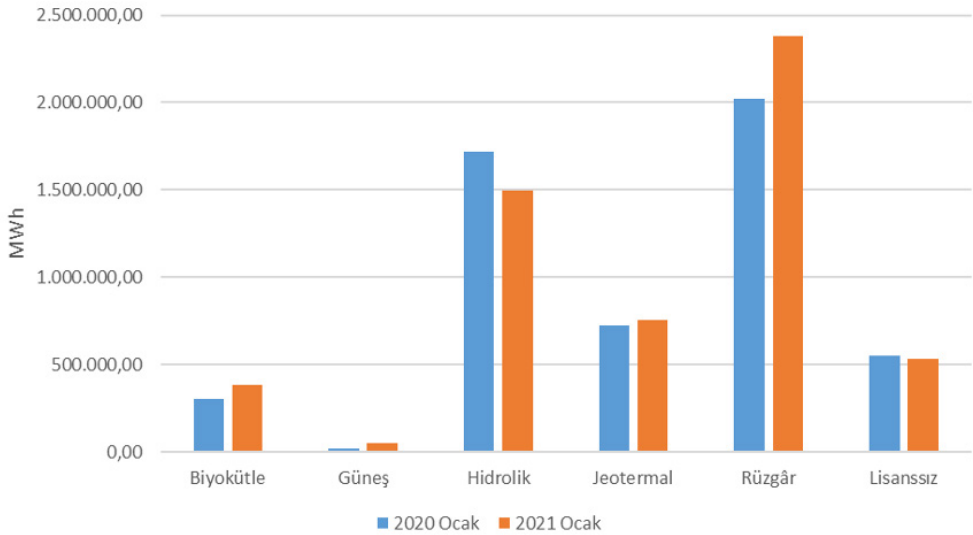
YEKDEM'den yararlanan santrallerin toplam gücü 2020'de 21.877,2 MW olarak kaydedilmiştir ve üretilen elektriğin yaklaşık dörtte biri bu sisteme dahil olmuş olan yüksek fiyatlı alım garantili tesislerden karşılanmıştır. Ancak özellikle son yıllarda teknolojik gelişmeler ile beraber maliyetlerde kayda değer azalmalar yaşanmıştır. Elektrik piyasamızda yaşanan değişiklikler ile beraber yüksek alım garantili bu sistemin değiştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Çizelge 1.7. Ocak 2021 Döneminde YEKDEM Kapsamındaki Üretimin Kaynaklara Göre Dağılımı ve 2020 Yılı Ocak Ayı Değeriyle Karşılaştırılması, [Kaynak: EPDK]

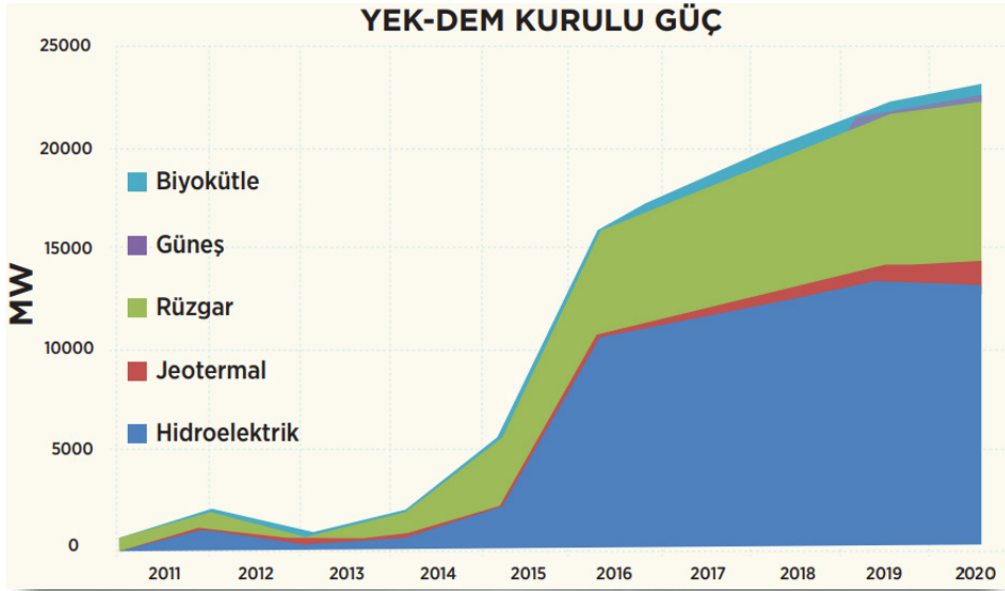
Kaynak Türü	2020 Yılı Ocak Ayı YEKDEM Kapsamındaki Üretim (MWh)	2020 Ocak Payı (%)	2021 Yılı Ocak Ayı YEKDEM Kapsamındaki Üretim (MWh)	2021 Ocak Payı (%)	Ocak 2020-Ocak 2021 Değişimi (%)
Biyokütle	302.547,89	5,67	385.191,49	6,89	27,32
Güneş	16.394,96	0,31	46.885,86	0,84	185,98
Hidrolik	1.716.451,43	32,17	1.497.756,96	26,78	-12,74
Jeotermal	724.573,72	13,58	751.743,11	13,44	3,75
Rüzgâr	2.023.009,50	37,92	2.379.182,59	42,54	17,61
Lisanssız	551.800,07	10,34	531.696,58	9,51	-3,64
Genel Toplam	5.334.777,58	100,00	5.592.456,58	100,00	4,83

Çizelge 1.8. Haziran 2021 Döneminde YEKDEM Kapsamındaki Üretimin Kaynaklara Göre Dağılımı ve 2020 Yılı Haziran Ayı Değeriyle Karşılaştırılması, [Kaynak: EPDK]

Kaynak Türü	2020 Yılı Haziran Ayı YEKDEM Kapsamındaki Üretim (MWh)	2020 Haziran Payı (%)	2021 Yılı Haziran Ayı YEKDEM Kapsamındaki Üretim (MWh)	2021 Haziran Payı (%)	Haziran 2020- Haziran 2021 Değişimi (%)
Biyokütle	301.764,84	4,89	432.670,41	7,92	43,38
Güneş	39.616,07	0,64	159.808,68	2,93	303,39
Hidrolik	2.930.709,31	47,50	1.768.042,31	32,36	-39,67
Jeotermal	609.483,39	9,88	625.275,84	11,45	2,59
Rüzgâr	1.117.905,10	18,12	1.229.190,13	22,50	9,95
Lisanssız	1.169.818,61	18,96	1.248.078,57	22,85	6,69
Genel Toplam	6.169.297,32	100,00	5.463.065,94	100,00	-11,45



Şekil 1.7. Ocak 2021 Döneminde YEKDEM Kapsamındaki Üretimin Kaynaklara Göre Dağılımı ve 2020 Yılı Ocak Ayı Değeriyle Karşılaştırılması (MWh)



Şekil 1.8. Kaynaklara Göre YEKDEM Kapsamındaki Santrallerin Yıllık Kurulu Güç Toplamları

2020 yılı sonunda çıkarılan yasa ile 30 Haziran 2021'den sonra işletmeye girecek yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretim tesisleri için yapılacak destek uygulamalarında değişiklikler yapılmıştır. 29.01.2021 tarih ve 3453 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararına göre, "1 Temmuz 2021 ile 31 Aralık 2025 arasındaki dönemde devreye girecek YEK belgeli santrallarda üretilen elektrik için 10 yıl boyunca garantili alım fiyatı uygulanacaktır. Bu santrallarda yerli ekipman kullanıldığı takdirde de 5 yıl boyunca alım fiyatlarına ilave yerli katkı desteği eklenecektir."

Yeni alım fiyatları Kuruş esaslı Türk Lirası olacak ve 1 Nisan 2021 tarihinden itibaren üçer aylık dönemler halinde güncellenecektir. Fiyat güncellemeleri sırasında TÜFE ve ÜFE artışları % 26, USD ve Euro fiyat değişimleri ise % 24 paya sahip olacaktır.

Türkiye'de yenilenebilir enerji sektöründeki yatırımların artması noktasında YEKDEM ile başlayan sürecin Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanı (YEKA) Mekanizması ile devam ettirilmesi planlanmıştır. Üretim ve Tedarik zincirlerinde Türkiye'nin de bir merkez haline gelmesini destekleyen bu mekanizmalar ile yatırımlar ciddi bir ivme kazanmış olup, bu artışın sürekliliği sağlanmalıdır. Belli oranda yerli ekipman üretimi şartıyla yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin arttırılmasını amaçlayan YEKA süreci hem Güneş hem de Rüzgar sektöründe ilk adımlarını atmıştır (Çizelge 1.8).

Yönetmelikteki tanımına göre YEKA, “kamu ve hazine taşınmazları ile özel mülkiyete konu taşınmazlar üzerinde kurulacak büyük ölçekli kaynak alanları”dır. Başka bir deyişle kamuya ait büyük arazilerin, enerji santralleri ile değerlendirilmek üzere tahsisidir.

Çizelge 1.8. YEKA Mekanizması ile beraber gelen değişiklikler

Daha büyük ihaleler	RES YEKA 1 = 1.000 MW, RES YEKA 2 = 4 x 250 MW
Daha düşük fiyat	RES YEKA 1 = 3,49 USD cent / kWh, RES YEKA 2 = 3,53 – 4,56 USD cent / kWh
Daha fazla yerlilik	YEKA 1 %65, YEKA 2 %55, (YEKDEM'de %51)
Daha uzun alım garantisi	15 yıl (YEKDEM 10 yıl)
Yatırım zorunluluğu	YEKA 1'de AR-GE Merkezi ve Nasel fabrikası kurulması zorunluluğu vardı. YEKA 2'de bunlar yoktu.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 03.07.2020 tarihli ve 31174 sayılı Resmi Gazete'de Güneş Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (“YEKA”) ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma ilanı yayımlanmıştır. Bu çerçevede Yarışma ilanı ekinde belirtilen Bağlantı Bölgelerinde güneş enerjisi santrallerinin (“GES”) kurulması için YEKA'ların kullandırılmasının sağlanması ve ilgili Bağlantı Kapasitelerinin tahsis edilmesi amaçlanmıştır.

Kaynaklar

1. Yeni Enerji dergisi – 2021 sayı 78
2. Global Trends in Renewable Energy Investment 2020
3. “Trading into a Bright Energy Future: The Case for Open, High-Quality Solar Photovoltaic Markets”, IRENA
4. Enerji Atlası, <https://www.enerjiatlası.com/>
5. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği, World Wind Energy Association, <https://wwindea.org/>
6. Global Wind Report 2021
7. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Haziran 2021
8. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Elektrik Piyasası Sektör Raporu, Ocak 2021



TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

2 GÜNEŞ GÖZE TEKNOLOJİLERİ

Doç.Dr. Selin PIRAVADILI / Fizik Mühendisi

Prof. Dr. Aynur ERAY / Fizik Yüksek Mühendisi



2. GÜNEŞ GÖZE TEKNOLOJİLERİ

Doç. Dr. Selin PIRAVADILI / Fizik Yüksek Mühendisi

Prof. Dr. Aynur ERAY / Fizik Yüksek Mühendisi

Güneş gözeleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren ve fotovoltaik etki ile çalışan düzeneklerdir. Güneş göze üretiminde malzeme seçerken malzemenin soğurma karakterinin güneş spektrumuna uyumluluğuna ve üretim maliyetine dikkat edilmektedir. Farklı türde gözeler olsa da organik gözeler haricinde hepsinin çalışma prensibi aynıdır. İnorganik güneş gözeleri yarıiletken malzemelerden üretilen *p-n* ekleminden oluşur. Yarıiletken malzeme güneş spektrumunun büyük bir kısmını soğurabilecek özellikte olmalıdır. Malzemenin soğurma özelliklerine bağlı olarak ışık, yüzeyde ya da malzeme içinde soğurulur. Yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına (E_g) eşit ya da büyük enerjili fotonlar malzeme içerisinde soğurularak elektron-deşik çifti oluşur. Bu taşıyıcılar (elektronlar ve deşikler), *p-n* ekleminden oluşturulan yapısal elektrik alan sayesinde birbirlerinden ayrılarak yeniden birleşmeleri engellenir. Üretilen yük taşıyıcıları, metal malzemelerden yapılan ön ve arka kontaklar aracılığı ile toplanır ve böylece dış devrede bir akım oluşturulur [1,2].

Güneş gözelerinin üretiminde silikon, kadmiyum tellür, galyum arsenit, bakır indiyum selenit gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler ile farklı yapılarda eklemeler geliştirilerek farklı yapılarda güneş gözeleri oluşturulabilmektedir. Üzerinde çalışılan

temel eklem çeşitleri, homoeklemler, heteroeklemler, p-i-n veya n-i-p yapılı gözeler ve çoklu eklem gözelerdir. Homoeklem güneş gözeleri farklı tipte katkılanmış, bant aralığı aynı iki yarıiletkenin bir araya gelmesi ile (silikon gibi) oluşturulmaktadır. Heteroeklemler ise farklı tipte katkılanmış, bant aralığı farklı değerlerde olan, iki malzeme ile (hidrojenlendirilmiş amorf silikon ve kristal silikon, kadmiyum sülfid ve bakır indiyum diselenid gibi) eklem yapılarak hazırlanmaktadır. p-i-n veya n-i-p yapılı güneş gözeleri de p-tipi katkılanmış (intrinsic, i-tipi) ve n-tipi katkılanmış aynı tipte yarıiletkenin (amorf silikon veya kadmiyum tellür gibi) bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Çoklu eklem güneş gözeleri ise farklı bant aralığına sahip birçok yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile hazırlanmaktadır. Bu yapıların üstünlüğü güneş spektrumunun farklı dalga boylarını soğurabilecek malzemeler ile eklem oluşturarak gelen güneş ışınımından olabildiğince fazla yararlanabilmesidir [1-6].

Fotovoltaik olayın tarihçesi, 1839 yılında A.E. Becquerel tarafından fotovoltaik etkinin gözlemlendiği, 19. Yüzyıla uzanmaktadır [7]. % 6 dönüşüm verimliliğine sahip silikon bazlı ilk güneş gözesi, 1954 yılında Chapin ve arkadaşları, tarafından üretilmiştir [8]. Fotovoltaik etkinin 1839 yılından beri bilinmesine karşın, pratik uygulamalarda güneş gözelerinin kullanılması 1970'li yıllarda Amerika'daki uzay çalışmaları ile başlamıştır. 1970'lerdeki petrol ambargosu nedeni ile temiz ve tükenmez enerjilere olan ilginin artması yeni araştırma laboratuvarlarının açılmasını sağlamıştır. Bunlardan biri olan Spectrolab firması, güneş gözelerinin metal kontaklarını perde baskılama (screen printing) yöntemi ile üreterek öncü olmuştur [9]. Bundan sonra yapılan milyonlarca göze bu yöntemle üretilmiştir. Daha sonra uzunca bir süre yeni bir gelişme gözlenmezken sadece Czochralski metodunda maliyeti azaltma çalışmaları yapılmıştır. 1980'lerin sonuna doğru güneş göze üreticileri, gözelerin maliyetini azaltma ve verimini artırma yöntemleri üzerine yoğunlaşmışlardır. 1992 yılında Florida Üniversitesi %15.9 verimli ince film kadmiyum tellür güneş gözesi üreterek bu alanda rekor sahibi olmuştur. 1994 yılında verimi %30'un üzerinde GaInP/GaAs çok eklemli gözeler üretilmiş ve 1996 'da organik gözelerin verimi %11'e ulaşmıştır [4]. Güneş gözelerinin maliyetlerini azaltmak ve verimlerini artırmak için yapılan araştırmalar sonucunda, 2013 yılında **Alüminyum arka yüzey alan** (Aluminium Back surface field-AI-BSF) ve **pasive edilmiş yayıcı arka kontak** (Passivated Emitter Rear contact Cell-PERC) göze yapısı ile %20 verim değeri elde edilmiştir. 2010-2020 yılları arasında, n ve p katkılı bölgeleri ve bütün bağlantılarının arka yüzeyde olması nedeniyle, yüksek verim potansiyeli olan, **arka kontak arka eklemli** (Interdigitated back-contact-IBC) güneş göze yapıları ile,

endüstriyel boyutlarda tek kristal yapılı silisyum gözelerde %25.2 değeriyle rekor verim seviyesine ulaşmıştır [9-12].

Elli yıla uzanan literatür incelendiğinde, güneş gözelerinin gelişimi için farklı teknolojilerin kullanıldığı göze çarpmaktadır [3,4,7]. **Çizelge 2.1**'de özetlenen bu teknolojiler

- Yonga (wafer) tabanlı kristal silikon güneş gözelerini içeren **İlk nesil gözeler**,
- Amorf silikon, bakır indiyum galyum selenit (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe) ince filmlerden oluşan **İkinci nesil gözeler**,
- Polimer, boya duyarlı, nanokristal ve perovskite güneş gözelerinin yer aldığı yüksek verimlerin elde edildiği yeni teknolojiler grubu olan **üçüncü nesil gözeler**.

olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır:

Çizelge 2.1 Güneş gözelerinin gelişim teknolojilerine göre sınıflandırılması



Kristal silikon gözeler fotovoltaik teknolojisinde önde giden malzemedir. Günümüzde fotovoltaik (FV) pazar payları %85'den fazladır. İnce film teknolojisi, kristal silikon güneş gözelerine oranla göze üretim maliyetlerini azaltmasıyla dikkat çekmiştir, ancak ince film silikon gözeler, beklenen verimlilik iyileştirmelerinin olmaması nedeniyle pazar paylarını kaybetmektedir [9].

CdTe güneş gözelerine, kolay ve ucuz üretim teknikleri ile üretilmesi sayesinde gitgide artan bir ilgi bulunmaktadır. Ayrıca birçok farklı yöntemle üretilmeleri de önemli bir avantajdır. Laboratuvar çalışmalarında gözlenen performans değerleri sayesinde ticari üretime geçen firma sayısında artış gözlenmektedir.

CIGS (Cu(InGa)Se_2) güneş gözeleri, üretim maliyeti açısından en çok ümit vaat eden göze teknolojisidir. Hem göze verimi hem de modül verimi olarak çok ince tabaka Cu(In-Ga)Se_2 yarıiletken malzemeden yüksek verim elde edilmektedir. Birçok farklı kuruluş tarafından Ar-Ge çalışmaları sürmektedir [13].

Organik güneş gözeleri ve boya duyarlı güneş gözeleri (Dye sensitized solar cell-DS-SC), esnek alttaşlar üzerine üretilebildiğinden ve taşınabilir elektronikler olmaları açısından tercih edilir olsa da, bu gözelerin fiziksel ve mekanik kararlılığının düşük olması, büyük alanda gerekli verimliliği sağlayamaması nedeniyle ticari uygulamalar için henüz üzerinde çalışılması gereken bir alandır. 1986 yılında, Tang ve çalışma grubu, eklemli mimaride organik güneş gözelerini geliştirmiş ve yaklaşık olarak %1'lik bir güneş göze güç verimi elde etmişlerdir [14]. Bu çalışma organik tabanlı yarıiletken fotovoltaik aygıtların gelişimi için önemli bir adımdır. Bazı organik ve boya duyarlı güneş gözeleri (FV) modüller ticarileştirilmiştir, ancak çoğunlukla bu teknolojiler yeni ve gelişmekte olan grupta kalmaktadır. Hibrit organik-inorganik perovskit malzemeleri, özellikle yüksek verimlilik ve cazip üretim maliyetleri sunmak için yonga tabanlı silikon ile birlikte umut verici bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

Tek bir güneş gözesinin ürettiği güç az olduğundan birkaç göze elektriksel olarak birleştirilerek güç üretici oluşturulur. FV modül, göze üretiminin son hali olup piyasada satın alınabilen ürün halindedir. Kurulacak olan sistemin performansı ve ömrü, modülün üretim aşamasındaki koruma katmanlarına doğrudan bağlıdır. Göze dizisini mekanik yüklere, hava şartlarına, darbelere karşı dayanıklı hale getirmek için modül düzgünce enkapsüle edilmelidir. Üretilen modül esnememeli ve elektriksel olarak yalıtılmalıdır. Modülü oluşturan katmanlar daha sonra istiflenmektedir. Üst yüzeye yerleştirilen 2-3 mm kalınlığındaki cam levha mekanik esnemezlik ve koruma sağlarken aynı zamanda

güneş ışığının göze erişmesine izin verir. Göze kalıbı iki katman arasında sıkıştırılır. Bu katmanlar en yaygın olarak etilenvinil-asetat (EVA) malzemesidir [15]. EVA termoplastik yapılı bir malzemedir ve bu özelliği sayesinde ısı farklılıklarda form değişikliği tersinir yapıdadır. Modülün ışık görmeyen alt tabakasında genellikle plastik levha kullanılır. Bu sayede nem ve aşındırıcı etkenlerden modül korunur. Bazı üreticiler alt yüzeyde de cam levha kullanır. Bu sayede modülün korunumu artırılır.

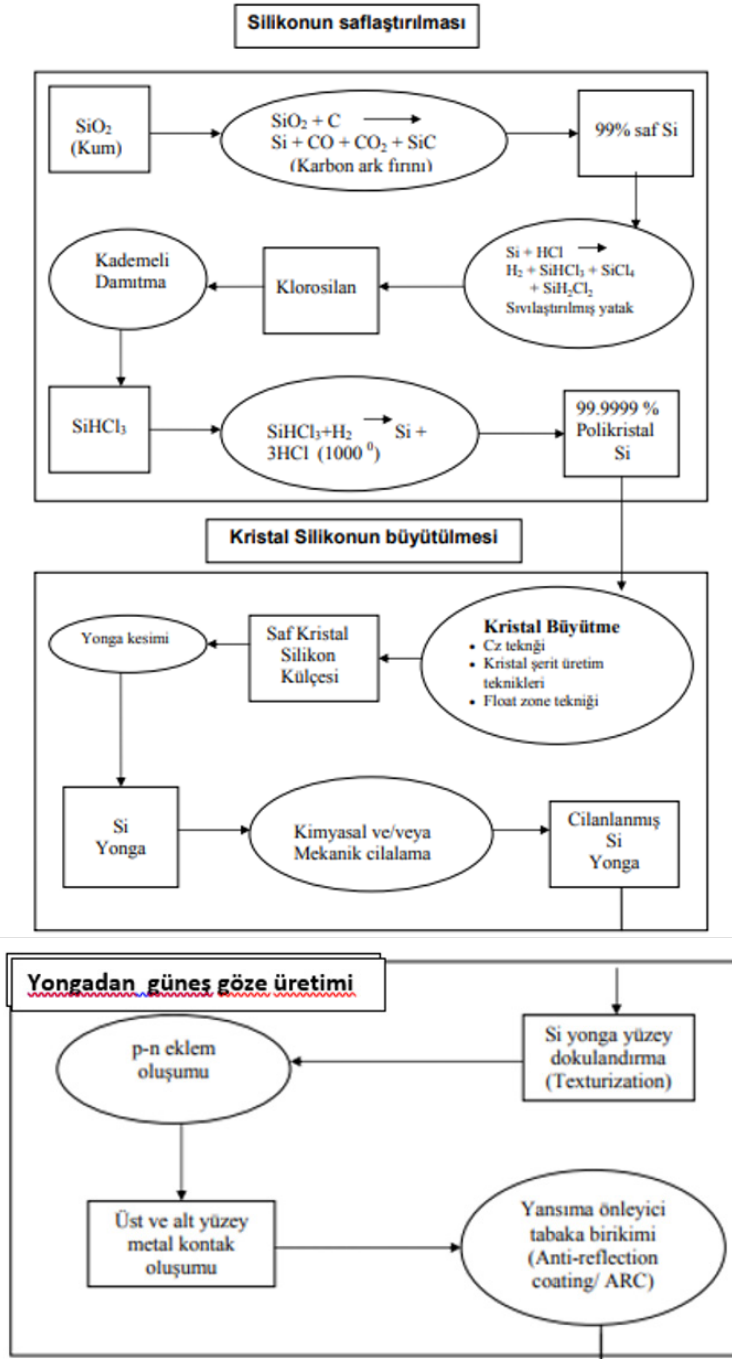
2.1 Yonga Formunda Kristal Silikon Güneş Gözeleri

Kristal silikon teknolojisi günümüzde en güvenilir ve en gelişmiş fotovoltaik teknolojisi olmasına karşın, üretim aşaması zor ve karışık işlemler gerektirmektedir. Silikon göze üretimi için Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi, üç ana aşama vardır:

- Silikonun saflaştırılması
- Kristal Silikonun büyütülmesi ve yongaların hazırlanması
- Yongalardan güneş göze üretimi

Silikonun saflaştırılması: Silikonu saflaştırma, göze verimini doğrudan etkileyen bir faktördür. Malzemede yer alan istenmeyen safsızlıklar kristal kusurlarını oluşturarak göze çıkış gücünü etkiler. Doğada saf halde bulunmamasına karşın oksijenle karışmış halde oldukça büyük miktarda silikon bulunur. Karbon karışımı SiO_2 'yi karbon ark fırınında karbondan ayırdıktan sonra arıtımda ikinci aşama olarak metalürjik silikon, hidrojen ya da klor ile tepkimeye sokulur ve tepkime sonucu Si-H-Cl bileşikleri olan SiH_2Cl_2 , SiHCl_3 , SiCl_4 oluşur. Oluşan her bir sıvının farklı kaynama noktası vardır. Bu yüzden SiHCl_3 'ü diğer bileşiklerden ayırmak için kademeli damıtma yapılır. Sonraki aşamada, triklorosilandan silikonu uzaklaştırmak için triklorosilan, hidrojen ile yüksek sıcaklıkta tepkimeye sokulur [4]. Sonuç olarak polikristal silikon ve HCl oluşur. Bu aşamada oluşan silikon artık elektronik seviyede kullanılacak saflıktadır.

Kristal Silikonun büyütülmesi ve yongaların hazırlanması: Tek kristal silikon yonga üretmek için silikon önce eritilmeli ve tekrar kristalleştirilmelidir. Tohum silikon kristali eriyik içine batırılıp yavaşça yukarı doğru belli bir eksende döndürerek çekilir. Silikon eriyikten çekilirken silikon içindeki safsızlıklar eriyik içinde kalır ve böylece silikon daha yüksek bir saflık mertebesine ulaşır. Kontrollü katılaştırma ve eriyik aktarım işlemlerinden sonra 10-15 cm çapında 1-1.5 m uzunluğunda kristal büyütülür.



Şekil 2.1. Yonga formunda kristal silikon güneş göze üretimi

Polikristal yonga üretiminde düşük maliyetli birçok farklı üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kristal çekme metodu olarak kullanılan “*Czochralski*” işlemidir. Czochralski metoduna benzeyen ama pota kullanılmasına gerek kalmadan yüksek saflıkta tek kristal silikon üretmeye olanak sağlayan diğer yöntem “*Floating Zone*” (yüzdürme bölgesi yöntemi) yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek mertebede saflaştırılmış, katı ve polikristal halde bulunan silikon, radyo frekans (RF) ısıtması ile eritilir ve oluşan bu eriyikten tek kristal silikon çekilir. İşlem sırasında pota kullanılmadığından ve böylece safsızlıklar oluşmayacağından, bu yöntemle üretilen silikon çok saf halindedir. Czochralski metoduna oranla çok daha fazla maliyetli olduğundan daha çok Ar-Ge çalışmalarında, laboratuvar ortamlarında kullanılmaktadır. Rekor verim değerlerine sahip güneş gözelerinin hemen hemen hepsi floating zone kristal büyütme tekniği ile üretilirken, ticari amaçlı gözelerde bu yöntem kullanılmamaktadır. [2, 4, 15].

Büyütülen kristal külçelerden hazırlanan her yonganın en az bir yüzeyi temiz, düz ve çatlaksız olmalıdır. Genel olarak uygun bir yonga, silikon külçelerinin ince dilimlere kesilmesi ve kesim izleri giderilinceye kadar cilalanması ile elde edilir. Dilimleme, düzleme, cilalama işlemleri kirli işlemlerdir ve her işlem arasında ve sonunda mutlaka yonga temizleme işlemi uygulanır. Kimyasal bağlarla tutunmuş istenmeyen parçacıklar (iyonlar, atomlar) kimyasal yollarla temizlenirken, zayıf bağlı maddeler mekaniksel temizleme ile yüzeyden ayrılır. Cilalanmış yongalara uygulanan temizleme işlemi fırçalama ve kimyasal solüsyona daldırma ile son bulur.

Yongalardan güneş göze üretimi: Üretilen silikon yongasını güneş gözesi haline getirmek için, yonga birkaç kimyasal ve ısıtma işleminden geçirilir. Üretim aşamaları için gerekli ana adımlar:

- Yüzey dokulandırması (texturization)
- p-n eklemi oluşumu
- Üst ve alt yüzey metal kontak oluşumu
- Yansıma önleyici tabaka biriktirme

olarak açıklanabilir.

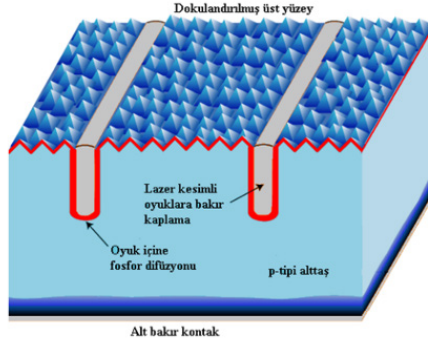
Farklı yapıdaki kristaller için farklı dokulandırma teknikleri uygulanır. Kesme aletleri ile ya da lazer ile mekanik dokulandırma, fotolitografik maske ile izotropik kimyasal aşındırma ve plazma aşındırma bunlara örnek olarak verilebilir.

Üretilen yongalar genellikle p-tipi yarıiletkenlerdir. p-n eklemi oluşturabilmek için n-tipi safsızlık, genellikle fosfor maddesi, ısıl işlemle üst yüzeye yayılır. Fosfor atomları silikon içine 900°C ya da daha yüksek sıcaklıkta yayılırlar. Elektriksel kontaklar perde baskılama yöntemiyle (screen printing) oluşturulur. Perde baskılama yönteminde alt yüzey, delikli yapılı bir perde (maske) ile örtülür. Sıkıştırıcı bir yüzey, metal macunu perdenin deliklerinden geçirerek yüzeye maskeleme yapar. Perde yüzeyden çekilir ve ardında kalın bir ıslak metal macun tabakası bırakır. Fırında kurutulan macundan organik çözücüler ayrılır. Göze, daha yüksek sıcaklıktaki ikinci bir fırına sokularak metal kontakın silikon yüzeyle birleşmesi sağlanır. Fırınlama sonucunda alt yüzeydeki n-tabakası yok edilir ve metal p-tabakası ile kontak oluşturur. Göze ters çevrilir ve üst yüzey baskılama işlemi başlar. Üst yüzeyde uygulanan işlemler alt yüzeye uygulananlarla benzer işlemlerdir. Göze yüzeyinde metal kontakten dolayı oluşabilecek gölgelenmeyi engellemek için perde yapısı şerit şeklinde yapılıdır. Parmak ızgara şeklindeki üst yüzey yüksek sıcaklıktaki fırında ısıtılır ve metal macun silikon yüzeyle birleşir.

Metal kontakların yapımından sonra, güneş gözesi yüzeyden yansımayı engellemek için ince saydam bir tabaka ile kaplanır. Birçok farklı yansıma engelleyici kaplama vardır. Bunlar, titanyum dioksit (TiO_2), silikon nitrit (Si_3N_4), tantalum oksit (Ta_2O_5) ve silikon monoksitdir (SiO). Tek katmanlı yansıma engelleyici kaplamalar polikristal güneş gözelerinde %10 yansımayı azaltırken, tek kristalli silikon gözelerde üst yapı genelde piramitsi dokulandırıldığından yansıma %1 oranında azalır.

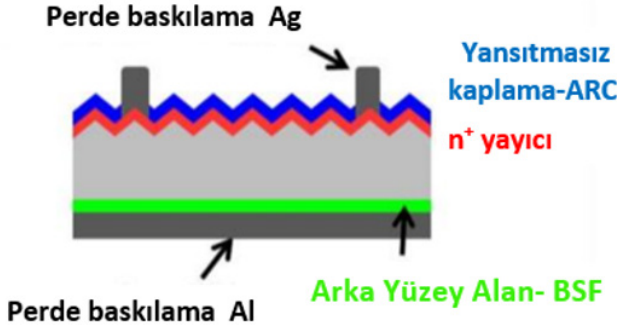
Perde baskılama güneş gözeleri ilk olarak 1970'lerde geliştirildiğinden, en iyi kurulmuş, en olgun güneş gözesi üretim teknolojisidir ve işlemin göreceli basitliği nedeniyle karasal FV modül pazarına hakimdir.

1995 yılında New South Wales üniversitesi tarafından geliştirilen *Gömülü kontak güneş gözesi teknolojisi* ile perde baskılama yönteminin dezavantajları ortadan kaldırılarak, göze performansı %25'e artırılmıştır. Yöntemin temeli, silikon yüzeyine oluklar açıp içine metal elektrot malzemeyi gömmeye dayanır (Şekil 2.2). Bu sayede üst metal kontakın göze üzerine yapacağı gölgeleme etkisi en aza indirgenmektedir [1, 10].



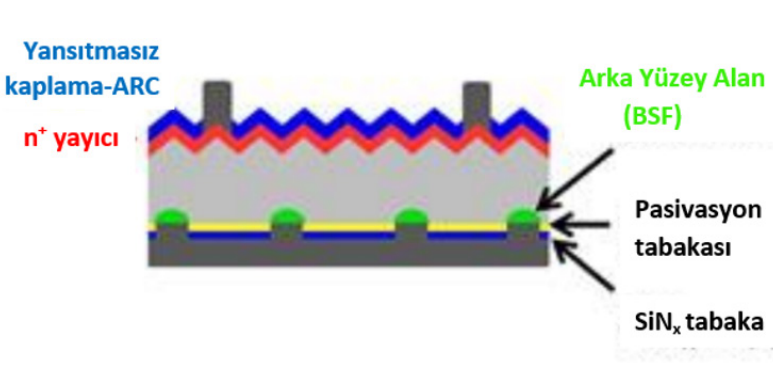
Şekil 2.2 Gömülü kontak gözenin şematik gösterimi

p-n eklemine oluşturmak için bor katkılı yongalara fosfor difüzyonu günümüzün standart endüstriyel teknolojisidir. 1960'lerde n-tipinden p-tipi yongaya geçişten sonra, alüminyum arka yüzey alanı (Al-BSF) kullanılması, arka tarafta azaltılmış bir birleşmeye izin veren n^+pp^+ yapısı ile sonuçlanmıştır [9-12]. Oldukça basit bu yapı (Şekil 2.3), sadece son on yıllarda %70-90 pazar payı ile lider konumunu korumuştur. 2015'te %85'in üzerindeki pazar payının 2019'da yarıya inmiş olmasına karşın, hala bir endüstri standardını temsil etmektedir. 2018'e kadar Al-BSF mimarisine sahip p-tipi çoklu kristalli gözeler pazarda iken, 2019'da baskın silikon yonga teknolojisi haline gelen passive edilmiş arka yayıcı kontak (PERC) mimarilerine büyük bir geçiş olmuştur. Bu hızlı geçişteki önemli etken, PERC üretim sürecinin, ön yüzeye olduğu kadar arka yüzeye de düşen ışığı kullanabildiği, iki yüzlü gözeler yapmak üzere uyarlanabilmesidir.



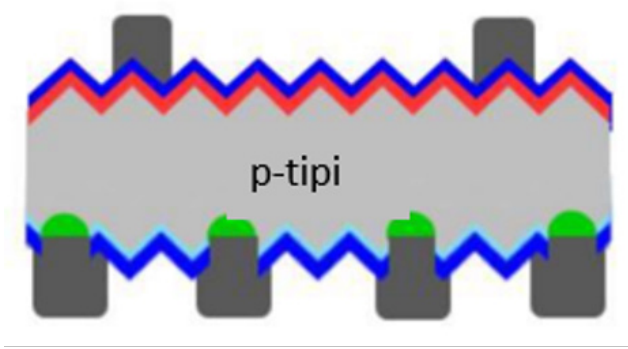
Şekil 2.3 Alüminyum Arka Yüzey Alan gözeler (Al-BSF)

Pasive edilmiş yayıcı arka kontak güneş gözeleri yüksek verimliliği ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle fotovoltaik endüstrisinde gelecek vadeden önemli bir güneş göze çeşididir. PERC gözeler, Al-Arka yüzey alanı sürecine, arka yüzey pasifleştirme tabakasının eklendiği ve daha fazla ışığın soğrulması için lazer kullanılarak küçük ceplerin açıldığı, ekstra adımlar eklenerek elde edilmiştir, Şekil 2.4'te arka yüzeyi dielektrik malzemeyle kaplanarak mikro delikler açılmış yapı görülmektedir, bu delikler sayesinde elektronların birleşme zamanı artarak güneş gözesinin toplam verimliliği artmaktadır. PERC gözelerin 2015 ile 2019 yılları arasında pazar payları %10'un altından yaklaşık %50'ye çıkmıştır.



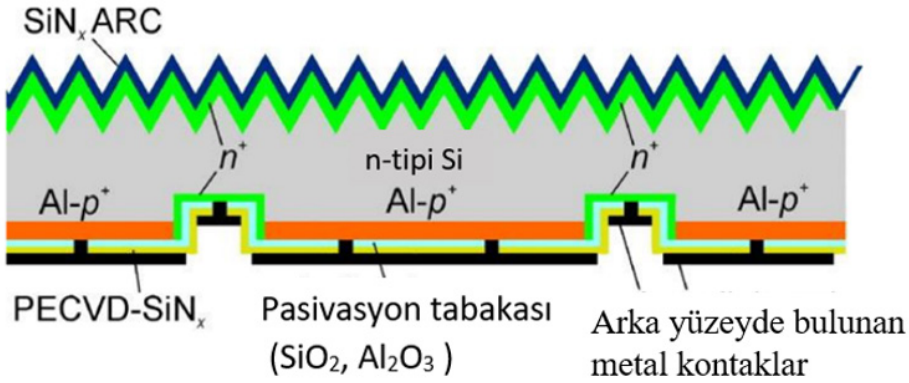
Şekil 2.4 Pasive edilmiş yayıcı arka kontak gözeler (Passivated Emitter Rear contact Cell-PERC)

PERC gözelerden uyarlanmış iki yüzeyli göze yapısında, ışığın erişmesine izin vermek için arka tarafta tüm yüzeyi kapayan arka katman yerine perde baskılı arka alüminyum parmak ızgarası kullanılmaktadır. 2019 yılında, iki yüzeyli teknolojilerin pazar payı yaklaşık %12 olmuştur. Otuz yılı aşkın bir süre önce ticari olarak tanıtılmış olmalarına ve maliyet nedeniyle beklenen ilgiyi görmemelerine karşın, iki yüzeyli FV modülleri 2018'den bu yana kayda değer bir geri dönüş yapmıştır. İki yüzeyli modüller artık zeminde monte edilen standart teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir [9-12].



Şekil 2.5 İki yüzlü (Bifacial cell) göze tasarımı

Birbirine bağlı arka kontaklı arka eklemli (Interdigitated Back Contact-IBC) güneş gözeleri Şekil 2.6'da görülmektedir. Gölgeleme kayıplarını önleyerek IBC her zaman en yüksek verimlilik potansiyeline sahip göze mimarisi olarak kabul edilmiştir ve seri üretim IBC göze geliştirilmesinde SunPower şirketi öncü rol üstlenmiştir [16]. Verimlilikleri %20'nin üzerinde olan ilk endüstriyel güneş gözeleri, bu mimariye dayanmaktadır. Aynı tarafta her iki tür katkılamının ve kontaktların bulunması nedeniyle, geleneksel göze yapısına kıyasla, daha fazla işlem karmaşıklığı içermektedir. SunPower, pasifleştirici kontaktlar uygulayarak %25'in üzerinde önemli bir verimlilik artışına ulaşmıştır. IBC yapısını heteroeklemli pasifleştirici kontaktlarla birleştirerek silikon güneş gözesi verimliliği için %26.7 değerini elde etmiştir [17].

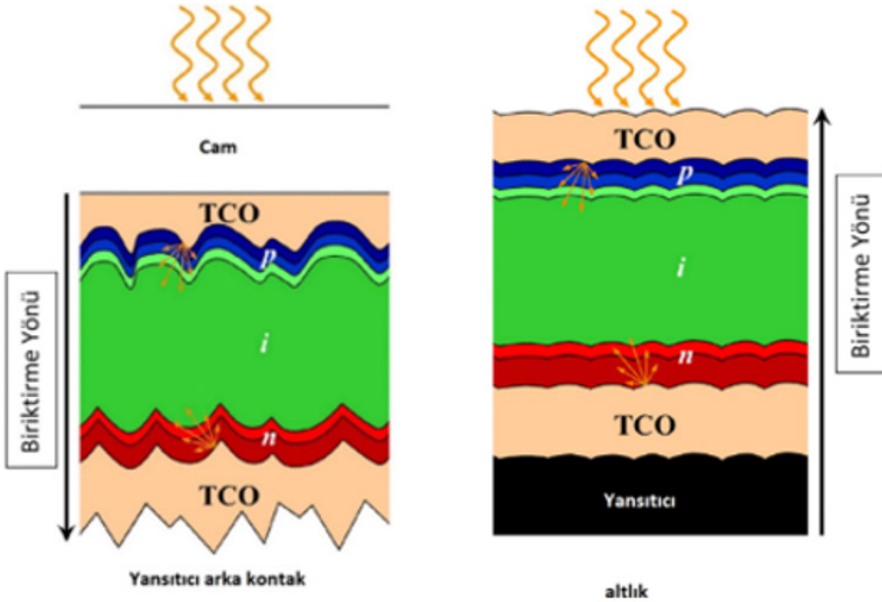


Şekil 2.6 Arka kontaklı arka eklemli güneş gözesi

2.2 İnce Film Güneş Gözeleri

İnce film güneş gözeleri, ilk nesil kristal silikon güneş gözelerine oranla daha düşük verime sahip olmalarına karşın, daha az malzeme gereksinimi, daha düşük maliyetle çelik, cam ve plastik gibi alt tabanlar üzerine hazırlanabilmeleri gibi avantajları nedeniyle üzerinde çok çalışılan konulardan birisi olmuştur [18-22].

İnce film güneş gözelerinde, homoeklemler, heteroeklemler, p-i-n ve n-i-p yapılı gibi farklı yapılar da eklemeler oluşturulabilmektedir. p-i-n ve n-i-p yapılı güneş gözelerinin kesiti Şekil 2.7’de verilmiştir. p-i-n yapısında, alttaş/altlık olarak kullanılan malzemenin saydam ve yüksek sıcaklık işlemlerine karşılık dayanıklı olması gerektiğinden, cam altlıklar üzerine biriktirme yapılır. n-i-p yapı için ise opak, saydam olmayan altlıklar gerektiğinden polimer, paslanmaz çelik gibi birçok malzeme kullanımı açısından esneklik vardır [18]. Gözenin güneş ışınımı alan yüzeyine yansımaya önleyici kaplama görevi görmesi amacıyla saydam iletken oksit (Transparent Conducting Oxide-TCO) tabaka kullanılmaktadır.



Şekil 2.7 a) p-i-n yapılı güneş gözesi b) n-i-p yapılı güneş gözesi

Özetle, ince film güneş gözeleri teknolojisinde dört ana göze gelecek vaat etmektedir. Bunlar amorf silikon, düşük maliyetli alttaş üzerine ince polikristal silikon, bakır indiyum diselenit/ kadmiyum sülfat, kadmiyum tellür güneş gözeleridir. Bu malzemelerin tümü 1-10 μm kalınlık aralığında olup büyük hacimli düşük maliyetli üretim teknolojilerine sahiptirler. Ar-Ge çalışmaları bu malzemelerin verimini arttırmak için devam etmektedir.

2.1.1 Amorf Silisyum Güneş Gözeleri

Amorf silisyum fotovoltaik güneş gözelerinin ortaya çıkışı, 1965 yılında Sterling ve arkadaşlarının silan gazı kullanarak alttaş üzerine silikon biriktirmesine uzanmaktadır. Kısa bir süre sonra 1969 yılında Chittick ve arkadaşları plazma eşikli kimyasal buhar biriktirme tekniği (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition-PECVD) ile ilk intrinsik amorf silikon filmleri üretmişlerdir. Spear ve LeComber 1975 yılında n tipi (bor ile katkılama) ve p tipi (fosfor ile katkılama) katkılamanın olası olduğunu göstermiş [23], Carlson ve Wronski ise ilk deneysel a-Si:H güneş gözelerini Radio Corporation of America (RCA) Laboratuvarlarında geliştirdiğini duyurmuşlardır [24]. O tarihlerde, saydam iletken oksit kaplı cam üzerinde biriktirilmiş, alüminyum arka kontaklı, tek eklemlili p-i-n yapıda hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) güneş gözesi %2.4 verimliliğe sahipti.

Bant aralığı 1.7 eV olan ve güneş ışığını kristal silikona oranla daha fazla soğuran, a-Si:H güneş gözelerinde, güneş ışığına açıldığında gözlenen ışık eşikli bozulma (**Light Induced Degradation**) diğer bir deyişle **Staebler Wronski** etkisi, bu malzemeler için bir dezavantaj gibi görünse de bu bozulmanın etkisinin az olduğu ince ve kaliteli a-Si:H gözelerin hazırlanması üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır [18,25,26].

Katkılı a-Si:H tabakaların difüzyon uzunluğunun kısa olması nedeniyle, p-n eklemesindeki elektrik alanda serbest yüklü taşıyıcıların ayrılması için yaşam süresi çok kısa olduğundan, n ve p tipi katkılı malzemeler arasına katılanmamış intrinsik a-Si:H tabaka yerleştirilerek, gözeler p-i-n yapıda hazırlanmaktadır [6]. p-i-n yapıli a-Si:H ince film güneş gözeleri; Cam/ saydam iletken oksit / (p) a-Si:H / intrinsik a-Si:H / (n) a-Si:H/ metal yapıda hazırlanmaktadır. Gözede ışık, p katkılı a-Si:H tarafından gelmekte ve bu tabaka pencere görevi üstlenmektedir. Gelen fotonların saf intrinsik tabakada soğrulmasıyla oluşan elektron-deşik çiftleri, p katkılı ve n katkılı a-Si:H tabakaları arasındaki saf intrinsik tabakada oluşan yapısal elektrik alan yardımıyla ayrılmakta, yüklü taşıyıcı-

cılar ön ve arka metal kontaklarda toplanarak güneş gözesinin güç üretmesine katkı sağlamaktadır. p-i-n yapılı a-Si:H gözelerinde;

- Işığın geldiği yüzeyde yansıtmasız kaplama (antireflection coating-ARC) amacıyla kullanılan saydam iletken oksit malzemesi olarak, kalay katkılı indiyum oksit ($\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, kısa adıyla ITO), flor katkılı kalay dioksit ($\text{SnO}_2:\text{F}$, kısa adıyla FTO), galyum ya da alüminyum katkılı çinko oksit ($\text{ZnO}:\text{Ga}/\text{Al}$)
- p tabaka olarak, karbon (C) ilave edilerek bant genişliği arttırılmış 10-30 nm kalınlıkta p katkılı a-SiC:H
- Arka kontak olarak yüksek yansıtma özelliği olan çinko oksit, alüminyum, gümüş

kullanılmaktadır.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H), yaklaşık 1.7-1.8 eV'lik bir optik aralığa sahiptir ve bu enerjinin altında enerjiye sahip fotonları soğurmaz. Göze içinde foton soğurulmasını arttırmak için, farklı bant aralıklarına sahip malzemelerin bir araya getirildiği çoklu eklemeler kullanmak gerekmektedir. a-Si:H gözeler kullanılarak ikili ve üçlü eklem yapıları ile laboratuvar ölçeğinde %15, ticari olarak %11 verimli güneş gözesi modülleri elde edilmiştir [18].

Heteroeklemler iki farklı yarıiletkenin üstün özelliklerini biraraya getirirler. Heteroeklem güneş gözelerinde ışınımı alan ön tarafta elektronik olarak ölü (pencere özelliği gösterecek), geniş bant aralıklı bir yayıcı tabaka tercih edilmekte, diğer yarıiletkenin ise ışınımı soğuracak bir soğurucu tabaka olması istenmektedir.

Basit a-Si:H/c-Si heteroeklemler, n ya da p tipi katkılanmış geniş bant aralıklı a-Si:H yayıcı tabaka ile daha dar bant aralıklı, a-Si:H'ye göre ters tipte katkılanmış c-Si ile oluşturulmaktadır. Ön kontak ve yansıma önleyici kaplama görevi görmesi için gözenin güneş ışınımı alan yüzeyine TCO uygulanmaktadır. Ayrıca yük taşıyıcılarının toplanması için gözenin arka ve öne kısmına metal elektrotlar bulunmaktadır. İdealde güneş ışınımının a-Si:H yayıcı tarafından soğurulmaması ve yayıcıdan soğurulmaksızın geçen fotonların c-Si(p)'de soğurulması beklenmektedir. Optik kayıpları azaltmak ve kontak oluşturmak amacı ile gözenin ön tarafı, TCO tabakası ile kaplanmaktadır. a-Si:H malzemenin yüksek soğuruculuğa sahip olması, ince tabakalar halinde, geniş yüzeylere uygulanabilmesi ve 200°C'ye yakın sıcaklıklarda hazırlanabilmesi bu malzemenin üstün özelliklerinden bazılarıdır. a-Si:H, c-Si ile karşılaştırıldığında geniş bant aralıklı bir

malzeme olduğundan iyi bir "pencere tabaka" özelliği göstermekte bu sayede gözenin mavi renge olan tepkisi yüksek olmaktadır. Ayrıca a-Si:H, c-Si dilim yüzeyini pasif hale getirmek için (passivation) kullanılan ideal bir malzemedir. c-Si'nin arka yüzüne, verimi arttırmak için BSF uygulamaları yapılmaktadır. a-Si:H/c-Si heteroeklemlerde, yüksek sıcaklıkta uygulanan Al-BSF yerine a-Si:H BSF'de uygulanabilmektedir [5, 9-10,19-20].

Heteroeklem güneş gözelerinin gelişimi ve bu konudaki gelişmeler incelendiğinde, heteroeklem yapının ilk kez 1954 yılında tek kristal Ge ve Si üzerine a-Si uygulanmasıyla (Bükreşli bir grup) tarafından çalışıldığı görülmektedir. Bu çalışmada, a-Si filmler, hidrojenlendirilme gerçekleşmeden ısı buharlaştırma ile hazırlandığından c-Si yüzey yeterli şekilde pasive edilememiştir [27]. 1974 yılında Fuha ve çalışma arkadaşları, kristal c-Si üzerine a-Si:H(i) uygulamış, 1983 yılında ise Hamakawa ve çalışma arkadaşları a-Si/c-Si göze uygulaması yapmışlardır [28]. 1994 yılında Sanyo Electric Co. [29] katkılanmış-a-Si/ μ c-Si(i)/c-Si yapısı ile ilk ince **katkılanmamış tabakalı heteroeklem** (heterojunction with intrinsic thin layer, HIT) göze uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Farklı çalışma grupları Sanyo'nun bu çalışmasından yola çıkarak n tipi c-Si kullanarak heteroeklem güneş gözesi geliştirmişlerdir [5,9-10].

c-Si(p) dilimler, c-Si(n) dilimler ile karşılaştırıldığında hem daha ucuz hem de daha yaygın kullanılan malzemeler olduğundan, soğurucu tabaka olarak c-Si(p) dilimi de tercih eden bir çok araştırma grubu bulunmaktadır. Katkılama türünün yarıiletken tabakaların elektronik özelliklerini etkilemesinin yanısıra, a-Si:H(n)/c-Si(p) veya a-Si:H(p)/c-Si(n) yapıda oluşturulan gözelerin bant bükülmeleri ve bant ofsetleri ve sonuç olarak da göze başarımlı potansiyelleri farklılık göstermektedir. Literatürde, farklı gruplar p-n yapının n-p yapıya göre daha yüksek başarımlı potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir [30-33].

c-Si yüzeyinde kopuk bağlar bulunmaktadır. c-Si üzerine katkılanmış veya katkılanmamış a-Si:H uygulanarak, hidrojen atomları kopuk bağlara bağlanabilmekte ve bu sayede kopuk bağlar doyurulabilmektedir. Bu etkiye pasivasyon adı verilmektedir. c-Si yüzeye katkılanmış a-Si:H uygulandığında katkılama malzemeleri de yüzeye bağlanabilmektedirler. Bu durum da arayüzde durumlar oluşmaktadır. a-Si:H(i) tabaka kullanıldığında katkılanmış tabaka ile c-Si ayrılmakta ve katkılama malzemelerinin etkilerinden kaçınılmaktadır [34]. Bu tabakanın bir diğer etkisi; a-Si:H(n,p)/a-Si:H(i) yayıcı tabakanın aynı kalınlıktaki a-Si:H(n,p) yayıcıya göre kusur yoğunluğunun daha az olmakta, yapıdaki

yeniden birleşmeler azalmakta ve daha fazla yük taşıyıcısı kontaklardan toplanabilmektedir [30].

a-Si:H/c-Si heteroeklem güneş gözelerinde göze başarımını arttırmak için BSF olarak Al-BSF'ye alternatif olarak, c-Si ile aynı katkılanmış, a-Si:H(n,p) veya a-Si:H(i)/a-Si:H(n,p) BSF tabakası kullanılmaktadır. a-Si:H BSF kullanımının en büyük avantajı bu tabakanın PECVD yöntemi ile düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesidir. a-Si:H(n,p) veya a-Si:H(i)/a-Si:H(n,p) BSF kullanıldığında c-Si arka yüzeyinin pasivasyonu yapılabilmektedir. Buna ek olarak bu tabaka kullanıldığında c-Si soğurucuda güneş ışınımı ile üretilmiş azınlık yük taşıyıcıları, bant ofsetleri ve bant bükülmelerinin yarattığı engel sayesinde arka kontaktaki elektronik ayna ile ön kontakta yönlendirileceklerdir [35].

2.2.2 CdTe İnce Film Güneş Gözeleri

Kadmiyum Tellür ilk olarak 1947 yılında, Frerichs'in fotoiletkenlik deneyleri sonucunda yeni bir elektronik malzeme olarak ortaya çıkmıştır [36]. 1959 yılında Rappaport ~%2.0 verimli tek kristal CdTe göze üretmeyi başarmıştır [37]. 1979 yılında Fransız CNRS grubu farklı bir yöntem geliştirerek %7.0 verime ulaşmışlar daha sonraki yıllarda %10.5 verimli gözeler üretmişlerdir [38]. 1980'lerde ve 1990'larda CdTe/CdS güneş göze üretiminde göze tasarımında, biriktirme yöntemlerinde, düşük dirençli kontak oluşumunda gelişmeler yaşanmıştır. CdTe'ün kimyasal olarak oldukça kararlı olması nedeniyle verim arttırmak için birçok farklı elementle ve bileşikle reaksiyonları denenmiş ve başarılı olunmuştur [9, 20-23].

CdTe'ün güneş gözesi uygulamaları için oldukça uygun malzeme olarak ele alınıp incelenmesinde [39-40]:

- Doğrudan ve güneş spektrumu ile eşleşen bant aralığı ile fotovoltaik enerji dönüşümü için ideal bir yarıiletken olması
- CdS ile güçlü p-n eklem oluşturma eğilimi

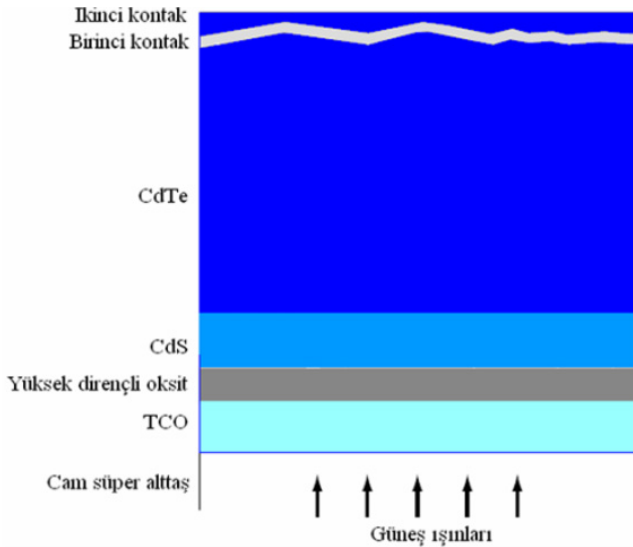
önemli etkenler olmuştur.

CdTe göze üretiminde birçok yöntem vardır. Bunların içinde, Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi (Physical Vapor Deposition, PVD), halen ticari olarak üretimi devam eden yöntemdir. Cd ve Te₂ buharının bir yüzey üzerine yoğunlaşması üzerine kurulan bu yön-

temin temeli, Cd ve Te_2 buharlarının ve CdTe katısının arasındaki dengedir. Elementsel kaynakların eş buharlaşması ile üretilebileceği gibi aynı zamanda katı CdTe kaynağın doğrudan süblimleşmesi ile ya da taşıyıcı gazlar kullanarak buhar nakli ile de üretilmektedir. Alttışa gelen buharın birikim hızı ve düzenliliği kaynağın sıcaklığı, kaynağın alttışa olan uzaklığı, pota geometrisi ve toplam basınç değerleri ile ayarlanmaktadır [2,9-10]. Son yıllarda polikristal CdTe bazlı güneş gözelerinin verimi, CdTe ile p-n birleşimini oluşturmak için kullanılan CdS katmanından kaynaklanan kayıplar ortadan kaldırılarak, %21'e yükselmiştir. Bir yarıiletkenin bant aralığı, malzemenin bileşimi değiştirilerek ayarlanabilir. Farklı bant aralıklarına sahip iki bileşenin ara bileşiminde, "bant aralığı eğilmesi" (bandgap blowing) denilen minimum bir bant aralığı vardır. $Cd(Te_{1-x}Se_x)$ ve $Cd(Te_{1-x}S_x)$ alaşımlarında meydana gelen bu etki nedeniyle yüksek verimli gözelerde soğurucu tabaka olarak saf CdTe yerine, $Cd(Te_{1-x}Se_x)$ ve $Cd(Te_{1-x}S_x)$ önerilmektedir [41]. Güncel olan bu konu üzerine akademik çalışmalar devam etmektedir.

Tüm yüksek verimli CdTe güneş gözelerinin yapısı Şekil 2.8'de verilmiştir. Gözenin yapısını cam alttış tabaka, TCO, yüksek dirençli oksit tabaka, n-tipi CdS pencere tabaka, p-tipi CdTe soğurucu tabaka ve alttış tabaka oluşturur.

Alttış: Genel olarak alttış malzemesi olarak saydam cam kullanılır. Maliyeti düşük olan soda-kireç camı ile pencere camı alttış olarak uygundur. Yüzeyin pürüzsüzlüğü



Şekil 2.8 Temel CdTe güneş göze yapısı

üretilecek olan ince film gözenin kalitesini arttırır. İşlem sıcaklığı 520° C ile sınırlıdır. Eğer daha yüksek sıcaklıklarda film birikimi yapılacaksa alttaş olarak borosilikat cam kullanılır. Bu cam malzemesi, 600°C sıcaklığın üstünde herhangi bir yumuşama oluşmadan işlenebilir.

Pencere tabakası: CdTe gözenin alttaşını üretme işleminde ilk adım, alttaş olarak kullanılan camı SnO₂, In₂O₃ gibi saydam iletken oksit tabakayla kaplamaktır. Böylece üst kontak oluşturulurken ışığın optik iletimi de engellenmemiş olur. Birçok CdTe göze yapısında n-tipi yarıiletken olarak çok ince bir CdS tabaka kullanılır. Fotonların soğurucu CdTe tabakasına ulaşma olasılığını arttırmak için olabildiğince ince üretilmelidir. CdS ile TCO tabakaları arasına biriktirilen yüksek dirençli oksit tabakası göze akım yoğunluğunu arttırıcı bir etkidir.

CdTe soğurucu tabaka: CdTe film biriktirme işlemlerinin sonunda gözenin kristalografik şeklini [40], elektriksel ve optik özelliklerini (fotoakımın ve açık-devre gerilimin artışı) iyileştirmek için “CdCl₂ birikimi” gerçekleştirilir. Bu işlemi gerçekleştirmek için birçok farklı yöntem vardır. Bunlardan bazıları CdTe tabakasını CdCl₂ içeren bir çözeltiye bırakıp kurutma işlemi [42], CdCl₂ buharında biriktirme işlemi [43] ve Cl₂ gazına maruz bırakma işlemidir [44].

Alt kontak: Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, gözenin alt kontağı ilk olarak CdTe tabakasından ikinci katman olarak da akım taşıyan iletken oluşur. Alt kontak oluştururken yüzey kimyasal aşındırma ile Te ile zenginleştirilir ve bakır malzeme ile kaplanır.

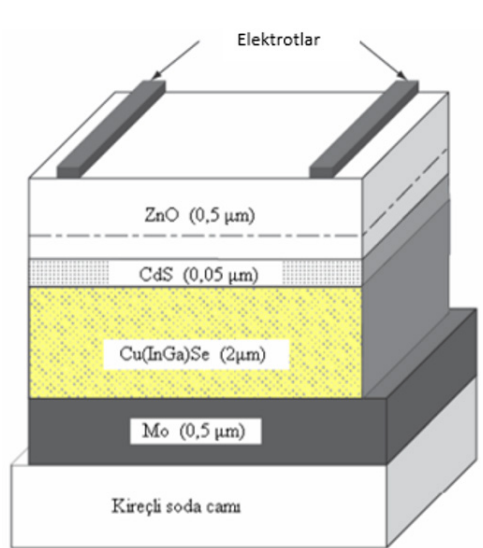
2.2.3 Cu(InGa)Se₂ (CIGS) İnce Film Güneş Gözeleri

Genellikle CIGS olarak bilinen I-III-VI grubu kalkopirit (Ag,Cu)(In,Ga)(S,Se)₂ yarıiletken alaşımları, güneş gözeleri için uygun soğurucu malzemelerdir. Maliyet bakımından ileriki yıllarda en çok gelişme kaydetmesi beklenen bir güneş göze teknolojisidir. Düşük maliyetli ince film üretimi, büyük alana yarıiletken malzeme birikimi ve tek parça modül üretimi gibi avantajları vardır. Bunlardan daha önemlisi hem göze üretiminde hem de modül üretiminde yüksek verimlere ulaşılmasıdır. Bunun dışında Cu(InGa)Se₂ güneş gözeleri dış alan uygulamalarında uzun zamanlı kararlılık göstermiştir [45]. Büyük alanlı uygulamaların dışında aynı zamanda oldukça hafif ve esnek alttaş malzemelerin üzerine kaplanarak uzay çalışmalarında da kullanılmaktadır. Cu(InGa)Se₂ gözelerin sentezi ve karakterizasyonu her ne kadar 1953 yılında Hahn tarafından resmen bildirilse de [46] gözeler ile ilgili çalışmalar 1970’li yıllarda Bell Laboratuvarlarında gerçekleşmiştir.

Bell laboratuvarında çalışan bilim adamları bu malzemelerle birçok kristal büyütürken malzemelerin yapısal, elektronik ve optik özelliklerini karakterize etmişlerdir [47,48]. Yapılan ilk Cu(InGa)Se_2 güneş gözesi n-tipi CdS'yi p-tipi tek kristal CuInSe_2 üzerine buharlaştırarak yapılmıştır [49]. Ancak kaliteli tek kristal büyütmenin zorluğundan dolayı çalışmalar ince film üzerine yoğunlaşmıştır. İlk ince film $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ göze Kazmerski tarafından üretilmiştir [50]. CuInSe_2 'nin soğurucu tabaka yasak bant aralığı, indiyumun galyumla kısmen yer değiştirmesi ile 1.02 eV'den 1.1-1.2 eV'ye çıkması sonucu verimde gözlenen artış önemli gelişmeler arasındadır [51].

CuInSe_2 uygun elektronik ve optik özelliklerinden dolayı (doğrudan bant yapılı ve yüksek soğurma katsayılı olması) güneş göze uygulamaları için idealdir. CuInSe_2 tabanlı güneş gözeleri dünyada en az 10 grup tarafından üretilmektedir. Üreticiler birçok farklı teknik uygulasa da tüm gözelerin temel yapısı aynıdır. Alttaş üzerine büyütülen $\text{Cu(InGa)Se}_2/\text{CdS}$ eklemi ve molibden (Mo) alt kontak yapılarından oluşur (Şekil 2.9) Birçok üretici firma Cu(InGa)Se_2 tabanlı modüllerin ticari gelişimi ile yakından ilgilenmektedir. Bunların arasından Shell Solar Industries (SSI), Würth Solar, Energy Photovoltaics, International Solar Electric Technology, Global Solar Energy, Showa Shell ve Matsushita firmaları üretim teknolojileri açısından öncü olanlardır.

Cu(InGa)Se_2 ince film üretiminde birçok farklı yöntem vardır. Ticari olarak en verimli



Şekil 2.9 Tipik bir Cu(InGa)Se_2 güneş gözesinin kesit görünümü

üretimi elde etmek için düşük maliyette yüksek biriktirme hızı elde edilmelidir. Ticari amaçlı göze ve modül üretiminde ümit vaat eden iki genel yaklaşım vardır. Bunlardan ilki vakum ortamında tüm bileşenlerin (Cu, In, Ga, Se) eşzamanlı olarak buharlaşarak, 400-600°C sıcaklığına kadar ısıtılmış alttaşın üzerinde birikmesi yöntemidir. Bu yöntem tek aşamalı bir işlemdir. İkinci yaklaşım ise iki aşamalı bir yöntemdir. Bileşenler, film oluşumu için alttaş üzerine yollanmadan önce tavlanma işlemine maruz bırakılır.

Alttaş: Cu(InGa)Se_2 güneş göze üretiminde alttaş malzemesinde en yaygın olarak pencere camı olarak bildiğimiz kireçli soda camı kullanılır. Maliyetinin düşük olması ve yaygın olarak kolay bulunabilmesi malzemeye olan talebi arttırır. Cu(InGa)Se_2 göze birikiminde alttaş sıcaklığı en az 350 °C, en fazla 550 °C aralığındadır. Bu değerler arasında alttaş formunu korumalı ve yumuşama gözlenmemelidir. Kireçli soda camlarında belli oranlarda gözlenen safsızlıkların modül üretimine zarar verici etkileri olduğundan bazı üreticiler, maliyeti çok daha fazla olmasına karşın, Borosilikat camı tercih etmiştir. Cam dışında bazı üreticilerin kullandığı metal ya da plastik alttaşlar hafif ve esnek olmalarından dolayı tercih edilirler.

Alt kontak: Molibden kontak yapımı tüm yüksek verimli gözelerde kullanılır. Genellikle doğru akım (DC) kopartma (sputtering) yöntemi ile biriktirilir. Mo tabakasının kalınlığını, istenilen direnç değeri belirler.

CdS tabakası: Yapılan ilk deneysel yüksek verimli CuInSe_2 gözeler, p-tipi tek kristal CuInSe_2 ile n-tipi CdS eklemleri ile oluşturulmuştur. Bu nedenle ilk ince film çalışmalarında eklem oluşumu için CuInSe_2 film üzerine CdS biriktirilmiştir. CdS tabakasını oluşturmak için kimyasal banyo birikimi (chemical bath deposition, CBD) metodu uygulanır.

Saydam kontaklar: Üretilen gözelerin elektriksel kontakları hem ışığı geçirmeli hem de yüksek iletkenliğe sahip olmalıdır. Bu yüzden firmalar SnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) ve ZnO gibi saydam iletken oksit tabakalar üretmektedirler. TCO katmanının üzerine gelen ışığı olabildiğince alt tabakalara geçiren ve gölgelenme yapmaması için parmaklı yapıda olan, metal kontaklar biriktirilir.

Cu(InGa)Se₂ ortak buharlaşma: En yüksek verimli gözeler bileşenlerin elementsel kaynaklardan ortak buharlaşması ile elde edilmiştir. Metallerin farklı buharlaşma sıcaklıkları olduğundan her kaynak için bir göze kullanılır. Bakır (Cu) kaynak için göze sıcaklığı 1300-1400^o C, indiyum (In) kaynak için 1000-1100^o C, galyum (Ga) kaynak için 1150-1250^o C ve selenyum (Se) kaynak için 300-350^o C aralığında olmalıdır. Üretilecek olan filmin kompozisyonu, akı dağılımı ve püskürtme hızı belirlir [4]. Yöntemin en büyük avantajı, Cu(InGa)Se₂ film içeriğinin ve bant aralığının üretim esnasında kontrol edilebilmesidir. Sistemin dezavantajı büyük ölçekli üretimler için uygun olmayışıdır.

Selenizasyon: Cu(InGa)Se₂ film büyütme işleminde bir diğer yöntem iki aşamalı işlem ya da selenizasyon olarak adlandırılır. Showa Shell ve Shell Solar firmaları tarafından ticari amaçlı pilot üretimi gerçekleştirilmiş ve geniş alana sahip modüllerde %13.4 verime ulaşılmıştır [52]. Bu yöntemde soğurucu katman oluşumu için biriktirme işlemi ile bileşik oluşturma işlemi birbirinden ayrılır. Tabakaların H₂Se içinde selenizasyonu ve daha sonra Se ortamında uygulanan ani ısı işlem sonucunda yüksek verimli soğurucu katmanlar elde edilir [53]. Bu ardışık işlemler büyük alan göze uygulamaları için oldukça uygundur. İlk olarak Cu, In, Ga katmanları kopartma (sputter) biriktirme ile Mo kaplamalı cam alttaş üzerine biriktirilir. Daha sonra filmler 400-500^o C sıcaklığında H₂Se ya da Se buharı ile tepkimeye sokulur. Bir üçüncü işlem olarak film kalitesini arttırmak için ani ısı işlem (rapid thermal process, RTP) her bir katmana ayrıca uygulanır.

CIGS güneş gözelerinin günümüzdeki yeri değerlendirildiğinde, sahada yapılan modül çalışmaları, bu ürünlerin onlarca yıldır düşük bozulma oranları sağladığını göstermiştir ve bu nedenle 50 yıllık ömürler gerçekçi bir hedeftir. Yapılan Ar-Ge sonuçları %25 verimliliğe sahip gözeler ulaşılabilir durumda olduğunu göstermektedir [12].

2.3 Yeni Nesil Güneş Gözeleri

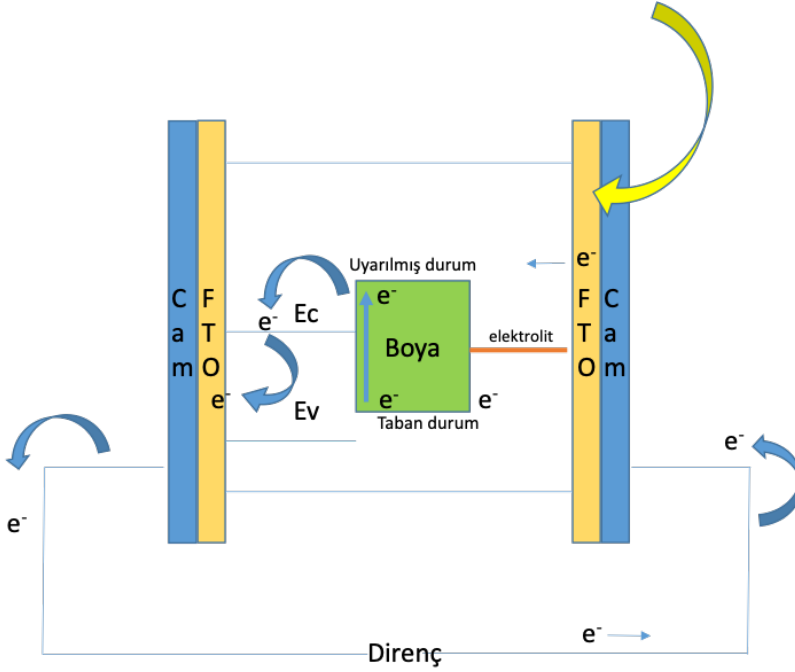
2.3.1 Boya Bazlı Güneş Gözeleri (Dye-Sensitized Solar Cell -DSSC)

Boya bazlı güneş gözeleri (DSSC, DSC veya DYSC [54]), görünür ışığı elektrik enerjisine dönüştüren üçüncü nesil bir fotovoltaik güneş gözeleridir. Bu güneş gözesi sınıfı, doğanın ışık enerjisini soğurmasını taklit etme biçiminden dolayı yapay fotosenteze benzetilebilir. Boya bazlı güneş gözeleri 1991 yılında İsviçre’de Michael Graetzel ve Brian O’Regan tarafından icat edilmiştir [53]. Bu nedenle boya bazlı güneş gözelerine genellikle Graetzel gözeleri de denmektedir. DSSC, iç ve dış mekanlarda çok çeşitli ışık koşullarında elektrik üretmek için kullanılabilir, kullanıcının hem yapay hem de doğal ışığı çok çeşitli elektronik cihazlara güç sağlamak için enerjiye dönüştürmesini sağlayan bir teknolojidir. DSSC ince film güneş gözesi grubuna ait düşük maliyetli bir güneş gözesidir [54]. Boya bazlı güneş gözeleri temelde ışığa duyarlı bir anot ile elektrolit arasında foto-elektrokimyasal sistem oluşturan bir yarıiletkeneye dayanmaktadır. DSSC’lerin birçok ilgi çekici özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Geleneksel rulo baskı tekniklerini kullanabildikleri için üretimleri basittir,
- Yarı esnek ve yarı saydamdır yüzeylere uygulanabildiğinden cam esaslı sistemler için geçerli olmayan çeşitli kullanımlar sunar,
- Kullanılan malzemelerin çoğu düşük maliyetlidir.

Uygulamada platin (Pt) ve rutenyum (Ru) gibi çok sayıda pahalı malzemenin ortadan kaldırılmasının zor olduğu görülmüştür. Ayrıca sıvı elektrolit, bir gözenin tüm hava koşullarında kullanıma uygun hale getirilmesinde ciddi zorluklar yaratmaktadır. Dönüşüm verimliliği en iyi ince film gözelerden daha az olduğu da yapılan çalışmalardan görülmektedir.

Çalışma elektrotu, boya, elektrolit ve karşı elektrot DSSC için dört anahtar parametredir. DSSC’lerde, elektrolit sızıntısını önlemek için bir bant yardımı ve ince bir elektrolit tabakası ile karşı elektrotun da yardımıyla sıkıştırılarak bir çalışma düzeneği oluşturulur. DSSC’lerin yapısı ve çalışması ile ilgili bileşenler Şekil 2.10’da gösterilmiştir [55-56]:



Şekil 2.10 Boya Bazlı Güneş Gözelleri çalışma prensibi

DSSC'ler tipik olarak iki iletken şeffaf malzeme tabakası arasında akım toplayıcıları olarak da görev yapan katalizör ve yarıiletkenin kaplanmasıyla yapılır. Flor katkılı kalay oksit (FTO, SnO_2 : F) ve indiyum katkılı kalay oksit (ITO, In_2O_3 : Sn) DSSC'lerde genellikle iletken şeffaf alttaş olarak uygulanır [57]. Çalışma elektrotları, TiO_2 , Nb_2O_5 , ZnO , SnO_2 (n-tipi) ve NiO (p-tipi) gibi ince bir oksit yarıiletken materyal tabakasının FTO veya ITO'dan yapılmış saydam bir iletken cam plaka üzerine yerleştirilmesiyle hazırlanır. Bu oksitler, 3-3.2 eV'lik geniş bir enerji bant aralığına sahiptirler. Boyalar ise, gelen ışığın maksimum soğurulmasında görevli bileşendir. DSSC'lerde karşıt elektrot olarak genellikle Pt veya karbon (C) kullanılır [58]. Çalışma ve karşıt elektrotları birbirine kapatılarak, elektrolit bir şırınga yardımıyla bu elektrotlar arasında doldurulur. Karşı elektrot, iyot (I^-/I_3^-) sıvı elektrolitin indirgenmesini katalize ederek ve deşik taşıma malzemelerinden deşik toplamaktadır.

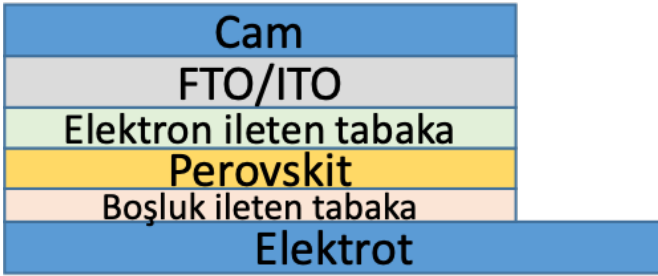
Elektrik akımı üretme işlemi dört aşamalı olarak gerçekleşir.

1. Bir foton, elektronu uyarılmış duruma yükseltmek için boya tarafından soğurulur,
2. Elektron TiO_2 filme aktarılır,
3. Elektron, TiO_2 'nin iletkenlik bandına geçmesi durumunda enerji oluşur,
4. Göze tarafından aradaki farka karşılık gelen bir foto-gerilim üretilir.

2.3.2 Perovskit Güneş Gözeleri

“Perovskite solar cell” ismi, perovskit yapısı olarak adlandırılan emici malzemelerin ABX_3 kristal yapısından türetilmiştir [59]. Perovskit güneş gözeleri, bir tür ince film gözedir ve karakteristik kristal yapılarından sonra adlandırılır. Perovskit gözeler, alt tabaka olarak bilinen altta yatan bir destek tabakası üzerine basılmış, kaplanmış veya vakumla bırakılmış malzeme katmanları ile inşa edilmiştir. Genellikle imalatı kolaydır ve kristal silikona benzer verimliliklere ulaşabilirler. Laboratuvarında, perovskite güneş gözesi verimliliği, 2009’da %3’ten 2020’de %25’in üzerine çıkarak diğer tüm FV malzemelerinden daha hızlı iyileşmiştir. Ticari olarak uygulanabilir olması için, perovskite FV gözelerinin açık havada 20 yıl hayatta kalabilecek kadar kararlı hale gelmesi gerekmektedir, bu nedenle araştırmacılar onları daha dayanıklı hale getirmek ve büyük ölçekli, düşük maliyetli üretim teknikleri geliştirmek için çalışmaktadırlar. En yaygın çalışılan perovskite emici, halojen içeriğine bağlı olarak 2.3 eV ile 1.6 eV arasında optik bir bant aralığı olan X, I, brom (Br^-), klor (Cl^-) gibi bir halojen iyonu olan metilamonyum kurşun trihalid ($CH_3NH_3PbX_3$). Formamidinyum kurşun trihalid ($H_2NCHNH_2PbX_3$) 1.5-2.2 eV arasında bant aralığına sahiptir. Minimum bant aralığı, tek bir eklem gözesi için, metilamonyum kurşun trihalidinden daha optimaldir, bu nedenle daha yüksek verime sahip olmalıdır [60]. Ortak bir endişe, perovskite materyallerinin bir bileşeni olarak kurşunun dahil edilmesidir; $CH_3NH_3SnI_3$ gibi kalay (Sn) bazlı perovskit emicilere dayanan güneş gözelerinin de daha düşük güç dönüşüm verimlerine sahip olduğu bildirilmiştir [61-63]. Şekil 2.11’de temel yapısı verilen perovskite güneş gözeleri, işlemlerinin basitliğinde geleneksel silikon güneş gözelerine göre avantaj sağlamaktadır. Geleneksel silikon gözeleri, yüksek sıcaklık gerektiren (1000°C’ye kadar) gerektiren pahalı, çok adımlı işlemler ve yüksek saflıkta silikon tabakalar üretmek için özel temiz oda tesislerinde vakum sistemi gerektirir [64]. Organik-inorganik perovskit materyaller, geleneksel bir laboratuvar ortamında daha basit ıslak kimyasal işleme teknikleriyle üretilebilir fakat bu tekniklerin ölçeklendirilmesi daha zordur [65]. En önemlisi, metilamonyum ve formamidinyum kurşun trihalidler, göreceli olarak uygulanabilirlik potansiyeline sahip olan çeşitli çözücü teknikleri ve buhar biriktirme teknikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çözelti tabanlı işlemde, kurşun halid ve metilamonyum iyodür çözücü içinde çözülebilir ve bir alttaş üzerine döndürerek kaplanabilmektedir. Dönel kaplama sırasında kendiliğinden ısı iletimi ve sonrasında buharlaşma, malzeme içindeki güçlü iyonik etkileşimler nedeniyle kristalize perovskit malzemenin yoğun tabakaların oluşmasına sebep olmaktadır. Organik bileşen ayrıca daha düşük kristalleşme sıcaklığına

katkıda bulunmaktadır. Ancak basit dönele kaplama homojen tabakalar vermez [66]. Basit çözelti işleme, katmanda kusurların varlığına neden olur ve bu durum güneş gözesinin verimini azaltır. Bununla birlikte oda sıcaklığı çözücü-çözülme etkileşmesini kullanan başka bir teknik sayesinde film yüzeyinde boşluklar oluşturmadan birkaç santimetre kare alanlara nanometre mertebesinde yüksek kaliteli kristal filmler üretilebilir. Bu yöntemde perovskit n-methylpyrrolidone (NMP) veya dimethylformamide (DMF) adlı bir çözücü içinde çözülür ve bir alttaş üzerine dönele kaplama yöntemiyle kaplanır. Daha sonra alttaş ısıtma yerine, NMP çözücüyü seçerek tutan ve uzaklaştıran ikinci bir çözücü olan dietileter (DEE) içinde yıkanır. Sonuçta perovskit kristallerinin ultra yumuşak bir filmi elde edilir [67].



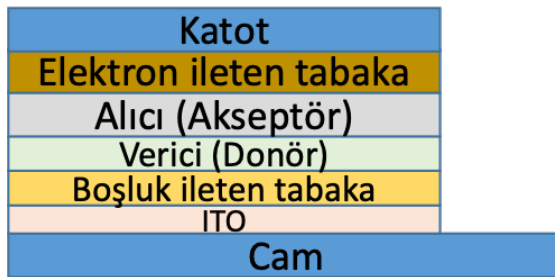
Şekil 2.11 Perovskit güneş göze yapısı

Buhar destekli tekniklerde dönele kaplı kurşun halojenür, yaklaşık 150°C sıcaklıkta metilmonyum iyodür buharı varlığında tavllanır. Bu teknik, daha geniş alanlarda uygulanmış ince filmlere olanak tanıdığından, çözelti işleme yöntemi üzerinde bir avantaja sahiptir [68]. Bu çok eklemlili güneş gözelerinin üretiminde de uygulanabilir. Ayrıca buharla biriktirme teknikleri, basit çözelti işleme ile elde edilen tabakalara nazaran daha homojen filmlerin elde edilmesini sağlar. Her iki teknik de düzlemsel ince film tabakalarına veya metal oksit kaplamalar gibi mezoskopik tasarımlarda kullanılabilir. Perovskit veya boya duyarlı güneş gözeleri için böyle tasarımlar yaygındır. İşlem maliyeti ve karmaşıklığı, silikon güneş gözelerinden önemli ölçüde daha azdır. Buharlaştırarak kaplama veya

buhar destekli teknikler, çözücü kalıntıları riskini azaltan başka çözücülerin kullanılması ihtiyacını azaltmaktadır. Perovskite güneş gözeleri ile ilgili güncel sorunlar, malzemenin standart çevre koşullarında bozulması nedeniyle verimin düşmesi gözlemlendiğinden kararlılık etrafında dönmektedir. Genel olarak güneş gözeleri silikon veya kadmiyum tellürid gibi inorganik fotovoltaik maddelere dayananlar ve poly[N-9-heptadecanyl-2,7-carbazole-alt-5,5-(4',7'-di-2-thienyl-2',1',3'-benzothiadiazole)] (PCDT-BT) gibi spesifik organik bileşiklere dayananlar olmak üzere iki ayrı gruba ayrılabilir. Her ikisinin de avantajları ve dezavantajları vardır. İnorganik malzemeler halihazırda endüstriyel olarak sağlam bir yapıya sahiptir, ışığı %20'den daha yüksek verimlilikle elektriğe dönüştürebilir ve 25 yıldan daha uzun ömürlü güneş panelleri oluşturabilir. Dezavantajı, özellikle silikon ile gerekli olan hammaddelerin pahalı olabmesidir. Organik güneş gözeleri potansiyel olarak düşük maliyetli malzemelerdir. Bununla birlikte, laboratuvar şartlarında bile, organik güneş gözeleri %10' dan daha fazla verim elde etmek için çalışmalar devam etmektedir. Daha da önemlisi, organik bileşikler ışık altında kademeli olarak ayrışır bu yüzden panel ömrü yıllarca değil ay ya da hafta kadar küçük bir zamandır. Sonuç olarak, hiç kimse altı ayda bir değiştirmek için çatılarına güneş paneli takmak istemediğinden bu organik materyaller güneş panelleri üretmek için nadiren kullanılmaktadır. İdeal olarak, inorganik malzemelerin performans ve uzun vadeli kararlılığına sahip ultra düşük organik malzeme maliyeti olan güneş gözeleri üretmek istenmektedir.

2.3.3 Çift katmanlı organik güneş gözesi (Bilayer Organic Solar Cell)

Şekil 2.12'de gösterildiği gibi, iki katmanlı bir güneş gözesinin yapısı sırasıyla bir anot, deşik toplama katmanı, donör (verici) ve akseptörden (alıcı) oluşan aktif katman, elektron toplama katmanı ve katottan oluşur.

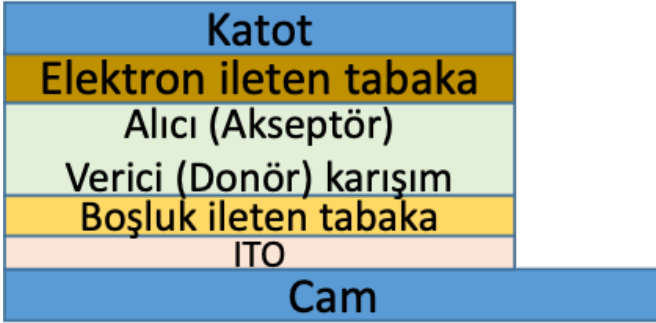


Şekil 2.12 Çift katmanlı (bilayer) güneş gözesi yapısı.

Deşik (boşluk) toplama ve elektron toplama tabakaları, omik bir kontak oluşturmak için elektrotların iş fonksiyonlarını değiştirmek için kullanılır. Eksitonların ayrıldığı donör ve akseptör arasında tek bir arayüz vardır. İki tabakalı güneş gözesi, güneş gözesinin temel çalışma prensibini en iyi açıklayan en basit yapıdır. İki tabakalı güneş gözesi için önemli bir dezavantaj, organik maddelerin kısa eksiton difüzyon uzunluğunun (eksitonların yeniden birleşiminden önce yayılabileceği mesafeye eksiton difüzyon uzunluğu denir.) donör ve akseptör tabakaların kalınlığını sınırlamasıdır.

2.3.4 Hacimli Heteroeklem Organik Güneş Gözeleri (Bulk Heterojunction Solar Cells, BHJ)

Şekil 2.13'te gösterilen BHJ yapısı, genellikle donör (verici) ve akseptör (alıcı) malzemelerin bir çözelti içinde karıştırılması, daha sonra da karıştırılmış çözeltinin bir alttaş üzerinde döndürülmesi sonucu aktif tabakanın oluşturulmasıyla oluşturulur.



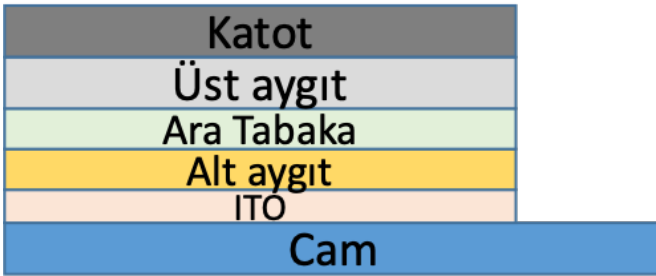
Şekil 2.13 Hacimli heteroeklem organik güneş gözesi yapısı.

Sonuçta ortaya çıkan film, verici ve alıcı malzemelerin iç içe geçmesiyle elde edilen nano boyutta bir yapıdır [69]. Film içindeki faz ayrımı genellikle 10-20 nm' dir ve bu, birçok organik yarıiletkenin eksiton difüzyon uzunluğu içerisindeydir. BHJ'lerde küçük nano ölçekli faz ayrılmasından dolayı, iki tabakalı güneş gözeleriyle karşılaştırıldığında bu gözelerde daha kalın bir aktif katman üretilebilir. Bununla birlikte, verimli BHJ'ler, elektronların deşik taşıyan ve deşiklerin elektron taşıyan elektrota ulaşmasını sağlayan bir çalışma sistemi oluşturmak için yeterince büyük alana ihtiyaç duyarlar. Bu sistem olmadan, yükler bir verici veya alıcı açısından zengin bir alanda tuzaklanabilir ve rekombinasyona uğrayabilir. BHJ'ler, katmanlı fotoaktif yapılara göre avantaja sahiptir, çünkü benzer performans seviyelerini koruyarak kolaylıkla etkili foton absorpsiyonu için yeterince kalın yapılabilirler. BHJ'ler, en yaygın olarak iki bileşeni içeren bir çözelti

oluşturulması, kaplama (örneğin, damlatarak (drop casting) ve dönele kaplama (spin casting) ve daha sonra genellikle bir tavlama basamağının yardımı ile iki fazın ayrılmasına izin verilmesi ile oluşturulur. İki bileşen, iki elektrotu birbirine bağlayan iç içe geçen bu sistemde kendiliğinden oluşur [70]. Bir fotonun soğurulmasıyla, elektronlar alıcı bölgesine doğru hareket eder, daha sonra aygıt boyunca taşınır ve bir elektrot tarafından toplanmaktayken, deşikler ise ters yönde hareket eder ve diğer tarafta toplanır. Elektron ve deşiklerin elektrotlara toplanması zayıf, zayıf yük aktarımına sebep olmaktadır [71-73]. Çoğu BHJ göze iki bileşenden oluşmaktadır ancak üç bileşenli gözeler de araştırılmıştır [74]. İkincil bir p-tipi donör polimer olan üçüncü bileşen, güneş spektrumunun farklı bir bölgesinde ışığı soğurmaktadır. Bu teorik olarak soğurulan ışık miktarını artırır. Bu üçlü gözeler “ternary solar cell” olarak adlandırılmaktadır.

2.3.5 Ardışık Yapılı (Tandem) Organik Güneş Gözeleri

Zayıf soğurma kuvveti ve aktif yarıiletken tabakanın soğurma aralığının sınırlarını genişletmek için tandem güneş gözeleri üretilmesi önerilmiştir (Şekil 2.14) [75].



Şekil 2.14 Tandem göze yapısı.

Zayıf soğurma ve aktif yarıiletken tabakanın soğurma aralığı sınırlarını ortadan kaldırmak için, güneş gözelerinin tandem olarak üretilmesi önerilmiştir. Güneş gözelerinin seri halde bağlanması, tandem yapıda farklı soğurma bölgelerine sahip büyük bir V_{oc} ve aktif katmanlar üretecektir. Bu durum gözenin geniş bir dalga boyu aralığında ışık soğurmasına izin verebilir. Daha büyük soğurma aralığı ve daha büyük açık devre gerilimi (V_{oc}) (poly (3-hexylthiophene), P3HT):phenyl-C61-butyrac acid methyl ester, PCBM ve Çinko fitolasiyanin (ZnPc) : Fulleren (C_{60}) tandem güneş gözesinde gösterilmiştir [76]. Tandem gözelerde, termal buharlaşma ile üretilen ara tabaka olarak ince bir altın (Au) veya gümüş (Ag) tabakası başarıyla kullanılmıştır [77,78]. Ayrıca tandem gözeler; polimer, küçük molekülü aktif katmanlar ve alt gözeler arasındaki ara katman olarak

titanyum oksit / Poly(2,3-dihydrothieno-1,4-dioxin) -poly (styrenesulfonate) (PEDO-T:PSS) kullanılarak çözelti ile işlenebileceği de gösterilmiştir [79].

2.3.6 Organik Güneş Gözelerinin (OPV) Çalışma Prensibi

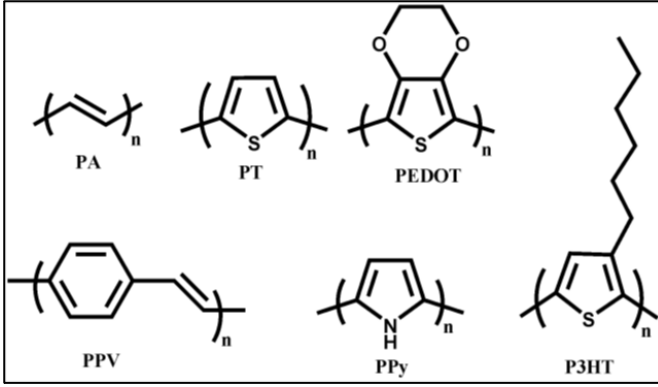
2.3.6.1 İletken Polimerler ve Özellikleri

Polimerler, monomer denilen çok sayıda küçük molekül biriminin tekrarlarını içeren makro-moleküllerdir. Polimerlerin özelliklerini; kimyasal bileşimleri, moleküler ağırlığı, moleküler yapısı ve morfolojisi belirler. Polimerler, iletken polimerlerin keşfine kadar yalıtım malzemeleri olarak kullanılmıştır. Bu iletken polimerler, ana zincirdeki omurga boyunca π (pi) elektronlarının delokalizasyonunu sağlayan, dönüşümlü tek ve çift bağlar sebebiyle konjuge polimerler olarak adlandırılır. İletken polimerlerin keşfi ve gelişiminin bir sonucu olarak, Alan J. Heeger, Hideki Shirakawa ve Alan G. MacDiarmid'e 2000 yılında Nobel Ödülü verilmiştir. Bu gelişmeden sonra özellikle kimya ve fizik alanında fotokimya, sensörler ve enerji depolama alanlarında yeni araştırma alanları oluşturulmuştur. Bunların yanı sıra, hızlı anahtarlama süresi, düşük maliyet, yüksek optik kontrast ve kolay erişilebilirlik nedeniyle konjuge polimerler organik ışık yayan diyotlar (organic light emitting diode-OLED), organik alan etkili transistörler (organic field effect transistor - OFET), organik güneş gözeleri (organic photovoltaics, OPV), elektrokromik aygıtlar (electrochromics, ECD) ve sensörlerin yapımında kullanılmaya başlanmıştır.

Organik yarıiletkenler de denilen iletken polimerler, yarıiletken özelliklere sahip karbon temelli malzemelerdir. Bir organik yarıiletken molekül içindeki atomlar, konjüge π -bağları ile bağlanırken moleküller birbirlerine zayıf Van der Waals kuvvetleri ile birbirine bağlanmaktadır. Bağ yapısı organik yarıiletkenlere benzersiz esneklik, hafiflik ve kolay işlenebilmesini sağlayan düşük buharlaşma/süblimleşme noktası sağlamaktadır.

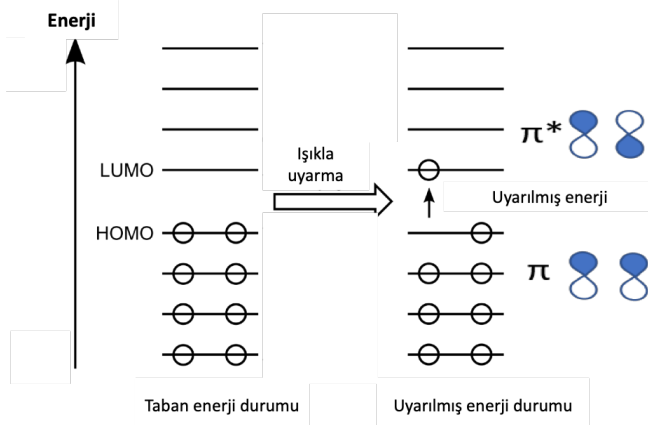
İletken polimerler oldukça geniş bir aileyi oluşturur ve sürekli olarak da bu aileye yeni polimer sınıfları eklenmektedir. Politiyofen, polianilin, polikarbazol, polipirol ve poliflorenler, poliheterosiklik bu yapılardan sadece birkaç tanesidir. Polipirol, politiyofen, poli(p-fenilenvinilen) ve bunların türevleri güneş gözesi uygulamalarında kullanılmaktadır (Şekil 2.15). Politiyofenler organik güneş gözesi uygulamalarında en çok kullanılan yarıiletken polimerlerdir. En iyi bilinenleri, alkillenmiş elektron bakımından zengin olan tiyofenleri kullanan P3HT'dir. Bununla birlikte, P3HT düşük iyonizasyon potansiyeli nedeniyle oksidasyona yatkındır. Bu nedenle, birçok yeni konjuge polimer, oksidatif stabiliteyi arttırmak için geliştirilmiştir. P3HT'de tek bir monomer tekrarlaması ünitesi

bulduğundan, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük doldurulmamış moleküler orbitalin (LUMO) delokalizasyonu, konjuge omurgaya nispeten eşit olarak yayılır.



Şekil 2.15 Elektronik uygulamalarda yaygın kullanılan bazı iletken polimerler

Makroskobik bakış açıdan, organik yarıiletkenlerin bant yapısı inorganik yarıiletkenler ile benzerdir. Değerlik bandı elektronlarla doludur ve iletkenlik bandı elektron içermez. Organik yarıiletkenlerde, HOMO ve LUMO enerji seviyeleri sırasıyla değerlik ve iletkenlik bandına eş değerdir. Organik yarıiletkenlerin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri, konjüge π -elektronların bağlanması ve koparılması arasındaki hibridizasyonu temsil eder [80,81]. Organik yarıiletkenler, π -konjüge sistem tarafından oluşturulan organik moleküllerden oluşur. Karbon atomları sp^2 hibritleşmesi yapar ve sp^2 bağları komşu atomlarla üç güçlü σ -bağı oluşturur [81]. Geri kalan C atomları zayıf π -bağlarının oluşumuyla yerelleşmemiş elektron bulutu oluşturur. Bu bağ yapısı konjüge organik yarıiletkenler için yarı tek boyutlu bir yapı (quasi one-dimensional) oluşturur. π -bağ sistemi, komşu atomların elektron dalga fonksiyonu örtüşmesine göre farklı bağlanma konfigürasyonlarına sahip olabilir. Örneğin, Şekil 2.16'da, farklı enerji seviyelerine karşılık gelen bağlanma (bonding) ve karşı bağlanma (antibonding) durumları ile iki farklı π -bağının durumunu görebiliriz. Organik yarıiletkenlerin HOMO ve LUMO enerji seviyeleri, organik bir yarıiletkenin farklı enerji seviyelerine neden olacak π -bağlarının farklı hibridizasyon durumlarına karşılık gelen enerji bantlarını belirtir.



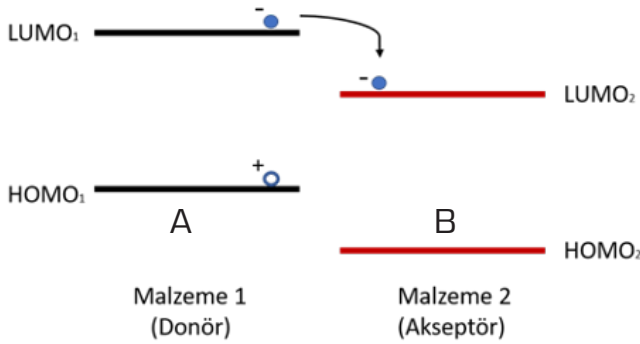
Şekil 2.16 Organik yarıiletkenin HOMO/LUMO enerji seviyeleri arasında bağlanma- karşı bağlanma etkileşimlerinin gösterimi

Bir elektron bir organik yarıiletkenin HOMO enerji seviyesinden LUMO enerji seviyesine uyarıldığında, inorganik yarıiletkenlerde değerlik bandından iletkenlik bandına serbest bir elektronun fiilen uyarılmasının aksine, molekülün kendisi daha yüksek bir enerji durumuna uyarılır. Organik yarıiletkenlerde taşıyıcı iletim mekanizması aynı zamanda inorganik yarıiletkenlerden farklıdır. Organik yarıiletkenlerde, düzensiz konjüge polimer yapısındaki enerji engellerinin aşılabilmesi için termal olarak aktive olan “taşıyıcıların hoptaması (hopping)” meydana gelir, böylece yarıiletken içinde taşıyıcı iletimi meydana gelmiş olur [82]. “Hopping” iletim mekanizması organik yarıiletkenlere inorganik yarıiletkenlere kıyasla oldukça düşük bir hareketlilik sağlar. Örneğin bazı küçük molekül malzemeler için elektron mobilitesi $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Vs}$ [83,84] değerine ulaşırken, silikonun $0.1 \text{ m}^2/\text{Vs}$ elektron mobilitesi çok daha yüksektir.

Bir fotonun soğurulmasıyla, organik yarıiletkendeki bir elektron HOMO enerji seviyesinden LUMO enerji seviyesine uyarılır. Bu durum, inorganik yarıiletkenlerin değerlik bandından iletkenlik bandına bir elektronun uyarılmasına benzer. Organik yarıiletkenlerde düşük dielektrik sabiti ve yerel elektron ve deşik dalga fonksiyonlarından dolayı, elektron-deşik çiftleri arasında güçlü Coulomb çekimi vardır [85,86]. Elde edilen bağlı elektron-deşik çifti $0.1-1.4 \text{ eV}$ 'lik bir bağlanma enerjisine sahip eksiton olarak adlandırılır. Bu bağlanma enerjisi inorganik yarıiletkenlerde birkaç meV'den çok daha düşüktür [86]. İnorganik yarıiletkende elektron-deşik çiftleri termal enerjiyi soğurarak kolayca ayrılabilirlerinden, fotonların soğurulmasından sonra serbest yük taşıyıcıları üretimi

nispeten daha yüksekken, organik yarıiletkenlerde kuvvetli bir şekilde bağlanan eksitonlar üretilir.

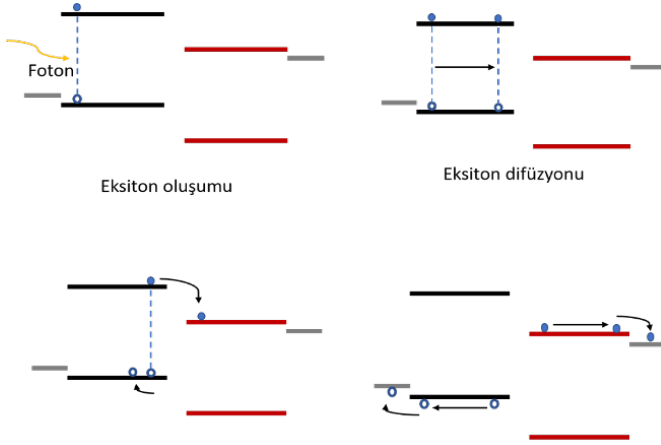
Üretilen bir eksiton ile elektrik üretimi sağlayan serbest yükler üretmek için bağlı elektron-deşik çiftinin nasıl ayrılacağı önemli bir sorudur. Bu soruya çözüm olarak yapılan çalışmalardan biri hizalanmış bant seviyelerine sahip iki farklı organik materyalin kullanılmasıdır. Bu iki malzeme arasındaki birleşime “heteroeklem” denmektedir. Eksiton ayrışmasını sağlamak için, Şekil 2.16’da gösterilen bantlarının hizalanması için iki organik materyal birbirine bitişik yerleştirilir. A malzemesinin HOMO enerji seviyesi ve B malzemesinin LUMO enerji seviyesi arasındaki fark, bağlı elektron-deşik çifti arasındaki potansiyel farktan daha düşük olmalıdır. Örneğin A malzemesinde bir eksiton üretildiğinde, heteroekleme doğru göç eder. $LUMO_B$ ve $HOMO_A$ arasındaki potansiyel fark, eksiton enerjisinden daha düşük olduğundan, elektronun eksi $LUMO_B$ ’a transferi enerjik olarak uygun bir işlemdir. Böylece bir elektron eksitondan $HOMO_B$ ’ye transfer edilirken $HOMO_A$ ’da bir deşik kalır.



Şekil 2.17 Bir heteroeklem yapı için donör ve akseptör malzemelerin bant hizalanması

Bu yük iletim işleminin bir sonucu olarak, Şekil 2.17’de görüldüğü gibi A ve B malzemelerine sırasıyla verici ve alıcı denmektedir. Ayrılma işleminden sonra, elektron-deşik çiftleri, hala Coulomb kuvveti etkisiyle bağlı olan ve bir iç alan ile ayrılması gereken, bir yük çifti oluşturur. Eksiton ayrışmasından sonra oluşan yük çiftleri, toplanmak üzere elektrotlara hareket etmek zorundadır. Deşiklerin anoda ve elektronların katoda taşınması için ana sürücü kuvvet sürüklenme ve difüzyon akımlarıdır [87]. Sürüklenme akımı, güneş gözesi içindeki potansiyel farkı boyunca taşıyıcı hareketine karşılık gelir.

Bu potansiyel farkı esas olarak bir güneş gözesindeki elektrotların seçimi ile belirlenir. Genel olarak, yüksek iş fonksiyonlu anot ve düşük iş fonksiyonlu katot kullanılır ve bu fark güneş gözesinde, gözenin açık devre gerilimini (V_{oc}) belirleyen yerleşik bir elektrik alan oluşturur. Dışardan bir gerilim uygulandığında, iç elektrik alan değiştirilmesiyle sürüklenme akımı değişir. Başka bir taşıyıcı iletim mekanizması, bir güneş gözesi içindeki taşıyıcı konsantrasyon farkı boyunca taşıyıcıların difüzyonu olan difüzyon akımıdır. Yük çiftleri, güneş gözesi heteroeklem etrafında üretildiğinden, elektronların ve deşiklerin konsantrasyonu, heteroeklem etrafında daha yüksektir. Dolayısıyla taşıyıcılar konsantrasyon farkı boyunca heteroeklemden uzağa yayılır ve difüzyon akımına yol açar. Difüzyon akımı esas olarak, uygulanan gerilimin iç elektrik alanı neredeyse sıfırladığında baskınlık gösterirken, sürüklenme akımı iç elektrik alanı büyük olduğunda baskın hale gelir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 Güneş gözesinde yük ayrılması prensibi

2.3.6.2 Polimerler: Organik Güneş Gözesi Performansına Etkisi

Konjuge polimerlerin bir güneş gözesine uygunluğu, kısaca iyi bir güneş gözesi verimi elde etmek için uygun kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olması demek olduğu Bölüm 2.3.6.1'de bahsedilmiştir. Bu özellikler arasında yüksek yük taşıyıcı mobilitesi, yüksek soğurum katsayısı, uygun bant aralığı, kararlılık, homojen karışım eldesi, uygun HOMO / LUMO seviyesi ve çözünürlüktür.

Yüksek soğurum katsayısı: Fotovoltaiklerin çalışmasının gereği foton soğurumu olduğundan güneş gözelerinde kullanılan polimerler için, film halindeki yüksek soğurum katsayısı, üretimdeki ön koşuldur. Çözelti karışımında alıcı bileşeni olarak genellikle kullanılan PCBM polimerinin 400 nm'den daha uzun dalga boylarındaki ışığı soğurması yetersiz olduğundan polimerin, dalga boyu 400 nm'nin üzerinde olan fotonu gerekir. Fotoaktif tabakanın güneş soğurumunu artırmak için;

- Aktif tabaka kalınlığını artırmak,
- Soğurum katsayısını artırmak,
- Polimerin soğurum bant aralığının güneş spektrumu ile eşleştirmek.

Yarıiletken polimerler yük taşıyıcı hareketliliklerinin düşük olmasından dolayı oldukça sınırlıdır. Aktif katman kalınlığının artırılması, güneş gözemesinin seri direncini önemli ölçüde artırır ve bu gözeyi zor çalışır hale getirir. Ayrıca, kısa devre akımı, yük taşıyıcılarının düşük hareketliliğinden dolayı azalabilir. Kalınlığı artırmak polimerin yüksek soğurum katsayısına sahip olmasını sağlayabilir. Bant aralığı azaltılarak, polimerin 800 nm'den yüksek dalga boyundaki ışığı yakalaması sağlanabilir.

Düşük Bant Aralığına Sahip Polimerler: Bant aralığı ~2.0 eV olan bir konjuge polimer, en fazla 600 nm'ye kadar dalga boyuna ve toplam güneş enerjisinin maksimum %25'ine sahip fotonları soğurabilmektedir. Soğurumun 1000 nm dalga boyuna artırılmasıyla, güneş enerjisinin ~% 70 ila 80'i soğurulabilmekte ve teorik olarak iki ya da üç kat verimlilik artışı sağlanabilmektedir. Düşük bant aralıklı polimerler daha uzun dalga boyunda ışığı soğuracağından, kısa dalga boyunda bir soğurum boşluğu olacak ve bu da verimlilikte azalmaya sebep olacaktır. Kısa dalga boyunda soğurum boşluğu oluşmaması için hem büyük hem de düşük bant aralıklı iki polimerin aynı anda kullanıldığı tandem bir güneş gözesi üretilmesi verimi artırmaya yardımcı çabalardan biridir.

Yük Taşıyıcı Hareketliliği: Aktif katmanda kullanılan polimerlerin yük taşıma kapasiteleri güneş gözelerinin verimliliğinde büyük rol oynamaktadır. Polimerlerin yük taşıyıcı hareketliliğinin artırılması, fotovoltaik işlem sırasında üretilen elektronların ve deşiklerin difüzyon yol uzunluğunu arttırır ve aynı zamanda aktif katmandaki elektron-deşik çifti birleşimi foto-akım kaybını azaltır. Polimer verici molekülden alıcısı molekülüne yük transfer verimi artar [88]. Aktif katmanın yük taşıma özelliği, hem verici hem de alıcı olarak kullanılan polimerin yük taşıma davranışı ile ilişkilidir. Saf PCBM ince filmin elekt-

ron taşıma özelliği yaklaşık 10^{-3} $\text{cm}^2/\text{V.s}$ olarak bildirilmiştir ve bu değer yüksek foto-voltaik performans için oldukça elverişlidir. İlaveten, polimer ince filmlerde serbest yük taşıyıcıların hareketliliği 10^{-3} ila 10^{-11} $\text{cm}^2/\text{V.s}$ arasındadır ve bu değer aygıtın verimini oldukça sınırlamaktadır [89].

Fulleren ve Türevlerinin Kullanımı: Aktif katmanın morfolojisinin aygıt performansını önemli ölçüde etkileyebileceği birçok çalışma ile raporlanmıştır [90]. Bununla birlikte, polimer karışımlarının morfolojisini kontrol etmek hala oldukça zordur. Bu amaçla, laboratuvarında morfolojiyi ve güneş gözelerinin performansını iyileştirmek için çeşitli güvenilir ve verimli yöntemler geliştirilmiştir. İlk yöntem, çözücü seçimini, çözelti konsantrasyonunu ve dönel kaplama hızını değiştirerek çözücü buharlaştırma sürecini kontrol etmektir. Yavaş buharlaşma işlemi, polimer zincirlerinin daha düzenli bir yapı halinde kendiliğinden organize olmasına yardımcı olurken, bu işlem daha yüksek bir konjügasyon uzunluğu ve soğurum spektrumunun daha uzun dalga boyu bölgesine kayması ile sonuçlanmaktadır. Aktif katman dönel kaplama ile kaplanacağında polimer/PCBM karışımını çözmek için çözücü olarak klorobenzenin, toluen veya ksilene üstün olduğu bildirilmiştir [91]. PCBM molekülü klorobenzen ve hatta diklorobenzen içinde daha iyi çözündüğünden, çökeltme veya kümeler oluşturma eğilimi azalır. Fakar klor gibi halojen malzemelerin çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle en az kullanımı tercih edilmelidir. İkinci yöntem, film kaplama işleminden sonra ısı işlem uygulamaktır. Morfolojiyi kontrol etmek için ısı işlem sıcaklığı ve süresi önemlidir. Kontrollü tavlama işleminde, hacim heterokeklem yapıda olacak şekilde çözelti karışımları, aktif katmandaki eksitonların ayrılması ve yüklerin iletimi için elverişli daha iyi bir polimerik ağ oluşturma eğilimindedir.

Kararlılık (Stabilite): Organik güneş gözelerinin kararlılığı, ticarileşme açısından önemli olduğundan, birçok araştırma grubu tarafından önde gelen çalışılan konulardandır. Ticarileşmesi açısından, dayanıklılıktan ziyade maliyetine daha fazla dikkat edilse de, organik güneş gözelerinin, oldukça uzun bir çalışma ömürlü olan silikon güneş gözeleriyle rekabet etmesi istenmektedir. Güneş gözesi aygıtlarının havadan kolayca etkilenmesi, temel olarak polimerin havadaki nem ile bozunması, düşük iş fonksiyonlu elektrotun oksidasyonu ve aktif tabakanın morfolojisinin bozunmasıyla sonuçlanır. Konjüge bir polimerin uzun ömürlü olması için, hava oksidasyon eşliğinin altında HOMO enerji seviyesini gereklidir. Aygıt mimarisi de konjüge polimerin havadan ve nemden korunmasıyla dışsal kararlılık sağlayabilir. Aygıt mimarisinde oksit malzemelerin (ZnO , TiO_2) kullanılması ömrü arttırmaktadır.

Organik güneş gözelerinin kararlılıkları, fotovoltaik özelliklerinin zamana bağlı değişimini ölçmekten geçer. Bir organik güneş gözünün kararlılığını değerlendirmek için, farklı gruplar tarafından aynı koşullarda üretilen organik güneş gözelerinin yaşam ömürlerinin test sonuçlarını birbiri ile karşılaştırmak gerekir. Organik malzemeler ile üretilen aygıtlar çevresel koşullara duyarlı olduğu için en ufak bir değişim bu sistemlerin kararlılıklarında önemli farklılıklara neden olabilmektedir. Farklı ülke/bölgelerdeki çalışma gruplarından gelen kararlılık testleri sonuçlarında tutarlılık sağlanması amacıyla ölçümler için bir standart oluşturulmuştur. Organik güneş gözelerinin bozunum ve kararlılıklarını belirlemek için belirli sıcaklık, nem, ışık etkisi gibi değişkenlerde bir standart oluşturmak amacıyla, Uluslararası Organik Fotovoltaiklerin Kararlılığı Zirvesi'nde (ISOS) test prosedürleri oluşturulmuştur [92]. 2008 ile 2010 yılları arasında, organik güneş gözelerinin kararlılığının incelendiği üç ISOS protokolü gerçekleştirilmiştir. Bu test protokolleri, karanlık, dış ortam, laboratuvar ortamında yaşlandırma ve ısıl döngü testleri olmak üzere farklı sınıflara ayrılmaktadır. Her bir sınıf kendi arasında temel seviye, orta seviye ve gelişmiş seviye olmak üzere üç bölüme ayrılmaktadır.

Güneş gözelerinin kararlılıklarını incelemek amacıyla oluşturulan ISOS test süreçleri Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3 de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Karanlıkta yapılan ISOS testleri

Karanlık Testleri			
Test	ISOS D1	ISOS D2	ISOS D3
Sıcaklık	23 °C	65 °C/85 °C	65 °C/85 °C
Bağıl nem	Ortam nemi	Düşük ortam nemi	%85
Çevre	Atmosfer ortamı	Fırın	İklimlendirme kabini
Işık kaynağı	Güneş/güneş benzeştirici	Güneş benzeştirici	Güneş benzeştirici

Çizelge 2.3. Laboratuvar ortamında yapılan ISOS testleri

Laboratuvar Testleri			
Test	ISOS L1	ISOS L2	ISOS L3
Sıcaklık	23 °C	65 °C/85 °C	65 °C/85 °C
Bağıl nem	Ortam nemi (%50)	Ortam nemi (%50)	Ortam nemi (%50)
Çevre	Işık altında	Işık altında ve sıcak ortam	Işık altında, sıcak ve nemli ortam
Işık kaynağı	Güneş benzeştirici	Güneş benzeştirici	Güneş benzeştirici

Polimerin Çözünürlüğü: Güneş gözesi üretiminde sentezlenen polimerlerin, fotoluminesans, siklik voltametri (CV) ve NMR spektroskopisi gibi çözelti bazlı karakterizasyon yöntemleriyle incelenebilmeleri için yüksek çözünürlüğe sahip olması gerekmektedir. Çözünürlüğü zayıf olan polimer, dönele kaplama ile oluşturulan ince filmin kötü mikroskobik morfolojisi nedeniyle aygıt performansının düşmesine sebep olmaktadır. Polimer omurgasına tutturulmuş olan alifatik zincirler, polimerin çözünürlüğünü sağlamak için esastır. Alkil zincirlerinin kullanımına ilişkin bazı kurallar arasında;

- Daha uzun zincir polimerin çözünmesini sağlamak, kısa zincirinkinden daha kolaydır.
- Dallı zincir polimerin çözünürlüğü, doğrusal zincirli polimerden daha iyidir.
- Polimer omurgası ne kadar düzlemselse, o kadar fazla ve daha uzun alkil zincirlerine ihtiyaç duyulur.

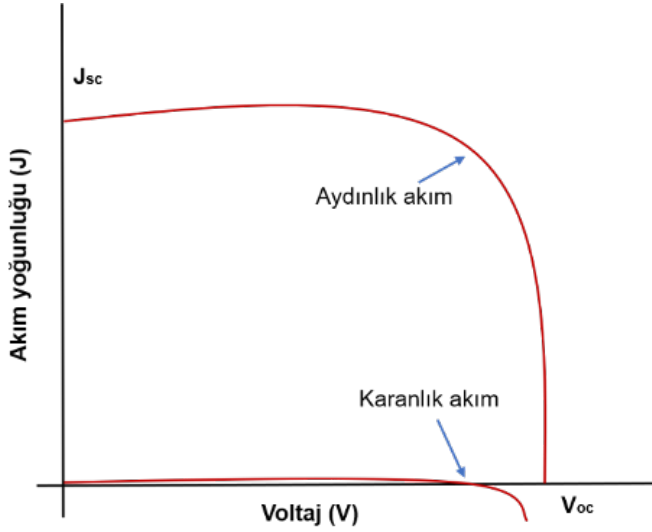
2.3.6.3 OPV' lerde Terminoloji

Fotoakım ve kuantum verimliliği: Kısa devre halinde aydınlatma altında olan bir güneş gözesi tarafından üretilen foto-akım, gelen ışığa bağlıdır. Foto-akım yoğunluğunu (J_{sc}), spektrumla ilişkilendirmek için gözenin kuantum verimliliğine (QE) ihtiyaç duyulmaktadır.

$$J_{sc} = q \int b_s(E)QE(E)dE$$

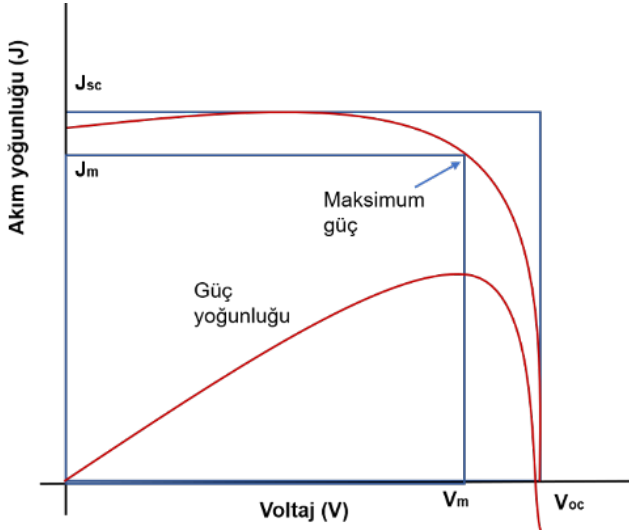
QE(E), gelen fotonunun enerjisini bir elektrona vermesi olasılığı, $b_s(E)$, olay spektral foton akısı yoğunluğu (birim zamanda birim alanda meydana gelen (E)-(E+dE) aralığında enerji foton sayısı), q yüküdür.

Karanlık akım ve açık devre gerilimi: Bir gözede potansiyel fark meydana geldiğinde, bu potansiyel fark, foto-akıma zıt yönde hareket eden bir akım oluşturur ve net akım, kısa devre değerinden düşürülür. Bu ters akım, genellikle, karanlıkta uygulanan gerilim altında aygıt boyunca akan karanlık akım ($I_{\text{karanlık}}(V)$) olarak adlandırılır.



Şekil 2.19 Aydınlık ve karanlıkta ideal diyotun akım-gerilim karakteristiği.

Kontaklar yalıtıldığında, potansiyel farkın maksimum değeri olan açık devre gerilimi (V_{oc}) elde edilir. Şekil 2.19'da aydınlık ve karanlıkta ideal diyotun akım-gerilim karakteristiği verilmiştir. Net akım grafikten, karanlık akımın foto-akımına eşit sabit bir miktarda yukarı kaydırılmasıyla elde edilir.



Şekil 2.20 İdeal bir güneş gözesinin akım gerilim ve güç gerilim karakteristikleri

Verim: Güneş gözesinin çalışma rejimi, gözenin güç sağladığı, 0'dan V_{oc} 'e kadar olan gerilim aralığındadır. Göze güç yoğunluğu şöyle verilir:

$$P=JV$$

Güç (P), maksimuma ulaştığında, maksimum (Şekil 2.20)dolum faktörü aşağıda verilen eşitlikteki oranla tanımlanır ve J-V eğrisinin kare şeklinde olmasını ifade eder.

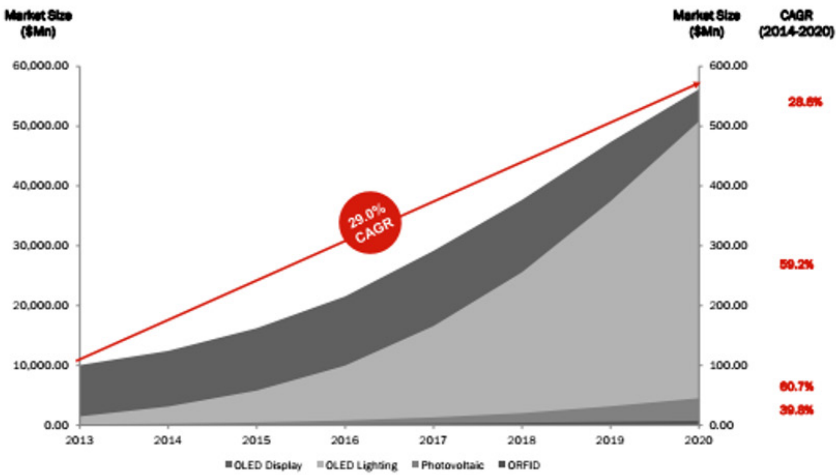
$$F = \frac{J_m V_m}{J_{sc} V_{oc}}$$

Güç yoğunluğu, V_{oc} 'e yakın, V_m gerilim değerinde maksimuma ulaşır. Maksimum güç yoğunluğu ($J_m \times V_m$), iç dikdörtgenin alanı olarak verilir. Dış dikdörtgen kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc} \times V_{oc}$ alanına sahiptir. Dolum faktörü 1'e eşitse, akım-gerilim eğrisi dış dikdörtgeni izler. Gözenin verimi (η), çalışma noktasında gelen ışık gücü yoğunluğunun bir kısmının aktarıldığı güç yoğunluğudur (P_s).

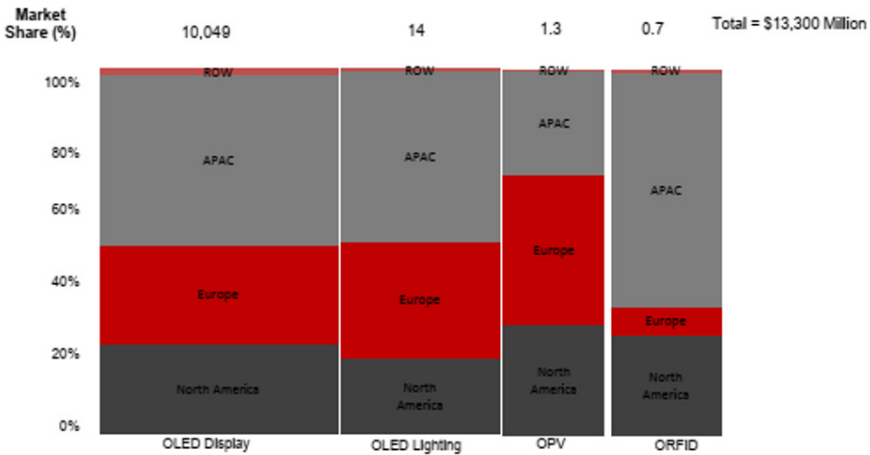
$$\eta = \frac{J_m V_m}{P_s}$$

2.3.6.4 OPV Market İncelemesi

OPV, kişisel cep telefonu şarj aleti, küçük ev elektroniği ve mobil elektronik araçlar, binanın dış duvarı, penceresi veya perdesi gibi Binaya Entegre Fotovoltaik gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. Organik fotovoltaik ayrıca yüksek güç üretiminde de kullanılmaktadır. Bu nedenle, OPV'ler diğer uygulamalara kıyasla daha yüksek oranda büyümektedir. Organik fotovoltaik pazarındaki başlıca oyuncular Konarka Technologies (ABD) ve Plextronics Inc.'dir (ABD).

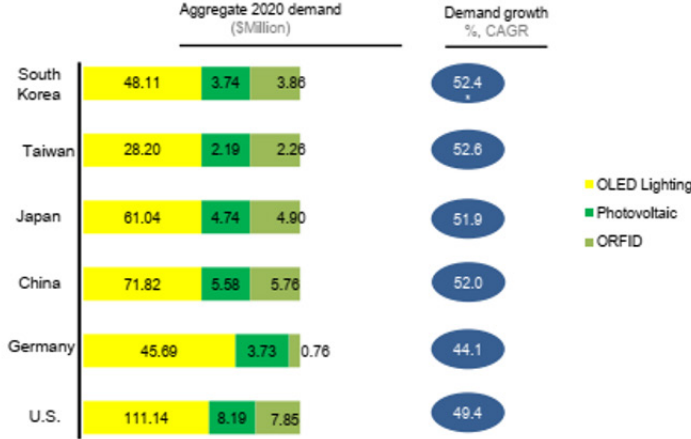


Şekil 2.21 OPV uygulamaları için 2013-2020 yılları arası büyüme grafiği

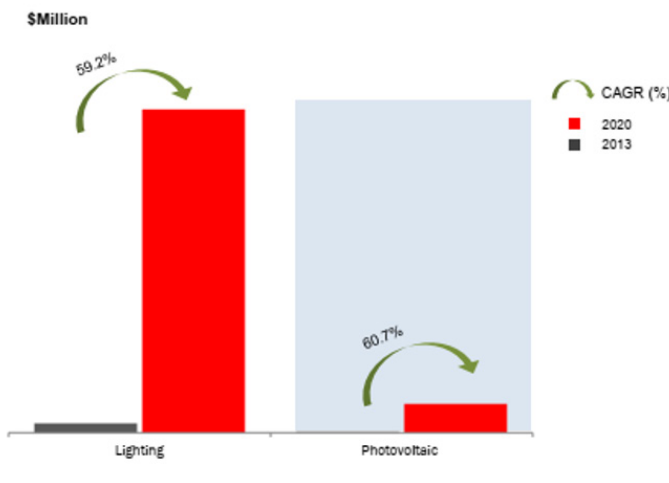


Şekil 2.22 OPV uygulamaları için bölgelerin market hacmi

Segmentin 2014'ten 2020'ye kadar %60,7'lik en yüksek bileşik yıllık büyüme oranında (CAGR) büyümesi beklenmektedir. OPV pazarı, mükemmel bir form faktörü, iç mekan aydınlatma koşullarında iyi performans, düşük sermaye harcaması ve çok düşük enerji üretim maliyeti tarafından yönlendirilmektedir (Şekil 2.21 ve 2.22).



Şekil 2.23 OPV uygulamaları (koyu yeşil renk) için ülkeler bazında büyüme grafiği



Şekil 2.24 OPV uygulamaları 2013-2020 yılları arasındaki büyüme

Organik fotovoltaik (OPV) market analizi, geleneksel FV'lerin kurulamadığı yerlerde kullanılan OPV'ler için teknolojinin ve pazarların değerlendirilmesini kapsamaktadır.

OPV uygulamaları 2013-2020 yılları arasında en hızlı büyümeye sahip alan olmuştur. Segmentin 2014'ten 2020'ye kadar %60,7'lik en yüksek CAGR'de büyümesi bekleniyor, Çizelge 2.4. OPV pazarı, mükemmel bir form faktörü, iç mekan aydınlatma koşullarında iyi performans, düşük sermaye harcaması ve çok düşük enerji üretim maliyeti tarafından yönlendirilmektedir (Şekil 2.23 ve 2.24).

Çizelge 2.4. Küresel organik elektronik Pazar hacmi (\$ Milyon)

Application	2013	2015	2018	2020	CAGR% (2014-2020)
Display	10,176.05	16,425.54	38,154.15	56,871.28	28.6
Lighting	14.63	57.94	255.86	508.03	59.2
Photovoltaic	1.33	4.68	20.22	45.12	60.7
System Components	2,842.96	4,731.95	11,601.25	17,697.35	30.4
Other Applications	265.31	239.35	138.01	703.86	20.8
Total	13,300.29	21,459.46	50,169.49	75,825.64	29.0

Ayrıca, Hindistan daha yeşil bir enerji tasarrufu aracı geliştirmede olumlu adımlar attığından, ülke OPV uygulamalarında umut verici bir pazardır. Buna bağlı olarak, Hindistan'ın OPV pazarının 2014'ten 2020'ye kadar tahmini %49,6'lık bir CAGR'de büyümesi ve şu anda çok yeni bir aşamada olan 2020'de 1,55 milyon dolarlık pazar büyüklüğüne ulaşmıştır. En yüksek büyümenin 2014'ten 2020'ye %52.2 olan OPV uygulama segmentinde 2020'de 0.38 milyon dolarlık pazar büyüklüğüne ulaşmıştır.

OPV uygulamaları hızla büyümekte ve Afrika'nın OPV pazarının 2014'ten 2020'ye kadar tahmini %54,5'lik bir CAGR'de büyümüştür, Çizelge 2.5. Şu anda çok umut verici bir aşamada olan 2020'de 0.17 milyon dolarlık pazar büyüklüğüne ulaşmıştır.

Çizelge 2.5. Orta Doğu'da organik elektronik Pazar hacmi (\$ Milyon)

Application	2013	2014	2015	2018	2020	CAGR% (2014-2020)
Display	70.23	93.13	126.81	334.72	571.53	35.3
Lighting	0.09	0.12	0.17	0.45	0.77	35.4
Photovoltaic	0.01	0.01	0.02	0.08	0.17	54.5
System Components	19.81	26.27	35.77	94.40	161.15	35.3
Other Applications	3.32	4.40	5.98	15.73	7.06	8.2
Total	93.46	123.94	168.75	445.37	740.68	34.7

Source: Secondary Research, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

Kaynaklar

1. <https://www.pveducation.org> erişim tarihi Eylül 2021
2. Markvart, T. and Castaner, L., Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Elsevier, Oxford, 2003.
3. Fonash, S., Solar Cells Device Physics. 2010.
4. Göksan Gül, "Güneş Gözelerinin Üretilmesinde Son Gelişmelerin Araştırılması", Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
5. Melis Bilgiç Aksarı, "Hidrojenlendirilmiş Amorf Silikon-Kristal Silikon Heteroeklem Güneş Gözelerinin Bilgisayar Modellemesi", Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
6. Tülay Ocak, "Amps-1d Programı Kullanılarak Güneş Gözelerinin Bilgisayar Modellemesi", Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2017.
7. E. Becquerel, "Observations of photovoltaic effects," C. R. Acad. Sci., vol. 9, pp. 561-567, 1839
8. D. M. Chapin, C. S. Fuller ve G. L. Pearson, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electric power," J. Appl. Phys., vol. 25, pp. 676–677, 1954
9. Taylor, N., Jäger-Waldau, A., Photovoltaics Technology Development Report 2020, EUR 30504 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2020, ISBN 978-92-76-27274-8, doi:10.2760/827685, JRC123157.
10. Pabitra K. Nayak 1, Suhas Mahesh, Henry J. Snaith and David Cahen, "Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art", *Nature Reviews Materials* vol.4, pp. 269–285, 2019.
11. IRENA, Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.2019.
12. Gregory M Wilson et al, "The 2020 photovoltaic technologies roadmap", J. Phys. D: Appl. Phys. 53 493001, 2020.
13. https://www.solar-frontier.com/eng/news/2017/1220_press.html
14. C. W. Tang, "Two layer organic photovoltaic cell," Appl. Phys. Lett., vol. 48, no. 2, pp. 183–185, 1986
15. Luque, A., Hegedus, S., Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley and Sons, West Sussex, 1181p. 2003.
16. Mulligan W P, et al. "Manufacture of solar cells with 21% efficiency", Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conf. (EU PVSEC) (7-11 June 2004, Paris, France) pp 387–90, 2004
17. Yoshikawa K et al "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", Nat. Energy 2 17032, 2017

18. Street R.A, "Technology and Application of Amorphous silicon," SpringerVerlag, Berlin, p. 6221, 2000.
19. V Shah, H. Schade, M. Vanecek, J. Meier, E. Vallat-Sauvain, N. Wyrsh, U. Kroll, C. Droz, and J. Bailat, "Thin-film silicon solar cell technology," *Prog. Photovoltaics*, vol. 12, no. 2–3, pp. 113–142, 2004.
20. Angèle Reinders, Pierre Verlinden Wilfried van Sark and Alexandre Freundlich, "Photovoltaic Solar Energy From Fundamentals To Applications" Wiley, 2017
21. Zanio, K., *Cadmium Telluride: Materials Preparation, Physics, Defects, Applications, Semiconductors and Semimetals*, Vol. 13., 1978
22. Taesoo D.Lee, Abasifreke U.Ebong: A review of thin film solar cell technologies and challenges, *Renewable and Sustainable Energy, Reviews, Volume 70*, pp 1286-1297, 2017
23. W. E. Spear and P. G. Le Comber, "Electronic properties of substitutionally doped amorphous Si and Ge," *Philos. Mag.*, vol. 33, no. 6, 1976.
24. D. E. Carlson and C. R. Wronski, "Amorphous silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 671–673, Jun. 1976.
25. N. Souffi, M. Daouahi, L. Chahed, K. Zellama, and P. Roca I Cabarrocas, "Effect of light soaking and annealing on the stability of hydrogenated amorphous silicon films deposited using pure and highly helium diluted silane," *Solid State Commun.*, vol. 122, no. 5, pp. 259–264, 2002.
26. M. Ito, S. Shimizu, M. Kondo, and a. Matsuda, "Light-soaking stability of silicon thin film solar cells using alternately hydrogenated dilution method," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 338–340, no. 1 SPEC. ISS., pp. 698–701, 2004.
27. Fuhs, W., Korte, L., Schimidt, M., *Heterojunctions of Hydrogenated Amorphous Silicon and Monocrystalline Silicon*, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8, 1989-1995, 2006.
28. Wang, T.H., Page, M.R., Iwaniczko, E., Levi D.H., Yan, Y., Branz, H.M., Wang, Q., 2004, *Toward Better Understanding and Improved Performance of Silicon Heterojunction Solar Cells*, 14th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules, 8-11, Winter Park, Colorado, USA, 2004
29. Sawada, T., Terada, N., Tsuge, S., Baba, T., Takahama, T., Wakisaka, K., Tsuda, S., Nakano, S., *High-Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cell*, First WSPEC, 5-9 December 1994, Hawaii, USA, 1994.
30. Stangl R., Froitzheim A., Elstner L., Fuhs W., 2001, **Amorphous**/crystalline silicon heterojunction solar cells, a simulation study, 17th European PV Conference, Munich, Oct.2001.
31. Froitzheim A., Stangl R., Elstner L., Schmidt M., Fuhs W., 2002, *Interface recombination in amorphous/crystalline silicon solar cells, a simulation study*, 25th IEEE Conference, 2002

32. Jensen, N., Hausner, R.M., Bergmann, R.B., Werner, J.H., Rau, U., Optimization and Characterization of Amorphous/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells, *Progress in Photovoltaics Research and Application*, 10, 1-13. 2002.
33. Tucci M., della Noce M., Bobeico E., Roca F., de Cesare G., Palma F., Comparison of amorphous/crystalline heterojunction solar cells based on n- and p- type crystalline silicon, *Thin Solid Films*, 451-452, 355-360, 2004
34. Taguchi M., Sakata H., Yoshimine Y., Maruyama E., Terakawa Ak., Tanaka M., An approach for higher efficiency in the HIT cells, *Conference Records of the Photovoltaic Specialists Conference*, 3-7 January 2005.
35. Dao, V, Heo, J, Choi, H., Kim, Y., Park, S., Jung, S., Lakshminarayan, N., Yi, J., Simulation and study of the influence of the buffer intrinsic layer, back-surface field, densities of interface defects, resistivity of p-type silicon substrate and transparent conductive oxide on heterojunction with intrinsic thin-layer (HIT) solar cell, *Solar Energy*, 84, 777-783, 2010.
36. Frerichs, R., *Phys. Rev.* 72, 594-601, 1947
37. Rappaport, P., 1959, *RCA Rev.* 20, 373-397.
38. Cohen-Solal, G., Lincot, D., Barbe, M., 1982, *Conf. Rec. 4th ECPVSC*, 621- 626, 1982
39. Zanio, K., 1978, *Cadmium Telluride: Materials Preparation, Physics, Defects, Applications, Semiconductors and Semimetals, Vol. 13.*, 1978
40. McCandless, B., Moulton, L., Birkmire, R., *Prog. Photovolt.* 5, 249-260. 1997
41. Poplawsky, J. D. et al. Structural and compositional dependence of the CdTe_{1-x}Se_x alloy layer photoactivity in CdTe-based solar cells. *Nat. Commun.* 7, 12537, 2016.
42. Meyers, P., Leng, C., Frey, T., U.S. Patent 4,710,589, 1987
43. McCandless, B., Hichri, H., Hanket, G., Birkmire, R., *Conf. Rec. 25th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 781-785, 1996
44. Qu, Y., Meyers, P., McCandless, B., *Conf. Rec. 25th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 1013-1016, 1996.
45. Wieting, R., *AIP Conf. Proc.* 462, 3-8, 1999.
46. Hahn, H., 1953, *Z. Anorg. Allg. Chem.* 271, 153-170, 1953.
47. Shay, J., Wernick, J., *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Application*, Pergamon Press, Oxford, 1974.
48. Tell, B., Shay, J., Kasper, H., *Phys. Rev. B*4, 4455-4459, 1971.
49. Wagner, S., Shay, J., Migliorato, P., Kasper, H., , *Appl. Phys. Lett.* 25, 434, 435, 1974.
50. Kazmerski, L., White, F., Morgan, G., *Appl. Phys. Lett.* 29, 268, 269, 1976
51. Chen, W., 1987, *Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 1445-1447, 1987
52. Tanaka et al., *Proc. 17th Euro. Conf. Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 989-994, 2001.

53. Binsma, J.J.M. and Van der Linden, H.A., 1982, Preparation of thin CuInS₂ films via a two-stage process. *Thin Solid Films*, Vol. 97, p. 237, 1982.
54. Grätzel, M., Dye-sensitized solar cells. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2003. 4(2): p. 145-153.
55. Brabec, C.J., et al., Tracing photoinduced electron transfer process in conjugated polymer/fullerene bulk heterojunctions in real time. *Chemical Physics Letters*, 2001. 340(3-4): p. 232-236.
56. Günes, S., H. Neugebauer, and N.S. Sariciftci, Conjugated polymer-based organic solar cells. *Chemical reviews*, 2007. 107(4): p. 1324-1338.
57. Sharma, K., V. Sharma, and S. Sharma, Dye-sensitized solar cells: fundamentals and current status. *Nanoscale research letters*, 2018. 13(1): p. 381.
58. Anduaem, A. and S. Demiss, *Edelweiss Applied Science and Technology*. 2018.
59. Grätzel, M. and J.-E. Moser, Solar energy conversion. 2001, Citeseer. p. 589-644.
60. Bagher, A.M., M.M.A. Vahid, and M. Mohsen, Types of solar cells and application. *American Journal of optics and Photonics*, 2015. 3(5): p. 94-113.
61. Xie, F.X., et al., Improving the efficiency of polymer solar cells by incorporating gold nanoparticles into all polymer layers. *Applied Physics Letters*, 2011. 99(15): p. 219.
62. Peng, B., et al., Performance improvement of polymer solar cells by using a solvent-treated poly (3, 4-ethylenedioxythiophene): poly (styrenesulfonate) buffer layer. *Applied Physics Letters*, 2011. 98(24): p. 113.
63. Yu, G., et al., Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions. *Science*, 1995. 270(5243): p. 1789-1791.
64. Chen, L., et al., Improvement of the efficiency of CuPc/C60-based photovoltaic cells using a multistep structure. *Organic Electronics*, 2009. 10(4): p. 724-728.
65. Park, S.H., et al., Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100%. *Nature photonics*, 2009. 3(5): p. 297.
66. Savenije, T.J., et al., The effect of thermal treatment on the morphology and charge carrier dynamics in a polythiophene–fullerene bulk heterojunction. *Advanced Functional Materials*, 2005. 15(8): p. 1260-1266.
67. Chen, H.-Y., et al., Polymer solar cells with enhanced open-circuit voltage and efficiency. *Nature photonics*, 2009. 3(11): p. 649.
68. Schilinsky, P., C. Waldauf, and C.J. Brabec, Recombination and loss analysis in polythiophene based bulk heterojunction photodetectors. *Applied Physics Letters*, 2002. 81(20): p. 3885-3887.
69. Padinger, F., R.S. Rittberger, and N.S. Sariciftci, Effects of postproduction treatment on plastic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 2003. 13(1): p. 85-88.
70. Cao, W. and J. Xue, Recent progress in organic photovoltaics: device architecture and optical design. *Energy & Environmental Science*, 2014. 7(7): p. 2123-2144.

71. Heeger, A.J., 25th anniversary article: bulk heterojunction solar cells: understanding the mechanism of operation. *Advanced Materials*, 2014. 26(1): p. 10-28.
72. Nelson, J., Organic photovoltaic films. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2002. 6(1): p. 87-95.
73. Kearns, D. and M. Calvin, Photovoltaic effect and photoconductivity in laminated organic systems. *The Journal of chemical physics*, 1958. 29(4): p. 950-951.
74. Scharber, M.C. and N.S. Sariciftci, Efficiency of bulk-heterojunction organic solar cells. *Progress in polymer science*, 2013. 38(12): p. 1929-1940.
75. Zhang, G., et al., High-performance ternary organic solar cell enabled by a thick active layer containing a liquid crystalline small molecule donor. *Journal of the American Chemical Society*, 2017. 139(6): p. 2387-2395.
76. Beiley, Z.M. and M.D. McGehee, Modeling low cost hybrid tandem photovoltaics with the potential for efficiencies exceeding 20%. *Energy & Environmental Science*, 2012. 5(11): p. 9173-9179.
77. Dennler, G., et al., Enhanced spectral coverage in tandem organic solar cells. *Applied Physics Letters*, 2006. 89(7): p. 073502.
78. Janssen, A., et al., Highly efficient organic tandem solar cells using an improved connecting architecture. *Applied Physics Letters*, 2007. 91(7): p. 073519.
79. Peumans, P., A. Yakimov, and S.R. Forrest, Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells. *Journal of Applied Physics*, 2003. 93(7): p. 3693-3723.
80. Kim, J.Y., et al., Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing. *Science*, 2007. 317(5835): p. 222-225.
81. Brédas, J.-L., et al., Organic semiconductors: A theoretical characterization of the basic parameters governing charge transport. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2002. 99(9): p. 5804-5809.
82. Fung, D.D. and W.C. Choy, Introduction to organic solar cells, in *Organic Solar Cells*. 2013, Springer. p. 1-16.
83. Hu, D., et al., Spatial confinement of exciton transfer and the role of conformational order in organic nanoparticles. *Nano Letters*, 2002. 2(10): p. 1121-1124.
84. Anthopoulos, T.D., et al., High performance n-channel organic field-effect transistors and ring oscillators based on C 60 fullerene films. *Applied Physics Letters*, 2006. 89(21): p. 213504.
85. Gundlach, D., et al., High mobility n-channel organic thin-film transistors and complementary inverters. *Journal of applied physics*, 2005. 98(6): p. 064502.
86. Gregg, B.A. and M.C. Hanna, Comparing organic to inorganic photovoltaic cells: Theory, experiment, and simulation. *Journal of Applied Physics*, 2003. 93(6): p. 3605-3614.
87. Mayer, A.C., et al., Polymer-based solar cells. *Materials today*, 2007. 10(11): p. 28-33.

88. Koster, L.J., et al., Device model for the operation of polymer/fullerene bulk heterojunction solar cells. *Physical Review B*, 2005. 72(8): p. 085205.
89. G. Li, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery ve Y. Yang, "High Efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self- organization of polymer blends," 2005, *Nature Materials*, vol. 4, no. 11, pp. 864-868
90. V. D. Mihailetschi, J. K. J. Duren, P. W. M. Blom, J. C. Hummelen, R. A. J. Janssen, J. M. Kroon, M. T. Rispens, W. J. H. Verhees ve M. M. Wienk, "Electron transport in a methallofullerene," 2003, *Advanced Functional Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 43-46,
91. T. L. Benanti ve D. Venkataraman, "Organic solar cells: An overview focusing on active layer morphology," 2006, *Photosynthesis research*, vol. 87, pp. 73-81.
92. J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. L. Ma, D. Moses, A. J. Heeger, G. C. Bazan, "Efficiency enhancement in low-bandgap polymer solar cells by processing with alkane dithiols", 2007, *Nature Materials*, vol. 6-7, pp. 497-500.
93. M. Reese, S. Gevorgyan, M. Jorgensen, E. Bundgaard, S. Kurtz, D. Ginley, D. Olson, M. Lloyd, P. Morvillo, E. Katz, A. Elschner, O. Haillant, T. Currier, V. Shrotriya, M. Hermenau, M. Riede, K. Kirov, ... F. Krebs, "Consensus Stability Testing Protocols For Organic Photovoltaic Materials and Devices," , 2011, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, pp. 1253-1267.



TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

3 GÜNEŞ ENERJİSİ PANELLERİNDE KALİTE KONTROL SÜREÇLERİ

Cenk YILDIRIM/ Fizik Mühendisi



3. GÜNEŞ ENERJİSİ PANELLERİNDE KALİTE KONTROL SÜREÇLERİ

Cenk YILDIRIM / Fizik Mühendisi

Türkiye'deki kurulu panel gücü 7400 MW'ı geçmiş durumdadır ve değerin artması kaçınılmaz gözükmektedir [1]. Söz konusu projelerde yurt dışından ithal edilen güneş panellerine uygulanan yüksek vergiler sebebi ile kullanılan panellerin büyük çoğunluğu yerli üreticilerden tedarik edilmektedir.

Ülkemizde ilk fotovoltaik güneş paneli üretimi 2000'li yılların ortasına kadar dayanmakta olup 2020 yılı itibari ile üretim kapasiteleri 1 MW/yıldan 800 MW/yıla varan aralıkta 20'i aşkın fotovoltaik panel üreticisi bulunmaktadır [2]. Yerli üreticiler kazandıkları deneyimler sayesinde sadece Türkiye'de kurulan projeler ile sınırlı kalmayıp yurt dışında da pek çok projeyi başarılı bir biçimde tamamlamışlardır. Ancak özellikle uzak doğudan ithal edilen panellerin projelerin zaman kısıtları sebebi ile kontrolsüz bir biçimde kurulması sonucu ülkemizde pek çok santralde uygunsuz panel kullanımı sebebiyle enerji üretim kayıpları gözlenmektedir.

Bu kayıpların önemini anlamak için örnek vermek gerekirse Türkiye'de kurulu toplam santral gücünde yaşanacak %1'lik bir verim kaybının yıl sonunda oluşturacağı zarar

100.000 MWh'ı bulabilmekte [3], bu da mevcut piyasa fiyatları ile 10.000.000 \$'lık bir parasal karşılığa denk gelmektedir. Sahada yapılan performans ölçümlerinde ise bazı güneş santrallerinde ölçülen verim kaybının %10'ları aştığı tespit edilmiştir. Bu kayıpların bazıları montaj ve tasarım hataları sebebi ile olmakla birlikte büyük oranda güneş paneli kaynaklı verim düşüşleri gözlenmiştir.

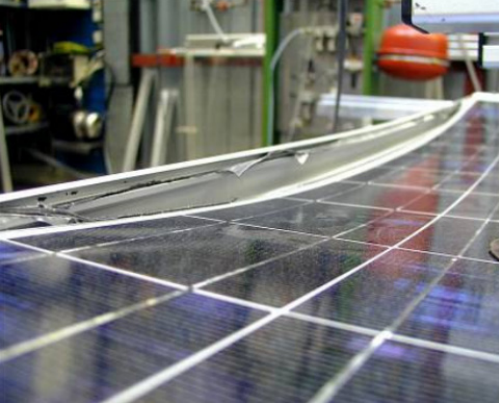
Peki güneş panellerindeki hataları minimize etmek için özellikle üretim aşamasında ne gibi test ve kontroller yapılmalıdır?

3.1 Laboratuvar Testleri ve Sertifikasyon

Kristal tabanlı fotovoltaik modüllerin tasarımı, üretimi ve güvenlik ihtiyaçları için kullanılan temel standartlar IEC 61215-1, IEC 61730-1 ve IEC 61730-2'dir. Türkiye'deki yasal mevcut gereği özellikle şebeke bağlantılı sistemlerde bu standartlara göre sertifikalandırılmış panellerin kullanılması zorunludur.

Üretilecek modüllerin sertifikasyon testine gönderilmeden tasarımının doğru yapılması büyük önem arz eder, hücreler, cam ve çerçeve gibi bileşenler arasındaki mesafelerin yeterli miktarda bırakılması maliyetleri bir miktar arttırsa da hem imalat firelerinin azalması hem de uzun dönemde panellerin çalışma performansı için olumlu etkiye sahiptir. Bunun yanı sıra kullanılacak ham madde kalitesi ve birbiri ile uyumluluğu da bir diğer önemli parametredir. Bu aşamada yapılacak doğru seçimler PID (potential induced degradation), LID (light induced degradation), mikro çatlak, Snail Trail gibi pek çok panel kusurunun önüne geçmekte büyük rol oynar.

Yapılan ön tasarım ve üretim çalışmaları sonucu genelde 20 adet numune panel uzun zamanlı laboratuvar testleri için analize gönderilir ve bu testlerin tamamlanması genelde dokuz Ay'ı bulur. Bu aşamada panellere nemli ısı, termal döngü, UV exposure, yangın, mekanik yükleme ve maksimum güç ölçümü gibi testler uygulanır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) Eğer bu testlerin herhangi birinde problem yaşanır ise tasarım ve hammadde seçiminde değişikliğe gidilerek uzun vade de ortaya çıkabilecek sorunların önüne geçmek mümkün hale gelir.



Şekil 3.1. Mekanik yük testi



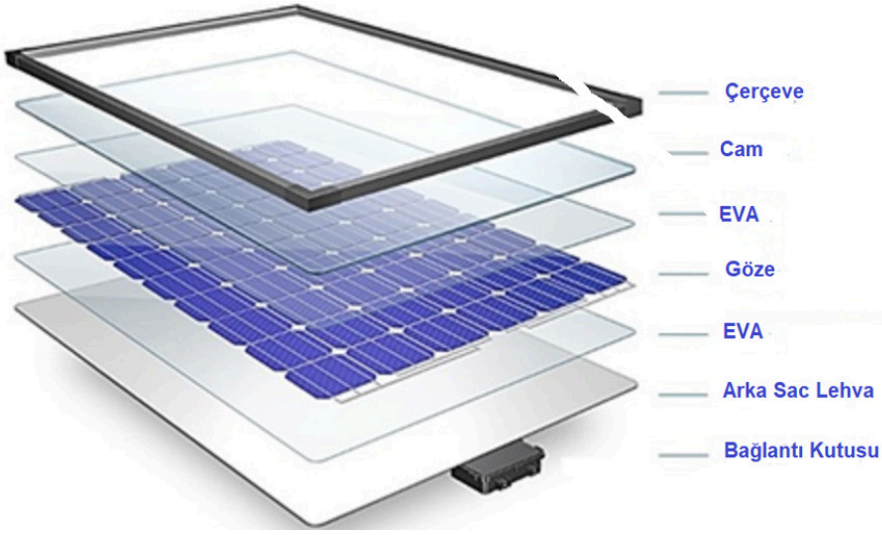
Şekil 3.2. UV maruziyet testi

3.2 Kullanılan Hammaddelerin Kalitesi ve Birbiriyle Uyumluluğu

Kristal tabanlı fotovoltaik modül üretiminde kullanılan temel hammaddeler, Şekil 3.3'te de gösterildiği gibi,

- Güneş Hücresi
- Cam
- Bağlantı Telleri (Tab-Bus Ribbon)
- Bağlantı Kutusu (J-Box)
- Enkapsülant (EVA vb.)
- Arka tabaka (Backsheet)
- Alüminyum Çerçeve
- Yapıştırma Silikonu/Bandı

olarak sıralanabilir.



Şekil 3.3. Kristal tabanlı fotovoltaik modül üretiminde kullanılan temel hammaddeler

Türkiye’de fotovoltaik sanayinin gelişmesiyle birlikte kullanılan hammaddelerin büyük bir kısmı yerli olarak üretilmeye başlanmıştır. Bunun yanı sıra her bileşen için onlarca yurt dışı muadil üretici de bulunmaktadır. Doğru hammaddeyi seçmek için panel tasarımı esnasında temel kriterler maliyet ve kalite olarak ön plana çıkar. Ancak bunların dışında ön görülemeyen uzun vadeli etkilerde mevcuttur. Bunların başında hammaddelerin birbiri ile uyumu gelir. Örneğin; silikon için tasarlanmış bir alüminyum çerçeve de çoğu zaman çift taraflı yapıştırma bandı kullanıldığı da görülmektedir ya da hücreleri birbirine bağlayacak ribonlarda bağlantı yolları ile uyumsuz büyüklükte ve yetersiz gümüş katkılı teller kullanılabilir. Bunun gibi birbiri ile uyumsuz ya da düşük kaliteli hammadde kullanımı kısa vade de üretilen panellerin testleri geçmesi konusunda bir olumsuzluk arz etmemekle birlikte uzun vadede paneller sahaya kurulduktan yıllar sonra çeşitli problem ve hatalar gözlenmeye başlanmaktadır. Bunlardan en önemlisi hot spot ve snail trail olarak da bilinen fenomenlerdir. Bunun yanı sıra PID ve LID gibi sıkça görülen güç düşüşü yaratan durumlar da temel olarak panelde kullanılan hammaddeler ile ilgilidir.

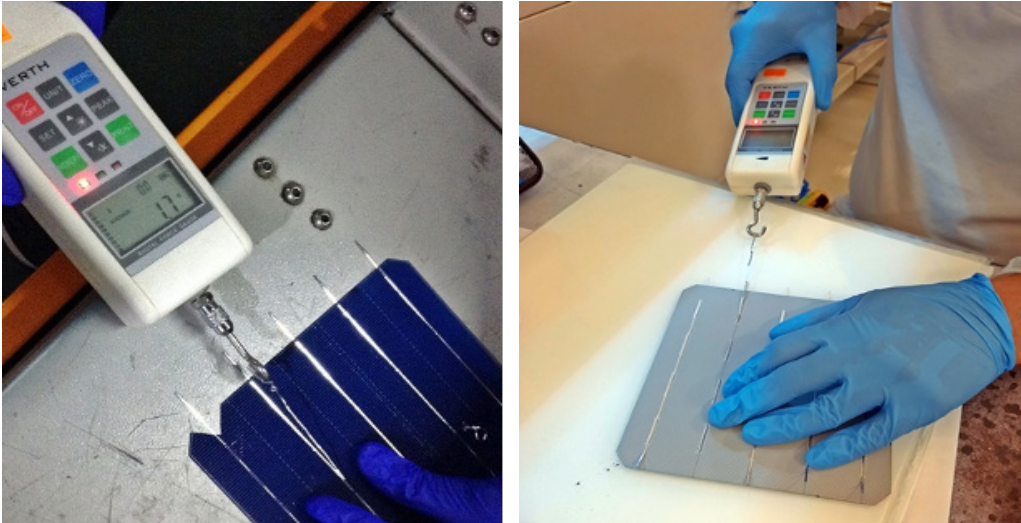
3.3. Fabrika ISO 9001 ve Kalite Kontrol Prosedürleri

Özellikle büyük hacimli üretim yapan panel fabrikalarında tüm süreçlerin doğru yönetimi ve izlenebilirliği büyük önem arz etmektedir. Bunun içinde uluslararası standart olarak ISO 9001'i kullanmak işleri oldukça hızlandırıp kolaylaştırmaktadır. Giriş hammaddelerinin kontrolünden depolama koşullarına, üretimden nakliyeye ve müşteri memnuniyeti takibine kadar bütün süreçler her bir fabrika için fotovoltaik panel üretimine göre özelleştirilerek kalitenin sürekliliği sağlanmalıdır. Böylece hem kalite artırılmış hem de pahalı hammaddeler kullanılarak üretilen modüllerde imalat fireleri azaltılmış olacaktır.

1.3 Fabrikada Test Aşamaları

• Hücre-Ribbon Çekme (Peeling) Testi

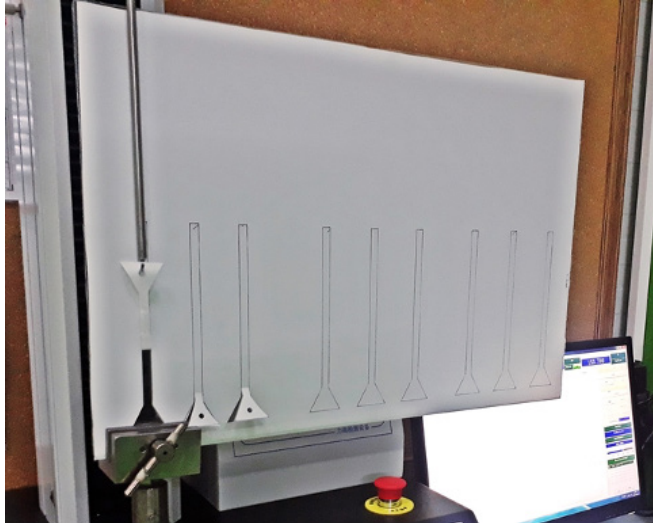
Çekme testi temel olarak güneş hücresi ve ribbon tel arasındaki lehim sonrası yapışma miktarını ölçmek için kullanılır (Şekil 3.4). Bu kontrol sonucu lehim kalitesi ölçülerek uzun yıllar elektrik ve ısı yükü altında çalışacak güneş panelleri içerisinde oluşabilecek bağlantı kopmaları ve mikro çatlaklar gibi istenmeyen durumların önüne geçilebilir.



Şekil 3.4. Hücre-Ribbon Çekme (Peeling) Testi

• Enkapsülant-Cam-Backsheet Çekme (Peeling) Testi

Laminasyon sonrası prosesin doğruluğunu ölçmek ve malzemelerin doğru yapışıp yapışmadığını test etmek için uygulanan bir çekme testidir (Şekil 3.5).



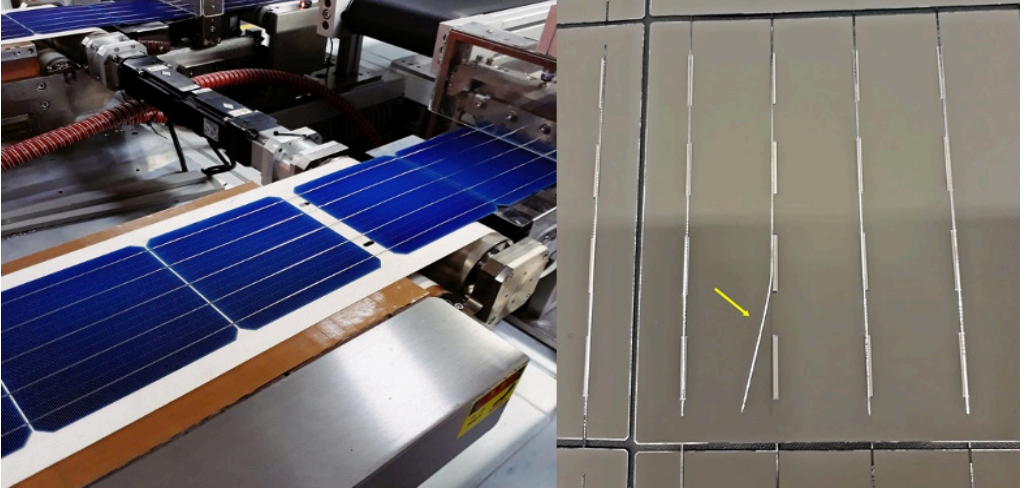
Şekil 3.5. Enkapsülant-Cam-Arka tabaka (Backsheet) Çekme (Peeling) Testi

• Jel İçerik Testi

Güneş panelleri 25 yıl boyunca atmosferik şartlar altında çalışabilecek şekilde üretilmelidir. Bunu sağlamanın en önemli yolu hücrelerin cam içerisinde lamine edilmesi işlemidir. Bu işlemin kalitesi hakkında bilgi sahibi olmanın temel yöntemi ise jel içerik (jel content) testidir. Bu test sayesinde yapışma, sararma, delaminasyon gibi pek çok problem paneller santral sahasında gitmeden engellenebilir.

• Hücre Dizilim Görsel Kontrol

Bu kontrolün amacı panel içerisinde lehimlenen alt dizelerin daha önceden belirtilen toleranslar içerisinde olduğunu kontrol etmektir, bunun yanı sıra hücreler arası bağlantı kaybı gibi durumlar da tespit edilerek laminasyon öncesi gerekli tamirat işlemleri yapılabilir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hücre dizilim görsel kontrol

• Panel Dizilim Görsel Kontrol

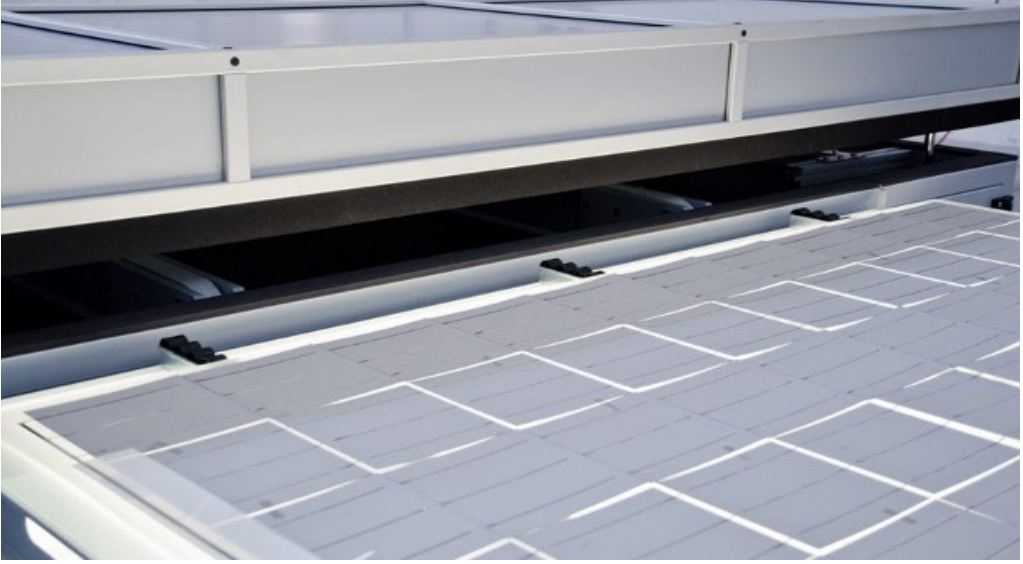
Bu kontrol sayesinde panel üzerinde oluşabilecek asimetrik dizilimler kontrol edilir (Şekil 3.7). Ayrıca panel içerisinde istenmeyen yabancı maddeler var ise temizleme işlemi bu aşamada yapılır.



Şekil 3.7. Panel dizilim görsel kontrol

• Elektrolüminesans Kontrolü (Laminasyon Öncesi)

Laminasyona hazır olan yarı mamul panellere bu aşamada son kontrol yapılır, panel üretimi esnasında oluşabilen elektriksel bağlantı hataları, mikro çatlaklı güneş hücreleri gibi pek çok kusur bu noktada ayrılıp tamir edilerek üretim esnasında oluşabilecek fire miktarı büyük oranda azaltılabilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Laminasyon öncesi Elektrolüminesans kontrol

• Panel Görsel Kontrol

Bu aşamada paneller müşteriye teslim edilmeden önce asimetri, kirlilik, yabancı madde gibi kusurlara göre kontrol edilerek ayrılı, eğer modüller bu kriterleri karşılamıyor ise genelde B sınıfı olarak ayrılır.



Şekil 3.9. Panel görsel kontrol

• Toprak Süreklilik, İzolasyon ve Yüksek Voltaj Testi

Bu testler sayesinde güneş panellerinin özellikle montaj ve işletme aşamasında ortaya çıkabilecek can güvenliği ile ilgili olası kusurları elektriksel olarak ölçülür (Şekil 3.10). Hatalı paneller ayrılarak duruma göre tamir ya da imha edilir.



Şekil 3.10. Toprak Süreklilik, İzolasyon ve Yüksek Voltaj Testi

• Güç Ölçümü

Üretilen modüllerin beyan edilen güç sınıfında olup olmadığı, olası hücre ve diyot arızaları bu aşamada tespit edilir. Üretim hattında yapılan en önemli test güç ölçümü aşamasıdır. Ancak bu testin yapılabilmesi için en kritik nokta test ünitelerinin kalibrasyonların düzenli yapılması ve akredite bir laboratuvar tarafından üretilen kalibrasyon panellerinin kullanılmasının gereğidir.



Şekil 3.11. Güç Ölçümü testi

Ölçümler 1000 W/m^2 ışınım, AM 1.5 spektrum, 25°C sıcaklık şartları olarak bilinen STC'da (standart test conditions) yapılır. Bu şartların oluşturulması için fabrikalarda güneş simülatörü olarak adlandırılan özel ölçüm cihazları kullanılır, (Şekil 3.11.)

• Paketleme Öncesi Elektrolüminesans Testi

Elektrolüminesans görüntüleme, Fotovoltaik modüllerin voltaj geri beslemesi sonucu yaydığı üst kızılötesi dalga boyundaki ışığı analiz ederek, modülü oluşturan hücreler üzerindeki kristal yapı hakkında bilgi veren bir yöntemdir.

Bu yöntemi kullanılarak; modül üzerinde oluşan mikro çatlaklar, hücre ve modül üretimi esnasında oluşan problemler (lehim kusurları, omik kontaklar vb), modül montajında oluşan arızalar ve çalışmayan bölgeler kolaylıkla belirlenebilir, (Şekil 3.12.)

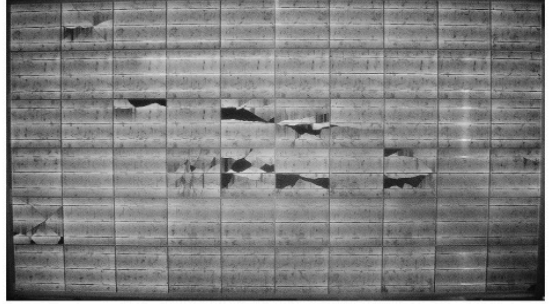
Paketleme öncesi yapılan elektrolüminesans testi üretim esnasında oluşan mikro çatlakların tespitini sağlar, bu sayede paneller kalite kriterlerine göre sınıflandırılarak ayrılır. Bu test sayesinde üretici güneş panellerinin sevkiyat öncesi durumlarını kayıt altına alarak ileride ortaya çıkabilecek olumsuz durumlara karşı kendi güvence altına alır.



Şekil 3.12. Paketleme öncesi yapılan elektrolüminesans test sonucu elde edilen görüntü

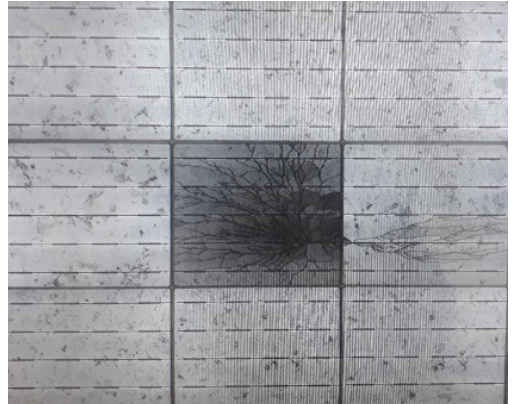
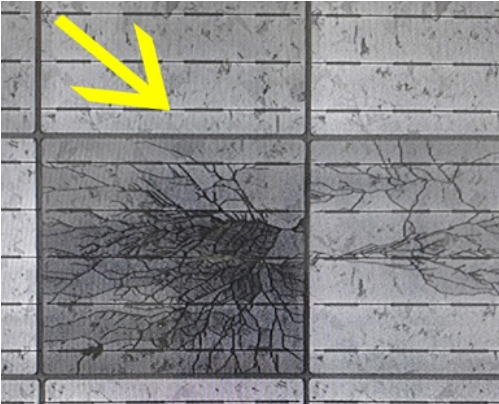
Fotovoltaik modüller üretildikten sonra uygun bir şekilde taşınıp montajları yapılmazsa aynı şekilde hücrelerinde yapısal kusurlar oluşur. Bu kusurların laboratuvar ortamında tespit edilmesi çok zahmetli ve maliyetli olacağından santral sahasında tespit edilmesi daha uygundur.

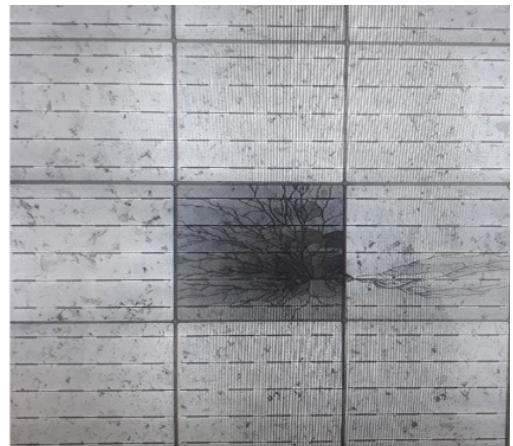
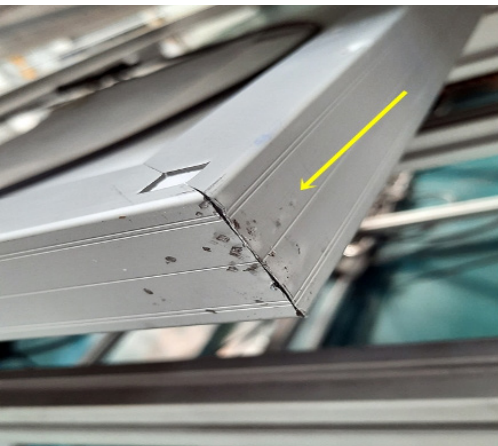
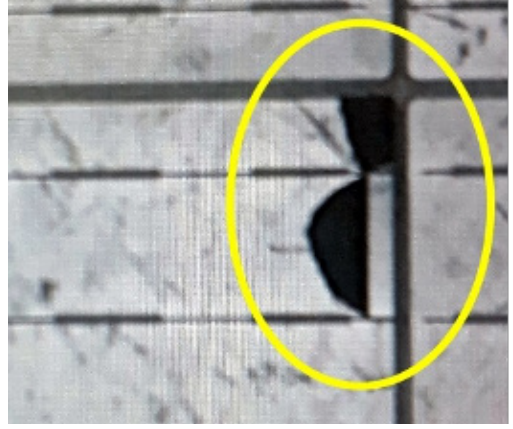
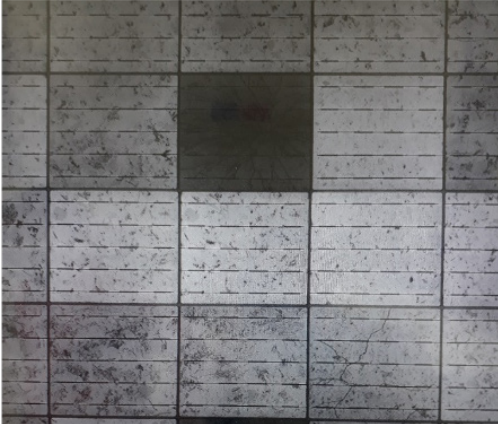
Proerck Mühendislik, Ar-Ge çalışmaları neticesinde geliştirdiği elektrolüminesans üniteleriyle hem fabrika ortamında hem de santral sahasında elektrolüminesans test hizmeti vermektedir. Geliştirmiş olduğumuz Elektrolüminesans ünitesiyle çekilmiş olan E.L. görüntüsünden bir örnek de aşağıda verilmiştir.

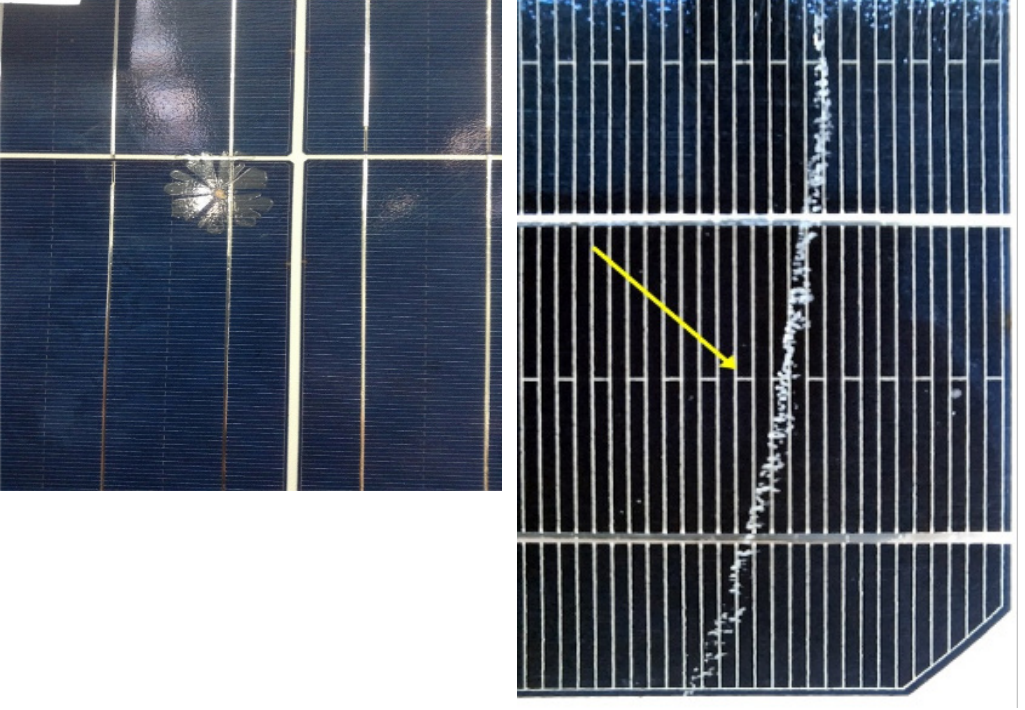


Şekil 3.13. Proerk Mühendislik tarafından geliştirilen elektrolüminesans üniteleri yapılmış test sonucu [3]

Hatalı Panel Elektrolüminesans (E.L) Fotoğrafları







Şekil 3.14 Arşiv fotoğrafları

Kaynaklar

1. <https://www.gensed.org/basin/t%C3%BCrkiyenin-g%C3%BCne%C5%9F-enerjisi-kurulu-g%C3%BCc%C3%BC-7-435-2-mwa-y%C3%BCkseldi#:~:text=G%-C3%BCne%C5%9F%20enerji%20kurulu%20g%C3%BCc%C3%BC%20de,7%-2C55'ni%20olu%C5%9Fturmaktad%C4%B1r>
2. Türkiye'deki PV Panel Üretimi Pazar Araştırması, Stantec, 1 Eylül, 2020
3. <https://www.tenva.org/turkiyenin-kurulu-gucu-2020-yilinda-95-8906-mw-ye-ulasti/>
4. www.proerk.com



TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

4 RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER

Burçin NEKAYA/ Fizik Mühendisi

Göksan GÜL/ Fizik Yüksek Mühendisi



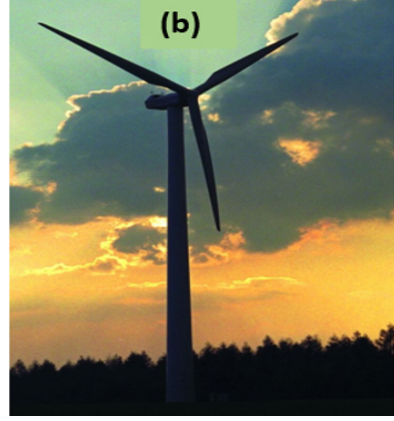
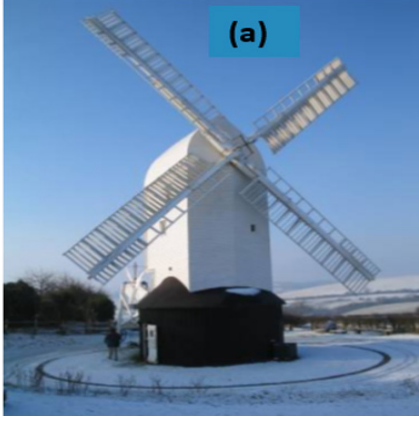
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER

Burçin NEKAYA / Fizik Mühendisi

Göksan GÜL / Fizik Yüksek Mühendisi

Hollanda'nın geleneksel yel değirmenleri (**Şekil 4.1a**), rüzgar enerjisinin yükselme dönemlerinde Avrupa'nın farklı yerlerinde 100.000'den fazla kurulmuştur. Bunlardan bazıları 400-600 yaşında hala hayatta kalmayı başarmış olup en eskisi 1628 yılında kurulmuş olan Outwood, Surrey'de (Birleşik Krallık) bulunan değirmendir. Eski geleneksel rüzgar teknolojisi pratik mühendislik çözümleri ve ampirik aerodinamik bilgileri içerdiği gözlemlenmiştir. Bu basit makineler insanlar tarafından kontrol edilmiş ve halkın ortak katılımı ile düzenli bakım ve bileşen değişimine tabi tutulmuştur. Dönem koşulları gereği verimlilik ön planda değildir.

Günümüz modern rüzgar türbinlerinin (**Şekil 4.1b**) en önemli şartı ise elektriğin düşük maliyet, yüksek verim ile üretilmesidir. Ekonomik hedefleri sağlayabilmek adına bir rüzgar türbini her daim hazır ve bakım zamanının kısa olması beklenir. Günümüz rüzgar teknolojisi için, "yüksek teknoloji" ve "düşük teknoloji" mühendisliklerin harmanlaması olarak görmek mümkündür. Mikroişlemcili kendi kendini takip edebilen akıllı yazılım ve donanımlar ile insan faktörü azaltılmış işletmeler kurulmaktadır.



Şekil 4.1. (a) Hollanda'nın geleneksel yel değirmenleri (b) Modern rüzgar türbini

1942 yılında, aerodinamik tasarımı Von Karman tarafından yapılan ve Smith-Putnam tarafından üretilen ilk Megawatt ölçekli (1.25 MW, 53.0 m rotor çaplı) türbinden günümüz rüzgar teknolojisine geçişte;

- Güvenirlilik
- Ulaşılabilirlik
- Emre-amadelik
- Tasarım ömrü
- Maliyet ve türbin sınıflandırma
- **İşletme ve bakım maliyetleri**

parametreleri endüstrinin ilham kaynağı olmuştur.

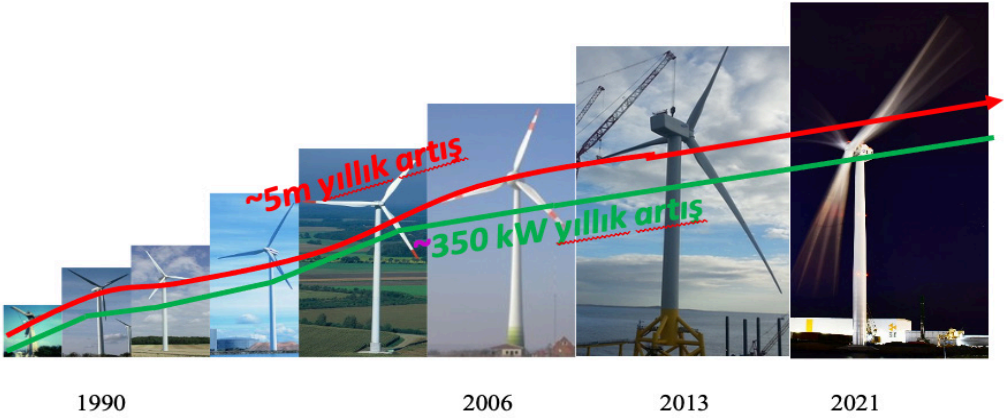
Kabul edilebilir riskler dahilinde en düşük maliyetli enerji üretimi için endüstri devrimindedir.

Modern rüzgar enerjisi teknolojisi diğer yenilenebilir enerjili alanlarında olduğu gibi doğaya uyumlu bir şekilde doğanın kanunlarına meydan okuyarak istenilen düşük maliyetli ve verimli üretime doğru günbegün gelişim içindedir [1]:

- Kanatların kütle-çap bariyeri inovatif tasarım ve malzeme ile aşılmış ve günümüzde karasal uygulamalarda 170.0 m rotor çapına ulaşan kanat tasarımları bulunmaktadır.
- Karasal kurulumların arazi tahsisi, topografik etkiler, göreceli olarak düşük enerji üretimi gibi dezavantajları bertaraf etmek için deniz aşırı rüzgar santrali kurulumları oldukça yaygınlaşmıştır.

- Türbin bileşenlerinin her geçen gün büyümesi ve farklı yerleşim yerlerinde kurulma talebi (dağlık arazi, orman ve denizüstü gibi) ardında taşıma ve kurulum işlemlerindeki zorlukları beraberinde getirmiş ancak bu zorluklar yeni tasarımlar ve farklı çözüm arayışlarıyla eşgüdümlü olarak aşılmaktadır.
- Üretilen enerjinin kalitesi, şebekenin kararlılığı ve yeterliliği gerçek zamanlı izlenerek sistem çok daha verimli hale getirilmiştir.

Rüzgar türbin teknolojisinin yıllar içinde gelişimi, Şekil4.2'de verilmiştir. Şekilde, enerji üretimini artırabilmek ve enerji üretiminde birim maliyeti azaltabilmek adına daha büyük kanat çaplı, daha yüksek kulelerin kullanıldığı ve karasal uygulamaların yanında denizüstü teknolojisinin de hızla geliştiği gözlemlenmektedir [2].



Şekil 4.2. Rüzgar türbin teknolojisinin gelişimi

4.1 Kanat Teknolojisi

Günümüzde artık denizüstü kurulumlarda 220 m kanat çapına ulaşan türbin kanatları oldukça sofistike bir tasarım ve üretim metoduna sahiptir. Kanat ağırlığının optimizasyonu, kanat ucunun esnekliği, aerodinamik kuvvetlerin kanat üzerinde dağılımı, kanat geometrisi gibi birçok parametrenin hesaplamalı akışkanlar dinamiği modelleriyle analizi sonucu endüstrinin talepleri karşılanmaktadır.

Kanat tasarımında günümüz trendleri incelendiğinde rotor çapının halen eksponansiyel olarak artış eğiliminde olduğu gözlemlenirse de bu büyümenin bir doyuma ulaşacağı öngörülmektedir. Kanat yarıçapının artması ile türbinlerin anma gücü doğru orantılı olarak (genellikle karesi ile) artış göstermektedir [2].

Kanat tasarımları sadece büyüklük olarak değil aynı zamanda farklı rüzgar sınıflarına bağlı, örneğin yüksek/orta/düşük rüzgar hızları ya da farklı türbülans sınıflarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu sayede türbin üreticileri sahaya özel kanat tasarımı çözümleri sunmaktadırlar [3] .

Günümüz büyük kanatlı türbinlerde en önemli mücadele kanat kütlesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu konuda üreticiler yeni malzemeler üzerinde çalışmalarını sürdürmüş ve karbon, güçlendirilmiş cam gibi malzemeleri kanatlarda kullanmışlardır.

2000'li yıllara kadar kanat üretimi teknolojisinde ıslak laminasyon tekniği sektörü domine etmiştir. Doymuş cam malzeme bir operatör tarafından elle kalıp içerisine yerleştirilir ve merdaneler tarafından sıkıştırılır. Bu yöntem halen küçük çaplı üreticiler tarafından kullanılmaktadır. Günümüzde ise Vakum İnfüzyon (RIM) tekniği, kullanılan malzemelerin görece olarak ucuz olması ve kanat üretim süresini kısaltması açısından, kanat seri imalatında yaygın olarak tercih edilmektedir. Cam elyaf malzeme kalıp içerisine kuru bir şekilde bir vakum torbası ile kaplanarak yerleştirilir. Daha sonra reçine basınç farkı yardımıyla cam elyafın içerisine nüfus eder [4].

4.1.1 Ülkemizde Kanat Üretimi

Ülkemiz rüzgar türbini ekipman üretimi yapan 12 tesisiyle Avrupa türbin ekipman üretimi listesinde 5. sırada yer almaktadır. Türkiye'deki 12 tesisin 6'sı kule ve 4'ü kanat üretimi yaparken, kalan 2'si ise döküm malzeme üretimi gerçekleştirmektedir.

Kanat üretimi yapan firmalar incelendiğinde;

- **Aero Rüzgâr Endüstrisi A.Ş.:** 2002 yılında Ege Serbest Bölgesinde üretime başlayan firma, Alman türbin üretici Enercon GmbH'nin bir alt şirketidir. Ülkemizin ilk rüzgar türbini kanat fabrikasıdır. Tesis toplam 32.254 m²'lik bir alanda Ege Serbest Bölgesinde bulunmaktadır. 20 yıla yakın süredir kanat üretimi yapan AERO, deneyimli ve konusunda uzman yaklaşık 400 kişilik ekibiyle hizmet vermektedir. Mayıs 2021 verisine göre, kurulduğu günden

bugüne, 8000 üzerinde kanat üretimi yapan AERO, toplam kurulu gücü 4.4 GW'ın üzerinde Enercon rüzgar türbinine kanat tedariki sağlamıştır [5] Enercon EP1 ve EP2 rüzgar türbinleri için kanat üreten AERO'da, E44, E48, E53, E70, E82 ve E92 modelleri için kanat üretimi yapılmaktadır.

- **TPI Kompozit:** Türkiye'de 2012'den bu yana İzmir Sasalı'da rüzgar kanatları üretmekte olup, Türkiye'deki ikinci rüzgar kanadı üretim tesisini de 2016 yılında İzmir Menemen'de açmıştır. Vestas, Siemens Gamesa ve Nordex türbin üreticilerine kanat tedariki yapmaktadır. Türbin üreticilerinin tasarlamış olduğu kalıplarla yüksek verimli kompozit kanatlar üretmektedirler. Bu fabrikada üretilen kanatların %70'i ihraç edilmektedir.
- **GE-LM Wind Power:** 2017 yılında İzmir Bergama'da GE Yenilenebilir Enerji bünyesinde faaliyet gösteren türbin kanadı tasarımcı ve üretici olan LM Wind Power yeni fabrikasını hizmete sokmuştur. Kanat geliştirme, üretim, servis ve lojistik hizmetleri sunmaktadır. Fabrika toplam 173.995 m² lik bir alanda faaliyet göstermektedir. 738 personel istihdam edip yılda 846 kanat üretim kapasitesine sahiptir.

4.2 Kule Teknolojisi

Bir rüzgar türbininde kulenin üç ana fonksiyonu vardır. Bunlar;

- Naseldeki kuvvetleri ve momentleri temele iletmek,
- Türbini istenilen yüksekliğe taşımak,
- Türbin temelinden nasele ulaşım yolunu sağlamak

olarak sıralanır. Günümüz türbinlerine kule tasarımı hiç bir zaman standart olmaz ve türbin tasarımına, kanat tasarımına ve sahaya özgü rüzgar parametrelerine bağlı değişiklikler gösterir.

Birçok bileşende olduğu gibi türbin kule teknolojisi de evrimsel bir süreçten geçmiştir. Otomasyon avantajı olan %100 boru şekilli çelik kuleler yaygın olarak kullanılsa da, ulaşım sınırlamaları ve türbin yüksekliklerinin artış trendi alternatif tasarımları beraberinde getirmektedir.

Fuhrlander firmasının öncülerinden olduğu ve artık günümüz büyük ölçekli türbinlerde tercih edilmeyen çelik kafes tipi kulelerde, boru tipli kulelere oranla yaklaşık %50

oranında kütle azaltımı söz konusudur. Birçok bağlantı noktası olduğundan yapısal sönümlenme çelik kulelere oranla daha fazladır ve bu sebeple ilk nesil Danimarka tipi 3 kanatlı türbinlerde sıkça kullanılmıştır. Daha sonraları ise arazideki görsel etkiden ve hem üretim hemde kurulum sürecindeki işçilik maliyetlerinin yüksek olmasından tercih edilmemeye başlanmıştır.

Ulaşım ve kurulum maliyetlerini en aza indirmek adına sektör sahada üretilen beton kule fikrine yönelmeye başlamıştır. Bu işlemin kalite kontrolünün zorluğundan dolayı, Enercon firması beton blokları istenilen koşullarda tesislerinde üretip sahada kurulumu tamamlama yöntemine başvurmuşlardır. Enercon birçok türbin modelinde bu kule tipini kullanmış halen bazı türbinlerde hibrit (beton + çelik kule) çözümler sunmaktadır.

Çelik halat destekli kuleler de daha çok küçük ölçekli türbinlerin kurulumunda kullanılmıştır. Düşük ağırlıklı kuleler olup maliyeti düşürme amaçlı tasarlanmıştır.

Maliyeti düşürme amaçlı GE firmasının 2014 yılında lanse ettiği “uzay çerçeve” kulesi, multi-MW türbinler için tasarlanmış, 139 m’ye kadar varan yükseklikte kafes bir direğin özel bir kumaşla kaplanmasından ibarettir. Türbin kurulumlarının çok zor olduğu bölgelerde sahada parçaların kolayca birleştirilmesi ile daha önce rüzgar enerjisinin giremediği bölgelere erişim hedeflenmiştir.

Siemens Gamesa ve Lagerway firmalarının kullanmış olduğu çok kenarlı modüler kuleler çelik levhaların sahada birleştirilmesi ile oluşan, kurulum ve ulaşım maliyetlerini azaltan yenilikçi tasarımlardır.

Sonuç olarak kule yükseklikleri yüksek rüzgarlı sahaların azalmasından ve rüzgar hızının arttığı daha yüksek irtifaya çıkma gerekliliğinden, kanat çaplarındaki ciddi artıştan ve ormanlık alanlarda kurulumların artmasından dolayı artış trendindedir. Ekonomik optimizasyon ve kırsal yerlerde kurulum kolaylıkları göz önüne alındığında çok yönlü modüler kulelerin ve hibrit kulelerin önemi önümüzdeki yıllarda daha artacağı beklenmektedir.

4.2.1 Ülkemizde Kule Üretimi

Ülkemizde kanat üretimi yapan firmalar incelendiğinde;

- **Ateş Wind Power:** 2013 yılında rüzgar türbinleri için boru tipi çelik kule üretimine başlamışlardır. 2018 yılında Bergama/ İzmir'de kurulan yeni fabrika ile ilk ve tek doğrudan tahrikli jeneratör üretimine başlamışlardır. Yılda ortalama kurulu gücü 1500MW'a denk gelen türbin kulesi üretilmektedir. Kule üretimine ek olarak türbin içinde mekanik tamamlayıcılar üretilmekte ve lojistik hizmetler verilmektedir. Üretilen kuleler Enercon, GE, Nordex, Siemens Gamesa ve Vestas firmalarınca kullanılmakta olup yaklaşık 600 personelle hizmet vermektedirler
- **Çiltuğ:** 1971 yılında Gaziantep 1. Organize Sanayi Bölgesi'nde ağır makine ve Çelik işleri alanında faaliyet etmek için kurulmuştur. Hidroelektrik ve Rüzgar enerjisi santrallerinin ihtiyaçlarını karşılayabilmek adına ikinci fabrikalarını işletmeye almışlardır. Rüzgar enerjisi santralleri için çelik kule imalatı, statör yapıları, jeneratör bileşenleri, türbin kanadı göbekleri gibi birçok ağır sanayi mühendisliği alanında, yaklaşık 32.000 m² lik bir alanda hizmet vermektedirler. Üretilen kuleler Nordex, Lagerwey, Amperax ve Areva firmalarınca kullanılmaktadır.
- **Çimtaş:** ENKA'ya bağlı olarak kurulan Çimtaş, Türkiye'de 6 ve Çin'de 1 olmak üzere 7 ayrı tesiste faaliyet göstermektedir. Ana faaliyet alanları; basınçlı kaplar, çelik yapılar, çelik köprüler, çelik rüzgar kuleleri, rüzgar türbinlerinin rotor ve statorları, açık deniz yapıları, proses ekipmanları, atık ısı kazanları ve güç - proses - türbin borulama sistemlerinin tasarımı olarak sıralanabilir. Grup bünyesinde 300 mühendis olmak üzere toplam 3.500 kişi çalışmaktadır. 2500 MW gücünde türbin kulesi üretilmiş olup birçok ülkeye ihraç edilmiştir. Fabrikada azami 120 m yüksekliğinde kule imalatı yapılmaktadır. Üretilen kuleler Alstom, Enercon, Nordex ve GE firmalarınca kullanılmaktadır.
- **Gesbey:** Beyçelik Holding ve İspanyol Gestamp Wind Steel ortaklığı ile 2010 yılında kurulan Gesbey Enerji Türbini Kule Üretim San. ve Tic. A.Ş. rüzgar türbini kule üretimi alanında Bandırma Organize Sanayi Bölgesinde toplam

94.500 m² lik üretim tesisinde faaliyetlerini sürdürmektedir. Gesbey'in yılda 320 adet kule üretim kapasitesi bulunmaktadır. Ağustos 2011'de seri üretime başladığı tarihten günümüze kadar 1,6 MW – 4,5 MW güce ve 76 m – 120 m arasında uzunluğa sahip 95 farklı tipte rüzgar türbini kulesinin imalatını gerçekleştirmiştir. Gesbey, ürünlerini %50 oranında Türkiye pazarına, diğer kısmını ise Almanya, Belçika, Brezilya, Fransa, İspanya, İtalya, Kazakistan, Romanya, Polonya, Ukrayna ve Yunanistan gibi ülkelere ihraç etmektedir.

- **Ege Kule:** Ege Kule, 1955 yılında kurulan ALKE İnşaat ve onun iştiraki olan Turmaks firmasının ortaklığıyla 2013 yılında kurulmuştur. İlk kule üretimi 2010 yılında gerçekleştirilmiştir. İzmir –Aliağa'daki yeni üretim tesisi ile Ege Kule, senede 60-80 adetlik kule üretim kapasitesine ulaşmıştır. Enercon, Alstom, Siemens, Senvion, EWT, Leitwind, Vestas, Goldwind, Gamesa gibi firmaların onaylı tedarikçisi olup, bu firmalar için gerek Türkiye gerek yurtdışı pazarları için kule tedariki yapmaktadır.
- **Temsan:** Sncan/Ankara'da kurulmuş olan firma toplamda 90.000 m²lik alanda faaliyet göstermektedir. Yılda 60-80 adet kule üretebilen firma, yakın tarihte üretim bandını genişleterek yılda 120-160 kule üretmeyi hedeflemektedir. 2016 yılından beri üretilmekte olan kuleler Enercon, Nordex, Siemens ve GE firmalarınca kullanılmaktadır.
- **Akat Prefabrike:** Akat Prefabrike A.Ş. 1996 yılından beri İzmir Torbalı'daki 50.000 m² alanda çalışmalarını sürdürmektedir. Betonarme prefabrike elemanların üretimindeki deneyimlerine istinaden, Enercon firmasının türbinlerinin hibrit beton kulelerinin imalatını 2009 yılından itibaren üretmektedirler.
- **WEC Kule:** Torbalı/İzmir'de Enercon firmasının beton kule tedariki için kurulan Enercon'un bir iştirakidir.

4.3 Jeneratör Teknolojisi

Türbinlerde kullanılan jeneratör teknolojisi üretimi sınırlayan önemli faktörlerden biridir. Asgari kayıpla türbin tarafından üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren bileşenlerdir. Jeneratör teknolojisinde geline nokta akademik açıdan ve/veya endüstriyel uygulamalarda alınan bir görüş birliği halen yoktur. Geleneksel olarak türbinlerde halen kullanılmakta olan üç ana jeneratör tipi mevcuttur [6].

- Doğru akım (DC) jeneratör: Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine doğru akım formunda dönüştüren jeneratör tipleridir. Genelde küçük ölçekli sistemlerde şebeke-den bağımsız uygulamalarda kullanılmaktadır.
- Senkron alternatif akım (AC) jeneratör: Rotor ve statorda bulunan mıknatısların senkronize çalışarak manyetik alan oluşturması prensibi ile çalışmaktadır.
- Asenkron alternatif akım (AC) jeneratör: Rüzgar türbinlerinde sıklıkla görülen 3 fazlı jeneratör tipidir. Düşük maliyetli ve güvenilir olmaları tercih edilme sebepleridir. Stator kısmında bulunan sargıdan geçen akım, dönen bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan jeneratördeki şaftın senkronize hızlanmasını sağlar.

Tüm bu jeneratör tipleri sabit hızda ya da değişken hızda çalıştırılabilir. Rüzgar gücünün dalgalı yapıda olmasından ötürü, türbinleri değişken hızda çalıştırmaların kanatlar ve aktarma organları üzerinde oluşan fiziksel stresi azaltma, aerodinamik verimliliği artırma üzerinde avantajları bulunmaktadır. Buna ek olarak düşük hızlarda düşük gürültü salınımı yapması, güç kalitesinin iyi seviyede olması avantajları arasında yer alırken, maliyet ve güvenilirlik gibi dezavantajları mevcuttur. Sabit hızlı jeneratörler ise basit, düşük maliyetli olmasının yanı sıra düşük güç kalitesi ve kanat, aktarma organlarında yorulmaların gözlenmesi gibi eksi yönleri vardır.

4.2.1 Ülkemizde Jeneratör Üretimi

Ülkemizde jeneratör üretimi yapan firmalar:

- **Ateş Wind Power:** 2018 yılında Bergama/ İzmir'de kurulan fabrika ile ilk ve tek doğrudan tahrikli jeneratör üretimine başlandı. Yılda ortalama 650MW'lık jeneratör üretim kapasitesi bulunmaktadır. Üretilen jeneratörler yapılan ikili anlaşma ile sadece Enercon tarafından kullanılmakta olup yaklaşık 150 personele hizmet vermektedirler
- **Siemens Gamesa:** 2017 yılında sonuçlanan YEKA-1 ihalesi kapsamında Sie-

mens Gamesa İzmir Aliğa Organize Sanayi bölgesinde yaklaşık 40.000 m² lik alanda jeneratör ve nasel üretim fabrikasını inşasını tamamlamış bulunmaktadır. Bu fabrikada 500 kişilik istihdam yaratıp yıllık 100 adet nasel üretimi planlanmaktadır.

4.4 Gelecekteki Teknolojik Eğilimler

Rüzgar endüstrisinin geçmişten günümüze olan gelişim sürecini takip ettiğimizde daha büyük kanat çaplı daha yüksek türbinlerin karada ve denizüstünde kurulacağı öngörülmektedir. Özellikle denizüstü kurulumlarda türbin üreticileri amansız bir rekabete girmiş durumdadırlar. Gelineen noktada GE firmasının prototip kurulumunu tamamladığı, 220 m rotor çaplı 14 MW anma gücündeki Haliade-X türbini daha ne kadar büyüyecek ya da artık doyuma ulaşılacak mı? Bu sorunun cevaplarını önümüzdeki yıllarda bulabileceğiz.

Süperiletken teknolojisinin yaygınlaşması ile beraber rüzgar endüstrisinde de süperiletken jeneratör konusu üzerine firmalar araştırma ve geliştirme çalışmalarına hızla devam etmektedir. AMSC firması tarafından sürdürülen SeaTitan projesi kapsamında süperiletken doğrudan tahrikli jeneratör üretimiyle 10MW'lık türbin üretimi planlanmaktadır. Envision firması da 3,6 MW gücünde süperiletken jeneratör tasarlayarak türbinlerin ağırlığını %40 hafifletmeyi planlamaktadır. Bunun, rüzgardan elde edileek gücün maliyetini %30 azaltacağı öngörülmektedir [7].

Yüzen denizüstü türbinler görünen o ki kurulumun çok maliyetli ve güç olduğu derin sularda önemli bir çözüm olanağı sunmaktadır. Yüzen türbin teknolojisi, deniz yatağının durumundan ve suyun derinliğinden bağımsız, standart ekipmanlara kurulum kolaylığı sağlamaktadır. Farklı temel çözümleri üzerine araştırmalar devam ederken maliyeti düşürme senaryoları üzerinde durulmaktadır [8].

Kaynaklar:

1. ETKB, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu>
2. “Next-Generation Wind Technology” <https://www.energy.gov/eere/wind/next-generation-wind-technology>
3. IEC Classification of Wind Turbines. Wind Resource Assessment and Micro-siting, Science and Engineering, 2015
4. L., Mishnaevsky et.all, Materials for Wind Turbine Blades: An Overview, 2017, Materials (Basel), 10(11), 1285.
5. AERO Rüzgar Endüstri A.Ş, <https://www.aerowind.com.tr/>
6. Wenping Cao, Ying Xie and Zheng Tan, Wind Turbine Generator Technologies, 2012, Ch7, Advances in Wind Power, Edited by Rupp Carriveau.
7. Innovation and Networks Executive Agency, http://cordis.europa.eu/project/rcn/195203_en.html
8. Offshore Wind Outlook, 2019



TMMOB
FİZİK MÜHENDİSLERİ ODASI

5 SONUÇ VE DEĞERLENDİRME



5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Enerjide dışa bağımlılık özellikle enerji ihtiyacının büyük kısmını dışarıdan ithal eden Türkiye gibi ülkeler açısından önemli bir dezavantaj niteliğindedir.

Türkiye'nin enerji ithalatı önceki yıllara oranla sürekli azalan bir eğilim göstermektedir. Türkiye'nin yerli ve yenilenebilir kaynaklarını daha etkin ve verimli bir şekilde kullanması bu durumun sebepleri arasında sayılabilmektedir. Türkiye'nin önümüzdeki dönemlerde enerjide dışa bağımlılığı azaltıcı çalışmalara önem vermesi ve yenilenebilir enerji potansiyellerini bir an önce ekonomiye kazandırması gerekmektedir.

Bu bağlamda Türkiye geleceğe yönelik enerji politika ve projelerini gerçekçi, güvenilir ve sağlam temellere oturtmak zorundadır. Uzun vadede, Yenilenebilir Enerjinin Türkiye'nin enerji politikasında çok önemli olacağı gerçeği dikkate alındığında şu hususlar ön plana çıkacaktır;

- Yenilenebilir enerji sektörünün uluslararası kural ve düzenlemeler çerçevesinde geliştirilmesine özen gösterilmelidir. Yenilenebilir enerji sektöründeki değişimlere ve gelişmelere hızla ayak uydurmak ve uygulanabilir şekilde hayata geçirmek gerekmektedir.
- Özellikle yenilenebilir enerji için fiyat garantisi uygulamasının hassas bir düzenleme ile uygulanması kaçınılmazdır. Yatırımcıların teşvik edilmesi ve yenilenebilir enerjinin fosil yakıtlarla rekabet edebilmesi adına fiyat politikası üzerinde önemle durulmalıdır.

- Yenilenebilir enerji potansiyelini değerlendirmek için çeşitli altyapı ve üstyapı çalışmalarına önem verilmelidir. Mevcut teşvik sisteminin ve hukuki yapı çerçevesinde var olan düzenlemelerin genişletilerek devam ettirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda toplam enerji tüketimindeki kullanım oranlarını artırmak adına yenilenebilir enerjiden faydalanma teşvik edilmelidir. Altyapısı uygun yerlerde yenilenebilir enerji kullanımı zorunlu hale getirilerek yaygınlaştırılabilir olmalıdır.
- Türkiye yenilenebilir enerji yatırımlarında yabancı teknolojiye ihtiyaç duymaktadır. Maliyetlerin yüksek olmasına neden olan bu durumun önüne geçebilmek adına kullanılan teknik ekipmanların yerli üretimleri teşvik edilmeli ve bizzat devlet tarafından desteklenmelidir. Bu doğrultuda özellikle rüzgâr türbinleri ve güneş panelleri gibi yenilenebilir enerji donanımlarının yerli üretimleri kullanılmalıdır.
- Yenilenebilir enerji alanındaki yatırımların devam edebilmesi adına öngörülebilir kamu politikaları ve siyasi istikrar gerekmektedir.
- Yenilenebilir enerji sektöründe yaşanan bürokratik engellerin giderilmesi ve yatırımcıların lisanslama işlemleri, plan, proje ve yatırım faaliyetleri açısından başvuru yapılacak kurum sayısının en aza indirilmesine ihtiyaç vardır.
- Sektörde yaşanan kalifiye iş gücü sorununun çözümüne yönelik düzenlemeler ve eğitimler artırılmalıdır. Üniversite ve sanayi iş birliği ile ilgili alanlarda belirlenen eksiklikler giderilmeli ve piyasanın ihtiyaçlarına yönelik eğitimler verilmelidir. Yine üniversitelerin lisans ve lisansüstü programlarında bulunan yenilenebilir enerji ile ilgili derslerin sayısı artırılmalıdır.
- Yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin iletimi ve depolanması hususlarındaki sorunlar giderilmelidir. Yenilenebilir enerjiji üretmek kadar onu iletmek ve depolamak da zahmetli ve maliyetli bir iştir. Özellikle rüzgar ve güneş enerjisi gibi yerleşim bölgelerine nispeten uzak alanlarda kurulan tesislerde üretilen enerjinin enterkonnekte sisteme verilmesi ve/veya bir kısmının da depolanması için enerji depolama sistemleri teknolojileri dikkatle incelenmelidir.
- Türkiye'nin enerjide dışa bağımlılığını azaltması adına yenilenebilir enerji sektöründeki verimlilik artırılmalı ve yenilenebilir enerji kaynaklarının diğer enerji kaynakları ile finansal açıdan rekabet edebilmesi sağlanmalıdır.

- Yenilenebilir enerji yatırımları çevre etkileri hesaba katılacak şekilde gerçekleştirilmelidir. Yenilenebilir enerji çevreye duyarlı ve temiz bir enerji olma noktasında oldukça önemlidir. Ancak rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji sistemlerinin kuruldukları bölgelerdeki ormanlık ve tarım alanları tahrip edilmeden bu sistemlerin aktif hale getirilmesi gerekmektedir.
- Yenilenebilir enerji hakkında tüm medya organları kullanılarak daha fazla bilgilendirme yapılmalı ve bu konudaki halkın bilgisi ve farkındalığı artırılmalıdır.
- Coğrafi konumu ve jeolojik yapısı nedeniyle yenilenebilir enerji potansiyeli önemli derecede yüksek olan ülkemizde karar vericilerin bu potansiyelden faydalanmak adına gerekli tedbirleri alması ve artırması gerekmektedir.
- Diğer taraftan yenilenebilir enerji alanındaki teknolojik ilerlemelerin daha yakından takip edilmesi ve bu teknolojik ilerlemenin bir parçası olunması gerekliliği bir gerçektir.

Enerjide önemli ölçüde dışa bağımlı bir ülke, enerji kaynaklarını çeşitlendirmek ve yenilenebilir enerji üretimini teşvik edip artırmak zorundadır. Bu nedenle istikrarlı bir enerji politikası ile hedeflere ulaşılması gerekir.