

GÜNEŞ PANELİ MALZEMELERİNİN VERİMLİLİĞİ VE TİCARİ DURUMUYLA İLGİLİ BİR ARAŞTIRMA

Hazırlayan: Yüksel Atakan, Dr. Fizik Y. Müh. ybatakan4@gmail.com 09.02.2026 /I/

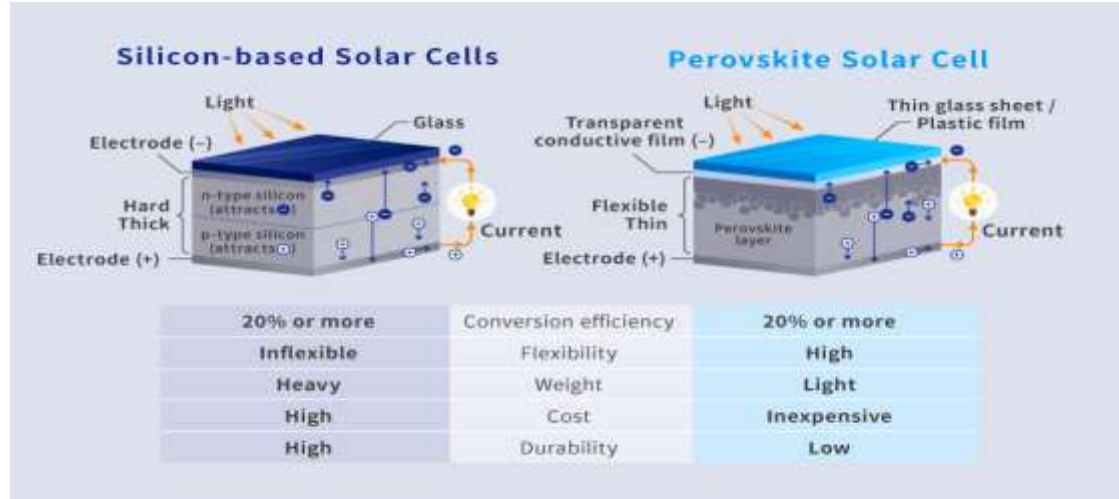
1. Giriş

Güneş enerjisi, küresel ölçekte artan enerji gereksinimi ve sera gazlarının iklimi bozması nedeniyle stratejik bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Fotovoltaik (PV) teknolojiler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen yarı iletken malzemeler kullanarak çalışır ve son yirmi yılda hem verimlilik hem de maliyet açısından büyük gelişim göstermiştir.

Özellikle silikon tabanlı hücre teknolojileri endüstriyel ölçekte olgunlaşmış olmakla birlikte, perovskit-silisyum tandem yapılar gibi yeni nesil teknolojiler laboratuvar sınırlarını aşarak ticari uygulamalara girmeye başlamıştır.

Bu çalışmanın amacı; günümüzde ticari olarak üretilen başlıca güneş hücresi malzemelerini verimlilik, maliyet ve enerji üretim kapasitesi açısından karşılaştırmak, ayrıca örnek bir 20 kg panel üzerinden yıllık enerji çıktısı kesirimleri yapmaktır. Çalışma, teknolojik başarıyla, ekonomik sürdürülebilirlik arasındaki ilişkiyi ortaya koyarak gelecekteki PV eğilimlerine ışık tutmayı hedeflemektedir.

2. Güneş Hücresi Malzemelerinin Verimlilik Karşılaştırması



2.1 Malzemelerin Temel Özellikleri

1. **Perovskit-Silisyum Tandem** teknolojisi, bugünkü ticari üretimlerde en yüksek verimlilik aralığını göstermektedir.
2. **Heterojunction (HJT)** ve **TOPCon** hücreler, yüksek verimlilikle birlikte endüstriyel üretimde yaygınlaşmaktadır.
3. **IBC (Back-Contact / Arka temash)** tasarımlar verimlilikte öne çıkarken maliyetleri oldukça yüksek olabilir.
4. Standart **monokristalin ve polikristalin silikon** paneller sektörde geniş kabul görmüş klasik teknolojilerdir.
5. **İnce film** türleri (örneğin CIGS, CdTe, a-Si) düşük maliyetli ancak görece daha düşük verimliliğe sahip seçeneklerdir.

2.2 Enerji Üretimi ve Maliyet Değerlendirmesi

Bu bölümde sunulan tablo, farklı malzemelerin ticari üretimdeki başarılarını göstermektedir. Örneğin **Perovskit-Silisyum tandem paneller**, en yüksek verimlilikle **20 kg panel başına yılda ~400–600 kWh** enerji üretme potansiyelindedir.

Aşağıda, ticari olarak büyük ölçekli üretimde kullanılan **en verimli 10 güneş hücresi malzemesi ve teknolojisi** listelenmiştir. Her bir teknoloji için tipik verimlilik, yaklaşık maliyet ve 20 kg'lık bir panel ile yılda elde edilebilecek enerji miktarı gösterilmiştir.

- ◆ Burada verimlilik, bir güneş panelinin güneş ışığını elektriğe çevirme oranını göstermektedir.
- ◆ 20 kg panel örneği için yaklaşık 400 W'lık bir panel gücü varsayılmıştır.
- ◆ Yıllık kWh kestirimleri, ortalama 4,5 saat/gün verimli güneş ışığı alındığına göre hesaplanmıştır.

Solar	Malzeme / Teknoloji	Tipik Ticari Verimlilik	Yaklaşık Maliyet (\$/W)	20 kg Panel Fiyatı	20 kg Panel Yıllık kWh Üretim
1	Perovskit-Silisyum Tandem	~%28–30	~\$0,30–\$0,50	\$120–\$200	~400–600 kWh
2	Heterojunction (HJT) Silikon	~%24–26	~\$0,35–\$0,60	\$140–\$240	~350–550 kWh
3	TOPCon (Si)	~%24–25	~\$0,30–\$0,50	\$120–\$200	~350–500 kWh
4	IBC (Arka Temash Si)	~%23–24	~\$0,40–\$0,60	\$160–\$240	~340–490 kWh
5	Yüksek Kalite Mono-Si (PERC/N-Type)	~%22–23	~\$0,25–\$0,45	\$100–\$180	~320–470 kWh
6	Standart Mono-Si	~%20–22	~\$0,20–\$0,40	\$80–\$160	~300–430 kWh
7	Polikristalin Si (Multi-Si)	~%15–18	~\$0,18–\$0,30	\$70–\$120	~230–350 kWh
8	CIGS İnce Film	~%13–16	~\$0,20–\$0,40	\$80–\$160	~180–300 kWh
9	CdTe İnce Film	~%12–15	~\$0,15–\$0,35	\$60–\$140	~170–280 kWh
10	Amorf Si (a-Si)	~%8–12	~\$0,15–\$0,30	\$60–\$120	~120–220 kWh

3. Değerlendirmeler

Bu analiz, ticari güneş hücrelerinde verimlilik ile maliyet arasında bir **denge ilişkisi** olduğunu ortaya koymaktadır. En yüksek verimlilik artışı sunan teknolojiler genellikle üretim ve yatırım açısından daha yüksek maliyetler gerektirirken, standart silikon paneller hala **maliyet-etkinlik açısından güçlü sonuçlar** vermektedir.

DÜNYADA EN ÇOK GÜNEŞ PANELİ ÜRETEN ÜLKELER VE ŞİRKETLER

Ülkeler — Güneş Paneli Üretim Payı (2025 Tahmini)

Sıra Ülke Global Üretim Payı / Göreli Konum

1	Çin	Dünya üretiminin ~80–85%'i Çin'de üretiliyor
2	Vietnam	İkinci en büyük üretim kapasitesi
3	Malezya	~%2.8 pay
4	ABD	~%1.9 pay
5	Hindistan	~%1.9 pay
6	Güney Kore	~%1.9 pay
7	Tayland	~%1.2 pay
8	Tayvan	~%0.5 pay
9	Kanada	~%0.4 pay
10	Diğer	~%5.2 pay

Çin, açık farkla en büyük global üretici konumundadır ve üretimin büyük bölümünü elinde tutmaktadır.

Önde Gelen Güneş Paneli Üreticisi Şirketler

Şirket	Ülke	Yaklaşık Yıllık Üretim (ör. 2024 verisi)
JinkoSolar Holding Co., Ltd.	Çin	~47.2 GWp (Karşılaştırma: Akkuyu 4 Reaktör 4,8 GW,
JA Solar Technology Co., Ltd.	Çin	~38 GWp ancak GES Verim % 12, Akkuyu % 85)
Tongwei Solar	Çin	~18.7 GWp (ilk yarı 2024)
LONGi Green Energy	Çin	~31.3 GWp
Aiko Solar (Aiko)	Çin	~30.7 GWp
Canadian Solar	Kanada	~16.8 GWp
Trina Solar	Çin	~14.5 GWp
Diğer	—	Çeşitli ölçeklerde üreticiler

Birçok üretici Çin merkezlidir ve küresel üretim kapasitesini domine etmektedir.

4. Güneş Hücresi Teknolojilerinin Karşılaştırılması (Çoğu 20 kg ve 400 Watt)

Malzeme / Teknoloji	Ticari Verimlilik (%)	Yaklaşık Maliyet (\$/W)	Yıllık Enerji Üretimi (kWh)
Perovskit-Si Tandem	28–30	0.30–0.50	400–600
HJT Silikon	24–26	0.35–0.60	350–550
TOPCon Silikon	24–25	0.30–0.50	350–500
IBC Silikon	23–24	0.40–0.60	340–490
Mono-Si (PERC/N-Type)	22–23	0.25–0.45	320–470
Standart Mono-Si	20–22	0.20–0.40	300–430
Polikristalin Si	15–18	0.18–0.30	230–350
CIGS İnce Film	13–16	0.20–0.40	180–300
CdTe İnce Film	12–15	0.15–0.35	170–280
Amorf Si (a-Si)	8–12	0.15–0.30	120–220

Verimlilik

En yüksek ticari verimlilik perovskit-silisyum tandem hücrelerde gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, HJT ve TOPCon teknolojileri olgun üretim altyapısı ve uzun vadeli güvenilirlikleri sayesinde günümüz pazarında güçlü konuma sahiptir. İnce film teknolojileri ise esneklik ve düşük ağırlık avantajı sunarken verimlilik açısından kristalin silikon tabanlı hücrelerin gerisinde kalmaktadır.

SORUNLAR VE ÇÖZÜMLER

1) Dayanıklılık & Stabilite Problemleri

Perovskit malzemeleri **çevresel koşullara karşı hassastır** — özellikle güneş paneli gibi dış ortamda çalışacak ürünler için bu büyük bir sorundur:

- **Nem (su) ve oksijen**, perovskit kristallerini hızla bozabilir, verim düşürür ve malzemeyi parçalar (örn. PbI_2 gibi by-ürünlere dönüşüm).
- **Sıcaklık ve UV ışığı**, hücrenin kimyasal yapısını değiştirip verim ve ömrünü azaltabilir.
- Hybrid organik–inorganik perovskitler hâlâ **uzun vadeli kararlılık (10+ yıl gibi)** sağlayacak seviyede değildir ve bu da ticari paneller için standart kabul edilen 25+ yıl beklentisinin çok altında kalır.

Bu yüzden perovskit hücreler laboratuvar ortamında iyi verim verirken gerçek dünya koşullarında güvenilirlikleri sınırlıdır.

2) Çevre ve Zehirlilik (Toksisite) Kaygıları: Kurşun ve diğer zararlı maddeler içeriği

- Birçok yüksek verimli perovskit hücresinde **kurşun (Pb)** bulunur. Bu, çevresel ve sağlık açısından kaygı yaratır — özellikle hücre bozulursa veya geri dönüştürülmezse.
- Kurşun içeriği nedeniyle bazı bölgelerde sıkı regülasyonlara takılabilir veya ekstra güvenlik/geri dönüşüm sistemleri gerektirebilir.

Araştırmacılar Pb'yi azaltmak ya da tamamen kurşunsuz bileşikler geliştirmek için çalışsa da bu henüz ticari çapta yaygınlaşmadı.

3) Büyük Alanlarda Üretim ve Ölçeklendirmenin Zorlukları

- Küçük laboratuvar hücrelerinde yüksek verim elde etmek kolayken, **büyük yüzeyli panellerde aynı verimi ve kaliteyi korumak zor**. Film kaplama işlemlerinde homojenlik ve kusursuz tabaka oluşturmak endüstriyel ölçekte hâlâ büyük bir mühendislik sorunu.
- Üretim süreçleri çoğunlukla kontrollü/kurutulmuş ortamlarda yapılır; dış mekanda ve hızlı üretimde performans düşüşü yaşanabilir.
- **Not: Genel olarak Güneş panellerinde antimon, kadmiyum, gümüş gibi daha başka zehirli maddeler de bulunur (Bkz Kaynaklar son link)**

Bu, üretim hattı standartlarını çok daha karmaşık ve pahalı hâle getirir; dolayısıyla endüstriyel yaygınlık sınırlı kalır.

4) Kararlılık Testleri ve Standart Protokoller Eksikliği

- Perovskit hücreler için **uluslararası standart “uzun ömür / dayanıklılık” test protokolleri** halen olgunlaşmamıştır — bu da gerçekçi yaşam sürelerinin güvenle kestirilmesini zorlaştırır.

Ticari garanti vermek isteyen üreticiler için bu belirsizlik büyük risk oluşturmaktadır.

Rakip Teknolojilerle Rekabet

- **Kristalin silikon** teknolojisi, 30+ yıl kullanım ömrü ve tam olgunlaşmış tedarik zinciri ile hâlâ baskındır. Perovskit, mevcut sistemlerle entegrasyon (ör. tandem hücrelerde) hâlâ yeni bir alandır ve **ticari üretim hâlâ çoğunlukla laboratuvar/deneme düzeyinde kalmaktadır**.

Bu nedenle GES’de genellikle güvencesi yüksek ve pazar tarafından kabul görmüş silikon panelleri tercih ediyor.

Sonuçlar

Perovskit güneş hücreleri **mükemmel verim potansiyeline** sahip olsalar da **dayanıklılık, toksisite ve üretim ölçeklendirilebilirliği gibi temel zorluklar nedeniyle** hâlâ ticari kullanımda çok yaygın değil. Bu yüzden teknoloji pazarda hâlâ **gelişmekte olan bir inovasyon ürünü** konumunda — gelecekte olabilir, ama bugün büyük paya sahip değil.

Perovskit Güneş Hücrelerinin Az Kullanılma Nedenleri

◆ 1. Düşük Dayanıklılık & Kararlılık

Perovskit malzemeler, özellikle **nem, oksijen, UV ışığı ve yüksek sıcaklık** gibi çevresel etkenlere karşı çok hassastır.

- Bu etkenler hücrenin yapısını bozar, verimi düşürür ve malzemenin çökmesine yol açar.
- Örneğin metilamonyum gibi organik bileşenler nemle hızla reaksiyona girerek bozunur.

➡ Bu nedenle ticari güneş panellerinde beklenen **25+ yıl dayanıklılık halen tam sağlanamıyor.**

Çözüm yaklaşımları:

- Hücrenin etrafını koruyan **güçlü kapsülleme yöntemleri** geliştiriliyor → nem, oksijen ve sıcaklık girişini engellemek için çok katmanlı bariyerler yapılıyor.

◆ 2. Çevresel & Zehirlilik Kaygıları

Çoğu yüksek verimli perovskit hücre, **kurşun (Pb)** içerir.

- Kurşun çevresel ve sağlık riskleri oluşturabilir; özellikle modül kırılır veya doğru geri dönüştürülmezse risk artar.

➡ Bu nedenle bazı bölgelerde regülasyon engelleri ve ilave güvenlik gereksinimleri ortaya çıkıyor.

Çözüm yaklaşımları:

- Kurşun içermeyen (örneğin **kalay-bazlı**) perovskitler araştırılıyor ama bu alternatiflerin stabilitesi ve verimi hâlâ daha düşük.

◆ 3. Büyük Ölçekli Üretim Zorlukları

Lab ortamında küçük hücrelerde yüksek verim elde etmek kolay olsa da:

- Büyük alanlı panellerde **film kalitesi, homojenlik ve verim** korunması zor.
 - Laboratuvar yöntemleri (spin-kaplama gibi) sanayiye doğrudan uygun değil; yerine **roll-to-roll, slot-die vb.** teknikler gerekiyor.
- Üretimde süreklilik ve tekrarlanabilirlik sağlanana kadar yaygın üretim zorlaşıyor.

Çözüm yaklaşımları:

- Yeni **baskı ve kaplama teknikleri** üzerinde çalışılıyor ama bunlar hâlâ geliştirilme aşamasında.

4. Enerji Verimliliği & Performans Kaybı

Laboratuvarda yüksek verimler mümkün olsa da:

- Gerçek yaşamda uzun süreli başarı düşüşleri yaşanabiliyor (ışık, sıcaklık, nem etkisiyle).

Bu da perovskit hücrelerin ömür boyu performansını etkiliyor.

Çözüm yaklaşımları:

- Arayüz mühendisliği, **iyon göçünü azaltma, katman pasifleştirme** gibi yöntemler aracılığıyla verim ve dayanıklılık artırılmaya çalışılıyor.

Kısaca: Ticari Ölçekte Neden Az Kullanılıyor?

Sorun	Etki
◆ Stabilite problemleri	Panelin ömrü düşük, dayanıklılığı düşük
◆ Kurşun zehirliliği	Çevre ve onaylanma riskleri
◆ Büyük ölçek üretim zorlukları	Sanayi üretimi pahalı/karmaşık

Sorun

Etki

◆ Uzun süreli başarı kaybı

Güvenilir çalışma süresi belirsiz

➡ Bu sorunlar çözüldüğünde perovskit hücreler **ticari olarak çok daha yaygın hale gelebilir.**

🔧 Çalışmalar Nasıl Çözümler Üretiyor?

Başlıca çözüm yönleri:

- ✓ Gelişmiş kapsülleme teknikleri → çevresel etkilere karşı koruma.
- ✓ Film kalitesini artıran **yüzey pasifleştirme** ve **arıza azaltma** taktikleri.
- ✓ **Kurşunsuz perovskit bileşenleri** üzerinde araştırma.
- ✓ Endüstriyel üretime uygun **baskı/kaplama yöntemleri** geliştirme.

Perovskit Hücrelerde Kararlılık / Dayanıklılık Artırma Çözümleri

Encapsulation (Koruyucu Kaplama / Paketleme)

Çevresel stres faktörlerine (nem, oksijen, UV, sıcaklık) karşı en etkili dış bariyer yöntemi.

Genel sonuçlar

Perovskit hücrelerde **kararlılığı artırmak**, yalnızca bir yöntemle değil; çok **katmanlı bir mühendislik stratejisiyle** mümkün oluyor.

Bu stratejiler hem hücrenin iç yapısını ("pasifleştirme", iyon optimizasyonu), hem arayüzleri (transport / metal reaksiyonları), hem de dış çevresel koşullara karşı korumayı (encapsulation) kapsıyor.

Bu alandaki ilerlemeler, perovskit teknolojisinin ticari ürünlerde daha yaygın kullanılmasına doğru somut adımlar atıyor — özellikle encapsulation ve defect passivation gibi çözümler **ömür ve dayanıklılığı büyük ölçüde artırıyor.**

Bu çalışma, ticari güneş hücresi teknolojilerinde verimlilik ile maliyet arasında güçlü bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Yüksek verimli hücreler daha fazla enerji yoğunluğu sağlarken üretim karmaşıklığı ve yatırım gereksinimi maliyetleri artırabilmektedir. Perovskit-silisyum tandem teknolojileri gelecekte verimlilik rekorlarını daha da ileri taşıma potansiyeline sahip olmakla birlikte, uzun dönem stabilite ve seri üretim güvenilirliği gibi konular hâlen araştırılmaktadır. Buna karşın HJT ve TOPCon gibi gelişmiş silikon teknolojileri, olgun üretim hatları ve kanıtlanmış saha performansları nedeniyle kısa ve orta vadede pazarın ana taşıyıcıları olmaya devam edecektir.

Sonuç olarak, güneş enerjisi sistemlerinde teknoloji seçimi yalnızca maksimum verimliliğe göre değil; yatırım maliyeti, kurulum alanı, iklim koşulları ve uzun vadeli performans kriterleri dikkate alınarak yapılmalıdır. Gelecek yıllarda çok katmanlı hücre mimarilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte birim alan başına enerji üretiminin artması beklenmektedir.

Kaynaklar /I/ YZ

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) Fotovoltaik Güç Sistemleri Programı Raporları
Fraunhofer ISE Photovoltaics Report

National Renewable Energy Laboratory (NREL) Solar Cell Efficiency Charts

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) Yenilenebilir Enerji İstatistikleri

Endüstriyel üretici teknik dokümanları (JinkoSolar, LONGi, Trina Solar, JA Solar vb.)

Tüm üretim ve pazar payı verileri ticari istatistik raporlarına dayanmaktadır.

[Güneş Enerjisi Gerçekten Temiz ve Ucuz mu? Hurda panellerdeki zararlı ve zehirli katkı maddeleri çevreye yayılmamalı](#)
[Y.Atakan 24.12.2025 - Fizik Y. Müh. Dr. Yüksel Atakan](#)