

Güneş Hücreleri

Veysel Çelik¹

Özet

Bu kitap bölümü, güneş hücrelerinin işleyişini, farklı türlerini, verimliliklerini, ekonomik ve maliyet etkinliklerini, çevresel etkilerini, topluma olan etkilerini, bilimsel araştırmaları ve inovasyonları, gelecekteki beklentileri ve perspektifleri detaylı bir şekilde incelemektedir. Temel işleyiş süreçleri ve farklı güneş hücre türleri ile başlayan bölüm, bu teknolojilerin verimlilik ve maliyet etkinlik boyutlarına ışık tutmaktadır. Çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik kavramları, güneş hücrelerinin çevre dostu bir enerji alternatifi olarak öne çıkmasını sağlamaktadır. Bilimsel araştırma ve inovasyonlar, tüm bu başlıkların merkezine oturmuş durumdadır. İnovasyon ve araştırma, güneş hücre teknolojilerinin verimliliğini artırmak, maliyetlerini azaltmak, daha çevre dostu hale getirmek ve toplumun daha geniş kesimlerine ulaştırmak için hayati önem taşımaktadır. Son olarak, bölüm gelecekteki gelişmeler, beklentiler ve güneş hücrelerinin genel gelecek perspektifini okuyuculara sunmaktadır.

1. Giriş

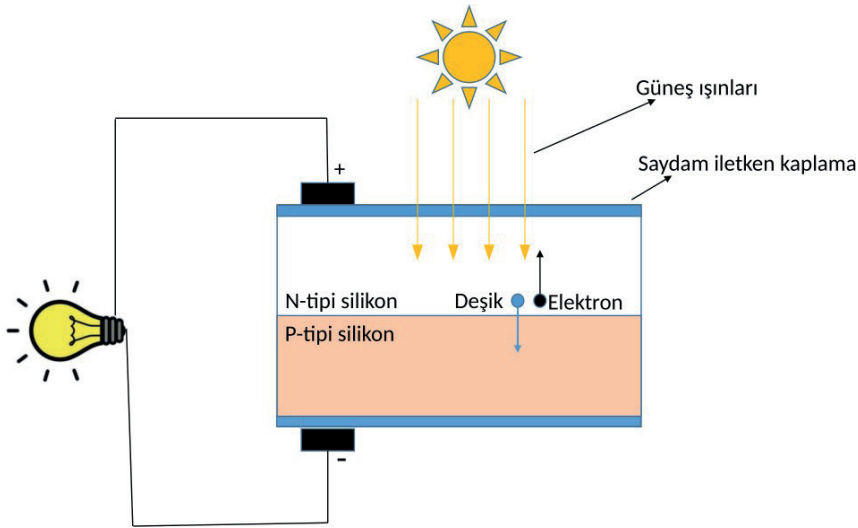
Dünya genelinde hızla büyüyen enerji talebi, iklim değişikliği ve çevresel sorunların artması, enerji kaynaklarının kökenini yeniden düşünmemizi gerektiriyor. Kullandığımız fosil yakıtlar, gezegenimizin karbon ayak izini önemli ölçüde artırıyor ve hızla tüketiyor. Gelecekte, bu enerji kaynaklarından biri veya hepsi bir noktada tükenecek. Bu durum, sürdürülebilir ve çevreye zarar vermeden enerji üretebilecek alternatifler arayışını hızlandırıyor. İşte tam da burada güneş hücreleri devreye giriyor. Güneş hücreleri, dünyamızın enerji ihtiyacını karşılamada potansiyel bir çözüm sunar. Çünkü güneş, bize geniş ve sınırsız bir enerji kaynağı sağlar. Güneş enerjisi, güneş hücreleri tarafından elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Bu teknoloji, fosil yakıtların yerini

1 Siirt Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği Bölümü, vcelik@siirt.edu.tr, Orcid: 0000-0001-5020-8422

alabilecek bir yenilenebilir enerji kaynağı sağlama potansiyeline sahiptir. Bu muazzam enerji potansiyeli, güneş hücreleri ve fotovoltaik (PV) teknoloji aracılığıyla kullanılabilir hale getirilmiştir.

Güneş hücreleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip olan yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Bir güneş hücresi, yüzeyine düşen ışığın enerjisini emerek ve bu enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek çalışır. Bu süreç, “fotovoltaik etki” olarak adlandırılır. Fotovoltaik teknoloji, hem enerji üretiminde hem de enerji tüketiminde büyük bir dönüşüm potansiyeli taşır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma çabalarımızın önemli bir parçasıdır. Bu bağlamda, güneş hücreleri ve onların sürekli gelişimi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji geleceği oluşturma çabalarımızın merkezinde yer alıyor. Bu bölüm, güneş hücrelerinin temel işleyişini, farklı türlerini ve teknolojilerini, maliyet analizini, verimlilik faktörlerini ve çevresel etkilerini anlamamıza yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, en yeni bilimsel araştırmalar ve inovasyonlar hakkında bilgi vererek, bu alanın gelecekte ne yönde ilerleyeceği konusunda bir perspektif sağlar.

Şekil 1: Tipik silikon tabanlı bir güneş hücresinin çalışma prensibi.



2. Güneş Hücrelerinin Temel İşleyişi

Güneş hücreleri, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi için kullanılan fotovoltaik (PV) cihazlardır. Temel işleyişleri, fotovoltaik etki olarak bilinen bir fiziksel süreci içerir. Bu süreç, ilk olarak 19. yüzyılda keşfedildi ve enerji sektöründe devrim yaratmıştır (Palz, 2010). Şekil 1’de silikon

tabanlı bir güneş hücresinin temel işleyişi gösterilmektedir. Fotovoltaik etki, bir malzemenin yüzeyine ışık düştüğünde meydana gelir. Işık, enerji taşıyan parçacıklar olan fotonları içerir. Fotonlar, güneş hücresine çarptığında, hücrenin yarı iletken malzemesinde elektronların serbest bırakılmasına neden olur. Bu serbest elektronlar, bir elektrik devresi oluşturmak için malzeme boyunca hareket ederler. Güneş hücrelerinin çoğu, yarı iletken silikon tabakalarından oluşur. Bu tabakalar genellikle, biri “p-tipi” ve diğeri “n-tipi” olmak üzere iki farklı türde olur. P-tipi ve n-tipi silikon tabakaları arasında bir “pn eklemi” oluşturulur. Pn eklemi, bir yük bariyeri oluşturarak elektronların sadece bir yönde akmasını sağlar. Bu, bir elektrik akımının oluşmasına neden olur. Verimlilik, bir güneş hücresinin başarı ölçütüdür. Bir güneş hücresinin verimliliği, hücrenin alınan güneş enerjisinin ne kadarını elektrik enerjisine dönüştürebildiğini ifade eder. Verimlilik, bir dizi faktör tarafından etkilenir, ancak malzeme kalitesi, hücre tasarımı ve işlem koşulları gibi faktörler en belirgin olanlarıdır.

3. Güneş Hücrelerinin Tarihçesi

Güneş hücrelerinin kökeni, 19. yüzyıla dayanır. Ancak, bu teknolojiyi modern dünyanın enerji sistemine entegre etme çabaları büyük ölçüde 20. yüzyıla özgüdür. İlk fotovoltaik etki, 1839’da Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından gözlemlendi (Edmond, 1839). Ancak, bu buluşun pratik uygulamaları oldukça sınırlıydı çünkü 19. yüzyılın teknolojisi, güneş ışığını etkili bir şekilde elektrige dönüştürme yeteneğinden yoksundu. 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, güneş hücreleri teknolojisi, enerji üretiminin bir formu olarak daha fazla dikkat çekmeye başladı. 1954’te, Bell Labs, modern güneş hücresinin ilk prototipini tanıttı. Bu hücre, bir pn eklemine sahip saf silikon bir hücreydi ve verimliliği %6’yı bulmuştu (Chapin ve ark., 2004). Apollo ve Voyager gibi uzay misyonları, güneş hücre teknolojisindeki ilerlemeyi hızlandırdı. Bu misyonlarda kullanılan uydu ve uzay araçları, güneş hücreleri tarafından güç sağlanan ilk cihazlar oldu. 1980’ler ve 1990’lar, fotovoltaik teknolojide büyük ilerlemelere tanıklık etti. Bilim insanları ve mühendisler, güneş hücrelerinin verimliliğini artırmak ve maliyetlerini azaltmak için yeni malzemeler ve üretim teknikleri keşfetti. Örneğin, ince film güneş hücreleri ve çoklu bağlantı hücreleri, bu dönemde önemli gelişmeler oldu. 21. yüzyılda, güneş hücreleri daha geniş çapta benimsendi ve enerji üretiminde daha önemli bir rol oynamaya başladı. İklim değişikliği ve sürdürülebilir enerji konularındaki artan farkındalık, hükümetler ve işletmeler arasında güneş enerjisi teknolojilerine yatırım yapma isteğini artırdı. Perovskit güneş hücreleri gibi ileri teknolojiler, bu dönemde geliştirildi ve ticarileştirildi (Kojima ve ark., 2009). Güneş hücrelerinin tarihçesi, teknolo-

jik ilerlemeye ve sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru ilerleyen sürekli bir yolculuktur. Bu yolculuk, bilim, teknoloji ve çevre farkındalığı arasındaki etkileşimleri vurgular.

4. Güneş Hücrelerinin Farklı Türleri ve Teknolojileri

Güneş hücreleri, çeşitli malzemeler ve teknolojiler kullanılarak üretilir. Her tür ve teknoloji, belirli avantajlar ve sınırlamalar sunar. En yaygın kullanılan güneş hücre türleri kristal silikon hücreler, ince film hücreler ve çok bağlantılı hücrelerdir. Kristal silikon hücreler, en yaygın kullanılan güneş hücresi türüdür ve pazarın büyük bir bölümünü oluşturur. Bunlar genellikle monokristal veya polikristal formda bulunur. Monokristal hücreler, yüksek verimlilik sağlar ancak üretim maliyetleri yüksektir. Polikristal hücreler, daha düşük maliyetlidir ancak verimlilikleri genellikle monokristal hücrelerden daha düşüktür. İnce film güneş hücreleri, genellikle bakır indiyum galyum diselenid (CIGS), kadmiyum tellurid (CdTe) veya amorf silikon (a-Si) gibi malzemelerden yapılmıştır. İnce film hücrelerinin avantajları, hafif olmaları, esnek olmaları ve gölgelendirme veya yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı olmalarıdır. Bununla birlikte, genellikle kristal silikon hücrelerinden daha düşük verimliliklere sahiptirler. Çoklu bağlantılı hücreler veya çok katmanlı hücreler, genellikle uzay uygulamalarında kullanılır ve en yüksek verimlilikleri sunar. Bu hücreler, farklı dalga boylarındaki ışığı emmek için birden çok yarı iletken tabaka kullanır. Bu, hücrelerin daha geniş bir ışık spektrumunu kullanmasını ve bu sayede daha yüksek verimliliklere ulaşmasını sağlar. 21. yüzyıl, güneş hücre teknolojilerinde bir dizi yeni ve heyecan verici gelişmeye tanıklık etmiştir. Özellikle perovskit güneş hücreleri, yüksek verimlilikleri ve potansiyel olarak düşük maliyetleri ile dikkat çekmektedir. Bu güneş hücreleri, inorganik ve organik malzemelerin bir kombinasyonunu kullanır ve laboratuvar koşullarında %25'in üzerinde verimlilik elde etmiştir (Min ve ark., 2021).

5. Güneş Hücrelerinin Verimliliği

Güneş hücreleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip cihazlardır. Bu cihazlar genellikle yarı iletken malzemelerden yapılmıştır, genellikle silikon. Her ne kadar bu dönüşüm süreci %100 verimli olmasa da, güneş hücreleri giderek daha verimli hale gelmektedir. Güneş hücrelerinin verimliliği genellikle laboratuvar koşullarında ölçülür ve bu değer genellikle yüzdelik olarak ifade edilir. 2023 itibarıyla, en yüksek verimli güneş hücreleri, laboratuvar koşullarında yaklaşık %40-46 verimlilik sağlar (Dimroth ve ark., 2016). Ancak, pratik kullanım koşullarında, bu de-

ğer genellikle biraz daha düşüktür ve ticari olarak mevcut güneş panellerinin verimlilik değerleri genellikle %15-22 arasındadır (Schultz ve ark., 2007).

Güneş hücrelerinin verimliliğini etkileyen birkaç faktör vardır. Bunlardan ilki seçilen malzemedir. Farklı yarı iletken malzemeler, farklı verimlilik seviyelerine sahiptir. Örneğin, monokristal silikon hücreler genellikle polikristal silikon hücrelerden daha verimlidir. Yeni teknolojiler, örneğin perovskit hücreler, potansiyel olarak daha yüksek verimlilik seviyelerine ulaşabilir. Diğer bir etken ise Hücre Tasarımıdır. Hücrenin fiziksel tasarımı da verimliliği etkilemektedir. Örneğin, daha ince hücreler genellikle daha verimlidir çünkü fotonların hücre içerisinde emilme olasılığı daha yüksektir. Güneş hücresinin üzerine düşen ışığın yoğunluğu ve açısı da verimliliği etkileyen diğer bir faktördür. Güneş hücreleri, güneş ışığına en dik açıyla maruz kaldığında en verimli hale gelir. Ayrıca, daha yoğun ışık, daha fazla elektrik enerjisi üretir. Güneş hücrelerinin verimliliği, hücrenin sıcaklığına da bağlıdır. Genellikle, hücre sıcaklığı arttıkça, verimlilik azalır. Sıcaklık gibi diğer bir çevresel faktörde gölgeleme ve kirdir. Bir güneş hücresi üzerindeki herhangi bir gölgeleme veya kir, hücrenin güneş ışığını emme yeteneğini azaltır ve dolayısıyla verimliliğini azaltır. Son olarak, yüksek verimlilik genellikle daha yüksek maliyetle gelir. Bu nedenle, bir güneş paneli sistemi seçerken, sadece verimliliği değil, aynı zamanda maliyeti ve sistemin genel enerji ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurmak önemlidir.

6. Güneş Hücrelerinin Ekonomik Etkileri ve Maliyet Etkinliği

Güneş hücrelerinin yaygınlaşması, sadece çevresel etkileri değil, aynı zamanda ekonomik etkileri de dikkate alınmalıdır. Güneş hücrelerinin maliyet etkinliği, bir dizi faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında hücrenin tipi, üretim maliyetleri, kurulum maliyetleri, bakım maliyetleri, hücre verimliliği ve kullanılan elektriğin fiyatı bulunur. Son yıllarda, güneş hücrelerinin maliyetleri önemli ölçüde azalmış ve bazı bölgelerde ızgara paritesi elde edilmiştir, yani güneş enerjisi, geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla aynı maliyete veya daha düşük maliyete sahip olmuştur (Clearway, 2023). Güneş hücrelerinin ekonomik faydaları da dikkate alınmalıdır. Bunlar arasında, yerel iş oluşturma, enerji güvenliği ve enerji ithalatına bağımlılığın azaltılması yer alır. Ayrıca, güneş hücreleri, enerji yoksunluğu olan kırsal ve uzak bölgelerde enerji erişimini sağlama potansiyeline sahiptir. Gelecekte, güneş hücrelerinin maliyetlerinin daha da düşmesi beklenmektedir. Bu, özellikle perovskit ve diğer gelişmekte olan güneş hücresi teknolojilerinin gelişmesiyle hızlanabilir. Ancak, bu tahminler belirsizliklere tabidir ve teknolojik ilerlemenin yanı sıra politika, düzenlemeler ve enerji fiyatlarındaki değişikliklere bağlıdır. Sonuç

olarak, güneş hücrelerinin ekonomik etkileri ve maliyet etkinliği, teknolojinin gelecekteki gelişimini şekillendiren önemli faktörlerdir. Bu etkilerin daha iyi anlaşılması ve yönetilmesi, güneş hücrelerinin sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru daha büyük bir katkıda bulunmasını sağlayabilir.

7. Güneş Hücrelerinin Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilirliği

Güneş hücreleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin önemli bir parçası olarak kabul edilir. Bununla birlikte, güneş hücrelerinin üretimi, kullanımı ve bertarafı çeşitli çevresel etkilere sahip olabilir. Güneş hücrelerinin üretimi, enerji tüketimine ve sera gazı emisyonlarına yol açabilir. Yarıiletken malzemelerin üretimi genellikle yoğun enerji kullanan bir süreçtir ve silikon bazlı güneş hücreleri genellikle yüksek sıcaklıkta işlemler gerektirir. İnce film hücreler ve perovskit hücreler, genellikle daha düşük enerji yoğunluğu gerektiren üretim süreçlerine sahip olabilir, ancak bazı durumlarda potansiyel olarak kurşun gibi toksik malzemeler gerektirebilirler. Ancak, güneş hücrelerinin operasyonel aşaması, neredeyse hiçbir emisyon üretmez ve bu da onları çevre dostu bir enerji kaynağı yapar. Bununla birlikte, hücrelerin ömrünün sonunda bertarafı, çevresel etkilere sahip olabilir. Güneş hücrelerinin çoğu 20-30 yıl süreyle kullanılabilir ve sonrasında geri dönüştürülmesi gerekir. Güneş hücrelerinin geri dönüşümü, teknolojinin sürdürülebilirliği için önemli bir adımdır. Geri dönüşüm, değerli malzemelerin yeniden kullanılmasını sağlar ve atık miktarını azaltır. Bununla birlikte, bu süreç, enerji tüketimi ve potansiyel çevresel etkileri nedeniyle zorluklar sunabilir. Bütün bunlara rağmen, güneş hücrelerinin çevresel avantajları genellikle olası etkilerinden daha ağır basar. Güneş hücrelerinin yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu sera gazı emisyonları, fosil yakıtların kullanılmasına kıyasla genellikle çok daha düşüktür. Güneş hücreleri, enerji sistemimizin sürdürülebilir bir şekilde dönüştürülmesinde önemli bir rol oynar. Bununla birlikte, bu teknolojinin tam potansiyelini kullanabilmek için, üretim, kullanım ve bertaraf süreçlerinin tüm yönlerini dikkate almak ve çevresel etkilerini en aza indirmek için stratejiler geliştirmek önemlidir.

8. Güneş Hücreleri ve Toplum

Güneş enerjisi, hem yenilenebilir enerji kaynağı olması hem de nispeten az çevresel etkisi nedeniyle toplumda geniş çapta kabul görmüştür. Ayrıca, son yıllarda güneş paneli teknolojisinin maliyetinin düşmesi ve verimliliğinin artması, bu kabulü daha da genişletmiştir. Güneş enerjisinin toplumsal kabulünde politikalar ve düzenlemeler büyük bir rol oynar. Hükümetler, güneş enerjisi kullanımını teşvik etmek için çeşitli yöntemler kullanabilirler. Örneğin, yenilenebilir enerji hedefleri belirleyebilirler, güneş enerjisi projeleri için

mali destek sağlayabilirler, ve elektrik şebekesine geri satma düzenlemeleri gibi politikalar uygulayabilirler. Elektrik şebekesine geri satma düzenlemeleri, güneş enerjisi sistemlerinin sahiplerinin, sisteminin ürettiği fazla elektriği elektrik şebekesine satmasına olanak sağlar. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik cazibesini artırır ve genellikle güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşmasına yardımcı olur. Güneş enerjisinin toplumsal kabulünde ayrıca eğitim ve farkındalık da önemli bir rol oynar. İnsanlar, güneş enerjisi teknolojisi ve bunun nasıl çalıştığı hakkında daha fazla bilgi edindikçe, bu teknolojiyi benimseme olasılıkları artar. Bu nedenle, eğitim ve bilgilendirme kampanyaları, güneş enerjisinin yaygınlaşmasını teşvik etmekte önemli bir rol oynayabilir. Toplumsal değerler ve normlar da güneş enerjisi kullanımını etkileyebilir. Topluluklar, çevre dostu teknolojileri benimseme ve iklim değişikliği ile mücadele konusunda daha fazla sorumluluk alma konusunda daha fazla baskı hissettikçe, güneş enerjisi kullanımı muhtemelen artacaktır. Genel olarak, güneş enerjisi, enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif olarak giderek daha yaygın bir şekilde benimsenmektedir. Bu benimseme, hem teknolojik ilerlemelerin hem de politikalar, düzenlemeler ve toplumsal normların bir kombinasyonu tarafından yönlendirilmektedir.

9. Güneş Hücrelerinin Gelecekteki Gelişmeleri ve Beklentiler

Güneş hücreleri teknolojisi, sürekli bir evrim ve ilerleme sürecinde olduğundan, bu alanın gelecekte ne yönde gelişeceğini öngörmek büyük önem taşır. Bu bölüm, mevcut trendlere ve gelecekteki gelişmelere bakarak güneş hücreleri teknolojisinin nerede olabileceğine dair bir bakış sunmaktadır. İlk olarak, güneş hücrelerinin verimliliğinin artırılması konusu, araştırma ve geliştirme çalışmalarının önemli bir odağı olmaya devam ediyor. Bu, hem geleneksel silikon hücrelerin optimize edilmesiyle hem de yeni teknolojilerin, özellikle perovskit hücrelerin ve çok katmanlı hücrelerin geliştirilmesiyle sağlanabilir. İkinci olarak, maliyet düşürme çabaları devam etmektedir. Bu, hem üretim süreçlerinin iyileştirilmesi ve ölçek ekonomilerinden yararlanılması hem de daha ucuz ve daha kolayca kullanılabilir malzemelerin geliştirilmesi ile gerçekleştirilebilir. Üçüncü olarak, güneş hücrelerinin çevresel etkisi üzerindeki çalışmalar önemli bir odak noktası olmaya devam edecektir. Bu, hem daha çevre dostu üretim süreçlerinin geliştirilmesini hem de hücrelerin geri dönüşümünün ve bertarafının etkin bir şekilde yönetilmesini içerir. Dördüncü olarak, güneş hücrelerinin daha geniş enerji sistemine entegrasyonu önemli bir konudur. Bu, akıllı şebekeler ve enerji depolama çözümleri gibi teknolojilerle ilgili olarak ele alınabilir. Sonuç olarak, güneş hücreleri teknolojisi parlak bir geleceğe sahip görünüyor. Ancak bu geleceği gerçekleştirmek

için, sürekli teknolojik yeniliklerin yanı sıra etkili politika ve düzenlemeler gereklidir.

10. Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyonlar

Güneş hücresi teknolojisi, son yıllarda önemli ilerlemeler kaydetti ve devam eden birçok araştırma, bu alanda daha da ilerleme potansiyelini göstermektedir. Perovskit güneş hücreleri, son yıllarda oldukça fazla dikkat çeken bir teknolojidir. Perovskit malzemeler, özellikle yüksek ışık emilimi ve ışığı elektriğe dönüştürme yeteneği nedeniyle öne çıkarlar. Perovskite güneş pilleri, perovskit yapıları bir malzemeden oluşan aktif bir tabakaya sahip güneş pilleridir. Bu malzeme tipik olarak solüsyonla işlenmiş bir hibrit organik-inorganik kalay veya kurşun halojenürdür. 2009 yılında verimlilikleri %5'in altındaydı ancak verimliliklerindeki artış yıllara göre yüksek olmuştur. Laboratuvar koşullarında, bu hücreler %25'in üzerinde bir verimlilik seviyesine ulaşmıştır (Li ve ark., 2022) ve bu oranın daha da artabileceği düşünülmektedir. Purcell etkisini kullanan Rochester Üniversitesi'ndeki araştırmacılar, 2023'te hücre verimliliğinde önemli gelişmeler elde edilebileceğini bildirdi (Rochester, 2023). Ancak, perovskit hücrelerin karşılaştığı bazı önemli zorluklar vardır. Bunlardan biri de çevresel koşullara dayanıklılıktır. Perovskite malzemeler genellikle nem ve sıcaklık değişikliklerine karşı hassastır, bu da hücrelerin ömrünü kısaltabilir. Çok sayıda araştırma grubunun çözümleri araştırmasına rağmen, perovskit güneş pili türlerinin çoğu henüz ticarileştirilmek için yeterli operasyonel kararlılığa ulaşmadı (Kosasih and Ducati, 2018). Yapılan çalışmalar Perovskite güneş pillerinin ve tandem perovskit'in enerji ve çevresel sürdürülebilirliğinin yapıya bağlı olduğu gösterilmiştir (Tian ve ark., 2020; Gong ve ark., 2015; Tian ve ark., 2021). Işık yönetimi için fotonik ön kontaklar, geniş bant emilimini artırarak perovskit hücrelerinin performansını artırabilir ve aynı zamanda onları tehlikeli yüksek enerjili (görünür üstü) radyasyondan koruyarak operasyonel stabilitelerini geliştirebilir (Haque ve ark., 2019). Ek olarak, perovskit malzemeler genellikle kurşun içerir, bu da çevresel ve sağlıkla ilgili sorunlara yol açabilir. Yüksek verimine rağmen, toksik element kurşunu en verimli perovskit güneş hücrelerine dahil etmek, ticarileştirme için bir engel teşkil edebilir (Li ve ark., 2020). Bu problemler, bilim insanlarını, perovskit güneş hücrelerinin çevresel istikrarını ve toksisitesini azaltmak için alternatif materyaller ve hücre tasarımları araştırmaya yönlendirmiştir. Özellikle, kurşun yerine kullanılacak alternatif malzemeler (Ke and Kanatzidis, 2019) ve hücrelerin nemden korunması için çeşitli koruyucu katmanlar üzerinde durulmaktadır (Hosseinian ve ark., 2021). Şekil 2'de perovskit tabanlı güneş hücresinin tabakalı yapısı gösterilmektedir. Özellikle verim açısından yüktaşıyıcı tabakalar ile perovskit

arasında elektronik yapı bakımından uyum olmalıdır. Yapılan araştırmada yük taşıyıcılardan elektron transfer tabakası olarak SnO_2 kullanıldığında iletim bandı minimum seviyesinin Pb iyonu ile ayarlanabileceği ön görülmüştür (Çelik, 2021).

Şekil 2: Tabakalı yapıya sahip Perovskite tabanlı güneş hücresinin genel yapısı.



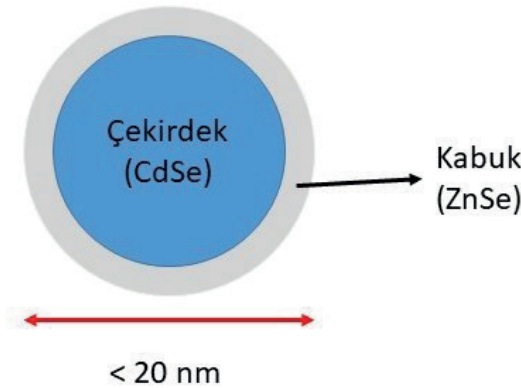
Diğer bir araştırma alanı ise çok katmanlı veya tandem hücrelerdir. Çok katmanlı hücreler, farklı enerji seviyelerinde ışığı emebilen birkaç yarı iletken tabakadan oluşur. Bu, daha geniş bir ışık spektrumunun kullanılmasını ve dolayısıyla daha yüksek verimlilik seviyelerine ulaşılmasını sağlar. Özellikle, perovskit malzemelerin silikon tabanlı hücrelerle birleştirilmesi, %30'un üzerinde verimlilik sağlayabilir (Duong ve ark., 2023). Çok katmanlı güneş hücreleri, farklı enerji band aralığına sahip birkaç fotovoltaik malzemeden oluşur ve bu sayede gelen güneş ışığının daha geniş bir spektrumunu absorbe etme kapasitesine sahip olur. Genellikle, bir tandem hücre, bir üst hücre ve alt hücre olmak üzere en az iki hücreden oluşur. Bu hücreler, genellikle bir tünel bağlantısı ile seri olarak bağlanır ve bu da tüm hücrelerin tek bir devre gibi çalışmasını sağlar. Yakın tarihli bir çalışma, çok katmanlı güneş hücrelerinin verimliliğini artırmanın anahtarı olan III-V yarıiletkenlerin kullanımına odaklanmıştır (Li ve ark., 2021). III-V yarıiletkenler, bant aralıkları (enerji bant aralıkları) ayarlanabilir olduğu için son derece popülerdir ve böylece farklı dalga boylarını emme yetenekleri optimize edilebilir. Ancak, bu malzemeler pahalı olduğu ve üretim süreçleri çevre için zararlı olabileceği için, çok katmanlı güneş hücrelerinin geniş çapta uygulanması konusunda bazı engeller vardır. Buna rağmen, son yıllarda perovskit tabanlı tandem hücreler önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Perovskit malzemeler, düşük maliyetleri ve üretim süreçlerinin çevre dostu olması nedeniyle popülerdir. Ayrıca, geniş ve ayarlanabilir band aralıkları sayesinde, farklı perovskit malzemeleri kombinleyerek bir çok katmanlı hücre oluşturulabilir. Bu nedenle, perovskit tabanlı tandem hücrelerin, gelecekte güneş enerjisinin verimli bir şekilde toplanması ve dönüştürülmesi için etkili bir çözüm olabileceği düşünülmektedir. Çok katmanlı güneş hücreleri, yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlamak için

birçok araştırmacının üzerinde durduğu bir teknoloji haline gelmiştir. Ancak, bu teknolojilerin yaygınlaşması için, malzeme maliyetlerini düşürme ve üretim süreçlerini daha çevre dostu hale getirme gibi çeşitli zorlukların üstesinden gelinmesi gerekmektedir. Bu alandaki gelecek çalışmaların, bu engelleri aşmak ve fotovoltaik teknolojilerin sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak kullanımını genişletmek için büyük bir potansiyeli vardır.

Kuantum nokta hücreler de sahip oldukları özellikler sayesinde araştırmacıların ilgisini çekmektedirler. Şekil 3'te bir kuantum noktasının genel yapısı gösterilmektedir. Kuantum noktalar, yarı iletken malzemelerin nano boyutlu parçacıklarıdır ve belirli özelliklerini değiştirmek için boyutları ve şekilleri ayarlanabilir (Michler, 2017). Bu, güneş hücrelerinin ışığı daha verimli bir şekilde emmesine olanak sağlar. Ayrıca, kuantum noktaların birden fazla elektronu aynı fotonla "uyarma" yeteneği vardır, bu da verimliliği artırılabilir (Nozik, 2002). Son yıllarda yapılan araştırmalar, kuantum nokta tabanlı güneş hücrelerinin potansiyelini ve zorluklarını anlamak için önemli bir ilerleme kaydetmiştir (Semonin ve ark., 2011a). Birçok çalışma, kuantum noktaların bant aralıklarının, ışığın geniş bir spektrumunu emmek ve enerjiye dönüştürmek için hassas bir şekilde ayarlanabileceğini göstermiştir (Kim ve ark., 2014). Bu, kuantum nokta hücrelerin teorik olarak, mevcut en iyi güneş hücrelerinden bile daha yüksek bir dönüşüm verimliliğine ulaşabileceği anlamına gelir. Ancak, kuantum nokta hücrelerin yaygın uygulanmasıyla ilgili birkaç teknik zorluk vardır. Örneğin, kuantum noktaların üretimi, genellikle yüksek maliyetli ve enerji yoğun süreçler gerektirir ve bu da kuantum nokta hücrelerin geniş çaplı uygulanmasını zorlaştırır (Rogach ve Eychmüller, 2020). Ayrıca, kuantum noktaların stabilitesi ve dayanıklılığı hala büyük bir endişe kaynağıdır. Buna rağmen, bu zorlukları aşmak için çeşitli araştırma çalışmaları devam etmektedir. Örneğin, daha düşük maliyetli ve daha çevre dostu kuantum nokta üretim yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar sürmektedir. Ayrıca, kuantum noktaların stabilitesini ve dayanıklılığını artırmak için yeni malzeme kombinasyonları ve nano yapısı tasarımları üzerinde de çalışılmaktadır. Cd ve Pb tabanlı bileşenlerle ilişkili toksisite nedeniyle, CuInS_2 , CuInSe_2 ve CuInSeS gibi "yeşil" kuantum nokta duyarlılaştırıcı malzemeler geliştirilmektedir (Sharma ve ark., 2016). Kuantum noktaların boyut kuantizasyonu, parçacık boyutunu değiştirerek bant aralığının ayarlanmasına olanak sağlar. Ayrıca yüksek soğurma katsayılarına sahiptirler ve çoklu eksiton oluşturma olasılığını göstermişlerdir (Semonin ve ark., 2011). Bir kuantum nokta güneş hücresinde, bir boya duyarlı güneş pilindeki gibi, titanyum dioksit (TiO_2) nano-partiküllerinin gözenekli tabakası hücrenin iskeletini oluşturur. TiO_2 tabakası, farklı yöntemler aracılığıyla yarı iletken kuantum noktaları (son derece küçük yarı iletken parçacıklar)

ile kaplanabilir. Bu yöntemler elektroforetik biriktirme, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve kimyasal banyo biriktirme olarak adlandırılır. Bu işlem, TiO_2 tabakasını ışığa duyarlı, yani fotoaktif hale getirir. Kaplama işleminden sonra, elektrik devresi, bir redoks çifti adı verilen özel bir kimyasal bileşik grubu kullanılarak tamamlanır. Bu redoks çifti sıvı veya katı formda olabilir. Kuantum nokta güneş hücrelerin verimliliği artmıştır ve hem sıvı bağlantılı hem de katı hal hücreler için %5'in üzerindedir (Kamat, 2012; Santra and Kamat, 2012; Moon ve ark., 2010). Rapor edilen en yüksek verimlilik %11.91'dir (Du ve ark., 2016). Üretim maliyetlerini düşürme çabası olarak, Prashant Kamat araştırma grubu, TiO_2 ve CdSe ile yapılan bir güneş boyası geliştirdi (Kamat, 2013). Bu boya, herhangi bir iletken yüzeye %1 üzerinde verimlilikle tek adımlı bir yöntemle uygulanabiliyor (Genovese ve ark., 2012). Ancak, Kuantum nokta güneş hücrelerde kuantum noktalarının soğurması oda sıcaklığında zayıftır (Yu ve ark., 2017). Plazmonik nanopartiküller, kuantum noktaların zayıf soğurmasını gidermek için kullanılabilir (Wu ve ark., 2015). Kuantum noktalarının intraband ve interband geçişini uyaracak bir dış kızılötesi pompalama kaynağı eklemek de başka bir çözüm olabilir (Yu ve ark., 2017). Kuantum nokta fotovoltaiik hücreler, yüksek enerji dönüşüm verimliliği potansiyeli nedeniyle büyük bir ilgi çekmektedir. Bu teknoloji, hala önemli teknik zorluklarla karşı karşıya olsa da, bu alanda devam eden araştırmalar, kuantum nokta hücrelerinin gelecekte sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Şekil 3: Çapı genellikle 20 nm altında olan kuantum noktalarının genel yapısının gösterimi.



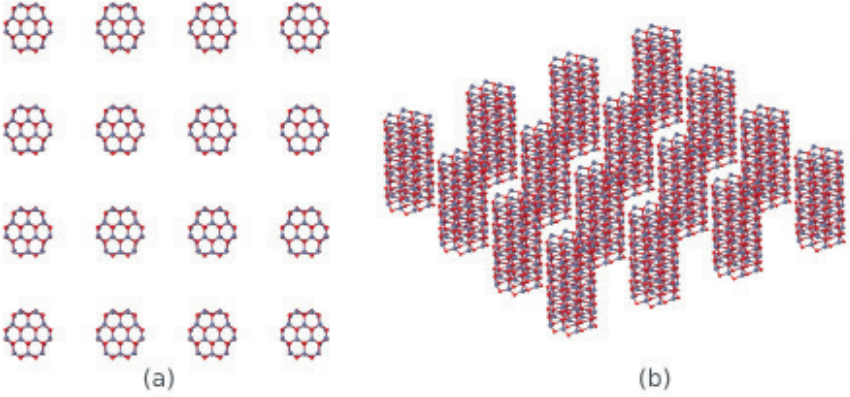
Güneş hücrelerinin kullanım alanlarını arttırmanın yollarından biri esneklik ve şeffaflıklarını arttırmaktır. Esnek ve şeffaf güneş hücreleri, güneş enerjisi teknolojisini daha geniş bir uygulama yelpazesine entegre etme potansiyeline sahiptir. Örneğin, bu hücreler pencerelere, binaların dış yüzey-

lerine veya hatta giysilere yerleştirilebilir. Esnek ve şeffaf güneş hücreleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinde bir dönüm noktası olabilirler. Bu hücreler, geleneksel güneş hücrelerinin kalın, sert ve opak olmasının aksine, hafif, esnek ve şeffaf olabilirler. Bu, onları çok çeşitli uygulamalar için ideal kılar, örneğin pencere ve cam cephe kaplamaları, esnek elektronik cihazlar ve hatta giyilebilir teknoloji. Esnek ve şeffaf güneş hücrelerinin üretiminde genellikle organik veya inorganik ince film malzemeler kullanılır. Organik güneş hücreleri, düşük maliyetli ve geniş alanlı üretim avantajlarına sahipken, inorganik ince film hücreler genellikle daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sunar. Son yıllarda, esnek ve şeffaf güneş hücrelerinin verimliliği ve dayanıklılığı üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin, bazı çalışmalar, esnekliği ve şeffaflığı artırırken verimliliği korumak için yeni malzeme ve hücre tasarımları üzerinde odaklanmıştır (Stauffer, 2017). Ayrıca, bu tür hücrelerin üretim sürecini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirme çabaları da bulunmaktadır. Örneğin, bazı araştırmalar, düşük enerji yoğunluklu üretim süreçleri ve çevre dostu malzemeler üzerinde durmuştur (Sadasiyuni ve ark., 2019). Ancak, esnek ve şeffaf güneş hücreleri hala önemli zorluklarla karşı karşıyadır, özellikle bu hücrelerin verimliliği, dayanıklılığı ve ömrü konusunda. Bununla birlikte, bu alandaki devam eden araştırmalar, bu zorlukların üstesinden gelme ve bu tür hücrelerin çok çeşitli uygulamalar için pratik ve maliyet etkin bir çözüm haline gelme potansiyelini göstermektedir. Sonuç olarak, esnek ve şeffaf güneş hücreleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geleceği için büyük bir umut vaat eder. Bu teknoloji, güneş enerjisini daha geniş bir çeşitlilikte ve daha esnek bir şekilde toplama ve kullanma potansiyeline sahiptir, bu da güneş enerjisinin gelecekteki kullanımını büyük ölçüde genişletebilir.

Nanoteller, yüksek derecede ışık soğurucu olmaları ve birçok elektrikselsel avantajları nedeniyle güneş hücreleri için ideal yapılar olarak kabul edilirler. Özellikle, nanotellerin yüksek yüzey alanı ve kısa taşıyıcı difüzyon yolları, hücrelerin hızla elektronları toplamasını ve ışığı daha verimli bir şekilde soğurmasını sağlar (Czaban ve ark., 2008). Silisyum nanoteller (SiNW) bazı güneş hücrelerinde yapılan bir dizi çalışma, bu teknolojinin ışık soğurma ve taşıyıcı toplama yeteneklerini daha da artırabileceğini göstermiştir (Garnett and Yang, 2010). Silisyum nanoteller, kristal yapısı ve elektronik özellikleri nedeniyle güneş hücrelerinde mükemmel bir performans gösterirler. Ayrıca, nanotellerin bir güneş hücresi tasarımına entegrasyonu, daha esnek ve hafif hücrelerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu, enerji toplama sistemlerinin her yerde, özellikle esnek elektronik cihazlar ve giyilebilir teknoloji uygulamalarında entegrasyonunu sağlar (McGehee, 2012). ZnO nano teller de güneş hücresi yapımında kullanılan önemli malzemelerdendir ve kristal yapısı elektronik yapısını etkilemektedir (Çelik and Mete, 2018). Sonuç olarak,

nanotellerin güneş hücreleri üzerindeki etkisi, bu teknolojinin önümüzdeki yıllarda yenilenebilir enerji sektörünün gelişmesinde önemli bir rol oynayacağına işaret ediyor. Bu nedenle, nanotellerin güneş hücrelerine entegrasyonu, sürdürülebilir bir enerji geleceğine doğru atılan önemli bir adım olarak görülebilir. Şekil 4'te ZnO nanotellerinin kristal yapısı gösterilmektedir.

Şekil 4: ZnO nanoteller. (a) nanotellerin üstten ve (b) farklı açıdan görünümü. Burada Zn ve O iyonları sırası ile gri ve kırmızı renklerle gösterilmektedir.



11. Sonuç ve Gelecek Perspektifi

Güneş hücresi teknolojisi, son yıllarda hızlı bir ilerleme kaydetmiştir. Maliyetlerin düşmesi, verimliliğin artması ve çeşitli hükümet politikalarının teşviki, güneş enerjisinin dünya çapında enerji üretiminde daha büyük bir rol oynamasına yardımcı olmuştur. Ayrıca, güneş enerjisi, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak giderek daha fazla kabul görmektedir. Bununla birlikte, güneş hücresi teknolojisinin gelişimi durmamıştır. Laboratuvarlarda ve araştırma merkezlerinde, daha verimli ve uygun maliyetli güneş hücreleri geliştirmek için birçok heyecan verici çalışma devam etmektedir. Perovskit hücreler, çok katmanlı hücreler, kuantum nokta hücreler ve diğer gelişmekte olan teknolojiler, güneş enerjisinin gelecekteki potansiyelini daha da artırabilir.

Yeni uygulamalar ve yeni pazarlar da güneş hücre teknolojisinin gelecekteki büyümesine katkıda bulunabilir. Örneğin, esnek ve şeffaf güneş hücreleri, güneş enerjisinin binalara, pencerelere, araçlara ve hatta giysilere entegre edilmesine olanak sağlayabilir. Bu, güneş enerjisinin kullanım alanlarını genişletebilir ve bu teknolojiyi daha görünür ve kabul edilebilir hale getirebilir. Gelecekte, güneş enerjisi politikaları ve düzenlemeleri de önemli bir rol oynayacaktır. Hükümetlerin güneş enerjisi projelerini teşvik etmek için ata-

cakları adımlar, bu teknolojinin yaygınlaşma hızını ve ölçeğini büyük ölçüde etkileyebilir. Sonuç olarak, güneş hücre teknolojisi, enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu bir alternatif olarak önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Devam eden teknolojik ilerlemeler ve uygun politikalar ve düzen-

lemeler ile birlikte, güneş enerjisi, gelecekte enerji tüketimimizin önemli bir parçası olmaya devam edecektir.

Kaynaklar

- Chapin, D. M., Fuller, C. S., and Pearson, G. L. (2004). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. *Journal of Applied Physics*, 25(5):676–677.
- Clearway (2023). Cost of Solar Versus Traditional Energy kernel description.
- Czaban, J., Thompson, D., and LaPierre, R. (2008). Gaas core-shell nanowires for photovoltaic applications. *Nano Letters*, 8(1):92–96.
- Çelik, V. (2021). Use of local density approximation within range separated hybrid exchange–correlation functional to investigate pb doped sno2. *Physica B: Condensed Matter*, 619:413236.
- Çelik, V. and Mete, E. (2018). Screened coulomb hybrid density functional investigation of oxygen point defects on zno nanowires. *Computational Condensed Matter*, 16:e00307.
- Dimroth, F., Tibbits, T. N. D., Niemeier, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., Oliva, E., Siefert, G., Lackner, D., Fuß-Kailuweit, P., Bett, A. W., Krause, R., Drazek, C., Guiot, E., Wasselin, J., Tauzin, A., and Signamarcheix, T. (2016). Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 6(1):343–349.
- Du, J., Du, Z., Hu, J.-S., Pan, Z., Shen, Q., Sun, J., Long, D., Dong, H., Sun, L., Zhong, X., and Wan, L.-J. (2016). Zn–cu–in–se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%. *Journal of the American Chemical Society*, 138(12):4201–4209.
- Duong, T., Nguyen, T., Huang, K., Pham, H., Adhikari, S. G., Khan, M. R., Duan, L., Liang, W., Fong, K. C., Shen, H., Bui, A. D., Mayon, A. O., Truong, T., Tabi, G., Ahmad, V., Surve, S., Tong, J., Kho, T., Tran-Phu, T., Lu, T., Zheng, J., Paetzold, U. W., Lemmer, U., Baillie, A. H., Liu, Y., Andersson, G., White, T., Weber, K., and Catchpole, K. (2023). Bulk incorporation with 4-methylphenethylammonium chloride for efficient and stable methylammonium-free perovskite and perovskite-silicon tandem solar cells. *Advanced Energy Materials*, 13(9):2203607.
- Edmond, B. M. (1839). Memoire sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences*, 9:561–567.
- Garnett, E. and Yang, P. (2010). Light trapping in silicon nanowire solar cells. *Nano Letters*, 10(3):1082–1087.

- Genovese, M. P., Lightcap, I. V., and Kamat, P. V. (2012). Sun-believable solar paint. a transformative one-step approach for designing nanocrystalline solar cells. *ACS Nano*, 6(1):865–872.
- Gong, J., Darling, S. B., and You, F. (2015). Perovskite photovoltaics: life-cycle assessment of energy and environmental impacts. *Energy Environ. Sci.*, 8:1953–1968.
- Haque, S., Mendes, M. J., Sanchez-Sobrado, O., Águas, H., Fortunato, E., and Martins, R. (2019). Photonic-structured tio₂ for high-efficiency, flexible and stable perovskite solar cells. *Nano Energy*, 59:91–101.
- Hosseinian Ahangharnejhad, R., Song, Z., Mariam, T., Gardner, J. J., Liyanage, G. K., Almutawah, Z. S., Anwar, B. M. M., Junda, M., Podraza, N. J., Phillips, A. B., Yan, Y., and Heben, M. J. (2021). Protecting perovskite solar cells against moisture-induced degradation with sputtered inorganic barrier layers. *ACS Applied Energy Materials*, 4(8):7571–7578.
- Kamat, P. V. (2012). Boosting the efficiency of quantum dot sensitized solar cells through modulation of interfacial charge transfer. *Accounts of Chemical Research*, 45(11):1906–1915.
- Kamat, P. V. (2013). Quantum dot solar cells. the next big thing in photovoltaics. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 4(6):908–918.
- Ke, W. and Kanatzidis, M. G. (2019). Prospects for low-toxicity lead-free perovskite solar cells. *Nature Communications*, 10(1):965.
- Kojima, A., Teshima, K., Shirai, Y., and Miyasaka, T. (2009). Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. *Journal of the American Chemical Society*, 131(17):6050–6051.
- Kosasih, F. U. and Ducati, C. (2018). Characterising degradation of perovskite solar cells through in-situ and operando electron microscopy. *Nano Energy*, 47:243–256.
- Li, J., Aierken, A., Liu, Y., Zhuang, Y., Yang, X., Mo, J. H., Fan, R. K., Chen, Q. Y., Zhang, S. Y., Huang, Y. M., and Zhang, Q. (2021). A brief review of high efficiency iii-v solar cells for space application. *Frontiers in Physics*, 8.
- Li, J., Cao, H.-L., Jiao, W.-B., Wang, Q., Wei, M., Cantone, I., Lü, J., and Abate, A. (2020). Biological impact of lead from halide perovskites reveals the risk of introducing a safe threshold. *Nature Communications*, 11(1):310.
- Li, Z., Li, B., Wu, X., Sheppard, S. A., Zhang, S., Gao, D., Long, N. J., and Zhu, Z. (2022). Organometallic-functionalized interfaces for highly efficient inverted perovskite solar cells. *Science*, 376(6591):416–420.
- McGehee, M. (2012). Nanostructured solar cells. *Nano Letters*, 12(6):2575–2578.
- Michler, P. (2017). *Single Semiconductor Quantum Dots*. Springer.

- Min, H., Lee, D. Y., Kim, J., Kim, G., Lee, K. S., Kim, J., Paik, M. J., Kim, Y. K., Kim, K. S., Kim, M. G., Shin, T. J., and Il Seok, S. (2021). Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO_2 electrodes. *Nature*, 598(7881):444–450.
- Moon, S.-J., Itzhaik, Y., Yum, J.-H., Zakeeruddin, S. M., Hodes, G., and Grätzel, M. (2010). Sb_2S_3 -based mesoscopic solar cell using an organic hole conductor. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(10):1524–1527.
- Nozik, A. J. (2002). Quantum dot solar cells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2):115–120.
- Palz, W. (2010). *Power for the World: The Emergence of Electricity from the Sun*. Jenny Stanford Publishing.
- Rochester (2023). Perovskites, a ‘dirt cheap’ alternative to silicon, just got a lot more efficient kernel description.
- Sadasivuni, K. K., Deshmukh, K., Ahipa, T. N., Muzaffar, A., Ahamed, M. B., Pasha, S. K. K., and Al-Maadeed, M. A.-A. (2019). Flexible, biodegradable and recyclable solar cells: a review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(2):951–974.
- Santra, P. K. and Kamat, P. V. (2012). Mn-doped quantum dot sensitized solar cells: A strategy to boost efficiency over 5%. *Journal of the American Chemical Society*, 134(5):2508–2511.
- Schultz, O., Mette, A., Preu, R., and Glunz, S. (2007). Silicon solar cells with screen-printed front side metallization exceeding 19
- Semonin, O. E., Luther, J. M., Choi, S., Chen, H. Y., Gao, J., Nozik, A. J., and Beard, M. C. (2011a). Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via meq in a quantum dot solar cell. *Science*, 334(6062):1530–1533.
- Semonin, O. E., Luther, J. M., Choi, S., Chen, H.-Y., Gao, J., Nozik, A. J., and Beard, M. C. (2011b). Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via meq in a quantum dot solar cell. *Science*, 334(6062):1530–1533.
- Sharma, D., Jha, R., and Kumar, S. (2016). Quantum dot sensitized solar cell: Recent advances and future perspectives in photoanode. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 155:294–322.
- Stauffer, N. W. (2017). Transparent, flexible solar cells kernel description.
- Tian, X., Stranks, S. D., and You, F. (2020). Life cycle energy use and environmental implications of high-performance perovskite tandem solar cells. *Science Advances*, 6(31):eabb0055.
- Tian, X., Stranks, S. D., and You, F. (2021). Life cycle assessment of recycling strategies for perovskite photovoltaic modules. *Nature Sustainability*, 4(9):821–829.

- Wu, J., Yu, P., Susha, A. S., Sablon, K. A., Chen, H., Zhou, Z., Li, H., Ji, H., Niu, X., Govorov, A. O., Rogach, A. L., and Wang, Z. M. (2015). Broadband efficiency enhancement in quantum dot solar cells coupled with multispiked plasmonic nanostars. *Nano Energy*, 13:827–835.
- Yu, P., Wu, J., Gao, L., Liu, H., and Wang, Z. (2017). Ingaas and gaas quantum dot solar cells grown by droplet epitaxy. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161:377–381.