



**Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa
Bilimleri Dergisi**
Usak University Journal of Science and Natural Sciences

<http://dergipark.gov.tr/usufedbid>
<https://doi.org/10.47137/usufedbid.1050648>



Derleme Makalesi

Kendi Gücünü Sağlayan Giyilebilir Elektronik Teknolojilerde Kullanılan Esnek Güneş Hücreleri

Mesut Ekmekçi

Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye

Geliş: 29 Aralık 2021

Kabul: 21 Mart 2022 / Received: 29 December 2021

Accepted: 21 March 2022

Abstract

Energy is an important factor for technological and economic development. The huge energy consumption caused by the rapid development of electronic devices along with the increasing environmental awareness has increased the new technology requirements to produce and store green and renewable energy. Among the renewable energy sources, solar energy is gaining importance day by day. Because solar energy is the most abundant, sustainable and cleanest energy in the world. With the continuous development of electricity generation technology from light, the share of solar energy in other conventional energies is increasing and it is becoming an alternative to fossil fuels. With the new technologies developed, solar energy is used in different fields. In this context, self-powered energy technology is highly promising for future wearable electronics, as it can ensure continuous operation of electronic devices without external power supply. Today, self-powered wearable electronic technologies are being developed using different types of flexible solar cells (EGHs). Wearable electronics have attracted great interest in recent years and are experiencing rapid growth. These technologies are mostly used for entertainment, smart monitoring, personal health and exercise control. In this study, flexible solar cells and self-powered wearable electronic technologies developed using these cells are summarized. In this context, first of all, flexible silicon solar cells (ESGHs), flexible perovskite solar cells (EPGHs), flexible organic solar cells (EOGHs), and flexible dye-sensitized solar cells (EBDGHs) were discussed. Later, sweat monitoring, motion monitoring, wearable fabric, heart rate monitoring, gas sensor and wearable display systems, which are self-powered wearable energy technologies integrated into flexible solar cells, were introduced. Finally, the challenges in front of wearable technologies and EGHs, solutions and predictions about their future situations were presented.

Keywords: *Flexible solar cells, wearable electronic, wearable devices.*

Özet

Enerji teknolojik ve ekonomik kalkınma için önemli bir faktördür. Artan çevre bilinciyle birlikte elektronik cihazların hızlı gelişiminin neden olduğu büyük enerji tüketimi, yeşil ve yenilenebilir enerjiyi üretmek ve depolamak için yeni teknoloji gereksinimlerini arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Çünkü güneş enerjisi dünyadaki en bol, sürdürülebilir ve en temiz enerjidir. Işıktan elektrik üretim teknolojisinin sürekli gelişmesiyle birlikte, güneş enerjisinin diğer konvansiyonel enerjiler içindeki payı gittikçe artmakta ve fosil yakıtlara alternatif haline gelmektedir. Geliştirilen yeni teknolojiler ile güneş enerjisi değişik alanlarda kullanılmaktadır. Bu bağlamda, kendi gücünü sağlayan enerji teknolojisi, elektronik cihazların harici güç kaynağı olmadan sürekli çalışmasını sağlayabildiğinden, gelecekteki giyilebilir elektronikler için oldukça umut vericidir. Günümüzde farklı tipteki esnek güneş hücreleri (EGH'ler) kullanılarak kendi gücünü sağlayan giyilebilir elektronik teknolojiler geliştirilmektedir. Giyilebilir elektronikler son yıllarda büyük ilgi görmekte ve hızlı bir büyüme

*Corresponding author:

E-mail: mesut.ekmekci@usak.edu.tr (ORCID ID: 0000-0001-7170-0010)

yaşamaktadır. Bu teknolojiler daha çok eğlence, akıllı izleme, kişisel sağlık ve egzersiz kontrolü amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, esnek güneş hücreleri ve bu hücreler kullanılarak geliştirilen kendi gücünü sağlayan giyilebilir elektronik teknolojiler özetlendi. Bu bağlamda, öncelikle, esnek silikon güneş hücreleri (ESGH'ler), esnek perovskit güneş hücreleri (EPGH'ler), esnek organik güneş hücreleri (EOGH 'ler) ve esnek boya duyarlı güneş hücreleri (EBDGH 'ler) ele alındı. Daha sonra esnek güneş hücrelere entegre kendi gücünü sağlayan giyilebilir enerji teknolojilerinden ter izleme, hareket izleme, giyilebilir kumaş, nabız izleme, gaz sensörü ve giyilebilir ekran sistemleri tanıtıldı. Son olarak giyilebilir teknolojilerin ve EGH'lerin önündeki zorluklar ve çözüm yolları ile gelecekteki durumları ile ilgili öngörüler sunuldu.

Anahtar Kelimeler: *Esnek güneş hücreleri, giyilebilir elektronik, giyilebilir cihazlar.*

©2022 Usak University all rights reserved.

1. Giriş

Teknolojinin hızlı gelişimi ve küresel ısınma konusunda dünya çapında artan endişe nedeniyle, herhangi bir yüzeye veya cihaza uyarlanabilen yeşil, yenilenebilir ve ucuz enerji kaynakları geliştirmek için birçok çaba sarf edilmektedir. Özellikle güneş enerjisi ile ilgili teknolojiler, geleneksel enerji kaynaklarına ideal alternatifler olarak büyük ilgi görmektedir [1]. Çünkü Güneş enerjisi, tükenmez ve CO₂ salınımı olmayan bir enerji kaynağıdır. Fotovoltaik (PV) güneş hücreleri düşük bakım ihtiyacı ve çevre dostu olması gibi avantajlara sahiptir ve hali hazırda çok sayıda uygulaması mevcuttur [2]. Birinci nesil silisyum (çoklu ve tek kristalli-Si) güneş hücreleri karardır ve %15-%25 arasında verimlilik gösterirler [3]. Bununla birlikte, üretim sürecinde karmaşık malzeme işleme tekniklerinin kullanılması nedeniyle bu güneş hücrelerinin üretim maliyetleri yüksektir [4]. Silisyum güneş hücrelerine endüstriyel ve maliyet olarak uygun alternatif güneş hücreleri, ince film ve yeni geliştirilen malzemeler kullanılarak geliştirilen ve üretilen yeni nesil güneş hücreleridir. Bazı yeni nesil güneş hücreleri esnek alt yüzeyler (Genellikle polimerik bazlı) kullanılarak esnek bir yapıda üretilebilmekte, düşük maliyet ve diğer avantajları nedeniyle de son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Esnek güneş hücreleri katlanabilir, dürülebilir ve geleneksel güneş hücrelerinden çok daha hafiftir. Ayrıca %12,2-%14,7 arasında verimlilik gösterirler [5]. Esnek Güneş hücreleri (EGH'ler) temel olarak EPGH'ler [6], EBDGH'ler [7], EOGH'ler [8] ve ESGH'ler [9] şeklinde kategorize edilebilir. Bu bağlamda, EGH'ler anot, katot ve fotoaktif katman olmak üzere üç temel bölümden oluşur. Perovskit ve organik güneş hücrelerinde yük rekombinasyonunu azaltmak için bir elektron/delik taşıma katmanı kullanılırken, boya duyarlı güneş hücreleri yük taşıma ve redoks reaksiyonları için elektrolitler içerir. EGH'ler için üretilen tüm parçalar, özellikle fotovoltaik cihazların aktif katmanları için alt tabaka görevi gören güneş hücrelerinin ana elektrotları esnek olmak zorundadır. Bu özellikleri onları taşınabilir hale getirmesi sebebiyle, EGH'ler dizüstü bilgisayarların, dijital kameraların, cep telefonların ve diğer birçok elektronik cihazın şarj edilmesinde kullanılmaktadır. Günümüzde yeni fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi ve üretim teknolojilerinin ilerlemesiyle farklı tipteki EGH'ler kullanılarak kendi gücünü sağlayan giyilebilir elektronik teknolojiler geliştirilmektedir. Bu teknolojiler daha çok eğlence, akıllı izleme, kişisel sağlık ve egzersiz kontrolü amacıyla kullanılmaktadır [10]. Bu derleme çalışmasında, EGH ve bu hücreler kullanılarak geliştirilen kendi gücünü sağlayan giyilebilir elektronik teknolojiler özetlendi (Tablo 1). Bu bağlamda, öncelikle, ESGH'ler, EPGH'ler, EOGH 'ler ve EBDGH 'ler ele alınmıştır. Daha sonra esnek güneş hücrelere entegre kendi gücünü sağlayan giyilebilir enerji teknolojilerinden ter izleme, hareket izleme, giyilebilir kumaş, nabız izleme, gaz sensörü ve giyilebilir ekran sistemleri tanıtılmıştır. Son olarak giyilebilir teknolojilerin ve EGH'lerin önündeki zorluklar ve gelecekteki durumları ile ilgili öngörüler değerlendirilerek sunulmuştur.

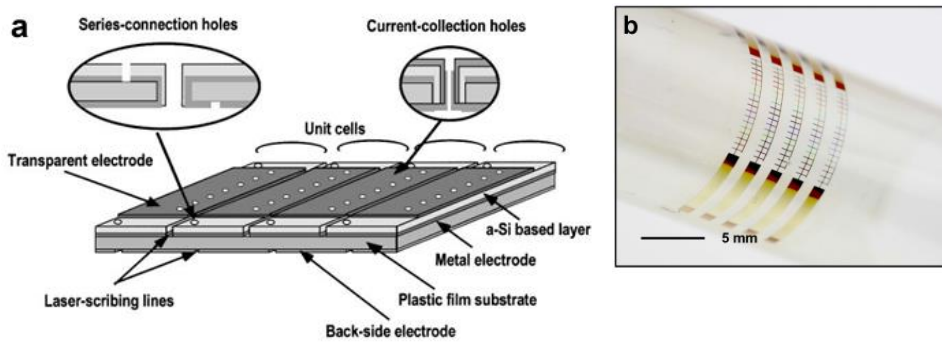
Tablo 1. Kendi Gücünü Sağlayan Giyilebilir Elektronik Teknolojilerde kullanılan EGH ve bataryalar

Cihaz	Kullanılan Güneş Hücresi	Kullanılan Batarya
Ter izleme	Esnek silikon güneş hücresi	Esnek çinko iyon batarya
Hareket izleme	Esnek perovskit güneş hücresi	Esnek şarj edilebilir lityum-iyon kondansatör
Nabız izleme	Esnek silikon güneş hücresi	Süperkapasitör
Gaz sensörü	Esnek/Organic güneş hücresi	Lityum iyon batarya
Giyilebilir ekran	Esnek silikon güneş hücresi	Esnek lityum iyon batarya

2. Kendi Gücünü Sağlayan Giyilebilir Elektronik Teknolojilerde Kullanılan Esnek Güneş Hücreler

2.1. Esnek silikon güneş hücreler (ESGH'ler)

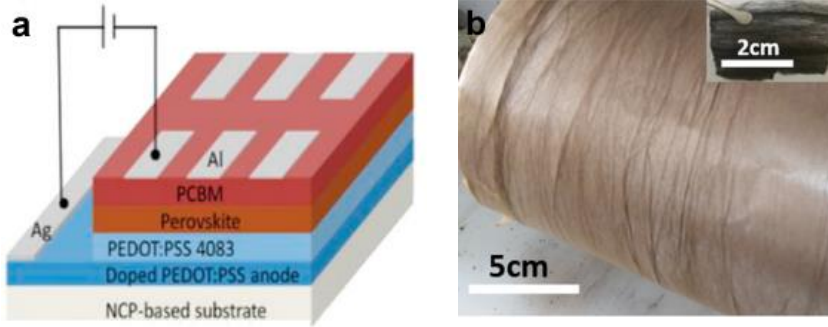
En eski geliştirilen güneş hücresi olan silikon güneş hücreleri (SGH) doğada bol bulunması, verimliliklerinin yüksek olması gibi özellikleri sebebiyle uzun süredir fotovoltaik pazarına hakim güneş hücreleridir. Monokristal, polikristal ve amorf olmak üzere çeşitli tiplerde üretilmektedir. Son dönemlerde ilk nesil sert SGH'lerin yerine, esnek alt tabakalar üzerine silikon yerleştirilerek veya silikon alt tabakaların içine küçük ölçekli SGH'ler yerleştirilerek ESGH'ler üretilmektedir. Yukimi Ichikawa ve ekibi 2001 yılında plastik film alt tabanlı esnek a-Si tabanlı güneş hücreleri geliştirmişler ve 40 cm x 80 cm ebatlı bir hücrede %9'luk bir stabilize verimlilik elde etmişlerdir (Şekil 1a) [11]. Lee ve ekibi önceki sistemi geliştirerek yeni bir tasarım yapmışlardır. Yaptıkları bu tasarımla mikro hücreleri birbirine bağlayarak %12,4 verimlilik sağlayan çok ince (~12 mm çapında silindirik bir destek üzerine bükülmüş mikro hücreler) ESGH üretmişlerdir (Şekil 1b) [12]. ESH'lerdeki bu gelişmeler ile esnek giyilebilir elektroniklerdeki uygulama çalışmaları daha dikkat çekici hale gelmektedir.



Şekil 1. (a) ESGH'nin genel yapısı [11]; (b) Birbirine bağlı mikro hücrelerden oluşan ESGH [12]

2.2. Esnek perovskit güneş hücreler (EPGH'ler)

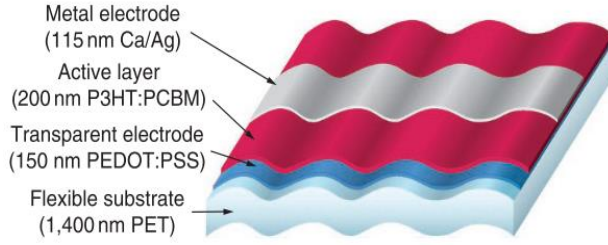
Perovskit ABX_3 kristal yapıya sahip olan bir mineraldir ve oksit mineraller grubundandır. Kübik yapı özelliği gösteren perovskitin en yaygın örneği kalsiyum titanattır ($CaTiO_3$). Perovskitler yüksek absorpsiyon özelliğine sahip oldukları için güneş hücrelerinde ışık absorblayıcı olarak kullanılmaktadır. Perovskit güneş hücreleri hafif olmaları, yüksek verim sağlamaları, esnek olmaları ve özellikle düşük sıcaklıklarda işlenebilmeleri sebebiyle diğer güneş hücrelerine önemli bir alternatif olarak görülmektedir. Düzlemsel EPGH'ler genellikle Şekil 2a'da gösterildiği gibi bir fotoaktif katman içeren sandviç yapıdadır. Bugüne kadar, PEDOT:PGH'ye dayalı EPGH'lerde en yüksek verimlilik PEN/ITO/PEDOT:PSS/perovskite/C60/BCP/LiF/Al yapılı EPGH'de %17,3 olarak ölçülmüştür [13]. Ancak bu tabaka nem varlığında kararsız hale gelebilmektedir. Bu nedenle bu katman için kaplama teknikleri ve alternatif materyaller geliştirilmelidir. Bunun yanında literatürde iletken ipliğe dayalı çift bükümlü EPGH'ler ile ilgili çalışmalar bulunmakta ve Li ve çalışma grubu geliştirdiği güneş ipliklerinde %15,7 verimlilik elde etmişlerdir (Şekil 2b) [14].



Şekil 2. (a) Fotoaktif katman içeren sandviç yapılı EPGH [13]; (b) Bir silindir üzerinde sarılmış nanoliflerin fotoğrafları [14]

2.3. Esnek organik güneş hücreler (EOGH'ler)

Son yıllarda EOGH'ler hafif olmaları, düşük maliyetleri, esneklik olarak iyi performans göstermeleri sebebiyle giderek artan bir ilgi görmektedir. Silikon güneş hücrelerine göre daha iyi esneyebildikleri için giyilebilir ve esnek yapıya sahip elektronik cihazların tasarımında kullanımı daha uygundur [8]. Genel olarak, EOGH'ler, esnek bir alt tabaka, taşıma elektrotu, aktif katman ve metal elektrottan oluşur (Şekil 3). EOGH'lerin aktif katmanında P3HT:PCBM gibi organik malzemeler kullanılmaktadır [15].



Şekil 3. Çok hafif ve ince EOGH şeması [15]

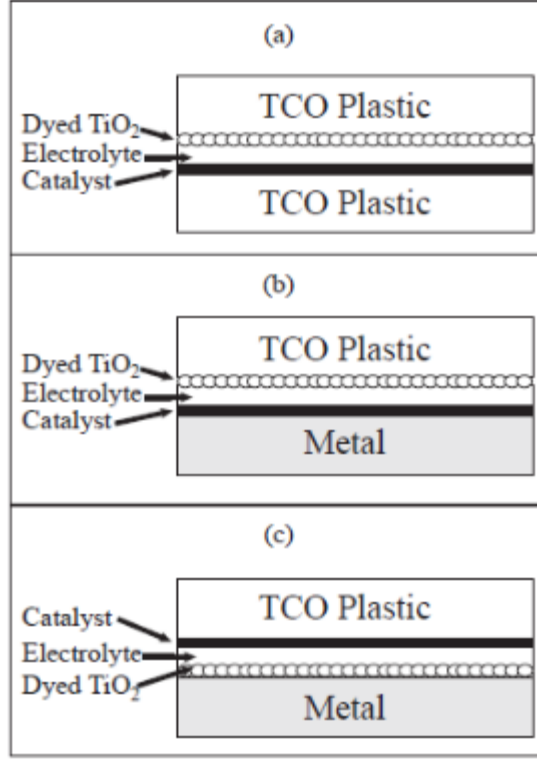
Hızlı gelişmelerinden dolayı, EOGH'lerin verimliliği, sert cam alt tabakalar üzerinde tandem hücreler için %17'ye ve tek hücreler için %14'e kadar ulaşmıştır. Günümüze kadar EOGH'lerin güç dönüştürme verimliliği (PCE), yaklaşık %15 olan sert ITO cam alt tabakalardaki hücrelere göre nispeten daha düşüktür. Xiong tarafından 2019'da fulleren olmayan OGH'ler için bildirildiği gibi, verimlilikleri hızla %12,5'e yükselmiştir. EOGH'lerin verimliliğini artırmak için, karbon bazlı malzemeler, metalik nanopapılar veya hibrit kompozit elektrotlar gibi FTO ve ITO camların yerini alacak farklı esnek alt tabaka malzemeler geliştirilmelidir [13]. Ayrıca EOGH'lerin organik elektrokimyasal transistörlere entegre edilmesiyle kendi gücünü sağlayan ultra esnek giyilebilir elektronik cihazlar üretilebilmekte ve bu cihazlar cilt veya dokular üzerine monte edildiğinde biyometrik sinyalleri yüksek hassasiyetle ölçebilmektedir.

2.4. Esnek boya duyarlı güneş hücreler (EBDGH'ler)

Boya duyarlı güneş hücreler (BDGH'ler) ışık emici olarak organik veya inorganik boyaların kullanıldığı güneş hücreleridir. DSSC'ler, boya ile modifiye edilmiş geniş bant yarı iletken elektrot, karşı elektrot ve redoks çifti içeren bir elektrolitten (I-/I³⁺) oluşan yeni bir fotoelektrokimyasal güneş hücreleridir (Şekil 4). Üretimindeki düşük maliyet, düşük sıcaklıklardaki üretim süreci, bol hammadde ve görece yüksek verimlilikleri sebebiyle araştırmacılar tarafından giderek daha fazla çalışılmaktadır. EBDGH'ler sert ve kırılman iletken cam bazlı BDGH'lerle karşılaştırıldığında hafiflik, rulo üretim teknolojisi ile uyumlu olması ve düşük üretim maliyeti gibi önemli avantajlara sahiptir. Şeffaf iletken oksit kaplı polimer alt tabakalar üzerinde EBDGH'lerin geliştirilmesi konusunda önemli çalışmalar yapılmıştır. Esnek foto elektrot, hızlı rulodan ruloya üretim cihazları kullanılarak geleneksel cam alt tabakalardan, esnek plastiklerden veya metallere farklı kombinasyonlarda üretilebilmektedir. EBDGH'ler üç temel konfigürasyonda hazırlanabilir. Düşük sıcaklık gerektiren üretim gerektiğinde Şekil 4a'da olduğu gibi oksit kaplı esnek plastik levhalar üzerinde üretilebilir. Diğer yandan metaller, Şekil 4b ve 4c'de olduğu gibi karşı elektrot veya foto elektrot olarak kullanılabilir [9].

Metal bazlı foto elektrot, yüksek kaliteli TiO₂ nanopartikül filmi için önemli bir gereklilik olan yüksek sıcaklıkta sinterleme prosesleri için bir avantaj sunmaktadır. Bu yüksek sıcaklık TiO₂ pastası, BDGH'lerin ters aydınlatma konfigürasyonunda kullanılmış ve paslanmaz çelik bazlı alt tabaka için %8,6'lık bir verim elde edilmiştir. Titanyum bazlı EBDGH'lerde en yüksek verim %9,2 olarak bildirilmiştir [16]. Wen ve arkadaşları giyilebilir akıllı giysiler elde etmek için birkaç BDGH ve ESGH üniteyi, seri/paralel bağlantılı tekstil yapısı olarak tek bir kumaş halinde dokuyarak kendi kendini şarj edebilen ve giyilebilir ürünlere dönüştürülebilen kumaş geliştirmişlerdir (Şekil 5)[17]. Bu çalışmalardan görüldüğü üzere BDGH'ler esnek uygulamalar ve özellikle kendi gücünü

sağlayan giyilebilir elektronik teknolojiler için büyük fırsatlar sunmakta ve gelecek vadetmektedir.



Şekil 4. EBDGH 'lerin farklı konfigürasyonları [9]



Şekil 5. Dış (A) ve iç mekan (B) koşullarında çalışan kendi kendini şarj eden elektrikli tekstil tasarımı [17]

3. Kendi Gücünü Sağlayan Giyilebilir Elektronik Teknolojiler

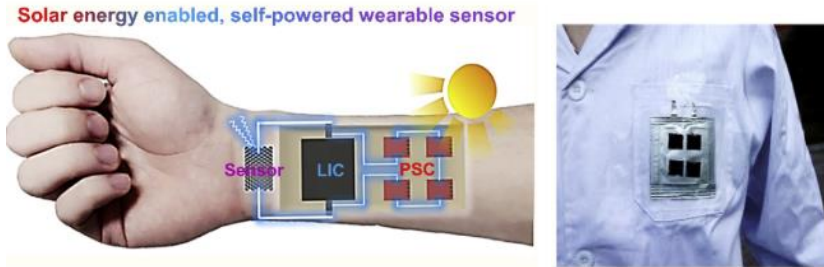
3.1. Ter izleme

Ter insan ve memeli hayvanların vücudunda ter bezleri tarafından salgılanan bir sıvıdır. İçerisinde su, elektrolit iyonları ve besin elementleri gibi maddeler içerir. Kolayca örnek alınabilmesi ve içeriğindeki zengin maddeler sebebiyle ter analizi bireylerin sağlık durumlarının izlenebilmesinde büyük avantajlar sağlamaktadır [18]. ESGH ve esnek şarj edilebilir çinko iyon batarya kullanılarak saat kordonu şeklinde entegre görüntüleme birimleri içeren ve kendi elektrik gücünü sağlayan akıllı saat geliştirilmiştir (Şekil 6). Cihazların ve sensörlerin esnekliği sayesinde bileğe takılabilmekte, enerji üretme ve depolama, biyogölgeleme ve sinyal işleme gibi işlemleri entegre bir biçimde gerçekleştirebilmektedir. Dışarıda güneş ışığı altında 1 saat sürede 6,0 V'a kadar şarj olabilmekte ve bu şarj ile yaklaşık 8 saat çalışabilmektedir. İçeride oda ışığında ise yaklaşık 2 saat sürede 4,2 V'a kadar şarj olabilmekte ve bu şarj ile yaklaşık 1 saat çalışabilmektedir.

Kendi elektrik enerjisini sağlayan bu cihaz sağlık izleme ve egzersiz yönetimi gibi fonksiyonları yerine getirmesi sebebiyle gelecek vadetmektedir [19]. Bu sayede açık ve kapalı mekanlarda spor yapanlar spor yaparlarken bu saati takıp ter içindeki glikoz seviyelerinin anlık verilerini alabilirler.

3.2. Hareket izleme ve gerinim ölçer

EPGH ve şarj edilebilir lityum-iyon kondansatör kullanılarak tasarlanan kendi gücünü sağlayan giyilebilir gerinim ölçer sensörünün %8,41'lik bir genel verimlilik ve 3V'luk yüksek bir çıkış voltajı sağladığı görülmüştür. Gerinim ölçer sensörü, herhangi bir harici güç bağlantısı olmadan fizyolojik sinyallerin kesin ve sürekli veri kaydı depolamakta, böylece tek bir akıllı sistem içinde enerji üretme, depolama ve kullanma işlevlerini gerçekleştirebilmektedir. Cihaz bileğe yerleştirilebilmekte ve 5 saat boyunca sürekli olarak çalışarak parmak hareketi gibi fizyolojik sinyalleri izleyebilmektedir (Şekil 7) [20].

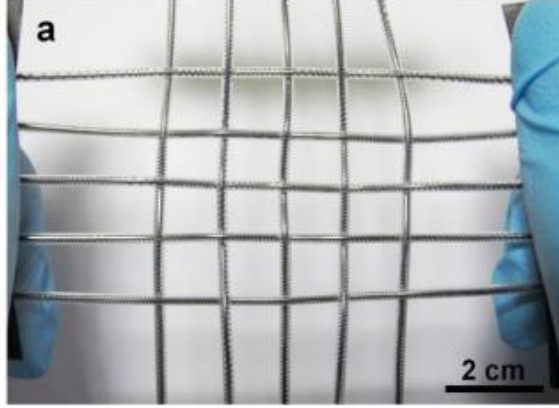


Şekil 7. Giyilebilir gerinim ölçer sensörünün şematik diyagramı [20]

3.3. Giyilebilir boyaya duyarlı güneş hücresi kumaşı

Giyilebilir, BDGH kumaşı, karşı elektrot olarak esnek, elektriksel olarak iletken fiberden ve çalışma elektrotu olarak yay benzeri titanyum telden üretilmiştir. Boyaya duyarlı hale getirilmiş güneş pillerinin %7,13'e varan enerji dönüşüm verimliliği sağladığı, enerji dönüşüm verimliliklerini esneme altında %30 ve esneme sonrasında %20 oranında koruduğu görülmüştür (Şekil 8) [21]. Bu nedenle üretilen bu esnek BDGH çeşitli hafif

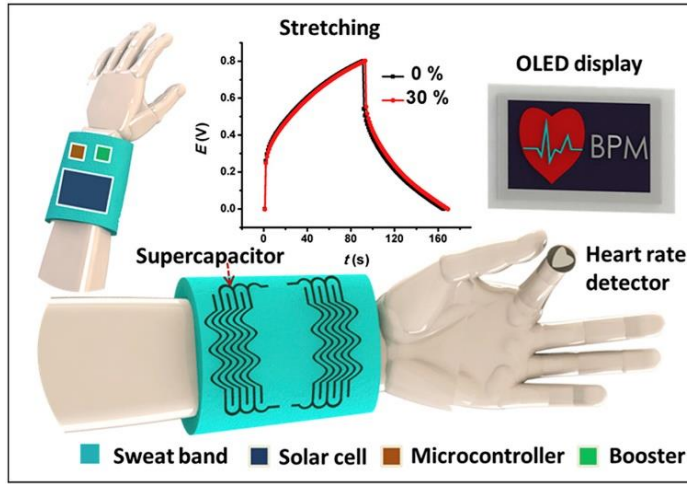
taşınabilir elektronik cihazlar için enerji sağlayıcı olarak yaygın kullanılabilme potansiyeline sahiptir.



Şekil 8. Giyilebilir, boya duyarlı bir güneş hücresi kumaşının görüntüsü [21]

3.4. Nabız izleme sensörü

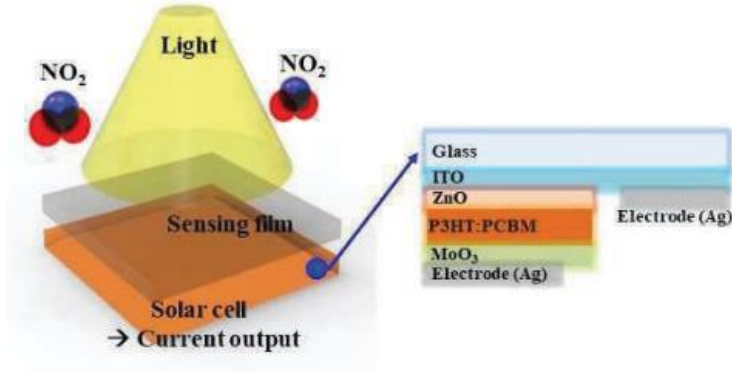
Kişilerin kalp atış hızı onların sağlık durumlarıyla ilgilidir. Bu yüzden kalp atış hızının takibi kişilerin sağlığının takibi ve hastalıkların erken teşhisi ve tedavisi açısından büyük öneme sahiptir. Devamlı takip gerektiren durumlar ve genel sağlık yönetimi için giyilebilir ve uzaktan takip edilebilen, kendi gücünü sağlayabilen cihazlar geliştirilmiştir. Araştırmacılar esnek bir ESGH, bir mikro denetleyici, bir nabız hızı sensörü ve bir OLED ekranı entegre ederek kendi kendine çalışan bir izleme sistemi üretilmiştir. Sensör, nabız hızı izleme için bir parmağa sabitlenebilmekte ve sonuçlar anlık izlenebilmektedir (Şekil 9) [22].



Şekil 9. Kendi gücünü sağlayabilen nabız izleme sensörü [22]

3.5. Gaz sensörü

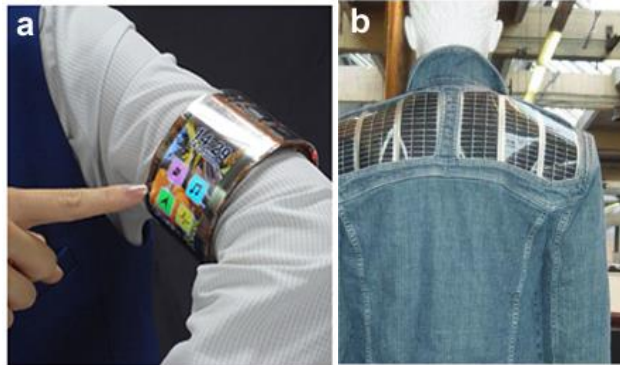
Üretim alanlarında formaldehit, fenol ve karbon monoksit gibi zehirli gazların açığa çıkması mümkündür. Bu zehirli gazların basit ve hızlı bir yöntemle tespiti, sağlığın ve güvenliğin korunması için çok önemlidir. Kyungnam Kang ve ekibi, şeffaf bir film ve bir OGH'den oluşan kendi gücünü sağlayan bir NO₂ sensörü geliştirmiştir. (Şekil 10) [23]. Kolorimetrik malzeme, görünür bölgede geçirgenliğini değiştirmek için toksik gazla reaksiyona girerek güneş hücresinin çıkış akımında bir değişikliğe neden olur. Bu akım ölçülerek akım değişimi tespit edilir. Bu sistem herhangi bir ek güç tüketimi olmadan, yani yalnızca ortam beyaz ışığının kullanılmasıyla NO₂'nin saptanmasını sağlar. Ayrıca üretiminde EOGH, EBDGH ve esnek lityum iyon bataryalar kullanılabildiği için kendi gücünü sağlayan giyilebilir elektronik cihaz olarak da tasarlanabilir.



Şekil 10. Organik güneş hücresinden oluşan ve kendi gücünü sağlayan bir NO₂ sensörünün şematik gösterimi [23]

3.6. Giyilebilir ekranlar

Tajima ve araştırma grubu kola takılabilir bir ekran üretebilmek için esnek organik ışık yayan diyot (OLED) ve esnek lityum iyot batarya geliştirmişlerdir (Şekil 11a) [24]. Bu ekranlar esnek güneş hücreleri ile üretilen giyilebilir güneş hücreleri ile entegre edilerek kendi gücünü sağlayarak çalışabilmektedir (Şekil 11b) [25].



Şekil 11. Prototip kola takılabilir ekran: (a) Giyilebilir ekran [24]; (b) Esnek giyilebilir güneş hücresi [25]

3.7. Karşılaşılan sorunlar ve zorluklar

Kendi enerjisini sağlayan giyilebilir enerji sistemlerinin enerji üretimi ve depolama cihazlarında kullanılan grafen, metal oksit nanoparçacıklar gibi sentetik malzemelerin karmaşık sentez süreçleri ile üretilebilmeleri, düşük verimli olmaları, bazılarının çevreye zararlı olmaları, bu cihazların uzun süreli test raporları ile ilgili nadir raporların olması gibi sorunları bulunmaktadır. Özellikle giyilebilir cihazlardaki güvenlik eksiklikleri ve az sayıda çalışan giyilebilir elektronik cihaz olduğu için maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle ticarileşme zorluklarıyla karşı karşıyadır. Bu sorunların ve zorlukların aşılması için cihazlarda kullanılan malzemelerin iyileştirilmesi ve çevreye zararsız hale getirilmesi; cihazların uzun süreli testlerinin yapılması ve bunların bir standarda bağlanması, güvenlik eksiklerinin giderilmesi, verimliliklerinin artırılması ve yapılacak çalışmalarla maliyetlerinin düşürülerek fiyatlarının piyasa şartlarına uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Giyilebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ile daha hafif ve daha verimli cihazlar üretilebilir. Bu sayede giyilebilir cihazların kullanımı artırılabilir. Özellikle sağlıkla ilgili taşınabilir cihaz kullanan kişiler sabit bir enerji kaynağına bağlı olma mecburiyetinden kurtulur. Örneğin oksijen cihazları, hasta veya yaşlı takip ve kontrol cihazlarının kullanımlarında kesintisiz enerji büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte bu cihazların kullanımının artması bu cihazların yaydığı radyasyondan canlı hücrelerin olumsuz etkilenmesi, dokulara temas sonucu oluşabilecek alerjik reaksiyonlar gibi bazı sağlık problemlerini de beraberinde getirebilir. Bunun için cihaz üretiminde malzeme seçimi özellikle organik ve vücuda zararsız malzemeler araştırılmalı ve kullanılmalıdır. Ayrıca radyasyondan etkilenmenin minimuma düşürülmesi için kullanım süreleri kısıtlanmalıdır. Günümüzde giyilebilir enerji sistemi olarak kullanılan ESGH'ler maliyet; EPGH, EOGH ve EBDGH 'ler kararlılık zorluklarıyla karşı karşıyadır. Bu zorlukların aşılabilmesi için daha hafif, zararsız ve ucuz malzemelerin üretilmesi ve kullanılması gerekmektedir. Ayrıca EOGH'lerin verimliliğini artırmak için, karbon bazlı malzemeler, metalik nano yapılar veya hibrit kompozit elektrotlar gibi FTO ve ITO camların yerini alacak farklı esnek alt tabaka malzemeleri araştırılmalıdır. Gelecekte esnek güneş hücreler ve diğer bileşenlerdeki sorunların giderilmesi ile kendi gücünü üretebilen giyilebilir elektronik teknolojiler günlük hayatımıza daha çok girecek ve yaşam tarzlarımızı olumlu yönde etkileyecektir.

Kaynaklar

1. Phuangpornpitak N, Kumar S. PV hybrid systems for rural electrification in Thailand. *Renew Sustain Energy Rev.* 2007;11(7):1530-1543.
2. Ahmad L, Khordehgah N, Malinauskaite J, Jouhara H. Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies. *Energy.* 2020;207:118254. Elsevier Ltd,
3. Tripathy M, Sadhu PK, Panda SK. A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;61:451-465. Elsevier,
4. Pillai U. Drivers of cost reduction in solar photovoltaics. *Energy Econ.* 2015;50:286-293. Elsevier B.V.,
5. Zhao J, Zha J, Zeng Z, Tan C. Recent advances in wearable self-powered energy systems based on flexible energy storage devices integrated with flexible solar cells. *J Mater Chem A.* 2021;9(35):18887-18905. Royal Society of Chemistry,
6. Lund PD, Halme J, Hashmi G, Asghar I, Miettunen K. Flexible and Printed Electronics TOPICAL REVIEW Application of dye-sensitized and perovskite solar cells on flexible substrates. Published online 2018.
7. Weerasinghe HC, Huang F, Cheng YB. Fabrication of flexible dye sensitized solar cells on plastic substrates. *Nano Energy.* 2013;2(2):174-189. Elsevier,
8. Lin Y, Jin Y, Dong S, et al. Printed Nonfullerene Organic Solar Cells with the Highest Efficiency of 9.5%. *Adv Energy Mater.* 2018;8(13).
9. Yugis AR, Mansa RF, Sipaut CS. Review on metallic and plastic flexible dye sensitized solar cell. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2015;78(1).
10. Jokic P, Magno M. Powering smart wearable systems with flexible solar energy harvesting. *Proc - IEEE Int Symp Circuits Syst.* Published online 2017.
11. Ichikawa Y, Yoshida T, Hama T, Sakai H, Harashima K. Production technology for amorphous silicon-based flexible solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2001;66(1-4):107-115.
12. Lee SM, Biswas R, Li W, Kang D, Chan L, Yoon J. Printable nanostructured silicon solar cells for high-performance, large-area flexible photovoltaics. *ACS Nano.* 2014;8(10):10507-10516.
13. Kim S, Quy H Van, Bark CW. Photovoltaic technologies for flexible solar cells: beyond silicon. *Mater Today Energy.* 2021;19:100583. Elsevier Ltd,
14. Li Q, Balilonda A, Ali A, et al. Flexible Solar Yarns with 15.7% Power Conversion Efficiency, Based on Electrospun Perovskite Composite Nanofibers. *Sol RRL.* 2020;4(9):1-12.
15. Kaltenbrunner M, White MS, Glowacki ED, et al. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. *Nat Commun.* 2012;3.
16. Yun HG, Bae BS, Kang MG. A simple and highly efficient method for surface treatment of Ti substrates for use in dye-sensitized solar cells. *Adv Energy Mater.* 2011;1(3):337-342.
17. Wen Z, Yeh MH, Guo H, et al. Self-powered textile for Wearable electronics by hybridizing fiber-shaped nanogenerators, solar cells, and supercapacitors. *Sci Adv.* 2016;2(10).
18. Tai LC, Gao W, Chao M, et al. Methylxanthine Drug Monitoring with Wearable Sweat Sensors. *Adv Mater.* 2018;30(23).
19. Zhao J, Lin Y, Wu J, et al. A Fully Integrated and Self-Powered Smartwatch for Continuous Sweat Glucose Monitoring. *ACS Sensors.* 2019;4(7):1925-1933.
20. Li C, Cong S, Tian Z, et al. Flexible perovskite solar cell-driven photo-rechargeable lithium-ion capacitor for self-powered wearable strain sensors. *Nano Energy.* 2019;60(February):247-256. Elsevier Ltd,

21. Yang Z, Deng J, Sun X, Li H, Peng H. Stretchable, wearable dye-sensitized solar cells. *Adv Mater.* 2014;26(17):2643-2647.
22. Rajendran V, Mohan AMV, Jayaraman M, Nakagawa T. All-printed, interdigitated, freestanding serpentine interconnects based flexible solid state supercapacitor for self powered wearable electronics. *Nano Energy.* 2019;65(August):104055. Elsevier Ltd,
23. Mayr T, Abel T, Enko B, et al. A planar waveguide optical sensor employing simple light coupling. *Analyst.* 2009;134(8):1544-1547.
24. Tajima R, Member SID. Truly wearable display comprised of a flexible battery , flexible display panel , and flexible printed circuit Bend-fix. Published online 2015:237-244.
25. Hashemi SA, Ramakrishna S, Aberle AG. Recent progress in flexible-wearable solar cells for self-powered electronic devices. *Energy Environ Sci.* 2020;13(3):685-743. Royal Society of Chemistry,