




TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER İLE ENERJİ HASADI: TEORİK KÖKEN, ÇALIŞMA PRENSİBİ VE ÇALIŞMA MODLARI

Nazire Deniz YILMAZ 

Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, TÜRKİYE
naziredyilmaz@gmail.com, nazire.yilmaz@usak.edu.tr

(Geliş/Received: 29.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.10.2020)

ÖZ: Cep telefonları ve giyilebilir elektronik aygıtların fonksiyonlarını kesintisiz biçimde yerine getirebilmeleri için gereksinim duyulan enerjinin üretimi ve depolanması, hafif ve esnek elemanlarla sağlanmalıdır. Konvansiyonel piller; gerekli pratiklik, esneklik, konfor ve hafifliği sağlama konusunda yetersizlik kalmaktadır. Bu durum, enerji hasatçılara yönelen ilginin artmasına neden olmuştur. Enerji hasatçıları, çevresel enerjileri elektrik enerjisine dönüştürürler. Enerji hasatçıları, yalnızca pratiklik sağlamaz aynı zamanda çevre dostu enerji üretimi gerçekleştirir. Enerji hasatçıları, faydalanılan enerji kaynağına ve elektrik enerjisine dönüştürme prensibine göre fotovoltaik, termoelektrik, elektromanyetik, piezoelektrik ve triboelektrik gibi sınıflara ayrılabilir. Triboelektrik enerji hasatçıları sürtünme sırasında oluşan statik elektriği kullanılabilir enerjiye dönüştürür. Triboelektrik enerji hasatçıları ile; dikey temas ayrılma, düzlem içi kaydırma, tek elektrotlu, serbest triboelektrik tabaka modları gibi farklı çalışma modlarında enerji elde edebilir. İlk defa 2012 yılında geliştirilen, ardından yoğun biçimde araştırma çalışmalarına konu olan triboelektrik enerji hasatçıları; yüksek güç çıkışları, nanoteknoloji ile uyumları, geniş malzeme ve tasarım seçenekleri, küçük boyutları, hafif ve esnek yapıları, düşük maliyetleri ve giyilebilir aygıtlara eklenebilmeleri ile geleceğin enerji teknolojisi olmaya adaydır.

Anahtar Kelimeler: Enerji hasadı, Giyilebilir aygıtlar, Nanogeneratörler, Triboelektrik nanogeneratörler

Energy Harvesting with Triboelectric Nanogenerators: Theoretical Roots, Working Principles and Working Modes

ABSTRACT: Light-weight and flexible components are needed for energy generation and storage in order for cell phones and wearable electronics to carry out their functions uninterruptedly. Conventional batteries are insufficient in terms of practicability, flexibility, comfort and light weight. This situation causes energy harvesters to attract more interest. Energy harvesters collect energy present in the environment and transfer it into electrical energy which can be used by wearables and other electronics. Harvesting environmental energy not only provides ease of use, but it also generates environmentally-friendly energy. According to the energy source and conversion principle; energy harvesters can be classified in groups such as photovoltaic, thermoelectric, electromagnetic, piezoelectric, and triboelectric energy harvesters. Triboelectric energy harvesters convert static electricity induced by friction, into usable energy. With triboelectric energy harvesters, energy can be generated using vertical contact separation, in-plane sliding, single electrode and free-standing triboelectric layer modes. Triboelectric energy harvesters were developed for the first time in 2012, and then have been the subject of intense research studies. With their high power output, compliance with nanotechnology, broad material and design choices, small

dimensions, light and flexible structure, low cost and adaptability to wearable systems, triboelectric energy harvesters show promise to be the energy technology of the future.

Key Words: *Energy harvesting, Nanogenerators, Triboelectric nanogenerators, Wearables.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hayat standardına olumlu katkılarından dolayı giyilebilir elektronik sistemlerin yakın gelecekte çok yaygın biçimde kullanılacakları öngörülmektedir. Günümüzde giyim bileşenlerin yalnızca estetik beklentileri karşılması yetmemekte, giyiciye birçok fonksiyon sağlaması beklenmektedir (Islam, Zubair, & Fairuz, 2019; Zeng et al., 2014). Elektronik tekstillere (akıllı tekstiller veya e-tekstiller) entegre edilen elektronik veya optoelektronik aygıtlar (Jeong ve diğ., 2019), elektronik sektörünün gelişmesi için de önemli katkı sağlama kapasitesindedir (Pu ve diğ., 2018). Giyilebilir aygıtlara örnek olarak sıcaklık sensörleri (Komolafe ve diğ., 2019), basınç sensörleri (Pizarro ve diğ., 2018), tıbbi teşhis sensörleri (Kim ve diğ., 2016; Miyata ve diğ., 2002), ışık yayan diyotlar (LED) (Choi ve diğ., 2017; Kim ve diğ., 2015), tekstil devreler (Tao ve Koncar, 2016) ve giyilebilir ekranlar (Yin ve diğ., 2020) sayılabilir. Bu giyilebilir aygıtların fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için enerjiye gereksinimleri vardır (Lancos ve diğ., 2017; Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014). Güç üretimi ve depolanması, giyilebilir sistemlere uygun biçimde hafif ve esnek elemanlarla sağlanmalıdır. Böyle bir çözümün bulunmaması başta giyilebilir sistemler olmak üzere nanorobotlar (Mavroidis ve Ferreira, 2013), mikroelektromekanik sistemler (MEMS) (Rajdi ve diğ., 2012), küçük kişisel elektronik aygıtlar gibi birçok elektronik cihazın kullanımını kısıtlayacaktır (Huang ve diğ., 2003; Lancos ve diğ., 2017; Zeng ve diğ., 2014). Konvansiyonel piller portatif elektronik aygıtlarda yaygın kullanıma sahiptir. Ne var ki sık şarj edilme veya değiştirilme mecburiyetlerinin yanında, rijit ve ağır yapıları ile giyilebilir sistemlerin gerektirdiği pratiklik, esneklik, konfor ve hafifliği sağlama konusunda yetersizlik gösterirler (Pu ve diğ., 2018). Pillerin çevreye toksik etki göstermesi diğer bir dezavantajdır (Zhu, Bai, Chen, & Lin Wang, 2013). Bu eksikliklerin giderilmesi amacıyla pillerin lif ve tekstil yapılarına dâhil edilmesi konusunda emek harcanmıştır. Fakat enerji yoğunluklarının sınırlı olması, güvenlik sakıncaları ve şarj edilme sıklığı; bu elektrokimyasal enerji depolama aygıtlarının dezavantajları olmaya devam etmektedir. Bu durum enerji hasatçılara ilginin artmasına neden olmuştur. Enerji hasatçıları olan elektromanyetik jeneratörler, piezoelektrik ve triboelektrik nanojeneratörler, çevresel enerjileri giyilebilir sistemler ve diğer elektronik aygıtlarda kullanılmak üzere elektrik enerjisine dönüştürürler (Pu ve diğ., 2018). Çevresel enerjilerin elektriğe çevrilmesi yalnızca pratiklik sağlamaz, aynı zamanda düşük karbon salımlı, dünyadaki kaynakları tüketmeyen çevre dostu enerji elde etme olanağı sunar (Lin ve diğ., 2016).

Bu çalışmada çevrede mevcut enerjileri elektrik enerjisine dönüştüren enerji hasatçıları genel olarak gözden geçirilmiş, bunlar arasında öne çıkan triboelektrik nanojeneratörler incelenmiştir. Triboelektrik nanojeneratörlerin teorik temelleri, çalışma modları açıklanmış, üretimlerinde kullanılan malzemeler listelenmiş ve bu konuda literatürde yer alan bazı çalışmalar irdelenmiştir.

ENERJİ HASATÇILARI (ENERGY HARVESTERS)

Çevresel enerjilerden elektrik üretebilen enerji hasatçıları, zor ve uzak yerlerde kullanılan elektronik cihazların ve giyilebilir elektronik cihazların çalışabilmesi için gerekli enerjiyi sağlayabilme potansiyeline sahiptir. İlgili enerji kaynağı; güneş ışığı (Hashemi ve diğ., 2020), vücut ısısı (Hyland ve diğ., 2016), su dalgası (Wang, 2017), ses (Choi ve diğ., 2019), yağmur damlası (Nie ve diğ., 2020), insan bedenindeki *in vitro* veya *in vivo* hareketler (Khalid ve diğ., 2019) olabilir. Enerji hasatçıları; fotovoltaik, termoelektrik, elektromanyetik, piezoelektrik ve triboelektrik enerji dönüşümü gibi farklı yöntemlerle elektrik enerjisi üretimi sağlayabilir (Islam ve diğ., 2019; Khalid ve diğ., 2019; Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014).

Termoelektrik enerji hasatçıları, sıcaklık farkının olduğu durumlarda ısı enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilir (Feng ve diğ., 2019). Termoelektrik enerji hasatçıları genelde katı-hal p- ve n- tipi yarıiletkenlerdir, ne var ki, verimlilikleri ve çıkış performansları çoğunlukla düşüktür (Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014) ve üretilen güç mikro Watt mertebesinde (Jokic ve Magno, 2017).

Farklı çeşitlerde güneş hücreleri (fotovoltaik piller) ile güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır (Hashemi ve diğ., 2020; Jokic ve Magno, 2017; Veligorskiy ve diğ., 2018). Ne var ki, güneş hücrelerinin kullanımı; coğrafi konum, mevsim, ve hava koşullarına bağlı olup enerji üretimi süreklilik arz etmemektedir (Pu ve diğ., 2018).

Diğer bir önemli bir enerji hasatçı sınıfı, elektromanyetik jeneratörlerdir. Elektromanyetik jeneratörler, Faraday'ın elektromanyetik endüksiyonu keşfetmesinden beri elektromanyetizma enerji üretimi için kullanılmaktadır. Konvansiyonel elektromanyetik jeneratörler de mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviriyor olsa da giyilebilir aygıtlar için uygun değildir. Bunun birinci sebebi, ağır ve sert mıknatıs kullanımının gerekmesidir. Diğeri ise düşük frekanstaki insan bedeni hareketlerinden elde edilebilen güç çıktısının yetersiz olmasıdır (Khalid ve diğ., 2019; Pu ve diğ., 2018).

Mekanik titreşim veya insan hareketleri, giyilebilir aygıtlar için genel olarak geçerli enerji kaynaklarıdır. Nanogeneratörlerin iki sınıfını oluşturan piezoelektrik nanogeneratörler ve triboelektrik nanogeneratörler ile, titreşim, rüzgar, deniz dalgası (Wang, 2017) ve insan hareketleri (Khalid ve diğ., 2019) gibi çeşitli mekanik enerjilerin toplanması için yoğun biçimde çalışılmıştır.

Piezoelektrik aygıtlar, basit yapıları ve kullanım kolaylığı nedeniyle enerji hasadı alanında önem kazanmıştır (Jung ve diğ., 2015). Ne var ki, bu yöntem insan hareketlerinden enerji elde etme konusunda bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajların biri, insan hareketlerinin aşırı düşük frekansa sahip olmasıdır (Li ve diğ., 2018). İnsan hareketlerinin frekansı 1 Hz civarındadır. Piezoelektrik enerji toplayıcıların çalışma bant aralıkları ise yüksektir. Diğer bir dezavantaj, insan hareket genliğinin, genelde cihaz boyutlarından çok yüksek olmasıdır. Buna ilaveten, insan hareketleri çok yönlüdür: doğrusal titreşimler dışında eğilme, gerilme, kayma ve diğer hareketleri içerir. Bu karmaşık hareketler, piezoelektrik enerji toplayıcılarının enerji üretmesini zorlaştırır. Bu zorluklar, piezoelektrik nanogeneratörler ile elde edilen güç miktarını birkaç mili Watt ile sınırlı tutar (Khalid ve diğ., 2019; Qian ve diğ., 2018).

Triboelektrik nanogeneratörler; düşük ağırlıkları, küçük boyutları, esneklikleri, çok sayıda malzeme seçeneği, kullanışlı tasarım yapıları ve düşük frekanslarda üstün performansları ile öne çıkmıştır. Triboelektrik, temas elektriklenmesi olarak da adlandırılabilir. Triboelektrik terimi "tribo" ve "elektrik" kelimelerinden oluşur. Burada "tribo", Yunanca bir kelime olup sürtünme anlamına gelmektedir. Anlamının işaret ettiği biçimde, "Triboelektrik" sürtünme ile elektrik oluşması anlamına gelmektedir (Khushboo ve Azad, 2017). Triboelektrik etki, triboelektrik seriye göre değişik polar özellik gösteren, yani farklı elektron çekme karakteristiğine sahip iki maddenin, temas veya sürtünme hallerinde elektriksel yüklenmesi olayıdır (Pu ve diğ., 2018; Zeng ve diğ., 2014).

Triboelektrik nanogeneratörler, cep telefonu ve diğer küçük elektronik aygıtlara, akıllı tekstillere (Shi, He, & Lee, 2019; Zhu, Peng ve diğ., 2014) ve Nesnelerin İnternetine (IoT, "internet of things") enerji sağlama kapasitesi ile yeni çağın enerji teknolojisi olma potansiyeli taşımaktadır (Ahmed ve diğ., 2019). Nesnelerin internetinde (IoT) milyarlarca sensörün şarj edilmesi mümkün olmadığı için konvansiyonel pillerin kullanımı uygun olmamaktadır. *In situ* enerji çevirimi yapan nanogeneratörler ise sürekli güç tedariki için uygun bir alternatiftir (Pu ve diğ., 2018).

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLER VE NANOTEKNOLOJİ (TRİBOELECTRIC NANOGENERATORS AND NANOTECHNOLOGY)

Nanoteknoloji; malzeme, yapı, aygıt ve sistemlerin tasarım, karakterizasyon, üretim ve uygulamalarının nanometre ölçeğindeki olaylardan faydalanarak gerçekleştirildiği bilim ve mühendislik alanlarını içerir (Baker ve diğ., 1975). Nanoteknoloji, hızla gelişen disiplinlerarası bir çalışma alanıdır. Değişik bilim ve teknoloji dalları ile ilgilidir; bunlar arasında elektronik, tıp ve malzeme bilimleri sayılabilir. Nanoteknoloji, değişik alanlarda gittikçe daha yüksek sayıdaki uygulamada gelişmiş özellikler ve performans kazandırılmasına katkı sağlamaktadır (Yılmaz, 2018a).

"Nanomalzeme" terimi, en azından bir boyutu nano ölçekte yani 100 nm'den düşük olan malzemeleri işaret eder (Gashti ve diğ., 2012). Bu malzemeler, fonksiyonellik ve yüksek performans isteyen uygulamalarda gösterdikleri yüksek spesifik özellikleri sayesinde kullanım potansiyeli taşımaktadır.

Nanomalzemelerin diğer malzemelere karşı başlıca avantajı, çok yüksek alan-hacim oranına sahip olmalarıdır (Joshi ve diğ., 2008; Yılmaz, 2018a). Birim hacim başına elde edilen yüksek yüzey alanı, maddenin ortam ile etkileşime girebilen miktarını artırır. Dolayısıyla küçük hacim ve miktardaki nanomalzeme ile büyük etki elde etmek mümkündür (Crosby ve Lee, 2007).

Nanobilim ve nanoteknolojinin hızlı gelişimi, elektronik aygıtların minyatürize edilme sürecini de hızlandırmıştır (Zeng ve diğ., 2014). Nanomalzemeler ile, konvansiyonel malzemelerin ulaşamayacağı tasarım ve özellik kombinasyonları elde edilebilir. Nanomalzemelerden oluşan nanokompozitler; sensör, aktuatör, enerji toplama ve depolama gibi farklı uygulamalarda kullanım potansiyeline sahiptir (Yılmaz, 2018b).

Yeni nesil giyilebilir elektronik aygıtlar doğrudan insan bedeni üzerine giyilmektedir. Dolayısıyla, insan bedeninin kıvrımlı şekline ve esnekliğine uyum sağlamalıdır. Cildin nefes almasına izin vermelidir (Yılmaz, 2018a). Hafif olmalı ve az yer kaplamalı, böylece giyilebilir aygıtların estetik ve konfor özelliklerine olumsuz etki etmemelidir (Zeng ve diğ., 2014). Nanoteknolojinin kullanımı ile enerji hasadı ve depolanması gibi ileri fonksiyonlar; nano-ölçekli boyutlar sayesinde, giyilebilir cihazlarda estetik ve konfor performansına zarar vermeden elde edilebilmektedir (Misra ve Bera, 2018).

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN TEORİK KÖKENİ (THEORETICAL BACKGROUND OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Elektromanyetik jeneratörlerin, piezoelektrik ve triboelektrik nanogeneratörlerin temelleri Maxwell denklemlerine dayandırılabilir (Zhang ve Wang, 2018). Maxwell denklemlerinin basit formları aşağıdaki gibi verilebilir (Maxwell, 1861a, 1861b, 2010; Pu ve diğ., 2018):

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (4)$$

Yukarıda, Maxwell denklemlerini oluşturan Gauss Yasası, manyetizma için Gauss Yasası, Faraday Endüksiyon Yasası ve Ampere Yasası sırası ile verilmiştir. Burada D elektrik yerdeğiştirme alanını, B manyetik alanı, E elektrik alan şiddeti, H mıknatıslama alanını, ρ serbest elektrik yükü yoğunluğunu, J serbest akım yoğunluğunu, t ise zamanı singeler. ∇ , diverjans operatörü; $\nabla \times$ ise rotasyonel operatördür.

Elektromanyetik jeneratörün çıktı akımı, manyetik alanın zamana göre değişiminden kaynaklanır ve akım $\frac{\partial B}{\partial t}$ ile ilişkilidir. Triboelektrik ve piezoelektrik nanogeneratörlerin akımı ise Maxwell yerdeğiştirme akımı kısmı ile ilgilidir. Bu akım polarize yüzey yükleri nedeniyle polarizasyon alanının değişimine bağlıdır (Pu ve diğ., 2018). Maxwell'in yer değiştirme akımı 1861' de açıklanmış (Maxwell, 1861a, 1861b, 2010) ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Schwinger ve diğ., 2019):

$$D = \epsilon_0 E + P. \quad (5)$$

Burada, ϵ_0 vakum elektrik geçirgenlik katsayısı ve P polarizasyon alanıdır. Bu eşitliğin zamana göre türevi aşağıdaki gibidir:

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

burada J_D yer değiştirme akımıdır. İzotropik ortam için, yer değiştirme akımı aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$J_D = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (7)$$

burada ϵ dielektriklerin elektrik geçirgenliğidir. Yüzey polarize yükleri varsa, yer değiştirme akımı aşağıdaki gibidir (Pu ve diğ., 2018):

$$J_D = \frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P_s}{\partial t}, \quad (8)$$

Burada P_s , polarize olan yüklerin indüklediği polarizasyon alanıdır. Sağ kısımdaki ilk terim değişken elektrik alanının oluşturduğu akımdır. Aynı kısımdaki ikinci terim ise yüzey yüklerinin değişken polarizasyon alanının indüklediği akımdır. Triboelektrik nanojeneratörlerde, dielektrik iki malzemenin fiziksel teması ile her iki yüzeyde birbirinin zıttı elektrik yüklenme oluşacaktır. Oluşan elektrostatik alan dış devre boyunca elektron akışına neden olacaktır. İç devre, yer değiştirme akımı ile ilgili olurken; dış akım, kapasitif iletkenlik akımı olacaktır (Pu ve diğ., 2018).

6 numaralı eşitlikte gösterilen Maxwell yer değiştirme akımı denkleminin sağ kısmındaki ilk terim, $\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$, elektromanyetik dalga teorisinin ve dolayısıyla radyo (Jondral, 2008), telsiz iletişim (Sengupta ve Sarkar, 2003), radar (Scott, 2005) gibi teknolojilerin gelişmesini sağlamıştır. İkinci terim ise, yani yüzey polarize yüklerin zamana bağlı değişiminin yol açtığı polarizasyon alanı ise, piezoelektrik (Guo, 2010) ve triboelektrik nanojeneratörlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Triboelektrik nanojeneratörlerin, Georgia Institute of Technology'den Prof. Wang ve ekibi tarafından 2012 yılında akademik dünyaya tanıtılması ile (Fan ve diğ., 2012); Nesnelerin İnterneti (IoT) çağı için gereken yeni enerji teknolojisi için "mavi enerji", "kendi gücünü sağlayan sensörler" ve "kendini şarj eden sistemler" gibi kavramların geliştirilmesine yol açılmıştır (Pu ve diğ., 2018; Zhang ve Wang, 2018).

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ (WORKING PRINCIPLE OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Farklı polarite gösteren iki malzeme birbiri ile temas haline getirilince, triboelektrik etki nedeniyle yük transferi meydana gelerek her iki yüzeyde birbirinin zıt yüklenme meydana gelir. Bu malzemeler temas halinde olmayan yüzeylerinden metal elektrotlara bağlı olması durumunda, temas yüzeylerinin ayrılması elektrostatik indüksiyon etkisi ile yük birikimine yol açar. Matematiksel olarak, yüzeylerdeki yük birikimi Q_f ise, iki elektrot arasındaki başlangıç voltajı V_{tr} aşağıdaki eşitlikteki gibi gösterilebilir (Khalid ve diğ., 2019):

$$V_{tr} = -\frac{Q_f d_{tr}}{\epsilon_0 S_{tr}} \quad (9)$$

Burada d_{tr} katmanlar arası uzaklığı, S_{tr} metal elektrotun yüzey alanını, ϵ_0 da vakum elektriksel geçirgenliği simgelemektedir. Aşağıdaki eşitlik ise dış elektrotlarda indüklenen akımı, I_{tr} , göstermektedir (Khalid ve diğ., 2019):

$$I_{tr} = C_{tr} \frac{\partial V_{tr}}{\partial t} + V_{tr} \frac{\partial C_{tr}}{\partial t} \quad (10)$$

burada C_{tr} sistemin sığasıdır. Triboelektrik etki yalnız kitlesel özelliklere bağlı değildir, temas yüzeyinden etkilenir. Temas yüzey morfolojisinin manipülasyonu, yüksek temas ve ayrılma hızına sahip aygıt yapı tasarımı ve elektron çekmede büyük farka sahip yüzey malzemelerinin kullanımı ile triboelektrik nanojeneratör performansı geliştirilebilir (Zeng ve diğ., 2014).

Çizelge 1, malzemelerin temas elektriklenmesi ile pozitif veya negatif yük alma eğilimlerini gösterir. Bu liste triboelektrik seri olarak bilinmektedir. İki malzeme triboelektrik seride birbirinden ne kadar uzaksa, temas halinde yüklenme o kadar şiddetli olur. Listede birbirine yakın yerleşmiş malzemelerin teması sonucu arasında çok az yüklenme meydana gelebilir veya hiç yüklenme olmaz (Miller, 2011). Literatürde farklı triboelektrik seri listeleri mevcuttur (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018).

Çizelge 1. Triboelektrik seri (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018)*Table 1. Triboelectric series (Khalid ve diğ., 2019; Miller, 2011; Pan ve Zhang, 2019; Pu ve diğ., 2018)*

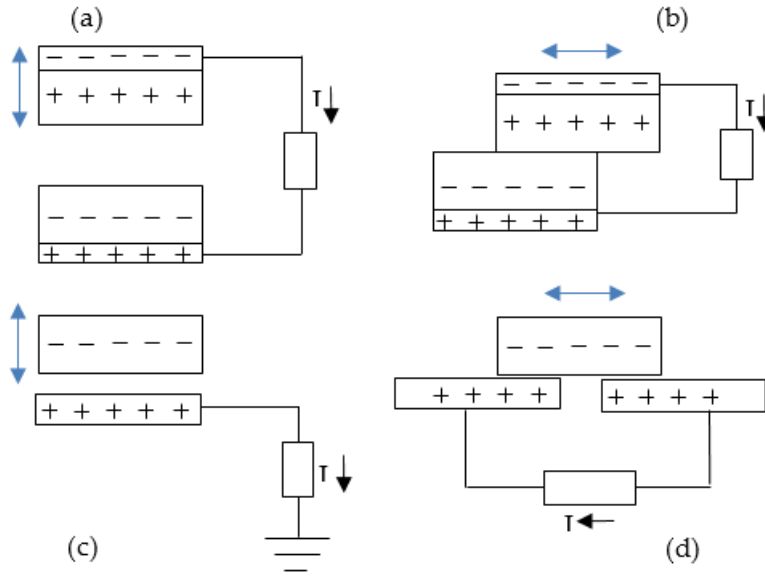
Pozitif yük almaya eğilimli malzemeler (aşağı doğru pozitif eğilim azalıyor)	Negatif yük almaya eğilimli malzemeler (aşağı doğru negatif eğilim artıyor)
İnsan teni	Pamuk
Asbest	Çelik
Asetat	Odun
Cam	Amber
Mika	Balmumu
İnsan saçı	Sert kauçuk
Naylon	Nikel
Yün	Bakır
Kürk	Pirinç
Kurşun	Gümüş
İpek	Çelik
Alüminyum	Altın, platin
Kağıt	Kükürt
Pamuk	Asetat, viskoz rayon
	Polimetilmetakrilat (PMMA)
	Polivinilalkol
	Polyester
	Stiren
	Orlon
	Akrilik
	Poliüretan
	Poliyeten
	Polipropilen
	Poliimid (kapton)
	Polieteraftalat
	Polivinilklorür
	Silikon
	Teflon (politetrafloroetilen-PTFE)
	Silikon kauçuk
	Ebonit

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÇALIŞMA MODLARI (WORKING MODES OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Triboelektrik elektrik hasatçıları, genelde dört farklı çalışma modu altında incelenir. Bunlar Şekil 1’de gösterildiği gibi; dikey temas ayrılma modu, düzlem içi kayma modu, tek elektrotlu mod ve serbest triboelektrik tabaka modudur (Khushboo ve Azad, 2017; Shi ve diğ., 2019).

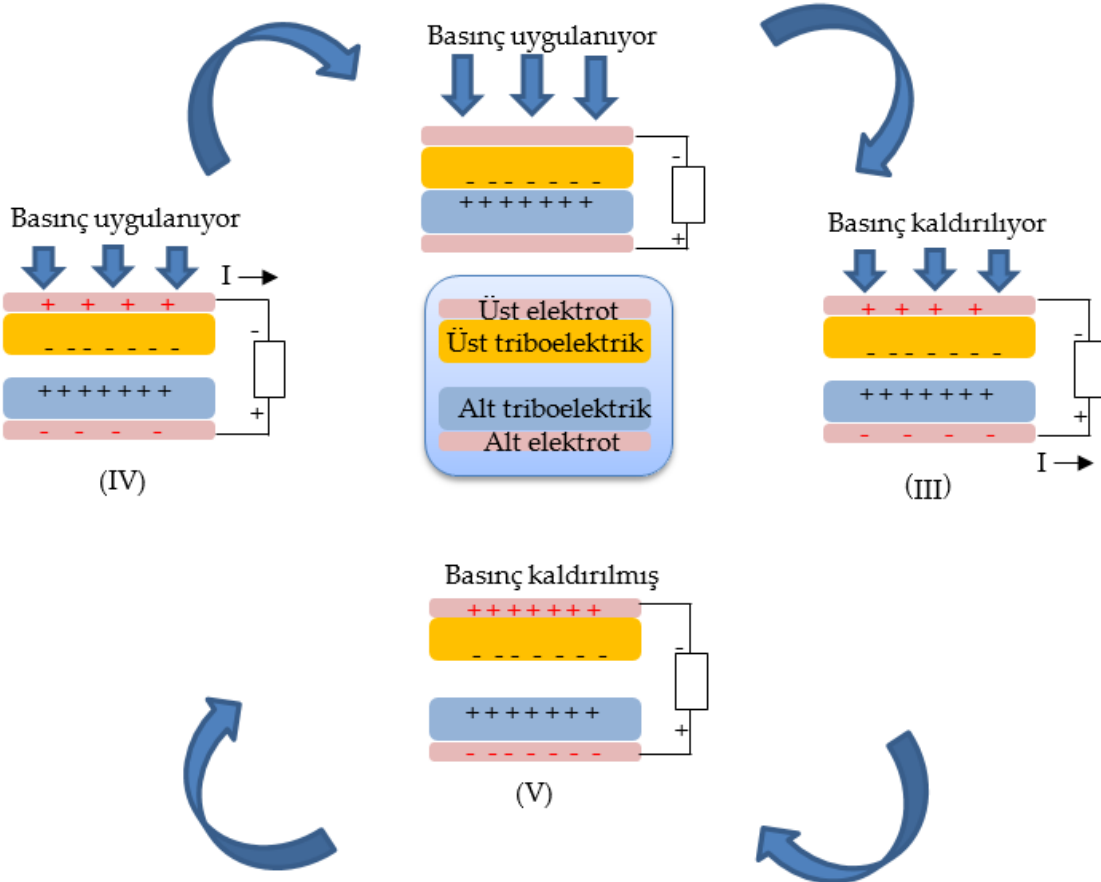
Dikey Temas-Ayrılma Modu (Vertical Contact Separation Mode)

Dikey temas-ayrılma modu, triboelektrik enerji hasatçılarının tasarlanan ilk formudur. 2012 yılında Prof. Wang ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2012; Zhu ve diğ., 2012). Elektrik akımı oluşturmak için Şekil 2’de gösterildiği gibi iki yüzeyin devirli biçimde temas ve ayrılma hareketi yapmasından yararlanır.



Şekil 1. Triboelektrik nanojeneratör çalışma modları: (a) dikey temas ayrılma, (b) düzlem içi kayma, (c) tek elektrot ve (d) serbest triboelektrik tabaka modları.

Figure 1. Working modes of triboelectric nanogenerators: (a) vertical contact separation, (b) in-plane sliding, (c) single-electrode (d) freestanding triboelectric layer modes.



Şekil 2. Dikey temas-ayrılma modunun çalışma prensibi.

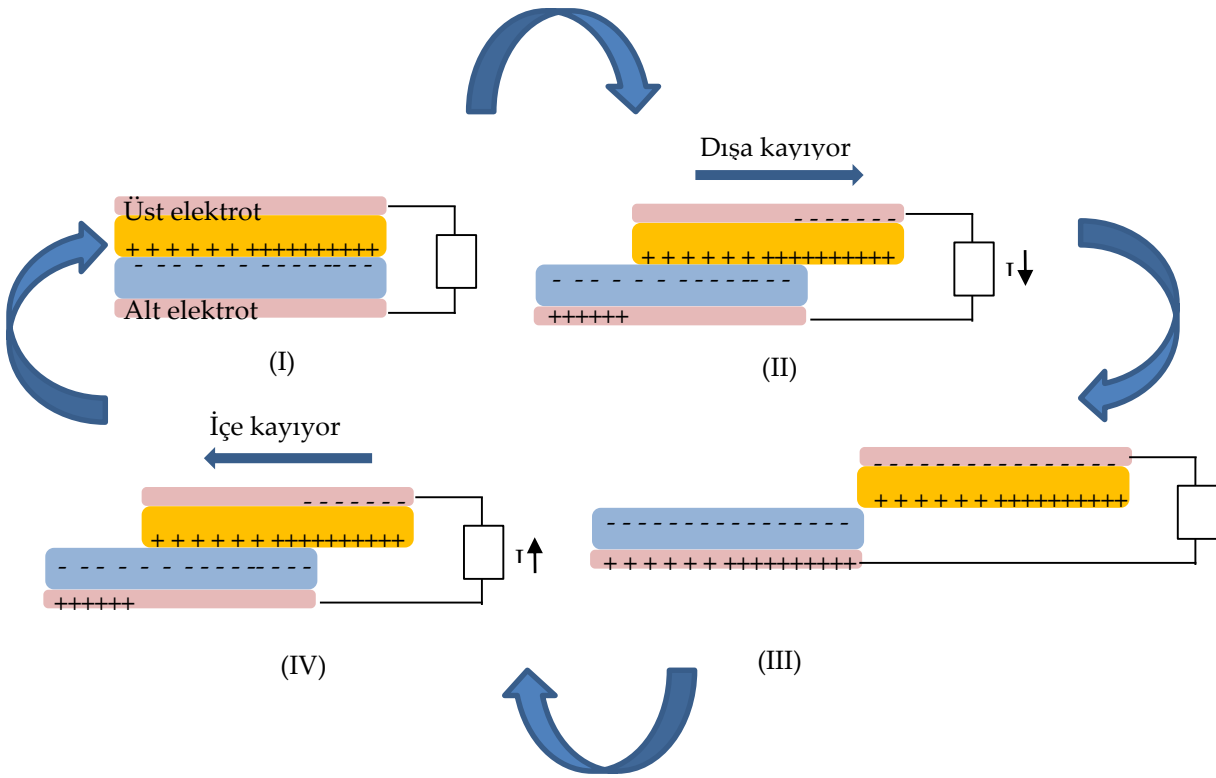
Figure 2. Working principle of vertical contact separation mode.

Bu modda, birbirine yakın biçimde yerleştirilen iki farklı dielektrik film, birbirinden uzak olan taraflarından ayrı elektrotlara bağlanmıştır. Dielektrik filmlere dikey doğrultuda tekrarlı temas ve ayrılma hareketi yaptırılır. Temas sırasında, elektron çekme kabiliyetlerindeki farklılıktan dolayı iki yüzeyde birbirine zıt elektrostatik yükler oluşur. Yüzeyler ayrıldığında uzak kısımlarından bağlı oldukları elektrotlarda serbest yüklerin oluşmasına neden olur. Bu serbest yükler, dielektrik yüzeylerin devirli temas-ayrılma hareketi devam ettikçe dış devrede akıma yol açacaktır (Pu et al., 2018). Dikkat edilmesi gereken husus, hareket eden yüklerin triboelektrik yüzeylerdeki elektrostatik yüklerin değil, bağlı buldukları elektrotlarda indüklenen yüklerdir. Bu durum, bu ve benzeri diğer modlar için de geçerlidir (Zhu, Peng, ve diğ., 2014). Wang ve ekibi, geliştirdikleri dikey temas ayrılma moduna göre çalışan triboelektrik nanojeneratörde dielektrik çifti olarak polimetil metakrilat (PMMA) and poliimid (Kapton) ve elektrot malzemesi olarak alüminyum kullanmıştır (Zhu ve diğ., 2012). 2013 yılında ayakkabı tabanına uyguladıkları dikey temas moduna göre çalışan triboelektrik nanojeneratörle, Wang ve ekibi, yürüyüş sırasında ayakkabıya ışıklandırma sağlamış ve cep telefonu şarj etmiştir (Zhu, Bai ve diğ., 2013).

Düzlem İçi Kaydırma Modu (In-Plane Sliding Mode)

Düzlem içi kaydırma modu, ilk olarak Prof. Wang ve ekibi tarafından 2013 yılında geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2013). Bu mekanizma, düzlemsel, disk rotasyon ve silindirik rotasyon hareketleri için kullanılabilir (Khalid ve diğ., 2019). Düzlem içi kaydırma hareketi, dikey temas ayrılma hareketine göre daha pratik ve kolaylık sağlayan bir hareket modudur (Wu ve diğ., 2018). Düzlem içi kaydırma modunda ilk triboelektrik hasatçı, Wang ve diğ. (2013) tarafından naylon ve politetrafloroetilen (PTFE) filmi gibi iki farklı yüzey arasındaki görece kayma hareketi kullanılarak sunulmuştur. Şekil 3, düzlem içi kaydırma modunun çalışma prensibini gösterir.

Başlangıçta, iki yüzey (teflon film ve naylon) tam temas sağlayacak biçimde üst üste durur. İki yüzeyin elektron çekme özellikleri arasında büyük farkın oluşturduğu triboelektriklenme nedeniyle naylon yüzeyde pozitif yükler belirirken, PTFE film de eşit miktarda negatif yük çeker. Yalıtkan malzemelerde biriken yükler başka yere akmadan yalnızca yüzeyler üzerinde yer alacaktır. Üst yüzey yana kaymaya başlayınca, yüzeylerin temas alanının azalmasıyla düzlemsel yük ayrılması meydana gelir. Yük ayrılması elektrik alanı oluşumuna yol açar. Üst elektrotta daha yüksek potansiyel oluşturularak, üst elektrottan alt elektrotta akım oluşmasına neden olur. Bu proses, iki yüzey birbiri üzerinden tamamen kayıncaya kadar devam eder. İdeal koşullarda elektrotlar ve triboelektrik yüzeyler arasındaki dikey uzaklık düzlemsel kayma uzaklığına nispeten ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve elektrotlara transfer olan yük miktarı, yüzeylerin kayması sırasında ayrılan yük miktarına eşittir. Benzer şekilde, üst yüzey geri hareket etmeye başlayınca, artan temas alanı ile birlikte ayrılmış yükler birbiri ile temas etmeye başlar ve iki yüzey tamamen üst üste gelinceye kadar alt elektrottan üst elektrotta akım oluşmaya başlar. Sonuçta, aygıt orijinal pozisyonuna geri döner ve elektrotlar üzerinde yük bırakmaz. Temas yüzeyleri yalıtkan olduğu için zıt yükler birbirini iptal edemez. Düzlem içi kaydırma modunda oluşan çıkış akımı, birbiri üzerinde kayan iki yüzeyin hızına bağlıdır (Zhang, Wang, 2018; Zhu, Peng ve diğ., 2014).

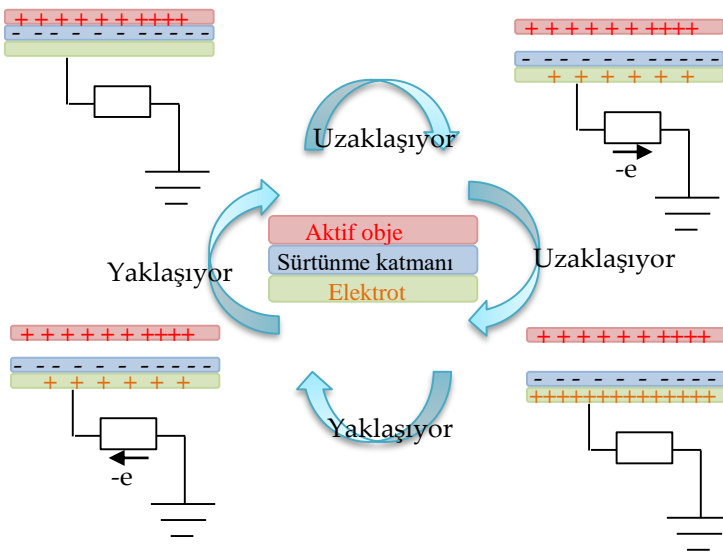


Şekil 3. Düzlem içi kaydırma modunun çalışma prensibi.

Figure 3. Working principle of in-plane sliding mode.

Tek Elektrotlu Mod (Single-Electrode Mode)

Tek elektrotlu mod, düzlem içi kaydırma modunun geliştirildiği yıl olan 2013 yılında Prof. Wang ve ekibi tarafından geliştirilmiştir (Yang ve diğ., 2013). Tek elektrotlu mod genelde bir topraklanmış elektrot, hareketli aktif eleman ve sürtünme tabakası içerir. Triboelektrik enerji hasatçıları için tek elektrotlu modun çalışma mekanizması Şekil 4'te gösterilmiştir.



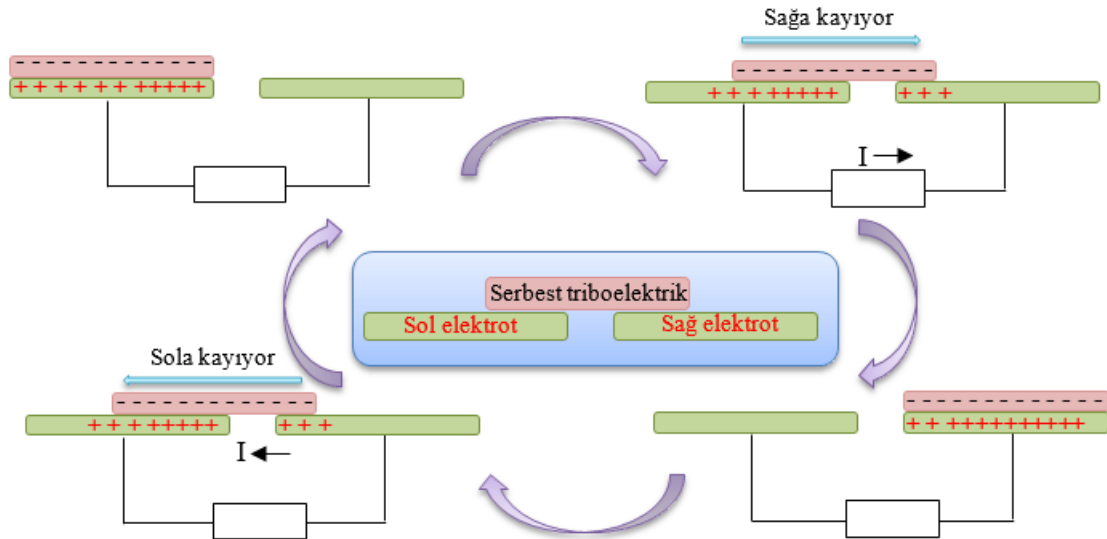
Şekil 4. Tek elektrotlu modun çalışma prensibi.

Figure 4. Working principle of single-electrode mode.

Başlangıçta; aktif eleman, arka kısmında elektrot bulunan sürtünme katmanı ile temas halindedir. Elektrostatik etki ile aktif elemanda pozitif yük, sürtünme yüzeyinde ise negatif yük belirir. Aktif parça, sürtünme tabakasından uzaklaşırken; elektrot, sürtünme yüzeyindeki yükün aksine pozitif yük alır. Bu da, toprak ve elektrot arasında potansiyel farkı oluşturarak elektrottan toprağa elektron akışına yol açar. Aktif elemanın yeterince uzak olduğu durumda, elektrotla sürtünme yüzeyi arasında elektriksel denge oluşur ve elektrik akımının durmasına neden olur. Benzer şekilde aktif tabaka, sürtünme yüzeyine doğru geri hareket ettiğinde toprakla elektrot arasında oluşan potansiyel farkı ile elektronlar bu sefer aksi yöne yani topraktan elektrotta akar. Böylece, toprak ve aktif elemanın devrimsel temas ve ayrılma hareketi dış devre üzerinde yük akımı oluşmasına neden olur (Khalid ve diğ., 2019; Ning ve diğ., 2018). 2013 tarihli çalışmalarında Wang ve ekibi, aktif obje olarak insan teni, sürtünme yüzeyi olarak polidimetilsiloksan (PDMS) tabaka, elektrot olarak da indiyum kalay oksit (ITO) kullandıkları tek elektrotlu triboelektrik nanojeneratörü dokunmaya duyarlı yüzeylerde kullanılmak üzere geliştirmişlerdir (Yang ve diğ., 2013).

Serbest Triboelektrik Tabaka Modu (Freestanding triboelectric layer mode)

Serbest triboelektrik tabaka modu, ilk olarak Wang ve diğ. tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Wang ve diğ., 2014). Bu mod, farklı konfigürasyonlar kullanılarak uygulanabilmektedir. Şekil 5'te serbest triboelektrik tabaka modunun bir konfigürasyonu gösterilmiştir. Burada, iki sabit metal elektrot ve serbest hareket eden bir triboelektrik tabaka mevcuttur.



Şekil 5. Serbest triboelektrik tabaka modunun çalışma mekanizması.

Figure 5. Working principle of freestanding triboelectric layer mode.

Triboelektrik tabaka, aynı düzlemde yer alan iki elektrotun üzerinde yine aynı düzlemde ileri geri kayma hareketi yapar. Her iki elektrot, kayan tabaka tarafından değişen oranda triboelektrik yüke maruz kalır. Bu değişken yük, elektrostatik indüksiyon etkisi ile elektrotlarda farklı miktarda yüklenmeye ve bu durum da elektrotlar arası elektrik akımının oluşmasına neden olur (Wang ve diğ., 2014).

Anlatılan dört çalışma modunun birbirine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin dikey temas ayrılma modunda nanojeneratörü oluşturan malzemelerin düzlemi ile hareket düzlemi birbirinden farklı iken; düzlem içi kaydırma modunda hareket, malzeme ile aynı düzlemde bulunur. Dikey temas ayrılma modunda, serbest durumda, triboelektrik yüzeylerin birbirinden belirli bir uzaklıkta kalmasının sağlanması gerekir. Wang ve ekibi, 2013 tarihli çalışmalarında bu mesafeyi dört yay yardımı ile sağlamıştır (Zhu, Lin, ve diğ., 2013). Tek elektrotlu modda, yalnızca bir elektrotun kullanımı yeterli iken bunun topraklanması gerekliliği bulunmaktadır. Serbest triboelektrik tabaka modu, düzlem içi kaydırma modu gibi malzeme düzleminde hareket eder. Serbest triboelektrik modunda tabakalara triboelektrik/elektrot malzemeleri ızgara biçiminde kesikli yerleştirilir. Bu şekilde, kayma hareketi düzlemsel kayma modu ile

aynı olsa da etkili frekans yüksek olur. Her bir kesikli triboelektrik/elektrot paneli bağımsız bir triboelektrik nanojeneratör gibi davranır. Düzlem içi kayma metodunda olduğu gibi iki tabakanın birbiri üzerinden tamamen kayması gerekmez, ızgara deseninin bir birimi kadar kayma yeterli olur (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Dikey temas ayrılma modunda ise performansın artırılması için, çok katlı yapı kullanılabilir (C. Wu et al., 2018; Zhu, Bai ve diğ., 2013).

Bahsedilen modlar birbiri ile karşılaştırılırken dikkat edilmesi gerek diğer bir husus ise her bir modun kendine uygun kullanım alanlarının bulunmasıdır. Örneğin, dikey temas ayrılma modu, basınç ve/veya darbe kuvveti etkisi ile çalışır (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Buna uygun biçimde ayakkabı tabanına veya yer karosuna (Zhu, Lin ve diğ., 2013) uygulanabilir. Düzlem içi kaydırma modunda ise iki yüzeyin birbiri üzerinden kayma hareketi söz konusudur. Dolayısıyla, düzlem içi kaydırma modundan, kol içi-gövde kısımlarında (Pu ve diğ., 2016), cep telefonu tablet ekran kaydırma, yüzey silme (Wu ve diğ., 2018) uygulamalarında yararlanabilir. Literatürdeki çalışmalarda, tek elektrotlu moda göre çalışan triboelektrik nanojeneratörler, genelde dikey temas ayrılma moduna benzer hareket gösterirken (Wang ve diğ., 2013), serbest triboelektrik tabakalı modda, düzlem içi kaydırma moduna benzer düzlemsel kayma hareketi gözlemlenir (Zhu, Chen, Zhang, Jing ve Wang, 2014).

Prof. Kim ve ekibi 2018 yılında yayımladıkları çalışmalarında geliştirdikleri nanojeneratörü farklı modlarda çalıştırmış; aynı düzenek ile dikey temas modunda daha yüksek gerilime ulaşırken, düzlem içi kaydırma modunun daha pratik uygulanabileceğini rapor etmişlerdir (Wu ve diğ., 2018). Farklı çalışma modlarında faaliyet gösteren triboelektrik nanojeneratörler, Çizelge 2'de listelenmiş, değişik enerji hasatçıları ile karşılaştırılmıştır.

TRİBOELEKTRİK NANOJENERATÖRLERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER (MATERIALS USED IN PRODUCTION OF TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS)

Triboelektrik nanojeneratörlerin üretiminde malzeme seçimi çok önemlidir (Shi ve diğ., 2019). Elektriksel özelliklerinin yanında; hafiflik, esneklik, dayanıklılık, biyo-uyumluluk ve ince tabaka oluşturabilme gibi pek çok kistasın sağlanması gerekir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Triboelektrik nanojeneratörler, genel olarak dielektrik malzeme ve elektrotlardan oluşmaktadır.

Triboelektrik nanojeneratörlerde dielektrik olarak farklı malzemeler kullanılmıştır. Triboelektrik malzeme çifti triboelektrik seride birbirinden uzak malzemelerden seçilmelidir. Pozitif yüklenen malzeme olarak polyamid ve metaller, negatif yüklenen malzemeler olarak PTFE, PVDF ve FEP (florlu etilen propilen) kullanılabilir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Bunlar dışında polidimetilsiloksan (PDMS), ticari olarak kolay tedarik edilebilirliği ve sınanmış özellikleri sayesinde birçok giyilebilir aygıtta olduğu gibi triboelektrik nanojeneratörlerde de dielektrik malzeme ve substrat olarak kullanım bulmuştur (Dong ve diğ., 2017; Seung ve diğ., 2015; Song ve diğ., 2019; Yang ve diğ., 2013). Benzer şekilde, polietilen teraftalat (PET) (polyester) (Dong ve diğ., 2017; Fan ve diğ., 2012; Pu ve diğ., 2015; Zhou ve diğ., 2014), politetrafloroetilen (PTFE) (Ning ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2013; Xia ve diğ., 2019; Zhong ve diğ., 2014), poliüretan (CITE), polivinilidenflorür (PVDF) (Huang ve diğ., 2014), poliimid (Kapton) (Bai ve diğ., 2013; Fan ve diğ., 2012; Wang ve diğ., 2012; Zhu ve diğ., 2012), naylon (S. Wang ve diğ., 2013; Zhou ve diğ., 2014), polimetil metakrilat (PMMA) (Zhu ve diğ., 2012), polivinilklorür (PVC) (Wu ve diğ., 2018), parilen (Pu ve diğ., 2015, 2016), pamuk (Zhong ve diğ., 2014),- ve kâğıt da (Wu ve diğ., 2018) dielektrik serilerdeki konumlarına göre kullanım bulan malzemeler arasında gelmektedir.

Triboelektrik nanojeneratörlerde elektrot olarak yine farklı iletken malzemeler kullanılmıştır. Örnek olarak, metaller (alüminyum (Bai ve diğ., 2013; Wang ve diğ., 2014), bakır (Song ve diğ., 2019)), nikel (Pu ve diğ., 2015, 2016), gümüş (Seung ve diğ., 2015; Wu ve diğ., 2018; Zhou ve diğ., 2014), altın (Fan ve diğ., 2012) paslanmaz çelik (Dong ve diğ., 2017), indiyum kalay oksit (ITO) (Yang ve diğ., 2013)), karbon nanotüp (Zhong ve diğ., 2014) ve grafen (Chung ve diğ., 2018) verilebilir. Dikkat edilmelidir ki; anılan malzemeler, elektrot olarak kullanılabilirlikleri gibi, elektrik triboelektrik serideki konumlarına göre triboelektrik malzeme olarak da kullanım bulabilmektedir (Zhu, Peng ve diğ., 2014). Çizelge 2, enerji hasatçı üretiminde kullanılan malzemeleri listelemektedir.

Çizelge 2. Bazı enerji hasatçıların; enerji hasat teknolojisi, güç, gerilim, kullanılan malzeme, uygulama alanı ve çalışma modu açısından karşılaştırılması

Table 1. Comparison of various energy harvesters in terms of energy harvesting technology, power, voltage, utilized materials, application areas and working modes

Enerji hasat prensibi	Güç çıktısı (mW)	Açık devre gerilimi (V)	Kullanılan malzeme	Uygulama alanı	Çalışma modu-Referans
Fotovoltaik	-	2,0-10,5	Silikon fotovoltaik modüller	Sırt çantası	-(Veligorskyi ve diğ., 2018)
	16	4	SP3-12 fotovotaik panel	Bilek bandı	-(Jokic ve Magno, 2017)
Termoelektrik	11,14 mW/cm ²	0,52	Bi ₂ Te ₃ , PET, Bi,Te,Sb, Se alaşımları, Nikel kaplama	İnsan teni	-(Feng ve diğ., 2019)
	-	55,2 μ V	Karbon nanotüp, pamuk	İnsan teni	-(Islam ve diğ., 2019)
Elektromanyetik	1,15	0,24	Neodyum-demir-bor mıknatısları, bakır yay, akrilik tüp, sargı teli	Kol ve bacak	-(Fan ve diğ., 2019a)
	1,09- 2,58	0,5	Neodyum-demir-bor mıknatısları, reçine tüp, sargı teli	Kol	-(Fan ve diğ., 2019b)
	0,5-2,28	0,3-0,5	Sabit mıknatıs, alüminyum hazne, emaye sargı teli, elastik ip	Ayakkabı	-(Wu ve diğ., 2017)
	2,48-2,81	1,15-1,9	Neodyum-demir-bor mıknatısları, yumuşak demir, bakır sargı	Kol saati	-(Halim ve diğ., 2016)
	0,284	2,5	Neodyum-demir-bor mıknatısları, PTFE, bakır sargı, paslanmaz çelik bağlantı, vidalar, somunlar	Arka cep	-(Dai ve Liu, 2014)
	-	1,4	Neodyum-demir-bor mıknatısları, NiZn ferrit bobin göbeği, bakır bobin	Diz protezi	-(Luciano ve diğ., 2014)
Piezoelektrik	12-60	6-27	PZT tabaka, gümüş elektrot, alüminyum çerçeve	Ayakkabı topuğu	-(Qian ve diğ., 2018)
	0,0002	0,7	Alüminyum nitür film, molibden film, poliimid folyo, PDMS, silikon	İnsan teni	-(Guido ve diğ., 2016)
	0,1-1,7	10-60	Alüminyum kiriş, M2814-P2, neodyum mıknatıs	Kol ve bacak	-(Izadgoshasb ve diğ., 2019)
Triboelektrik	31,2 mW/cm ³	110	Triboelektrik: poliimid, PMMA Elektrot: alüminyum	-	Dikey temas ayrılma modu (Zhu ve diğ., 2012)
	128 mW/cm ³	230	Triboelektrik: poliimid, PDMS Elektrot: alüminyum	-	Dikey temas ayrılma modu (Wang ve diğ., 2012)
	31,3 mW/cm ²	1200	Triboelektrik: PDMS, Substrat: PMMA Elektrot: altın tabaka	Ayakkabı tabanı, yer	Dikey temas ayrılma modu (Zhu, Lin ve diğ., 2013)
	9,8 mW/cm ²	215	Triboelektrik: PTFE, alüminyum Substrat: poliimid Elektrot: alüminyum	Ayakkabı iç tabanı	Dikey temas ayrılma modu (Bai ve diğ., 2013)
	-	220	Triboelektrik: PTFE, alüminyum Elektrot: alüminyum Substrat: poliimid	Ayakkabı tabanı içi	Dikey temas ayrılma modu (Zhu, Bai ve diğ., 2013)
	2,1	210	Triboelektrik: PVDF Elektrot: İletken kumaş	Ayakkabı tabanı	Dikey temas ayrılma modu (Huang ve diğ., 2014)
	1,1	120-170	Triboelektrik: Gümüş kaplı tekstil, PDMS kaplı tekstil, ZnO Elektrot: gümüş kaplı tekstil	Giysi kolu	Dikey temas ayrılma modu (Seung ve diğ., 2015)
	-	17- 100	Triboelektrik: Kâğıt peçete, PVC	Peçete	Dikey temas modu (Wu ve diğ., 2018)

4,67	392	Elektrot:gümüş nanotel Triboelektrik: PTFE, kağıt, karton Elektrot: iletken mürekkep	İnsan parmağı	Dikey temas ayrılma (Xia ve diğ., 2019)
5,3 mW/cm ²	<1300	Triboelektrik: naylon 6,6; PTFE Elektrot: metal	-	Düzlem içi kaydırma modu (Wang ve diğ., 2013)
-	5-19	Triboelektrik: Kağıt peçete, PVC Elektrot: gümüş nanotel	Peçete	Düzlem içi kaydırma modu (Wu ve diğ., 2018)
0,05 mW/cm ²	1000	Triboelektrik: insan teni, PDMS Elektrot: ITO	Dokunmatik yüzey	Tek elektrotlu mod – (Yang ve diğ., 2013)
19 mW/cm ²	850	Triboelektrik: Bakır Elektrot: altın- florlu etilen propilen (FEP)	El	Serbest triboelektrik tabaka modu (Zhu, Chen ve diğ., 2014)
0,32 mW/cm ²		Triboelektrik: Parilen Elektrot: nikel	Kol altı	Serbest triboelektrik mod (Pu ve diğ., 2016)
0,026 mW/cm ²	-	Triboelektrik: PDMS Elektrot: paslanmaz çelik- polyester iplik	Dans matı	Tek elektrotlu mod (Dong ve diğ., 2017)
-	1050	Triboelektrik: PTFE Elektrot: bakır	Kumaş	Tek elektrotlu mod (Ning ve diğ., 2018)
0,3	305	Triboelektrik: poliimid, bakır Elektrot: bakır	Bilek bandı	Serbest triboelektrik mod (Song ve diğ., 2019)

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada çevrede mevcut enerjileri elektrik enerjisine dönüştürebilen enerji hasatçıları genel olarak gözden geçirilmiş, bunlar arasında yüksek güç çıkışları, nanoteknoloji ile uyumları ve giyilebilir aygıtlara eklenebilmeleri açısından öne çıkan triboelektrik nanojeneratörler incelenmiştir. Triboelektrik nanojeneratörler; teorik temelleri, çalışma modları ve kullanılan malzemeler açısından açıklanmış, bu konuda literatürde yer alan bazı çalışmalar irdelenmiştir.

Triboelektrik nanojeneratörler; hafif ve minyatürize olmaları, estetik ve konfor özellikleri olumsuz yönde etkilememeleri, geniş malzeme yelpazesine sahip olmaları gibi pek çok olumlu özellik gösterirler. Diğer enerji hasat biçimlerine göre çok daha genç bir enerji elde etme teknolojisi olan triboelektrik enerji hasadının; biyoyuumluluk, dayanıklılık, kullanım kolaylığı ve enerji üretim performanslarında meydana gelmesi beklenen iyileşmelerle yakın gelecekte toplum hayatı üzerinde daha yaygın etkiye sahip olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmed, A., Hassan, I., El-Kady, M. F., Radhi, A., Jeong, C. K., Selvaganapathy, P. R., ... Kaner, R. B. (2019). Integrated Triboelectric Nanogenerators in the Era of the Internet of Things. *Advanced Science*, 6(24), 1802230. <https://doi.org/10.1002/advs.201802230>
- Bai, P., Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Chen, J., Zhang, G., ... Wang, Z. L. (2013). Integrated multilayered triboelectric nanogenerator for harvesting biomechanical energy from human motions. *ACS Nano*, 7(4), 3713–3719. <https://doi.org/10.1021/nn4007708>
- Baker, R. R., Dowdall, M. J., & Whittaker, V. P. (1975). The involvement of lysophosphoglycerides in neuro-transmitter release; The composition and turnover of phospholipids of synaptic vesicles of guinea-pig cerebral cortex and torpedo electric organ and the effect of stimulation. *Brain Research*, 100(3), 629–644. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(75\)90162-6](https://doi.org/10.1016/0006-8993(75)90162-6)
- Choi, J., Jung, I., & Kang, C. Y. (2019). A brief review of sound energy harvesting. *Nano Energy*, 56, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.036>

- Choi, S., Kwon, S., Kim, H., Kim, W., Kwon, J. H., Lim, M. S., ... Choi, K. C. (2017). Highly Flexible and Efficient Fabric-Based Organic Light-Emitting Devices for Clothing-Shaped Wearable Displays. *Scientific Reports*, 7(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06733-8>
- Chung, I. J., Kim, W., Jang, W., Park, H. W., Sohn, A., Chung, K. B., ... Park, Y. T. (2018). Layer-by-layer assembled graphene multilayers on multidimensional surfaces for highly durable, scalable, and wearable triboelectric nanogenerators. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(7), 3108–3115. <https://doi.org/10.1039/c7ta09876f>
- Crosby, A. J., & Lee, J. (2007). Polymer Nanocomposites: The “Nano” Effect on Mechanical Properties. *Polymer Reviews*, 47(2), 217–229. <https://doi.org/10.1080/15583720701271278>
- Dai, D., & Liu, J. (2014). Hip-mounted electromagnetic generator to harvest energy from human motion. *Frontiers in Energy*, 8(2), 173–181. <https://doi.org/10.1007/s11708-014-0301-2>
- Dong, K., Deng, J., Zi, Y., Wang, Y. C., Xu, C., Zou, H., ... Wang, Z. L. (2017). 3D Orthogonal Woven Triboelectric Nanogenerator for Effective Biomechanical Energy Harvesting and as Self-Powered Active Motion Sensors. *Advanced Materials*, 29(38). <https://doi.org/10.1002/adma.201702648>
- Fan, F. R., Tian, Z. Q., & Lin Wang, Z. (2012). Flexible triboelectric generator. *Nano Energy*, 1(2), 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.01.004>
- Fan, K., Cai, M., Liu, H., & Zhang, Y. (2019). Capturing energy from ultra-low frequency vibrations and human motion through a monostable electromagnetic energy harvester. *Energy*, 169, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.053>
- Fan, K., Zhang, Y., Liu, H., Cai, M., & Tan, Q. (2019). A nonlinear two-degree-of-freedom electromagnetic energy harvester for ultra-low frequency vibrations and human body motions. *Renewable Energy*, 138, 292–302. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.105>
- Feng, R., Tang, F., Zhang, N., & Wang, X. (2019). Flexible, High-Power Density, Wearable Thermoelectric Nanogenerator and Self-Powered Temperature Sensor. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(42), 38616–38624. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b11435>
- Gashti, M. P., Alimohammadi, F., Song, G., & Kiumarsi, A. (2012). Characterization of nanocomposite coatings on textiles : a brief review on Microscopic technology. *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, 1424–1437.
- Guido, F., Quattieri, A., Algieri, L., Lemma, E. D., De Vittorio, M., & Todaro, M. T. (2016). AlN-based flexible piezoelectric skin for energy harvesting from human motion. *Microelectronic Engineering*, 159, 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.03.041>
- Guo, S. (2010). *The Eigen Theory of Waves in Piezoelectric Solids*. IntechOpen. Retrieved from www.intechopen.com
- Halim, M. A., Cho, H., Salauddin, M., & Park, J. Y. (2016). A miniaturized electromagnetic vibration energy harvester using flux-guided magnet stacks for human-body-induced motion. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 249, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.08.008>
- Hashemi, S. A., Ramakrishna, S., & Aberle, A. G. (2020). Recent progress in flexible–wearable solar cells for self-powered electronic devices. *Energy & Environmental Science*, 13(3), 685–743.
- Huang, T., Wang, C., Yu, H., Wang, H., Zhang, Q., & Zhu, M. (2014). Human walking-driven wearable all-fiber triboelectric nanogenerator containing electrospun polyvinylidene fluoride piezoelectric nanofibers. *Nano Energy*, 14, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2015.01.038>
- Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223–2253. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7)
- Hyland, M., Hunter, H., Liu, J., Veety, E., & Vashaee, D. (2016). Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting. *Applied Energy*, 182, 518–524. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.150>
- Islam, F., Zubair, A., & Fairuz, N. (2019). Wearable Thermoelectric Nanogenerator Based on Carbon Nanotube for Energy Harvesting. In *2019 IEEE Student Conference on Research and Development, SCOReD 2019* (pp. 253–258). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- <https://doi.org/10.1109/SCORED.2019.8896333>
- Izadgoshasb, I., Lim, Y. Y., Tang, L., Padilla, R. V., Tang, Z. S., & Sedighi, M. (2019). Improving efficiency of piezoelectric based energy harvesting from human motions using double pendulum system. *Energy Conversion and Management*, 184, 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.001>
- Jeong, E. G., Jeon, Y., Cho, S. H., & Choi, K. C. (2019). Textile-based washable polymer solar cells for optoelectronic modules: Toward self-powered smart clothing. *Energy and Environmental Science*, 12(6), 1878–1889. <https://doi.org/10.1039/c8ee03271h>
- Jokic, P., & Magno, M. (2017). Powering smart wearable systems with flexible solar energy harvesting. In *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2017.8050615>
- Jondral, F. K. (2008). From Maxwell's equations to cognitive radio. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, CrownCom 2008*. <https://doi.org/10.1109/CROWNCOM.2008.4562458>
- Joshi, M., Bhattacharyya, A., & Ali, S. W. (2008). Characterization techniques for nanotechnology applications in textiles. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 33(3), 304–317.
- Jung, W. S., Kang, M. G., Moon, H. G., Baek, S. H., Yoon, S. J., Wang, Z. L., ... Kang, C. Y. (2015). High Output Piezo/Triboelectric Hybrid Generator. *Scientific Reports*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep09309>
- Khalid, S., Raouf, I., Khan, A., Kim, N., & Kim, H. S. (2019). A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00144-y>
- Khushboo, & Azad, P. (2017). Triboelectric nanogenerator based on vertical contact separation mode for energy harvesting. In *Proceeding - IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2017 (Vol. 2017-Janua, pp. 1499–1502)*. Greater Noida, India: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2017.8230037>
- Kim, H., Kwon, S., Choi, S., & Choi, K. C. (2015). Solution-processed bottom-emitting polymer light-emitting diodes on a textile substrate towards a wearable display. *Journal of Information Display*, 16(4), 179–184. <https://doi.org/10.1080/15980316.2015.1091391>
- Kim, Y. K., Wang, H., & Mahmud, M. S. (2016). Wearable body sensor network for health care applications. In *Smart Textiles and Their Applications* (pp. 161–184). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00009-6>
- Komolafe, A., Torah, R., Nunes-Matos, H., Tudor, M., & Beeby, S. (2019). Integration of temperature sensors in fabrics. In *FLEPS 2019 - IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems, Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/FLEPS.2019.8792294>
- Lancos, L., Thronickle, W., & Ristol, S. (2017). Smart fabrics white paper. Retrieved March 3, 2020, from <https://atos.net/wp-content/uploads/2018/01/atos-smartfabric-white-paper-1.pdf>
- Li, K., He, Q., Wang, J., Zhou, Z., & Li, X. (2018). Wearable energy harvesters generating electricity from low-frequency human limb movement. *Microsystems and Nanoengineering*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41378-018-0024-3>
- Lin, Z., Chen, J., & Yang, J. (2016). Recent Progress in Triboelectric Nanogenerators as a Renewable and Sustainable Power Source. *Journal of Nanomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2016/5651613>
- Luciano, V., Sardini, E., Serpelloni, M., & Baronio, G. (2014). An energy harvesting converter to power sensorized total human knee prosthesis. *Measurement Science and Technology*, 25(2), 025702. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/2/025702>
- Mavroidis, C., & Ferreira, A. (2013). Nanorobotics: Past, present, and future. In *Nanorobotics: Current Approaches and Techniques* (pp. 3–27). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2119-1_1
- Maxwell, J. C. (1861a). XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and*

- Journal of Science*, 21(139), 281–291, 838–849. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786446108643033>
- Maxwell, J. C. (1861b). XXV. On physical lines of force, PART I--The Theory of Molecular Vortices applied to Magnetic Phenomena. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 21(139), 12–24. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786446108643033>
- Maxwell, J. C. (2010). On physical lines of force. *Philosophical Magazine*, 90(SUPPL.1), 11–23. <https://doi.org/10.1080/14786431003659180>
- Miller, K. (2011). Triboelectric series. Retrieved April 3, 2020, from http://soft-matter.seas.harvard.edu/index.php/Triboelectric_series
- Misra, S., & Bera, S. (2018). Introduction to Smart Grid. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart Grid Technology* (1st ed., pp. 3–17). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener. <https://doi.org/10.1017/9781108566506.003>
- Miyata, T., Uragami, T., & Nakamae, K. (2002). Biomolecule-sensitive hydrogels. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 54(1), 79–98. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(01\)00241-1](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(01)00241-1)
- Nie, S., Guo, H., Lu, Y., Zhuo, J., Mo, J., & Wang, Z. L. (2020). Superhydrophobic Cellulose Paper-Based Triboelectric Nanogenerator for Water Drop Energy Harvesting. *Advanced Materials Technologies*, 2000454. <https://doi.org/10.1002/admt.202000454>
- Ning, C., Tian, L., Zhao, X., Xiang, S., Tang, Y., Liang, E., & Mao, Y. (2018). Washable textile-structured single-electrode triboelectric nanogenerator for self-powered wearable electronics. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(39), 19143–19150. <https://doi.org/10.1039/c8ta07784c>
- Pan, S., & Zhang, Z. (2019). Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction*. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>
- Pizarro, F., Villavicencio, P., Yunge, D., Rodríguez, M., Hermosilla, G., & Leiva, A. (2018). Easy-to-build textile pressure sensor. *Sensors (Switzerland)*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/s18041190>
- Pu, X., Hu, W., & Wang, Z. L. (2018). Nanogenerators for smart textiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart textiles: wearable nanotechnology* (1st ed., pp. 177–210). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener.
- Pu, X., Li, L., Song, H., Du, C., Zhao, Z., Jiang, C., ... Wang, Z. L. (2015). A self-charging power unit by integration of a textile triboelectric nanogenerator and a flexible lithium-ion battery for wearable electronics. *Advanced Materials*, 27(15), 2472–2478. <https://doi.org/10.1002/adma.201500311>
- Pu, X., Song, W., Liu, M., Sun, C., Du, C., Jiang, C., ... Wang, Z. L. (2016). Wearable Power-Textiles by Integrating Fabric Triboelectric Nanogenerators and Fiber-Shaped Dye-Sensitized Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 6(20). <https://doi.org/10.1002/aenm.201601048>
- Qian, F., Xu, T. B., & Zuo, L. (2018). Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester. *Energy Conversion and Management*, 171, 1352–1364. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.069>
- Rajdi, N. N. Z. M., Bakir, A. A., Saleh, S. M., & Wicaksono, D. H. B. (2012). Textile-based Micro Electro Mechanical System (MEMS) accelerometer for pelvic tilt measurement. In *Procedia Engineering* (Vol. 41, pp. 532–537). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.208>
- Schwinger, J., DeRaad, L. L., Milton, K. A., & Tsai, W. (2019). *Classical Electrodynamics. Classical Electrodynamics* (3rd ed.). New York: Wiley. <https://doi.org/10.1201/9780429503542>
- Scott, A. W. (2005). *Understanding Microwaves*. New York: Wiley.
- Sengupta, D. L., & Sarkar, T. K. (2003). Maxwell, Hertz, the Maxwellians, and the early history of electromagnetic waves. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45(2), 13–19. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1203114>
- Seung, W., Gupta, M. K., Lee, K. Y., Shin, K. S., Lee, J. H., Kim, T. Y., ... Kim, S. W. (2015). Nanopatterned textile-based wearable triboelectric nanogenerator. *ACS Nano*, 9(4), 3501–3509. <https://doi.org/10.1021/nn507221f>
- Shi, Q., He, T., & Lee, C. (2019). More than energy harvesting – Combining triboelectric nanogenerator and flexible electronics technology for enabling novel micro-/nano-systems. *Nano Energy*, 57, 851–871. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.002>

- Song, Y., Wang, H., Cheng, X., Li, G., Chen, X., Chen, H., ... Zhang, H. (2019). High-efficiency self-charging smart bracelet for portable electronics. *Nano Energy*, *55*, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.045>
- Tao, X., & Koncar, V. (2016). Textile electronic circuits based on organic fibrous transistors. In *Smart Textiles and Their Applications* (pp. 569–598). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00025-4>
- Veligorskiy, O., Khomenko, M., Chakirov, R., & Vagapov, Y. (2018). Performance analysis of a wearable photovoltaic system. In *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems, IESES 2018* (Vol. 2018-January, pp. 376–381). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IESES.2018.8349905>
- Wang, S., Lin, L., & Wang, Z. L. (2012). Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics. *Nano Letters*, *12*(12), 6339–6346. <https://doi.org/10.1021/nl303573d>
- Wang, S., Lin, L., Xie, Y., Jing, Q., Niu, S., & Wang, Z. L. (2013). Sliding-triboelectric nanogenerators based on in-plane charge-separation mechanism. *Nano Letters*, *13*(5), 2226–2233. <https://doi.org/10.1021/nl400738p>
- Wang, S., Xie, Y., Niu, S., Lin, L., & Wang, Z. L. (2014). Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes. *Advanced Materials*, *26*(18), 2818–2824. <https://doi.org/10.1002/adma.201305303>
- Wang, Z. L. (2017). Catch wave power in floating nets. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/542159a>
- Wu, C., Kima, T. W., Sung, S., Park, J. H., & Li, F. (2018). Ultrasoft and cuttable paper-based triboelectric nanogenerators for mechanical energy harvesting. *Nano Energy*, *44*, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.11.080>
- Wu, S., Luk, P. C. K., Li, C., Zhao, X., Jiao, Z., & Shang, Y. (2017). An electromagnetic wearable 3-DoF resonance human body motion energy harvester using ferrofluid as a lubricant. *Applied Energy*, *197*, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.006>
- Xia, K., Zhu, Z., Zhang, H., Du, C., Fu, J., & Xu, Z. (2019). Milk-based triboelectric nanogenerator on paper for harvesting energy from human body motion. *Nano Energy*, *56*, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.071>
- Yang, Y., Zhang, H., Lin, Z. H., Zhou, Y. S., Jing, Q., Su, Y., ... Wang, Z. L. (2013). Human skin based triboelectric nanogenerators for harvesting biomechanical energy and as self-powered active tactile sensor system. *ACS Nano*, *7*(10), 9213–9222. <https://doi.org/10.1021/nn403838y>
- Yilmaz, N. D. (2018a). Introduction to Smart Nanotextiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart textiles: wearable nanotechnology* (pp. 3–38). Beverly, MA: Wiley Scrivener.
- Yilmaz, N. D. (2018b). Nanocomposites for Smart Textiles. In N. D. Yilmaz (Ed.), *Smart Textiles* (1st ed., pp. 211–245). Hoboken, MA, USA: Wiley Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119460367.ch7>
- Yin, D., Chen, Z. Y., Jiang, N. R., Liu, Y. F., Bi, Y. G., Zhang, X. L., ... Sun, H. B. (2020). Highly transparent and flexible fabric-based organic light emitting devices for unnoticeable wearable displays. *Organic Electronics*, *76*, 105494. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105494>
- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., & Tao, X.-M. (2014). Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Advanced Materials*, *26*(31), 5310–5336.
- Zhang, C., & Wang, Z. L. (2018). *Triboelectric Nanogenerators* (pp. 1335–1376). Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5945-2_38
- Zhong, J., Zhang, Y., Zhong, Q., Hu, Q., Hu, B., Wang, Z. L., & Zhou, J. (2014). Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication. *ACS Nano*, *8*(6), 6273–6280. <https://doi.org/10.1021/nn501732z>
- Zhou, T., Zhang, C., Han, C. B., Fan, F. R., Tang, W., & Wang, Z. L. (2014). Woven structured triboelectric nanogenerator for wearable devices. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *6*(16), 14695–14701. <https://doi.org/10.1021/am504110u>
- Zhu, G., Bai, P., Chen, J., & Lin Wang, Z. (2013). Power-generating shoe insole based on triboelectric

- nanogenerators for self-powered consumer electronics. *Nano Energy*, 2(5), 688–692.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2013.08.002>
- Zhu, G., Chen, J., Zhang, T., Jing, Q., & Wang, Z. L. (2014). Radial-arrayed rotary electrification for high performance triboelectric generator. *Nature Communications*, 5(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1038/ncomms4426>
- Zhu, G., Lin, Z. H., Jing, Q., Bai, P., Pan, C., Yang, Y., ... Wang, Z. L. (2013). Toward large-scale energy harvesting by a nanoparticle-enhanced triboelectric nanogenerator. *Nano Letters*, 13(2), 847–853.
<https://doi.org/10.1021/nl4001053>
- Zhu, G., Pan, C., Guo, W., Chen, C. Y., Zhou, Y., Yu, R., & Wang, Z. L. (2012). Triboelectric-generator-driven pulse electrodeposition for micropatterning. *Nano Letters*, 12(9), 4960–4965.
<https://doi.org/10.1021/nl302560k>
- Zhu, G., Peng, B., Chen, J., Jing, Q., & Lin Wang, Z. (2014). Triboelectric nanogenerators as a new energy technology: From fundamentals, devices, to applications. *Nano Energy*, 14, 126–138.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.11.050>