



Raylı Sistemlerde Pnömatik Fren Basınçlarına Uygun Piezoelektrik Enerji Hasadı için Termal Olarak İyileştirilmiş Gr:ZnO:PDMS Esnek Nanokompozit Filmler

Seval KINDEN

*Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Eskişehir, Türkiye*

soren@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 11.12.2025, Kabul/Accepted: 05.01.2026, Yayınlama/Published: 20.01.2026)

Öz: Fonksiyonel nano dolgu maddesi ile zenginleştirilmiş polimer esaslı nanokompozitler, esnek elektronikler, optoelektronik aygıtlar ve enerji hasadı sistemlerinde güçlü bir potansiyel göstermektedir. Bu çalışmada, grafen (Gr), çinko oksit (ZnO) ve polidimetilsiloksan (PDMS) bileşimlerinden oluşan esnek kompozit filmler üretilmiş ve yapısal, morfolojik ve piezoelektrik özellikleri incelenmiştir. Termal işlemin malzeme performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için tavlınmamış ve 200 °C'de 1 saat boyunca ısı işlem uygulanmış iki örnek grubu hazırlanmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizi, PDMS matrisi içinde kristal ZnO varlığını doğrulamış; tavlınmış örneklerde ZnO partiküllerinin yeniden düzenlenmesiyle daha homojen dağılımlı ve ince kristaliteli bir yapı oluştuğu gözlemlenmiştir. Tarama elektron mikroskobu (FESEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), tavlınmış kompozitlerde Gr ve ZnO'nun daha eşit dağılım gösterdiğini ve arayüzey etkileşiminin iyileştiğini göstermiştir. Piezoelektrik performans, 1-4 Hz frekans ve 3-6 bar basınç aralığında değişen mekanik uyarımlar altında açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Tavlınmış numuneler tavlınmamış numunelere göre daha yüksek gerilim ve akım çıktıkları sergilerken, akım çıktısında iki gruba ait numunelerde sınırlama gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan 3-6 bar basınç ve 1-4 Hz frekans aralıkları, yalnızca deneysel parametreler olarak değil, aynı zamanda raylı sistem araçlarında kullanılan pnömatik fren mekanizmalarının çalışma koşullarını mümkün olduğunca simüle etmek amacıyla belirlenmiştir. Raylı sistemlerde frenleme ve fren çözme döngüleri sırasında hat basıncı tipik olarak 3-6 bar aralığında değişmekte ve bu döngüler düşük frekanslı (1-4 Hz) mekanik titreşimler üretmektedir. Bu nedenle çalışmada uygulanan mekanik uyarımlar, fren sisteminin işletme sırasında maruz kaldığı basınç salınımlarını ve dinamik yüklemeleri laboratuvar ortamında oluşturmayı hedeflemektedir. Bu simüle düzenek sayesinde geliştirilen Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin fren silindir yüzeyi, fren hattına bağlı esnek diyaframlar veya yardımcı basınç odaları üzerine entegre edilmeleri durumunda gösterecekleri performans öngörülebilir hale gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozit filmin raylı sistemlerde karşılaşılan gerçekçi mekanik uyarımları elektriksel sinyallere dönüştürebildiğini göstermekle birlikte bu malzemeyi pnömatik fren alt yapısına entegre edilebilecek esnek enerji hasadı ve kendi enerjisini kendisi üretebilen basınç/durum izleme sensörleri için güçlü bir aday haline getirmektedir.

Anahtar kelimeler: Raylı sistemler, Pnömatik fren sistemi, Piezoelektrik nanokompozit, Enerji hasadı

Thermally Enhanced Gr:ZnO:PDMS Flexible Nanocomposite Films for Piezoelectric Energy Harvesting under Pneumatic Brake Pressures in Railway Systems

Abstract: Polymer-based nanocomposites enriched with functional nanofillers offer strong potential for flexible electronics, optoelectronic devices, and energy harvesting systems. In this study, flexible composite films composed of graphene (Gr), zinc oxide (ZnO), and polydimethylsiloxane (PDMS) were fabricated and investigated for their structural, morphological, and piezoelectric properties. Two types of samples, non-annealed and thermally annealed at 200 °C for 1 hour, were prepared to assess the impact of thermal treatment on material performance. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed the presence of crystalline ZnO within the PDMS matrix, with annealed samples at 200°C for 1 hr exhibiting partial reorganization and redistribution of ZnO particles in the PDMS matrix, resulting in more homogeneously dispersed and finer crystallites. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) revealed a more uniform dispersion and better interfacial integration of Gr and ZnO

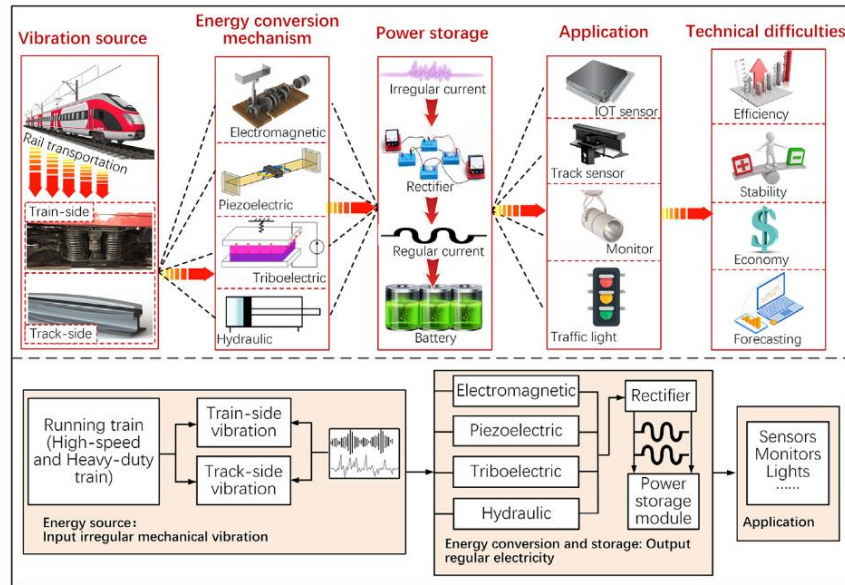
Atıf için/Cite as: S. Kinden, "Raylı sistemlerde pnömatik fren basınçlarına uygun piezoelektrik enerji hasadı için termal olarak iyileştirilmiş Gr:ZnO:PDMS esnek nanokompozit filmler," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 23, no. 1839693, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1839693

in the annealed composites. Piezoelectric performance was evaluated by measuring open-circuit voltage and short-circuit current under mechanical stimuli ranging from 1-4 Hz and 3-6 bar. Annealed films demonstrated higher voltage and current outputs compared to non-annealed samples; however, both sample groups showed limited sensitivity in current responses. Importantly, the selected pressure and frequency ranges were not arbitrary experimental parameters but were chosen to realistically stimulate the operating conditions of pneumatic brake mechanisms used in rail vehicles. During braking and release cycles, these systems typically experience 3-6 bar pressure fluctuations and low-frequency mechanical oscillations. The results indicate that Gr:ZnO:PDMS films can effectively convert realistic pneumatic brake-induced mechanical stimuli into electrical signals, making them promising candidates for integration into rail vehicle brake infrastructure as flexible harvesters or self-powered pressure and condition-monitoring sensors.

Keywords: Railway systems, Pneumatic brake system, Piezoelectric nanocomposite, Energy harvesting

1. Giriş

Raylı sistemlerde tren hareketi, ray-tekerlek etkileşimi, titreşimler, geçiş yükleri ve araç üstü mekanik bileşenlerin çalışması sırasında sürekli bir mekanik enerji açığa çıkmaktadır [1]. Bu enerji, hat boyunca ve araç bileşenlerinde düzenli veya darbeli mekanik uyarımlar şeklinde ortaya çıkmakta olup, Şekil 1, bu mekanik enerjinin piezoelektrik, triboelektrik ve elektromanyetik dönüşüm mekanizmalarıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesini ve doğrultucu-depolama modülleri üzerinden sensör besleme veya altyapı izleme gibi uygulamalarda kullanılmasını özetlemektedir [2-4]. Raylı sistemlerde kendi enerjisini üreten sensörlerin gereksinimi arttıkça, düşük frekanslı ve değişken genlikli mekanik uyarımları verimli bir şekilde dönüştürebilen malzemeler kritik hale gelmiştir. Buna karşın verimlilik, dayanıklılık ve ekonomik uygulanabilirlik gibi teknik zorluklar enerji hasadı teknolojilerinin geniş ölçekli entegrasyonunu sınırlamaya devam etmektedir. Bu bağlamda, yeni nesil esnek nanokompozitlerin geliştirilmesi raylı sistemlerde sürdürülebilir enerji hasadı çözümleri için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır.



Şekil 1. Raylı sistemlerde mekanik titreşim kaynakları, enerji dönüşüm mekanizmaları ve elde edilen enerjinin sensör ve izleme sistemlerinde kullanımını özetleyen genel enerji hasadı şeması [4]

Raylı sistemlerde pnömatik fren mekanizması çalışması sırasında ortaya çıkan basınç dalgalanmaları ve tekrarlayan frenleme-fren çözme döngüleri, önemli miktarda mekanik enerji açığa çıkarmaktadır; ancak mevcut fren altyapılarında bu enerji büyük ölçüde geri kazanılmadan

kaybolmaktadır. Özellikle fren hattındaki ve fren silindiri gövdesindeki 3-6 bar aralığındaki basınç değişimleri ve fren silindirinde oluşan periyodik mekanik titreşimler, yüksek genlikli ve düzenli uyarımlar oluşturur ve bu uyarımlar, piezoelektrik, triboelektrik veya elektrostriktif gibi çeşitli enerji dönüşüm mekanizmaları ile elektrik enerjisine dönüştürülebilir [5]. Piezoelektrik malzemeler mekanik deformasyonu doğrudan elektrik yüküne çevirirken, triboelektrik sistemler temas ve ayrılma hareketlerinden yararlanarak yük birikimi sağlar; elektrostriktif malzemeler ise uygulanan mekanik stres ile geometrik değişim ve dolayısıyla elektriksel çıktı üretir. Bu çoklu mekanizmalar, raylı araçların fren sistemlerinde sürekli ortaya çıkan mekanik enerjinin etkili bir şekilde toplanması ve elektriksel enerjiye dönüştürülmesini mümkün kılarak, kablosuz fren sıcaklık sensörleri, basınç izleme modülleri, fren balatası aşınma sensörleri için sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunabilir. Ayrıca, raylı sistem araçlarının uzun bakım aralıkları nedeniyle enerji hasadı tabanlı sensörler, harici batarya ihtiyacını azaltarak bakım maliyetinin düşürülmesi potansiyeline sahiptir.

PDMS tabanlı esnek kompozitler, hafiflik, mekanik esneklik ve kimyasal kararlılık gibi avantajlarıyla öne çıkmaktadır. Ancak saf PDMS'in düşük elektriksel iletkenliği ($\sim 10^{-12}$ S/m) piezoelektrik uygulamalarda yetersiz kalmaktadır [6]. Bu nedenle PDMS matrisine, piezoelektrik ve elektriksel iletkenlik sağlayan ZnO ve Gr katkılarının yapıldığı çalışmalar bulunmaktadır. ZnO [7-12], geniş bant aralığı ($\sim 3,37$ eV) ve yüksek piezoelektrik özellikleri ile sensör ve enerji hasadı uygulamalarında yaygın olarak kullanılırken; Gr [13-17] yüksek iletkenlik, mekanik dayanım ve taşıyıcı hareketliliği sayesinde hem yük taşıma yollarını iyileştirmekte hem de kompozit yapıyı güçlendirmektedir. PDMS matrisine ZnO ve Gr eklenerek oluşturulan kompozit filmler, saf ZnO yapılarıyla karşılaştırıldığında piezoelektrik çıktı, dielektrik davranış ve taşıyıcı hareketliliği açısından sinerjik iyileşmeler göstermektedir [18-19]. Buna ek olarak, bir son işlem adımı olan termal tavlama, kompozit filmlerin morfoloji ve piezoelektrik performansını optimize edilmesinde kritik öneme sahiptir. ZnO filmlerde, 200-600 °C aralığında yapılan tavlama, XRD eğrileri ve piezoelektrik tepkilerde de görüldüğü üzere ZnO'nun kristallikliğini artırmakta ve arayüz uyumunu güçlendirmektedir [20]. Benzer şekilde, Gr bazlı yapılarda tavlama, oksijen fonksiyonel grupların azalmasına ve sp^2 bağ ağının yeniden kurulmasına yardımcı olarak elektriksel iletkenliği ve termal kararlılığı geri kazandırmaktadır [21]. Bununla birlikte, Gr katkılı ZnO:PDMS kompozitlerde tavlamanın hem morfoloji, kristallik ve piezoelektrik performans üzerindeki etkileri hem de ray geçiş basınçları altında kompozit malzemenin performansına olan etkisi halen sınırlı sayıda çalışma ile ele alınmıştır.

Bu çalışmada, Gr katkılı ZnO:PDMS filmlerinin morfolojik, yapısal ve piezoelektrik performansı üzerinde termal tavlama işleminin etkisi, Türkiye'deki raylı sistem araçlarında kullanılan pnömatik fren mekanizmalarına yönelik bir uygulama simülasyonu kapsamında değerlendirilmiştir. Piezoelektrik performans ölçümleri, fren hattı ve fren silindirlerinde işletme sırasında ortaya çıkan basınç dalgalanmalarını temsil edecek şekilde 3-6 bar aralığında gerçekleştirilmiştir; böylece bu çalışma, pnömatik fren döngülerinin oluşturduğu mekanik uyarımların laboratuvar ortamında kontrollü bir şekilde simülasyonunu sağlamıştır. Elde edilen deneysel bulgular, bu basınç aralığındaki periyodik mekanik yüklemelerin Gr:ZnO:PDMS kompozitleri tarafından elektriksel çıkışa dönüştürülebildiğini göstermekte ve bu malzemelerin pnömatik pnömatik fren bileşenlerine entegre edilmesi halinde, mevcut sistemlerde boşa giden mekanik enerjiden yararlanarak kablosuz fren sıcaklık sensörleri, basınç izleme modülleri ve fren balatası aşınma sensörlerinin enerji ihtiyacını karşılayabilecek potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu kapsamda bu çalışma, Türkiye'deki raylı sistem altyapısı için sürdürülebilir, bakım ve izleme maliyetlerini düşürme potansiyeline sahip çözümlere yönelik bir deneysel çalışma olarak sunulmaktadır.

2. Metot

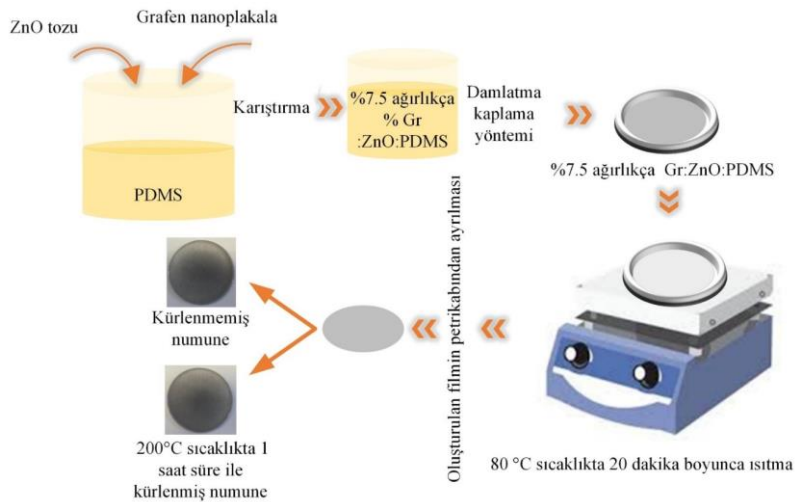
2.1. Malzemeler

Grafen nanoparçacık tozu Nanografi'den temin edilmiştir (Safılık: %99,9, ortalama kalınlık ~3 nm, özgül yüzey alanı: ~800 m²/g, çap: 1,5 µm). PDMS, Dow Corning Corporation'dan Sylgard 184 Silikon Elastomer Kiti olarak temin edilmiştir. ZnO tozu ise Alfa Aesar'dan (Puratronic®, 99,9999% safılık, metal bazlı) sağlanmıştır.

2.2. Saf ve Gr katkılı ZnO:PDMS kompozit filmlerin üretim süreci akışı ve enerji hasatlayıcı modül üretimi

Kompozit filmler, çok aşamalı döküm ve kürlenme süreci ile üretilmiştir. Öncelikle, Sylgard 184 elastomer baz ve kürlenme ajanı (Dow Corning, Auburn, MI, ABD) 10:1 ağırlık oranında karıştırılarak bir PDMS öncül çözeltisi hazırlanmıştır. Ardından, ZnO tozu, ZnO:PDMS karışımının toplam ağırlığına göre %1,2 oranında PDMS'e eklenmiştir. Sonrasında, Gr nanoplaketler, toplam dolgu içeriğine (PDMS ve ZnO) göre %7,5 oranında ilave edilmiş ve tüm bileşenler, toz fazının PDMS çözeltisi tarafından homojen şekilde ıslanmasını sağlamak amacıyla 500rpm hızında 25 dk karıştırılmıştır. Karışım, hapsolmuş hava kabarcıklarını gidermek için 30 dakika boyunca vakum odasında vakumlanmıştır. Elde edilen karışım eşit paylaştırılarak iki adet petri kabına dökülmüş ve oda sıcaklığında iki saat boyunca homojen şekilde yayılması sağlanmıştır. Filmler daha sonra sıcak plaka üzerinde 80 °C'de 20 dakika süreyle termal olarak kürlenmiştir. Oda sıcaklığına soğuduktan sonra, kürlenmiş filmler nazikçe petri kaplarından çıkarılmış ve nihai kalınlığı 0,75 mm olarak ölçülmüştür. Kompozit filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri üzerindeki post-termal tavlama etkisini incelemek için, filmlerden biri 200 °C'de 1 saat süreyle inkübatörde tavlansmıştır. Bu çalışmada uygulanan 200 °C'de 1 saat süreyle uygulanan ısı işlemi, PDMS esaslı kompozit filmlerde post-kürlenme etkisi oluşturarak zincir hareketliliğini artırmak, olası uçucu bileşenleri uzaklaştırmak ve dolgu-matris arayüzey etkileşimini iyileştirerek ZnO/Gr fazlarını daha homojen olacak şekilde yeniden düzenlenmesini sağlamak amacıyla seçilmiştir. Literatürde PDMS altlık/film hazırlama işlemlerinde 200 °C/ 1 saat post-kürlenme uygulamasının mekanik özellikleri ayarlamak ve film özelliklerini stabilize etmek için kullanıldığı bildirilmektedir [22]. ZnO tarafında ise tavlama sıcaklığının kristal yapı ve kristalit boyutu üzerinde etkili olduğu bilindiğinden, 200 °C gibi bir sıcaklık değeri seçilerek PDMS matriste yeniden düzenleme desteklenirken ZnO'nun aşırı kristalit büyümesinin /sinterleşmesinin sınırlanması hedeflenmiştir [23].

Üretim sürecinin şematik gösterimi Şekil-2'de sunulmaktadır.

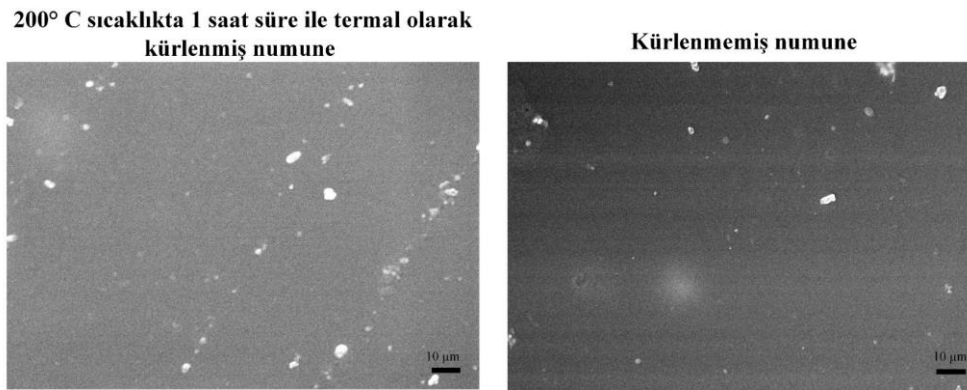


Şekil 2. 7,5 (ağırlıkça) % Gr içeren Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin hem tavlansmamış hem de termal tavlama uygulanmış koşullarda hazırlanmasını gösteren şematik gösterim

Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin yüzey morfolojisi ve elementel birleşimi, enerji dispersif (EDX) ile donatılmış Hitachi Regulus 8230 FESEM kullanılarak analiz edilmiştir. Kompozit filmlerin mikro yapısal özellikleri ise D2 Phaser Bruker XRD cihazı ile incelenmiştir. 2-theta (2θ) taraması 5° ile 80° açısal aralığında gerçekleştirilmiştir. Kompozit filmlerin piezoelektrik enerji hasadı performansını ölçmek için, her iki yüzeye de 3 cm x 2 cm boyutlarında Alüminyum (Al) elektrotlar entegre edilmiş ve termal tavlamanın piezoelektrik etki üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Piezoelektrik çıktılar, özel olarak tasarlanmış motorize test ekipmanı kullanılarak uygulanan dikey kuvvet ile karakterize edilmiştir. Numunelerin üst ve alt elektrotları osiloskop (PicoScope 4224) ve kaynak ölçüm ünitesi (Keysight B2902A Precision Source/Measurement Unit) ile bağlanmış; uygulanan kuvvet 3-6 bar aralığında, 0,5 bar artışlarla ve yüklenme/boşaltma frekansları 1 Hz ve 4 Hz arasında olacak şekilde test edilmiştir.

3. Bulgular

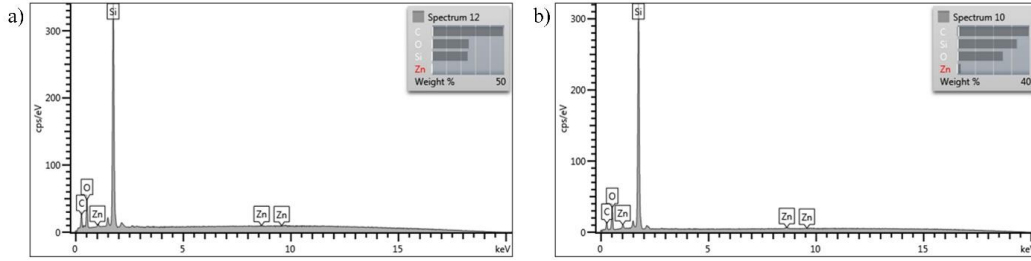
FESEM analizleri, 200°C 'de 1 saat süreyle tavllanmış Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin, tavlınmamış örneklerle kıyasla dolgu dağılımı ve yüzey morfolojisi açısından belirgin iyileşme gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 3) [24,25]. FESEM görüntülerinden yapılan nicel analizlerde, parlak contrast veren ZnO/Gr zengin bölgelerin eşdeğer yarıçapı (ECD) belirlenmiştir. Kürlenmiş numunede medyan $\sim 1,55\ \mu\text{m}$ iken, kürlenmemiş numunede medyan ECD $\sim 1,41\ \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur. Bu durum, tavlanan numunede parlak ZnO zengin bölgelerin boyutunda görülen sınırlı değişim, başlangıçta serbest hareketten kaynaklı toplanmadan ziyade, yüksek sıcaklıkta polimer ağının kısmen relaksasyonu ve olası hacimsel yoğunlaşma ile ZnO kümelerinin daha belirgin hale gelmesi ya da yakın kümelerin kısmi koalesansı ile açıklanabilir. Ayrıca, tavlınmamış numunede aynı görüntü alanında daha fazla sayıda aglomera tespit edilmesi, ısıl işlemle dolgu fazının dağılımının artması ile ilişkilendirilebilir. Tavlınmamış filmlerde ZnO partiküllerin düzensiz aglomeratları, homojen olmayan dağılım ve zayıf ara yüz etkileşimine işaret ederken, tavlama sonrası filmlerde dolgu partikülleri daha eşit şekilde dağılmıştır. Bu iyileşme, termal tavlamanın polimer zincir hareketliliğini artırarak nanoparçacıkların yeniden düzenlenmesini kolaylaştırması ve ZnO-Gr-PDMS arayüz etkileşimini güçlendirmesiyle açıklanmaktadır. Ayrıca, Gr yüzeyindeki oksijenli fonksiyonel grupların kısmi indirgenmesi, elektriksel iletkenliği ve arayüz uyumluluğunu artırarak piezoelektrik performansın optimize edilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Bu bulgular, termal tavlamanın Gr:ZnO:PDMS kompozitlerde mikro yapıyı homojenleştirerek elektriksel ve piezoelektrik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.



Şekil 3. Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerine ait FESEM görüntüleri

FESEM analizleri, kompozit filmlerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiş olup, elementel birleşim değerlendirmesi için EDX ile tamamlanmıştır. Şekil 4, tavlınmış ve tavlınmamış Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlere ait EDX spektrumlarını sunmaktadır. Analizler, kompozit yapıda silikon (Si), karbon (C), çinko (Zn) ve oksijen (O)

elementlerinin mevcudiyetini doğrulamaktadır. Filmlerdeki elementlerin stokiyometrik oranları ise Tablo 1’de detaylı olarak verilmiştir. Bu bulgular, fonksiyonel nano katkı maddelerin matriste başarılı bir şekilde dağıldığını ve elementler arası beklenen kimyasal bileşimin korunduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerinin EDX spektrumları (a) tavllanmış numune (b) 200°C’de bir saat boyunca termal olarak tavllanmış numune

Tablo 1. Tavllanmış (200° C’de 1 saat) ve tavlınmamış Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlere ait EDX analiz sonuçları

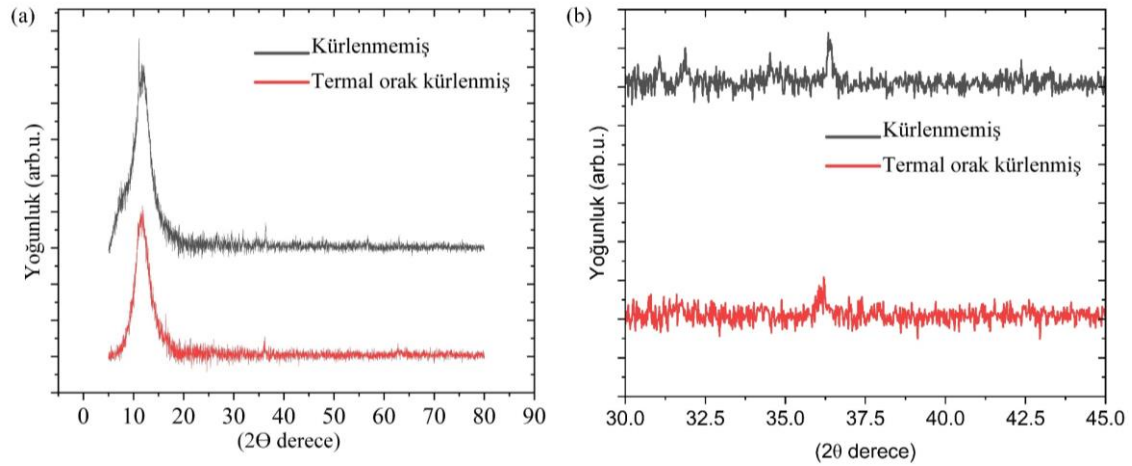
Malzeme	C (ağırlık %)	O (ağırlık %)	Si (ağırlık %)	Zn (ağırlık %)
Gr:ZnO:PDMS tavllanmış örnek	39,55	25,28	33,03	2,14
Gr:ZnO:PDMS tavlınmamış örnek	49,12	25,54	24,76	0,58

Tablo 1 ve Şekil 4’te sunulan EDX verileri, Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerinin termal tavlama sonrası bileşiminde meydana gelen kaymaları açıkça göstermektedir. Tavlama sonrasında gözlenen C içeriğindeki azalma, PDMS matrisinin kısmi uzaklaşması veya yeniden düzenlenmesiyle ilişkilendirilebilir. Yüksek sıcaklıklar, düşük molekül ağırlıklı PDMS fonksiyonlarının uçuculaşmasına ya da zincirler arası çapraz bağlanmanın artmasına neden olarak yüzeydeki karbon esaslı türlerin göreceli olarak azalmasına yol açabilmektedir [26]. Buna karşılık Si içeriğindeki artış, C kaybıyla uyumlu olup PDMS’in yeniden yapılanması sonucu fazla Si-O-Si biriminin yüzeye doğru hareket etmesi ve yüzeyde tutulmasıyla açıklanabilir. Bu durum, tavlama etkisiyle PDMS yapısında ağ yoğunlaşmasının arttığını veya faz ayrışmasına benzer bir davranışın ortaya çıktığını düşündürmektedir [26]. Termal tavlama aynı zamanda ZnO parçacıklarının aglomerasyonunu azaltarak yüzeye doğru daha etkin şekilde göç etmelerini sağlamış, böylece EDX etkileşim hacmi içerisinde Zn sinyal yoğunluğunun artmasına katkıda bulunmuştur [7]. Buna karşın O içeriğinin büyük ölçüde sabit kalması, toplam oksit fraksiyonunu tavlama sonrasında korunduğunu göstermektedir [27].

Şekil 5a’da, termal tavlamanın yol açtığı yapısal değişimleri incelemek amacıyla tavllanmış ve tavlınmamış Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerine ait XRD eğrileri gösterilmektedir. XRD ölçümleri $2\theta = 5^\circ - 80^\circ$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü üzere $2\theta = \sim 12^\circ$ konumunda elde edilen pik PDMS’e ait kırılım pikidir [28]. $2\theta = \sim 36^\circ$ konumunda ortaya çıkan pik ise hegzagonal wurtzite ZnO’nun (002) kristal düzlemine atfedilebilir [29]. Gr pikleri belirgin şekilde gözlemlenmemiştir; bunun nedeni, kompozitteki Gr miktarının ilgili piklerin tespit edilmesi için yetersiz olması ve Gr’nin kırınım şiddetinin ZnO ve PDMS’e kıyasla oldukça zayıf kalmasıyla açıklanabilir. Termal kürlenmenin kristal yapı üzerindeki etkisini nicel olarak değerlendirmek amacıyla hem tavllanmış hem tavlınmamış numuneler için XRD piklerinden kristal boyutu/koherans uzunluğu hesaplaması yapılmıştır. Hesaplamalarda Scherrer denklemi kullanılmıştır (1).

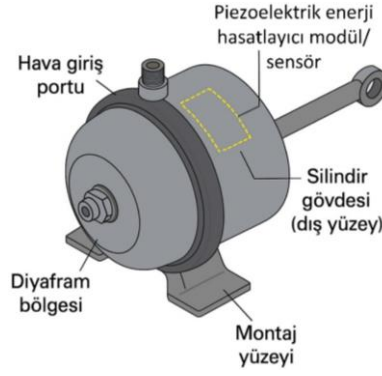
$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad (1)$$

Burada $\lambda = 0,15418$ nm (Cu K α), θ faktörü (0,94 alınmıştır), θ Bragg açısı ve β seçilen pikin FWHM değerinin (2θ cinsinden) radyana çevrilmiş halidir. Bu kapsamda PDMS'e ait geniş özellik (Şekil 5a) ve ZnO'nun kristalin yansıması olan (002) piki ($\sim 36^\circ$) (Şekil 5b) değerlendirilmiştir. Hesaplama sonuçlarına göre PDMS piki için D değeri 2,39 nm'den 2,78 nm'ye çıkarken, bu değer ZnO (002) piki için 41,62 nm'den 138,67 nm'ye yükselmiştir. Bu sonuçlar, termal tavlama sonrası PDMS'e ait geniş özelliğin temsil ettiği kısa menzilli düzen/korelasyon uzunluğunun sınırlı artış gösterdiğini ortaya koyarken, ZnO'nun (002) yansımasında belirgin pik daralmasıyla birlikte görünür kristalit boyutunun anlamlı şekilde arttığını göstermiştir. Bu sonuçlar, termal tavlamanın polimer fazda daha çok zincir paketlemesi/lokal düzeyini iyileştirdiği; ZnO fazında ise kusur/mikro gerinim azalması ve parçacıkların yeniden düzenlenmesi/ koalesansı nedeniyle koherans uzunluğunu belirgin ölçüde arttırdığı yönünde açıklanabilir. Ayrıca, Scherrer denkleminde elde edilen değerlerin fiziksel tane çapından ziyade görünür kristalit uzunluğu olarak değerlendirilmesi önemlidir. Sonuç olarak, XRD desenleri, 200° C'de 1 saat süre ile tavlamanın PDMS matrisi içerisinde ZnO parçacıklarının kısmi yeniden düzenlenmesine ve yeniden dağılımına neden olarak daha homojen dağılımlı ve daha ince kristalitlerin oluşumunu teşvik ettiğini ortaya koymaktadır.



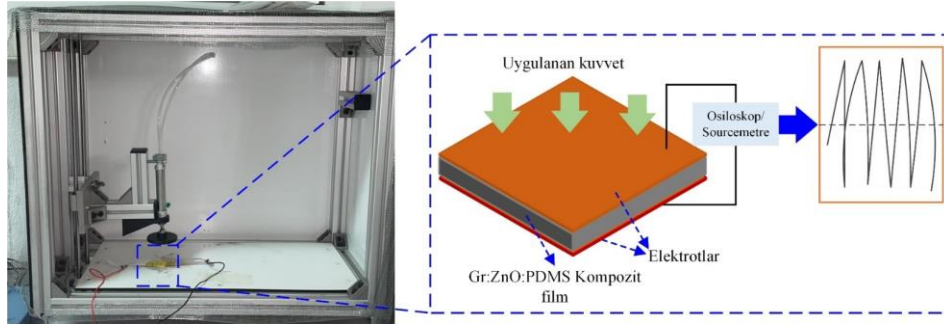
Şekil 5. (a) Tavlanmamış ve 200° C'de 1 saat süreyle termal olarak tavllanmış koşullar altındaki Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerine ait XRD desenleri (b) ZnO piklerinin daha dar 2θ derece aralığında gösterildiği XRD desenleri

Kompozit filmlerin piezoelektrik tepkisi, 3 bar ile 6 bar arasındaki dikey basınç altında, 0,5 bar artış adımıyla ve 1 Hz ve 4 Hz arasındaki yükleme/boşaltma frekanslarında değerlendirilmiştir. Raylı sistem araçlarında pnömatik fren mekanizmasının işletimi sırasında oluşan basınç dalgalanmalarının, fren hattı ve fren silindiri gibi bileşenlerde, ani ve tekrarlayan yüklemelere yol açtığı bilinmektedir. Bu basınç darbelerinin genliği, frenleme ve fren çözme süreçlerinde genellikle 3-6 bar aralığında değişmektedir. Bu nedenle laboratuvar ortamında geliştirilen kompresör temelli deney düzeninde, pnömatik fren sisteminin gerçek çalışma koşullarını temsil etmek amacıyla basınç aralığı 3-6 bar olarak seçilmiştir. Kontrollü bir düzenekle uygulanan bu basınç profili, enerji hasatlayıcıların fren silindiri yüzeyine entegre edildiğinde sahada maruz kalacağı gerçekçi dinamik yük koşullarını simüle etmekte ve malzemenin uygulamaya yönelik performans değerlendirmesi için güvenilir bir temel oluşturmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Pnömatik fren silindirinin yapısal bileşenleri ve Gr:ZnO:PDMS piezoelektrik enerji hasatlayıcı modülün silindir gövdesine yerleştirildiği önerilen konumun şematik gösterimi

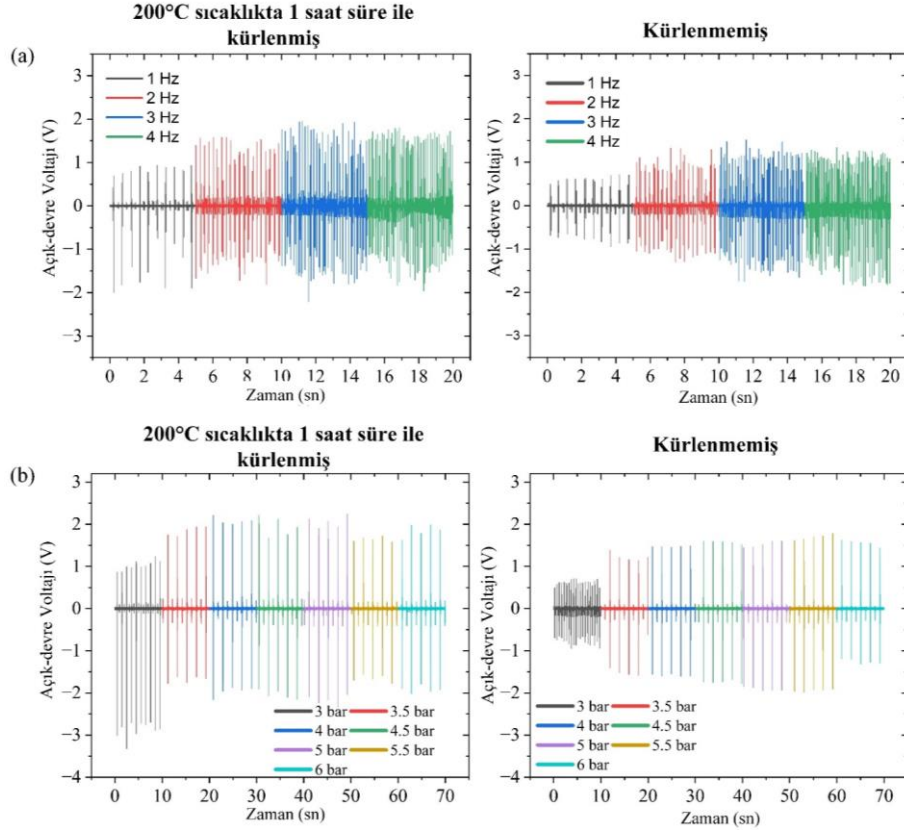
Basınç uygulama düzeneğinin şematik gösterimi ve motorize test ekipmanının optik görüntüsü Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Basınç uygulama düzeneğinin şematik gösterimi (sağ) ve numune ile birlikte motorize test ekipmanının optik görüntüsü (sol)

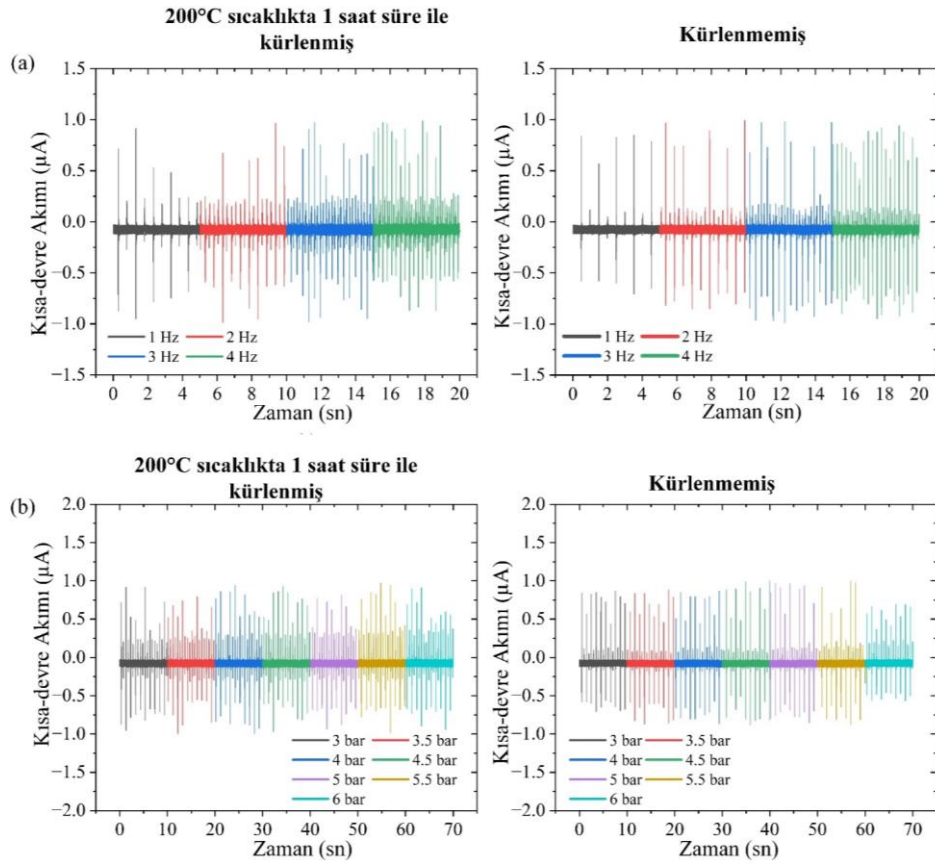
Şekil 8’de yer alan grafiklere göre uygulanan tüm kuvvet ve yükleme/boşaltma frekanslarında, termal tavlamanın açık devre gerilimini artırdığı belirlenmiştir. Grafikler detaylı analiz edildiğinde, kompozit filmin 200 °C’de 1 saat süreyle tavlama durumunda açık devre voltajının daha yüksek değerlerde elde edildiği görülmektedir. Bu artış, ZnO parçacıklarının PDMS matrisi içerisindeki kristalinitesinin iyileşmesine ve daha uniform bir dağılım elde edilmesine atfedilebilir. ZnO’nun daha iyi dağılması ve Gr, ZnO ve PDMS fazları arasındaki arayüz bağlanmasının güçlenmesi, daha verimli gerilme transferine olanak sağlamaktadır [30-34]. Şekil 8a’da, kompozit filmler üzerine dikey yönde 3 bar basınç uygulanarak farklı yükleme ve boşaltma frekansları altında gerçekleştirilen test sonuçları sunulmaktadır. Raylı araçlarda pnömatik fren silindirleri, frenleme ve fren çözme döngüleri sırasında düzenli olarak yaklaşık 3-6 bar aralığında basınç değişimlerine maruz kalmaktadır. Bu koşulları simüle etmek amacıyla kompozit filmler 3 bar sabit basınç altında farklı yükleme/boşaltma frekansları altında test edilmiştir. Fren silindirinin düşük frekanslı genleşme/büzülme davranışını temsil eden bu deneylerde, termal olarak tavlama kompozit filmlerin tüm frekanslarda daha yüksek çıkış voltajı ürettiği gözlemlenmiştir. Şekil 8b’de ise kompozit filmlere 1 Hz yükleme/boşaltma frekansında, 3 bar ile 6 bar arasında 0,5 bar artış adımıyla dikey yük uygulanmasına ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, tüm basınç seviyelerinde termal olarak tavlama kompozit filmlerin daha yüksek çıkış voltajı ürettiğini göstermektedir. Uygulanan basınç 4,5 bar seviyesine kadar arttıkça gerilim çıktısının yükselmesi, silindir gövdesinin artan deformasyonunun ZnO partiküllerinde daha fazla dipol yönelimi oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Ancak 4,5 bar üzerindeki basınçlarda gerilimde doygunluk eğilimi gözlemlenmiştir; bu durum PDMS matrisinin doğrusal elastik bölgeden çıkması, deformasyonun bir kısmının elastik olmayan bölgede sönümlenmesi ve ZnO partiküllerinin ek yük altında daha fazla yük ayrıştırma kapasitesi göstermemesiyle açıklanabilir.

Hem Şekil 8a hem Şekil 8b’de elde edilen bulgular, fren silindirinin gerçek çalışma koşullarının laboratuvar ortamında simüle edilebildiğini ve Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin bu dinamik basınç ve deformasyon döngülerine etkin bir şekilde tepki verebildiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, kompozit filmlerin pnömatik fren sistemlerine entegre edilerek hem enerji hasadı hem de kendi kendine beslenen basınç/durum izleme sensörleri olarak kullanılması da teknik açıdan uygulanabilir görünmektedir.



Şekil 8. Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin açık devre gerilim çıktıları a) 3 bar basınç altında farklı yüklenme/boşaltma frekanslarında b) Hz yüklenme/boşaltma frekansında uygulanan 3-6 bar aralığında basınç seviyelerinde

Şekil 9, Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin kısa devre akım çıktılarının, pnömatik fren sistemlerinde görülen basınç ve frekans değişimlerine karşı sınırlı duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu düşük hassasiyetin ilk nedeni, kompozit filmlerin yüksek atalet empedansına sahip olmasıdır; dolayısıyla kısa devre akımı çok düşük değerlerde ölçülmekte ve fren silindirindeki basınç dalgalanmalarına karşılık elde edilen akım çıktısı belirgin bir farklılık oluşturmamaktadır. İkinci neden olarak, kompozit matris içinde ZnO partiküllerin hapsolmesi ve Gr ağ yapısı boyunca yük taşıma yollarını kısmen engellemesi akım akışını sınırlayabilir. Bu durum, pnömatik fren döngülerinin oluşturduğu yük değişimlerine rağmen akım çıktısının güçlü şekilde modüle edilememesine yol açmaktadır. Ancak, tavlanmış örneklerde görülen tepe-tepe kısa devre akımı artışı, termal işlemin Gr-PDMS arayüzünde bağlanmayı iyileştirerek, ZnO partikülleri ve Gr ağı arasındaki yük taşınımını kolaylaştırdığını göstermektedir [35,36]. Bu iyileşme, fren silindiri yüzeyi gibi dinamik deformasyona maruz kalan bileşenlere entegre edilmesi halinde kompozit filmin daha kararlı ve tekrarlanabilir elektriksel yanıt vermesini mümkün kılabilir. Bununla birlikte, kısa devre akımının genel olarak basınca ve frekansa düşük duyarlılık göstermesi, pnömatik fren sistemlerinde akım tabanlı izleme yerine gerilim tabanlı piezoelektrik sensör yaklaşımının daha uygun olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 9. Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin kısa devre akım tepkileri (a) 3 bar basınç altında farklı yükleme/boşaltma frekanslarında (1-4 Hz) ve (b) 1 Hz yükleme/boşaltma frekansında uygulanan basınç seviyelerinde (3-6 bar)

4. Sonuç

Bu çalışmada Gr:ZnO:PDMS kompozit filmler üretilerek, 200 °C’de 1 saatlik termal tavlama işleminin filmlerin yapısal, morfolojik ve piezoelektrik özellikler üzerindeki etkileri ayrıntılı bir biçimde değerlendirilmiştir. Yapılan FESEM ve EDX analizleri, tavlama işleminin ZnO parçacıkları ile Gr yapraklarının PDMS matrisi içinde daha homojen, bağlantılı ve iletken yollar oluşturacak şekilde yeniden düzenlenmesini sağladığını ortaya koymuştur. XRD bulguları ise tavllanmış örneklerde daha ince, daha kararlı ve homojen dağılım sergileyen ZnO kristalitlerinin oluştuğunu göstermiştir. Piezoelektrik çıktı analizine yönelik filmlere uygulanan basınç (3-6 bar) ve frekans (1-4 Hz) değerleri, raylı araçlarda pnömomatik fren sistemlerinin çalışma aralığını temsil edecek şekilde seçilmiş olup, kompozit filmlerin bu gerçekçi mekanik uyarımlar altındaki piezoelektrik performansı değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, tavllanmış kompozitlerin açık devre gerilimi ve kısa devre akımı açısından belirgin bir iyileşme gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu performans artışı, güçlendirilmiş arayüz bağlanması ve partikülle arası iletim yollarının iyileşmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, her iki kompozit filmde de kısa devre akım çıktısı basınç ve frekans değişimlerine karşı sınırlı duyarlılık sergilediği görülmüş; bu durum inertiyel empedans, yük taşıma yollarındaki kısıtlar ve içsel direnç kaynaklı kayıplarla açıklanmıştır. Buna karşın açık devre gerilimi ölçümlerinde gözlenen belirgin duyarlılık, kompozit filmin fren silindiri veya fren hattında oluşan düşük frekanslı basınç dalgalanmalarını elektriksel olarak izleyebilecek nitelikte olduğunu göstermektedir.

Tüm deneysel sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin termal tavlama sonrası kazandığı gelişmiş yapısal ve piezoelektrik özelliklerin, filmlerin raylı sistemlerde pnömatik fren bileşenlerine entegre edilmesine yönelik önemli avantajlar sağladığı görülmektedir. Fren silindiri veya fren hattı üzerinde doğal olarak oluşan basınç döngülerinin elektriksel enerjiye dönüştürülebilmesi, bu kompozitleri kendi enerjisini üreten sensörler ve enerji hasatlama modülleri için güçlü bir aday haline getirmektedir.

Gelecek çalışmalarda, Gr:ZnO:PDMS kompozit filmlerin pnömatik fren sistemlerine entegrasyonunu daha gerçekçi şekilde değerlendirmek amacıyla ölçeklendirilmiş fren silindiri prototipleri üzerinde uzun süreli çevrimsel testler yapılması planlanmaktadır. Bu testlerde farklı frenleme senaryoları uygulanarak malzemenin tekrarlanabilirliği, çevresel etkilere dayanım seviyesi ve gerilim üretim kararlılığı araştırılacaktır. Ayrıca, fren silindiri-kompozit film etkileşiminin daha ayrıntılı anlaşılabilmesi için sayısal modeller geliştirilecek ve farklı montaj bölgelerinde film davranışı simüle edilecektir. Son aşamada, raylı araçlarda saha testleri gerçekleştirilerek önerilen sistemin gerçek işletme koşullarındaki performansı desteklenecektir.

Teşekkür

Yazar, FESEM cihazı ve teknik destek imkanların sağlanması nedeniyle Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne (ARUM) teşekkür eder. Ayrıca, bu çalışmada gerçekleştirilen XRD analizleri ve piezoelektrik ölçümlerine sağladıkları katkılar için Eskişehir Teknik Üniversitesi İleri Seramik Teknoloji Laboratuvarı'na teşekkürlerini sunar.

Kaynakça

- [1] M.Y. Gao, P. Wang, Y. Cao, R. Chen, C. Liu, "A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration," *J. Vibroeng.*, vol. 18, no. 7, pp. 4647-4663, Nov. 2016, doi: 10.21595/jve.2016.16938
- [2] D. Ding, J. Fan, H. Wang, G. Jing, and Y. Guo, "Piezoelectric energy harvesting in railways: Current status and future challenges," *Energy Strategy Rev.*, vol. 61, no. 101869, Sept. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101869>
- [3] N. Bosso, M. Magelli, and N. Zampieri, "Application of low-power energy harvesting solutions in the railway field: a review," *Veh. Sys. Dyn.*, vol. 59, no. 6, pp. 841-871, 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/00423114.2020.1726973>
- [4] L. Qi, H. Pan, Y. Pan, D. Luo, J. Yan, and Z. Zhang, "A review of vibration energy harvesting in rail transportation field," *iScience*, vol. 25, no. 103849, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103849>
- [5] US Department of Transportation Federal Railroad Administration, Self-powered wireless brake health monitor, Research result, Nov. 2008. Available: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/2015/rr0830.pdf?utm
- [6] R. Ariati, F. Sales, A. Souza, A. R. Lima, J. Riberio, "Polydimethylsiloxane composites characterization and its applications: a review," *Polymers*, vol. 13, no. 4258, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13234258>
- [7] Y. Amangeldinova, D. Aben, X. Ma, H. Ahn, K. Kim, M-D. Shin, H-Y. Hwang, "Enhancing electrical outputs of piezoelectric nanogenerators by controlling the dielectric constant of ZnO/PDMS composite," *Micromachines*, vol. 12, no. 630, May 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/mi12060630>
- [8] Q. Huang, J. Wu, D. Zeng, P. Zhou, "Graphene-wrapped ZnO nanocomposite with enhanced room-temperature photo-activated toluene sensing properties," *Mater.*, vol. 17, no. 1009, Feb. 2024, <https://doi.org/10.3390/ma17051009>
- [9] M. Muszynski, H. Teisseyre, K. Sobczak, J. Suffczynski, "Stable charged excitation in a ZnO/(Zn, Mg)O quantum well at near room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 117, no. 033102, Jul. 2020, <https://doi.org/10.1063/5.001638>

- [10] X. Yu, J. Xu, H. Lu, G. Fang, "Sol-gel derived Al-doped zinc-oxide-reduced graphene oxide nanocomposite thin films," *J. Alloys Compd.*, vol. 699, pp. 79-86, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.326>
- [11] K. Batra, N. Sinha, B. Kumar, "Tb-doped ZnO:PDMS based flexible nanogenerator with enhanced piezoelectric output performance by optimizing nanofiller concentration," *Ceram. Int.*, vol. 46, pp. 24120-24128, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.191>
- [12] V. S. Bhati, M. Hojamberdiev, M. Kumar, "Enhanced sensing performance of ZnO nanostructures based on gas sensors: a review," *Energy Rep.*, vol. 6, no. 4, pp. 46-62, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.070>
- [13] F. Gong, H. Li, W. Wang, D. Xia, Q. Liu, D. V. Papavassiliou, Z. Hu, "Recent advanced graphene-based free-standing films for thermal management: Synthesis, properties, and applications," *Coatings* vol. 8, no. 63, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings8020063>
- [14] J. S. Murray, Z. P-I. Shields, P. Politzer, *Design and Applications of Nanomaterials for Sensors*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2014
- [15] A. Nieto, A. Bisht, D. Lahiri, C. Zhang, A. Agarwal, "Graphene reinforced metal and ceramic matrix composites: a review," *Int. Mater. Rev.*, vol. 62, pp. 241-302, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1219481>
- [16] S. Kumar, Himanshi, J. Prakash, A. Verma, Suman, R. Jasrotia, A. Kandwal, R. Verma, K. S. Godara, M. A. M. Khan, M. S. Alshehri, J. Ahmed, "A review on properties and environmental applications of graphene and its derivative-based composites," *Catalysts*, vol. 13, no. 111, May, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/catal13010111>
- [17] A. R. Urade, I. Lahiri, K. S. Suresh, "Graphene properties, synthesis and applications: a review," *Jom-J. Min. Met. Mat. S.*, vol. 75, pp. 614-630, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05505-8>
- [18] G-H. Nam, S-H. Baek, C-H. Cho, I-K. Park, "A flexible and transparent graphene/ZnO nanorod hybrid structure fabricated by exfoliating a graphite substrate," *Nanoscale*, vol. 6, pp. 11653-11658, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1039/C4NR02318H>
- [19] J. Sengupta, C. M. Hussain, "Graphene-enhanced piezoelectric nanogenerators for efficient energy harvesting," *J-C. Carbon Res.*, vol. 3, no. 3, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/c11010003>
- [20] K. Deng, Z. Liu, H. Liu, Y. Chen, S. Li, S. Guo, B. Xiu, X. Dong, H. Cao, "Temperature dependence on microstructure, crystallization orientation, and piezoelectric properties of ZnO films," *Sensors*, vol. 25, no. 242, Jan. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/s25010242>
- [21] M. Tortello, S. Colonna, M. Bernal, J. Gomez, M. Pavese, C. Novara, F. Giorgis, M. Maggio, G. Guerra, G. Saracco, R-S. Gonnelli, A. Fina, "Effect of thermal annealing on the heat transfer properties of reduced graphite oxide flakes: a nanoscale characterization via scanning thermal microscopy," *Carbon*, vol. 109, pp. 390-401, Nov. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.08.017>
- [22] A. J. Greaney, C. M. McCarthy, J. P. Vethil, M. Abubaker, E. C. Reardon, F. D. Crowley, E. M. Cunnane, J. E. Mulvihill, "A comprehensive protocol for PDMS fabrication for use in cell culture," *PLOS one*, May 2025, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323283>
- [23] S. Azizi, R. Mohamad, A. Bahadoran, S. Bayat, R. A. Rahim, A. Ariff, W. Z. Saad, "Effect of annealing temperature on antimicrobial and structural properties of bio-synthesized zinc oxide nanoparticles using flowe extract of *Anchusa italica*," *J. Photochem. Photobiol. B.*, vol. 161, pp. 441-449, Aug. 2016, doi: [10.1016/j.jphotobiol.2016.06.007](https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.06.007)
- [24] D. B. Kamaruzaman, M. H. Mamat, N. I. K. Ariffin, A. S. R. B. A. Subki, H. Abdullah, N. Parimon, M. K. Yaakob, M. F. Malek, I. B. S. Banu, N. Vasimalai, A. B. Suriani, A. Mohamed, M. K. Ahmad, M. Rusop, "Effects of thermal annealing on the morphology and structural characteristics of zinc oxide nano powders for triboelectric nanogenerator applications," *J. Adv. Res. Fluid. Mech. Therm. Sci.*, vol. 99, pp. 17-27, Oct. 2022, doi: [10.37934/arfmts.99.1.1727](https://doi.org/10.37934/arfmts.99.1.1727)
- [25] F. Salemi, F. Karimzadeh, M-H. Abbasi, F. Moradi, D. H. Pham, J. Kim, "Effective parameters on polydimethylsiloxane/graphene composite-based triboelectric nanogenerator performance," *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 15, pp. 365-386, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/19475411.2024.2352481>
- [26] S. Venkatachalam, D. Hourlier, "Heat treatment of commercial Polydimethylsiloxane PDMS precursors: Part I. Towards conversion of patternable soft gels into hard ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 45, pp. 6255-6262, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.106>
- [27] A. D. Santos, F. Sabino, S. Rovisco, P. Barquinha, H. Aguas, E. Fortunato, R. Martins, R. Igreja, "Optimization of ZnO nanorods concentration in a micro-structured polymeric composite for

- nanogenerators,” *Chemosensors*, vol. 9, no. 27, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/chemosensors9020027>
- [28] S. M. Javanmardi, E. Ameri, “Pervaporation characteristics of PDMS/PHMS nanocomposite membranes inclusive multi-walled carbon nanotubes for improvement of acetic acid-methanol esterification reaction,” *Polym. Bull.*, vol. 77, pp. 2591-2609, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02875-z>
- [29] A. A. G. Santiago, J. G. S. Gondim, R. L. Tranquilin, F. S. Silva, F. F. Fernandez, M. C. B. Costa, F. V. Motta, M. R. D. Bomio, “Development of ZnO/PDMS nanocomposite with photocatalytic/hydrophobic multifunction,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 740, no.137051, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.137051>
- [30] Z. L. Wang, J. Song, “Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays,” *Sci.*, vol. 312, pp. 242-246, Apr. 2006, doi: 10.1126/science.1124005
- [31] G. Poulin- Vittrant, K. Nadaud, C. R. Chandraiahgari, D. Alquier, “Strategies to enhance ZnO nanogenerator performance via thermal-annealing and cryo-cooling,” *Cond. Mat. Mtrl. Sci.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.05718>
- [32] X-Z. Zhang, Y-P. Xia, X. Liu, Y-M. Zhong, H-B. Zhao, P-H. Wang, “Effect of annealing temperature on the microstructure and optoelectrical properties of ZnO thin films and their application in self-powered accelerometers,” *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 26, pp. 1186-1193, Sept. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1828-3>
- [33] N. Bhadwal, R. B. Mrad, K. Behdinan, “Review of zinc oxide piezoelectric nanogenerators: piezoelectric properties, composite structures and power output,” *Sensors*, vol. 10, Apr. 2023, doi: 10.3390/s23083859
- [34] L. Gong, I. A. Kinloch, R. J. Young, I. Riaz, R. Jalil, K. S. Novoselov, “Interfacial stress transfer in a graphene monolayer nanocomposite,” *Adv. Mater.*, vol. 22, pp. 2694-2697, Jun. 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.200904264>
- [35] H. Yao, F. Li, J. Lutkenhaus, M. Kotaki, H.-J. Sue, “High-performance photocatalyst based on nanosized ZnO reduced graphene oxide hybrid for removal of rhodamine B under visible light irradiation,” *AIMS Mater. Sci.*, vol. 3, pp. 1410-1425, Oct. 2016, doi: 10.3934/matserci.2016.4.1410
- [36] Y. Zhang, Y. Zhang, L. Song, Y. Guo, L. Wu, T. Zhang, “Illustration of charge transfer in graphene coated hexagonal ZnO photocatalysts using Kelvin probe force microscopy,” *RSC Adv.*, vol. 8, pp. 885-894, Jan. 2018, doi:10.1039/C7RA12037K

Özgeçmiş



Seval KINDEN

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde, doktora eğitimini ise Iowa Devlet Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Eskişehir Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde görev almaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları giyilebilir ve esnek sensörler, triboelektrik ve piezoelektrik tabanlı enerji hasatlayıcılardır.

E-Posta: soren@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.