



PAMUK İPLİKLER ÜZERİNE BİRİKTİRİLEN AZO İNCE FİLMLERİN YAPISAL ÖZELLİKLERİ VE ELEKTRİKSEL YANITLARININ İNCELENMESİ

Enes NAYMAN^{1*}

¹Bilecik Şeyh Edebali University, Söğüt Vocational School, 11600, Bilecik, Türkiye

Özet: Fonksiyonel tekstillerin geliştirilmesi, giyilebilir elektronik ve sensör teknolojilerindeki potansiyel uygulamaları nedeniyle giderek artan bir ilgi görmektedir. Bu çalışmada, Al katkılı ZnO (AZO) ince film kaplamaları, sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak pamuk ipliklerine uygulanmıştır. Katkısız ZnO kaplamalarına ek olarak, öncü çözeltideki Al öncü içeriği %2 ve %4 olacak şekilde ayarlanarak iki farklı AZO numunesi hazırlanmıştır. Kaplamaların morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenirken, elektriksel tepkileri analog-dijital dönüştürücü mikrokontrolör kart tabanlı bir ölçüm sistemi kullanılarak değerlendirilmiştir. SEM analizleri, katkısız ZnO kaplamalarının daha homojen ve sürekli bir yüzey morfolojisi sergilediğini, Al katkısının artmasının ise yüzey pürüzlülüğünü, kümelenmeyi ve film süreksizliklerini artırdığını ortaya koymuştur. Elektriksel ölçümler, katkısız ZnO numunelerinin kararlı ancak düşük elektriksel tepkiler gösterdiğini, daha yüksek Al katkılama seviyelerinin ise yapısal homojen olmama nedeniyle elektriksel kararlılığı olumsuz etkilediğini göstermiştir. Sonuçlar, düşük sıcaklık işleme koşulları altında tekstil alt tabakalara biriktirilen AZO ince filmler için yüzey düzgünlüğünün ve film sürekliliğinin elektriksel davranışı belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: İnce film, Nanomalzeme, Pamuk altlık, Sol-gel, Karakterizasyon, Elektriksel özellik

Investigation of the Structural Properties and Electrical Responses of AZO Thin Films Deposited on Cotton Yarns

Abstract: The development of functional textiles has gained increasing attention due to their potential applications in wearable electronics and sensor technologies. In this study, Al-doped ZnO (AZO) thin film coatings were deposited onto cotton yarns using the sol-gel dip-coating method. In addition to undoped ZnO coatings, two different AZO samples were prepared by adjusting the Al precursor content to 2 wt.% and 4 wt.% in the precursor solution. The morphological characteristics of the coatings were investigated by scanning electron microscopy (SEM), while their electrical responses were evaluated using an analog-to-digital converter microcontroller board-based measurement system. SEM analyses revealed that undoped ZnO coatings exhibited a more homogeneous and continuous surface morphology, whereas increasing Al doping led to enhanced surface roughness, agglomeration, and film discontinuities. Electrical measurements indicated that undoped ZnO samples showed stable but low electrical responses, while higher Al doping levels adversely affected electrical stability due to structural inhomogeneities. The results demonstrate that, for AZO thin films deposited on textile substrates under low-temperature processing conditions, surface uniformity and film continuity play a critical role in determining electrical behavior.

Keywords: Thin film, Nanomaterial, Cotton substrate, Sol-gel, Characterization, Electrical properties

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Bilecik Şeyh Edebali University, Söğüt Vocational School, 11600, Bilecik, Türkiye

E mail: enes.nayman@bilecik.edu.tr (E. NAYMAN)

Enes NAYMAN <https://orcid.org/0000-0002-3656-3126>

Gönderi: 15 Aralık 2025

Kabul: 12 Şubat 2026

Yayınlanma: 15 Mart 2026

Received: December 15, 2025

Accepted: February 12, 2026

Published: March 15, 2026

Cite as: Nayman, E. (2026). Investigation of the structural properties and electrical responses of AZO thin films deposited on cotton yarns. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(2), 702-708.

1. Giriş

Günümüz bilim ve teknoloji dünyasında, fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi ve farklı uygulama alanlarına entegrasyonu, disiplinler arası araştırmaların merkezinde yer almaktadır. Tekstil endüstrisi, geleneksel kullanımının ötesine geçerek, yüksek performanslı ve akıllı özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi için cazip bir platform sunmaktadır (Duan vd, 2025; Zhang vd, 2025). Özellikle son yıllarda nanoteknolojide kaydedilen çığır açıcı ilerlemeler, tekstil yüzeylerinin

özelliklerini kökten değiştirme potansiyeli taşımaktadır. Nanomalzemelerin üstün yüzey/hacim oranı ve benzersiz kuantum etkileri, polimer, seramik veya metal oksit bazlı ince filmlerin tekstil substratları üzerine uygulanmasıyla, bu malzemelere yeni işlevler kazandırmıştır (Gozukizil vd, 2024; Tanveer vd, 2025). Bu yenilikçi yaklaşım, tekstil ve nanomalzeme bilimlerini birleştirerek, giyilebilir elektronikler, sensörler ve enerji depolama cihazları gibi teknolojik açıdan ileri uygulamaların önünü açmaktadır (Bin Choi vd, 2025;



Chen, 2025).

Tekstil malzemeleri, kullanım amacına göre farklı lif türlerinden üretilebilmekte olup, bu liflerin yapısal ve kimyasal özellikleri nihai ürünün mekanik, termal ve elektriksel performansını belirlemektedir. İplikler, kumaş yapısının temel bileşenleri olarak, esneklik, mukavemet, tuşe ve işlenebilirlik gibi kritik özellikler sunar. Bu bağlamda, pamuk lifi, doğal yapısı, üstün hidrofilik özellikleri, yüksek mekanik dayanımı ve kolay işlenebilirliği sayesinde tekstil endüstrisinin en çok tercih edilen substratlarından biri olmuştur. Pamuk iplikleri, sahip oldukları gözenekli yapı ve yüksek yüzey alanı sayesinde, fonksiyonel ince filmlerin homojen bir şekilde biriktirilmesi için ideal bir taşıyıcı görevi görmektedir (Kong vd, 2025; Nayman vd, 2024).

Nanoteknolojik malzemeler, kütle malzemelerinden farklı olarak, optik, manyetik ve elektriksel özellikler sergileyebilirler. Bu da onları yarı iletken cihazlar ve koruyucu kaplamalar gibi ileri teknoloji uygulamaları için vazgeçilmez kılar (Shinde vd, 2025). İnce filmlerin tekstil iplikleri üzerine biriktirilmesi, tekstil yüzeylerinin doğal özelliklerini korurken, istenen fonksiyonel özellikleri (örneğin, iletkenlik, UV koruması, antibakteriyel aktivite) kazandırmak için etkili bir stratejidir (Ahmed vd, 2024). Sol-jel daldırma kaplama yöntemi, düşük maliyet, geniş alan kaplama yeteneği, oda sıcaklığına yakın işlem koşulları ve kimyasal bileşimin hassas kontrolü gibi avantajları sayesinde, karmaşık yüzey morfolojisine sahip tekstil substratları üzerine homojen ve iyi yapışmış ince filmlerin üretimi için özellikle uygundur (Sunil vd, 2025).

Nanomalzeme temelli ince film kaplamaların tekstil yüzeylerine entegrasyonu, geleneksel lif esaslı yapıların elektriksel ve işlevsel özelliklerini geliştirmek için etkili bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle ZnO gibi geniş bant aralıklı yarı iletken metal oksitlerin, uygun katkılama stratejileriyle modifiye edilmesi, esnek ve hafif tekstil altlıklar üzerinde kontrollü elektriksel davranışların elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Al katkısı, ZnO kristal yapısında taşıyıcı yoğunluğunu ve bant yapısını etkileyerek elektriksel yanıtın ayarlanmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Marasini vd, 2025; Yahi vd, 2025). Bununla birlikte pürüzlü morfolojiye sahip tekstil altlıklar üzerinde gerçekleştirilen kaplamalarda, katkı oranının yalnızca elektronik özellikleri değil, aynı zamanda film homojenliği, yüzey sürekliliği ve lif-film etkileşimini de belirgin biçimde etkilediği bilinmektedir (Tanveer vd, 2025). Literatürde, Al katkılı ZnO ince filmlerin tekstil tabanlı uygulamalarda potansiyel sunduğu görülmektedir.

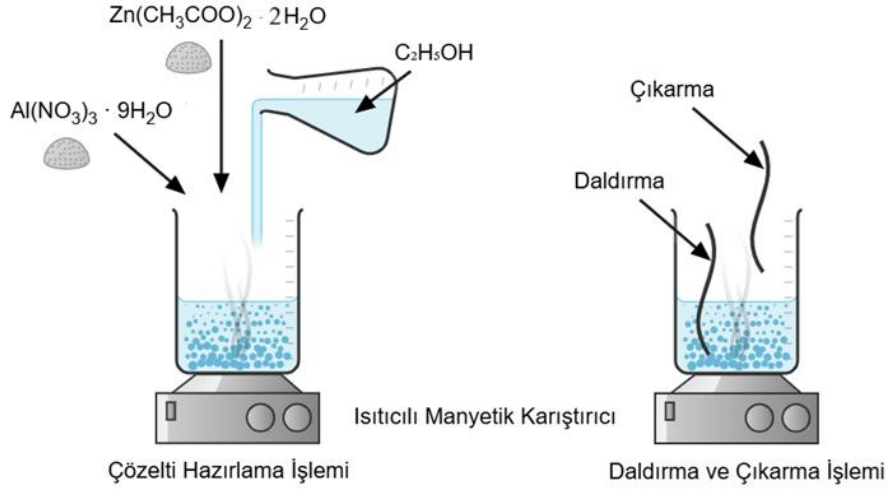
İnce filmlerde elektriksel özellikleri kontrol etmede temel bir yöntem olan katkılama, ana malzemenin kristal yapısına farklı iyonların belirli oranlarda dahil edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlem, malzemenin bant yapısında yeni enerji seviyeleri oluşturarak doğal iletkenliğin ve taşıyıcı yoğunluğunun ayarlanmasına imkân sağlar (Sharma vd, 2024; Sultana, Islam vd, 2024).

Bu çalışmada odaklanılan, Al katkılı ZnO (AZO) ince filmlerin pamuk iplikler gibi pürüzlü, esnek ve düşük sıcaklıkla sınırlı tekstil altlıkları üzerine sol-jel daldırma kaplama yöntemiyle biriktirilmesi ve katkı oranı-morfolojik süreklilik-elektriksel yanıt ilişkilerinin birlikte ve karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Literatürde AZO ince filmler çoğunlukla cam, silikon gibi rijit altlıklar üzerinde ve yüksek tavlama sıcaklıklarında araştırılmış olup, tekstil tabanlı ve düşük sıcaklık koşullarında elde edilen yapıların fotovoltaiik ve sensör gibi farklı elektriksel davranışları sınırlı düzeyde raporlanmıştır. Bu nedenle, katkı oranının yalnızca elektronik özellikler üzerindeki etkisinin değil, aynı zamanda film homojenliği ve sürekliliği üzerinden elektriksel yanıtı nasıl şekillendirdiğinin ortaya konulması önem taşımaktadır.

Bu bağlamda çalışmanın amacı, sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak pamuk iplikler üzerine biriktirilen katkısız ZnO ile kütlece %2 ve %4 Al katkılı ZnO (AZO) ince filmlerin morfolojik yapılarının ve düşük sıcaklık altında sergiledikleri elektriksel yanıtların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Al katkı oranındaki değişimin, ZnO tabanlı kaplamaların yüzey sürekliliği ve elektriksel kararlılığı üzerindeki etkileri SEM analizleri ve mikrokontrolör tabanlı gerilim ölçümleri ile incelenmiştir. Elde edilen bulguların, giyilebilir elektronik ve tekstil tabanlı sensör uygulamaları için uygun katkılama stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, pamuk iplikler üzerine Al katkılı ZnO (AZO) ince film kaplamalar, sol-jel daldırma kaplama yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Referans numune olarak katkısız ZnO ince film kaplamalar hazırlanmış; karşılaştırmalı inceleme amacıyla Al katkı oranı kütlece %2 ve %4 olacak şekilde iki farklı AZO çözeltisi oluşturulmuştur. Bu çalışmada katkılama terimi, ZnO esaslı çözeltide Al^{3+} iyonlarının belirli oranlarda ilave edilmesini ifade etmektedir. Çinko kaynağı olarak çinko asetat dihidrat ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$), >%99 saflıkta Sigma-Aldrich), alüminyum kaynağı olarak alüminyum nitrat nonahidrat ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, >%98 saflıkta Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Çözücü olarak etanol (C_2H_5OH , %99,9 saflıkta) tercih edilmiş, sol-jel sürecinde kompleks oluşturuucu ve monoetanolamin (MEA- Sigma Aldrich >%98 saflıkta) sol-jel sürecinde dengeleyici kimyasal olarak ilave edilmiştir (Bu, 2014; Moussa vd, 2021). Tüm kimyasallar herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır. Esnek ve iletken yüzeyler elde etmek için ticari amaçla kullanılan ham pamuk iplikleri altlık malzemedde kullanılmak üzere tedarik edilmiştir. Çözelti hazırlama ve kaplama sürecine ait deneysel düzenek şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çözelti hazırlama ve daldırarak kaplama işlemi süreci.

Çözeltiler, oda koşullarında çözücü, çinko ve alüminyum kaynakları ilave edilerek 50 ml'lik beherlerde karıştırıldıktan sonra MEA ilavesi gerçekleştirilmiştir. Ardından, homojen ve kararlı bir sol elde edebilmek amacıyla çözeltiler 60 °C'de 2 saat boyunca 300 rpm hızında ısıtıcı manyetik karıştırıcıda karıştırılmaya devam edilmiştir. Hazırlanan çözeltiler, daldırma kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

Kaplama öncesinde pamuk iplikler, yüzeydeki kir ve yabancı maddelerin uzaklaştırılması amacıyla distile su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur. Temizlenen iplikler, hazırlanan ZnO ve AZO çözeltilerine daldırılarak kaplanmış; her numune için beş tekrarlı daldırma-çıkarma döngüsü uygulanmıştır. Her daldırma sonrası ipliklerin fazla çözeltiden arındırılması sağlanmıştır. Kaplama işlemi tamamlanan numuneler, etüv içerisinde ince film oluşumunu stabilize etmek ve organik bileşenleri uzaklaştırmak amacıyla 150 °C'de 2 saat süreyle kurutulmuştur. Tavlama sıcaklığı, pamuk ipliklerin termal dayanım sınırları ve giyilebilir tekstil uygulamalarına uygunluk dikkate alınarak seçilmiştir. Bu düşük sıcaklık koşullarında elde edilen kaplamaların, tekstil altlıklar üzerinde Al katkılı AZO yapısında, kısmen amorf veya nanokristalin karakterde olduğu kabul edilmiştir.

Literatürde kullanılan altlık malzemelerin genellikle yüksek sıcaklıklara çıkılabilmesi ile daha sağlam kristal yapının oluşması mümkünken hem esnek hem de giyilebilir malzeme elde etmek açısından kullanılan pamuk ipliklerinin yüksek sıcaklıklara dayanamaması sebebi ile 150 °C tavlama sıcaklığı olarak seçilmiştir (Priyalakshmi vd, 2022).

ZnO ve AZO ince film kaplı pamuk ipliklerin elektriksel yanıtlarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla, mikrokontrolör kart tabanlı bir analog-sayısal dönüştürücü (ADC) kullanılarak gerilim tabanlı ölçümler gerçekleştirilmiştir. İnce film kaplı iplikler, sabit bir referans direnç ile birlikte bir gerilim bölücü devresi oluşturacak şekilde bağlanmış ve sistem, USB üzerinden beslenen mikrokontrolör kartı aracılığıyla 5 V DC sabit

gerilim altında çalıştırılmıştır. Sensörlerin elektriksel dirençlerinde meydana gelen değişimler, gerilim bölücü devresinin çıkışında ölçülen gerilim seviyelerinde farklılıklara yol açmıştır. Bu gerilim seviyeleri, mikrokontrolör kart üzerindeki 10 bit çözünürlüklü ADC tarafından sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen dijital veriler, ADC çözünürlüğü dikkate alınarak 0-5 V aralığına karşılık gelecek şekilde gerilim değerlerine (V) dönüştürülmüştür. ZnO ile AZO ince film kaplı pamuk ipliklerin sabit besleme gerilimi altında sergiledikleri elektriksel yanıt karakteristikleri bu gerilim değerleri üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

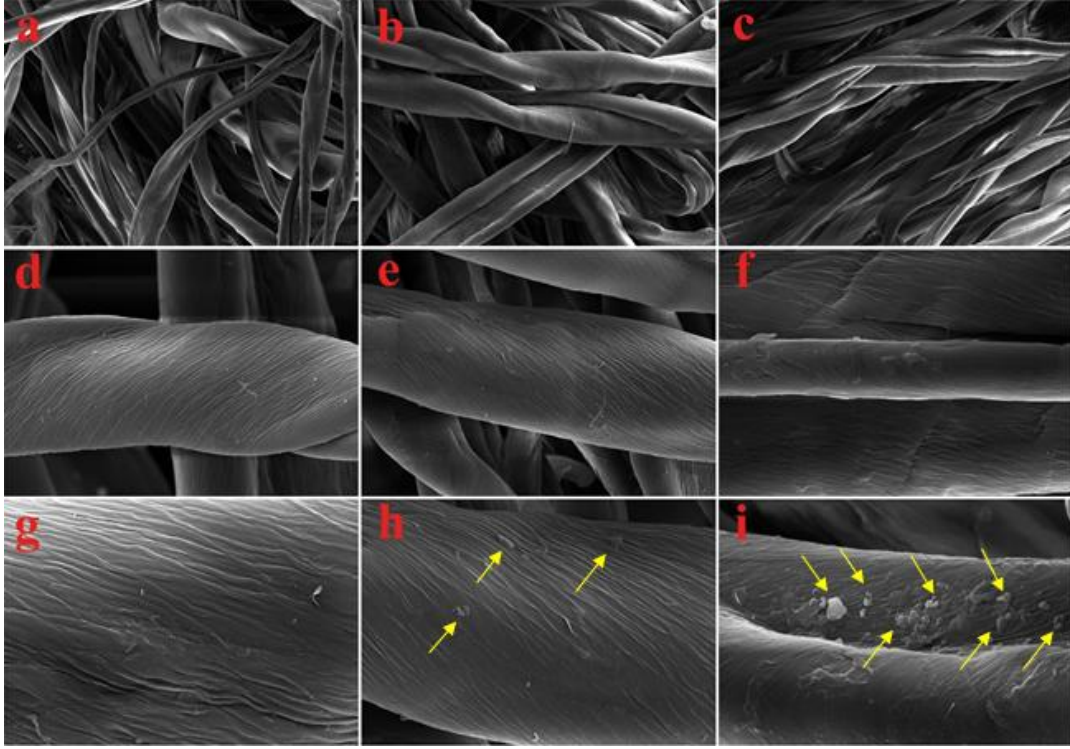
3. Bulgular

3.1. Karakterizasyon

Şekil 2'de verilen SEM görüntüleri, katkısız ZnO ile Al katkı oranı kütlece %2 ve %4 olan AZO ince film kaplamaların pamuk iplik yüzeyindeki morfolojik özelliklerini yaklaşık 1KX (Şekil 2a, 2b, 2c), 5KX (Şekil 2d, 2e, 2f), ve 10KX (Şekil 2g, 2h, 2i) büyütmelerinde göstermektedir. Katkısız ZnO numuneleri (Şekil 2a, 2d, 2g), tüm büyütme seviyelerinde lif yüzeyini nispeten homojen, sürekli ve düzgün bir şekilde kaplayan bir film morfolojisi sergilemiştir. Film boyunca belirgin çatlaklar veya büyük ölçekli kümelenmeler gözlenmemiş olup, kaplamanın iplik yüzeyine iyi bir uyum sağladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, sol-jel daldırma yöntemiyle elde edilen ZnO kaplamalar için beklenen bir davranış olarak değerlendirilmektedir. Al katkı oranı kütlece %2 olan AZO numunelerinde (Şekil 2b, 2e, 2h), katkısız ZnO'ya kıyasla yüzey morfolojisinde belirgin bir heterojenlik artışı gözlenmiştir. Orta ve yüksek büyütmelerde, lif yüzeyi üzerinde yerel topaklanmalar, artan yüzey pürüzlülüğü ve film kalınlığında küçük de olsa düzensizlikler dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, film bütünlüğü genel olarak korunmuş olup kaplamanın lif yüzeyini büyük ölçüde sardığı görülmektedir. Bu morfolojik değişimler, ZnO kristal kafesine ikame edilen Al³⁺ iyonlarının çekirdeklenme ve büyüme süreçlerini

etkilemesi sonucu ortaya çıkan yapısal düzensizliklerle ilişkilendirilmektedir. Kütlece %4 Al katkılı AZO numunelerinde (Şekil 2c, 2f, 2i) ise yüzey morfolojisindeki bozulmalar daha belirgin ve yaygın hâle gelmiştir. Düşük büyütmelerde dahi, film yüzeyinde iri topaklanmalar, kaplama sürekliliğinde belirgin kopmalar ve boşluklu bölgeler gözlenmektedir. Yüksek

büyütmelerde ise, kaba yüzey topografyası, düzensiz parçacık kümeleri ve film-altlık ara yüzeyinde zayıf uyum gösteren bölgeler ortaya çıkmaktadır. Bu durum, yüksek Al katkı oranının ZnO matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılmakta zorlandığını ve aşırı katkılama sonucu bölgesel Al-zengin bölgelerin oluştuğunu düşündürmektedir.



Şekil 2. ZnO ve AZO numunelerin SEM analizleri.

Genel olarak SEM bulguları, Al katkı oranındaki artışın AZO ince filmlerin morfolojik homojenliğini olumsuz yönde etkilediğini ve belirli bir katkı seviyesinin üzerinde film sürekliliği ile yüzey bütünlüğünün bozulduğunu göstermektedir. Özellikle tekstil gibi pürüzlü ve esnek altlıklar üzerinde gerçekleştirilen düşük sıcaklıklı kaplama işlemlerinde, yüksek Al katkı oranlarının topaklanma eğilimini artırarak kaplama kalitesini sınırlandırdığı değerlendirilmektedir. Bu morfolojik değişimlerin, çalışmada gözlenen elektriksel yanıt farklılıkları üzerinde belirleyici bir rol oynadığı düşünülmektedir.

3.1.2. Elektriksel Ölçümler

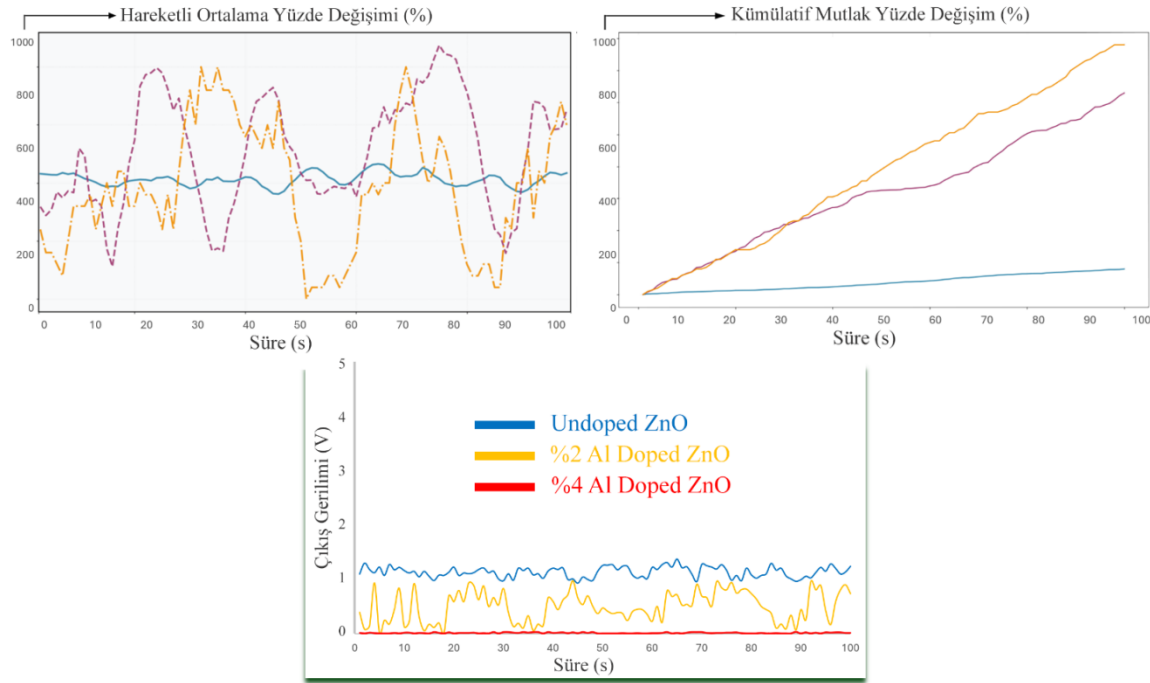
Şekil 3'te ZnO ince film kaplı pamuk iplik numuneleri, ölçümler boyunca dar ve tekrarlanabilir bir gerilim aralığında (V) yanıt vermiş olup, elektriksel yanıtın zamana bağlı olarak belirgin dalgalanmalar göstermediği gözlenmiştir. Ölçülen gerilim değerlerinin genel olarak düşük seviyelerde kalması, 150 °C gibi düşük bir tavlama sıcaklığı altında üretilen ZnO kaplamaların yüksek özdirençli bir karakter sergilediğini ve sınırlı iletim yollarına sahip olduğu çıkarımı yapılabilir. Bununla birlikte, SEM analizlerinde gözlenen homojen ve süreklilik gösteren film morfolojisi, ölçülen gerilim yanıtının kararlı ve tekrarlanabilir olmasını

desteklemiştir. Kütlece %2 Al katkılı AZO numunelerinde, ölçülen gerilim değerlerinin katkısız ZnO numunelerine kıyasla daha geniş bir aralıkta değiştiği ve zamanla belirgin dalgalanmalar sergilediği tespit edilmiştir. Bu durum, Al katkısının ZnO matrisi içerisinde serbest taşıyıcı yoğunluğunu artırma potansiyeline işaret etmesine rağmen, SEM görüntülerinde gözlenen yüzey pürüzlülüğü ve lokal kümelenmelerin iletim yollarında süreksizliklere yol açmasıyla ilişkilendirilmektedir. Dolayısıyla %2 Al katkılı AZO numunelerinde, kısmi bir iletim artışı potansiyeli bulunmakla birlikte, morfolojik düzensizliklerin elektriksel yanıtın kararlılığını sınırlandırdığı değerlendirilmektedir. Kütlece %4 Al katkılı AZO numunelerinde ise ölçülen gerilim yanıtının belirgin şekilde zayıfladığı ve kararsız bir profil sergilediği gözlenmiştir. Bu numunelerde elde edilen gerilim değerleri, ölçümler boyunca sıfıra yakın seviyelerde kalmış ve tekrarlanabilir bir elektriksel yanıt davranışı ortaya koymamıştır. SEM analizlerinde belirginleşen iri yığınlar, boşluklu yapı ve film sürekliliğinin kaybı, iplik yüzeyi üzerinde sağlıklı bir elektriksel temasın kurulmasını engellemiş ve iletim yollarının kopmasına neden olmuştur. Yüksek Al katkı oranının ZnO matrisi içerisinde homojen şekilde dağılamaması sonucu aşırı katkılama ya bağlı yapısal

kusurların arttığı ve bunun da elektriksel yanıtı olumsuz yönde etkilediği çıkarımı yapılabilir.

Genel olarak elektriksel ölçüm sonuçları, AZO ince filmlerin elektriksel yanıtı üzerinde negatif yönlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çalışmadaki düşük katkı seviyelerinde taşıyıcı yoğunluğundaki artış potansiyeli elektriksel yanıtı her ne kadar desteklese de elektriksel uygulamalarda kullanılamayacak derecede stabil olmayan bir grafik sergilemiştir. Yüksek katkı oranlarında ortaya çıkan morfolojik bozulmalar ve film süreksizlikleri, iletim davranışını daha baskın şekilde sınırlamıştır. Bu olumsuz etkinin, rijit olmayan ve sürekli değişken bir yüzey morfolojisine sahip olmasının yanı

sıra kaplama çözeltilerini kısmen absorbe edebilen altlık malzemenin yapısal özelliklerinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, nispeten düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen tavlama işleminin özellikle AZO kaplamalarda beklenen kristal düzenin tam olarak gelişmesini sağlayacak düzeyde etkili olmamış olabileceği ve bu durumun da elektriksel yanıt üzerindeki sınırlayıcı etkenlerden biri olduğu düşünülmektedir. Bu bulgular, tekstil tabanlı AZO ince filmlerde katkı oranının dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerektiğini ve yüzey homojenliğinin güvenilir elektriksel yanıt açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Numunelerin elektriksel özelliklerinin ADC olarak ve yüzdesel ölçümleri.

4. Tartışma

ZnO ve AZO ince film kaplı pamuk ipliklerin elektriksel yanıtları, gerilim tabanlı ölçümler ile SEM analizleri birlikte değerlendirildiğinde, elektriksel davranışın katkı oranı kadar film sürekliliği ve yüzey morfolojisi tarafından da etkilendiği görülmektedir. Esnek ve rijit olmayan tekstil altlıkları üzerinde gerçekleştirilen kaplamalarda, morfolojik düzensizliklerin iletim yolları üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır. Katkısız ZnO kaplı ipliklerde ölçülen gerilim yanıtlarının dar ve tekrarlanabilir bir aralıkta seyretmesi, SEM analizlerinde gözlenen homojen ve sürekli film yapısı ile doğrudan ilişkilendirilebilir. Film sürekliliğinin korunması, iplik yüzeyi boyunca kesintisiz iletim yollarının oluşmasını sağlamış ve bu durum sabit besleme gerilimi altında kararlı bir elektriksel yanıt olarak yansımıştır. Buna karşın düşük tavlama sıcaklığı, kaplamaların yüksek özdirençli bir karakter sergilemesine ve ölçülen gerilim değerlerinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. %2 Al katkılı AZO

numunelerinde ölçülen gerilim yanıtlarının daha geniş bir aralıkta ve dalgalı bir profil sergilemesi, Al katkısının beklenen taşıyıcı artışı etkisinin, yüzey pürüzlülüğü ve lokal kümelenmeler nedeniyle oluşan iletim süreksizlikleri tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Bu durum, katkılamamanın olumlu etkisi ile morfolojik düzensizliklerin olumsuz etkisi arasındaki rekabetin elektriksel yanıt üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Al katkı oranının %4'e çıkarılmasıyla birlikte elektriksel yanıt belirgin biçimde zayıflamış ve ölçülen gerilim değerleri çoğunlukla sıfıra yakın seviyelerde kalmıştır. SEM analizlerinde gözlenen film sürekliliğinin kaybı, iri yığınlar ve boşluklu yapı, iplik yüzeyi üzerinde sağlıklı elektriksel temasın kurulmasını engelleyerek iletim yollarının kopmasına neden olmuştur. Bu bulgu, aşırı katkılamamanın morfolojik bozulma yoluyla elektriksel performansı olumsuz etkilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, ZnO ve AZO ince film kaplı pamuk ipliklerin elektriksel yanıt davranışları, katkı oranı ile birlikte film morfolojisi ve

sürekliliğinin ortak etkisi altında şekillenmektedir. Literatür ile kıyaslama yapıldığında ise AZO ince filmlerin elektriksel özellikleri çoğunlukla cam veya benzeri rijit altlıklar üzerinde ve yüksek tavlama sıcaklıklarında raporlanmış olup, artan Al katkı oranlarıyla iletkenliğin iyileştiği belirtilmektedir (Abbas vd, 2023; Ahmed vd, 2023; Jiménez-González vd, 1998). Buna karşın bu çalışmada, pamuk iplikler gibi esnek ve düşük sıcaklıkla sınırlı tekstil altlıkları üzerinde, Al katkı oranındaki artışın film homojenliğini bozarak elektriksel kararlılığı sınırladığı görülmüştür. Bu farklılık, tekstil altlıkların pürüzlü ve absorptif yapısı ile düşük sıcaklık işlem koşullarının, AZO ince filmlerin yapısal ve elektriksel davranışları üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. İşlem sıcaklığı, tavlama süresi ve öncül çözelti stabilitesi gibi parametreler, özellikle düşük sıcaklık kısıtları altında belirleyici rol oynamaktadır. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda karbon fiber iplikler ve cam elyaflar gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı esnek altlıklar kullanılarak daha yüksek tavlama sıcaklıklarının denenmesi önerilmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, pamuk iplikler üzerine sol-jel daldırma kaplama yöntemiyle üretilen ZnO ve AZO ince filmlerin yapısal ve elektriksel özellikleri, %2 ve %4 Al katkı oranları dikkate alınarak incelenmiştir. SEM analizleri, ZnO kaplamaların daha homojen ve sürekli bir yüzey morfolojisi sergilediğini; Al katkı oranının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün, topaklanmaların ve film süreksizliklerinin belirginleştiğini ortaya koymuştur. Elektriksel ölçümlerde, bu morfolojik değişimlerle uyumlu olarak, katkısız ZnO numunelerinin daha kararlı bir elektriksel yanıt verdiği görülmüştür. Al katkı oranlarının artması ile elektriksel iletkenlik kararsız bir hareket göstermeye başlamıştır. Bu negatif etkinin rijit olamayan, sürekli değişken bir yüzeye sahip olan ve çözelti de absorbe etme yeteneğine sahip olan altlık malzemelerden kaynaklı olabileceği düşünülmüştür. Ayrıca düşük sıcaklıklarda uygulanan tavlama işleminin istenilen kristal yapıyı oluşturmak için yeterli etkiyi göstermeme olasılığı da bir diğer faktör olarak öne çıkmaktadır. Sonuçlar, pamuk ipliklerin sol-gel daldırarak kaplama yöntemi ile 150°C'de tavlanaarak elde edilen AZO ince filmlerde yüzey homojenliği ve film sürekliliğinin, düşük sıcaklık koşulları altında elektriksel davranışı belirleyen temel faktörler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda çalışma, AZO kaplamaların giyilebilir elektronik uygulamalarında kullanılabilmesi için katkı oranı ve işlem parametrelerinin iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarın katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	E.N.
K	100
T	100
Y	100
VTI	100
VAY	100
KT	100
YZ	100
KI	100
GR	100
PY	100
FA	100

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

Çatışma Beyanı

Yazar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Kaynaklar

- Abbas, S. I., Alattar, A. M., & Al-Azawy, A. A. (2023). Enhanced ultraviolet photodetector based on Al-doped ZnO thin films prepared by spray pyrolysis method. *Journal of Optics* 2023 53:1, 53(1), 396-403. doi:10.1007/S12596-023-01164-3
- Ahmed, G., Mohamed, W. S., Hasaneen, M. F., Ali, H. M., & Ibrahim, E. M. M. (2023). Optical, structural, electrical and photocatalytic properties of aluminum doped zinc oxide nanostructures. *Optical Materials*, 140, 113880. doi:10.1016/J.OPTMAT.2023.113880
- Ahmed, S., Mazumdar, A. K. M. A. R., Syduzzaman, M., & Mahmud, M. S. (2024). UV Protection and Antimicrobial Properties of Textiles Using Nanotechnology. *Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials, Part F3464*, 191-232. doi:10.1007/978-981-97-2696-7_8/FIGURES/6
- Bin Choi, S., Veeralingam, S., Khanh, T. D., Choi, J. S., Kishore, K. R., Jung, S. B., & Kim, J. W. (2025). Rapid-response hybrid piezo-triboelectric pressure sensor using all-fabric materials for enhanced sensing and power generation. *Nano Energy*, 140, 111000. doi:10.1016/J.NANOEN.2025.111000
- Bu, I. Y. Y. (2014). Sol-gel production of aluminium doped zinc oxide using aluminium nitrate. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 27(1), 19-25. doi:10.1016/J.MSSP.2014.06.011
- Chen, C. (2025). Hierarchical porous MXene/CNT composite fiber supercapacitors with cryogenic-tolerant performance for wearable energy storage devices. *Chemical Engineering Journal*, 520, 165708. doi:10.1016/J.CEJ.2025.165708
- Duan, Y., Sun, Z., Zhang, Q., Dong, Y., Lin, Y., Ji, D., & Qin, X. (2025).

- Constructing electrospun 3D liquid metal adhesion channel on stretchable yarns for broad-range strain-insensitivity smart textiles. *Nature Communications* 2025 16:1, 16(1), 6362-. doi:10.1038/s41467-025-61444-3
- Gozukizil, M. F., Nayman, E., Temel, S., & Gokmen, F. O. (2024). Comparison of gas sensing performances in various yarn types coated with polyaniline. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2024 35:7, 35(7), 529-. doi:10.1007/S10854-024-12106-5
- Jiménez-González, A. E., Soto Urueta, J. A., & Suárez-Parra, R. (1998). Optical and electrical characteristics of aluminum-doped ZnO thin films prepared by solgel technique. *Journal of Crystal Growth*, 192(3-4), 430-438. doi:10.1016/S0022-0248(98)00422-9
- Kong, L., Zhang, F., Wang, L., Ayiti, W., & Yao, Q. (2025). Nanocrystalline conductive thin films prepared by a novel micro-liquid droplet infiltration method on the surface of cotton yarns. doi:10.2139/SSRN.5464473
- Marasini, S., Pandey, S., Ram Ghimire, R., & Subedi, P. (2025). Effect of Aluminum Doping on the Optical, Electrical, and Gas Sensing Properties of ZnO Thin Films. *Progress in Physics of Applied Materials*, 5(1), 1-9. doi:10.22075/PPAM.2024.35384.1118
- Moussa, N. Ben, Lajnef, M., Jebbari, N., Mahut, F., Bayle, F., Villebasse, C., ... Herth, E. (2021). ZnO and Al-doped ZnO Sol-Gel Properties. *2021 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS and MOEMS, DTIP 2021*. doi:10.1109/DTIP54218.2021.9568674
- Nayman, E., Gözükcıl, M. F., & Usta, İ. (2024). Deposition of CdO Semiconductors on yarns by Dip Coating Method and Gas Sensor Applications. *Tekstil ve Konfeksiyon*. 34:2, 34(2), 117-126, 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1178133
- Priyalakshmi Devi, K., Goswami, P., & Chaturvedi, H. (2022). Fabrication of nanocrystalline TiO₂ thin films using Sol-Gel spin coating technology and investigation of its structural, morphology and optical characteristics. *Applied Surface Science*, 591, 153226. doi:10.1016/J.APSUSC.2022.153226
- Sharma, N., & Kumar, R. (2024). Zinc doped TiO₂ thin films for ethanol detection. *Inorganic Chemistry Communications*, 162, 112224. doi:10.1016/J.INOCHE.2024.112224
- Shinde, P. G., Wani, S. M., Kotkar, M. T., Patil, A. G., & Jadhav, K. M. (2025). Enhanced surface morphology, electrical and optical properties of ZnO thin film deposited by the doctor blade method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2025 36:24, 36(24), 1566-. doi:10.1007/S10854-025-15638-6
- Sultana, R., Islam, K., & Chakraborty, S. (2024). Tuning Optical and Electrochemical Properties of Nb₂O₅ Thin Films via WO₃ Doping. *Transactions on Electrical and Electronic Materials* 2024 26:1, 26(1), 48-59. doi:10.1007/S42341-024-00572-X
- Sunil, A., Gopika, M. S., Jayasudha, S., & Nair, P. B. (2025). Enhanced Photocatalytic and Antimicrobial Activity of Zn Doped TiO₂ Thin Films Synthesized via Sol-Gel Dip Coating Method. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 2025, 1-17. doi:10.1007/S10904-025-04058-Y
- Tanveer, Z., Arhum, Usman, M., Tanveer, B., Iqbal, H., Cheema, S. A., ... Javaid, M. A. (2025). Advancing conductive cellulosic textiles: Structural, optical and thermoelectric enhancements via innovative metallic oxide deposition. *International Journal of Biological Macromolecules*, 305, 141418. doi:10.1016/J.IJBIOMAC.2025.141418
- Yahi, A. H., Kacha, A. H., Anani, M., & Salim, K. (2025). Optimizing Al-Doped ZnO Thin Films: Structural, Optical, and Electrical Enhancements for Solar Cells. *Physics of the Solid State* 2025 67:4, 67(4), 259-268. doi:10.1134/S1063783425600451
- Zhang, W., Luan, S., Fang, Y., Zhu, L., Yang, Y., Tian, M., ... Miao, J. (2025). Dynamic reversible thermochromic camouflage smart textiles for temperature visualized personal healthcare and thermal management. *Chemical Engineering Journal*, 523, 168746. doi:10.1016/J.CEJ.2025.168746