



**ESNEK GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN AEROSOL BASKI TEKNİĞİ İLE
GÜMÜŞ NANOTEL ELEKTROTLARIN GELİŞTİRİLMESİ**

Berk SERBEST

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FOTONİK BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Berk SERBEST

20/07/2024

ESNEK GÜNEŞ HÜCRELERİ İÇİN AEROSOL BASKI TEKNİĞİ İLE GÜMÜŞ NANOTEL ELEKTROTLARIN GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berk SERBEST

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Aerosol baskı tekniği ile esnek alttaş üzerine gümüş nanotel (AgNT) elektrot geliştirilmesi için yapılan bu çalışmada elektrot numunelerinden elde edilebilecek en düşük elektriksel tabaka direnci ve görünür bölgede en yüksek optik geçirgenlik sonucuna ulaşılması hedeflenmiştir. Gümüş nanotellerin etanol içindeki süspansiyonu deneysel mürekkep olarak ve esnek alttaş olarak polietilen naftalat (PEN) ve poliimid (PI) malzeme ile çalışılmıştır. Optik mikroskop ile baskı kalitesi incelendi, dört noktadan kontak istasyonu ile elektriksel tabaka direnci ölçümü, mor ötesi ve görünür bölge (UV-Vis.) spektrometresi ile optik yüzde geçirgenlik değerleri ölçüldü, taramalı elektron mikroskobu yardımıyla nanotellerin ayrıntılı görüntülenmesi yapıldı. Bu çalışmada, esnek alttaşlar üzerinde esnek şeffaf iletken AgNT elektrotlar üretilerek baskı katman sayısının elektrotların şeffaflığı ve elektriksel tabaka direnci üzerindeki etkisi araştırıldı. PEN alttaş için 3 kat baskılı elektrotların tabaka direnci 30,96 ohm/kare ve görünür bölgede ortalama %78 şeffaflığa sahiptir. PI alttaş için, 3 katmanlı 200 °C'de tavlanan numune, 26,20 Ω/kare elektriksel direnç ve görünür bölgede %83,2 optik geçirgenlik değerlerine sahiptir, 4 kat 200 °C'de tavlanan numune %82,5 geçirgenlik ve 11,63 Ω/kare elektriksel direnç ve son olarak 5 kat olan numune 6,76 Ω/kare elektriksel dirence ve optik geçirgenlik %82'dir.

Bilim Kodu : 20217
Anahtar Kelimeler : Aerosol baskı, gümüş nanotel, AgNT, esnek,
baskılı elektronik
Sayfa Adedi : 31
Danışman : Doç. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ

DEVELOPMENT OF SILVER NANOWIRE ELECTRODES BY AEROSOL PRINTING
TECHNIQUE FOR FLEXIBLE SOLAR CELLS

(M. Sc. Thesis)

Berk SERBEST

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

The objective of this study was to develop silver nanowire (AgNW) electrodes on flexible substrates using the aerosol printing technique. The goal was to achieve the lowest electrical sheet resistance and the highest optical transmittance in the visible region that can be obtained from the electrode samples. The suitability of silver nanowire suspension in ethanol as an experimental ink was investigated, with polyethylene naphthalate (PEN) and polyimide (PI) materials as flexible substrates. The printing quality was examined with an optical microscope, the electrical layer resistance was measured with a four-probe station, the optical percentage transmittance values were measured with an ultraviolet and visible region (UV-Vis.) spectrometer, and detailed imaging of the nanowires was made with the help of a scanning electron microscope. The objective of this study was to produce flexible transparent conductive AgNW electrodes on flexible substrates and to investigate the effect of the number of printing layers on the transparency and surface resistance of the electrodes. The sheet resistance of the three-layer printed electrodes on the PEN substrate is 30,96 Ω /sq, with an average transparency of 78% in the visible region. For the PI substrate, the 3-layer sample annealed at 200 °C exhibits an electrical resistivity of 26,20 Ω /sq and an optical transmittance of 83,2% in the visible region. The 4-layer sample annealed at The 200 °C sample exhibited 82,5% transmittance and an electrical resistance of 11,63 Ω /sq. The 5-layer sample demonstrated an electrical resistance below 6,76 Ω /sq and an optical transmittance of 82%.

Science Code : 20217

Key Words : Aerosol printing, silver nanowire, AgNW, flexible,
printed electronics

Page Number : 31

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ

TEŞEKKÜR

Tez danıőmanım Sayın Doç. Dr. Nihan AKIN SÖNMEZ'e, çalışmanın yapılabilmesi için sağladığı olanaklar için Fotonik Uygulama ve Araőtırma Merkezi Müdürü Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e, çalışmada katkısı bulunan değerli çalışma arkadaşlarıma, TÜBİTAK'a 121F379 nolu ve Strateji ve Bütçe Başkanlığı'na 2019K12-149045 nolu projeler ile verilen destek için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	3
2.1. Gümüş Nanotel (AgNT) Malzemesi ve Elektrot Özellikleri	3
2.2. Üretim ve Karakterizasyon Sistemleri.....	6
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	11
3.1. Numunelerin Üretilmesi.....	11
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	13
4.1. Esnek Alttaş Seçilmesinde Optik Geçirgenliğin Durumu.....	13
4.2. PEN Alttaş Üzerine Farklı Sayıda Katman Yapılarak Elde Edilen Sonuçları ...	14
4.3. PI Alttaş Üzerine Farklı Sayıda Katman Ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlama Yapılarak Elde Edilen Sonuçlar.....	16
4.4. Numunelerin Kalınlık Ölçümü	20
4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Numunelerin İncelenmesi	21
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	25
KAYNAKLAR.....	27

ÖZGEÇMİŞ..... 31

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Aerosol Jet Yazıcı sistem üretim parametreleri.....	13
Çizelge 4.1. Farklı Esnek Alttaşların Optik Geçirgenlik Durumları.....	15
Çizelge 4.2. PI alttaş numunelerinin sonuç tablosu.....	20
Çizelge 5.1. Aerosol baskı yöntemi ve diğer yöntemlerle üretilen numunelerin karşılaştırılması.....	23

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrotlar için oluşturulan ızgara geometri.....	12
Şekil 4.1. Farklı Esnek Alttaşların Optik Geçirgenlik Durumları.....	14
Şekil 4.2. Numuneleri Optik Geçirgenlikleri.....	15
Şekil 4.3. PI malzemesinin boş ve 1, 2 ve 3 katman baskı yapıldıktan sonra numunelerin optik geçirgenlikleri.....	16
Şekil 4.4. Farklı katman sayısı ve tavlama sıcaklığı denemelerinin optik Geçirgenliğe etkisi.....	17
Şekil 4.5. PI malzemesinin boş ve 1, 2 ve 3 katmanlı elektrotların optik geçirgenlikleri.....	18

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Aerosol Jet Yazıcı Sistemi ve Çalışma Şekli.....	6
Resim 2.2. Lake Shore 7700 Serisi Yüksek Empedans Hall Etkisi Sistemi.....	6
Resim 2.3. Mor Ötesi - Görünür Böl. Spektrofotometre, Perkin Elmer Lambda 2S....	7
Resim 2.4. Optik Mikroskop Leica DM6000 M.....	8
Resim 2.5. Profilometre Veeco Dektak 150.....	9
Resim 2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu JEOL JSM-6060 LV.....	10
Resim 4.1. PEN numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	14
Resim 4.2. PI numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	14
Resim 4.3. Numunenin şeffaflık durumu (solda) ve farklı sıcaklıklarda soldan sağa sırayla 200 °C, 250 °C ve 300 °C’de tavlanan numunelerin durumu (sağda).....	19
Resim 4.4. PI numunelerin kalınlık ölçümünde örnek cihaz ekran görüntüleri (solda), kalınlık ölçümü için hazırlanan numune örneği (sağda).....	20
Resim 4.5. Taramalı elektron mikroskobu ile numunelerin incelenmesiyle nanotel boylarının belirlenmesi.....	22

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Ω	Ohm Elektriksel Direnç Birimi
Ω/kare	Ohm/kare Elektriksel Direnç Birimi
mm	Milimetre
nm	Nanometre metrenin milyarda biri uzunluk birimi
μm	Mikrometre metrenin milyonda biri uzunluk birimi
%T	Optik Yüzde Geçirgenlik
R_s	Tabakanın Elektriksel Direnci
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece Sıcaklık Birimi
sccm	Bir dakikada standart bir santimetreküp akış birimi
kHz	Kilo Hertz Frekans Birimi
mL	Mililitre Hacim Birimi
psi	Basınç Birimi

Kısaltmalar

Açıklamalar

AgNT	Gümüş Nanotel
FOM	Başarım Ölçütü
ITO	İndiyum Katkılı Kalay Oksit
PEN	Poli Etilen Naftalat
PI	Poliimid
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Şeffaf iletken malzemeler, günümüzde birçok kullanım alanına sahiptir. Güneş hücrelerinde dokunmatik ekranlarda toplayıcı elektrot, elektro-optik sistem pencerelerinde ısıtıcı (buğubuz çözücü) gibi pek çok uygulaması vardır. Geleneksel olarak metaller tarafından iyi bir şekilde yerine getirilmiştir. Bu bölümde şeffaf elektrot malzemelerinden ve bu çalışmaya konu olan gümüş nanotel hakkında karşılaştırmalı bilgiler verildi. Başlıca şeffaf iletken malzemeler metal oksitler, karbon nanotüp, grafen, iletken polimerler, metal nanoteller ve metal ızgaralardır. Şeffaf iletken katkılı metal oksit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. İndiyum katkılı kalay oksit (ITO), %80 optik geçirgenliğiyle uygulamada en yaygın malzemedir bunun dışında florin katkılı kalay oksit, alüminyum katkılı çinko oksit, indiyum katkılı çinko oksit metal oksit malzemeler araştırmalara konu olmaktadır. Grafenin düşük maliyetle sentezlemek için yöntemler araştırılmaktadır ve rulo yöntemi ile uygulanabilirliği oldukça arttırıldı. Grafen üretimindeki ilerlemelere rağmen, grafen elektrotlar, ITO ile karşılaştırıldığında zayıf tutunma ve zayıf elektrik iletkenliği gibi sorunların çözülmesi beklenmektedir. Karbon nanotüpler, giyilebilir elektronik alanında, insanların sağlık durumlarının izlenmesi için tekstil ipliklerinde son derece uyumlu olan ve yüksek kalitede elektrokardiyografi sinyali ölçen elektrotlar olarak araştırılmaktadır. Karbon nanotüp elektrotların, gürültü miktarının düşük oluşu ve kararlılıkları çalışmalarda gösterilmektedir. Elektrotların dayanıklılık testi, yıkamaya karşı sağlamlık ve yeniden kullanılabilir ve sürdürülebilir uygulamalar için kullanılabilir olabileceği düşünülmektedir [1-3].

Metalik basılabilir ızgara yapılar, maskeli fotolitografi veya maskeli baskı ya da maskesiz olan litografi, lazer kazıma veya doğrudan baskı yöntemleriyle üretilebilirler. Metal ızgaralı elektrotlar, malzemelerin katı bir yüzeyden lazer ışını ışınlanması ile uzaklaştırılması işlemidir. Bu çalışmada kullanılan doğrudan baskı yöntemlerinden biri olan aerosol jet baskı ile metal ızgara yapıların 10 µm çizgi genişliğine kadar üretimi mümkündür. Nanoparçacık içeren mürekkeplerle yapılan metal ızgara elektrotlarda çizginin kapladığı alanda optik geçirgenliğin düşmesi nedeniyle bu çalışmada nanotel parçacıklarla çalışıldı tel yapısında olan parçacıklar sebebiyle alt katmanla ara yüzey alanının fazla oluşu ve optik geçirgenliğinin daha yüksek olmasıyla öne çıkmaktadır [4, 5].

Bu çalışmada aerosol jet baskı yöntemiyle elde edilen gümüş nanotel (AgNT) ızgara deseni esnek alttaşlar üzerine uygulanarak şeffaf ve iletken elektrotlar elde edilmesi araştırıldı. Bu çalışmada aerosol jet baskı yöntemiyle elde edilen gümüş nanotel (AgNT) ızgara deseni esnek alttaşlar üzerine uygulanarak şeffaf ve iletken elektrotlar elde edilmesi araştırıldı, 57,68 ohm/kare'lik bir tabaka direncine sahip cam alt tabakalar üzerinde yüksek şeffaflıkta AgNW elektrotlar ve hem yapısal sağlık izleme hem de insan fizyolojisi tespiti için minyatürleştirilmiş gerilim sensörleri üzerine bir çalışmayla literatüre katkıda bulunmuştur. Baskı döngülerinin 1'den 7'ye çıkarılmasının, basılan AgNW'nin elastomer alt tabaka üzerindeki direncini 1,2 k Ω /cm'den 0,046 k Ω /cm'ye düşürdüğünü gösterdiler. Bu çalışmalara ek olarak, aerosol baskı ile üretilen AgNT elektrotlarının çeşitli optoelektronik ve biyomedikal cihazlarda kullanımı üzerine güncel çalışmalar bulunmaktadır [5-7].

Bu çalışmada, ilk bölümde şeffaf elektrot olarak kullanılabilen malzemeler hakkında bilgi verildi. İkinci bölümde gümüş nanotellerin özellikleri, üretim yöntemleri, kullanım alanlarından, çalışmada uygulanan üretim ve karakterizasyon yöntemlerinden kısaca anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde numunelerin üretim aşamaları anlatıldı. Dördüncü bölümde, numunelerin optik geçirgenlik, elektriksel direnç ve yapısal özelliklerinin karakterizasyon sonuçları yer almaktadır. Beşinci bölümde, sonuçların değerlendirilmesi ve öneriler bulunmaktadır. Son kısımda kaynaklar yer almaktadır.

2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Gümüş Nanotel (AgNT) Malzemesi ve Elektrot Özellikleri

Elektriksel direncinin düşük olması, optik geçirgenliğinin yüksek olması özellikleriyle gümüş nanoteller, elektro optik pencerelerde şeffaf elektrot, ısıtıcı ve buğu çözücü gibi uygulamalar için termal ve elektriksel iletkenliği nedeniyle yaygın olarak araştırılmaktadır. Bu çalışmada, AgNT şeffaf iletken elektrotların Aerosol jet baskı tekniğiyle elektro-optik cihazlarda kullanılacak özelliklerde geliştirilmesine çalışılmıştır ve sonuçlar sunulmaktadır. Gümüş nanoteller AgNT, nanometre mertebesinde çap ve mikrometre uzunluğa sahip işlevsel malzemelerdir. Gözenekli malzemelerin kalıp olarak kullanılmasıyla veya kimyasal (hidrotermal, polyol vb.) yöntemlerle sentezlenirler. Bu çalışmada nanotel çözeltisi hazır olarak temin edilip kullanılmıştır [9].

Nanotellerin büyütülmesinde yumuşak ve sert şablonların kullanımı ile hidrotermal ve polyol yöntemi gibi kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile birkaç nanometreden birkaç yüz nanometre çapa ve bir mikrometre ile birkaç yüz mikrometreye kadar uzunlukta nanoteller üretilebilmektedir. Bu çalışmalar sonucunda algılayıcılar, elektro-optik cihazlar ve benzeri birçok uygulama alanı söz konusudur. Giyilebilir cihazların geliştirilmesinde gelecekte kullanılabilecektir. Bu alanlarda kullanılan indiyum katkılı kalay oksit'e göre gümüş nanotellerin bazı özellikleri ile avantajlı bir durumda olduğu öngörülmektedir. Optik sistem pencereleri, elektrot gibi elektronik uygulamalar ile giyilebilir teknolojiler gibi alanlarda yaygınlaşabilir, esnek monitör panelleri, esnek güneş hücreleri. Şeffaf elektrot üretimi için karbon nanotüpler, grafen oksit, alüminyum katkılı çinko oksit, metal nanoteller, nanofiberler ve iletken polimerler gibi başka alternatif malzeme seçenekleri de mevcuttur. AgNT şeffaf elektrot uygulamaları bu alternatifler arasında; üretim kolaylığı, esnek alttaşlar ile uyumu, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek optik geçirgenliğin olmasıyla öne çıkmaktadır [1-6].

AgNT sentezlenmesinde en çok tercih edilen polyol yöntemidir. Metal nanoyapı sentezi için polyol yönteminin avantajlarını belirtilmiştir. Shen ve ark. 2009'daki ve Chandran ark. 2006'daki çalışmalarında avantajları olarak hacimli üretimin ve nanotel uzunluğu açısından kontrolün kolaylığını vurgulamışlardır. Gümüş nanoteller; çözücüler, ortam sıcaklığı,

tepkimeye giren malzemelerin yoğunlukları, tutucu ve indirgeyiciler gibi koşullar değiştirerek polyol yöntemini kullanarak boyutlar rahatlıkla kontrol edilebilir. Bu yapılar, malzemelerin boyutlarının asimetrik olarak tek doğrultuda büyümesi ile üretilebilir. Gümüş nanoteller, nanoparçacıkların tek bir doğru boyunca büyütülmesi ile mikrometre üzeri uzunluğa ve nano çaplı tek boyutlu olarak adlandırılan nanoteller üretilir. En yaygın olan polyol yönteminde nitratlı gümüş tuzu, yüzey aktif malzeme olarak poli vinil propilen ve çözelti haline getirilmesi için etilen glikol kullanılır. Etilen glikol içerisinde çözünen tuzun iyonlarına ayrılması ile gümüş serbest kalır. Serbest gümüş oksijen ile karşılaşır ise oksitlenme olabilir. Oksitlenmenin önüne geçilmesi için çeşitli metallerin klorlu tuzları kullanılarak etilen glikol ile gümüş nanoparçacıkların yüzeyinde oluşan oksit filminin temizlenmesini sağlar ve ortamdaki klor iyonları nanotel büyüme sürecinde kararlılığa katkıda bulunduğu belirtilmektedir [8-11].

Bu çalışmada seçilen aerosol jet baskı yöntemi ve benzer doğrudan baskı yöntemleri karşılaştırılabilir. Bu yöntemlerden inkjet baskı bu çalışma öncesinde denenmiş sıvı içindeki nanotellerin çabucak çökmesi ile nozüllerde tıkanma olması sebebiyle aerosol jet baskı yöntemi tercih edilmiştir. Aerosol baskı yöntemi inkjet yöntemine göre ön filtreleme gerektirmemesi ve adından anlaşılacağı üzere aerosol formunda baskı yapılması avantajlarına sahiptir, bunun yanında yüzeyde biriktirebilen nanotellerin uzunlukları ultrasonik atomizasyon işleminde Aerosol baskı yönteminin atomizer akışı ile aerosol akış yoğunluğunun, kılıf gazı akışı ile çizgi genişliğinin müdahalelere izin vermesi, iyi yönleri elektrot geometrisinin kolayca değiştirilebilmesiyle optik geçirgenlik artırılabilir, kılıf gazı akışı optimize edilerek aerodinamik odaklama ile nanoteller çizgisel belli bir bölgede yoğunlaştırılabilir [5-7, 9, 12, 13].

Poliimid malzemenin alttaş olarak kullanımında; alttaşın yüksek optik geçirgenliğe sahip olması, tavlama işlemi sırasında 200 °C sıcaklıkta yapısını koruyabilmesi dolayısıyla esnek alttaşlar arasında temin edilebilen en iyi malzeme olması seçimde etkili olmuştur. Alttaş malzemesinin özellikleri deneysel yöntem bölümünde belirtilmiştir [14, 15]

Şeffaf iletken elektrotlar, fotovoltailer, fotodedektörler, ışık yayan diyotlar (LED'ler), sıvı kristal ekranlar ve dokunmatik ekranlar dahil olmak üzere optoelektronik cihazlar için temel bileşenlerden biridir. Bunun yanı sıra, elektrokimyasal kararlılıklarını artırarak süperkapasitörler, elektrokromik ve elektrokimyasal katalizör gibi elektrokimyasal

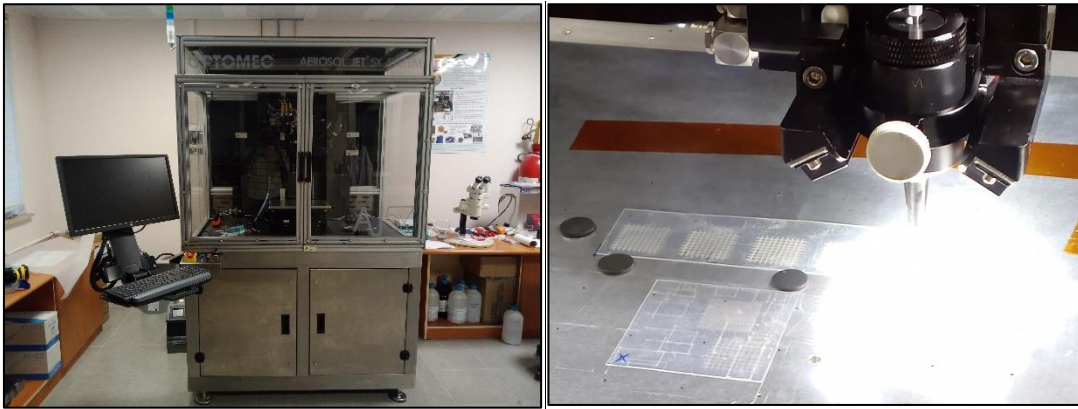
uygulamalarda da kullanılır. Yaygın olarak kullanılan, düşük levha direncine (~10 ohm/kare) ve görünür spektral bölgede yüksek optik geçirgenliğe (~%85) sahip indiyum kalay oksittir. Fiziksel özellikleri birçok uygulama için yeterli olsa da, aynı zamanda birkaç dezavantajı da vardır. Bir yandan, sınırlı indiyum rezervleri ITO'nun maliyetinin yüksek olmasına neden olur; dahası, kırılma yapısı onu hafif, esnek ve taşınabilir optoelektronik cihazlar için kullanımını kısıtlar. Bu nedenden dolayı, önemli miktarda araştırmalar alternatif şeffaf iletken oksit malzemelere odaklanmıştır. Ancak, bunların sert film yapıları esnek elektrot olarak kullanılmasına engel olabilmektedir. Bu nedenle, iletken polimerler, karbon nanotüpler, grafen ve metalik nanoteller gibi daha da esnek şeffaf iletken malzemelere yönelinmiştir. Bunlar arasında gümüş nanotel (AgNT) elektrotlar, sentez işlemleri ve baskı teknikleri gibi üretim yöntemleri ile uygulamaları yapılmaktadır [1-7, 12, 13, 16, 20].

AgNT elektrotlar, püskürtme kaplama, damla döküm, laminasyon, elektrospinning, serigrafi baskı ve mürekkep püskürtmeli baskı gibi birçok yaklaşımla üretilebilir. Her üretim yönteminin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin, AgNW'ler damla döküm tekniği kullanılarak polimer kompozitlerin yüzeyinde iyi bir şekilde dağıtılabılırken, damla döküm film kalınlığını kontrol etmek zordur. Elektrospinning, birkaç santimetreye kadar uzun AgNT'ler dahil olmak üzere nanofiberler üretmek için çok yönlü bir yöntemdir. Ancak, yine de morfolojik hasara neden olur ve tekdüze çap elde etme, 100 nm'den daha ince lifler oluşturma ve pürüzsüz yüzeyler üretilememesi gibi zorluklar içerir. Bir baskı tekniği olan aerosol jet baskı, yüksek çözünürlüğü, 10 µm çizgi geniliğine olanak sağlaması, nozul tıkanıklığı ihtimalinin düşüklüğü, yüksek viskoziteli mürekkeplerle baskı (pnömatik atomizasyonla 1.000 cP'ye kadar), düzlemsel olmayan yüzeylere baskı yapılabilmesi ve kısa sürede üretim yapılabilmesi ile bir alternatif bir yöntemdir. Ayrıca aerosol baskı, hem sert hem de esnek alt tabakaların geniş alanlı, ince özellikli desenlenmesi için oldukça uyumlu bir tekniktir [5-7, 9, 12, 13, 20, 25-30].

Aerosol baskı diğer üretim tekniklerine kıyasla daha yeni bir teknoloji olduğundan, parametrelerin esnek AgNT elektrotlar üzerindeki etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. 57,68 ohm/kare'lik bir tabaka direncine sahip cam alttaşlar üzerine AgNT elektrotlar üretmişlerdir, sağlık izleme için gerilim sensörleri üzerine bir çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalara ilaveten, AgNT elektrotların çeşitli optoelektronik ve biyomedikal cihazlarda kullanımına ilişkin çalışmalar bulunmaktadır [1,4-6, 16, 20, 25].

2.2. Üretim ve Karakterizasyon Sistemleri

Aerosol jet baskı sistemi kullanılan üretim sistemidir, çeşitli fonksiyonel malzemelerin istenilen yüzeye desen olarak kaplanabilmesini sağlar. Aerosol baskı aşamaları; ultrasonik atomizasyon kullanılarak femtolitre boyutunda damlacıkların üretilmesi, atomize edilmiş damlacıklar azot gazıyla karışarak aerosol biçimine gelerek haznede oluşan basınç sayesinde nozüle ilerler. Nozül içinde, aerosol sisi bir kılıf gazı akışıyla aerodinamik olarak odaklanabilen demet çapı ve aerosol akışı ile istenilen malzemenin alttaş üzerine biriktirilmesi sağlanır. Bu baskı işlemi, fotolitografi, serigrafi gibi maskeli işlemlere veya vakum ortamı gerektiren kaplama sistemlerine, mezo ölçekte (10 μ m-1mm) bir alternatif olarak kullanılabilir. Deneysel çalışmalarda ve prototip üretiminde karmaşık geometriye sahip üç boyutlu yüzeyler üzerine iletken hatlar veya seçici geçirgen yapıların fonksiyonel malzemelerle basılmasına imkan sağlar. Metaller, polimerler, reçineler, seramikler veya biyolojik malzemeler de basılabilir. Malzemelerin nanoparçacık biçiminde olması, parçacık boyutu en fazla 500 nm olabilir ve gerekli tavlama işleminin düşük sıcaklıklarda yapılabilmesi ile öne çıkmaktadır. Numunelerde ulaşılmak istenen iki ana unsur elektriksel iletkenliğin ve optik geçirgenliğin elde edilebilecek en iyi seviyede olmasıdır. Spektrofotometre ile optik geçirgenlik ve dört noktadan tabaka direnç ölçümleri ile bu iki değişken açısından değerlerin iyileştirilmesi için üretim aşamalarında iyileştirmeler yapılmıştır [1,4-6, 16, 20, 25].



Resim 2.1. Aerosol Jet Yazıcı Sistemi ve Baskı İşlemi

Dört noktadan akım-gerilim ölçümü ile elektriksel tabaka direncinin belirlenmesi



Resim 2.2. Lake Shore 7700 Serisi Yüksek Empedans Hall Etkisi Sistemi

Lake Shore 7700 Serisi Yüksek Empedans Hall Etkisi Ölçüm Sistemi, yüksek aralıklarla gerilim ve akım uygulayarak olanağı ile hassas ölçüm yapabilen bir sistemdir. Ölçümler, Van der Pauw yöntemi kullanılarak, 10^{-6} ($\mu\Omega$) ila 10^6 ($M\Omega$) aralığında alınabilmektedir.

UV-Vis. spektrofotometre ile optik geçirgenliğin belirlenmesi



Resim 2.3. UV-Vis. Spektrofotometre, Perkin Elmer Lambda 2S

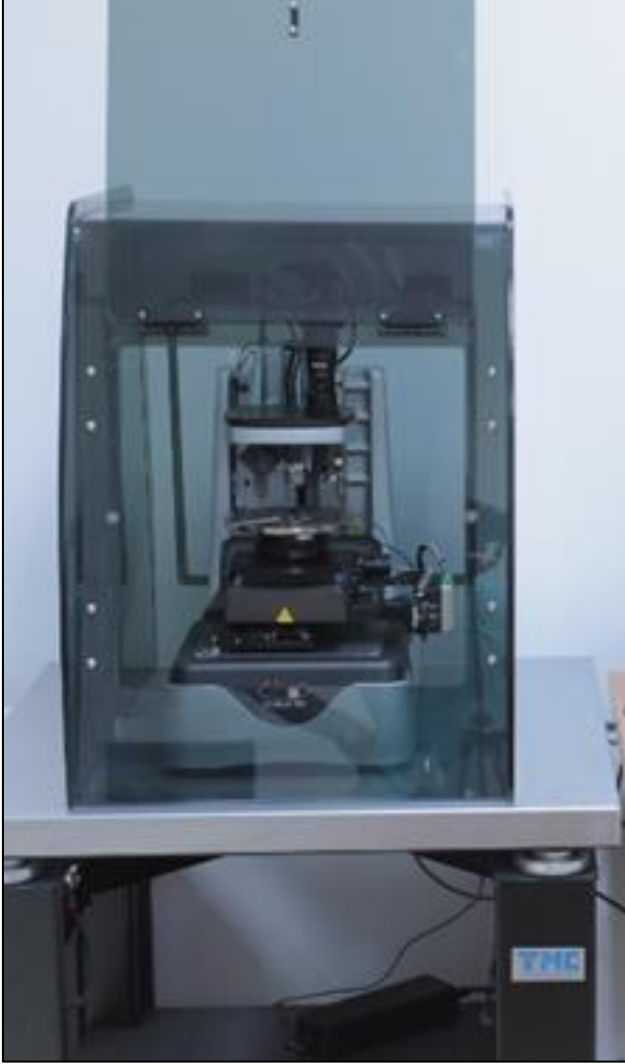
UV-Vis Spektrofotometresi: Lambda 2S UV-VIS, ışık şiddetinde değişikliklerden etkilenmeyen çift ışık yollu spektrofotometredir, ayarlanabilen tarama hızı ve 190-1100 nm geniş bir dalga boyu aralığında, ölçüm alınabilmektedir.

Optik mikroskop ile numunelerin yapısının incelenmesi

Resim 2.4. Optik Mikroskop Leica DM6000 M

Leica DM6000M optik mikroskobu, numune analizi ve elde edilen görüntülerin işlenebildiği yüksek çözünürlüklü bir sistemdir. x, y ve z eksenlerinde hareket ettirilebilen numune yerleştirme ünitesi odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Değiştirilebilen mercekler ile 200 kat büyütme mümkündür. Işık şiddeti, aydınlatma miktarı, mercekler arası geçiş ile büyütmenin değiştirilebilmesi gibi birçok seçenek mevcuttur. Kontroller ve görüntülerin kayıt ve işleme aşamaları bilgisayar üzerinden yapılabilmektedir.

Profilometre ile numunelerin kalınlıklarının belirlenmesi



Resim 2.5. Profilometre Veeco Dektak 150

Dektak 150 yüzey profilometresi, geniş tarama alanına sahip bir analiz cihazıdır. Hava destekli tablası yardımıyla dışarıda gelebilecek titreşim etkilerini minimize eder. Hava akımlarından etkilenmesini önleyecek muhafaza kabini içerisinde yer almaktadır. Ölçme iğnesi yukarı aşağı yani Z ekseninde hareket edebilir, numune tablası ise sağa sola X ekseninde ve ileri geri Y ekseninde hareket yeteneğine sahiptir. Ölçümde taranacak mesafe ve tarama hızı ayarlanabilir.

Taramalı elektron mikroskobu numuneleri yapısal analizinin yapılması

Resim 2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu JEOL JSM-6060 LV

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bilgisayar kontrolü ile çalışmaktadır. Elektron kaynağı olarak K-tipi tungsten filaman kullanılmaktadır. 5 eksen hareket kontrolü ile çalışmaktadır. 30 kV hızlandırma voltajı ve 8 mm numune mesafesi ile 3,5 nm çözünürlük elde edilebilmektedir. SEM'de 0,5 kV-30 kV hızlandırıcı voltaj aralığında inceleme yapılabilmektedir. 8 ila 300.000 kat büyütme yapılabilmektedir.

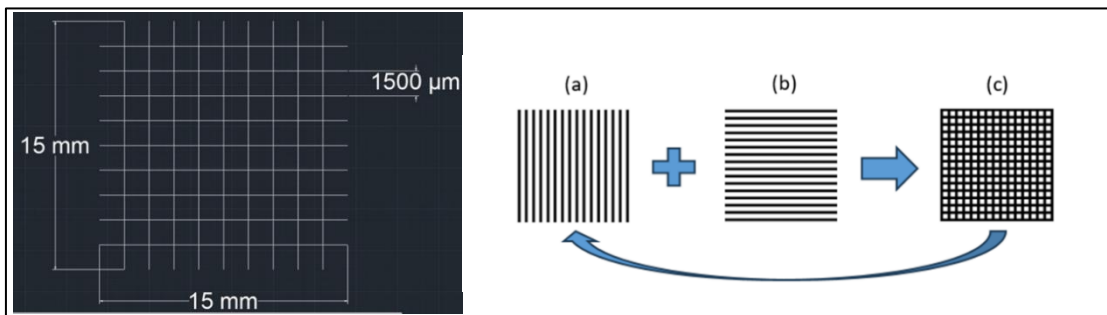
3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Numunelerin Üretilmesi

Numunelerin üretilmesinde iki ana malzeme kullanılmıştır; AgNT süspansiyonu ve PI alttaş bu malzemelerin özellikleri belirtilmelidir. AgNT süspansiyon giriş bölümünde de anlatıldığı üzere hazır olarak temin edilmiştir. Nanografi Nanoteknoloji firması tarafından üretilmiştir. Polyol yöntemi adı verilen bir kimyasal sentezleme işlemiyle elde edilmiştir. NG10SM0107 kodlu malzeme ağırlıkça %99 saflıkta, nanotel çapı 50 nm, nanotel uzunlukları 8 µm olarak belirtilmektedir.

Alttaş malzemesi olarak PEN (Poli etilen naftalat) 125 µm kalınlıkta PEN film (Teonex Q51, Teijin DuPont ve PI (poliimid) Shijiazhuang Dajia New Materials Technology Co. Ltd. firmasının üretimi olan 50 µm kalınlığa sahip filmler 20 mm x20 mm kare şeklinde kesilerek kullanıldı.

Aerosol jet baskı sisteminde parametreleri; 300 µm çapa sahip nozül ve ultrasonik atomizer kullanıldı. PI alttaşlar üzerine 15 mm x 15 mm alanda çizgiler arası 1.5 mm kare boşluklara sahip ızgara şeklinde desen tasarlanarak 300 µm çapında nozül kullanılarak çizgi genişliği 75-100 µm olacak şekilde baskılar yapıldı, tavlama işlemi 200 °C’de 1 saat olarak yapıldı.



Şekil 3.1. Elektrotlar için oluşturulan ızgara geometri (solda), tüm yüzey kaplanan numunelerin baskı deseni (sağda)

Alttaşların deiyonize su ile sabun ve sonrasında propanol ile temizlenmesi ve azot ile kurutulmasının ardından numunelerin üretimi yapıldı. Nanotel süspansiyonundan 3 mL şırıngayla alınarak sistemin haznesine konuldu. Mürekkep sıcaklığı 25°C’ye ayarlandı. Süspansiyon sıcaklığının sabitlenmesinin ardından Çizelge 3.1’de yer alan baskı gaz akış ve

sıcaklık değerleri yazıcı sistemin proses modülüne girildi. Proses ekranında bulunan grafiklerden değerlerin kararlı hale gelmesi beklendi. Nozül ucu ve alttaş arasındaki mesafe hizalama kamerasının odak uzaklığı yardımıyla belirlendi ve başlangıç noktası kaydedildi. Çizim dosyası sisteme yüklenebilecek uyumlu biçimde çıktı alınarak sistemin hareket kontrol modülüne yüklendi. Şekil 3.1 'deki desenin baskı işlemi istenilen katman sayısı kadar tekrarlandı.

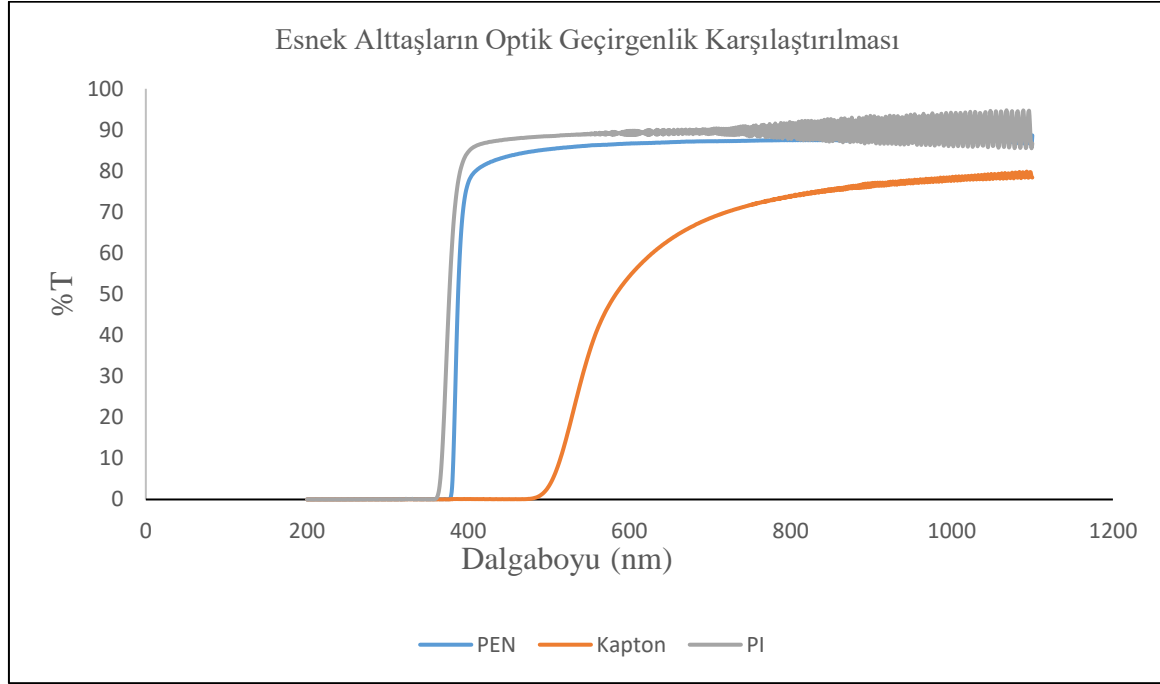
Çizelge 3.1. Aerosol Jet Yazıcı sistem üretim parametreleri

Ultrasonik Atomizer	
Nozül Çapı: 300 µm	
Yazma Hızı: 1 mm/s	
Gaz Akışları (sccm)	
Atomizer	20
Sheath (Kılıf)	70
Boost (İtme)	60
Divert (Geri Çevirme)	60
Sıcaklık (°C)	
Atomizer (Aerosol oluşumu)	25
Bubbler (Gaz Verici)	27
Platen Heat (Tabla Isısı)	40

Numunelerin farklı sıcaklıklarda ısıtıcıda tavlansak bir çok defa üretim yapılarak tekrarlanabilirlik ve sonuçlarda tutarlılık gözlemlendi. Tavlansak esnasında gerçekleşen fiziksel olaylar yüzeyde bulunan etanolün buharlaşması, nanotellerin ısınması ve 200 °C sıcaklığa ulaşıldığında nanotellerin birbirleriyle temas ettiği noktalarda nano kaynak adı verilen olayın gerçekleşmesiyle elektriksel iletkenliğin oluşmasıdır, 160 °C ve üzerinde sıcaklıklarda yapılan tavlama işlemi işlemlerden önce oluşmuş olabilecek oksitlenmeleri giderecek etkileri literatürde yer almaktadır [15, 17, 18, 22, 30].

4.DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Esnek Alttaş Seçilmesinde Optik Geçirgenliğin Durumu

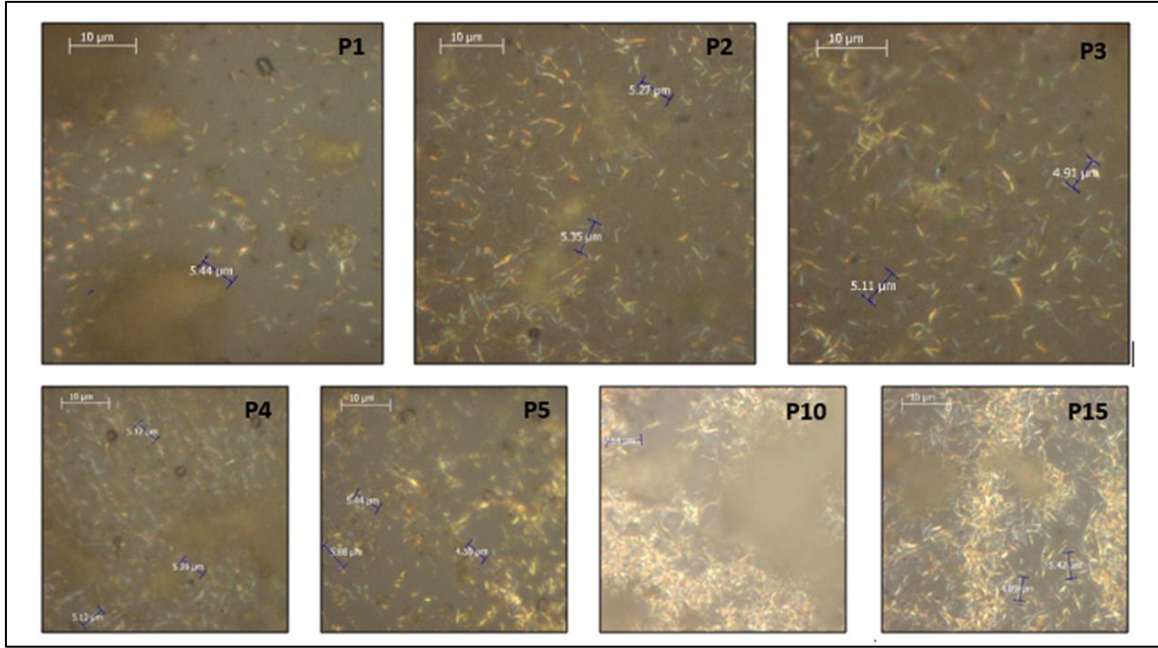


Şekil 4.1. Farklı Esnek Alttaşların Optik Geçirgenlik Durumları

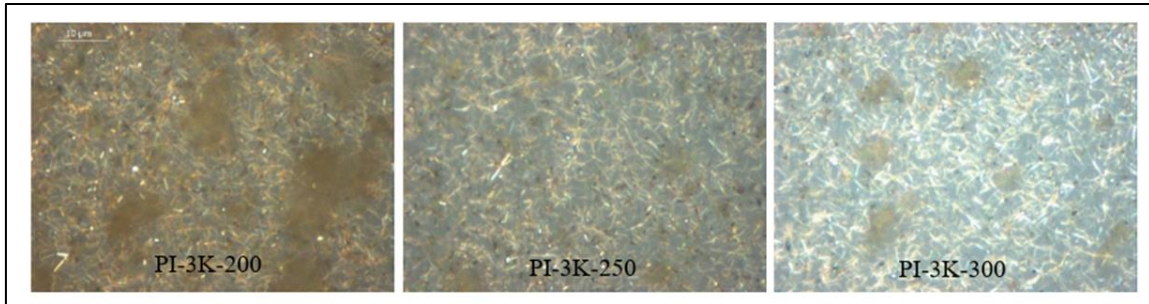
Çalışma için temin edilen farklı esnek alttaşlardan kaptonun geçirgenlik spektrumu görünür bölgede düşüktür, %80'in üzerinde geçirgenliğe sahip PI ve PEN'in optik geçirgenliğinin belirgin şekilde yüksek olması görünür bölgede geniş geçirgenlik spektrumuna sahip olmasıyla çalışmaların bu iki alttaş ile sürdürülmesi kararlaştırıldı.

Şeffaflık ve iletkenlik şeffaf elektrotları karakterize etmek için en önemli iki parametredir. Genellikle optik geçirgenlik (%T), filmin elektriksel tabaka direnci (R_s) ile ifade edilmektedir. Elektriksel iletkenliğe optik iletkenlik oranı (σ_{DC}/σ_{OP}) olarak bilinen başarımlı ölçüsü (FOM), Denklem 4.1'de belirtilmiş olan eşitlik ile hesaplanır. Şeffaf iletken elektrotların performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [16, 28, 29].

$$FOM = \frac{Z_0}{2 * R_s (T^{-1/2} - 1)} \quad (4.1)$$



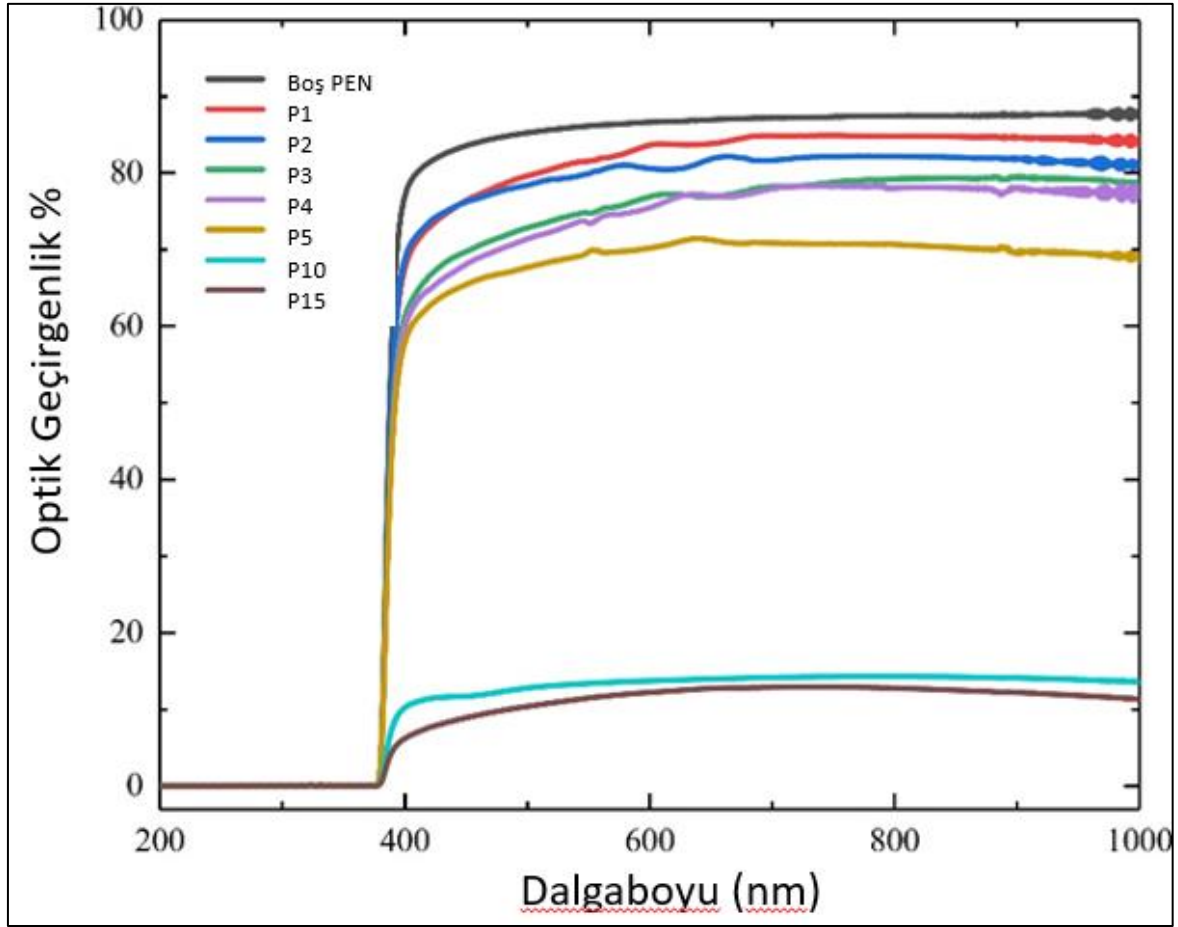
Resim 4.1. PEN numunelerin optik mikroskop görüntüleri



Resim 4.2. PI numunelerin optik mikroskop görüntüleri

4.2. PEN Alttaşı Üzerine Farklı Sayıda Katman Yapılarak Elde Edilen Sonuçlar

PEN numunelerin isimlendirilmesi; P1, P2, P3, P4, P5, P10 ve P15 olarak P alttaşı olan PEN'i yanındaki rakam kat sayısını göstermektedir. Boş PEN alttaşın ve yedi numunenin geçirgenlik spektrumları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. İlk bakışta, baskı döngüsü arttıkça görünür bölgenin şeffaflığında sistematik bir azalma olduğu görülmektedir. 10 ve 15 baskı döngüsüyle elde edilen P10 ve P15 numunelerindeki şeffaflığın giderek azalışı Şekil 4.2'de görülebilmektedir diğer numuneler P1, P2, P3, P4 ve P5 için 400-700 nm spektral aralıktaki ortalama optik geçirgenlik sırasıyla %85, %80, %78, %73 ve %72 olarak yüksek sayılabilecek geçirgenlik mevcuttur.



Şekil 4.2. PEN numuneleri optik geçirgenlikleri

Çizelge 4.1. PEN alttaş numunelerinin sonuç tablosu

Numune	Katman Sayısı	AgNT Katman Kalınlığı (nm)	Görünür Bölgede Ortalama Optik Geçirgenlik(%)	Elektriksel Tabaka Direnci(ohm/kare.)	Başarım Ölçütü (FOM)
P1	1	173	85	128,8	17,28
P2	2	190	80	47,44	33,66
P3	3	267	78	30,96	46,02
P4	4	340	73	76,26	14,5
P5	5	531	68	35,65	29,62
P10	10	1078	%15	112,6	-
P15	15	1230	%10	48,2	-

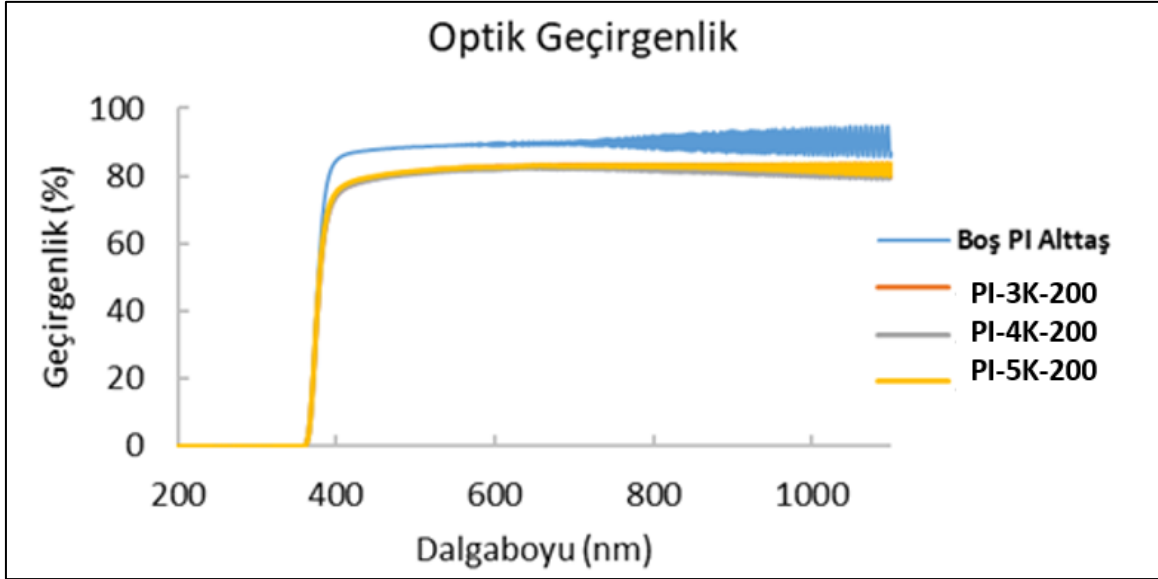
Tüm yüzeyin kaplanması AgNT elektrot üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir, yeterince ince katmanlar ve süreklilik sağlanabilirse elde edilen elektriksel sonuçlar

açısından tercih edilmektedir. Aerosol jet baskı yönteminde yapılan bu çalışmada katman kalınlığı tek katman için ortalama 200 nm, kullanılan malzemeler ve diğer koşullar sonucunda optik geçirgenlik 2 kat için %80 sınırının altına düşmektedir. Bu durum AgNT malzemesinin ITO alternatifi olarak kullanım olanağı oldukça azalmaktadır. Elektriksel tabaka direnç 1,62 k Ω ölçüldü, 1 kat olan numune de ise elektriksel direnç G Ω mertebesindedir. Baskı reçetesi düzenlenip yüzeyde biriktirilen AgNT yoğunluğunun artırılması optik geçirgenliği düşüreceği için tüm yüzeyin kaplanması yönteminden vazgeçilerek ızgara geometri ile çalışmaya devam edildi.

Alttaş tavlama sıcaklığının artırılmasının optik geçirgenliğe olumsuz etkilerinin sebepleri; 50 μ m kalınlığında film olarak temin edilen şeffaf alttaş, 75 μ m kalınlıklı renkli poliimid ile elde edilen iyi elektriksel sonuçlarla beraber optik geçirgenliğin artırılması amacıyla kullanılmıştır. 200 $^{\circ}$ C, 250 $^{\circ}$ C ve 300 $^{\circ}$ C sıcaklıklarda yapılan tavlama optik geçirgenliğin düşmesine sebep olduğu görüldü. Sıcaklık artışı ile şekil bozulmaları ve renk değişiklikleri görüldü. Literatürde, renk değişiminin sıcaklık artışıyla oluşması, florin içeriğinin sıcaklıkla değişebilme durumunun malzemenin ışığı kırma indisini artırması, saf poliimid malzemenin yumuşama camı geçiş sıcaklığının 200 $^{\circ}$ C değerinin üzerindeki sıcaklıklarda malzemenin yapısının değişimi, alttaş kalınlığının azalması ve tavlama sıcaklığının artışının optik geçirgenliği düşürmesi referanslar ile sebepler bu şekilde değerlendirilmektedir [4, 6, 14, 15, 17, 18, 22, 30].

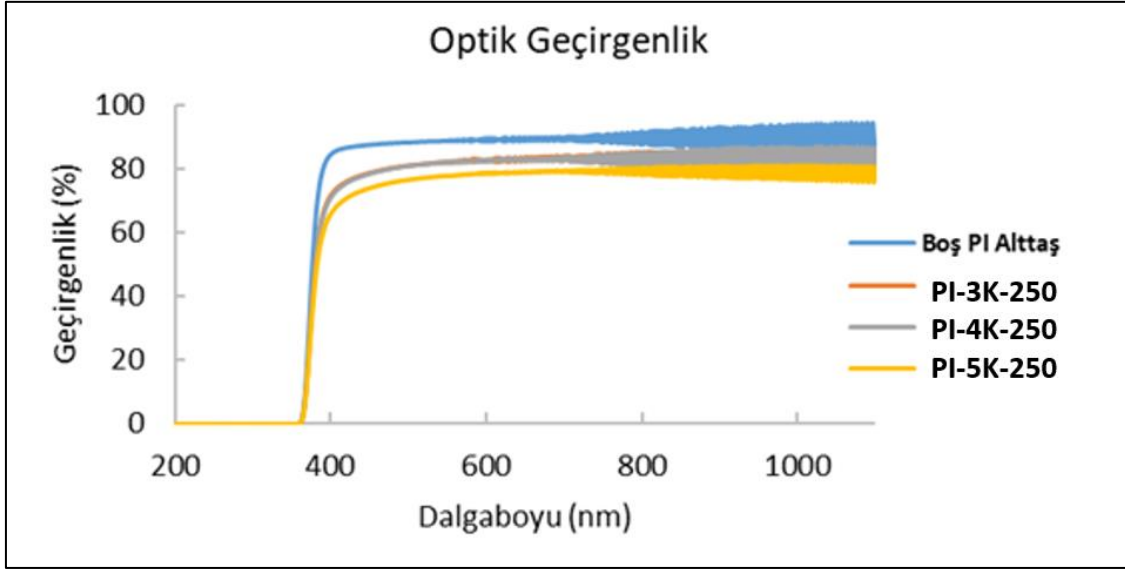
4.3. PI Alttaş Üzerine Farklı Sayıda Katman Ve Farklı Sıcaklıklarda Tavlama Yapılarak Elde Edilen Sonuçlar

Poliimid numunelerin isimlendirilmesi; PI-3K-200: PI Alttaş 3 kat 200 $^{\circ}$ C'de PI-4K-200: PI Alttaş 4 kat 200 $^{\circ}$ C'de, PI-5K-200: PI Alttaş 5 kat 200 $^{\circ}$ C'de, PI-3K-250: PI Alttaş 3 kat 250 $^{\circ}$ C'de, PI-4K-250: PI Alttaş 4 kat 250 $^{\circ}$ C'de, PI-5K-250: PI Alttaş 5 kat 250 $^{\circ}$ C'de, PI-3K-300: PI Alttaş 3 kat 300 $^{\circ}$ C'de, PI-4K-300: PI Alttaş 4 kat 300 $^{\circ}$ C'de, PI-5K-300: PI Alttaş 5 kat 300 $^{\circ}$ C'de tavlanan numunelerdir.

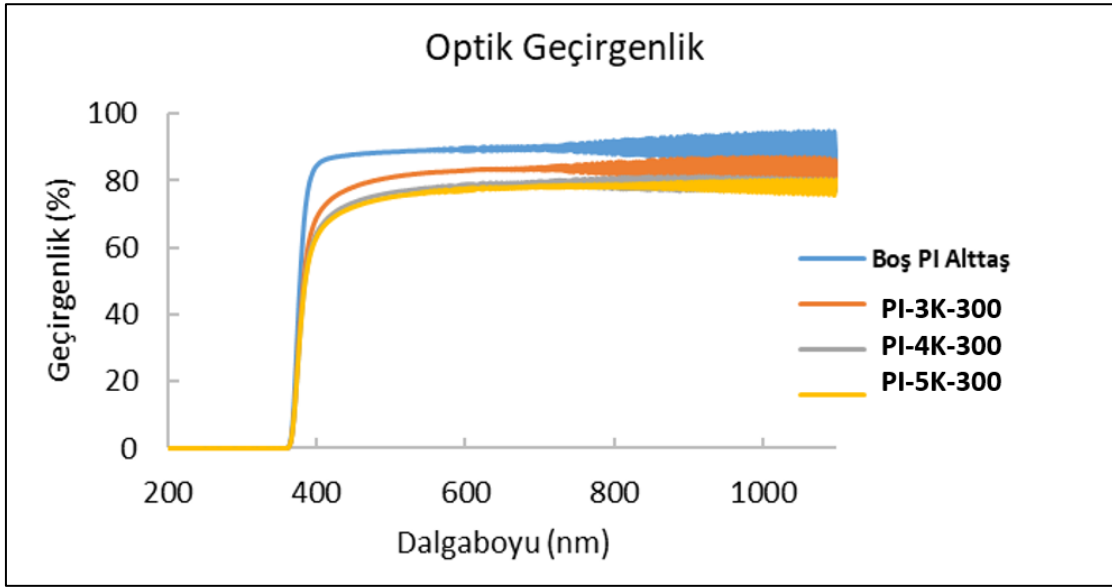


Şekil 4.3. PI numunelerin optik geçirgenlik (200 °C)

Geçirgenlik-dalgaboyu grafiği incelendiğinde boş PI alttaşın 600-700 nm’de ortalama %90 optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. 600-700 nm’de PI-3K-200, PI-4K-200 ve PI-5K-200 numuneleri sırasıyla, ortalama %83,2, %82,5 ve %82 geçirgenlik değerlerine sahiplerdir. Tavlama sıcaklığının artmasının geçirgenlik üzerinde genelde düşürücü etki oluşturduğu 250 ve 300 °C’de hazırlanan numunelerin aşağıda sunulan geçirgenlik grafiklerinden görülmektedir. 600-700 nm’de PI-3K-250, PI-4K-250, PI-5K-250, PI-3K-300, PI-4K-300 ve PI-5K-300 numuneleri sırasıyla, ortalama %83,4, %82,2, %79, %83,1, %78,8 ve %77 geçirgenlik değerlerine sahiplerdir. Burada dikkat çeken daha ince, 3 kat olarak hazırladığımız numune için sıcaklık artsa da görünür bölge geçirgenliğinde kayıp olmamasıdır. Her 3 sıcaklık değerinde de %83 gibi kararlı bir geçirgenliğe sahiptir. Örneğin 5 kat olarak hazırlanan numune için 200 °C’den 300 °C’ye çıkıldığında geçirgenlik değerinin %82’den %77’ye kadar gerilediği görülmektedir.

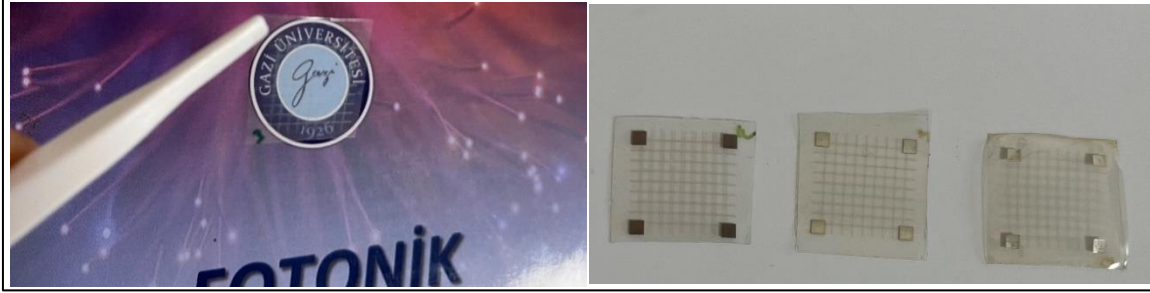


Şekil 4.4. PI malzeme 250 °C'de tavlanan numunelerin optik geçirgenlikleri



Şekil 4.5. PI malzeme 300 °C'de tavlanan numunelerin optik geçirgenlikleri

Sıcaklık artışının görünür bölge geçirgenliğini düşürmesi ile ilgili fiziksel mekanizmalar görüldüğü gibi renk değişikliği ve şekil bozukluğu oluşması, esnek alttaşlar üzerine hazırlanan numuneler için sıcaklık artışıyla florin içeriğinin sıcaklıkla değişebilme durumunun malzemenin ışığı kırma indisini artırması Takasaki ve arkadaşlarının veya tavlama sıcaklığının artışı ile PI alttaş kalınlığının azalması ve optik geçirgenliği düşürmesi Benfridja ve arkadaşlarının gibi çeşitli sebeplere dayandırılmıştır [4, 6, 14, 15, 17, 18, 22, 30].



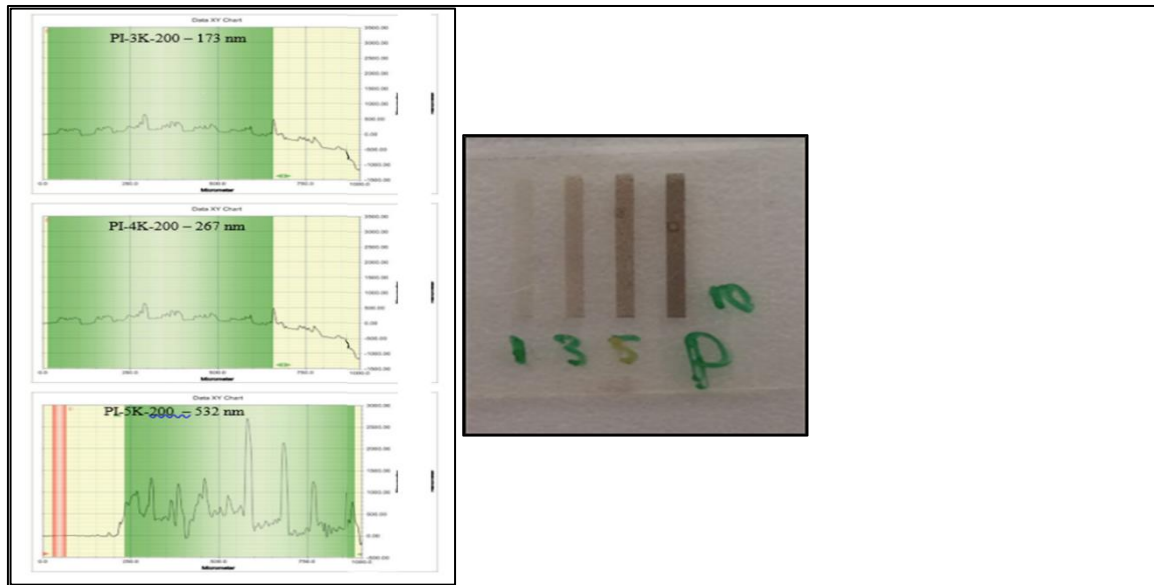
Resim 4.3. Numunenin şeffaflık durumu (solda) ve farklı sıcaklıklarda soldan sağa sırayla 200 °C, 250 °C ve 300 °C'de tavlanan numunelerin durumu (sağda)

Bütün numuneler için dört noktadan temasla iletkenlik ölçümü uygulanmıştır. Ölçüm sonuçları aşağıdaki tabloda sunulmuştur. Bu numune grubu arasında, en iyi elektriksel sonucu olan numune 6,76 Ω /kare direnç değeri ile PI-5K-200 kodlu numunedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Profilometre ile alınan Ag nanotel film kalınlığı ölçümlerine göre katman sayısı arttıkça film kalınlığı artmaktadır, Çizelge 4.2'de gösterilmiştir ve bu durum 5 kat hazırlanan numunenin 3 kat hazırlanan numuneye göre daha iyi elektriksel iletkenliğe sahip olmasını sağlamaktadır. Liu ve arkadaşlarının belirttiği gibi Ag nanotel film kalınlığı arttıkça nanoteller arasında daha fazla sayıda temas noktası oluşur ve film yüzey direnci azalır. Ancak, sıcaklık artışının optik özellikler üzerinde olumsuz etki yaratması gibi elektriksel açıdan da benzer etki oluşturmuştur. Sıcaklığın 200 °C'den 300 °C'ye çıkarılması ile elektriksel direnç değerleri kötüleşmiştir. Bu durum, Ag nanotellerin 200°C'den itibaren birbirine kaynaşmaya başlarken PI alttaşın 250°C'den itibaren ayrılmaya başlamasından kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir. PI alttaş için 300°C ye kadar dayanıklı olduğu bilgisi literatürde yer alsa dahi 250°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlikte düşüş olduğu gözlemlenip literatürdeki kaynaklarla bu durum doğrulanmıştır [4, 16, 17, 18, 26, 30].

Çizelge 4.2. PI alttaş numunelerinin sonuç tablosu

Numune	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Katman Sayısı	AgNT film kalınlığı (nm)	Görünür Bölgede Optik Geçirgenlik (%)	Elektriksel Tabaka Direnci (ohm/kare)
PI-3K-200	200	3	173	83,2	26,20
PI-4K-200	200	4	267	82,5	11,68
PI-5K-200	200	5	531	82,0	6,76
PI-3K-250	250	3	211	83,4	41,94
PI-4K-250	250	4	312	82,2	90,26
PI-5K-250	250	5	553	79,0	92,02
PI-3K-300	300	3	282	83,1	> Ω/kare
PI-4K-300	300	4	391	78,8	> kΩ/kare
PI-5K-300	300	5	596	77	> kΩ/kare

4.4. Numunelerin Kalınlık Ölçümü

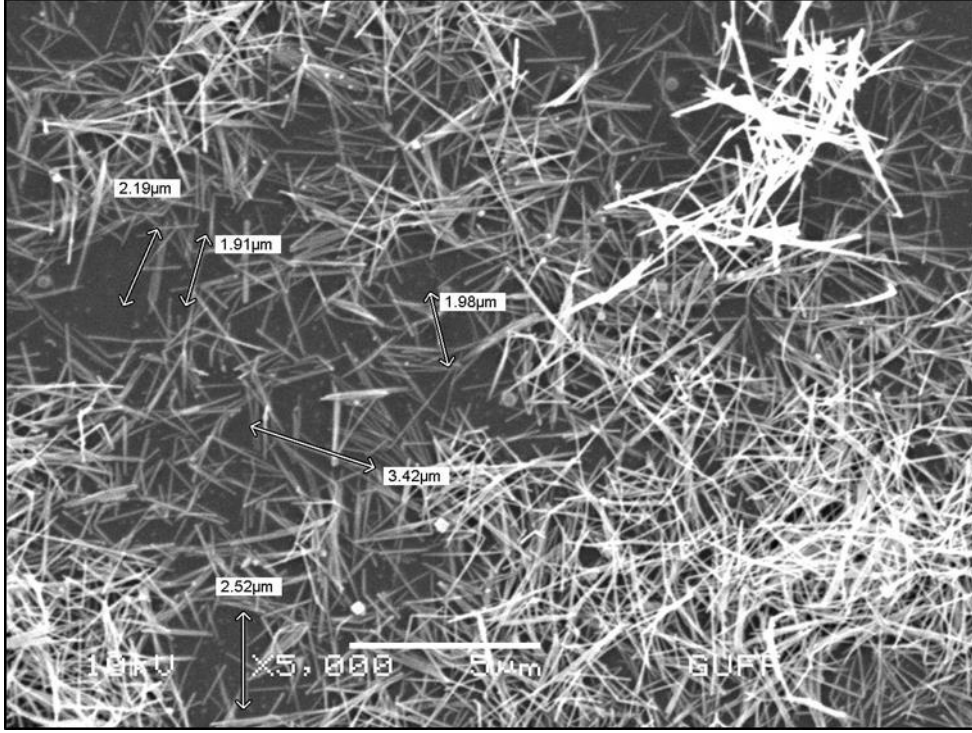


Resim 4.4. PI numunelerin kalınlık ölçümünde örnek cihaz ekran görüntüleri (solda), kalınlık ölçümü için hazırlanan numune örneği (sağda)

Numuneleri kalınlık ölçümü alttaş üzerine şeritler halinde PEN üzerine 1, 2, 3, 4, 5, 10 ve 15 kat, PI üzerine 3, 4 ve 5 kat kaplama yapılmıştır, numuneler 1 saat süresince 200°C tavlama yapılmıştır. Numuneler çift taraflı bant ile cam yüzeyine yapıştırılmıştır. Ölçümler için yapılan baskıda bitişik on adet çizginin bulunduğu şeritler halinde baskı yapılmış ve tepe ölçüm modunda ortalama kalınlık değeri alınmıştır. Ortalama değerler katman sayısına göre 1 kat 173nm, 3 kat 267 nm, 5 kat 531 nm, 10 kat için 1078 nm elde edildi.

4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Numunelerin İncelenmesi

Nanotellerin boyları ultrasonik atomizasyon sırasında gerçekleşen kırılmalara bağlı olarak kısalmaktadır. Bu durum yöntemin olumsuz yönlerinden biridir. Sistem mekanizmalarının nanotelleri uzunlukları üzerinde oluşturdukları sınırlamaların sebeplerini gerçekleştiren olaylar sırasıyla üzerinden geçilerek anlaşılabilir; kullanılan mürekkep alt kısmında bir esnek zar bulunan bir hazneye yerleştirilir. Bu zar altında damıtılmış su ile doldurulmuş küvet ve üzerinde kapton film en altta elektrik akımını titreşim enerjisine çeviren dönüştürücüden oluşan ultrasonik banyo düzeneği yer almaktadır. Ultrasonik atomizasyon işleminde titreşim sırasıyla; dönüştürücü, su, kapton film, yeniden su, zar ve sonunda mürekkebe iletilir. Ultrasonik frekanstaki (>20kHz) titreşimler mürekkep yüzeyinde kılcak dalgalanmalar oluşturur, bu dalgalanmalar sırasında küçük damlacıklar yüzeyden kopar ve ortama verilen azot akışı ile birleşerek gaz-sıvı karışımı aerosol oluşur, bu aerosol hazneye sürekli gelen gaz akışı ve bir hortum aracılığı ile püskürtme için nozül kısmına gelir. Kılıf gazı akış demetiyle eş eksenli olacak şekilde tasarlanması odaklanmasını sağlayarak alttaş yüzeyine püskürtme yapılır [21-24].



Resim 4.5. Taramalı elektron mikroskobu ile numunelerin incelenmesiyle nanotel boylarının belirlenmesi

Ultrasonik titreşim uygulanması sırasında, mürekkep içinde bulunan nanoteller eğilip bükülürler, esnek yapıda olmalarına rağmen yüksek frekanslı dalgalanmalar belirli noktalarda zorlanma sonucu kırılmalar meydana gelir. Literatürde titreşim uygulanma süresine bağlı nanotel uzunluk değerleri belirtilmiştir. Nozül çapı a değerinde ise parçacık boyutunu $a/50$ ve daha düşük değerde olabileceği belirtilmiştir. $300 \mu\text{m}$ çaplı nozül kullanılarak elde edilebilecek en uzun nanotel $6 \mu\text{m}$ veya daha düşük uzunluğa sahip olabilmektedir. Atomizasyon esnasında oluşan kırılmaların etkisini azaltmak için nanotel uzunluğu yüksek değerde mürekkep seçilmesi oluşan sonucu da etkilemektedir. Atomizasyon esnasında oluşan damlacıkların boyutları ve dağılmadan taşınabilmesi olasılığı arasındaki ilişkide damla çapı arttıkça damlanın dağılma olasılığı artmaktadır. Kararlı işlem için küçük damlacıklar için (MHz) mertebesinde veya daha yüksek frekans gerektiğinden nanotellerin kırılma olasılığı artmaktadır. Kısa nanoteller baskı yapılan yüzeye ulaşabilmektedir [21, 24].

Son olarak 2024 yılında esnek güneş hücreleri için elektrot hedefli olarak geliştirilen Ag nanotel çalışmalarından bazı örnekler ve bizim numunelerimizin kıyaslamasını içeren bir tablo yer almaktadır.

Çizelge 5.1. Aerosol baskı yöntemi ve diğer yöntemlerle üretilen numunelerin karşılaştırılması [26-29]

Numune	Yöntem	Yapı	Optik Geçirgenlik (%T)	Elektriksel Tabaka direnci (ohm/kare)
PI-3K-200	Aerosol jet baskı	Ag nanotel/PI	83,2	26,20
PI-4K-200	Aerosol jet baskı	Ag nanotel/PI	82,5	11,68
PI-5K-200	Aerosol jet baskı	Ag nanotel/PI	82,0	6,76
Elsokary ve ark. 2024	Hidrotermal yöntem	Ag nanotel/Cam	80,3	85,0
Ren ve ark. 2024	Spin kaplama	Ag nanotel/PET	83,5	12,5
Wang ve ark. 2024	Rulodan ruloya baskı	Ag nanotel/PET	80,0	12,0
Yao ve ark. 2024	Spin kaplama	Ag nanotel/Cam	93,3	54,12

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada amaç yüksek optik geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip elektrotların geliştirilmesi amaçlanmıştır, elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Aerosol baskı tekniği kullanılarak PEN alttaşlar üzerine şeffaf ve esnek AgNT elektrotlar geliştirildi; esneklikleri, maliyet etkinlikleri, yüksek elektrik iletkenlikleri ve çeşitli yüzeylerle uyumlulukları ile şeffaf metal oksit malzemelere alternatif olabilecektir. Baskı katman sayısının esnek PEN alttaşlar üzerine basılan AgNT elektrotlarının özellikleri üzerindeki etkisini ve bunun AgNT'lerin kalınlığı ile ilişkisini gösteren bulgular verildi. AgNT elektrotlar için, 3 kat baskı ile 267 nm kalınlığa sahip AgNT elektrotlar, 30,96 ohm/kare'lik bir tabaka direnci, görünür bölgede ortalama %78'lik bir optik geçirgenlik ve bunun sonucunda 46,02'lik karşılık gelen bir FOM (Başarım Ölçütü) değeri elde edildi.

Aerosol baskı ile esnek PI alttaş üzerine geliştirilen numuneler arasında, 3 kat numune PI-3K-200, 26,20 Ω /kare elektriksel tabaka direnci ve görünür bölgede %83,2 optik geçirgenlik ile en iyi sonucu veren numunedir. Bu numuneyi takiben, %82,5 geçirgenlik ve 11,63 Ω /kare yüzey direnci ile PI-4K-200 kodlu numune gelmektedir. Hatta, PI-5K-200 kodlu numune 7 Ω /kare elektriksel tabaka direnci ve bu numune için de optik geçirgenlik %82'dir.

PEN alttaş için 3 kat baskılı elektrotların tabaka direnci 30,96 ohm/kare ve görünür bölgede ortalama %78 şeffaflığa sahiptir. PI alttaş için, 3 katmanlı 200 °C'de tavlanan numune, 26.20 Ω /kare elektriksel direnci ve görünür bölgede %83.2 optik geçirgenlik değerlerine sahiptir, 4 kat 200 °C'de tavlanan numune %82.5 geçirgenlik ve 11.63 Ω /kare elektriksel direncine ve son olarak 5 kat olan numune 7 Ω /kare altında olan elektriksel direnci ve optik geçirgenlik %82'dir.

Buna benzer bir çalışma yapacak olanlara öneriler şu şekilde sıralanabilir; gümüş nanotel yoğunluğu daha yüksek bir süspansiyon ya da aerosol yazıcı sistemler için özel geliştirilmiş mürekkepler temin edilebilirse yaşanabilecek sorunlar epeyce azalacaktır. Bu sayede daha az sayıda veya daha ince yapıda katmanlar sayesinde optik geçirgenlikte yükselme, elektriksel iletkenlikte ise iyileşme veya en azından sonuçların korunması ile gelişme sağlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Sharma, S. S. K., Sandeep, B. K., Tripathi, C. C.. (2018). Alternative transparent conducting electrode materials for flexible optoelectronic devices. *Opto-Electronics Review*, (26), 223-235.
2. Woo, Y. S. (2010). Transparent Conductive Electrodes Based on Graphene-Related Materials. *Micromachines*, (10), 13.
3. Hossain M., Li B., Busra S., Jesse J. ve Philip B. (2022). Adhesive free, conformable and washable carbon nanotube fabric electrodes for biosensing. *npj Flexible Electronics*. (6), 97.
4. Hu, L., Kim, H. S., Lee, J. Y., Peumans, P. ve Cui, Y. (2010). Scalable coating and properties of transparent, flexible, silver nanowire electrodes. *ACS Nano*, (4), 2955–2963.
5. Wilkinson, N. S., Kay M., Russell R. H. (2019). A review of aerosol jet printing a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (105), 170.
6. Tu, L., Yuan, S., Zhang, H., Wang, P., Cui, X., Wang, J. ve Zheng, L. R. (2018). Aerosol jet printed silver nanowire transparent electrode for flexible electronic application. *Journal of Applied Physics*, 123(17).
7. Herbert, R., Lim, H. R. ve Yeo, W. H. (2020). Printed, soft, nanostructured strain sensors for monitoring of structural health and human physiology. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(22), 25020-25030.
8. Fiévet F., Ammar-Merah S., Brayner R., Chau F., Giraud M., Mammeri F., Peron J., Piquemal J. Y., Sicard L. ve Viau G. (2018). The polyol process: A unique method for easy access to metal nanoparticles with tailored sizes, shapes and compositions. *Chemical Society Reviews*, (47), 5187–5233.
9. Kumar A, Shaikh M. O., Chuang C. H. (2021). Silver Nanowire Synthesis and Strategies for Fabricating Transparent Conducting Electrodes. *Nanomaterials*, (3), 693.
10. Wiley B., Sun Y., Mayers B. ve Xia Y. (2005). Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: The case of silver. *Chemistry: A European Journal*, (11), 454–463.
11. Xia Y., Xia X., Peng H. C. (2015). Shape-controlled synthesis of colloidal metal nanocrystals: Thermodynamic versus kinetic products. *Journal of the American Chemical Society*, (137), 7947–7966.
12. Wang, H., Pan, Y., Han, Y., Chen, Z., Liu, T., Zhang, L. ve Ma, C. Q. (2024). Large Area Gravure Printed AgNWs Electrode on Water/Oxygen Barrier Substrate for Long Term Stable Large Area Flexible Organic Solar Cells. *Chinese Journal of Chemistry*.
13. Patil, P. P., Prachi, S. K. ve Kulkarni, A. (2021). Inkjet printing of silver nanowires on flexible surfaces and methodologies to improve the conductivity and stability of the printed patterns. *Nanoscale Advances*, (3), 101.

14. Takasaki, T., Kuwana, Y., Takahashi, T. ve Hayashida, S. (2000). Synthesis and optical properties of polyimides. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, (38), 4831-4838.
15. Benfridja, I., Diaham, S., Laffir, F., Brennan, G., Liu, N. ve Kennedy, T. (2022). A universal study on the effect thermal imidization has on the physico-chemical, mechanical, thermal and electrical properties of polyimide for integrated electronics applications. *Polymers*, (14), 1713
16. Campbell C. T. (1997). Ultrathin metal films and particles on oxide surfaces: Structural, electronic and chemisorptive properties. *Surface Science Reports*, (27), 1–111.
17. Kim, C. L., Lee, J. Y., Shin, D. G., Yeo, J. S. ve Kim, D. E. (2020). Mechanism of Heat-Induced Fusion of Silver Nanowires. *Scientific Reports*, (1), 9271.
18. Lee, J., Lee, P., Lee, H. B., Hong, S., Lee, I., Yeo, J., Lee, S. S., Kim, T. S., Lee, D. ve Ko, S. H. (2013), Room-Temperature Nanosoldering of a Very Long Metal Nanowire Network by Conducting-Polymer-Assisted Joining for a Flexible Touch-Panel Application. *Advanced Functional Materials*, (23), 4171-4176.
19. Lee, P., Lee, J., Lee, H., Yeo, J., Hong, S., Nam, K. H., Lee, D., Lee, S. S. ve Ko, S. H. (2012). Highly stretchable and highly conductive metal electrode by very long metal nanowire percolation network. *Advanced Materials*. (24), 3316–3331.
20. Ricciardulli, A. G., Yang, S., Wetzelaer, G. J. A. H., Feng, X. ve Blom, P. W. M. (2018). Hybrid silver nanowire and graphene based solution processed transparent electrode for organic optoelectronics. *Advanced Functional Materials*, (28), 1706010.
21. Toimil Molares, M. E., Balogh, A. G., Cornelius, T. W., Neumann, R. ve Trautmann, C. (2004). Fragmentation of nanowires driven by Rayleigh instability. *Applied Physics Letters*, (85), 5337–5339.
22. B. L'vov (1999). Kinetics and mechanism of thermal decomposition of silver oxide. *Thermochimica Acta*, (333), 13–19.
23. Sun, Y., Gates, B., Mayers, B. ve Xia, Y. (2002). Crystalline silver nanowires by soft solution processing. *Nano Letters*, (2), 165–168.
24. Qiuxian C., Wenwen X., Qiaozhen J., Ting H., Jun Z., Cheng S., Zhipan L., Xueyang L. ve Hongyu C. (2020). Ultrasonic Bending of Silver Nanowires, *ACS Nano*, (11), 15286-15292.
25. Du, J., Pei, S., Ma, L. ve Cheng, H. M. (2014). 25th anniversary article: carbon nanotube and graphene based transparent conductive films for optoelectronic devices. *Advanced Materials*, (13), 1958-1991.
26. Liu, X., Sun, W., He, M., Fang, Y., Djoulde, A., Ding, W. ve Wang, Z. (2024). Unidirectionally Sensitive Flexible Resistance Strain Sensor Based on AgNWs/PDMS. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 1-11.

27. Elsokary, A., Soliman, M., Abulfotuh, F., Ebrahim, S., Sadat-Shafai, T. ve Karim, M. (2024). Fabrication of composite transparent conductive electrodes based on silver nanowires. *Scientific Reports*, 14(1), 3045.
28. Ren, H., Chen, W. S., Chen, J. D., Yang, J. P., Zhang, Y. F., Hou, H. Y. ve Tang, J. X. (2024). Unraveling the electrical energy loss in silver nanowire electrodes for flexible and Large-Area organic solar cells. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148498.
29. Yao, W., Yuxin, T., Meng, L., Hanming, D., Demei, K. ve Dezeng, L. (2024). Sandwich structure silver nanowires transparent conductive films with improved photoelectronic performance. *Journal of Materials Science*, 1-12.
30. Dhar, A., Alford, T. L. (2013). Effect of silver thickness and annealing on optical and electrical properties of Nb₂O₅/Ag/Nb₂O₅ multilayers as transparent composite electrode on flexible substrate. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, (1552), 101-110.



Gazili olmak ayrıcalıktır