



**GÜMÜŞ İNCE FİMLERİN NANOMÜREKKEPLİ BASKI TEKNİĞİ İLE
GELİŞTİRİLMESİ**

Alp Deniz Yaman

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Alp Deniz YAMAN tarafından hazırlanan ‘‘GÜMÜŞ İNCE FİLMERİN NANOMÜREKKEPLİ BASKI TEKNİĞİ İLE GELİŞTİRİLMESİ’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 20/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmada 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.

Alp Deniz YAMAN

20/01/2020

GÜMÜŞ İNCE FİLMLERİN NANOMÜREKKEPLİ BASKI TEKNİĞİ İLE GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Alp Deniz YAMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında vakumsuz ve düşük maliyetli bir üretim tekniği olan Inkjet baskı yöntemi ile esnek alttaşlar üzerine Ag ince filmler üretildi. Bu çalışma ile hedeflenen temel amaç, inkjet yazıcı ile sensör, anten, baskı devre ve güneş hücreleri gibi birçok alanda kullanılmaya uygun, yüksek iletkenlikte ve çözünürlükte Ag filmler üretmektir. Bu amaç doğrultusunda 150 µm ile 1165 µm arasında değişen genişliklere ve 121 nm ile 294 nm arasında değişen kalınlıklara sahip Ag filmler, esnek Kapton alttaşlar üzerine 500 dpi ve 800 dpi çözünürlükte basıldı. Sonrasında basılan filmler 150 °C, 200 °C ve 250 °C sıcaklık değerlerinde 30 dakika, 40 dakika ve 50 dakika tavlandı. Tavlama işlemi ısıtıcı tabla üzerinde atmosfer koşullarında yapıldı. Tavlanan Ag filmlerin direnç ölçümleri yapıldı ve öz dirençleri hesaplandı. Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, iletkenliği en yüksek olan Ag filminin 800 dpi çözünürlükte ve 250 °C tavlama sıcaklığında elde edildiği ve öz direncinin $1,68 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ olduğu görüldü.

Bilim Kodu : 20215

Anahtar Kelimeler : Mürekkepli baskı, Nanomürekkepler, Ag ince filmler, Esnek iletken ince filmler

Sayfa Adedi : 74

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF SILVER THIN FILMS WITH NANOINK PRINTING
TECHNIQUE
(M. Sc. Thesis)

Alp Deniz YAMAN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

In this thesis, Ag thin films on flexible substrate were produced with Inkjet printing method, which is a vacuum-free and low-cost production technique. The main purpose of this study is to produce high-conductivity and resolution Ag films suitable for using in many areas such as sensors, antennas, printed circuit and solar cells with an inkjet printer. For this purpose, Ag films with widths ranging from 150 μm to 1165 μm and thicknesses ranging from 121 nm to 294 nm were printed on flexible Kapton substrate at 500 dpi and 800 dpi resolution. Then, it was annealed at 150 $^{\circ}\text{C}$, 200 $^{\circ}\text{C}$ and 250 $^{\circ}\text{C}$ for 30 min, 40 min and 50 min. Annealing was done on the heating table under atmospheric conditions. Resistance measurements of annealed samples were made, and their resistivity was calculated. As a result of the optimization studies, it was observed that the Ag film with the highest conductivity was obtained at 800 dpi resolution and with an annealing temperature of 250 $^{\circ}\text{C}$ and its resistivity was $1,68 \times 10^{-6} \Omega.\text{cm}$.

Science Code : 20215

Key Words : Inkjet printing, Nanoinks, Silver thin films, flexible conductive thin films

Page Number : 74

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan ve benden sevgilerini asla eksik etmeyen, bu hayattaki ilk eğitmenlerim olarak şu an dönüştüğüm kişinin temellerini atan çok değerli annem Emel YAMAN'a ve babam Hikmet YAMAN'a sonsuz teşekkür ederim,

Çalışmalarına başladığım ilk günden beri desteğini eksik etmeyen, çalışmalarım için gereken imkânı sağlayan, bilgi ve birikimini çekinmeden paylaşarak beni yönlendiren, ama hepsinden önemlisi bana benden çok güvenerek, kendime karşı inancımın yeniden yeşermesini sağlayan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, saygı değer danışmanım Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e,

Çalışmalarım boyunca desteklerini asla eksik etmeyen, beni asla yalnız bırakmayan ve bir ailenin yapacağı şekilde beni sahiplenen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki hocalarımın ve mesai arkadaşlarımdan her birine,

Tüm destekleri, inançları ve yanımda oldukları için sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışmayı 2016K121220 nolu proje ile destekleyen T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı'na teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. INKJET	5
2.1. Inkjet Baskı Yöntemi	5
2.1.1. Devamlı mod.....	6
2.1.2. İsteğe bağlı damlacık (DoD)	6
2.2. Mürekkep	10
2.2.1. Metal iletken mürekkepler	12
2.2.2. Ag mürekkep.....	12
2.2.3. Kahve lekesi (Coffee staining).....	14
3. BASKI YAPILAN SİSTEM VE BASKI KOŞULLARININ BELİRLENMESİ	17
3.1. PixDro LP50.....	17
3.1.1. Baskı platformu.....	17
3.1.2. Yazıcı kafası.....	20
3.1.3. Kontrol birimi	22

	Sayfa
3.2. Baskı Koşullarının Belirlenmesi	29
3.2.1. Damlacığın üretim şartlarının belirlenmesi.....	29
3.2.2. Tarif özellikleri.....	33
3.2.3. Kullanılacak nozüllerin belirlenmesi	34
3.2.4. Alttaş şartlarının belirlenmesi	34
4. Ag FİLMLERİN BASIMI, ELDE EDİLEN SONUÇLAR VE YORUM	35
4.1. Ag filmlerin Basımı.....	35
4.1.1. Kullanılan malzemeler	35
4.1.2. Desen.....	36
4.1.3. Alttaşların hazırlanması	37
4.1.4. Yazıcı kafasının temizliği	37
4.1.5 Baskı koşulları.....	39
4.1.6. Tavlama koşulları.....	40
4.2. Ölçüm Sonuçları.....	41
4.2.1. Kalınlık ve genişlik ölçümlerinin yapılması	41
4.2.2. Direnç ölçümleri ve öz direnç hesabı.....	43
4.2.3. Sonuçlar	44
4.3. Sonuçların Değerlendirilmesi ve Yorum	51
4.3.1. Sıcaklığın etkisi.....	52
4.3.2. Tavlama süresinin etkisi.....	57
4.3.3. Çözünürlüğün etkisi	60
4.3.4. Desen çalışmaları	63
5. SONUÇ	65

Sayfa

KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	73



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı baskı metotları için viskozite değerlerinin karşılaştırılması	11
Çizelge 4.1. Kullanılan mürekkebin genel özellikleri.....	36
Çizelge 4.2. Çizgilerin tasarlanan genişlik değerleri	37
Çizelge 4.3. Ortak baskı koşulları.....	40
Çizelge 4.4. Çözünürlüklerine göre Ag filmlerin sınıflandırılması	40
Çizelge 4.5. 500dpi çözünürlük için tavlama sıcaklıkları ve süresi.....	41
Çizelge 4.6. 800dpi çözünürlük için tavlama sıcaklıkları ve süresi.....	41
Çizelge 4.7. Ag filmlerin ortalama genişlik değerleri.....	44
Çizelge 4.8. Ag filmlerin ortalama kalınlık değerleri	45
Çizelge 4.9. Ag filmlerin kesit alanı	45
Çizelge 4.10. 500 dpi çözünürlük ve 150 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri	47
Çizelge 4.11. 500 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri	48
Çizelge 4.12. 500 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri	49
Çizelge 4.13. 800 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri	50
Çizelge 4.14. 800 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri	51
Çizelge 4.15. Tavlama sıcaklığına ve çözünürlüğe göre kalınlık değişimi	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sürekli püskürtme modu için yazıcı kafasının çalışma şeması	6
Şekil 2.2. Termal ve piezoelektrik inkjet çalışma şeması.....	7
Şekil 2.3. Spectra S-class yazıcı kafası için dalga formu	8
Şekil 4.1. Kullanılan desen	36
Şekil 4.2. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 30 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi	52
Şekil 4.3. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 30 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi	53
Şekil 4.4. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 50 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi	53
Şekil 4.5. 800 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama sıcaklığının ve süresinin etkisi.....	55
Şekil 4.6. Kesit alanının sıcaklığa ve çözünürlüğe göre değişimi	56
Şekil 4.7. 500 dpi çözünürlük için 150 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi	57
Şekil 4.8. 500 dpi çözünürlük için 200 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi	57
Şekil 4.9. 500 dpi çözünürlük için 250 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi	58
Şekil 4.10. 800 dpi çözünürlük için 200 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi.....	59
Şekil 4.11. 800 dpi çözünürlük için 250 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi.....	59
Şekil 4.12. 800 dpi çözünürlük için 250 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi.....	60
Şekil 4.13. 250 °C tavlama sıcaklığı için çözünürlüğün çizgi genişliği üzerine etkisi...	61
Şekil 4.14. 200 °C tavlama sıcaklığı için çözünürlüğün etkisi	61
Şekil 4.15. 250 °C için çözünürlüğün etkisi	62

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. PixDro LP50 inkjet yazıcı	5
Resim 2.2. Ağ mürekkep kullanılarak Inkjet teknolojisi ile üretilen anten örnekleri.....	13
Resim 2.3. Inkjet teknolojisi kullanılarak üretilen sensör örnekleri.....	14
Resim 2.4. Örnek kalınlık ölçümü	15
Resim 3.1. PixDro LP50 yazıcı sistemi	17
Resim 3.2. Baskı platformu	18
Resim 3.3. PixDro LP50 hareket eksenleri.....	18
Resim 3.4. Yazma görünümü ve damlacık görünümü kameraları.....	19
Resim 3.5. Yazıcı kafaları.....	20
Resim 3.6. Spectra SE128 yüklü yazıcı kafası montaj kiti.....	21
Resim 3.7. PixDro arayüzünün ana ekran görüntüsü.....	22
Resim 3.8. Reçeteler (Recipes) menüsünün genel görünümü	23
Resim 3.9. Kontrol menüsü genel görünümü	25
Resim 3.10. Örnek damlacık analizi	27
Resim 3.11. Örnek simülasyon ekran görüntüsü	28
Resim 3.12. Basınç değişiminin damlacığın özellikleri üzerine etkisi	30
Resim 3.13. Potansiyel fark değişiminin damlacık üzerine etkisi	31
Resim 3.14. Dalga şeklinin damlacık üzerine etkisi	32
Resim 3.15. Sıcaklığın damlacık üzerine etkisi	33
Resim 4.1. Nozüllerin baskı öncesi ve sonrası görünümü.....	38
Resim 4.2. Kirlenen nozül örneği	39
Resim 4.3. Kalınlık ve genişlik ölçümü için örnekler	42

Resim	Sayfa
Resim 4.4. 500 dpi çözünürlük ve 150 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler	46
Resim 4.5. 500 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler	47
Resim 4.6. 500 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler	48
Resim 4.7. 800 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler	49
Resim 4.8. 800 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler	50
Resim 4.9. Bant testi	52
Resim 4.10. 5x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü	54
Resim 4.11. Baskı hataları	54
Resim 4.12. GFP16 kodlu Ag filmler için bozulan mürekkep görüntüleri.....	58
Resim 4.13. Cam ve esnek alüminyum üzerine, interdigital elektrot ve spiral baskı denemeleri	63
Resim 4.14. NFC anten tasarımı.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Ag	Gümüş
Au	Altın
Cu	Bakır
R	Direnç
ρ	Özdirenç
\vec{E}	Elektrik alan
\vec{j}	Akım yoğunluğu
V	Potansiyel fark
I	Akım
L	İletken telin (hattın) uzunluğu
A	İletken telin (hattın) kesit alanı
m	Metre
cm	Santi metre
cm ³	Santi metre küp
mm	Mili metre
μm	Mikro metre
nm	Nano metre
Ω	Ohm
G Ω	Giga ohm
$\mu\Omega$	Mikro ohm
°	Derece
°C	Derece santigrat
dpi	Dots per inch (inch başına nokta)
pl	Piko litre

Simgeler**Açıklamalar****g**

Gram

kg

Kilo gram

mN

Mili newton

dk

Dakika

ph

Asitlik veya bazlık derecesini tarif eden ölçü birimi

mbar

Mili bar

s

Saniye

µs

Mikro saniye

Kısaltmalar**Açıklamalar****ADA**

Advanced rop analysis

DoD

İsteğe bağlı damlacık

LED

Işık yayan diyot

MEMS

Mikro elektromekanik sistemler

NFC

Yakın alan iletişimi

PEN

Polyethylene naphthalate

PET

Polietilen tereftalat

QF

Kalite faktörü

RFID

Radyo frekansıyla tanımlama

1. GİRİŞ

Baskı teknolojilerinin keşfi 15. Yüzyılda yaşamış Johannes Gutenberg'e atfedilse de, ilkel baskı yöntemlerinin Asya'da 1000 yıldan fazla süredir kullanıldığı bilinmektedir [1]. Baskı teknolojileri bu zamanlardan başlayarak yaklaşık 1000 yıldır toplumun oldukça önemli bir parçası haline gelmiştir. Grafik baskı özellikle paketleme, kitap basımı ve gazete gibi geniş kapsamlı uygulamalarda kullanılarak toplumun vazgeçemeyeceği bir teknolojiye dönüşmüştür.

Bununla birlikte son yıllarda ortaya çıkan, işlevsel malzemelerin "basılmasını" sağlayan yöntem ile baskı teknolojilerinin kapsamı grafik ve metin basmanın ötesine geçerek, teknolojik üretim ve ar-ge çalışmaları için tercih edilen ince film kaplama tekniklerine, düşük maliyetli ve hızlı bir alternatif haline gelmiştir.

Nano-mürekkepli bir baskı tekniği olan Inkjet teknolojisinin gelişmesiyle, elektriksel olarak iletken [2,3], yarı iletken [4,5], yalıtkan [6], manyetik [7], biyolojik [8] ve optik [9] malzemelerin baskı yöntemi ile basılabilmesi mümkün olmuş ve alışıla gelmiş yöntemlere alternatif bir yöntem olma yolunda ilerlemeye başlamıştır.

Metal ve metal olmayan ince filmlerin oluşturulmasında magnetron püskürtme [10-12], vakum ısı buharlaştırma [13,14] ve kimyasal buhar biriktirme [15] gibi vakumlu teknikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler, vakum gerektirmesi, işlem basamaklarının içerdiği karmaşıklıklar ve yüksek maliyetleri gibi dezavantajlara sahiptir. Inkjet yazıcı teknolojisi hem vakum gerektirmemesi hem de işlem basamaklarının sadeliği ile bu yöntemler üzerinde avantaja sahip olduğu görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen sebepler ve avantajlardan dolayı son yıllarda fonksiyonel malzeme baskı teknolojilerine ilgi giderek artmakta ve gün geçtikçe ticari alanlara daha fazla uyum sağlamaktadır. Mürekkepli baskı teknolojilerinin en büyük avantajı; basılması planlanan desen ile baskı işlemi arasındaki basamakları ortadan kaldırarak işlemi çok daha hızlı hale getirirken maliyeti azaltmasıdır. Baskı teknolojileri arasında ise belki de en kullanışlı olan yöntem Inkjet baskı yöntemidir. Çünkü bu yöntemde alttaş ile hiçbir temas olmadığı gibi oldukça geniş bir mürekkep ve alttaş seçeneği sunmaktadır.

Bu teknoloji için hedef uygulamalar; radyo frekans tanımlama (RFID) [16,17], esnek ekranlar [18], sensörler [19], basılı depolama birimleri [20], basılmış piller [21], mikro elektromekanik sistemler (MEMS) [22], LED [23] gibi oldukça güncel ve gelişmekte olan teknolojilerdir. Bu konularda ise iletken filmler oldukça önem taşımakta olup, özellikle elektrot ya da iletken hat ihtiyaçlarında Ag (gümüş) filmler yüksek iletkenlikleri dolayısı ile tercih edilmektedir.

Araştırmacılar Inkjet teknolojiyi kullanarak Ag ince filmler üzerine yaptıkları çalışmalar ile baskı ve tavlama koşullarının film özellikleri üzerine olan etkisini gözlemlemeyi amaçlamışlardır. Bu çalışmalara, Hsien-Hsueh Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışma örnek verilebilir [2]. Bu çalışmada çalışma ekibi tarafından hazırlanan, solvent olarak su kullanılan Ag mürekkep incelenmiş ve $1,6 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ öz direncine sahip çizgiler elde edildiği raporlanmıştır. Bunun yanında tavlama sıcaklığının ve tavlama süresinin iletkenlik üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bunun için seçilen sıcaklık değerleri; 150 °C, 200 °C, 260 °C olup bu sürelerde 1 saate kadar değişen tavlama sürelerinde direncin değişimi incelenmiştir. Çalışma sonucunda ise hem süre artışının hem de sıcaklık artışının iletkenliğe etkisinin pozitif yönde olduğu raporlanmıştır.

Diğer bir çalışmada ise alümina alttaşlar üzerine basılan Ag filmler, 500 °C, 700 °C, 800 °C ve 900 °C de 15 dakika tavlarken, tavlama sıcaklığının bu filmlerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini gözlenmiştir [24]. Sıcaklığın artışı ile 700 °C tavlanan ve kalınlık ve genişlik ölçüleri sırası ile 1,56 μm ve 446 μm olan çizgide $1,68 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ gibi neredeyse Ag'nin bulk direncine eşit bir sonuca ulaşılmıştır. Fakat sıcaklık artmaya devam ettiğinde direncin arttığı hatta 900 °C'de çizgi devamlılığının bozularak, iletkenliğin kaybolduğu gözlemlenmiştir.

İlgi çekici bir diğer çalışmada ise farklı çözünürlüklerde basılan ve farklı sıcaklık değerlerinde tavlanan filmler incelenmiştir [25]. Bu inceleme için 350 dpi, 400 dpi, 450 dpi ve 500 dpi çözünürlüklerinde kaplamalar yapılarak bu kaplamaların kalitesi değerlendirilmiştir. Varılan sonuç; 350 dpi ve 400 dpi için çizgi sürekliliğinin çok kötü olduğu ve 160 G Ω değerine ulaşan direnç değerleri gözlemlendiği, 450 dpi ve 500 dpi için ise minimum malzeme kaybı ile iyi süreklilik ve iletkenlik değerlerine ulaşıldığıdır. Bunun yanında 130 °C'nin kullanılan mürekkep için yeterli olduğu da raporlanmıştır.

Bu tez çalışmasında amaçlanan temel kazanım; inkjet yazıcı ile sensör, antenler, baskı devreler ve güneş hücreleri gibi birçok alanda kullanılmaya uygun, yüksek iletkenlikte ve çözünürlükte Ag filmler üretmektir. Bunun başarılabilmesi için bu teknoloji üzerinde yıllardır elde edilen deneyim ve bilgiler kullanılarak ar-ge ve üretim çalışmalarında kullanılmaya uygun Ag ince filmlerin esnek alttaşlar üzerine basım koşulları kalibre edildi. Çalışma sonunda elde edilen verilerin yanında bu çalışmanın yapılabilmesine imkân sağlayan deneyim ve birikim de mümkün olduğu ölçüde sadeleştirilerek paylaşıldı.

Tez çalışması aşağıdaki gibi organize edilerek sunuldu:

- ❖ İlk bölümde tez çalışmasının temel amacı sunulup ve yapılan literatür taramaları kullanılarak teknoloji hakkında genel bilgilere yer verildi
- ❖ İkinci bölümde Inkjet teknolojisi ve bu teknolojide kullanılan mürekkepler ile ilgili genel bilgiler ve bu teknoloji ile üretilen iletken filmler için yapılan literatür taraması sunuldu.
- ❖ Üçüncü bölümde basım yapılan sistem ve baskı koşullarının belirlenmesi için yapılan analiz ve dikkat edilen noktalara değinildi.
- ❖ Dördüncü bölümde çalışma için üretilen Ag filmlerin baskı koşulları ve Ag filmlerin kalitesinin belirlenmesi için yapılan ölçüm sonuçları verilerek, üretim sırasında müdahale edilen değişkenlerin filmin kalitesi üzerinde yapmış olduğu etkiler tartışıldı.
- ❖ Son olarak beşinci bölümde tez çalışması genel olarak değerlendirilerek gelecek çalışmalar için bir yol planı yapıldı. Bunun yanında konu ile ilgili öneriler sunuldu.

2. INKJET

2.1. Inkjet Baskı Yöntemi

Inkjet baskı yöntemi, sadece ihtiyaç duyulduğunda mürekkebin püskürtüldüğü ve dolayısı ile malzeme harcamasının sadece basılmak istenen desen ile sınırlandırıldığı bir baskı yöntemidir. Inkjet baskı yönteminin keşfi 1970'lere dayanmakta olup, elektronik verilerin altaşa temas olmaksızın aktarımı ihtiyacına bir karşılık olarak geliştirilmiştir. Dolayısı ile günümüzde bu teknoloji oldukça gelişmiş olup birçok uygulamada kullanılmaktadır. Genel olarak kullanım alanları ofis ya da evlerde sıklıkla kullanılan yazıcılar olmakla beraber, son yıllarda ince filmlerin sıklıkla kullanıldığı, güneş hücresi üretimi, elektronik devre kartı üretimi, anten teknolojileri ve sensör teknolojileri gibi birçok alanda, üretim aracı olarak yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir [26-29].

Bunun yanında, diğer kaplama yöntemleri ile kıyaslandığında, üretim sırasında maskeye ve vakum ortamına ihtiyaç duymaması, düşük malzeme sarfiyatı ve dolayısı ile diğer yöntemlere göre daha düşük maliyette üretim imkânı bu yöntemin popülerliğine katkı sağlamaktadır. Resim 2.1'de malzeme basımında kullanılan örnek inkjet sistemi görülmektedir.

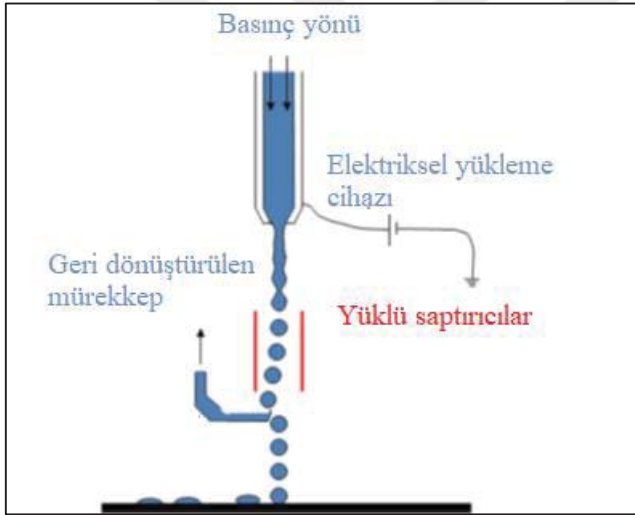


Resim 2.1. PixDro LP50 inkjet yazıcı [30]

Bu yöntem mürekkebin püskürtülme şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar devamlı ve isteğe bağlı damlacık (Drop on demand (DoD)) modlarıdır.

2.1.1. Devamlı mod

Bu modda mürekkebin akışı için üzerine bir dış kaynaktan basınç uygulanır ve küçük bir nozülden hızla geçmesi sağlanır. Rayleigh-Taylor dengesizliği, akıntının düzenli damlacıklara bölünmesine sebep olur [31]. Bu damlacıklar bir dış kaynak sayesinde elektrik yükü ile yüklenirler ve sonrasında elektrik alan kullanılarak alt taş üzerine düşürülürler. Akış devamlı olmakla beraber desendeki boşluklar için damlacıklar diğer tarafa yönlendirilerek mürekkebin tekrar depoya gitmesi, dolayısı ile de tekrar kullanılması sağlanır. Çalışma prensibinin şeması Şekil 2.1’de görülmektedir. Mürekkebin akışı sistem içinde sürekli olduğundan bu teknolojinin en büyük handikabı; mürekkebin içinde bulunan katı parçacıkların zamanla mürekkep hattını tıkkama tehlikesidir.



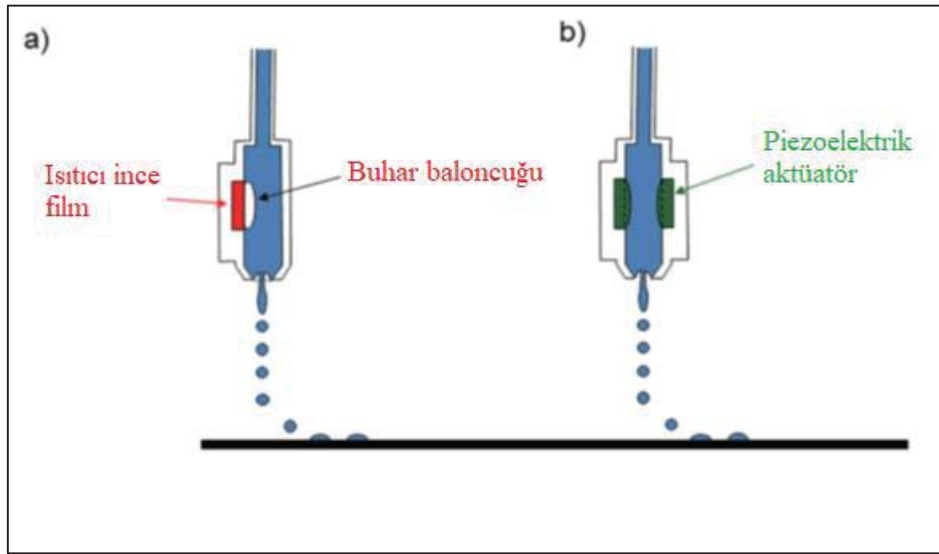
Şekil 2.1. Sürekli püskürtme modu için yazıcı kafasının çalışma şeması [32]

2.1.2. İsteğe bağlı damlacık (DoD)

DoD modunda, nozüller sadece desende ihtiyaç duyulduğunda damlacıkları püskürtürler. Temelde çalışma prensibi; düşük bir negatif basınç altında yerçekimine karşı askıda tutulan mürekkebin, isteğe bağlı olarak dışarıya itilmesi şeklinde özetlenebilir. Bu teknoloji termal ve piezoelektrik olmak üzere ikiye ayrılır.

Termal inkjet

Termal inkjette, nozüllerin arkasında bulunan bütün mürekkep odacıkları ısıtıcı ince filme sahiptir. Akım sinyali bu ısıtıcıya gelir ve ani buharlaşmaya sebep olur. Oluşan bu buhar odacıktaki basıncı artırır ve artan basınç odacıktaki mürekkebi nozülden dışarı doğru iter. Hemen ardından buhar baloncuğu yoğunlaşır, büzülür ve odacığa yeni mürekkep girişine sebep olur [33]. Şekil 2.2 a’da bu işlem görülmektedir.



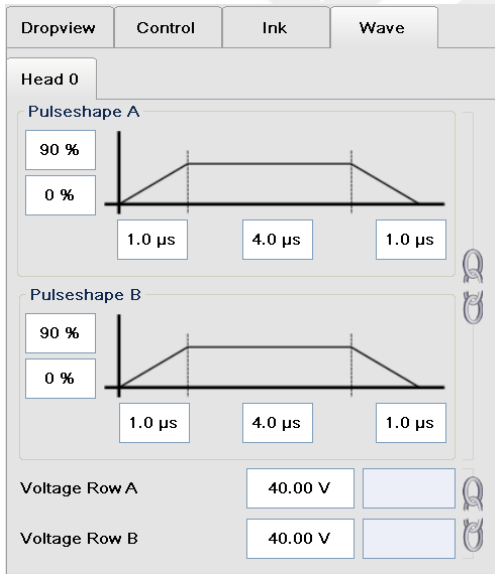
Şekil 2.2. a) Termal ve b) piezoelektrik inkjet çalışma şeması [32]

Piezoelektrik inkjet

Piezoelektrik inkjet yazıcı kafalarında, nozüllerin arkasında bulunan mürekkep ile dolu odacığın içinde piezoelektrik materyaller kullanılır. Bilindiği üzere bu malzemeler uygulanan potansiyel fark ile şekil değiştirirler, bu şekil değişimi ya da esneme odacık içinde bulunan mürekkep üzerinde bir basınç oluşturur. Bu basınç, tıpkı termal inkjette ani buharlaşma ile oluşan baloncuğun mürekkep üzerinde yarattığı basınç gibi, mürekkebi püskürtmek için kullanılır [34]. Şekil 2.2 b’de bu işlem görülmektedir. Bu adımda piezoelektrik inkjet kafasının, termal inkjet kafasına göre büyük bir üstünlüğü görülmektedir; termal inkjet kafasında mürekkep püskürtülmesi için oluşturulan baloncuk, nozül ile temas edebilir ve bu da nozülde anlık kuruluklara sebep olabilir. Anlık kurulukların ise nozüllerde tıkanmayı hızlandırdığı ve dolayısı ile kafanın ömrünü azalttığı bilinmektedir. Fakat piezoelektrik materyalin kullanıldığı kafalarda bu ihtimal çok daha düşüktür.

Piezoelektrik materyalin üzerine uygulanan gerilimin artırılması, hedef değerde tutulması ve tekrar düşürülmesi bir dalga formu oluşmasına sebep olur. Bu dalga formuna (potansiyel farkın zaman içinde değişimine) müdahale edilerek damlacık boyutu ve hızı kontrol edilebilir [35,36]. Bu ayarlama yapılırken yazıcı kafasının karakteristiğine, kullanılan mürekkebin karakteristiğine ve anlık mürekkep sıcaklığına dikkat edilmesi gerekmekte olup, değerler hesaplama sonucu değil, deneyimler sonucu tespit edilmektedir.

Tipik olarak dalga formu, potansiyel farkın istenilen değere ulaşması için geçen süreye, o değerde bekleme süresine, potansiyel farkın yeniden sıfırlanma süresine ve sıfır değerinde bekleme süresine müdahale edilmesi ile oluşturulur. Şekil 2.'de *Spectra S-class* yazıcı kafaları için müdahale edilen dalga şekli verilmektedir. Bunun yanında bu çalışmada da kullanılan *Trident 256* yazıcı kafası gibi kafalarda, dalga şekli sadece potansiyel farkın istenilen değerde kalacağı ve sıfır olacağı zamanların belirlenmesi ile de oluşturulabilir.



Şekil 2.3. Spectra S-class yazıcı kafası için dalga formu [30]

Piezoelektrik inkjet için yazma koşullarının etkileri

Deneyimler göstermektedir ki, yazma koşulları mürekkebin, yazma kafasının ve alttaşın birçok özelliğine bağlıdır. Bunların yanında sistemin karakteristiğinin ve dış ortam koşullarının da büyük bir etkisi vardır. Önemli olan başlıca özellikler aşağıda sıralandı.

❖ *Nozül boyutu*

Nozülün yarıçapı damlacığın hacmini direk etkilemekte olup maksimum çözünürlük ve katman kalınlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Daha küçük nozül boyutu daha yüksek çözünürlüğe ve daha ince filmlere imkân sağlayacaktır. Piyasada 9 µm yarıçapta nozüllere sahip kafalar bulunmakta ve bu kafalar 1 pl hacimli damlacıklar üretebilmekte ve 20 µm gibi bir genişlikte baskı yapabilmektedir [37,38]. Bunun yanında nozül boyutunun küçülmesi nozülün tıkanma ihtimalini arttırdığından, nozülde çıkan damlacığın kalitesindeki süreklilik nozül boyutu düştükçe düşmektedir.

❖ *Mürekkep sıcaklığı*

Mürekkep sıcaklığı arttıkça mürekkebin akışkanlığı arttığından, mürekkep nozüllerden daha kolay geçer. Bu durum özellikle nozüllerin tıkanması durumunda ya da daha kalın katman kalınlığına sahip baskıya ihtiyaç duyulması durumunda oldukça faydalı olmakla beraber sıcaklığın artması ile mürekkebin buharlaşma ihtimali artar. Buharlaşan mürekkep nozüllerin anlık olarak kuru kalmasına ya da daha kötüsü sistemin manifoldunun zarar görmesine sebep olabilir. Bu sebepler göz önüne alındığında mürekkebin basımı için optimum sıcaklığın tespiti elzemdir.

❖ *Potansiyel farkın büyüklüğü*

Potansiyel fark yükseldikçe mürekkebin akış miktarı, hızı ve mürekkebe uygulanan kuvvet artar. Bu sebeple genel olarak yüksek viskozite ve yüzey gerilimine sahip mürekkeplerde potansiyel farkın yükselmesi fayda sağlayacaktır. Bunun yanında yüksek kalınlık ile basılmak istenen baskılar için potansiyel farkın yükseltilmesi tercih edilebilecek müdahalelerden biridir. Fakat potansiyel farkın çok yükselmesi, mürekkep üzerindeki kuvveti arttırarak bir noktadan sonra nozülde çıkan damlacığın 2 ya da 3 parçaya bölünmesine sebep olarak baskıda hatalar oluşturabilir.

Bunun yanında ince filmler ve hassas çözünürlükler için potansiyel farkın, dolayısı ile damlacık boyutunun düşürülmesi gerekmektedir. Nozül boyutunun küçültülmesi kadar etkili bir yöntem olmamakla birlikte potansiyel farkın düşürülmesi, kullanılan yazıcı kafası ile üretilebilecek en küçük damlacıklara ulaşmak için kilit rol oynamaktadır. Fakat potansiyel

farkın çok düşürülmesi damlacık üzerindeki kuvveti azaltarak bir süre sonra damlacığın oluşmamasına sebep olur. Dahası, düşük kuvvet ile ateşlenen nozüller ufak bir kirlilik sebebi ile ateşlemeyi baskı sırasında kesebilmektedir. Bunun sebebi nozüllerde oluşan ufak bir daralma karşısında uygulanan kuvvetin düşük kalması ve dolayısı ile mürekkebin nozülden ittirilememesidir. En uygun potansiyel fark değerinin bulunması için analizler yapılabilmekle beraber en doğru sonuca zaman içinde biriken deneyim ile ulaşılmaktadır. Bu sebeple yazıcı kafasının iyi deneyimlenmesi elzemdir.

❖ *Uygulanan negatif basınç*

Bu basıncın amacı kafada bulunan mürekkebi yerçekimine karşı askıda tutmak olup, manifoldta bulunan venturi aracılığı ile sağlanmaktadır. 0 mbar'dan -38 mbar'a kadar ayarlama yapılabilmekte olup, yapılan ayarlama mürekkebin sıcaklığı, yoğunluğu ve viskozitesi ile doğrudan ilgilidir. Basınç değerinin yüksek olması nozüllerden mürekkebin kontrolsüzce akmasına sebep olabileceği gibi, çok düşük olması da mürekkebin akamamasına hatta basıncın düşmesi sonucu artan buharlaşma dolayısı ile venturiye nem gitmesine sebep olarak sistemin bozulmasına sebebiyet verebilir.

Operatör için kullanılan mürekkebe ve sıcaklık değerlerine uygun basınç değerinin tespiti belki de en önemli konulardan biridir. Düşük tercih edilen basınç değerleri uzun kullanımlar sonucunda nozül kalitesinin düşmesine ve hatta nozül kayıplarına sebep olacağı gibi, yüksek tercih edilen basınç değeri ise baskı sırasında mürekkebin kontrolsüzce akmasına sebep olarak baskı kalitesini düşürmektedir.

2.2. Mürekkep

Mürekkepler, inkjet teknolojisi için büyük bir öneme sahiptir. Mürekkep kalitesi tek başına sonuçların seviyesini, sistemin ve kullanılan kafanın ömrünü belirleyebilir. Nerdeyse, nano boyutlara getirilebilen her malzemedan mürekkep üretilmekle beraber, iyi kalitede desenler üretilebilmesi için, mürekkeplerin *viskozite ve parçacık büyüklüğü gibi* özelliklerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

Viskozite

Viskozite en temel manada bir akışkanın akma dayanımıdır. Düşük olması mürekkebin çok akışkan olmasına ve dolayısı ile baskı sırasında kontrol dışında akmasına, yüksek olması ise mürekkebin nozüllerden püskürtülememesine sebep olacaktır. Bazı baskı türleri için genel olarak önerilen viskozite değerleri Çizelge 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı baskı metotları için viskozite değerlerinin karşılaştırılması [39]

Baskı yöntemi	Viskozite aralığı (mPa.s)
Termal inkjet	1-5
Piezo inkjet	5-30
Gravüre	50-200
Fleksografi	50-500
Serigrafi	1000-10000
Ofset	40000-100000

Çizelge 'deki değerler genel aralıkları yansıtmakla beraber sistem üreticileri farklı aralıklar tavsiye edebilmektedirler. Bu çalışmada kullanılan sistem için önerilen viskozite aralığı 2 mPa.s-20 mPa.s arası olup kullanılan mürekkebin viskozite değeri 13 mPa.s'dir. Sıcaklık değeri değiştirilerek üst değer bir miktar esnetilebilse de bu yöntem önerilmemektedir.

Parçacık büyüklüğü

Yazıcı kafasının korunması açısından, parçacık boyutu ve nozül büyüklüğü arasında 1/100 gibi bir oranın bulunması, nozüllerin tıkanma riskini azaltmak amacıyla bir kural olarak görülmektedir. Bu konuda kabaca bir hesaplama yapılır ise, 10 pl civarında damlacık üreten yazıcı kafalarının nozül genişliği 20 µm civarında olduğu göz önüne alınırsa, bu kafadan ateşlenecek olan mürekkebin parçacık boyutları 200 nm'den düşük olması gerektiği görülmektedir. Fakat mümkün oldukça küçük parçacık boyutlarına sahip mürekkebin tercihi için en temel sebep nozüllerin korunmasından ziyade baskı kalitesinin arttırılmak istenmesidir. Daha düşük parçacık boyutları kalınlık için daha düşük değerlere ulaşılması, Ag parçacıkları arasında daha fazla temas alanının olması ve büyük parçacıklara nazaran daha iyi yayılabileceğinden dolayı parçacıklar arası daha az boşluk oluşması anlamına gelir.

2.2.1. Metal iletken mürekkepler

Inkjet sistemlerinde kullanılmaya uygun birçok iletken mürekkep bulunmaktadır. Bunlar; iletken polimer mürekkepler [40-42], karbon nanotüpler [3,43] ve metal nano-parçacıklardır [44]. Yüksek iletkenlik gereken durumlarda metal nano-parçacıklar daha yüksek performans sunmaktadır. Söz konusu metal nano-parçacık mürekkepler olduğunda, Au (altın) [45], Ag (gümüş) [2] ve Cu (bakır) [46] nano-parçacıklar ile üretilmiş mürekkepler farklı alttaşlar ile kullanılabilirler.

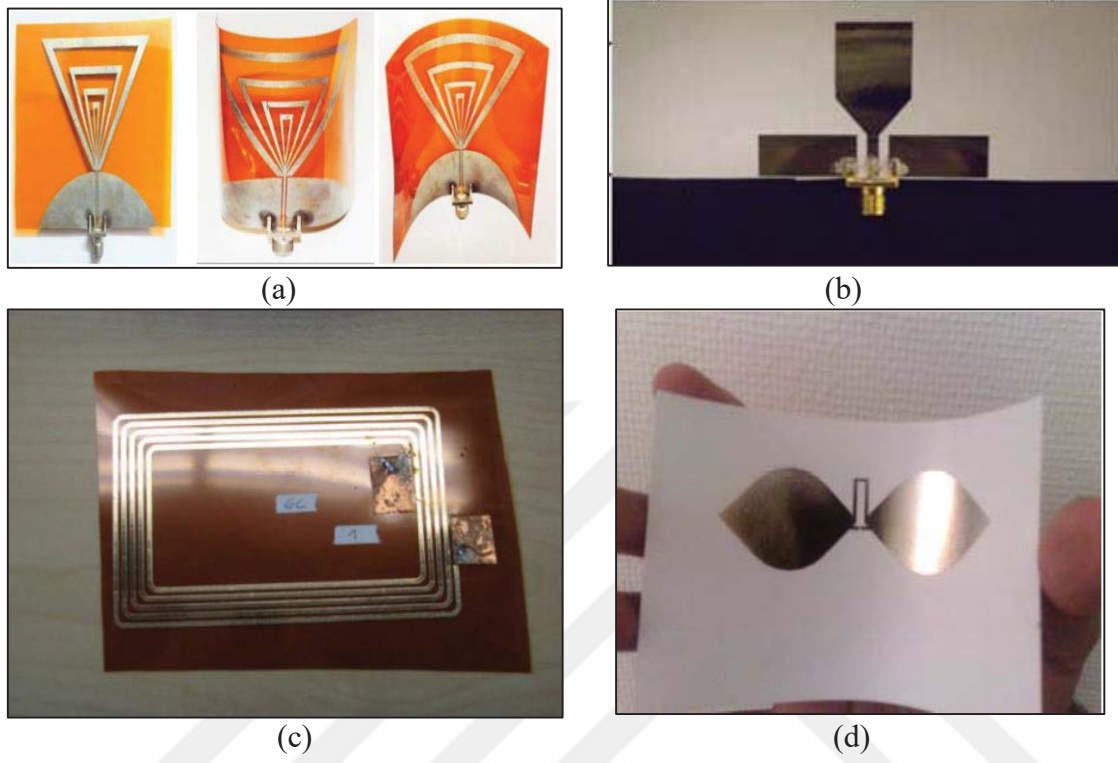
Ag metaller arasındaki en iyi elektriksel iletkenliğe sahip metallerden biridir ve piyasada inkjet yazıcılar tarafından kullanılabilen birçok mürekkebi mevcuttur. Au, maliyetinin yüksekliğinden dolayı, tüketim düşük olmadığı sürece çalışmalarda tercih edilmemekle beraber diğer ayırt edici özellikleri için kullanılmaktadır. Örneğin; elektrokimyasal sensor çalışmalarında kullanılan elektrotlar için, Au ve Ag karıştırılarak kullanılmaktadır [47]. Bunun yanında görece yüksek olan Ag maliyetleri uygulamalar konusunda hala daha sınırlamaya sebep olmaktadır. Bunun yanında Cu iletkenlik konusunda Ag'ye oldukça yakın olmakla beraber maliyeti Ag'ye göre oldukça düşüktür. Bu sebeple Cu'dan elde edilen mürekkepler oldukça ilgi çekmektedir. Bunun yanında Cu'nun Ag'ye göre çok daha kolay oksitlenmesi yaygın kullanımı önünde engel oluşturmaktadır. Bu tezde Ag filmlere odaklanılmış olup, ulaşılabilecek en düşük direnç değeri için üretim koşulları incelenmiştir.

2.2.2. Ag mürekkep

Literatür Ag mürekkeplerin kullanımı ile ilgili tarandığında, yüksek iletkenliğe ihtiyaç duyulan birçok alanda sıklık ile Ag mürekkeplerden faydalandığı görülmektedir. Bu durum, bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde büyük etkiye sahiptir.

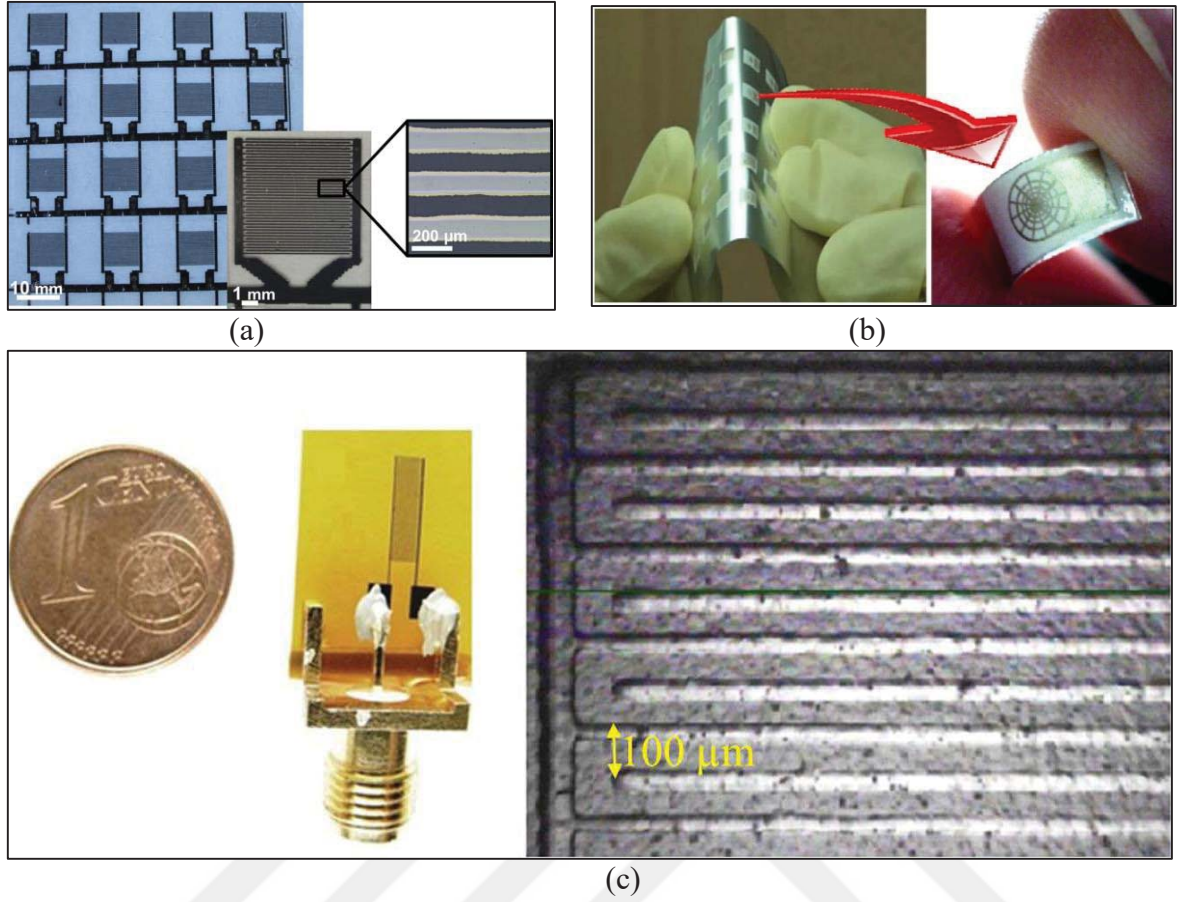
Literatür tarandığında bu alanların en başında anten teknolojileri gelmektedir. Yakın mesafe iletişimi (NFC) [48-50], mobil antenler [26], RFID antenler [16,51,52] için yapılan çalışmalara örnekler verilebilir ve bu örnekler arttırabilir. Anten teknolojilerinde yapılan özellikle ar-ge çalışmalarında inkjet yazıcı teknolojisinin sağladığı en büyük avantaj ise herhangi bir farklı desen hakkında inceleme yapılmak istendiğinde maske ya da litografiye ihtiyaç duymaksızın bu desenin bilgisayar ortamında çizilmesi ve basılmasıdır. Bu özellik

yeni bir tasarımın etkisi denenmek istendiğinde bu işlemi çok hızlı ve düşük maliyetli bir hale getirmektedir. Resim 2.2’de bu çalışmalarda üretilmiş antenlere örnekler verilmiştir.



Resim 2.2. Ag mürekkep kullanılarak Inkjet teknolojisi ile üretilen anten örnekleri. (a) multi band modül anten [26], (b) ultra geniş band anten [53], (c) NFC anten [48], (d) ultra yüksek frekanslar için RFID anten [52]

Inkjet teknolojisi ile üretilen Ag filmlerin sıklıkla kullanıldığı bir diğer alan sensör teknolojileridir. Nem sensörleri [54,55], insan tenine hassas yakınlık sensörü [29], gaz sensörü [56] gibi bir çok alanda üretilen sensörlerde Ag filmlerin yüksek iletkenliklerinden elektrot olarak faydalanılmaktadır. Resim 2.3’de Ag mürekkep kullanılarak üretilen sensör örnekleri görülmektedir.



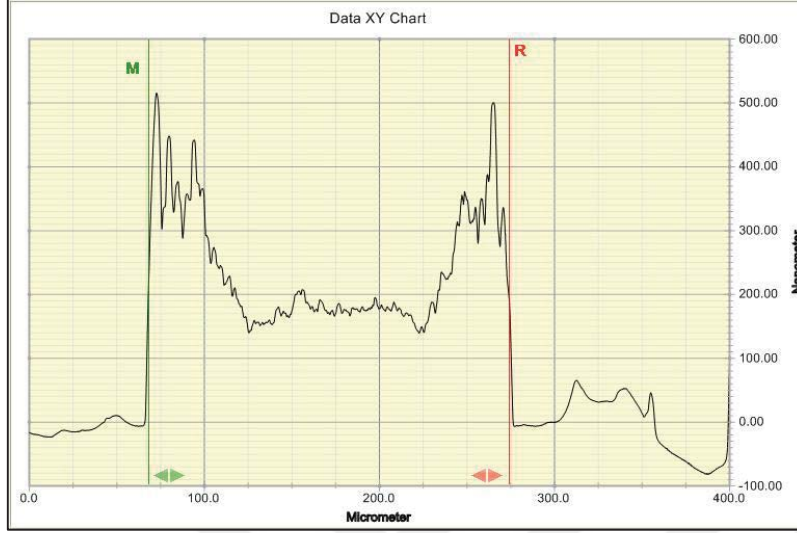
Resim 2.3. Inkjet teknolojisi kullanılarak üretilen sensor örnekleri. (a) plastik alttaş üzerine basılan nem sensörü [19], (b) yakınlık sensörü [29], (c) nem sensörü [54]

Yukarıdaki çalışmalar göz önüne alındığında, inkjet teknolojisi ile üretilen Ag iletken filmlerin önemi ve bu tez çalışmasının motivasyonunun kaynağı görülmektedir. Bunun yanında gelişen teknoloji ile neredeyse bütün elektronik sistemlerin küçülmesi ve bunun yanında mobil cihazların esnek devre elemanlarına ihtiyaç duyması, esnek alttaşlar üzerine basılmış Ag filmlerin önemini bir kez daha göstermektedir.

2.2.3. Kahve lekesi (Coffee staining)

Nano-parçacık mürekkeplerde karşılaşılan ve zaman zaman sorun olarak tanımlanabilecek bir etkidir kahve lekesi. Bu deyim genel olarak biriken bir sıvının içinde bulunan parçacık yoğunluğunun çizginin ya da damlanın kenarlarında daha yoğun olması anlamına gelmektedir. Bunun sebebi; sıvının kenarlarda daha hızlı buharlaşması ve iç kısımdan kenarlara doğru parçacık akışına yol açmasıdır [57]. Bu konuda yapılan çalışmalarda ve bu tezin konusu olan çalışmada da bu durum gözlemlenmiştir. Resim 2.4’de yapılan bir kalınlık

ölçümünde bu etki görülmektedir. Bunun yanında ise yüksek parçacık yoğunluğuna sahip mürekkep kullanımı bu etkiyi azaltmaktadır [58].



Resim 2.4. Örnek kalınlık ölçümü

Resim 2.4'de kırmızı ve yeşil çizgilerin konumlandırıldığı noktalar ince filmin genişlik sınırlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere kalınlık kenarlarda bir anda artmakta ve çizginin orta kısmında çukur oluşturmaktadır. Bu durum çizgilerin sabit bir kalınlığının olamamasına sebep olmaktadır. Çizgi kalınlıkları bu sebeple ortalama olarak hesaplanmaktadır.



3. BASKI YAPILAN SİSTEM VE BASKI KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

3.1. PixDro LP50

Bu çalışmada kullanılan yazıcı sistemi, Resim 3.1’de görülen, Roth&Rau tarafından üretilen, sadece nano mürekkepler ile materyal basmaya odaklanmış, giriş seviyesi ar-ge inkjet yazıcı sistemi olan *PixDro LP50*’dir.

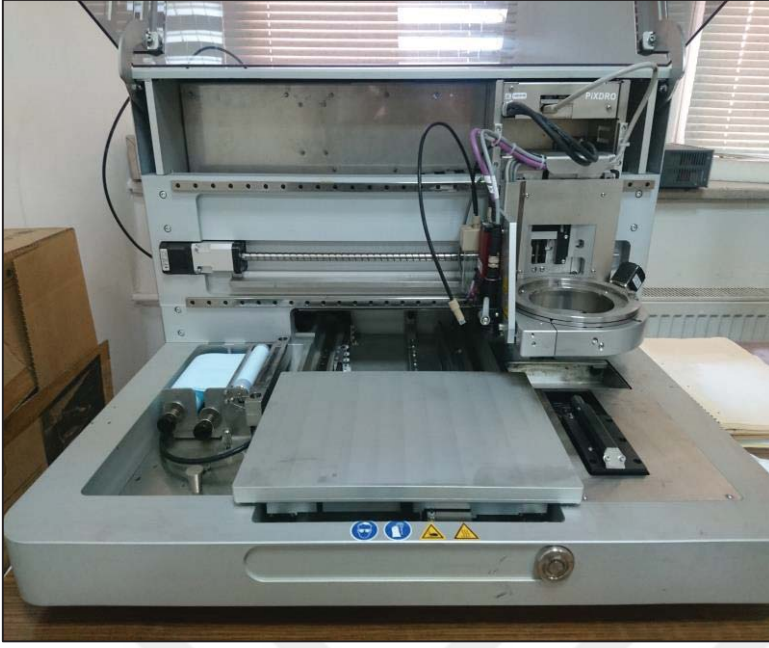


Resim 3.1. PixDro LP50 yazıcı sistemi (Gazi Fotonik)

PixDro LP50, baskı platformu, yazıcı kafası ve kontrol birimi olmak üzere 3 ana başlıkta incelenebilir.

3.1.1. Baskı platformu

Bu kısım tüm yazma işleminin yapıldığı ana sistemdir. Ölçüleri 770 x 620 x 410 mm olup ağırlığı yaklaşık 90 kg’dır. Resim 3.2’de bu çalışmada kullanılan sisteme ait baskı platformu görülmektedir.

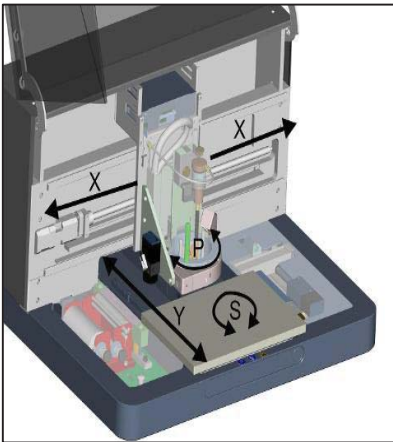


Resim 3.2. Baskı platformu (Gazi Fotonik)

Sistem 5 eksen de hareket etmekte olup bunlar:

- Kafanın monte edildiği kısmın X ekseninde hareketi
- Alttaş tablasının Y ekseninde hareketi
- Yükseklik ayarı için yazıcı kafanın Z ekseninde hareketi
- Yazıcı kafasının P ekseninde hareketi
- Alttaş tablasının S ekseninde hareketi

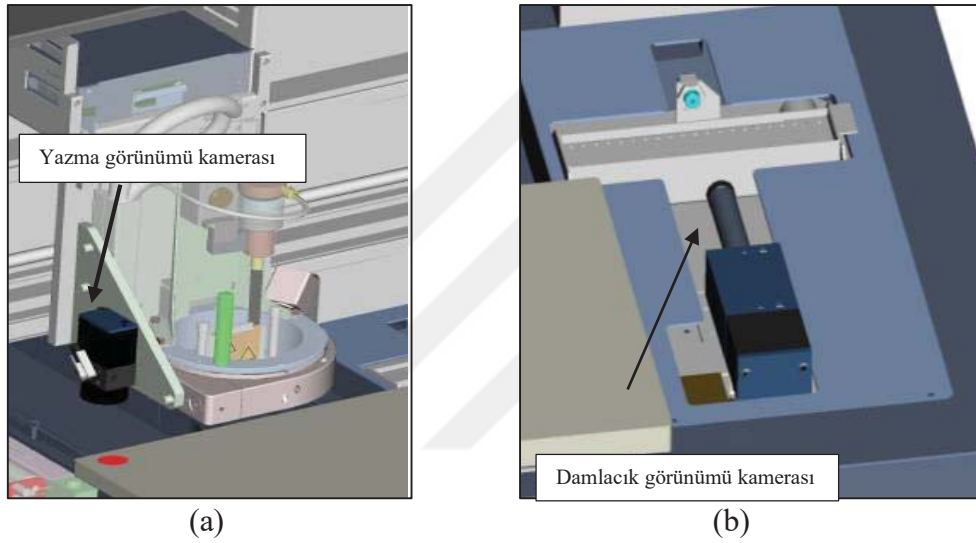
olup Resim 3.3'te görülmektedir.



Resim 3.3. PixDro LP50 hareket eksenleri [30]

Ana sistemin merkezinde alttaş tablası bulunur. Tablanın ölçüleri 240 x 290 mm'dir (A4 boyutu) ve tüm alan aktif olarak kullanılabilir. Alttaş tablası geri planda bir pompaya bağlıdır ve üstünde bulunan delikler sayesinde alttaşı vakumlayarak sabitler. Böylece yazma sırasında alttaşın hareket etmesi engellenmiş olur.

Bunun yanında tablanın içinde bulunan ısıtıcılar sayesinde alttaş tablası 90 °C'a kadar ısıtılabilir. Ayrıca alttaş tablası, altında bulunan rotasyon motoru ile döndürülebilmekte ve alttaşın konumu ile ilgili hassas ayar yapılabilir.



Resim 3.4. Yazma görünümü ve damlacık görünümü kameraları

Ana sistemin bir diğer önemli bileşeni Resim 3.4 a'da görünen yazma görünümü kamerasıdır. Yazma kafasının yan tarafında bulunan bu kamera, basım öncesi alttaşın konumunun görülerek, alttaş tablasının rotasyon özelliği ile oldukça hassas hizalanması sağlar.

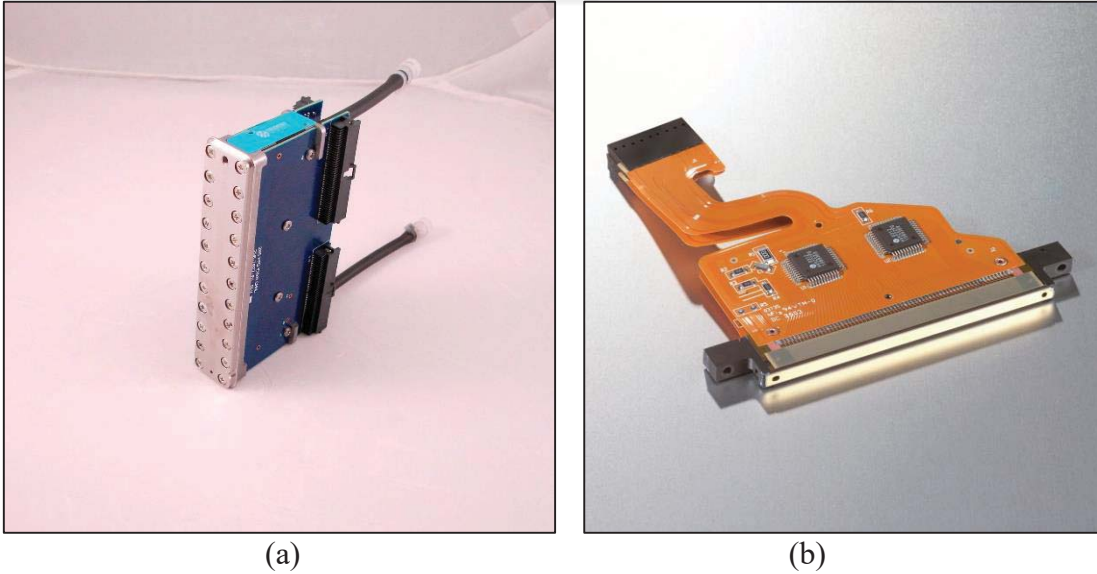
Fakat ana görevi yazma işleminin başlanacağı noktayı mikron hassasiyetinde belirlemektir. Bunu yapmak için iki farklı ışıklandırma kullanılmaktadır. Bunlar; eş-eksenli (coaxial) ve yayılmış (diffuse). Bu sayede kameradan alttaş net olarak görülür ve başlangıç noktası mikron hassasiyetinde belirlenebilir.

Resim 3.4 b'de görülen, yazıcının yan tarafında bulunan damlacık görüntüleme sistemidir. Bu sistem, üzerinde bulunan kamera sayesinde gerçek zamanlı olarak kafadan ateşlenen damlacıkların gözlenebilmesini sağlar. Bu sayede bir yandan nozüllerin durumu

gözlenirken, diğer yandan da sistemin özel yazılımı sayesinde damlacıklar analiz edilerek, hız, hacim ve çıkış açısı gibi özellikleri tespit edilir. Tüm bu bilgiler birleştirilerek basım işlemi sırasında kullanılacak nozüller belirlenir. Bu işlem oldukça önemlidir. Çünkü basım sırasında kullanılmak üzere en kaliteli ve devamlılığı yüksek nozülleri seçmek baskı kalitesinde anahtar rol oynamaktadır.

3.1.2. Yazıcı kafası

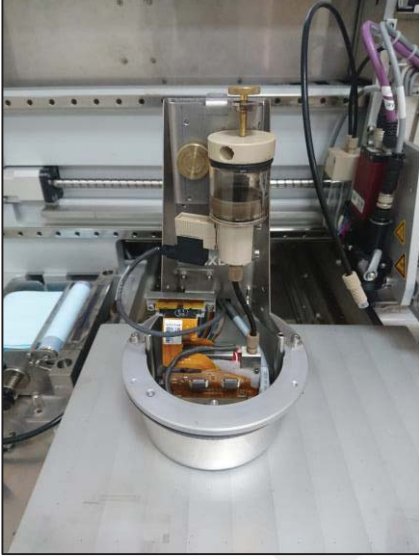
PixDro LP50, tasarımı dolayısı ile sanayi tipi olarak tanımlanabilecek ve yaygın olarak kullanılan birçok piezoelektrik inkjet yazıcı kafasına uyumludur. Bunlar arasında materyal basımı için tasarlanmamış, büyük boyutta baskılar yapılmak için kullanılan Spectra SE128 gibi yazıcı kafalarının yanında, bu teknolojiye ilginin artması ile sadece materyal basmak için tasarlanan Trident 256 ya da Konica Minolta KM512 gibi yazıcı kafaları da bulunmaktadır. Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde Spectra SE128 sanayi tipi yazıcı kafasına ve Trident 256 materyal yazımı için tasarlanan yazıcı kafasına sahip olup Resim 3.5'te resimleri verilmiştir.



Resim 3.5. Yazıcı kafaları (a) Trident 256, (b) Spectra SE128

Yazıcı kafaları yapılması planlanan basımın kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Özellikle damlacık boyutu, ulaşılabilecek maksimum çözünürlük, baskı sıcaklığı ve basılabilecek materyal çeşitliliği tamamen yazıcı kafasının özelliklerine bağlıdır.

Yazıcı kafaları sisteme montaj kiti ile monte edilir ve her kafa için ayrı olarak üretilen sürücüler sayesinde kontrol edilir ve kontrol birimi ile bağlantısı sağlanır. Resim 3.6'da Spectra SE128 için kullanılan montaj kiti görülmektedir.



Resim 3.6. Spectra SE128 yüklü yazıcı kafası montaj kiti

Bu çalışmada materyal baskısı için üretilen Trident 256 yazıcı kafası kullanılmıştır.

Trident 256 yazıcı kafası

Paslanmaz çelikten üretilen bu yazıcı kafası 256 nozüle sahiptir. Paslanmaz çelikten oluşması 2-14 pH arasındaki bazik ve asidik birçok sıvı ile kullanılabilmesine imkân sağlar. Bu özelliği sayesinde ihtiyaç duyulduğunda kaplama öncesi aşındırma işlemleri yapılabildiği gibi, kafanın temizlenmesi gerektiğinde biriken metallere kurtulabilmek için asitler kullanılabilir [30].

Trident 256 oldukça küçük nozüllere sahiptir ve bu nozüller sayesinde 7-30 pl arasında damlacıklar üretebilmektedir. Bunun yanında nozüllerin yerleşimi, nozül ekseninde 64 dpi çözünürlük tanımakla beraber uygun ayarlamalar yapıldığında 2560 dpi çözünürlüğe kadar baskı imkânı tanımaktadır. Fakat tabii ki baskı yapılacak çözünürlük sadece kafanın özelliklerine değil, mürekkep özelliklerine ve damlacık boyutuna da bağlıdır.

Bu yazıcı kafasında kullanılan piezelektrik materyaller 30 V ile 70 V arasında potansiyel fark uygulanmasına imkân vermektedir [30]. Bunun yanında piezelektrik materyallere uygulanacak gerilim için dalga formu 0.1 μ s hassasiyetinde belirlenebilmektedir ve bu da damlacık özelliklerine çok hassas müdahale edilebilmesini sağlar [30].

Son olarak Trident 256, mürekkebin 30°C ile 50°C arasındaki sıcaklıklarda kullanılabilmesine imkan sağlayan ısıtıcıya sahiptir[30].

3.1.3. Kontrol birimi

Baskı ile ilgili tüm ayarlamalar Kontrol birimi olarak kullanılan, bilgisayar da arayüz üzerinden yapılmaktadır. Arayüz üzerinden birçok değişkene müdahale edilebildiği gibi, baskı yapılacak koşulların belirlenmesi için analizler de yapılmaktadır. Koşullar her mürekkepte hatta neredeyse her desende farklılık göstereceğinden operatörün sistem üzerindeki deneyimi, işlemin süresi ve kalitesi için kilit rol oynamaktadır. Baskı işlemini gerçekleştirecek operatörün, iyi sonuçlar elde edebilmesi tamamı ile arayüz üzerindeki hakimiyetine bağlıdır. Resim 3.7’de arayüzün ana ekran görüntüsü görülmektedir.

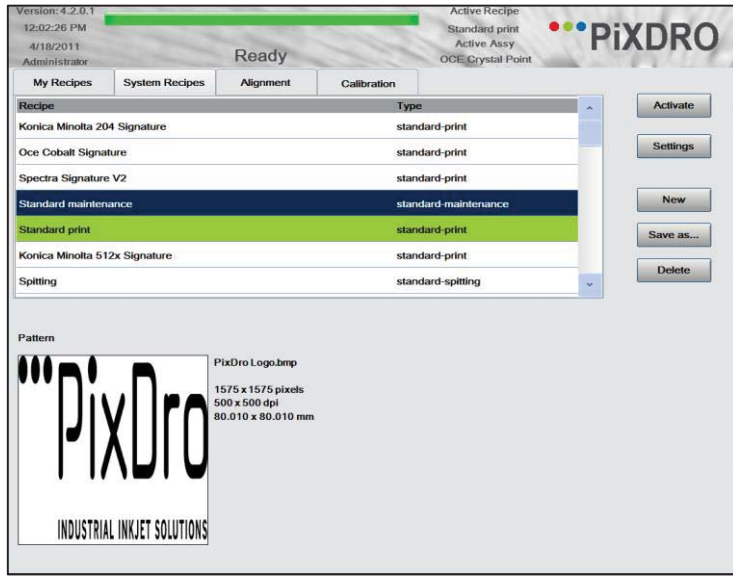


Resim 3.7. PixDro arayüzünün ana ekran görüntüsü [30]

Bu bölümde arayüz üzerinde yapılan ve baskı kalitesi üzerinde doğrudan etkisi olan ayarlardan ve analizlerden bahsedilecektir.

Reçete ayarları

Temel manada baskı yapılacak desen ve baskı koşullarının çoğunun belirlendiği bölümdür. Çözünürlük, yazma hızı, yazma yönü, aynı anda kaç nozülün ateşleneceği, aynı nozülün kaç kolonda bir kullanılacağı, hangi nozüllerin aktif olacağı, bakım yapılıp yapılmayacağı gibi birçok şeyin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Resim 3.8’de Reçeteler sekmesi görülmektedir.



Resim 3.8. Reçeteler (Recipes) menüsünün genel görünümü [30]

Bu ayarlardan belki de en önemlisi *nozül seçimidir*. Nozüller ADA (Advance Drop Analysis) ile incelenir, çalışan ve iyi durumda olan nozüller baskı için belirlenir. Burada kilit kelime “ortalama”dır. Baskıda kullanılacak nozüllerden çıkan damlaların, hacminin ve hızının birbirine yakın olması gerekmektedir. Aksi takdirde basılan desende yer yer yoğunluk farklılıkları oluşacaktır. Bu durum bazı kısımlarda, çok yoğun mürekkepten dolayı boşluk olması gereken yerlerin kapanmasına, bazı noktalarda ise iletkenlik kayıplarına sebep olabilir. Nozül seçimindeki bir başka kilit nokta ise damlacığın nozülden çıkış açısıdır. Bu açının çok yüksek olması damlanın gitmesi gereken yere ulaşmasını engelleyerek, desene zarar vermesine sebep olacaktır.

Reçetede bulunan bir başka önemli ayar çözünürlüktür. Çözünürlük yatayda ve dikeyde inç başına nokta (dpi) olarak girilir. Çözünürlüğün doğru seçilmesi çok önemlidir. Düşük olması desende kopukluklara sebep olacaktır, fakat çok yüksek olması da desendeki mürekkep

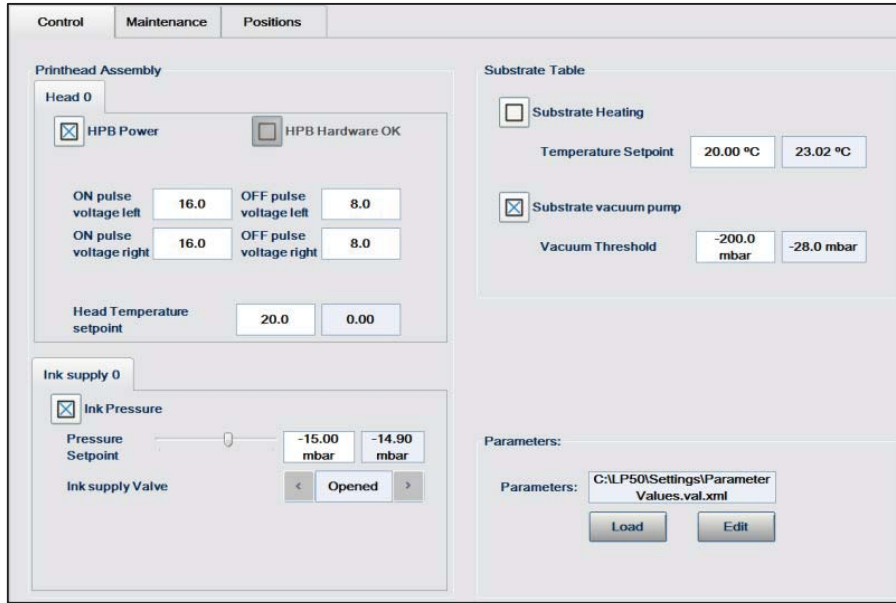
miktarını arttırarak yayılmasına ve desenin bozulmasına sebep olacaktır. Bu sebeple operatörün deneyimlerine dayanarak iyi bir seçim yapması oldukça önemlidir.

Üzerinde durulması gereken diğer özellikler aynı anda kaç nozülün kullanılacağı ya da kalite faktörü (Quality Factor (QF)) ve kaç kolonda bir aynı nozülün kullanılabileceği ya da adım sayısıdır (step). QF1 nozüllerin tek tek ateşlenmesi manasına gelirken QF5 nozüllerin her defasında yeniden belirlenen 5'li gruplar halinde ateşlenmesi manasına gelmektedir. Bu durum toplam proses süresini etkilemekle beraber, kafa açısı değiştirilerek normalde sistem yeterlilikleri ile ulaşılamayacak çözünürlük değerlerine de ulaşılmasını sağlamaktadır. Step ya da adım sayısı ise bir nozül ateşlendikten sonra kaç piksel ara verileceğini belirler. Temelde yazılım desenin üzerinden yapacağı her geçiş için hangi nozülün hangi noktada ateşleneceğini geçiş öncesinde belirler. Adım sayısı ise kullanılmış bir nozülün kaç kolon sonra ateşleneceğini belirlemek için kullanılır. Bu ayar sayesinde hem kullanılan nozüllerin çeşitliliği artar hem de nozül sürekliliği korunur.

Bunların yanında yapılacak analizler için de gerekli reçete seçimleri bu menüden yapılmakta ve ilerleyen bölümlerde bunlara da değinilecektir.

Kontrol

Bu menüde genel olarak kafanın ve alttaşın kontrolü, kafanın bakımı ile ilgili işlemler ve çeşitli işlemler için kafanın gitmesi gereken pozisyonlara kafanın hareketi ile ilgili işler yapılmaktadır. Bu menünün görünümü kullanılan yazıcı kafasına göre farklılık göstermekle beraber, yapılan işlemler değişmemektedir.



Resim 3.9. Kontrol menüsü genel görünümü

Bu menüde 3 farklı sekme olup bunlar: *Kontrol*, *Bakım* ve *Pozisyonlardır*.

Kontrol bölümü yazıcı kafanın ve alttaşın kontrolü için kilit sekmedir. Bu kısımdan öncelikle yazıcı kafasına gücün verilmesi sağlanmaktadır. Sonrasında ise piezoelektrik malzemeye uygulanacak olan potansiyel fark, mürekkebe uygulanacak olan negatif basınç ve mürekkebin sıcaklığı burada belirlenir. Görüldüğü üzere burası yazıcı kafasının çalıştırıldığı ve temel ayarların yapıldığı kısımdır.

Bunların yanında alttaş tablasının da temel özellikleri bu sekmeden kontrol edilir. Bunlar uygulanacak sıcaklık ve alttaşın tutulması için uygulanacak vakumdur.

Bakım bölümü, nozüller istenilen kalitede olmadığında, tıkanmış olduğunda ya da düzgün çalışmaya devam etmeleri amacıyla yapılacak olan bakım seçeneklerinin bulunduğu sekmedir. Bunlar basınç uygulanarak mürekkebin nozüllerden geçmesini sağlayan *temizleme*, özel bir istasyonda vakumla mürekkebin nozüllerden emilmesini sağlayan *emme*, seçilen nozüllerden belirli bir frekansta belirli bir sayıda ateşleme yapılmasını sağlayan *jet* ve bu işlemler sonucunda nozüllerin önünde birikecek olan mürekkebi temizlemek için *silme* seçenekleridir.

Pozisyonlar bu menüdeki son sekmedir. Bu sekmeden yazıcı kafası önceden kaydedilmiş, temizleme pozisyonu, silme pozisyonu gibi pozisyonlara otomatik olarak gönderilebileceği gibi bu pozisyonlar yeniden belirlenebilir.

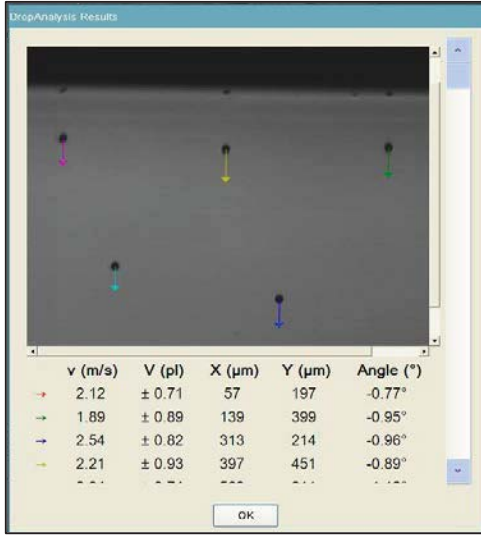
Yazdırma görünümü

Bu menü altında yazdırma görünüm kamerası kullanılarak alttaş ile ilgili ayarlar yapılabilmektedir. Bunlardan ilki ve en önemlisi tabii ki yazmaya başlanacak ilk konumdur. Daha önce de bahsedildiği gibi, mikron hassasiyetinde başlangıç noktası belirlenebilmektedir. Bunun yanında alttaşın kalınlık bilgileri ve yazma işleminin alttaşın yüzeyinden ne kadar mesafe yukarıda yapılacağı ve yazma sırasında kafanın yatay ile yapacağı açı da bu menü altında belirlenmektedir.

Bunların yanında bu bölümde otomatik olarak ya da manuel olarak alttaşın düz olması için alttaş tablasının rotasyon özelliği kullanılabilir. Eğer bu işlem otomatik olacak ise, programa alttaşın birbirine dik olan iki kenarından 3 nokta gösterilir ve yazılımın otomatik olarak alttaşın düz olması için gerekli rotasyon miktarını hesaplaması beklenir.

Damla görünümü

Bu menü altında damlacığın özellikleri incelenmektedir. Damlacığın kalitesini belirleyen etkenlere müdahale edilerek, damlacık kalitesi ile ilgili analizler yapılabilmektedir Resim 3.10'da sistem manuelinden alınmış örnek bir analiz görülmektedir.



Resim 3.10. Örnek damlacık analizi

Kontrol menüsü altında mürekkep kalitesi ile ilgi müdahale edilebilen, potansiyel fark, basınç, sıcaklık gibi özelliklere Damla-görünümü (dropview) menüsü altında da müdahale edilebilmektedir. Fakat bu menünün gerçek önemi damlacık üretilirken uygulanacak dalga formunun burada belirlenmesidir. *Dalga* sekmesi altında potansiyel farkın uygulanacağı ve uygulanmayacağı süreler belirlenir ve yapılan analizler ile damlacığa etkisi gözlemlenir.

Bunların dışında bu menü altında nozüller tek tek incelenerek nozüllerin durumları görülebilir ve hangi nozüllerin kullanıma uygun olup hangilerinin kullanıma uygun olmadığı görülebilir.

ADA (Advanced Drop Analysis)

ADA sistem yazılımına ek olarak sunulan analiz programıdır. Çalışma prensibi basitçe damla-görünüm özelliğini kullanarak, değişkenlerin damlacık yapısı üzerindeki etkisini, belirli şartlar altında tek bir nozülün devamlılığını ya da tüm nozüllerin belirli şartlar altında tek tek kalitesini analiz etmektir. Analiz sonuçlarını resim, hız, çıkış açısı ve hacim verileri olarak operatöre sunmaktadır.

ADA baskı koşullarının belirlenmesi ve basımda kullanılacak nozüllerin görülmesi için oldukça kullanışlı bir programdır. Operatörün normal koşullarda saatlerce sürecekle ve geçen

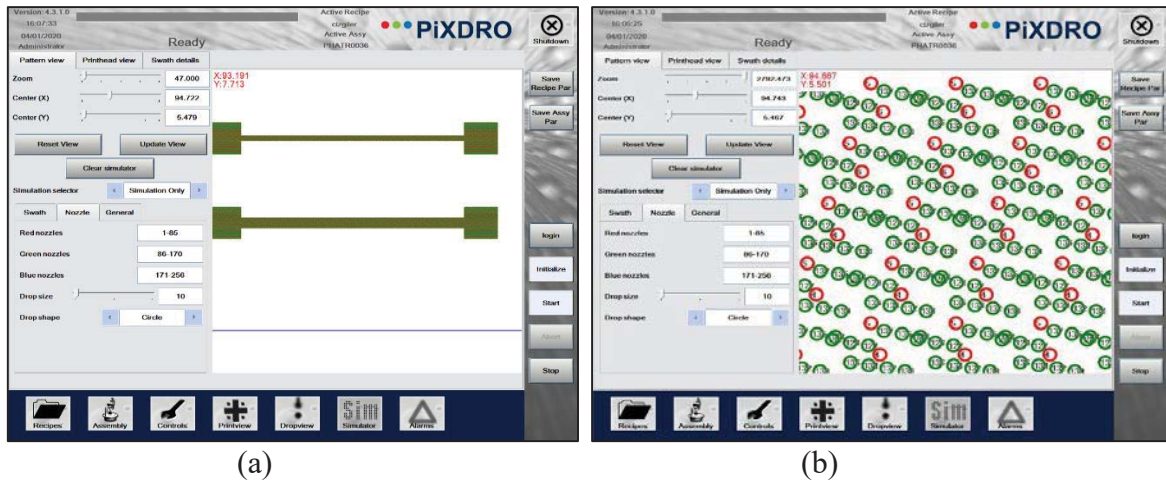
sürede nozüllerin durumu değişeceği için anlamsızlaşacak analizleri yapmasına imkân tanır. Özellikle baskı yapılacak nozüllerin belirlenmesinde çok büyük öneme sahiptir.

Yazma simülatörü

Basılacak desen ve baskı koşulları belirlendikten sonra, basım sırasında bir sorunun çıkıp çıkmayacağı bu menü altından görülür. Temelde baskı öncesi son kontroldür. Bir uyumsuzluk olması durumunda (ki çözünürlük, seçilen nozüller, kafa açısı, QF, adım sayısı düşünüldüğünde nozüller ve pikseller eşleştirilmesi sırasında sorun çıkması oldukça olasıdır) yapılan simülasyon ile sorun görülüp gerekli müdahaleler yapılır.

Bunun yanında simülasyon sonrasında baskının tablada nereye yapılacağı da görülerek olası dikkatsizlik hatalarının önüne geçilir.

Fakat belki de en önemli özelliği baskı sırasında hangi piksel için hangi nozülün kullanılacağını görülebilmesidir. Bu durum çoğu zaman baskı sonrasında görülen ateşleme hatalarının hangi nozüllerden kaynaklandığı hakkında bilgi vererek aynı durumun tekrarlanmaması için gerekli önlemin alınmasına imkân verir. Resim 3.11’de simülasyon ekranından bir görüntü görülmektedir ve resimde görüldüğü gibi farklı numara aralığındaki nozüller farklı renklerde işaretlendiği gibi hangi piksele hangi nozülün ateşlendiği de görülebilmektedir.



(a)

(b)

Resim 3.11. Örnek simülasyon ekran görüntüsü (a) basılan çizgilerin uzaktan görünümü, (b) piksel boyutuna kadar yakınlaştırılmış hali

3.2. Baskı Koşullarının Belirlenmesi

Bu bölümde baskı işlemi için kullanılan şartların belirlenmesi için yapılan analizler ve bu analizlerin sonuçlarının değerlendirilmesi yapılacak olup, bu işlem için nasıl bir yaklaşım izlenilmesi ve nelere dikkat edilmesi gerektiği konusunda bilgiler verilecektir.

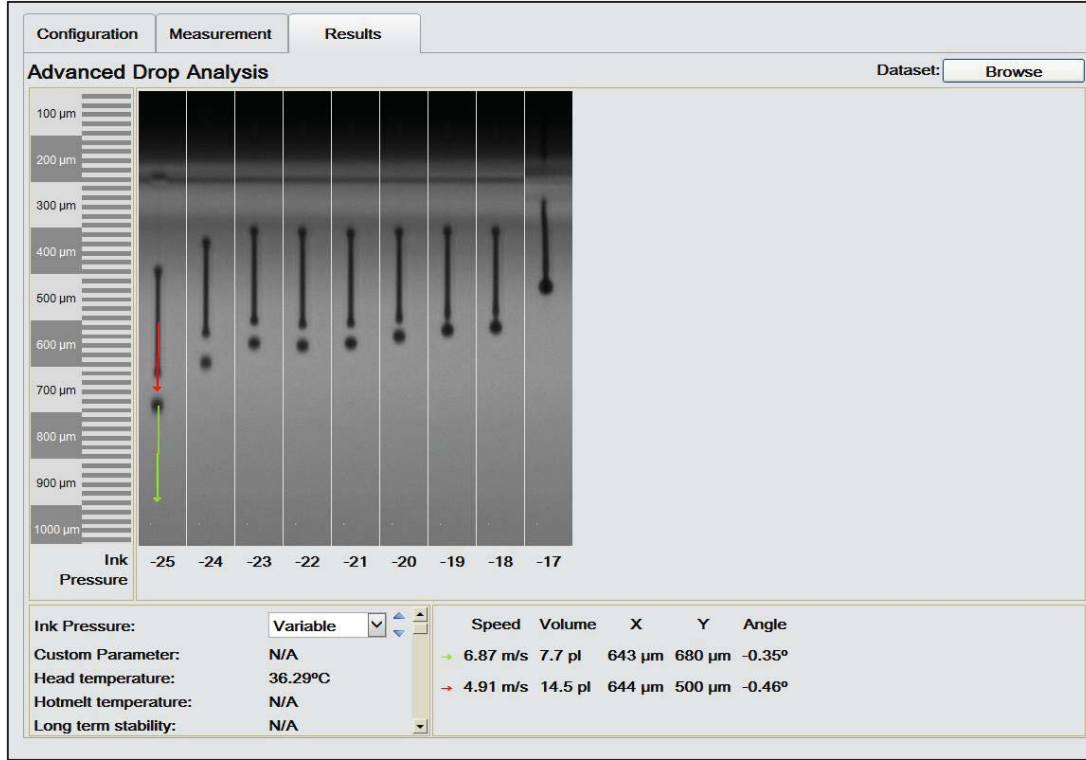
3.2.1. Damlacığın üretim şartlarının belirlenmesi

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi damlacığın kalitesini belirleyen faktörler:

- ❖ Mürekkep sıcaklığı
- ❖ Potansiyel fark değeri
- ❖ Basınç değeri
- ❖ Dalga şekli (potansiyel farkın uygulanma ve uygulanmama süresi)

Bu özellikler üzerinde yapılan değişiklikler esnasında dikkat edilen veriler ise damlacığın hacmi, hızı ve görüntüsüdür. Yapılan analizler sonucunda tercih edilen değerler ile; 4-5 m/s hızında, ortalama 20 pl civarında hacme sahip damlacıklar elde edilmiştir. Asıl hedef 10 pl civarı damlacıklar üretmek olsa da bu hedefe ulaşıldığında ateşleme yapabilen nozül sayısındaki azlık, ateşleme yapan nozüllerin ise kalitesindeki düşüklük ve devamlı olmayışları, damlacık hacminin yüksek seçilmesini mecbur kılmıştır.

Yapılan analizlerden ilki mürekkep için uygun basınç değerinin bulunmasıdır. Bunun için tek bir nozül üzerinden yapılan analizin görüntü çıktısı Resim 3.12’de verilmiştir. Analiz çıktısında -25 mbar ve -17 mbar arasındaki basınç değerleri için, aynı nozülden çıkan damlacıkların şekilleri görüyor. Bu resimler yazılım tarafından ayrı ayrı çekilerek bir arada operatöre sunulmaktadır.

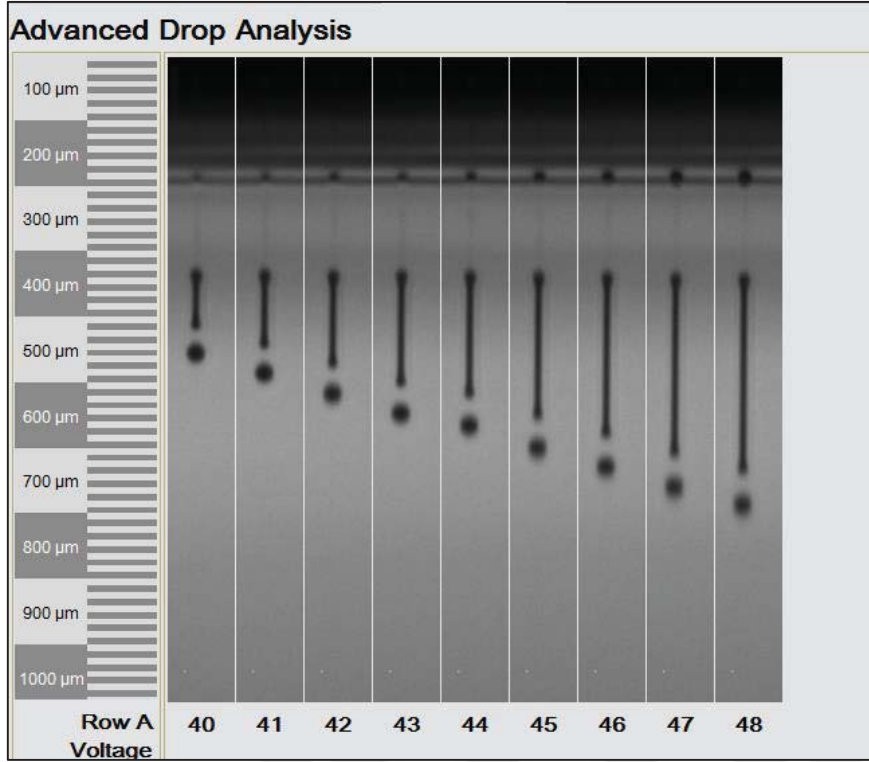


Resim 3.12. Basınç değişiminin damlacığın özellikleri üzerine etkisi

Analiz için seçilen değerler bu mürekkep ile atış yapılabilen değerlerdir. -17 mbar'dan daha yüksek mürekkep basınçları için, mürekkebin ağırlığı dengelenemezken, -25 mbar'dan daha düşük değerlerde ise nozüllardan havanın vakumlanması ihtimali ortaya çıkmaktadır.

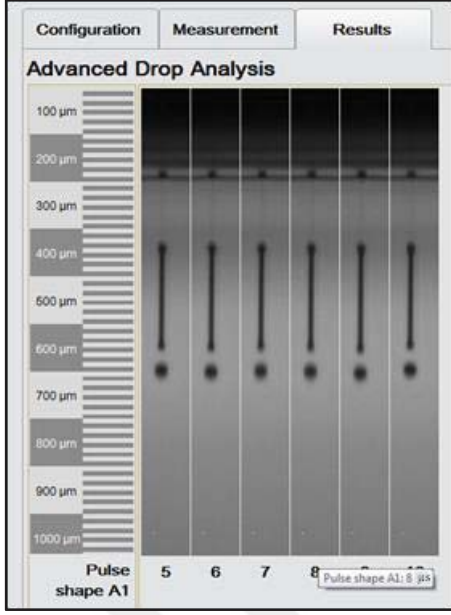
Görölmüş olduğu gibi kafa sıcaklığı 36 °C'dir. Bu sıcaklık dışarıdan etki olmaksızın bir süre çalıştırılan kafanın ısınması sonucu ulaştığı limit değerdir. Yukarıda bahsedildiği gibi bu ölçüm tek bir nozül üzerinden alındı. Sonrasında bu basınçlar altında diğer nozüller incelendi ve -20 mbar, -21mbar, -22 mbar ve -23 mbar değerleri uygun göröldü ve mürekkep üzerinde deneyim arttıkça -22 mbar basınç değerinde karar kılındı.

Sonrasında karar verilen potansiyel fark değeri oldu. Potansiyel fark değeri üzerinde yapılan değışimin, nozülden çıkan damlacığa etkisi Resim 3.13'te görölen analiz sonucunda görölmektedir. Bu ölçüm yine tekbir nozül üzerinden yapıldı ve resimler altlarında yazan potansiyel fark değerlerinde yazılım tarafında çekilerek bir arada operatöre sunulmuştur.



Resim 3.13. Potansiyel fark değişiminin damlacık üzerine etkisi

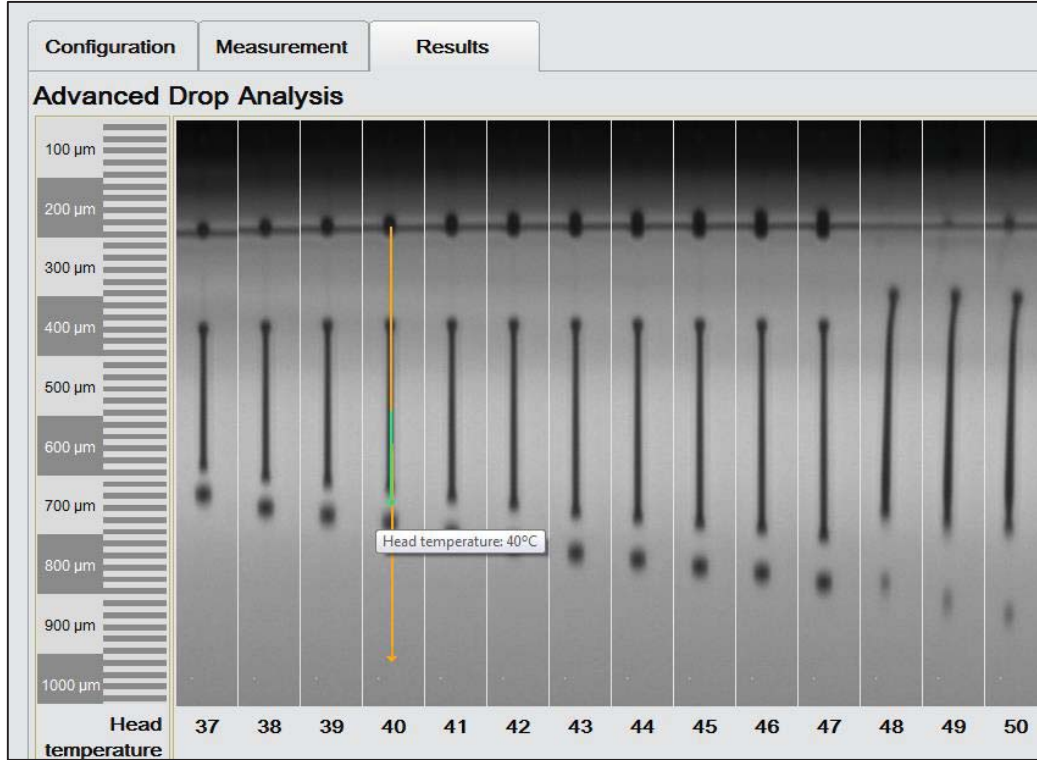
Görüldüğü üzere potansiyel fark arttıkça damlacığın boyutları artmaktadır. 40 V değeri için damlacık boyutu başlangıçta istenilen hacim değerlerine daha yakın olmakla beraber, 45 V için nozüllerin devamlılığı ve düzgün ateşlenen nozül sayısı çok daha fazla olduğundan bu değer tercih edildi. Bunun temel sebebi elbette ki nozüllerde uzun süre kullanılmanın yarattığı kirlilikten kaynaklı olarak 40 V değerinin bazı nozüllerden mürekkep ateşlenmesi için yeterli gücü sağlayamamasıdır. Fakat 45 V değerinde kaliteli ateşleme yapan nozül miktarı arttı, nozüllerden çıkan damlacıkların değerleri birbirine yaklaştı ve devamlılıkları arttı. 48 V değerinde ise damlacık boyutu artmakla beraber nozüllerin sayısında ve kalitesinde anlamlı bir değişim görülmedi, hatta bazı nozüllerden çıkan damlanın parçalara ayrıldığı gözlemlendi.



Resim 3.14. Dalga şeklinin (potansiyel farkın uygulanma süresinin) damlacık üzerine etkisi

Resim 3.14’de seçilen potansiyel farkın uygulanma süresinin etkisi görülmektedir. Görünüş olarak çok büyük fark olmamakla beraber bu değerin hem hız hem de nozülün devamlılığı üzerine etkisi olduğu yapılan ölçümlerde görüldü. Yine tüm nozüllere bakıldığında en iyi sonuçlar 8 µs için alındığından bu değer tercih edildi.

Sıcaklık değişiminin mürekkebin özellikleri üzerine olan etkisi görülmek amacıyla son analiz sıcaklık üzerine yapıldı. Resim 3.15’de görüldüğü gibi sıcaklık artışı ile damlacığın formu giderek bozulmaktadır. Bunun sebebi basitçe viskozitenin azalması ve akışkanlığın artmasıdır. Baskı sıcaklığı olarak deneyimlere dayanılarak 40 °C belirlenmiştir. Bunun sebebi önceki deneyimlerde baskı sırasında alttaş sıcaklığı sebebi ile ortam sıcaklığındaki artıştan dolayı mürekkep 40 °C ye kadar ısındığı görüldü ve şartların sabit olması amaçlanarak baskı sıcaklığı 40 °C olarak belirlendi.



Resim 3.15. Sıcaklığın damlacık üzerine etkisi

3.2.2. Tarif özellikleri

Bu başlık altında müdahale edilen ayırt edici özellikler QF değeri, adım sayısı, yazıcı kafa açısı, çözünürlük ve kullanılacak nozül numaralarıdır. Çözünürlük değişimi incelenen değişken olduğundan ve nozül seçimleri her baskı öncesi yeniden yapıldığından bu başlık altında karar verilmesi gereken değişkenler QF değeri, adım sayısı, yazıcı kafa açısıdır.

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bu özellikler toplam işlem süresine, kullanılacak nozül çeşitliliğine ve ileri seviye uygulamalar için ulaşılabilecek maksimum çözünürlüğe etki etmektedir. Öncelik sırası düşünüldüğünde, en büyük öncelik QF değeri ve adım sayısıdır. Bu değerlerin yükselmesi kullanılan nozül çeşitliliğini arttıracak ve hem baskı hatalarını azaltacak hem de nozüllerin sürekliliğini arttıracaktır. Fakat bunun yanında sayıların artması da kullanılan nozül miktarı ve birbirlerine göre konumlarına bağlıdır. Kullanılan nozül miktarı göz önüne alındığında ve kafa açısı 0 ° olarak girildiğinde QF ve step sayısı yazılımın yaptığı hesaplama sonucu hata alınmayan en yüksek değer olan 3 seçildi.

Kafa açısı ise tek geçişte taranabilen alanı belirlemektedir. Bu sebeple tercih edilen değer 45° olmakta ve baskı süresi mümkün olduğunca kısaltılmaktadır. Bunun faydası; kafanın ısıtılmış alttaş tablası üzerinde daha az gezinmesi ve dolayısı ile mürekkebin daha az ısınmasıdır. Fakat kullanıma uygun nozül sayısı yetersiz olduğundan yalnızca QF değeri ve adım sayısı 1 olduğunda nozüller ve pikseller hatasız bir şekilde eşleşebildi. Nozül çeşitliliği daha önemli olduğundan kafa açısı 0° tercih edildi.

3.2.3. Kullanılacak nozüllerin belirlenmesi

Nozüllerin belirlenme işlemi her baskı işlemi öncesi tekrar yapılmaktadır. Bunun için ADA programı üzerinden “nozül benzerlik” analizi yapılmaktadır. Bu analizde yazılım damla-görünümü üzerinden tüm nozülleri analiz etmekte ve sonuçları operatöre sunmaktadır. Operatör tüm nozüllerden gelen verileri inceledikten sonra yazmaya uygun olan nozülleri belirler ve “*Tarifler*” menüsündeki ilgili yere girer.

Nozüller seçilirken dikkat edilen noktalar; çıkan damlacığın genel görünüşü, nozülün etrafında kirlilik olup olmadığı, damlacığın çıkış açısı, damlacığın hızı ve hacmidir. Operatörün sadece o anda iyi olan ve çalışan nozülleri görmesinin yanında çıkan damlanın durumuna bakarak sorun çıkması muhtemel olan nozülleri de elemesi gerekmektedir. Bu sebeple operatörün deneyimi burada kilit rol oynamaktadır.

3.2.4. Alttaş şartlarının belirlenmesi

Alttaş sıcaklığının tek başına püskürtülen mürekkebin alttaş üzerinde ne kadar yayılacağını belirlediği, doğru alttaş sıcaklığı kullanılmayan baskılarda mürekkebin dağıldığı ve deseni bozduğu önceki deneyimlerde tespit edildi. 500 dpi çözünürlük daha önce bu mürekkep ile deneyimlenen bir baskı çözünürlüğü olduğundan uygun alttaş sıcaklığının 60 °C olduğu bilinmekteydi. Aynı alttaş sıcaklığı şartların korunması ve bu sayede karşılaştırmanın daha doğru yapılabilmesi için 800 dpi çözünürlükte de kullanıldı.

4. Ag FİLMLERİN BASIMI, ELDE EDİLEN SONUÇLAR VE YORUM

Bu tez çalışmasında esnek alttaşlar üzerine iletken Ag filmler inkjet baskı yöntemi kullanılarak basıldı ve ileriki çalışmalarda kullanılmak amacı ile iletken filmlerin kalitesi ile tavlama koşulları ve baskı çözünürlüğünün ilişkisi incelendi.

4.1. Ag filmlerin Basımı

Bu tez çalışmasında üretilen tüm Ag filmler *Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi* bünyesinde bulunan PixDro LP50 inkjet baskı sistemi Trident 256 yazıcı kafası ile kullanılarak basıldı.

4.1.1. Kullanılan malzemeler

Alttaş

Alttaş olarak, Dupont firmasının ürettiği 75µm kalınlığa sahip *Kapton HN poliimid film* kullanıldı. PET gibi diğer esnek alttaşlar yerine Kapton filmin tercih edilmesinin temel sebebi; bu filmin oldukça geniş çalışma sıcaklığıdır. Kapton HN -269°C ile 400°C arasındaki sıcaklıklarda yapısını koruyabilmektedir. Maksimum tavlama sıcaklığının 250°C seçilmesinden dolayı bu alttaş tercih edildi.

Mürekkep

Bu çalışmada Genes' Ink firmasına ait Smart'Ink S-CS01520 kodlu Ag mürekkep kullanıldı. Bu mürekkep alkol ve glikol karışımı içinde 100 nm'den küçük Ag nano parçacıkların çözülmesi ile üretilmiştir. Üretici firma tarafından esnek alttaşlar üzerinde yapılacak olan ve yüksek iletkenliğe ihtiyaç duyulan çalışmalar için önerilmektedir. Mürekkebin genel özellikleri Çizelge 4.1'de verildi.

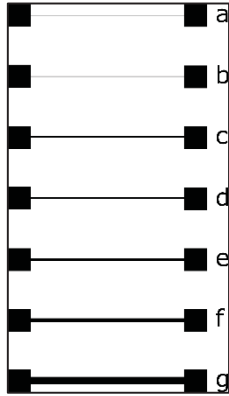
Çizelge 4.1. Kullanılan mürekkebin genel özellikleri

Kütlece parçacık yoğunluğu	%20±1
Solvent türü	Alkol/glikol karışımı
Yoğunluk	1,1 g/cm ³
Parçacık boyutu	<100 nm
Viskozite	12±3 mPa.s
Yüzey gerilimi	24±3 mN/m
Tavsiye edilen tavlama sıcaklığı / süresi	150 °C / 30 dk
Tavlama sonrası vaat edilen Özdirenç	6 µΩ.cm
Uygun olduğu alttaşlar	PET, PEN, KAPTON, Seramik

Bu mürekkebin seçilmesinde; vaat edilen özdirenç değeri, esnek alttaşlara uygun olması, çözücüsünün alkol/glikol karışımı olması ve dolayısı ile temizliğin sadece alkol ile yapılabilecek olması ve piyasada bulunan diğer mürekkeplere nazaran maliyetinin düşük olması etkili oldu.

4.1.2. Desen

Baskı yapılan desen Inkscape programı kullanılarak tasarlandı. Gerçek boyutlu görseli Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Kullanılan desen

Desen tasarlanırken temel amaç; basılan her numunede mümkün olduğu kadar fazla genişlikteki çizginin incelenebilmesi olarak özetlenebilir. Desende kullanılan çizgilerin uzunluğu 2 cm, çizgilerin uçlarına yerleştirilen elektrotların boyutları ise 3 x 3 mm² dir.

Çizgilerin genişlikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Fakat basım sırasında basım koşullarının etkisi ile çizgiler tasarlanandan farklı genişliklere ulaşıldı ve öz direnç değerleri arasında karşılaştırma yapılırken amaçlanan değil ulaşılan genişlikler dikkate alındı.

Çizelge 4.2. Çizgilerin tasarlanan genişlik değerleri

Çizgi	Tasarlanan genişlik (μm)
a	50
b	100
c	200
d	300
e	400
f	500
g	1000

4.1.3. Alttaşların hazırlanması

Alttaşların tamamı, desen ölçülerinden çok az daha büyük olması uygun görülerek, 6 cm x 3 cm ölçülerinde kesildi. Kesilen parçalar üzerlerindeki herhangi bir kirlilikten etkilenmemesi için, 5 dk aseton içinde ultrasonik banyo sonrasında ise asetonun temizlenmesi için 5 dk alkol içinde ultrasonik banyo yapıldı ve en son azot gazı ile kurutuldu. Temizleme işlemlerinin öncesinde, alttaşın alkol ve asetonla etkilenmediğinden emin olmak amacı ile küçük bir parça kesilerek bu kimyasalların içinde 5 dakika bekletildi ve sorun olmadığı görülünce temizleme işlemi uygulandı.

4.1.4. Yazıcı kafasının temizliği

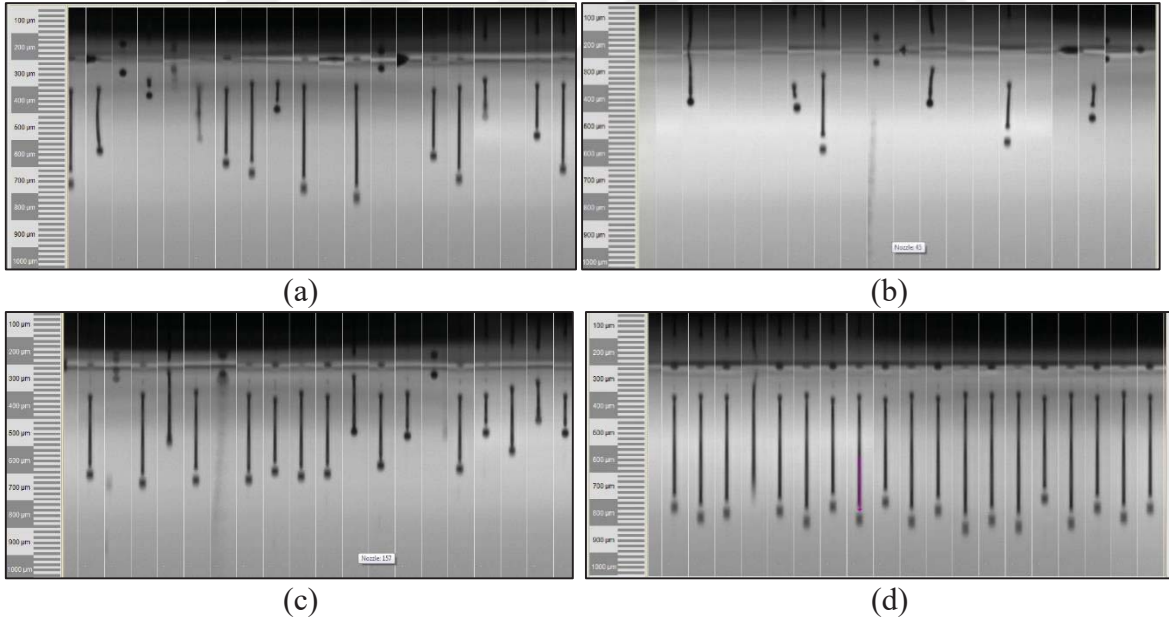
Basım işleminde kullanılan mürekkebin içinde nano boyutta Ag parçacıklarının bulunması ve nozül boyutlarının küçüklüğü sebebiyle basım işlemi sırasında nozüllerde Ag parçaları birikmektedir. Eğer bunlara zamanında müdahale edilmez ise; nozülden çıkan damlacıkların kalitesinin düşmesine ve hatta nozülün tamamen kapanmasına sebep olabilirler.

Bunu engellemek için nozüllerin her basım işlemi sonrasında temizlenerek mürekkepten arındırılması elzemdir. Nozüllerin boyutlarından dolayı ise bunu yapmanın tek yolu nozüllerden solvent geçirmektir. Tercih edilen solventler kullanılan mürekkebin içeriğine göre değişmektedir.

Bu çalışmada kullanılan mürekkep için temizlik aşamalarında sırası ile kullanılan solventler; Genes' Ink firması tarafından mürekkeplerin temizlenmesi amacı ile üretilen C-FS21511 kodlu Clean'ink solution, İzopropil alkol ve son olarak trietilen glikol monoetil eterdir.

Trietilen glikol monoetil eter, genellikle mürekkeplerin içeriğinde kullanılan bir solventtir. Viskozitesi inkjet yazıcılarda püskürtülmeye uygundur. Bunun yanında birim fiyatının mürekkeplerden çok daha düşük olduğu da göz önüne alındığında, bu solvent hem mürekkebin yüklenmesinden önce nozüllerin durumunun görülmesi, hem de sistemin kullanılmadığı zamanlarda, nozüllerin kurumasının engellenmesi amacı ile kafanın içinde bekletilmesi için sıklık ile kullanılmaktadır.

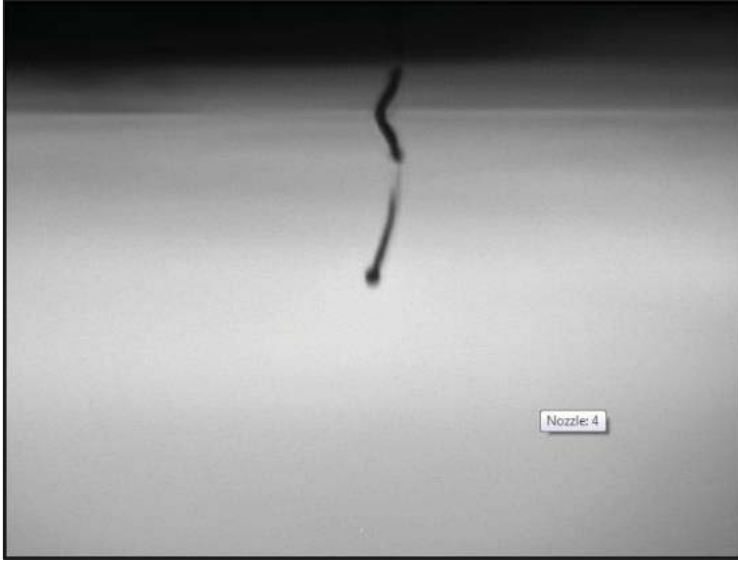
Nozüllerin temizlenmesi hem baskı kalitesi için hem de yazıcı kafasının ömrü için hayati önem taşımaktadır. Aşağıda temizlik öncesi ve sonrası nozüllerin görünümü hakkında örnek fotoğraflar görülmektedir.



Resim 4.1. Nozüllerin baskı öncesi ve sonrası görünümü a) baskı öncesi mürekkep ile görünümü, b) baskı sonrası mürekkep ile görünümü c) ve d) temizlik sonrası solvent ile görünümü

Resim 4.1'de baskı işleminin nozüller üzerinde bıraktığı etki ve temizlik işleminin önemi açıkça görülmektedir. (c) ve (d) resimleri arasındaki fark (d) resminin son nozüllerden

alınmış olmasıdır. Her ne kadar nozüllerin durumu daha iyi görülse de buradaki damlacıkların hacmi çok fazla olmaktadır ve her zaman kullanıma uygun olmamaktadır. Bunun yanında basım öncesi alınan görüntüde bazı nozüllerin kapalı olduğu ya da kirlilikten dolayı kalitesiz damlacıklar ateşlediği görülmektedir ve baskı öncesi alınan son analiz olmasına rağmen temizlik sonrası görünümünden çok daha kötü olduğu açıktır. Bunun sebebi; mürekkebin, nano boyutta dahi olsa, katı içeriğinden dolayı solventin rahatça geçebildiği nozüllerden geçerken zorlanması, dolayısıyla bu nozüllerin kalitesinin düşmesi ya da kapanmasıdır. Kapanan ya da kirlenen nozüllerin temizlenmeden bu şekilde uzun süre durması nozüllerin kaybına sebep olacağından, basım işleminin total süresi büyük önem kazanmaktadır. Resim 4.2’de kirlenen nozül örneği görülebilir.



Resim 4.2. Kirlenen nozül örneği

4.1.5. Baskı koşulları

Üretilen tüm Ag filmler için ortak olan baskı koşulları Çizelge 4.3’de verildi.

Çizelge 4.3. Ortak baskı koşulları

QF değeri	3
Adım sayısı	3
Kafa açısı	0 °
Potansiyel fark	45 V
Dalga değeri	8 µs
Mürekkep basıncı	-22 mbar
Mürekkep sıcaklığı	40 °C
Altaş sıcaklığı	60 °C
Ortalama hacim	≈ 20 pl

Çözünürlük özelliklerine göre Ag filmlerin ayrımı Çizelge 4.4’de verildi.

Çizelge 4.4. Çözünürlüklerine göre Ag filmlerin sınıflandırılması

500dpi	800dpi
GFP21	GFP30
GFP14	GFP31
GFP13	GFP32
GFP15	GFP33
GFP16	GFP34
GFP17	GFP35
GFP18	GFP36
GFP19	GFP37
GFP20	GFP38

Yukarıda bahsedilen özellikler dışında basım sırasında müdahale edilen diğer özellik basımda kullanılan nozüllerdir. Bu nozüller, her baskı öncesi yeniden analiz yapılarak belirlendiğinden her Ag filmin basımında aktif olan nozüller farklılık göstermekle beraber, bu durumun filmlerin özelliğini derinden etkileyecek bir önemi olmadığı düşünülmektedir.

4.1.6. Tavlama koşulları

Basım işlemi sonrasında Ag filmlere uygulanan tavlama işlemi için sıcaklık ve süre bilgileri Çizelge 4.5’te, tavlama sıcaklıkları ise Çizelge 4.6’da verildi.

Çizelge 4.5. 500dpi çözünürlük için tavlama sıcaklıkları ve süresi

Süre \ Sıcaklık	150°C	200°C	250°C
30 dk	GFP21	GFP15	GFP18
40 dk	GFP14	GFP16	GFP19
50 dk	GFP13	GFP17	GFP20

Çizelge 4.6. 800dpi çözünürlük için tavlama sıcaklıkları ve süresi

Süre \ Sıcaklık	150°C	200°C	250°C
30 dk	GFP30	GFP33	GFP36
40 dk	GFP31	GFP34	GFP37
50 dk	GFP32	GFP35	GFP38

Tavlama koşullarının belirlenirken, mürekkebin temin edildiği Genes'Ink firmasının mürekkep için önerdiği 150°C / 30 dk başlangıç kabul edilerek, tavlama süresinin ve sıcaklığının etkisinin görülebilmesi için, süre ve sıcaklık arttırıldı.

Tavlama işlemi kalibre edilmiş ısıtıcı tabla ile atmosfer ortamında yapıldı. Kalibrasyon işlemi sırasında Fluke 289 True-rms multimeterden ve Extech MM570A multimeterden eş zamanlı olarak faydalanıldı.

4.2. Ölçüm Sonuçları

4.2.1. Kalınlık ve genişlik ölçümlerinin yapılması

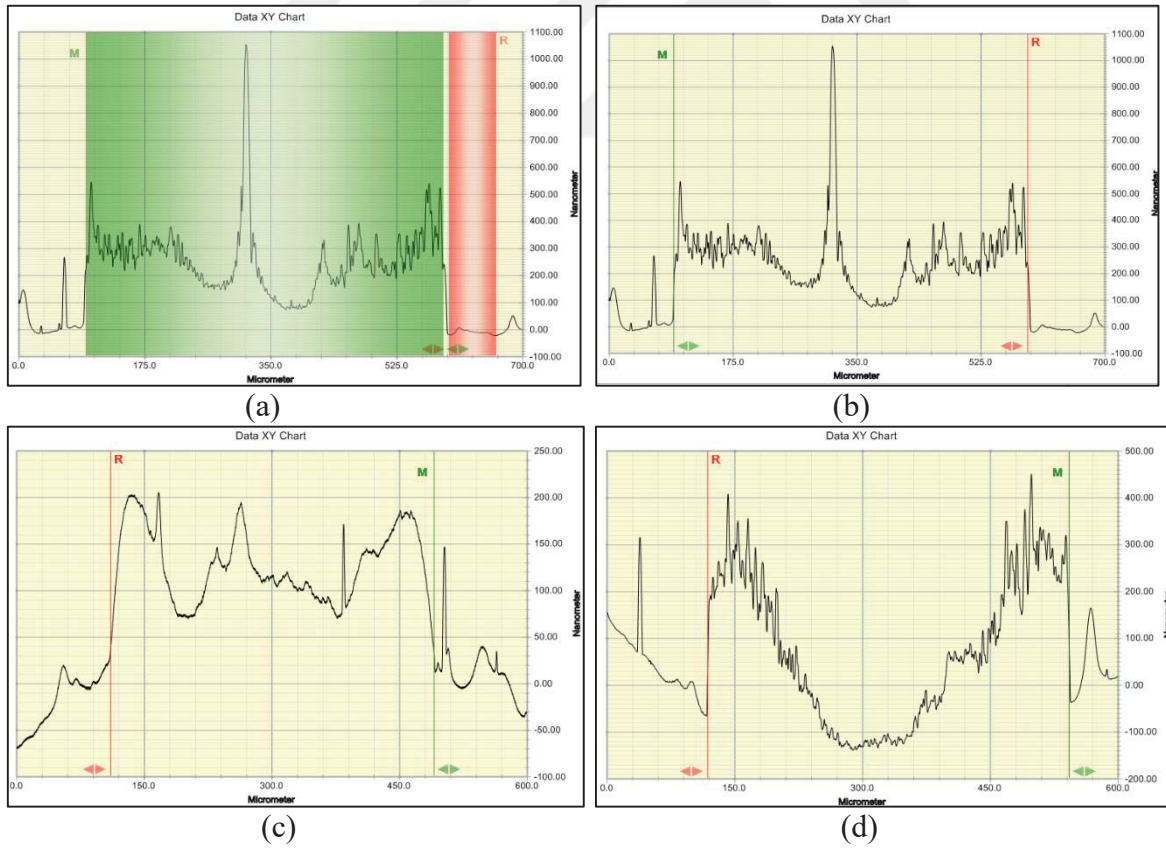
Kalınlık ve genişlik ölçümleri Dektak 150 Optik profilometre sistemi kullanılarak yapıldı. Kalınlık ve genişlik ölçümü yapılırken alttaşın esnek olması dolayısı ile ölçüm öncesi alttaş cam üzerine çift taraflı bant kullanılarak sabitlenerek ölçüm sırasında alttaşın bükülmesi engellenmeye çalışıldı.

Kalınlık ve genişlik ölçümleri her tavlama sıcaklığı için o sıcaklıkta 30 dakika tavlanan Ag film üzerinden yapılmış olup aynı sıcaklıktaki diğer süreler için de bu değerler kullanıldı.

Baskı türünden kaynaklı olarak filmlerim yüzeyinin çok pürüzlü olması ve genişliğin çizgi boyunca farklılık göstermesinden dolayı hem genişlik hem de kalınlık tespiti için birden

fazla ölçüm alınarak ortalama değer hesaplandı. Ortalama değer hesabı esnasında en yüksek ve en düşük birer değer uç değer kabul edilerek ortalamaya alınmadı.

Genişlik değerleri için çizgi başına 10 adet ölçüm yapıldı. Kalınlık değerleri için ölçüm alınırken alttaşın esnek olması dolayısı ile zorluklar yaşandı. Bunun engellenmesi için alttaş cam üzerine yapıştırıldı. Bu işlem sonrası kalınlık ölçümü almak mümkün olsa da yapıştırma sırasında oluşan nano boyutlardaki eğrilikler genişlik ölçümüne engel olmazken kalınlık ölçümünü kötü yönde etkiledi. Bu sebeple bazı çizgilerde anlamlı ölçümler alınamadı. Bu durum kalınlık değerlerinin her çizgi için ayrı ayrı belirlenmesindenense, numune için ortalama kalınlık değerinin hesaplanmasına sebep oldu. Ortalama kalınlık değerinin hesaplanması için ise numune başına mümkün olan en fazla ölçüm yapılmaya çalışıldı ve bunun sonucu olarak numune başına 20 ila 70 arasında değişen sayıda kalınlık verisi toplanarak ortalama hesaplandı. Resim 4.3’de yapılan ölçümler için örnek sonuçlar görülmektedir. a ve b başarılı ölçümlere, c ve d ise sonuç alınamayan başarısız ölçümlere örnek olarak verildi.



Resim 4.3. Kalınlık ve genişlik ölçümü için örnekler. (a) iyi kalınlık ölçümü, (b) iyi genişlik ölçümü, (c) ve (d) kalınlık ölçümü alınamayan kötü ölçümler

4.2.2. Direnç ölçümleri ve öz direnç hesabı

Direnç ölçüm işlemleri Fluke 289 True-rms multimetre kullanıldı. Ölçümler tüm çizgiler için 2 cm (tam çizgi boyu) mesafeden yapıldı. Daha sonra çizgi boyunca 1 cm'lik mesafeler için ölçüm tekrarlandı ve ulaşılabilen en küçük değer alınarak baskı hataları minimize edilmeye çalışıldı. 2 cm ve 1 cm'lik mesafeler için ölçüm alınamayan çizgilerde ise ölçüm alınabilen mesafedeki direnç değerleri kaydedildi.

Öz direnç hesabı için öncelikle tüm çizgiler için kesit alanı hesaplandı. Bu yapılırken çizgilerin kalınlığı ve genişliği için hesaplanan ortalama değerler kullanıldı. Sonrasında *Ohm yasası* kullanılarak öz direnç hesaplandı.

Bir iletkende akım yoğunluğu (\vec{J}), malzemeye uygulanan (\vec{E}) elektrik alanına, sıcaklığa ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Belirli bir sıcaklıkta E/J oranı sabit olup bu oran *Özdirenç* olarak tanımlanır.

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (1)$$

$$\vec{E} = \frac{V}{L} \quad (2)$$

ve

$$\vec{J} = \frac{I}{A} \quad (3)$$

için;

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad (4)$$

olur. Burada L telin uzunluğu, A kesit alanı, V uygulanan gerilim ve I akım değeridir. $I=V/R$ yerine yazılırsa öz direnç;

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (5)$$

olarak bulunur.

Özdirenç hesaplamalarında *Ohm yasasından* çıkarılan (5) numaralı eşitlik kullanıldı.

4.2.3. Sonuçlar

Bu bölümde basılan her Ag film için kalınlık, genişlik, direnç ve özdirenç değerleri verildi. Yalnızca 800 dpi’da basılan ve 150°C’de sırası ile 30 dk, 40 dk, ve 50 dk tavlanan GFP30, GFP31, GFP32 kodlu numunelerde iletkenlik tespit edilmediği için, bu numunelere ait Ag filmler için ölçüm değeri bulunmamaktadır.

Sonuçların değerlendirilmesi sonraki bölüm olan “4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum” bölümümde yapıldı.

Kalınlık, genişlik ve kesit alanı değerleri

Çizelge 4.7. Ag filmlerin ortalama genişlik değerleri

Çizgi	Tasarlanan genişlik (µm)	Ortalama genişlik (µm)				
		500 dpi baskı çözünürlüğü			800 dpi baskı çözünürlüğü	
		150°C	200°C	250°C	200°C	250°C
a	50	171,61	201,41	191,83	242,04	339,338
b	100	152,16	176,00	184,84	377,70	393,338
c	200	279,88	272,98	302,76	414,96	476,088
d	300	361,03	361,28	391,43	502,49	597,138
e	400	478,93	504,60	480,49	596,35	677,80
f	500	599,54	616,70	587,99	658,55	723,238
g	1000	1039,51	1115,89	1094,84	1135,61	1165,36

Sıcaklık ve çözünürlük değişiminin ölçülen çizgi üzerindeki etkisi Çizelge 4.7’de verildi. 500 dpi çözünürlük değeri için, sıcaklığın genişliğe düzenli bir etkisi görülmezken, 800 dpi çözünürlük değeri için sıcaklık artışının genişliği arttırdığı görüldü. Bunun yanında genişlik üzerinde çözünürlüğün etkisi incelendiğinde çözünürlük artışının genişlik artışına sebep olduğu görüldü.

Çizelge 4.8. Ag filmlerin ortalama kalınlık değerleri

Tavlama sıcaklığı	Ortalama kalınlık (nm)				
	500dpi baskı çözünürlüğü			800dpi baskı çözünürlüğü	
	150°C	200°C	250°C	200°C	250°C
Kalınlık	149,2	135,1	121,7	293,6	184,9

Tavlama sıcaklığına ve baskı çözünürlüğüne göre Ag filmlerin kalınlık değerleri Çizelge 4.8’de verildi. Sıcaklığın ve çözünürlüğün kalınlık üzerinde olan etkisi incelendiğinde; her iki çözünürlük değeri için de sıcaklık artışı ile kalınlıklarda azalma görüldü. Bununla beraber çözünürlükte yapılan artışın kalınlığa etkisinin de pozitif olduğu görüldü.

Bunun yanında kesit alanları hesaplandığında, sıcaklık artışının, özellikle daha kalın çizgilerde, kesit alanını düşürdüğü görüldü. Çözünürlükte yapılan artışın ise kesit alanını yükselttiği gözlemlendi. Hesaplanan kesit alanları tavlama sıcaklığı ve baskı çözünürlüğüne göre Çizelge 4.9’da verildi.

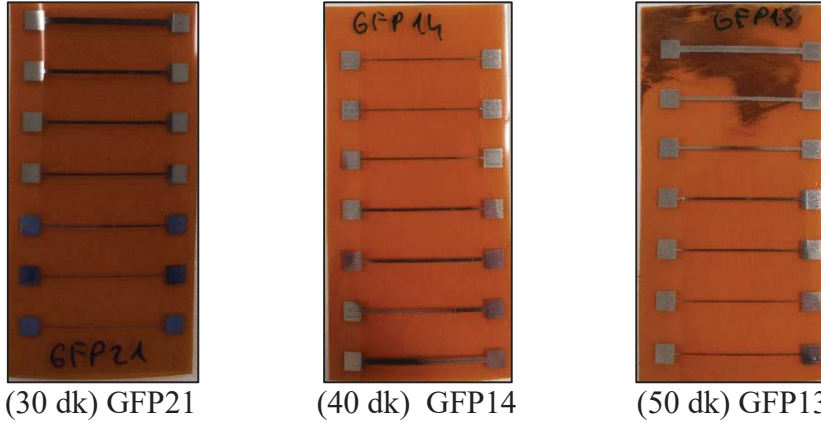
Çizelge 4.9. Ag filmlerin kesit alanı

Çizgi	Kesit alanı (10^{-7} cm^2)				
	500 dpi baskı çözünürlüğü			800 dpi baskı çözünürlüğü	
	150 °C	200 °C	250 °C	200 °C	250 °C
a	2,56	2,72	2,33	7,11	6,28
b	2,27	2,38	2,25	11,10	7,27
c	4,18	3,69	3,69	12,20	8,80
d	5,39	4,88	4,76	14,80	11,00
e	7,14	6,82	5,85	17,50	12,50
f	8,94	8,33	7,16	19,30	13,40
g	15,50	15,10	13,30	33,30	21,60

Direnç ve öz direnç değerleri

Bu bölümde üretilen Ag filmler için ölçülen direnç değerleri ve hesaplanan öz direnç değerleri verildi. Bu yapılırken benzer koşullarda üretilen Ag filmlerin bir arda rahatça görülebilmesi için sonuçlar, çözünürlük ve tavlama sıcaklıklarına göre üçlü gruplar halinde sunuldu.

500 dpi çözünürlükte ve 150 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler



Resim 4.4. 500 dpi çözünürlük ve 150 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler

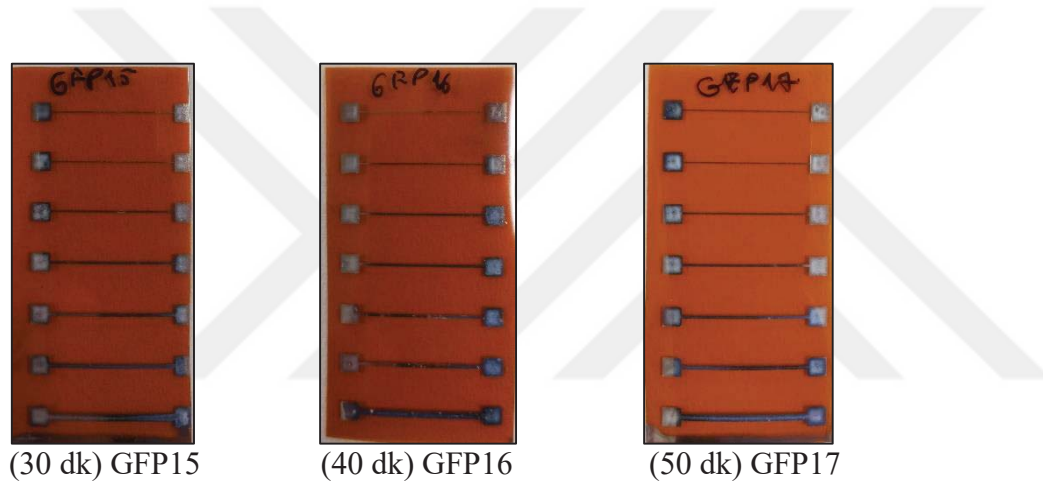
500 dpi çözünürlüğünde ve 150 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler Resim 4.4’de görülmektedir. GFP13 kodlu numunenin üzerinde görülen leke benzeri iz, alttaşın arkasında olup, incelenen çizgiler ile hiçbir bağının olmadığı ve dolayısı ile iletkenliğe hiçbir etkisinin olmadığı tespit edildi. Bu leke baskı sırasında kafanın alt yüzeyinde asılı kalan mürekkebin, alttaşın etrafında bulunan PET filme temas etmesi ile tablaya yayılması ve dolayısı ile alttaşın arkasına teması sonucu oluştu.

500 dpi çözünürlüğünde ve 150 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler için genişlik ve direnç ve öz direnç değerleri Çizelge 4.10’da verildi. Bunun yanında GFP21 kodlu numunede b çizgisi için 1 cm ya da 2 cm mesafede direnç değeri ölçülemediğinden, ölçüm direnç değeri okunabilen mesafeden yani 3 mm’den yapıldı ve Çizelge 4.10’da “diğer” başlığı altında sunuldu. GFP13 kodlu numuneye ait Ag filmler için ise a çizgisi için iletkenlik tespit edilemedi. Yapılan ölçüm ve hesaplamalar sonucu tavlama süresindeki artışın bu sıcaklık ve çözünürlük değeri için pozitif olduğu görüldü.

Çizelge 4.10. 500 dpi çözünürlük ve 150 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri

Çizgiler	Ort. genişlik (µm)	Direnç değerleri (Ω)						Özdirenç değerleri (10 ⁻⁶ Ω.cm)				
		GFP21			GFP13		GFP14		GFP21	GFP13	GFP14	
		2 cm için	1 cm için	Diğer	2 cm için	1 cm için	2 cm için	1 cm için				
a	171,61	121,20	68,00					205,70	75,80	15,51		19,41
b	152,16			21,00 (3mm için)	108,60	45,50	245,05	89,80	15,89	10,33		20,38
c	279,88	50,89	21,30		60,50	32,50	47,70	19,80	8,89	12,63		8,27
d	361,03	33,79	12,90		30,10	13,90	36,30	17,90	6,94	7,49		9,64
e	478,93	40,60	12,40		20,70	10,70	28,10	9,20	8,86	7,39		6,57
f	599,54	23,20	11,70		20,30	10,30	17,70	6,60	10,38	9,08		5,90
g	1039,51	10,63	5,30		10,20	5,20	8,70	4,60	8,22	7,91		6,75

500 dpi çözünürlükte ve 200 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler



Resim 4.5. 500 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler

500 dpi çözünürlüğünde ve 200 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler Resim 4.5’de görülmektedir. GFP17 kodlu numunenin alt kısmında görülen kaplama baskı işlemi sona erdikten sonra servis pozisyonuna giden yazıcı kafanın alttaşa temas etmesi ile oluştu. Yapılan incelemede çizgilerin hiçbirisi ile teması olmadığı, dolayısı ile sonuçlara etkisinin olmadığı tespit edildi.

500 dpi çözünürlüğünde ve 200 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler için genişlik ve direnç ve öz direnç değerleri Çizelge 4.11’de verildi. Bunun yanında GFP16 kodlu numunede a ve e çizgileri için 1cm ve 2cm mesafeden direnç değeri alınamadı. Farklı mesafeden alınan direnç değeri mesafe ile Çizelge 4.11’de “diğer” başlığı altında sunuldu. GFP15 kodlu numunede ise a çizgisi için iletkenlik tespit edilemedi.

Direnç ve öz direnç değerleri incelendiğinde, tavlama süresinin etkisiyle düzenli bir artış ya da azalış gözlemlenmedi ve bunun nedeni hakkındaki yorum “4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum” bölümünde yapıldı.

Çizelge 4.11. 500 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri

Çizgiler	Ort. genişlik (µm)	Direnç değerleri (Ω)							Özdirenç değerleri (10 ⁻⁶ Ω.cm)		
		GFP15		GFP16			GFP17		GFP15	GFP16	GFP17
		2 cm için	1 cm için	2 cm için	1 cm için	Diğer	2 cm için	1 cm için			
a	201,41					30,5 (2mm için)	134,90	65,10		41,50	15,75
b	176,00	233,00	122,30				137,20	68,70	27,71		16,31
c	272,98	64,10	34,10	168,80	95,10		62,70	38,30	11,82	31,13	11,56
d	361,28	48,10	22,50	93,50	40,20		39,92	21,60	10,98	19,62	9,74
e	504,60	57,30	13,80			22,00 (5mm için)	23,40	11,30	9,41	30,00	7,70
f	616,70	21,50	8,60	76,80	14,60		16,20	8,50	7,17	12,17	6,75
g	1115,89	6,30	3,20	7,20	3,80		5,94	3,20	4,75	5,43	4,48

500 dpi çözünürlükte ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler



Resim 4.6. 500 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler

500 dpi çözünürlüğünde ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler Resim 4.6’da görülmektedir. GFP20 kodlu numune için a çizgisinde iletkenlik tespit edilmedi. 500 dpi çözünürlüğünde ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler için genişlik ve direnç ve öz direnç değerleri Çizelge 4.12’de sunuldu. GFP18 ve GFP19 kodlu numunelerde ise a ve b çizgilerinde 1 cm’den ve 2 cm’den farklı mesafelerden ölçüm alınabildi. Ölçüm değeri ölçüm alınan mesafe ile Çizelge 4.12’de “diğer” sekmesi altında verildi.

Yapılan incelemelerde ise tavlama süresindeki artışın pozitif olduğu görülerek konu ile ilgili yorum “4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum” bölümünde sunuldu.

Çizelge 4.12. 500 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri

Çizgiler	Ort. genişlik (µm)	Direnç değerleri (Ω)									Özdirenç değerleri (10 ⁻⁶ Ω.cm)				
		GFP18			GFP19			GFP20			GFP18	GFP19	GFP20		
		2cm için	1cm için	Diğer	2cm için	1cm için	Diğer	2cm için	1cm için						
a	191,83			40,2 (2mm)									46,93	21,01	
b	184,84			20,7 (2mm)					123,3	51			23,29	47,6	11,47
c	302,76	43,4	19,5		45,7	24,12				31			7,19	8,42	11,42
d	391,43	47,6	16,8		29,01	14,4			340,3	21			8	6,86	10
e	480,49	46	17,7		17,27	8			18	8,6			10,35	4,68	5,03
f	587,99	45,6	13,3		21,5	8,94			18,7	8,9			9,52	6,4	6,37
g	1094,84	19,7	7,7		12,93	5,9			9,9	4,68			10,26	7,86	6,23

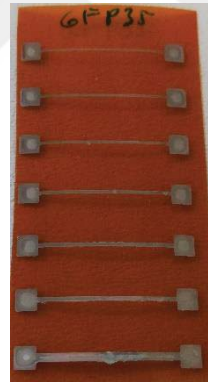
800 dpi çözünürlükte ve 200 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler



(30 dk) GFP33



(40 dk) GFP34



(50 dk) GFP35

Resim 4.7. 800 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler

Resim 4.7’de bu tavlama sıcaklığı ve çözünürlük koşullarında basılan Ag filmler görülmektedir. Basılan çizgilerin 500 dpi çözünürlük değeri için basılan çizgilerden farklı görülmesinin nedeni, 800 dpi çözünürlüğün belirlenen damlacık boyutları için oldukça yüksek olmasıdır. GFP35 kodlu numune incelendiğinde en kalın çizgide (g) çizgide görülen yuvarlak yayılmış mürekkep görüntüsünün sebebi de budur.

800 dpi çözünürlüğünde ve 200 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler için genişlik ve direnç ve öz direnç değerleri Çizelge 4.13’te verildi. GFP34 ve GFP35 kodlu numunelerin a

çizgilerinde 1 cm'den ve 2 cm'den farklı mesafelerden ölçüm alındı ve mesafe değerleri ölçüm sonucu ile Çizelge 4.13'te "diğer" başlığı altında verildi.

Sonuçlar incelendiğinde ise oldukça yüksek olduğu görülen özdirençlerin nedeni, tavlama sıcaklığının 800 dpi çözünürlük değeri için yeterli olmaması olarak yorumlandı ve "4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum" bölümünde tartışıldı.

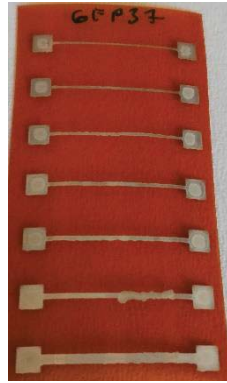
Çizelge 4.13. 800 dpi çözünürlük ve 200 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve özdirenç değerleri

Çizgiler	Ort. genişlik (µm)	Direnç değerleri (Ω)									Özdirenç değerleri (10 ⁻⁶ Ω.cm)		
		GFP33			GFP34			GFP35			GFP33	GFP34	GFP35
		2cm için	1cm için		2cm için	1cm için	Diğer	2cm için	1cm için	Diğer			
a	242,04		74,80				24,67 (5mm)			16,45 (2mm)	53,15	35,06	58,4477
b	377,70		41,73	38,30	24,07		41,27	15,80		46,27	21,23	17,52	
c	414,96	71,14	21,20	21,37	9,18		22,78	12,73		25,82	11,18	13,88	
d	502,49	39,54	16,14	21,00	7,90		37,27	8,01		23,81	11,65	11,81	
e	596,35	20,79	8,34	8,73	3,90		8,91	3,64		14,60	6,82	6,37	
f	658,55	18,40	4,31	5,95	2,77		7,40	3,13		8,33	5,36	6,05	
g	1135,61	3,19	1,50	2,37	1,22		3,09	1,24		5,00	3,95	4,13	

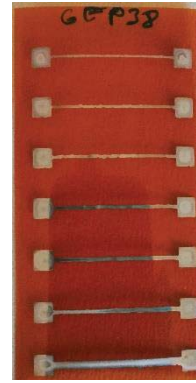
800 dpi çözünürlükte ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler



(30 dk) GFP36



(40 dk) GFP37



(50 dk) GFP38

Resim 4.8. 800 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı ile üretilen Ag filmler

800 dpi çözünürlüğünde ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler Resim 4.8'de görülmektedir. GFP36 kodlu numunenin en alt çizgisinde (g) görülen karartı fotoğraf çekimi sırasında oluşan gölgeden kaynaklanmaktadır.

800 dpi çözünürlüğünde ve 250 °C tavlama sıcaklığında üretilen Ag filmler için genişlik ve direnç ve öz direnç değerleri Çizelge 4.14’de verildi. GFP38 kodlu numunenin a çizgisi için 3 mm mesafeden direnç değeri okunabildi ve bu değer “diğer” başlığı altında Çizelge 4.14’de sunuldu. Bunun yanında Ag filmlerin resimlerinde, bazı çizgilerde görülen dağılımlar kaplama çözünürlüğünün yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.

Elde edilen direnç değerleri ve hesaplanan öz direnç değerlerine bakıldığında, ulaşılan değerlerin tüm çalışma için en düşük değerler arasında olduğu görüldü ve bu sonuç “4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum” kısmında incelendi.

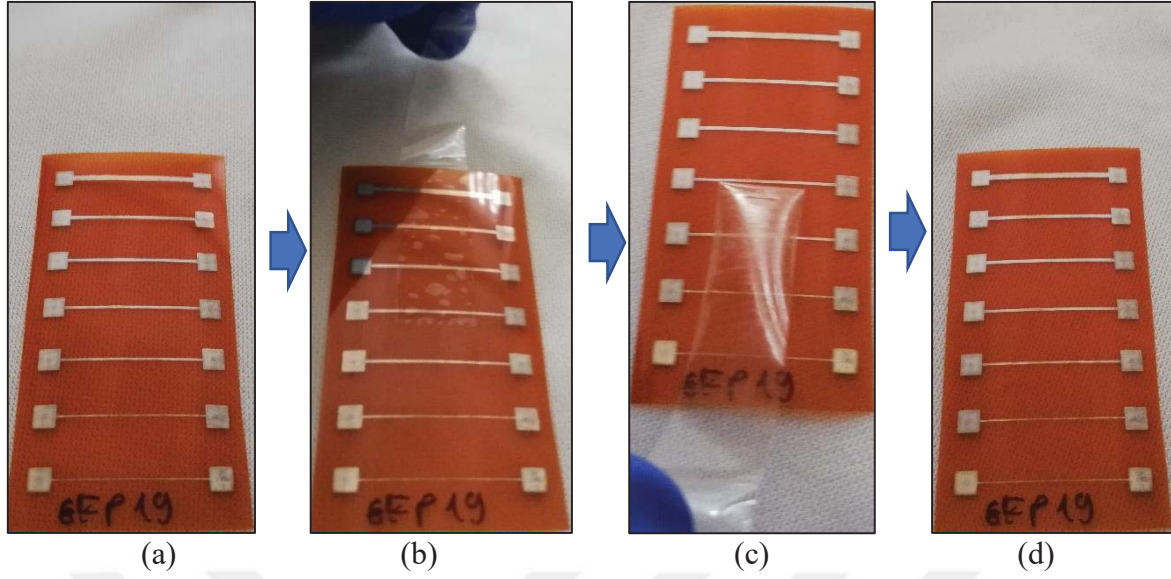
Çizelge 4.14. 800 dpi çözünürlük ve 250 °C tavlama sıcaklığı için direnç ve öz direnç değerleri

Çizgiler	Ort. genişlik (µm)	Direnç değerleri (Ω)							Öz direnç değerleri (10 ⁻⁶ Ω.cm)		
		GFP36		GFP37		GFP38			GFP36	GFP37	GFP38
		2 cm için	1 cm için	2 cm için	1 cm için	2 cm için	1 cm için	Diğer			
a	339,34	20,34	9,35	21,63	9,85			16,65 (3mm)	5,87	6,18	34,83
b	393,34	15,24	6,31	15,22	5,02	18,47	5,04		2,29	3,65	3,65
c	476,09	8,16	3,67	9,33	3,80	9,46	4,17		3,23	3,67	3,67
d	597,14	6,48	3,69	6,80	3,15	6,63	2,52		3,58	2,78	2,78
e	677,80	4,82	2,07	4,97	2,22	4,93	2,40		2,59	3,00	3,00
f	723,24	4,17	1,80	4,58	2,14	4,12	2,13		2,40	2,76	2,76
g	1165,36	1,98	1,04	1,91	0,99	1,75	0,78		2,13	1,68	1,68

4.3. Sonuçların değerlendirilmesi ve yorum

Elde edilen sonuçlar, inkjet baskı yöntemi ile 10 µΩ.cm büyüklüğünden küçük öz dirence sahip ve 120 nm ile 294 nm arasında değişen kalınlık değerlerine sahip Ag ince filmlerin üretiminin başarılı olduğunu göstermektedir. Bu iletken filmlerin, özellikle 800dpi çözünürlük ve 250°C tavlama sıcaklığında Ag’nin yığın öz direncine çok yaklaştığı [59,60], bu sebeple sensör, baskı devre ve anten teknolojileri gibi birçok alanda metal elektrot / metal iletken hat olarak kullanıma uygun olduğu değerlendirildi.

Geliştirilen filmler esnetilerek direnç ölçümü yapıldığında, iletkenliklerini kaybetmeden esnek alttaş ile uyumlu olarak esneyebildiği görülmüştür. Bunun yanında yapılan bant testinden başarı ile geçebilecek seviyede alttaş tutunabildiği de belirlendi. Bant testinin yapılışı ve sonucu Resim 4.9’da gösterildi.

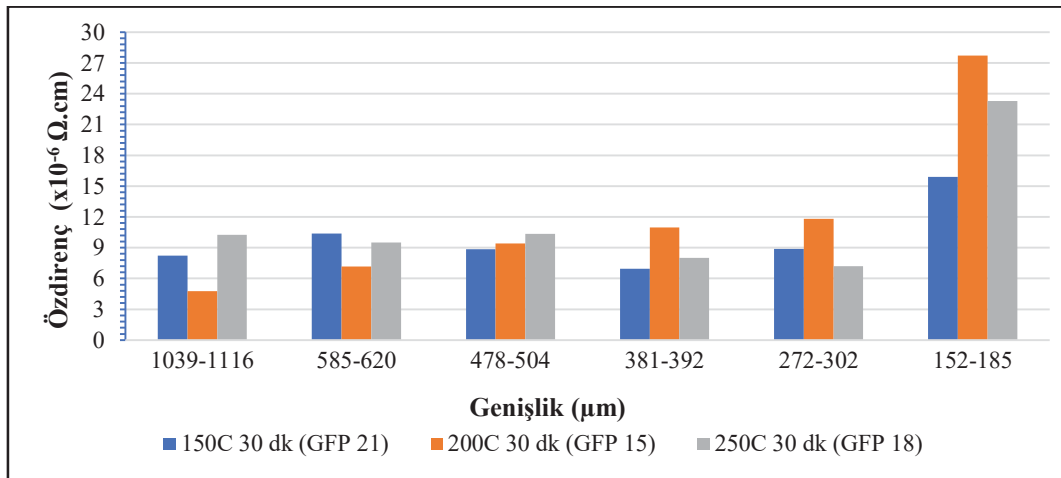


Resim 4.9. Bant testi a) test öncesi numunenin durumu, b) bantın yapıştırılması, c) bantın çekilmesi sonrası, d) testin sonunda numunenin durumu

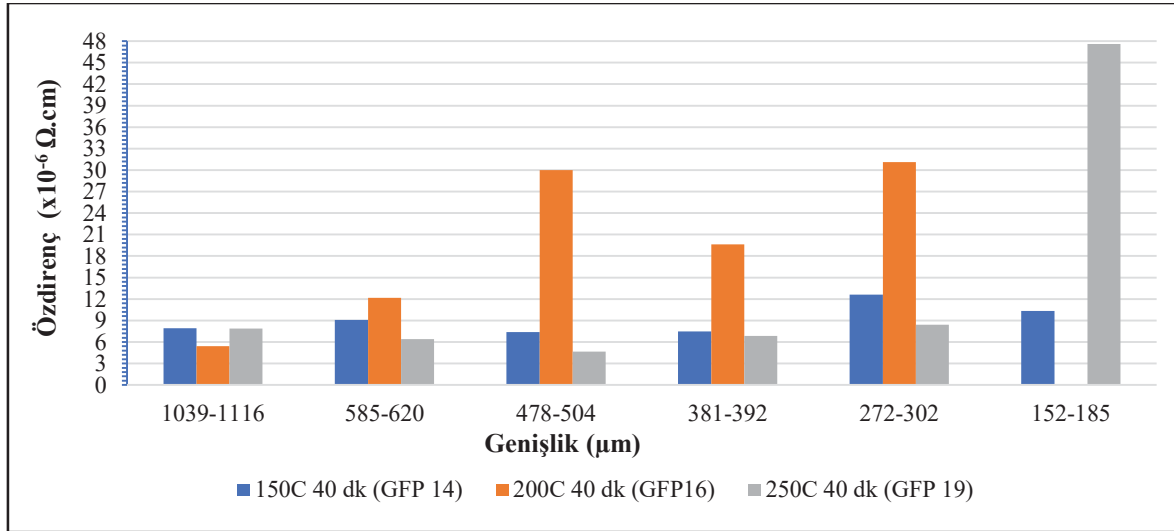
Bu filmler üzerinde tavlama sıcaklığının, tavlama süresinin ve çözünürlüğün etkisi aşağıdaki başlıklarda incelendi.

4.3.1. Sıcaklığın etkisi

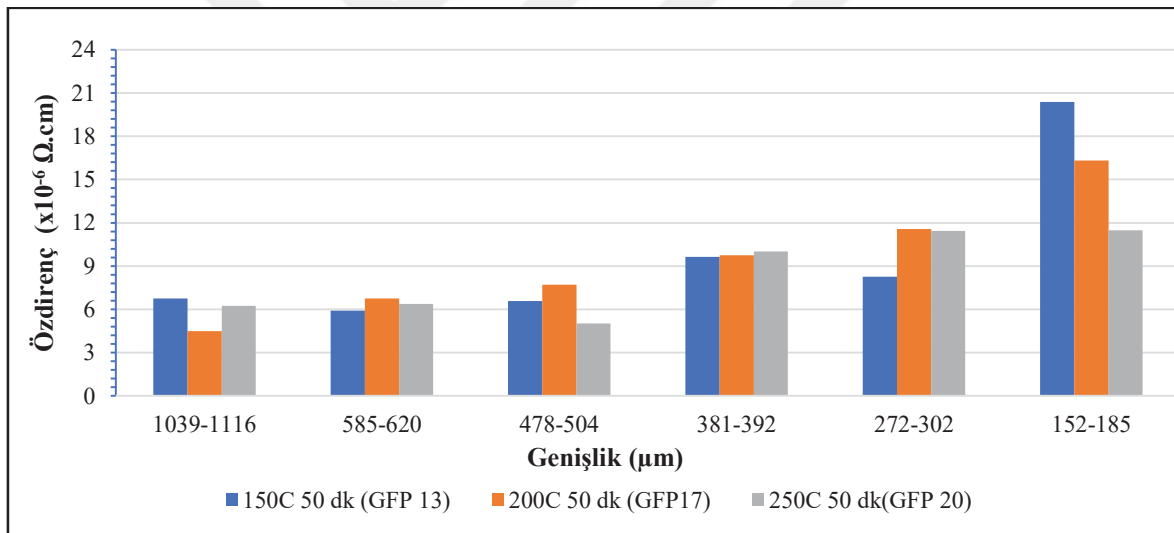
500 dpi çözünürlükte üretilen Ag filmler 30, 40 ve 50 dk süreyle 150, 200 ve 250 °C sıcaklıklarda tavlandı. Tavlama sıcaklığının öz direnç üzerindeki etkisi, film genişliğine bağlı olarak Şekil 4.2-4' de verildi.



Şekil 4.2. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 30 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi

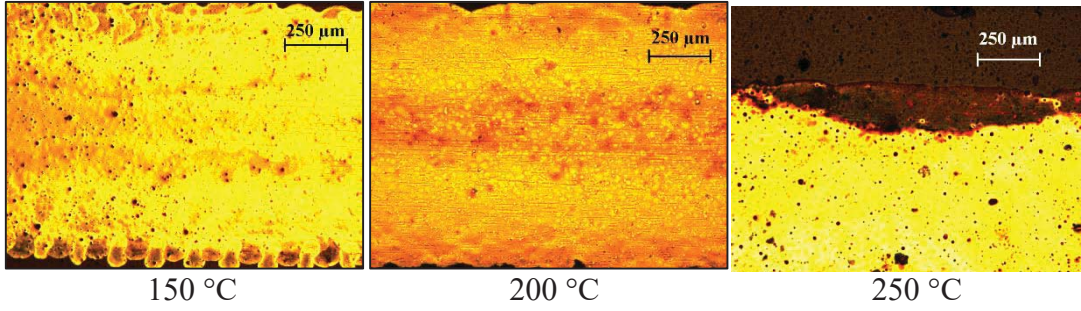


Şekil 4.3. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 40 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi



Şekil 4.4. 500 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama süresi 50 dk olan Ag filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi

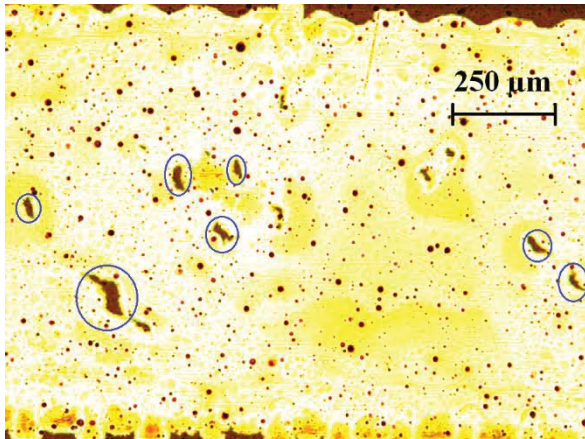
Şekil 4.2-4' de, 500 dpi çözünürlük için tavlama sıcaklığının etkisi 1039 μm ile 1116 μm arasındaki çizgiler baz alınarak incelendiğinde, tavlama sıcaklığının 200 °C'ye çıkması ile özdirencin düştüğü, fakat 250 °C'ye çıkarılması ile özdirencin yükseldiği gözlenmektedir. Sıcaklığın artması ile özdirencin düşmesi, solventin daha iyi buharlaşması ve Ag nano-parçacıklar arasında daha iyi sinterleme olması nedeni ile beklenen bir durum iken, özdirencin yükselmesi genel beklentinin dışında bir gelişimdir. Bunun sebebi ise optik mikroskop ile filmler incelendiğinde net olarak görülebilmektedir



Resim 4.10. 5x büyütülmüş optik mikroskop görüntüsü

Resim 4.10'da optik mikroskop kullanılarak 5x büyütme ile alınan resimler görülmektedir. Bu resimlerde görüldüğü üzere 150 °C sıcaklıkta tavlanan filmde bazı noktalarda damlacıkların şekli görülürken, 200 °C tavlanan filmin yüksek devamlılığa sahip olduğu görüldü ve bu durum öz direnç değerinin 200 °C da daha düşük olmasının bu çizginin yüksek devamlılığından kaynaklandığını göstermektedir. 250 °C'de tavlanan filmin ise kenarlardan başlayarak bozulduğu net bir şekilde görülmektedir ve bu durumun iletkenliğe negatif etkide bulunarak öz direnci arttıracakı aşıkardır.

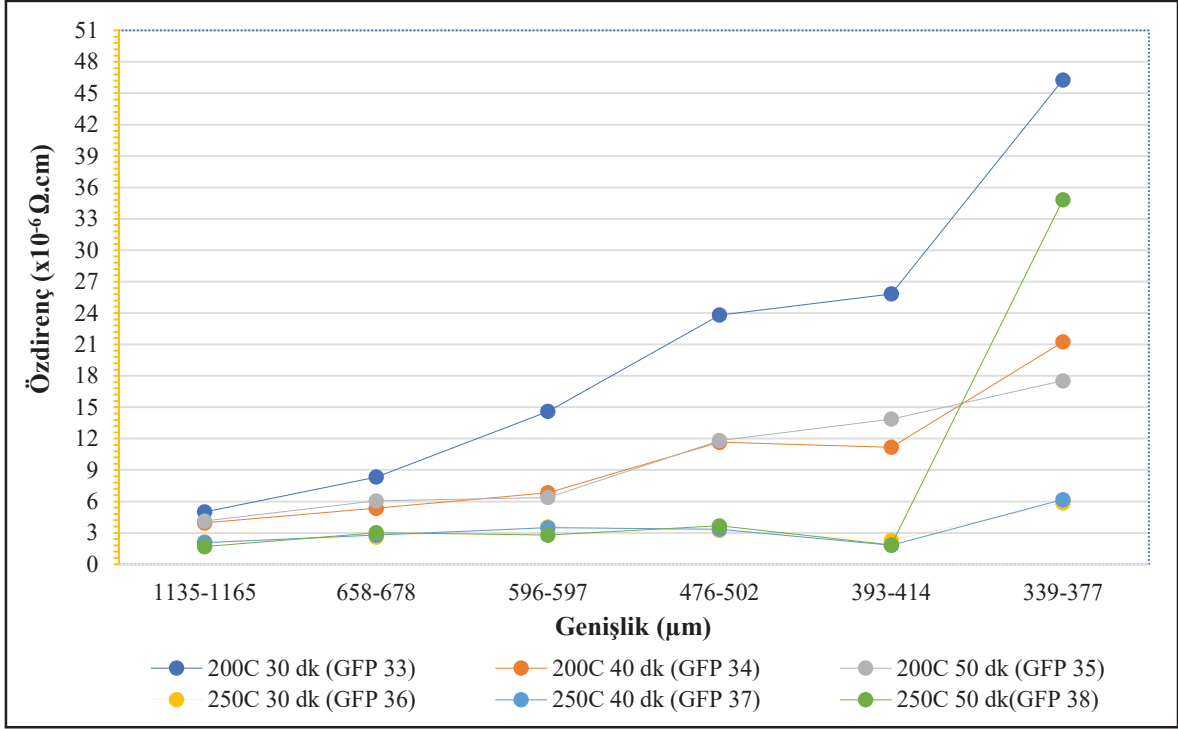
1039 µm ile 1116 µm arasındaki çizgilerde gözlenen düzen, çizgi genişliği düştükçe gözlemlenememektedir. Bunun sebebi olarak çizgi genişliği azaldıkça, iletkenliğin baskı hatalarından daha fazla etkilenmesi olarak gösterilebilir. Resim 4.11'de baskı hataları görülmektedir.



Resim 4.11. Baskı hataları

Resim 4.11'de yuvarlak içine alınan koyu renkli bölgeler, baskı hatalarından kaynaklı olarak filmde oluşan boşluklardan görünen alttaştır. Bu baskı hatalarının sebebi, kirlilik sebebi ile

tıkanarak ya da anlık kontrol birimi ile haberleşmede yaşanan sorundan dolayı ateşleme yapmayan nozüllerdir. Genelde bu hatalar çok net görülmemektedir. Fakat Resim 4.11’de, ateşleme yapmayan nozüllerden kaynaklı olarak boş kalan pikseller yan yana gelmiş ve bu hataların bu kadar net görülmesini sağlamıştır.



Şekil 4.5. 800 dpi baskı çözünürlüğü için tavlama sıcaklığının ve süresinin etkisi

800 dpi çözünürlüğe sahip filmlerde tavlama sıcaklığının etkisi çizgi genişliğine bağlı olarak Şekil 4.5’de verildi ve sıcaklık artışının direnci düşürdüğü görüldü. 800 dpi çözünürlükte basılan çizgilerde, 500dpi çözünürlükte basılan çizgilerin aksine en yüksek değer 250 °C’da gözlemlendi ve 150 °C için iletkenlik gözlenmedi. Bunun sebebi olarak, 800 dpi çözünürlüğünde basılan çizgilerin birim alandaki mürekkep yoğunluğunun 500 dpi çözünürlüğünde basılan çizgilere göre daha yüksek olması, dolayısı ile 500 dpi için yeterli olan 150 °C’nin 800 dpi için düşük, 500 dpi için fazla olan ve zarar veren 250 °C’nin ise 800 dpi için yeterli olmasıdır.

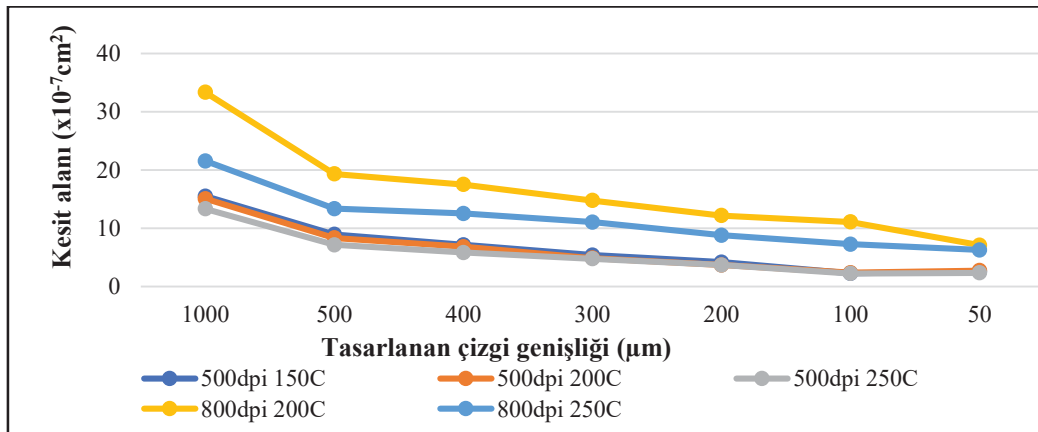
Her iki çözünürlük içinde sonuç toparlanacak olursa; tavlama sıcaklığındaki artış geniş çizgiler baz alındığında, filmin mürekkep yoğunluğu ile ilgili olan bir üst sınıra kadar iletkenliğe pozitif katkı sağlamaktadır. Bu durum literatür tarafından birçok çalışmada desteklendiği görüldü [2,24,61]. Bu çalışmalardan biri olan Rita Faddoul ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada [24] alümina alttaşlar üzerine basılan filmler için 500 °C ile

900 °C arasında değişen sinterleme koşulları seçilmiştir. Sıcaklık artışı ile özdirencin düştüğü, 700 °C'de en düşük değerine ulaştığı, 800 °C ile arttığı ve 900 °C'de ise çizgi sürekliliğinin bozulduğu rapor edilmiştir. Özellikle bir limit değerinden sonra sıcaklığın özdirenci olumsuz etkilemesi, 500dpi çözünürlükte basılan Ag filmlerin sonuçları ile örtüşmektedir. Bu çalışmada bizim çalışmamızdan farklı mürekkep kullanılması sinterleme sıcaklığını değiştirmekle beraber, iletken filmin sıcaklık karşısındaki davranışında farklılık yaratmamıştır.

Bunların dışında tavlama sıcaklığının çizgilerin kesit alanı üzerindeki etkisi de görüldü. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.6'da görüldüğü üzere kalınlık ve kesit alanı sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Özellikle 800 dpi çözünürlüğündeki çizgilerde bu fark açıkça görülmektedir. Bunun yanında 800 dpi değerinde görülen yüksek azalma miktarı ile 200 °C'de solventin tam olarak buharlaşmadığı ve 250 °C de buharlaşmanın tamamlandığı gözlemlenmiş oldu.

Çizelge 4.15. Tavlama sıcaklığına ve çözünürlüğe göre kalınlık değişimi

Çözünürlük (dpi)	500			800	
	150	200	250	200	250
Sıcaklık (°C)	150	200	250	200	250
Kalınlık (nm)	149,2	135,1	121,7	293,6	184,9



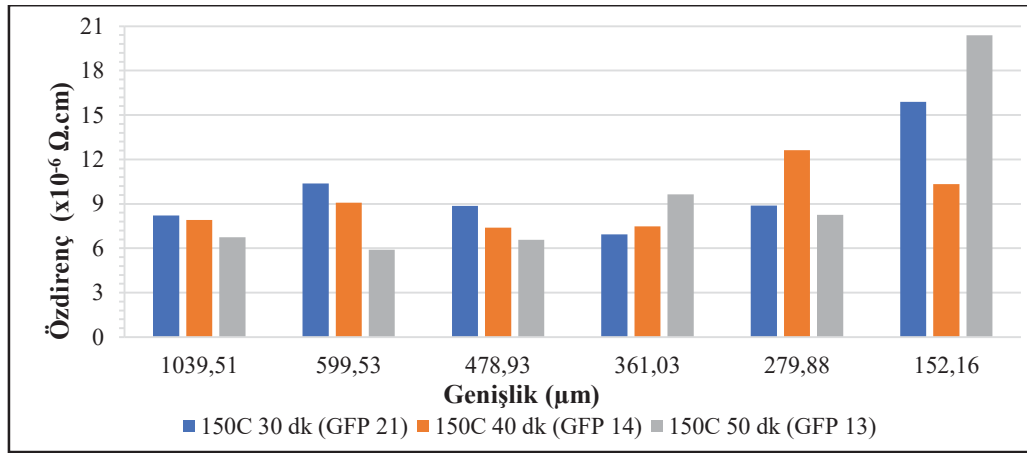
Şekil 4.6. Kesit alanının sıcaklığa ve çözünürlüğe göre değişimi

Çizelge 4.15'de görüldüğü üzere tavlama sıcaklığındaki artış her iki çözünürlük içinde kalınlıkta düşüşe sebep olmaktadır. Bu sonuç Junhong Park ve arkadaşları tarafından yapılan

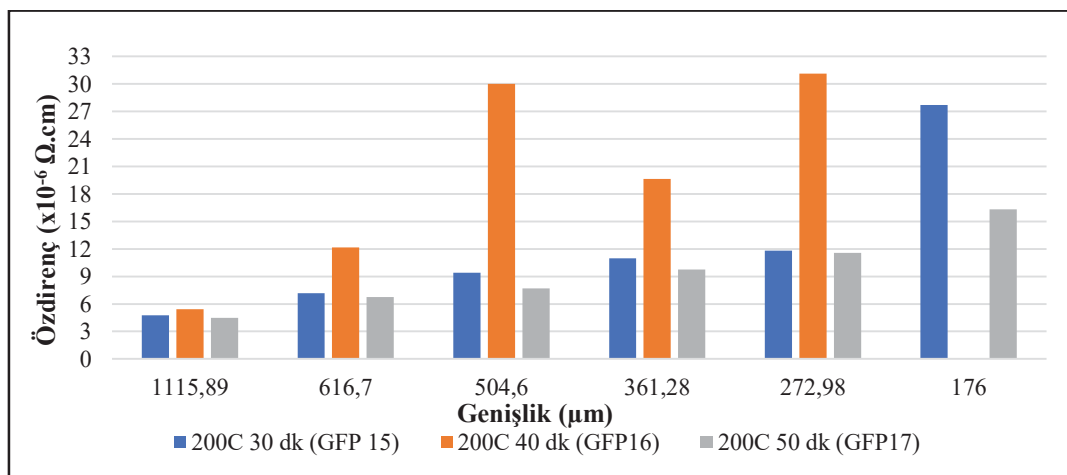
çalışma ile de desteklenmektedir [25]. Her ne kadar bu tez çalışmasında elde edilen kalınlık değerlerinin aksine, μm mertebesinde kalınlık değerleri elde edilmiş olsa da yapılan çalışmada da tavlama sıcaklığındaki artış ile kalınlığın düştüğü sonucuna ulaşıldığı görüldü.

4.3.2. Tavlama süresinin etkisi

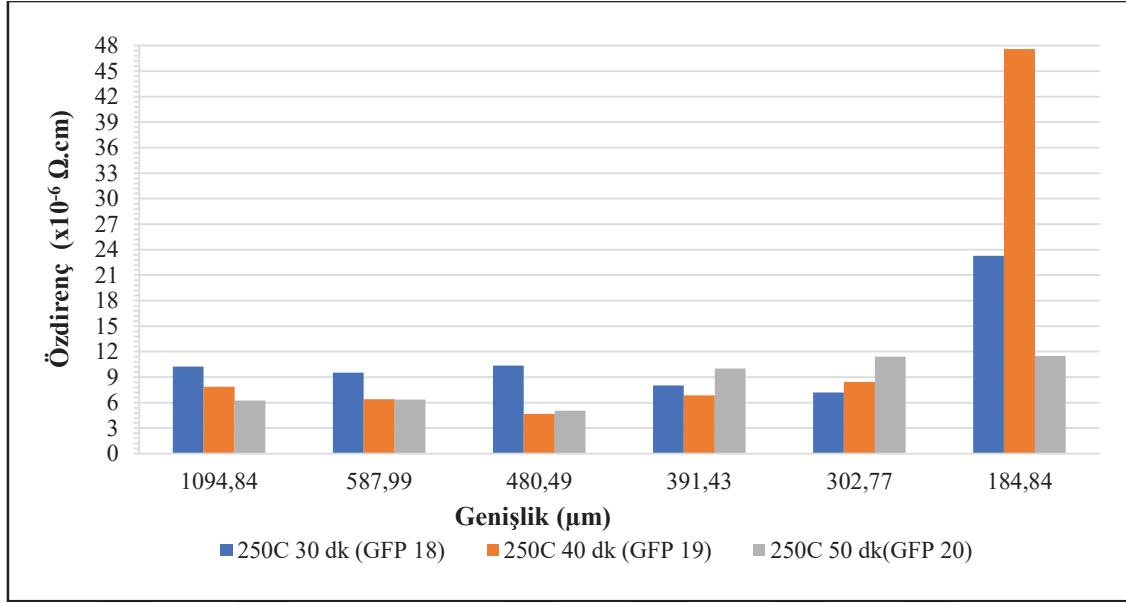
500 dpi çözünürlükte üretilen Ag filmler için tavlama süresinin öz direnç üzerindeki etkisi çizgi genişliğine bağlı olarak, 150 °C için Şekil 4.7’de, 200 °C için Şekil 4.8’de ve 250 °C için Şekil 4.9’da verildi.



Şekil 4.7. 500 dpi çözünürlük için 150 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi

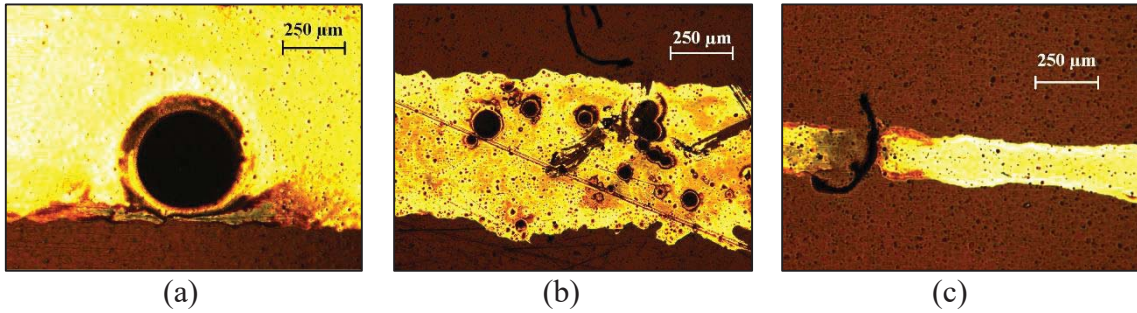


Şekil 4.8. 500 dpi çözünürlük için 200 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi



Şekil 4.9. 500 dpi çözünürlük için 250 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi

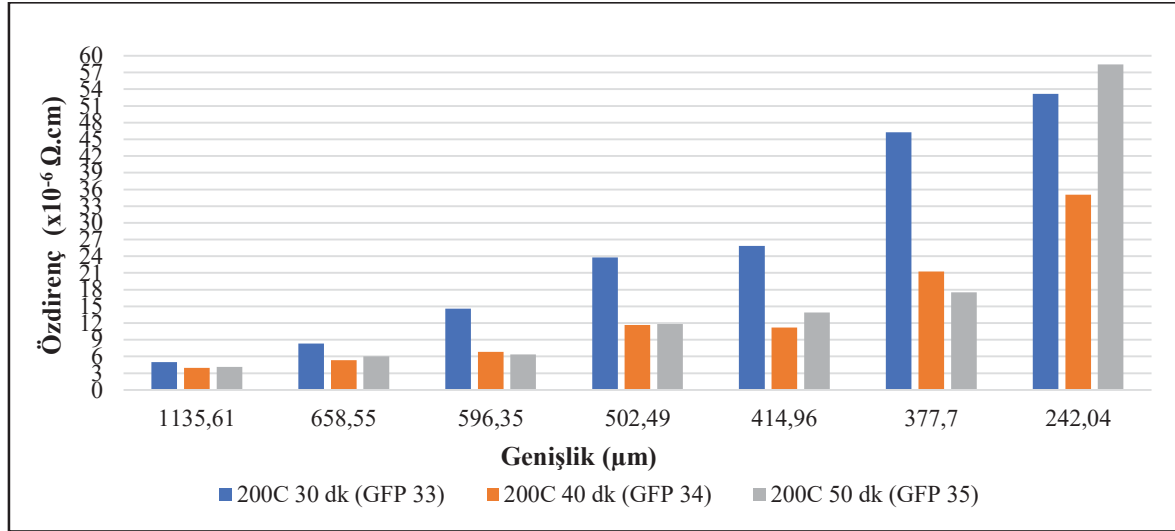
1039,51 μm, 1094,84 μm ve 1115,89 μm genişlik değerlerine sahip çizgiler baz alındığında, 150 °C ve 250 °C için de tavlama süresinin artışının, direnci düşürerek iletkenliği olumlu yönde etkilediği Şekil 4.7-9'dan görülmektedir. Yine çizgi genişliği azaldıkça bu durum düzensizleşmekte olup bir önceki bölümde bahsedilen baskı hataları ve çizgi genişliği arasındaki ilişkiden dolayı beklenen bir sonuçtur. 200 °C'de tavlanan Ag filmlerde ise öz direncin önce artıp sonra ise azaldığı görüldü. Bu beklenmeyen bir sonuç olmakla birlikte, sebebi GFP16 kodlu 200 °C sıcaklıkta 40 dk tavllanmış Ag film optik mikroskop altında incelendiğinde görüldü.



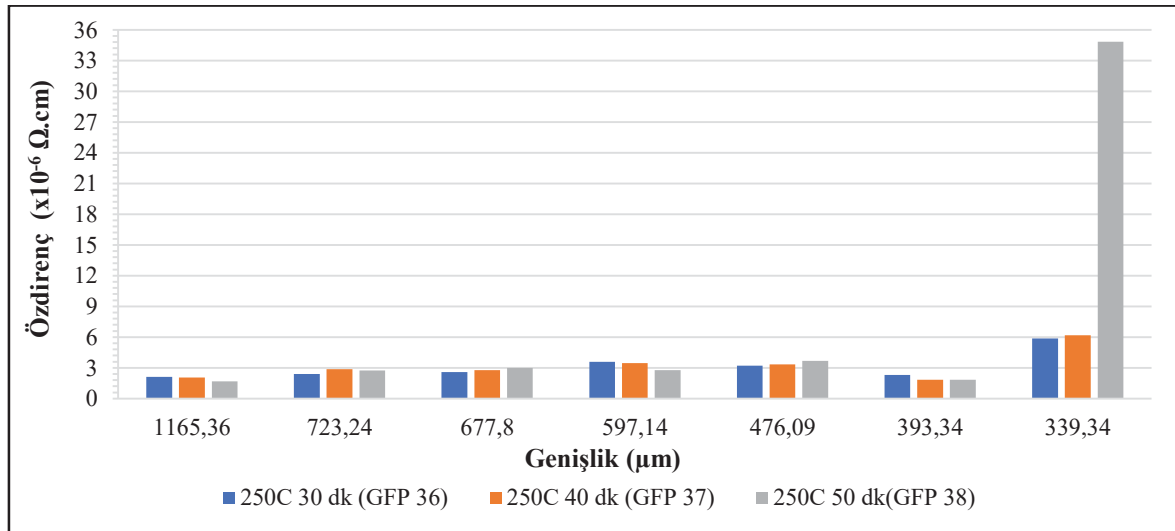
Resim 4.12. GFP16 kodlu Ag filmler için bozulan mürekkep görüntüleri. a) 1115,89 μm, b) 587,99 μm, c) 191,83 μm genişlikteki çizgiler

GFP16 kodlu numuneye ait farklı genişlikteki çizgilerden 5x yakınlığında alınmış görüntüler, Resim 4.12'de görülmektedir. Bu görüntülerde direncin yüksek çıkmasının temel

sebepleri olan lekeler / mürekkepteki bozulmalar görülmektedir. Bu bozulmaların sebebi muhtemelen temizlik sonunda yapılan bir hata ile alkolün tam olarak kurutulmaması olabilir. Mürekkebin alkol ile çözülebildiği göz önüne alındığında, alttaş üzerinde kaldığını düşünülen alkol kalıntıları mürekkebin yapısının bozulmasına sebep olmuş ve geride bu lekeleri bırakmış olabilir.



Şekil 4.10. 800 dpi çözünürlük için 200 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi



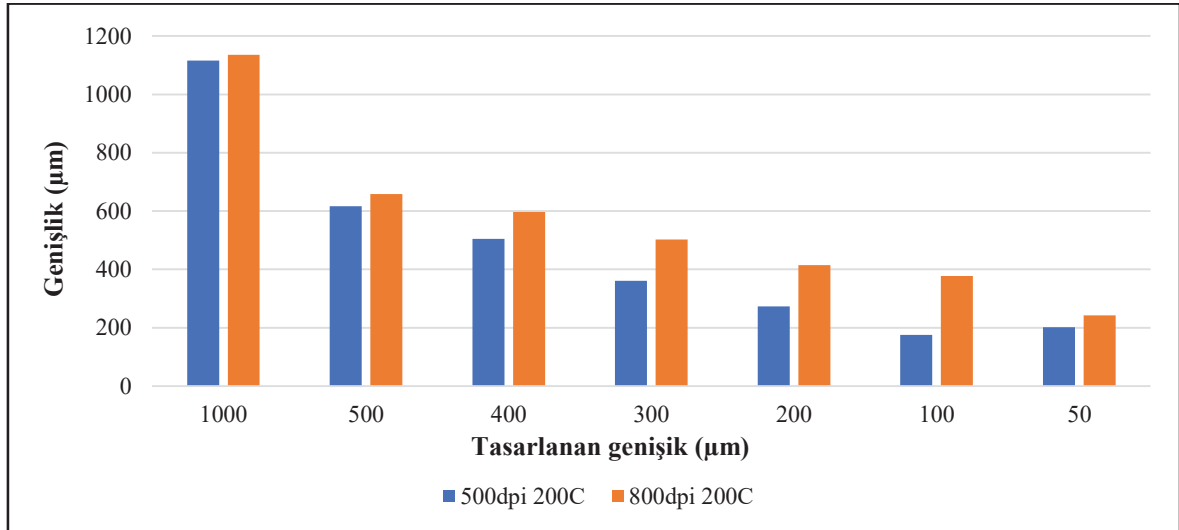
Şekil 4.11. 800 dpi çözünürlük için 250 °C tavlama sıcaklığında tavlama süresinin etkisi

800 dpi çözünürlükte üretilen Ag filmler için tavlama süresinin öz direnç üzerindeki etkisi çizgi genişliğine bağlı olarak, 200 °C için Şekil 4.10'da ve 250 °C için Şekil 4.11'de verildi. 200 °C için sonuçlar incelendiğinde 30 dk tavlanan Ag filmlerin öz dirençlerinin diğer

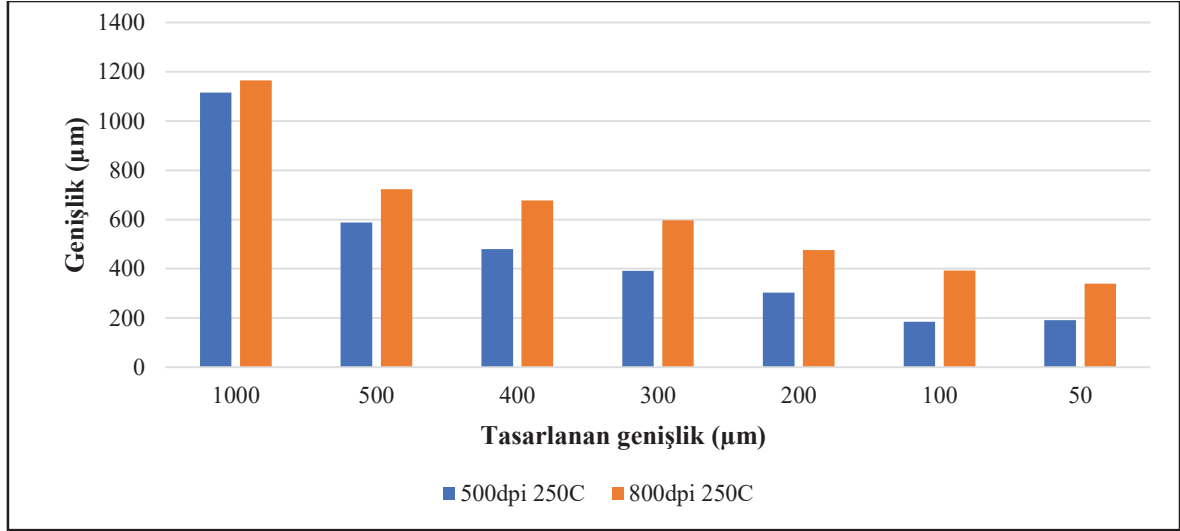
sürelerden yüksek olduğu, 40 dk ve 50 dk'nın ise birbirlerine çok yakın oldukları görüldü. Çizgi genişliği düştükçe ise öz direnç değerlerinin hızla arttığı gözlemlendi. Tavlama süresinin artışının bu çözünürlük ve sıcaklık değeri için pozitif etkisinin olduğu söylenilebilse de 200 °C sıcaklığın 800 dpi çözünürlük değeri için yetersiz olduğu ve solventin tam olarak buharlaşmadığı dolayısı ile filmde ıslak kısımlar kaldığı yorumu yapıldı. Bu durumun hem 40 dk ve 50 dk tavlama süreleri için çizgiler arası düzen görülememesine, hem de çizgi genişliği azaldıkça öz direncin çok fazla artmasına sebep olduğu görüldü. 250 °C de tavlanan Ag filmler için ise 1165,36 µm genişliğindeki çizgi incelendiğinde tavlama süresindeki artışın öz direnci düşürdüğü görüldü. Fakat bu sıcaklık değerinde, öz direncin limit değere yaklaşmasından dolayı tavlama süreleri arasındaki öz direnç değişiminin çok düşük olduğu görüldü.

4.3.3. Çözünürlüğün etkisi

Baskı çözünürlüğünün çizgi genişliği üzerindeki etkisi tasarlanan çizgi genişliklerine bağlı olarak, 200 °C tavlama sıcaklığı için Şekil 4.12'de ve 250 °C tavlama sıcaklığı için Şekil 4.13'te sunuldu.

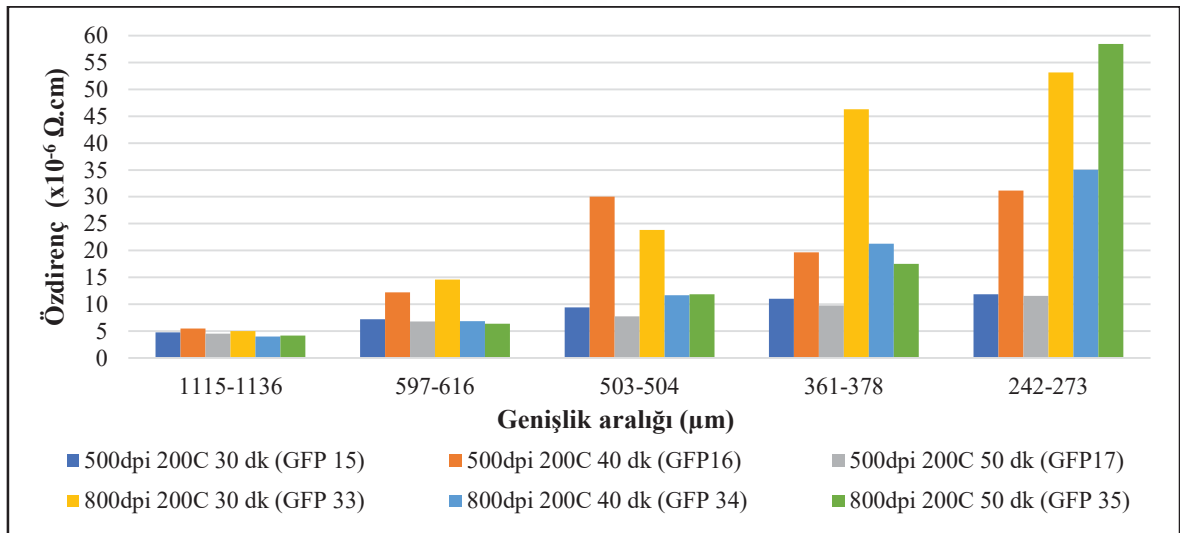


Şekil 4.12. 200 °C tavlama sıcaklığı için çözünürlüğün çizgi genişliği üzerine etkisi

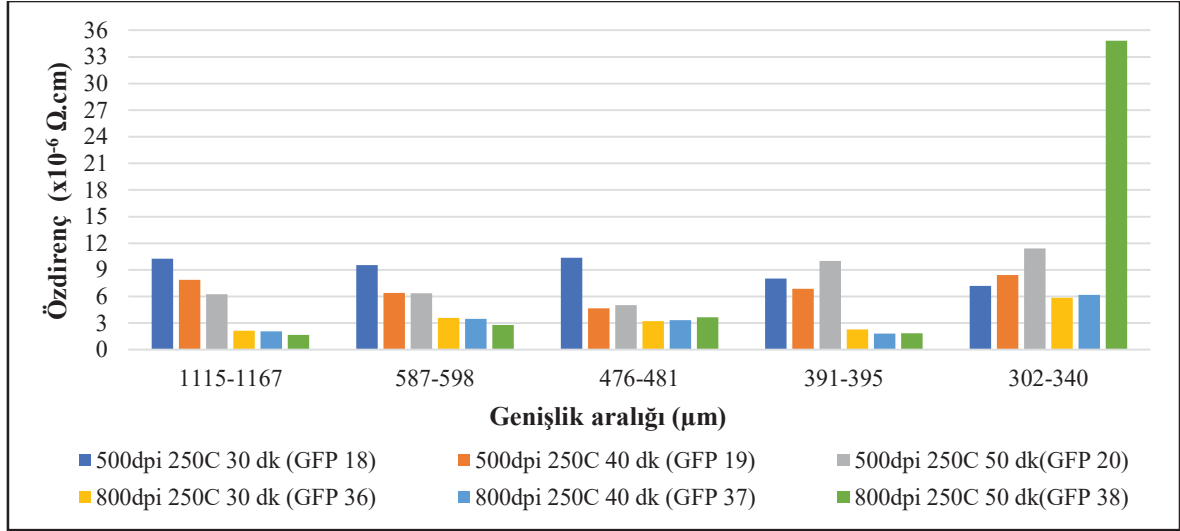


Şekil 4.13. 250 °C tavlama sıcaklığı için çözünürlüğün çizgi genişliği üzerine etkisi

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de görüldüğü üzere, çözünürlüğün ilk etkisi çizgi genişliği üzerine olmuştur. Basımda kullanılan damlacık hacmi için 800 dpi değerinin oldukça fazla gelmesi, mürekkebin ekstra yayılmasına sebep olmuş ve çizgilerin tasarlanan ve ulaşılan genişlik değerleri arasında oldukça büyük farklar oluşmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.14. 200 °C tavlama sıcaklığı için çözünürlüğün etkisi



Şekil 4.15. 250 °C için çözünürlüğün etkisi

Çözünürlüğün özdirence etkisi çizgi genişliğine bağlı olarak, 200 °C tavlama sıcaklığında 30 dk, 40 dk ve 50 dk tavlama süreleri için Şekil 4.14’de ve etkisi 250 °C tavlama sıcaklığında 30 dk, 40 dk ve 50 dk tavlama süreleri için Şekil 4.15’de verildi. Bu iki grafiğe bakıldığında 250 °C için çözünürlük artışının olumlu olduğu ve hatta çözünürlüğün 800 dpi değerine çıkarılması ile bu sıcaklık değerinde 302 μm ile 340 μm arasındaki çizgilerde dahi 6 μΩ.cm değerinden daha küçük özdirence değerlerine ulaşıldığı görüldü. Bunun temel sebebi çözünürlüğün artması ile birim alana düşen mürekkep miktarının artması ve baskı hatalarının tolere edilmesidir. Bunun yanında çözünürlüğün artması ile pikseller arası mesafe azalmakta ve tavlama sırasında Ag nano-parçacıkların birbirleri ile temas etme olasılığı artmakta, bu durumda filmin kalitesini ve devamlılığını arttırmaktadır.

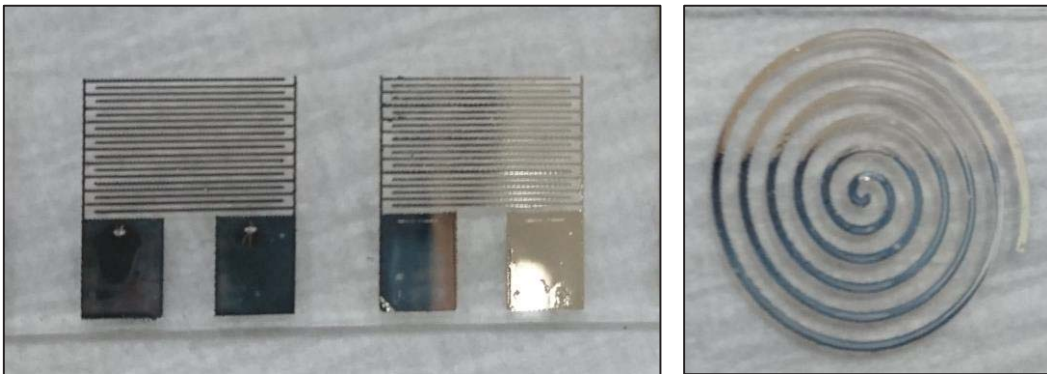
Fakat 200 °C için durumun net olarak böyle olmadığı görülmektedir. Bunun temel sebebi 800dpi çözünürlüğün basımda kullanılan damlacık boyutu için çok yüksek olması, bu sebeple çizgilerin çok “ıslak” olması ve bu sebeple solventin daha zor buharlaştırılmasıdır. Bu durum 150 °C’de tavlanan Ag filmlerin, solventin yeterince buharlaşmaması dolayısı ile iletken olmamasına, 200 °C tavlanan Ag filmlerin yine aynı sebeple daha yüksek dirence değerine sahip olmasına sebep olurken, 250 °C tavlanan Ag filmlerin bu sıcaklık değerine dayanarak “yanmamasına” ve dolayısı ile çok düşük özdirence değerine sahip olmasına sebep oldu.

Çözünürlük artışının film kalitesine olan pozitif etkisi A. Brodeala ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da görüldü [62]. Bu çalışmada 350 dpi, 400 dpi, 450 dpi ve 500 dpi'da iletken filmler basılmış, sonuç olarak ise 350 dpi ve 400 dpi için sürekliliğin kötü olduğu, hatta bu değerler için direncin $160 \text{ G}\Omega$ değerlerine ulaştığı, 450 dpi ve 500 dpi değerleri için ise iyi elektriksel iletkenliklere ulaşıldığı raporlanmıştır.

Bunun yanında 800 dpi çözünürlüğün, basımda kullanılan damlacık boyutu için çok fazla olması, mürekkebin yayılmasına ve çizgilerin tasarlanandan çok daha geniş olmasına sebep olmuştur. Tasarlanan ve basılan çizgiler arasındaki farkın $1000 \mu\text{m}$ 'lik çizgi için $160 \mu\text{m}$ iken daha dar tasarlanan çizgilerde bu fark daha fazla artarak $50 \mu\text{m}$ için neredeyse $300 \mu\text{m}$ 'e çıktığı görüldü.

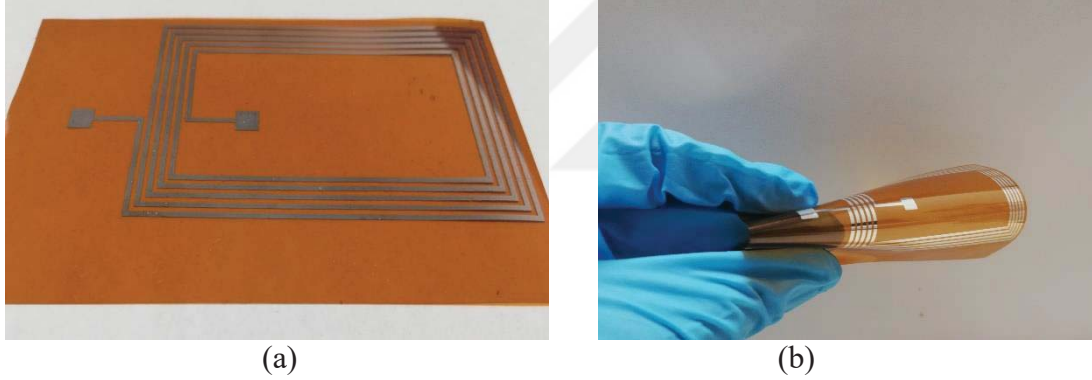
4.3.4. Desen çalışmaları

Yapılan bu tez çalışmasına paralel olarak, değişik geometrilere Ag elektrot basımı üzerine yaptığımız çalışmalarda; sensör, dedektör, anten vb. aygıt geliştirmekte kullanılacak Ag filmlerin inkjet tekniği ile basımı gerçekleştirildi. Elektrot geometrisinin $1,1 \text{ cm} \times 1,1 \text{ cm}$ alanda, çizgi genişlikleri $200 \mu\text{m}$ ve çizgiler arası mesafe $200 \mu\text{m}$ olarak tasarlandı ve basıldı. Bu elektrotların basımı, bu tez çalışmasında kullanılan farklı bir mürekkep kullanılarak hem cam hem de esnek alttaşlar üzerine gerçekleştirildi. Resim 4.13'te basılan interdigital geometrisi ve spiral çalışması görülmektedir. Bu desenler 600 dpi çözünürlük ile basılmış olup, kollar arasında hiçbir kısa devrenin olmadığı ve ortalama direncin $10 \mu\Omega.\text{cm}$ 'den küçük olduğu görüldü.



Resim 4.13. Cam ve esnek alttaşlar üzerine, interdigital elektrot ve spiral baskı denemeleri

Bunun yanında bu çalışmaya paralel olarak, anten üretiminde kullanılabilir nitelikte baskılar da gerçekleştirildi. Yakın Alan Anteni (NFC) olarak basılan ve Resim 4.14'de gösterilen anten yapısı, literatüre bağlı olarak tasarlandı [48]. Tasarlanan anten geometrisi Resim 4.14 a'da görüldüğü hali ile Ag mürekkep kullanılarak kapton alttaş üzerine 5 cm x 8 cm ölçülerinde basıldı. Elde edilen baskı incelendiğinde çizgi genişliğinin 1mm civarında olduğu ölçülerek belirlendi. Bunun yanında ise spiral olarak basılan bu antenin toplam çizgi uzunluğu hesaplandığında 1 metreden fazla olduğu görüldü. Yapılan uçtan uca multimetre ölçümü ve hesaplama sonrasında öz direncinin $10 \mu\Omega.cm$ 'den küçük olduğu belirlendi. Ayrıca Resim 4.14 b'de görüldüğü gibi baskı bükülmelere karşı da dayanıklılık gösterdi. Yapılan bükülme testinde de 7mm kıvrılma yarıçapı ile 10 kez büküldüğünde, Ag elektrotlarda kopma ya da kırılma olmadığı iletkenlik testi ile görüldü. Yapılan bu çalışmaların ilerleyen zamanlarda interdigital elektrot ve anten geliştirilmesinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.



Resim 4.14. NFC anten tasarımı a) basılan NFC anten, b) Basılan NFC antenin bükülmüş hali

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında Inkjet baskı yöntemi ile esnek alümin üzerine farklı baskı çözünürlüklerinde Ag ince filmler basıldı. Basılan ince filmler farklı sıcaklık değerlerinde farklı sürelerde tavlansak, bu değişkenlerin filmlerin iletkenlikleri üzerindeki etkisi incelendi.

Bu tez çalışmasında, ar-ge ve üretim aşamalarında kullanıma uygun, 10 $\mu\Omega$.cm değerinden daha düşük öz dirence sahip iletken filmlerin üretilmesi hedeflendi ve başarıldı. Bu hedef için yapılan çalışmada baskı sırasında kullanılan parametrelerin, tavlama sıcaklığının, tavlama süresinin ve çözünürlüğün Ag ince filmlerin iletkenliği ve kalitesi üzerine etkisi incelendi.

İncelenen tüm değişkenler için görülmüştür ki, geniş çizgilerde değişkenlere bağlı gözlenen artış ya da azalış düzenleri, çizgi genişliği azaldıkça düzensizleşmiştir. Bunun sebebi olarak, çizgi genişliği azaldıkça baskı hatalarının iletkenlik üzerindeki etkisinin arttığı sonucuna varıldı. Bu sebeple değişkenlerin etkileri üzerine yapılan karşılaştırmalarda geniş çizgilerin baz alınması daha doğru bulundu.

Yapılan çalışma sonucunda; geniş çizgiler baz alındığında sıcaklık artışının bir noktaya kadar iletkenliğe pozitif katkı sağladığı, 500 dpi çözünürlük için 250 °C'de filmin bozulmaya başladığı ve bu sebeple direncin arttığı görüldü. 800 dpi çözünürlük değerinde ise birim alandaki mürekkep yoğunluğu dolayısıyla 150 °C sıcaklığının düşük kaldığı ve solventin buharlaşmasını tam olarak sağlayamadığı ve bu sebeple bu sıcaklıkta tavlansak Ag filmlerde iletkenlik olmadığı görüldü. Bunun yanında 200 °C'de iletkenlik elde edilmesine karşın bu sıcaklık değerinin de bu çözünürlük için düşük olduğu görüldü. 250 °C'de ise 2-3 $\mu\Omega$.cm gibi oldukça düşük öz direnç değerlerine ulaşıldı. Bu durum farklı çözünürlük değerleri için farklı tavlama sıcaklıklarının tercih edilmesi gerektiğinin bir göstergesi olmakla beraber, sıcaklığın artışının genel olarak iletkenliğe katkı sağladığı fakat mürekkep özellikleri ve çözünürlük ile ilişkili olarak bir üst sınırdan sonra mürekkebin yanmasına ya da yapısının bozulmasına sebep olarak direnci arttırdığı görülmüştür.

Tavlama süresinin artışı ise her iki çözünürlük değeri için özellikle geniş çizgiler baz alındığında direncin düşmesine sebep oldu.

Çözünürlüğün etkisi ise ilk olarak basılan çizgilerin genişliğinde görüldü. Çözünürlük artışı ile basılan çizgilerin tasarlanan genişlikleri ile basılan genişlikleri arasındaki farkın arttığı görüldü. Önceki deneyimler baz alınarak bu farkın azaltılması için damlacık boyutunun azaltılmasının ya da alttaş sıcaklığının artırılmasının işe yarayacağı düşünülmekle beraber, çözünürlüğün etkisinin gözlemlenebilmesi adına yapılan bu çalışmada bu iki değer de sabit tutuldu. Genişlik artışının sebebi birim alandaki mürekkep yoğunluğunun fazla olması olup bu durum mürekkebin yayılmasına sebep oldu. Bunların yanında birim alandaki yoğunluğun artışı baskı sırasında oluşan hataların etkisini ciddi boyutta azaltarak, özdirencin kalın çizgilerde (g) $2 \mu\Omega.cm$ değerinin altına inmesine sebep oldu.

Yukarıda bahsedilen sonuçların dışında bu çalışmada üretilen iletken filmlerin alttaşla bir bütün olarak iletkenliklerini kaybetmeden esneyebildiği ve bant testine dayanacak seviyede alttaşa tutunduğu görüldü.

Yapılan desen çalışmalarında ise, sensörler için üretilen intedigital elektrotlarda ve NFC anten çalışmalarında sıklık ile kullanılan desenlerin Cam ve esnek alttaş üzerine başarılı bir şekilde basıldığı görüldü.

Sonuç olarak bu tez çalışması ile, iletken metal ince filmlerin ihtiyaç duyulduğu; sensör, NFC anten, RFID anten, devre kartları, güneş hücreleri gibi birçok alanda, gerek ar-ge gerekse üretim aşamasında kullanıma uygun $10 \mu\Omega.cm$ değerinden küçük özdirenç değerine sahip Ag filmler üretildi. Yapılan çalışma baz alınarak üretilen çizgiler için genişlik ve kalınlık değerleri kalibre edilebilir ve istenilen özelliklere sahip filmler geliştirilebilir. İlerleyen aşamalarda bu çalışmada elde edilen veriler kullanılarak, kullanıma uygun ürünler üretilmek amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Whitfield, R., Farrer, A., Vainker, S. J., and Rawson, J. (1990). *Caves of the thousand Buddhas: Chinese art from the silk route*: George Braziller.
2. Lee, H.-H., Chou, K.-S., and Huang, K.-C. (2005). Inkjet printing of nanosized silver colloids. *Nanotechnology*, 16(10), 2436-2441.
3. Kordás, K., Mustonen, T., Tóth, G., Jantunen, H., Lajunen, M., Soldano, C., Talapatra, S., Kar, S., Vajtai, R., and Ajayan, P. M. (2006). Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes. *Small*, 2(8-9), 1021-1025.
4. Wang, J. Z., Gu, J., Zenhausern, F., and Sirringhaus, H. (2006). Low-cost fabrication of submicron all polymer field effect transistors. *Applied Physics Letters*, 88(13), 133502, 1-3.
5. Subramanian, V., Chang, P. C., Lee, J. B., Molesa, S. E., and Volkman, S. K. (2005). Printed organic transistors for ultra-low-cost RFID applications. *IEEE transactions on components and packaging technologies*, 28(4), 742-747.
6. Sirringhaus, H., Kawase, T., Friend, R., Shimoda, T., Inbasekaran, M., Wu, W., and Woo, E. (2000). High-resolution inkjet printing of all-polymer transistor circuits. *Science*, 290(5499), 2123-2126.
7. Sambucetti, C. (1980). Magnetic ink for jet printing. *IEEE Transactions on Magnetics*, 16(2), 364-367.
8. Patel, N., Meier, S., Cammann, K., and Chemnitz, G.-C. (2001). Screen-printed biosensors using different alcohol oxidases. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 75(1-2), 101-110.
9. Fakhfouri, V., Cantale, N., Mermoud, G., Kim, J., Boiko, D., Charbon, E., Martinoli, A., and Brugger, J. (2008). *Inkjet printing of SU-8 for polymer-based MEMS a case study for microlenses*. Paper presented at the IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Tucson, Arizona, USA.
10. Kato, K., Omoto, H., Tomioka, T., and Takamatsu, A. (2011). Visible and near infrared light absorbance of Ag thin films deposited on ZnO under layers by magnetron sputtering. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8), 2352-2356.
11. Carcia, P., McLean, R., Reilly, M., and Nunes Jr, G. (2003). Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering. *Applied Physics Letters*, 82(7), 1117-1119.
12. Tanahashi, I., Manabe, Y., Tohda, T., Sasaki, S., and Nakamura, A. (1996). Optical nonlinearities of Au/SiO₂ composite thin films prepared by a sputtering method. *Journal of applied physics*, 79(3), 1244-1249.

13. Lv, J., Lai, F., Lin, L., Lin, Y., Huang, Z., and Chen, R. (2007). Thermal stability of Ag films in air prepared by thermal evaporation. *Applied Surface Science*, 253(17), 7036-7040.
14. Comini, E., Faglia, G., Ferroni, M., and Sberveglieri, G. (2007). Gas sensing properties of zinc oxide nanostructures prepared by thermal evaporation. *Applied Physics A*, 88(1), 45-48.
15. Jeong, J., Choi, S.-P., Chang, C. I., Shin, D. C., Park, J. S., Lee, B., Park, Y.-J., and Song, H.-J. (2003). Photoluminescence properties of SnO₂ thin films grown by thermal CVD. *Solid State Communications*, 127(9-10), 595-597.
16. Yang, L., Rida, A., Vyas, R., and Tentzeris, M. M. (2007). RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 55(12), 2894-2901.
17. Subramanian, V., Fréchet, J. M., Chang, P. C., Huang, D. C., Lee, J. B., Molesa, S. E., Murphy, A. R., Redinger, D. R., and Volkman, S. K. (2005). Progress toward development of all-printed RFID tags: materials, processes, and devices. *Proceedings of the IEEE*, 93(7), 1330-1338.
18. Shin, H., Yoon, B., Park, I. S., and Kim, J.-M. (2014). An electrothermochromic paper display based on colorimetrically reversible polydiacetylenes. *Nanotechnology*, 25(9), 094011, 1-8.
19. Molina-Lopez, F., Briand, D., and De Rooij, N. (2012). All additive inkjet printed humidity sensors on plastic substrate. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 166, 212-222.
20. Lien, D.-H., Kao, Z.-K., Huang, T.-H., Liao, Y.-C., Lee, S.-C., and He, J.-H. (2014). All-printed paper memory. *ACS nano*, 8(8), 7613-7619.
21. Hilder, M., Winther-Jensen, B., and Clark, N. (2009). based, printed zinc-air battery. *Journal of power Sources*, 194(2), 1135-1141.
22. Fuller, S. B., Wilhelm, E. J., and Jacobson, J. M. (2002). Ink-jet printed nanoparticle microelectromechanical systems. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(1), 54-60.
23. Villani, F., Vacca, P., Nenna, G., Valentino, O., Burrasca, G., Fasolino, T., Minarini, C., and Della Sala, D. (2009). Inkjet printed polymer layer on flexible substrate for OLED applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(30), 13398-13402.
24. Faddoul, R., Reverdy-Bruas, N., Blayo, A., and Khelifi, B. (2013). Inkjet printing of silver nano-suspensions on ceramic substrates—Sintering temperature effect on electrical properties. *Microelectronic Engineering*, 105, 31-39.

25. Park, J., Lee, D. J., Kim, S. J., and Oh, J. H. (2009). Dynamic characteristics measurements of inkjet-printed thin films of nanosilver suspensions on a flexible plastic substrate. *Journal of micromechanics and microengineering*, 19(9), 095021, 1-8.
26. Ahmed, S., Tahir, F. A., Shamim, A., and Cheema, H. M. (2015). A Compact Kapton-Based Inkjet-Printed Multiband Antenna for Flexible Wireless Devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1802-1805. doi:10.1109/lawp.2015.2424681
27. Hermans, J., van Knippenberg, R., Kamp, E., Brok, W., Papet, P., Legradic, B., and Strahm, B. (2013). *Inkjet printing for solar cell mass production on the PiXDRO JETx platform*. Paper presented at the 28th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Exhib., Paris, France.
28. Meier, H., Löffelmann, U., Mager, D., Smith, P. J., and Korvink, J. G. (2009). Inkjet printed, conductive, 25 μm wide silver tracks on unstructured polyimide. *physica status solidi (a)*, 206(7), 1626-1630.
29. Wang, C.-T., Huang, K.-Y., Lin, D. T., Liao, W.-C., Lin, H.-W., and Hu, Y.-C. (2010). A flexible proximity sensor fully fabricated by inkjet printing. *Sensors*, 10(5), 5054-5062.
30. PixDro, (2011), *Documentation PixDro LP50 Inkjet printer*, Eindhoven/The Netherlands, Roth&Rau.
31. Rayleigh, L. (1879). On the capillary phenomena of jets. *Proceedings of the Royal Society London*, 29(196-199), 71-97.
32. Derby, B. (2015). Additive manufacture of ceramics components by inkjet printing. *Engineering*, 1(1), 113-123.
33. Chen, P.-H., Chen, W.-C., and Chang, S.-H. (1997). Bubble growth and ink ejection process of a thermal ink jet printhead. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(6), 683-695.
34. Chen, P.-H., Peng, H.-Y., Liu, H.-Y., Chang, S.-L., Wu, T.-I., and Cheng, C.-H. (1999). Pressure response and droplet ejection of a piezoelectric inkjet printhead. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41(2), 235-248.
35. Kwon, K.-S. (2010). Experimental analysis of waveform effects on satellite and ligament behavior via in situ measurement of the drop-on-demand drop formation curve and the instantaneous jetting speed curve. *Journal of micromechanics and microengineering*, 20(11), 115005.
36. Kwon, K.-S. (2009). Waveform design methods for piezo inkjet dispensers based on measured meniscus motion. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(5), 1118-1125.
37. Chuang, M. Y. (2017). Inkjet Printing of Ag Nanoparticles using Dimatix Inkjet Printer (Technical Report No 2). Retrieved from:
https://repository.upenn.edu/scn_protocols/40/

38. Dimatix Material Printer DMP-2831. (2013). Dimatix Material Printer DMP-2831. California, USA.
39. Kipphan, H. (2001). *Handbook of print media: technologies and production methods*: Springer Science & Business Media, 134.
40. Jang, J. (2006). Conducting polymer nanomaterials and their applications. In *Emissive Materials Nanomaterials*, Springer, 189-260.
41. Yoon, H., and Jang, J. (2009). Conducting-polymer nanomaterials for high-performance sensor applications: issues and challenges. *Advanced Functional Materials*, 19(10), 1567-1576.
42. Yoshioka, Y., and Jabbour, G. E. (2006). Desktop inkjet printer as a tool to print conducting polymers. *Synthetic Metals*, 156(11-13), 779-783.
43. Small, W. R., and in het Panhuis, M. (2007). Inkjet printing of transparent, electrically conducting single-walled carbon-nanotube composites. *Small*, 3(9), 1500-1503.
44. Kamyshny, A., Steinke, J., and Magdassi, S. (2011). Metal-based inkjet inks for printed electronics. *The Open Applied Physics Journal*, 4(1), 19-36.
45. Zhao, N., Chiesa, M., Siringhaus, H., Li, Y., Wu, Y., and Ong, B. (2007). Self-aligned inkjet printing of highly conducting gold electrodes with submicron resolution. *Journal of applied physics*, 101(6), 064513, 1-6.
46. Lee, Y., Choi, J.-r., Lee, K. J., Stott, N. E., and Kim, D. (2008). Large-scale synthesis of copper nanoparticles by chemically controlled reduction for applications of inkjet-printed electronics. *Nanotechnology*, 19(41), 415604, 1-7.
47. Määttänen, A., Vanamo, U., Ihalainen, P., Pulkkinen, P., Tenhu, H., Bobacka, J., and Peltonen, J. (2013). A low-cost paper-based inkjet-printed platform for electrochemical analyses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 177, 153-162.
48. Ortego, I., Sanchez, N., Garcia, J., Casado, F., Valderas, D., and Sancho, J. (2012). Inkjet printed planar coil antenna analysis for NFC technology applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, 486565, 1-6.
49. Chung, M.-A., Chien, Y.-L., Cho, L., Hsu, P.-H., and Yang, C.-F. (2015). *A dual-mode antenna for wireless charging and Near Field Communication*. Paper presented at the IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Vancouver, British Columbia, Canada.
50. Lee, B., Kim, B., and Yang, S. (2014). Enhanced loop structure of NFC antenna for mobile handset applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, 187029, 1-6.

51. Jankowski-Mihułowicz, P., Tomaszewski, G., and Węglarski, M. (2015). Flexible antenna design for semi-passive HF RFID transponder in ink-jet technology. *Organ*, 4, 15, 1-5.
52. Amin, Y., Prokkola, S., Shao, B., Hallstedt, J., Tenhunen, H., and Zheng, L.-R. (2009). *Inkjet printed paper based quadrate bowtie antennas for UHF RFID tags*. Paper presented at the 11th International Conference on Advanced Communication Technology, Gangwon-Do, South Korea.
53. Shaker, G., Safavi-Naeini, S., Sangary, N., and Tentzeris, M. M. (2011). Inkjet printing of ultrawideband (UWB) antennas on paper-based substrates. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 10, 111-114.
54. Rivadeneyra, A., Fernández-Salmeron, J., Agudo, M., López-Villanueva, J. A., Capitan-Vallvey, L. F., and Palma, A. J. (2014). Design and characterization of a low thermal drift capacitive humidity sensor by inkjet-printing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 195, 123-131.
55. Andersson, H., Manuilskiy, A., Unander, T., Lidenmark, C., Forsberg, S., and Nilsson, H.-E. (2011). Inkjet printed silver nanoparticle humidity sensor with memory effect on paper. *IEEE Sensors Journal*, 12(6), 1901-1905.
56. Fang, Y., Akbari, M., Hester, J. G., Sydänheimo, L., Ukkonen, L., and Tentzeris, M. M. (2017). Sensitivity enhancement of flexible gas sensors via conversion of inkjet-printed silver electrodes into porous gold counterparts. *Scientific reports*, 7(1), 8988, 1-10.
57. Deegan, R. D., Bakajin, O., Dupont, T. F., Huber, G., Nagel, S. R., and Witten, T. A. (1997). Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops. *Nature*, 389(6653), 827.
58. Smith, P., Shin, D.-Y., Stringer, J., Derby, B., and Reis, N. (2006). Direct ink-jet printing and low temperature conversion of conductive silver patterns. *Journal of materials science*, 41(13), 4153-4158.
59. Matula, R. A. (1979). Electrical resistivity of copper, gold, palladium, and silver. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 8(4), 1147-1298.
60. Park, J.-W., and Baek, S.-G. (2006). Thermal behavior of direct-printed lines of silver nanoparticles. *Scripta materialia*, 55(12), 1139-1142.
61. Dearden, A. L., Smith, P. J., Shin, D. Y., Reis, N., Derby, B., and O'Brien, P. (2005). A low curing temperature silver ink for use in ink-jet printing and subsequent production of conductive tracks. *Macromolecular Rapid Communications*, 26(4), 315-318.
62. Brodeala, A., Bonea, A., Ionescu, C., Vladescu, M., and Svasta, P. (2012). *Physical properties of silver inkjet printed circuits*. Paper presented at the 2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bad Aussee, Austria.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YAMAN, Alp Deniz
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.08.1989, Bursa
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (554) 704 47 21
 e-mail : alpdenizyaman@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ İleri Teknolojiler A.B.D	Devam ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi/ Fizik Mühendisliği	2015
Lise	Osmangazi Gazi Anadolu Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Gazi Teknoloji A.Ş.	Ar-Ge Personeli
2016-2018	Gazi Üni. Fotonik Uy. Ar. Mer.	Ar-Ge Personeli

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Bildiri ve Sunular

1. Yaman, A. D., Akın Sönmez, N. ve Özçelik, S. (2018, 21 Aralık). *Tavlama Sıcaklığının Mürekkepli Baskı Yöntemi İle Üretilen Gümüş Elektrotların İletkenlikleri Üzerine Etkisi*. 24. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, S05, Ankara.
2. Karaca, A., Dönmez, M., Kurtuluş, G., Yaman, A. D., Sağlam, S., ve Özçelik, S. (2017, 22 Aralık). *8-12 µm Dalgaboyu Aralığı İçin Germanyum Optik Pencere Üzerine Yansıma Önleyici İnce Film Geliştirilmesi*. 23. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P03, Ankara.
3. Dinçer, A.S., Yaman, A. D., Efkere, H. İ., Gümrükçü, A. E., ve Özçelik, S. (2017, 22 Aralık). *Farklı Isıl Etkinin Cu:ZnO İnce Filminin Yapısal-Morfolojik-Optik Özelliklerinin İncelenmesi*. 23. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P32, Ankara

4. Gümrukçü, A. E., Efker, H. İ., Yaman, A. D., Cömert, B., ve Özçelik, S. *Cu:ZnO İnce Filmlerin Geliştirilmesi: DC Püskürtme Gücünün Etkisi*. 23. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, P08, Ankara
5. Cömert, B., Dönmez, M., Yaman, A. D., Gümrukçü, A. E., Akın Sönmez, N. ve Özçelik, S. (2017, 06 Eylül). *Effects of Rf Power on Pd-doped TiO₂ Thin Films*. Turkish Physical Society 33rd International Physics Congress, P38, Bodrum.

Hobiler

Latin Amerikan Dans Sporu (7 yıl), Çağdaş Dans (3 yıl), Sinema, Kitap, Müzik





GAZİ GELECEKTİR..