



**AEROSOL JET BASKI TEKNİĞİ İLE BASINÇ VE GERİNİM ÖLÇER  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Onur GÜLCÜ**

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2025**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Onur GÜLCÜ

08/01/2025

# AEROSOL JET BASKI TEKNİĞİ İLE BASINÇ VE GERİNİM ÖLÇER GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Onur GÜLCÜ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

## ÖZET

Bu çalışmada, yarı iletken üretim tekniklerinden biri olan Aerosol Jet Baskı (AJP) yöntemini kullanarak Kapton alt tabaka üzerine gümüş mürekkeple basınç ve gerinim sensörleri üretmenin verimliliğini ve hassasiyetini artırmak amaçlanmıştır. Ayrıca, AJP tekniğinde geleneksel yarıiletken üretim yöntemlerine istinaden vakum veya maske hizalaması oluşturmaya gerek yoktur. Özellikle fotolitografi ve diğer mikrofabrikasyon tekniklerinin belirli uygulamalar için genellikle çok karmaşık veya maliyetli olan uygulamalardır. AJP yöntemi, bir mürekkebi (genellikle metal nanopartikül bazlı bir mürekkep) ince bir aerosol sisi haline atomize etmeyi ve ardından malzemeyi yüksek hassasiyetle bir alt tabaka üzerine biriktirmek için bir nozul aracılığıyla yönlendirmeyi içerir. Kapton (bir poliamid film) üzerine gümüş mürekkeple aerosol jet baskı, Kapton'un esnekliği, termal kararlılığı ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle gerinim ölçerler oluşturmak için yaygın bir yaklaşımdır. Gümüş mürekkep mükemmel iletkenlik sağlar ve bu da onu hassas algılama uygulamaları için ideal hale getirir. Aerosol jet baskı kullanılarak Kapton'a uygulandığında, gümüş mürekkep alt tabakaya iyi yapışan son derece iletken izler oluşturur. Biriktirmeden sonra, basılı mürekkep genellikle dayanıklılığını ve iletkenliğini artırmak için bir kütleme sürecinden geçer. Gümüş mürekkep ve Kapton'un bu kombinasyonu, zorlu koşullarda bile sağlam, güvenilir gerinim ölçümleri sağladığı için genellikle havacılık ve esnek elektronikte kullanılır. Bu çalışmada baskısı yapılan sensörlerin kalınlığı, genişliği ve elektriksel özellikleri ölçüldü ve birbirleriyle karşılaştırıldı. Bu sensörlerin fiziksel ölçüm aralığı, çizgi genişliği için 65-75µm ve kalınlık için 3-4µm ve elektrik dirençleri için 200-300ohm olarak ölçülmüştür.

Bilim Kodu : 20232  
Anahtar Kelimeler : Gerinim ölçer, AJP, mürekkep püskürtme, gümüş.  
Sayfa Adedi : 33  
Danışman : Doç. Dr. Nihan Akın SÖNMEZ

# DEVELOPMENT OF PRESSURE AND STRAIN GAUGES USING AEROSOL JET PRINTING TECHNIQUE

(M. Sc. Thesis)

Onur GÜLCÜ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

## ABSTRACT

In this study, it was aimed to improve the efficiency and precision of producing pressure and strain sensors with silver ink on Kapton substrate by using the Aerosol Jet Printing (AJP) method, which is one of the semiconductor production techniques. Also, in AJP technique, there is no need to generate vacuum or mask aligning. Particularly in applications where traditional photolithography and any other microfabrication techniques are often too complex or costly for certain applications. AJP method involves atomizing an ink (often a metal nanoparticle-based ink) into a fine aerosol mist, which is then directed through a nozzle to deposit the material onto a substrate with high precision. Aerosol jet printing with silver ink on Kapton (a polyimide film) is a common approach for creating strain gauges due to Kapton's flexibility, thermal stability, and electrical insulation properties. Silver ink provides excellent conductivity, making it ideal for precision sensing applications. When applied to Kapton using aerosol jet printing, the silver ink forms highly conductive traces that adhere well to the substrate. After deposition, the printed ink typically undergoes a curing process to enhance its durability and conductivity. This combination of silver ink and Kapton is often used in aerospace and flexible electronics, as it provides robust, reliable strain measurements even in harsh conditions. The thickness, widths and electrical properties of these printed gauges were measured and compared with each other. The range of physical measurement of the printed gauges were measured as 65-75 $\mu\text{m}$  for line width and 3-4 $\mu\text{m}$  for thickness and 200-300ohm for electrical resistances.

Science Code : 20232  
Key Words : Strain gauge, AJP, inkjet, silver.  
Page Number : 33  
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nihan Akın SÖNMEZ

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda tecrübelerini ve yardımlarını esirgemeyen her aşamada beni yönlendiren tez danışmanım sayın Doç. Dr. Nihan Akın SÖNMEZ'e; bu tez çalışması kapsamında kullanılan tüm olanakları sağlayan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin direktörü sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e; aygıt tasarımı ve üretim işlemleri konusunda teorik desteğini hiç esirgmeden sunan Ar. Gör. Berk SERBEST'e, örneklerin ölçümlerinde deneysel becerilerini ortaya koyan Mehmet ERDOĞAN'a, beni her zaman destekleyen canım aileme; tüm zorlukların üstesinden gelebilme sebebim, hayat arkadaşım, güzel eşim Deniz'e ve bu zorlu yolda bana arkadaşlık eden minicik elleriyle bana ikramlar getiren, beni hayata neşeyle, sabırla bağlayan kızım İpek'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması 2019K12-149045 nolu proje ile Türkiye Cumhuriyeti (T.C.) Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER .....	3
2.1. Gerinim Sensörü ve İletken Gümüş Mürekkep Malzemesinin Özellikleri.....	3
2.2. Gümüş (Ag) İletken Mürekkep .....	5
2.3. Poliamid (PA) DuPont Kapton.....	5
2.4. Gerinim Sensörü Geometrileri .....	5
2.5. Wheatstone Köprüsü .....	6
2.5.1. Tam köprü.....	7
2.5.2. Yarım köprü ve çeyrek köprü .....	8
2.6. Hatalar .....	8
2.6.1. Çıktı hataları .....	8
3. BASKI ELEKTRONİKLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ .....	11
3.1. Aerosol Jet Baskı Yöntemi.....	11
3.2. Pnömotik Atomizasyon Yöntemi .....	12
3.3. Ultrasonik Atomizasyon.....	13

4. SENSÖR ÜRETİMİNDE VE ÖLÇÜMÜNDE KULLANILAN SİSTEMLER .....	15
4.1. Aerosol Jet Baskı.....	15
4.2. Optik Mikroskop .....	16
4.3. Yüzey Profilometresi .....	17
5. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	19
5.1. Sensörlerin Üretilmesi.....	19
6. SENSÖR KARAKTERİZASYONU VE TARTIŞMA .....	23
6.1. Fiziksel Ölçümler .....	23
6.1. Elektriksel Ölçümler .....	24
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	27
KAYNAKLAR .....	29
ÖZGEÇMİŞ .....	33

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. K�rleme prosesi sonrası iletkenlik.....	5
Çizelge 5.1. Aerosol jet baskı sensör üretim değerleri .....	20
Çizelge 6.1. Ölüm sonuçlarının karşılaştırılması .....	26

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Gerinim sensörü tasarımı .....	4
Şekil 2.2. Farklı SG geometrileri tasarımlarına örnekler .....	6
Şekil 2.3. Wheatstone köprüsü.....	7
Şekil 2.4. Tam Wheatstone köprüsü .....	7
Şekil 2.5. Wheatstone Köprüsü; a) çeyrek köprü, b) yarım köprü .....	8
Şekil 2.6. Çıktı hatalarının hesaplanması.....	9
Şekil 3.1. AJP tekniğiyle Ag hazırlama .....	11
Şekil 3.2. Pnömotik atomizasyon .....	13
Şekil 3.3. Ultrasonik atomizasyon .....	14
Şekil 4.1. Optik mikroskop ve optik mikroskopta alınan görüntü.....	17
Şekil 4.2. Hizalama paterninin maske tasarım ve optik mikroskop görüntüsü.....	18
Şekil 5.1. Gerinim sensör tasarım modeli.....	19
Şekil 5.2. Üretilen Gerinim Sensörü görüntüsü.....	21
Şekil 6.1. Izgara kalıklıkları a)kenar elektrot,b)iletim ızgaraları c)lehimleme pedi kalınlığı.....	23
Şekil 6.2. Izgara genişliklerinin optik mikroskop görüntüsü, a) Izgara iletim hatları genişliği ve iletim hatları arası uzaklık ölçümü, b) iletim hatları arası uzaklık ölçümü, c) ızgara iletim hattı genişlik ölçümü, d) lehimleme pedi bağlantı geçişi genişlik ölçümü .....	24
Şekil 6.3. Ölçüm düzeneği.....	25

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.1. Aerosol jet baskı sisteminin görüntüsü.....	16
Resim 5.1. Aerosol Jet baskı sisteminde gerinim sensörü üretimi .....	20

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

$\Omega$	Ohm Elektriksel Direnç Birimi
$\Omega/\text{kare}$	Ohm/kare Elektriksel Direnç Birimi
mm	Milimetre
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece Sıcaklık Birimi
sccm	Bir dakikada standar bir santimetreküp akış birimi
mL	Mililitre Hacim Birimi

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

Ag	Gümüş
AJP	Aerosol Jet Printing
PA	Poliamid
SG	Strain Gauge

## 1. GİRİŞ

Basınç ve gerinim sensörleri, işlevselliklerini kaybetmeden bükülebilme, esneyebilme veya farklı şekillere uyum sağlayabilme özelliğine sahiptir. Fiziksel, kimyasal veya çevresel değişiklikleri algılayabilen bir sensör kategorisinde bulunmaktadır. Bu sensörler, daha geniş esneyebilir veya giyilebilir sensörler kategorisinin bir alt kümesidir ve çok yönlülükleri, hafif yapıları ve karmaşık, kavisli veya dinamik yüzeylerle etkileşime girebilme yetenekleri sayesinde çeşitli alanlarda kullanılması üzerine yapılan çalışmalar artmıştır [1-4].

Esnek sensörlerin temel özelliği, insan derisi, giysi veya kavisli elektronikler gibi sert olmayan nesnelere veya yüzeylere entegre edilebilme yetenekleridir. Bu nedenle, sağlık hizmetleri, giyilebilir cihazlar, robotik, çevresel izleme gibi endüstrilerde çok sayıda uygulamaları vardır [5-8].

Esnek sensörler, ölçtükleri fiziksel özellik türüne göre sınıflandırılabilir. Basınç ve gerinim sensörleri kullanım alanları şu şekildedir;

1. Gerinim Sensörleri: Giyilebilir sağlık monitörleri, insan hareketi takibi veya yapısal sağlık izleme gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılan deformasyon veya gerilmedeki değişiklikleri ölçer.
2. Basınç Sensörleri: Sensör yüzeyine uygulanan basınç veya kuvvetteki değişiklikleri algılar. Bunlar genellikle dokunmaya duyarlı ekranlarda, giyilebilir sağlık izlemede (örneğin, duruş düzeltme için vücut basıncındaki değişiklikleri algılama) ve robotikte kullanılır [9].

Bu çalışmada alışlageldik günümüz teknolojisinde kullanılmakta olan yarıiletken üretim teknikleri (fotolitografi, MOCVD, elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi vb.) yerine aerosol jet baskı yöntemi kullanılarak gümüş mürekkep ile esnek altaşlar üzerine gerinim sensörü üretilmesi araştırılmıştır.

Bu tez çalışması, yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, çalışma kapsamı ve içeriği ile ilgili bilgi içermektedir. İkinci bölüm, iletken gümüş mürekkep malzemesinin özellikleri, gerinim sensörünün çalışma ilkesi, kullanılan altaş hakkında teorik bilgiler içermektedir. Üçüncü bölüm, baskı elektroniklerinin üretiminde kullanılan teknikleri içermektedir.

Dördüncü bölüm, gerinim sensörlerin üretiminde kullanılan sistemler hakkında bilgileri içermektedir. Beşinci bölüm üretim aşamalarını içermektedir. Altıncı bölüm, aygıt karakterizasyonunda yapılan çalışmaları ve karakterizasyon sonuçlarını içermektedir. Yedinci bölüm, deneysel sonuçlara göre yapılan genel değerlendirmeyi ve önerileri içermektedir.

## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1. Gerinim Sensörü ve İletken Gümüş Mürekkep Malzemesinin Özellikleri

Gerinim ölçer, bir nesnenin veya malzemenin uygulanan bir kuvvete maruz kaldığında yaşadığı gerinim (deformasyon) miktarını ölçen bir sensördür. Gerinim, genellikle malzemenin orijinal uzunluğuna göre uzunluğundaki değişiklik olarak ölçülür ve gerinim ölçerler bu fiziksel deformasyonu ölçmenin bir yolunu sağlar. Gerinim ölçerler, stresi, gerinimi veya mekanik deformasyonu ölçmenin önemli olduğu mühendislik, malzeme bilimi ve yapısal sağlık izlemede yaygın olarak kullanılır [10]. Gerinim ölçerin temel çalışma prensibi, gerinim ile ölçerin elektrik direncindeki değişiklik arasındaki ilişkiye dayanır.

**Elektriksel Direnç ve Gerinim:** Bir gerinim ölçer bir yüzeye takıldığında ve yüzey deformasyona uğradığında (gerilme veya sıkışma), gerinim ölçerin kendisi de deforme olur. Deformasyon, gerinim ölçerin fiziksel boyutlarını değiştirir ve genellikle uzunluğunun değişmesine neden olur. Uzunluk değiştiğinde ölçerin elektrik direnci de değişir. Bunun nedeni, bir iletkenin direncinin uzunluğu, kesit alanı ve öz dirençten etkilenmesinden kaynaklanır.

**Ölçüm Faktörü:** Dirençteki değişim ( $\Delta R$ ) ile uygulanan gerinim ( $\epsilon$ ) arasındaki ilişki, ölçü faktörü (GF) ile tanımlanır. Ölçü faktörü, gerinim ölçerin malzemesine bağlı olarak değişen bir sabittir ve genellikle şu şekilde tanımlanır:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.1)$$

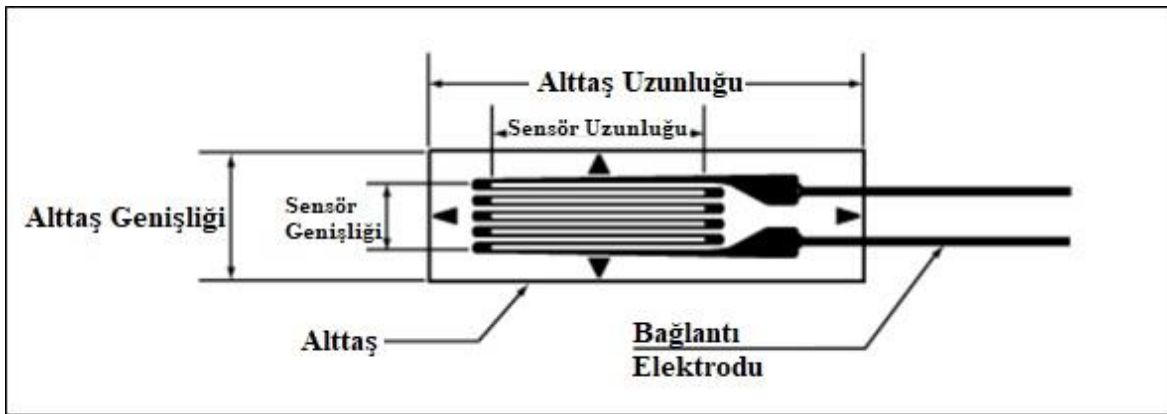
Burada  $\Delta R$  dirençteki değişimdir,  $R$  gerinim ölçerin orijinal direncidir,  $\epsilon$  gerinimdir (uzunluktaki değişimin orijinal uzunluğa bölümü). Ölçümler, gerinim nedeniyle dirençteki değişim ( $\Delta R$ ), dirençteki küçük değişimlerin hassas bir şekilde ölçülmesini sağlayan bir Wheatstone köprü devresi kullanılarak tespit edilebilir.

Wheatstone köprüsü, sıcaklık değişimlerini telafi eder ve dirençteki küçük değişimlerin doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlar [11-14]. Gerinim ölçer türleri arasında metalik gerinim ölçerler en yaygın gerinim ölçer türüdür ve ölçülen malzemenin yüzeyine yapıştırılmış ince bir metal folyo modeli veya telden oluşur. Metalin direncinin gerinim ile

değişme ilkesine dayanarak çalışır. Kullanılan malzemeler genellikle konstantan (%55 bakır ve %45 nikel alaşımı) veya kararlı öz dirençli diğer alaşımlar gibi malzemelerden yapılır. Bu çalışmada bakır nikel alaşımlar yerine yüksek iletkenlik seviyesinde olan gümüş iletken mürekkep kullanılarak sensör üretimi gerçekleştirilmiştir [15].

Folyo gerinim ölçerler, ince bir metalik folyonun bir ızgara desenine baskı yapıldığı bir tür metalik gerinim ölçerdir. Izgara, test edilen malzemenin yüzeyine yapıştırılır.

Folyo ölçerler genellikle hassas ölçümlerde kullanılır ve yüksek doğruluk gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Gerinim ölçerler, köprüler, binalar, barajlar ve diğer büyük yapılardaki gerinimi ölçmek için inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılır. Gerinimin izlenmesi, olası arızaları gösterebilecek yapısal zayıflıkları veya deformasyonları tespit etmeye yardımcı olur [16-19]. Gerinim ölçerler, genellikle kuvveti veya ağırlığı ölçen cihazlar olan yük hücrelerinde kullanılır. Yük hücreleri, yük altında bir malzemenin deformasyonunu ölçerek çalışır ve malzemeye bağlı gerinim ölçerler gerinimin ölçümünü sağlar. Çekme mukavemeti, elastikiyet ve yorulma direnci gibi mekanik özelliklerini belirlemek için malzemelerin laboratuvar testlerinde kullanılır. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kanatlar, gövdeler veya motor parçaları gibi malzemeler ve bileşenler üzerindeki gerinimleri ve zorlanmaları test etmek için kullanılır. Bu, yapıların güvenliğini, dayanıklılığını ve performansını sağlamaya yardımcı olur [20].



Şekil 2.1. Gerinim sensörü tasarımı

## 2.2. Gümüş (Ag) İletken Mürekkep

Aerosol Mürekkep (Su bazlı gümüş dispersiyon) olan Metalon® JS-A221AE; kağıt, PET, cam ve poliamid (Kapton) gibi alt tabakalar üzerinde iletken izler üretmek üzere tasarlanmış elektriksel olarak iletken bir gümüş nanopartikül mürekkebidir. Bu mürekkep 35nm boyutta gümüş parçacıklar su bazlı bir solüsyon ile karıştırılarak kütlece 50% gümüş içeriğe sahip ve alevlenmez özelliktedir. JS-A221AE mürekkebi, ultrasonik atomizasyon kullanılarak aerosol baskı için özel olarak formüle edilmiştir ve cam, kapton gibi altaşlara daha iyi yapışma (adezyon) için polimerik bir katkı maddesi içerir [21-23]. Mürekkebin uygulamaları arasında yüksek yoğunluklu ara bağlantılar ve ince çizgi iletken baskıları bulunur.

Çizelge 2.1. Kürleme prosesi sonrası iletkenlik

Kürleme Sıcaklığı(°C)	Kürleme Süresi(dk)	Direnç ( $\Omega$ -cm)
120	60	4.2 E-4
150	60	3.0 E-5
200	60	9.1 E-6

Bu çalışmada 200 °C’de 60dk termal sinterleme yapılarak ortalama 70 $\Omega$  elektriksel direnç gösteren gerinim sensörleri elde edilmiştir.

## 2.3. Poliamid (PA) DuPont Kapton

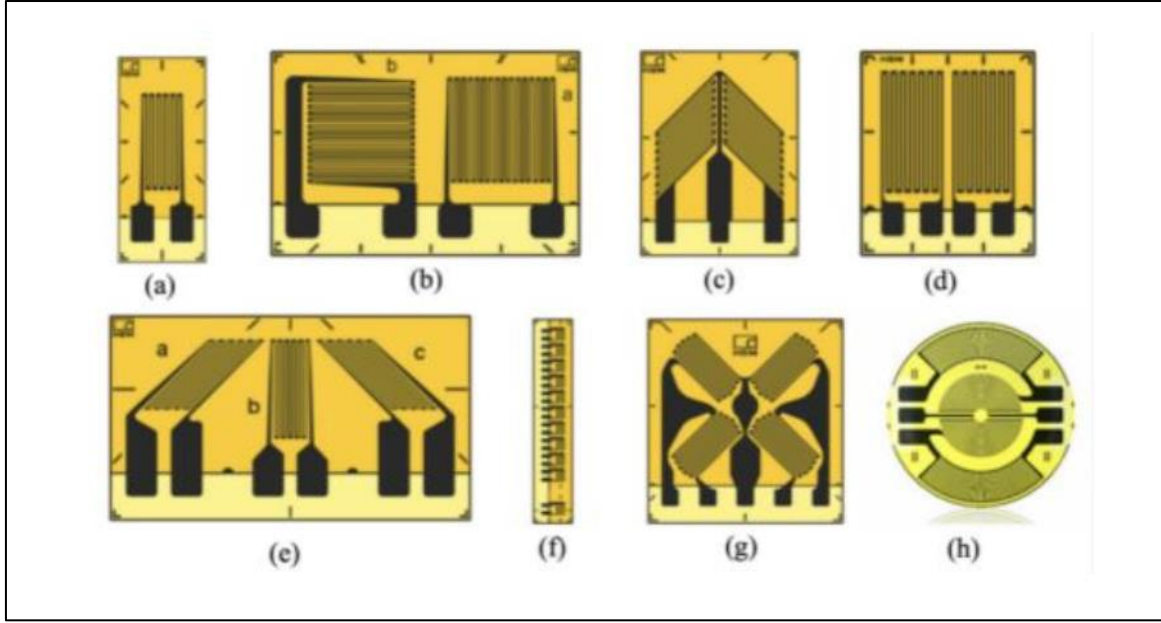
Kapton, DuPont tarafından üretilen bir poliamid film türünün marka adıdır ve mükemmel termal kararlılığı, elektriksel yalıtım özellikleri ve mekanik dayanıklılığıyla yaygın olarak bilinir. Geniş bir sıcaklık aralığında faydalı özelliklerini koruyan yüksek performanslı bir polimer malzemedir ve bu özellik onu çeşitli endüstrilerdeki zorlu uygulamalar için uygun hale getirir [24]. Bu çalışmada 50 $\mu$ m kalınlığındaki kapton altaş 80mm x80mm boyutlarda olacak şekilde kesilerek sensör üretiminde kullanılmıştır.

## 2.4. Gerinim Sensörü Geometrileri

Gerinim ölçerin hassasiyeti, sensörün şekline, malzemesine ve genel boyutuna bağlıdır. Gerinimin çeşitli yönlerde aktarıldığı farklı uygulamalar, bu gereksinimleri karşılayabilen SG (strain gauge) gerektirir. Kesme gerinimini ölçmek için kullanılan gerinim sensörleri, doğrusal gerinimi ölçen sensörlere kıyasla farklı şekilde şekillendirilir. Gerinimin folyo

ızgaraları yönünde ölçülmesi gerektiğinden, SG'ler kullanıma ve gerinim yönüne bağlı olarak farklı şekilde şekillendirilir.

Şekil 2.2 'de farklı SG geometrileri görülebilir. En basit tip, a) 'da görülen doğrusal gerinim ölçerdir. Bu yapı yalnızca bir eksendeki gerinimi ölçebilir ve yalnızca bükme veya çekme uygulamaları için kullanılabilir [9].



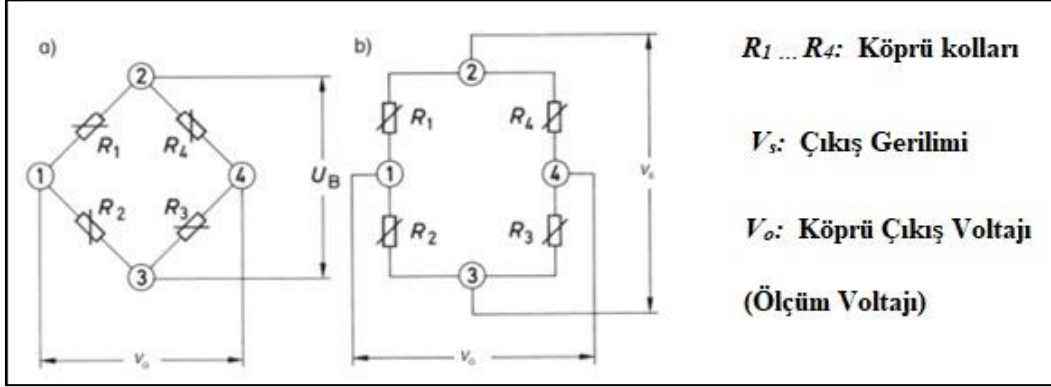
Şekil 2.2. Farklı SG geometrileri tasarımlarına örnekler [1]

## 2.5. Wheatstone Köprüsü

Bir gerinim ölçerin çıktısı, Wheatstone köprüsü adı verilen bir devre kullanılarak ölçülebilir.

Wheatstone köprüsü, bir veya daha fazla direncin değişken olduğu birçok uygulamada kullanılan bir devredir. Çelik gibi metalik malzemeler, SG 'nin direncindeki değişiklikten doğrudan ölçülemeyecek kadar küçük bir gerinim gösterebilir. Bu değişikliği ölçmek için, her SG için dirençteki değişikliği doğrudan ölçmek yerine, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi iki farklı gerinim ölçer seti arasındaki voltajdaki değişikliği ölçmek için bir Wheatstone köprüsü kullanılır. Gerinim ölçerler veya dirençler, herhangi bir değişikliği ayırt edebilmek için çiftler halinde bağlanır ve ölçülür. Şekil 2.3 'te görülebileceği gibi, devre 2 ve 3 numaralı düğümler arasında güç alır. 1 ve 4 numaralı düğümlerden, gerinim ölçerin

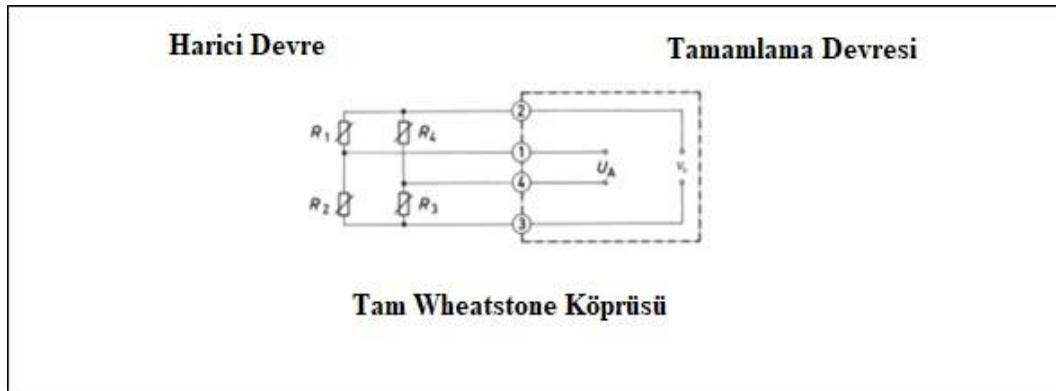
deformasyonundan kaynaklanan voltajdaki değişiklik, gerinim ölçerin direncindeki değişiklik nedeniyle ölçülebilir.



Şekil 2.3. Wheatstone köprüsü

### 2.5.1. Tam köprü

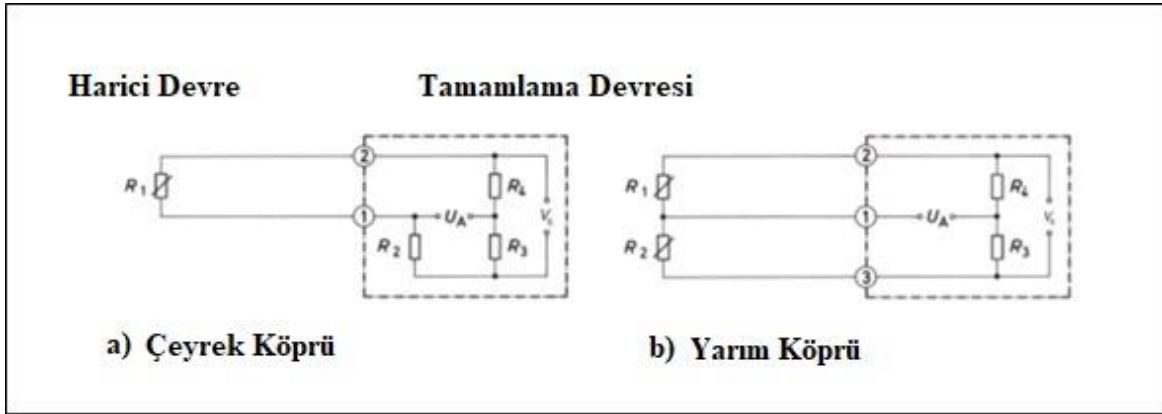
Şekil 2.4 'te görülebileceği gibi devrede birlikte eşleştirilmiş dört gerinim ölçerden veya diğer değişken bileşenlerden oluşur. Duraęan haldeyken devre dengelenmelidir. Bu, akımdan gelen voltaj çıkışının sıfır olması gerektiği anlamına gelir. Gerinim ölçerler gerinimdeki bir değişikliğe maruz kalırsa, SG çiftlerinden gelen direnç değişecektir ve böylece çıkışta sıfırdan farklı bir değer verecektir. Tam köprü çoğunlukla gerinimin birden fazla yönde ölçüldüğü veya sıcaklık telafisinin gerektiği uygulamalarda kullanılır. Sıcaklık telafisi kullanıldığında gerinim ölçerlerden biri gerinim aralığının dışına yerleştirilir. Bu nedenle, SG 'nin değişimi yalnızca sıcaklığın neden olduğu değişime bağlı olacaktır. Bu sıcaklık değişimi daha sonra gerinimi ölçen gerinim ölçerlerin geri kalanı için buna göre ayarlanabilir.



Şekil 2.4. Tam Wheatstone köprüsü

### 2.5.2. Yarım köprü ve çeyrek köprü

Çeyrek köprü, bir SG 'ye sahip ve köprüdeki diğer bileşenlerin dirençlerden oluştuğu bir devredir. Bu köprü türü yalnızca doğrusal gerilmeler ve esas olarak doğrusal gerilmenin uygulandığı uygulamalar için kullanılabilir, örneğin bükme veya çekme testinde. Bu tür SG, diğer gerilmelerin uygulandığı uygulamalarda kullanılırsa, yalnızca şebeke yönündeki gerilme ölçülürken, diğer gerilmeler ölçümde hata olarak görülebilir. Yarım köprü, Şekil 2.5b 'de görüldüğü gibi iki SG ve iki dirençten oluşan bir köprüdür. Ek SG, enine gerilmelerden kaynaklanan hataları gidermek veya sıcaklığı telafi eden bir SG olarak kullanılabilir. Sıcaklık telafisi uygulamak için ek SG, gerilmenin uygulanmadığı ve dolayısıyla yalnızca dönüştürücü gövdesinin sıcaklık değişimine bağlı olarak değiştiği bir yere yerleştirilebilir. Şekil 2.5, yarım ve çeyrek köprü modellerini göstermektedir [25].



Şekil 2.5. Wheatstone Köprüsü; a) çeyrek köprü, b) yarım köprü

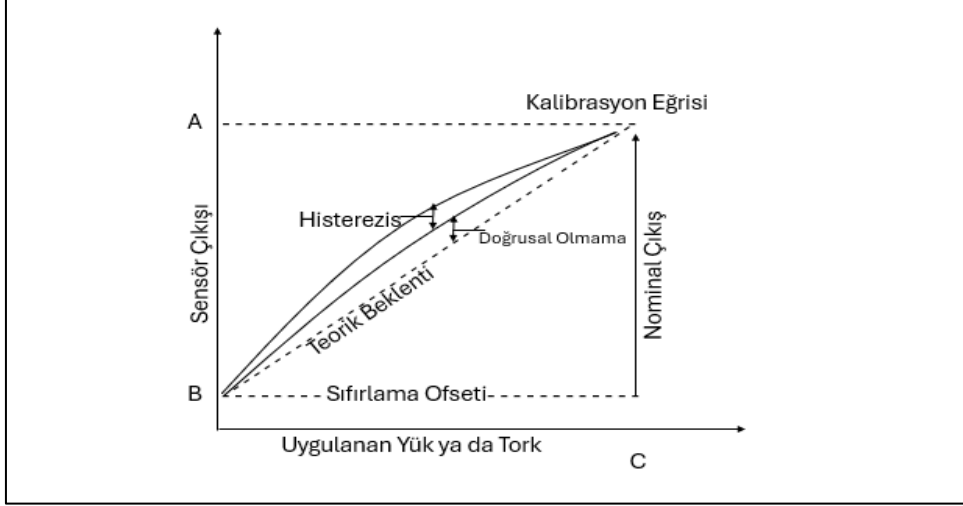
### 2.6. Hatalar

Gerinim ölçer, örneğin yanlış hizalanmışsa, değişen sıcaklıklarda veya nemde kullanılırsa veya tamamen mükemmel üretilmemişse yanlış çıktı verebilen hassas bir cihazdır. Bu faktörler gerinim ölçümünde ve devrenin nihai çıktısında hatalara neden olabilir.

#### 2.6.1. Çıktı hataları

Gerinim ölçerden çıktı ölçülürken, gerinim ölçerin teorik değerlere karşılık gelen mükemmel bir değer vermesi nadiren görülür. Mükemmel bir SG, çıkış ile uygulanan gerinim arasında

Şekil 2.6 'da görülebilen doğrusal bir ilişkiye sahip olmalıdır. Çıkış, SG 'nin kullanıldığı uygulamaya bağlı olarak ölçülebilir ve dönüştürülebilir [1].



Şekil 2.6. Çıktı hatalarının hesaplanması

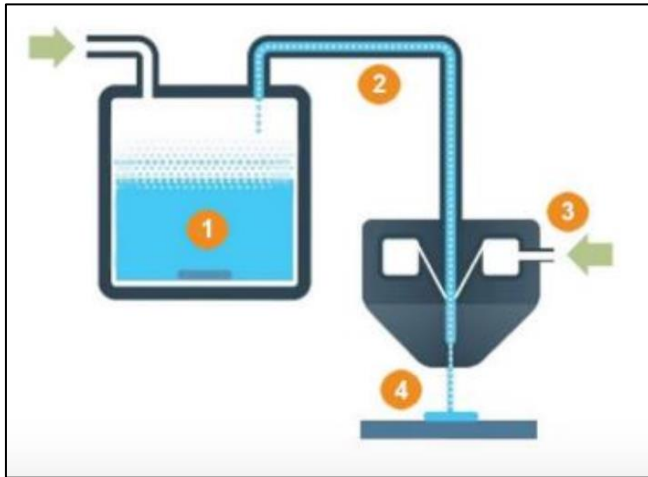


### 3. BASKI ELEKTRONİKLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Elektronik bileşenlerin üretimi uzun zamandır farklı devreleri izlemek için kesilen bakırla kaplanmış silika plakalar kullanılmaktan oluşmakta idi. Ancak bu yöntem uzun zaman almaktadır. Bir kesim yeterince iyi değilse tüm devre yanlış değerler gösterebilir veya en kötü durumda hasar görebilir. Bu nedenle elektronik için daha yeni üretim yöntemleri olan gravür baskı, ofset baskı, fleksografi baskı, serigrafik baskı, IJP veya AJP gibi baskı yöntemleri kullanılmaktadır.

#### 3.1. Aerosol Jet Baskı Yöntemi

Aerosol Jet Baskı, bir bileşeni oluşturmak için mürekkebi katmanlar halinde biriktirmek amacıyla aerosol kullanan temassız bir katkı maddesi üretim tekniğidir. Baskı işlemi, yazıcının izlemesi gereken bilgi olarak bir Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) dosyasının kullanıldığı diğer baskı işlemlerine benzer şekilde çalışır. Yapı, daha sonra bileşeni yazdırırken bu deseni izleyen makinede vektör yollarına çevrilir [8]. Baskı işlemi, mürekkebin bir sis haline getirilmesiyle başlar. AJP 'de kullanılan mürekkep, esas olarak ana malzemenin toz parçacıklarını, çözücülerini ve diğer katkı maddelerini içerir. Çözücü, parçacıkların askıya alınması için bir çözelti görevi görür ve katkı maddeleri mürekkepte kümeleşmeyi ve tortulaşmayı önler. Mürekkebin AJP sisteminde kullanılabilmesi için mürekkepteki parçacıkların 1 µm'den küçük olması gerekir. Bunun nedeni, daha büyük ve daha ağır parçacıkların atomize edilemeyeceği aerosol yapma işlemidir.

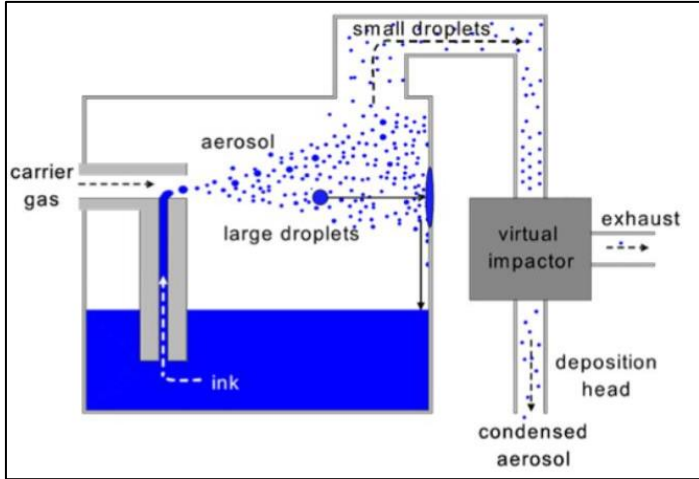


Şekil 3.1. AJP tekniğiyle Ag hazırlama

Aerosolün yoğunluğunu kontrol etmek için, atomizer gaz akışı ve atomizer sıcaklığıyla ilgili parametreler değiştirilebilir. Bu, basılı yüzeyin maksimum kapsamını elde etmek için optimize edilmesi açısından önemlidir. Mürekkep yoğunluğu, mürekkep viskozitesi, kılıf gazı hızı, nozul çapı ve ara yüksekliği gibi diğer parametreler de baskının çözünürlüğünü etkiler [19]. AJP için kaydedilen en iyi çözünürlük tek bir satır için 10 µm'dir. Bu işlem yalnızca 30 µm'ye kadar yapıları basabilen örneğin serigrafi baskıdan ve 20-50 µm sınırı olan IJP 'den önemli ölçüde daha küçüktür.

### **3.2. Pnömotik Atomizasyon Yöntemi**

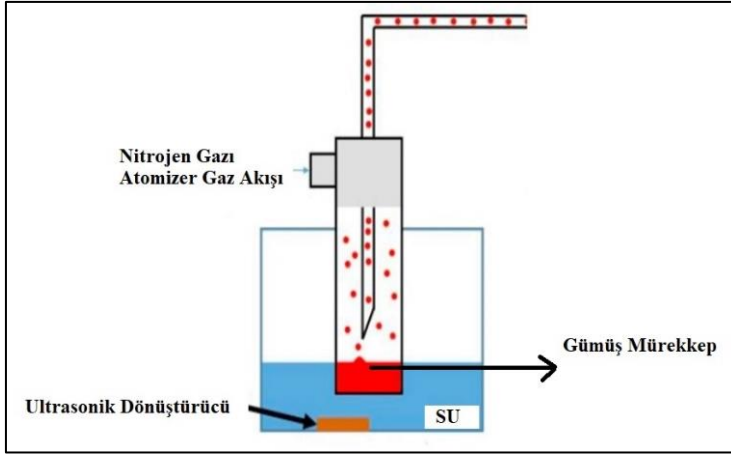
AJP için kullanılan atomizasyon işlemlerinden biri pnömatik atomizasyondur. Bu teknik, mürekkebi daha küçük damlacıklara ayırmak için ortam olarak atomizer gaz akışı olarak da adlandırılan bir taşıyıcı gaz kullanır. Taşıyıcı gaz, mürekkebe doğru püskürtülür ve böylece akıştan daha küçük damlacıklar parçalanır. Daha ağır damlacıklar yerçekimi nedeniyle mürekkep haznesine geri taşınırken, küçük damlacıklar taşıyıcı gaz tarafından şekil 3.2 'de görüldüğü gibi yazıcı nozulüne taşınır. Bu teknik, genellikle 1- 1000 cP arasında olan daha geniş bir viskozite aralığına sahip mürekkepleri işleyebilir. Baskıların kalitesi, parçacıkların akışıyla ilgili işlem parametrelerine ve alt tabakanın sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır. Atomizer gaz akışı, mürekkep haznesinden nozüle ne kadar taşındığıyla ilgilidir. Daha yüksek atomizer gaz akışı, daha fazla mürekkebin taşınmasına neden olur ve böylece baskıların yoğunluğu artar. Kılıf gazı akış hızı ayrıca yoğunlukla da ilgilidir; burada daha yüksek kılıf gazı akışı daha düşük yoğunluğa ve daha ince çizgilere yol açar [26-28]. Sıcaklık ayrıca mürekkebin alt tabakaya yayılması konusunda büyük bir etkiye sahiptir. Daha yüksek sıcaklık genellikle mürekkebin yüzeyde yayılması için daha az zamana sahip olması nedeniyle daha doğru sonuçlar getirir [1,13].



Şekil 3.2. Pnömotik atomizasyon [13]

### 3.3. Ultrasonik Atomizasyon

Ultrasonik atomizasyon, yüksek frekansta salınan bir dönüştürücünün yardımıyla aerosol oluşturur. Atomizasyon odasının konfigürasyonu şekil 3.2 'de görülmektedir. Mürekkepleri içeren bir şişe, dönüştürücüyü de içeren bir su banyosuna daldırılır. Dönüştürücü salındığında, su basınç dalgalarının mürekkep şişesine yayılmasına yardımcı olur. Mürekkep titreşmeye başladığında, yüzeydeki mikro damlacıklar yerel kayma nedeniyle yüzeyden kopar. Sonra damlacıklar taşıyıcı gaz tarafından taşınır ve nozüle taşınır. Bu teknik için viskozite aralığı, pnömotik atomizasyona kıyasla çok daha küçüktür. Kullanılabilen viskozite aralığı 1-10 cP arasındadır ve bir kerede kullanılabilen sıvı miktarı, kabın boyutu nedeniyle yaklaşık 2 ml ile sınırlıdır [29-30]. Viskozite aralığı, damlacıkların yüzeyden ayrılması için gereken enerji nedeniyle pnömotik atomizasyona kıyasla çok daha küçüktür. Viskozite arttıkça yüzey gerilimi de artar ve bu da mürekkepleri yüksek akışlı viskozitelerle sınırlar [21].



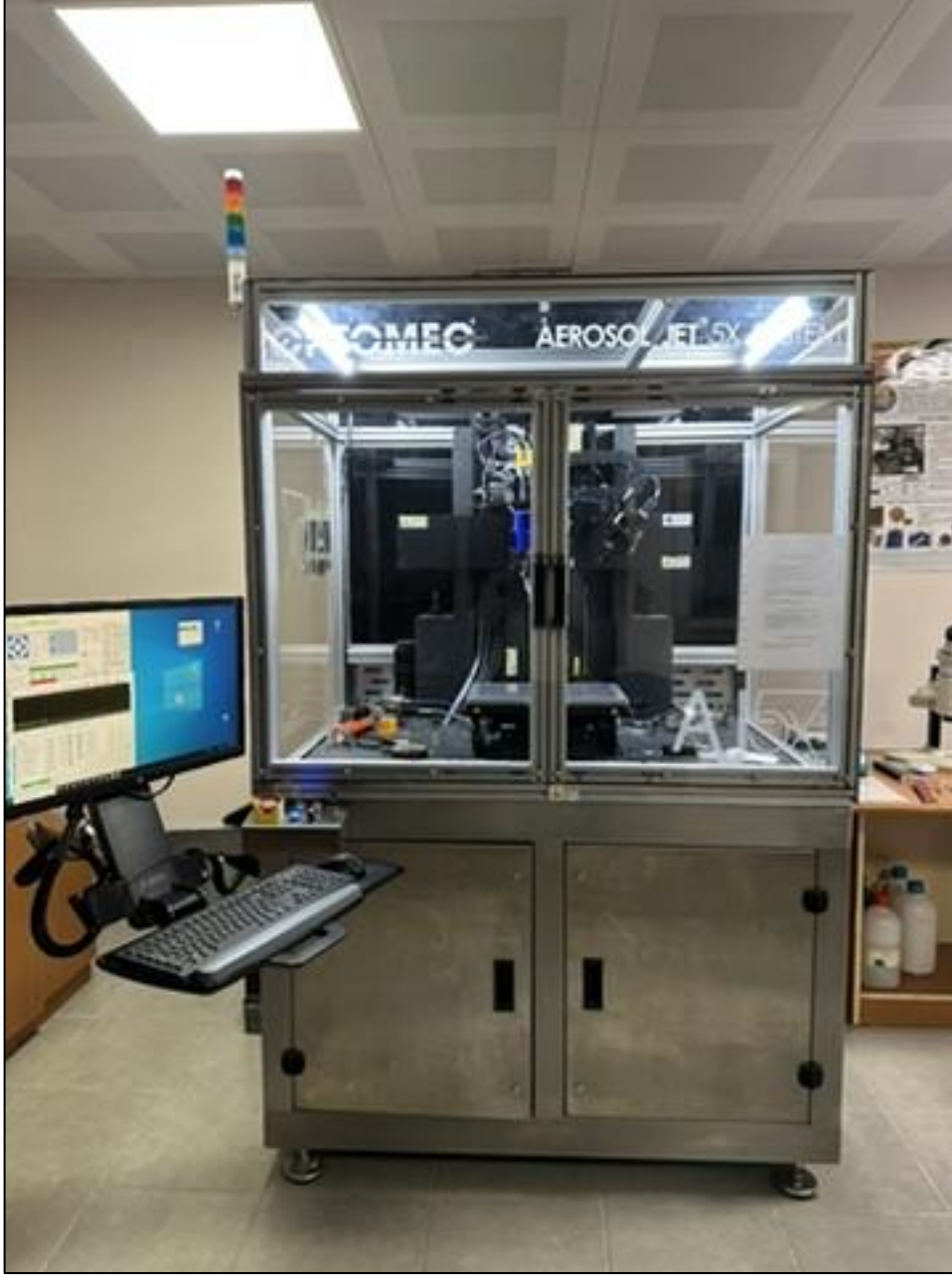
Şekil 3.3. Ultrasonik atomizasyon [21]

## **4. SENSÖR ÜRETİMİNDE VE ÖLÇÜMÜNDE KULLANILAN SİSTEMLER**

### **4.1. Aerosol Jet Baskı**

Aerosol Jet Baskı (AJP), işlevsel malzemelerin çeşitli alt tabakalara yüksek çözünürlük ve hassasiyetle biriktirilmesini sağlayan bir tür katkı maddesi imalatı (veya 3D baskı) teknolojisidir. Özellikle iletken malzemelerin, elektroniklerin ve biyomalzemelerin karmaşık desenlerini basmak için uygundur ve bu yetenek onu elektronik üretimi, tıbbi cihazlar, fotonik ve sensörler gibi alanlarda değerli bir araç haline getirir.

Aerosol jet baskı, maskesiz, temassız bir baskı tekniğidir, yani baskı nozülü ile alt tabaka arasında fiziksel temas gerekmez ve bu da hassas veya düzensiz şekilli yüzeylere baskı yapılmasına olanak tanır. İşlem, desenler oluşturmak için yüzeye yönlendirilen ince bir sıvı malzeme aerosol sisi kullanır.

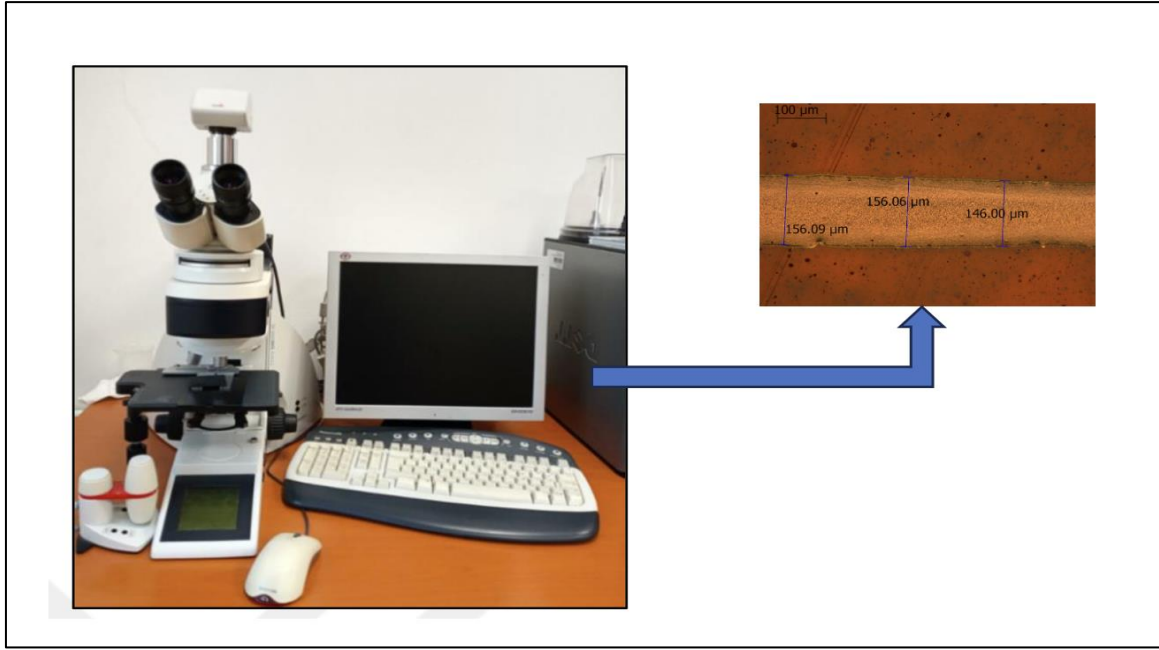


Resim 4.1. Aerosol jet baskı sisteminin görüntüsü

## 4.2. Optik Mikroskop

Optik mikroskop hazırlanan aygıtların görüntülerini yüksek çözünürlüklü bir şekilde analiz edilmesi için kullanılan bir sistemdir. Farklı eksenlerde hareket kabiliyeti sunan ve optik görüntüyü mercek değişimleriyle 200 kat büyütebilme özelliğine sahiptir. Numunelerin incelenmesi ve kayıtlarının alınabilmesi için kontroller bilgisayar kullanılarak yapılmaktadır.

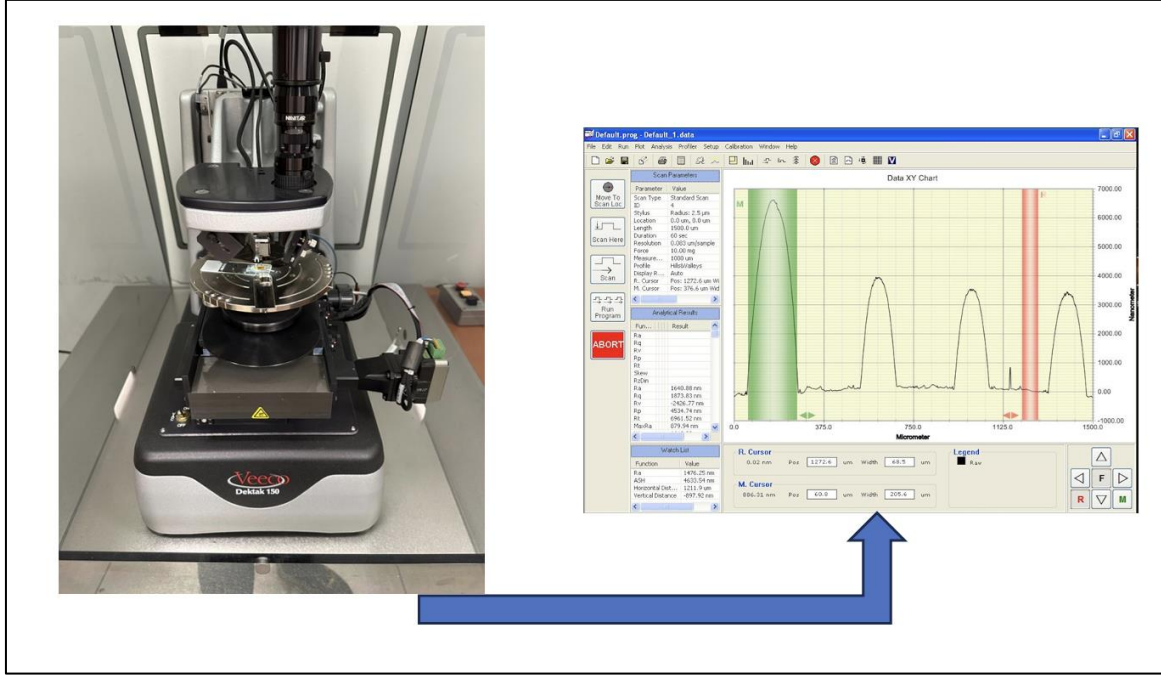
Şekil 4.1'de optik mikroskop ve optik mikroskopta alınan görüntü gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Optik mikroskop ve optik mikroskopta alınan görüntü

### 4.3. Yüzey Profilometresi

Profilometre yardımıyla yapılan yüzey pürüzlülük ölçümü aygıt karakterizasyonu için en yaygın kullanılan metotlardan biridir. Sistem üzerinde bulunan elmas iğne uç yardımıyla malzeme yüzeyi mikrometre hassasiyetinde taranarak yüzeydeki pürüzlülüğü, girinti ve çıkıntıları ölçülür. Şekil 4.2'de yüzey profilometresi ve bu sistem ile ölçüm alınırken elde edilen görüntü verilmektedir.

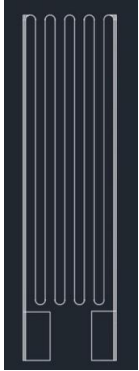


Şekil 4.2. Hizalama paterninin maske tasarım ve optik mikroskop görüntüsü

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

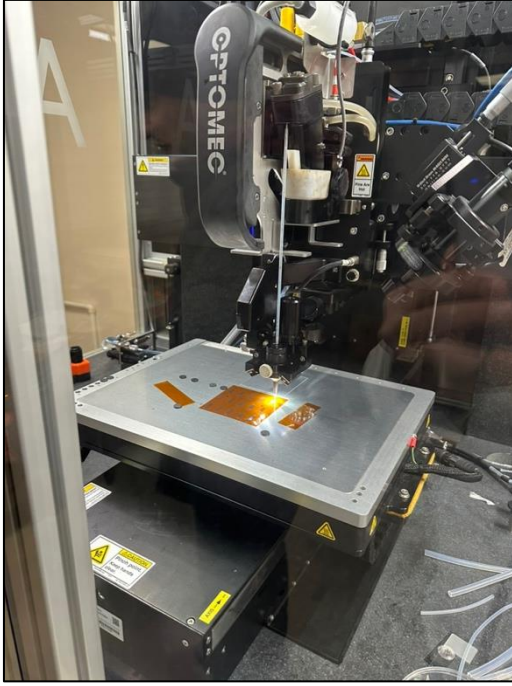
### 5.1. Sensörlerin Üretilmesi

Bu tez çalışmasında gerinim sensörlerinin üretiminde iki temel malzeme kullanılmıştır. Bunlar giriş kısmında detayları anlatıldığı üzere poliamid kapton ve aerosol gümüş iletken mürekkeptir. 80mm x80mm boyutlarında olacak şekilde kapton alttaş kesilerek temizlik adımı için hazırlanmıştır. Kesilmiş kapton isopropil alkol kullanılarak temizlenmiştir. Saf azot kurutma yöntemiyle kurutulduktan sonra üretim için hazır hale getirilmiştir. Gerinim sensör üretimi öncesinde yapılan bu işlem oldukça öncemlidir. Yüzeyde kalabilecek bir kirlilik sensör performansını, adezyonu ya da iletken yüzey verimini olumsuz etkileyebilmektedir. Sensör baskısı iletken yüzey izdüşümü için AutoCad programlayıcı yardımı ile tasarım tamamlanmıştır. Şekil 5.1 'de AutoCad kullanılarak tasarlanan gerinim sensörünün tasarımı verilmiştir.



Şekil 5.2. Gerinim sensör tasarım modeli

AJP 'de baskı şablonu geçişleri arasındaki her adım için 260µm mertebelerinde boşluk bırakılmıştır ve her baskı adımının genişliği 150µm mertebelerinde olacak şekilde sistem parametreleri ayarlanmıştır.



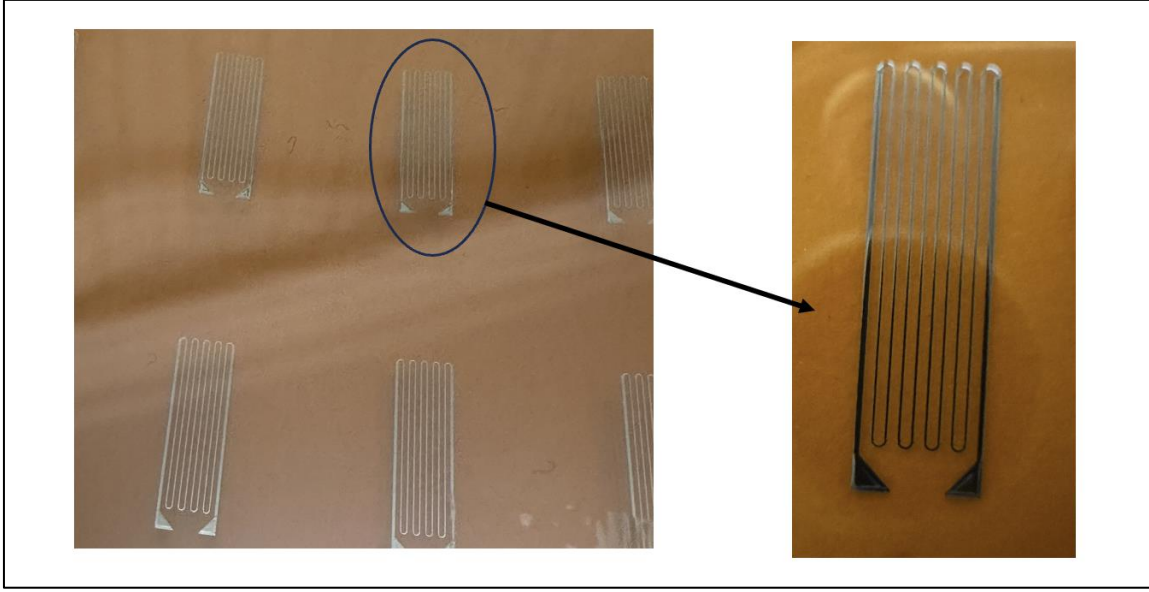
Resim 5.1. Aerosol Jet baskı sisteminde gerinim sensörü üretimi

Aerosol Jet Baskı için 100 $\mu$ m ağızlı baskı ucu ve ultrasonik transduserli atomizer kullanılmıştır. Üretim parametreleri aşağıda verilen Çizelge 5.1 'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.2. Aerosol jet baskı sensör üretim değerleri

Ultrasonik Atomizer	
Nozül Çapı	100 $\mu$ m
Yazma Hızı	2 mm/s
Gaz Akışları (sccm)	
Kılıf	75
İtme	65
Geri Çevirme	65
Sıcaklık ( $^{\circ}$ C)	
Aerosol Oluşum	29
Gaz Verici	30
Tabla Isısı	44

Çizelge 5.1 'de verilen üretim parametreleri kullanılarak aerosol jet baskı sisteminde esnek altaş üzerine gerinim sensörleri oluşturulmuştur. Üretim sonrasında yapılmış olan gerinim sensörünün görüntüsü Şekil 5.2'de verilmiştir.



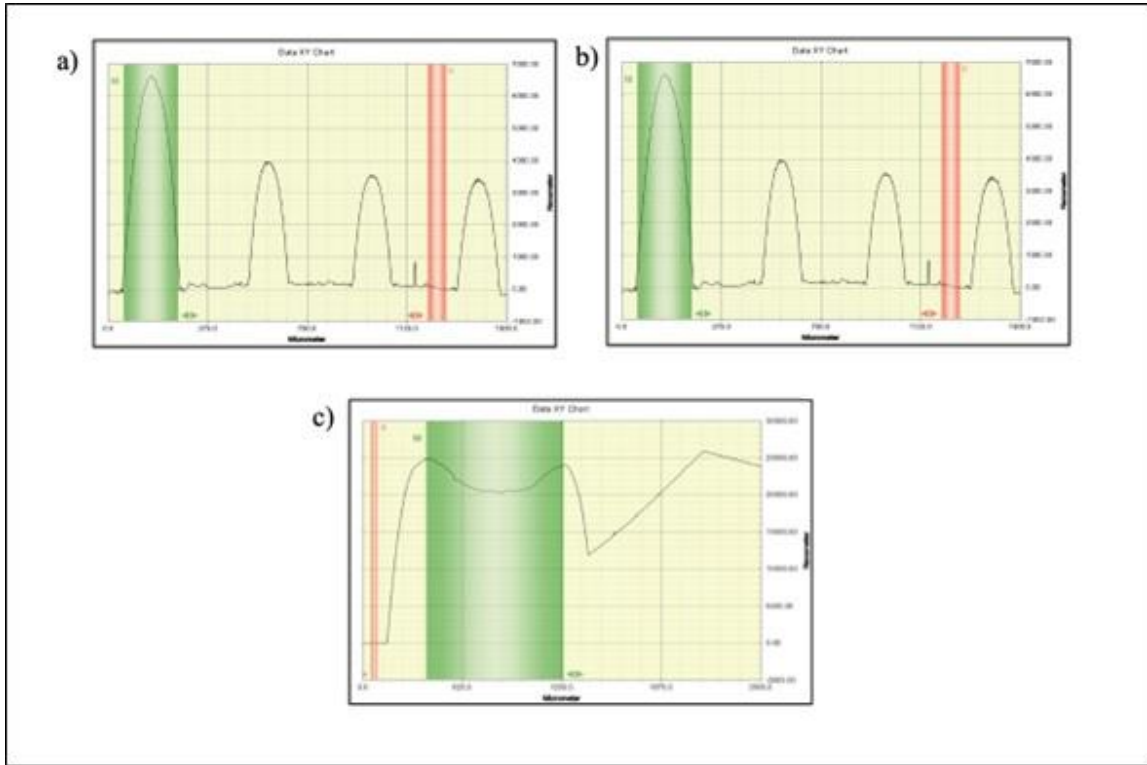
Şekil 5.2. Üretilen Gerinim Sensörü görüntüsü



## 6. SENSÖR KARAKTERİZASYONU VE TARTIŞMA

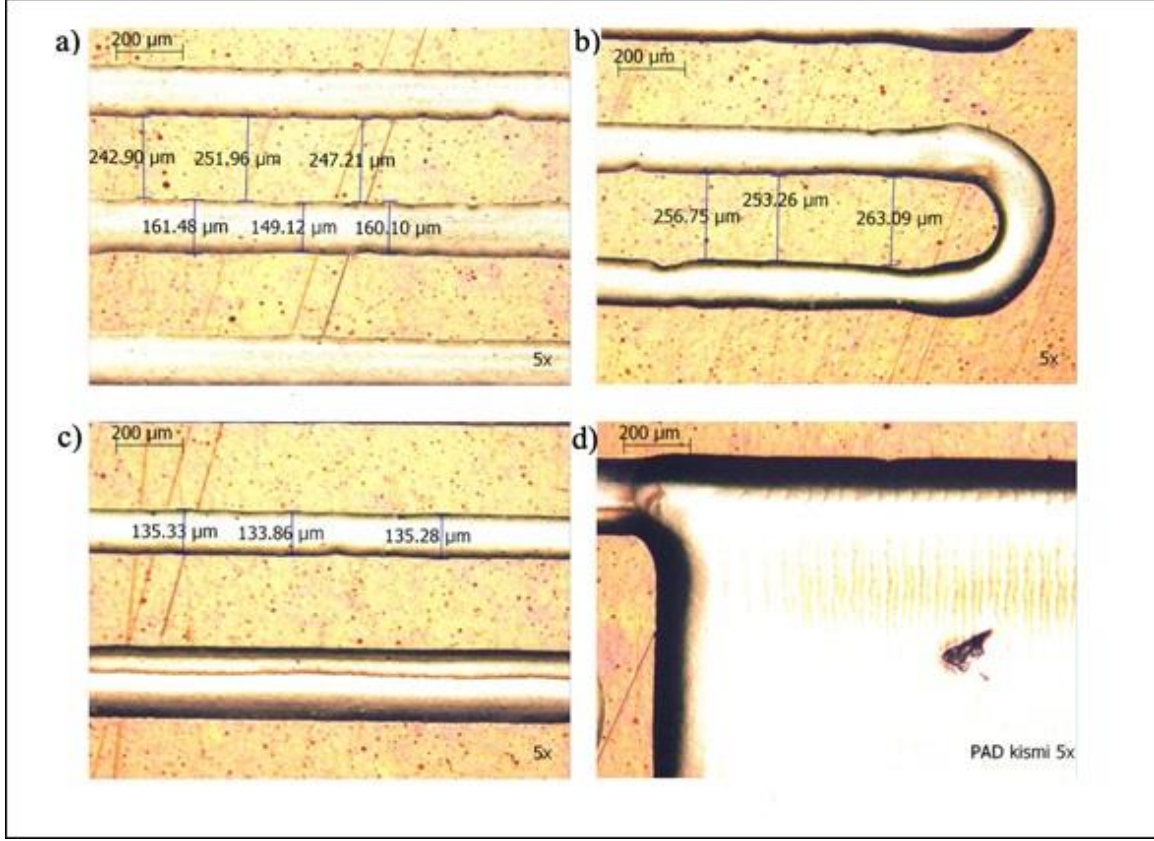
### 6.1. Fiziksel Ölçümler

Kenar elektrodların kalınlığı profilometre ölçümlerinde  $4\mu\text{m}$  iletim modeli ızgara kalınlıkları  $3\mu\text{m}$  ve bağlantı pad kalınlıkları  $25\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir. Izgara kalınlıkları için alınan profilometre ölçümü şekil 6.1 'de ızgara kalınlıkları görülmektedir.



Şekil 6.3. Izgara kalınlıkları a)kenar elektrot,b)iletim ızgaraları c)lehimleme pedi kalınlığı

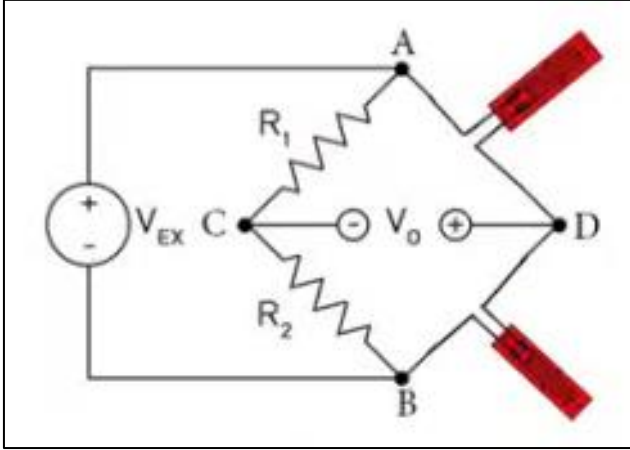
Optik mikroskop ile yapılan ölçümler sonucunda kenar elektrot ile bağlantı pedi yüzeylerinin bağlantı pedi geçişlerinde  $200\mu\text{m}$  civarında genişlikte baskı ve iletim model ızgaralarında ise  $130\mu\text{m}$  ile  $170\mu\text{m}$  arasında genişlikler elde edilmiştir.



Şekil 6.4. Izgara genişliklerinin optik mikroskop görüntüsü, a) ızgara iletim hatları genişliği ve iletim hatları arası uzaklık ölçümü, b) iletim hatları arası uzaklık ölçümü, c) ızgara iletim hattı genişlik ölçümü, d) lehimleme pedi bağlantı geçişi genişlik ölçümü

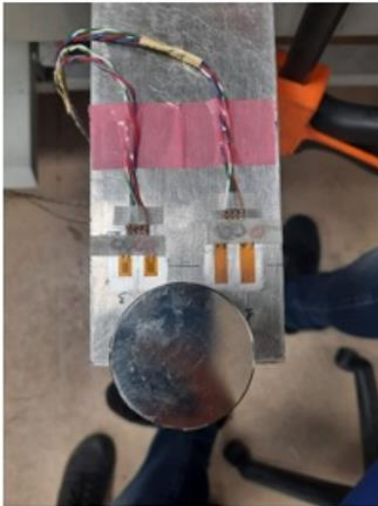
### 6.1. Elektriksel Ölçümler

Bu çalışmada gerinim sensörleri ölçümleri için uzunluğu 300mm, genişliği 72mm ve kalınlığı 2mm olacak şekilde AL6061 hadde plaka hazırlanmıştır. Sensör yapıştırma işlemleri için hadde plaka isopropil alkolle temizlenmiş ve kuru hava ile kurutulmuştur. Yüzeydeki kireç ve oksidi gidermek için zımparalanmış hadde plaka üzerinde sensör konumları işaretlenmiş ve 2 adet referans gerinim sensörü ile 2 adet çalışmada üretilen örneklerden olacak şekilde yapıştırma işlemi tamamlanmıştır. Sensör bağlantı pedleri tam wheatstone köprüsü oluşturacak şekilde lehimlenmiştir. Bağlantı uçları RJ45 konnektör ile kayıt tutma özelliği bulunan gerinim sensör indikatörü kanallarına bağlanmıştır. Hadde plaka mengene ile çalışma masasına sabitlenmiş ve ofset alınmıştır.



Şekil 6.1. Ölçüm düzeneği

Ölçüm düzeneği üzerinde moment oluşturabilmek için 137,5 gram ağırlığındaki 4 adet fiziksel özellikleri aynı olan hadde plaka sabitleme noktasından 150mm uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Sırasıyla 0, 137,5, 275, 412,5 ve 550 gram kütlelerle plaka üzerinde oluşturulan gerinime karşılık sensör tepkileri ağırlık artırılarak ve azaltılarak ölçülmüştür. Benzer şekilde alüminyum hadde ters çevirilerek Resim 6.1’te belirtildiği üzere negatif gerinim altındaki sensör tepkileri de ölçülmüştür. Her bir gerinim sensörünün direnç değeri ölçülerek wheatstone köprüsü oluşturulmuştur. Burada üretilen sensör dirençleri sırasıyla  $20\Omega$ ,  $200\Omega$  ve  $300\Omega$  olarak tespit edilmiştir.



Resim 6.1. Gerinim uygulama

Çizelge 6.3. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

Uygulanan Küttele(gram)	Pozitif Yönde Alınan Ölçümler		Negatif Yönde Alınan Ölçümler	
	Üretilen SG Çıkış (mV/V)	Referans Raf Ürünü SG Çıkış (mV/V)	Üretilen SG Çıkış (mV/V)	Referans Raf Ürünü SG Çıkış (mV/V)
0	0,006	0,002	-0,004	0,003
137,5	0,123	0,121	-0,123	-0,116
275	0,250	0,240	-0,249	-0,239
412,5	0,373	0,366	-0,365	-0,356
550	0,495	0,490	-0,486	-0,476
412,5	0,365	0,363	-0,357	-0,354
275	0,235	0,242	-0,233	-0,232
137,5	0,114	0,122	-0,109	-0,112
0	-0,008	0,002	0,009	0,005

Pozitif yönde ve negatif yönde uygulanan eş kuvvetler sonucunda üretilen gerinim ölçer ile referans raf ürünü alınan gerinim ölçer çıkış değerleri karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Raf ürünü olarak karşılaştırma amaçlı Vishay MicroMeasurements 350Ω lineer sensörleri kullanılmıştır. Bu çalışmada referans raf ürünü gerinim ölçer ile üretilen gerinim ölçerin birbiriyle binde bir seviyesinde aynı çıkışları sağladığı gözlemlenmiştir. En yüksek ölçüm toleransının %1 sapma oranını geçmediği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada farklı bir yöntem kullanılarak üretilen gerinim sensörlerinin mV/V değerinin bir diğer söylem olarak hassasiyetinin  $\pm 0,01$  seviyelerinde olduğu bildirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar sonucu elde edilen ölçümler bu hassasiyet seviyelerini destekler nitelikte çıkmıştır.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Kapton esnek alttaş üzerine gümüş aerosol mürekkep kullanılarak lineer ızgara yapısında gerinim ölçer geliştirilmesi amaçlanmıştır ve elde edilen sonuçların uygunluğu değerlendirilmiştir. Aerosol jet baskı tekniği kullanılarak gerinim ölçerlerin üretim süreçleri tamamlanmıştır. Gerinim sensörünün iletim yüzeylerinin kalınlık ve genişlik ölçümleri incelenmiştir. Bunun yanında sensör ölçüm duyarlılığı referans sensörler ile karşılaştırılarak uygunluğu değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan aerosol gümüş mürekkep (Su bazlı gümüş dispersiyon) olan Metalon® JS-A221AE ile esnek alttaş Kapton Poliamid üzerinde sensör iletim yapıları oluşturulmuştur. Geleneksel fotolitografi ve diğer mikrofabrikasyon tekniklerine istinaden bu yöntem maliyet ve uygulanabilirlik açısından daha kolay olduğu görülmüştür. Termal dayanım, esneklik ve elektriksel özellikler açısından ideal gerinim ölçer üretim yöntemi yaklaşımıdır. Bu yöntemde iletkenlik seviyelerindeki hassasiyeti düzenlemek için farklı sinterleme adımları kullanılarak dayanıklılık ve iletkenlik belirlenmiştir.

Üretilen gerinim sensörleri basılı lineer ızgara yapısı iletim yüzey genişlikleri bilgisayar ortamında yapılan tasarımla aynı boyutlarda olacak şekilde 130µm - 170µm olarak elde edilmiştir. Lineer ızgara yapısındaki iletim yüzeyleri arasında bulunan yalıtkan bölgeler ise 200µm - 250µm olarak basılmıştır. Sinterleme prosesi aygıt karakterizasyonunda öz direnç hassasiyetinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında 20Ω ile 300Ω arasında gerinim sensörleri üretilerek ölçümlerde kullanılmıştır. Elde edilen gerinim sensörlerinin referans alınan sensörlere oranla ±%1 tolerans farkıyla benzer ölçümleri sağladığı ve böylece performansının iyi olduğu gösterilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışması kapsamında incelenen gerinim sensörünün hassasiyet kıyaslamaları belirli kuvvetler altında elektriksel ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Uygun yöntem ve malzeme seçildiğinde, sensör performansının hali hazırda raf ürünü olarak kullanıma sunulan sensörlere benzer özelliklerde olduğu başarıyla gösterilmiştir. Ayrıca havacılıkta test düzenekleri oluşturmak için bu yöntemle üretilen sensörler tercih edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.



## KAYNAKLAR

1. Wennersten, K., Sundberg, K., Akhlaghi, S. (2022) A study of the feasibility of printing strain gauges using inkjet printing. *Additive Manufacturing of Strain Gauges*, (44), 3-59.
2. Kaya, M.D., Ozcelik, S. (2023) Thickness effect on electro-optical characteristics of RF magnetron sputtered MoS<sub>2</sub>/p-Si heterojunction devices fabricated by aerosol jet printing. *Silicon*, 15, 5513–5523.
3. Komurcu, H. A., Ataser, T., Sonmez, N. A., Asar, T. and Ozcelik, S. (2023). Production of hydrogen gas sensors based on sol–gel spin-coated Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(10), 922.
4. Sharma, S. S. K., Sandeep, B. K., Tripathi, C. C. (2018). Alternative transparent conducting electrode materials for flexible optoelectronic devices. *Opto-Electronics Review*, (26), 223-235.
5. Wilkinson, N., Smith, M., Kay, R. and Harris, R. (2019). A review of aerosol jet printing—a non-traditional hybrid process for micro-manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(11), 4599-4619.
6. Tu, L., Yuan, S., Zhang, H., Wang, P., Cui, X., Wang, J. and Zheng, L. R. (2018). Aerosol jet printed silver nanowire transparent electrode for flexible electronic application. *Journal of Applied Physics*, 123(17).
7. Herbert, R., Lim, H. R. and Yeo, W. H. (2020). Printed, soft, nanostructured strain sensors for monitoring of structural health and human physiology. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(22), 25020-25030.
8. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*, (6 ed.), New York, Heidelberg, Drodrecht, London: Springer, 78-92.
9. Zhao, Y., Liu, Y., Li, Y. and Hao, Q. (2020). Development and application of resistance strain force sensors. *Electronic Sensors*, (20), 5826.
10. Patil, P. P., Prachi, S. K., Kulkarni, A. (2021). Inkjet printing of silver nanowires on flexible surfaces and methodologies to improve the conductivity and stability of the printed patterns. *Nanoscale Advances*, (3), 101-128
11. Benfridja, I., Diaham, S., Laffir, F., Brennan, G., Liu, N. and Kennedy, T. (2022). A universal study on the effect thermal imidization has on the physico-chemical, mechanical, thermal and electrical properties of polyimide for integrated electronics applications. *Polymers*, (14), 1713.
12. Rahman, T., Renaud, L., Heo, D., Renn, M. and Panat, R., (2015). Aerosol based direct-write microadditive fabrication method for sub-mm 3D metal-dielectric structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, (25), 1-8.
13. Khan, S., Ali, S., Bermak, A., (2019). Smart manufacturing technologies for printed electronics, in *Flexible Electronics*. New York: IntechOpen, 78-92.

14. Liu, X., Sun, W., He, M., Fang, Y., Djoulde, A., Ding, W. and Wang, Z., (2024). Unidirectionally sensitive flexible resistance strain sensor based on AgNWs/PDMS. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 1-11.
15. Feng, J., Loveland, A., Renn, M. (2021). Aerosol jet direct writing polymer-thick-film resistors for printed electronics. *Journal of Surface Mount Technology*, 34(1), 24-31.
16. Smith, M., Choi, Y., Boughey, C. and Kar-Narayan, S. (2017). Controlling and assessing the quality of aerosol jet printed features for large area and flexible electronics. *Flexible and Printed Electronics*, 2(1), 015004.
17. Dalal, N., Gu, Y., Hines, D., Dasgupta, A. and Das, S. (2019). Cracks in the 3d-printed conductive traces of silver nanoparticle ink. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 29(9), 097001.
18. Vella, S., Smithson, C., Halfyard, K., Shen, E. and Chrétien, M. (2019). Integrated capacitive sensor devices aerosol jet printed on 3d objects. *Flexible and Printed Electronics*, 4(4), 045005.
19. Lu, S., Cardenas, J., Worsley, R., Williams, N., Andrews, J., Casiraghi, C. and Franklin, A. (2019). Flexible, print-in-place 1d–2d thin-film transistors using aerosol jet printing. *ACS Nano*, 13(10), 11263-11272.
20. Mahajan, A., Frisbie, C., Francis, L. (2013). Optimization of aerosol jet printing for high-resolution, high-aspect ratio silver lines. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 5(11), 4856-4864.
21. Agarwala, S., Liang, G. G., Yeong, W. Y. (2017). *Optimizing aerosol jet printing process of silver ink for printed electronics*. In International Conference on Material Engineering and Nano Sciences, Singapore, 38-42.
22. Panreck, B., Hild, M. (2018). Fully printed strain gauges: a comparison of aerosoljet-printing and micropipette-dispensing. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 12(9), 678-684.
23. Zhao, T. Liu, M. Zhang, R. Liang and Wang B.( 2012). Fabrication and characterization of aerosol-jet printed strain sensors for multifunctional composite structures, *Smart Materials And Structures*, (21), 115008-115016.
24. Hirman, M., Navratil, J., Soukup R., Hamacek A. and Steiner, F. (2017). *Influence of flexible substrate roughness with aerosol jet printed pads on the mechanical shear strength of glued joints*, 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Sofia, 1-6.
25. Hoffmann, K. (1989). *An introduction to measurements using strain gages* (No. BOOK). Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 18-22.
26. Lukacs, P., Pietrikova, A., Cabuk, P. (2017). Dependence of electrical resistivity on sintering conditions of silver layers printed by InkJet printing technology. *Circuit World*, 43(2), 80-87.

27. Ratnayake, D., Curry, A., Walsh, K. (2021). *Demonstrating a new ink material for aerosol jet printing conductive traces and custom strain gauge on flexible surfaces*, IEEE International Conference on Flexible and Printed Sensors and Systems, Manchester, 12-18.
28. Zlebic, C., Zivanov, L., Menicanin, A., Blaz, N. and Damnjanovic, M. (2016). Inkjet Printed Resistive Strain Gages On Flexible Substrates, *Electronics and Energetics*, 29(1), 89-100.
29. Zhang, H., Moon, S. K. and Ngo, H. T. (2020). 3D Printed Electronics of Non-contact Ink Writing Techniques: Status and Promise, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(7), 511-524.
30. Stringer, J., Althagathi, T. M., Tse, C. C., Ta, V. D., Shephard, J. D., Esenturk, E., Connaughton, C., Wasley, T. J., Li, J., Kay, R. W. and Smith, P. J. (2016) Integration of additive manufacturing and inkjet printed electronics: a potential route to parts with embedded multifunctionality. *EDP Science*, 3(12), 45-52.





*Gazili olmak ayrıcalıktır*