



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİNİM SENSÖRÜNÜN EKLEMELİ
İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Şeymus GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Haziran-2024
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır



T.C.
MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİNİM SENSÖRÜNÜN EKLEMELİ
İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

Şeymus GÜNEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Osman ÜLKİR
2. Danışman: Doç. Dr. Melih KUNCAN

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Said BAYRAKLILAR
Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÜNDÜZ

Haziran-2024
MUŞ
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL ve ONAYI

Şeymus GÜNEŞ tarafından hazırlanan “Gerinim Sensörünün Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu” adlı tez çalışması 06/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hasan GÜNDÜZ
Muş Alparslan Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Elektronik ve Otomasyon

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR
Muş Alparslan Üniversitesi,
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,
Elektrik ve Enerji

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Said BAYRAKLILAR
Siirt Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Mekanik

.....

Yukarıdaki sonuç;
Enstitü Yönetim Kurulu 10/06/2024 Tarih ve VII nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Selçuk SAĞIR
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Muş Alparslan Üniversitesi-Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından BAP-23-TBMYO-4902-01 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Şeyhmus GÜNEŞ

06/06/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GERİNİM SENSÖRÜNÜN EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Şeyhmus GÜNEŞ

Muş Alparslan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR
2. Danışman: Doç. Dr. Melih KUNCAN

Sanal gerçeklik ve robotikle ilgili teknolojiler ilerledikçe, bu sistemleri güçlendirmek için daha iyi sensör teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle, sistemlerin çoğu, yüksek miktarda hareketliliği ve esnekliği korurken insan vücudu veya çevreyle etkileşime girmelidir. Bu durum, esnek elektronik cihazlara, özellikle de esnek gerinim sensörlerine olan talebi ortaya çıkardı. Bu tez çalışması, esnek tek eksenli gerinim sensörü geliştirmek için basit ve uygun maliyetli bir yöntem olan eklemeli imalat (Eİ) teknolojisinin fizibilitesini araştırmaktadır. Eİ, tasarımların nispeten düşük maliyetle hızlı bir şekilde üretilmesini ve prototipleşmesini sağlar. Gerinim sensörün esnek olan alt katmanını üretmek için Eİ yöntemlerinden biri olan eriyik yığıma modelleme (EYM) teknolojisi kullanılmıştır. Sensörün üst katmanına ise iletken gümüş malzeme enjekte edilmiştir. Gerinim sensörü, yaklaşık 20 mm x 60 mm ölçülerinde üretilmiştir. Sensörün kalınlığı ise 2 mm dir. Bu aşamadan sonra sensörün hassasiyeti deneysel verilerden gösterge faktörü hesaplanarak tespit edilmiştir. Sonuçlar, sensörün yüksek doğrusalılık ve az histerezis performansı sergilediğini göstermiştir. Ayrıca, uygulanan kuvvete karşı gerinim sensörünün yer değiştirme miktarları gözlemlenmiştir. Son olarak, akma durumunda sensörün uzamasını incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Gerçek zamanlı deneylerin doğruluğunu ispatlamak için gerinim sensörün sonlu elemanlar analizi COMSOL programıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, COMSOL yazılımı, gerinim sensörün gerilme dağılımını ve uzama miktarını modellemek için kullanılmıştır. Sensörün deneysel sonuçlarının simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, stres birikiminin ve kalıcı deformasyonun EYM ile üretilen sensörlerin işlevselliğini belirlemede önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu tez çalışmasının sonuçları eklemeli üretimin çok çeşitli uygulamalar için karmaşık tasarımlar ve sensör platformları üretme potansiyelini göstermektedir.

2024, 40 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Esnek gerinim sensörü, eklemeli imalat, eriyik yığıma modelleme, sonlu elemanlar analizi, çekme testi.

ABSTRACT

MS THESIS

MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF STRAIN SENSOR USING ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Şeyhmus GÜNEŞ

**Muş Alparslan University
Natural and Applied Science
Department of Nuclear Energy and Energy Systems**

**Advisor: Assistant Prof. Osman ÜLKİR
Coadvisor: Associate Prof. Melih KUNCAN**

As virtual reality and robotics-related technologies advance, better sensor technology is needed to power these systems. In particular, most systems must interact with the human body or the environment while maintaining a high amount of mobility and flexibility. This has created a demand for flexible electronic devices, especially flexible strain sensors. This thesis study investigates the feasibility of additive manufacturing (AM) technology, which is a simple and cost-effective method to develop a flexible single-axis strain sensor. AM enables rapid production and prototyping of designs at relatively low cost. Fused deposition modeling (FDM) technology, one of the AM methods, was used to produce the flexible substrate of the strain sensor. Conductive silver material is injected into the upper layer of the sensor. The strain sensor is fabricated to approximately 20 mm x 60 mm. The thickness of the sensor is 2 mm. After this stage, the sensitivity of the sensor was determined by calculating the indicator factor from the experimental data. The results showed that the sensor exhibited high linearity and low hysteresis performance. Additionally, the displacement amounts of the strain sensor against the applied force were observed. Finally, tensile tests were performed to examine the elongation of the sensor in yielding. To prove the accuracy of real-time experiments, finite element analysis of the strain sensor was performed with the COMSOL program. COMSOL was also used to model the stress distribution and strain of the strain sensor. It has been found that the experimental results of the sensor are in good agreement with the simulation results. The results show that stress accumulation and permanent deformation play an important role in determining the functionality of FDM-fabricated sensors. The results of this thesis study demonstrate the potential of additive manufacturing to produce complex designs and sensor platforms for a wide variety of applications.

2024, 40 Pages

Keywords: Flexible strain sensor, additive manufacturing, fused deposition modelling, finite element analysis, tensile test.

ÖNSÖZ

Bu çalışma Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı Yüksek Lisans programında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmamın planlanması araştırılması ve meydana gelmesinde desteğini esiremeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok değerli danışman hocalarım sayın Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR ve Doç. Dr. Melih KUNCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında değerli tecrübeleri ile bana destek olan Muş Alparslan Üniversitesi Öğretim Üyeleri Doç. Dr. İshak ERTUĞRUL ve Burak ERGÜNEŞ hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Muş Alparslan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler (BAP) Koordinatörlüğüne (Proje No: BAP-23-TBMYO-4902-01) teşekkür ederim.

Şeyhmus GÜNEŞ
MUŞ-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	3
1.2. Literatür Taraması.....	4
1.2.1. Gerinim Sensörü Tasarımları	6
1.3. Üretim Yöntemlerine Genel Bakış	12
1.3.1. Kalıplama Yöntemiyle Üretim Süreci	13
1.3.2. Kaplama Yöntemiyle Üretim Süreci.....	14
1.3.3. Kontak 3D Baskı Yöntemiyle Üretim Süreci	14
1.3.4. Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretim Süreci	15
1.4. Tez İçeriği	18
2. MATERYAL ve METOT	19
2.1. Yaklaşımımız ve Yöntemlerimiz	19
2.2. Gerinim Sensörün Tasarımı	19
2.3. Gerinim Sensörün Üretimi	22
2.4. Gerinim Sensörün Karakterizasyonuna Yönelik Yaklaşım	25
2.5. Çekme Testi Deneyi.....	26
3. BULGULAR ve TARTIŞMA	27
3.1. Önerilen Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulaması	27
3.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları	30
3.3. Tartışma	33
4. SONUÇLAR	34
4.1. Sonuçlar	34
4.2. Gelecekte Yapılacaklar	35
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	40

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

g	: Gram
kg	: Kilogram
k Ω	: Kiloohm
Ω	: Ohm
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
s	: Saniye
V	: Volt
°	: Derece
μ m	: Mikrometre
μ s	: Mikrosaniye
μ C	: Mikroculomb
mm/s	: Milimetre/saniye
ΔR	: Yaklaşık direnç değişimi
Δl	: Sensörün gerinimi
l_0	: Sensörün orijinal uzunluğu
ϵ	: Uzama
N	: Kuvvet

Kısaltmalar

3D	: 3 Boyut
ABS	: Akrlonitril butadien stiren
Eİ	: Eklemeli İmalat
Ar-Ge	: Araştırma-geliştirme
BAP	: Bireysel araştırma projeleri
CAD	: Bilgisayar destekli grafik-tasarım
DLP	: Dijital ışık işleme
EYM	: Eriyik yığıma modelleme
G-Kod	: Nümerik kontrol amaçlı kullanılan bir programlama dili
GaIn	: Gallium indium
GF	: Gösterge faktörü
LOM	: Namine nesne imalatı
OBJ	: Wavefront 3 boyut nesne dosyası
PBF	: Toz yatağı füzyon
PC	: Bilgisayar
PDMS	: Polidimetilsiloksan
PET	: Polietilen tereftalat
PETG	: Polietilen tereftalat glikol
PJM	: Polyjet modelleme
PLA	: Polilaktik asit
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Seçici lazer sinterleme
STL	: Dosya formatı
TPU	: Termoplastik poliüretan
SEA	: Sonlu elemanlar analizi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1	Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen aktüatör ve sensörler	2
Şekil 1. 2	Eklemeli imalatla üretilmiş dirençli tip gerinim sensörü yapısı.....	7
Şekil 1. 3	Esnek gerinim sensörünün gömülü iletken izlerle üretilmesi	8
Şekil 1. 4	Gerinim sensörlerin CAD modeli ve 3D baskılı örnekleri.....	8
Şekil 1. 5	Köpek kemiği şeklindeki gerinim sensörünün 3 boyutlu modellenmesi	9
Şekil 1. 6	SLA tabanlı 3D yazıcıda üretilen gerinim sensörü	10
Şekil 1. 7	Ultrasonik eklemeli imalat ile üretilen gerinim sensörü	10
Şekil 1. 8	Önerilen gerinim sensörünün 3D modeli ve üretimi	11
Şekil 1. 9	Gerinim sensörünün modeli ve üretilmiş hali	12
Şekil 1. 10	Eriyik yığma modelleme yöntemiyle üretilen gerinim sensörü	12
Şekil 1. 11	Gerinim sensörünün kalıplama tekniğiyle üretim süreci.....	13
Şekil 1. 12	Gerinim sensörünün kaplama tekniğiyle üretim süreci.....	14
Şekil 1. 13	Gerinim sensörünün kontak 3D tekniğiyle üretim süreci.....	15
Şekil 1. 14	Gerinim sensörünün eklemeli imalat tekniğiyle üretim süreci.....	16
Şekil 1. 15	Eklemeli imalat ile üretim süreci.....	16
Şekil 1. 16	Eriyik yığma modelleme çalışma prensibi	17
Şekil 2. 1	Gerinim sensörün tasarım görüntüsü ve boyutlandırılması.....	20
Şekil 2. 2	Gerinim sensörün 3D modeli	21
Şekil 2. 3	Gerinim uygulandığında iletken kanalların çalışma prensibi.....	21
Şekil 2. 4	EYM tabanlı Zaxe Z1 plus 3D yazıcı.....	22
Şekil 2. 5	Üretimi tamamlanan gerinim sensörün görüntüsü	24
Şekil 2. 6	Üretilen gerinim sensörün, sıcak tutkal kullanılarak kablolması	25
Şekil 2. 7	Sensörün karakterizasyonu için geliştirilen deney düzeneği.....	26
Şekil 3. 1	Gerinim sensörün COMSOL yazılımında oluşturulan modeli	28
Şekil 3. 2	Gerinim sensörün yer değiştirmeye karşı kuvvet verileri	29
Şekil 3. 3	Gerinim sensörün uzamaya karşı elektrik direnci değişimi	29
Şekil 3. 4	Gerinim sensörü için elektriksiz direnç ve uzama eğrisi.....	30
Şekil 3. 5	Gerinim sensörü için kuvvet ve yer değiştirme eğrisi	31
Şekil 3. 6	Gerinim sensörü için direnç ve uzama eğrisi	32
Şekil 3. 7	3D baskılı TPU'nun ölçülen gerilme-uzama eğrisi	32

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1 Gerinim sensörünü üretmek için kullanılan yazıcı ayar ve parametreleri 23

Tablo 3. 1 Literatürden seçilen dirençli esnek gerinim sensörlerin karşılaştırılması..... 33



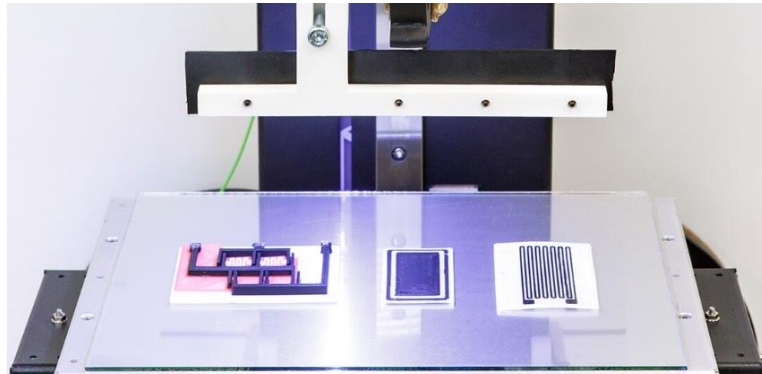
1. GİRİŞ

3B baskı teknolojisi olarak da bilinen eklemeli üretim, bilgisayar ortamında tasarlanmış bir model ve bu modelin yazıcı aracılığıyla fiziksel olarak üretilmesi sürecidir (Bikas ve ark., 2016). Sürekli gelişim halinde olan bu teknoloji günümüzde, tıp, havacılık, inşaat, elektronik, uzay, giyilebilir teknolojiler otomotiv, maden gibi çeşitli sektörlerde ilerlemeler kaydetmiştir (Abdulhameed ve ark., 2019; Salmi, 2021). Bir cihazın çalışma ömrü, maruz kaldığı nem, sıcaklık, aşınma gibi etmenlerden dolayı kısalmaktadır. Bundan dolayı cihaz üzerinde sürekli olarak iyileştirmeler yapılması zorunlu hale gelmektedir. İstenmeyen arızalar ortadan kaldırılabilen ve en aza indirmek için eklemeli imalat (Eİ) ile üretim metodu kullanılabilen ve üretilen cihazların daha verimli maddeler ile üretimi sağlanabilmektedir.

Eİ, özellikle üretim süreçlerinde esneklik sağlayarak avantaj sunan bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde, malzeme tabakaları veya malzeme eklemeleri kullanılarak ürün katmanlar halinde oluşturulur (Li ve ark., 2019). Bu sayede karmaşık geometriye sahip parçaların üretimi kolaylaşır ve tasarım özgünlüğü artar. Ayrıca, malzemenin israfının azalması, üretim maliyetlerinin düşmesine katkıda bulunur. Eklemeli imalatın diğer bir avantajı da prototip üretim sürecini hızlandırmasıdır, çünkü tasarımların hızlı bir şekilde fiziksel örnekleri üretilir. Bu yöntem, özellikle özelleştirilmiş ürünlerin üretiminde ve küçük ölçekli seri üretimde etkili bir çözüm sunar. Geleneksel yöntemler aracılığı ile üretim sonucunda ortaya çıkan cihaz ve aletler dinamik ortamlarda daha az ömürlü, daha yüksek hata paylı ve daha az verimli olabilmektedir. Bu sorunun önüne geçebilmek için gelişim sağlayan Eİ sayesinde daha verimli, yüksek performanslı ve dinamik ortamlarda çalışmaya daha uygun esnek yapılar üretilmektedir (Attaran, 2017; Strong ve ark., 2018).

Eİ (3D yazıcı teknolojisi) ve sensör teknolojisi, birlikte kullanıldığında üretim süreçleri daha akıllı ve verimli hale getirebilir. Sensörler, üretim aşamalarında gerçek zamanlı veri toplamak ve analiz etmek için kullanılabilir, bu da üretim süreçlerini optimize etmede önemli bir rol oynar (Hossain ve ark., 2016). Örneğin, 3D yazıcı üzerindeki sensörler, baskı sırasında malzeme kalitesini ve katman birleşimini izleyerek potansiyel hataları erkenden tespit edebilir. Bu, üretim sürecinin daha güvenilir ve kaliteli olmasına katkı sağlar. Sensörler ayrıca ürünlerin gerçek dünyada nasıl performans gösterdiğini izlemek için kullanılabilir. Üretilen parçaların veya ürünlerin sensörler

aracılığıyla toplanan verileri, kalite kontrolü ve sürekli iyileştirme süreçlerinde kullanılabilir. Bu, üreticilere ürünlerini daha iyi anlama ve optimize etme fırsatı sunar (Rao ve ark., 2015).



Şekil 1. 1 Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilen aktüatör ve sensörler

Eİ ve sensör teknolojisinin entegrasyonu, üretim süreçlerini daha esnek hale getirerek tasarım değişikliklerine hızlı yanıt verme yeteneğini artırabilir (Lehmus ve ark., 2016). Ayrıca, enerji ve malzeme israfını azaltabilir, üretim süreçlerini daha sürdürülebilir hale getirebilir. Bu entegrasyon, endüstri 4.0 ilkelerine uygun bir üretim ortamı oluşturarak daha akıllı ve rekabetçi bir üretim sağlayabilir.

Gerinim sensörü veya gerinim ölçerler de Eİ teknolojisinden biridir (Chen ve ark., 2019). Bu sensörler aracılığı ile mevcut durumda oluşabilecek değişimleri anında tespit edebilir ve buna göre önlemler alabiliriz. Bir cihaz, fiziksel olarak değişim gösterdiğinde, elektrik direnci değişir ve bu değişikliğe göre cihaz üzerinde hangi etkilerin olabileceğini öngörebiliriz. Bu sayede istediğimiz adımları atabiliriz.

Gerinim sensörleri, bir malzemenin üzerine uygulanan kuvvetin neden olduğu deformasyonu ölçen ve bu bilgileri elektriksel sinyallere dönüştüren cihazlardır (Liu ve ark., 2021). Bu sensörler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek, yapısal analizler yapmak ve dayanıklılık testleri gerçekleştirmek amacıyla önemli bir rol oynar. Genellikle telli veya film tipi sensörler olarak tasarlanan gerinim sensörleri, malzemenin gerilme, bükülme, eğilme veya uzama gibi deformasyonlarını hassas bir şekilde ölçebilirler (Zhao ve ark., 2015).

Gerinim sensörlerin kullanıldığı birçok alanda öne çıkan uygulamalar arasında malzeme testi laboratuvarları, otomotiv endüstrisi, yapısal mühendislik ve elektronik bulunmaktadır (Campanella ve ark., 2018; Duan ve ark., 2020). Gerinim sensörleri, mühendislik projelerinde malzeme seçimi, tasarım optimizasyonu ve güvenlik değerlendirmeleri gibi süreçlerde önemli veriler sağlar. Hassas ölçümleri sayesinde, bu sensörler, malzemelerin performansını anlamak, ürün kalitesini artırmak ve güvenilir

mühendislik çözümleri geliştirmek için mühendisler ve araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Gerinim sensörleri, özellikle belirli bir endüstri veya uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı malzemelerle üretilebilir (Chen ve ark., 2019; Ma ve ark., 2021). Bu sensörler, genellikle elektronik devrelerle entegre edilir ve malzeme deformasyonu ile ilgili elektriksel sinyalleri ölçerek bu değişiklikleri algılar. Gerinim sensörü için iletken bir malzeme seçimi, büyük ölçüde uygulamanın doğasına ve malzemenin elektromekanik özelliklerine bağlıdır. Metalik veya metalik olmayan çeşitli iletken 3B yazdırılabilir malzemeler mevcuttur. Sıvı metal bazlı gerinim ölçerlerde direnç, sıvıyı tutan kanalların deformasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Bu sensörler, yüksek derecede gerilebilir uygulamalar için uygundur. Yaygın olarak kullanılan sıvı metaller arasında cıva ve galyum bulunur. Farklı algılama uygulamaları için çeşitli karbon allotropları kullanılmıştır. Grafit, yüksek elektriksel iletkenliği, korozyon direnci ve gözenekliliği nedeniyle kullanılmıştır (Wang ve ark., 2024). Ancak diğer yandan, karbon bazlı çözümler elektrik direncinde değişikliklere yol açan histerezisten muzdariptir. Yüksek kullanılabilirliği, düşük maliyeti ve korozyon direnci nedeniyle bu çalışmada sensör malzemesi olarak karbon bazlı bir filament seçilmiştir. Ek olarak, aynı uygulama için aynı malzeme kullanılarak bir gerinim sensörü geliştirilmiştir, bu da genel üretim karmaşıklığını azaltmaya yardımcı olacaktır.

Bu tez çalışmasındaki motivasyon, ticari malzemeler kullanarak uygun maliyetli uygulanabilir sensörler üretmek için (masaüstü model) eriyik yığıma modelleme (EYM) 3D baskının kullanılabileceği farklı alanları keşfetme arzusudur. 3D baskı veya Eİ, karmaşık tasarımların ve ağların hızlı ve nispeten doğru bir şekilde üretilmesini sağlar. Hızlı sensör üretimine ve sensör üretiminde daha düşük maliyet potansiyeline sahiptir. Ticarileştirilmiş malzemelerin kullanılmasındaki amaç, bu malzemelerin özel olarak üretilmiş malzemeleri imal etmek yerine hâlihazırda mevcut ve test edilmiş olanların kullanıldığı anlamına gelir. Bu durum, birçok sistem için kullanılabilen nispeten ucuz, esnek ve giyilebilir sensörlerin üretilmesine izin verir.

1.1. Amaç

Bu tez çalışmasının amacı, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen birçok üründen biri olan gerinim ölçerler veya gerinim sensörlerinin çeşitleri, üretim aşamaları ve karakterizasyon özellikleri ile ilgili karşılaştırma yapmaktır. Sensör çeşitleri, yapılarına ve kullanım alanlarına göre gruplandırılacaktır. Avantaj ve dezavantajlarına

göre ele alınacaktır. Öncelikle, tek eksenli gerinim sensörünün tasarımı yapılacaktır. Tasarım aşamasından sonra gerinim sensörünün eriyik yığıma modelleme (EYM) yöntemiyle üretilip karşılaştırması yapılacak ve karakteristik özellikleri incelenecektir. Gerinim sensörünün üretiminde esnek filament ve iletken gümüş malzeme kullanılacaktır. Üretilen sensörün tam karakterizasyon sürecini gerçekleştirmek için bir deneysel aparat inşa edilmiş ve kullanılmıştır. Son olarak, gerinim sensörünü üretmek için kullanılan elastik filament malzemenin doğasını incelemek için çekme testlerinin yapılması hedeflenmiştir. Gerçek zamanlı deneylerin doğruluğunu ispatlamak için gerinim sensörünün sonlu elemanlar analizi yapılacaktır. Bu analiz sürecinin COMSOL programı yardımıyla gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

1.2. Literatür Taraması

Bilim ve teknolojideki gelişmeler sayesinde birçok alanda yeni ürünler ve sensörler ortaya çıkmıştır. Bu cihazlar günlük hayatı kolaylaştırdığı gibi iklim değişikliğine bağlı olarak ortaya çıkan zararları azaltma, bu zararlara karşı önlem alma veya bu zararları tamamen ortadan kaldırma anlamında yardımcı olmaktadır. Giyilebilir teknolojiler, insan sağlığı izleme ve takip cihazları, insan-makine arayüzleri ile robotik uygulamaların uyum içinde çalışması konularında öne çıkan sensör teknolojileri hayatın her alanında karşımıza çıkacak potansiyele ulaşmıştır (Chandra ve ark., 2015; Tricoli ve ark., 2017). Sensör teknolojileri, eğilme, katlanma, bükülme, gerilme gibi durumlarda alınacak önlemler, bu durumların tespiti ve taleplerin karşılanması için vazgeçilmezdir.

Esnek elektronik cihazlara artan bir talep bulunmaktadır. Bunlar, özellikle sağlık hizmetlerinde, hareket algılamada, yumuşak robotik sistemlerde vazgeçilmez cihazlar haline gelmiştir (Han ve ark., 2017). Kuvveti algılamadaki ana araç gerinim ölçerdir. Gerinim ölçerler sadece gerinim kavramı ile ilişkili değildir. Bunun yanında, kuvvet, tork, yer değiştirme, ivme, konum gibi birçok bileşen ile ilgili olabilir. İletim yöntemlerinin uygun şekilde uygulanmasıyla birlikte birçok ölçüm için kullanılabilir. Gerinim ölçeri sensör olarak kullanmak, kuvvete tepki verecek şekilde yapılmasını gerektirir. Bunun olması için, gerinim ölçer, gerinim uygulanacak elemana, genellikle yapıştırılır (Huang ve ark., 2019). Farklı uygulamalar ve malzeme türleri için özel bağlayıcı maddeler mevcuttur ve bu maddeler, genellikle, gerinim ölçer üreticileri veya uzman üreticiler tarafından sağlanmaktadır. Motor şaftları, köprü yüklemesi, kamyon ağırlığı algılama gibi alanlarda, gerilme, burulma ve deformasyon gibi değişimleri algılamak için kullanılırlar.

Basınç, tork ve ivme gibi gerinim (veya kuvvet) ile ilgili herhangi bir miktar doğrudan ölçülebilir.

Sensörler, akıllı bir sistemin önemli bir parçasıdır. Birçok uygulamada, algılama elemanının izlenen yapının bir parçası olarak yer alması özellikle yararlı olacaktır. Sensör teknolojileri ve bu alandaki gelişmeler, ihtiyaçların karşılanması anlamında yardımcı olmuştur. Gerinim sensörleri bu anlamda önemli bir yere sahiptir (Le ve ark., 2015). Bu sensörler birçok alanda hayatımızı kolaylaştıran gelişmelere imza atmaktadır. Birçok uygulamada, algılama elemanının izlenen yapının bir parçası olarak sisteme gömülü olması özellikle yararlı olacaktır. Metal gerinim ölçerler, yarı iletken gerinim ölçerler, buhar biriktirilmiş gerinim ölçerler, kapasitif gerinim ölçerler, piezoelektrik gerinim ölçerler, foto elastik gerinim ölçerler, mekanik gerinim ölçerler gibi birçok farklı yapı, teknolojik gelişmeler sayesinde hayatımızı kolaylaştırmaktadır (Park ve ark., 2018; Yin ve ark., 2018).

Günümüzde, esnek gerinim sensörleri üzerine yapılan araştırmaların çoğu üç temel alana yönelmektedir. Bunlar hassasiyet, elastikiyet ve üretim sürecidir (Cai ve ark., 2018). Hassasiyet ve elastikiyet alanlarında temel hedef, hem son derece hassas hem de yüksek seviyelere zorlanabilen bir cihaz ortaya çıkarmaktır. Üretim alanında, araştırmacılar esnek sensörleri imal etmek için uygun maliyetli yöntemler geliştirmeye çalışmaktadır. Araştırma ayrıca, gücü birden fazla yönde izlemek için birden fazla sensörü tek bir cihaza entegre etmeyi ve okumaları ayırmayı amaçlamaktadır.

Geleneksel gerinim sensörleri ile esnek gerinim sensörleri arasındaki temel fark, ölçülebilen gerinim miktarındaki farklılıktır (Campanella ve ark., 2018). Geleneksel gerinim sensörleri genellikle sadece % 5 civarında bir maksimum gerinim değerine sahipken, esnek gerinim sensörleri % 800 kadar yüksek maksimum gerinim değerleri üretmiştir. Ölçülebilir gerinim aralığındaki ciddi artış, esnek gerinim sensörlerine geleneksel olanlara kıyasla daha geniş bir olası uygulama yelpazesi sağlar. Esnek gerilme sensörleri, sensörlerin çok daha geniş bir cihaz ve alan dizisine uygulanmasına izin verdiği için, bu kısmen esnek elektroniğe olan ilginin artmasının nedenidir (Wang ve ark., 2018; Gao ve ark., 2019). Ölçülebilen gerinim aralığındaki ciddi artış, esnek gerinim sensörlerinin geleneksel olanlarla karşılaştırıldığında daha geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasını sağlar. Esnek gerilim sensörleri, sensörlerin çok daha geniş bir cihaz ve alan dizisine uygulanmasına izin verdiği için, esnek elektroniğe olan ilginin artmasının nedeni kısmen budur.

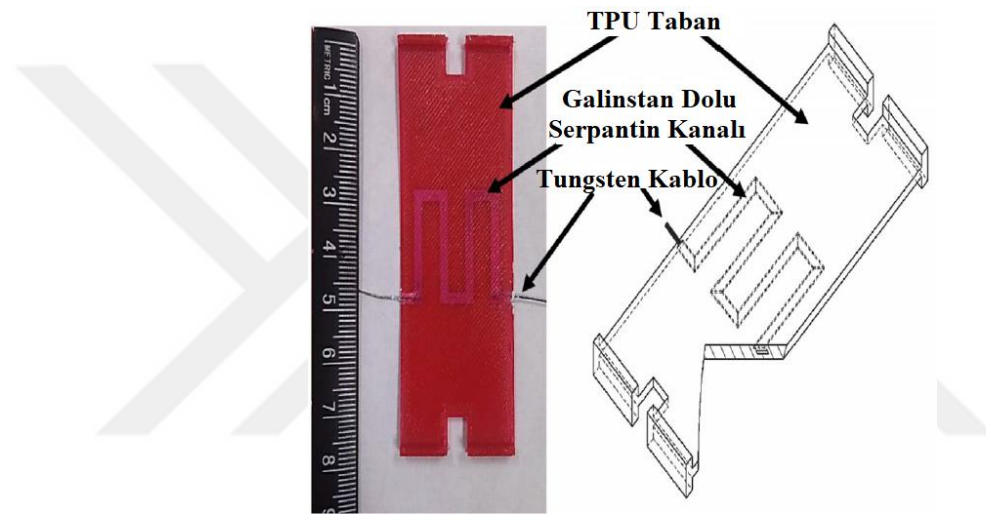
Bir gerinim sensörünün hassasiyeti, gösterge faktörüne (GF) dayanır. GF, uygulanan gerinim miktarına yanıt olarak kapasitans, gerilim veya direnç olup olmadığına bakılmaksızın gerinim sensörü okumasındaki değişiklik açısından tanımlanır. Gösterge faktörü ne kadar yüksek olursa, gerinim sensörü o kadar hassastır. Geleneksel gerinim sensörleri nispeten düşük elastikiyet ve duyarlılığa sahip olma eğilimindedir (GF 2 ve maksimum gerinim % 5). Günümüzde araştırmalar esas olarak gerilme sensörlerinin elastikiyetini ve hassasiyetini artırmaya odaklanmaktadır. Bununla birlikte, yüksek gösterge faktörleri ile geliştirilen gerinim sensörlerinin çoğu elastikiyetten yoksunken, daha yüksek elastikiyete sahip gerinim sensörleri hassasiyetten yoksundur. Bununla birlikte, son derece hassas gerinim sensörlerini oluşturmak için kullanılan malzemelerin çoğu esneklik veya yumuşaklıktan yoksundur (Wang ve ark., 2018; Jayathilaka ve ark., 2019). Ayrıca daha küçük gerinim değerlerinin daha yüksek hassasiyetle ölçülmesi için çatlak yayılımı gibi yöntemler tercih edilmektedir. Son derece esnek malzemelerin çoğu iletken değildir ve bu nedenle iletken malzemelerle entegre edilebilir, böylece gerildiklerinde bir okuma yapılabilir. İletken malzemeleri elastik yapılara entegre etme yöntemleri, bunlarla sınırlı olmamak üzere, iletken nano parçacıkların veya nano tellerin esnek malzemenin içine veya üzerine konumlandırılmasını ve desenlendirilmesini veya sıvı iletkenlerin esnek malzeme de kapsüllenmiş mikro kanallara enjekte edilmesini içermektedir.

1.2.1. Gerinim Sensörü Tasarımları

Literatürde farklı üretim teknikleri ve malzeme grupları kullanılarak geliştirilmiş esnek gerinim sensörü çeşitleri mevcuttur. Bu sensörler üzerinde birçok deneysel çalışma yapılarak sonuçları literatüre kazandırılmıştır. Bu bölümde, mevcut çalışmalardan bazıları incelenecektir. Çalışmaların üretim yöntemleri, kontrol stratejileri ve deneysel adımları açıklanacaktır. Böylelikle gerçekleştirilen tez çalışmasının özgün tasarımı ve deneysel süreci ortaya çıkarılmış olacaktır. Aşağıda belirtilen çalışmalar gerinim sensörü alanındaki uygulamalara örnek olarak verilmiştir.

Mofidian ve ark., katmanlı imalattaki sürekli iyileştirme ve karmaşık tasarım ve yapılara sahip esnek gerinim sensörlerinin geliştirilmesine yönelik artan ilgiden dolayı bu çalışmayı gerçekleştirmiştir (Mofidian ve ark., 2020). Karakterizasyon ve analiz sürecinde, sadece sensörün mekanik davranışının anlaşılmasını değil, aynı zamanda elektriksel davranışın ve bağlantılı elektromekanik davranışın anlaşılmasını da çalışmışlardır. Bu birleşik elektromekanik davranış, elektrik alanı ile mekanik alan

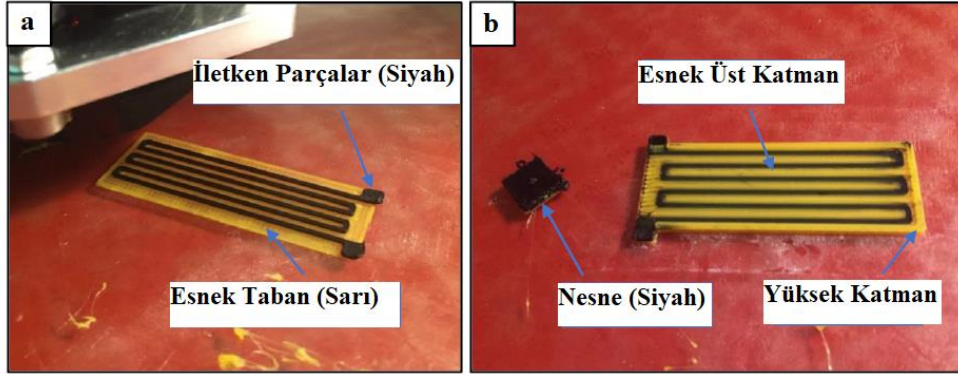
arasında bir ilişki kurmak için basitleştirilmiş yaklaşımlar kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışma, gerinim sensörlerini karakterize etmek için deneysel ve sayısal bir platform sunmakta ve bu sensörler için tasarım yönergeleri için bir araç görevi görmektedir. Doğrusal olmayan bir sonlu eleman COMSOL modeli geliştirildi ve deneylerle doğrulandı. %38 gerinim seviyesinde, sensörün kalınlığı, $t = 1.4$ mm'den $t = 0.6$ mm'ye düştüğünde hassasiyet %7 oranında artmıştır. Gerinim sensörünün üretiminde üç farklı malzeme çeşidi kullanılmıştır. Bunlar Polidimetilsiloksan (PDMS), EcoFlex ve NinjaFlex dir. %35 gerilim seviyesinde, NinjaFlex alt tabakaya sahip bir sensör, EcoFlex alt tabakaya sahip bir sensörle karşılaştırıldığında hassasiyette yaklaşık % 6 iyileşme gözlemlenmiştir.



Şekil 1.2 Eklemeli imalatla üretilmiş dirençli tip gerinim sensörü yapısı

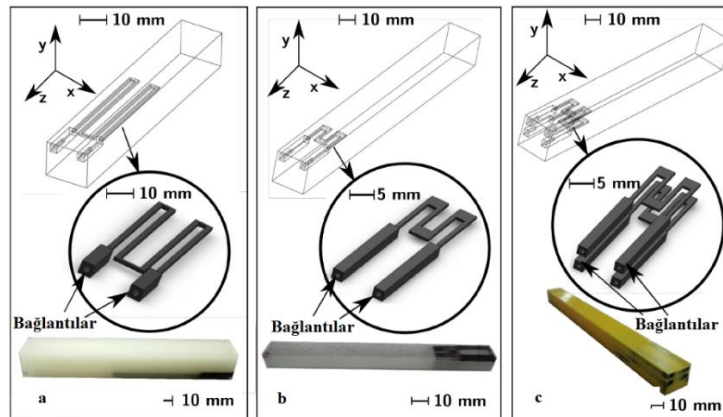
Elgeneidy ve ark., güvenilir eğilme geri bildirim ve basit temas tespiti sağlamak için kalibre edilebilen tamamen yazdırılabilir bir sensörlü eğilme aktüatör çalışması gerçekleştirmiştir (Elgeneidy ve ark., 2018). Pileli bir morfolojiyi takip eden yumuşak bir eğilme aktüatörü ve esnek bir dirençli gerinim sensörü, çift ekstrüzyonlu bir alet kafasına sahip kolayca erişilebilen EYM yazıcı donanımı kullanılarak doğrudan 3D olarak basılmıştır. Gerinim sensörü, eğilme aktüatörün gövdesine doğrudan kaynaklanmış ve değişken giriş basıncı altında tepkisini karakterize etmek ve değerlendirmek için sistematik olarak test edilmiştir. Sensörlü aktüatörün tepkisi daha sonra duyuşal okumaları gerçek eğilme açısı değerlerine dönüştürmek için bir sistem kullanılarak kalibre edildi. Ayrıca, sensörlü aktüatör, aynı giriş basınçlarındaki kısıtlı ve serbest bükülme tepkilerini karşılaştırarak basit temas tespiti için aynı sensörü kullanma potansiyelini değerlendirmek üzere bükülmeyi önleyen kısıtlı bir kurulumda test edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, çift ekstrüzyonlu bir EYM üretim işleminin, güvenilir

bükülme geri bildirimi ve temel temas tespiti sağlayabilen son derece özelleştirilebilir esnek gerinim sensörlerini doğrudan yazdırmak için nasıl ayarlanabileceğini göstermiştir. Gerinim aktüatörlerine bu tür algılama kabiliyetinin eklenmesi, kontrollü yumuşak kavrama, esnek giyilebilir cihazlar ve dokunsal cihazlar gibi uygulamalar için işlevselliklerini ve güvenilirliklerini artırmaktadır.



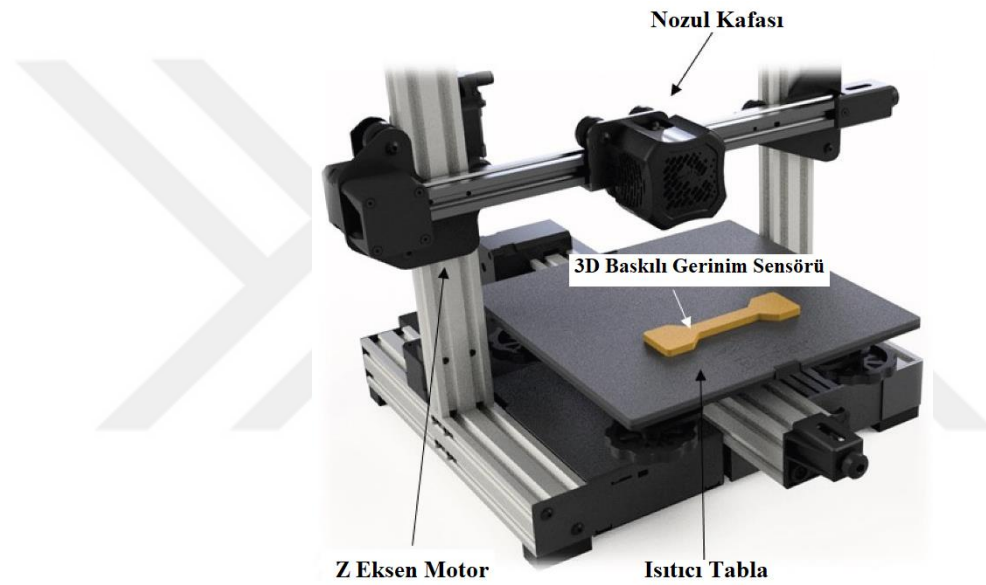
Şekil 1.3 Esnek gerinim sensörünün gömülü iletken izlerle üretilmesi

Maurizi ve ark., gömülü ve baskılı duyuşal elemanlara sahip akıllı 3D yapıları araştırmıştır (Maurizi ve ark., 2019). Gömülü gerinim sensörü iletken Polilaktik Asit (PLA) malzemesine dayanıyordu. Araştırma, gerinimin dinamik ölçümlerine odaklanmış ve iletken PLA malzemelerinin piezo rezistivitesinin teorik arka planı, sıcaklık etkileri, doğrusal olmayan durumlar, dinamik aralık, elektromanyetik hassasiyet ve frekans aralığı dikkate alınmıştır. Dinamik ölçümlerde kullanılan yarı statik bir kalibrasyon önerilmiştir. Sıcaklık etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu, duyuşal elemanın yapı doğrusal bir tepkiye sahip olduğu sürece doğrusal olduğu, dinamik aralığın $\sim 30 \mu\text{c}$ 'de başladığı ve geniş bant performansının birkaç kHz aralığında olduğu (basılı sensörün boyutuna bağlı olarak) gösterilmiştir. Sonuçlar, hâlihazırda piezo-kristal tabanlı sensörlerin kullanıldığı alanlarda dinamik ölçümler için kullanılan gömülü duyuşal öğelere sahip akıllı 3D baskılı sistemlerin gelecekteki uygulamalarını desteklemektedir.



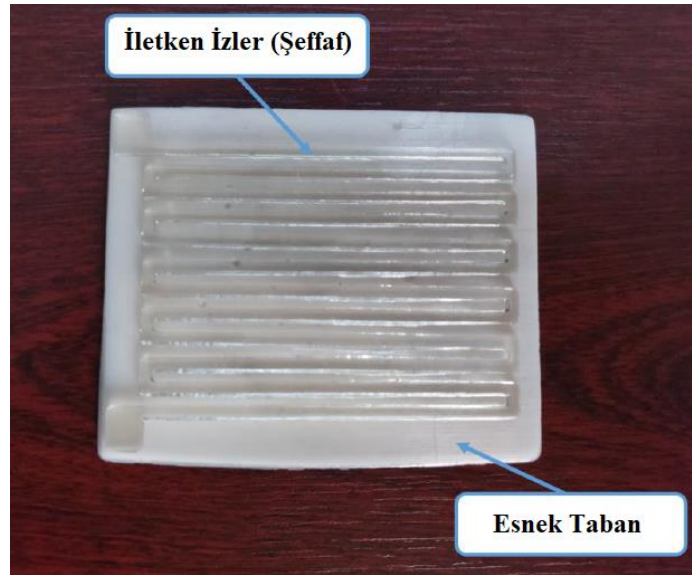
Şekil 1.4 Gerinim sensörlerin CAD modeli ve 3D baskılı örnekleri

Lim ve ark., farklı dilimleme açlarına sahip grafen bazlı sensörleri, EYM yöntemini kullanarak başarıyla üretmiş ve gerilme açılarının sensörlerin performansı üzerindeki etkisinin sistematik olarak incelenmesini sağlamıştır (Lim ve ark., 2023). Grafen filamentlerinin uygulanan gerinim yönüne göre hizalanmasının, gösterge faktörünü (GF) ve diğer önemli sensör parametrelerini etkilediği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, 45° örüntünün 180° örüntüye kıyasla daha yüksek hassasiyet ve stabilite sergilediğini, GF'nin ise 180° örüntü için daha büyük olduğunu göstermiştir. Ek olarak, 1000 eğilme testi ile yüksek güvenilirlik ve doğrusallık gösterdi. Bu çalışmanın bulguları, EYM ile üretilmiş grafen bazlı gerinim sensörleri üzerine yapılan araştırmaların artmasına katkıda bulunacaktır.



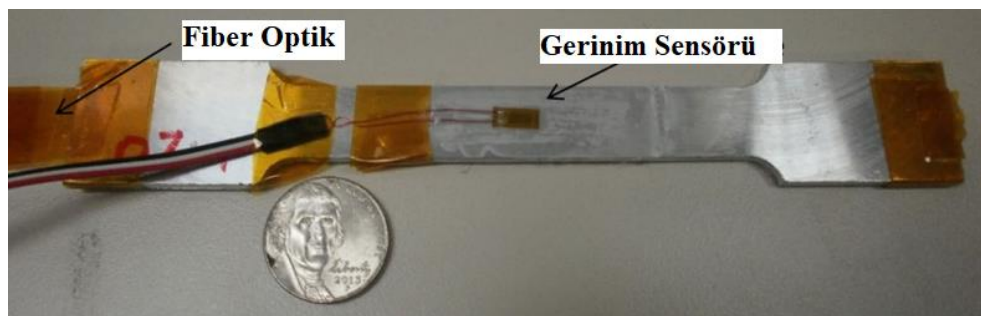
Şekil 1. 5 Köpek kemiği şeklindeki gerinim sensörünün 3 boyutlu modellenmesi

Ulkir ve Akgun, doğrudan yumuşak uygulamalarda kullanılacak 3D baskılı gerinim sensörünün üretimini ve deneysel çalışmalarını sunmuştur (Ulkir ve Akgun, 2023). Sensörün imalatında fotopolimer bazlı iletken ve esnek ultraviyole (UV) reçine malzemeleri kullanılmıştır. 3D üretim için eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan stereolitografi (SLA) tabanlı 3D yazıcı tercih edilmiştir. İki adet parçadan oluşan sensörün alt tabanı esnek UV reçineden üretilirken, iletken olması gereken kanallar iletken UV reçineden üretilmiştir. Toplamda 2 mm kalınlığında gerinim sensörü üretilmiştir. Sensörün histerezis etkisini gözlemlemek için yükleme ve boşaltma koşullarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar gerinim sensörü ile ölçülen direnç değeri arasında yakın bir doğrusal ilişki olduğunu gösterdi. Ayrıca iletken ve iletken olmayan malzemelerin davranışlarını gözlemlemek amacıyla çekme test numuneleri üretildi.



Şekil 1. 6 SLA tabanlı 3D yazıcıda üretilen gerinim sensörü

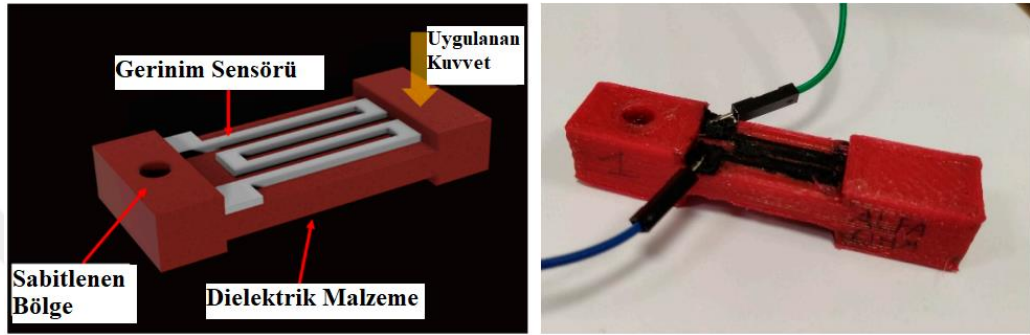
Hehr ve ark., alüminyum alaşımı 6061'e gömülü ticari olarak temin edilebilen fiber optik gerinim sensörlerinin kaynaşma kalitesini, arayüz sağlamlığını ve yük algılama sınırlarını değerlendirmiştir (Hehr ve ark., 2018). Üretim sürecinde ultrasonik eklemeli imalat yöntemini kullanmışlardır. Oldukça yeni bir üç boyutlu (3D) baskı teknolojisi olan ultrasonik eklemeli üretim, oda sıcaklığına yakın metal folyo katmanları arasında metalurjik bağlar üretmek için ultrasonik enerji kullanır. Prosesin bu düşük sıcaklık özelliği, fiber optik gerinim sensörleri gibi sıcaklığa duyarlı bileşenlerin doğrudan metal yapılara entegrasyonunu sağlar. Bu sanal model etkileşimi ve canlı yük verileriyle geri bildirim gibi dijital ikiz uygulamaları için olanak sağlayan bir teknoloji olabilir. Son olarak teknolojiye ve uygulamalarına genel bir bakış atılmıştır.



Şekil 1. 7 Ultrasonik eklemeli imalat ile üretilen gerinim sensörü

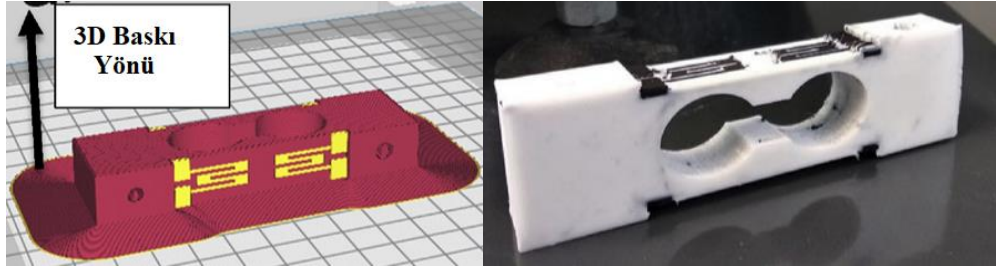
Lanzolla ve ark., karbon siyahı ve karbon nanotüpler (CNT) ile katkılı polilaktik asit (PLA) bazlı bir matristen oluşan iletken bir malzeme kullanılarak malzeme ekstrüzyon teknolojisi kullanılarak üretilen, düşük maliyetli bir 3D baskılı gerinim sensörünün karakterizasyonunu sunmuştur (Lanzolla ve ark., 2022). Yer değiştirme veya kuvvet profillerini tanımlamak için yüksek tekrarlanabilirliğe sahip bir endüstriyel robot

kullanarak otomatik karakterizasyon testlerini gerçekleştirmek için uygun bir ölçüm düzeneği geliştirildi. Uygulanan uyaran ile 3D baskılı sensörün elektrik direncindeki değişim arasındaki korelasyon değerlendirildi ve sıcaklığın etkisini telafi edecek bir yaklaşım geliştirildi. Sonuçlar sıcaklığın ve histerezisin tekrarlanabilirliği etkilediğini göstermektedir; yine de sensör, 10 g ile 50 g arasında değişen darbe kuvvetlerini doğru bir şekilde algılar. Sensör yüksek doğrusallık gösterdi ve 114 g ve 0.7 mm kuvvet ve yer değiştirme aralığında sırasıyla $0.077 \Omega \text{ g}^{-1}$ ve $12.54 \Omega \text{ mm}^{-1}$ hassasiyet tespit edildi. Sonuçlar sensörün gerçek verilere oldukça yakın olduğunu göstermiştir.



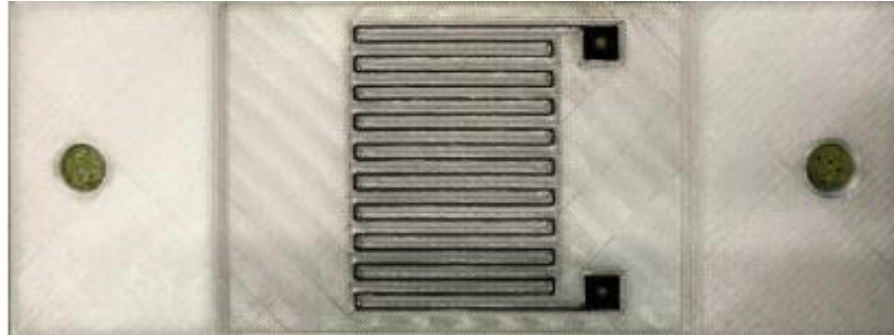
Şekil 1.8 Önerilen gerinim sensörünün 3D modeli ve üretimi

Stano ve ark., tek adımlı bir baskı döngüsünde iletken ve iletken olmayan ticari malzemelerin çift ekstrüzyonunu kullanarak bir yük hücresi üretmek için eklemeli imalat yöntemi kullanımını sunmuştur (Stano ve ark., 2020). Dört gerinim ölçer arasında neredeyse eşit elektriksel direnç değerleri elde etmek amacıyla iletken filamanı biriktirmek için özel proses parametreleri ve stratejileriyle üretilmiş, dört gömülü gerinim ölçer içeren bir yük hücresi kullanıldı ve bunların tam bir Wheatstone köprüsü konfigürasyonuna bağlanması amaçlandı. Daha sonra, öncelikle her bir gerinim ölçerin davranışını anlamak ve daha sonra yük hücresini karakterize etmek için çeşitli testler gerçekleştirildi. Testler, gerinim ölçerlerin basınç ve çekme deformasyonuna duyarlı olduğunu ve dört gerinim ölçerin tam bir Wheatstone köprüsüne bağlanmasıyla elde edilen yük hücresi voltajının, uygulanan kuvvet arttıkça azaldığını gösterdi. Bu çalışma, eklemeli imalat teknolojisinin sensör üretim alanındaki potansiyelini ve düşük maliyetli ticari filamentler ve 3D yazıcılar kullanılarak hassas elemanların hassas olmayan elemanlara ek bir montaj işlemi olmadan entegre edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. 9 Gerinim sensörünün modeli ve üretilmiş hali

Munasinghe ve ark., doğrudan yerçekimi ayırma spirallerine (GSS) yazdırılabilen 3 boyutlu baskılı bir gerinim sensörü çalışmasını sunmuştur (Munasinghe ve ark., 2019). Bu yaklaşım, Polilaktik Asit (PLA) bazlı bir malzemenin üzerine bir gerinim ölçer basmak için karbon bazlı iletken bir filaman kullanır. Baskılı sensörler, doğruluğu artırmak için optik ekstansometreli bir Instron E10000 test makinesi kullanılarak test edilmiştir. Histerezisin etkisini anlamak için hem yükleme hem de boşaltma koşullarında test yapıldı. Test sonuçları, gerinim ile ölçülen direnç arasında doğrusala yakın bir ilişki olduğunu ve test sonrasında dirençte %6,05'lik bir artış olduğunu gösterir; bu, küçük bir histerezise işaret eder. Ayrıca, direnç tepkisinin gerinimin gerisinde kaldığı viskoelastik davranışın etkisi de tanımlanır. Hem iletken hem de iletken olmayan malzemeden elde edilen sonuçlar, iletken karbonun çekme mukavemeti üzerindeki etkisini göstermektedir; bu, sensörün yerleştirilmesiyle ilgili gelecekteki kararların alınmasında yardımcı olacaktır.



Şekil 1. 10 Eriyik yığıma modelleme yöntemiyle üretilen gerinim sensörü

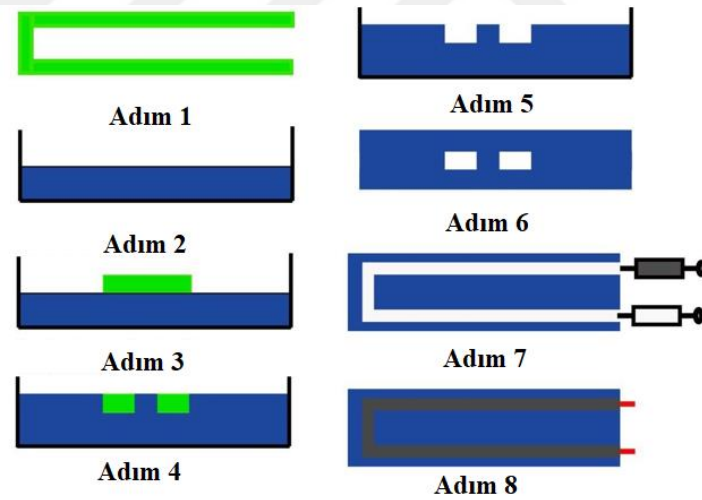
1.3. Üretim Yöntemlerine Genel Bakış

Gerinim sensörlerinin geliştirilmesi için araştırılan çok sayıda malzeme çeşidi ve üretim yöntemi vardır. Bu bölümde eklemeli imalat, kalıplama, kontak baskı ve kaplama yöntemleri incelenmiştir. Bu üretim yöntemlerinin odak noktası, direnç, gerilim veya kapasitans değerlerindeki değişikliklerin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için iletken malzemeleri esnek bir alt tabakaya sokmaktır. Buna ilaveten, üretim teknikleri gerinim sensörünün gösterge faktörünü artırarak işlevselliğini artırmaya veya gerinim sensörünü

daha uygun maliyetli ve endüstri dostu hale getirmek için süreci değiştirmeye odaklanır. Örneğin, eklemeli imalat, daha yüksek gösterge faktörlerine sahip gerinim ölçerleri üretmek için uygun maliyetli ve endüstri dostu bir yöntem olarak önerilmiştir.

1.3.1. Kalıplama Yöntemiyle Üretim Süreci

Kalıplama, gerinim sensörlerinin üretildiği çok aşamalı bir üretim sürecidir. Tipik olarak, kalıplama işlemi, bir sıvı elastomerin içine dökülen bir kasa yapısı oluşturularak yapılır. Daha sonra, sıvı elastomer kürlenmeye bırakılır. Kürlenme işleminden sonra kasa yapı kazınarak uzaklaştırılır ve kalıp, kürlenmiş elastomerin başka bir tabakası kullanılarak üstten kapatılır. Bunu bir enjeksiyon işlemi takip eder. Gerinim sensörlerini üretmek için kullanılan kalıplama işleminin şeması Şekil 1.11’de özetlenmiştir. Kalıplama işleminin kullanılmasının önemli bir avantajı, farklı boyutlarda ve yapılar da kanallar üretmek için çeşitli tekniklerin yanı sıra çeşitli elastik malzemelerin kullanılmasına izin vermesidir. Ek olarak, kalıplama ayrıca çeşitli iletken dolgu maddelerinin kullanılmasına izin verir (Khosravani ve Nasiri, 2020).

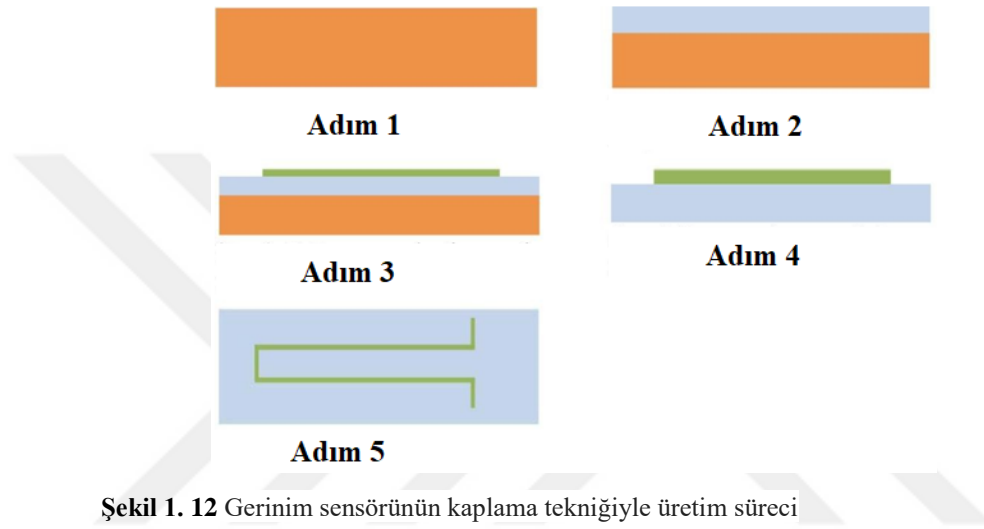


Şekil 1. 11 Gerinim sensörünün kalıplama tekniğiyle üretim süreci

Park ve ark., elastomer olarak Ecoflex, 3D baskılı bir kasa kalıbı ve iletken dolgu olarak iyi ergiyen Gallium Indium (GaIn) kullanarak çok eksenli bir gerinim sensörü üretmiştir (Park ve ark., 2012). XY yönlerindeki gerinim değerini ve Z yönündeki basıncı ölçmek için gerinim sensörlerine 3 katman oluşturmuştur. Üretilen gerinim sensörü, x eksenini ve y eksenini sensörleri için sırasıyla 3.6 ve 3.7’lik bir gösterge faktörü sergilemiştir. Ergiyen GaIn’i gerinim sensörünün de tutmak için kullanılan kanalların boyutları 200 μm genişliğinde ve 300 μm derinliğindedir. Son olarak, üretilen gerinim sensörünün maksimum fonksiyonel gerinim değeri % 250 idi.

1.3.2. Kaplama Yöntemiyle Üretim Süreci

Kaplama üretim yöntemi, elastik malzemeyi iletken bir malzemeye kaplayarak elastik bir malzemeye iletken özellik kazandırmayı içermektedir. Gerinim, malzemenin iletkenliğindeki veya direncindeki değişikliklere göre ölçülür. Bazı durumlarda, kaplanan malzeme, kazınmasını önlemek için elastik malzemenin ikinci bir katmanında kapsülendir. Ek olarak, birkaç durumda kaplama elastik malzeme tarafından emilir veya elastik malzemeye bağlanır. Gerinim sensörlerini üretmek için kullanılan kaplama işleminin şeması Şekil 1.12’de özetlenmiştir (Fotovvati ve ark., 2019).

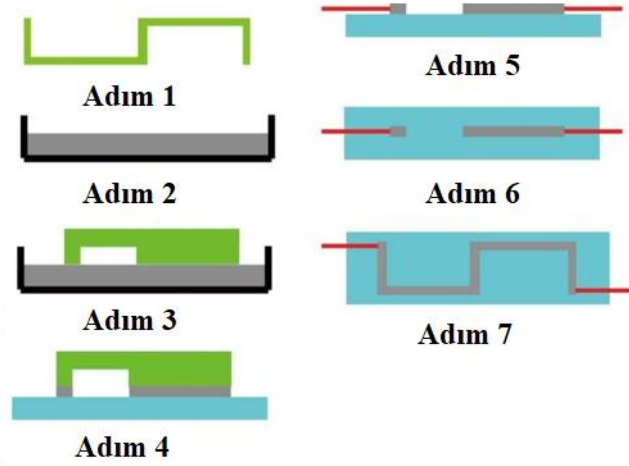


Şekil 1. 12 Gerinim sensörünün kaplama tekniğiyle üretim süreci

Lee ve ark., gümüş nanoparçacık ince filmler kullanılarak kaplama tekniğiyle gerinim sensörü üretmiştir (Lee ve ark., 2014). Üretim işlemi, bir desende doğrudan PDMS'ye bırakılan gümüş nano parçacık ince bir filmde oluşuyordu. Gerinim sensörü gerildikçe ince filmde mikro çatlaklar oluşmuş ve bu nedenle iletkenlik değişmiştir. Gerinim sensörü, % 20 'de 2.05' lik bir gösterge faktörü ile % 25 gerinim değerine kadar test edilmiştir.

1.3.3. Kontak 3D Baskı Yöntemiyle Üretim Süreci

Kontak 3D baskı, desenli bir kalıbın oluşturulduğu bir üretim yöntemidir. Desenli kalıp iletken bir malzemeye daldırılır. İletken malzeme daha sonra bir elastomer veya cam substrat üzerine bırakılır. Bunu, iletken kalıbı örtmek için alt tabaka üzerinde biriken elastik bir malzeme izler. Gerinim sensörlerini üretmek için kullanılan kontak 3D baskı işleminin şeması Şekil 1.13’de özetlenmiştir (Zhang ve ark., 2022).



Şekil 1.13 Gerinim sensörünün kontak 3D tekniğiyle üretim süreci

Liu and Choi, bir gerinim sensörü üretmek için kontak baskı işlemini kullanmıştır (Liu ve Choi, 2009). Öncelikle bir baskı işlemiyle bir kalıp ürettiler. Kalıp daha sonra bir plakaya döndürülerek kaplanmış bir PDMS nano kompozitine daldırılmıştır. Nanokompozit daha sonra kalıp şeklinde bir cam yüzeye aktarılmıştır. Bu yapı, daha sonra PDMS ile kaplanmıştır. PDMS bir kütleme işleminden geçtikten sonra, esnek gerinim sensörünü oluşturarak çıkarılmıştır. Gerinim sensörü % 41'lik bir gerinim için test edilmiştir.

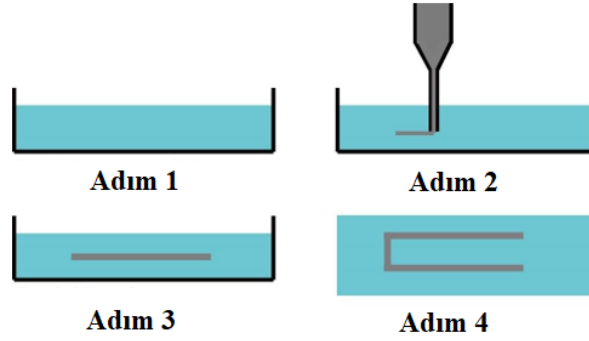
1.3.4. Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretim Süreci

Eklemeli imalat (Eİ), modern üretim tekniklerinden biri olarak endüstride giderek daha fazla önem kazanan bir süreçtir. Bu yöntem, katman katman malzeme biriktirerek ürün oluşturma işlemidir. Geleneksel üretim yöntemlerinden farklı olarak, eklemeli imalat sayesinde karmaşık geometrilerin üretimi daha kolay hale gelir. Bu yöntem, özellikle prototip üretiminde, kişiye özel üretimde ve yedek parça üretiminde büyük avantajlar sağlar (Prakash ve ark., 2018).

Eİ yöntemleri, endüstride giderek daha fazla popülerlik kazanan ve üretim süreçlerini kökten değiştiren bir dönüşümü temsil ediyor. Bu yöntemler, birçok farklı teknoloji ve süreç içerir. 3D baskı, dijital ışık işleme, lazer eritme, elektron ışını eritme ve seçici lazer sinterleme gibi yöntemler, eklemeli imalatın önde gelen örnekleridir. Eİ yöntemlerinin avantajlarından biri, tasarım özgürlüğü ve esnekliğidir.

Geleneksel üretim yöntemleri genellikle kalıpların veya özel aletlerin üretilmesini gerektirirken, Eİ doğrudan dijital bir modelden üretim sağlar. Bu da tasarımcılara ve mühendislere daha fazla yaratıcılık ve esneklik sağlar. Ayrıca, kişiselleştirilmiş ürünlerin üretimi için de idealdir, çünkü her bir parça kolayca özelleştirilebilir. Ancak, Eİ

yöntemlerinin bazı sınırlamaları da vardır. Örneğin, üretim hızı genellikle geleneksel yöntemlere göre daha düşüktür ve büyük ölçekli üretimler için uygun değildir. Ayrıca, bazı malzemelerin işlenmesi için uygun olmayabilir veya son ürünlerin mekanik özellikleri geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha düşük olabilir. Ancak, sürekli teknolojik ilerlemeler ve Ar-Ge çalışmalarıyla bu zorlukların üstesinden gelinmesi ve eklemeli imalatın yaygınlaşması beklenmektedir (Bikas ve ark., 2016; Gibson ve ark., 2021).



Şekil 1.14 Gerinim sensörünün eklemeli imalat tekniğiyle üretim süreci

Eİ veya 3D baskı yönteminde elastik malzeme katmanları oluşturularak istenilen yapı üretilir. Eİ, gerinim sensörleri oluşturmak için çeşitli şekillerde kullanılır. Kalıplama işleminde kalıpları veya katmanlarını imal etmek için Eİ kullanılır. 3D baskı, gerinim sensörlerini doğrudan yazdırmak için de kullanılabilir. Gerinim sensörlerini üretmek için kullanılan Eİ işleminin şeması Şekil 1.14'de özetlenmiştir (Vayre ve ark., 2012).

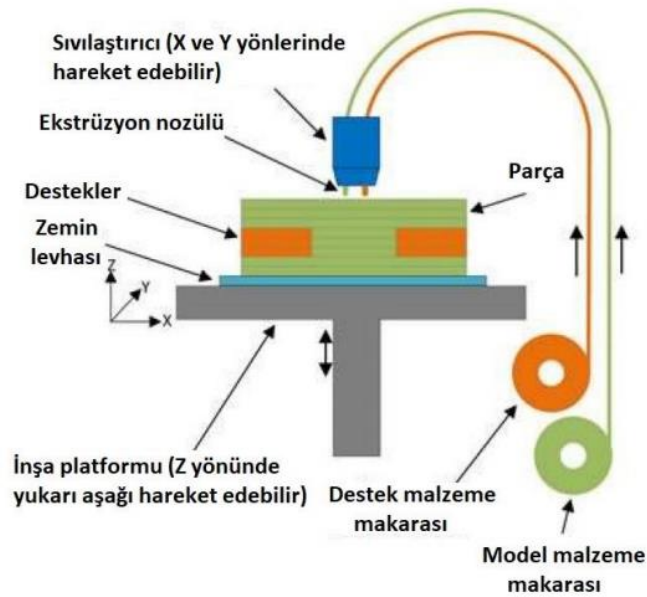
İşlem, iletken bir mürekkebin bir elastomere gömülmesiyle esnek elektroniklerin basılması için özel olarak tasarlanmıştır. İşlem, kürlenmemiş elastomer ile doldurulmuş bir rezervuar ve kürlenmemiş elastomeri kaplayan bir dolgu sıvısına sahip iki yapının işleme tabi tutulması şeklinde çalışır. Yazıcı kafası, mürekkebi doğrudan kürlenmemiş elastomere belirtilen desende enjekte eder. Desen girildikten sonra elastomerin sertleşmesine izin verilir ve böylece gerinim sensörü oluştur.



Şekil 1.15 Eklemeli imalat ile üretim süreci

Muth ve ark., tarafından üretilen gerinim sensörü 3.8'lik bir gösterge faktörüne ve % 400' lük bir maksimum etkili gerinime sahipti (Muth ve ark., 2014). Bu gerinim sensörünün avantajlarından biri, gerinim sensörünün 3D baskı işlemi sırasında oluşan katmanlara sahip olmamasıydı. Sonuç olarak, katman ayrılması gibi sorunlar veya gerinim dengelemesi, gerinim birikimi veya erken kalıcı deformasyon gibi olumsuz etkiler ortadan kaldırıldı.

Eriyik yığma modelleme (EYM), Eİ tekniklerinden biri olarak dikkat çeken bir yöntemdir. Bu yöntem, bir metal tozunun lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynaklarıyla eritilerek katman katman biriktirilmesi prensibine dayanır (Sheoran ve Kumar, 2020; Ahmad ve ark., 2022). EYM sürecinde, bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyalarından gelen dijital veriler kullanılarak, karmaşık metal parçalar üretilebilir. Bu yöntem, özellikle havacılık, tıp ve otomotiv gibi endüstrilerde yüksek performanslı ve karmaşık parçaların üretimi için tercih edilir.



Şekil 1. 16 Eriyik yığma modelleme çalışma prensibi

EYM sürecinde, öncelikle bir metal toz tabakası düzgün bir şekilde serilir (Şekil 1.16). Ardından, bir lazer veya elektron ışını gibi yoğun enerji kaynakları, belirli bir desene göre bu toz tabakasını eritir (Mohamed ve ark., 2015; Rajan ve ark., 2022). Lazer veya elektron ışını, toz tabakasının belirli bir noktasına yoğunlaştırılarak malzemeyi eritir ve istenilen katman şeklini oluşturur. Eritilen metal, hemen ardından soğuyarak katılaşır ve bir sonraki katmanın üzerine yeni bir tabaka toz serilir. Bu süreç, katman katman tekrarlanarak nihai parça oluşturulur. Son olarak, oluşturulan parça, gerektiğinde işleme tabi tutularak istenilen yüzey pürüzsüzlüğüne ve boyuta getirilir. Bu süreçte, dijital

tasarım dosyasındaki verilerin her bir katmana göre lazer veya elektron ışını tarafından kontrol edilmesiyle çok karmaşık geometriler elde edilebilir.

1.4. Tez İçeriği

Bu tez çalışması 4 başlık altında incelenmiştir. Bunlar;

- Giriş bölümü,
- Materyal ve Metot bölümü,
- Bulgular ve Tartışma bölümü,
- Sonuçlar bölümü.

Giriş bölümünde, tez çalışması hakkında bazı temel ve önemli bilgiler verilmiştir. Öncelikle sistemin amacı açık bir şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, gerinim sensörü ile ilgili yapılmış çalışmaların tasarımları ve kontrol stratejileri için literatür taraması anlatılmıştır. Son olarak, esnek gerinim sensörünü üretmek için kullanılan imalat yöntemleri genel olarak özetlenmiştir. İkinci bölümde, gerinim sensörünün bilgisayar destekli tasarım ve eklemeli imalat yöntemiyle üretim süreçleri detaylı biçimde anlatılmıştır. Ayrıca, sensörün karakterizasyon süreci için kullanılan deneysel yöntemler özetlemiştir. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu sonuçlar detaylı biçimde yorumlanarak mevcut çalışmalardan farklılıklar ortaya çıkarılmıştır. Dördüncü bölümde, sistemin genel olarak sonuçları hakkında bilgi verilerek tez çalışması tamamlanmıştır. Ayrıca, gelecekte yapılması planlanan çalışmalar hakkındaki süreçle ilgili de açıklamalar yapılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT

2.1. Yaklaşımımız ve Yöntemlerimiz

Bu tez çalışmasında, gerinim sensörünün tasarımı, üretimi ve karakterizasyonuna odaklanmıştır. İlk aşamada, sensörün 3D olarak tasarımı gerçekleştirildi. Daha sonra, prototip ürün termoplastik poliüretan (TPU) esnek polimer malzeme kullanılarak 3D baskı yöntemlerinden biri olan eriyik yığıma modellemesi yöntemiyle üretildi. Gerinim sensörü, yaklaşık 20 mm x 60 mm ölçülerinde üretilmiştir. Sensörün kalınlığı ise 2 mm dir. Üretim sürecini takiben, gerinim sensörünün sonlu elemanlar analizi ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Gerinim sensörünün performansı ölçüldü ve uygulanan kuvvete nasıl tepki verdiği incelendi.

İmalat ve karakterizasyon yöntemleri detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Üretim sürecinde kullanılan malzemeler, 3D baskı parametreleri ve montaj aşamaları belirtilmiştir. Karakterizasyon sürecinde ise sensörün deneysel aşamalar, ölçüm testleri, performans metriklerinin belirlenmesi ve veri analizi yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

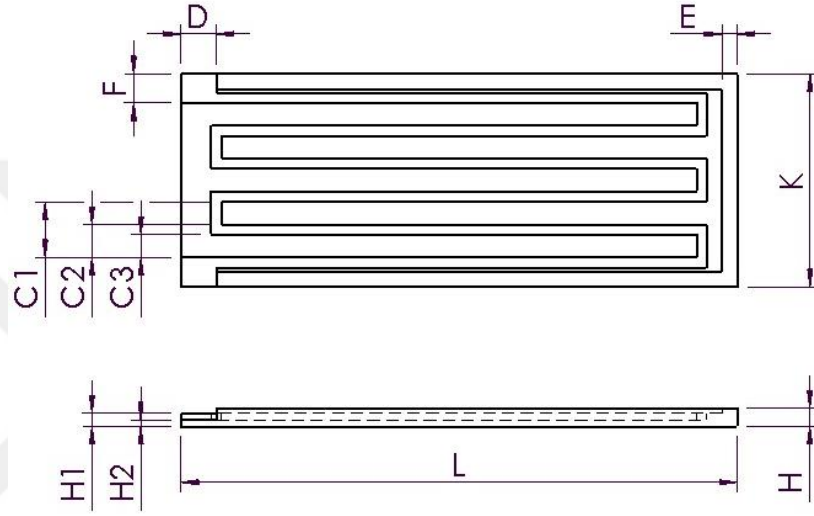
Bu çalışma, gerinim sensörünün tasarım, üretim ve karakterizasyon süreçlerine yönelik kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Elde edilen bulgular, hem sensörün tasarımı ve üretimi hem de performanslarının değerlendirilmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

2.2. Gerinim Sensörün Tasarımı

Bu bölümde, gerinim sensörünün 3D tasarım süreci anlatılmıştır. Tasarım süreci bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan SolidWorks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SolidWorks, mühendislik, mimarlık, endüstriyel tasarım ve diğer alanlarda kullanılan karmaşık parçaların ve montajların tasarımını kolaylaştırmak için kullanılır. Bu yazılım, kullanıcıların üç boyutlu modeller oluşturmasını, bunları analiz etmesini, simülasyonlar yapmasını, teknik çizimler oluşturmasını ve montajlarını kontrol etmesini sağlar.

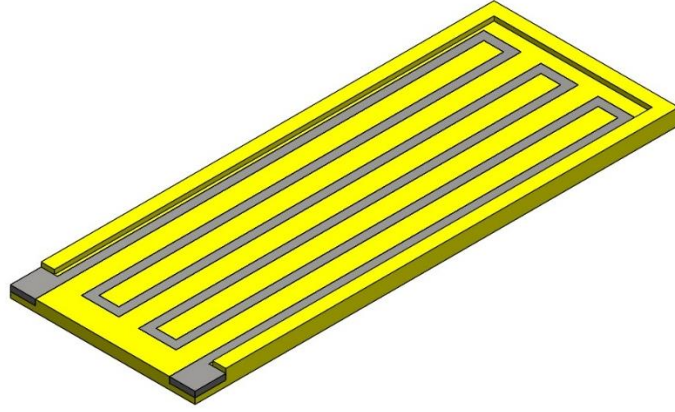
Esnek gerinim sensörün tasarımı, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi standart gerinim ölçer sensörlerin tasarımına uygundur. Sensörün özel boyutları: L=60 mm, K=20 mm, D=5 mm, E=2 mm, F=5 mm, H=2 mm, H1=1.4 mm, H2=1.2 mm, C1=6 mm, C2=4 mm, C3=3 mm dir (Şekil 2.1)). Sensörün gövdesi, esnek bir malzemedan oluşurken, algılama izleri iletken gümüş malzemedan oluşmaktadır. Burada önemli olan iki malzemenin de

birbirine iyi bağlanmasıdır. Buradaki asıl amaç, esnek malzeme ile sensörün esnekliğinin sağlanması iken iletken malzeme ile hareketlerin algılanmasının sağlanmasıdır. İletken gümüş malzemesi çok esnek olmasa da çok ince kalınlıkta basıldığında uzayabilecek kadar esnek hale gelerek sensörün istenilen esnekliğini korur. Dolayısıyla, esnek sensör gövdesi dış kuvvetler altında uzarken, içine gömülü ince iletken izler de bükülmeyi takip ederek dirençte bir değişikliğe neden olur. En ince pratik iz kalınlığı, yazıcının güvenilir şekilde yazdırabileceği minimum katman kalınlığına eşdeğerdir. Bu değer gerinim sensörü için 0.4 mm'dir.



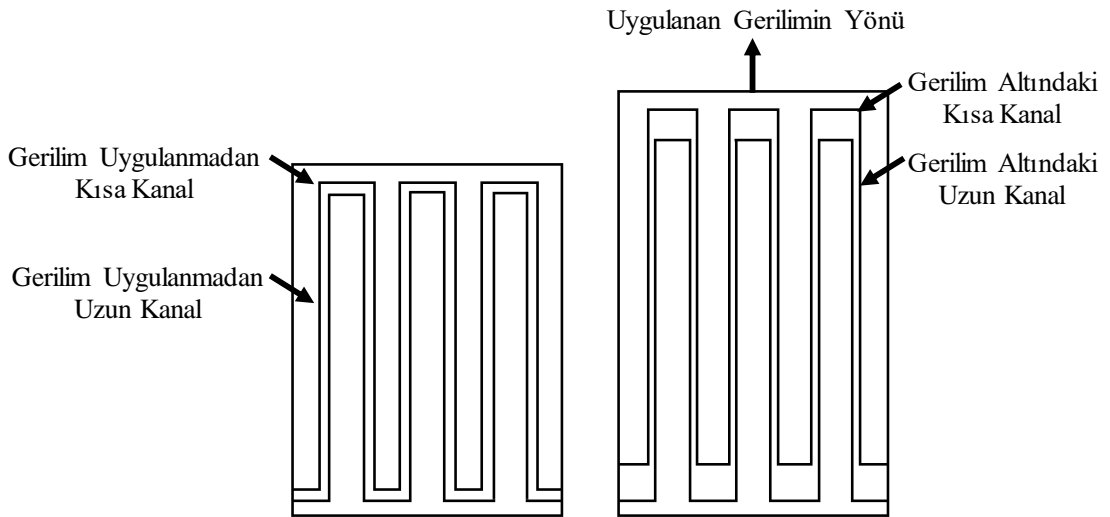
Şekil 2. 1 Gerinim sensörün tasarım görüntüsü ve boyutlandırılması

Şekil 2.1'deki gerinim sensörün kesitine bakıldığında, iletken desen katmanının her biri 0.4 mm'lik iki esnek malzeme katmanı arasında nasıl kapsülendiği görülmektedir. Dolayısıyla sensörün toplam kalınlığı yalnızca 1.4 mm, kapsüllemiş algılama izlerinin kalınlığı ise yalnızca 0.8 mm'dir. Bu, sensörün son derece esnek kalmasını sağlar ve herhangi bir sisteme entegre edildiğinde esnekliğini sınırlamaz. Ek olarak, kablolamayı kolaylaştırmak için iletken yolların uçları açıkta bırakılmıştır. Son olarak, sonraki aşamalarda sensörün herhangi bir sistem üzerinde uygulamasını yapabilmek ve kaynaklamayı kolaylaştırmak için sensörün üst kısmına çevresi etrafında 0.7 mm yüksekliğinde ve 1.1 mm genişliğinde yükseltilmiş bir basamak eklenmiştir. 3D olarak tasarlanan gerinim sensörünün görüntüsü Şekil 2.2'de verilmiştir. Burada, sarı kısımlar esnek malzemedен oluşurken gri kısımlar ise iletken gümüş malzemedен oluşmaktadır. Şekilden anlaşılacağı üzere gerinim sensörü, U-şekilli gömülü uzun ve kısa kanallardan oluşmaktadır.



Şekil 2. 2 Gerinim sensörün 3D modeli

Harici bir kuvvet uygulandığında kanallar deforme olmuş ve kısa kanalların kesit alanı artarken uzun kanalların kesit alanı azalmıştır. Sonuç olarak, uzun kanalların deformasyonu, iletkenin kesit alanında bir azalmaya neden olmuştur. İletken alanındaki bu değişiklik, akımın geçebileceği yolun boyutunu azalttı ve böylece direncini artırdı. Kullanılan iletken gümüş malzemedir. Gerinim sensörün'deki desen, tek eksenli gerinim için idealdi. Ana direnç değişimi, uygulanan gerilimin yönüne paralel olan uzun kanallardan kaynaklanmaktadır. Gerinim uzun kanallara dik olarak uygulandığında dirençte ortaya çıkan değişiklik paralel uygulandığında ortaya çıkan değişimden daha düşüktü. Şekil 2.3'de gerinim sensörün çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2. 3 Gerinim uygulandığında iletken kanalların çalışma prensibi

Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, gerinim uygulandıkça, kısa kanal yüzey alanı genişlerken uzun kanal yüzey alanı azalmıştır. Daralma direncin artmasıyla ilişkiliyken, genişleme direncin azalmasına neden oldu. Büzülme kanalları, dirençteki azalmayla dirençteki kazanımın dengelenmesini önlemek için daha uzun hale getirilmiştir. Bu, tek eksenli bir gerinim sensörünün ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

2.3. Gerinim Sensörün Üretimi

Gerinim sensörün üretim süreci bu bölümde anlatılmıştır. Bu süreç eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan eriyik yığıma modellemesi (EYM) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle üretilen esnek kalıp kullanılarak gerinim sensörünün üretim süreci tamamlanmıştır. EYM, eklemeli imalatın getirdiği yenilikçi potansiyeli keşfetmek için önemli bir araçtır ve birçok sektörde gelecekteki üretim süreçlerini dönüştürebilir. EYM yönteminin çalışma prensibi ve uygulanmasıyla ilgili detaylı bilgiler Bölüm 1.3.4’de verilmiştir.

Esnek kalıbın üretiminde bölüm bünyesinde bulunan EYM tabanlı bir 3D yazıcı olan ‘Zaxe Z1 Plus’ kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bu yazıcı, kullanıcı dostu bir arayüze sahip olup, çeşitli malzemelerle (PLA, ABS, PETG gibi) kullanılabilir. Bu malzemelerden bazıları polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), polietilen tereftalat glikol (PETG) ve termoplastik poliüretan (TPU) dır. Otomatik seviyeleme sistemi, yüksek kaliteli baskılar elde etmek için katman kalınlığını ayarlar. Ayrıca, geniş bir baskı hacmi sunar ve kablosuz bağlantı seçenekleriyle kullanıcıların rahatlığını artırır. Zaxe Z1 Plus, eğitim, prototipleme, hobi amaçlı kullanımlar gibi çeşitli alanlarda talep gören bir masaüstü 3D yazıcı modelidir.



Şekil 2. 4 EYM tabanlı Zaxe Z1 plus 3D yazıcı

Öncelikli hedefimiz, sensör tasarımını ve baskı ayarlarını en ince fonksiyonel sensörün başarıyla basılabileceği şekilde optimize etmektir. İletken yolların kesit alanının artırılması, uzadığında sensör olarak işlevsel kalmalarını sağlayacaktır. Ek olarak, algılama izlerinin boyutlarının, püskürtme ucu çapı gibi yazıcı spesifikasyonlarını hesaba katması gerekir; böylece izler aşırı veya eksik ekstrüzyon sorunları olmadan başarılı bir şekilde yazdırılabilir. Dilimleme yazılımından herhangi bir tutarsızlık veya kesintili

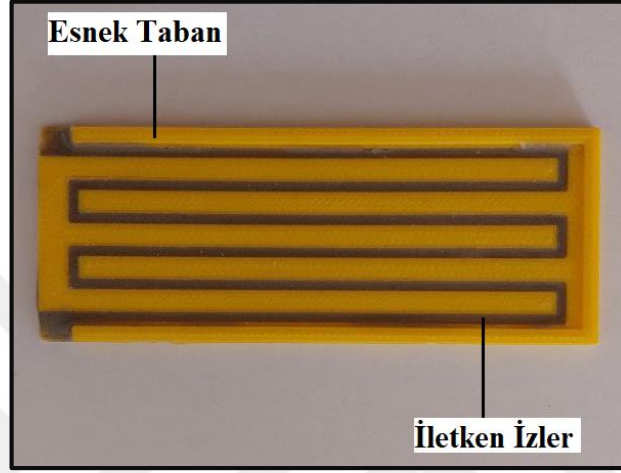
hareket olmaksızın düzgün sonuçlar elde etmek amacıyla, sensörün düzlemsel boyutları, nozul çapının tam katları olacak şekilde tasarlanmıştır; tüm dikey boyutlar ise baskı katmanı yüksekliği tamsayıların tam katları olarak seçilmiştir.

Gerinim sensörünü üretmek için kullanılan malzemeler Zaxe flex marka TPU tipi filament ve iletken gümüştür. Flex, plastik ve kauçuğun bir kombinasyonunu kullanan bir filamenttir. Flex filamentin ana avantajı, elastik özelliklere sahip esnek baskıların oluşturulmasıdır. SolidWorks yazılımı kullanılarak elde edilen gerinim sensörü modeli Şekil 2.2’de verilmiştir. Tasarım dosyasının 3D baskıda kullanılabilmesi için öncelikle dosyanın uygun bir biçime dönüştürülmesi gereklidir. Bu genellikle STL (Stereolitografi) veya OBJ (Wavefront) formatlarına dönüştürme işlemiyle yapılır. Bu formatlar, 3D baskı dilimleme yazılımlarının anlayabileceği ve işleyebileceği standart dosya formatlarıdır. Bu dönüşüm sürecinde, modelin geometrik bütünlüğünü korumak ve gerektiğinde detayları optimize etmek önemlidir. Bu adım, modeldeki hataların düzeltilmesi, duvar kalınlıklarının ayarlanması, destek yapılarının eklenmesi ve gerektiğinde boyutların ayarlanması gibi işlemleri içerir. Daha sonra, hazırlanan model 3D baskı dilimleme yazılımı kullanılarak dilimlenir. Bu adım, modelin katmanlar halinde ayrılması ve her katmanın baskı parametrelerinin (katman kalınlığı, hız, sıcaklık vb.) belirlenmesini içerir. Sonuç, her katmanın bir G-kod komutları dizisine dönüştürüldüğü bir dosyadır. Bu G-kod dosyası, 3D yazıcı tarafından işlenir ve fiziksel bir nesne oluşturmak için baskı işlemi gerçekleştirilir. Bu süreçte, 3D yazıcı, G-kod komutlarını kullanarak malzemenin katman katman biriktirilmesini, sıcaklık ve hareket kontrollerini gerçekleştirir. Bu adımlar, tasarım dosyasının 3D baskıda kullanılabilmesi için gereken sürecin ana hatlarını oluşturur.

Tablo 2. 1 Gerinim sensörünü üretmek için kullanılan yazıcı parametreleri

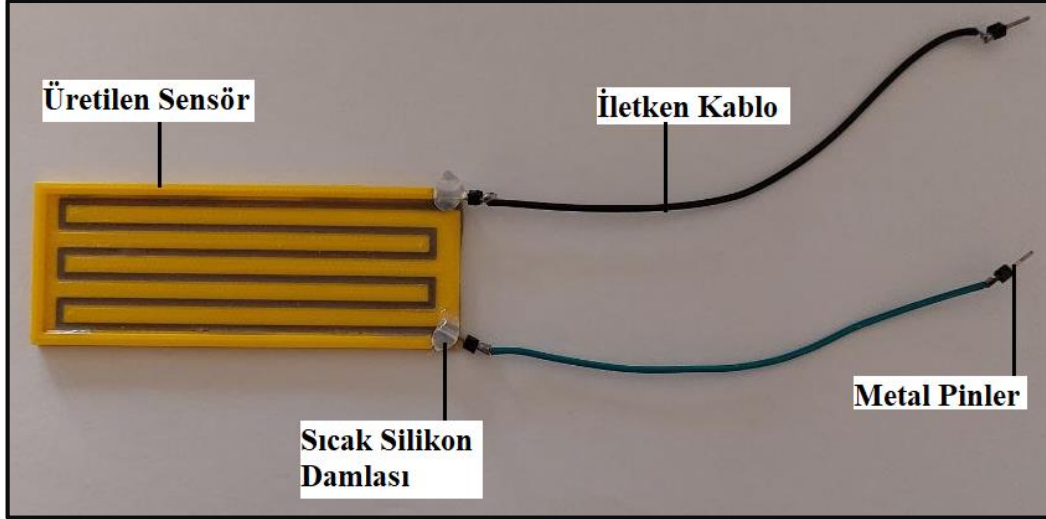
Parametre	Değer
Katman Yüksekliği	200 μ m
Dolgu Yoğunluğu	%80
Dolgu Tipi	Lines
Nozul Sıcaklığı	240
Tabla Sıcaklığı	80
Baskı Hızı	40 mm/s
Duvar Kalınlığı	2 mm

Üretim süreci tamamlanan gerinim sensörün görüntüsü Şekil 2.5’de verilmiştir. Sensörün ana yapısı sarı renk esnek filament malzemeden yapılırken; iletken kanalların içerisi gümüş malzeme ile doldurulmuştur. EYM yöntemiyle esnek taban üretildikten sonra, gümüş iletken yapışkan malzeme kalıba enjekte edildi. Enjeksiyon işlemi, gümüş malzemeyi enjekte etmek için bir iğneden oluşuyordu. Gerinim sensörün bütün kanalları doldurulduktan sonra, iki saat malzemenin kürlenmesi sağlandı. Kürlenme işleminin tamamlanmasıyla birlikte sensörün üretim süreci bitmiştir.



Şekil 2. 5 Üretimi tamamlanan gerinim sensörün görüntüsü

Üretilen gerinim sensörünü karakterize etmeye çalışırken karşılaşılan ilk zorluk, kararlı bir kablolama arayüzü oluşturmaktır. Algılama izlerinin yazdırılmasında kullanılan iletken gümüş malzemesi doğrudan bakır veya gümüş tellere lehimlenemez. Bu nedenle, sensörün direncini ölçebilmek için kabloların sensör terminallerine bağlanması gerekir. Ancak kabloları metal kelepçeler kullanarak takarken, sensörün ölçülen direnci çok kararsızdı ve teller hareket ettiğinde salınıyordu. Bu etki, iletken izlerin çok ince bir kalınlıkta basılmış olması nedeniyle, nispeten daha ağır kabloların sert kelepçelerle yol terminallerine bağlanması, tel hareket ettiğinde basılı izlerde titreşimlere neden olur ve bu da ölçülen okumaları bozar. Ayrıca metal kelepçeler esnek sensöre göre çok daha serttir, bu nedenle tekrar tekrar kullanımdan sonra sensör terminallerine kolayca zarar verebilirler. Bu sorunu çözmek için, kablo olarak düşük maliyetli iletken jumper kablo kullanılmıştır. Kablonun bir ucu sensör terminallerinin etrafına basıtçe sarılır ve sabitlemek için sıcak silikon uygulanır (Şekil 2.6). İletken kablonun diğer ucu yine metal bir pimmin etrafına sarılır ve sabitlenir. Bu, terminallere zarar vermeden veya kabloların ağırlığından sensör okumasını etkilemeden sensöre güvenli bir şekilde sabitlenebilen hafif ve esnek bir kabloyla sonuçlanır. Ölçülen sensör direnci artık kabloların hareketinden dolayı önemli ölçüde dalgalanmadı ve istikrarlı okumalar kaydedilebildi.



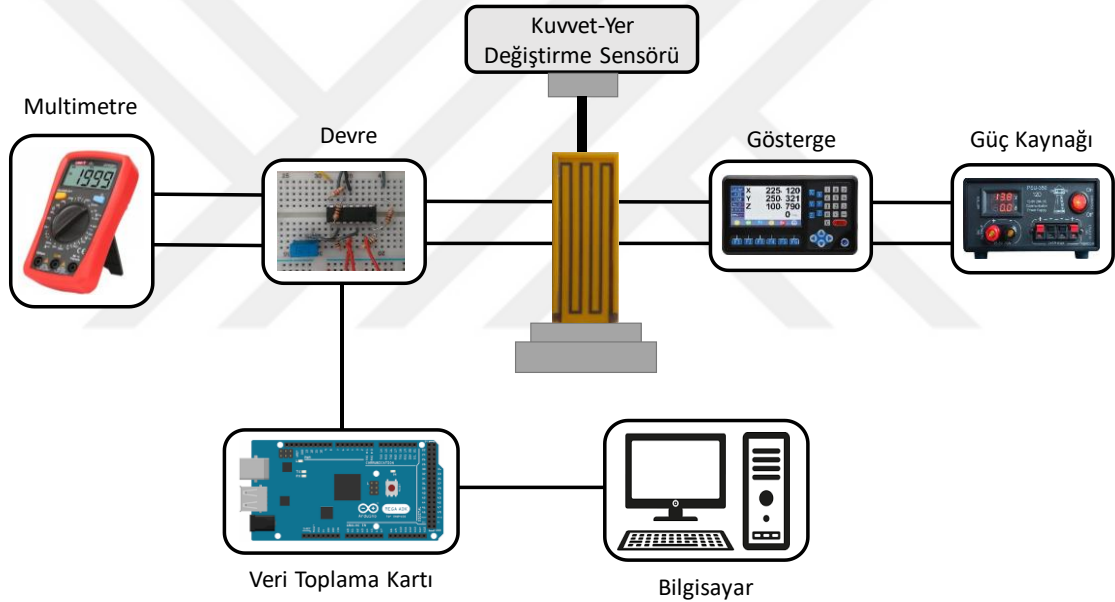
Şekil 2. 6 Üretilen gerinim sensörün, sıcak tutkal kullanılarak kablolanması

2.4. Gerinim Sensörün Karakterizasyonuna Yönelik Yaklaşım

Üretimi tamamlanan gerinim sensörünü karakterize etmek için kullanılan deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu diyagram, kuvvetölçer, lazer yer değiştirme sensörü ve multimetre cihazlarından oluşmaktadır. Kurulan deney düzeneği, gerinim sensöründe ortaya çıkan gerinim değerlerini ölçmek için kullanıldı. Bu işlem, sensöre bağlanan direnç boyunca sabit 5V gerilim uygulanarak gerçekleştirildi. Gerilim değişikliği ölçümünün doğruluğunu artırmak için 180 Ω değerinde direnç seçilmiştir. Sensörün direnç değeri oldukça düşüktü ve 180 Ω altındaki dirençlerde ısınma meydana gelmiştir. Deney sırasında ortaya çıkan gerilim düşümleri multimetre yardımıyla ölçülmüştür. Gerinim sensörü ilk olarak, bir kanca ile kuvvetölçer cihazına yerleştirildi. Sensörün stabil kalması sağlanarak multimetre cihazı gerilim düşüşünü ölçmek için sensörün bağlantı uçlarına takıldı. Daha sonra, deney düzeneği üzerindeki el çarkı kullanılarak sensöre kademeli olarak kuvvet uygulandı. Uygulanan kuvvet neticesinde ortaya çıkan gerilim düşüşleri sürekli değişikçe kuvvet, yer değiştirme ve gerilim için okumalar yapıldı.

Ohm yasası, ölçülen gerilim düşüşüne karşılık gelen gerinim sensörü boyunca dirençteki yaklaşık değişimi (ΔR) tahmin etmek için kullanıldı. Gerinim, ϵ , sensörün gerildiği uzunluğa, Δl , sensörün orijinal uzunluğuna, l_0 göre hesaplandı. Dirençteki değişim ΔR ve gerinim den, $\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ bir gerinim-direnç eğrisi oluşturuldu. Benzer şekilde, gerinim uygulandığında kuvvetin nasıl değiştiğini incelemek için bir a , F , ϵ (kuvvete karşı gerinim) eğrisi de yapıldı. Bütün bu veriler üzerinden gösterge faktörü hesaplamaları gerçekleştirildi.

İncelenen malzemenin elektriksel özellikleri araştırıldığında elektriksel ve mekanik karakteristikler arasında bir paralellik olduğu görülür. Uzunluk Δl kadar değiştiğinde ΔR 'lik bir değişim olur oluşur ve esneklik sınırları içinde Δl ile ΔR doğru orantılıdır. ΔR 'ye karşı Δl 'nin grafiği bir doğru çizgidir. Bu değerler normalize edildiğinde: $\frac{\Delta l}{l} \propto \frac{\Delta R}{R}$ elde edilir. Burada, $\Delta l/l$ malzemenin uğradığı **mekanik gerinme** ve $\Delta R/R$ de **elektriksel gerinmedir**. $\frac{\text{Elektriksel gerinme}}{\text{Mekanik gerinme}} = \text{Sabit oranı gösterge faktörü}$ olarak tanımlanır ve malzemedan bağımsızdır (birinci-derece yaklaşımda). Gösterge faktörü 2 olan 120Ω 'luk bir gerilme göstergesindeki %0.5'lik uzunluk değişimine karşılık gelen direnç değişimini hesapladığımızda: $R = 2 \times 120\Omega \times 0.005 = 1.2\Omega$. Gösterge faktörü 200 olan 120Ω 'luk bir gerilme göstergesindeki %0.5'lik uzunluk değişimine karşılık gelen direnç değişimini hesapladığımızda: $R = 200 \times 120\Omega \times 0.005 = 120\Omega$.



Şekil 2. 7 Sensörün karakterizasyonu için geliştirilen deney düzeneği

2.5. Çekme Testi Deneyi

Çekme testleri, akma durumunda gerinim sensörünün uzamasını incelemek için kullanılmıştır. Gerinim sensörü, çekme test cihazı kullanılarak test edilmiştir. Testten sonra gerinim %10'luk artışlarla arttırılmıştır. Gerinim sensörünün test edildiği maksimum ölçülen gerinim % 79 idi. Bu, numunenin boyutundan ve çekme test makinesinin sınırlamalarından kaynaklanıyordu. Veriler çekme test cihazından alınmış ve ölçülen kuvvet kullanılarak gerilme hesaplanmıştır. Gerilme daha sonra gerilme-gerinim eğrisi oluşturmak için gerinim ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, bu değerler kullanılarak elastite modülü hesaplandı.

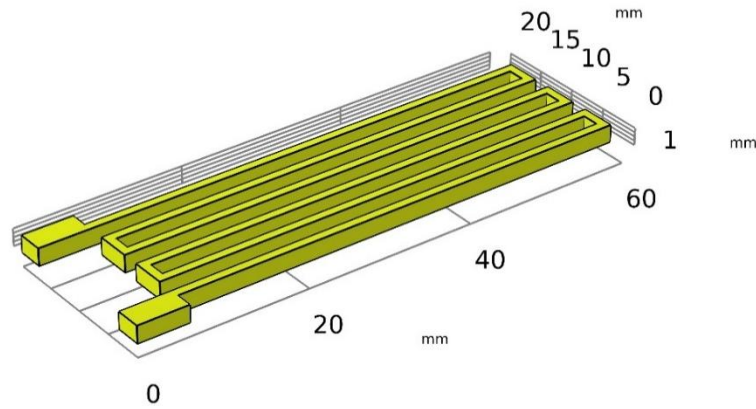
3. BULGULAR ve TARTIŞMA

Gerinim sensörün deneysel sonuçları bu bölümde verilmiştir. Deneysel süreç, direnç, gerilme, hassasiyet ve çekme testlerini kapsamaktadır. Gerinim sensörün canlılığı, gerinim değişimini ne kadar iyi ölçtüğü gözlemlenerek test edilmiştir. Sensörün hassasiyeti ise gösterge faktörü hesaplanarak incelenmiştir. Test sırasında ortaya çıkan kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve uygulanan çekme testleri de detaylandırılmıştır. COSMOL yazılımı, gerinim sensörün gerilme dağılımı ve uzamasını modellemek ve karşılaştırmak için kullanılmıştır. Buradan, gerilme birikimi ve uzama çıktılarının etkileri gözlemlenmiştir. Son olarak, mevcut sonuçların tartışması yapılarak geleceğe dair çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Önerilen Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulaması

Gerinim sensörünün 3 boyutlu sabit modelinin sonlu elemanlar analizi (SEA) COMSOL Multifizik yazılımı kullanılarak geliştirildi ve uygulandı. COMSOL, çoklu fiziksel alanların etkileşimini simüle etmek için kullanılan güçlü bir mühendislik simülasyon yazılımıdır. Elektromanyetizma, mekanik, akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi çeşitli fiziksel olayların aynı anda analiz edilmesine olanak tanır. Kullanıcılar, karmaşık mühendislik problemlerini modellemek, simüle etmek ve optimize etmek için COMSOL'un kullanıcı dostu arayüzünden ve geniş materyal veritabanından faydalanabilirler. Bu program, mühendislerin ve araştırmacıların gerçek dünya problemlerini çözmelerine ve yenilikçi çözümler geliştirmelerine olanak sağlar.

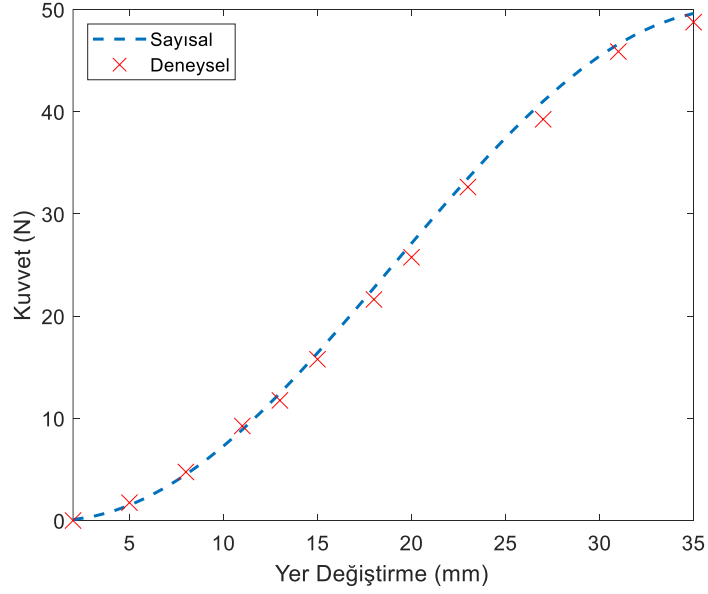
SEA amacıyla gerinim sensörünün geometrisi SolidWorks CAD yazılımı kullanılarak oluşturuldu ve daha sonra COMSOL yazılımına aktarıldı. Simülasyon süreci sırasında, birleşik yapısal mekanik ve AC/DC modülleri kullanılarak gerinim sensörünün elektrik ve mekanik alanlarının birleşik çoklu fizik modeli oluşturuldu. Daha sonra hem alt tabaka hem de sıvı iletken metal için gerekli tüm malzeme özellikleri COMSOL yazılımına aktarıldı. Sensörün alt tabakası esnek malzemedir (TPU) oluşurken sıvı iletken metal olarak gümüş malzeme kullanılmıştır. Malzemelerle ilgili detaylar Bölüm 2.3 de verilmiştir. Daha sonra yapıya ilişkin sınır koşulları tanımlandı. Burada, yapının çoklu fiziğini doğru bir şekilde temsil etmek için kanal duvarı ile iletken sıvı metal arasında etkileşimli bir sınır koşulu oluşturuldu. Bu sınır koşulunda, gerinim kuvveti nedeniyle kanalın deformasyonunun kanalın hacim değişikliğine yol açtığı varsayılmıştır.



Şekil 3. 1 Gerinim sensörün COMSOL yazılımda oluşturulan modeli

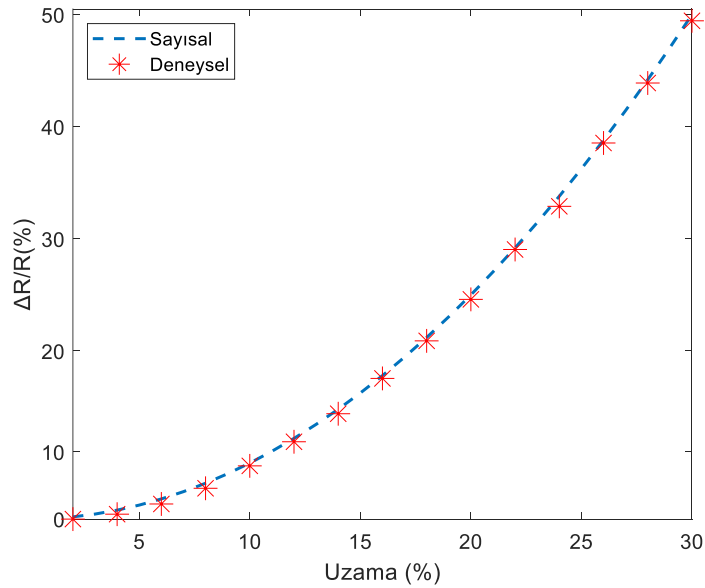
Hacim değişikliği iletken sıvı metalin iç basıncını etkiler ve sonuç olarak sıvı metal uygulanan sıkıştırmaya direnir ve kanal içindeki basıncı yeniden oluşturma eğilimi gösterir. Bir sonraki adımda, farklı gerinimlerdeki alt tabaka deformasyonu COMSOL yapısal mekanik modülünde sürekli olarak çözüldü ve deforme olmuş geometri, kanal boyunca bu deformasyona bağlı direnç değişimini hesaplamak için AC/DC modülüne aktarıldı. Farklı gerinim seviyelerinde alt tabaka deformasyonu hesaplandıktan sonra, deforme olmuş geometri yeniden örgülendi (mesh) ve örgülenmiş bir geometri olarak başka bir COMSOL bileşenine aktarıldı. Daha sonra sıvı metal kanalının iç hacmi izole edildi ve deforme olmuş kanalın elektrik direncini bulmak için AC/DC modülünde yeni bir alan olarak tanımlandı. Sıvı metalin elektriksel iletkenliği, $6.31E7$ (S/m) olarak atanmıştır. AC/DC modülünde sıvı metal kanalının iki tarafı boyunca direnci belirlemek için bir taraf toprak olarak kabul edilirken diğer taraf 1 A sabit akım kaynağına sahip bir terminale bağlanmıştır. Mesh oluşturma işleminde, hem substrat katı alanında hem de deforme olmuş sıvı metal alanında tetrahedral elemanlar kullanıldı. Mesh bağımsızlığı, TPU alanı için yapısal mekanik modülünde ve gümüş iletken alanı için AC/DC modülünde incelenmiştir.

COMSOL programından elde edilen simülasyon sonuçları deneysel olarak ölçülen verilere göre doğrulandı. Burada hem elektrik direnci hem de yer değiştirmeye karşı yüklemeye ilişkin model simülasyonları ölçülen verilerle karşılaştırılır. Bu amaçla öncelikle Şekil 2.7'de gösterilen deney düzeneği kullanılarak sensöre tek eksenli kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan kuvvet kademeli olarak 50 N'ye çıkarıldı. Eş zamanlı olarak, uygulanan kuvvetten kaynaklanan uzama yer değiştirme sensörü kullanılarak ölçüldü. Deney ve model simülasyonundan elde edilen sonuçlar Şekil 3.2 'de gösterilmektedir. Daha sonra, elektrik direncindeki değişiklikler (ΔR) ölçüldü ve nominal mühendislik gerilimi (ϵ), yüklemeye yönü boyunca sensörden ölçülen uzama kullanılarak hesaplandı.



Şekil 3. 2 Gerinim sensörün yer değiştirmeye karşı kuvvet verileri

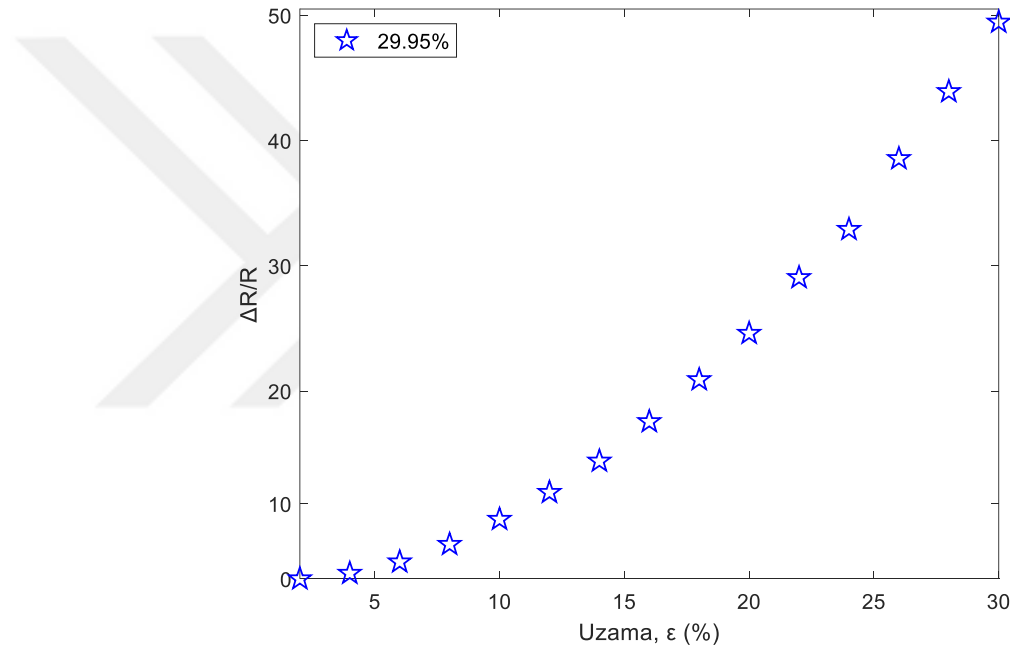
Şekil 3.3, elektrik direncindeki normalleştirilmiş ölçülen değişiklikleri, $\Delta R/R$ 'ye karşı nominal gerinim, ε 'yi göstermektedir. Şekil 3.2-3.3'den elde edilen sonuçlar, model simülasyonları ile ölçülen veriler arasında mükemmel bir uyum olduğunu göstermektedir. Sonuçlar ayrıca doğrusal olmayan etkilerin daha yüksek gerinim seviyelerinde belirgin hale geldiğini göstermektedir. Bu nedenle, bu çalışmada geliştirilen doğrusal olmayan model, gerinim sensörünün doğrusal olmayan davranışını yakalamak için gereklidir. Yaygın olarak kullanılan doğrusal basitleştirilmiş modellerin aksine, bu çalışmada geliştirilen doğrusal olmayan model, elektrik-mekanik çözücüyle birleştirilmiş doğrusal olmayan hiper elastik model nedeniyle sensörün tepkisini daha geniş bir gerinim seviyesi aralığında doğru bir şekilde tahmin edebilir.



Şekil 3. 3 Gerinim sensörün uzamaya karşı elektrik direnci değişimi

3.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları

Gerinim sensörü, gerinim sensörleri oluşturmak için EYM 3D baskının kullanımını araştırmak amacıyla üretilmiştir. Bu çalışmada, gerinim sensörünün etkinliği, ilk direnç, uzama ve gösterge faktörüne (GF) göre dirençteki değişim ölçülerek doğrulanmıştır. Bu ölçümler neticesinde sensörün hassasiyeti ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra gerinim sensörünün kuvvet uygulandığında ne kadar uzayabileceğini, ne zaman kopacağını ve kopma noktasında ne kadar kuvvetle karşılaşabileceğini belirlemek için çekme testi uygulanmıştır. Testler, Şekil 2.7’de özetlenen test tezgâhı kurulumu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4’de gerinim sensörü için uzama direnci eğrileri gösterilmiştir. Buradaki sensörün %29.95 uzadığı görülmektedir.



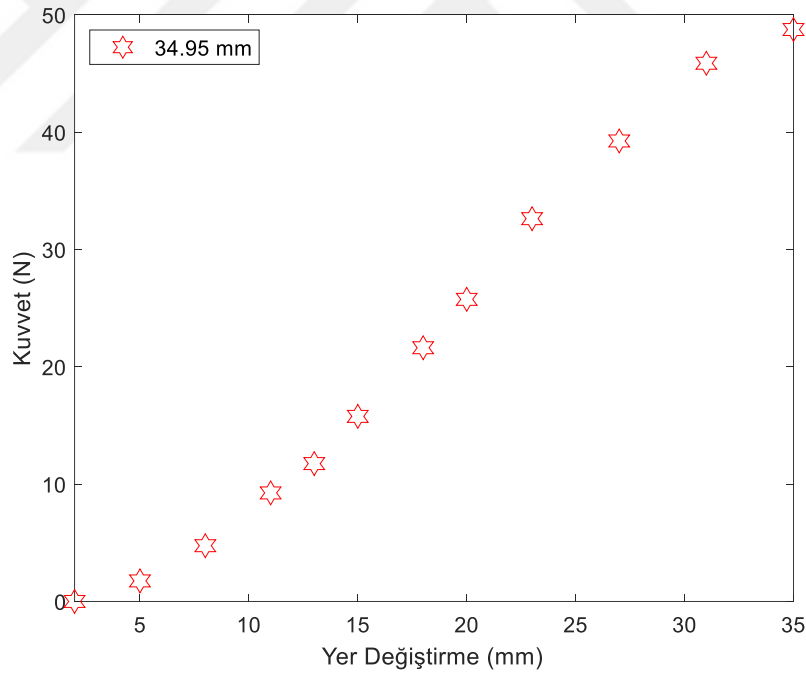
Şekil 3. 4 Gerinim sensörü için elektriksel direnç ve uzama eğrisi

Şekil 3.4’deki grafik incelendiğinde uzama ile direnç değişimi arasında doğrusala yakın bir ilişki olduğu görülmektedir. Sonuçlar genel olarak çok az histerezis gösterdi veya hiç göstermedi. Gerinim sensörünün hassasiyeti hesaplanan gösterge faktörüne bağlı olarak belirlenmiştir. Burada sensörün hassasiyeti, verilen gerilime yanıt olarak elektrik direncindeki göreceli değişiklik cinsinden ifade edilir, yani $\Delta R/R$. Gerinim sensörün maksimum uzadığı noktada elektriksel direnç değişimi 49.85 olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak gösterge faktörü 1.66 olarak hesaplanmıştır.

GF, hem direncin hem de uzamanın birden fazla farklı yönünden etkilenmiştir. İlk olarak, ilk direnç ile dirençteki değişim arasındaki ilişki vardı. Test boyunca, gerinim sensörü daha fazla gerildikçe başlangıç direncindeki değişiklikler fark edildi. Başlangıç

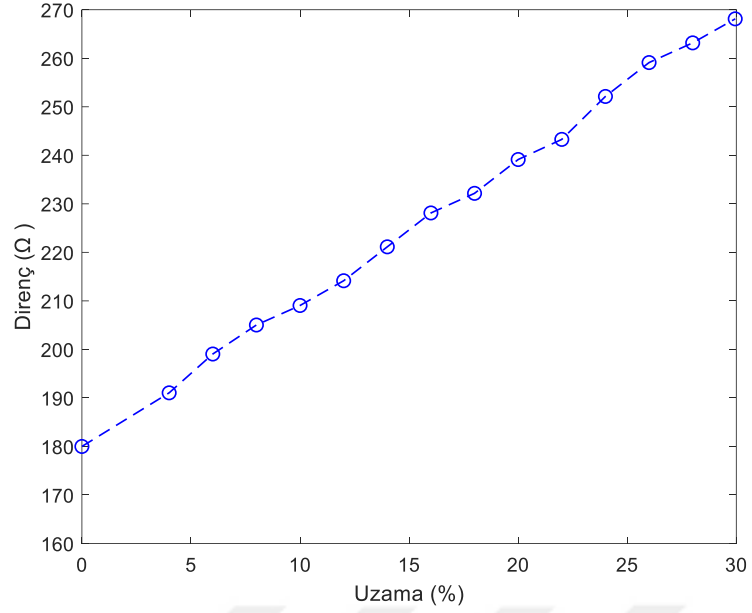
direncindeki bu değişim stres birikiminden kaynaklanmıştır. Gerinim sensörü gerildikçe, esnek tabanda stres birikmiştir. Biriken stres, taban daha yüksek uzamalarda gevşediğinden kanalların deforme olmasına neden olmuştur. Direncin değişme hızı yaklaşık olarak doğrusal ölçülmüştür. Başlangıç direnci ile dirençteki değişim arasındaki oran, uygulanan gerilmedeki artışlar arasında değişmiştir. Bu GF'de değişikliğe neden olmuştur.

Belirli bir uzama yüzdesini elde etmek için gereken yer değiştirmeyi belirlemek için başlangıç uzunluğu kullanıldığı için başlangıç uzunluğu da dikkate değerdi. Bu nedenle, gerilme sensörünün boyutundaki küçük değişiklik, gerinim sensörünün ne kadar yer değiştirdiği konusunda bir fark yaratacaktır. Direnç uzama testleri sırasında gerinim sensörü üzerindeki kuvvet değerleri de alınmıştır. Kuvvetin test sırasında nasıl değiştiğini incelemek için “kuvvet-yer değiştirme eğrisi” çizilmiştir. Gerinim sensörün kuvvete göre yer değiştirme sonuçları şekil 3.5’de verilmiştir. Test sırasında, yaklaşık 50 N yakın kuvvet ortaya çıkmıştır ve sensör üzerinde maksimum 34.95 mm yer değiştirme ölçülmüştür.



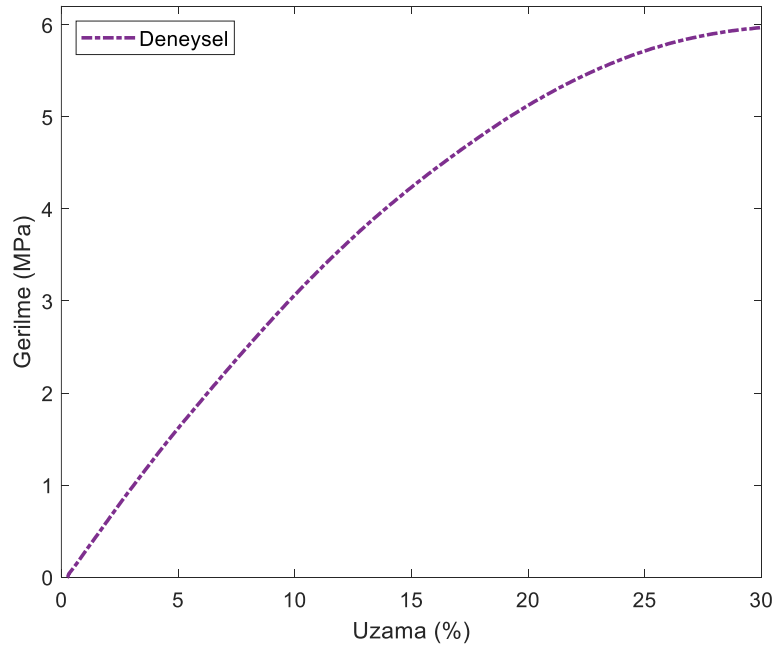
şekil 3. 5 Gerinim sensörü için kuvvet ve yer değiştirme eğrisi

Hesaplanan elektriksel direnç ve uzama eğrisi kullanılarak gerinim sensörü üzerindeki direnç değişimi hesaplanmıştır. Bu veriler şekil 3.6’da gösterilmiştir. Direnç değerleri yaklaşık %50 artış göstererek maksimum 269.35 Ω direnç değişimi sağlamıştır. Uzama miktarının artmasıyla direnç değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu net biçimde görülmektedir.



Şekil 3. 6 Gerinim sensörü için direnç-uzama eğrisi

Elastite modülünü ve gerilme birikiminin esnek taban üzerindeki etkilerini incelemek için çekme testleri de yapılmıştır. Şekil 3.7'de gerinim sensörü için çekme testinin sonuçları gösterilmiştir. Şekil 3.7 'de gerinim çıktısı % 0 ila % 30 aralığında meydana gelmiştir. Çekme dayanımı değeri 5.95 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu noktayı geçtikten sonra malzemede kopma meydana gelmiştir. % 30 uzamadan sonra, gerinim sensörü orijinal uzunluğuna geri dönmedi. Çekme testi yoluyla bulunan elastite modülü, üretici tarafından bildirilen elastite modülü ile yaklaşık olarak aynıydı.



Şekil 3. 7 3D baskılı TPU'nun ölçülen gerilme-uzama eğrisi

3.3. Tartışma

Bu tez çalışmasında sunulan 3D üretim teknolojisiyle üretilen gerinim sensörün, literatürdeki son teknoloji dirençli gerinim sensörleri ile kıyaslaması Tablo 3.2’de gösterilmiştir. Her ne kadar bu tez çalışmasında rapor edilen 3D baskılı gerinim sensörü, diğer teknolojiler kullanılarak üretilen dirençli tipteki gerinim sensörleriyle karşılaştırıldığında performansları iyi şekilde optimize edilmemiş olsa da. Tablo 3.1, karmaşık tasarımlar ve geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilecek çeşitli küçük ölçekli cihazlar üretmek için eklemeli imalatın diğer gelişmiş ve karmaşık tekniklerle rekabet etme potansiyelini göstermektedir. Tablo 3.1’de bildirilen diğer temsili tekniklerden farklı olarak, sensör yapısını doğrudan oluşturmak için eklemeli imalat yöntemiyle 3B baskının kullanımı oldukça basit ve anlaşılırdır. Üretimin basitliği ve karmaşık tasarımları benimseme yeteneği, eklemeli üretimi bu gerinim sensörlerin gerçekleştirilmesi için cazip bir yöntem haline getirmektedir. Bu çalışmanın, önerilen tasarımın optimizasyonundan ziyade ilk tasarımlara ve kavram kanıtı girişimlerine odaklandığını belirtmek önemlidir. 3D baskılı gerinim sensörünün performansını ve gösterge faktörü metriklerini geliştirmek için çeşitli iyileştirmeler yapılabilir.

Tablo 3. 1 Literatürden seçilen dirençli esnek gerinim sensörlerin karşılaştırılması

Yapılan Çalışmalar	Üretim Yöntemi	Gösterge Faktörü	Gerinim Seviyesi
Bu çalışma	Eklemeli üretim	1.66	%29.95
(Muth ve ark., 2014)	İletken bir mürekkebin elastomere gömülmesi	3.82	%400
(Park ve ark., 2012)	İletken sıvı ile doldurulmuş elastomer matrisinde kanalların katmanlı kalıplanması	3.93	%250
(Mofidian ve ark., 2020)	Eklemeli üretim	1.59	%25.9
(Amjadi ve ark., 2014)	Ecoflex katmanında karbon nanotüp ince film	2.57	%500
(Yamada ve ark., 2011)	PDMS substratı üzerinde karbon nanotüp ince film	0.82	%280
(Kang ve ark., 2014)	Platin tabakasının viskoelastik polimerin üzerine bırakılması	2000	%2
(Agarwala ve ark., 2017)	Mürekkep püskürtmeli baskı	50	%1
(Kong ve ark., 2014)	İletken kompozitlerin PDMS üzerinde mikro modellenmesi	5.53	%10

4. SONUÇLAR

4.1. Sonuçlar

Gerinim sensörleri, malzemelerdeki mekanik deformasyonu veya gerilmeyi tespit ederek ve ölçerek çeşitli mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynarlar. Bileşenlerin, yapıların veya malzemelerin maruz kaldığı gerilmeyi ölçerek, bu sensörler yapısal bütünlüğü değerlendirmek, potansiyel arızaları tespit etmek ve tasarımları verimlilik ve dayanıklılık için optimize etmek için değerli veriler sağlarlar. Bu tez çalışmasında, özgün tasarıma sahip bir gerinim sensörün modellenmesi, sonlu elemanlar analizi, üretimi ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Esnek gerinim sensörün tasarımında SolidWorks katı modelleme programı kullanılmıştır. Tek eksen tasarıma sahip olan sensörün üretiminde piyasada bulunan esnek filament ve eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan eriyik yığma modelleme (EYM) 3D yazıcı kullanılmıştır. Sensörün alt katmanı esnek malzemeden oluşurken iletken izler için gümüş malzeme kullanılmıştır. Gerinim sensörünün canlılığı, gerinimdeki değişikliklere karşı dirençteki değişiklikler, yani gösterge faktörü ile ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. Gerinim sensörü üretildi ve ölçüldü, 1.66 gösterge faktörü, yüksek doğrusalılık ve düşük histerezis ile yaklaşık %29.95 gerinim değeri gözlemlendi. Gerçek zamanlı deneylerin doğruluğunu ispatlamak için gerinim sensörün sonlu elemanlar analizi COMSOL programıyla gerçekleştirilmiştir. Sensörün deneysel sonuçlarının simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

EYM baskı tekniğini kullanarak karmaşık tasarımlar ve çeşitli sensör platformları üretme potansiyeli gösterilmiştir. Bununla birlikte, gerinim çıktısı, stres birikimi ve stres konsantrasyonu ile ilgili konular sınırlayıcı faktörlerdi. EYM prosesinin elastik tabanları oluşturma şekli, elyafların iç içe ve uygulanan gerilmeye göre bir açıda olacak şekilde meydana gelmiştir. Bu, bu liflerde kalıcı deformasyona neden olmuş ve gerilme birikimine neden olmak için gereken gerilimi azaltmıştır.

Bu gözlemler, katmanların desenlendirilmesi gerinim sensörünün gerilme tepkisini önemli ölçüde değiştirebileceğinden, 3D baskılı gerinim sensörlerinin oluşturulmasıyla oldukça ilgiliydi. Genel olarak, EYM 3D baskının, esnek gerinim sensörlerinin basit ve uygun maliyetli imalatına yönelik bir yöntem olarak potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir.

Bu araştırmanın başlıca katkıları şunlardır:

1. Esnek ve iletken malzeme kullanılarak eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan EYM ile gerinim sensörün üretimidir.
2. Gerinim sensörün sonlu elemanlar analizinin COMSOL yazılımıyla yapılmasıdır.
3. Kuvvet-yer değiştirmeye karşı sensördeki direnç değişiminin ve gerinim miktarlarının ölçülmesidir.

4.2. Gelecekte Yapılacaklar

Gelecekteki çalışmalar, yatay genişleme, hız ve sıcaklık gibi 3D baskı ayarlarının kanal köşelerindeki etkisini araştırmaya odaklanmalıdır. Yuvarlatılmış şekiller uygulayarak ve keskin kenarlardan kaçınarak gerinim konsantrasyonunu azaltmak, sensörün maksimum gerinme seviyelerini de iyileştirebilir. Ayrıca, gerinim sensörün üretiminde farklı malzeme ve tekniklerin test edilmesi planlanmaktadır. Böylelikle sensörün metrikleri iyileştirilebilir. Son olarak, gerinim sensörün gerçek zamanlı olarak esnek ve yumuşak bir sistem üzerinde uygulaması yapılarak doğrusallığı ve kararlılığı test edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdulhameed, O., Al-Ahmari, A., Ameen, W., Mian, S.H. 2019. Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications, *Advances in Mechanical Engineering*, 11 (2), 1687814018822880.
- Agarwala, S., Goh, G.L., Yap, Y.L., Goh, G.D., Yu, H., Yeong, W.Y., Tran, T. 2017. Development of bendable strain sensor with embedded microchannels using 3D printing, *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 593-599.
- Ahmad, N., Wong, Y.H., Ghazali, N. 2022. A systematic review of fused deposition modeling process parameters, *Soft Science*, 2 (3), 11.
- Amjadi, M., Pichitpajongkit, A., Lee, S., Ryu, S., Park, I. 2014. Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire–elastomer nanocomposite, *ACS nano*, 8 (5), 5154-5163.
- Attaran, M. 2017. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Business horizons*, 60 (5), 677-688.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., Chryssolouris, G. 2016. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405.
- Cai, Y., Shen, J., Ge, G., Zhang, Y., Jin, W., Huang, W., Shao, J., Yang, J., Dong, X. 2018. Stretchable Ti₃C₂T_x MXene/carbon nanotube composite based strain sensor with ultrahigh sensitivity and tunable sensing range, *ACS nano*, 12 (1), 56-62.
- Campanella, C.E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A., Passaro, V.M. 2018. Fibre Bragg grating based strain sensors: Review of technology and applications, *Sensors*, 18 (9), 3115.
- Chandra, R., Zhou, H., Balasingham, I., Narayanan, R.M. 2015. On the opportunities and challenges in microwave medical sensing and imaging, *IEEE transactions on biomedical engineering*, 62 (7), 1667-1682.
- Chen, J., Yu, Q., Cui, X., Dong, M., Zhang, J., Wang, C., Fan, J., Zhu, Y., Guo, Z. 2019. An overview of stretchable strain sensors from conductive polymer nanocomposites, *Journal of Materials Chemistry C*, 7 (38), 11710-11730.
- Duan, L., D'hooge, D.R., Cardon, L. 2020. Recent progress on flexible and stretchable piezoresistive strain sensors: From design to application, *Progress in Materials Science*, 114, 100617.
- Elgeneidy, K., Neumann, G., Jackson, M., Lohse, N. 2018. Directly printable flexible strain sensors for bending and contact feedback of soft actuators, *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 2.
- Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A. 2019. On coating techniques for surface protection: A review, *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 3 (1), 28.
- Gao, Y., Li, Q., Wu, R., Sha, J., Lu, Y., Xuan, F. 2019. Laser direct writing of ultrahigh sensitive SiC-based strain sensor arrays on elastomer toward electronic skins, *Advanced Functional Materials*, 29 (2), 1806786.

- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M. 2021. Development of additive manufacturing technology, *Additive manufacturing technologies*, 23-51.
- Han, S.T., Peng, H., Sun, Q., Venkatesh, S., Chung, K.S., Lau, S.C., Zhou, Y., Roy, V. 2017. An overview of the development of flexible sensors, *Advanced materials*, 29 (33), 1700375.
- Hehr, A., Norfolk, M., Wenning, J., Sheridan, J., Leser, P., Leser, P., Newman, J.A. 2018. Integrating fiber optic strain sensors into metal using ultrasonic additive manufacturing, *Jom*, 70, 315-320.
- Hossain, M.S., Gonzalez, J.A., Hernandez, R.M., Shuvo, M.A.I., Mireles, J., Choudhuri, A., Lin, Y., Wicker, R.B. 2016. Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology, *Additive Manufacturing*, 10, 58-66.
- Huang, Y., Fan, X., Chen, S.C., Zhao, N. 2019. Emerging technologies of flexible pressure sensors: materials, modeling, devices, and manufacturing, *Advanced functional materials*, 29 (12), 1808509.
- Jayathilaka, W.A.D.M., Qi, K., Qin, Y., Chinnappan, A., Serrano-García, W., Baskar, C., Wang, H., He, J., Cui, S., Thomas, S.W. 2019. Significance of nanomaterials in wearables: a review on wearable actuators and sensors, *Advanced Materials*, 31 (7), 1805921.
- Kang, D., Pikhitsa, P.V., Choi, Y.W., Lee, C., Shin, S.S., Piao, L., Park, B., Suh, K.-Y., Kim, T.-i., Choi, M. 2014. Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system, *Nature*, 516 (7530), 222-226.
- Khosravani, M.R., Nasiri, S. 2020. Injection molding manufacturing process: Review of case-based reasoning applications, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 847-864.
- Kong, J.-H., Jang, N.-S., Kim, S.-H., Kim, J.-M. 2014. Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors, *Carbon*, 77, 199-207.
- Lanzolla, A.M.L., Attivissimo, F., Percoco, G., Ragolia, M.A., Stano, G., Di Nisio, A. 2022. Additive manufacturing for sensors: Piezoresistive strain gauge with temperature compensation, *Applied Sciences*, 12 (17), 8607.
- Le, T., Song, B., Liu, Q., Bahr, R.A., Moscato, S., Wong, C.-P., Tentzeris, M.M., 2015, A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design, *2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, IEEE, 981-986.
- Lee, J., Kim, S., Lee, J., Yang, D., Park, B.C., Ryu, S., Park, I. 2014. A stretchable strain sensor based on a metal nanoparticle thin film for human motion detection, *Nanoscale*, 6 (20), 11932-11939.
- Lehmhus, D., Aumund-Kopp, C., Petzoldt, F., Godlinski, D., Haberkorn, A., Zöllmer, V., Busse, M. 2016. Customized smartness: a survey on links between additive manufacturing and sensor integration, *Procedia Technology*, 26, 284-301.
- Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., Shi, G., Blackburn, J. 2019. Progress in additive manufacturing on new materials: A review, *Journal of Materials Science & Technology*, 35 (2), 242-269.

- Lim, S., Che Ab Rahman, A., Qi, X., Kim, H., Lee, B.-J., Kim, S.H., Hwang, B. 2023. Highly Efficient 3D-Printed Graphene Strain Sensors Using Fused Deposition Modeling with Filament Deposition Techniques, *Journal of Natural Fibers*, 20 (2), 2276723.
- Liu, C.-X., Choi, J.-W. 2009. Patterning conductive PDMS nanocomposite in an elastomer using microcontact printing, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19 (8), 085019.
- Liu, H., Zhang, H., Han, W., Lin, H., Li, R., Zhu, J., Huang, W. 2021. 3D printed flexible strain sensors: from printing to devices and signals, *Advanced Materials*, 33 (8), 2004782.
- Ma, Z., Li, H., Jing, X., Liu, Y., Mi, H.-Y. 2021. Recent advancements in self-healing composite elastomers for flexible strain sensors: Materials, healing systems, and features, *Sensors and Actuators A: Physical*, 329, 112800.
- Maurizi, M., Slavič, J., Cianetti, F., Jerman, M., Valentinčič, J., Lebar, A., Boltežar, M. 2019. Dynamic measurements using FDM 3D-printed embedded strain sensors, *Sensors*, 19 (12), 2661.
- Mofidian, S.M., Davani, S., Momeni, K., Bardaweel, H. 2020. 3D-Printed Strain Sensors: Electro-Mechanical Simulation and Design Analysis Using Nonlinear Material Model and Experimental Investigation, *IEEE Sensors Journal*, 21 (2), 1675-1685.
- Mohamed, O.A., Masood, S.H., Bhowmik, J.L. 2015. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in manufacturing*, 3, 42-53.
- Munasinghe, N., Woods, M., Miles, L., Paul, G., 2019, 3-D printed strain sensor for structural health monitoring, *2019 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, IEEE, 275-280.
- Muth, J.T., Vogt, D.M., Truby, R.L., Mengüç, Y., Kolesky, D.B., Wood, R.J., Lewis, J.A. 2014. Embedded 3D printing of strain sensors within highly stretchable elastomers, *Advanced materials*, 26 (36), 6307-6312.
- Park, J.Y., Lee, W.J., Nam, H.J., Choa, S.-H. 2018. Technology of stretchable interconnector and strain sensors for stretchable electronics, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 25 (4), 25-34.
- Park, Y.-L., Chen, B.-R., Wood, R.J. 2012. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors, *IEEE Sensors journal*, 12 (8), 2711-2718.
- Prakash, K.S., Nancharaih, T., Rao, V.S. 2018. Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2), 3873-3882.
- Rajan, K., Samykano, M., Kadirgama, K., Harun, W.S.W., Rahman, M.M. 2022. Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120 (3-4), 1531-1570.
- Rao, P.K., Liu, J., Roberson, D., Kong, Z., Williams, C. 2015. Online real-time quality monitoring in additive manufacturing processes using heterogeneous sensors, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137 (6), 061007.

- Salmi, M. 2021. Additive manufacturing processes in medical applications, *Materials*, 14 (1), 191.
- Sheoran, A.J., Kumar, H. 2020. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research, *Materials Today: Proceedings*, 21, 1659-1672.
- Stano, G., Di Nisio, A., Lanzolla, A., Percoco, G. 2020. Additive manufacturing and characterization of a load cell with embedded strain gauges, *Precision Engineering*, 62, 113-120.
- Strong, D., Kay, M., Conner, B., Wakefield, T., Manogharan, G. 2018. Hybrid manufacturing—integrating traditional manufacturers with additive manufacturing (AM) supply chain, *Additive Manufacturing*, 21, 159-173.
- Tricoli, A., Nasiri, N., De, S. 2017. Wearable and miniaturized sensor technologies for personalized and preventive medicine, *Advanced Functional Materials*, 27 (15), 1605271.
- Ulkir, O., Akgun, G. 2023. Predicting and optimising the surface roughness of additive manufactured parts using an artificial neural network model and genetic algorithm, *Science and Technology of Welding and Joining*, 1-10.
- Vayre, B., Vignat, F., Villeneuve, F. 2012. Designing for additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 3, 632-637.
- Wang, C., Wu, R., Wang, L., Wang, X. 2024. Multifunctional flexible graphene oxide/bacterial cellulose composite paper platforms for realtime monitoring sweat and strain in wearable devices, *Chemical Engineering Journal*, 481, 148390.
- Wang, Z., Chen, J., Cong, Y., Zhang, H., Xu, T., Nie, L., Fu, J. 2018. Ultrastretchable strain sensors and arrays with high sensitivity and linearity based on super tough conductive hydrogels, *Chemistry of Materials*, 30 (21), 8062-8069.
- Yamada, T., Hayamizu, Y., Yamamoto, Y., Yomogida, Y., Izadi-Najafabadi, A., Futaba, D.N., Hata, K. 2011. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection, *Nature nanotechnology*, 6 (5), 296-301.
- Yin, B., Liu, X., Gao, H., Fu, T., Yao, J. 2018. Bioinspired and bristled microparticles for ultrasensitive pressure and strain sensors, *Nature communications*, 9 (1), 5161.
- Zhang, Y., Wu, L., Zou, M., Zhang, L., Song, Y. 2022. Suppressing the step effect of 3D printing for constructing contact lenses, *Advanced Materials*, 34 (4), 2107249.
- Zhao, J., Wang, G., Yang, R., Lu, X., Cheng, M., He, C., Xie, G., Meng, J., Shi, D., Zhang, G. 2015. Tunable piezoresistivity of nanographene films for strain sensing, *ACS nano*, 9 (2), 1622-1629.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şeyhmus GÜNEŞ

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mardin Anadolu Lisesi, Artuklu, MARDİN	2008
Üniversite	: Yıldız Teknik Üniversitesi , Beşiktaş, İSTANBUL	2013
Yüksek Lisans :		
Doktora :		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2015	Çardak Hava Meydan Komutanlığı	Yedek Subay
2020-	Varto Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	Elektrik Öğretmeni

UZMANLIK ALANI

- Elektrik Elektronik Teknolojileri

YABANCI DİLLER

- YDS İngilizce – 75 (2019)

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Gunes, S., Ulkir, O., & Kuncan, M. (2024). Application of artificial neural network to evaluation of dimensional accuracy of 3D-printed polylactic acid parts. *Journal of Polymer Science*.