



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**BİYOMALZEME ÜRETİMİ İÇİN KULLANILABİLECEK 4
BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI**

YUNUS KARTAL

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Memik Taylan DAŞ**

KIRIKKALE-2023

YUNUS KARTAL tarafından hazırlanan “BİYOMALZEME ÜRETİMİ İÇİN KULLANILABİLECEK 4 BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Memik Taylan DAŞ

Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan: Prof. Dr. Osman BİCAN

Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye: Dr. Öğr. Üy. Masoud LATIFI-NAVID

Mekatronik Mühendisliği
Anabilim Dalı, Türk Hava Kurumu
Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Kürşad GÖV

Havacılık ve Uzay Bilimleri
Anabilim Dalı, Gaziantep
Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üy. Alemdar ONGUN

Makine Mühendisliği Anabilim
Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 04/07/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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

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

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

YUNUS KARTAL

ÖZET

BİYOMALZEME ÜRETİMİ İÇİN KULLANILABİLECEK 4 BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE İMALATI

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora

Danışman: Doç. Dr. Memik Taylan DAŞ

TEMMUZ 2023, 88 sayfa

Bu tez çalışmasında biyoyumlu malzemelerin üretimi için alışlagelmiş kartezyen eksenlerinin haricinde tablada bulunan ve eksenini etrafında dönen dördüncü eksene sahip, nesnelere ultraviyole (UV) enerjisi ile kürleyebilen, dört boyutlu (4D) eklemeli imalat cihazı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda çeşitli mekanik ve elektronik aksesuar veya bileşenlerin teorik ve teknik detayları verilmiştir. 4D eklemeli imalat cihazı nesnelere özelliklerinin atmosfer koşullarından etkilenmesini engellemek amacıyla atmosferden yalıtılmış bir ortamda çalışmaktadır. 4D eklemeli imalat cihazında var olan dördüncü eksen ile hem döner kaplama (spin coating) hem de imalata esneklik kazandırılması amaçlanmıştır. 4D eklemeli imalat cihazı kullanılarak ultraviyole (UV) ışın altında poli(2-hidroksietil metakrilat) üretilmiş ve mekanik özellikleri, incelenmiştir. 4D eklemeli imalat cihazında üretilen numunelerden elde edilen sonuçların daha anlamlı olması için, sonuçlar alışlagelmiş 3D kartezyen eksenlere sahip cihazda üretilen numune ile karşılaştırılmıştır. 4D eklemeli imalat cihazında üretilen numunenin çekme dayanımının %11,53 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Üretilen polihidroksietilmetakrilatın (pHEMA) istenilen geometriyi elde etmek amacıyla polivinil alkol (PVA) kalıp malzemesi kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dört boyutlu eklemeli imalat, biyomalzeme, UV ışın ile kürleme, fotopolimerizasyon.

ABSTRACT

DESIGN AND MANUFACTURING OF 4D PRINTER THAT CAN BE USED FOR BIOMATERIALS PRODUCTION

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, PhD

Supervisor: Doç. Dr. Memik Taylan DAŞ

July 2023, 88 pages

In this thesis, a four-dimensional (4D) additive manufacturing device with a fourth axis rotating around its axis apart from the usual Cartesian axes for the production of biocompatible materials was designed and manufactured. In this context, theoretical and technical details of various mechanical and electronic accessories or components are given. The 4D additive manufacturing device works in an environment isolated from the atmosphere in order to prevent the properties of materials from being affected by atmospheric conditions. The fourth axis of the 4D additive manufacturing device used in the study is aimed at providing flexibility to both spin coating and manufacturing. For the verification process of device, poly(2-hydroxyethyl methacrylate) was produced under ultraviolet (UV) light by using the 4D additive manufacturing device, and its mechanical properties were examined. For the results obtained from the samples produced in the 4D additive manufacturing device to be more meaningful, the results were compared with the sample produced in the device with the 3D conventional cartesian axes. The tensile strength of the sample produced in the 4D additive manufacturing device is 11,53% higher. In order to obtain the desired geometry of the Polyhydroxyethylmethacrylate (pHEMA) produced, polyvinyl alcohol (PVA) mold material was used.

Keywords: Four-dimensional additive manufacturing, biomaterials, UV curing, photopolymerization.

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım esnasında, yardım ve katkılarıyla bana desteklerini esirgemeyen, kariyerimde bana yol gösteren ve bu günlere gelmemi sağlayan, danışman hocam Doç. Dr. Memik Taylan DAŞ'a sonsuz teőekkürlerimi sunuyorum. Desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üy. Alemdar ONGUN hocalarıma ve değerli mesai arkadaşım Arş. Gör. Türker AKKOYUNLU'ya tezin yürütölmesi aşamasında vermiő oldukları desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan canım annem, babam ve kardeőlerime sonsuz teşekkür ederim.

Bu alışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiőtir. Proje numarası 2022/36.

Bu alışma TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) tarafından desteklenmiőtir. Proje numarası 123M213.

Bu doktora çalışmasını destekleyen TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB) ve Kırıkkale Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2. Eklemeli İmalat için Literatür Araştırması	5
1.3. Biyoyumlu Malzemeler İçin Literatür Araştırması	7
1.3.1. Biyoyumlu Nesnelerin Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi.....	9
1.3.2. Biyoyumlu Nesneler İçin Örnek Üretim Yöntemi	24
2. MATERYAL ve METOD	27
2.1. Materyaller.....	27
2.1.1. Kimyasallar	27
2.1.2. Cihazlar	27
2.1.2.1. PVA Kalıpların Üretilmesi.....	29
2.1.2.2. Dönerek Kaplama Cihazı (Spin Coating) Tasarımı	30
2.1.2.3. Kapalı Ortam Koşullarının Oluşturulması	32
2.1.2.4. Dozajlama Ünitesi Tasarımı	34
2.1.2.5. Kapalı Ortam Koşullarının Kontrolü.....	36
2.1.2.6. pHEMA Karıştırma İşlemi	38
2.2. Metod.....	38
2.2.1. pHEMA İçerikli Yapay Aort Üretimi	38
2.2.2. pHEMA İçerikli Yapay Aort Karakterizasyonu	40
2.2.2.1. pHEMA Kristal Yapı Karakterizasyonu	40
2.2.2.2. pHEMA Fizikokimyasal Analizleri	40

3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	42
3.1. Dört Eksenli Eklemeli İmalat Cihazında Yapay Aort Üretimi.....	42
3.2. pHEMA İçeriğinin Belirlenmesi	46
3.3. Fizikokimyasal Analiz.....	49
3.3.1. Mekanik Testler	49
3.3.1.1. Dayanımın Belirlenmesi.....	49
3.3.1.2. Mekanik Özelliklere Bağlı Üretim Süresinin Belirlenmesi	53
3.3.2. Biyodegradasyon Etkinliği	56
3.3.3. Yapısal Karakterizasyon	58
3.3.3.1. Yüzey özellikleri	58
3.3.3.2. İç Yapı Analizi	59
4. SONUÇLAR.....	61
KAYNAKLAR	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat alanında incelenen makaleler ve özellikleri.....	7
Çizelge 1.2. UV ışını ile kütleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri.....	20
Çizelge 1.3. Aerosol jet printing yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri.....	22
Çizelge 1.4 Microplotter yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri.....	23
Çizelge 2.1. DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası	32
Çizelge 2.2. pHEMA film kompozisyonu.....	39
Çizelge 2.3. Kütleme işlem süresi.....	40
Çizelge 3.1. pHEMA film kompozisyonu.....	42
Çizelge 3.2. pHEMA polimerlerinin mekanik verileri.....	50
Çizelge 3.3. pHEMA/50AIBN/10EDGMA mekanik özellikleri	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Zhou Z., vd. üretim şeması (Zhou vd., 2021)	24
Şekil 1.2. Annabestani M. vd., üretim basamakları (Annabestani vd., 2021).....	25
Şekil 2.1. 4D eklemeli imalat cihazının a. dış, b. iç görüntüsü.....	28
Şekil 2.2. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen PVA kalıp	29
Şekil 2.3. Saf suyun içerisindeki pHEMA numunesini görüntüsü	29
Şekil 2.4. Dönerek kaplama (spin coating) cihazı teknik görünüşleri	30
Şekil 2.5. Çalışma kapsamında tasarlanan ve üretilen dönerek kaplama cihazı	31
Şekil 2.6. a. Montajı tamamlanan cihazın dış görüntüsü b. Montajı tamamlanan cihazın iç görüntüsü	33
Şekil 2.7. a. Dozajlama ünitesi başlığının teknik detayları, b. Dozajlama ünitesi başlığının mürekkep malzeme serimi anındaki görüntüsü.....	35
Şekil 2.8. Dozajlama sisteminin görüntüsü.....	36
Şekil 2.9 a. Sıcaklık ve nem sensörünün şeması. b. Sıcaklık ve nem ölçer şemasına uygun olarak üretilen sıcaklık ve nem ölçüm cihazı.	37
Şekil 2.10. Manyetik ısıtıcı karıştırıcı.....	38
Şekil 2.11. Yapay aort üretiminin şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.1. Mürekkep malzemelerin hazırlanması.....	43
Şekil 3.2. Dört eksenli imalat cihazında PVA kalıp içerisindeki dozajlama işlemi... 43	
Şekil 3.3. Üretim görüntüsü	44
Şekil 3.4. PVA numunesinin çözünmesi işlemi	45
Şekil 3.5. Yapay aort geometrisine sahip pHEMA polimerleri	46
Şekil 3.6. Üretilen ve PVA çözünmesi için saf suda bekletilen polimerler	47
Şekil 3.7. Üretilen sekiz farklı bileşimdeki pHEMA polimerleri	48
Şekil 3.8. pHEMA/50AIBN/200EDGMA görüntüsü	49
Şekil 3.9. Çekme testi örneği ve kopma anının fotoğrafı.....	50
Şekil 3.10. pHEMA numunelerin çekme dayanımı	51

Şekil 3.11. pHEMA numunelerin çekme dayanımı	52
Şekil 3.12. Saf suda bekletilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA	54
Şekil 3.13. Çözünme işleminden sonra pHEMA/50AIBN/10EDGMA.....	54
Şekil 3.14. pHEMA/50AIBN/10EDGMA mekanik özellikleri	55
Şekil 3.15. Degradasyonu incelenen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numuneler.....	56
Şekil 3.16. Fosfat tamponlu içeren çözeltide bekletilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numuneler.....	57
Şekil 3.17. pHEMA/50AIBN/10EDGMA filmlerinin hidrolitik degradasyonu	58
Şekil 3.18. pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin SEM görüntüleri.....	59
Şekil 3.19. pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin X-ışını kırınım deseni	60



SİMGELER DİZİNİ

°: Derece

μ: Mikron



KISALTMALAR DİZİNİ

UV: Ultraviyoleet

4D: Dört boyutlu

pHEMA: Polihidroksietilmetakrilat

SEM: taramalı elektron mikroskopisi,

XRD: X-ışını difraksiyonu

CAD: Bilgisayar destekli tasarım

EİY: Eklemeli imalat yöntemi

dak: Dakika

ATRP: atom transfer radikal polimerizasyon

mL: mililitre

1.GİRİŞ

Gelişen ve de değişen teknolojik atılımlar, yeniliği birçok alanda vazgeçilmez hale getirmiştir. Gerçekleşen yeniliklerden biri de hiç kuşkusuz imalat sürecinde meydana gelmiştir. Eklemeli imalat yöntemleri en önemlilerinden birisidir. Eklemeli imalat yöntemi (EİY) genel anlamda, nesnelere, geleneksel imalat yöntemleri kullanılmaksızın, tabaka tabaka birbiri üzerine eklenmesiyle meydana gelen üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Kalaycıoğlu vd., 2022, Gebel vd., 2021).

Eklemeli imalat yöntemi üstün mekanik özellikler, az alet gereksinimi (Öksüzcan vd., 2022), karmaşık formlardaki yapıların kısa sürede ve kolay üretilebilmesi, farklı özelliklerdeki malzeme gruplarının aynı anda kullanımı gibi öne çıkan avantajları nedeniyle imalat işlemlerinde tercih edilmektedir. Örnek verilecek olursa, medikal sektöründe eklemeli imalat işlemleri cerrahi operasyon sürelerini kısaltması, daha ergonomik ve estetik sonuçların elde edilmesi ve düşük seviyede implant reddi gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir (Gebel vd., 2021). Eklemeli imalat yöntemleri sahip oldukları avantajlar nedeniyle söz konusu sektörlere ek olarak esnek tabanlı algılayıcılar, hafıza kartları, esnek elektrik pilleri ve biyoyumlu nesne üretiminde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat işlemleri birçok avantaja sahip olmalarına karşı düşük yüzey kalitesi ve mekanik özellikler gibi dezavantajları da barındırmaktadır. Tabakaların birbiri üstüne serilerek nesnelere üretimi prensibine dayanan eklemeli imalat yönteminde serilen tabakalar arasındaki birleşme bölgeleri yüzey kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Düşük mekanik özellikler ise ani ısınma ve soğuma sebebiyle malzemenin iç yapısında oluşan gerilmelerden kaynaklandığı gibi tabakaların birbirine yapışmasından da kaynaklanabilmektedir (Aycan vd., 2019).

Eklemeli imalat yöntemlerini altı grupta sınıflandırmak mümkündür. Bunlar;

- Malzeme ekstrüzyonu (material extrusion)
- Fotopolimerizasyon (photopolimerization)
- Malzeme püskürtme (material jetting)

- Toz yatağı füzyonu (powder bed fusion)
- Bağlayıcı püskürtme (binder jetting-bj)
- Tabaka laminasyonu (sheet lamination)

Bu yöntemlerden;

Malzeme ekstrüzyonu ile üretim yazıcı teknolojisi içerisinde gelişen en son yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde hammadde sıcak nozullardan geçerken eritilir ve hammaddeyi bilgisayar yazılımında belirlenen konumlara yığma işlemi yapılır. Bu işlemde kullanılan malzemeler günümüz teknolojileri ile sınırlıdır. Her ne kadar yaygın kullanılsa bile bu yöntem halen çalışılmaya muhtaç konulardan birisidir (Özdoğan vd., 2021).

Fotopolimerizasyon işlemi ekstrüzyon yönteminde olduğu gibi CAD ortamında çizimi yapılan ürünün STL dosyasından oluşturulan G kodlarıyla üretim şeklidir. Bu yöntemde ışın enerjisi (lazer yada ultraviyole ışını) ile katılaşabilen bir sıvı kullanılır. Işın daha önce belirlenen koordinatlara atış yapar ve tabakadaki bütün noktalara atış yapıldıktan sonra bir sonraki tabakaya geçilir ve üretilmek istenen ürün tabaka tabaka eklenerek elde edilmiş olur (Gebel vd., 2018).

Malzeme püskürtme yönteminde çok sayıda nozuldan ultraviyole ışınla ile katılaşabilen sıvı damlatılır ve UV-ışını ile katılaştırılır. Bu işlemde UV-ışını ile kürlenebilen sıvı uygun viskoziteyi elde etmek amacıyla ısıtılır. CAD ortamında gerçekleştirilen çizimler ve ardından oluşturulan STL dosyası ve oluşan G kodlarıyla sıvı malzemelerin serileceği yerler belirlenir ve bu koordinatlara sıvılar damlacık damlacık bırakılır. UV-ışını ile bu sıvılar sertleşip katılırlar. Böylece parçanın ilk katman oluşturulur sonraki katman için tabla katman kalınlığı kadar aşağı iner ve tüm parça oluşturulana kadar işlem böyle devam eder (Gebel vd., 2018).

Toz yatağı füzyonunu lazer ile sinterleme ve elektron ışını ile ergitme şeklinde iki gruba ayırmak mümkündür. Lazer ışını ile sinterleme yönteminde üretim tozların lazer ışını sayesinde birleştirilmesine dayanmaktadır. Elektron ışını ile ergitme yönteminde ise lazer ışını ile sinterlemeden farklı olarak bu yöntemde kullanılan tozlar önceden ısıtılırlar. Üretim ekipmanları sıcak toz partikülleri ile temas halinde olduğu için üretim aşamalarında azami dikkat gerekmektedir.

Bağlayıcı püskürtme yöntemi üretimi yapılacak olan malzemenin parçacıklarının bir sıvı bağlayıcı kullanılarak birleştirilmesi temeline dayanır.

Tabaka laminasyonu kapsamında ultrasonik birleştirme yöntemi bir metal eklemeli imalat yöntemidir ve bu yöntemde metal ince levhaları birleştirilerek, ultrasonik kaynak ile birleştirme işlemi yapılır, istenilen yapıda malzeme üretilmiş olur (Song vd., 2021).

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Mevcut çalışma eklemeli imalat yöntemlerinden fotopolimerizasyon yöntemi kullanılarak ultraviyole ışın enerjisi ile yapay aort geometrisine sahip polivinil alkol (PVA) kalıp içerisinde kütleme ile biyoyumlu nesnelerin üretimini ve söz konusu üretimi sağlayabilecek dört eksenli (4D) eklemeli imalat cihazı tasarımı ve üretimini kapsamaktadır. 4D eklemeli imalat cihazı alt tablasında bulunan döner kaplama cihazı ile PVA kalıp tabanına vakum uygulamakta ve böylece dozajlama ünitesinden akıtılan pHEMA'nın PVA kalıp içerisine dolumu sırasında ve üretim sonrasında homojen iç yapının oluşmasını sağlamaktadır. Çalışma kapsamında üretimi gerçekleştirilen yapay aort geometrisine sahip pHEMA'nın karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın 1. bölümü eklemeli imalat ve biyoyumlu malzeme literatür araştırması olmak üzere iki bölümden oluşturulmuştur. İlk bölümde eklemeli imalat teknolojilerine genel bir bakışa yer verilmiştir. İncelenen akademik çalışmalar, malzeme, kütleme, serme tipleri gibi farklı özelliklerle derlenmiştir. Biyomalzeme literatür araştırması ise biyoyumlu malzemelerin üretim teknolojileri (aerosol jet printing ve microplotter) örnek üretim yöntemi başlığı altında incelenmiştir. 1. bölümde ayrıca biyoyumlu malzeme konusunda belirlenen çalışmaların genel yöneliminin nereye doğru gittiği gösterilmiştir. İncelenen akademik çalışmalar değerlendirildiğinde genel eğilim, mürekkep adı verilen ve içerisinde destek malzeme ile birlikte canlı dokuları da barındıran malzemelerin özelliklerini incelemeye yöneliktir. Bu alandaki malzemelerin, atomik yapı, viskozite, çalışma sıcaklığı ve kütleme yöntemi gibi genel özelliklerinin eklemeli imalatta kullanılabilirliklerini etkilediği söylenebilir. Ticari anlamda üretilen biyomalzemeler genellikle implant, yapay organ ve algılayıcı gibi alanlarda kullanılmıştır.

Bölüm 2’de çalışma kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen atmosfer koşullarından yalıtılmış, mürekkepleri UV enerjisi ile kürleyebilen, alt kısmında bulunan dördüncü eksen vasıtasıyla üretilen nesnelere dönerek kaplama işlemi yapabilen 4D eklemeli imalat cihazının teknik ve teorik detayları verilmiştir. 4D eklemeli imalat cihaz ile insan aort geometrisine sahip PVA kalıp geometrisi içerisinde poli(2-hidroksietil metakrilat) üretilmiştir. Çalışmanın pHEMA ile gerçekleştirilmiş olmasının nedeni, pHEMA’nın hidrofilik olmasının yanı sıra biyolojik olarak uyumlu olmasındandır. pHEMA burun kıkırdağı (Ma vd., 2020), yara bandajı (Ren vd., 2021), yapay kornea (Díez-Pascual ve Díez-Vicente, 2016) ve ilaç taşıyıcı sistem olarak (Singha vd., 2022) biyomedikal uygulamalarında kullanılmaktadır. pHEMA ilk kez radikal polimerizasyon tekniği ile Wichterle ve Lim tarafından sentezlenmiştir (Wichterle vd., 1960). pHEMA sentezleme tekniklerinden bazıları, mikrodalga (Zhang vd., 2014), radikal polimerizasyon/hidrotermal (Erol vd., 2022) ve atom transfer radikal polimerizasyonudur (ATRP) (Gao ve Matyjaszewski, 2007). Literatür çalışmaları incelendiğinde pHEMA sentezleme tekniklerinden en yaygın kullanılanlardan biri de UV-fotopolimerizasyon yöntemidir. Söz konusu yöntemin avantajları, kısa sentez süresi, esnek polimer geometrisine sahip olmasıdır (Chiulan vd., 2021). Bu avantajları nedeniyle mevcut çalışmada pHEMA’nın sentezlenmesinde UV- fotopolimerizasyon yöntemi seçilmiştir.

Bölüm 3’te çalışma kapsamındaki bulgulara yer verilmiştir. Bu bölümde üretilen pHEMA’nın taramalı elektron mikroskopisi (SEM) incelemesi ile yüzey karakterizasyonu ve çekme deneyi ile degradasyon deneyi uygulanarak mekanik ve X-ışını difraksiyonu (XRD) ile kristal yapı karakterizasyonu incelenmiştir. pHEMA 6 farklı UV ışığına maruz kalma süresinde (2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 dak.) kürlenmiş ve çekme deneyi sonucunda en üstün mekanik özelliği 12.5 dak. kürlenmiş pHEMA sergilediği belirlenmiştir. Bundan dolayı çalışma kapsamında söz konusu malzemenin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4’te elde edilen sonuçların yorumlanması ve sonuçlar hakkında özet yer almaktadır. Bu bölümde elde edilen bulgular yorumlanmış ve gelecekteki yönelim hakkında bilgi verilmiştir.

1.2. Eklemeli İmalat için Literatür Araştırması

Eklemeli imalat inceleme çalışmalarımızda geçmiş bilimsel makaleleri incelerken ilk olarak doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat alanındaki çalışmalar incelenmiştir.

Karabulut Y., Inconel 718 malzemesini farklı cidar kalınlıklarında eklemeli imalat yöntemiyle üretmiş ve üretime ikincil işlemlerin etkisi incelemiştir. İkincil işleme operasyonlarından sonra numuneye çekme testi ve çentik darbe testine maruz bırakılmıştır. İkincil işlemler sonrasında parçaların yüzey kalitesinin arttığı ve mekanik özelliklerinde gelişmelerin olduğu gözlemlenmiştir (Karabulut Y., Kaynak Y., 2020).

Top N., omurga sistemi üzerinde Lumbar 4 (L4) kemiğini Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) Plus™ – P430 kullanılarak ve malzeme püskürtme yöntemi ile akrilik monomer, akrilik oligomer ve Ti₂O (titanyum dioksit) gibi malzemeleri içeren Verowhite Plus™ RGD 835 malzemesinden 3B yazıcı teknolojilerinden malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiş ve yapay kemiğin özellikleri incelenmiştir (Top vd., 2019).

Atalay Y., TIG-Tel-Ark tekniği kullanarak metal yığma sistemi imal etmiştir. Gerçekleştirilen sistemde standart x, y ve z eksenlerinden başka bir dördüncü eksen tasarlanmıştır. Bu tasarımın primitif profil altlıkların kullanılması halinde imalat süresini kısaltabileceği belirtilmiştir. Bu tasarım ile silindirik parçalar üzerine spiral şekilli faturalar ve burulmuş kanatlar eklenebildiği belirtilmiştir (Atalay Y., Eyercioğlu Ö., 2020).

Claudia, E., ve ark., ABS malzemenin yüzey kalitesine odaklanarak eklemeli imalattaki zorlukları incelemişlerdir. Yüzey kalitesi, makroskopik görüntüleme ve farklı mikroskopik teknolojiler (transmisyon ışık mikroskobu, lazer tarama mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu) ile değerlendirilmiştir. Bu eklemeli imalat sürecinden elde edilen yüzey topolojisine göre, yüzeyin tesviye edilmesi ve sızdırmaz hale getirilmesi ile ön işlem, elektro kaplama işleminin başarısı ve tekrarlanabilirliği açısından önemli bir zorluk olduğu belirtilmiştir (Claudia vd., 2021).

Mohanavel V., ve ark., eklemeli imalat teknikleri, otomobil ve havacılık alanında üç boyutlu (3D) baskı ile ilgili konularını gözden geçirmişlerdir. Katmanlı imalat veya

3D baskı, imalat alanında gelişen teknolojilerden ve 3D baskının, dünya çapında yeni işleme tekniklerin biri olduğu vurgulanmıştır (Mohanavel vd., 2021).

Tsushima N., ve ark., eklemeli imalat ile üretilmiş bir kanat modelinin üretim doğruluğu ve aeroelastik özellikleri sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Bu tür kanatların rüzgar tüneli testlerinde kullanılabilirliğini de belirtmişlerdir (Tsushima vd., 2021).

Bhatia A., ve ark., üç boyutlu (3D) baskı teknikleriyle birlikte geniş bir malzeme yelpazesini ayrıntılı olarak incelemiştir. Biyomalzemeler, gıda baskı malzemeleri, akıllı malzemeler, cam, reçine ve ahşap gibi geliştirme aşamasında olan malzemelere ek olarak en yaygın olarak kullanılan polimerler, metaller ve alaşımlar, kompozitler, betonlar, seramikler gibi diğer malzeme grupları ile ilgili 3D baskı yöntemleri detaylı olarak araştırılmıştır (Bhatia vd., 2021),

Wang H., ve ark., optimal bir bağlantı yapısı elde etmek için eklemeli imalata dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Parametre ayarlarının ve destek yöntemlerinin eklemeli imalat kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir (Wang vd., 2021).

Hashmi A. W., ve ark. (2021), yüzey pürüzlülük değerinin azaltılması, mekanik özellikler ve boyutsal doğruluk gibi çeşitli etki derecelerine sahip mevcut çeşitli yüzey bitirme yaklaşımlarını incelemiştir. Katmanlı imalat ile üretilen parçaların yüzey özelliklerini iyileştirmeye yönelik mevcut son işleme yöntemleri, süreçlerin mekanizmalarına dayalı bir sınıflandırma ile incelenmiştir (Hashmi vd., 2021).

Doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat alanında incelenen makaleler ve özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Doğrudan metal lazer sinterleme ve ekstrüzyon eklemeli imalat alanında incelenen makaleler ve özellikleri

Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik & Nümerik analiz	Deneysel
Alüminyum alaşımı	Metal lazer Sinterleme	Demiröz Ö. B. vd.,	X	X
AlSi10Mg alaşımı	Metal lazer Sinterleme	Aktürk M. vd.,	X	X
Inconel 718	Metal lazer Sinterleme	Karabulut Y. vd.,		X
PLA	Metal lazer Sinterleme	Wang, H. vd.,	X	X
ABS, PLA plus ve Verowhite plus	Ekstrüzyon ve malzeme püskürtme	Top N. vd.,	X	X
PLA	Ekstrüzyon yöntemi	Özdoğan S. vd.,		X
ABS	Ekstrüzyon yöntemi	Claudia, E. vd.,		X
PLA	Ekstrüzyon yöntemi	Tsushima, N. vd.,	X	X
308 L paslanmaz çelik	Şekilli metal yığma makinesi ile Hibrit Eklemeli İmalat	Atalay Y. vd.,		X
Derleme	Derleme	Mohanavel, V. vd.,	Derleme	Derleme
Derleme	Derleme	Bhatia, A. vd.,	Derleme	Derleme
Derleme	Derleme	Hashmi, A. W. vd.,	Derleme	Derleme

1.3. Biyoyumlu Malzemeler İçin Literatür Araştırması

Biyoyumlu nesnelere özellikle son on yılda birçok alanda kullanılmaya başlandığı gibi eklemeli imalatın üretim yöntemi olarak kullanıldığı önemli bir alan haline gelmiştir. Teknolojik uygulamalar incelendiğinde tıp, askeri malzemeler, teknoloji gibi birçok alanda söz konusu malzemelere rastlanılmaktadır. Biyoyumlu malzemelerin kullanımında dikkat edilmesi gereken en önemli kriter canlı yapısına uyumdur. Bu malzemelerin EİY ile üretimleri incelendiğinde, çalışmaların önemli bir kısmı UV ışını ile kürlenme prensibine dayanır.

Invernizzi M. ve ark., UV destekli üç boyutlu (UV-3D) baskı yöntemini kullanarak cam (GFR) ve karbon fiber takviyeli (CFR) polimer kompozit üretmişlerdir. Elde edilen ürünlerin yüksek termal kararlılığa ve mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir (Invernizzi vd., 2016).

Mantelli A., ve ark., UV destekli doğrudan mürekkeple yazma yoluyla geri dönüştürülmüş karbon fiber 3D baskının uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Ticari bir

aparata dayalı özelleştirilmiş bir 3D yazıcı sayesinde, bir grup numune başarıyla 3D olarak basılmış ve çekme testleri ve taramalı elektron mikroskobu analizine göre, malzeme iyi mekanik özellikler sergilediği ve 3D baskı ile ilgili katman izlerinin bulunmadığı belirtilmiştir (Mantelli vd., 2021).

Postiglione G., ve ark., UV destekli üç boyutlu (UV-3D) baskıda kullanılmak üzere UV ile kürlenebilen polimerik reçine ve farklı inorganik dolgu maddelerine dayalı nanokompozitler geliştirmiştir (Postiglione vd., 2021)

Barkane A., ve ark., çalışmalarında iki farklı foto-kürleme yöntemi olan stereolitografik (SLA) üç boyutlu (3D) yazıcı kurulumu ve UV-LED lamba kullanarak bitkisel yağ epoksitlenmiş akrilatların üretimini gerçekleştirmiş ve termal özelliklerini incelemiştir. Çalışmada termal özellikleri iyileştirmek için 1,6-heksandiol diakrilat ve trimetilolpropan triakrilattan oluşan iki reaktif monomer kullanılmıştır. Uygun reaktif komonomerlerin eklenmesinin cam geçiş sıcaklığını 10 °C, termal bozunma sıcaklığını 28 °C artırdığını ve ayrıca gerekli reçine fotokürleme süresini neredeyse yarı yarıya (4 saniyeden 2 saniyeye kadar) azaltabildiğini göstermiştir Barkane vd., 2020).

Kim Y. C., ve ark., UV ile kürlenebilen bir akrilik reçine sisteminin bir diferansiyel taramalı foto-kalorimetre (DPC) kullanılarak UV kürleme kinetiği ve cam geçiş sıcaklığı (Tg) incelenmiştir. Geliştirilen kinetik model, çeşitli UV kürleme malzemeleriyle yüksek çözünürlüklü ve yüksek hızlı üretim sağlayabilen üst üste baskı ve yerinde UV kürleme için 3D baskı çalışma koşullarını belirlemek için kullanılabileceği belirtilmiştir (Kim vd., 2017).

Hong S., Y., ve ark, üç boyutlu (3D) ve UV baskılı fotopolimerin termomekanik analiz ve mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Zayıf mekanik özelliklere ek olarak, 3D baskılı fotopolimerlerin anizotropik ve boyuta bağlı çekme özellikleri de gözlemlenmiştir (Hong vd., 2018).

Lee S., ve ark, termal arayüz malzemesi oluşturmak için ana zincir monomeri olarak bütül akrilat ve çapraz bağlayıcı olarak diüretan dimetakrilat ile yazdırılabilir bir fotopolimer reçinenin optimum bileşimini belirlemeyi amaçlamışlardır. Ağırlıkça %30 AlN içeren üretilmiş malzemenin termal iletkenliğinin, saf akrilat reçinelerinden sırasıyla %477 ve %350 daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Lee vd., 2021).

Li Y., ve ark, NH₂-POSS ve 2-izo-siyanoetil metakrilat ile sentezlenen farklı

miktarlarda modifiye polihedraloligomerik silseskioksan (m-POSS) nanoparçacıkları ile yüksek performanslı stereolitografi reçinesi (SLR) nanokompozitleri hazırlanmıştır %5 m-POSS nanoparçacıklarının eklenmesiyle gerilme ve mukavemetinin sırasıyla %36.2 ve %40 arttığı belirlenmiştir. m-POSS nanoparçacıklarının dahil edilmesinin nanokompozitlerin cam geçiş sıcaklığını (T_g), bozunma sıcaklığını, kömür verimini ve ısı bozulma sıcaklığını önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir (Li vd., 2019).

1.3.1. Biyoyumlu Nesnelerin Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi

İncelenen bilimsel çalışmaların bir kısmı UV ışını ile kütleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.

Sun F. ve ark., mikro piramit yapılı esnek bir piezo dirençli basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Piezo dirençli basınç algılayıcı ile gerçek zamanlı dinamik basınç kaydedilmiş ve farklı gönüllüler tarafından yazılan karakterlerin benzerlikleri dinamik zaman çarpıtma algoritması kullanılarak değerlendirilmiştir. Poliimid substratlar üzerindeki mikro piramidin boyutunun ve film kalınlığının cihaz performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir (Sun vd., 2019),

Mao R., ve ark., grafen malzemesinin sıcaklık, basınç ve esneklik algılama kapasitesini incelemişlerdir. Çalışmada grafen malzemesi, ticari dirençli termometrelerden 5 kat daha büyük sıcaklık algılama özelliği sergilemiştir. 3 boyutlu küresel şekli nedeniyle, grafen aerojel küreleri (GAS) tüm yönlerden gelen (360°) kuvvetleri algılayabilmiştir (Mao vd., 2020).

Guo M., ve ark., geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilen esnek bir algılayıcı üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, mika substrat üzerinde biriktirilmiş fonksiyonel oksit ince filme dayalı esnek algılayıcı üretmişlerdir. Çalışmada üretilen esnek algılayıcının 20°K 'den 773°K 'ye kadar sıcaklık aralığında çalışabilir olduğu belirtilmiştir (Guo vd., 2020).

Wang G., ve ark., uçak ve hava araçlarının yüzeyinde kullanılabilecek esnek algılayıcı üretmeyi amaç edinmişlerdir. Çalışmalarında üretilen algılayıcı boşluklar, iletken sıvı ve elektrotlar içeren esnek bir alt tabakadan oluşturulmuş, aerodinamik basınç ölçümü için esnek bir mikro akışkan algılayıcısıdır. Geliştirilen algılayıcı hızlı dinamik yanıt, yüksek döngüsel yükleme/boşaltma kararlılığı sergilemiştir (Wang vd., 2021).

Xiong Y., ve ark., bakır nanoteller/indirgenmiş grafen oksit/melamin köpüğünden

(CuRGOMF) oluşan 3 katmanlı esnek bir basınç algılayıcı üretmişlerdir. Hazırlanan algılayıcı, geniş çalışma aralığında ve döngüsel kararlılıkta yüksek hassasiyete sahip olduğu belirtilmiştir. Algılayıcı, parmak bükme, kavrama, bilgisayar faresi tıklama ve nesnelere alma/bırakma gibi insan hareketlerinde incelenmiş ve başarılı sonuçlar sergilemiştir (Xiong vd., 2020).

Li T., ve ark., çok katmanlı esnek gerinim algılayıcısı üretmişlerdir. Hazırlanan gerinim algılayıcısı farklı parmak hareketlerinde, bilek, dirsek ve diz hareketlerinde incelenmiş ve başarıyla hareketleri tanımıştır. Algılayıcının yüksek iletkenlik, yüksek gerinim çalışma aralığı, yüksek hassasiyet ve yüksek stabilite özelliklerine sahip olduğu belirlenmiştir (Li vd., 2020).

Xiong Y., ve ark., mikro dizilere ve çok ince dielektrik katmana sahip basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Algılayıcı, üst katmanda mikro dizili elektrot, orta katmanda çok ince dielektrik tabaka, alt katmanda ise mikro dizili elektrotun katman katman bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Algılayıcı 100.000 döngüsel kararlılık değeri ile ömür sergilemiştir (Xiong vd., 2019).

Lim H., ve ark., altın/karbon nanotüp/altın (Au/CNT/Au) katman sıralamasında esnek bir algılayıcı üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, ince film sistemi, 500 döngüye kadar tekrarlayan bükülmelerde bile mekanik sağlamlık ve güvenilirlik göstermiştir (Lim vd., 2021).

Zhang R., ve ark., çalışmalarında polidimetilsiloksan (PDMS) içine nanokarbon siyahı (nCB) ekleyerek algılayıcı üretmeyi amaçlamışlardır. PDMS/nCB kompozitlerinin mekanik özelliklerinin, gradyan nCB dağılımı nedeniyle, saf PDMS'inkilere yakın olduğu ve PDMS/nCB'nin yüzeyi, gerilmeler altında bile pürüzlü yüzeyden kaynaklanan süper hidrofobiklik gösterdiği belirlenmiştir (Zhang vd., 2020).

Yang X., ve ark., herhangi bir anda piezoelektrik algılayıcının hata mekanizması için bir yöntem önermişlerdir. Mekanizma temeli doğru akım sinyali yerine frekans sinyalinin kullanılmasıdır. Çalışmada kullanılan yöntem ile algılayıcının hatası 800 kHz'in üzerinde büyük ölçüde azalmış ve böylece hassasiyetinin arttığı belirtilmiştir (Yang vd., 2020).

Zhang Y. ve Cui Y., hat sanatı yöntemiyle saydam algılayıcı üretmişlerdir. poli(3,4-etilendioksitiyofen) polistiren sülfonat (PEDOT:PSS) elektrotu, kaligrafi metnine bir bez kullanılarak basılmış, ardından 160°C'de 10 dakika kurutulmuşlardır. Üretilen

algılayıcının, kısa yanıt süresi (yaklaşık 30 s) ve %10-90 bağıl nem algılama aralığına sahip olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2019).

Guo D. ve ark., CPC tabanlı bir gerinim algılayıcıyı hazırlamak tabakalı algılayıcı üretmişlerdir. Üretilen algılayıcı parmak eklemlerinde kullanılarak direnci ölçülmüş ve çalışılabilirliği kontrol edilmiştir. Çalışmada silikon sıvısının, gerilebilirliği azaltmadan gerinim algılayıcısının hassasiyetini 10-30 kat artırabileceği belirtilmiştir (Guo vd., 2019).

Zhao C., ve ark., gümüş kaplı cam elyaf (AGF) ve karbon fiber (CF) ile doldurulmuş iletken silikon kauçuğu, polidimetilsiloksan (PDMS) matrisine gömmüşlerdir. Çalışmada üretilen esnek algılayıcı kararlı bir dayanıklılık sergilediği belirtilmiştir (Zhao C vd., 2020).

Tsai M S., Su P., ve Lu C., üç katmanlı bir nem algılayıcıyı üretmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla platin (Pt) nanopartiküller, politiyofen ve indirgenmiş grafen oksitten (Pt/politiyofen/RGO) oluşan üçlü nanokompozit filmlere dayanan yeni, esnek bir nem algılayıcıyı, basit bir tek kap redoks sentezi kullanılarak üretilmiştir. Bu esnek nem algılayıcı geniş bir çalışma nemi aralığı, kısa bir tepki süresi ve zayıf bir sıcaklık bağımlılığı göstermiştir (Tsai vd., 2020).

Zhang R., ve ark., polidimetilsiloksan (PDMS) bazlı esnek gerinim algılayıcısı hazırlamışlardır. Nikel kaplı grafit (NCG) iletken dolgu maddeleri, bir PDMS çözeltisine homojen olarak dağıtılmış ve daha sonra kompozit algılayıcılar elde etmek için karışımın 2 saat bekletilmesine izin verilerek bir çökeltme tabakası oluşturmasına izin verilmiştir. PDMS/NCG kompozitleri hacimce %2.52 düşük sızma değerine ve hacimce %11.11 NCG'de 148 S/m yüksek iletkenliğe sahip iki boyutlu iletkenlik göstermişlerdir (Zhang vd., 2020).

Zhang X., ve ark., poliüretan (PU) süngerler üzerinde karbon nanopartikülleri ve karbon nanotüpler yerine grafen nanoplateletleri kullanılarak piezodirençli gerinim algılayıcıları üretmişlerdir. Karbon nanotüp tabanlı algılayıcılar ve grafen nanoplateletler karşılaştırıldığında, karbon nanotüp algılayıcının daha geniş bir gerinim algılama aralığına ve daha yüksek doğrusallığa sahip olduğu belirlenmiştir (Zhang vd., 2020).

Ma Z., ve ark., iki boyutlu (2D) basit ve düşük maliyetli bir gerinim algılayıcı üretim yöntemi önermektedirler. Algılayıcı gerinim algılama testinde, yüksek hassasiyet,

yüksek doğrusallık, mükemmel güvenilirlik ve kararlılık sergilediği belirtilmiştir (Ma vd., 2020).

Li K., ve ark., yüzey mikroyapılarının negatif kopyasını (N-Algılayıcı) ve pozitif kopyasını (P-Algılayıcı), yüksek performans elde etmek için incelemiştir. Dışbükey mikro yapılar içeren pozitif kopya, daha küçük başlangıç temas alanı sergilemiş ve gözenekli yüzeyli negatif kopyadan daha kolay sıkıştırılabilir olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, hassasiyet, doğrusallık aralığı ve algılama sınırı dahil olmak üzere P-Algılayıcısının performansları büyük ölçüde iyileştirilmiştir (vd., 2020).

Ma L., ve ark., mikro dizi yapıları elektrotlar ve dielektrik sabiti yüksek katmanlar kullanılarak hassas basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Dielektrik katmana seramik baryum titanat (BT) dolgu maddeleri eklendiğinde, algılayıcının hassasiyeti iki kat artış göstermiştir (Ma vd., 2020).

Liu C., ve ark., silikon kauçuk (SR) ve karbonize melamin sünger (CMS) kombinasyonuna dayalı esnek basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Hazırlanan esnek algılayıcı, yüksek stabilite, mekanik performanslar, parazit önleme özelliği, geniş çalışma aralığı ve kısa yanıt zamanı özellikleri göstermiştir (Liu vd., 2020).

Ma Q., ve ark., polidimetilsiloksanda tabanlı grafen kaplı cam elyaf kullanarak esnek bir kompozit algılayıcıyı üretmişler ve duyarlılığını incelemiştir. Çalışmadaki sonuçlar kompozitlerin algılama davranışının, matriste grafen kaplı cam elyafın bükülme yönüne ve gömülü derinliğine önemli oranda bağlı olduğu belirtilmiştir (Ma vd., 2020).

Fang Y., ve ark., poliüretan substrat ve polianilin iletken oluşmuş hidrojel ile gerinim algılayıcısı üretmişlerdir. Hidrojelin, büyük kopma uzaması, 0,3 MPa Young modülü ve 1,1 MPa gerilme mukavemeti ve geri dönüştürülebilirlik özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir (Fang vd., 2021).

Yellapantula K., ve ark., karbon siyahı ile kompozit sütunlardan yapılmış yumuşak ve esnek bir algılayıcı üretmişlerdir. Bu kompozit sütunlar, belirli bir düzlemsel alanda daha fazla algılama elemanının oluşturulmasına izin verdiğinden dolayı yüksek hassasiyete sahip olduğu belirtilmiştir (Yellapantula vd., 2020).

Thouti E., ve ark., polidimetilsiloksan (PDMS) bazlı basınç algılayıcısı üretmiş ve algılayıcının yüzey kaplamasının basınç algılayıcı cihazlarının duyarlılığı üzerindeki

etkisini incelemişlerdir. Periyodik olarak düzenlenmiş basınç algılayıcısına kıyasla diyagonal olarak düzenlenmiş basınç algılayıcısı daha yüksek yüzey kaplama, daha düşük basınç hassasiyeti özelliği sergilemiştir (Thouti vd., 2020).

Shu J., ve ark., geniş ölçüm aralığına ve yüksek hassasiyette gerinim ölçümüne sahip gerinim algılayıcısı üretmeyi amaçlamışlardır. Üretilen algılayıcının iyi tekrarlanabilirlik ve stabilite sergilediği belirtilmiştir. Bu esnek algılayıcı, insan eklemlerinin durumunu gerçek zamanlı olarak izlemek için insanın parmaklarına yerleştirilmiş ve yüksek bir performansa ve kullanılabilirliğe sahip olduğu belirtilmiştir (Shu vd., 2021).

Feng R., ve ark., koruyucu bir zar olarak poli(etilen glikol) ile modifiye edilmiş poliüretan (PU-PEG) ile kaplanmış esnek bir enzimatik glikoz algılayıcısı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, minimum algılama limitinin 0,25 mM ve duyarlılığın 3.418 $\mu\text{A}/\text{mM}$ olduğu belirtilmiştir (Feng vd., 2021).

Shen X., ve ark., polyester-spandeks kumaş üzerine indirgenmiş grafen oksit (RGO) ve polianilin (PANI) kaplanarak esnek bir algılayıcı üretmişlerdir. Üretilen algılayıcı, yüksek iletkenlik, gerinim duyarlılığı özelliği sergilemiştir (Shen vd., 2021).

Zhou Z., ve ark., geleneksel algılayıcıların yapışkanlık, harici güç kaynağına mutlak bağımlılık ve cilt tahrişi gibi sorunlarının üstesinden gelmek için poli(vinilalkol)/poli(akrilamid-ko-[2-(metakriloiloksi)etil] dimetil-(3-sülfo-propil) amonyum hidroksit) hidrojel üretmişlerdir. PPS hidrojelini iyi mekanik, yüksek yapışma, ve antibakteriyel özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir (Zhou vd., 2021).

Mao J., ve ark., 2-akrilamido-2-metil propan sülfonik asit (AMPS), metilenbisakrilamid (MBA) ve amonyum persülfattan (APS) ile yapışkan, şeffaf, gerilebilir iletken bir hidrojel hazırlamıştır. Kullanılan hidrojel kovalent bağ ve hidrojen bağına sahip olması nedeniyle ve mükemmel gerilebilirlik sergilemiştir (Mao vd., 2021).

Liu M. Y., ve ark., karbon nanomalzemeye dayalı esnek basınç algılayıcılarındaki en son gelişmeleri incelemişlerdir. İlk olarak, iletim ilkeleri, değerlendirme parametreleri ve nano-mikro yapılar dahil olmak üzere basınç algılayıcılarının temel hususları incelenmiştir. Ayrıca, karbonlu nanomalzemelere, geçiş metali karbürlerine ve karbonitürllere (Mxene) dayalı esnek basınç algılayıcıları, metal nanomalzemelerle birlikte farklı transdüksiyon ilkelerine göre gözden geçirilmiş ve sınıflandırılmıştır.

Sonunda, basınç dağılımı algılama, kuvvet yönü algılama, çok işlevli algılama ve sistem entegrasyonu dahil olmak üzere metal ve karbonlu nanomalzeme bazlı esnek basınç algılayıcılarını içeren elektronik cilt (E-cilt) üzerinde bir dizi uygulama tanıtılmıştır (Liu vd., 2021).

Wang W., ve ark., yüksek performanslı esnek gerilebilir gerinim algılayıcılarının geliştirilmesi için biyomalzemelerdeki ve biyoyapılardaki en son gelişmeleri sistematik olarak özetlemişlerdir. Esnek gerilebilir gerinim algılayıcılarının yapısal özelliklerine göre, aktif malzemeler, esnek substratlar ve fonksiyonel katkı maddeleri dahil olmak üzere biyomalzemelerin çeşitli rolleri ve işlevleri ayrıntılı olarak gözden geçirilmiştir. Biyomalzemeler ve biyoyapılardan ilham alan esnek gerilebilir gerinim algılayıcıları için ana zorluklar ve gelecekteki olası Ar-Ge yönelimleri irdelenmiştir (Wang vd., 2021).

Guo X., ve ark., biyomimetik bir esnek lif gerinim algılayıcısı önermişlerdir. Bu algılayıcı, silindirik bir sandviç yapıda çift iletken katmanlar oluşturmak için basit ve kontrol edilebilir, katman katman daldırma kaplama işlemi kullanılarak tasarlanmıştır. Biyomimetik gerinim algılayıcısı hızlı tepki süresi (~60 ms) ve 3000 döngü üzerinde uzun süreli dayanıklılık gibi algılama özellikleri sergilemiştir (Guo vd., 2021).

Sun C., ve ark., tasarlanmış desenlere sahip esnek gerinim algılayıcıları üretmek için substrat olarak poli(viniliden florür) (PVDF) kullanmışlardır. Düşük aktiviteli PVDF üzerinde etkili plazma ön işlemi sayesinde, piezodirençli çinkooksit (ZnO) nano tabaka, atomik tabaka biriktirme (ALD) yoluyla doğrudan PVDF membranın yüzeyine biriktirmişlerdir. ZnO/PVDF tabanlı gerinim algılayıcısı, %6'nın altındaki gerilimi ve özellikle diğer yöntemlerle kesin olarak tespit edilmesi zor olan %0,1 ile %0,6 arasında değişen çok düşük gerinimleri izlemek için yüksek bir performans sergilemiştir (Sun vd., 2021).

Wang X., ve ark., tren bujilerinde rüzgar basıncının izlenmesi için esnek kavisli algılayıcı (FCSA) üretmişlerdir. Ağırlıkça %1.75 karbon siyahı (CB) hibrit dolgulu kompozitin, iyi doğrusallık, yüksek doğruluk, mükemmel gerilebilirlik ve mükemmel dayanıklılık gibi özellikler sergilediği belirtilmiştir (Wang vd., 2021).

Chen J., ve ark., kanal etkisi ve çatlak yayılımının algılama mekanizmalarının avantajlarını birleştirebilen esnek gerinim algılayıcısı üretmeyi amaçlamışlardır. Üretilen gerinim algılayıcısının, %0,01'lik düşük algılama sınırı, mükemmel

gerilebilirlik, yüksek tekrarlanabilirlik özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir (Chen vd., 2021).

Yang Y., ve ark., esnek metal/ karbon nanotüp (CNTs) kompozit algılayıcının duyarlılığını incelemiştir. Bakır/karbonnanotüp/ polidimetilsiloksan (Cu/CNTs-PDMS) algılayıcısı, geleneksel gerinim algılayıcılarına göre yüksek hassasiyet, geniş gerinim aralığı, iyi stabilite, dayanıklılık ve düzlem dışı kuvvetin tespiti gibi çok daha yüksek performanslara sahip olduğu belirtilmiştir (Yang vd., 2021).

Guo D., ve ark., farklı yükleme hızlarının ve yükleme şekillerinin esnek gerinim algılayıcısının performansı üzerindeki etkilerini sistematik olarak araştırmışlardır. Yüksek yükleme hızının, polimerin visko elastisitesinin histerezis (omuz tepesi, kaşık vadisi ve sürüklenme) derecesini ve duyarlılığını artırabileceği bulunmuştur (Guo vd., 2021).

Yang R., ve ark., mikropiramit tek duvarlı tek duvarlı karbon nanotüp (CNT (SWNT)) film esnek kuvvet algılayıcısına duyarlılığını daha da artırmak için uygulanan elektromekanik bir sınıflandırma yöntemi sunmuşlardır. Sınıflandırılmış SWNT'lerin esnek kuvvet algılayıcısının hassasiyetinin 3.4891 KPa olduğu belirlenmiştir ki bu, ilk sıralanmamış cihazlarla karşılaştırıldığında %56.86'lık bir gelişmeyi ifade ettiği belirtilmiştir (Yang vd., 2021).

Khorablou Z., ve ark., altın nanoparçacıklar (AuNP'ler) ve politiyofen (p(Thp)) ince film ile elektro-çökeltmiş karbon kumaş (CC) temelli esnek bir algılayıcı geliştirmiştir. Algılayıcının hassas ve geniş bir çalışma aralığına sahip olduğu belirtilmiştir (Khorablou Z., Fard F S., Razmi H. (2021).

Bijender ve Kumar A., indiyum-kalay-oksit (ITO) kaplı esnek polietilen tereftalat (PET) elektrotlar arasında birleştirilmiş bir polidimetilsiloksan (PDMS) tabakasına sahip esnek bir basınç algılayıcı geliştirmiştir. Gözenekli PDMS katmanına sahip cihaz, geniş bir çalışma basıncı aralığı, yüksek çalışma kararlılığı, hızlı yanıt ve düşük basınç algılama sınırı göstermiştir (Bijender vd., 2021).

Pathak P., ve ark., nanokompozit bazlı esnek elektrokimyasal algılayıcı üretmiştir. Üretilen elektrokimyasal algılayıcı, kurşun iyonlarına (Pb²⁺) bakır bazlı elektrokimyasal algılayıcıdan daha yüksek bir tepki göstermiştir (Pathak vd., 2021).

Chen S., ve ark., esnek silikon substrat ve polimer kompozit malzemelerden oluşan, biyonomik insan derisi olarak birbirine kenetlenmiş bir yapıya sahip esnek bir üç boyutlu

kuvvet algılayıcısını üretmeyi amaçlamışlardır. Üretilen algılayıcı yüksek hassasiyet, kısa yanıt süresi ve 30°nin altında kesme kuvveti açılal çözünürlüğü göstermiştir (Chen vd., 2021).

Yang G., ve ark., geniş basınç algılama aralığına sahip esnek basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Karbon sünger/ karboksil demir parçacığı/silikon (CS/CIP/silikon) algılayıcısının üst basınç algılama sınırı, manyetik alan varlığında önemli ölçüde artmıştır. CS/CIP/silikon algılayıcı, düşük ve yüksek basınçlı uyarılarla çeşitli insan hareketlerini izlemede (arka arkaya nefes alma, kol hareketi, yürüme, kaldırma hareketlerini) başarılı olduğu belirtilmiştir (Yang vd., 2021).

Dong H., ve ark., poli(3,4-etilendioksitiyofen) polistiren sülfonat (PEDOT:PSS)/grafen/karbon nanotüp (PEDOT:PSS/GR/SWCNTs) katmanlarında basınç algılayıcı üretmişlerdir. Üretilen esnek basınç algılayıcı, yaklaşık 6,4 Pa'lık küçük bir basıncı bile algılayabilmektedir. Üretilen esnek basınç algılayıcısının yüksek hassasiyete, hızlı tepki kabiliyetine ve düşük algılama sınırına sahip olduğu belirtilmiştir (Dong vd., 2020).

Park H., ve ark., dikey olarak entegre edilmiş, cilde takılabilir gerinim algılayıcısına güç sağlamak için yüksek performanslı esnek mikro kapasitör (MSC) üretimini incelemişlerdir. Esnek mikro kapasitör, 1000 tekrarlamanın üzerinde mekanik kararlılık göstermiş ve 3,7 mm yarıçapında bükülmüştür (Park H vd., 2021).

Zhang J., ve ark., basitleştirilmiş bir Langmuir Blodgett yöntemiyle iletken bir çubuk karbon nanotüp (CNT) filmi üretmişlerdir. Bu karbon nanotüp tabanlı algılayıcı, geniş bir gerinim aralığında son derece yüksek bir hassasiyet, hızlı tepki, iyi stabilite ve son derece geniş tepki aralığı özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2020).

Liu C., ve ark., esnek gerinim algılayıcı imal etmek için pratik ve güvenilir bir kimyasal bağlama bazlı daldırma kaplama yöntemi önermişlerdir. Önerilen algılayıcının üretim süreci, ikili hidrojen bağı destekli yapı prensibi, gerinim algılama mekanizması ve çeşitli özellikleri incelenmiştir. Çatlakların ve çift hidrojen bağı destekli yapının, yüksek hassasiyet, uzun vadeli stabilite, iyi doğrusallık özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir (Liu vd., 2020).

Sankar V., ve ark., nano dolgu maddelerinin dağılımını dengelemek ve nano elyafların doğal özelliklerini korumak için bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu amaçla çalışmada kullanılan polimerpolistiren sülfonat sodyum tuzu (PSS) ile işlevselleştirilmiş karbon

nanotüp (CNT), (PSS-CNT), poli (vinilidendiflorür)(PVDF) matrisinde poli-diallil-dimetil-amonyum klorür-karbon nanotüpten (PDDA-CNT'den) daha iyi dağılım göstermiştir. Ayrıca, PVDF/PSS-CNT'nin elektrik iletkenliği, PVDF/PDDA-CNT'den yaklaşık 28 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Sankar vd., 2021).

Wang F., ve ark., gözenekli baryum titanat (BaTiO₃)/çok duvarlı karbon nanotüpler (MCNTs)/polidimetilsiloksan (PDMS) katmanlı esnek bir basınç algılayıcısı üretmişlerdir. Algılayıcının hassasiyeti, kararlılığı, tepki süresi ve insan uyumluluğu incelenmiştir. BaTiO₃/MwCNTs/PDMS esnek kapasitif basınç algılayıcı, yüksek hassasiyete ve iyi stabiliteye sahip olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2021).

Zhai W., ve ark., sarmal yapıya sahip sağlam bir fiberden polimerizasyon ve ultrasonikasyon yoluyla azaltılmış grafen oksit (rGO) katmanıyla köprülenen iki polianilin (PANI) katmanından oluşan esnek ve giyilebilir gerinim algılayıcıları üretmiştir. Esnek ve giyilebilir algılayıcı özellikle küçük deformasyonlar için yüksek hassasiyete, mükemmel yanıt kararlılığına, sahip olduğu belirtilmiştir (Zhai vd., 2021).

Wang L., ve ark., esnek elektrotlar, gerinim/basınç algılayıcıları ve dokunmatik paneller gibi esnek giyilebilir algılayıcılardaki hidrojel uygulamalarının son ilerlemelerini özetlemiş ve kendi kendini iyileştiren, kendi kendine yapışan, çok işlevli iletken hidrojellere dayalı esnek giyilebilir algılayıcılara odaklanmışlardır. Çalışmanın, gelecekteki gelişim hakkında kişisel bir bakış açısı da sağladığını ve iletken hidrojel tabanlı çok işlevli esnek giyilebilir algılayıcıların ticarileştirilmesinde kalan zorlukları ele aldığını bildirmişlerdir (Wang vd., 2021).

Preobrazhenskiy I.I. ve ark., kemik kusurlarının tedavisi için 3D baskı yöntemi kullanılarak kalsiyum fosfatlarla doldurulmuş hidrojellere dayalı biyokompozitler üretmiştir. PEGDA, PEGMA bazlı bir hidrojel bileşimine dahil edildiğinde elastik özelliklerde artış meydana gelmiştir. Dolgu maddesi olarak α -trikalsiyum fosfat (α -TCP) tozunun kullanılmasının, dolgu fraksiyonunu ağırlıkça %60'a kadar artırdığı belirtilmiştir (Preobrazhenskiy vd., 2021).

Song P., ve ark., silikon kauçukta (SR) dağılılabirliği geliştirmek için iletken karbon siyahının (CCB) yüzeyinde bir silan birleştirme maddesinin serbest radikal polimerizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Algılayıcının nabız atma, yutma ve kas kasılma süreçleri gibi insan hareketlerini algılayabilmiştir (Song vd., 2021).

Ma Z., ve ark., esnek gerinim algılayıcıları için kendi kendini iyileştiren kompozit

elastomerlerin geliştirilmesinde son zamanlarda kaydedilen ilerlemeyi sistematik olarak gözden geçirmiştir. Doğal kauçuk (NR), polidimetilsiloksan (PDMS) ve poliüretan (PU) ve diğer yeni elastomerler dahil olmak üzere yaygın olarak kendi kendini iyileştiren elastomerik matrisler kapsamlı bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Farklı dinamik bağlantıların özellikleri, çeşitli iletken dolgu maddelerinin seçimi ve kritik performans parametreleri, algılama performanslarını kontrol etmek için iyileştirme mekanizmalarının ve hibrit iletken ağların rasyonel kombinasyonuna ilişkin bilgileri sağlamak için ayrıntılı olarak özetlenmiştir (Ma vd., 2021).

Shi Z., ve ark., farklı gözenek boyutlarına sahip indirgenmiş grafen oksit kaplı poliüretan kompozit köpükler (RPF'ler) hazırlamıştır. RPF'lerin iyi yapısal bütünlüğe ve mükemmel esnekliğe sahip olduğu, %90'lık büyük deformasyona ve elektrik direncinde 3 derecelik büyüklük düşüşüne dayanma konusunda dikkate değer bir yeteneğe sahip olduğu bulunmuştur (Shi vd., 2021).

Wang X., ve ark., piezorezistif basınç algılayıcıları, kapasitif basınç algılayıcıları ve piezoelektrik basınç algılayıcılarıyla ilgili en son gelişmeleri özetlemiştir. En yeni esnek basınç algılayıcılarının kapsamlı bir açıklamasından sonra, esnek basınç algılayıcılarının mevcut üretim ve kullanım zorluklarını ve gelecekte potansiyellerine değinilmiştir (Wang vd., 2021).

Pei Z., ve ark., elektriksel iletkenliği arttırmak için karbon nano tüplerin (CNC'lerin) yüzeyinde aşılınmış polipirol (PPy) ile kendi kendini iyileştiren nanokompozit hidrojelleri üretmişlerdir. Elde edilen nanokompozit hidrojeller, olağanüstü kendi kendini iyileştirme ve mekanik davranışlar sergilemiş ve optimum mekanik mukavemet, tokluk göstermişlerdir (Pei vd., 2021).

Dai X., ve ark., insan hareketlerini izleyebilen, esneyebilir, sağlam mekanik dayanım ve yüksek algılama hassasiyetine sahip kendi kendini iyileştiren esnek bir gerinim algılayıcı üretmişlerdir. Kendi kendini iyileştirme özelliğinden yararlanan algılayıcı, mekanik hasara dayanabildiği ve insan hareketlerini algılama işlevini yapabildiği, akıllı giyilebilir cihazlar, sağlık izleme ve insan-makine ara yüzleri gibi alanlarda geliştirmek için büyük potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir (Dai vd., 2021).

Kim J. S., ve ark., nanomalzemelere dayalı esnek basınç algılayıcı dizisinde tek tip basınç tepkileri elde etmek için bir elektrik devresi yöntemi kullanmışlardır. Kübik spline enterpolasyonu tarafından kullanılarak önerilen yöntem, algılayıcı dizisinde

çalışmak için geniş bir kalibrasyon aralığı sağlamıştır. Tek tip tepkiler, aktif malzeme olarak kullanılan grafen nanoplatelet (GNP) nedeniyle piezo dirençli özelliklere sahip 4x4'lük bir basınç algılayıcı dizisinde kullanılmıştır (Kim vd., 2021).

Sholehah A., ve ark., basit bir elektrokimyasal biriktirme işlemi kullanılarak esnek bir polietilen tereftalat-indiyum kalay oksit (PET-ITO) substrat üzerinde çinko-gümüş (ZnO-Ag) tabakası kullanılarak bir algılayıcı üretmişlerdir. Etilen algılamanın en iyi şekilde, en eşit kaplama katmanına sahip daha küçük kristal boyutlu ZnO-Ag katmanında çalıştığı gösterilmiştir (Sholehah vd., 2021).

Annabestani M., ve ark., jel bazlı ve düşük maliyetli, yüksek derecede gerilebilir algılayıcı üretmişlerdir. Önerilen yöntemle tek bir algılayıcı, tüm esneme, bükülme ve basınç özelliklerini ölçüp ayırt edilebilmiştir (Annabestani vd., 2021).

Özdoğan S., (2021), PLA malzemesinin eklemeli imalat işleminde üretim parametrelerinin etkisini incelemiştir. Çalışmada doluluk oranı %20, %40, %60, %80, katman kalınlığı 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 mm, nozul sıcaklığı 210, 220, 230 °C ve tarama açısı 0°, 45° ve 90° parametreleriyle toplamda 10 farklı numune grubu üretilmiş ve üretilen numunelerin akma mukavemeti, maksimum eğilme gerilmesi, rezilyansı, tokluğu, elastiklik modülü gibi mekanik özelliklere ve baskı süresine etkileri incelenmiştir (Özdoğan S., 2021).

Gebel M. E., (2018), karbon ve cam fiber takviyeli ultraviyole ışınla kürlenebilen polimer matrisli kompozit ürünlerin, üretilebileceği bir eklemeli imalat yöntemi geliştirmiş ve çeşitli parametrelerin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonunda karbon fibere kıyasla cam fiberin daha uygun olduğu anlaşılmıştır (Gebel M. E., 2018).

Aktürk M., (2021), Seçmeli Lazer Ergitme (SLM) teknolojisi kullanılarak AlSi10Mg alaşımlı numuneler üretmiştir. Numunelerin Jhonson-Cook malzeme modeli belirlenmiş ve bu veriler sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Ansys programına yüklenerek oluşturulan çekme simülasyonu sonuçları ve deney sonuçları kıyaslanmıştır. Test ve simülasyon sonuçları arasında ortalama %7.5 fark olduğu görülmüş ve bu sapma miktarı, oluşturulan yeni malzeme modelinin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini ispatladığı belirtilmiştir (Aktürk M., 2021).

Çizelge 1.2'de UV ışını ile kütleme yöntemiyle eklemeli imalat işleminin kullanıldığı bilimsel çalışmalar ve özellikleri verilmiştir. Çizelge 1.2'den de anlaşılacağı gibi UV ışını ile kütleme yöntemi son zamanlarda tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde

mürekkep adı verilen sıvılar çeşitlendirilmeye çalışılmış ve bu mürekkeplerin genellikle mekanik ve iç yapı özellikleri incelenerek karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların daha çok deneysel gerçekleştirildiği sonucuna varılabilir.

Çizelge 1.2. UV ışını ile kütleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri

Malzeme	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Karbon fiber	Gebel M. E. ve Ermurat M.		X
İnsan koroner arter endotel hücreleri (HCAEC'ler) ile yüklü nano-güçlendirilmiş hibrit bir kalp yamasını	Izadifar, M., vd.,		X
Kompozit	Invernizzi, M., vd.,		X
Kompozit	Mantelli, A., vd.,		X
Kompozit	Postiglione G. Vd.,		X
Bitkisel yağ	Barkane, A., vd.,		X
Akrilik reçine	Kim, Y. C., vd.,		X
Fotopolimer	Hong, S. Y., vd.,		X
Bütül akrilat ve çapraz bağlayıcı olarak diüretan dimetakrilat	Lee, S., vd.,		X
Polihebraloligomerik silseskioksan (m-POSS) nanoparçacıkları	Li, Y., vd.,		X
Gözenekli demir-mangan yapı	Putra N. E., vd.,		X
Aljinat/jelatin kompozit hidrojeller	Lin Z. vd.,		X
Fotreaktif jelatin nanopartikül	Diba M. vd.,		X
Sodyum aljinat	Kim M. H. vd.,		X
Mikrojel bazlı kompozit mürekkep	Song K. vd.,		X
Hidroksi etil selüloz bazlı biyo mürekkep	Gospodinova A., vd.,		X
İpek fibroin nanofiberler	Sakai S., vd.,		X
Silikon	Ginestra P. S., vd.,		X
Carrageenan ile aljinat hidrojelleri	Kim M. H. vd.,		X

Çizelge 1.2. devamı

Malzeme	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Kalsiyum karbonat ve kalsiyum Hidrojen fosfat	Liu Su vd.,	X	X
Nano-hidroksiapatit tozu ve nano-Zirkonya	Zhang J., vd.,		X
Di-functional methacryloxypropyl Terminated polydimethylsiloxane (PDMS-DMA), mono-functional 2-ethyl hexyl acrylate (EHA) and bis(2,4,6-Trimethylbenzoyl)-henylphosphine oxide (Irgacure 819)	Foerster A. vd.,		X
Al ₂ O ₃ mürekkebi	Xing H. vd.,		X

İncelenen bilimsel çalışmaların önemli bir kısmında kullanılan diğer bir yöntem ise aerosol jet printing yöntemidir. Aerosol jet printing yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar ve bu çalışmaların özellikleri Çizelge 1.3'te verilmiştir. Aerosol jet printing yöntemi microplotter yöntemine kıyasla daha yüksek hızda üretimin mümkün olması ve yüksek mekanik özellikler gibi nedenlerden dolayı son zamanlarda ilgi çekici yöntemlerden birisi olmuştur. Her ne kadar yöntem microplotter yöntemine kıyasla daha yüksek toleranslarda üretim gerçekleştirmesi yöntemin bir dezavantajı olsa da aerosol jet printing yönteminin yukarıda sayıldığı gibi kendine özgü avantajları da mevcuttur. Son zamanlarda aerosol jet printing yöntemiyle gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde kullanılan mürekkebin özelliklerini belirlemek temel amaç edinildiği sonucuna varılabilir. Çizelge 1.3 incelendiğinde çalışmaların tamamının deneysel yöntemle gerçekleştirildiği sonucu çıkarılabilir.

Çizelge 1.3. Aerosol jet printing yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri

Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Karbon nanotüp	Aeresol jet printing	Jones C. S. vd.,		X
Gümüş nano partikül ve nano karbon takviyesi	Aeresol jet printing	Zhao D. vd.,		X
Zirkonyum ve NiO takviyeli mürekkep	Aeresol jet printing	Sukeshini M. A. vd.,		X
Organik gümüş mürekkep	Aeresol jet printing	Eckstein R. vd.,		X
Organik gümüş mürekkep	Aeresol jet printing	Seifert T., vd.,		X
Grafen bazlı mürekkep	Aeresol jet printing	Jabari E. vd.,		X
Grafen/gümüş bazlı mürekkep	Aeresol jet printing	Tait J. G. vd.,		X
Poliimid/karbon nanotüp bazlı mürekkep	Aeresol jet printing	Wang K. vd.,		X
Karbon nanotüp	Aeresol jet printing	Goh G. L. vd.,		X
Organik gümüş mürekkep	Aeresol jet printing	Laurent Ph. vd.,		X
Altın bazlı mürekkep	Aeresol jet printing	Khan S. vd.,		X
Gümüş bazlı nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	He C. vd.,		X
Gümüş bazlı nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Zhang H. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Chen Y. D. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Catic N. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Deneault J. R. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Phuah E. W. C. vd.,		X
Grafen amonyak sensörü	Aeresol jet printing	Zhu Y. vd.,		X
Nikel nanoparçacıklı mürekkep filmler	Aeresol jet printing	Rahman M. T. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Aeresol jet printing	Jing Q. vd.,		X

Bilimsel çalışmalar incelendiğinde; incelemelerde kullanılan bir diğer yöntem ise microplotter yöntemidir. Çizelge 1.4'te microplotter yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar ve bu çalışmaların özellikleri verilmiştir. Microplotter yöntemi yüksek hassasiyetli imalat işlemlerine imkan veren yöntemdir. 5µm hassasiyetinde imalat işlemleri gerçekleştirebilen yöntem bu özelliği nedeniyle son zamanlarda ilgi çekici bir diğer konu olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların daha çok deneysel yöntemle gerçekleştirildiği belirlenebilir. Çalışmalarda mürekkep malzemesi olarak kullanılan sıvıların özellikleri incelenmiştir. İncelemelerde mürekkeplerin mekanik, termal, ıslatılabilirlik gibi özellikleri alanında incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1.4 Microplotter yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen makaleler ve özellikleri

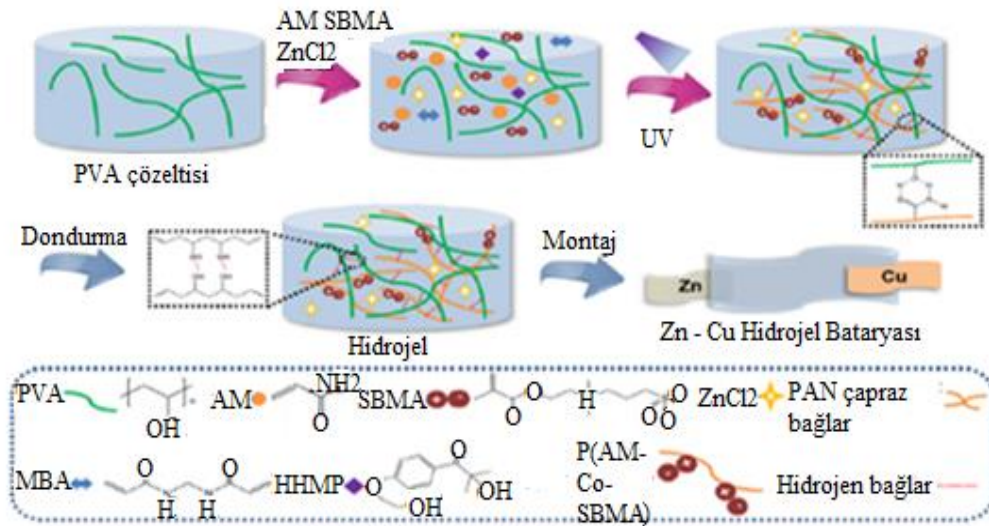
Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Kurşun Zirkonat titanat	Microplotter	Larson B. J. vd.,		X
Kurşun Zirkonat titanat	Microplotter	Bau M. vd.,		X
Latmanyum alüminat	Microplotter	Driessche I. V. vd.,		X
Sertleştirici (araldite M 960) and epoxy reçine (Araldite 506)	Microplotter	Zang Z. vd.,		X
-	Microplotter	Allanurov A. M. vd.,		X
Karbon nanotüp	Microplotter	Aminayi P. vd.,	X	X
Silika ve silikon	Microplotter	Shancheng Y. vd.,	X	X
rGO-Pt dispersiyonu ve polimer çözeltisi	Microplotter	Sobolewski P. vd.,		X
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Rohit A. vd.,		X
Bakır nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Molazemhosseini A. vd.,		X
Silikon dioksit ve manyetik nanopatikül mürekkebi	Microplotter	Wang Y. vd.,	X	X
Kalsiyum titanyum oksit	Microplotter	Holeman T. vd.,		X

Çizelge 1.4.devamı

Malzeme	Yöntem	Yazar	Analitik, & Nümerik analiz	Deneysel
Karbon nanotüp ve grafen	Microplotter	Kwon K. S. vd.,	Derleme	Derleme
Gümüş nanoparçacık mürekkepleri	Microplotter	Zymelka D. vd.,		X
Karbon nanotüp mürekkebi	Microplotter	Li Q. vd.,		X

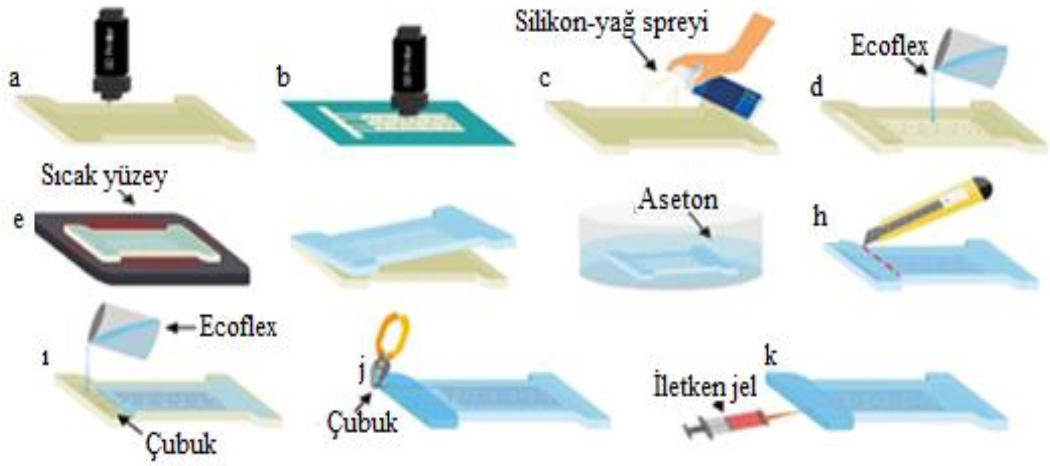
1.3.2. Biyoyumlu Nesnelere İçin Örnek Üretim Yöntemi

Biyoyumlu nesnelere üretimindeki çalışmalar, genel anlamda üretim malzemesinin yanı sıra; üretim yöntemidir. Bu kısımda üretim malzemesi ve üretim yöntemi ile ilgili iki örnek verilmiştir. Zhou ve ark., kendilerinin sentezledikleri polimeri kullanarak yaptıkları çalışmada üretilen nesnenin özelliklerini incelemiştir. Üretilen nesnenin beklenen özellikler önceden belirtilmiş ve çalışma sonucunda bu hedeflere tutarlılık irdelenmiştir. Şekil 1.1.'de Zhou ve ark., üretimini gerçekleştirmiş olduğu algılayıcı olarak kullanılan biyoyumlu nesnenin üretim basamakları verilmiştir.



Şekil 1.1. Zhou Z., vd. üretim şeması (Zhou vd., 2021)

Çalışmaların inceleme alanları, üretim malzemesinin yanı sıra; üretim yöntemidir. Çalışmada üretim yönteminin etkisini inceleyen, Annabestani ve ark., bu anlamda örnek olarak verilebilir. Şekil 1.2.'de Annabestani M. ve ark., üretimini gerçekleştirmiş olduğu algılayıcının üretim basamakları verilmiştir.



Şekil 1.2. Annabestani M. vd., üretim basamakları (Annabestani vd., 2021)

Annabestani ve ark., üretim işlemini şu basamaklardan oluşmaktadır:

1. Öncelikle kalıp hazırlanmıştır.
2. 3D baskı ile iletken yapının iskelesi hazırlanmıştır.
3. Yumuşak malzemenin kalıba aşırı yapışmasını önlemek ve kalıptan kolayca soyulabilmesi için yağlayıcı (silikon-yağ spreyi) sıkılmıştır.
4. Basılan iskele deseni kalıba alındıktan sonra Ecoflex hazırlanıp desikatöre alınarak kalan baloncukların çıkması için kalıba dökülmüştür.
5. Daha sonra bir sıcak plaka üzerine yerleştirilmiş ve Ecoflex kürlenene kadar (120°C' ye) ısıtılmıştır. Sertleşme süresi, algılayıcının kalınlığına bağlı olarak yaklaşık 20 dakikadır.
6. Talaşı kalıptan çıkardıktan sonra asetona batırılmıştır. Bu aşamada aseton buharı ABS'yi çözmüş ve Ecoflex'te 3D mikro kanalları oluşturulmuştur.
7. Bu adımda algılayıcı hazır olduğu belirtilmiştir Ecoflex'in yüksek uzama özelliğinden dolayı kontak telleri kanala sabitlenemeyebileceğinden, bölge için Dragon Skin™ 30 silikon kauçuk kullanılmıştır.

8. Jel içinde istenmeyen kabarcıkları önlemek için ip soyulduktan sonra kanallar bir ıringa pompası kullanılarak doldurulmuştur.
9. Son olarak her bir hazneye ince tellerden yapılmış elektrik bağlantıları yerleştirilmiştir.



2. MATERYAL ve METOD

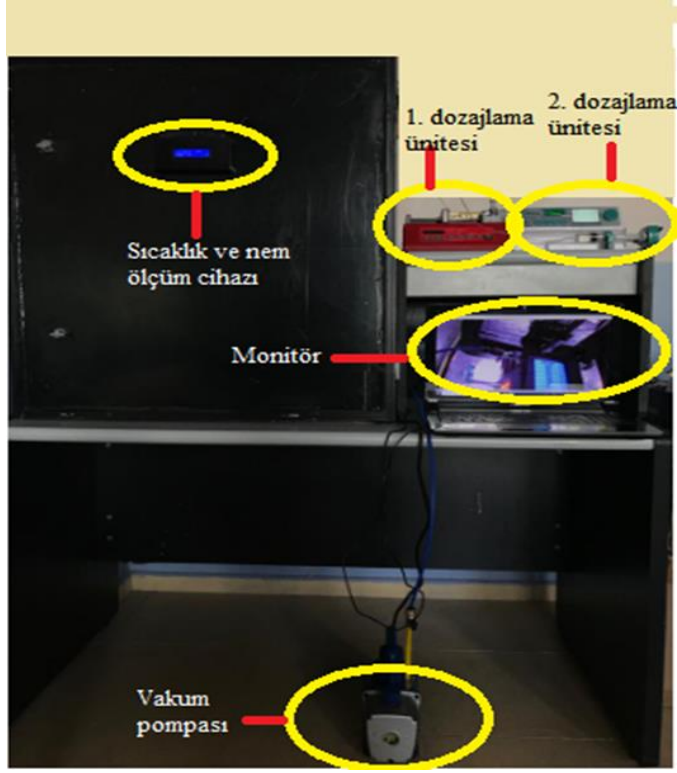
2.1. Materyaller

2.1.1. Kimyasallar

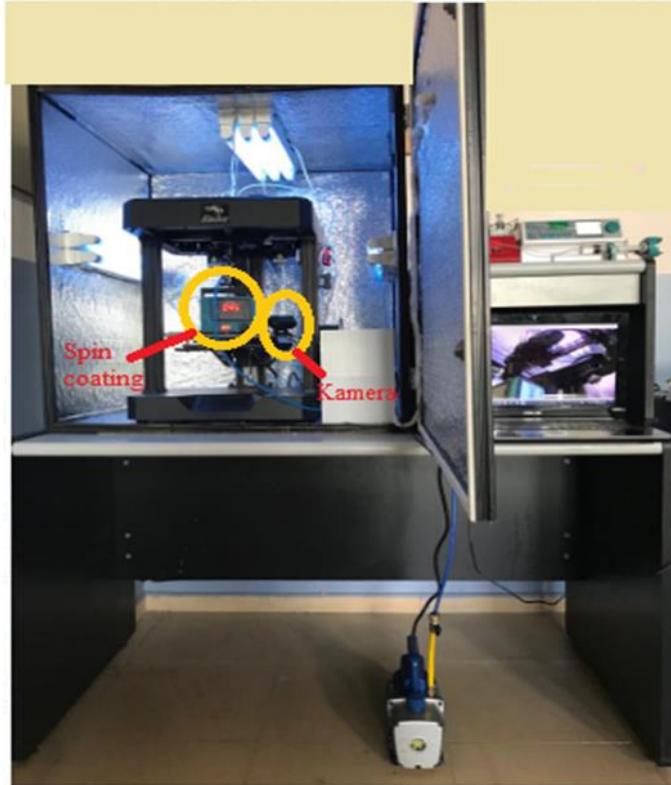
pHEMA üretimi için kullanılan, 2-Hidroksietilmetakrilat (HEMA,>%97) Ataman kimya, polivinil alkol (PVA, $M_n \sim 30.000-70.000 \text{ g mol}^{-1}$) Ultimaker, etilen glikol dimetilakrilat (EGDMA, >%97.5) Sigma-Aldrich, azobisobütironitril (AIBN,>%98) Sigma-Aldrich firmasından ve fosfat tamponlu salin (PBS, pH 7.4) Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

2.1.2. Cihazlar

Gerçekleştirilen çalışmada UV enerjisi ile fotopolimerizasyon yöntemine uygun olarak mürekkepleri kürleyebilen, atmosfer koşullarından tamamen yalıtılmış ve standart kartezyen eksenlerine sahip olmakla birlikte tablasının üstüne monte edilmiş farklı devir sayılarında dönebilen cihaz ile dördüncü eksen kazandırılmış ve böylece dönerek kaplama işlemini yapabilen 4D eklemeli imalat cihazı tasarlanmıştır. Cihazdaki dördüncü eksen ile üretime esneklik kazandırılması amaçlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen cihazın performansını ölçmek amacıyla ultraviyole ışın ile kürlenmiş poli(2-hidroksietilmetakrilat), pHEMA, bazlı mürekkep malzeme kullanılmış ve üretilen nesnenin çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikleri elde edilmiş ve cihazın performansı test edilmiştir. Biyouyumlu nesnelerin eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde kullanılması için tasarlanan cihazın görüntüsü Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



a)



b)

Şekil 2.1. 4D eklemeli imalat cihazının a. dış, b. iç görüntüsü.

2.1.2.1. PVA Kalıpların Üretilmesi

Çalışma kapsamında elde edilen pHEMA polimeri, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen Ø30x30 ve Ø26x30 boyutlarındaki polivinilalkol (PVA) kalıp içerisinde (Şekil 2.2), hidroksietilmetakrilat monomerinin 2,2'-azobis(2-metilpropilonitril) fotobaşlatıcısı ile ultraviyole ışın ile polimerleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Polimerleşmeden sonra PVA'dan üretilen kalıbın çözünmesi ve böylece pHEMA temelli biyopolimerin eldesi için PVA kalıp ile birlikte pHEMA da saf suyun içerisinde 8 saat boyunca bekletilmiştir (Şekil 2.3).



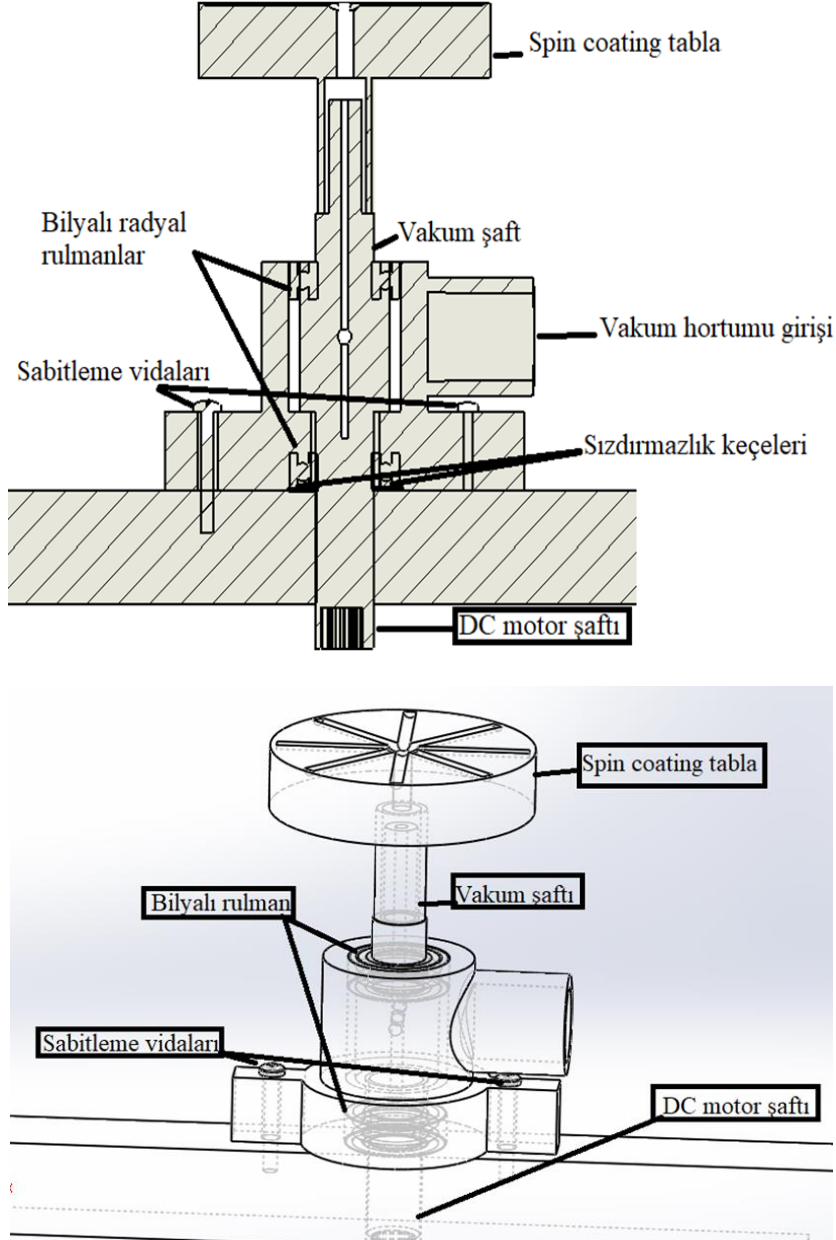
Şekil 2.2. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen PVA kalıp



Şekil 2.3. Saf suyun içerisindeki pHEMA numunesini görüntüsü

2.1.2.2. Dönerek Kaplama Cihazı (Spin Coating) Tasarımı

Dönerek kaplama cihazı iki sızdırmaz keçe ve iki sızdırmaz rulman kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan kaplama cihazı farklı devir sayılarında dönebilmektedir. Tasarlanan dönerek kaplama aparatı Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Dönerek kaplama (spin coating) cihazı teknik görüşleri

Çizelge 2.1. DC motor voltaj ve hız ayar değer skalası

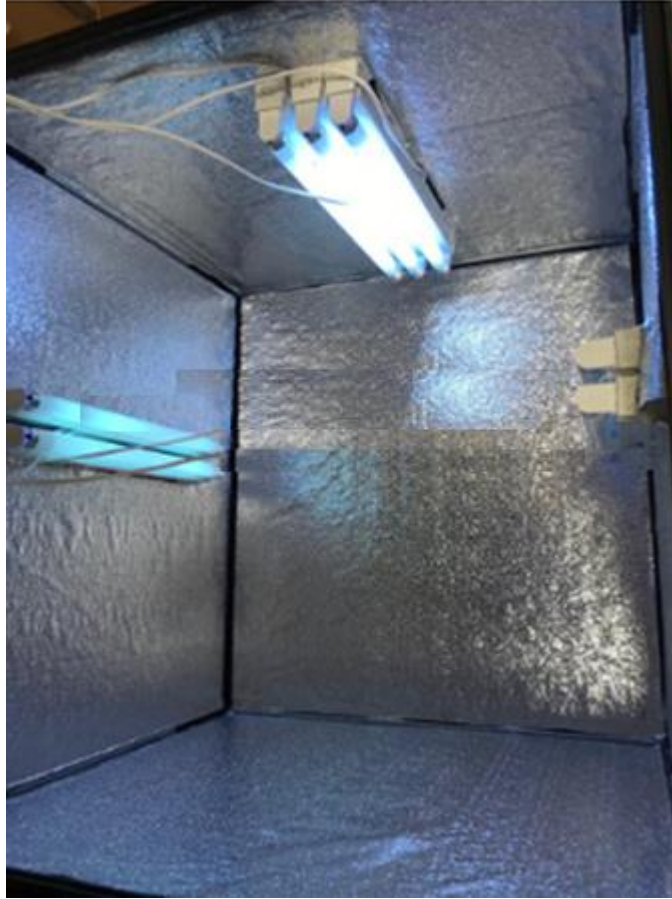
Kademe	Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)	Kademe	Voltaj yüzdesi	Devir sayısı (rpm)
1	% 5	137.5	11	% 55	1512.5
2	% 10	275	12	% 60	1650
3	% 15	412.5	13	% 65	1787.5
4	% 20	550	14	% 70	1925
5	% 25	687.5	15	% 75	2062.5
6	% 30	825	16	% 80	2200
7	% 35	962.5	17	% 85	2337.5
8	% 40	1100	18	% 90	2475
9	% 45	1237.5	19	% 95	2612.5
10	% 50	1375	20	% 100	2750

2.1.2.3. Kapalı Ortam Koşullarının Oluşturulması

Üretilen nesnelerin çevre atmosfer koşullarından etkilenmesini önlemek amacıyla 700x750x800mm boyutunda 4mm kalınlığında siyah pleksi malzemeden kabin tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan 4 mm kalınlığındaki pleksi levhalar, 20x20mm ölçülerindeki altı kanallı sigma profillere Selsil marka sert silikon yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiştir. Montaj işlemi tamamlandığında son ölçüleri 710x760x810mm olan kabinin dış görüntüsü Şekil 2.6 a. da gösterilmiştir. Kabinin iç ortamının yansıtıcılığını artırmak ve kürlenme işlemini kolaylaştırmak amacıyla kabinin iç yüzeylerine 0.3mm kalınlığında yapışkan alüminyum folyo kullanılmıştır. Yapışkan alüminyum folyonun pleksi malzemeye tutuculuğu artırmak amacıyla Sista marka genel amaçlı silikon kullanılmıştır. Kürlenme işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla 15watt gücünde 7 adet Osram marka L-BL-T8 model UV ışın kaynağı kullanılmıştır. Işın kaynakları pleksi levhaya kullanılan ışık kaynaklarının tüm alanı eşit şekilde görebilmesi için kabinin iç tarafının yanal yüzeylerine 2 adet ve tavan kısmında 3 adet olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.6.b).



a)



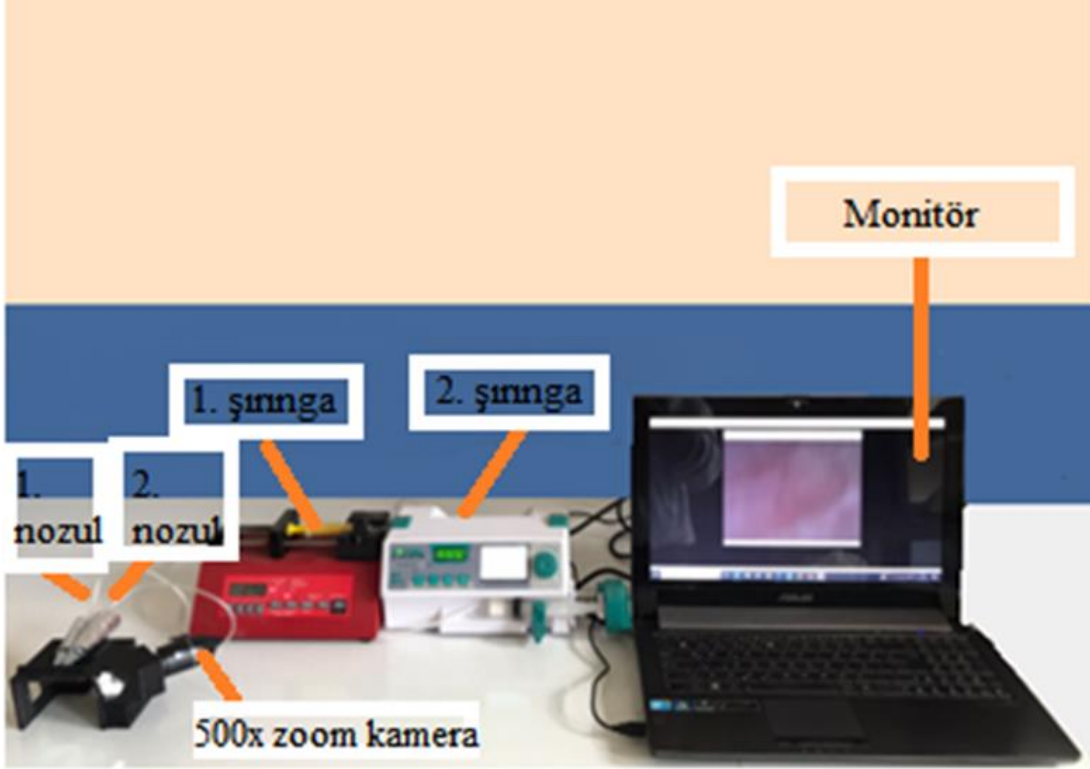
b)

Şekil 2.6. a. Montajı tamamlanan cihazın dış görüntüsü **b.** Montajı tamamlanan cihazın iç görüntüsü

4D eklemeli imalat cihazının atmosfer koşullarını kontrol edebilmek amacıyla CL marka vakum pompası (215 model) ve Kuletaş marka kompresör (ZB2024 model) kullanılmıştır. Kabinin atmosfer koşullarından yalıtılması amacıyla kabinin yanıl yüzeyine 5mm çapında 4 adet delik açılmıştır. Bu açılan deliklerin birisi vakum hortumu, ikincisi spin coating vakum hortumu, üçüncüsü cihaz ışıklarının kablolarına güç kaynağının sağlanması ve dördüncüsü dozajlama ünitesinden çıkan hat için açılmıştır.

2.1.2.4. Dozajlama Ünitesi Tasarımı

4D eklemeli imalat cihazı ile üretimi sağlamak amacıyla dozajlama ünitesi tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Dozajlama ünitesinin sol yan kısmına montajlanmış halde bulunan ve dozajlama ünitesinin çalışması sırasında üretimi kontrol edebilmek amacıyla görüntüleri .jpeg ve .mp4 formatında kaydedebilen dijital kamera bulunmaktadır. Dozajlama ünitesinde 3 adet nozul bulunmaktadır. Kullanılan nozullar 0.4mm kalınlığındadır. Ünite başlığı sahip olduğu çoklu nozul yapısı sayesinde aynı ve farklı yapıdaki polimerleri herhangi bir nozul değişimi olmaksızın serbilmektedir. Dozajlama ünitesinin başlığının daha hafif olması ve havalandırma için başlığın her iki yanında 30x25x5mm ve ön kısmında 50x20x5mm boşluklar bulunmaktadır. Üretimi eklemeli imalat yöntemiyle polilaktik asit (PLA) malzeme kullanılarak gerçekleştirilen dozajlama ünitesine ait görüntüler Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekil 2.7.a'da dozajlama ünitesinin başlığının teknik detayları, Şekil 2.7.b'de dozajlama ünitesinin başlığının mürekkep malzeme serimi anındaki serim görüntüsü verilmiştir.

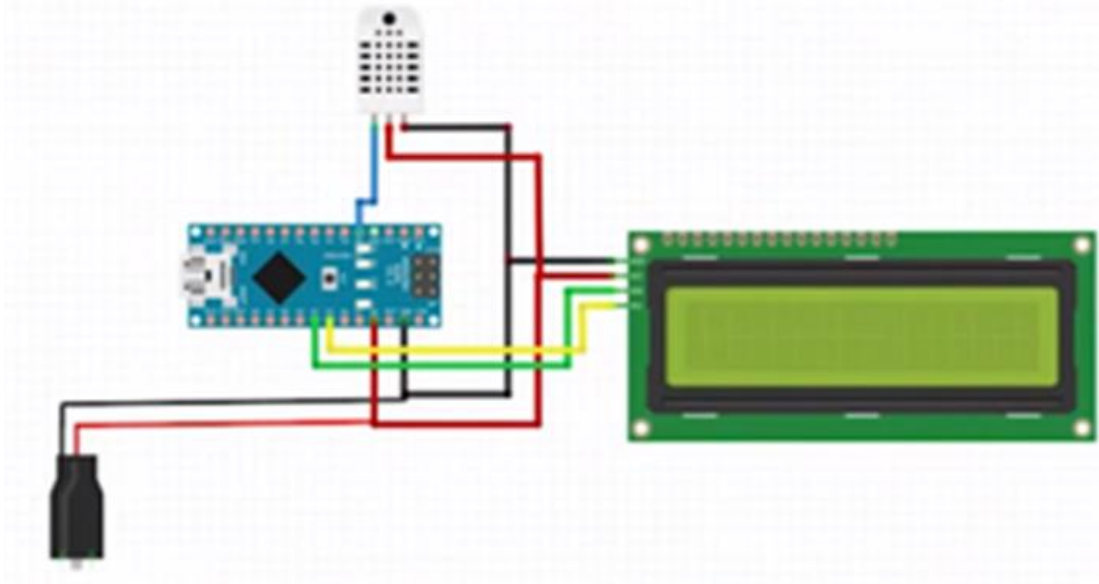


Şekil 2.8. Dozajlama sisteminin görüntüsü

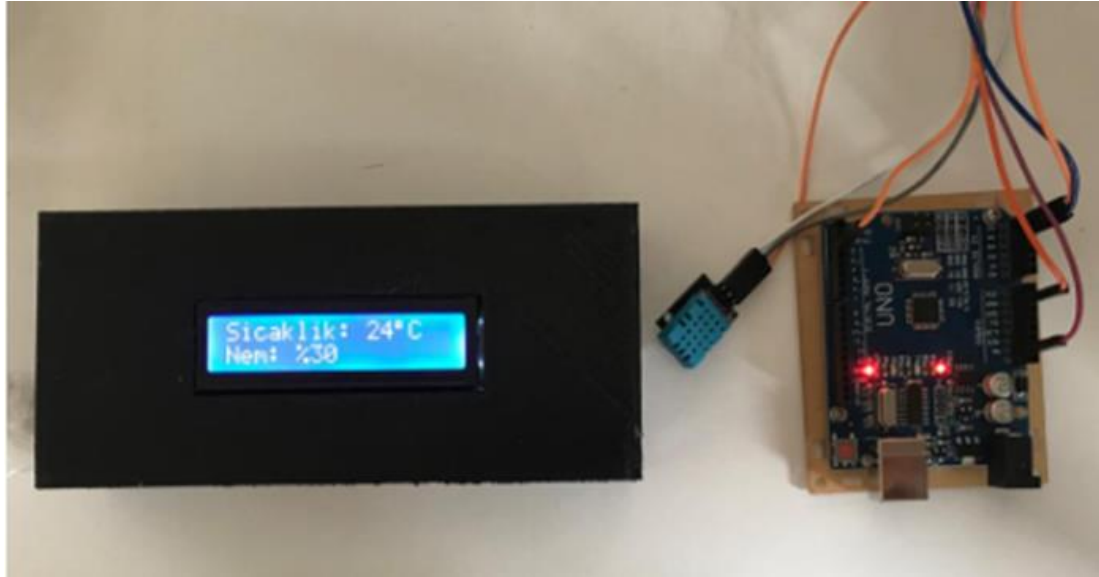
2.1.2.5. Kapalı Ortam Koşullarının Kontrolü

Kabin atmosfer koşullarının kontrolünü sağlamak amacıyla sıcaklık ve nem ölçer üretilmiştir. Sıcaklık ve nem ölçer üretimini gerçekleştirmek için kontrolör olarak Arduino Uno kartı kullanılmıştır. Kabin iç sıcaklık ve nem değerlerini ölçmek amacıyla DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ve nem ölçüm sensörü 0-50°C aralığında 2°C lik hata payı ve %20-90 nem aralığında %5 lik hata payı ile ölçüm yapabilmektedir. Bu tolerans değerleri çalışma şartları için uygun olduğundan DHT11 model sıcaklık ve nem ölçüm sensörü kullanılmıştır. Sensörde okunan değerleri Arduino ile yorumladıktan sonra ince tabakalı transistör (TFT) ekranına yansıtarak kabin koşulları görselleştirilmiştir. Kabin çalışma atmosferini görselleştirmek amacıyla 16x2 IIC/I2C/TWI model seri mavi LCD ekran kullanılmıştır. Sıcaklık ve nem ölçer cihaz yapısının sadeleştirilmesi amacıyla çalışmada kullanılan LCD ekran İ:C bağlantısını desteklemektedir. Çalışmada kullanılan modüller arasında bağlantı kurabilmek için atlama kablosu ve sıcaklık ve nem ölçüm cihazını besleyebilmek için 5 volt 1 amper çalışma değerine sahip güç kaynağı (adaptör) kullanılmıştır. Güç kaynağından gelen

enerjiyi devreye verebilmek amacıyla klemens çıkışlı DC diş adaptör prizi kullanılmıştır. Kabin atmosfer koşullarını kontrol etmek amacıyla tasarlanan ve üretilen sistemin şeması Şekil 2.9.a'da, bu şemaya uygun olarak üretimin gerçekleştirilmesi sonucunda oluşan cihazın görseli Şekil 2.9.b'de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 2.9 a. Sıcaklık ve nem sensörünün şeması. **b.** Sıcaklık ve nem ölçer şemasına uygun olarak üretilen sıcaklık ve nem ölçüm cihazı.

2.1.2.6. pHEMA Karıştırma İşlemi

pHEMA'nın elde edilmesinde manyetik ısıtıcılı karıştırıcı (İsolab, Almanya) kullanılmıştır (Şekil 2.10).

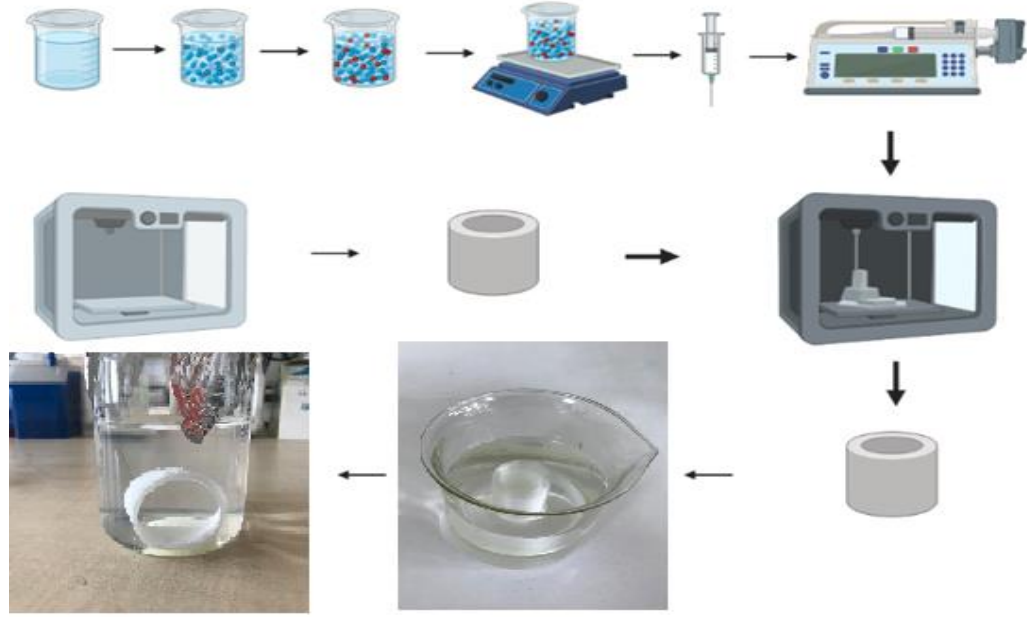


Şekil 2.10. Manyetik ısıtıcılı karıştırıcı

2.2. Metod

2.2.1. pHEMA İçerikli Yapay Aort Üretimi

pHEMA filmler literatürdeki üretim yönteminde küçük değişiklikler gerçekleştirilerek UV-fotopolimerizasyon yöntemine uygun şekilde üretildi (Bayramoğlu ve Arıca, 2002). Çalışmada, 2-hidroksietil metakrilat (HEMA monomeri, 4 mL), iki farklı oranda (25-50 mg) azobisobütironitril (AIBN) ile etilen glikol dimetilekriyat (EDGMA), altı farklı oranlarda (10-25-50-75-100-200 µL) 25 dakika boyunca karıştırıldı. Oluşan çözelti içerisine 2 mL fosfat tamponlu salin (PBS) eklendi. Oluşan çözelti dış çapı 30mm ve iç çapı 26 mm boyu 30 mm olan (Ø30x30 ve Ø26x30) polivinilalkol kalıplar (PVA) içerisine dozajlama ünitesi vasıtasıyla serildi. PVA kalıp içerisine aktarılan çözeltiye oda sıcaklık değerinde 365 nm ultraviyole ışın (LUZ_EDU modeli) uygulandı (Şekil 2.11). Fotopolimerizasyon işleminden sonra PVA kalıp içerisindeki pHEMA saf içerisine alındı ve 8 saat bekletildi. PVA malzemenin suda erimesi için gerçekleştirilen bekleme işleminden sonra pHEMA elde edildi. Elde edilen numuneler suda yıkandı 40 °C'de vakum etüvünde kurutuldu ve karakterizasyonu gerçekleştirildi.



Şekil 2.11. Yapay aort üretiminin şematik gösterimi

Numunelerin fizikokimyasal özelliklerinden olan mekanik özellikleri dikkate alınarak yapay aort üretimi için en uygun malzeme grubu belirlenmiştir. pHEMA filmleri, AIBN ve EDGMA derişimine bağlı olarak adlandırılmıştır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. pHEMA film kompozisyonu

Polimer Kodu	EDGMA oranı (mg)	AIBN oranı (mg)
pHEMA/25AIBN	0	25
pHEMA/50AIBN	0	50
pHEMA/50AIBN/10EDGMA	10	50
pHEMA/50AIBN/25EDGMA	25	50
pHEMA/50AIBN/50EDGMA	50	50
pHEMA/50AIBN/75EDGMA	75	50
pHEMA/50AIBN/100EDGMA	100	50
pHEMA/50AIBN/200EDGMA	200	50

2.2.2. pHEMA İçerikli Yapay Aort Karakterizasyonu

4D eklemeli imalat cihazında yapay aort numunesinin uygun kimyasal bileşimi mekanik testler sonucunda belirlenmiştir. Cihazın etkinliğini irdelemek ve sonuçların daha anlamlı hale gelebilmesi amacıyla, dördüncü eksenini durdurulmuş ve bu durumundaki (3 boyutlu üretim koşullarındaki) numunelerin özellikleri ile 4D eklemeli imalat cihazında üretilen numunelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. En yüksek mekanik özelliklere sahip pHEMA bileşimi daha sonra 6 farklı kürlenme süresinde kürlenerek en uygun kürlenme süresi uygulanan mekanik test sonucunda belirlenmiştir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Kürlenme işlem süresi

Kademe	Kürlenme süresi (dk)
1. kademe	2.5
2. kademe	5
3. kademe	7.5
4. kademe	10
5. kademe	12.5
6. kademe	15

Uygun kimyasal bileşenin ve kürlenme süresinin mekanik test sonucunda elde edilmesiyle yapay aort numunesinin karakterizasyonu gerçekleştirilen iç yapı karakterizasyonu ve fizikokimyasal analizlerle belirlendi.

2.2.2.1. pHEMA Kristal Yapı Karakterizasyonu

4D eklemeli imalat cihazında kürlenme işlemi sonucunda üretilen pHEMA malzemesinin kristal yapısı, X-ışını Kırınımı (XRD, Rigaku Ultima IV ve Bruker AXS/Discovery D8) yöntemi kullanılarak, 10°-90° değer aralığında, 1°/dk değerinde tarama hızı ile elde edilen kırınım desenleri aracılığıyla değerlendirilmiştir.

2.2.2.2. pHEMA Fizikokimyasal Analizleri

Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM)

pHEMA numunelerin morfolojik yapısı taramalı elektron mikroskopu (TESCAN,

Almanya) ile analiz edilmiştir. Bu amaçla 20,0 mm x 20,0 mm boyutunda numuneler hazırlanmıştır.

Mekanik Testler

Çalışma kapsamında elde edilen pHEMA filmlerin mekanik özellikleri, oda sıcaklığında uygulanan çekme deneyi ile belirlenmiştir. pHEMA filmlere ISO 527-3 test standardına uygun olarak çekme testi uygulanmıştır. Bu amaçla, 20 x 5 x 4 mm boyutlarında hazırlanan her bir numune için ayrı ayrı en az 5 defa çekme testi tekrarlanmıştır. Çekme testleri oda sıcaklığında 10 kN çekme yükünde ve 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen numunelerin elastiklik modülü (Young modülü) Eşitlik 2.1 de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır (Alsayed, 2021).

$$Young\ Modülü = \frac{Gerilim, \sigma}{Gerinim, \epsilon} \quad (2.1)$$

Biyodegradasyon Etkinliği

Biyodegradasyon, enzimler ve yüzey aktif maddelerin bulunduğu bir ortamda organik bileşiklerin küçük parçalara ayrılmasıdır. Numunelerin *in vitro* koşullarda kararlılığını belirlemek için, yapay aort numunesinin *in vitro* koşullarını taklit eden bir ortamda degradasyon özelliği belirlenmiştir. Bu amaçla numuneler 40 °C sıcaklıkta önce kurutulup sabit tartıma getirilmiş ve 10x10 mm boyutlarında hazırlandıktan sonra tartılmıştır. Tartılan ilk kütleler başlangıç kütlesi olarak kaydedilmiştir (W_0). Daha sonra numuneler, içerisinde fosfat tamponu (50mM, pH 7,4 20 ml) bulunan ortama aktarılmış ve 37 °C’de çalkalamalı su banyosunda, 100 rpm çalkalama hızında 30 gün boyunca sürekli olarak karıştırılarak inkübe edilmiştir. Çalışmanın her 10. günü sonunda numuneler ortamdaki alınmış ve tuz kalıntılarının uzaklaştırılması için distile su ile yıkanmış ve 40 °C’de vakum etüvünde kurutulup tartılmıştır (W_1). Degradasyon değeri yüzde olarak eşitlik (2.4) ile hesaplanmıştır.

$$Degradasyon\ Yüzdesi = \frac{(W_0 - W_1)}{W_1} \times 100 \quad (2.4)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

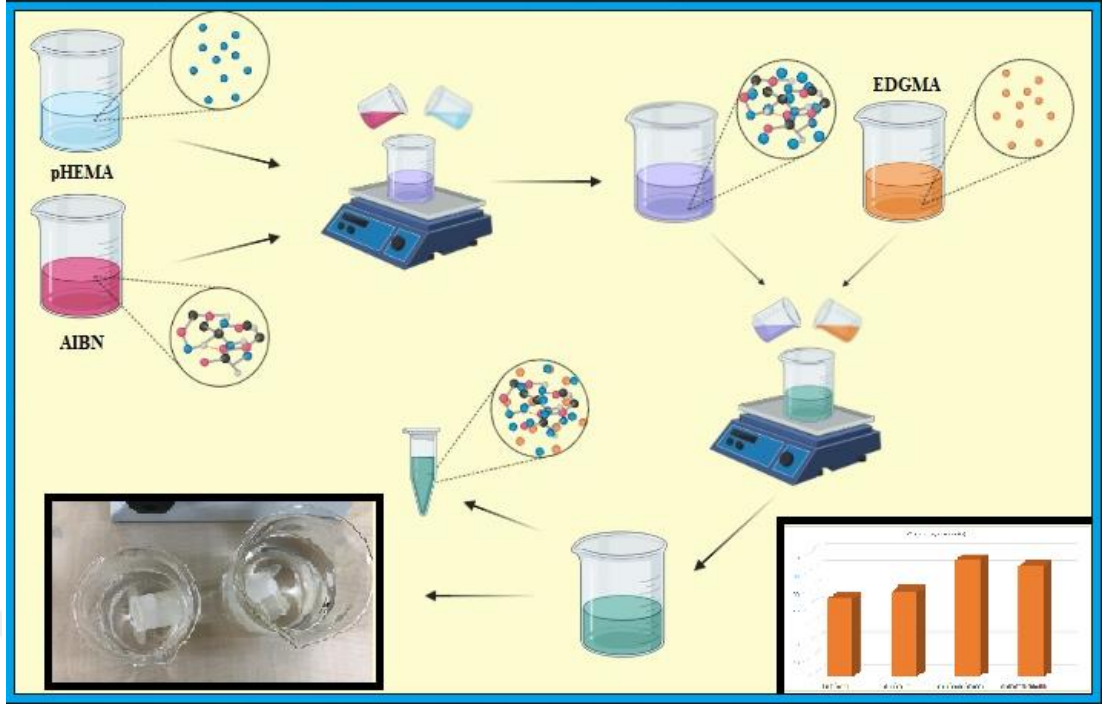
3.1. Dört Eksenli Eklemeli İmalat Cihazında Yapay Aort Üretimi

Bu tez iki ana bölümden oluşmaktadır birinci bölümde dört eksenli eklemeli imalat cihazının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. İkinci bölümde ise yapay aort imalatı için en uygun mürekkep bileşimi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla sekiz farklı oranda üretilen mürekkeplerin özellikleri incelenmiş ve en yüksek mekanik özelliğe sahip ve en hızlı kürlenebilen mürekkep bileşimi belirlenmeye çalışılmıştır (Çizelge 3.1)

Çizelge 3.1. pHEMA film kompozisyonu

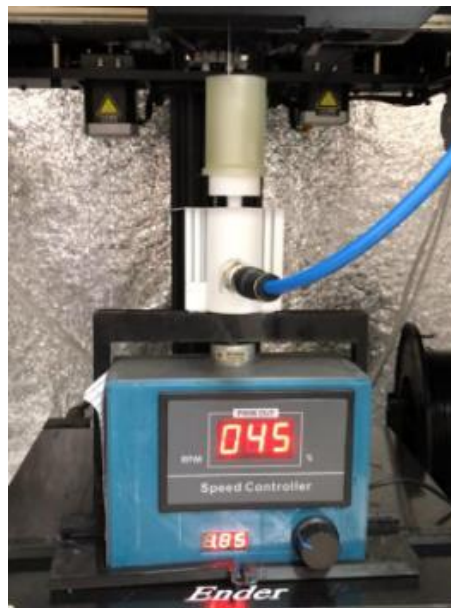
Polimer Kodu	EDGMA oranı (mg)	AIBN oranı (mg)
pHEMA/25AIBN	0	25
pHEMA/50AIBN	0	50
pHEMA/50AIBN/10EDGMA	10	50
pHEMA/50AIBN/25EDGMA	25	50
pHEMA/50AIBN/50EDGMA	50	50
pHEMA/50AIBN/75EDGMA	75	50
pHEMA/50AIBN/100EDGMA	100	50
pHEMA/50AIBN/200EDGMA	200	50

pHEMA içeren mürekkep malzemeler oda sıcaklığında 190 rpm hızında 30 dk. boyunca manyetik ısıtıcılı karıştırıcı ile karıştırılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Mürekkep malzemelerin hazırlanması

Karıştırma işlemi sonunda elde edilen mürekkep malzemeleri ayrı ayrı dozajlama ünitesindeki enjektörlere alınmış ve aort geometrisindeki PVA kalıplar içerisine serim için hazır hale getirilmiştir. Mürekkeplerin PVA kalıp içerisine dozajlama işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İşlem sırasında kullanılan dozajlama ünitesi 10 mL/saat hızında çalışmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Dört eksenli imalat cihazında PVA kalıp içerisindeki dozajlama işlemi

Serim işlemi sırasında eklemeli imalat cihazının ön kapağı kapatılmış ve böylece serim sırasında pHEMA'nın atmosfer koşullarından etkilenmesi önlenmiştir. Cihaz kapatıldıktan sonra 105 watt gücündeki 7 adet UV ışın kaynağı çalıştırılmıştır. Serim işlemi ve kürlenme işlemi boyunca eklemeli imalat cihazının dördüncü eksenini 45 rpm dönme hızında çalıştırılmış ve homojen iç yapının oluşturulması amaçlanmıştır (Şekil 3.3).



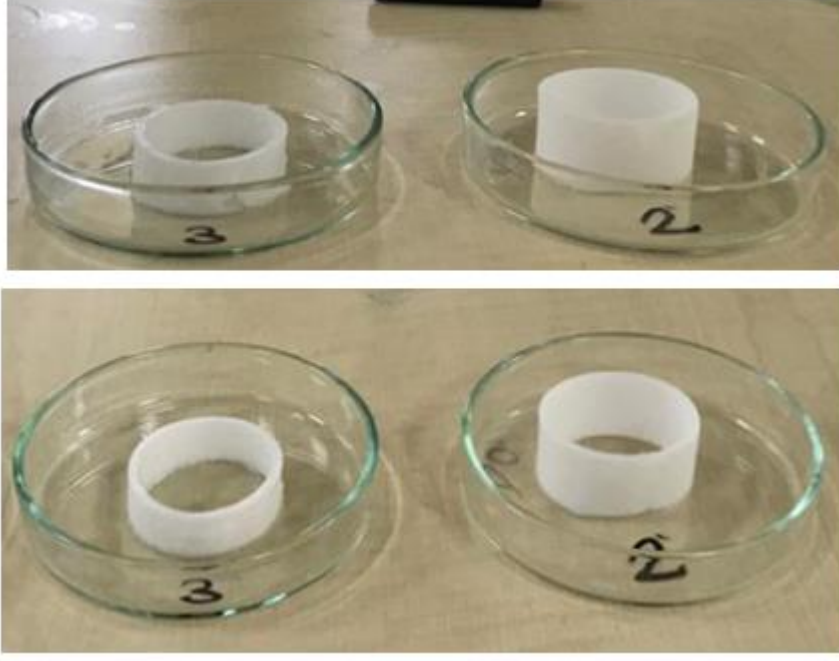
Şekil 3.3. Üretim görüntüsü

PVA kalıp içerisine serim işlemi gerçekleştirildikten sonra farklı kimyasal yapıdaki pHEMA polimerleri, PVA malzemesinin erimesi ve yapay aort geometrisine sahip malzemelerin elde edilmesi amacıyla, içerisinde saf su bulunan beherlere alınmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. PVA numunesinin çözünmesi işlemi

8 saat bekleme süresinden sonra PVA malzemesi saf su içerisinde tamamen çözülmüştür (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yapay aort geometrisine sahip pHEMA polimerleri

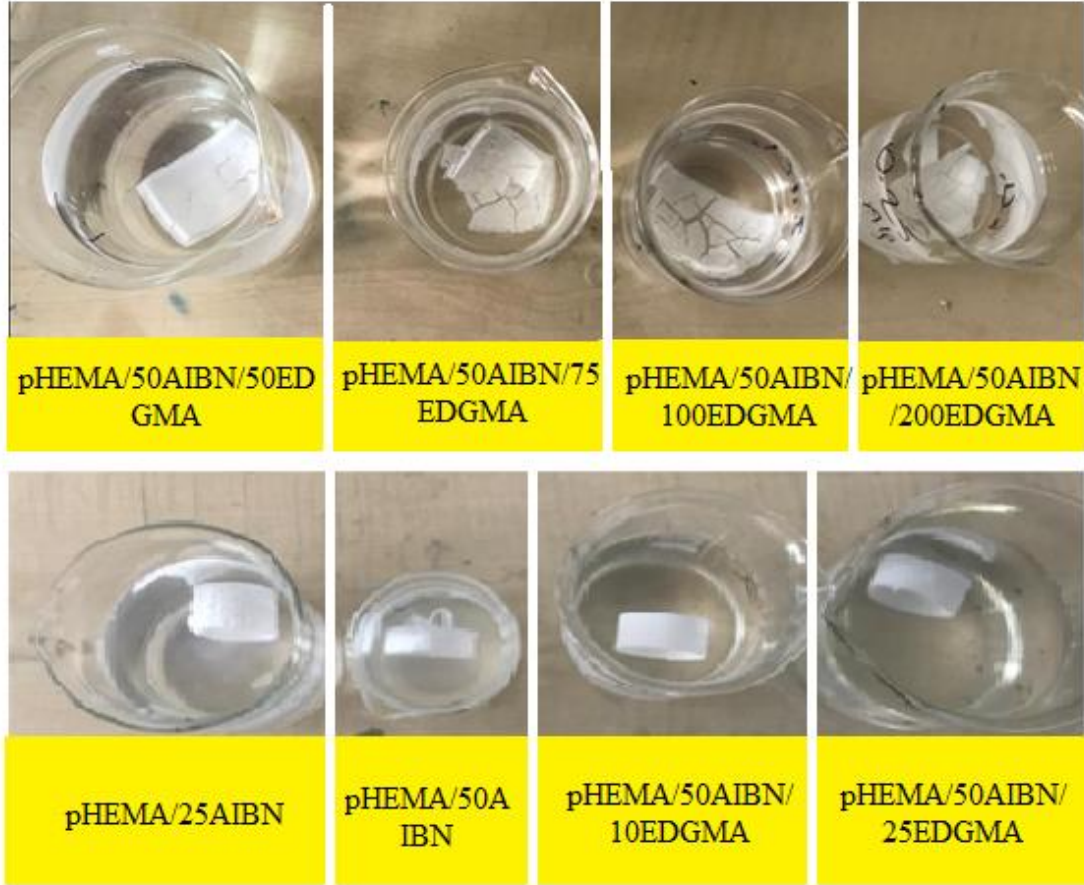
3.2. pHEMA İçeriğinin Belirlenmesi

Hazırlanan 8 farklı bileşimdeki pHEMA polimerleri dört eksenli eklemeli imalat cihazında fotopolimerizasyon işlemine tabi tutulmuş ve numuneler kürlenmiştir. Kürlenme işleminin ardından PVA kalıp içerisindeki polimerler saf su içerisine bırakılmış ve 8 saat saf suda bekletilen PVA malzemenin suda çözünmesi sağlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Üretilen ve PVA çözünmesi için saf suda bekletilen polimerler

PVA malzemenin suda çözünmesi sonucunda aort geometrisindeki polimerlerin görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir. Üretilen pHEMA/50AIBN/50EDGMA, pHEMA/50AIBN/75EDGMA, pHEMA/50AIBN/100EDGMA, pHEMA/50AIBN/200EDGMA içerikli polimerlerde suda çözünme sırasında yapısal kırılmalar meydana gelmiştir.



Şekil 3.7. Üretilen sekiz farklı bileşimdeki pHEMA polimerleri

Kırılmaların yoğunluk sıralaması pHEMA/50AIBN/50EDGMA, pHEMA/50AIBN/75EDGMA, pHEMA/50AIBN/100EDGMA, pHEMA/50AIBN/200EDGMA şeklindedir. Polimerlerde meydana gelen kırılmaların temel nedeni EDGMA'dır. Kırılmanın en fazla olduğu pHEMA/50AIBN/200EDGMA görüntüsü Şekil 3.8 de verilmiştir. EDGMA'nın literatürde fotopolimerizasyon işlemini hızlandığı belirtilmiştir ve bu nedenle polimere katılmıştır. EDGMA belirli bir orandan sonra kürlenme işlemini aşırı hızlandırmış ve kırılmalara neden olmuştur. EDGMA malzemesinin kalıplama amacıyla kullanılan PVA ve foto-başlatıcı olarak AIBN ile uyumlu şekilde çalıştığı, aort geometrisinde başarılı şekilde üretilen diğer bileşimlerdeki pHEMA polimerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 3.8. pHEMA/50AIBN/200EDGMA görüntüsü

AIBN oranının 50 mg ve 25 mg olarak iki farklı oranda kullanılmasının nedeni AIBN oranının mekanik etkilere etkisinin incelenmek istenmesidir. Ayrıca kırılmaların gerçekleştiği diğer polimerler kullanılamaz halde olduğu için özellikleri incelenmemiştir.

Aort geometrisinde üretilen polimerlerin kullanım alanını dikkate alınarak en temel kriterin mekanik özellik olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle başarılı şekilde üretilen pHEMA/25AIBN, pHEMA/50AIBN, pHEMA/50AIBN/25EDGMA, pHEMA/50AIBN/10EDGMA kompozisyonundaki numunelere uygulanacak olan mekanik testler neticesinde en uygun bileşim belirlenmiştir.

3.3. Fizikokimyasal Analiz

3.3.1. Mekanik Testler

3.3.1.1. Dayanımın Belirlenmesi

pHEMA/25AIBN, pHEMA/50AIBN, pHEMA/50AIBN/10EDGMA, pHEMA/50AIBN/25EDGMA numunelere 30 dk. boyunca UV ışını uygulandı. Kütleme işlemi sonrasında numunelerin elastiklik modülü, çekme mukavemeti ve kopma uzaması miktarı değerlendirildi. Diğer polimerler kütleme sonrasında kırıldığından mekanik testler uygulanmadı. Çekme testi Instron marka cihazda 20 x 1 mm boyutlarındaki numuneye 3 mm/dk çekme hızında en az 5 kez tekrarlanarak

gerçekleştirildi ve elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alındı. Numunelerde Şekil 3.9'da verilen kopma davranışına benzer şekilde yanal kenarlardan başlayıp büyüyen bir kopma meydana gelmiştir.



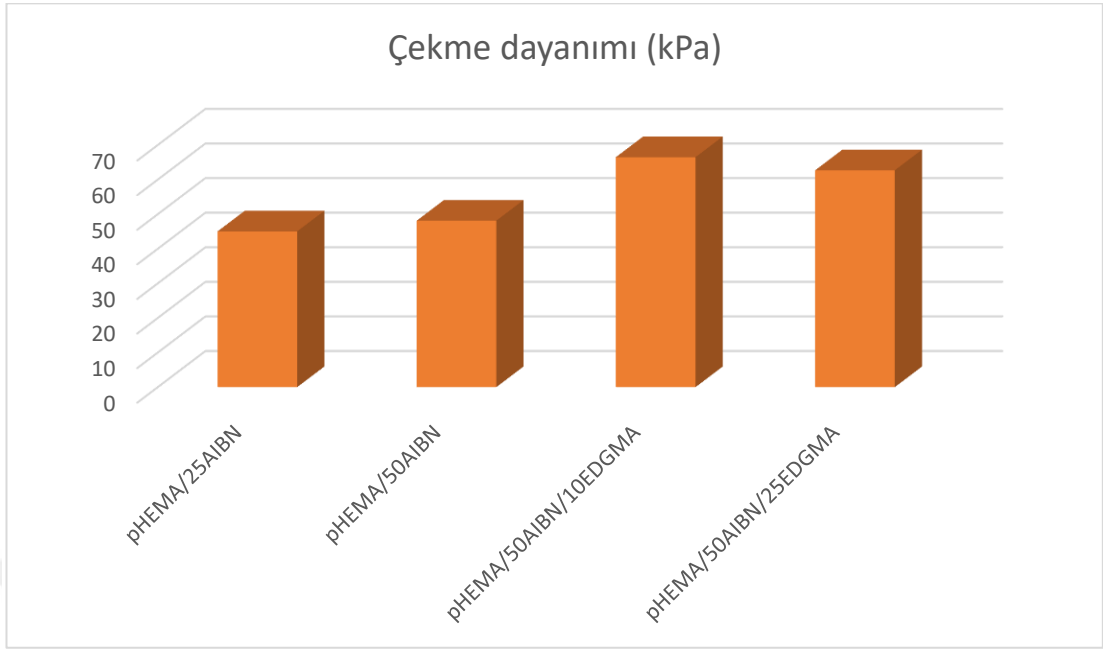
Şekil 3.9. Çekme testi örneği ve kopma anının fotoğrafı

Çizelge 3.2'de farklı takviye oranlarındaki pHEMA numunelerde elde edilen çekme dayanımı gerilmesi, elastiklik modülü ve kopma uzaması verilmiştir.

Çizelge 3.2. pHEMA polimerlerinin mekanik verileri

Numune bileşeni	Elastiklik Modülü (MPa)	Çekme dayanımı (KPa)	Kopma uzaması (mm)
pHEMA/25AIBN	0.2	45.0193	36.26
pHEMA/50AIBN	0.2	48.1073	33.325
pHEMA/50AIBN/10EDGMA	0.3	66.4701	26.51
pHEMA/50AIBN/25EDGMA	0.3	62.6776	21.445

Şekil 3.10, farklı takviye oranlarındaki pHEMA numunelerde elde edilen çekme dayanımı değerlerini göstermektedir. Elde edilen veriler literatürdeki veriler ile uyumludur. Pruksawan S. vd., pHEMA ve farklı çapraz bağlayıcılar kullanarak elde ettiği hidrojenlerin çekme mukavemeti değerlerini 33.6-156.2 KPa aralığında elde etmiştir (Pruksawan et al., 2022).



Şekil 3.10. pHEMA numunelerin çekme dayanımı

Şekil 3.10'da görüleceği gibi, kürlenmeyi hızlandırması amacıyla eklenen EDGMA takviyesi içermeyen numunelerde AIBN takviyesi arttıkça çekme dayanımı artmıştır. Fotobaşlatıcı olarak kullanılan AIBN takviye oranının artmasıyla birlikte polimerin UV ışınlarına duyarlılığı artmış ve daha kısa sürede oluşan polimerler HEMA ve AIBN bağları arasına girerek polimer yapısının gevşemesine ve böylelikle mekanik özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur (Doğan D. 2023). Şekil 3.10'da polimer yapısına EDGMA eklenmesiyle mekanik özelliklerin arttığı görülebilir. EDGMA içeren numunelerin mekanik özellikleri EDGMA içeriği 10 μ L olduğunda en yüksek değerdedir. EDGMA içeriği 10 μ L'nin üstünde olan numunelerden olan ve 25 μ L EDGMA içeren numunede kırılma olmamış ancak mekanik özelliklerde düşüş meydana gelmiştir. 25 μ L'den fazla EDGMA içeren numuneler kırılmıştır.

Şekil 3.11'de farklı takviye oranlarındaki pHEMA numuneler elde edilen çekme dayanımı değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.11. pHEMA numunelerin çekme dayanımı

EDGMA takviyesinin, pHEMA/AIBN ile karşılaştırıldığında, kopma uzaması ve çekme dayanımı ile birlikte elastiklik modülü de etkilediği söylenebilir (Şekil 3.11). Polimerin mekanik davranışı, molekül ağırlığı ve gözeneklilik gibi faktörlerden etkilenmektedir (He vd., 2021a). Kürlenmeyi hızlandırmak amacıyla kullanılan EDGMA takviyesi pHEMA/AIBN polimeri ile fiziksel etkileşimi sonucunda polimer yapısında homojen dağılır ve daha hızlı kürlenmiş partiküllerin polimer yapısına dahil olması nedeniyle mukavemetin artmasına neden olur. EDGMA takviyesi ile nispeten daha kısa sürede oluşan kürlenmiş partiküllerin, çekme işlemi esnasında oluşan ve genellikle kopmaya ve/veya yırtılmaya sebep olan mikro çatlakların oluşmasını engellemek için bariyer gibi davrandığı ve bu nedenle çatlak oluşumu ve büyümesi için gerekli kuvveti artırdığı söylenebilir. Bununla birlikte EDGMA takviyesi kopma uzamasını azaltmıştır. EDGMA takviyesinin 25 μ L'dan fazla olması durumunda kırılma meydana gelmiştir. EDGMA eklenmesi elastiklik modülünü artırmıştır. Kopma uzaması ve elastiklik modülü EDGMA takviyeli polimerin daha yüksek dayanıma sahip olduklarını doğrulamaktadır. Nitekim kürlenme işlemi hızlandıran EDGMA, daha kısa sürede oluşan polimerleşme nedeniyle AIBN ve HEMA arasındaki bağlar gevşemiş ve mekanik özellikler iyileşmiştir.

Literatürde EDGMA ve pHEMA takviyesi ile oluşan numunelerde bu iki malzeme gurubunun etkileşimi sonucu mekanik özelliklerin bir seviyeye kadar artırdığı ve sonrasında azalttığı belirtilmiştir (Yang vd., 2003).

Farklı oranlarda AIBN ve EDGMA içeren numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde ve üretilen numunelerin kullanım alanı dikkate alındığında, en kritik verinin çekme olduğuna karar verilmiştir. Bu nedenle mevcut şartlar altında, yapay aort numunesi olarak kullanıma en uygun pHEMA polimeri, sahip olduğu en yüksek çekme dayanımından dolayı pHEMA/50AIBN/10EDGMA polimeridir.

3.3.1.2. Mekanik Özelliklere Bağlı Üretim Süresinin Belirlenmesi

Mürekkep malzemelerin eklemeli imalat ile üretiminde genel eğilimlerden biride; üretimin kalıp içerisinde değil kalıpsız imalat ile gerçekleştirilmesidir. Mürekkep malzemelerin kalıpsız imalatında en önemli parametrelerden birisi kürlenme süresidir. Serilen mürekkebin kürlenmesi ve bir sonraki katmanın bu kürlenmiş mürekkep üzerine kürlenmesi prensibine dayanan kalıpsız eklemeli imalat işleminde kürlenme süresinin kısa olması gerekir. Gelecek çalışmalara rehber olabilecek bir çalışmanın gerçekleştirilmesinin amaçlandığı bu çalışmada altı farklı kürlenme süresi (2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 dk.) uygulanarak en uygun süre belirlenmeye çalışılmıştır.

Çizelge 3.3'te UV ışın uygulanma sürelerinin uygun olarak en yüksek mukavemet değerine sahip pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesine kürlenme işlemi uygulanmıştır. İşlem sonrasında üretilen polimerler PVA kalıbın çözünmesi amacıyla saf su içerisinde bekletilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Saf suda bekletilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA

PVA kalıp çözünmesi tamamlandıktan sonra polimerler saf su içerisinde çıkarılmış ve saf suyla yıkandıktan sonra üzerindeki sular alınmıştır (Şekil 3.13). Özellikleri incelemeye hazır olan numuneler mekanik özelliklerini incelemek amacıyla ilgili standart boyutlarına uygun hale getirilmiştir.



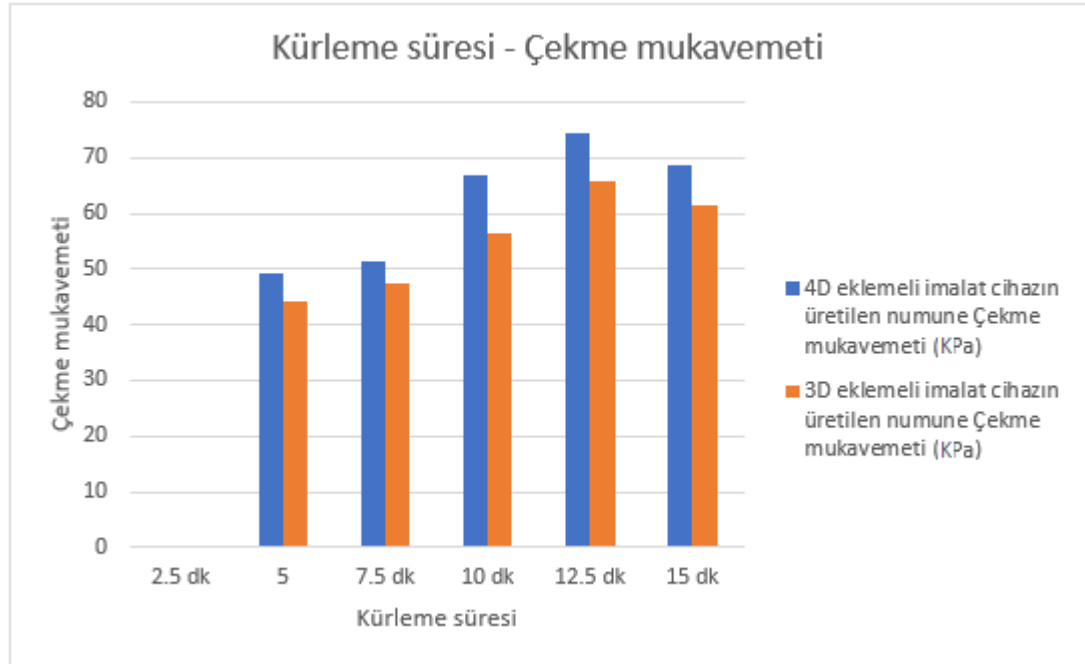
Şekil 3.13. Çözünme işleminden sonra pHEMA/50AIBN/10EDGMA

pHEMA/50AIBN/10EDGMA polimerine uygulanan çekme deneyi ile mekanik özellikler incelenmiştir. Deney sonucunda elde edilen veriler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. pHEMA/50AIBN/10EDGMA mekanik özellikleri

Kürleme süresi (dk)	4D eklemeli imalat cihazın üretilen numune Çekme mukavemeti (KPa)	3D eklemeli imalat cihazın üretilen numune Çekme mukavemeti (KPa)	Fark (%)
1	0	0	0
5	49,39101	44,326719	10,253467
7.5	51,55345	47,297453	8,255503
10	66,72563	56,48791	15,343009
12.5	74,42438	65,84516	11,527432
15	68,67245	61,57891	10,329528

Çizelge 3.3'teki veriler ile hazırlanan grafik Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.14. pHEMA/50AIBN/10EDGMA mekanik özellikleri

Şekil 3.14'deki veriler incelendiğinde her iki yöntemde de (4D ve 3D eklemeli imalat yöntemi) 2.5 dk kürlenen numunede kürleme işleminin gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Numunelerin kürlenmesi ve film tabakasının oluşması için 2.5 dk UV ışınına maruz kalma süresinin az olduğu anlaşılmaktadır. Numunelerde en fazla dayanım gerilmesi (çekme dayanımı) her iki yöntem içinde 12.5 dk. boyunca UV ışın uygulanma süresinde elde edilmiştir. Numunelere uygulanan çekme deneyi

neticesinde dikkat çekici bir diğer veri kütleme süresine ile çekme dayanımı gerilmesi arasında doğrusal oran bulunmasıdır. Sırasıyla 5-7.5-10-12.5 dakika kütleme süresi uygulanan numunelerin dayanımı beklenildiği gibi kütleme süresine bağlı olarak artmaktadır; ancak kütleme süresi 15 dk. değerine çıkarıldığında numunenin dayanım değeri azalmıştır. Meydana gelen bu azalışa uygulanan UV ışınına bağlı olarak numune yapısında daha fazla miktarda oluşan boşlukların neden olduğunu düşünülmektedir. Kütleme sürelerindeki farklılığa bağlı olarak elde edilen mekanik özellikler dikkate alındığında pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin, kullanım alanı düşünüldüğünde, mevcut şartlar altında ideal UV ışını uygulanma süresi 12.5 dakikadır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen 4D eklemeli imalat cihazı ile üretilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin çekme dayanımı, 3D eklemeli imalat cihazıyla üretilen numune verisine nazaran %11,53 daha yüksektir. Çekme dayanımındaki bu farklılık 4D ile üretilen numunenin nispeten daha fazla kristal yapıya sahip olmasındandır. Bu durum gerçekleştirilen XRD incelemesi ile doğrulanmaktadır.

3.3.2. Biyodegradasyon Etkinliği

4D ve 3D eklemeli imalat cihazında üretilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunelerin degradasyonun incelenmesi amacıyla, hazırlanan numuneler (Şekil 3.15), 3 tekrarlı olacak şekilde 37°C ve fosfat tamponlu içeren çözelti (Şekil 3.16) ortamında (pH=7,4; 50 mM PBS) dört hafta boyunca bekletilmiştir.

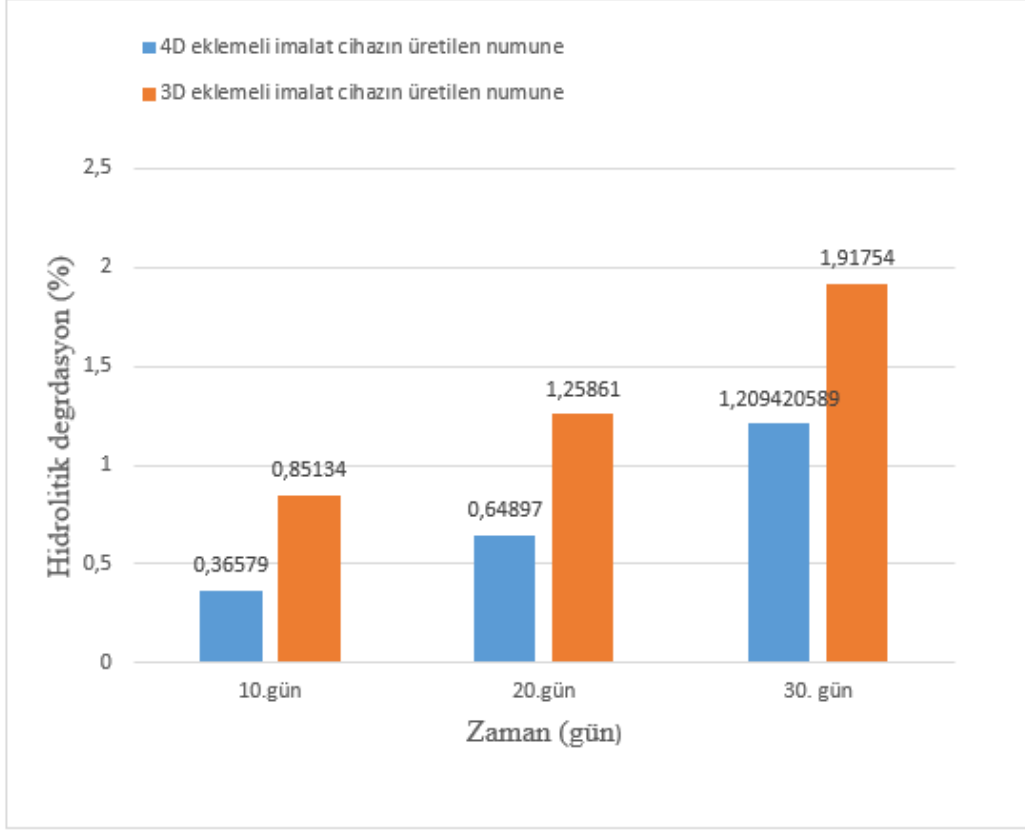


Şekil 3.15. Degradasyonu incelenen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numuneler



Şekil 3.16. Fosfat tamponlu içeren çözeltide bekletilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numuneler

Numunelerin kütlelerinde meydana gelen değişim gravimetrik olarak ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). Dört eksenli eklemeli imalat cihazında üretilen ve 12.5 dk kürlenen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunelerinin kütle kaybının aritmetik ortalaması % 1.21, 3D eklemeli imalat cihazında üretilen numunelerin kütle kaybının ortalaması ise 1.92'dir. Polimer numunelerin kütlelerinde meydana gelen bu kayıp, pHEMA'nın ester gruplarının hidrolizine bağlı olabilir (Díez-Pascual ve Díez-Vicente 2016). Benzer sonuçlar daha önce de Díez-Pascual ve Díez-Vicente tarafından elde edilmiştir. 3D eklemeli imalat cihazında nispeten daha yüksek kütle kaybının meydana gelmesinin nedeni üretilen numunelerin daha gözenekli olmasındandır.

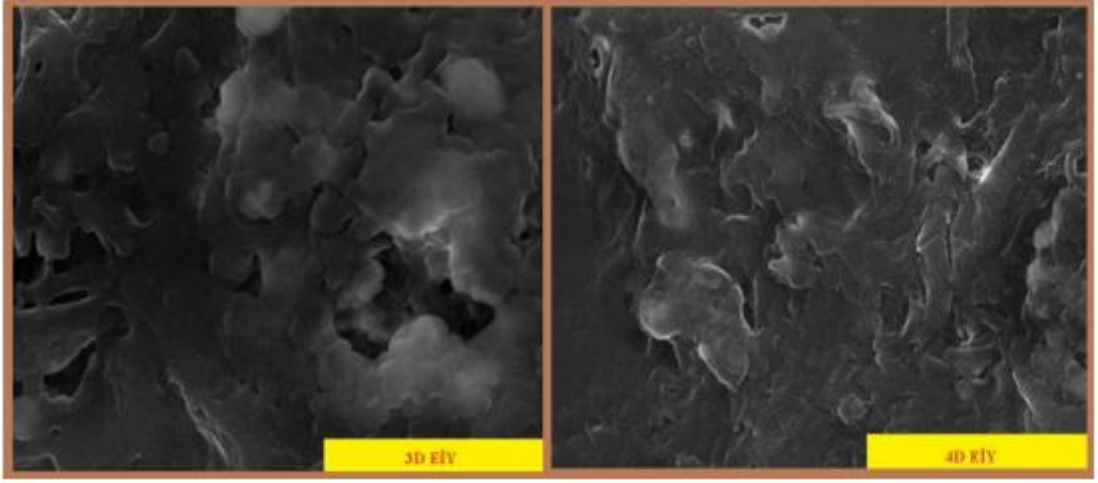


Şekil 3.17. pHEMA/50AIBN/10EDGMA filmlerinin hidrolitik degradasyonu

3.3.3. Yapısal Karakterizasyon

3.3.3.1. Yüzey özellikleri

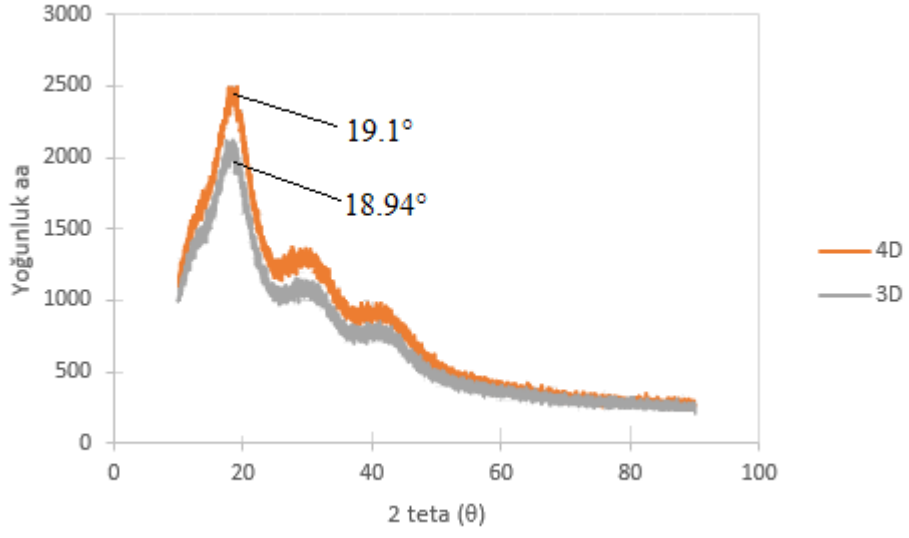
Üretilen pHEMA filmlerin, yüzey özellikleri gerçekleştirilen SEM incelemesi belirlendi (Şekil 3.18). Buna göre elde edilen yapıların gözenekli ve rastgele yönelimlerle birbirine bağlı olduğu söylenebilir. Şekil 3.18'den görülebileceği gibi, filmlerin SEM mikrografları değerlendirildiğinde, pHEMA mikro gözenekli bir yüzeye sahipken, üretim yöntemi numune yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu belirtilebilir. 4D eklemeli imalat yöntemi ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğünde nispeten azalma meydana gelmiştir. 4D eklemeli imalat cihazının sahip olduğu döner tabla üretilen numunelerde daha az gözenekliliğe sebep olduğu belirtilebilir.



Şekil 3.18. pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin SEM görüntüleri

3.3.3.2. İç Yapı Analizi

Şekil 3.19, pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin, $10^\circ < 2\theta < 90^\circ$ açı aralığındaki X-ışını kırınım desenini (XRD) göstermektedir. Üretilen her iki numune de kristal yapılar oluştuğu belirlenmiştir. 4D ile üretilen 19.1° 'de, 3D ile üretilen 18.94° 'de geniş bir tepe noktası vermiştir. Elde edilen sonuçlar her iki numune için de literatürle uyum içerisindedir (Tabatabaee vd., 2022). 4D ile üretilen numune en yüksek tepe noktasında elde edilen yoğunluk değeri nispeten yüksektir ve bu değer Tabatabaee vd., elde ettikleri sonuca daha uygundur. Tepe noktasındaki yoğunluk değerinin yüksek olması, 4D ile üretilen numunelerdeki kristal bölgelerin yoğunluğunun artışıdır. Kristal bölgelerin yoğunluğundaki artış pik şiddetlerinde ve keskinliğinde artışa sebep olur. Ayrıca 4D ve 3D ile üretilen numunelerde sırasıyla $30,04^\circ - 41,36^\circ$ ve $41,7^\circ - 30,5^\circ$ 'de iki geniş tepe ölçülmüştür. Her iki numune de ölçülen tepelerin nedeni pHEMA'nın sahip olduğu düzensiz (amorfs) yapıdır. 4D ile üretilen numuneler nispeten daha yoğun kristal bölgelere sahip olmaları nedeniyle yüksek mekanik özellikler sergilemiştir. Sonuç olarak 4D ile üretilen numunelerin XRD analiz değeri, hem literatür ile hem de mekanik özellikler ile uyumludur.



Şekil 3.19. pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesinin X-ışını kırınım deseni

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada biyoyumlu numunelerin üretilmesi amacıyla üç boyutlu kartezyen sisteme ilave olarak cihazın alt kısmında yani tablasında kendi ekseninde döner tabla konulması ile üretilmiş 4D eklemeli imalat işlemini gerçekleştirebilen bir cihaz tasarlanmış ve üretilmiş ve bu cihazın üretim performansı değerlendirilmiştir. Cihazın sahip olduğu dördüncü eksen dönerek kaplama işlemini de yapabilecek kapasiteye sahiptir. Bununla beraber tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazın dış koşullardan etkilenmesini engellemek amacıyla sıcaklık, nem ve hava kontrolünün sağlanması ile beraber hermetik bir ortam oluşturulması amaçlanmıştır. Üretimi yapılan 4D eklemeli imalat cihazı üzerinde biyoyumlu numunelerin üretilmesi amacıyla UV ışın kaynağı sistemi, çalışmaya dahil edilmiştir. Biyoyumlu numunelerin özellikleri literatürde kullanılanlarla karşılaştırılarak incelenmiştir.

4D eklemeli imalat cihazı ile üretilen numunelerin özellikleri literatür verileri ve alışlagelmiş 3D eklemeli imalat cihazı ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen numunelerin mekanik özellikleri literatür ile uyumludur (Pruksawan et al., 2022). Üretilen 4 farklı bileşimdeki numunelerin çekme dayanımlarının ortalaması alındığında, 4D eklemeli imalat cihazında üretilen numunelerin %11,34 daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu farklılığın nedeni 3D eklemeli imalat kullanılarak üretilen numunelerin nispeten daha gözenekli yapıda olmasıdır. Bu yorum gerçekleştirilen SEM analizi ile doğrulanmıştır.

4D eklemeli imalat cihazının üretim performansını incelemek amacıyla aort geometrisinde biyoyumlu nesnelere üretilmiştir. Biyoyumlu nesne üretiminde pHEMA kullanılmıştır. Çalışmanın pHEMA kullanılarak gerçekleştirilmesinin nedeni malzemenin sahip olduğu biyoyumluluktur. Çalışma kapsamında pHEMA kullanılarak üretilen aort geometrisindeki numunenin kullanım alanına dikkat edilerek en kritik özelliğin mekanik özellik olduğuna karar verilmiştir. Bu nedenle 4D eklemeli imalat cihazında yapay aort formunda üretilen 8 farklı pHEMA numune çekme

deneyine tabi tutulmuş ve en yüksek performansa sahip olan bileşen (pHEMA/50AIBN/10EDGMA) ile çalışmaya devam edilmiştir.

Kullanılan 8 farklı pHEMA bileşimi, temelde 2 farklı oranda foto-başlatıcı (AIBN) ve 6 farklı oranda EDGM içermektedir. EDGMA'nın kullanılma nedeni kütleme işlemini hızlandırmasıdır. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde 25 µL'den fazla EDGMA eklenen numunelerde kırılma ve çatlaklar oluşmuştur. Mekanik testlerin uygulanamadığı bu numunelerdeki kırılma ve çatlakların oluşumunun nedeni kütleme işleminin, yüksek EDGMA içeriğinden dolayı, kritik kütleme hızından yüksek olmasındandır. Kırılmanın gerçekleşmediği pHEMA numuneleri 2 farklı oranda AIBN ve EDGMA içeriğine sahip pHEMA'dır. 4 farklı içerikteki numunelere uygulanan çekme deneyi neticesinde, en yüksek özelliklere sahip olmasından dolayı, en uygun bileşimin pHEMA/50AIBN/10EDGMA olduğu belirlenmiştir.

Bileşimi belirlenen pHEMA numunesinin fizikokimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunenin özelliklerinin daha anlaşılabilir olması amacıyla çalışma kapsamındaki cihaz ile 3D eklemeli imalat cihazında üretilen numunenin sonuçları karşılaştırılmıştır. 4D eklemeli imalat cihazında üretilen numunelerin degradasyon oranı % 36.93 daha düşüktür. 4D eklemeli imalat cihazının sahip olduğu dönerek kaplama cihazından dolayı bu cihaz kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarda numuneler nispeten gözeneksiz bir yapıya sahiptirler. Degradasyon oranlarındaki bu farklılık 4D eklemeli imalat cihazındaki üretimin nispeten daha az gözenekli olmasındandır.

Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen cihazda üretilen pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesine uygulanan bir diğer inceleme uygun kütleme süresinin belirlenmesidir. Bu amaçla pHEMA/50AIBN/10EDGMA numunesine 6 farklı sürede UV ışını uygulanmıştır. Mekanik özelliklerin kütleme süresi ile ilgili olduğu belirlenmiştir. Kütleme sürelerinden birisinin (2.5 dk.) yetersiz olduğu ve 12.5 dk.'da kürlenmiş numunelerin en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir. 12.5 dk. kütleme süresine kadar artan kütleme süresi ile kürlenmiş numunelerin mekanik özellikleri artma eğilimindedir. 12.5 dk. kütleme süresinden sonraki 15 dk. ve 30 dk. kütleme işlemlerindeki numunelerin mekanik özellikleri nispeten daha düşüktür. Uygulanan UV ışınları, kütleme işleminde belirli bir süreden sonra foto-degradasyona neden olmuş ve polimerlerin mekanik özellikleri etkilemiştir (Düzyer Ş. 2019.).

Gelecek çalışmalarda farklı UV dalga boylarında kürlenebilen mürekkep türleri kullanılarak üretilen polimerlerin özellikleri incelenebilir yada sıcaklık ile sertleşen mürekkepler kullanılarak, sıcaklık ile mürekkepleri sertleştiren 4D eklemeli imalat cihazı tasarlanıp üretilip, üretilen numunelerin yüzey özellikleri, iç yapı analizleri ve işlem parametrelerinin etkisi incelenebilir.

İletken malzemelerin özelliklerinden yararlanılarak esnek sensörlerin hassasiyeti, darbe dayanıklılığı son zamanlarda ilgi çekici bir diğer konu olmuştur. Gelecek çalışmalarda altın, gümüş gibi metaller kullanarak 4D yada 3D EİY ile üretilecek esnek sensörlerin özellikleri incelenebilir.

Biyouyumlu malzemelerin EİY ile üretiminde sonlu elemanlar metodu kullanılarak üretilen nesnelerin özellikleri analiz edilebilir ve üretim parametrelerinin etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aktürk M., (2021). Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş AlSi10mg malzemesinin malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi ve sonlu elemanlar yöntemiyle doğrulanması. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Allanurov, A. M., Zdrok, A. Y., Loschilov, A. G., & Malyutin, N. D. (2014). Problem of Ink Evaporation while Using Plotter Systems to Manufacture Printed Electronic Products. *Procedia Technology*, 18(September), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.11.006>
- Alsayed AA (2021) Physics of Open Fractures: Reconsidering Tissue Viability, Contamination Risk and Importance of Wound Debridement. *Journal of Applied Mathematics and Physics* 09:176–182. <https://doi.org/10.4236/jamp.2021.91012>
- Aminayi P. (2016). Development and evaluation of matrix material formulations for potential integration in to immuno diagnostic biosensors western Michigan University, Doctoral thesis.
- Annabestani, M., Esmaili-dokht, P., Olianasab, S. A., Orouji, N., & Alipour, Z. (n.d.). A novel fully 3D , microfluidic-oriented , gel-based and low cost stretchable soft sensor. 1–11.
- Atalay Y., (2020). Hybrid additive manufacturing by shaped metal deposition. Yüksek lisans tezi. Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Aycan, M. F., Investigation on manufacturability of bone plates used in humerus fractures by additive manufacturing method, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 2007–2016, 2019.
- Barkane, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., & Gaidukovs, S. (2020). Thermal stability of UV-cured vegetable oil epoxidized acrylate-based polymer system for 3D printing application. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109347. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109347>
- Baù, M., Ferrari, M., Tonoli, E., & Ferrari, V. (2011). Sensors and energy harvesters based on piezoelectric thick films. *Procedia Engineering*, 25, 737–744. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.182>
- Bhatia, A., & Sehgal, A. K. (2021). Materials Today: Proceedings Additive manufacturing materials , methods and applications : A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.379>
- Bijender, & Kumar, A. (2021). Flexible and wearable capacitive pressure sensor for blood pressure monitoring. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 33(June), 100434. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100434>
- Ćatić, N., Wells, L., Al Nahas, K., Smith, M., Jing, Q., Keyser, U. F., Cama, J., & Kar-Narayan, S. (2020). Aerosol-jet printing facilitates the rapid prototyping of microfluidic devices with versatile geometries and precise channel functionalization. *Applied Materials Today*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100618>
- Chen, J., Zhu, G., Wang, F., Xu, Y., Wang, C., Zhu, Y., & Jiang, W. (2021). Design of flexible strain sensor with both ultralow detection limit and wide sensing range via the multiple sensing mechanisms. *Composites Science and Technology*,

- 213(April), 108932. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108932>
- Chen, S., Bai, C., Zhang, C., Geng, D., Liu, R., Xie, Y., & Zhou, W. (2021). Flexible piezoresistive three-dimensional force sensor based on interlocked structures. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 330, 112857. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112857>
- Chen, Y. D., Nagarajan, V., Rosen, D. W., Yu, W., & Huang, S. Y. (2020). Aerosol jet printing on paper substrate with conductive silver nano material. *Journal of Manufacturing Processes*, 58(January), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.07.064>
- Chiulan I, Heggset EB, Voicu ŞI, Chinga-Carrasco G (2021) Photopolymerization of bio-based polymers in a biomedical engineering perspective. *Biomacromolecules* 22:1795–1814
- Claudia, E., Fischer, D., & Nickel, D. (2021). Challenges in electroplating of additive manufactured ABS plastics. 68(June), 1378–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.037>
- Dai, X., Huang, L. B., Du, Y., Han, J., & Kong, J. (2021). Self-healing flexible strain sensors based on dynamically cross-linked conductive nanocomposites. *Composites Communications*, 24(December 2020), 100654. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100654>
- Deneault, J. R., Bartsch, C., Cook, A., Grabowski, C., Berrigan, J. D., Glavin, N., & Buskohl, P. R. (2020). Conductivity and radio frequency performance data for silver nanoparticle inks deposited via aerosol jet deposition and processed under varying conditions. *Data in Brief*, 33, 106331. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106331>
- Diba, M., Koons, G. L., Bedell, M. L., & Mikos, A. G. (2021). 3D printed colloidal biomaterials based on photo-reactive gelatin nanoparticles. *Biomaterials*, 274(April), 120871. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2021.120871>
- Díez-Pascual AM, Díez-Vicente AL (2016) PEGylated boron nitride nanotube-reinforced poly(propylene fumarate) nanocomposite biomaterials. *RSC Adv* 6:79507–79519. <https://doi.org/10.1039/c6ra09884c>
- Doğan D., (2023). Bor nitrür takviyeli biyokompozit malzemeler: sentez, fizikokimyasal ve biyolojik karakterizasyon. Doktora tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Dong, H., Zhang, L., Wu, T., Song, H., Luo, J., Huang, F., & Zuo, C. (2021). Flexible pressure sensor with high sensitivity and fast response for electronic skin using near-field electrohydrodynamic direct writing. *Organic Electronics*, 89(September 2020), 106044. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.106044>
- Eckstein, R., Hernandez-Sosa, G., Lemmer, U., & Mechau, N. (2014). Aerosol jet printed top grids for organic optoelectronic devices. *Organic Electronics*, 15(9), 2135–2140. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.05.031>
- Erol İ, Yurdakal S, Demirelli K, Gürler Z (2022) Preparation of pHEMA/TiO₂ nanocomposites by combination of in-situ polymerization/hydrothermal method and determination of their thermal, swelling, biological and dielectric properties. *Journal of Polymer Research* 29:.. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03146-8>
- Fang, Y., Xu, J., Gao, F., Du, X., Du, Z., Cheng, X., & Wang, H. (2021). Self-healable and recyclable polyurethane-polyaniline hydrogel toward flexible strain sensor. *Composites Part B: Engineering*, 219(April), 108965. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108965>
- Feng, R., Chu, Y., Wang, X., Wu, Q., & Tang, F. (2021). A long-term stable and flexible glucose sensor coated with poly(ethylene glycol)-modified polyurethane.

- Journal of Electroanalytical Chemistry, 895(April), 115518.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115518>
- Foerster, A., Annarasa, V., Terry, A., Wildman, R., Hague, R., Irvine, D., De Focatiis, D. S. A., & Tuck, C. (2021). UV-curable silicone materials with tuneable mechanical properties for 3D printing. *Materials and Design*, 205, 109681. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109681>
- Gao H, Matyjaszewski K (2007) Synthesis of molecular brushes by “grafting onto” method: Combination of ATRP and click reactions. *J Am Chem Soc* 129:6633–6639. <https://doi.org/10.1021/ja0711617>
- Gebel M., (2018). Polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretimi için bir eklemeli imalat yönteminin geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Gebel, M. E., Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 57–67, 2021.
- Ginestra, P. S., Rovetta, R., Fiorentino, A., & Ceretti, E. (2020). Bioprinting process optimization: Evaluation of parameters influence on the extrusion of inorganic polymers. *Procedia CIRP*, 89, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.125>
- Goh, G. L., Agarwala, S., Tan, Y. J., & Yeong, W. Y. (2018). A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 260, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.127>
- Gospodinova, A., Nankov, V., Tomov, S., Redzheb, M., & Petrov, P. D. (2021). Extrusion bioprinting of hydroxyethylcellulose-based bioink for cervical tumor model. *Carbohydrate Polymers*, 260(January), 117793. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117793>
- Guo, D., Pan, X., & He, H. (2019). A simple and cost-effective method for improving the sensitivity of flexible strain sensors based on conductive polymer composites. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 298. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111608>
- Guo, D., Pan, X., Xie, Y., Liu, Y., & He, H. (2021). Effects of service condition on the performance of conductive polymer composites for flexible strain sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 318. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112494>
- Guo, M., Yang, C., Gao, D., Li, Q., Zhang, A., Feng, J., Yang, H., Tao, R., Fan, Z., Zeng, M., Zhou, G., Lu, X., & Liu, J. M. (2020). A flexible and high temperature tolerant strain sensor of La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/Mica. *Journal of Materials Science and Technology*, 44, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.10.019>
- Guo, X., Zhao, Y., Xu, X., Chen, D., Zhang, X., Yang, G., Qiao, W., Feng, R., Zhang, X., Wu, J., Duan, Z., Zhang, H., Huang, L., Xu, C., & Qu, L. (2021). Biomimetic flexible strain sensor with high linearity using double conducting layers. *Composites Science and Technology*, 213(June). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108908>
- Gursel I, Balcik C, Arica Y, et al (1998) Synthesis and mechanical properties of interpenetrating networks of poly(hydroxy butyrate-co-hydroxy valerate) and poly(2-hydroxyethyl methacrylate).
- Hashmi, A. W., & Meena, A. (2021). Materials Today : Proceedings Improving the surface characteristics of additively manufactured parts : A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.223>

- He Z, Zhao J, Li F, et al (2021b) In situ synthesis of polymer-modified boron nitride nanosheets via anionic polymerization. *Appl Surf Sci* 537:.. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147966>
- He, C., Jin, N., Yu, H., Lin, J., & Ma, C. Q. (2019). The electrical sintering and fusing effects of Aerosol-Jet printed silver conductive line. *Materials Letters*, 246, 5–8. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.03.016>
- Holeman T. 2018. The systematic approach to microplotter printing of perovskite precursors, Master of Science, Ohio University.
- Hong, S. Y., Kim, Y. C., Wang, M., Kim, H. I., Byun, D. Y., Nam, J. Do, Chou, T. W., Ajayan, P. M., Ci, L., & Suhr, J. (2018). Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials. *Polymer*, 145, 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.067>
- Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., & Griffini, G. (2016). UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites. *Materials*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/MA9070583>.
- Jabari, E., & Toyserkani, E. (2016). Aerosol-Jet printing of highly flexible and conductive graphene/silver patterns. *Materials Letters*, 174, 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.082>
- Jing, Q., Pace, A., Ives, L., Husmann, A., Ćatić, N., Khanduja, V., Cama, J., & Kar-Narayan, S. (2021). Aerosol-jet-printed, conformable microfluidic force sensors. *Cell Reports Physical Science*, 2(4). <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100386>
- Jones, C. S., Lu, X., Renn, M., Stroder, M., & Shih, W. S. (2010). Aerosol-jet-printed, high-speed, flexible thin-film transistor made using single-walled carbon nanotube solution. *Microelectronic Engineering*, 87(3), 434–437. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.05.034>
- Kalaycıoğlu Ş. G., Mechanical Behaviour of Polymeric Lattice Structures Produced by Additive Manufacturing, Master Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2022.
- Karabulut Y., (2020). Eklemeli imalat yöntemiyle farklı cidar kalınlıklarında üretilen inconel 718 alaşım malzemesine uygulanan ikincil işlemlerin malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Khan, S., Nguyen, T. P., Lubej, M., Thiery, L., Vairac, P., & Briand, D. (2018). Low-power printed micro-hotplates through aerosol jetting of gold on thin polyimide membranes. *Microelectronic Engineering*, 194(March), 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.03.013>
- Khorablou, Z., Shahdost-Fard, F., & Razmi, H. (2021). Flexible and highly sensitive methadone sensor based on gold nanoparticles/polythiophene modified carbon cloth platform. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 344(June), 130284. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130284>
- Kim Y. C., Hong, S., Sun, H., Kim, M. G., Choi, K., Cho, J., Choi, H. R., Koo, J. C., Moon, H., Byun, D., Kim, K. J., Suhr, J., Kim, S. H., & Nam, J. Do. (2017). UV-curing kinetics and performance development of in situ curable 3D printing materials. *European Polymer Journal*, 93(February), 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.05.041>
- Kim, J. S., So, Y., Lee, S., Pang, C., Park, W., & Chun, S. (2021). Uniform pressure responses for nanomaterials-based biological on-skin flexible pressure sensor array. *Carbon*, 181, 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.04.096>
- Kim, M. H., & Nam, S. Y. (2020). Assessment of coaxial printability for extrusion-based bioprinting of alginate-based tubular constructs. *Bioprinting*, 20(July),

- e00092. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00092>
- Kim, M. H., Lee, Y. W., Jung, W. K., Oh, J., & Nam, S. Y. (2019). Enhanced rheological behaviors of alginate hydrogels with carrageenan for extrusion-based bioprinting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 98(February), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.06.014>
- Kwon, K. S., Rahman, M. K., Phung, T. H., Hoath, S. D., Jeong, S., & Kim, J. S. (2020). Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*, 5(4). <https://doi.org/10.1088/2058-8585/abc8ca>
- Larson, B. J., Gillmor, S. D., & Lagally, M. G. (2004). Controlled deposition of picoliter amounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette. *Review of Scientific Instruments*, 75(4), 832–836. <https://doi.org/10.1063/1.1688436>
- Laurent, P., Stoukatch, S., Dupont, F., & Kraft, M. (2018). Electrical characterization of Aerosol Jet Printing (AJP) deposited conductive silver tracks on organic materials. *Microelectronic Engineering*, 197(April), 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.06.002>
- Lee, S., Kim, Y., Park, D., & Kim, J. (2021). The thermal properties of a UV curable acrylate composite prepared by digital light processing 3D printing. *Composites Communications*, 26(May), 100796. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100796>
- Li, K., Li, Z., Zhang, T., & Yang, X. (2020). High sensitivity, broad linearity range and low detection limit flexible pressure sensors based on irregular surface microstructure. *Organic Electronics*, 87(August), 105920. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105920>
- Li, Q., & Liu, J. (2020). Combined Printing of Highly Aligned Single-Walled Carbon Nanotube Thin Films with Liquid Metal for Direct Fabrication of Functional Electronic Devices. *Advanced Electronic Materials*, 6(9). <https://doi.org/10.1002/aelm.202000537>
- Li, T., Li, J., Zhong, A., Han, F., Sun, R., Wong, C. P., Niu, F., Zhang, G., & Jin, Y. (2020). A flexible strain sensor based on CNTs/PDMS microspheres for human motion detection. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 306, 111959. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111959>
- Li, Y., Zhong, J., Wu, L., Weng, Z., Zheng, L., Peng, S., & Zhang, X. (2019). High performance POSS filled nanocomposites prepared via UV-curing based on 3D stereolithography printing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 117(July 2018), 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.11.024>
- Lim, H. R., Lee, Y., Jones, K. A., Kwon, Y. T., Kwon, S., Mahmood, M., Lee, S. M., & Yeo, W. H. (2021). All-in-one, wireless, fully flexible sodium sensor system with integrated Au/CNT/Au nanocomposites. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 331(September 2020), 129416. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.129416>
- Lin Z., Jiang, T., Kinsella, J. M., Shang, J., & Luo, Z. (2021). Assessing roughness of extrusion printed soft materials using a semi-quantitative method. *Materials Letters*, 303(July), 130480. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130480>
- Liu, C., Li, M., Lu, B., Huang, Y., Zhang, Y., Liu, P., Guo, X., Ma, Y., Zhang, Y., Li, S., Chen, W., & Ge, Y. (2021). High-sensitivity crack-based flexible strain sensor with dual hydrogen bond-assisted structure for monitoring tiny human motions and writing behavior. *Organic Electronics*, 88(June 2020), 105977. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105977>
- Liu, C., Zhu, W., Li, M., Sun, X., Guo, X., Liu, J., Liu, P., Zhang, Y., & Huang, Y. (2020). Highly stable pressure sensor based on carbonized melamine sponge

- using fully wrapped conductive path for flexible electronic skin. *Organic Electronics*, 76(April 2019), 105447. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.105447>
- Liu, M. Y., Hang, C. Z., Zhao, X. F., Zhu, L. Y., Ma, R. G., Wang, J. C., Lu, H. L., & Zhang, D. W. (2021). Advance on flexible pressure sensors based on metal and carbonaceous nanomaterial. *Nano Energy*, 87(March), 106181. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106181>
- Liu, S., Mo, L., Bi, G., Chen, S., Yan, D., Yang, J., Jia, Y. G., & Ren, L. (2021). DLP 3D printing porous β -tricalcium phosphate scaffold by the use of acrylate/ceramic composite slurry. *Ceramics International*, 47(15), 21108–21116. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.114>
- Ma Z, Liu Z, Cheng Z (2020a) Scalable exfoliation for few-layered hexagonal boron nitride nanosheets (BNNs) by microwave-assisted expansion and liquid nitrogen intercalation. *Chinese Chemical Letters* 31:1936–1940. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2020.01.019>
- Ma, L., Yu, X., Yang, Y., Hu, Y., Zhang, X., Li, H., Ouyang, X., Zhu, P., Sun, R., & Wong, C. ping. (2020). Highly sensitive flexible capacitive pressure sensor with a broad linear response range and finite element analysis of micro-array electrode. *Journal of Materiomics*, 6(2), 321–329. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2019.12.008>
- Ma, Q., Hao, B., & Ma, P. C. (2020). Modulating the sensitivity of a flexible sensor using conductive glass fibre with a controlled structure profile. *Composites Communications*, 20(February), 100367. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100367>
- Ma, Zhenping, 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. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112800>
- Ma, Ziang, Ma, K., Lu, S., Wang, S., Liu, X., Li, B., Zhang, L., & Wang, X. (2020). Flexible Ti₃C₂T_x MXene/ink human wearable strain sensors with high sensitivity and a wide sensing range. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 315, 112304. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112304>
- Mantelli, A., Romani, A., Suriano, R., Diani, M., Colledani, M., Sarlin, E., Turri, S., & Levi, M. (2021). Uv-assisted 3d printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. *Polymers*, 13(5), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym13050726>
- Mao, J., Zhao, C., Liu, L., Li, Y., Xiang, D., Wu, Y., & Li, H. (2021). Adhesive, transparent, stretchable, and strain-sensitive hydrogel as flexible strain sensor. *Composites Communications*, 25(December 2020), 100733. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100733>
- Mao, R., Yao, W., Qadir, A., Chen, W., Gao, W., Xu, Y., & Hu, H. (2020). 3-D graphene aerogel sphere-based flexible sensors for healthcare applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 312, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112144>
- Mohanavel, V., Ali, K. S. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. (2021). Materials Today : Proceedings The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596>
- Molazemhosseini, A., Magagnin, L., Vena, P., & Liu, C. C. (2017). Single-use nonenzymatic glucose biosensor based on CuO nanoparticles ink printed on thin

- film gold electrode by micro-plotter technology. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 789, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.01.041>
- Öksüzcan İ., The Effect of Aging Atmosphere on Mechanical and Degradation Properties of Maraging Steels Produced by Additive Manufacturing, Master Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir, 2022.
- Özdoğan S., (2021). Eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen parçaların baskı parametrelerinin üç-nokta-eğilme davranışlarına etkisinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Park, H., Song, C., Jin, S. W., Lee, H., Keum, K., Lee, Y. H., Lee, G., Jeong, Y. R., & Ha, J. S. (2021). High performance flexible micro-supercapacitor for powering a vertically integrated skin-attachable strain sensor on a bio-inspired adhesive. *Nano Energy*, 83(November 2020), 105837. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.105837>
- Pathak, P., Hwang, J. H., Li, R. H. T., Rodriguez, K. L., Rex, M. M., Lee, W. H., & Cho, H. J. (2021). Flexible copper-biopolymer nanocomposite sensors for trace level lead detection in water. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 344(December 2020), 130263. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130263>
- Pei, Z., Yu, Z., Li, M., Bai, L., Wang, W., Chen, H., Yang, H., Wei, D., & Yang, L. (2021). Self-healing and toughness cellulose nanocrystals nanocomposite hydrogels for strain-sensitive wearable flexible sensor. *International Journal of Biological Macromolecules*, 179, 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.023>
- Phuah, E. W. C., Hart, W. L., Sumer, H., & Stoddart, P. R. (2020). Patterning of biomaterials by aerosol jet printing: A parametric study. *Bioprinting*, 18(August 2019), e00081. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2020.e00081>
- Postiglione G. (2021). Uv-assisted 3d printing of polymer composites from thermally and mechanically recycled carbon fibers. *Polymers*, 13(5), 1–15.
- Preobrazhenskiy, I. I., Tikhonov, A. A., Evdokimov, P. V., Shibaev, A. V., & Putlyaev, V. I. (2021). DLP printing of hydrogel/calcium phosphate composites for the treatment of bone defects. *Open Ceramics*, 6(April), 100115. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100115>
- Preobrazhenskiy, I. I., Tikhonov, A. A., Evdokimov, P. V., Shibaev, A. V., & Putlyaev, V. I. (2021). DLP printing of hydrogel/calcium phosphate composites for the treatment of bone defects. *Open Ceramics*, 6(April), 100115. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100115>
- Pruksawan, S., Chee, H. L., Wang, Z., Luo, P., Chong, Y. T., Thitsartarn, W., & Wang, F. K. (2022). Toughened Hydrogels for 3D Printing of Soft Auxetic Structures. *Chemistry - An Asian Journal*, 17(19). <https://doi.org/10.1002/asia.202200677>
- Putra, N. E., Leeflang, M. A., Taheri, P., Fratila-Apachitei, L. E., Mol, J. M. C., Zhou, J., & Zadpoor, A. A. (2021). Extrusion-based 3D printing of ex situ-alloyed highly biodegradable MRI-friendly porous iron-manganese scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 134(xxxx), 774–790. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.07.042>
- Rahman, M. T., & Panat, R. (2021). Aerosol jet 3D printing and high temperature characterization of nickel nanoparticle films. *Manufacturing Letters*, 29, 5–10. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.04.006>
- Ren J, Stagi L, Innocenzi P (2021) Hydroxylated boron nitride materials: from structures to functional applications. *J Mater Sci* 56:4053–4079
- Rohit A.(2017). Optimization and characterization of a capillary contact micro-plotter for printed electronic devices, Master of Science,
- Sakai, S., Yoshii, A., Sakurai, S., Horii, K., & Nagasuna, O. (2020). Silk fibroin

- nanofibers: a promising ink additive for extrusion three-dimensional bioprinting. *Materials Today Bio*, 8(July). <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2020.100078>
- Sankar, V., Balasubramaniam, K., & Sundara, R. (2021). Insights into the effect of polymer functionalization of multiwalled carbon nanotubes in the design of flexible strain sensor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 322, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112605>
- Secor, E. B. (2021). Light scattering measurements to support real-time monitoring and closed-loop control of aerosol jet printing. *Additive Manufacturing*, 44(April), 102028. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102028>
- Seifert, T., Baum, M., Roscher, F., Wiemer, M., & Gessner, T. (2015). Aerosol Jet Printing of Nano Particle Based Electrical Chip Interconnects. *Materials Today: Proceedings*, 2(8), 4262–4271. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.09.012>
- Shancheng Y. (2016), Wavelength tuning of the soft approached whispering gallery mode microlasers for display and sensing, Nanyang Technological University, Doctoral thesis.
- Shen, X., Zhao, S., & Wan, A. (2021). A sensitive and flexible sensor enhanced by constructing graphene-based polyaniline conductive networks. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 330, 112862. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112862>
- Shen, X., Zhao, S., & Wan, A. (2021). A sensitive and flexible sensor enhanced by constructing graphene-based polyaniline conductive networks. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 330, 112862. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112862>
- Shi, Z., Li, A., Zhang, C., & Zhang, Y. F. (2021). Reduced graphene oxide coated polyurethane composite foams as flexible strain sensors for large deformation. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 272(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2021.115360>
- Sholehah, A., Karmala, K., Huda, N., Utari, L., Septiani, N. L. W., & Yulianto, B. (2021). Structural effect of ZnO-Ag chemoresistive sensor on flexible substrate for ethylene gas detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112934. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112934>
- Shu, J., Yang, R., Chang, Y., Guo, X., & Yang, X. (2021). A flexible metal thin film strain sensor with micro/nano structure for large deformation and high sensitivity strain measurement. *Journal of Alloys and Compounds*, 879, 160466. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160466>
- Singhal R, Datta M (2009) Studies on the development of biodegradable p(HEMA)/cloisite nanocomposites. *Polym Compos* 30:887–890. <https://doi.org/10.1002/pc.20627>
- Sobolewski, P., Goszczynska, A., Aleksandrak, M., Urbas, K., Derkowska, J., Bartoszevska, A., Podolski, J., Mijowska, E., & Fray, M. El. (2017). A biofunctionalizable ink platform composed of catechol-modified chitosan and reduced graphene oxide/platinum nanocomposite. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 8(1), 1508–1514. <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.151>
- Song, K., Zhang, D., Yin, J., & Huang, Y. (2021). Computational study of extrusion bioprinting with jammed gelatin microgel-based composite ink. *Additive Manufacturing*, 41(January), 101963. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101963>
- Song, P., Wang, G., & Zhang, Y. (2021). Preparation and performance of graphene/carbon black silicone rubber composites used for highly sensitive and flexible strain sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 323, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112659>
- Song, P., Wang, G., & Zhang, Y. (2021). Preparation and performance of

- graphene/carbon black silicone rubber composites used for highly sensitive and flexible strain sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 323, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112659>
- Sukeshini A., M., Meisenkothen, F., Gardner, P., & Reitz, T. L. (2013). Aerosol Jet® Printing of functionally graded SOFC anode interlayer and microstructural investigation by low voltage scanning electron microscopy. *Journal of Power Sources*, 224, 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.09.094>
- Sun, C., Zhang, J., Zhang, Y., Zhao, F., Xie, J., Liu, Z., Zhuang, J., Zhang, N., Ren, W., & Ye, Z. G. (2021). Design and fabrication of flexible strain sensor based on ZnO-decorated PVDF via atomic layer deposition. *Applied Surface Science*, 562(March), 150126. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150126>
- Sun, F., Gu, Y., Cao, Y., Lu, Q., Bai, Y., Li, L., Hao, M., Qu, C., Wang, S., Liu, L., Li, T., & Zhang, T. (2019). Novel flexible pressure sensor combining with dynamic-time-warping algorithm for handwriting identification. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 293, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.018>
- Tabatabaee S., Baheiraei N., Salehnia M., (2022). Fabrication and characterization of PHEMA– gelatin scaffold enriched with graphene oxide for bone tissue engineering. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 17-216. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03122-4>
- Tait, J. G., Witkowska, E., Hirade, M., Ke, T. H., Malinowski, P. E., Steudel, S., Adachi, C., & Heremans, P. (2015). Uniform Aerosol Jet printed polymer lines with 30 μm width for 140 ppi resolution RGB organic light emitting diodes. *Organic Electronics*, 22, 40–43. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2015.03.034>
- Thouti, E., Nagaraju, A., Chandran, A., Prakash, P. V. B. S. S., Shivanarayanamurthy, P., Lal, B., Kumar, P., Kothari, P., & Panwar, D. (2020). Tunable flexible capacitive pressure sensors using arrangement of polydimethylsiloxane micro-pyramids for bio-signal monitoring. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 314, 112251. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112251>
- Top N., (2019). Doku mühendisliği için eklemeli imalat kullanılarak yeni bir kemik iskelesi tasarımı ve üretimi. Yüksek lisans tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tsai, M. S., Su, P. G., & Lu, C. J. (2020). Fabrication of a highly sensitive flexible humidity sensor based on Pt/polythiophene/reduced graphene oxide ternary nanocomposite films using a simple one-pot method. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 324(August), 128728. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2020.128728>
- Tsushima, N., Tamayama, M., Arizono, H., & Makihara, K. (2021). Geometrically nonlinear aeroelastic characteristics of highly flexible wing fabricated by additive manufacturing. *Aerospace Science and Technology*, 117, 106923. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106923>
- Van Driessche, I., Feys, J., Hopkins, S. C., Lommens, P., Granados, X., Glowacki, B. A., Ricart, S., Holzappel, B., Vilardell, M., Kirchner, A., & Bäcker, M. (2012). Chemical solution deposition using ink-jet printing for YBCO coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 25(6). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/6/065017>
- Wang, F., Tan, Y., Peng, H., Meng, F., & Yao, X. (2021). Investigations on the preparation and properties of high-sensitive BaTiO₃/MwCNTs/PDMS flexible capacitive pressure sensor. *Materials Letters*, 303(May), 130512. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130512>
- Wang, G., Yang, X., Li, J., Wang, Y., & Qing, X. (2021). A flexible microfluidic sensor based on main-channel and branch-channels for aerodynamic pressure

- measurement. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 319, 112546. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112546>
- Wang, H., Du, W., Zhao, Y., Wang, Y., Hao, R., & Yang, M. (2021). Joints for treelike column structures based on generative design and additive manufacturing. *Journal of Constructional Steel Research*, 184, 106794. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106794>
- Wang, K., Chang, Y. H., Zhang, C., & Wang, B. (2016). Conductive-on-demand: Tailorable polyimide/carbon nanotube nanocomposite thin film by dual-material aerosol jet printing. *Carbon*, 98, 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.11.032>
- Wang, L., Xu, T., & Zhang, X. (2021). Multifunctional conductive hydrogel-based flexible wearable sensors. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 134, 116130. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116130>
- Wang, W., Yang, S., Ding, K., Jiao, L., Yan, J., Zhao, W., Ma, Y., Wang, T., Cheng, B., & Ni, Y. (2021). Biomaterials- and biostructures- inspired high-performance flexible stretchable strain sensors: a review. *Chemical Engineering Journal*, 129949. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129949>
- Wang, X., Gao, Y., Deng, F., Xiao, Y., Zhang, H., & Huang, Y. (2021). Design of flexible curved sensor array for wind pressure monitoring of train bogie. *Sensors and Actuators A: Physical*, 331, 112873. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112873>
- Wang, X., Yu, J., Cui, Y., & Li, W. (2021). Research progress of flexible wearable pressure sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 330, 112838. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112838>
- Wang, Y., Zhao, C., Wang, C., Cerica, D., Bajot, M., Xiao, Q., Stoukatch, S., & Kraft, M. (2018). A mass sensor based on 3-DOF mode localized coupled resonator under atmospheric pressure. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 279, 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.028>
- Xing, H., Zou, B., Lai, Q., Huang, C., Chen, Q., Fu, X., & Shi, Z. (2018). Preparation and characterization of UV curable Al₂O₃ suspensions applying for stereolithography 3D printing ceramic microcomponent. *Powder Technology*, 338, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.023>
- Xiong, Y., Shen, Y., Tian, L., Hu, Y., Zhu, P., Sun, R., & Wong, C. P. (2020). A flexible, ultra-highly sensitive and stable capacitive pressure sensor with convex microarrays for motion and health monitoring. *Nano Energy*, 70(January), 104436. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.104436>
- Xiong, Y., Zhu, Y., Liu, X., Zhu, P., Hu, Y., Sun, R., & Wong, C. P. (2020). A flexible pressure sensor based on melamine foam capped by copper nanowires and reduced graphene oxide. *Materials Today Communications*, 24(January), 100970. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100970>
- Yang X, Shao C, Guan H, et al (2004) Preparation and characterization of ZnO nanofibers by using electrospun PVA/zinc acetate composite fiber as precursor. *Inorg Chem Commun* 7:176–178. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2003.10.035>
- Yang Y., Sun, Y., Luo, C., Fu, Q., & Pan, C. (2021). Effect of metal's inherent characteristics on sensibility of flexible metal-based composite sensor and its applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 327, 112754. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112754>
- Yang, G., Tian, M. Z., Huang, P., Fu, Y. F., Li, Y. Q., Fu, Y. Q., Wang, X. Q., Li, Y., Hu, N., & Fu, S. Y. (2021). Flexible pressure sensor with a tunable pressure-detecting range for various human motions. *Carbon*, 173, 736–743.

- <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.11.066>
- Yang, R., Chang, Y., Yang, X., Dai, J., Chen, Y., Chang, W., & Xiong, W. (2021). Electromechanical sorting method for improving the sensitivity of micropylramid carbon nanotube film flexible force sensor. *Composites Part B: Engineering*, 217(December 2020), 108818. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108818>
- Yang, X., Cao, Z. M., Chen, Y., Wu, D., Qiu, X. B., Yu, D. li, & Guo, X. L. (2020). Double layer carbon-nanoparticle-based flexible pressure sensor with high precision and stability. *Extreme Mechanics Letters*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100715>
- Yellapantula, K., Devaraj, H., Assadian, M., Stuart, L., Lo, C. Y., Gan, W. C., & Aw, K. (2020). Soft and flexible sensor array using carbon black pillars for object recognition via pressure mapping. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 159, 107781.
- Zang, Z., Tang, X., Liu, X., Lei, X., & Chen, W. (2014). Fabrication of high quality and low cost microlenses on a glass substrate by direct printing technique. *Applied Optics*, 53(33), 7868. <https://doi.org/10.1364/ao.53.007868>
- Zhai, W., Li, X., Xia, Q., Zhan, P., Xu, J., Zheng, G., Dai, K., Zhang, Z., Liu, C., & Shen, C. (2021). Multi-functional and flexible helical fiber sensor for micro-deformation detection, temperature sensing and ammonia gas monitoring. *Composites Part B: Engineering*, 211(September 2020), 108621.
- Zhang L, Zheng G-J, Guo Y-T, et al (2014) Preparation of novel biodegradable pHEMA hydrogel for a tissue engineering scaffold by microwave-assisted polymerization *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine Poly(2-hydroxyethylmethacrylate) Biodegradable hydrogel Microwave-assisted polymerization*
- Zhang, H., Choi, J. P., Moon, S. K., & Ngo, T. H. (2020). A hybrid multi-objective optimization of aerosol jet printing process via response surface methodology. *Additive Manufacturing*, 33(December 2019), 101096. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101096>
- Zhang, J., Huang, D., Liu, S., Dong, X., Li, Y., Zhang, H., Yang, Z., Su, Q., Huang, W., Zheng, W., & Zhou, W. (2019). Zirconia toughened hydroxyapatite biocomposite formed by a DLP 3D printing process for potential bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering C*, 105(July), 110054. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110054>
- Zhang, R., Li, S., Ying, C., Hu, Z., Lv, A., Hu, H., Fu, X., Hu, S., Liu, Q., & Wong, C. P. (2020). Bioinspired design of flexible strain sensor with high performance based on gradient filler distributions. *Composites Science and Technology*, 200(June). <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108319>
- Zhang, R., Lv, A., Ying, C., Hu, Z., Hu, H., Chen, H., Liu, Q., Fu, X., Hu, S., & Wong, C. P. (2020). Facile one-step preparation of laminated PDMS based flexible strain sensors with high conductivity and sensitivity via filler sedimentation. *Composites Science and Technology*, 186(October 2019), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107933>
- Zhang, R., Lv, A., Ying, C., Hu, Z., Hu, H., Chen, H., Liu, Q., Fu, X., Hu, S., & Wong, C. P. (2020). Facile one-step preparation of laminated PDMS based flexible strain sensors with high conductivity and sensitivity via filler sedimentation. *Composites Science and Technology*, 186(October 2019), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107933>
- Zhang, X., Xiang, D., Zhu, W., Zheng, Y., Harkin-Jones, E., Wang, P., Zhao, C., Li,

- H., Wang, B., & Li, Y. (2020). Flexible and high-performance piezoresistive strain sensors based on carbon nanoparticles@polyurethane sponges. *Composites Science and Technology*, 200(September), 108437. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108437>
- Zhang, Y., & Cui, Y. (2019). A flexible calligraphy-integrated in situ humidity sensor. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 147, 106853. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106853>
- Zhao, C., Xia, Z., Wang, X., Nie, J., Huang, P., & Zhao, S. (2020). 3D-printed highly stable flexible strain sensor based on silver-coated-glass fiber-filled conductive silicon rubber. *Materials and Design*, 193, 108788. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108788>
- Zhao, C., Xia, Z., Wang, X., Nie, J., Huang, P., & Zhao, S. (2020). 3D-printed highly stable flexible strain sensor based on silver-coated-glass fiber-filled conductive silicon rubber. *Materials and Design*, 193, 108788. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108788>
- Zhao, D., Liu, T., Park, J. G., Zhang, M., Chen, J. M., & Wang, B. (2012). Conductivity enhancement of aerosol-jet printed electronics by using silver nanoparticles ink with carbon nanotubes. *Microelectronic Engineering*, 96, 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2012.03.004>
- Zhou, Z., He, Z., Yin, S., Xie, X., & Yuan, W. (2021). Adhesive, stretchable and antibacterial hydrogel with external/self-power for flexible sensitive sensor used as human motion detection. *Composites Part B: Engineering*, 220(April), 108984. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108984>
- Zhou, Z., He, Z., Yin, S., Xie, X., & Yuan, W. (2021). Adhesive, stretchable and antibacterial hydrogel with external/self-power for flexible sensitive sensor used as human motion detection. *Composites Part B: Engineering*, 220(April), 108984. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108984>
- Zhu, Y., Yu, L., Wu, D., Lv, W., & Wang, L. (2021). A high-sensitivity graphene ammonia sensor via aerosol jet printing. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 318, 112434. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112434>
- Zymelka, D., Yamashita, T., Sun, X., & Kobayashi, T. (2020). Printed strain sensors based on an intermittent conductive pattern filled with resistive ink droplets. *Sensors (Switzerland)*, 20(15), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s20154181>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Yunus KARTAL

Yabancı Dil: İngilizce

Öğrenim Bilgileri

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği A.B.D.	Kırıkkale Üniversitesi	2017

Yüksek Lisans Tez Başlığı

Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi

Danışman: Dr. Öğr. Üy. Ali Osman ER

Uzmanlık Alanları

- 1- Eklemeli İmalat
- 2- Giyilebilir Teknoloji
- 3- Biyomalzeme
- 4- Fotopolimerasyon İşlemi
- 5- Alışılmamış imalat Yöntemleri
- 6- Talaşlı İmalat

Projeler

1. Biyoyumlu Nesnelerin Dört Eksenli Eklemeli İmalat Cihazında Üretilmesi ve Karakterizasyonu 123M213 (TÜBA-TÜBİTAK)

2. Biyomalzeme ve Algılayıcı Üretim İçin Kullanılabilecek 4 Boyutlu Yazıcı Tasarımı ve İmalatı 2022-036 (KKU-BAP)
3. Talaşlı İmalatta Kullanılan Nano Parçacık İçeren Kesme Sıvılarının İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması 2021-053 (KKU-BAP)
4. Nano Parçacık İçeren Kesme Sıvılarının Ti ve Ti6Al4V Malzemelerinin İşlenebilirliğine Etkilerinin Karşılaştırılması 2021-050 (KKU-BAP)
5. Al2014 matrisli TiB2 takviyeli MMK malzemelerin işlenebilirliklerinin değerlendirilmesi 2016-009 (KKU-BAP)
6. Metal Matrisli Kompozitlerin İşlenebilirliklerinin Thirwave Advantedge Yardımıyla Simülasyonu 2016-096 (KKU-BAP)

Eserler

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler: (SSCI, SCI, SCI-EXPANDED, AHCI)

A.1 Kartal Y., Das M. T., "Algılayıcı ve Biyomalzeme Üretiminde Eklemeli İmalat", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:4 (2023) 2191-2203.

B. Diğer indekslerde taranan bilimsel dergilerde yayımlanan makaleler: (IM, DI, CMCI, EI, E-SCI vb.)

B.1 Kartal Y., Dogan D., Das M. T., Metin A. Ü., "Biyoyumlu Malzemelerin Üretimi için 4D Eklemeli imalat Cihazı Tasarımı ve Üretimi", International Journal of Engineering Research and Development 15:2 (2023) 840-847.

C. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler:

C.1 Kartal, Y., ER, A.O. Çalın, R. "Hibrit Metal Matrisli Kompozitler ve Savunma Sanayi Uygulamaları", III. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, Online, 7-9 Ekim 2021.

C.2 Kartal, Y., ER, A.O. "Alaşımlandırmanın Titanyumun İşlenebilirliği Üzerine Etkisinin İncelenmesi", III. Uluslararası Savunma Sanayi Sempozyumu, Online, 7-9 Ekim 2021.