

T.C.

İstanbul

YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**3B YAZICI İLE ÜRETİLEN PLA VE GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ PLA ESASLI YAPILARIN
BİYOAKTİVİTE VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Münife DEMİREL

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY

İkinci Danışman

Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN

İSTANBUL

Nisan 2024

T.C.
İstanbul
YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kabul Onay

Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı çerçevesinde yürütülmüş olan bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 25/04/2024

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi

Ek Danışmanı

Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi

Doç. Dr. Sezen CANIM ATEŞ
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi

Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY
Acıbadem Üniversitesi

Etik Beyan

İstanbul Yeni Yüzyıl 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.

25/04/2024

Münife DEMİREL

Önsöz

Tez çalışmam süresince, değerli fikirleri ile beni yönlendiren, çalışma süresince emeğini, sabrını, ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum çok değerli hocam ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde analiz aşamasında ve yorumlanmasında desteğini eksik etmeyen eş danışmanım Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde numunelerimizin üretiminde bize yardımcı olan Elas 3B firmasının genel müdürü Sayın Onur TOPKAYA'ya teşekkür ediyoruz.

Tez sürecinde çekme ve üç nokta eğme deneylerinin yapımında bize yardımcı olan GTÜ Uçak Mühendisliği'nde Dr. Öğr. Üyesi Fatih USTA ve İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Laboratuvar Görevlisi Muhammed Sefa BAŞALAN'a teşekkür ediyoruz.

Tez sürecinde biyoaktivite deneylerinde yardımlarını ve desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Sezen CANIM ATEŞ, Arş. Gör. Fatma Zehra KÖSE ve Arş. Gör. Rezzan YARDIMCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, destekleri ve varlıkları ile bana güven veren sevgili AİLEME sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

25/04/2024

Münife DEMİREL

İçindekiler

Kabul Onay.....	i
Etik Beyan.....	ii
Önsöz.....	iii
İçindekiler.....	iv
Şekil ve Grafik Listesi.....	vi
Tablo Listesi	viii
Sembol ve Kısaltma Listesi	ix
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Biyomalzemeler	3
2.1.1 Metallerik Biyomalzemeler.....	4
2.1.2 Seramik Biyomalzemeler	4
2.1.3 Kompozit Biyomalzemeler	4
2.1.4 Polimerik Biyomalzemeler	5
2.2 Polilaktik Asit (PLA)	5
2.3 Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit (Re-PLA)	9
2.4 Üç Boyutlu (3B) Yazıcılar	10
2.5 Çekme Deneyi	10
2.6 Üç Nokta Eğme	11
2.7 Yüzey Pürüzlülüğü.....	12
2.8 Biyouyumluluk.....	13
2.9 Literatür Araştırması	13
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
3.1 Kullanılan Malzeme ve 3B Yazıcı Özellikleri	21
3.2 İş Parçasının Üretimi.....	23
3.3 Karakterizasyon Çalışmaları	24
3.3.1 Çekme Testi	24
3.3.2 Üç Nokta Eğme Testi.....	26
3.3.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçümü.....	28
3.3.4 SEM Analizleri	29
3.3.5 Biyoaktivite Testleri.....	30
3.3.5.1 Antibakteriyel testi	31
3.3.5.2 Sitotoksikite (MTT) testi	31
3.3.6 Salım Çalışması	33
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	34
4.1 Çekme Test Sonuçları	34

4.2	Üç Nokta Eğme Test Sonuçları	39
4.3	Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları	43
4.4	SEM Analizleri.....	52
4.5	Biyoaktivite Sonuçları.....	55
4.5.1	Antibakteriyel Test Sonuçları	55
4.5.2	Sitotoksisite Test Sonuçları.....	58
4.6	Salım Çalışması Sonuçları	59
5.	GENEL SONUÇLAR	60
5.1	Sonuçlar.....	60
5.2	Öneriler.....	62
KAYNAKÇA		63
ÖZGEÇMİŞ.....		67



Şekil ve Grafik Listesi

Şekil 2.1: Biyomalzeme çeşitleri.....	4
Şekil 2.2: PLA sentez şeması [10].....	5
Şekil 2.3: PLA' nın kimyasal yapısı [10].	6
Şekil 2.4: Laktik izomerlerinin kimyasal yapıları.	6
Şekil 2.5: PLA'nın doğadaki döngüsü.....	7
Şekil 2.6: PLA uygulama alanları [9].....	8
Şekil 2.7: Üç nokta eğme deneyi şematik görseli.....	12
Şekil 2.8: Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rt ve Rz ölçümü [21].....	13
Şekil 3.1: (a) Çekme, (b) üç nokta eğme ve (c) biyoaktivite – salım numunelerinin şekilleri ve ölçüleri.....	22
Şekil 3.2: Creality marklı ve CR 6 SE modeli üç boyutlu yazıcı.	22
Şekil 3.3: Polilaktik asit ELAS 3B markalı PLA PLUS filamenti.	23
Şekil 3.4: Numunelerin boyutlarının adlandırılması (a) çekme numunesi için en, boy ve kalınlık (b) üç nokta eğme numunesi için en, boy ve kalınlık ve (c) biyoaktivite numunesi için en, boy ve kalınlık.....	24
Şekil 3.5: Numunelerin adlandırılması (a) sistematigi ve (b) örneği.	24
Şekil 3.6: Çekme numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.	25
Şekil 3.7: Çekme deneyi cihazı.	26
Şekil 3.8: Üç nokta eğme numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.	27
Şekil 3.9: Üç nokta eğme cihazı.	28
Şekil 3.10: Yüzey pürüzlülük cihazı ve ölçümü.....	29
Şekil 3.11: SEM cihazı.	29
Şekil 3.12: Biyoaktivite-salım numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.	30
Şekil 3.13: Süspansiyonlar ve kullanılan UVmini-1240 markalı UV cihazı.....	31
Şekil 3.14: MTT testinde kullanılan numuneler.....	32
Şekil 4.1: Çekme testi öncesi ve sonrası numuneler (a) PLA ve (b) Re-PLA.....	34
Şekil 4.2: PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.	35
Şekil 4.3: Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.	35
Şekil 4.4: PLA ve Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.	36
Şekil 4.5: PLA numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.	36
Şekil 4.6: Re-PLA numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.....	37

Şekil 4.7: Tüm numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.	37
Şekil 4.8: Üç nokta eğme testi öncesi ve sonrası numuneler (a) PLA ve (b) Re-PLA.....	39
Şekil 4.9: PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.	40
Şekil 4.10: Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.	40
Şekil 4.11: PLA ve Re-PLA numunelerinin karşılaştırılmış gerilim – gerinim grafiği.	41
Şekil 4.12: PLA numunelerinin üç nokta eğme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.	41
Şekil 4.13: Re-PLA numunelerinin üç nokta eğme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması...	42
Şekil 4.14: Tüm numunelerinin eğme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.	42
Şekil 4.15: YXZ eksenli PLA parçanın kırılan yüzeyin yüzey pürüzlülüğü sonuçları.	44
Şekil 4.16: PLA numunelerinin ortalama Ra değerlerinin karşılaştırılması.....	46
Şekil 4.17: YXZ eksenli Re-PLA parçanın kırılan yüzeyin yüzey pürüzlülüğü sonuçları.	48
Şekil 4.18: Re-PLA numunelerinin ortalama Ra değerlerinin karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.19: PLA ve Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.	51
Şekil 4.20: PLA ve Re-PLA numunelerinin XZY-YZX eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.	51
Şekil 4.21: PLA ve Re-PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.	52
Şekil 4.22: XYZ eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.	53
Şekil 4.23: XZY eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.	53
Şekil 4.24: ZXY eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.	53
Şekil 4.25: XYZ eksenine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.	54
Şekil 4.26: XZY eksenine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.	54
Şekil 4.27: ZXY eksenine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.	54
Şekil 4.28: Biyoaktivite testi için PLA numuneleri.....	56
Şekil 4.29: Biyoaktivite testi için Re-PLA numuneleri.....	56
Şekil 4.30: (a) Test öncesi ve (b) 24 saat test sonrası agar petri kaplarında <i>E.coli</i> kolonilerinin görseli.....	56
Şekil 4.31: (a) Test öncesi ve (b) 24 saat test sonrası agar petri kaplarında <i>S. aureus</i> kolonilerinin görseli.	57
Şekil 4.32: MTT test sonuçlarının karşılaştırılması.	58

Tablo Listesi

Tablo 2.1: PLA özellikleri [12].....	7
Tablo 2.2: PLA'nın dolgu şekil yapısı ve özellikleri [12].	7
Tablo 3.1: PLA üretiminin temel parametreleri.....	23
Tablo 3.2: Çekme, üç nokta eğme, biyoaktivite ve salım numunelerinin üretim süreleri.	23
Tablo 3.3: Kullanılan PLA'nın özellikleri.	23
Tablo 3.4: Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihazın özellikleri.	29
Tablo 4.1: Farklı eksenler arasındaki çekme dayanımı yüzde farkları.	38
Tablo 4.2: Farklı eksenler arasındaki eğme dayanımı yüzde farkları.	43
Tablo 4.3: PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenlerine ait Ra sonuçları.	45
Tablo 4.4: PLA numunelerinin XZY-YZX eksenlerine ait Ra sonuçları.	45
Tablo 4.5: PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenlerine ait Ra sonuçları.	45
Tablo 4.6: Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenlerine ait Ra sonuçları.	48
Tablo 4.7: Re-PLA numunelerinin XZY-YZX eksenlerine ait Ra sonuçları.	49
Tablo 4.8: Re-PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenlerine ait Ra sonuçları.	49

Sembol ve Kısaltma Listesi

3B	: Üç Boyutlu
DK	: Doğal Kauçuk
DSC	: Diferansiyel Kalorimetri
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Spektroskopi
HA	: Hidroksiapatit
MMA	: Metilmetakrilat
PA	: Poliasetal
PE	: Polietilen
PET	: Polietilenteraftalat
PGA	: Poliglikolik Asit
PLA	: Polilaktik Asit
PMMA	: Polimetilmetakrilat
PP	: Polipropilen
PS	: Polisülfon
PTFE	: Politetraşoroetilen
PU	: Poliüretan
PVC	: Polivinilklorür
Ra	: Profilin Aritmetik Ortalama Sapması
RA	: Regresyon Analizi
Re-PLA	: Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit
Rt	: Maksimum Tepe-Çukur Yüksekliği
Rz	: Noktalarının Ortalama Mesafesi
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SR	: Silikon Kauçuk
TGA	: Termo Gravimetrik Analiz
TPU	: Termo Plastik Poliüratan
ZnO	: Çinko Oksit

ÖZET

3B Yazıcı ile Üretilen PLA ve Geri Dönüştürülmüş PLA Esaslı Yapıların Biyoaktivite ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Münife DEMİREL

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY

Tez Ek Danışmanı: Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN

Nisan 2024, 79 sayfa

Eklemeli üretim teknolojisi, bugüne kadar çeşitli ilgili teknolojilerdeki buluşlara ve ilerlemelere bağlı olarak gelişmiştir. Son birkaç yılda, geleneksel üretim teknolojilerine kıyasla avantajları nedeniyle eklemeli üretim teknolojisinin potansiyel kullanımları birçok endüstride özellikle havacılık, sağlık sektörü, sanat, eğitim ve otomotiv sektöründe artmıştır. Eklemeli üretim teknolojisi ile birlikte çok sık duyulan 3 boyutlu yazıcılarda bir parça üretirken farklı oranlarda hatalı parçalar da meydana gelmektedir. Sorunlu parçalar, gerekli özellikleri sağlamaması ve kullanımı mümkün olmaması dolayısıyla ıskarta olarak değerlendirilmektedir.

Bu tez çalışmasında filament çeşidi olarak biyoplastiklerden polilaktik asit PLA filamenti ve üç boyutlu yazıcı olarak FDM (Fused Deposition Modeling) cihazı kullanılmıştır. PLA filamenti kullanımı sonrası hatalı numunelere geri dönüşüm işlemi uygulanıp Re-PLA filamenti hazırlanmıştır. Sabit olarak belirlenen parametreleri kullanarak, tabla eksenlerine paralel olacak şekilde, altı farklı konumlandırmada numuneler üretilmiştir. Mekanik özelliklerini ortaya koymak adına çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve taramalı elektron mikroskobu SEM analizi ve biyo özelliklerini ortaya koymak adına ise; antibakteriyel, biyouyumluluk ve salım incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçlarına bakıldığında kısaca PLA ve Re-PLA malzemelerinin deney genelindeki sonuçlarının benzer olduğu kanısına varılabilir. Her iki malzeme ile üretilen ürünler de birbirlerinin yerlerine kullanılabilir. Bu tez çalışması sonucunda hatalı üretimler sonrası oluşan atık parçaların, pahalı filament malzemesinin israfı ve çevre kirliliğine neden olan atıkların önüne geçilebilir olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Polilaktik asit PLA, geri dönüştürülmüş polilaktik asit Re-PLA, mekanik özellikler, biyouyumluluk.

ABSTRACT

Investigation of Bioactivity and Mechanical Properties of PLA and Recycled PLA Based Structures Produced with 3D Printer

Münife DEMİREL

Istanbul Yeni Yuzyil University, Science and Engineering Institute

Master Thesis, Biomedical Engineering Department

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Şakir ALTINSOY

Co-Supervioser: Doç. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN

April 2024, 79 pages

Additive manufacturing (AM) technology has developed so far based on inventions and advances in various related technologies. In the last few years, the potential uses of additive manufacturing technology have increased in many industries, especially in the aerospace, healthcare, art, education, and automotive sectors, due to its advantages compared to traditional manufacturing technologies. When producing a part with 3D printers, which are frequently heard of with additive manufacturing technology, defective parts occur at different rates. Problematic parts are considered scrap because they do not provide the required features and are not possible to use.

In this thesis study, polylactic acid PLA filament from bioplastics was used as a filament type and an FDM (Fused Deposition Modeling) device was used as a three-dimensional printer. After using the PLA filament, the recycling process was applied to the faulty samples, and the Re-PLA filament was prepared. Using fixed parameters, samples were produced in six different positions, parallel to the table axes. To reveal its mechanical properties, the tensile test, three-point bending test, surface roughness measurements, and scanning electron microscope SEM analysis, and to reveal its bio properties; antibacterial, biocompatibility, and release studies were carried out.

Looking at the test results, it can be concluded that the results of PLA, and Re-PLA materials are similar throughout the experiment. Products produced with both materials can be used in place of each other. As a result of this thesis study, it has been seen that waste parts formed after faulty production, waste of expensive filament material, and waste that causes environmental pollution can be prevented.

Keywords: *Polylactic acid (PLA), recycled polylactic acid (Re-PLA), mechanical properties, biocompatibility.*

1. GİRİŞ

Doğada oluşan biyomalzemeler uzun sürelerdir bilhassa insanların organ ve dokularını güçlendirmek için destekleyici şekilde kullanılmaktadır. Bu çeşit malzemelerin doku mühendisliği ve ilaç salımı benzeri pek çok biyomedikal uygulamalarda kullanımına imkan kazandıran bir diğer özellikleri ise biyouyumlu olmalarıdır. Biyouyumlu olan malzemeler biyo malzeme olarak tanımlanmış ve biyo uyumluluk, uygulama sırasında malzemenin vücut sistemine olumlu yanıt verebilme kabiliyeti olarak açıklanmıştır. Biyouyumluluğu yüksek olan malzemeler, yani biyo malzemeler; seramikler, metaller, kompozit malzemeler ve polimerlerdir. Polimerler, bitki ve hayvandan direkt polimer olarak elde edilebildikleri gibi çıkış maddeleri olan monomerlerin doğal bileşiklerden elde edildikten sonra kimyasal veya biyolojik olarak sentezlenebilir. Bu türden doğal polimerlere biyoelastomerler ve polihidroalkanoatların yanı sıra bir poliestere türevidir olan polilaktik asit örnek olarak verilebilir. PLA kullanımı ile tasarım süreçleri, kısılan teslimat süreleri, prototiplerin hızlı sentezi, kolay test, minimuma inen süreç hataları sağlanmaktadır. Tasarlanan parçalar fazlaca karmaşık bir yapıda olsa dahi PLA kullanımının üretiminin kolay olması sayesinde rahatlık sunmaktadır. Ayrıca farklı üretim yöntemlerine göre maliyet olarak daha düşük ve daha pratiktir [1,2].

Üç boyutlu (3B) yazıcılarda üretim malzemesi olarak kullanılan Polilaktik asit (PLA), alçak sıcaklıklarda ergiyebildiği için kolaylıkla çalışmamızı sağlayan bir malzemedir. Bu sebep ile fazlaca tercih edilmektedir. PLA filamentini yazdırma sırasında zehirleyici koku üretmediği için hem kapalı hem açık ortamlarda kullanımı güvenlidir. PLA filamentinin yazdırılması fazlaca kolaydır ve nadir sorunlar oluşturmaktadır. PLA, bitkisel bazlı şeker ve nişasta içerdiğinden dolayı biyouyumlu biyopolimer bir malzemedir. İnsan sağlığına zararlı olan bir içeriğe sahip olmadığı için biyomedikal ve gıda sektöründeki plastik uygulamalarında çok fazla kullanılmaktadır. PLA; biyouyumlu, maliyeti ve biyobozunur olmasıyla kendisini öne çıkmaktadır. Polilaktik asitler amorf yapıda olan ya da yarı kristalin, rijit ve alifatik termoplastik polimerlerdir. Bu polimer hem polipropilen (PP) özelliğini sergilemesi hem de polietilenteraftalat (PET) karakteristiğine sahip olmasıyla eşsiz bir özellik içermektedir. Polilaktik asit %100 doğal kaynaklardan üretilmektedir. PLA kullanılan ve geride kalan (atık olarak anılabilecek) parçalarını geri dönüştürülmeye imkan sağlar ve Re-PLA olarak adlandırılmaktadır [2-4].

Atık filamentlerin geri dönüşümü farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir ve tekrardan hammadde olarak kullanılabilir. Böylece hem maliyetler minimuma indirilebilmekte

hem de çevre korunmaktadır. Filament geri dönüştürme yöntemi olarak, extrüderler kullanılmakta olup filament parçacıklarının ergitildikten sonra istenen kalınlıktaki bir nozuldan sabit bir kalınlık değeri oluşturacak biçimde akışının sağlanması ve makaralara sarılmasıyla yeniden üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sırasında filamentin granül halden parçalı üretim tekniği ile ihtiyaç kadar geri dönüştürülmesi sağlanarak israfın önüne geçilebilmektedir [3]. Bu nedenle yapılan tez çalışmasında PLA ve tekrar başka bir ürün üretiminde kullanmak adına geri dönüştürülmüş versiyonu olan Re-PLA ile alınan 3B baskılar arasındaki dayanımsal farkları tespit edilmiş ve Re-PLA' nın saf hali ile mekanik özelliklerin karşılaştırmaları ortaya koyularak istenen hedeflere ulaşılmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışma, filament geri dönüşümün desteklenebilirliği hakkında fikir oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında biyopolimer olarak bilinen PLA ve Re-PLA malzemeleri kullanılmıştır. 3 boyutlu yazıcıda 6 farklı eksen ile hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri ve 3 farklı doluluk oranında üretilen malzemelerin biyoaktivite özellikleri incelenmiştir. Üretilen numunelerin çekme dayanımı, eğme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve kırılan bölgelerin SEM görüntüleri kırılma sebepleri araştırılmıştır. Bunlara ek olarak, çalışmada üretilen numunelerin anti bakteriyel, biyouyumluluk ve salım özellikleri de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmıştır. Parametrelerin doğru seçimi, tasarımcıların ve üreticilerin imalat süresi ve ürün özellikleri açısından parçalarda daha az farklılık ve belirsizlik ile iyi biyoaktivite ve mekanik özellikler elde etmelerini sağlayacaktır. Bu çalışma sonuçları ile literatüre katkı da bulunmaya ve literatürdeki boşluğu giderilmeye çalışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Biyomalzemeler, polilaktik asit (PLA), geri dönüştürülmüş polilaktik asit (Re-PLA), Üç boyutlu yazıcılar hakkında genel bilgiler, çekme deneyi, üç nokta eğme deneyi, yüzey pürüzlülüğü ölçümü, biyouyumluluk ve literatür taraması olmak üzere 9 başlıktan oluşan bu bölüm tez konusuna ilişkin bilgiler verilmiştir.

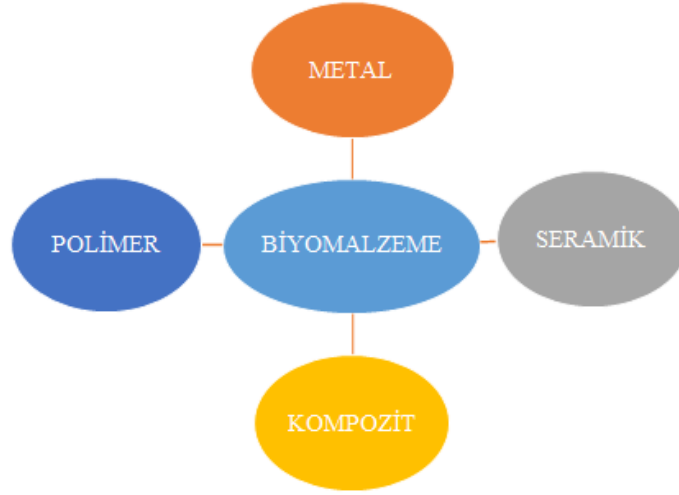
2.1 Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, ortopedik uygulama alanlarında kemik yerine kullanılan malzemes olarak ve eklem protezi, bel kemiği enstrümantasyonlarında, yüz-çene cerrahisinde, yapay kalp parçalarında, kalp kapakçığında, diş implantlarında, fiksator tellerinde, fiksator malzemesi olarak, kateter, çivilerde, kalça plaklarında, delikli vidalarda, vidalarda, vida pullarında metal parçalarda açılı plaklarda, anatomik plaklarda ve vücuda yerleştirilebilir cihazlar gibi yerlerde kullanılmaktadır [5].

Kullanım alanları;

- Hücre ve moleküler biyoloji ürünleri
- Tedaviye yardımcı olmak (drenaj, kateter)
- Farmasötik aparatlar ve biyoteknoloji
- Fonksiyonelliği artırmak (işitme cihazı, kontrakt lens, kalp pili)
- İlaç taşınması
- Hastalıklı veya hasar görmüş kısımların yerine (protezler, diyaliz)
- Doku mühendisliği için iskeleler
- İyileşmeye yardımcı olmak (vidalar teller, ameliyat ipliği)
- Fonksiyon bozukluklarını düzeltmek (omurga sabitleyiciler)
- Teşhise yardımcı olmak (endoskopi, enjektör, biyosensörler)
- Dental implant, diş dolguları
- Kozmetik problemleri düzeltmek (deri implantasyonu, silikon, diş teli)

Biyomalzemeler, metaller, kompozitler, seramikler ve polimerler olarak 4 bölüme ayrılırlar.



Şekil 2.1: Biyomalzeme çeşitleri.

2.1.1 Metallik Biyomalzemeler

Dayanıklı olması, kolay şekil verilebilmesi, elektriksel özellikleri ve termal iletkenliklerinin olması biyomalzeme olarak kullanılmasına olanak sağlar. Genellikle diş ve ortopedi uygulamalarında kullanılır. Metal biyomalzemeler; paslanmaz çelikler (316L), metal ve alaşımları, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları, nikel-titanyum alaşımları kobalt-nikel-krom-molibden alaşımı, altın, amalgam ve tantal alaşımlarıdır [5].

2.1.2 Seramik Biyomalzemeler

Biyoyumlulukları fazla olmalarının yanında kırılğan, sert, korozyona dayanıklı, yoğunluğu yüksek ve mekanik özellikleri düşük zor işlenen malzemelerdir. Biyoseramik malzemelere örnek olarak; biyoaktif cam, alümina ve hidroksiapatit verilebilir [5].

Biyoseramikler, biyoaktif ve biyo inert olmak üzere iki çeşitte gösterilir.

- (i) Biyoaktif seramikler implant ve doku arasında kimyasal bağ oluşumuna imkan oluşturan seramik malzemedir.
- (ii) Biyo inert seramiklerin doku ile etkileşimleri mekanik bağ şeklindedir. Mekanik bağ, malzemenin doku özelliklerini değiştirmeden dokuyu bir arada tutabilmesi anlamına gelir [6].

2.1.3 Kompozit Biyomalzemeler

Kompozitler, bileşenlerin tek başına kullanıldığında yetersiz özellikli olan iki ya da daha fazla sayıda farklı kimyasal yapıdaki malzemenin, özelliklerini ve sınırlarını koruyarak oluşturduğu birçok fazlı malzemelerdir. Düşük elastikite modülüne sahip ve yüksek

dayanıklılığından kaynaklı, bilhassa ortopedik uygulama alanlarında kullanılırlar. Kompozitler, diş hekimliği ve ortopedide uygulama alanları dışında, yumuşak doku implantı olarak da kullanılmaktadır [5,6].

2.1.4 Polimerik Biyomalzemeler

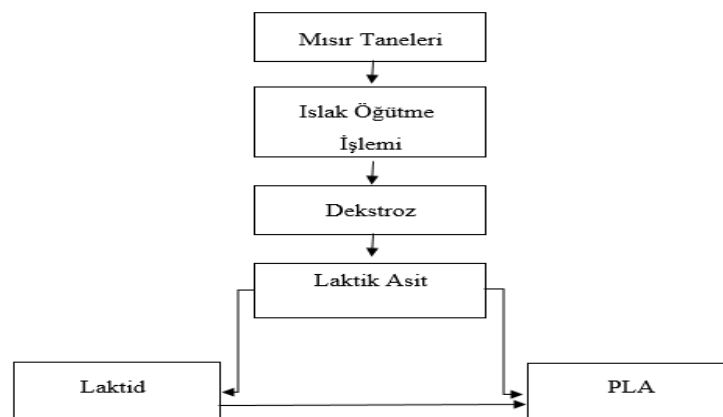
Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerin çok fazla sayıda farklı veya aynı atomların kimyasal bağlarla, tekrarlar halinde düzgün bir şekilde bağlantı yapılarak uzun zincirli oluşan, farklı bir tanımla yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimerler fiziksel yapısı açısından vücuttaki yumuşak dokulara yakın özellik sergiler. Cilt, damar, kıkırdak ve lens gibi özel dokuya sahip bölgelerde, protez malzemesi olarak kullanılırlar [6]. Biyopolimerler araç-gereçlerin çeşidini tanımlamada kullanılan bir terimdir. İki başlıca kategoriye ayrılır:

1. Mikroorganizma, hayvanlar ve bitkilerden üretilen polimerler.
2. Doğal yağlar, şeker ve aminoasit vb. biyolojik kaynaklı malzemelerden türetilen kimyasal olarak üretilen polimerler [7,8].

Biyopolimerlere örnek olarak verilen polisülfon (PS), polimetilmetakrilat (PMMA), polietilen (PE), politetraoroetilen (PTFE), poliglikolik asit (PGA), silikon kauçuk (SR), poliüretan (PU), poliaktik asit (PLA), polietilenteraftalat (PET) ve poliasetal (PA) gibi birçok sayıda polimer, tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır [9].

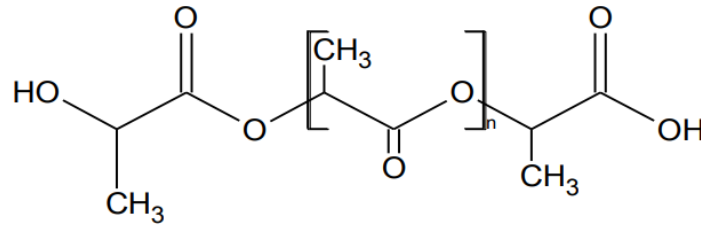
2.2 Polilaktik Asit (PLA)

PLA (Polilaktik Asit) mısır nişastası ve şeker fermentasyonu ile elde edilen bir biyoplastik ve termoplastik olarak bilinmektedir. Şekil 2.2’ de PLA sentez şeması sunulmuştur.

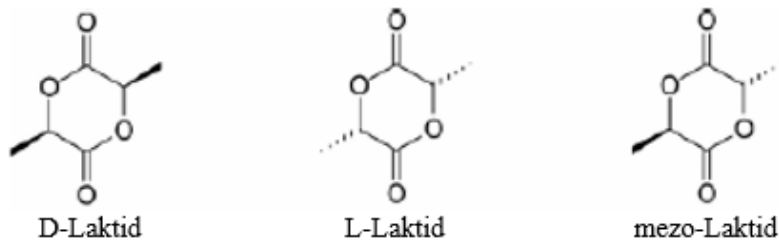


Şekil 2.2: PLA sentez şeması [10].

Şekil 2.3’ de PLA’ nın tekrar eden laktik asit birimlerinden meydana gelen kimyasal yapısı, Şekil 2.4’de ise PLA izomerlerinin (Poli (L-laktik asit) (PLLA), Poli (D-laktik asit) (PDLA), Poli (LD-laktik asit) (PLDLA)) kimyasal yapısı gösterilmiştir. PLA üretimi aşamasında direkt polikondenzasyon yöntemi (eriyik polikondenzasyonu ve çözelti polikondenzasyonu) ve halka açılma polimerizasyonu olmak üzere başlıca iki sentetik yöntem uygulanmaktadır.

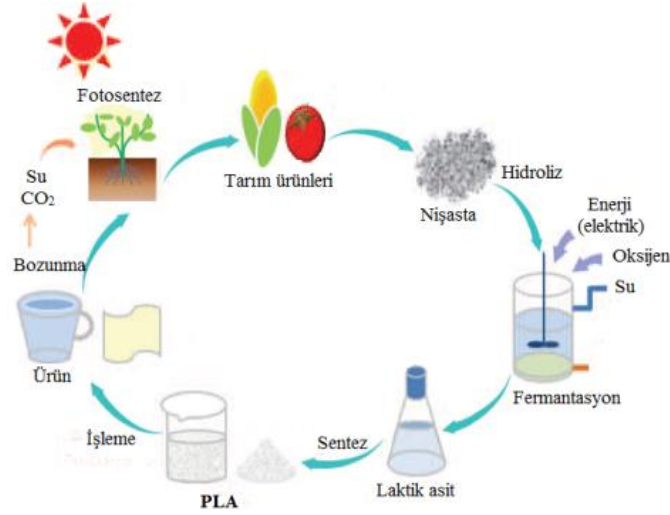


Şekil 2.3: PLA’ nın kimyasal yapısı [10].



Şekil 2.4: Laktik izomerlerinin kimyasal yapıları.

Laktik asit 3 potansiyel tip oluşmaktadır: D- laktid, L- laktid, mezo laktid (D-, L- laktid). PLA üretiminde mutlaka mezo-laktid bulunmaktadır. Bu yüzden teorik olarak bütün PLA’ lar D+ ve L- laktid kopolimerlerinden meydana gelmektedir. Kopolimer, iki veya daha çok monomerden oluşan polimer çeşididir. Merkezi karbon atomu durumuna göre; dört farklı gruba bağlandığından laktik asit, L (levo) ve D (dextro) olmak üzere iki adet optik izomeri oluşturmaktadır. L laktik asit polarize ışığı saat yönünde, D-laktik asit saat yönünün tersi yönünde dönmektedir. L (+) ve D (-) izomerleri bakteriyel sistemlerde sentezlenmektedir. Bu izomerlerden sadece L şekli hayvansal metabolizmada yer almaktadır. PLA polimerinden glikolik asit ve farklı monomerlerinden türevleri veya kopolimer de oluşturulabilir. PLA polimerinden oluşturulan bu kopolimer doğada kolay bir şekilde çözünüp, ayrışabilir. Poli-L-laktik asit doğada çözünmesi için uzun zamanlar gerekliyken, poliglikolik asit için aylar, polilaktik L ve D laktik için birkaç hafta süre yeterli olabilmektedir [2,9]. Şekil 2.5’te PLA’nın doğadaki döngüsü gösterilmektedir [11].



Şekil 2.5: PLA'nın doğadaki döngüsü.

PLA filamentleri, diğer filamentlere göre en yaygın olanıdır. Geri dönüşüm özelliği olan PLA filament gübre olarak da kullanılmaktadır. Sert ve hafif esnek bir yapısı vardır ama kırılındır. Yüksek eğilme dayanımı ve gerilme kuvveti gibi mekanik özelliklere sahip olup erime sıcaklığı ve camsı geçiş sıcaklığı düşüktür. Geleneksel polimer filamentlere göre baskı ve sentez aşamasında kötü koku yaymaz, baskı pratik ve kısa süre içerisinde alınır [12,13]. Tablo 2.1'de PLA özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1: PLA özellikleri [12].

Filament	Biyolojik Özellikler	Yoğunluk, (g/cm ³)	Esneklik	Dayanıklılık	Baskı Zorluğu	Baskı Sıcaklığı, (°C)	Yatak Sıcaklığı, (°C)
PLA	Biyolojik olarak parçalanır	1,24	Düşük	Orta	Düşük	180-230	Isıtmalı yatak gerekmez 60-80 °C önerilir.

PLA parçalarının dolgu şekli, pekçok mekanik özellikleri etkilediği bilinmektedir. Tam p-destek, doğrusal, üçgen, hızlı p-destek, ızgara ve kıvrık olmak üzere altı çeşit dolgu şekli vardır. Altı çeşit dolgu şekil yapı ve özellikleriyle beraber Tablo 2.2'de yer almaktadır.

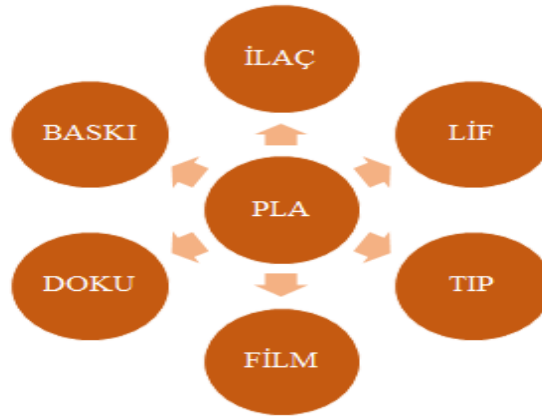
Tablo 2.2: PLA'nın dolgu şekil yapısı ve özellikleri [12].

Desen	Yapı	Özellik
Tam p-destek		Arı paneli veya p-destek dolgusu yükü ve ağırlı hassas bir şekilde dağıtmak için altıgen geometridir.
Doğrusal		Dikdörtgen doğrusal desen, her yönde güçlü bir ağ sağlar.

Tablo 2.2 (devamı): PLA'nın dolgu şekil yapısı ve özellikleri [12].

Üçgen		Üçgen desen, uygulanan kuvvetlere karşı daha yüksek dayanıma sahiptir.
Hızlı p-destek		Hızlı p-destek, dikdörtgen doğrusal desenden daha büyüktür, ancak daha uzun bir baskı süresince sahiptir.
Izgara		Izgara, diğer desen tiplerine göre en hızlı olanıdır.
Kıvrık		Kıvrık, yeterli destek sağlar ve geri tepme kuvvetini artırır.

Laktik asit her insanın vücudunda oluşan organik bir bileşiktir. Kan, kas ve vücudun farklı organlarında bulunur. Laktik asit insanlarda ya da hayvanlarda kas dokularıyla ilişkili olduğu için vücudun doğal metabolizmasıyla çözünürler. Vücuttaki laktik asit pruvik asite çevrilir, karbonhidrat ve su sentezlemek için trikarboksilik asit döngüsüne geçer. Daha sonra çözünme sonucunda organlarda herhangi bir kalıntı ile karşılaşmaz. Laktik asit oluşan döngüyü gerçekleştirmesiyle, biyo uyumluluk özelliğini kazanmış olur. Laktik asidin polimerleşmesiyle oluşan polilaktik asidin fazlaca ve çok geniş uygulama alanı, tıp alanındaki cerrahi dikişlerdir. Laktik asidin polimerleşmesiyle oluşan polilaktik asit; medikal malzeme, implant, yapı iskelesi, medikal dikiş ipliği, yabancı ot önleme ağları, bayan hijyen ürünleri, kontrollü ilaç salımı, bitki ağları, kum torbaları gibi çok çeşitli uygulamalarına karşılaşılmaktadır [2,12].



Şekil 2.6: PLA uygulama alanları [9].

Ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel üretim şekilleriyle ve üç boyutlu yazıcı tekniğiyle üretimlerde polilaktik asit kullanılabilmektedir. Ester grupları hidrolizinde yapısının kırılğan olması, süresinin fazla olması, gibi dezavantaj sergilemesine karşılık oluşumunda diğer seçeneklerine göre istenilen amaca uygun, düşük enerji harcanması gibi nitelikler kazandırır özellikte olması, atık biçimdeyken doğal şekilde bozunması ve toksik olayların meydana gelmemesi gibi avantajları olduğu için polilaktik asidin kullanılması, pekçok uygulama alanlarında yaygınlaşmıştır [9,12].

Katmanlı imalat yönteminde PLA kullanımıyla prototiplerin tasarım süreçleri, kısalan teslimat süreleri, kolay test, minimuma inen süreç hataları ve hızlı sentez sağlanmaktadır. Tasarlanan parçalar çok karışık bir yapıda olsa da PLA kullanımının üretimde sağladığı kolaylık ve 3B yazıcı teknikleri ile daha kısa sürede, istenilen özelliklerde ve düşük maliyetle üretim süreçleri gerçekleştirilmektedir.

2.3 Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit (Re-PLA)

Atık filamentler ile geri dönüşüm işlemi farklı şekiller olabilmektedir ve tekrardan filament gibi kullanılabilir hale gelmektedir. Bu sayede hem maliyetler minimuma indirilmekte hem de çevre korunmaktadır. Atık filament geri dönüşüm işleminde ekstrüderler kullanılmakta olup filament parçacıklarının ergitme işleminden sonrasında sabit bir kalınlık oluşacak şekilde istenilen kalınlıktaki nozuldan geçirilerek akışının sağlanması ve son adım olarak makaraya sarma işlemi sonunda dönüşüm işlemi tamamlanmaktadır. Bu işlem israfın önüne geçmek amacıyla filament granül halinden parçalı üretim sonucunda ihtiyaç kadar geri dönüştürülme yapılır [3].

Yüksek oranda şeker kamışı, nişasta ve şeker kaynaklı polimer olan tarımsal üründen elde edilerek oluşan PLA, geri üretim yapılmadığında besin kaynakları tüketilmesinin artışına sebep olmasından dolayı yeniden işlenmesi ve geri kazanılması sosyo ve ekonomik açıdan gereklidir. PLA'nın geri dönüşüm işlemi sonrası ortaya çıkan bozunmalarla birlikte özelliklerini de olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durum fiziksel geri dönüşüm işleminden verim gelmemesine neden oluşturmaktadır.

Polimer malzemeler üretim sonrası kullanım neticesinde işlevlerini yitirir ve atık olarak ortaya çıkar. Bu malzemelerin geri dönüşüm yöntemleri zor ve maliyetlidir. Fakat bunların geri dönüştürülmesi doğa açısından avantajdır. Teknolojinin gelişmesiyle çok sayıda geri dönüşüm yöntemi geliştirilmiştir. Geri dönüşüm malzemeleri önce kaynağından (ürün imalatçılarından, hammadde üreticilerinden ve tüketicilerden) toplanır. Farklı kaynaklardan

toplanan (PLA, PVC, metal, kâğıt, vb.) gibi atıklar sınıflarına göre (yüzdürmeyle, elle, gözle, çeşitli çözeltiyle ve hidrosiklon) yöntemiyle ayrıştırılır ve temizlik işlemleri uygulanır. Plastik atıklar, doğaya bırakıldığında çevredeki mikroorganizmalara ve güneş ışınlarına karşı bozunmaya direnç gösterdiği için doğada uzun süre kalmaktadırlar [14]. Atıklar sınıflarına göre ayrıştırıldıktan sonra farklı üretim aşamalarından geçerek granül ve çapak plastik elde edilir. Elde edilen bu yeni hammaddeler sanayide tekrardan kullanılarak istenilen ürünler ve malzemeler üretilir [15].

2.4 Üç Boyutlu (3B) Yazıcılar

Üç boyutlu (3B) yazıcılar, metal ya da plastik nesneleri ergitip üst üste katmanlar oluşturma prensibine göre uygulama yapan ve bilgisayar destekli programlar yardımıyla tasarımların üretimini iki boyutlu düzlemde gerçekleştiren makinelerdir. Üç boyutlu (3B) yazıcılar, polimer sektöründe uygulanan farklı sentez şekillerine göre aynı süre kullanılarak üretim yapıldığında daha az üretimin olduğu takım tasarımı ve kalıp gibi uygulamalara gerek olmaması haliyle de prototip ya da çok hızlı bir şekilde ürünün az miktardaki bir parçasının üretilmesini sağlamaktadır. Endüstri ve bilim ile birlikte bu teknoloji, sunduğu kolaylıklara bağlı olarak bireysel amaçla da kullanılmaktadır ve git gide yaygınlaşmaktadır. Diğer bir şekilde büyük ebatlı ürünler, üç boyutlu yazıcılarda katmanların yığıldığı tablanın hacmi küçük olduğu için küçük küçük parçalar şeklinde üretilip daha sonra montaj edilebilerek oluşturulabilmektedir [16].

Geleneksel üretim yöntemleri nesneleri delerek, bükerek ya da keserek şekil vermek yerine, dijital işlemler uygulayarak oluşturulan şekili katmanlar halinde üst üste yığma, polimer sertleştirme, lazer sinterleme gibi farklı işlem adımlarını izleyerek malzemeleri şekillendirirken 3B yazıcılarda endüstri alanında kullanılan geleneksel üretim yöntemlerine göre daha değişik teknikler kullanarak üretim sağlanmaktadır [17].

2.5 Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzeme seçimi, malzemelerin mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Çekme testi deneyinin ilkesini incelersek her iki çenede de hareket olan çekme test deneyi makineleri olsa dahi sıklıkla alt çene sabit ve üst çenesi hareketli olan bir makinenin arasına koyulan uygun standartlardaki numuneler yine uygun standartlardaki bir biçimde çekme işlemi kullanarak koparılması sırasında uygulanmaktadır [16]. Denklem 2.1’de gerilme- birim uzama eğrisinin detayları verilmiştir.

$$\sigma - \varepsilon \text{ eğrisi}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.1)$$

σ : Gerilme (MPa)

ε : Birim uzama

Δl : Kırılma anındaki uzama – İlk uzunluk

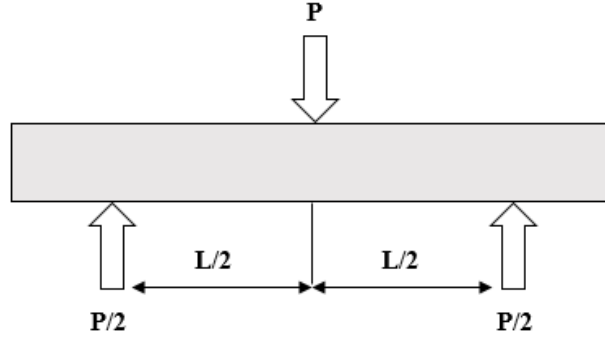
l_0 : İlk uzunluk

Çekme testi sırasında, belirtilen ölçülere göre hazırlanmış dogbone (papyon) örneklerle değişmeyen hızla çekme bozulması kullanılmakta ve bu sırada numunenin bozulmasına göre gösterdiği gerilme, uzamanın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Gösterilen kuvvet orantısal limitin üstünde bir sonucuna ulaştığında, kalıcı deformasyon (plastik deformasyon) oluşmaktadır ve gösterilen kuvvet kalktığında eski şekline tekrardan gelememektedir. Orantısal limit seviyesinin altında kalan sonuçlarda ise kuvvet oluşturulması esnasında, oluşturulan kuvvet kalktığında numune eski şekline tekrardan gelmektedir ve bu durum elastik deformasyon olarak adlandırılmaktadır [18].

2.6 Üç Nokta Eğme

Üç nokta eğme deney çalışması, eğme testleri arasında en fazla tercih edilen deneysel metottur ve bu metot yardımıyla malzemenin mukavemetine ilişkin tasarım özelliklerini saptama ve numunenin eğilmeye karşı gösterdiği mekanik özelliklerini saptamayı amaçlar. Eğme deney çalışmasının uygulama ilkesi, belirli standarttaki hıza ve ölçüye bağlı olarak iki mesnet arasında üst kısımda duran numuneye aparatın hareket etmesiyle kuvvet uygulanmasıdır [16].

Deneysel uygulamanın temel ilkesi, üretilen numuneyi “kiriş” şekli biçiminde adlandırmasıdır. Bu durumun sebebi ise enine yük taşıyan kiriş şeklindeki malzemelerin eğilmeye maruz kalmalarıdır. Kiriş denklemi ideal moment durumuna göre çıkarılmasından kaynaklı, kirişte meydana gelen kayma gerilmesinin normal gerilme sonuçlarına kıyasla yok sayılabilir ölçüde olması beklenmektedir. Bu neden ile numunenin sabit kesit alanına sahip olması ve uzunluk verilerinin diğerlerine göre en geniş değerine oranla en az 16 kat fazla olması gerekmektedir. Yatay bir pozisyonda test numunesi destekler üzerine uzunlamasına koyulurken, tam orta kısmından üzerine kuvvet uygulanır [16,19]. Üç noktalı eğme deneyine ait şematik gösterimi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Üç nokta eğme deneyi şematik görseli.

Deney süresince, P kuvvetinde artış olması sağlanırken, numunenin ortasındaki kısmında meydana gelen sehim verileri hesaplanır. Hesaplanan verilerin neticesinde kuvvete tekabül eden verilerden sehim grafiği oluşturulur. Hesaplamalar, bütün malzemelerin en fazla moment ve sehimin meydana geldiği orta noktada gerçekleştirilir. Mukavemet verilerinden yararlanarak, üç nokta eğilme deneyindeki kullanılan hesaplamalar denklem (2.2) ve (2.3)'teki gibidir [20].

$$M = \frac{P.L}{4} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}^c}{I} \quad (2.3)$$

M : Moment

P : Yük sehim eğrisinin kuvveti

L : Mesnetlerin aralığı

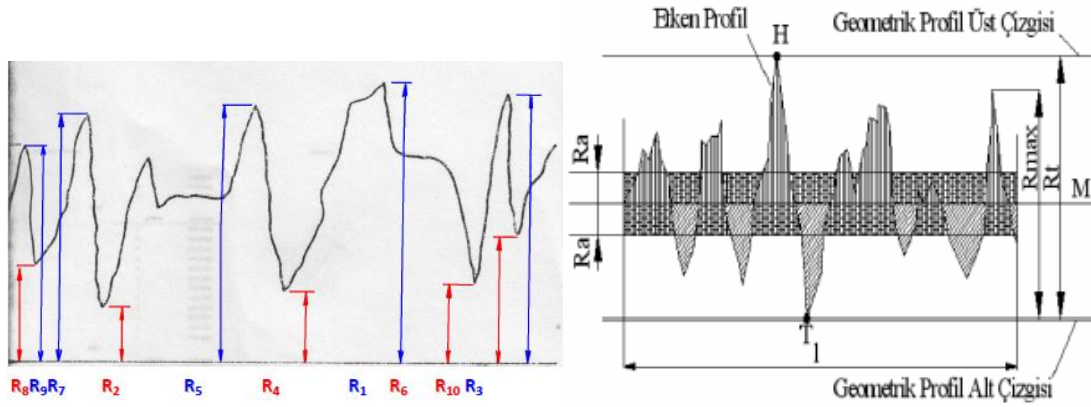
M_{max}^c : Maksimum eğme momenti

σ_{max} : Eğme gerilmesi

2.7 Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, üretim şekilleri ve farklı nedenlerle yüzeyde ortaya çıkan düzensizliklerdir. Üretim yöntemi, üretim hızı ve üretim zamanı yüzey durumunu tanımlamaya yardımcı olan önemli değişkenlerdir. Her bir değişkenin tek tek yüzey pürüzlülüğüne etkisi vardır. İdeal yüzey pürüzlülüğü ve doğal yüzey pürüzlülüğü olmak üzere iki şekilde gözlemlenir. Yüzey pürüzlülüğü testlerinde; Ra, bir dizi ya da tek bir faktöre göre işlenmiş yüzeyin aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini gösterir. Aritmetik olarak sapmasıdır. Rt, maksimum tepe-çukur yüksekliğini gösterirken Rz, 5 derin çukur ve 5 en

büyük tepe noktalarının ortalama mesafesini gösterir ve dik olarak ölçüm yapılır [21]. Şekil 2.8’de yüzey pürüzlülüğü ölçümü gösterilmiştir. Denklem (2.4) ve (2.5)’te yüzey pürüzlülüğü ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rt ve Rz ölçümü [21].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |x| dx \quad (2.4)$$

$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{L} \quad (2.5)$$

2.8 Biyouyumluluk

Biyoyumculuk, bir biyomalzeme için vazgeçilmez bir özellik olup, vücut ile benzerlik olarak da tanımlanabilir. Diğer bir şekilde vücudun biyomalzemeyi kabul edebilmesidir. Bu tanımlamaya istinaden biyomalzemelerin, kendini çevreleyen dokunun iltihaplanma, pıhtı oluşumu gibi istenmeyen durumları olmayan ve dokunun özelliklerinin değişmesini engelleyen malzemelerdir. Belli şekilde kullanımda biyomalzemenin iyi bir konak yanıtı meydana getirme becerisidir. Vücut sıvıları ve malzemenin kimyasal etkileşmesi ve bu etkileşim sonucunda fizyolojik yanıtlarının vücutta hangi ölçüde zarara uğrayıp uğramamasıdır. Biyoyumculuğu ikiye ayırarak, yapısal uyumluluğu, malzemenin vücut dokularının mekanik davranışına gösterdiği uygunluk yüzey uyumluluğu ise; bir biyomalzemenin vücut dokularına biyolojik, kimyasal ve fiziksel uygunluk şeklinde açıklamışlardır [9,22].

2.9 Literatür Araştırması

Çetindağ ve diğ.; yaptıkları çalışmada eşit boylara ve kesit alanlarına sahip geometrik şekillerinin farklı olduğu 3 boyutlu baskıların mukavemetini ölçmek için Regresyon Analizi (RA) ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yapmışlardır. Dikdörtgen kesitin oluşan maksimum

gerilme yönünden ve deforme olması yönünden de incelendiğinde diğer kiriş modellerine göre PLA kullanılarak üretilen yapıların gerilme ve deformasyon yönünden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. İncelenen verilere göre, deformasyon yönünden analiz edilen PLA kullanılarak üretilen malzemeler arasında olan dikdörtgen kesit geometrisinin, diğer şekiller ile kıyaslandığında %2,6 ile %30 oran aralığında daha avantajlı sonuç gösterdiğini, maksimum gerilme oranı için analiz edildiğinde ise %5 ile %69 oranları arasında daha iyi sonuç gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Diğer malzemelerin sonuçları da ele alınıp işlem yapıldığında en olumsuz sonuç %118 daha az verim sergileyen dairesel kesit geometrisinde gözlemlemişlerdir [23].

Kamer ve diğ.; yaptıkları çalışmada PLA malzemesini kullanılarak mavi, yeşil, turuncu ve inci beyazı renklerde değişik dolgu desenlerinde çekme test numuneleri üretmişlerdir. Değişik renklerde PLA filamentleri ile üretilen çekme test numunelerinin ağırlıklarında en yüksek %5 değişiklik görmüşlerdir. Değişik renklerde PLA filamentleri ile üretilen numunelerin çekme testi sonuçları kıyaslandığında porozite değerinin PLA Turuncu renk numunelerinde en fazla olduğu, pürüzlülük değerinin ise PLA Mavi renk numunelerde aritmetik ortalamanın en az olduğunu belirlemişlerdir. Değişik renkler kullanarak üretilen PLA malzemesi çekme test numunelerinin çekme mukavemet verilerinin hemen hemen aynı kaldığı, numunenin üst kısmındaki sertlik verilerinin genellikle birbirine yakın değerlerde olduğu ve PLA Mavi renk numunelerinin sertlik değerinin en yüksek olduğunu saptamışlardır. Değişik dolgu desenleri ile PLA filament kullanılarak üretilen numunelerin ağırlıklarında önemli ölçüde bir değişiklik olmadığını yüzey sertlik verilerinin genel olarak birbirine benzer olduğu kanısına varmışlardır. Seçilen filament renginde değişiklik olması 3 boyutlu yazıcı ile çekme testi için üretilen numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında rengin öneminin olmadığını saptamışlardır [24].

Tuna yaptığı çalışmada; farklı reaksiyon sürelerinin ve farklı konsantrasyonlarda zincir uzatıcıların Re-PLA (geri dönüştürülmüş PLA)'nın zincir yapısı, moleküler ağırlığı ve fiziko-mekanik özelliklerine etkilerini karşılaştırmıştır. PLA'nın geri dönüşüm aşamasında, harmanlayıcıda termomekanik sonuç nedeniyle dekompozisyona uğradığını ve bununla da zincirlerin koparak moleküler kütlelerinin azalışı ve özelliklerde düşüşe neden olduğunu tespit etmiştir. Mekanik ve reolojik testlerden alınan sonuçlar da moleküler kütlelerinin artışında reaktif harmanlama yönteminin olumlu sonuç gösterdiğini tespit etmiştir. Çalışma sonucunda zincir uzatıcıların mekanik özellikleri, zincir uzatıcıların moleküler ağırlıklarının arttırılmasında verimli olduğunu görmüşlerdir [18].

Kemaloğlu Doğan yaptığı çalışmada; peklik ve tokluğu uygulama amacıyla PLA/TPU (polilaktik asit/ termoplastik poliüretan) filamentin biyobozunur polimer karışımlarının üretimini yapmak ve özelliklerini nitelendirmek bu karışımların biyobozunurluk ve biyouyumluluk özelliklerini incelemek ve bu karışımların gösterdiği şekil hafıza özelliklerini belirlemek istemiştir. PLA/TPU biyouyumlu olduğu ve toksik etki oluşturmadığını gözlemlemiştir. TPU oranının artması biyobozunurluğu azaltmıştır. Çalışmada üretilen PLA/TPU filament karışımlarının, 50°C ve 60°C’de şekil hafıza özelliği gösterdiği döngüsel (dinamik) ve statik şekil hafıza testleri ile gözlemlemiştir. Uyumlaştırılmış ve uyumlaştırılmamış bütün filament karışımları %80 nin üstünde PLA bileşimindeki oranın artması sonucu şekil geri kazanım oranının artışı göz önünde bulundurularak şekil geri kazanımı sergilediğini gözlemlemiştir [11].

Erel yaptığı çalışmada; PLA filament matrisli nanokompozit yapının üretilmesiyle ve üretilen yeni PLA filament matrisli nano takviyeli kompozit numunelerinin karakterizasyon ve mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışma tamamına bakıldığında birinci aşamada enjeksiyon yöntemi uygulanmış ve numunenin elde edilmesiyle olumsuz sonuç almıştır. Bu olayın sonucunda parçacık uzaklaştırma ve çözücü döküm uygulamasını denemiştir. SEM görüntülerindeki gözenek ve oluşan apatitlerin boyutlarındaki analizleri sonucunda apatit oluşumunun ve ağırlıktaki artışın en yüksek PLA/HA (polilaktik asit/ hidroksiapatit) numunelerinde, apatit oluşumunun ve ağırlıktaki artışın en düşük olduğu PLA numunelerinde rastlamıştır. Çalışmanın sonucunda en düşük basma dayanımı PLA numunesinde olduğunu gözlemlemiştir [25].

Ercan yaptığı çalışmada; 3B eklemeli üretim ile üretilen periyodik hücresel yapıya sahip; dikey bal peteği, yatay bal peteği, dikey truss, yatay truss, gyroid, iskelet ve kübik birim hücre şekilli PLA ve karbon fiber takviyeli PLA’nın kafes yapılarının basma ve eğme mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Numunelerin bağıntılı özkütle verilerinin, birim hücre boyutları değiştirilmez ama birim hücre kalınlıkları değiştirilerek %20, %40, %60 olacak biçimde oluşturulmuştur. Gerilme verileri, özkütlenin artışıyla, farklı birim hücre biçimleri için farklı oranlarda arttığını gözlemlemiştir. En yüksek basma dayanımını dikey bal peteği, kübik ve dikey truss birim hücrelerde olduğunu, en düşük basma dayanımının yatay bal peteği ve yatay truss hücrelerinde olduğunu gözlemlemiştir. Beş ayrı birim hücre için en fazla eğme kuvveti değeri kübik birim hücresindeki numunelerde gözlemlenirken, en az eğme kuvveti değeri ise iskelet birim hücresindeki numunelerde gözlemlemiştir. Ayrıca eğme özelliklerinde ise karbon fiber takviyeli olan parçalarda artma olduğunu gözlemlemiştir [26].

Karabıyık ve Apak yaptıkları çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile farklı parametrelerde üretilen PLA'nın sertlik ölçüm testi ve çekme testi yapılarak ürünlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek direnç değeri sergileyen numuneleri; yaklaşık 50,9 N/mm² sonucu ile doluluk oranı %100, üretim hızı 140 mm/sn olan çizgi dolgu modelidir. Buna karşın en az direnç gösteren numuneler ise yaklaşık 25,5 N/mm² sonucu ile doluluk oranı %20, üretim hızı 20 mm/sn olan çizgi dolgu modelidir. Buna göre doluluk oranı arttıkça çekme mukavemeti artmıştır fakat dolgu desenini ve üretim hızının çekme mukavemetine bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. En fazla sertlik değerine ait numune 19,53 VSD (Vickers Sertlik Deneyi) sonucu ile doluluk oranı %100, üretim hızı 20 mm/sn olan orta merkezli dolgu modelli numunedir. Sertlik verileri en az olan numune 16,97 VSD sonucu ile doluluk oranı %20, ile üretim hızı 60 mm/s olan çizgi dolgu modeli olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Buna göre dolgu oranındaki artış ve üretim hızındaki azalma sertliğin artışına neden olmuştur. Aynı şekilde dolgu deseninin sertliğe bir etkisinin olmadığını sonucuna varmışlardır [19].

Hira yaptığı çalışmada; 3B yazıcı ile üretilen PLA'nın imalat parametrelerinin optimizasyonunu araştırmıştır. Simülasyonlar ve deneysel çalışmalar besleme hızları ve nozul sıcaklıklarında gerçekleştirmiştir. Nozul sıcaklığının artmasıyla PLA numunelerinde şerit genişliğinde artışa sebep olduğunu gözlemlemiştir. Çalışmasını iki aşamada tamamlamıştır. Birincisinde, beş farklı besleme hızı ve üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirdiği deneysel çalışmaların sonunda PLA numuneleri için sapma miktarı yazma yönü boyunca sıcaklık ile doğru orantılı olarak arttığını ve besleme hızı arttıkça şerit genişliğinde düşüş gözlemlemiştir. Ayrıca PLA'nın sıcaklığında artış oldukça polimer çapında da artış olması nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha düşük çapta bir nozulun kullanılmasının daha doğru olacağını gözlemlemiştir. İkincisinde ise; çıkış kanalı yüksekliği ve çıkış kanalı çapı parametrelerini optimize etmiştir. Sonuçlara göre çeşitli şartlar altındaki optimum imalat parametrelerini belirlemiş ve bütün yerel minimum noktaları eş eğrilerle iyi bir uyum sağlamıştır. PLA için artan sıcaklığın polimer çapında artışa sebep olduğunu ve artan besleme hızı ile de PLA'nın çaplarında düşüşe neden olduğunu gözlemlemiştir [27].

İsa yaptığı çalışmada; PLA kompozitlerin üretilmesinde kullanılabilecek Maleik Anhidrit (C₂H₂(CO)₂O) ile grafit edilmiş PLA geliştirmiş ve kompozit malzeme uygulamasını araştırmıştır. Üretilen PLA kompozitlerin fiziksel (kalınlık artımı, su alma ve yüzey sertliği) özelliklerine, mekanik (çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci, eğilme elastikiyet modülü, eğilme direnci ve darbe direnci) özelliklerine, termal Termo Gravimetrik Analiz (TGA), Diferansiyel Kalorimetri (DSC) testlerine, Fourier Dönüşümlü Spektroskopi (FTIR)

analiz sonuçlarına ve SEM analiz sonuçlarına bakmıştır. Elde edilen sonuçlara göre inorganik ve organik maddeler kullanılarak geliştirilmiş PLA'nın eğilme direnci, çekme direnci ve sertliğin arttığını gözlemlemiştir. Sertlikte meydana gelen artışta mekanik ve fiziksel özelliğinin arttığını gözlemlemiştir. SEM görüntülerinde dokuların kaynaşmış olduğunu saptamıştır. Petrokimya temelli polimerlerin kullanımı çevre ve insan sağlığı için tehlikelidir. PLA gibi biyolojik olarak bozunabilen polimerler, bu polimerlerin yerine seçilmesi gerektiğini düşündüğünü belirtmiştir [28].

Koç yaptığı çalışmada; hatalı üretimler sonrası üretilen PLA'nın geri dönüşümüyle tekrar 3B baskı ile üretilen parçanın mekanik özelliklerini incelemiştir. Doluluk oranları %30, %50 ve %70 olan çizgi kafes bal peteği olarak belirlemiştir. Çekme testi sonucunda %70'lik doluluk oranındaki PLA'nın çekme kafes yapısının olduğuna, en düşük değer ise doluluk oranı %30 olan bal peteği yapısının olduğuna varmıştır. Eğme gerilmesi sonucunda PLA filamentinde, hesaplanan dayanım verilerine istinaden %70 doluluktaki numunenin en büyük, %30 doluluktaki numunenin en küçük değer olduğu bulunmuştur. Re-PLA ile yapılan darbe, üç nokta eğme dayanım ve çekme verilerinden de gözlemlendiği gibi mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı gibi PLA filamentinin biraz altında kalmıştır. Geri dönüşüm yapılarak elde edilen Re-PLA filamentinin üretimi sonrası mekanik özelliklerinin PLA filamentiyile üretilen numunelere kıyasla daha düşük olduğunu görmüştür. SEM analizinde tüm numunelerin çekme testi esnasında filamentin koptuğu noktada farklı ölçülerde özellikle Re-PLA filamentinin bazı boşluklar ve düzensizlikler gösterdiği testler sonucunda iki parçaya ayrılan kısımlardan saptamıştır. Bunun nedenini geri dönüşüm işleminin sonucunda termal bozunmanın etkisiyle polimer malzemenin yüzeyinde kırılmalar oluşmasını sebep olarak görmüştür [3].

Özer yaptığı çalışmada; PLA filamentlerin fiziksel ve mekanik özellikleri inceleyip, yorumlamıştır. Bu çalışmada PLA filamentlerinin on ayrı ticari markaya sahip numunelerinin kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla üç boyutlu yazıcı ile ördürtmüştür. Daha sonra ördürülen numuneleri analiz etmiştir. Numunelerin yazdırılması, kullanılan hammadde ve kimyasal içeriğinin mekanik özelliklere gösterdiği değişim için üç nokta, çekme, çentik darbe, XRD ve sertlik ölçüm testlerini yapmıştır. Veriler sonucunda; kullanılan hammaddenin türü, katkı malzemesi boyutu, miktarı ve kalitesine orantılı şekilde mekanik özellikleri değişime uğramıştır. Ayrıyetten kimyasal içerikten tamamen ayrı bir biçimde ördürme ve üretim şekillerinin mekanik testinin sonuçlarına gösterdiği değişim olduğunu gözlemlemiştir. Üretim esnasında gıda ile temas edildiğinde veya solunma durumunda

çağımızın büyük problemlerinden bir tanesi olan mikro plastik, doğa ile temas ettiği durumda ne şekilde çevre ve sağlık sorununa sebep olabileceği kısa ya da uzun sürede öngörülememektedir. Bütün veriler eşliğinde bu olayla ilgili kalite yönetim şekli ve standardının gelişmesinin gerektiğini düşünmektedir [12].

Uzunoglu yaptığı çalışmada emülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle metilmetakrilat (MMA) monomerinden elde edilen polimetil metakrilat (PMMA) polimeri ve farklı oranlarda kütlece %5 ve %10 inorganik katkı maddeleri kullanılarak PMMA/Bentonit ve PMMA/HNT (polimetil metakrilat/halloysit nanotüp) nanokompozitleri yerinde ve çözeltide harmanlama yöntemleriyle sentezlemiştir. Son aşamada sentezlenen polimer ve nanokompozitlerin karakterizasyon analizleri yapılarak bu malzemelere ait mekanik, yüzey ve termal özellikler incelemiştir. Polimer ve nanokompozitlere ait yüzde monomer dönüşüm oranları ve viskozite ortalama molekül ağırlıkları hesaplamıştır. SEM analizleri incelendiğinde, in-situ sentez şekliyle elde edilen nanokompozit malzemelerin çözeltide harmanlama sentez şekliyle oluşturulan nanokompozit malzemelere istinaden daha net görüntüler verdikleri görmüştür. Elde ettiği veriler doğrultusunda inorganik kil katkısı hem mekanik ve ısı dayanıma olan etkisi hem de biyobozunmayı hızlandırıcı etkisi ile petrol bazlı polimer kullanım miktarını azaltarak ve biyobozunur hale getirdiği ürünün doğada kısa sürede yok olmasını sağlayarak daha çevreci ürün oluşturulması amacına ulaşmıştır [29].

Özbay yaptığı çalışmada; doğal kauçuk (DK) değiştirilerek PLA ile homojen harmanların elde edilmesi amaçlanmış, böylelikle mekanik özelliklerde artış olmasını hedeflemiştir. Homojen yapıda bir harman oluşturmak için DK ilk olarak epoksilenmiş, daha sonra epoksi grupları asetillendirilip yapıya ester grupları kazandırılmış, böylece ester yapısındaki PLA filamentiyle uyumlu olmasını sağlamayı hedeflemiştir. DSC (Diferansiyel taramalı kalorimetre) analizlerinden harmanlar içinde %17,49 değerli %25 ADK (asetilenmiş doğal kauçuk) bulunduran harmanda en fazla kristalinite niceliğini hesaplamıştır. Çekme testi esnasında heterojen kısımlarının aynı anda dağılmasından ötürü gerilim- gerinim eğrilerinde dalgalanmalar meydana geldiğini gözlemlemiştir. SEM analizi değerlendirildiğinde PLA/DK harmanlarının heterojen bir şekillen, PLA/EDK (polilaktik asit/ epoksilenmiş doğal kauçuk) harmanlarında homojen bir yapıya sahip oldukları gözlemlemiştir. Harmanlara yapılan mekanik testler DK (doğal kauçuk) ve EDK (epoksilenmiş doğal kauçuk) harmanlarında PLA filamentinde artmanın olması kopma uzama verilerinin düştüğü fakat kopma mukavemeti verilerinin yükseldiği gözlemlenirken, ADK içeren harmanlarda tamamen zıt bir şekilde

meydana geldiği, PLA filament oranının artması ile kopma uzama verilerinde azalma gözlemlenmiştir [1].

Aydın yaptığı çalışmada en fazla kullanılan biyobozunur niteliğe sahip polimer olan poli (D, L-laktik asit) (PLA)' ya biyobozunur niteliğini değiştirmeden antibakteriyel özellik yükleyebilmek hedefiyle, Türkiye'de fazlaca yetişen *Laurus Nobilis L.*(defne) yapraklarından üretilen ZnO nanoparçacıkları (ZnO-NPs) karıştırılarak kompozit filmler hazırlamıştır. Üretilen PLA kompozit filmlerin su absorplama kapasiteleri incelendirildiğinde PLA filmin (1. Grup) su absorplamadığı, %33 ZnO-NPs katkılanmış PLA film'in (3. Grup) %3,86 ile en çok su absorplayan grup olduğunu gözlemlenmiştir. Biyobozunur bir polimer olan PLA'ya, sentezlenen ZnO-NPs ve ZnO+Ag-NPs'lerin katkılanması PLA'nın biyobozunurluğuna etki etmediğini NPs'ler eklenerek sentezlenen PLA kompozit filmlerin biyobozunur olduğunu DSC analiz sonuçları, TGA (termogravimetrik analiz) analiz ve yapılan antibakteriyel analiz sonuçları ile saptamıştır. PLA kompozit filmlerin biyobozunur olduğunu uygulanan antibakteriyel test verileri sonucunda çevresel yönden atık problemleri ortaya çıkarmayan antibakteriyel polimer üretiminin olumlu sonuçlandığını gözlemlenmiştir [30].

Şahin yaptığı çalışmada; 3 boyutlu (3B) yazıcılarda kullanımı her geçen gün yaygınlaşan polilaktik asit (PLA) filamentleri ve kompozitlerin baskı ile mekanik niteliklerini değiştiren birkaç çevresel etkileri incelemiştir. Çevresel etkiler, %80 bağıl nem ve 25°C sıcaklıktaki sulu alan belirlemiştir. Filamentlerin tamamı 5., 10., 15. ve 20. günlerde belirlenen alanda bekletilmenin sonucunda standart kemik numuneleri basımı için filamentler kullanılmıştır. Basılan numunelere ve filamentlere çekme analiz testleri, kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri analizleri, numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülükleri ve fourier dönüşümlü kızıl ötesi spektrometresi (FTIR) testlerini yapmıştır. Uygulanan test analizleri değerlendirilmesiyle çevre etkilerine uğramış PLA/Grafit kompozit ve PLA filamentlerinden elde edilen 3B üretimlerde çekme dayanımları ve baskı kalitelerinde azalma gözlemlenmiştir. Nem bulunan ortamda kalan polilaktik asit / polihidroksibütirat (PLA/PHB) kompozit filamentinde ise çekme dayanımı ve baskı kalitesinde artma olduğunu gözlemlenmiştir [4].

Tatlı ve Özgül yaptıkları çalışmada; FDM teknolojisi ile üretilen 3 boyutlu yazıcı tasarımı ile üretilen 2 değişik iç dolgu geometri şekline sahip PLA filament test numunelerinin darbe, çekme ve üç nokta eğilme testi uygulayarak iç dolgu geometri şeklinin mekanik özelliklere gösterdiği tepkiyi incelemişler. Eğilme deney sonuçlarına ilişkin kesit şeklindeki değişimin, eğilme kuvveti değerinin oranında fazla artış gözlemlenmemişlerdir. Giroid geometrik kesit modeliyle sağlanan veriler, ızgara geometrik kesit modeli verilerine kıyasla % 0,74 artma

gözlenmişlerdir. Fakat; çekme deneyi değerlerine kıyaslandığında kesit şeklinin değişmesinin daha verimli sonuçlar verdiğini ve ızgara geometrik kesit modeliyle sağlanan veriler, giroid geometrik kesit modeli verilerine kıyasla % 8,3 artma gösterdiğini saptamışlardır. Çentik darbe enerjisi verilerine ilişkin kırılma enerjisi %11,4 lük artma ile giroid geometrik kesit modeli olduğunu gözlemlemişlerdir.. Tüm değerleri incelediklerinde; deneysel çalışmada kullanılan dolgu geometri modelindeki farklılık, çekme kuvveti verilerini net bir biçimde değiştirirken, çentik darbe enerjisi ve eğilme kuvveti verilerinde etkisinin olmadığı yanıtına varmışlardır [31].

Li ve diğ.; yaptıkları çalışmada; sıcak buhar düzleştirme işlemi ile FDM kullanılarak PLA parçalarının yüzey kalitesini değerlendirmişlerdir. Testler; sıcaklık, süre ve sıcak buhar düzleşme çözeltisinin konsantrasyon parametrelerini değiştirerek 3 adet analiz elde etmişlerdir. Sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü için; kimyasal işleme ile etkin bir şekilde yüzey pürüzlülüğünün azaltılabildiğini, etkililik sırasının sıcaklık-konsantrasyon-süre şeklinde olduğunu ve sıcaklığın yüzey pürüzlülüğüne yüksek oranda etki ettiğini gözlemlemişlerdir [32].

Mat ve diğ.; yaptıkları çalışmada; metal bakır malzemeleri, PLA ve PTEG kullanarak 3B yazıcının dolgu tasarımı ve tabaka kalınlığı gibi yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Metalin Ra değerinin her iki termoplastik poliestere göre daha yüksek olduğunu ve durumun da açık kaynaklı yazının bakır malzemin PLA ve PTEG'ye kıyasla daha kötü yüzey pürüzlülüğü ürettiğini gözlemlemişlerdir. 0,1mm tabaka kalınlığı 0,2 mm tabaka kalınlığı ve 0,3 mm tabaka kalınlığı ile %30, %40 ve %50 dolgu tasarımı değiştirilmiş malzemelerin ölçümleri sonucunda; %40 tabaka kalınlığında yüzey pürüzlülüğünde artış oluşmuştur. Ancak %30 ve %50 de oluşan pürüzlük aynı olduğu için yüzey pürüzlülüğüne tabaka kalınlığının bir önemi olmadığına olduğunu gözlemlemişlerdir [33].

Mihai ve diğ.; yaptıkları çalışmada; polietilen glikol, polivinil alkol ve vinil poliklorür polimerlerinin biyoyumluluk testlerini yapmışlardır. İn vitro testler, dengelenmiş bir fibroblast kültüründe gerçekleştirmişlerdir ve araştırılan polimerlerin temas halinde olan hücrelerin morfolojisini ve canlılığını değerlendirmişlerdir. Hücre canlılıklarını %80-85 arası bulmuşlardır. Üç polimerin biyoyumluluk derecelerinin farklı olduğunu gözlemlemişlerdir [34].

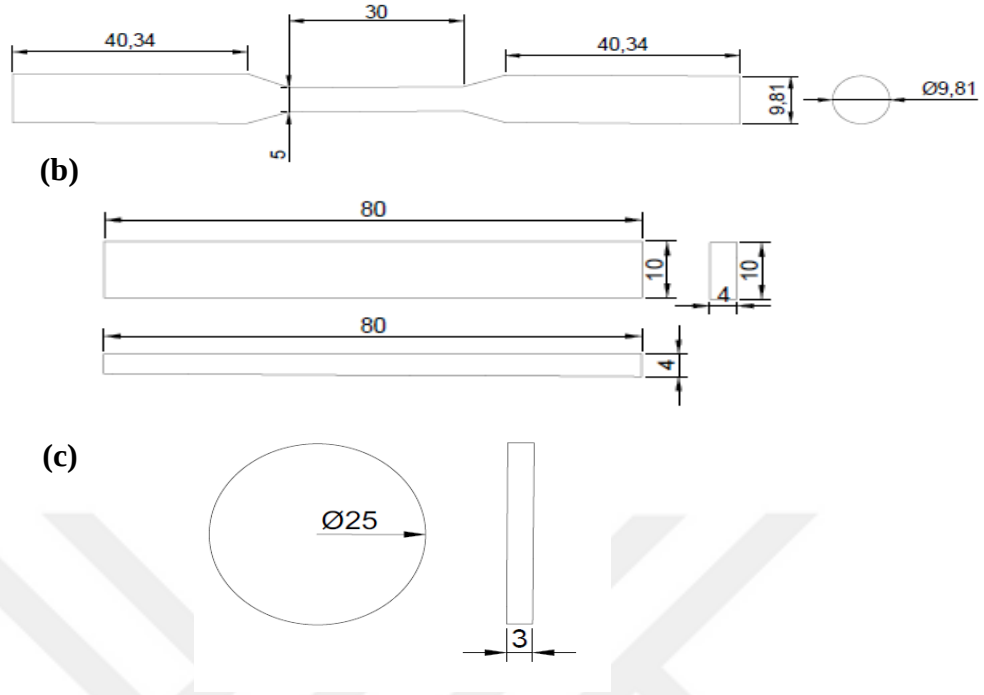
3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında üretilen test numunelerinin ölçü bilgileri, tasarımları, kullanılan programlar, üretimin gerçekleştiği makineler hakkında ayrıntılı bilgiler bu bölümde sunulmuştur. Üretilen parçaların karakterizasyon çalışmalarının detayları da bu bölümde verilmiştir.

3.1 Kullanılan Malzeme ve 3B Yazıcı Özellikleri

Bu tez çalışmasında, PLA numunelerinin üretilmesinde, malzeme olarak PLA kullanılmış olup “ELAS 3B” markasının “PLA PLUS” filamenti tercih edilmiştir. Re-PLA numunelerinde ise; ELAS 3B markasının PLA PLUS filamentinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen filament kullanılmıştır. Şekil 3.1 (a), (b) ve (c)’de sırayla gösterilen; çekme, üç nokta eğme ve biyoaktivite-salım numunelerinin şekilleri ve boyutları gösterilmiştir. Yüzey pürüzlüğü deneyi için ise daha önce deneye maruz kalmış üç nokta eğme ve çekme numuneleri kullanılmıştır.

Geri dönüşüm işleminde, PLA 3B baskı atıkları endüstriyel şartlar altında 85 °C sıcaklık (%1 NaOH ve %3 aktif yüzey çözücü) maddeler kullanılarak temizleme işlemi yapılmıştır. Yıkma işlemi sonrası malzemeler vakum ile kurutulmuştur. Geri dönüştürülmüş filament üretimi 60 rpm dönüş hızında L/D oranı 20 olan Rondol Microlab çift vidalı ekstrüderde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin çizimi AutoCAD ile çizilmiş olup Stl uzantılı dosyalar şeklinde kaydetme işlemi yapılmıştır. Stl uzantılı dosyalar Ultimaker Cura programında açılıp nesnelerin üç boyutlu yazıcı kullanarak üretimin oluşması için gerekli destekler yapılmıştır. Deney numunelerinin üretiminde CREALITY markla ve CR6SE modelli üç boyutlu yazıcı kullanılmıştır.



Şekil 3.1: (a) Çekme, (b) üç nokta eğme ve (c) biyoaktivite – salım numunelerinin şekilleri ve ölçüleri.

Şekil 3.2’de üretimde kullanılan 3B yazıcı gösterilmiştir. PLA için üretim gerçekleştirilen üç boyutlu yazıcı parametreleri Tablo 3.1’de sunulmuştur. Deney numuneleri için üretim süresi Ultimaker Cura programı ile hesaplanarak Tablo 3.2’de çekme, üç nokta eğme, biyoaktivite ve salım numunelerinin üretim süreleri verilmiştir. Tablo 3.3’de filamentin özellikleri gösterilmiştir. Şekil 3.3’de üretimde kullanımı olan PLA PLUS filamentin görseli verilmiştir.



Şekil 3.2: Creality marklı ve CR 6 SE modeli üç boyutlu yazıcı.

Tablo 3.1: PLA üretiminin temel parametreleri.

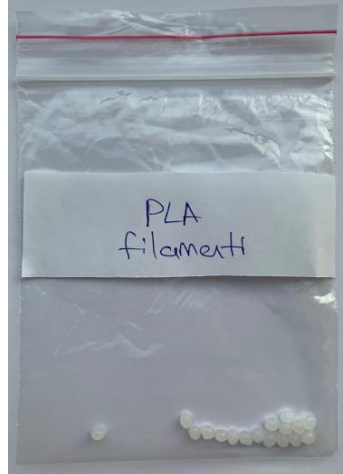
Parametre Türü	Belirtilen Parametre
Katman kalınlığı, mm	0,2
İç dolgu deseni	Izgara
İç dolgu yüzdesi, %	20
Destek çerçevesi tur sayısı, devir	4
Destek katman sayısı, adet	1
Baskı hızı, m/s	50
Tabla sıcaklığı, °C	60
Ekstrüder sıcaklığı, °C	200
Eteğin parçaya mesafesi, mm	10

Tablo 3.2: Çekme, üç nokta eğme, biyoaktivite ve salım numunelerinin üretim süreleri.

Numune Çeşitleri	Üretim Özellikleri	XYZ	YXZ	XZY	YZX	ZXY	ZYX
Üretim Süresi (dak)	Çekme Numunesi	80	80	80	80	110	110
	Üç Nokta eğme Numunesi	49	49	57	57	72	72
	Biyo deney ve Numunesi	27	27	21	21	27	27

Tablo 3.3: Kullanılan PLA'nın özellikleri.

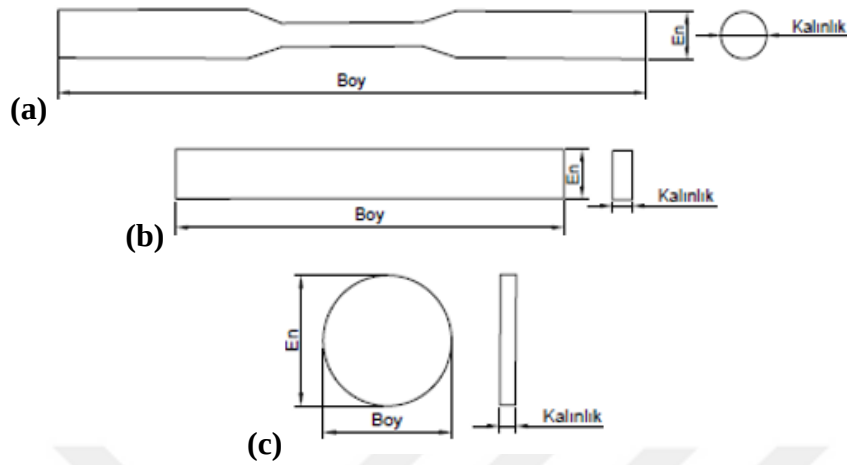
Yoğunluk (g/cm ³)	1,25
Uygun yatak sıcaklığı aralığı (°C)	60
Filement çapı (mm)	1,75
Uygun baskı sıcaklığı aralığı (°C)	200

**Şekil 3.3:** Polilaktik asit ELAS 3B markalı PLA PLUS filamenti.

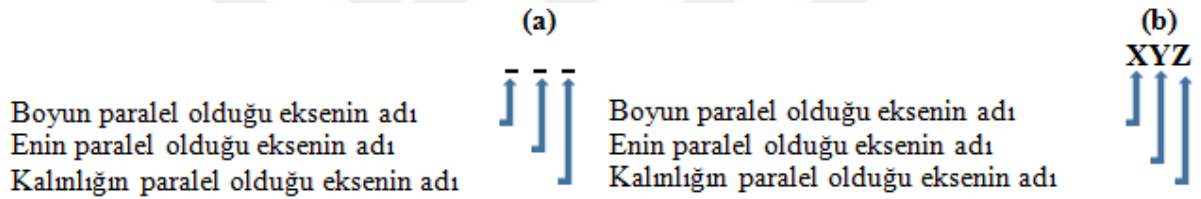
3.2 İş Parçasının Üretimi

Bu çalışmada numunelerin konumları tablaya 6 değişik şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin adlandırılması yapılırken; ilk harf uzun kenarın paralel olduğu eksen adıdır, ikinci harf orta uzunluktaki kenarın paralel olduğu eksenin adıdır, son harf ise kısa kenarın paralel olduğu eksenin adı olacak biçimde oluşturulmuştur. Şekil 3.1 (a), (b) ve (c)'de ölçü özellikleri

bulunan boyutların nasıl adlandırıldığı Şekil 3.4 ve bu boyutlar üstündeki adlandırma biçimi Şekil 3.5'te şematik biçimde sunulmuştur.



Şekil 3.4: Numunelerin boyutlarının adlandırılması (a) çekme numunesi için en, boy ve kalınlık (b) üç nokta eğme numunesi için en, boy ve kalınlık ve (c) biyoaktivite numunesi için en, boy ve kalınlık.



Şekil 3.5: Numunelerin adlandırılması (a) sistematığı ve (b) örneği.

Eğme, çekme, antibakteriyel ve biyouyumluluk olmak üzere tüm deneysel çalışmalar için test standartlarına uygun numunelerin tablaya 6 değişik şekilde koyulmalarına göre XYZ, YXZ, XZY, YZX, ZXY ve ZYX kodlu numunelerin üretimi yapılmıştır. Yüzey pürüzlüğü deneyi için ise daha önce deneye maruz kalmış üç nokta eğme ve çekme numuneleri üzerinden yapılmıştır.

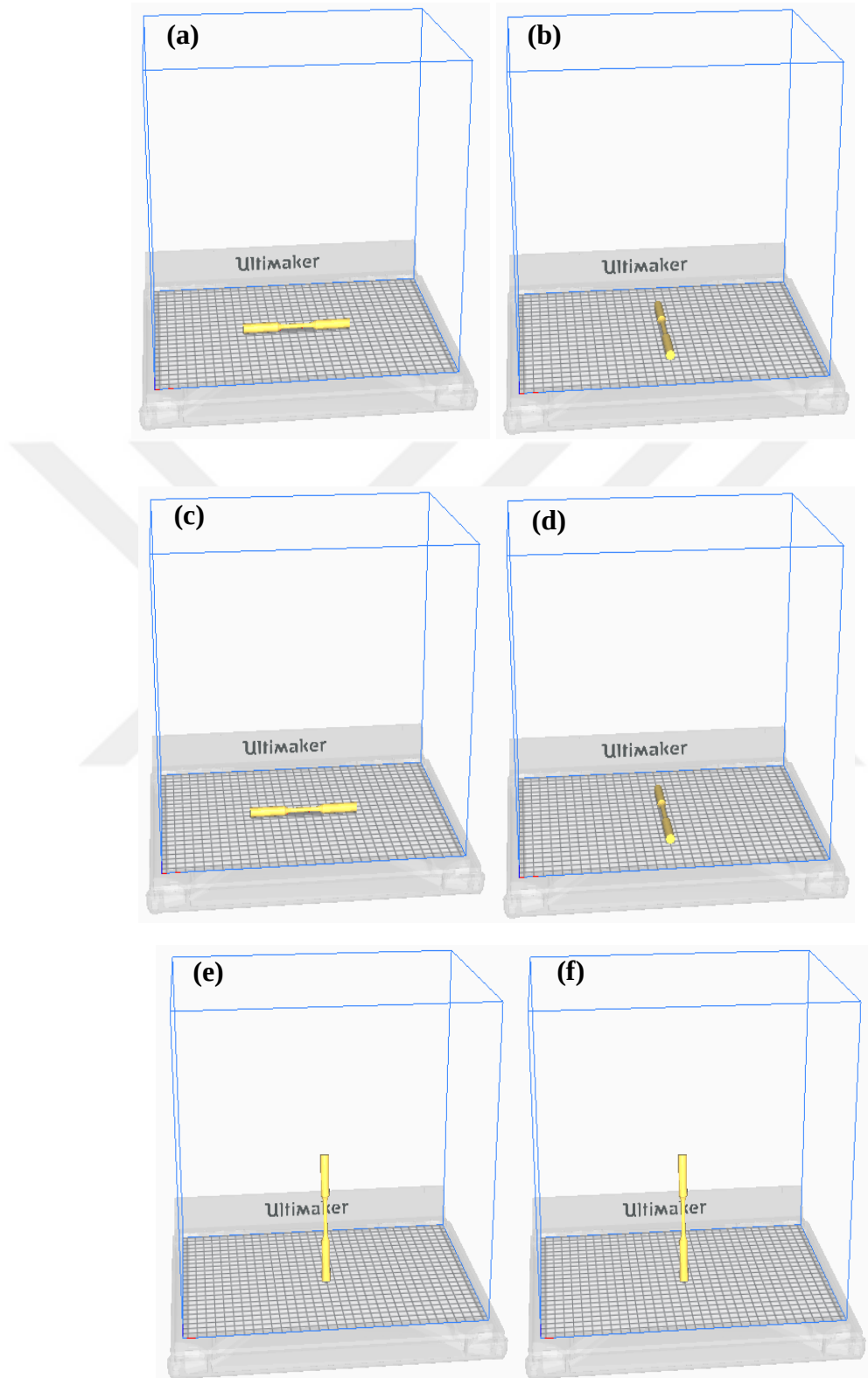
3.3 Karakterizasyon Çalışmaları

Bu tez çalışmasında, PLA ve Re-PLA filamentlerinin kullanılmasıyla tablaya 6 farklı yönde konumlandırılarak üretim gerçekleştirilmiş olup testler yapılmıştır. Bu amaçla çekme, üç nokta eğme testleri, yüzey pürüzlülük ölçümleri, kırılan yüzeylerin kırılma mekanizmaları, antibakteriyel, biyouyumluluk ve salım çalışması yapılmıştır. Çalışmada kullanılan ve işlenen yüzeyleri karakterizasyon çalışmalarının detayları aşağıda verilmektedir.

3.3.1 Çekme Testi

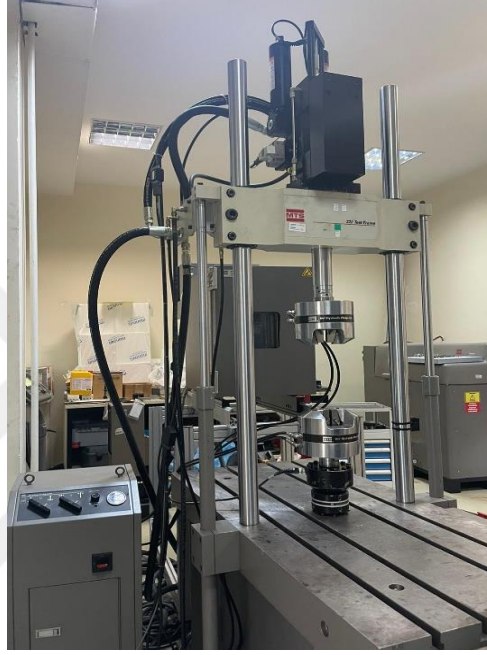
Üç boyutlu yazıcıda çekme numuneleri üretiminin sağlanabilmesi için üretim yönlerindeki baskılarında destekler kullanılmıştır. XZY, YZX, ZXY ve ZYX çekme numunelerinde destek

sağlanması zorunlu olmuştur. Çekme numuneleri için tablaya konumlandırmalarına (üretim yönlerine) göre görselleri ve adlandırmaları, Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Çekme numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.

Çekme deneyinin uygulanmasında, çekme hızı 2 mm/dak ve ortam sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir. PLA numunesi için 1 adet ve Re-PLA numunesi için 3 adet ölçüm yapılmış olup ortalama değer belirlenmiştir. Çekme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi-Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesindeki MTS marklı 322 test frame modeli makine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadaki değerler, “Station Manager” programı yardımıyla görüntülenmiştir. Çekme test deneysel çalışmasında kullanılan MTS marklı 322 test frame modeli çekme cihazı görüntüsü Şekil 3.7’de sunulmuştur.

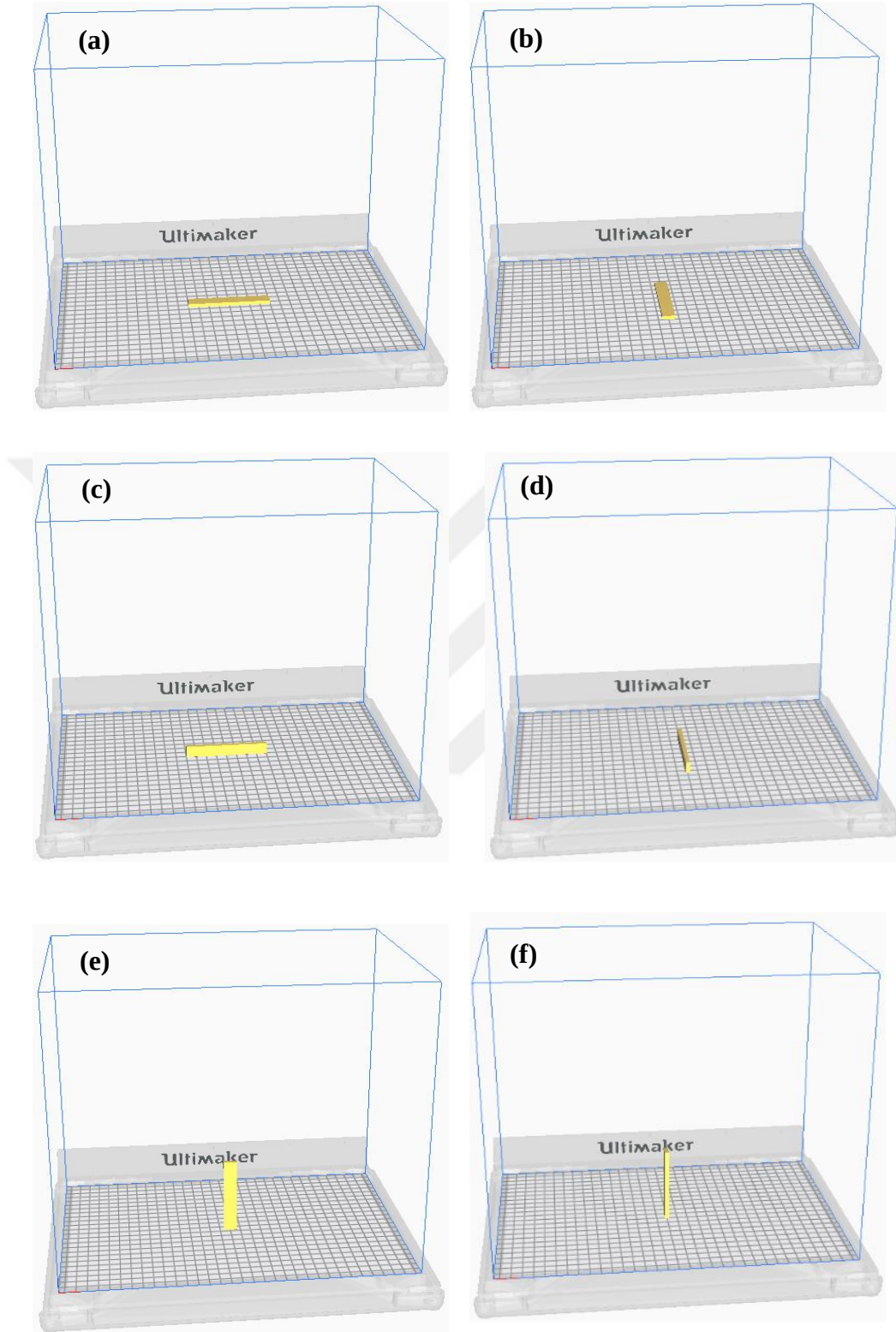


Şekil 3.7: Çekme deneyi cihazı.

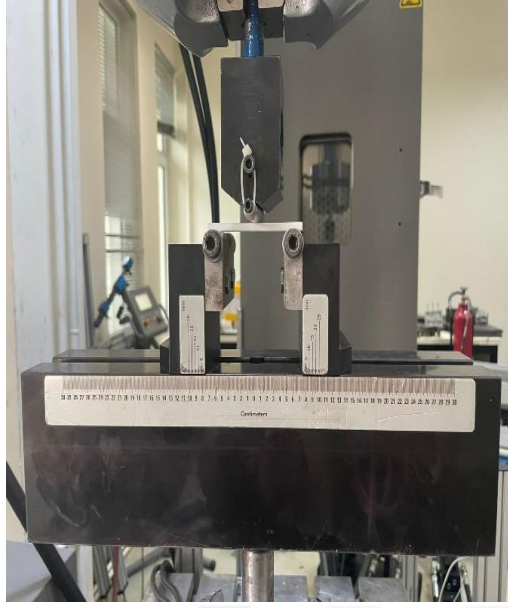
3.3.2 Üç Nokta Eğme Testi

Üç boyutlu yazıcıda, Üç nokta eğme test numunelerinin üretim esnasında tabaya iyi yapışması için desteklere ihtiyaç duyulmamıştır. Eğme test numuneleri için üretim şekillerine göre görselleri ve adlandırılmaları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

Üç nokta eğme uygulamasında, destekler arası mesafe 16 mm, eğme hızı 1,3 mm/dak ve ortam sıcaklığı 25°C olarak belirlenmiştir. PLA numunesi için 1 adet ve Re-PLA numunesi için 3 adet ölçüm yapılmış olup ortalama değer belirlenmiştir. Eğme deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi-Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesindeki MTS marklı 322 test frame modeli makine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadaki değerler, “Station Manager” programı yardımıyla görüntülenmiştir. Eğme test deneysel çalışmasında kullanılan MTS marklı 322 test frame modeli üç nokta eğme cihazı Şekil 3.9 ‘da verilmiştir.



Şekil 3.8: Üç nokta eğme numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.



Şekil 3.9: Üç nokta eğme cihazı.

3.3.3 Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü deneyinde daha önce deneye maruz kalmış üç nokta eğme numuneleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Şekil 3.1 (a) ve (b)'de gösterilen numuneler ile gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin yüzey pürüzlülükleri ile ilgili verilerin bilinebilmesi amacıyla Ra (profilin aritmetik ortalama sapması) değerleri ölçülmüştür.

Ra ölçümler, 22°C ortam sıcaklığında yapılmıştır. Altı farklı yüzeyde basılarak üretilen numunelerin sırasıyla boy, kalınlık, en ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmıştır. Tüm numuneler için üç farklı noktadan hesaplama yapılmıştır ve bunların ortalama değeri alınmıştır. Örneğin XYZ numunesinin boy kısmından üç farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Sonuç olarak; XYZ numunesinden on iki ölçüm yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümün de bulunan Mutituyo marklı SurfTest SJ-210 modeli yüzey pürüzlülüğü cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar “Surface Roughness Tester SJ-210/310/410” programı yardımıyla elde edilmiştir. Tüm ölçümler sonucunda bulunan yüzey pürüzlülük (Ra) değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait özellikler Tablo 3.4’te verilmiştir. Mutituyo marklı SurfTest SJ-210 modeli cihaz ile yapılan ölçüm deney düzeneği Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



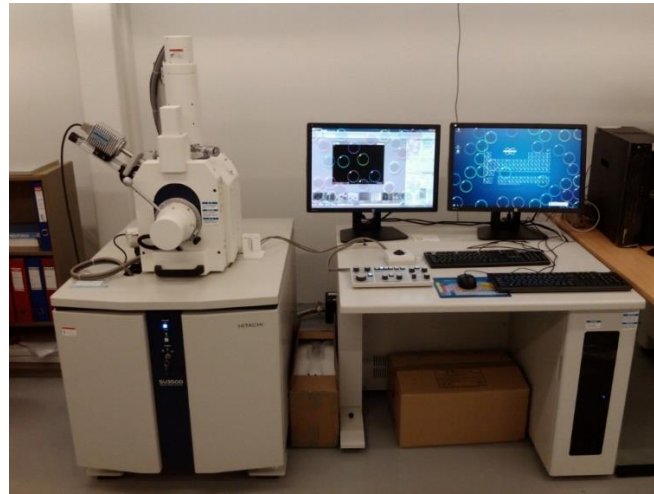
Şekil 3.10: Yüzey pürüzlülük cihazı ve ölçümü.

Tablo 3.4: Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihazın özellikleri.

Model	MitutoyoSurfTest SJ-210
Uç Malzemesi	Elmas
MitutoyoSurfTest SJ-210	0,25, 0,5, 0,75
Değerlendirme Uzunluğu, mm	0,3-16
Ölçme Kuvveti, Mn	0,75
Kesme Uzunluğu (λ_c), mm	0,08, 0,25, 0,8, 2,5

3.3.4 SEM Analizleri

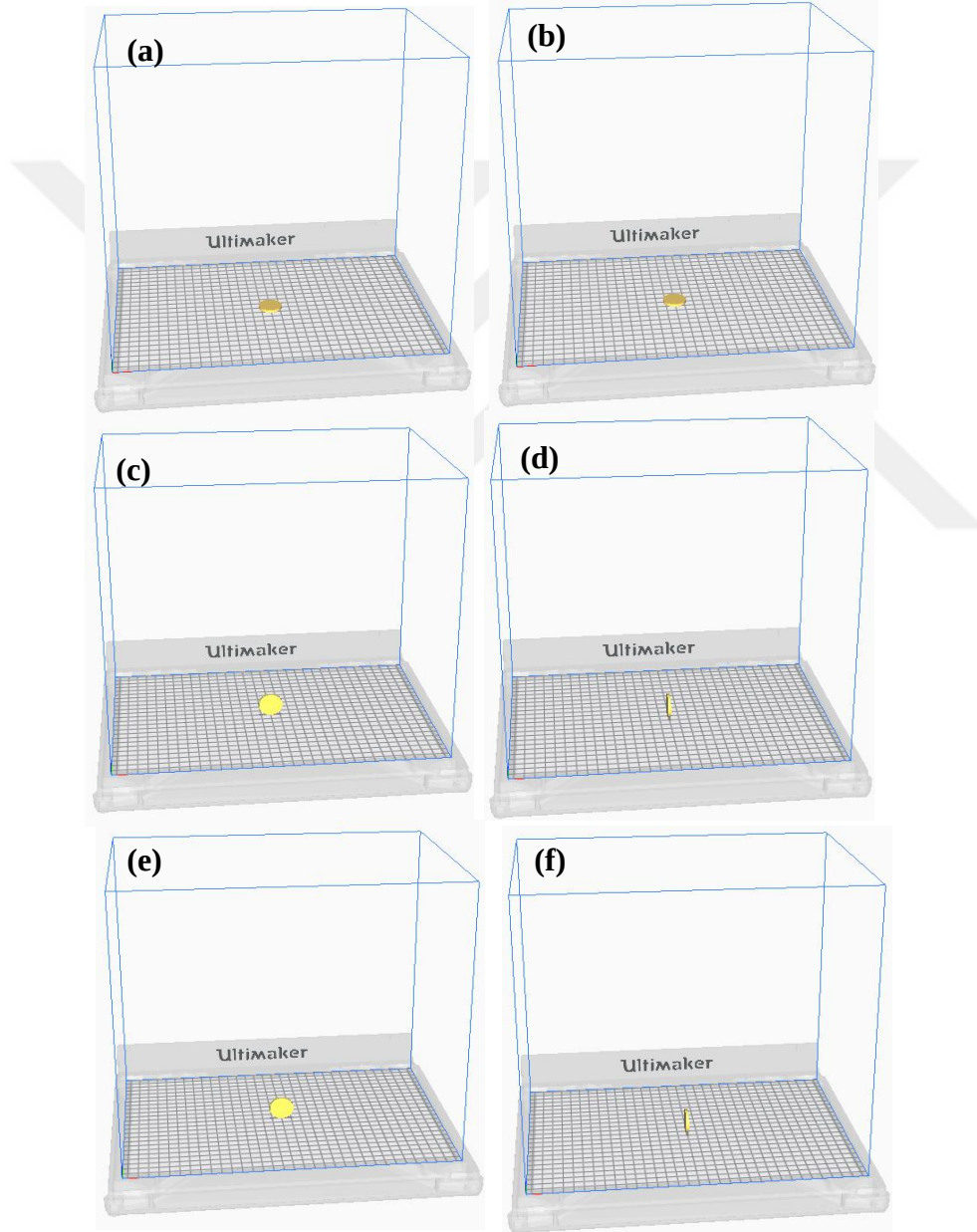
Üretilen PLA ve Re-PLA numunelerin testler sonrası kırılma sebeplerini tespit etmek amaçlı kırılan yüzeyler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. SEM görüntüleme işlemi Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi – İleri Analiz Laboratuvarın da bulunan Hitachi markalı SU3500 Modeli cihaz ile yapılmıştır. Her bir numune için x500, x1000 ve x5000 büyütme ile çekim yapılmıştır. Şekil 3.11’de, Hitachi markalı SU3500 Modeli SEM cihazı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11: SEM cihazı.

3.3.5 Biyoaktivite Testleri

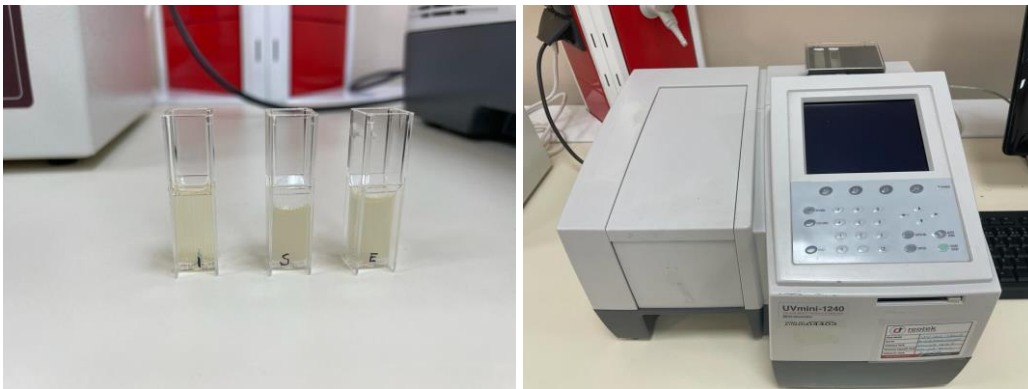
Üretilen PLA ve Re-PLA numunelerinin biyomalzeme olarak kullanılması düşünülmesinden dolayı antibakteriyel ve sitotoksik testler yapılarak vücuttaki ya da implantasyon sırasındaki muhtemel etkisi analiz edilmiştir. Numunelere uygulanan antibakteriyel çalışmalar İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi mikrobiyoloji laboratuvarında sitotoksik çalışmalar ise yaşam bilimleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Biyoaktivite test numuneleri için tablaya konumlandırılmalarına göre görselleri ve adlandırılmaları Şekil 3.12’de sunulmuştur. Biyoaktivite test numuneleri %20, %40 ve %60 doluluk oranları ile üretilmiştir.



Şekil 3.12: Biyoaktivite-salım numunelerinin yönleri ve kodları (a) XYZ numunesi, (b) YXZ numunesi, (c) XZY numunesi, (d) YZX numunesi, (e) ZXY numunesi ve (f) ZYX numunesi.

3.3.5.1 Antibakteriyel testi

Antibakteriyel numune görselleri Şekil 3.1 (c)'de sunulmuştur. Antibakteriyel aktivite deneyleri, *E.coli* ve *S.aures* bakterileri kullanılarak yapılmıştır. *E.coli* ve *S. aureus* bakterilerinin kullanıldığı çalışmalarda kullanılacak olan Mueller-Hinton agar (MHA) 38 gr tartılarak içerisine 1000 mL saf su ekleme işlemi yapılarak manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale getirilmiştir. Otoklav işlemi gerçekleştirildikten sonra steril tek kullanımlık petri kaplarına dökülerek 1 saat katılaşması için bekletilmiştir. Daha sonra 4°C'de saklanmıştır. Çalışmalarda kullanılan diğer besiyeri olan Mueller-Hinton broth (MHB) 21 gr tartılarak içerisine 1000 mL saf su ekleme işlemi yapılarak manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen hale getirildikten sonra 4°C' kullanılabilecek kadar muhafaza edilmiştir. Bakteri stok kültürlerinden bakteri kültürü hazırlanması amacıyla öncelikle *E. coli* ve *S. aureus* bakterilerinin, birkaç iyi izole edilmiş kolonisinin MHB içerisinde 37°C'de ve 180 rpm'de çalkalamalı inkübatörde bir gece süreyle inkübe edilmesi ile bakteri süspansiyonları elde edilmiştir. Süspansiyonlar UV spektrofotometrede ölçülerek, 600 nm'de OD 0,1-0,2 absorbans aralığında olana kadar MHB ile seyreltilerek 10^8 CFU/mL olacak şekilde hazırlanmıştır. Şekil 3.13'te süspansiyonlar ve kullanılan UVmini-1240 markalı UV cihazı gösterilmiştir. Hazırlanan bakteri süspansiyonundan 100 µL MHA petri kaplarına eklenmiş ve alevden geçirilerek steril edilen cam drigalski ile bakteriler petri yüzeyine homojen olarak yayılmıştır. Daha sonrasında petri içlerine numune örnekleri bırakılarak inkübatörde 24 saat 37 °C'de inkübe edilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. Antibakteriyel aktivite deneyleri, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Mikrobiyoloji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13: Süspansiyonlar ve kullanılan UVmini-1240 markalı UV cihazı.

3.3.5.2 Sitotoksikite (MTT) testi

Biyoyumluluk numune görselleri Şekil 3.1 (c)'de gösterilmiştir. Biyoyumluluk testleri MTT (3-4,5-dimetil-tiyazolil-2,5-difeniltetrazolyum bromür) sitotoksikite testi ile L929 fare

fibroblast hücreleri kullanılarak yapılmıştır. %20, %40 ve %60'arlık hem PLA ve hem de Re-PLA numunelerinin sterilize işlemi otoklavda gerçekleştirilmiştir ve sonrasında üstlerine 5 mL FBS'siz DMEM F12 besiyeri koyularak 37°C'de 7 gün inkübe işlemi yapılmıştır. 1., 4., ve 7. günlerde numunelerle besiyerlerinden örnekler alındı ve kullanılabildiği kadar +4°C'de saklanmıştır. Sitotoksikite deneyi için L929 hücreleri 25 cm²'lik flasklara ekim yapılmıştır. Hücreler flaskların %80'ini kapladığında hücre sayımı yapılmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Toplam Hücre Sayısı} &= \text{Ortalama Hücre Sayısı} \times \text{Seyreltme Faktörü} \times 10^4 \quad (4.1) \\ &= 2 \times 50 \times 10000 = 1000000 \text{ Hücre} \end{aligned}$$

Denklem 4.1'e göre hücreler kuyucuk başına 10⁴ hücre olacak şekilde 100 µl hacim ile ekim yapılmıştır. 24 saat inkübasyon işlemi sonrası besiyerinin tamamı çekilerek ve hücreler PBS ile yıkanmıştır. 1., 4. ve 7. gündeki numunelerden çekilerek kuyucuklara 100'er µl ekleme işlemi yapılmıştır. Her bir numune için 5 tekrar çalışılmıştır. Daha sonra 24 saat hücreler tekrar inkübasyona bırakılmıştır. 24 saat sonrası kuyucuklara önceden hazırlanan stoktan 10'ar µl MTT (Sigma M5655) eklenir ve 3 saat karanlıkta inkübe edilmiştir. İnkübe sonrası formazan kristalleri oluşmaktadır ve bunu çözmek için her bir kuyucuğa 100 uL DMSO (Merck) eklenir ve yarım saat bekletilmiştir. Son olarak plate 540 nm dalga boyunda plate okuyucu cihazda (Thermo Scientific MultiScan) okutulmuştur. Elde edilen absorbans değerlerinden canlılık hesaplanmıştır. Denklem 4.2'de verilen denkleme göre hücrelerin canlılığı hesaplanmıştır. Şekil 3.14'te MTT test görüntüleri verilmiştir. Biyouyumluluk deneyleri, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi-Yaşam Bilimleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

$$\% \text{ Canlılık} = \frac{\text{Deney Grubu Absorbansı}}{\text{Kontrol Grubu Absorbansı}} \times 100 \quad (4.2)$$



Şekil 3.14: MTT testinde kullanılan numuneler.

3.3.6 Salım Çalışması

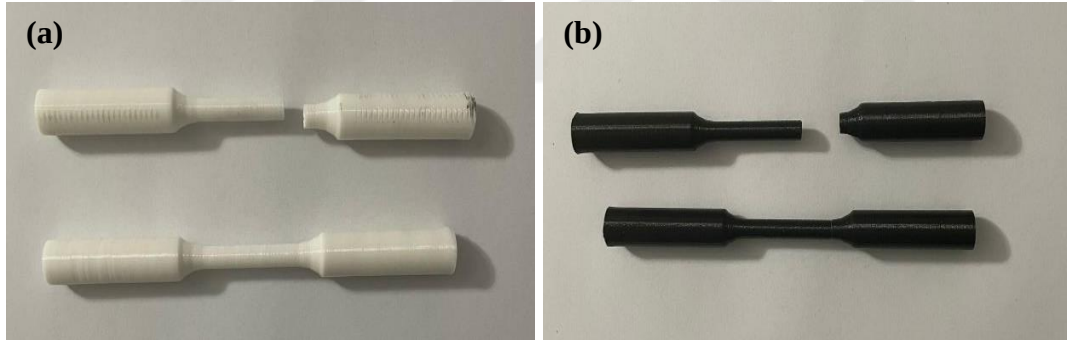
Numuneler %20, %40 ve %60 doluluk oranları ile üretilmiştir. Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi salım çalışmasında gözenek yapısı en yoğun olan %20 PLA, %20 Re-PLA, %40 Re-PLA ve %60 Re-PLA numuneleri kullanılmıştır. Salım deneyleri, İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi-Mikrobiyoloji Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Salım deneylerinde hazırlanan PLA ve Re-PLA polimerlerinin salım özellikleri PBS tamponu içerisinde incelenmiştir. Salım için kullanılan 4 numune de 10 ml’lik PBS tamponu içerisinde, 37°C ‘de ve 60 rpm çalkalama hızında çalkalamalı inkübatöre yerleştirilmiştir. Her bir numuneden 1, 2, 3, 4, 5, 24, 48, 72, 96, 120, 144 ve 168 saat sonra 3 ml örnek alınıp, içerisine yine 3 ml taze PBS çözeltisi koyularak toplam hacim 10 ml olacak şekilde bırakılmıştır. Her bir numuneden alınan 3 ml’lik örneklerden UV spektrofotometre cihazında 200-800 nm aralığında spektrum alınmış ve salım profili incelenmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tıp ve biyomedikal alanda biyomalzeme olarak sıklıkla kullanılan Polilaktik Asit (PLA) ve Re-PLA üzerine yapılan test sonuçları verilmiştir. Deney çalışması sonrasında oluşan sonuçlar ve bu oluşan sonuçların sebep oluşturduğu düşünülen olayların ve sebeplerin incelenip yorumlanmıştır. Değerlendirmeler bütün test sonuçları için ayrı ayrı gerçekleştirilerek raporlandırılmıştır. Bu bölümde çekme, üç nokta eğme, yüzey pürüzlülüğünün, SEM analizleri, biyoaktivite ve salım çalışmalarının sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

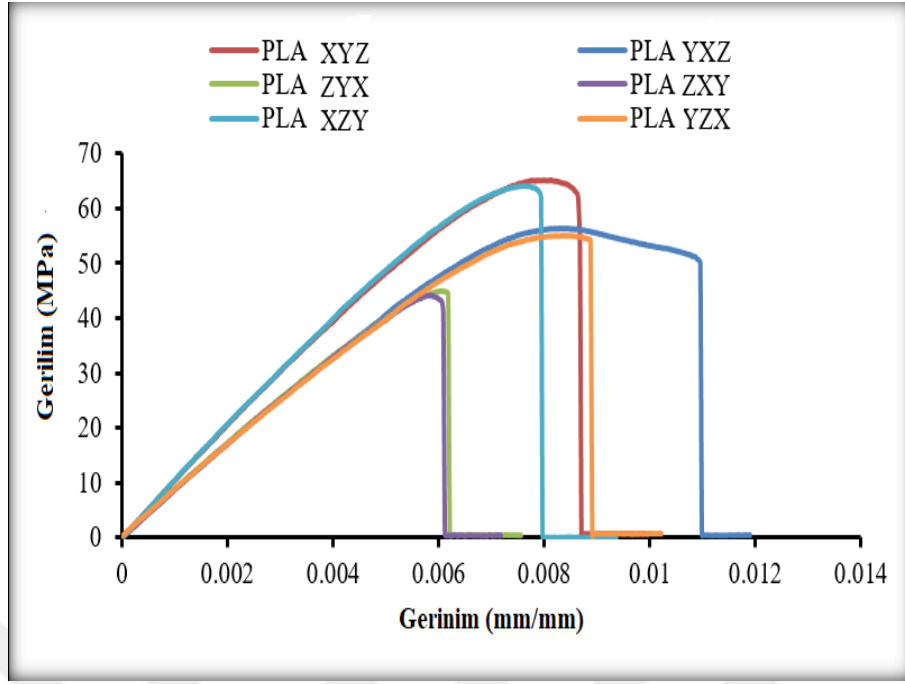
4.1 Çekme Test Sonuçları

Çekme deneyi testi sırasında ölçülen çekme dayanımının en yüksek gerilme değerindeki malzeme kopar kopmaz hesaplanan gerilme kopma gerilmesi; uzama miktarına ise kopma sırasındaki uzama olarak tanımlanmaktadır [35]. Şekil 4.1 (a) ve (b)'de sırayla; çekme testi öncesi ve sonrası PLA numunesi ve çekme testi öncesi ve sonrası Re-PLA numunesi gösterilmiştir.

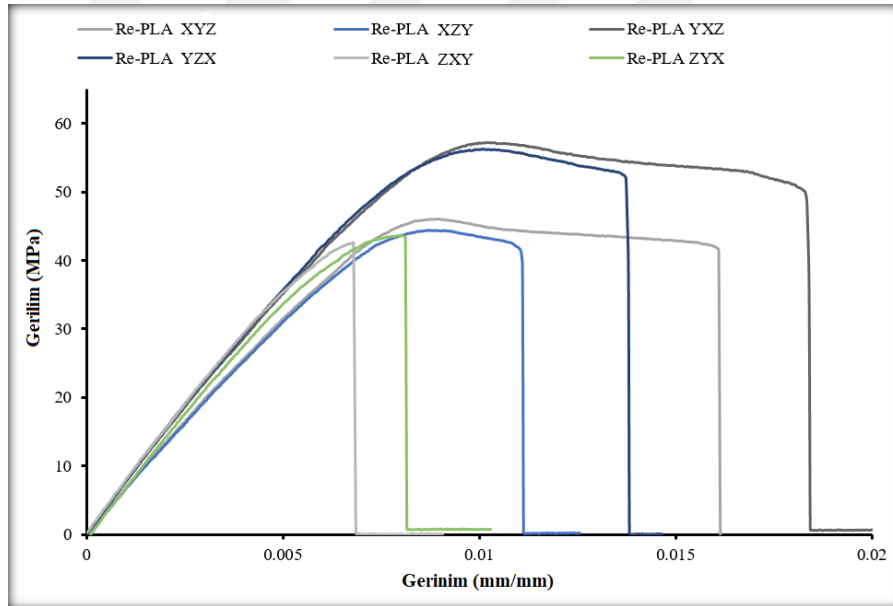


Şekil 4.1: Çekme testi öncesi ve sonrası numuneler (a) PLA ve (b) Re-PLA.

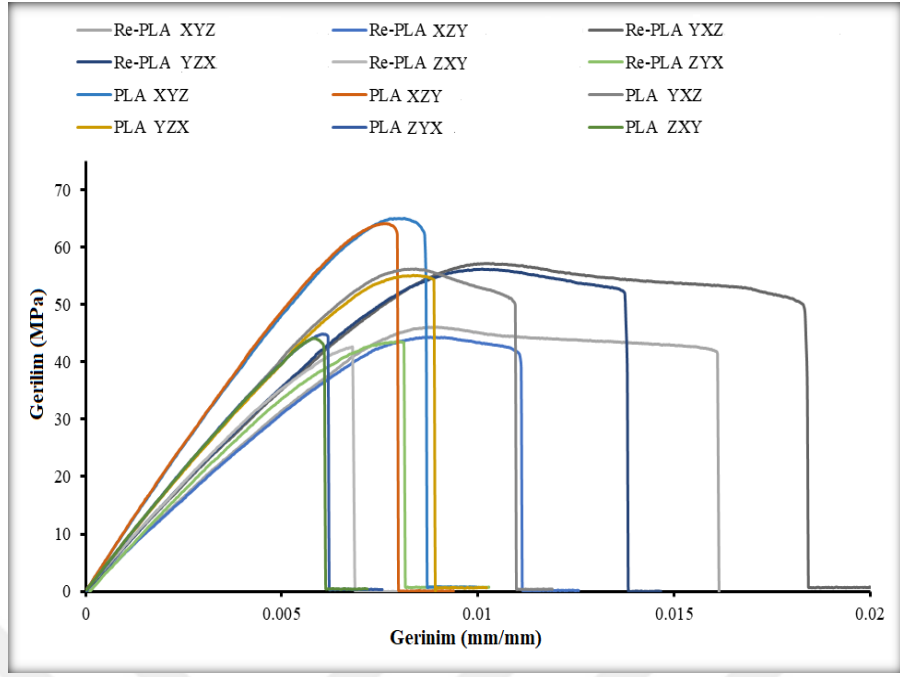
Çekme testleri sonucu elde edilen PLA, Re-PLA ve PLA-Re-PLA karşılaştırmalı numunelerin gerilim-gerinim grafikleri sırayla; Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Sonuçları daha iyi anlamak ve yorumlamak için çekme test sonuçları sütun grafik olarak çizilmiştir. PLA, Re-PLA ve PLA ile Re-PLA numunelerinin sütun grafikleri sırayla; Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



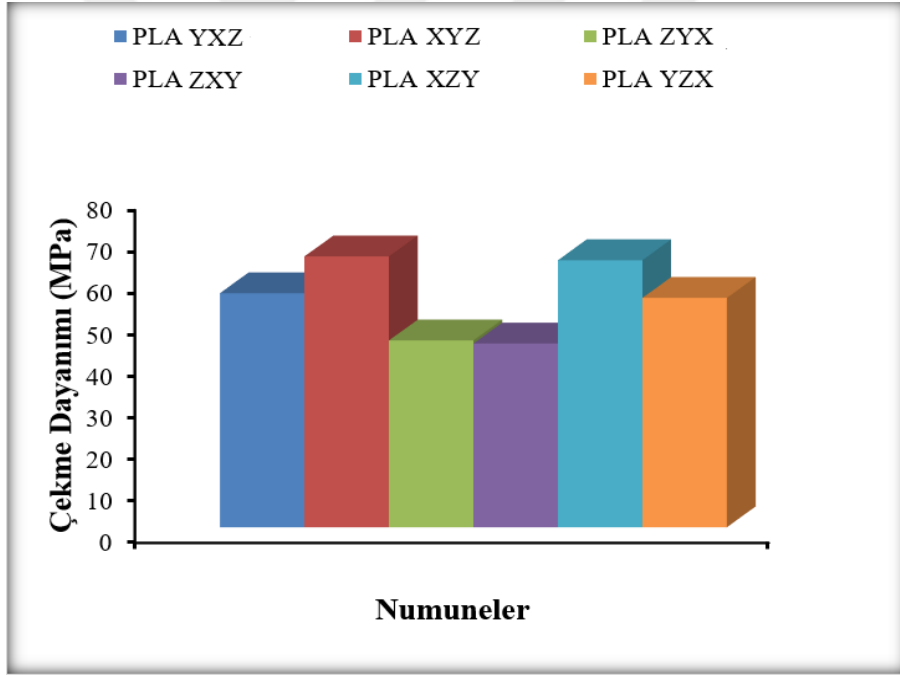
Şekil 4.2: PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.



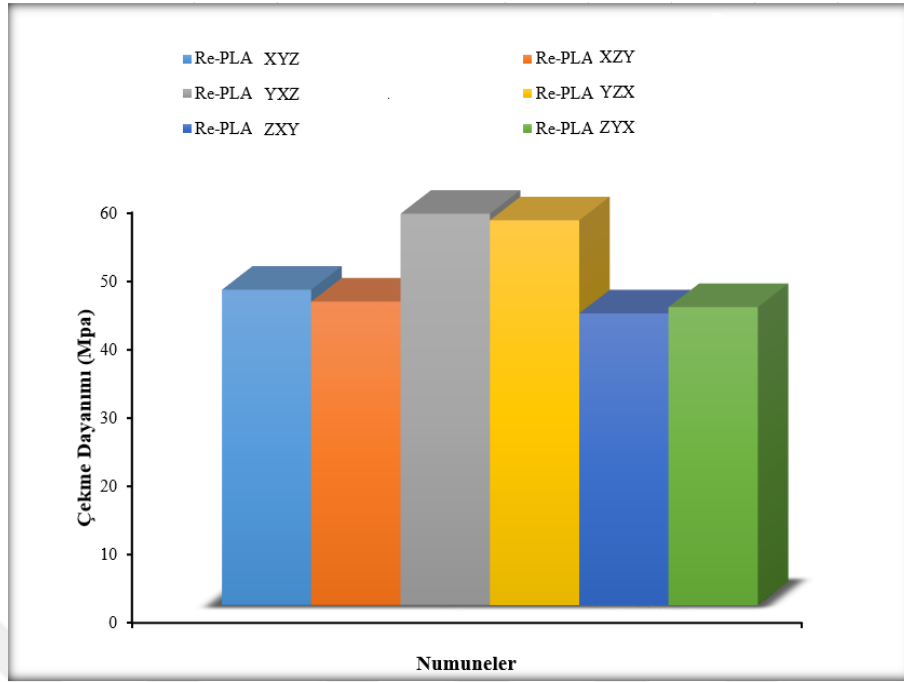
Şekil 4.3: Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.



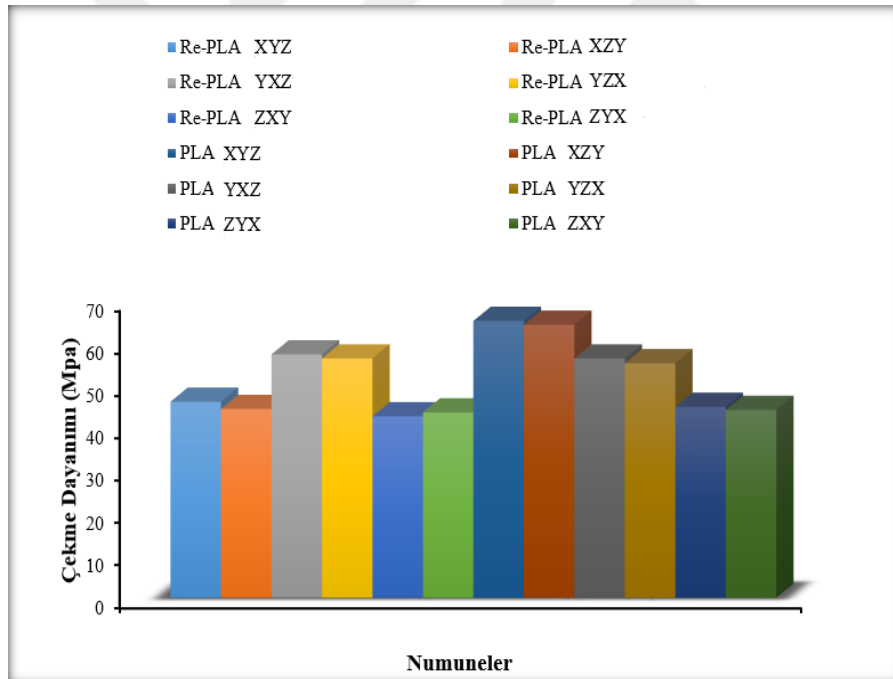
Şekil 4.4: PLA ve Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.



Şekil 4.5: PLA numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.6: Re-PLA numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.7: Tüm numunelerinin çekme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 incelendiğinde PLA ve Re-PLA malzemelerinde XYZ-XZY, YZX-YXZ ve ZYX-ZXY ikili gruplar halinde ayrılanların hemen hemen benzer karakteristik özellik taşıdığı ortaya çıkmaktadır. Bu çıkan farklılıkların temel sebebi numunelerin tabla üzerinde konumlandırılırken 90° döndürülmesidir. Bu döndürmelerden dolayı numunelerin iç yapısında bazı boşluklar oluşmaktadır. Bu boşluklardan dolayı mukavemetlerinin değiştiği rapor edilmiştir [8,36]. Şekil 4.4'te verilen PLA ve Re-PLA karşılaştırılmalı gerilim-gerinim

grafiği incelendiğinde; Re-PLA malzemelerinde, PLA malzemelerine göre gerilmede azalma ancak gerinim değerlerinde ise artış meydana geldiği tespit edilmiştir. PLA malzemelerinde en düşük ve en yüksek gerinim değerleri 0,006 mm/mm ve 0,011 mm/mm iken; Re-PLA malzemelerinde en düşük ve en yüksek gerinim değerlerinin 0,007 mm/mm ve 0,019 mm/mm olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise geri dönüşüm sonrası sertlik değerlerindeki değişime atıf edilmektedir. Re-PLA filamentinin geri dönüşüm işlemi sırasında var olan kendisinin özelliklerinde birkaç bozunumlar ortaya çıkmaktadır. Filamentin geri dönüştürülme işlemi ve üretimi sırasında ekstrüzyon kesintileri ortaya çıkabilecek bir düzensizlik oluşturabilmektedir. Bunun dışında filament ekstrüze edilmeden önce filtre kullanılmaması durumunda mikroskobik safsızlıklar oluşabilmektedir [37,38]. Bu çalışmada elde edilen gerilim-gerinim sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmüştür.

Şekil 4.5 – Şekil 4.7 arasındaki şekilleri daha iyi yorumlayabilmek amaçlı ve numuneleri kendi düzlemlerinde kıyaslamak için çekme dayanımlarındaki artış ve azalma farkları Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: Farklı eksenler arasındaki çekme dayanımı yüzde farkları.

Eksen	PLA	Re-PLA	Artma-Azalma
XYZ	65,08	46,10	18,98
XZY	64,17	44,37	19,80
YXZ	56,24	57,21	0,97
YZX	55,12	56,24	1,12
ZYX	44,88	43,56	1,32
ZXY	44,14	42,64	1,50

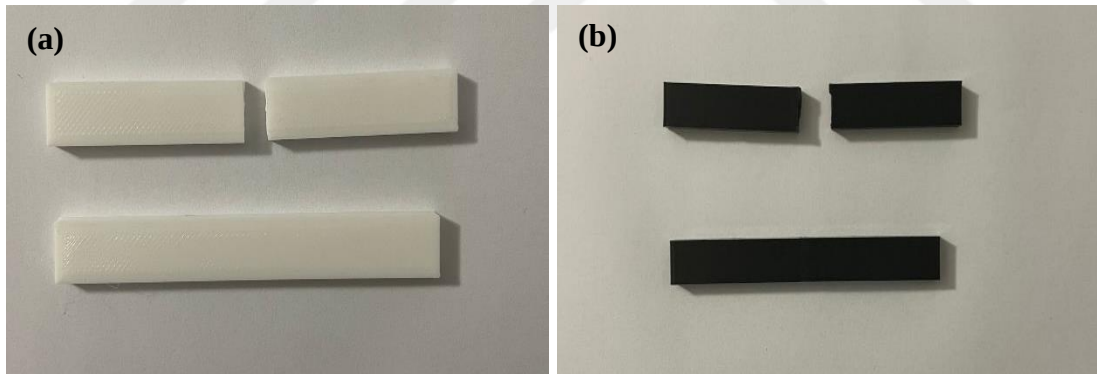
PLA ve Re-PLA’dan oluşturulmuş numunelerin aynı düzlemde oluşturduğu fark incelendiğinde XYZ ve XZY numunelerinin mukavemetinde bir düşüş gözlenmiş olup; diğer düzlemlerde üretilen numunelerin hemen hemen benzer özellik gösterdiği görülmüştür. PLA ile üretilen numunelerin daha gevrek yapıda olduğu ve Re-PLA ile üretilen numunelerin daha sünek yapıda olduğu görülmüştür. YZX ve YXZ düzlemlerinde üretilen numunelerin ise hem süneklik hem maksimum çekme dayanımı noktasından bakarsak benzer özellik taşıdığı görülmüştür. Konusu olan olaylar filamentten numune sentezi esnasında oluşabilecek şekildedir. Buna bağlı olarak numunelerin mekanik özellikleri ve deney testlerinde gösterdiği özelliklerindeki değişimini göstermektedir [8,37].

Testler deney numuneleri kırılana kadar yapılmıştır, polimerlerin sünekliliği numunelerin kırılmamasına sebep olmamıştır. Alınan veriler sonucunda, değişime uğramamış PLA malzemesi ile üretilen numuneler ve Re-PLA üretilmiş numunelerin birbirine yakın mekanik

özelliklerini göstermektedir [35]. Geri dönüşümü yapılan filamentler kullanıldığında mekanik özelliklerdeki azalışa, geri dönüştürülmesine sebep olan ve diğerlerine kıyasla daha alçak moleküler ağırlıkla doğrudan ilgili olduğunu literatür araştırması sonucunda da ortaya çıkmaktadır [35]. Kafes yapılarda üretim yönlerinin ve yükleme yönüne göre dizilimi, mekanik özellikler üzerinde çok etkilidir [39,40]. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen kafas yapılarda, inşa yönünün mekanik özellikleri etkilemesinin en önemli nedeni farklı inşa yönlerinde, üretim sonucunda ortaya çıkan gözenek miktarlarının farklı olmasıdır. Delroisse ve diğ., dik olarak tasarlanan ve üretilen parçalarda, eğik olanlara göre daha az gözenek görüldüğü, eğik olarak üretilen parçalarda daha sert, daha az gözenekli, ince mikroyapıya sahip üst bölge ve sertliği daha az, daha çok gözenekli ve kaba mikroyapıya sahip alt bölge olmak üzere iki farklı bölgenin oluştuğunu belirtmişlerdir [41].

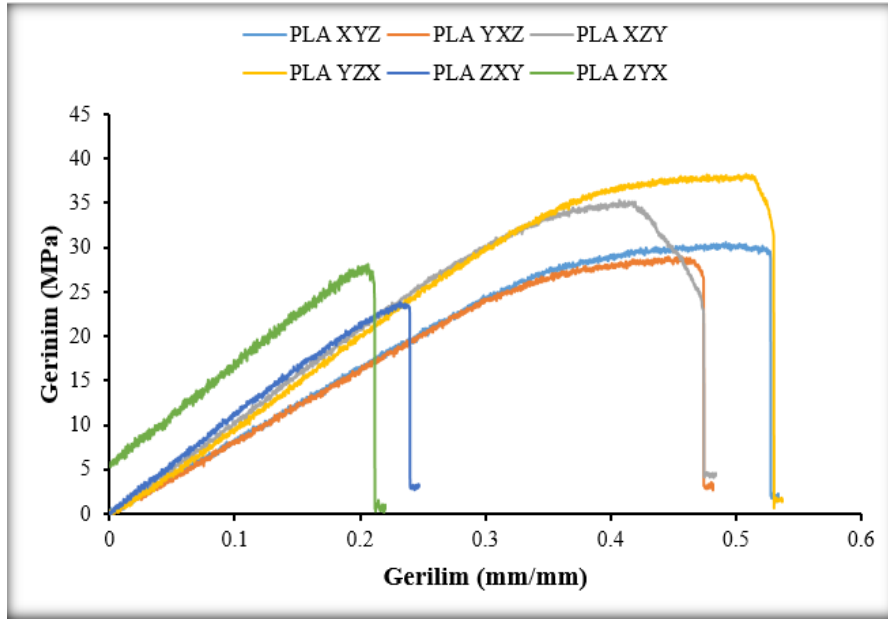
4.2 Üç Nokta Eğme Test Sonuçları

Eğilme modülü şeklinde de adlandırılabilen elastiklik eğilme, elastik limitteki gerilme-gerinim oranıdır. Bir eğilme testindeki maksimum bükülme gerilmesine, eğilme mukavemeti denilir [42]. Şekil 4.8 (a) ve (b)'de sırasıyla; PLA ve Re-PLA deney numunelerinin üç nokta eğme testi öncesi ve sonrası görüntüleri sunulmuştur.

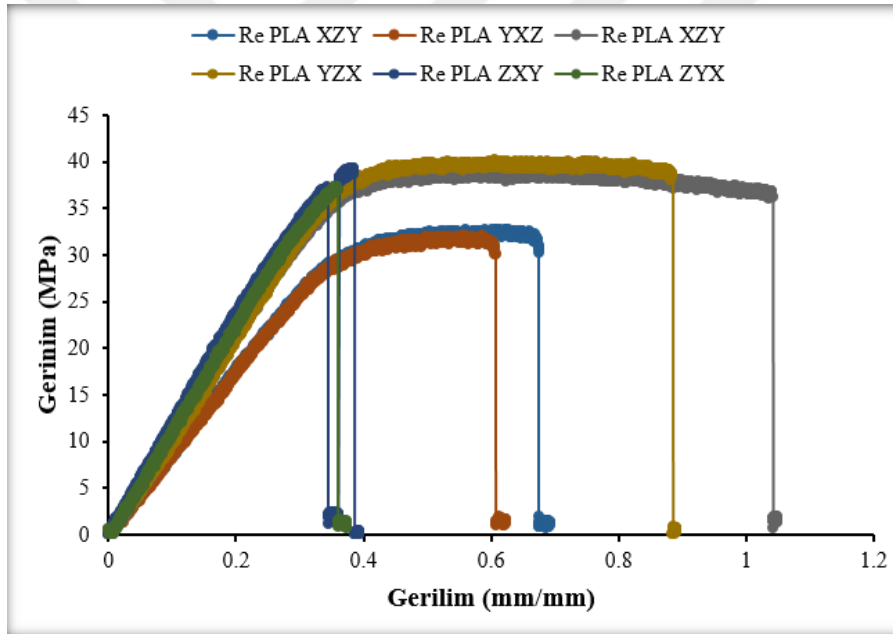


Şekil 4.8: Üç nokta eğme testi öncesi ve sonrası numuneler (a) PLA ve (b) Re-PLA.

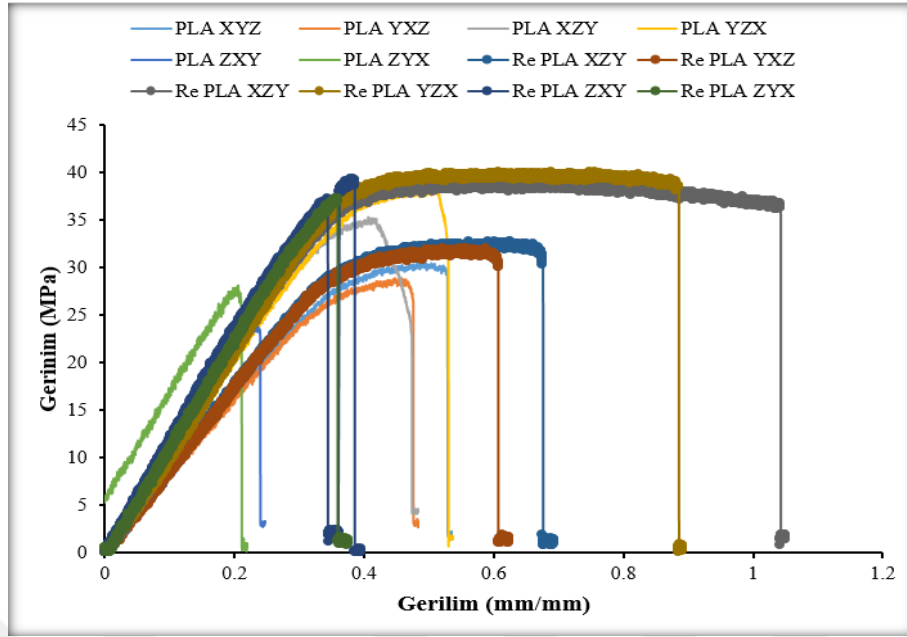
Üç nokta eğme testleri sonucu elde edilen PLA, Re-PLA ve PLA-Re-PLA karşılaştırmalı numunelerin gerilim-gerinim grafikleri sırasıyla; Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Sonuçları daha iyi anlamak ve yorumlamak için üç nokta eğme test sonuçları sütun grafik olarak çizilmiştir. PLA, Re-PLA ve PLA ile Re-PLA numunelerinin sütun grafikleri sırasıyla; Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



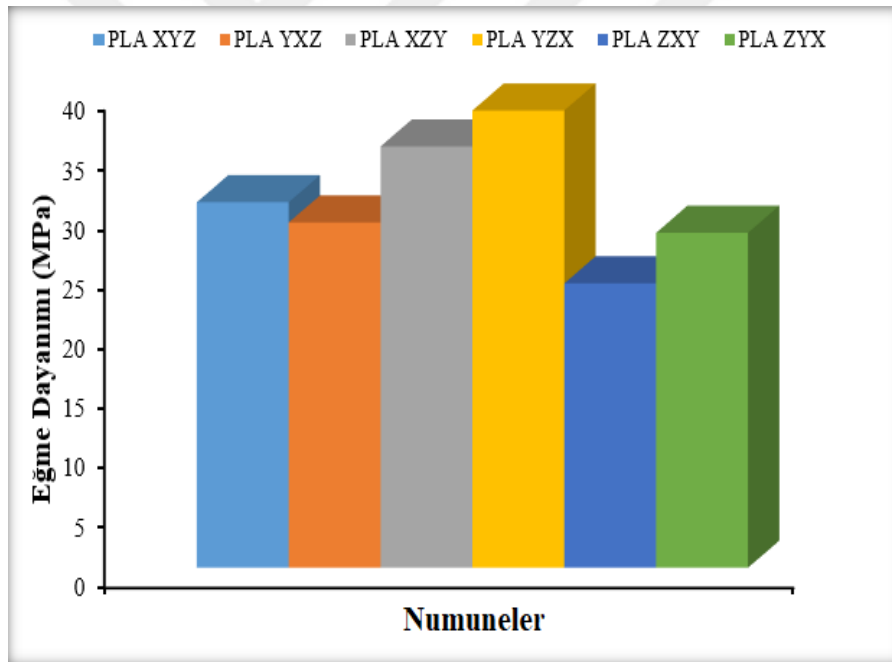
Şekil 4.9: PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.



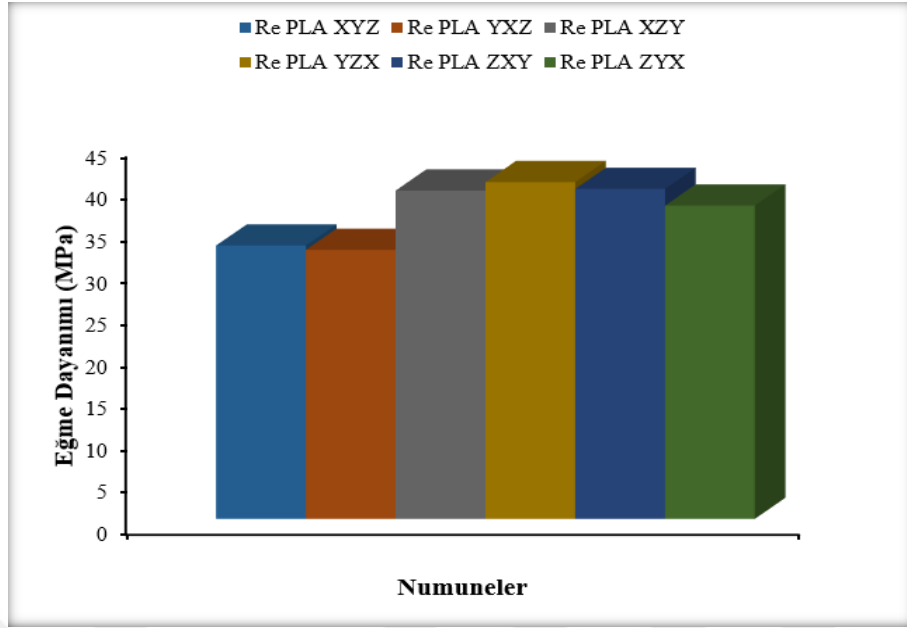
Şekil 4.10: Re-PLA numunelerinin gerilim – gerinim grafiği.



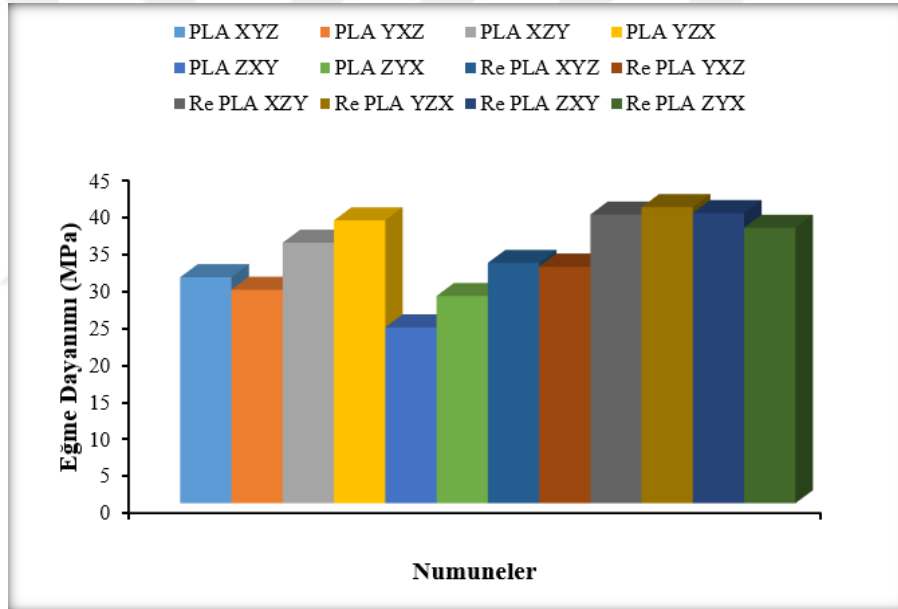
Şekil 4.11: PLA ve Re-PLA numunelerinin karşılaştırılmış gerilim – gerinim grafiği.



Şekil 4.12: PLA numunelerinin üç nokta eğme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.13: Re-PLA numunelerinin üç nokta eğme dayanım sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 4.14: Tüm numunelerinin eğme dayanımı sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 verilen eğme testi deneyinin sonuçları değerlendirildiğinde; PLA ve Re-PLA malzemeden oluşturulmuş numunelerinin XYZ-YXZ, XZY-YXZ ve ZXY-ZYX ikili gruplar halinde ayrılan hemen hemen benzer karakteristik özellik taşıdığı ortaya çıkmaktadır. Burada bahsedilen ikili gruplar halinde ayrılan numune gruplarının tablaya yüzeyinde 90° döndürülmüş haller olduğu görülmüştür [43]. PLA ve Re-PLA'dan oluşturulmuş numunelerin ikili grupları incelendiğinde genel olarak numunelerinin mukavemetinde bir artış görülmüş olup; ZXY-ZYX ikili gruplarında üretilen numunelerin diğer ikili gruplara kıyasla daha yüksek oranda artış görülmüştür. Şekil 4.11'de verilen PLA ve Re-PLA numunelerinin

karşılaştırılmalı gerilim-gerinim grafiği incelendiğinde; görüldüğü üzere Re-PLA ile üretilen numunelerdeki eğilme dayanımının diğer numunelere göre daha fazladır. En yüksek gerinim değeri de Re-PLA ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. PLA numunelerinin gösterdiği eğilme dayanımının değişimi kayda değer bir sonuç olmamakla beraber kıyaslamak gerekirse küçüktür [43,44]. Üretilen numunelerdeki eğilme dayanımının fazla veya düşük olması üretim sırasındaki enerji akışına ve yüzey pürüzlülüğündeki farka bağlı olduğu düşünülmektedir [39,45].

Şekil 4.12 – Şekil 4.14 arasındaki şekilleri daha iyi yorumlayabilmek amaçlı ve numuneleri kendi düzlemlerinde kıyaslamak için eğme dayanımlarındaki artış ve azalma farkları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2: Farklı eksenler arasındaki eğme dayanımı yüzde farkları.

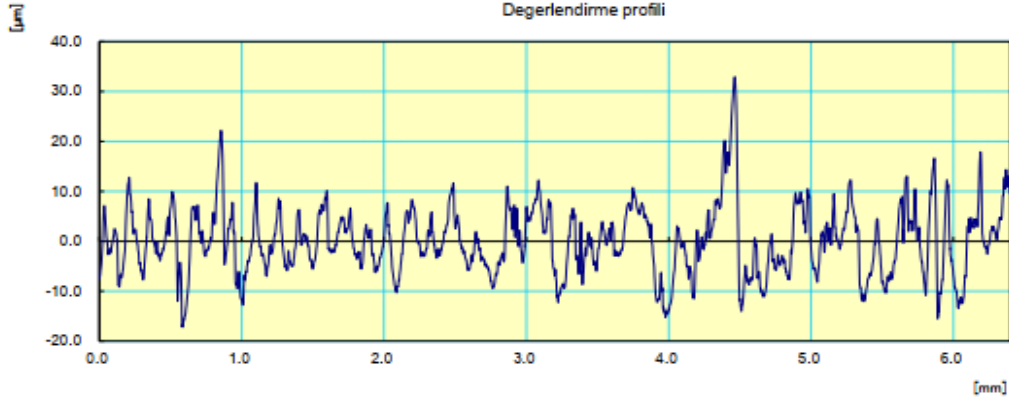
Eksen	PLA	Re-PLA	Artma-Azalma
XYZ	30,62	32,55	1,93
YXZ	28,92	32,04	3,12
XZY	35,29	39,10	3,81
YZX	38,31	40,12	1,81
ZXY	23,82	39,30	15,48
ZYX	28,06	37,31	9,25

PLA ile üretilen numunelerin daha gevrek yapıda olduğu ve Re-PLA ile üretilen numunelerin daha sünek yapıda olduğu gözlemlenmiştir. XYZ-YZX ikili grubun hem PLA hem de Re-PLA numunelerinin süneklik ve maksimum eğme dayanımı noktasından bakıldığında benzer özellik taşıdığı görülmüştür. En yüksek artış ZXY-ZYX ikili grupta elde edilmiştir. Filament sentezinde kullanılan çağımızdaki diğer filamentlere göre PLA’nın darbe dayanımının iyileştirilmesi, ticari polimerlerin yerine geçerek geniş bir kullanım ortamına olanak sunacaktır [3].

4.3 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

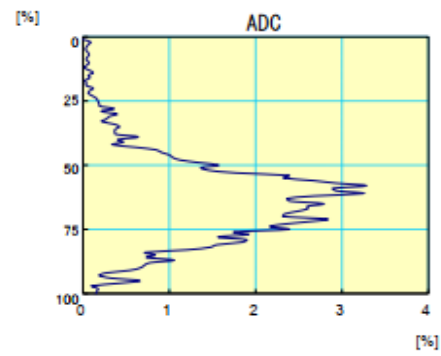
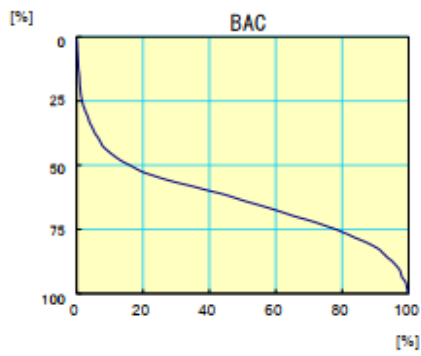
Yüzey pürüzlülüğü, ölçü tamlığını, parçaların üretim maliyetlerini ve mekanik performansını etkilemektedir. Bundan kaynaklı yüzey pürüzlülüğünün güzel bir sonuç oluşturulması için yapılan geliştirme ve araştırmalar üretim yöntemlerini optimize edilmesine zemin hazırlamıştır [46]. 3B ile üretilmiş PLA yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde cihazdan elde ettiğimiz sonuçların ekran görüntüleri alınmıştır. PLA için YXZ eksenli parçaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarına ait ekran görüntüleri Şekil 4.15’te verilmiştir. Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’te sırasıyla; PLA numunelerinin XYZ-YXZ, XZY-YZX ve ZXY-ZYX eksenlerine göre ölçülen ortalama Ra değerlerinin tabloları gösterilmiştir.

KONTROL SERTİFİKASI



Calisma adi	Ornek	Operator	Mitutoyo
Olcum Cihazı	SurfTest	Aciklama	Ver2.00
Standart	ISO 1997	N	8
Profil	R	Adım	0.8mm
As	2.5µm	Filtre	GAUSS
Ra	5.846 µm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation



Şekil 4.15: YXZ eksenli PLA parçanın kırılan yüzeyin yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

Tablo 4.3: PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenlerine ait Ra sonuçları.

PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)				
Ayrıntılar	XYZ	Ortalama	YXZ	Ortalama
Boy	0,094	0,298	0,747	0,880
	0,349		0,615	
	0,453		1,278	
Kalınlık	0,914	0,815	1,248	0,900
	0,791		0,949	
	0,740		0,505	
En	2,021	1,436	1,235	2,372
	1,600		2,636	
	0,688		3,247	
Kırılan Yüzey	3,115	5,152	4,335	4,594
	5,110		5,846	
	7,232		3,663	

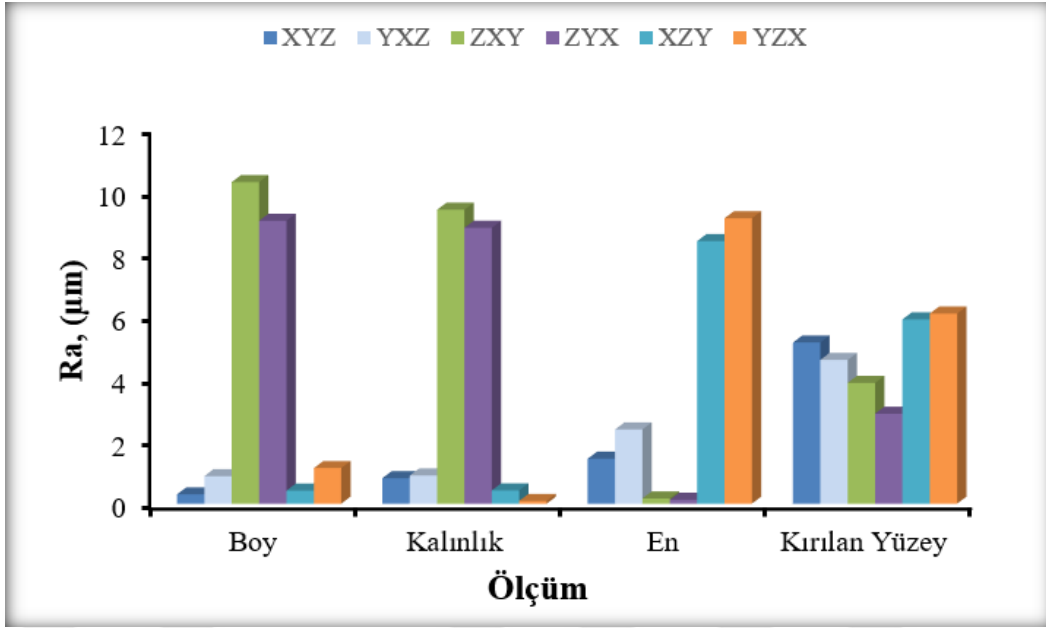
Tablo 4.4: PLA numunelerinin XZY-YZX eksenlerine ait Ra sonuçları.

PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)				
Ayrıntılar	XZY	Ortalama	YZX	Ortalama
Boy	0,324	0,418	1,130	1,138
	0,502		1,027	
	0,428		1,257	
Kalınlık	0,399	0,424	0,032	0,087
	0,415		0,019	
	0,459		0,041	
En	7,639	8,391	9,195	9,120
	8,872		8,776	
	8,664		9,389	
Kırılan Yüzey	4,930	5,891	3,964	6,076
	7,327		6,989	
	5,417		7,275	

Tablo 4.5: PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenlerine ait Ra sonuçları.

PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)				
Ayrıntılar	ZXY	Ortalama	ZYX	Ortalama
Boy	10,306	10,278	9,027	9,041
	9,950		8,939	
	10,578		9,157	
Kalınlık	9,104	9,394	8,892	8,818
	9,839		8,657	
	9,240		8,907	
En	0,187	0,166	0,111	0,126
	0,169		0,120	
	0,143		0,149	
Kırılan Yüzey	3,721	3,862	3,617	2,876
	3,001		2,988	
	4,865		2,023	

Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’te verilen boy, en, kalınlık ve kırılan yüzeylerin ortalama Ra sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için sütun grafikler çizilmiştir. PLA numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



Şekil 4.16: PLA numunelerinin ortalama Ra değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.16’da gösterilen farklı yönlerde üretilen bu numunelerin boy yönünden yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde; ZXY yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve XYZ yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.16’da boy yönünden XZY, YXZ, YZX, ZXY ve ZYX numunelerinde XYZ numunesine göre yüzey pürüzlülüğü sonuçları sırasıyla %40, %195, %281, %3349 ve %2934 oranlarında Ra değerlerinde artış ölçülmüştür. XYZ, XZY, YXZ ve YZX düzlemlerinde üretilen numunelerin Ra değerlerinin (0-1,5) μm aralığında ölçülmüş olup, ZYX ve ZXY düzlemlerinde üretilen numunelerin ise Ra değerleri (9-10,5) μm aralığındadır.

Şekil 4.16’da gösterilen farklı yönlerde üretilen numunelerin kalınlık yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde; ZXY yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve YZX yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.16’da boy yönünden yüzey pürüzlülüğü sonuçları YXZ, ZXY ve ZYX numunelerinde XYZ numunesine göre sırasıyla; %10, %1053 ve %982 oranında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; XZY ve YZX numunelerinde ise %48 ve %90 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ, XZY, YXZ ve YZX düzlemlerinde üretilen numunelerin Ra değerlerinin 0-1 μm aralığında ölçülmüş olup, ZYX ve ZXY düzlemlerinde üretilen numunelerin ise Ra değerleri 8-9,5 μm aralığındadır.

Farklı yönlerde üretilen bu numunelerin en yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde; YZX yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve ZYX yönünde

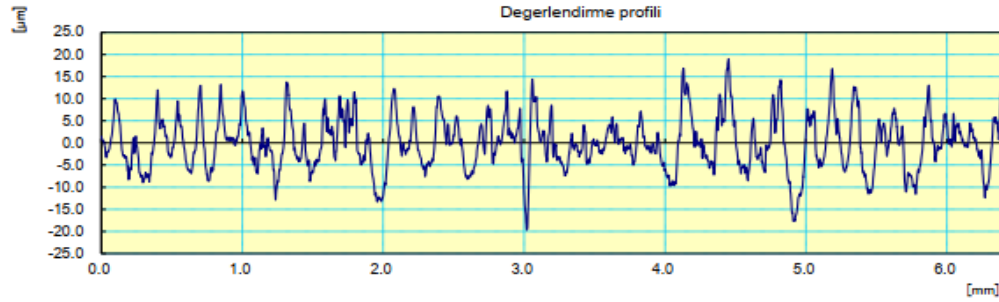
Üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. şekil 4.16’da XZY, YXZ ve YZX numunelerinde XYZ numunesine göre; sırasıyla %487, %65 ve %535 oranlarında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; ZXY ve ZYX numunelerinde ise sırasıyla %88 ve %91 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ ve YXZ, XZY ve YZX ile ZXY ve ZYX numunelerinin Ra değerlerinin 1-2,5, 8-9,5 ve 0-0,5 μm aralıklarında oldukları gözlemlenmiştir.

Kırılan yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde ise; YZX yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve ZYX yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. şekil 4.16’da verilen veriler incelendiğinde XZY ve YZX numunelerinde XYZ numunesine göre; sırasıyla %14 ve %18 oranlarında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; YXZ, ZXY ve ZYX numunelerinde ise sırasıyla %10, %25 ve %44 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ ve YXZ, XZY ve YZX ile ZXY ve ZYX numunelerinin Ra değerlerinin 4-5, 5-6 ve 2-4 μm aralıklarında oldukları gözlemlenmiştir.

Altı farklı düzlemde aynı şekilde basılan PLA numuneleri incelendiğinde boy ve kalınlık olarak baktığımız zaman Z eksenı üzerinde basılan yüzeylerde yüzey pürüzlülüğünün daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yüzeylerin aksine en ve kırılan yüzey noktalarında yapılan ölçümlerde Z eksenı üzerinde basılan yüzeylerde pürüzlülük ortalamasının azaldığı gözlemlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülüğüne sergiledikleri karakteristik değişiklikler, üretim yöntemlerinin sabit olmasından dolayı tabla üzerindeki konumlandırılması değişik olduğundan kaynaklanmaktadır [18,33,47].

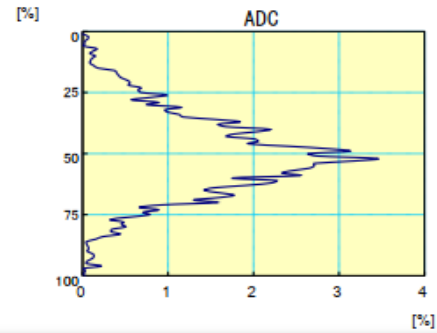
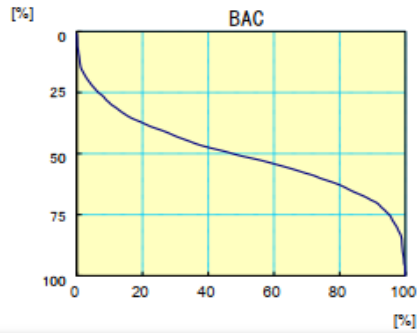
3B ile üretilmiş Re-PLA yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde cihazdan elde ettiğimiz sonuçların ekran görüntüsü alınmıştır. YXZ eksenli Re-PLA parçaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarına ait ekran görüntüleri şekil 4.17’de gösterilmiştir. Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de sırasıyla; Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ, XZY-YZX ve ZXY-ZYX eksenlerine göre ölçülen ortalama Ra değerlerinin tabloları gösterilmiştir.

KONTROL SERTİFİKASI



Çalışma adı	Örnek	Operator	Mitutoyo
Ölçüm Cihazı	SurfTest	Açıklama	Ver2.00
Standart	ISO 1997	N	8
Profil	R	Adım	0.8mm
λs	2.5μm	Filtre	GAUSS
Ra	4.860 μm		

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation



Şekil 4.17: XYZ eksenli Re-PLA parçanın kırılan yüzeyin yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

Tablo 4.6: Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenlerine ait Ra sonuçları.

Re-PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)				
Ayrıntılar	XYZ	Ortalama	YXZ	Ortalama
Boy	0,620	0,508	0,179	0,222
	0,601		0,230	
	0,305		0,257	
Kalınlık	0,043	0,355	1,430	1,208
	0,402		1,480	
	0,620		0,716	
En	8,120	8,800	3,088	3,365
	9,203		2,631	
	9,071		4,378	
Kırılan Yüzey	2,846	2,542	4,860	4,910
	2,094		4,255	
	0,687		5,615	

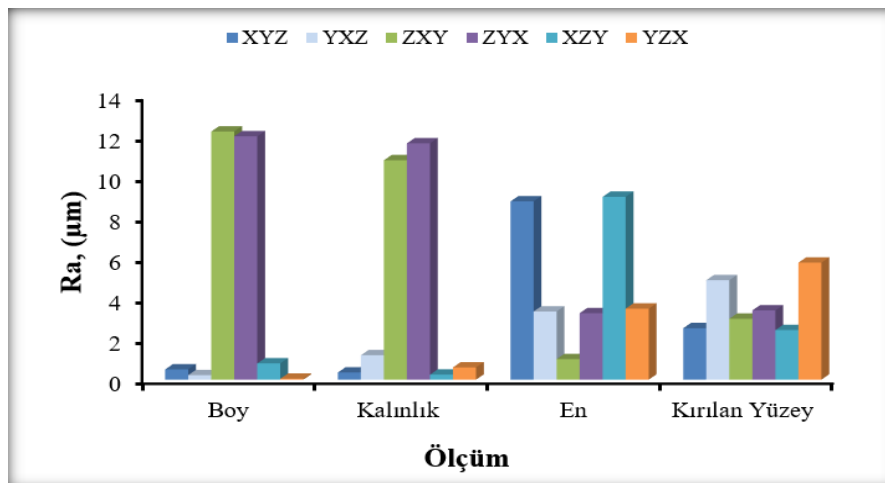
Tablo 4.7: Re-PLA numunelerinin XZY-YZX eksenlerine ait Ra sonuçları.

Re-PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)				
Ayrıntılar	XZY	Ortalama	YZX	Ortalama
Boy	1,008	0,802	0,023	0,048
	0,385		0,066	
	1,013		0,056	
Kalınlık	0,425	0,247	0,529	0,605
	0,303		0,531	
	0,013		0,756	
En	9,118	9,026	4,334	3,504
	8,661		4,268	
	9,300		1,910	
Kırılan Yüzey	2,266	2,447	6,593	5,774
	2,803		4,883	
	2,274		5,846	

Tablo 4.8: Re-PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenlerine ait Ra sonuçları.

Re-PLA – Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)				
Ayrıntılar	ZXY	Ortalama	ZYX	Ortalama
Boy	12,555	12,247	12,026	12,011
	12,146		11,987	
	12,042		12,020	
Kalınlık	10,674	10,829	11,706	11,664
	11,080		12,077	
	10,735		11,211	
En	1,098	1,013	2,403	3,280
	0,915		5,496	
	1,028		1,943	
Kırılan Yüzey	3,473	3,005	3,619	3,418
	3,055		2,672	
	2,487		3,964	

Tablo 4.6, Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de verilen boy, en, kalınlık ve kırılan yüzeylerin Ra sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için sütun grafikler çizilmiştir. Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.18: Re-PLA numunelerinin ortalama Ra değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.18’de gösterilen farklı yönlerde üretilen numunelerin boy yönünden yüzey pürüzlülüğü sonuçları incelendiğinde; ZXY yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve YZX yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.18’de boy yönünden yüzey pürüzlülüğü sonuçları XYZ numunesine göre XZY, ZXY ve ZYX numunelerinde sırasıyla %57, %2310 ve %2264 oranlarında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; YXZ ve YZX numunelerinde ise sırasıyla %56 ve %90 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ, XZY, YXZ ve YZX düzlemlerinde üretilen numunelerin Ra değerleri 0-1 μm aralığında ölçülmüş olup, ZYX ve ZXY düzlemlerinde üretilen numunelerin ise Ra değerleri 12-13 μm aralığındadır.

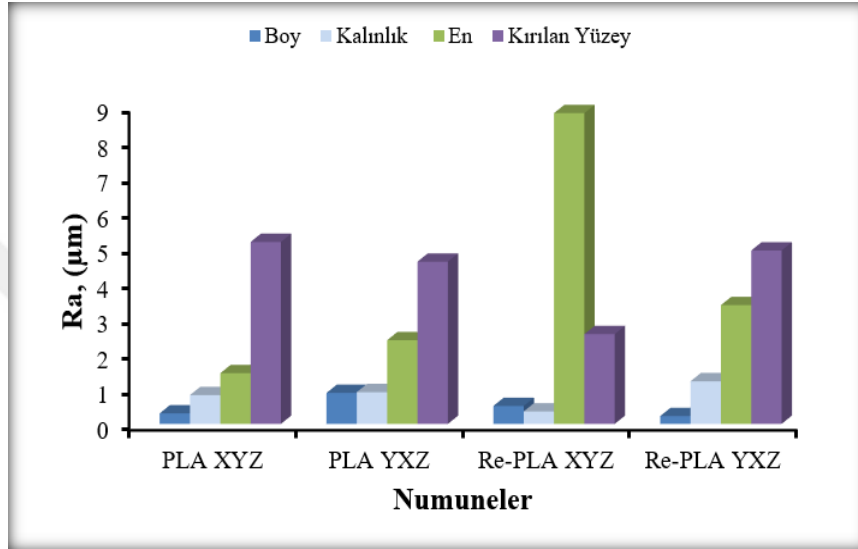
Şekil 4.18’de gösterilen farklı yönlerde üretilen bu numunelerin kalınlık yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde; ZYX yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve XZY yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.18’de boy yönünden yüzey pürüzlülüğü sonuçları XYZ numunesine göre; YXZ, YZX, ZXY ve ZYX numunelerinde sırasıyla %240, %70, %2950 ve %3185 oranlarında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; XZY numunesinde ise %30 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ, XZY, YXZ ve YZX düzlemlerinde üretilen numunelerin Ra değerleri 0-1 μm aralığında ölçülmüş olup, ZYX ve ZXY düzlemlerinde üretilen numunelerin ise Ra değerleri 2-10 μm aralığındadır.

Farklı yönlerde üretilen bu numunelerin enleri yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde XZY yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve ZXY yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.18’de XYZ numunesine göre; XZY numunesinde Ra değerinde %9 oranında artış gözlenmiş olup; YXZ, YZX, ZXY ve ZYX numunelerinde ise sırasıyla %62, %60, %88 ve %63 oranlarında Ra değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ ve YXZ numunelerinin Ra değerleri 8-9 μm aralığındadır. YXZ, YZX ve ZYX numunelerinin Ra değerleri 3-3,5 μm arasındadır. ZXY numunesinin Ra değeri 1,013 μm olarak ölçülmüştür.

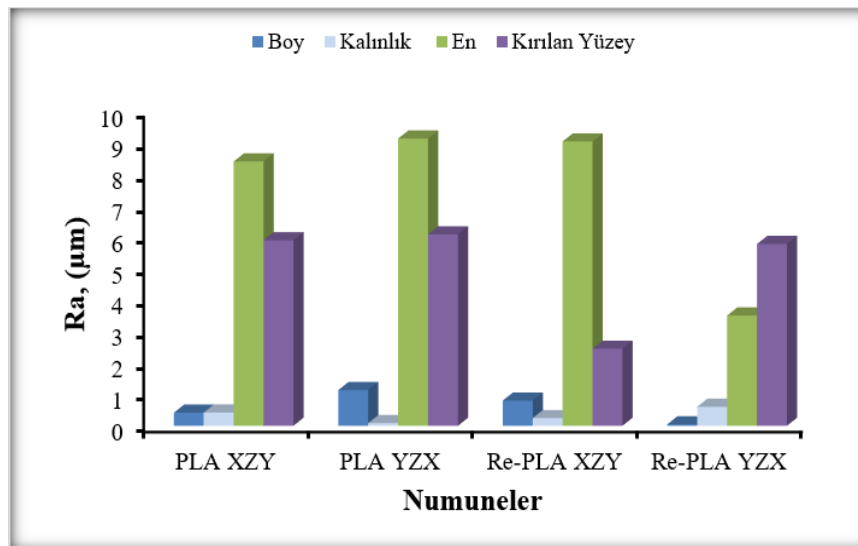
Kırılan yönünden yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde ise; YZX yönünde üretilen numunenin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu ve XZY yönünde üretilen numunenin ise yüzey pürüzlülüğünün en düşük olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 4.18’de verilen veriler incelendiğinde YXZ, YZX, ZXY ve ZYX numunelerinde XYZ numunesine göre; sırasıyla %93, %119, %18 ve %34 oranlarında Ra değerlerinde artış gözlenmiş olup; XYZ

numunesinde ise %4 oranında Ra değerinde azalma gözlemlenmiştir. XYZ, XZY, ZXY ve ZYX numunelerinin Ra değerleri 2-3,5 μm aralığında ölçülürken; YXZ ve YZX numunelerinde Ra değerleri 5-6 μm arasında ölçülmüştür.

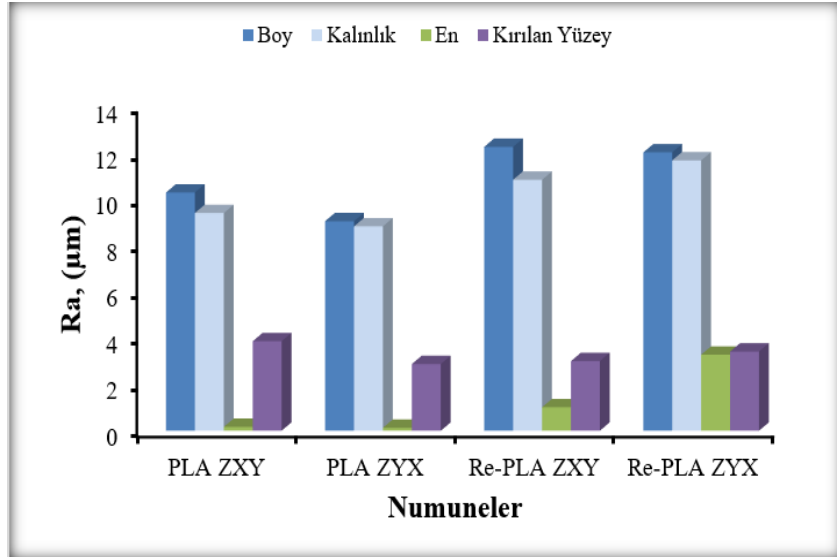
Ölçülen Ra değerlerine göre PLA ve Re-PLA numunelerini karşılaştırılmalı yorumlayabilmek amaçlı sütun grafikleri yapılmıştır. Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de sırayla; PLA ve Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ, XZY-YZX ve ZXY-ZYX eksenleri için ortalama yüzey pürüzlülüğünün sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 4.19: PLA ve Re-PLA numunelerinin XYZ-YXZ eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 4.20: PLA ve Re-PLA numunelerinin XZY-YZX eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.

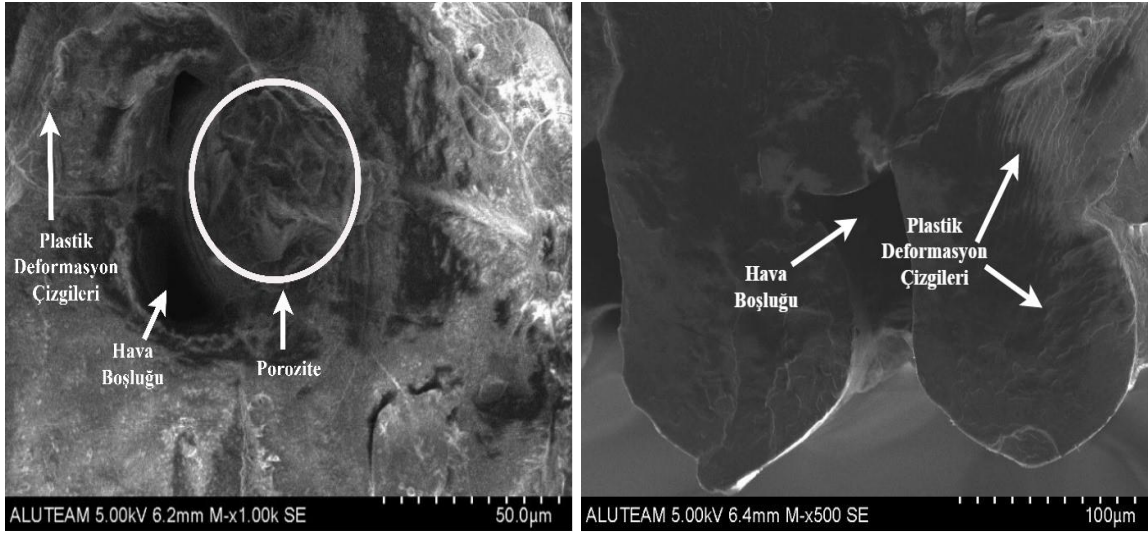


Şekil 4.21: PLA ve Re-PLA numunelerinin ZXY-ZYX eksenleri için Ra değerlerinin karşılaştırılması.

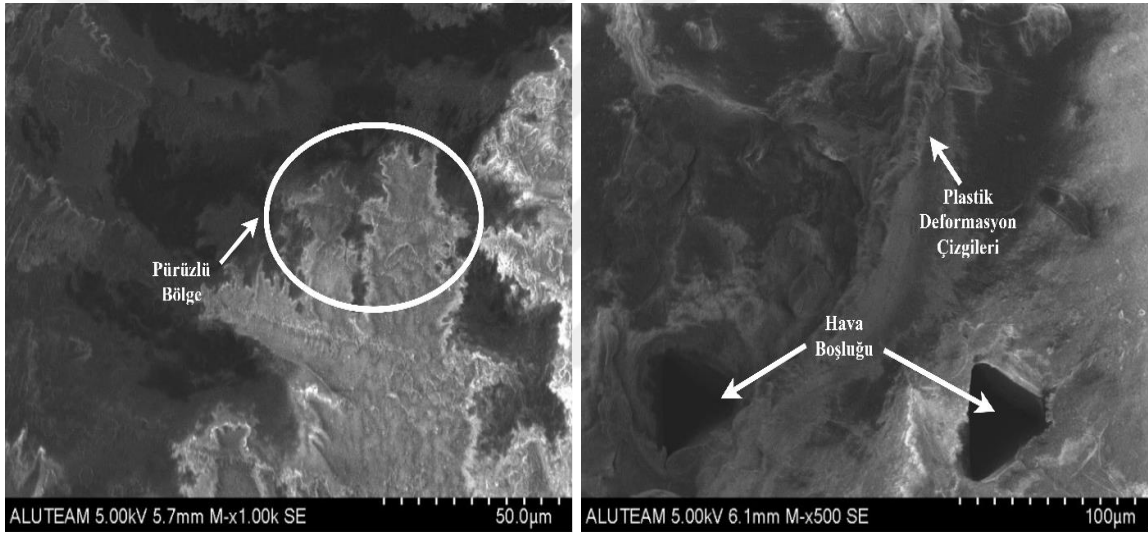
Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilen sonuçlar araştırıldığında; hem PLA hem de Re-PLA’da; XYZ-YXZ, XZY-YZX ve ZXY-ZYX ikili grupların deney sonuçlarında Ra yüzey pürüzlülüğü bakımından karakteristiklerinin eş olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değerleri düşük olan malzemelerin daha iyi mekanik özellikler gösterirken; daha yüksek yüzey pürüzlülüğü içeren malzemelere göre daha düşük mekanik özellikler göstermektedir [48]. Bu bölümde elde edilen sonuçlar çekme ve üç nokta eğme testleri sonuçları ile uyum içerisinde.

4.4 SEM Analizleri

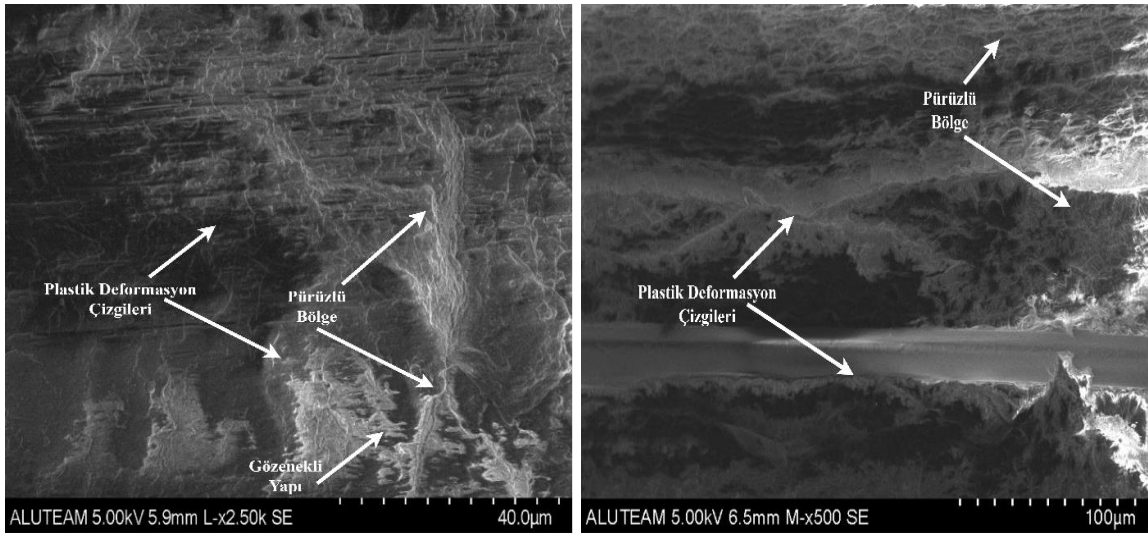
Numunelerin mekanik özellikleri, mikroyapı özelliklerine sahip en üst düzeyde ilişkili olup, mikroyapıları uygulanan parametrelerle değiştirilebilmektedir. Dolayısıyla malzemelerin mekanik özelliklerini daha iyi anlayabilmek için yapılarının detaylıca incelenmesi gerekmektedir. Bu açıklamalara dayanarak kırılan yüzeylerin SEM görüntü analizleri yapılmıştır. Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te sırayla; XYZ, XZY ve ZXY eksenlerine göre PLA numunelerinin SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de sırayla; XYZ, XZY ve ZXY eksenlerine göre Re-PLA numunelerinin SEM görüntüleri verilmiştir.



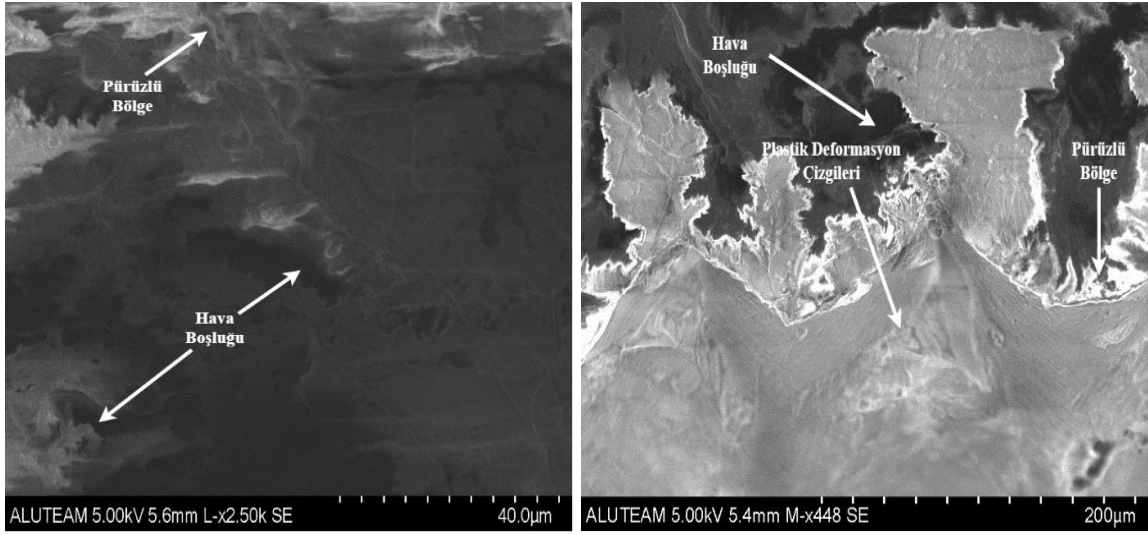
Şekil 4.22: XYZ eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



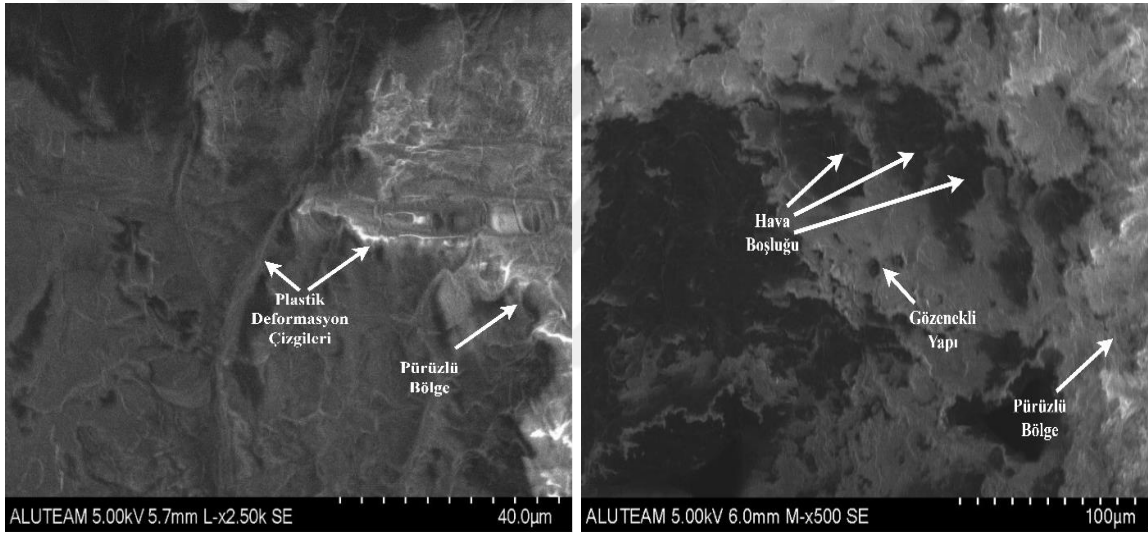
Şekil 4.23: XZY eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



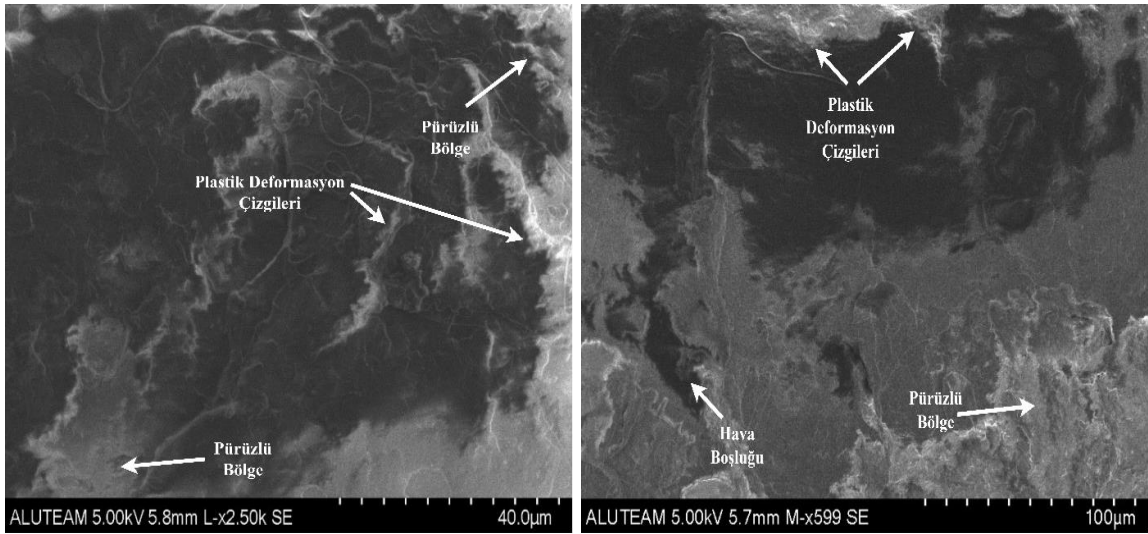
Şekil 4.24: ZXY eksenine göre üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.25: XYZ eksinine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.26: XZY eksinine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.27: ZXY eksinine göre üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de görülen farklı eksenlere göre üretilmiş PLA SEM görüntüleri incelendiğinde; kırık yüzeyinde görülen kaba ve pürüzlü yüzeyler plastik deformasyonu işaret etmektedir. Kırık yüzeylerde mikro-çatlaklar görülmüştür. Şekil 4.25’de kırık yüzeyinin düz görüntüsü gevrek kırılmaya işaret etmektedir. Şekil 4.26’da kırık yüzeyinde kristalin ve amorf bölgelerden oluşan iki fazlı (yarı kristalin) bir yapı görülmüştür. Şekil 4.27’de disperse olmuş faz ve matris fazından oluşan iki fazlı bir yapı görülmüştür.

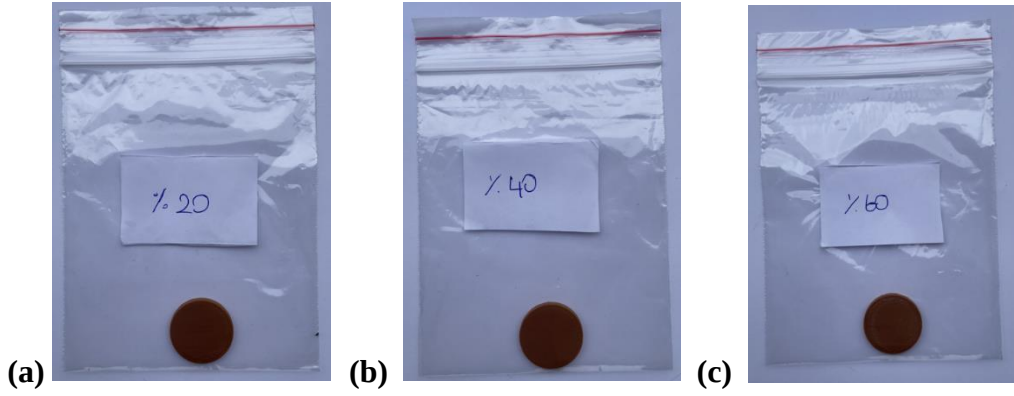
Filament kesit SEM analiz görüntülerine bakıldığında, Re-PLA’nın PLA’ya göre pürüzlü bölgeler ve çatlakların daha fazla ihtiva ettiği görülmektedir. Bu bölgeler, testler sırasında üretilen numunelerin mekanik davranışlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Numuneler içinde bulunan yüzey pürüzlülüğü değeri mekanik özellikleriyle ters orantılıdır. Yüzey pürüzlülüğü daha düşük olan numunelerin daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir [48]. SEM görüntülerinde filamentin ikiye ayrıldığı noktada değişik oranlarda bazı boşlukların olduğu görülmektedir. Re-PLA filamentinin ikiye ayrıldığı noktadan alınan görüntülerde düzensizlikler ve büyük boşlukların oluştuğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ise; geri dönüşüm işlemi sonrasında termal bozunma sonucunda oluşan polimer yüzeylerinde kırılmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir [49]. Geri dönüşüm işlemi sırasında, harmanlayıcıda termomekanik etkiler sebebiyle bozunmaya uğradığı düşünülmektedir. Bunun sonucunda da monomerler arasındaki zincirlerin kopmasıyla moleküler ağırlığında azalmaya ve Re-PLA’nın filament özelliklerindeki düşüşe neden olduğu da düşünülmektedir [18]. Kırık yüzeyinde görülen kaba ve pürüzlü yüzeyler elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarıyla uyum içerisindedir.

4.5 Biyoaktivite Sonuçları

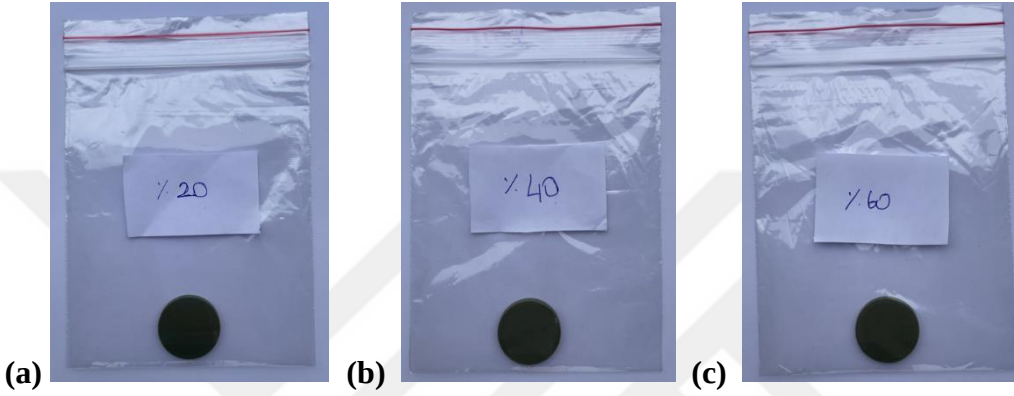
Biyoaktivite testleri kapsamında PLA ve Re-PLA numunelerinin farklı doluluk oranlarında antibakteriyel ve sitotoksiste test sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.5.1 Antibakteriyel Test Sonuçları

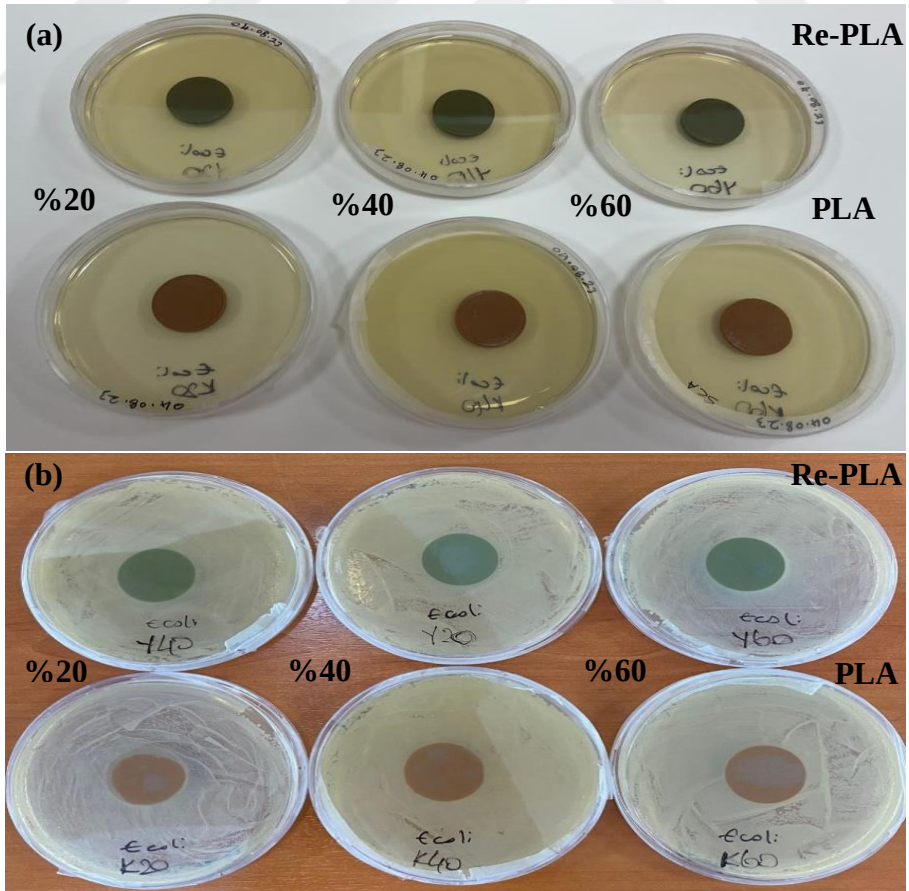
Antibakteriyel aktivite testlerinde *E.coli* ve *S. aureus* bakterileri antibakteriyel testi kontrollü biçimde, %20, %40 ve %60 hem PLA hem de Re-PLA numuneleri kullanılmıştır. Şekil 4.28 (a), (b) ve (c) ve Şekil 4.29 (a), (b) ve (c)’de sırasıyla PLA ve Re-PLA biyoaktivite test numuneleri gösterilmiştir. Şekil 4.30’da *E.coli* antibakteriyel testi (a) öncesi ve (b) 24 saat bekledikten sonrasındaki görselleri gösterilmiştir. Şekil 4.31’de *S. aureus* antibakteriyel testi (a) öncesi ve (b) 24 saat bekletilme işlemi sonrasında görselleri sunulmuştur.



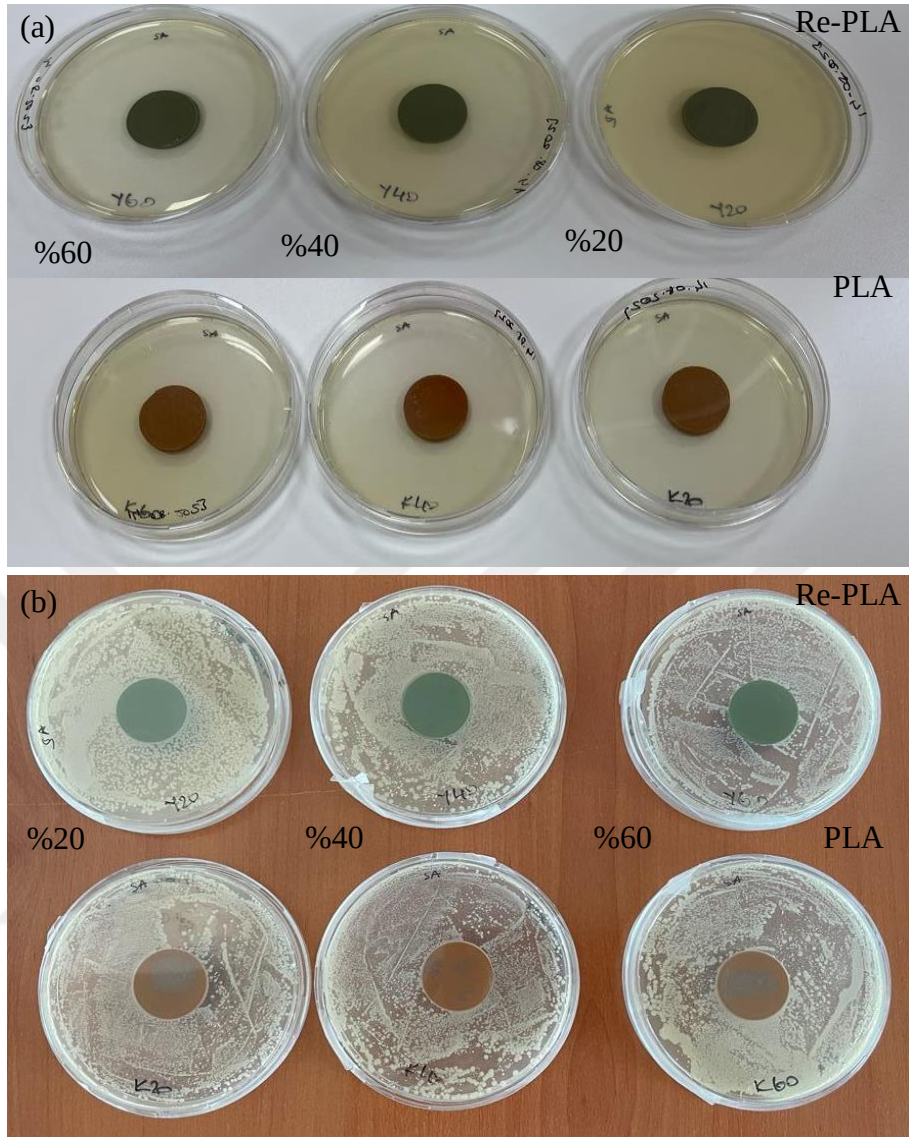
Şekil 4.28: Biyoaktivite testi için PLA numuneleri.



Şekil 4.29: Biyoaktivite testi için Re-PLA numuneleri.



Şekil 4.30: (a) Test öncesi ve (b) 24 saat test sonrası agar petri kaplarında *E.coli* kolonilerinin görseli.



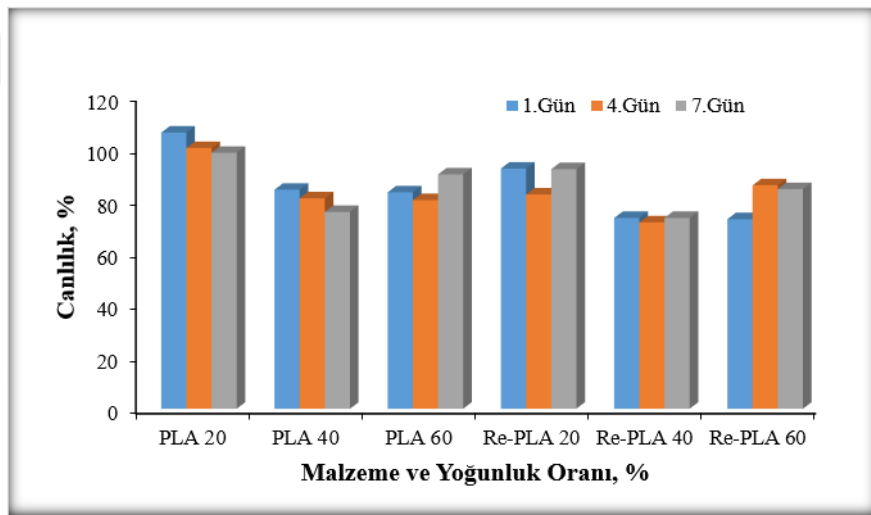
Şekil 4.31: (a) Test öncesi ve (b) 24 saat test sonrası agar petri kaplarında *S. aureus* kolonilerinin görseli.

Antibakteriyel aktivite, değişik hücre yüzey karakteristik özelliklerinden kaynaklı gram-negatif ve gram-pozitif bakterilerin arasında farklılık gösteren süreç oldukça karmaşıktır [50]. Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'deki *E.coli* ve *S. aureus* çözeltilisindeki numunelerin sonuçları incelendiğinde, hiçbir numunede anlamlı bir antibakteriyel aktivite gözlemlenmemiştir. PLA ve Re-PLA sonuçlarının aynı özellikte olduğu görülmüştür. Ancak çok az da olsa PLA ve Re-PLA'nın gram-negatif bakterilerde, gram-pozitif bakterilere kıyasla daha az antibakteriyel aktivitesinin olduğu görülmektedir. Atık filamentlerden geri dönüştürülmüş Re-PLA numunelerin de PLA numunelerle benzer sonuçlar vermesi, geri dönüşümün önemini göz önüne sermektedir. PLA polimerinin yenilenebilir kaynaklardan üretimi gerçekleştirilen

kısmı laktik asittir. Çünkü biyolojik kaynaklardan elde edilebilen laktik asit, L-laktik asit içerisinde barındırmaktadır. Mezo-izomeri, D enantiyomer ve L-enantiyomer olarak yapısal açıdan L-laktik asit vardır. Polimer zincirindeki D ve L enantiyomerlerinin oranındaki farklılıklar polimerik yapıya farklılıklar katarlar. Bu oluşumlarda polimerin istenilen performans özelliklerine sahip olarak üretilmesine olanak sağlar [2,51].

4.5.2 Sitotoksosite Test Sonuçları

Elde edilen ve 3.2.6. bölümünde anlatılan biyoyumluluk deneylerinin ölçüm sonuçlarına göre % canlılık değerleri MTT testi sonuçları sütunsal grafik olarak Şekil 4.32’de verilmiştir. % hücre canlılık formülü kullanılarak canlılık yüzdelikleri kontrol grubuna göre belirlenmiştir. Kontrol grubu hücre canlılığı %100 olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.32: MTT test sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4,32’de gösterilen sonuçlar incelendiğinde; PLA 20 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %106,147, %100,204, %98,360 olarak çıkmıştır. PLA 40 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %84,180, %80,901, %75,655 olarak çıkmıştır. PLA 60 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %83,196, %80,191, %90,061 olarak çıkmıştır. Re-PLA 20 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %92,311 , %82,377 , %92,011 olarak çıkmıştır. Re-PLA 40 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %73,360 , %71,618 , %73,360 olarak çıkmıştır. Re-PLA 60 numunesinin 1., 4. ve 7. gün sırasıyla sonuçlar %72,868 , %85,901 , %84,426 olarak çıkmıştır.

ISO10993-5 standardına göre gerçekleştirilen testlerde; hücrenin hayatta kalma oranı %70’üzerindeyse numunenin sitotoksitesi yok sayılmaktadır [52]. Sonuçlara bakıldığında atık filamentlerden geri dönüştürülmüş Re-PLA numunelerin kullanımında hücrelerin

canlılığının tüm doluluk oranlarında bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Genel olarak tüm filamentler için hücre canlılığına anlamlı bir sitotoksik etki belirlenmemiştir.

4.6 Salım Çalışması Sonuçları

Örneklerin salım profilleri PBS ortamında 168 dakika boyunca incelenmiştir. Hazırlanan numuneler canlı sistemde kullanılması hedeflendiği için çalışmalar PBS tamponu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Doluluk oranlarına göre sınıflandırılan %20 PLA, %20 Re-PLA, %40 Re-PLA ve %60 Re-PLA örneklerin PBS tamponu içerisindeki salım profilleri 1, 2, 3, 4, 5, 24, 48, 72, 96, 120, 144 ve 168 saat UV-Vis spektrofotometre cihazında 200-800 nm dalga boyu aralığında incelenmiş ve salım gözlenmemiştir. Bunun nedeni, vücutta kullanılan implant malzemelerde sıklıkla kullanılan PLA'nın hidrofobik yapılı bir polimer olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir ve PBS tamponu içerisinde çözünmez. Salım çalışmasının hiçbir saatinde salım gerçekleşmemiştir.

5. GENEL SONUÇLAR

5.1 Sonuçlar

Bu çalışma da, 3B yazıcılarla üretilen PLA ve Re-PLA malzemelerinin, üretim eksenlerinin değiştirilmesinin çekme, üç nokta eğme, yüzey pürüzlülüğü antibakteriyel, biyouyumluluk ve salım üzerindeki etkileri araştırılmış ve tespit edilen sonuçlar ışığında aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- PLA ve Re-PLA malzemelerinde XYZ-XZY, YZX-YXZ ve ZYX-ZXY ikili gruplar halinde ayrılanların hemen hemen benzer karakteristik özellik taşıdığı ortaya çıkmıştır. Bu çıkan farklılıkların temel sebebi numunelerin tabla üzerinde konumlandırılırken 90° döndürülmesi olduğu düşünülmektedir.
- Re-PLA malzemeleri PLA malzemelerine kıyasla şekil değişimine daha fazla maruz kaldığı görülmüştür. Re-PLA filamentinin geri dönüşüm işlemi sırasında kendinde bulunan özelliklerde bir veya birden fazla bozunmalar oluşabilmektedir. Filamentlerin üretimi ve geri dönüşümü sırasında ekstrüzyon kesintilerinin oluşması da düzensizliğe sebebiyet verebilmektedir. Bunların haricinde filtre kullanılmadan filament ekstrüze edilmemesi olayında mikroskobik safsızlıklar meydana gelebilmektedir. Bu malzemelerin geri dönüşüm sonucunda daha sünek olduğu tespit edilmiştir.
- PLA malzemelerinin çekme dayanımının Re-PLA malzemelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. XYZ ve XZY numunelerinin mukavemetinde bir düşüş gözlenmiş olup; diğer düzlemlerde üretilen numunelerin hemen hemen benzer özellik gösterdiği görülmüştür. PLA ile üretilen numunelerin daha gevrek yapıda olduğu ve Re-PLA ile üretilen numunelerin daha sünek yapıda olduğu görülmüştür.
- PLA ve Re-PLA'dan oluşturulmuş numunelerin ikili grupları incelendiğinde genel olarak numunelerinin mukavemetinde bir artış görülmüş olup; ZXY-ZYX ikili gruplarında üretilen numunelerin diğer ikili gruplara kıyasla daha yüksek oranda artış görülmüştür.
- XYZ-YZX ikili grubun hem PLA hem de Re-PLA numunelerinin süneklik ve maksimum eğme dayanımı noktasından bakıldığında benzer özellik taşıdığı görülmüştür. En yüksek artış ZXY-ZYX ikili grupta elde edilmiştir.
- PLA malzemelerinin boy ve kalınlık yönlerindeki benzer eksenler arasında fazla yüzey pürüzlülüğü değerinin değişmediği ancak en yönünde bu değerlerin farklı olduğu görülmüştür.

- 3B ile üretilen kafes yapılarda, üretilcek parçanın üretim platformu üzerindeki konumu da mekanik özellikleri etkilemektedir.
- Re-PLA malzemelerinin boy ve kalınlık yönlerindeki benzer eksenler arasında fazla yüzey pürüzlülüğü değerinin değişmediği ancak en yönünde bu değerlerin farklı olduğu görülmüştür.
- Re-PLA malzemelerinin PLA malzemelerine göre daha düzgün kırıldığı tespit edilmiştir. Bu düzgün yüzey kırılmasının sebebi ise malzemenin süneklik oranıyla orantılı olduğu düşünülmektedir.
- Hem PLA hem de Re-PLA numunelerinde; XYZ-YXZ, XZY-YZX ve ZXY-ZYX ikili grupların deney sonuçlarında Ra değerleri bakımından karakteristiklerinin eş olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değerleri düşük olan malzemelerin daha iyi mekanik özellikler gösterirken; daha yüksek yüzey pürüzlülüğü içeren malzemelere göre daha düşük mekanik özellikler göstermektedir.
- Üretim yönü parametresi numunelerinin çekme mukavemetini, eğme dayanımını ve kırılma davranışlarını etkilediği görülmüştür. Bunun sebebi ise; dolgu üretim açısının çekme ve eğme testi yüküne dik olması nedeniyle açıklanmaktadır. Üretim yönü belli bir dayanım sonrası baskı çizgileri yönünde uzama ile kırılmaya yol açmaktadır.
- PLA malzemelerinin kırık yüzeylerinde plastik deformasyonunu işaret eden kaba ve pürüzlü yüzeyler görülmüştür. Re-PLA malzemelerinde ise iki fazlı (yarı kristalin) bir yapı görülmüştür.
- SEM görüntülerinde Re-PLA numunelerin PLA numunelere kıyasla pürüzlü bölgeler ve çatlakların fazlaca ihtiva ettiği görülmektedir. Bu bölgeler, testler sırasında üretilen numunelerin mekanik davranışlarını olumsuz yönde etkilemiştir.
- SEM görüntülerinde filamentin iki parçaya bölündüğü kısımlarda değişik oranlarda birkaç boşluk olduğu görüntülenmiştir. Re-PLA filamentinin ikiye bölünen kısmından alınan görüntülerde düzensizlikler ve büyük boşlukların oluştuğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ise; geri dönüşüm işleminden sonra termal bozunmaya ile ilişkin olarak polimer yüzeylerinde kırılmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- PLA ve Re-PLA malzemelerinin antibakteriyel açıdan herhangi bir farklılıklarının olmadığı görülmüştür.
- PLA ve Re-PLA malzemelerinin her ikisinin de biyouyumlu olduğu tespit edilmiştir. Fakat sonuçlar detaylı incelendiğinde PLA malzemelerinin Re-PLA malzemelerine göre biyouyumluluğun daha yüksek olduğu görülmüştür.

- PLA %20 ve Re-PLA %20 %40 ve %60 doluluk oranlarına sahip numunelerde salım gözlenmemiştir.
- Sonuçlar doğrultusunda; Re-PLA malzemesinin desteklenebilirliği hakkında olumlu yönde fikir oluşturulmuş ve bu neticede atık PLA malzemesinden ötürü polimer atıkların israfını önlenebileceği anlaşılmıştır.
- Yapılan çalışma ile hedeflenen son yıllarda petrol kökenli biyobozunur polimerler yerine PLA gibi tamamen yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyo polimerleri ön plana çıkartmaktır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmanın, PLA ve Re-PLA malzemelerinin mekanik ve biyo özellikleri üzerine yapılacak olan çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Ayrıca üretilen polimer malzemelerinin mekanik özellikleri ve biyoyumluluğunu tam olarak anlamak için daha fazla test ve çalışmaya ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın devamı olarak aşağıda yazılı olanların yapılması tavsiye edilir:

- Farklı doluluk oranlarının ve farklı içi dolgu desenlerinin PLA ve Re-PLA malzemeleri üzerine çalışmalar yapılabilir.
- Basma, sertlik ve aşınma gibi özelliklerinin incelenmesi üzerine detaylı çalışmalar yapılabilir.
- Farklı polimerik malzemeler kullanılarak geri dönüşümün mekanik ve biyo özellikleri üzerine araştırma yapılabilir.
- İleri imalat yöntemleri kullanılarak üretim işlemleri gerçekleştirilebilir ve bu bağlamda mekanik ve biyo özellikleri incelenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] C. Özbay, Polilaktik asitin mekanik özelliklerinin modifiye edilmiş doğal kauçuk ile iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi, 2019. <http://acikerisim.btu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12885/172> (accessed February 8, 2024).
- [2] İ. Üner, E.D. Koçak, Poli (laktik asit)'in kullanım alanları ve nano lif üretimdeki uygulamaları, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 11 (2012) 79–88.
- [3] H.B. Koç, Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılmak Üzere Geri Dönüştürülmüş PLA Filamentle Basılan Parçaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, 2022. <https://search.proquest.com/openview/11e4620656df20a0761461db225a257a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y> (accessed February 8, 2024).
- [4] G. Şahin, 3 Boyutlu yazıcılarda kullanılan poli (Laktik asit) ve kompozit filamentlerinin mekanik ve baskı özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trakya Üniversitesi, 2021. <https://dspace.trakya.edu.tr/xmlui/handle/trakya/7909> (accessed February 8, 2024).
- [5] Ş. Güven, Biyouyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2 (2014) 303–311.
- [6] Z.D. Çırak, D.B. Yakıncı, Tıbbi uygulamalarda kullanılan biyouyumlu biyomalzemeler, İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi 8 (2020) 515–526.
- [7] S. Aydın, Biyopolimerler ve kullanım alanları, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [8] H. Evlen, M.A. Özdemir, A. Çalışkan, Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri, Politeknik Dergisi 22 (2019) 1031–1037. <https://doi.org/10.2339/politeknik.426413>.
- [9] Z. Dizdar, Poli (laktik asit) esaslı filmlerin ısı ve basınç yardımıyla kendine ve etilen vinil alkol kopolimerine yapışma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, 2012. <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11493/15515/301628.pdf?sequence=1> (accessed February 8, 2024).
- [10] A.B.H. Yoruç, V. Uğraşkan, Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 17 (2017) 318–337.
- [11] Ş. Kemaloğlu Doğan, Biyomalzeme olarak kullanılabilecek poli (Laktik Asit)/poliüretan polimer karışımları, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014. <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11493/15425/360869.pdf?sequence=1> (accessed February 8, 2024).
- [12] H.İ. Özer, Polilaktik asit (PLA) esaslı farklı filamentlerle biriktirilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2022.
- [13] M.Y. Solmaz, E. Çelik, 3 Boyutlu Yazıcı Kullanılarak Üretilen Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Basma Yüğü Altındaki Performanslarının Araştırılması, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 30 (2018) 277–286.
- [14] J.E. Heer, D.J. Hagerty, Handbook of solid waste disposal: materials and energy recovery, Van Nostrand Reinhold, 1975.
- [15] A. Güney, E.A. Yüce, O.M. Kangal, Plastik atıkların geri kazanımına yönelik uygun flotasyon proseslerinin geliştirilmesi, İTÜ Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Müh. Bölümü, TÜBİTAK MAG, 1001Araştırma Projesi, Proje No:108M042, Aralık (2010).
- [16] B.S. Elmas, Üç boyutlu (3D) yazıcıda üretilen polilaktik asit (pla) numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

- Kocaeli Üniversitesi, 2021. <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/18016> (accessed February 8, 2024).
- [17] U. Çifçi, A. Özkan, Ç. Taşdemirci, Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Hızlı Prototip Uygulamaları için Farklı Materyaller Aracılığıyla Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 7 (2019) 1627–1643.
- [18] B. Tuna, Geri dönüştürülmüş PLA'nın özelliklerinin reaktif harmanlama ile zincir uzatıcılar kullanılarak geliştirilmesi, Master's Thesis, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013. <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11493/15326/335448.pdf?sequence=1> (accessed February 8, 2024).
- [19] Ö. Karabıyık, K. Apak, Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemesinden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi* 13 (2021) 62–68.
- [20] F. Başbuğ, Mekanik alın birleştirilmiş kompozit plakaların üç nokta eğilme testleri ile mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, 2012. <https://gcris.pau.edu.tr/handle/11499/1662> (accessed February 10, 2024).
- [21] N.B. Ullen, S.M.A. Hasak, M.H. Dirikolu, Factors influencing the machinability during turning sinter-hardened Cu-Ni-Mo based steel: Dependency on cutting speed, feed rate and cutting depth, *Journal of Engineering Research* 8 (2020).
- [22] M. Demirel, Biyomalzemelerin gelişimine üretim yöntemlerinin etkisi, in: Bitirme Projesi, Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Mimarlık Mühendislik Fakültesi, 2020.
- [23] H.A. Çetindağ, İ. Toktaş, M.T. Özkan, 3 Boyutlu Baskısı Yapılacak Ankastre Kirişlerin Eşit Miktarda Filament Kullanımı İle Eğilme Mukavemetine Göre Kesit Geometrisi Optimizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 5 (2017) 466–476.
- [24] M.S. Kamer, Ş. Temiz, H. Yaykaşlı, A. Kaya, 3 boyutlu yazıcı ile farklı renklerde ve farklı dolgu desenlerinde üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 26 (2021) 829–848.
- [25] G. Erel, Polilaktik asit (PLA) matrisli nano takviyeli biyoyumlu kompozit malzeme üretimi ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, 2019.
- [26] N. Ercan, 3B eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş hücresel kafes yapılı sandviç panellerin mekanik davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Teknik Üniversitesi, 2019. <http://acikerisim.btu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12885/209> (accessed February 10, 2024).
- [27] O. Hira, Filament beslemeli 3 boyutlu yazıcılarda imalat parametrelerinin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, n.d.
- [28] İ. Küçük, Biyobozunur polilaktik asit (PLA) odun kompozitlerin bazı teknik özelliklerinin geliştirilmesi, Master's Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, n.d.
- [29] T. Uzunoğlu, PMMA/PLA esaslı biyobozunur nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 2022.
- [30] A. Aydın, Poli (D, L-laktik asit) ve *Laurus nobilis* L. ile biyobozunur polimer kompozitlerin sentezi ve antibakteriyel etkisinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2019.
- [31] O. Tatlı, H.G. Özgül, Üç boyutlu yazıcı tasarımı, imalatı ve dolgu geometrisinin mekanik özelliklere etkisi, *ICONTECH International Journal of Surveys, Engineering, Technology* (2020) 13–24.

- [32] B. Li, J. Yang, H. Gu, J. Jiang, J. Zhang, J. Sun, Surface roughness of PLA parts by FDM with chemical treatment, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2021: p. 012199. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1948/1/012199/meta> (accessed February 10, 2024).
- [33] M.C. Mat, F.R. Ramli, M.R. Alkahari, M.N. Sudin, M.F. Abdollah, S. Mat, Influence of layer thickness and infill design on the surface roughness of PLA, PETG and metal copper materials, Proc. Mech. Eng. Res. Day 7 (2020) 64–66.
- [34] R. Mihai, I.P. Florescu, V. Coroiu, A. Oancea, M. Lungu, In vitro biocompatibility testing of some synthetic polymers used for the achievement of nervous conduits, Journal of Medicine and Life 4 (2011) 250.
- [35] A.C. Pinho, A.M. Amaro, A.P. Piedade, 3D printing goes greener: Study of the properties of post-consumer recycled polymers for the manufacturing of engineering components, Waste Management 118 (2020) 426–434.
- [36] F. Decuir, K. Phelan, B.C. Hollins, Mechanical strength of 3-D printed filaments, in: 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), IEEE, 2016: pp. 47–48. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7458981/> (accessed February 8, 2024).
- [37] I. Anderson, Mechanical Properties of Specimens 3D Printed with Virgin and Recycled Polylactic Acid, 3D Printing and Additive Manufacturing 4 (2017) 110–115. <https://doi.org/10.1089/3dp.2016.0054>.
- [38] U. Mahir, Y.E. Erdoğan, Eriyik yığıma modellemesi ile üretimde takviyesiz ve takviyeli PLA kullanımının mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Journal of the Institute of Science and Technology 10 (2020) 2800–2808.
- [39] O. Gülcan, Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etki Eden Faktörler, Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 19 (2021) 64–81.
- [40] I. Maskery, A.O. Aremu, L. Parry, R.D. Wildman, C.J. Tuck, I.A. Ashcroft, Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading, Materials & Design 155 (2018) 220–232.
- [41] P. Delroisse, P.J. Jacques, E. Maire, O. Rigo, A. Simar, Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting, Scripta Materialia 141 (2017) 32–35.
- [42] A. Ji, S. Zhang, S. Bhagia, C.G. Yoo, A.J. Ragauskas, 3D printing of biomass-derived composites: Application and characterization approaches, RSC Advances 10 (2020) 21698–21723.
- [43] M. Bembenek, L. Kowalski, A. Kosoń-Schab, Research on the influence of processing parameters on the specific tensile strength of FDM additive manufactured PET-G and PLA materials, Polymers 14 (2022) 2446.
- [44] M.-R. Condruz, A. Paraschiv, T.-A. Badea, D. Useriu, T.-F. Frigioescu, G. Badea, G. Cican, A Study on Mechanical Properties of Low-Cost Thermoplastic-Based Materials for Material Extrusion Additive Manufacturing, Polymers 15 (2023) 2981.
- [45] V. Weißmann, P. Drescher, R. Bader, H. Seitz, H. Hansmann, N. Laufer, Comparison of single Ti6Al4V struts made using selective laser melting and electron beam melting subject to part orientation, Metals 7 (2017) 91.
- [46] Ö. Erkan, B. Isık, 0/90 elyaf oryantasyonuna sahip camelyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin farklı kesme yönlerinde frezelenmesinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi, in: 1st National Symposium on Machining, 2009. https://www.researchgate.net/profile/Omer-Erkan-2/publication/265504325_090lyaf_Oryantasyonuna_Sahip_Camelyaf_Takviyeli_Polimer_Kompozit_Malzemenin_Farkli_Kesme_Yonlerinde_Frezelenmesinin_Yuzey_Puruzlulugune_Etkilerinin_Incelenmesi/links/541057f60cf2df04e75d3f57/0-90lyaf-Oryantasyonuna-Sahip-Camelyaf-Takviyeli-Polimer-Kompozit-Malzemenin-Farkli-

- Kesme-Yoenlerinde-Frezelenmesinin-Yuezey-Pueruezluelueguene-Etkilerinin-Incelenmesi.pdf (accessed February 8, 2024).
- [47] B.S. Elmas, Üç boyutlu (3D) yazıcıda üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021. <http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/18016> (accessed February 8, 2024).
- [48] K. Chawla, R. Singh, J. Singh, On recyclability of thermoplastic ABS polymer as fused filament for FDM technique of additive manufacturing, *World Journal of Engineering* 19 (2022) 352–360.
- [49] S. Yaman, 3B yazıcı ile üretilen PLA40/ABS60 malzemesinin termal ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, 2018. <https://platform.almanhal.com/Details/Thesis/2000170111?ID=4-2000170111> (accessed February 8, 2024).
- [50] N. Gürler, F.C. Yazdıç, 3-APTMS Takviyeli Kitosan-Polivinil Alkol Harman Filmlerinin Fiziksel ve Antibakteriyel Aktiviteleri, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 26 (2023) 154–165.
- [51] F.S. Senatov, K.V. Niaza, M.Y. Zadorozhnyy, A.V. Maksimkin, S.D. Kaloshkin, Y.Z. Estrin, Mechanical properties and shape memory effect of 3D-printed PLA-based porous scaffolds, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 57 (2016) 139–148.
- [52] R.F. Wallin, E.F. Arscott, A practical guide to ISO 10993-5: Cytotoxicity, *Medical Device and Diagnostic Industry* 20 (1998) 96–98.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Münife DEMİREL

Eğitim Bilgileri

Lisans : İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi : Türkçe - Anadili
İngilizce - İyi

