T.C.
İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GERİ DÖNÜŞÜM İŞLEMİNİN FARKLI BİYOPOLİMERİK MALZEMELERİN KIRILMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus KARAYER

İSTANBUL, 2025

T.C.
İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GERİ DÖNÜŞÜM İŞLEMİNİN FARKLI BİYOPOLİMERİK MALZEMELERİN KIRILMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus KARAYER

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
Jüri Üyesi: Prof. Dr. Ertan GÜDEKLİ
Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Diyadin CAN

İSTANBUL, 2025

T.C.

İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

TEZ ONAY BELGESİ

Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı 22242401003 numaralı yüksek lisans öğrencisi Yunus KARAYER'in **"Geri Dönüşüm İşleminin Farklı Biyopolimerik Malzemelerin Kırılma Davranışları Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi ve Analizi"** adlı tez çalışması, Enstitümüz Yönetim Kurulunun 22/07/2025 tarih ve 2025/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 01/08/2025

Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ertan GÜDEKLİ
Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Diyadin CAN
Jüri Üyesi

DESTEKLEYEN KURUM VE KURULUŞLAR

Bu tez çalışması İYYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje **No: İYYÜ-BAP-AP-2025-22**

ETİK BEYAN

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

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

01/08/2025

Yunus KARAYER

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezi, akademik bir zorunluluktan ziyade; zamanla sınırlı olmayan bir düşünce yolculuğunun, mekânlardan bağımsız bir arayışın ve bilgiyi çoğaltmaktan daha çok derinleştirmeye yönelen bir niyetin ürünüdür. Her satırı, geleceğe hoş bir sadâ bırakma arzusuyla sessizce örülen emeğin izlerini taşır.

Yüksek lisans öğrenimin başından tez çalışma süreci boyunca; değerli fikirleri ile beni yönlendiren, sabrını, ilgi ve desteğini her daim yanımda hissettiğim, birlikte çalışmaktan onur duyduğum çok değerli hocam ve danışmanım süreci aydınlatan meşalem sayın Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY'a saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının matematiksel değerlendirmesi ve analizinin ortaya koyulmasını mümkün kılan sayın Dr. Öğr. Üyesi Diyadin CAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasınındaki mevcut mekanik testlerin yapılmasını mümkün kılan Öğr. Gör. Yunus Emre TOĞAR'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecinde yardım ve desteğini esirgemeyen kıymetli Öğr. Gör. Gökçe KOÇ'a, Arş. Gör. Fatma Zehra KÖSE ve Arş. Gör. Rezzan YARDIMCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, yalnızca bilgiyi sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sorgulamayı teşvik eden ismini zikredemediğim hocalarıma; desteğiyle görünmez bağlar kuran dostlarıma ve öğrenmenin sınırlarını genişleten tüm karşılaşmalara içtenlikle teşekkür ederim.

Öğrenim süresi boyunca da mücadeleye devam etmemi sağlayan, gecemin karanlığına ışık, henüz yazılmamış satırlara ilham olan sevgili eşim ve oğlumuza kalbî şükranlarımı sunarım.

Yunus KARAYER

İstanbul, 2025

Aileme,

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DESTEKLEYEN KURUM VE KURULUŞLAR ..... **ii**
ETİK BEYAN ..... **iii**
ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **i**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **iii**
TABLO LİSTESİ **7**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ **8**
ÖZET **9**
ABSTRACT **11**
1. GİRİŞ **13**
2. GENEL BİLGİLER **18**
2.1 Literatür Araştırması 18
2.2 Biyomalzemeler 32
2.2.1 Metalik Biyomalzemeler 34
2.2.2 Seramik Biyomalzemeler 35
2.2.3 Kompozit Biyomalzemeler 36
2.2.4 Polimerik Biyomalzemeler 37
2.3 Polilaktik Asit (PLA) 37
2.4 Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit (Re-PLA) 38
2.5 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) 40
2.6 Geri Dönüştürülmüş Akrilonitril Bütadien Stiren (Re-ABS) 41
2.7 Üç Boyutlu (3B) Yazıcılar 41
2.8 Üç Nokta Eğme Deneyi 42
2.9 Yüzey Pürüzlülüğü 44
3. MATERYAL VE YÖNTEM **45**
3.1 Kullanılan Malzeme ve 3B Yazıcı Özellikleri 46
3.2 Geri Dönüştürme İşlemi 48
3.3 Sterilizasyon İşlemi 48
3.4 Üç Nokta Eğme Testi 49
3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 49
3.6 SEM Analizi 50
3.7 Matematiksel Modelleme 51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA **55**

4.1 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları 55
4.1.1 PLA Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları 55
4.1.2 ABS Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları 68
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 83
4.2.1 PLA Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 83
4.2.2 ABS yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 93
4.3 SEM Analizi 102
4.3.1 PLA Malzemelerinin SEM Analizi 103
4.3.2 ABS Numunelerinin SEM Analizi 110
4.4 Matematiksel Analiz 117
4.4.1 Matematiksel Modelleme İşlemleri 117
4.4.2 Matematiksel Model Performans Kriterleri 119
4.4.3 PLA Numunelerine Ait Matematiksel Analiz 119
4.4.3.1 Eğilme dayanımı modelleri……..…..…….119
4.4.3.2 Yüzey pürüzlülüğü modelleri…….….120
4.4.3.3 Matematiksel model performans kriterleri…….….121
4.4.4 ABS Numunelerine Ait Matematiksel Analiz 126
4.4.3.1 Eğilme dayanımı modelleri……..…..…….126
4.4.3.2 Yüzey pürüzlülüğü modelleri…….….127
4.4.3.3 Matematiksel model performans kriterleri…….….128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 135
5.1 Sonuçlar 135
5.2 Öneriler 138
EKLER 139
KAYNAKLAR 143
ÖZGEÇMİŞ 149

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Balık kılçığı diyagramı, yazdırma parametrelerinin parça mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir [29]. 19
Şekil 2.2: Hanon ve diğ. çalışmasında kullanılan numuneler (a) üretim yönleri ve (b) katman kalınlığı ve deseni. 22
Şekil 2.3: Hanon ve diğ. deney numunelerinin tasarımları. 24
Şekil 2.4: Biyomalzemelerin insan vücudu üzerinde kullanım alanları [37]. 33
Şekil 2.5: Biyomalzeme çeşitleri. 34
Şekil 2.6: Metalik biyomalzemeler. 35
Şekil 2.7: Seramik biyomalzemeler. 36
Şekil 2.8: Kompozit biyomalzemeler. 36
Şekil 2.9: Polimerik biyomalzemeler 37
Şekil 2.10: PLA sentez şeması [41]. 38
Şekil 2.11: PLA malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örnekleri. 38
Şekil 2.12: ABS malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örneği. 41
Şekil 2.13: Üç nokta eğme deneyine ait şematik gösterim. 43
Şekil 2.14: Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rt ve Rz ölçümü. 44
Şekil 3.1: Polimer malzemelerin yapısal (amorf, yarı kristal) ve kullanım alanlarının şematik gösterimi [60]. 46
Şekil 3.2: Creality markalı ve CR 6 SE modelli üç boyutlu yazıcı. 47
Şekil 3.3: Numunenin teknik çizimi. 47
Şekil 3.4: Sterilizasyon cihazı ve numune örneği. 49
Şekil 3.5: Üç nokta eğme cihaz görseli. 49
Şekil 3.6: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm düzeneği. 50
Şekil 3.7: SEM cihazı. 51
Şekil 3.8: Değişkenlerin korelasyon ilişkisi. 52
Şekil 4.1: Üç nokta eğme testi. 55
Şekil 4.2: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 57
Şekil 4.3: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 59
Şekil 4.4: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 60
Şekil 4.5: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 61
Şekil 4.6: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri. 63
Şekil 4.7: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri. 63

Şekil 4.8: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri. 66
Şekil 4.9: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri. 67
Şekil 4.10: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 71
Şekil 4.11: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 72
Şekil 4.12: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 73
Şekil 4.13: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları. 75
Şekil 4.14: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri. 77
Şekil 4.15: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri. 77
Şekil 4.16: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri. 80
Şekil 4.17: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri. 81
Şekil 4.18: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 85
Şekil 4.19: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 86
Şekil 4.20: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 88
Şekil 4.21: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 90
Şekil 4.22: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri. 91
Şekil 4.23: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri. 92
Şekil 4.24: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 95
Şekil 4.25: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re- ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 96

Şekil 4.26: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 98
Şekil 4.27: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları. 99
Şekil 4.28: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri. 101
Şekil 4.29: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri. 101
Şekil 4.30: %25 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü. 103
Şekil 4.31: %50 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü. 104
Şekil 4.32: %75 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü. 104
Şekil 4.33: %25 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 105
Şekil 4.34: %50 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 105
Şekil 4.35: %75 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 106
Şekil 4.36: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü. 106
Şekil 4.37: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü. 107
Şekil 4.38: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü. 107
Şekil 4.39: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 108
Şekil 4.40: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 108
Şekil 4.41: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü. 109
Şekil 4.42: %25 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü. 110
Şekil 4.43: %50 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü. 111
Şekil 4.44: %75 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü. 111
Şekil 4.45: %25 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 112
Şekil 4.46: %50 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 112
Şekil 4.47: %75 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 113
Şekil 4.48: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü. 113
Şekil 4.49: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü. 114
Şekil 4.50: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü. 114
Şekil 4.51: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 115
Şekil 4.52: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 115
Şekil 4.53: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü. 116
Şekil 4.54: Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabit tutulduğunda, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin eğilme dayanımı (σ_{max}) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili. 122
Şekil 4.55: Üretim açısı Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabitken, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili. 123
Şekil 4.56: σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması. 124
Şekil 4.57: Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması. 124
Şekil 4.58: Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabit tutulduğunda, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin eğilme dayanımı (σ_{max}) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili. 129

Şekil 4.59: Üretim açısı Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabitken, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili. 130
Şekil 4.60: σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması. 130
Şekil 4.61: Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması. Açıklayıcılık (R^2) düşerken, hata metrikleri görece düşük kalmaktadır. 131
Şekil 4.62: Oluşturulan regresyon modellerinin Python/Colab ortamında performans çıktıları (R^2, MAE, RMSE). (Grafiklerle desteklenen değerlere doğrudan karşılık gelen hesaplamalar bu tabloda dijital olarak sunulmuştur.) 131

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Literatür çalışmalarının tablo olarak incelenmesi 16
Tablo 2. 1: katman kalınlığı ve doluluk oranının çekme mukavemetine etkisi (PLA vs Re-PLA) 32
Tablo 3. 1: PLA numune üretim parametreleri 47
Tablo 3. 2: ABS numune üretim parametreleri. 48
Tablo 4.1: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları. 56
Tablo 4.2: PLA grubu numunelerin eğilme dayanımı ve % değişim oranları. 56
Tablo 4.3: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait şekil deformasyonu test sonuçları. 65
Tablo 4.4: PLA grubu numunelerin şekil deformasyonu ve % değişim oranları. 66
Tablo 4.5: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları. 69
Tablo 4.6: ABS grubu numunelerin eğilme dayanımı ve % değişim oranları. 70
Tablo 4.7: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait şekil deformasyonu test sonuçları. 79
Tablo 4.8: ABS grubu numunelerin şekil deformasyonu ve % değişim oranları. 80
Tablo 4.9: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları. 83
Tablo 4.10: PLA grubu numunelerin yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri ve % değişim oranları. 84
Tablo 4.11: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları. 93
Tablo 4.12: ABS grubu numunelerin yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri ve % değişim oranları. 94
Tablo 4.13: Eğilme Dayanımı Modelleri için performans metrikleri. 121
Tablo 4.14: Yüzey Pürüzlülüğü Modelleri için performans metrikleri. 121
Tablo 4.15: Eğilme Dayanımı Modelleri için performans metrikleri. 128
Tablo 4.14: Yüzey Pürüzlülüğü Modelleri için performans metrikleri. 129

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
σ	: Gerilme
µm	: Mikrometre
Ra	: Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Mpa	: Megapaskal

Kısaltmalar	Açıklama
3B	: Üç Boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadiyen Stiren
ASTM	: Amerikan Malzeme ve Testler Derneği
FDM	: Ergitilmiş Katman Modelleme
PET	: Polietilen Teraftalat
PLA	: Polilaktik Asit
PLACF	: Karbon Fiber Takviyeli Polilaktik Asit
Re-ABS	: Geri Dönüştürülmüş Akrilonitril Bütadiyen Stiren
Re-PLA	: Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit

ÖZET

GERİ DÖNÜŞÜM İŞLEMLERİNİN FARKLI BİYOPOLİMERİK MALZEMELERİN KIRILMA DAVRANIŞLARI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ VE ANALİZİ

YUNUS KARAYER

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi

Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
Ağustos 2025, 156 sayfa

3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle yaygınlaşan katmanlı üretim, havacılık, sağlık ve eğitim gibi birçok alanda tercih edilmekte ve diğer üretim yöntemleriyle imalatı güç olan karmaşık tasarımlı ürünlerin hızlı ve kolay şekilde üretilmesine imkân sağlamaktadır. Ancak üretim sırasında oluşan hatalı parçalar, yeniden kullanılamadıkları için hem hammadde israfına hem de çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bu nedenle, özellikle Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) gibi polimer atıkların geri dönüştürülerek yeniden kullanılması, çevresel ve ekonomik açıdan fayda sağlayacaktır. Ayrıca, geri dönüştürülmüş malzemelerin kırılma davranışlarının incelenmesi, malzeme performansı ve yapısal güvenilirlik açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, biyobozunur özellik gösteren PLA ile geleneksel bir termoplastik olan ABS malzemeleri, hem orijinal hem de geri dönüştürülmüş halleriyle değerlendirilmiştir. Ayrıca, malzemeler üzerinde sterilizasyonun etkilerini araştırmak amacıyla basınç ve buhar sterilizasyon yöntemleri uygulanmıştır. Numuneler, Ergitilmiş Yığma Modellemesi (FDM) tipi 3B yazıcı kullanılarak belirlenen üretim parametreleri altında üretilmiştir. Deneysel çalışmalarda, doluluk oranı (%25, %50, %75), katman kalınlığı (0,15 mm, 0,20 mm, 0,25 mm) ve üretim açısı (0°, 45°, 90°) olmak üzere üç farklı üretim parametresi kullanılmıştır. Üretilen numuneler üzerinde üç nokta eğme testleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilerek bu parametrelerin mekanik ve yüzey özelliklerine etkileri analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre doluluk oranı, her iki malzeme grubunda da (PLA ve ABS) eğilme dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon açısından en etkili üretim parametresi olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü sonuçlarında doluluk oranı artışı yüzey kalitesini iyileştirirken, üretim açısı artışı pürüzlülüğü olumsuz etkilemiştir. Deformasyon davranışında ise geri dönüşüm ve sterilizasyonun içyapıdaki düzensizliklere bağlı olarak malzemelerde beklenmedik etkiler oluşturduğu görülmüştür. SEM analizleri, PLA numunelerinde daha homojen ve gevrek yapılar ortaya koyarken, ABS numunelerinde gözeneklilik ve sünek kırılma karakteri belirginleşmiş; geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş numunelerde ise mikro yapısal bozulmalar ve yüzey düzensizlikleri artmıştır.

Elde edilen deneysel veriler, doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı gibi üretim parametreleri ile eğilme dayanımı (σmax) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) arasındaki ilişkileri açıklamak üzere çok değişkenli ikinci dereceden regresyon modelleri ile matematiksel olarak

modellenmiştir. Özellikle PLA ve ABS varyantları için geliştirilen modeller, yüksek açıklayıcılık seviyeleri ($R2 > 0.85$) ile mekanik özellikleri başarıyla tahmin etmiştir. Buna karşılık, yüzey pürüzlülüğü modelleri daha düşük açıklayıcılığa sahip olmuş, bu da yüzey kalitesinin üretim sürecindeki dışsal faktörlerden daha fazla etkilendiğini göstermiştir.

***Anahtar Kelimeler**: PLA, ABS, Geri dönüşüm, Sterilizasyon, Matematiksel modelleme.*

ABSTRACT

Examination and Analysis of the Effect of Recycling Process on the Fracture Behavior of Different Biopolymeric Materials

Yunus KARAYER

Istanbul Yeni Yuzyil University, Science and Engineering Institute
Master Thesis, Biomedical Engineering Department
Supervisor: Assist. Dr. Şakir ALTINSOY
August 2025, 156 pages

Additive manufacturing, which has become widespread through 3D printing technology, is preferred in many fields such as aerospace, healthcare, and education, as it allows for the rapid and easy production of complexly designed products that are difficult to manufacture using other production methods. However, defective parts generated during production cannot be reused, leading to both raw material waste and environmental pollution. Therefore, recycling and reusing polymer waste, particularly polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS), can offer environmental and economic benefits. Furthermore, examining the fracture behavior of recycled materials is crucial for material performance and structural reliability.

In this thesis, the biodegradable PLA and the conventional thermoplastic ABS were evaluated in both their original and recycled forms. Pressure and steam sterilization methods were also applied to investigate the effects of sterilization on the materials. Samples were produced using a Fused Deposition Modeling (FDM)-based 3D printer under specified production parameters. Three different production parameters were used in the experimental studies: infill density (25%, 50%, 75%), layer thickness (0.15 mm, 0.20 mm, 0.25 mm), and printing orientation (0°, 45°, 90°). Three-point bending tests, surface roughness measurements, and Scanning Electron Microscope (SEM) analyses were performed on the produced samples to analyze the effects of these parameters on their mechanical and surface properties.

According to the results, infill density was the most effective production parameter in terms of flexural strength, surface roughness, and deformation in both material groups (PLA and ABS). In the surface roughness results, increasing infill density improved surface quality, while increasing printing orientation negatively affected roughness. Regarding deformation behavior, recycling and sterilization were observed to have unexpected effects on the materials due to irregularities in the internal structure. SEM analyses revealed more homogeneous and brittle structures in PLA samples, while porosity and ductile fracture characteristics were more pronounced in ABS samples. Moreover, microstructural deterioration and surface irregularities were found to increase in recycled and sterilized samples.

The experimental data were mathematically modeled using multivariate second-degree regression models to explain the relationship between production parameters (infill density, layer thickness, and printing orientation) and mechanical properties such as flexural strength (σ_{max}) and surface roughness (Ra). Especially for PLA and ABS variants, the developed models achieved high explanatory power ($R^2 > 0.85$) in predicting mechanical performance.

However, surface roughness models showed lower accuracy, suggesting that surface quality is more sensitive to external factors during the production process.

Keywords: *PLA, ABS, Recycling, Sterilization, Mathematical modeling.*

1. GİRİŞ

Günlük yaşamda kullandığımız araç-gereçler, tüketim alışkanlıklarımız ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak sürekli bir değişim ve gelişim içerisindedir. Bu dönüşüm süreci, beraberinde doğayı ve geleceğimizi tehdit eden çevresel sorunları da getirmektedir. Özellikle hızlı kentleşme, artan plastik tüketimi ve teknolojiye bağımlı üretim süreçleri, çevre kirliliğini ve kaynak israfını önemli ölçüde artırmaktadır. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin çevreyle daha uyumlu hâle getirilmesi ve sürdürülebilir kaynaklara yönelinmesi, küresel düzeyde önemli bir gereklilik hâline gelmiştir.

Son yıllarda gelişen üretim teknolojileri arasında yer alan üç boyutlu (3B) yazıcılar, hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte yaygınlaşmıştır. 3B yazıcılarda en çok tercih edilen malzeme türlerinden biri polimer esaslı filamentlerdir. Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi polimerler, farklı mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde hem endüstriyel hem de biyomedikal uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. PLA, biyolojik olarak parçalanabilir olması ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi sayesinde sürdürülebilir üretim süreçleri açısından oldukça avantajlıdır. Özellikle 3B baskı teknolojileri, tıbbi malzemeler, geçici implantlar, doku mühendisliği iskeleleri ve biyolojik olarak çözünebilen ilaç salım sistemlerinde ön plana çıkmaktadır. Çevre dostu yapısı, PLA'yı yalnızca sürdürülebilirlik açısından değil, aynı zamanda doğrudan biyomedikal uygulamalarda kullanım açısından da cazip kılmaktadır. Öte yandan, ABS malzemesi yüksek darbe dayanımı, sertlik ve işlenebilirlik gibi özellikleriyle otomotiv sektörü, elektronik ürünler, oyuncaklar ve ev aletleri gibi alanlarda geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Ayrıca cerrahi eğitim modelleri, medikal cihaz prototipleme ve dış muhafaza üretimi gibi dolaylı biyomedikal uygulamalarda da tercih edilmektedir. Bu yönüyle PLA çevre ve biyouyumluluk açısından ön plana çıkarken, ABS ise mekanik mukavemeti nedeniyle öne çıkmaktadır [1–5].

3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeler genellikle polimer esaslıdır. PLA ve ABS'nin yanı sıra Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG), Polietilen Tereftalat (PET), Yüksek Etkili Polistiren (HIPS), Polipropilen (PP), Polikarbonat (PC), Polivinil Alkol (PVA), Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) ve Termoplastik Poliüretan (TPU) gibi çeşitli polimer filamentler de farklı uygulamalara yönelik olarak tercih edilmektedir. Günümüzde petrol bazlı polimerler, düşük maliyetleri ve işlenebilirlikleri

nedeniyle hâlâ yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu malzemelerin doğada bozunmaması ciddi çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu bağlamda biyopolimerler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilebilme özellikleriyle sürdürülebilir üretim için önemli bir alternatif sunmaktadır.

3B yazıcı teknolojisinin yaygınlaşmasıyla birlikte oluşan üretim atıkları da önemli bir sorun hâline gelmiştir. Özellikle destekli baskı sonrası ayrılan destek yapıları veya hatalı çıkan parçalar, tekrar kullanılamamaları nedeniyle atık hâline gelmekte ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kaygı uyandırmaktadır. Plastics Europe (2022) raporuna göre sadece Avrupa'da yılda yaklaşık 20 bin ton 3B yazıcı atığı oluşmaktadır. Bu durum, 3B yazıcılarda kullanılan malzemelerin geri dönüşümünü ve yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır [6].

Atık filamentlerin geri dönüştürülmesi, çevresel zararı azaltmanın yanı sıra ekonomik açıdan da avantaj sağlamaktadır. Geri dönüşüm sürecinde atıklar toplanmakta, parçalanmakta, yeniden karıştırılıp homojenleştirilerek yeniden filament hâline getirilmektedir. Böylece hem hammadde kaybı önlenmekte hem de üretim maliyetleri azaltılmaktadır. Ancak, özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılacak parçaların sterilizasyon gerekliliği, bu geri dönüştürülmüş malzemelerin performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktördür. Biyomalzemeler, implantlar, cerrahi ekipmanlar ve diğer tıbbi cihazlar sterilizasyon işlemine tabi tutulmak zorundadır. Sterilizasyon işleminin polimer malzemeler üzerinde fiziksel ve mekanik etkiler oluşturabileceği bilinmektedir. Bu bağlamda, 3B yazıcılarda geri dönüştürülmüş PLA ve ABS malzemelerle üretilen prototiplerin sterilizasyon sonrası mekanik dayanımlarının değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak literatürde bu alanda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yalnızca PLA malzemesine odaklanmakta, ABS gibi mühendislik polimerlerinin sterilizasyon sonrası davranışları ise çoğu zaman göz ardı edilmektedir. Ayrıca, üretim parametreleri ile sterilizasyon etkilerini birlikte ele alan çok değişkenli analizlerin azlığı, literatürdeki önemli bir boşluğu ortaya koymaktadır. Tablo 1.1'de literatürde bulunan çalışmalara ait çalışma detayları ve bu tez çalışmasına ait bilgiler sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, hem orijinal hem de geri dönüştürülmüş Polilaktik Asit (PLA) ve Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzemeler kullanılarak, 3B yazıcı ile farklı üretim parametrelerinde üretilen numunelerin mekanik performansları kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı temel

üretim parametreleri olarak belirlenmiş; bu parametrelerin numunelerin eğilme dayanımı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Ayrıca, kırılma yüzeylerinin morfolojik karakterizasyonunu yapmak amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiş ve malzemelerin kırılma türleri mikroyapı düzeyinde analiz edilmiştir. Deneysel veriler, istatistiksel analizlere dayalı matematiksel modellemeler aracılığıyla teorik olarak desteklenmiş; bu sayede deneysel ve teorik bulgular karşılaştırılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları, en uygun üretim parametrelerinin belirlenmesini sağlamış ve deney sayısının azaltılmasına yönelik önemli bir katkı sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, mevcut literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve bu çalışmadan elde edilen bulgular, literatüre özgün katkılar sağlayacak biçimde yorumlanmıştır. Böylece, geri dönüştürülmüş polimerlerin performanslarının orijinal malzemelerle karşılaştırılması mümkün hâle getirilmiş; ayrıca bu malzemelerin mühendislik ve biyomedikal uygulamalardaki potansiyel kullanım alanlarının belirlenmesine yönelik önemli çıkarımlarda bulunulmuştur.

Tablo 1.1: Literatür çalışmalarının tablo olarak incelenmesi

Ref. No	Malzeme	Yöntem	Kullanılan Parametreler	Karakterizasyon Çalışması
[7]	PLA, PLA+CF (PLA karbon fiber takviye)	3B Yazıcı	Üretim açısı	Çekme dayanımı ve kırılganlık.
[8]	PLA, Re-PLA	3B Yazıcı	Katman kalınlıkları, doluluk oranları	Darbe dayanımı, üç nokta eğme, çekme mukavemeti, SEM analizi ve yüzey gözenekliliği.
[4]	PLA, ABS	3B Yazıcı	Katman kalınlığı, dolgu oranı, duvar kalınlığı, baskı hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı.	Çekme, sıkıştırma, bükme testleri, gerilme, mukavemet ve yüzey kalitesi
[9]	PLA	3B Yazıcı, Sıkıştırma Kalıplama.	Üretim yöntemi	Çekme mukavemeti, Nem emilimi ve boşluklar.
[10]	PLA	3B Yazıcı	Katman Kalınlığı, nozul çapı, baskı hızı, doldurma oranı, katman yönelimi, baskı yönü, baskı sıcaklığı, tabla sıcaklığı.	Çekme ve basma, Young modülü, elastik limit gerilimi ve katmanlar arası boşluklar.
[11]	Çeşitli termoplastik malzemeler.	3B Yazıcı	Nozzle sıcaklığı, baskı yönelimi, katman kalınlığı, dolgu yoğunluğu, dolgu tipi	Çekme mukavemeti, mekanik davranışlar ve fiziksel özellikler.
[12]	Bakır, PLA, PTEG.	3B Yazıcı	Dolgu tasarımı, tabaka kalınlığı.	Yüzey pürüzlülüğü, Metal bakır, PLA ve PTEG kullanarak 3B yazıcının dolgu tasarımı ve tabaka kalınlığı gibi yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi.
[13]	Poli metil metakrilat (PMMA) bazlı malzemeler (Vertex Self-Curing, Palacos R+G ve NextDent C&B MFH).	3B Yazıcı	Sterilizasyon yöntemleri: etilen oksit, hidrojen peroksit gaz plazma, otoklav ve γ-ışınlama.	Eğilme mukavemeti, eğilme modülü, kırılma tokluğu, darbe dayanımı, gerilim yoğunluğu ve maksimum stres yoğunluk faktörü
[14]	Bronz/PLA kompozit.	3B Yazıcı	Baskı yönelimleri	Mekanik dayanımlar, çekme mukavemeti. Tribolojik davranış (sürtünme, aşınma derinliği, stick-slip eğilimi), yüzey pürüzlülüğü ve sertlik.
[15]	PLA	3B Yazıcı	Baskı yönelimi, üretim açısı	Çekme dayanımı ve kopma uzaması
[16]	PLA, Manyetik Demir ve Bronzefill,	3B Yazıcı	Nozul çapı, dolgu deseni, sıcaklık parametreleri, lif dolgu oranları.	Çekme, eğilme dayanımı, mekanik dayanım, süneklik. Arayüzey yapışma sorunları, metal aglomerasyonu, optik çekicilik ve SEM analizi

Tablo 1.1 (devamı): Literatür çalışmalarının tablo olarak incelenmesi

[17]	PLA, ABS	3B Yazıcı	Katman kalınlığı, süreç, sıcaklık, dolgu	Çapraz bağlanma
[18]	Re- (PLA, ABS, PET, HDPE).	3B Yazıcı	Üretim yöntemleri (FDM, HME, FPF), geri dönüşüm	Çekme dayanımı, esneklik. UV duyarlılığı ve biyobozunurluk.
[19]	PLA+CF	3B Yazıcı	Fiber içeriği, katman kalınlığı, ekstrüzyon genişliği, baskı sıcaklığı, baskı hızı.	Çekme testi, mekanik dayanım ve fiber-matris arayüzü.
[20]	PLA+CF, ABS+CF	3B Yazıcı	Isıl işlem, doluluk oranı, İç desen	Çekme davranışı ve mekanik özellikleri, çekme performansı, ara yüzey bağlanma ve gözeneklilik.
[21]	ABS	3B Yazıcı	İç desen, doluluk oranı, katman kalınlığı.	Çekme dayanımı, darbe dayanımı. Stres dağılımı, çatlak yayılmasına direnç.
[2]	PLA	3B Yazıcı	Katman kalınlığı, nozul çapı, dolgu yoğunluğu, baskı hızı, üretim yönelimi	Bükülme dayanımı ve katmanlar arası bağlanma.
[22]	PLA, PLA+CF	3B Yazıcı	Katman kalınlıkları, baskı yönleri.	Çekme dayanımı, mekanik performans, malzeme anizotropisi, boşluklar ve malzeme bağlanması.
[3]	PLA	3B Yazıcı	Dolgu oranları.	Eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve mekanik özellikleri.
[23]	PLA	3B Yazıcı	Baskı hızı, doluluk oranı, tarama açısı.	Mekanik özellikler, çekme mukavemeti ve gerilme mukavemeti.
[24]	PET, PLA.	3B Yazıcı	Dolgu oranı	Sertlik, çekme mukavemeti, gerilme mukavemeti, yüzey pürüzlülüğü, nem, kabarcıklanma, renk değişiklikleri ve gevreklilik.
[25]	PLA, ABS, PLA+CF, ABS+CF, CNT-ABS	3B Yazıcı	Dolgu oranı, dolgu deseni, dolgu hızı, nozul sıcaklığı.	Mekanik özellikler, çekme, eğilme, basma testleri, Young modülü, dayanım, termal özellikler (DSC, TGA, termal görüntüleme), morfolojik özellikler (SEM), baskı kalitesi, katman düzeni, gözeneklilik, boşluklar, çatlak başlangıç noktası, lif içeriği.
[26]	PLA, ABS	3B Yazıcı	Baskı hızı.	Mekanik özellikler, çekme numuneleri, mekanik performans, mikro yapısal özellikler ve yapısal bütünlük.
Bu çalışma	*PLA, Re-PLA ABS, Re-ABS*	*3B Yazıcı*	*Doluluk oranı, katman kalınlığı, üretim açısı, geri dönüşüm, sterilizasyon.*	*Üç nokta eğme, yüzey pürüzlülüğü, SEM, matematiksel modelleme.*

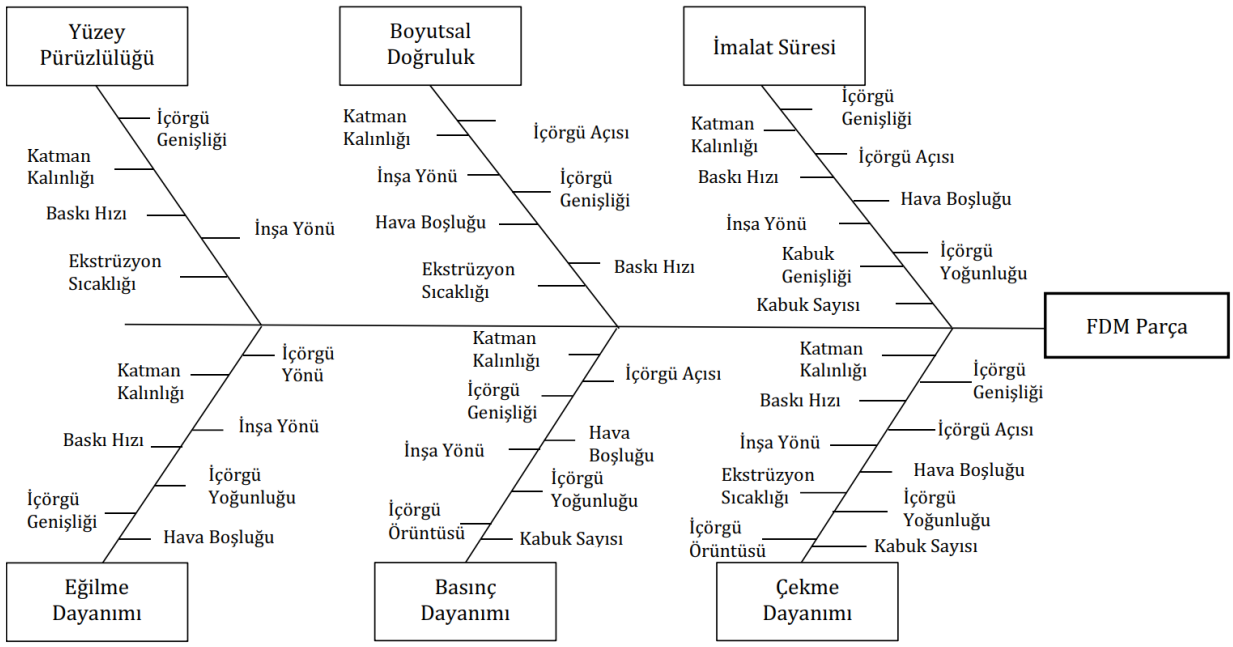
2. GENEL BİLGİLER

2.1 Literatür Araştırması

Sanayi Devrimi'nden günümüze uzanan üretim teknolojileri tarihi, her dönemde malzeme bilimi ve üretim tekniklerinin evrim geçirmesiyle şekillenmiştir. Özellikle son yıllarda dijital üretim tekniklerinde yaşanan gelişmeler, üretimin kişiselleştirilmesine ve hızlandırılmasına olanak tanıyarak geleneksel yöntemlere alternatif çözümler sunmuştur. Bu teknolojiler arasında, üç boyutlu (3B) yazıcılar; prototipleme süreçlerinden biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı bulmuş ve üretim kültüründe devrim yaratmıştır. Elde edilen avantajlara rağmen, bu teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli sorunlar da gündeme gelmiştir.

Mevcut çalışmalarda, filamentin cinsine ek olarak baskı sürecine ait parametrelerin de mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu parametreler arasında: Katman kalınlığı, üretim açısı, baskı hızı, doluluk oranı bulunmakta olup, bu değişkenlerin tekil veya kombine etkileri parçanın dayanımı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Genel olarak 3B yazıcılar ile imalata uygun materyallerin çeşitli parametrelere bağlı kalınarak karşılaştırıldığı gözlemlenmiştir. Analizler sonucu tespit edilen çeşitli değerlendirmelerin malzemelerin çeşitli karakteristiklerini gün yüzüne çıkarmak bakımından değerli olsa da bazı materyallerin değerlendirme noktasında eksik kalındığı hatta geri dönüştürülmüş materyallerin analizi noktasında yeni çalışmaların yerinde olacağı görülmüştür. Bu bağlamda 3B yazıcıdan elde edilen ürünlerin kaynak materyalleri ve bunların geri dönüşümünden elde edilen malzemelere ait yapılan çalışmaların sınırlı kaldığı ve hatta bazıları ile ilgili henüz bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmaların incelenmesi sonucunda FDM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini belirleyen tek parametrenin filamentin cinsi veya takviye malzemesi olmadığı görülmüş olup bununla birlikte yazdırma sırasında kullanılan bazı parametrelerin de mekanik dayanıma etki ettiği gözlemlenmiştir. Bu parametreler; katman kalınlığı, üretim açısı, baskı hızı ve iç doluluk oranlarıdır [27,28]. Şekil 2.1'de farklı yazdırma parametrelerinin üretim üzerindeki etkileri gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Balık kılçığı diyagramı, yazdırma parametrelerinin parça mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini göstermektedir **[29]**.

Ferreira ve diğ., yaptıkları çalışmada polilaktik asit (PLA) ve PLA+CF (%15 ağırlık fraksiyonunda, yaklaşık 60 mm uzunluğunda kısa karbon elyaflarıyla güçlendirilmiş) malzemeler kullanarak, sabit parametrelerle 0°, 90° ve 45° baskı açılarında numuneler üretmişlerdir. Yaptıkları çekme deneyi grafiklerine göre her iki malzeme için çekme dayanımının en yüksek değerinin 0°'de olduğu, en düşük değerin ise 45°'de olduğu belirlenmiştir. Açılar ve tüm parametreler aynı olmasına rağmen, katkı durumlarının farklı olduğu malzemelerden elde edilen numunelerin çekme eğrileri incelendiğinde, çekme dayanım değerlerinin yakın olduğu görülmüş ve bunun sebebinin, PLA+CF malzemesine kısa karbon liflerinin eklenmesinin malzemeyi daha kırılgan hale getirmiş olduğu açıklanmıştır [7].

Alharbi ve diğ., yaptıkları çalışmada 3B yazıcıdan elde edilen ara diş restorasyonlarının mekanik özelliklerine yapı yönünün etkisini araştırmışlardır. Baskı yönüne göre iki grup test edilmiştir. Birinci grup, katmanların yükleme yönüne dik olacağı şekilde basılmıştır. İkinci grup ise katmanların yükleme yönüne paralel olacağı şekilde basılmıştır. Numuneler, DW028D 3B yazıcı kullanılarak üretilmiştir. Numuneler, 10 kN bir yük hücresi ile 1 mm/dak bir kroshed hızında, evrensel bir test makinesiyle yüklenmiştir. Deneyler, kuru test koşulları altında oda sıcaklığında (22 °C) gerçekleştirilmiştir. Belirlenen koşullarda, dikey olarak yazdırılan örnekler için ortalama ± SD basınç dayanımı, 297 MPa (± 34) iken, yatay olarak yazdırılan örnekler için 257 MPa (± 41) olarak bulunmuştur. Sonuçlardan hareketle, katman

oryantasyonunun malzemenin basınç dayanımını etkilediği bulunmuştur. Yük yönüne dikey olarak basılan katmanlara sahip numunelerin, yükleme yönüne paralel basılan numunelere göre daha gelişmiş mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir [30].

Atakök ve diğ., yaptıkları çalışmada 3B baskılı parçaların mekanik özelliklerini gerilme, Izod darbe ve üç nokta eğme testleriyle araştırmış ve kırılma yüzeylerinin SEM analiziyle desteklemişlerdir. Katman kalınlıkları, doluluk oranları ve filament türleri (PLA ve Re-PLA) açısından değişiklikler üzerinde yoğunlaşan bu araştırmada, 0,25 mm katman kalınlığı ve %70 doluluk oranı kullanılarak PLA filament ile optimal mekanik dayanımın elde edildiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, düşük doluluk oranlarının dayanımı azalttığı ve PLA'nın Re-PLA'ya kıyasla üstün çekme mukavemeti sergilediği ortaya çıkmıştır. Ek olarak, yüzey gözenekliliği ve boşlukların baskılı parçaların dayanımını azaltan ana faktörler olarak belirlenmiştir [8].

Özsoy ve diğ., yaptıkları çalışmada FDM 3B baskıda kullanılan PLA ve ABS malzemelerin mekanik özelliklerine işlem parametrelerinin (katman kalınlığı, dolgu oranı, duvar kalınlığı, baskı hızı, nozul ve tabla sıcaklıkları) etkisini değerlendirmişler ve bulguları mevcut literatürle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, yüksek dolgu oranlarının mekanik özellikleri artırdığını ve PLA'nın ABS'ye göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir [4]. Kompresyon kalıplama (compression molding) ile üretilen PLA numunelerin, daha yüksek elastik modül (sertlik) gösterdiği, 3B baskı (FDM) ile üretilen PLA numunelerin ise daha yüksek başarısızlık (kopma) gerinimi yani daha fazla uzayabildiği rapor edilmiştir.

Chandran ve diğ., yaptıkları çalışmada sıkıştırma kalıplama ve 3B baskı ile üretilen PLA numunelerinin çekme özelliklerini karşılaştırmışlardır. Her iki yöntem benzer çekme mukavemeti (59,9 MPa) sağlamıştır, ancak sıkıştırma kalıplamalı numuneler daha yüksek elastik modül (sertlik) göstermiş olduğu, 3B baskı (FDM) ile üretilen PLA numunelerin ise daha yüksek başarısızlık (kopma) gerinimi yani daha fazla uzayabildiği rapor edilmiştir. 3B baskılı numuneler daha fazla nem emmiş ve bu durum mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemiştir. 3B baskılı PLA örneklerindeki nem emiliminin mekanik özellikler üzerindeki önemli etkisinin, örneklerin yapısındaki boşluklardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu boşluklar, nem emilimini artırarak mekanik performansı azaltmaktadır [9].

Salvatore ve Roberto, yaptıkları çalışmada FDM 3B baskıyla üretilen PLA numunelerinin çekme ve basma mekanik özelliklerini, Young modülü, elastik limit gerilimi ve çekme mukavemeti açısından değerlendirmişlerdir. Çekme testleri 2145,59-2952,48 MPa, basma

testleri ise 1932,81-2137,20 MPa arasında Young modülü göstermiştir. PLA'nın çekme ve basma testlerindeki Young modülü değerleri arasında farklılıklar görülmüştür. Gerilme testlerinde modül daha yüksekken, basınç testlerinde daha düşük olmuştur. Bu farkın, 3B baskı sürecinden kaynaklanan katmanlar arasındaki boşluklar nedeniyle gerilme durumunda malzemenin daha sert olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Basınç altında ise, katmanların daha homojen birleşiminin malzemenin biraz daha esnek davranmasına yol açtığını belirtmişlerdir [10].

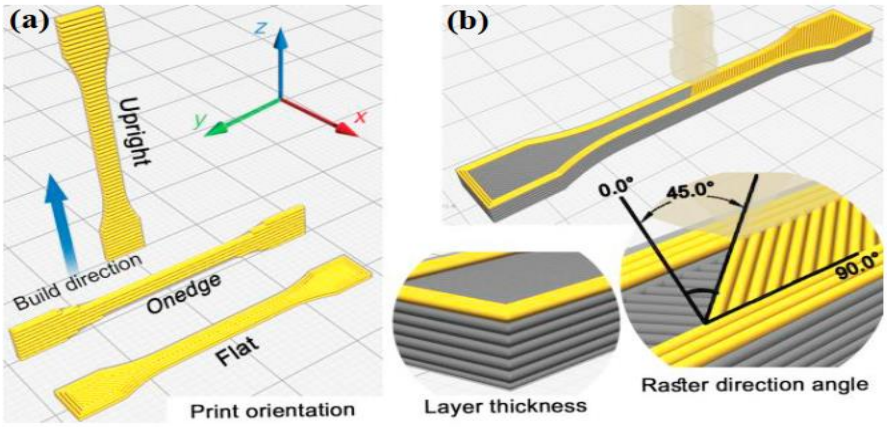
Bembenek ve diğ., yaptıkları çalışmada, FDM 3B baskı parçalarının, özellikle çeşitli termoplastik malzemelerdeki çekme mukavemeti üzerine fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, malzeme mukavemeti üzerindeki işlem parametrelerinin etkisini değerlendiren karşılaştırmalı bir yaklaşımı hedeflemişlerdir. Sonuçlar, farklı malzemelerin mekanik davranışlarındaki benzerlikleri ve farklılıkları, özellikle çekme mukavemeti açısından ortaya koymuş ve orta ölçekli üretimde maliyet etkinliği ile güç-ağırlık oranlarının iyileştirilmesi için temel veriler sağlamıştır [11].

Ramli ve diğ., yaptıkları çalışmada; metal bakır malzemeleri, PLA ve PTEG kullanarak 3B yazıcının dolgu tasarımı ve tabaka kalınlığı gibi parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Metalin Ra değerinin her iki termoplastik poliestere göre daha yüksek olduğunu ve bu durumun da açık kaynaklı yazıcının (donanım ve/veya yazılım tasarımları herkesin erişimine açık olan, yani isteyen herkesin cihazı üretip, değiştirip geliştirebileceği) bakır malzemenin PLA ve PTEG'ye kıyasla daha kötü yüzey pürüzlülüğü ürettiğini gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 0,1 mm 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 dolgu oranında yüzey pürüzlülüğünde artış oluştuğunu belirtmişlerdir. Ancak, %30 ve %50 dolgu oranlarında oluşan pürüzlülük değerlerinin aynı olduğunu ve bu nedenle yüzey pürüzlülüğüne tabaka kalınlığının bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir [12].

Mihai ve diğ., yaptıkları çalışmada; polietilen glikol, polivinil alkol ve vinil poliklorür polimerlerinin biyouyumluluk testlerini yapmışlardır. İn vitro testleri, dengelenmiş bir fibroblast kültüründe gerçekleştirmişlerdir ve araştırılan polimerlerin temas halinde olan hücrelerin morfolojisini ve canlılığını değerlendirmişlerdir. Hücre canlılıklarını %80-85 arası bulmuşlardır. Üç polimerin biyouyumluluk derecelerinin farklı olduğunu gözlemlemişlerdir [31].

Li ve diğ., yaptıkları çalışmada; sıcak buhar düzleştirme işlemi (FDM ile üretilmiş polimer parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için bir çözücü maddenin buharı kullanılarak, polimer yüzeyinin hafifçe eritilmesi ve yüzeydeki mikro pürüzlerin kendiliğinden yayılıp yumuşaması amacı ile kullanılan kimyasal temelli bir yüzey işleme yöntemi) ile FDM kullanılarak PLA parçalarının yüzey kalitesini değerlendirmişlerdir. Testlerde; sıcaklık, süre ve sıcak buhar düzleştirme 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].

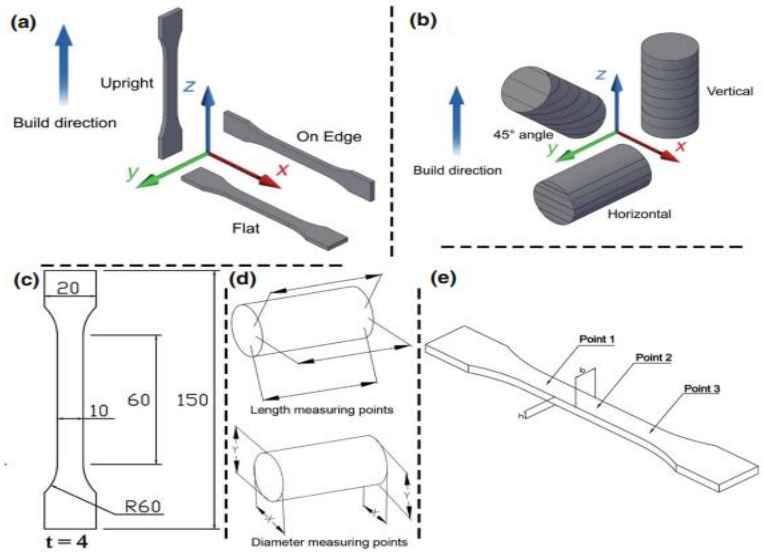
Hanon ve diğ., yaptıkları araştırmada, farklı 3B baskı hızlarının PLA polimerinin çekme mukavemeti ve sertlik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. eriyik yığma modelleme tekniğini kullanarak farklı yapı yönelimi, açısı ve katman kalınlığına sahip numuneler üretmişlerdir. Deneylerde ayrıca optik mikroskobik, yüzey pürüzlülüğü ve SEM incelemeleri de yapmışlardır. Bu çalışmayı, 3B baskı malzeme davranışını tam olarak anlamak amacıyla gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, On-edge yönelim örneklerinde en yüksek Young modülü ve maksimum çekme mukavemeti değerlerinin gözlendiğini rapor etmişlerdir (sırasıyla 1,896 ± 0,044 GPa ve 49,12 ± 0,78 MPa). En yüksek kırılma uzamasının 0,1 mm katman kalınlığı numunesinde (%3,13) bulunduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, sertlik ve çekme mukavemeti arasında bir orantılı ilişkinin varlığı, baskı yönelimi parametresi değişken olduğunda fark etmişlerdir. Şekil 2.2'de çalışmada kullanılan numune çizimleri ve üretim yönleri gösterilmiştir [14].



Şekil 2.2: Hanon ve diğ. çalışmasında kullanılan numuneler (a) üretim yönleri ve (b) katman kalınlığı ve deseni.

Münker ve diğ., yaptıkları çalışmada poli metil metakrilat (PMMA) malzemeleri üzerine farklı sterilizasyon yöntemlerinin etkilerini incelemişlerdir. Üç poli (metil metakrilat) (PMMA) bazlı malzemeyi (Vertex Self-Curing, Palacos R+G ve NextDent C&B MFH), etilen oksit, hidrojen peroksit gaz plazma, otoklav ve γ-ışınlama gibi farklı sterilizasyon yöntemleriyle sterilize etmişlerdir. Eğilme mukavemeti, eğilme modülü, kırılma tokluğu ve darbe dayanımlarını araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda; tüm malzemelerin eğilme mukavemetinin, ıslak ortamda yapılan testlerde γ-ışınlama sonrası kontrol ve diğer sterilizasyon yöntemlerine göre önemli ölçüde değiştiğini rapor etmişlerdir. NextDent C&B MFH, en yüksek eğilme ve darbe dayanımını gösterirken, Palacos R+G en yüksek gerilim yoğunluğunu göstermiştir. Bunlara ek olarak; otoklav sterilizasyonunun PMMA bazlı malzemelerin sterilizasyonu için uygun olmadığını rapor etmişlerdir. Etilen oksit, hidrojen peroksit gaz plazma ve γ-ışınlama yöntemlerinin, PMMA bazlı kişiselleştirilmiş tıbbi cihazların sterilizasyonu için uygun teknikler olduğunu ifade etmişlerdir [13].

Hanon ve diğ., yaptıkları çalışmada, Eriyik Yığma Modelleme teknolojisini kullanarak üretilen bronz/PLA kompozit numunelerinin tribolojik ve mekanik dayanımlarını incelemişlerdir. Test parçalarını farklı yönlere göre imal etmişler ve baskı yöneliminin etkisini incelemek amacıyla tasarlamışlardır. Tribolojik testlerde, geri dönüşümlü kayar hareket ve kuru koşullarda test parametrelerini kullanmışlardır. Çalışmada ürünlerin yüzey pürüzlülüğü ve sertliğini de incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, çeşitli baskı yönelimlerinin mekanik özellikler ve tribolojik davranış üzerinde farklılıklar yarattığını ifade etmişlerdir. İncelenen parametreler arasında, kırılma noktasında en yüksek çekme mukavemetine sahip olan baskı yönelimi On-Edge olmuştur. Dikey olarak yönlendirilmiş test parçaları en yüksek sürtünme eğilimini sunarken, en düşük aşınma derinliğini sağlamıştır. Öte yandan, düşük yük altında kayma sırasında daha az aşınma gözlenirken, stick-slip eğiliminin arttığını rapor etmişlerdir. Şekil 2.3'te deney numunelerinin tasarımları gösterilmiştir [33].



Şekil 2.3: Hanon ve diğ. deney numunelerinin tasarımları.

Meltem Eryıldız, yaptığı çalışmada, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) yöntemiyle üretilen PLA parçaların baskı yönelimi değiştikçe mekanik özelliklerinde ve üretim süresinde meydana gelen değişimleri deneysel olarak araştırmıştır. Numuneler farklı yönelimlerde (0°, 45°, 90°) üretilmiş ve her bir yönelimde mekanik testlere tabi tutulmuştur. En yüksek çekme dayanımı yatay baskı (0°) ile elde edilmiştir. Dikey baskı yöneliminde çekme dayanımının, yataya kıyasla %36 oranında azaldığını belirtmiştir. Düşük kopma uzamasının özellikle 90° baskı yöneliminde belirginleştiğini ifade etmiştir. Yatay baskıda üretim süresinin daha kısa olduğunu, dikey baskıda ise katman sayısının artması ve destek yapılarının kullanılması nedeniyle üretim süresinin uzadığını gözlemlemiştir. İstatistiksel analiz (örneğin ANOVA) yapılmamış olması, çalışmanın bir eksikliği olarak belirtilmiştir. Sadece PLA malzemesi kullanılmıştır. Numune geometrileri hakkında detay verilmediğini ifade etmiştir [15].

Fafenrot ve diğ., polilaktik asit (PLA) temelli metal-polimer hibrit filamentlerden (Bronzefill (%78 metal) ve Manyetik Demir (%46 metal)) üretilen, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) ile basılmış nesnelerin mekanik özelliklerini saf PLA ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çekme ve eğme testlerinde, saf PLA'nın üstün mekanik dayanım sergilemesine karşın, hibrit malzemelerin (özellikle Bronzefill) metal parçacıklar ile polimer matris arasındaki arayüzey yapışma sorunları nedeniyle düşük çekme ve eğilme direnci gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Baskılı PLA ve Manyetik Demir örneklerinin çekme dayanımlarının, orijinal filament değerleriyle yakınsadığını ve bu durumun baskı sürecinde katmanlar arası ve içi ideal bağlanmanın sağlandığını işaret ettiğini belirtmişlerdir. Ancak Bronzefill örneklerinde, filament ve baskılı nesneler arasında belirgin dayanım farklılıkları gözlemişlerdir. Bu

durumun, seyrek doldurulmuş bölgelerde metal aglomerasyonunun mekanik zayıflıkları artırmasına bağlandığını ifade etmişlerdir. Nozul çapı (optimum 0,4 mm) gibi baskı parametrelerinin mekanik özellikleri etkilediğini, dolgu deseni ve sıcaklık parametrelerinin etkisinin ise önemsiz olduğunu belirtmişlerdir. Mekanik parlatma gibi son işlem tekniklerinin, Bronzefill örneklerinin optik çekiciliğini artırarak, mekanik stresin ikincil olduğu estetik veya işlevsel uygulamalarda kullanımını mümkün kıldığını ifade etmişlerdir. Çalışmaları, PLA'nın biyobozunurluk ve şekil hafızalı özelliklerinden yararlanan biyomedikal veya tekstil kompozitleri gibi özel uygulamalarda metal-polimer hibritlerin potansiyelini vurgulamış ve gelecek araştırmaların arayüzey yapışma optimizasyonu, metal parçacık morfolojisi ve polimere-metal ko-ekstrüzyon yöntemleri üzerine odaklanması gerektiğini belirtmişlerdir [16].

Brancewicz ve diğ., yaptıkları çalışmada, 3B baskıda biyopolimer Polilaktik Asit (PLA)'ın kullanımını gözden geçirerek, endüstriyel uygulamalar için PLA'nın iyileştirilmesine yönelik çeşitli parametreleri ele almışlardır. Bu parametreler arasında katmanlı baskı, süreç parametre optimizasyonu (sıcaklık, dolgu ve yüzey geliştirme gibi) ve dikümil peroksit (DCP) gibi katkı maddeleri kullanılarak çapraz bağlanmanın artırılması yer almaktadır. Ayrıca, PLA'nın diğer polimerler (ABS) ile birleştirilerek yapılan çok malzemeli baskı uygulamalarının potansiyeline de vurgu yapmışlardır. Çalışmaları, eklemeli üretimin sürdürülebilir, kapalı devre üretim döngülerini mümkün kılmak amacıyla biyobozunur malzemelerin kullanımı ve geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesine odaklanması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu sayede, çevre dostu ve çok malzemeli 3B baskı talebinin artışına paralel olarak bu yaklaşımın kritik önem taşıyacağını sonuçlandırmışlardır [17].

Arefin ve diğ., yaptıkları derleme çalışmasında, tıbbi uygulamalarda kullanılan polimer esaslı 3B baskı teknolojisindeki son gelişmeleri ele almışlardır ve malzemeler, işleme yöntemleri ile tasarım stratejileri arasındaki etkileşime odaklanmışlardır. Çalışma, uygulama performansının etkinliğinin bu üç faktörün dikkatli seçimi ve entegrasyonuna büyük ölçüde bağlı olduğunu vurgulamıştır. Hiyerarşik ve çok malzemeli mimariler gibi tasarım yaklaşımlarının, özellikle doku iskelesi, protez, diş implantları ve ilaç salım sistemleri gibi uygulamalarda, yapısal dayanıklılık ile biyolojik uyumluluk gibi çelişkili gereksinimler arasında denge sağladığını göstermişlerdir. Derleme, malzeme-işlem-tasarım etkileşimlerinin daha fazla araştırılması ve optimize edilmiş parça konfigürasyonlarını yönlendirecek sağlam metodolojik çerçevelerin geliştirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır [1].

Maraveas ve diğ., yaptıkları çalışmada, geleneksel depolama ve yakma gibi yöntemlere sürdürülebilir bir alternatif olarak 3B baskı teknolojilerinin-Eriyik Yığma Modelleme (FDM), Sıcak Eritme Ekstrüzyonu (HME) ve Parçacık Füzyon İmalatı (FPF)-özellikle tarımsal plastik atıkların geri dönüşümündeki potansiyelini değerlendirmişlerdir. Sistematik olarak incelenen 39 çalışma, bu yöntemlerin geri dönüştürülmüş plastiklerin (PLA, ABS, PET, HDPE) ham malzemelere yakın mekanik özellikler (%80'e kadar) sergileyen işlevsel filamentlere dönüştürülebileceğini göstermiştir. Ancak, tekrarlanan geri dönüşüm döngülerinin çekme dayanımı ve esnekliği azalttığını; UV duyarlılığı ve biyobozunur olmayan 3B baskılı ürünlerin ise çevresel riskler oluşturduğunu belirtmişlerdir. 3B baskının, atıkları yeniden kullanarak plastik kirliliğini azaltsa da malzeme bozunumu ve geri dönüşüm sırasındaki sera gazı emisyonlarının uzun vadeli sürdürülebilirliği sorgulattığını ifade etmişlerdir. Gelecek araştırmaların, UV dirençli katkı maddeleri, hibrit polimer formülasyonları ve ölçeklenebilir süreçlere odaklanarak ürün ömrünü uzatması ve ekolojik etkileri minimize etmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu adımların, kaynak verimliliği ve kapalı döngü sistemleriyle net-sıfır hedeflerine ulaşmada kritik rol oynayacağını belirtmişlerdir [18].

Dou ve diğ., yaptıkları çalışmada, sürekli karbon fiber takviyeli polilaktik asit (PLA) kompozitlerinin 3B baskı yoluyla üretilmesinde fiber içeriğinin çekme özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini, katman kalınlığının ve ekstrüzyon genişliğindeki artışın mekanik dayanımda azalmaya yol açtığını göstermişlerdir. Ayrıca, daha yüksek baskı sıcaklıklarının fiber-matris arayüzünü iyileştirerek çekme özelliklerini artırdığını, baskı hızındaki artışın ise ters etki yaparak çekme dayanımını azalttığını belirtmişlerdir [19].

Nassar ve diğ., yaptıkları çalışmada, 3B baskılı yüksek modüllü karbon fiber takviyeli kompozitlerin çekme davranışı üzerine ısıl işlemin etkilerini incelemişlerdir. Araştırma, %9 karbon fiber takviyeli polilaktik asit (PLA+CF) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS+CF) filamentlerine odaklanmış ve farklı dolgu yoğunluklarına (%70 ve %100) ile yapısal desenlere (rektilineer ile Archimedean kordlar) sahip numunelerin incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, ısıl işlemin ara yüzey bağlanmasını güçlendirdiğini ve gözenekliliği azalttığını, böylece çekme özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ek olarak, dış katmanlarda PLA+CF ve çekirdek kısmında ABS+CF kullanılan yenilikçi bir sandviçyapısının da üstün çekme performansı sergilediğini ve çok malzemeli tasarımların potansiyeline işaret ettiklerini belirtmişlerdir. Bu bulgular, özel ısıl işlemler ve yapısal tasarımlar yoluyla 3B baskılı polimer bileşenlerinin optimizasyonu için maliyet etkin bir yöntem önermekte ve hafif, yüksek

mukavemetli kompozitler gerektiren uygulamalara yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır [20].

Milovanović ve diğ., yaptıkları çalışmada, iki farklı 3B yazıcı malzemesi olan PLA ile, ikinci faz partikülleri içeren geliştirilmiş bir varyantı olan PLA-X'in mekanik özelliklerini incelemişlerdir. PLA, biyobozunur ve çevre dostu bir malzeme olup, baskı kolaylığı ve yüksek boyutsal doğruluk gibi avantajlara sahip olmakla birlikte, mekanik özelliklerinin ABS'e kıyasla daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık, ABS'in daha sağlam bir malzeme olarak bilindiği, ancak büzülme nedeniyle boyutsal doğruluk sorunlarına yol açabildiği ifade edilmiştir. Mitsubishi Chemical tarafından geliştirilen PLA-X'in, PLA'nın boyutsal doğruluğunu korurken ABS'in geliştirilmiş mekanik özelliklerini sağlama amacı taşıdığı belirtilmiştir. Çalışmada, PLA-X'in ABS'e benzer mekanik özellikler sergilediği, özellikle daha yüksek darbe dayanımı sunduğu ancak PLA'ya kıyasla çekme dayanımı (UTS) açısından bazı ödünler verdiği belirlenmiştir. Sonuçlar, PLA-X'in darbe dayanımı ve deformasyon kapasitesi bakımından standart PLA'ya göre üstün performans gösterdiğini, ancak elastik modül açısından PLA'dan daha iyi olmadığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, PLA-X'in boyutsal doğruluğu koruyarak daha iyi mekanik özellikler gerektiren uygulamalar için umut vadeden bir malzeme olduğunu göstermektedir [34].

Agrawal ve diğ., yaptıkları çalışmada, Eriyik Filament Biriktirme (FFF) yöntemi kullanılarak üretilmiş 3B yazıcılarla imal edilen Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) parçaların mekanik özellikleri üzerinde dolgu deseni, dolgu oranı ve katman kalınlığının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, üretim parametreleri olarak dolgu deseni (çizgi, üçgen, konsantrik), dolgu oranı (%75, %80, %85) ve katman kalınlığı (100 µm, 200 µm, 300 µm) kullanmışlardır. Mekanik özellikler, çekme ve darbe dayanımı dahil olmak üzere, ASTM standartlarına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %80 dolgu oranı ve 100 µm katman kalınlığı ile kombinlenen konsantrik dolgu deseninin, diğer konfigürasyonlara kıyasla %123 oranında daha yüksek çekme dayanımı ve %168 oranında daha büyük darbe dayanımı sağladığını göstermiştir. Çalışma, konsantrik desenin etkinliğinin, üstün stres dağılımı ve çatlak yayılmasına karşı direnç sağlama özelliklerinden kaynaklandığını ve bu nedenle 3B yazıcılarla üretilmiş ABS bileşenlerinde yüksek dayanım elde etmek için optimal seçim olduğunu sonucuna varmışlardır [21].

Jaya Christiyan ve diğ., yaptıkları çalışmada masaüstü bir 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş Polilaktik Asit (PLA) bileşenlerinin bükülme özelliklerini; katman kalınlığının, baskı hızının

ve yönelimin bükülme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Numuneler, 0,2 mm, 0,25 mm ve 0,3 mm katman kalınlıklarında; 0,4 mm nozül çapı ve %40 dolgu yoğunluğu kullanılarak üretilmiştir. Çalışmada iki farklı baskı hızı (38 mm/s ve 52 mm/s) uygulanmış ve numuneler yatay (0°) ve dikey (90°) yönelimlerde test edilmiştir.

Sonuçlara göre, en yüksek bükülme dayanımı 0° yönelimi, 0,2 mm katman kalınlığı ve 38 mm/s baskı hızı ile elde edilmiş; bu durum daha iyi katmanlar arası bağlanmaya ve daha fazla katman sayısına atfedilmiştir. Buna karşın, dikey yönlendirilmiş numunelerin, azalmış bağlanma ve daha az katman sayısı nedeniyle daha düşük bükülme dayanımları gösterdiği belirtilmiştir. En yüksek bükülme dayanımı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 52 mm/s baskı hızında 48 MPa olarak ölçülmüştür. Çalışmada, daha düşük katman kalınlığının, daha düşük baskı hızının ve yatay yönelimin PLA bileşenlerinin bükülme dayanımını önemli ölçüde artırdığı sonucuna varılmıştır [2].

Bochnia ve diğ., yaptıkları çalışmada, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak üretilmiş ince duvarlı örneklerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı bir analizini sunmuşlardır. Polilaktik Asit (PLA) ve karbon fiber takviyeli PLA (PLA-CF) üzerinde yoğunlaşan çalışmada, farklı kalınlıkların ve baskı yönlerinin çekme dayanımı ve genel mekanik performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Araştırma, daha ince örneklerin (1,0-1,8 mm) daha kalın örneklere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek çekme dayanımı sergilediğini ortaya koymuş ve özellikle PLA-CF kompozitleri kullanıldığında baskı yönü ve malzeme anizotropisinin önemini vurgulamışlardır. Çalışma, FDM baskısında daha fazla optimizasyon potansiyelini ve özellikle boşlukların azaltılması ile malzeme bağlanmasının iyileştirilmesi konularında değerli bilgiler sunduğunu ve endüstriyel uygulamalarda 3B yazıcı tekniklerinin geliştirilmesi için önemli ipuçları sağladığını belirtmişlerdir [22].

Kaptan ve Kartal, yaptıkları çalışmada, 3B baskı yoluyla üretilen polilaktik asit (PLA) örneklerinin mekanik özellikleri üzerindeki farklı dolgu oranlarının (%5, %50 ve %100) etkisini incelemişlerdir. Özellikle, ASTM standartlarına göre eğilme ve çekme dayanımları üzerinde durmuşlardır. Modellenmiş bir 3B yazıcı kullanarak yapılan araştırmalarında, optimum dayanımın %50 dolgu oranında elde edilebileceğini göstermişlerdir; bu oran, tam dolgu oranının çekme dayanımının üçte birine denk gelmekte olup, performansta bir düşüş olmaksızın önemli ölçüde hammadde tasarrufu sağladığını ortaya koymuşlardır. Özellikle, %5 dolgu oranında bile eğilme dayanımının maksimum değerin yaklaşık üçte ikisine ulaşmasının,

kayda değer bir malzeme verimliliği önerdiğini belirtmişlerdir. Bulgular ayrıca, malzeme kullanımının azalmasının daha az plastik atık ve enerji tüketimi ile çevresel faydalar sağladığını vurgulamış ve ayrıca operasyonel aşınmanın azalması nedeniyle yazıcının ömrünü artırma potansiyeline işaret etmişlerdir [3].

Sengupta ve diğ., yaptıkları çalışmada, PLA ile çeşitli oranlarda (%5, %10 ve %15 ağırlık) Mimosa pudica (MP) mikro lifleri ile güçlendirilmiş çevre dostu kompozitlerin sentezine odaklanmışlardır. Kompozitlerin fiziksel özellikleri, yoğunluk, boşluk içeriği, nem içeriği, su emme ve kalınlık şişme gibi parametreler açısından karakterize edilmiştir. Sonuçlar, su emme ve kalınlık şişmenin maksimum seviyelerinin lif yüklemesi ile arttığını göstermiştir; 30 gün boyunca distile su içinde bekletilen kompozitlerin su emme oranı %7,28 ve kalınlık şişme oranı %13,2 olarak ölçülmüştür. %10 MP lif içeren kompozitlerin, optimum çekme dayanımı (20 MPa) ve eğilme dayanımını (28 MPa) sergilediği belirtilmiştir. MP liflerinin eklenmesinin, %15 lif yüklemesinde maksimum 293 °C'lik bir bozulma sıcaklığı göstererek termal stabiliteyi artırdığı ifade edilmiştir. Biyobozunurluk testlerinde, 90 gün sonunda önemli ölçüde ağırlık kaybı olduğu ortaya konmuş; %15 lif kompozitinde en yüksek kayıp %40,96 olarak belirlenmiştir ve bu durumun çevresel atık bertarafı açısından olumlu özellikler gösterdiği belirtilmiştir. Çalışma, MP liflerinin PLA kompozitleri için sürdürülebilir bir güçlendirme kaynağı olarak potansiyelini vurgulamış ve özellikle biyomedikal ile ambalaj sektörlerinde geleneksel bitki lifleriyle ilgili sınırlamaları aşarak uygulanabilir özellikler sunduğunu belirtmiştir. Genel olarak, PLA/MP kompozitlerinin pratik uygulamalar için umut verici özellikler gösterdiği sonucuna varmışlardır [5].

Günay ve diğ., yaptıkları çalışmada, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) 3B baskı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerinin mekanik özellikleri, baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısının etkilerine odaklanılarak incelemişlerdir. Bu işlem parametrelerini değerlendirmek için Taguchi L18 deneysel tasarımı kullanılarak ayrıntılı bir analiz yapmışlardır. Standart çekme testi numuneleri hazırlanmış ve bunların çekme mukavemeti Varyans Analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Çalışma, doluluk oranının çekme mukavemetini etkileyen en önemli parametre olduğunu, bunu tarama açısı ve baskı hızının izlediğini belirtmişlerdir. Bu parametrelerin optimizasyonu Taguchi metodolojisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, -45/+45° ve 0/90°'lik bir tarama açısının, dolgu oranındaki bir artışla birlikte, daha yüksek çekme mukavemeti değerlerine yol açtığını göstermiştir. Özellikle, %100 doluluk oranı ve 0/90° tarama açısı ile 30 mm/s'de basılan numunelerin optimum gerilme mukavemeti

sergilediği belirtilmiştir. Araştırma, doluluk oranının çekme özellikleri üzerindeki kritik etkisini vurgulayarak PLA+ malzemelerin gelişmiş mekanik performansı için FDM proses parametrelerinin optimizasyonuna katkıda bulunduklarını ifade etmişlerdir [23].

Özsoy ve diğ., yaptıkları çalışmada, PLA ve ABS malzemelerine odaklanarak, Eriyik Yığma Modelleme (FDM) 3B baskı yönteminin işleme parametreleri ve malzeme özelliklerini incelemişlerdir. Test örnekleri, plastikler için ISO standartlarına göre hazırlanmış ve çekme, sıkıştırma ve bükme test numuneleri üretilmiştir. Çalışmada katman kalınlığı (0,15-0,2 mm), doluluk oranı (%50 ve %70), duvar kalınlığı (0,8 ve 1,2 mm), baskı hızı (50 mm/s), nozül sıcaklığı (220°C) ve tabla sıcaklığı (60°C) gibi üretim parametrelerini değiştirmişlerdir. Her bir işleme parametresi için toplamda on iki test, PLA ve ABS malzemeleri için üçer kez tekrar edilerek gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, doluluk oranının artmasının mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir ve PLA numunelerinin mekanik özelliklerinin ABS'ye göre daha üstün olduğunu tespit etmişlerdir. ABS malzemeler en yüksek gerilmeyi gösterirken, PLA'ya kıyasla en düşük mukavemet değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Gelecekteki araştırmalar için, yüzey kalitesinin tahmin edilmesi veya regresyon analizinin büyük veri ve yapay zekâ algoritmaları kullanılarak, kullanılan malzeme sayısının artırılması ve süreç parametrelerinin değiştirilmesi ile incelenmesi gerektiğini önermişlerdir [4].

Evlen ve diğ., yaptıkları çalışmada, dolgu yüzdesinin PET ve PLA malzemelerinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için kaynaşmış biriktirme modelleme teknolojisini kullanan Kartezyen tipi, açık kaynaklı bir 3B yazıcı geliştirmişlerdir. Dolgu yüzdesi %10, %20, %30, %40 ve %50 olan test numuneleri üreterek sertlik, çekme mukavemeti ve yüzey pürüzlülüğü gibi mekanik özellikleri ölçmüşlerdir. Sonuçlar, hem PET hem de PLA'nın sertliğinin daha yüksek dolgu yüzdeleri ile arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğü ve gerilme mukavemeti arasındaki ilişkinin değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir: PLA için, artan pürüzlülüğün azalan gerilme mukavemeti ile ilişkili olduğu, buna karşın sertlik ve pürüzlülüğün doğru orantılı olduğu ifade edilmiştir. PET için ise sertlik, çekme mukavemeti ve pürüzlülüğün doğru orantılı bir artış gösterdiğini belirtmişlerdir. PLA malzemesinin neme maruz kalması veya uygun şekilde kurutulup saklanmaması durumunda kırılganlaşıp mekanik özelliklerini kaybedebileceğini ve ekstrüzyon sırasında kabarcıklanma ve renk değişiklikleri gibi sorunlara yol açabileceğini gözlemlemişlerdir. Bu nedenle PLA'nın oksijen ve nemden uzakta saklandığından emin olunmasının çok önemli olduğunu

vurgulamışlardır. Buna karşılık PET, dolgu yüzdesi ile birlikte artan sertlik ve gerilme mukavemeti ile tutarlı bir davranış sergilediğini belirtmişlerdir [24].

Abeykoon ve diğ., yaptıkları çalışmada, farklı işlem parametreleri ve filament malzemeleri kullanılarak üretilen 3B baskılı numunelerin mekanik, termal ve morfolojik özelliklerinin kapsamlı bir analizini sunmuşlardır. Araştırmada, beşi farklı filament türünden (üçü saf, ikisi lif takviyeli olmak üzere PLA, ABS, CFRE-PLA (karbon fiber takviyeli PLA), CFRE-ABS (karbon fiber takviyeli ABS) ve CNT-ABS) (karbon nanotüp takviyeli ABS; elektriksel iletkenlik ve yüksek mukavemet sağlar) üretilen parçalar üzerinde dolgu yoğunluğu, dolgu deseni, dolgu hızı ve nozul sıcaklığı gibi işlem parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Numuneler; çekme, eğilme, basma testleri ile diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetrik analiz (TGA), termal görüntüleme ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleriyle değerlendirilmiştir. Bulgular, %100 dolgu yoğunluğu ve 90 mm/s dolgu hızının en uygun mekanik performansı sağladığını göstermiştir; bu bağlamda CFRE-PLA, 2637,29 MPa ile en yüksek Young modülüne ulaşmıştır. Doğrusal dolgu deseninin, katmanlar arası mesafenin azalması nedeniyle dayanımı artırdığı belirlenmiş, PLA için en uygun baskı sıcaklığı ise 215 °C olarak tespit edilmiştir. SEM analizleri, baskı kalitesinin katman düzeni ve gözeneklilikle doğrudan ilişkili olduğunu, takviyeli malzemelerde ise daha fazla boşluk ve çatlak başlangıç noktası bulunduğunu ortaya koymuştur. TGA analizleri, ticari veri sayfalarında genellikle belirtilmeyen kompozit filamentlerin lif içeriğini belirlemiştir [25].

Kamer ve diğ., çalışmasında FFF (Eriyik Yığma Üretimi) yöntemiyle Ultimaker 2 Extended 3B yazıcı kullanılarak üretilen ABS ve PLA çekme numunelerinin mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerine baskı hızının etkisini araştırmışlardır. Elde edilen bulgular, baskı hızına malzeme bazında farklı duyarlılıkların olduğunu göstermiş; yüksek baskı hızlarında PLA'nın, ABS'ye kıyasla daha belirgin şekilde mekanik performans ve yapısal bütünlük kaybı yaşadığını ortaya koymuştur [26].

Fafenrot ve diğ., derleme çalışmalarında, doğal lif dolgulu biyolojik olarak parçalanabilir termoplastiklerin FDM tipi 3B yazıcılarda kullanımını; mekanik performans, işlenebilirlik zorlukları ve yaygın uygulama potansiyeli açısından kapsamlı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Doğal liflerin, maliyetleri düşürmeleri ve biyobozunurluk özelliklerini korumaları nedeniyle avantaj sağladığı ancak takviye etkilerinin kullanılan polimer matrisine bağlı olarak farklılık gösterdiği belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar, PLA ve ABS bazlı kompozitlerin doğal lif ilavesiyle mekanik dayanım ve sünekliklerinde azalma yaşandığını;

buna karşın PE ve PP gibi poliolefinlerin bu tür dolgularla performans kazandığını göstermiştir [16].

Ferreira ve diğ., tarafından yapılan çalışmada, PLA ve karbon fiber katkılı PLA (PLA+CF) numuneler üzerinde 0°, 45°, 90° baskı açılarında çekme testi uygulanmıştır. 0° oryantasyonun en yüksek çekme dayanımını sunduğu, 45° oryantasyonda ise belirgin zayıflamanın gözlemlendiği belirtilmiştir. Karbon fiber katkısının mukavemeti artırdığı ancak kırılganlık oranını da yükselttiği tespit edilmiştir [7].

Atakok ve diğ., yaptıkları çalışmada, PLA ve Re-PLA numuneleri farklı doluluk oranları ve katman kalınlıklarında test ederek optimal performans için %70 doluluk ve 0,25 mm katman kalınlığını önermişlerdir. Re-PLA numunelerde yüzey gözeneklerinin mekanik dayanımı düşürdüğü belirtilmiştir. Yapılan çalışmaya ait veriler Tablo 2.1'de verilmiştir [8]. Bu tablo, üretim parametrelerinin doğrudan mekanik dayanımı ve mikroyapıyı nasıl etkilediğini ortaya koyar.

Tablo 2. 1: katman kalınlığı ve doluluk oranının çekme mukavemetine etkisi (PLA vs Re-PLA)

Katman Kalınlığı (mm)	Doluluk Oranı (%)	Malzeme Türü	Çekme Mukavemeti (MPa)	Yüzey Gözeneği (%)
0,25	70	PLA	56,3	3,1
0,25	70	Re-PLA	49,8	6,7
0,30	50	PLA	51,5	5,6
0,30	50	Re-PLA	44	8,9

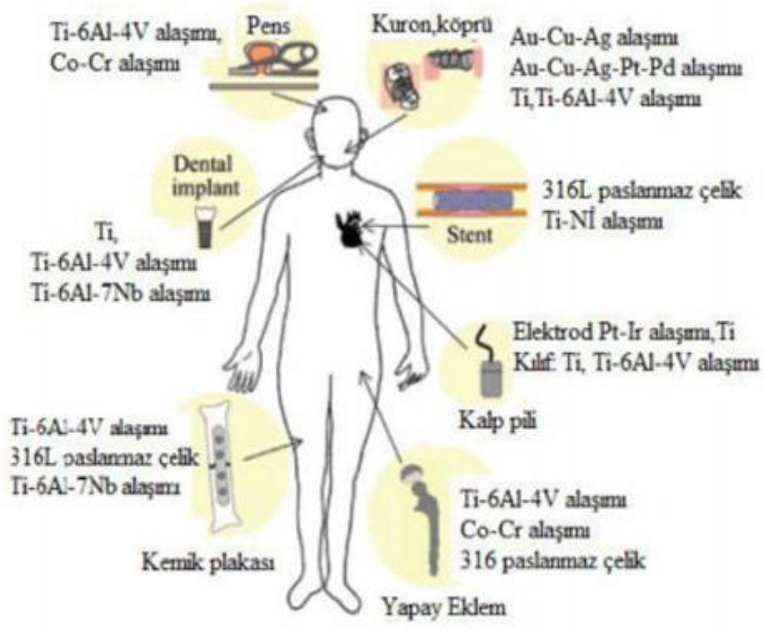
2.2 Biyomalzemeler

Biyomalzemeler, canlı organizmalarla etkileşime girmek üzere tasarlanmış doğal veya sentetik kaynaklı malzemelerdir. Tıbbi cihazlar, doku mühendisliği yapıları, implantlar, protezler ve ilaç salım sistemleri gibi çok çeşitli biyomedikal uygulamalarda kullanılan belirli bir fizyolojik görevi yerine getiren doğal veya sentetik kökenli malzemelerdir [35]. Bu malzemeler, hem mekanik hem de biyolojik olarak vücutla uyumlu olmalı, toksik veya immünolojik tepkilere yol açmamalıdır. Biyomalzemelerden beklenen temel özellikler arasında biyouyumluluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik, mekanik dayanım, kimyasal stabilite ve işlenebilirlik yer almaktadır [1,17].

Biyomalzemeler, ortopedik uygulama alanlarında kemik yerine kullanılan malzemesi olarak ve eklem protezi, bel kemiği enstrümantasyonlarında, yüz-çene cerrahisinde, yapay kalp

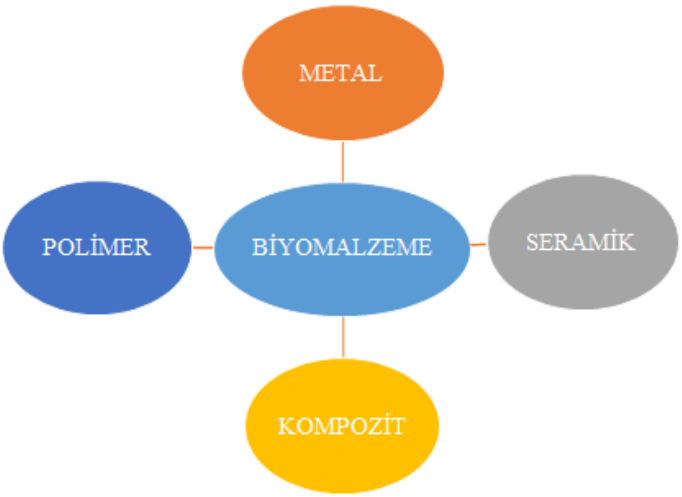
parçalarında, kalp kapakçığında, diş implantlarında, fiksatör tellerinde, fiksatör malzemesi olarak, kateter, çivilerde, kalça plaklarında, delikli vidalarda ve vücuda yerleştirilebilir cihazlar gibi yerlerde kullanılmaktadır [36].

Gelişen malzeme bilimi ve biyoteknoloji ile birlikte, biyomalzemelerin biyolojik sistemlerle olan etkileşimlerinin daha iyi anlaşılması, onların daha fonksiyonel ve güvenli hâle getirilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda biyomalzemeler, yalnızca tedavi edici değil, aynı zamanda teşhis edici ve rejeneratif tıpta da kritik bir rol üstlenmektedir. Şekil 2.4'te Biyomalzemelerin insan vücudu üzerinde kullanım alanları gösterilmiştir [1,20].



Şekil 2.4: Biyomalzemelerin insan vücudu üzerinde kullanım alanları [37].

Biyomalzemeler genel olarak metalik, seramik, polimerik ve kompozit yapıdaki malzemeler olarak sınıflandırılır. Şekil 2.5'te Biyomalzeme çeşitleri gösterilmiştir. Her bir biyomalzeme türü, hedeflenen uygulama alanına göre farklı avantajlar ve sınırlılıklar sunar. Örneğin, metalik biyomalzemeler yüksek mekanik dayanım sağlarken, seramikler kemik doku ile uyumlu mineral bileşimleri ile öne çıkar. Polimerik biyomalzemeler ise esneklikleri, hafiflikleri ve modifiye edilebilir yapıları sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [5,17].

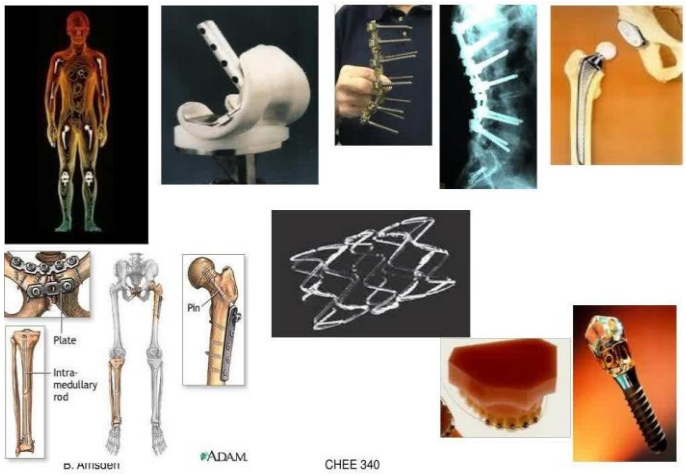


Şekil 2.5: Biyomalzeme çeşitleri.

2.2.1 Metalik Biyomalzemeler

Metalik malzemelerin dayanıklı yapıları, kolay şekil verilebilmeleri, elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri, biyomalzeme olarak kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Genellikle diş hekimliği ve ortopedi uygulamalarında tercih edilmektedir. Metal biyomalzemeler; paslanmaz çelikler (316L), saf metaller ve alaşımları, kobalt-krom alaşımları, titanyum ve titanyum alaşımları, nikel-titanyum alaşımları, kobalt-nikel-krom-molibden alaşımları, altın, amalgam ve tantal alaşımları gibi çeşitli malzemelerden oluşmaktadır [36].

Metalik malzemeler, yüksek mekanik dayanım ve biyoinertlik özellikleri sayesinde birçok implant uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ortopedik implantlar, diş protezleri ve cerrahi aletler gibi yapısal biyomedikal uygulamalarda, yüksek dayanım ve tokluk sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Titanyum ve alaşımları, paslanmaz çelik ve kobalt-krom alaşımları gibi metaller, korozyon dirençleri, biyouyumlulukları ve uzun ömürlü performanslarıyla ön plana çıkmaktadır. Özellikle titanyum, düşük yoğunluğu ve kemik dokusuyla uyumlu elastik modülü sayesinde kemik implantlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca metal yüzeylere uygulanan biyoseramik kaplamalar, doku entegrasyonunu artırarak implant başarısını desteklemektedir. Tüm bu özellikleri sayesinde metalik biyomalzemeler, biyomedikal mühendisliğinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilmektedir. Şekil 2.6'da metalik biyomalzemelere örnekler gösterilmektedir [1,17].



Şekil 2.6: Metalik biyomalzemeler.

2.2.2 Seramik Biyomalzemeler

Biyoseramikler, biyoaktif ve biyoinert olmak üzere iki çeşitte gösterilir. Biyoaktif seramikler, implant ve doku arasında kimyasal bağ oluşumuna imkân oluşturan seramik malzemedir. Biyoinert seramiklerin doku ile etkileşimleri mekanik bağ şeklindedir. Mekanik bağ, malzemenin doku özelliklerini değiştirmeden dokuyu bir arada tutabilmesi anlamına gelir [38]. Biyouyumlulukları fazla olmalarının yanında kırılgan, sert, korozyona dayanıklı, yoğunluğu yüksek ve mekanik özellikleri düşük zor işlenen malzemelerdir. Biyoseramik malzemelere örnek olarak; biyoaktif cam, alümina ve hidroksiapatit verilebilir [36].

Seramik malzemeler, biyomalzeme sınıfında özellikle kemik yenilenmesi ve diş implantları gibi alanlarda sıkça tercih edilen önemli bir gruptur. Yüksek sertlik, kimyasal dayanıklılık ve biyouyum özellikleri sayesinde öne çıkarlar. Özellikle hidroksiapatit gibi seramik türleri, kemik yapısıyla benzer mineral içeriğe sahip olmaları nedeniyle vücutla biyolojik uyumluluk gösterir. Bunun yanında, seramik bazlı kaplamalar implant yüzeylerini geliştirmek ve kemikle bütünleşmeyi artırmak amacıyla kullanılır. Bu avantajları sayesinde seramikler, biyomedikal mühendislikte vazgeçilmez bir yere sahiptir. Şekil 2.7'de seramik biyomalzemelere örnek gösterilmiştir [1].



Şekil 2.7: Seramik biyomalzemeler.

2.2.3 Kompozit Biyomalzemeler

Kompozit biyomalzemeler, tek başına kullanıldığında yetersiz özelliklere sahip iki veya daha fazla farklı kimyasal yapıya sahip malzemenin, kendi özelliklerini ve sınırlarını koruyarak bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok fazlı malzemelerdir. Düşük elastisite 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 [36,38].

Kompozit biyomalzemeler, genellikle doğal ya da sentetik liflerin bir matris içinde birleştirilmesiyle elde edilir. Bu lifler; karbon, cam ya da polimer kökenli olabilir. Tıbbi uygulamalarda, özellikle kemik tamiri gibi durumlarda yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek dayanıklılıkları ve kemik dokusuna benzer özellikler taşımaları, onları ideal bir seçenek haline getirir. Ayrıca, implant gibi uygulamalarda üstün performans sunabilirler. Şekil 2.8'de kompozit biyomalzemelere örnek gösterilmiştir [1].



Şekil 2.8: Kompozit biyomalzemeler.

2.2.4 Polimerik Biyomalzemeler

Polimerler, monomer adı verilen küçük moleküllerin, aynı veya farklı atomların kimyasal bağlarla düzenli ve tekrarlı bir şekilde bir araya gelerek uzun zincirler oluşturmasıyla meydana gelen, bir diğer ifadeyle yüksek molekül ağırlığına sahip bileşiklerdir [38].

Biyopolimerler, araç-gereçlerin çeşitlerini tanımlamada kullanılan bir terimdir. Temel olarak iki kategoriye ayrılmaktadır: Birincisi, mikroorganizmalar, hayvanlar ve bitkiler gibi doğal kaynaklardan elde edilen polimerler; ikincisi ise doğal yağlar, şekerler ve aminoasitler gibi biyolojik kaynaklı malzemelerden türetilerek kimyasal yöntemlerle üretilen polimerlerdir [39,40]. Polimer bazlı biyomalzemeler; esnek yapıları, kolay şekillendirilebilmeleri ve biyolojik sistemlerle olan yüksek uyumları sayesinde sağlık alanında yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bu polimerler, fiziksel yapıları bakımından vücuttaki yumuşak dokulara benzer özellikler sergilemektedir. Özellikle cilt, damar, kıkırdak ve lens gibi özel doku gerektiren bölgelerde; protez malzemesi, yumuşak doku mühendisliği, dikiş iplikleri, ilaç taşıma sistemleri ve doku yenileme çalışmaları gibi pek çok biyomedikal uygulamada kullanılmaktadır. Ayrıca, 3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle karmaşık geometrilere sahip yapıların üretilebilmesi, bu malzemelerin tıbbi uygulamalara geniş bir uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır. Şekil 2.9'da polimerik biyomalzemelere örnekler gösterilmektedir [1].

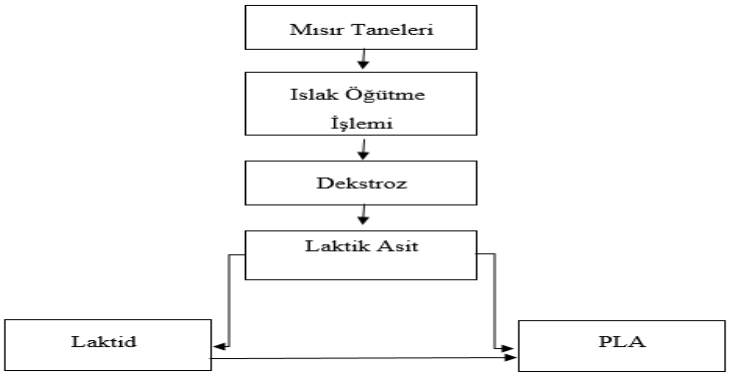


Şekil 2.9: Polimerik biyomalzemeler

2.3 Polilaktik Asit (PLA)

Polilaktik Asit (PLA) yenilenebilir kaynaklardan (örneğin mısır nişastası, şeker kamışı) elde edilen, biyolojik olarak parçalanabilir bir termoplastik alifatik polyesterdir. Şekil 2.10'da PLA sentez şeması sunulmuştur. Çevre dostu yapısı ve biyouyumlu özellikleri nedeniyle özellikle tıbbi ve biyomedikal uygulamalarda büyük ilgi görmektedir. PLA, düşük toksisite ve kontrollü bozunma profili sayesinde doku mühendisliği iskeleleri, geçici implantlar, cerrahi

dikiş materyalleri ve ilaç taşıma sistemleri gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [1,5,17].



Şekil 2.10: PLA sentez şeması [41].

Ayrıca, iyi şekillendirilebilme kabiliyeti ve 3B yazıcılarla uyumlu olması, PLA'yı prototipleme ve kişiye özel tıbbi cihaz üretiminde avantajlı kılmaktadır. Mekanik olarak yüksek sertliğe ve düşük termal genleşmeye sahip olması, belirli mühendislik uygulamalarında da değerlendirilmesini mümkün kılar. Ancak, termal stabilitesinin ve nem karşısındaki dayanımının sınırlı olması, uzun vadeli yapısal uygulamalarda bazı kısıtlamalara yol açabilir [2,4,34].

PLA'nın sürdürülebilir üretim süreçlerine olan katkısı, onu yalnızca biyomedikal alanda değil, aynı zamanda çevreye duyarlı mühendislik çözümlerinde de öne çıkaran önemli bir polimer hâline getirmiştir. Şekil 2.11'de PLA malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örnekleri gösterilmiştir [17,18].



Şekil 2.11: PLA malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örnekleri.

2.4 Geri Dönüştürülmüş Polilaktik Asit (Re-PLA)

Yüksek oranda şeker kamışı, nişasta ve şeker kaynaklı polimer olan tarımsal ürünlerden elde edilen PLA'nın, geri dönüşüm yapılmadığı takdirde besin kaynaklarının tüketimini artırması

nedeniyle yeniden işlenmesi ve geri kazanılması, sosyoekonomik açıdan gereklidir. Ancak PLA'nın geri dönüşüm işlemi sonrasında meydana gelen bozunmalar, malzemenin özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, fiziksel geri dönüşüm işlemlerinden istenilen verimin alınamamasına neden olmaktadır.

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 çözeltilerle 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 [42]. 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 [43].

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 extrüderler 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 [44].

Geri dönüştürülmüş Polilaktik Asit (Re-PLA) kullanım ömrünü tamamlamış PLA bazlı ürünlerin fiziksel veya kimyasal yöntemlerle yeniden işlenmesi sonucu elde edilen, çevre dostu ve sürdürülebilir bir polimer malzemedir. Doğal kaynakların korunması ve plastik atıkların azaltılması amacıyla geliştirilen Re-PLA, döngüsel ekonomi yaklaşımları doğrultusunda hem çevresel hem de ekonomik fayda sağlamaktadır [18].

Re-PLA, orijinal PLA'nın biyolojik olarak parçalanabilirliği ve biyouyumluluğu gibi temel özelliklerini büyük ölçüde korurken; yeniden işlenme sürecine bağlı olarak mekanik

özelliklerinde (örneğin dayanım, sertlik ve termal stabilite) bazı değişiklikler gözlemlenebilmektedir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş PLA'nın mühendislik ve biyomedikal uygulamalardaki performansının optimize edilmesi amacıyla, üretim parametrelerinin ve katkı malzemelerinin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir [18].

Özellikle 3B baskı teknolojileri gibi kısa ömürlü veya prototiplemeye yönelik uygulamalarda re-PLA, düşük maliyetli ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, biyomedikal alanda tek kullanımlık veya geçici ürünlerde Re-PLA'nın potansiyel kullanımı giderek artmakta; bu da onu geri dönüşüm teknolojileri açısından stratejik öneme sahip bir biyopolimer hâline getirmektedir [18].

2.5 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)

Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) üç farklı monomerin (akrilonitril, bütadien ve stiren) kopolimerizasyonu ile elde edilen, amorf yapıya sahip, teknik özellikleri dengeli bir termoplastik polimerdir. Yüksek darbe dayanımı, sertlik, işlenebilirlik ve yüzey kalitesi gibi avantajları sayesinde otomotiv, elektronik, oyuncak ve beyaz eşya sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.[34] Polimer, belirgin bir erime noktasına sahip olmamakla birlikte yaklaşık 105 °C cam geçiş sıcaklığına sahiptir [45].

ABS, mekanik mukavemeti ve boyutsal kararlılığı sayesinde mühendislik uygulamalarında tercih edilen bir malzeme olup, aynı zamanda 3B baskı teknolojilerinde de sıkça kullanılmaktadır. Biyomedikal mühendisliği açısından değerlendirildiğinde, doğrudan vücut içine uygulanmasa da cerrahi eğitim modelleri, medikal cihaz dış kasaları ve prototipleme süreçlerinde ABS, ekonomik ve işlevsel bir çözüm sunmaktadır. ABS'nin sahip olduğu çok yönlü özellikler, onu hem geleneksel endüstrilerde hem de biyomedikal uygulamalarda dolaylı olarak değerli kılan bir polimer hâline getirmiştir [1].

Yüksek darbe dayanımı, sertlik ve ısıl kararlılığı sayesinde özellikle mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. İşlenebilirliğinin kolay olması ve yüzey kalitesinin yüksekliği nedeniyle, prototipleme, medikal cihaz muhafazaları ve biyomedikal alanlarda çeşitli yardımcı ekipmanların üretiminde potansiyel bir malzeme olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.12'de ABS malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örneği gösterilmiştir [1,21,34].



Şekil 2.12: ABS malzemesiyle ilgili tıbbi kullanım örneği.

2.6 Geri Dönüştürülmüş Akrilonitril Bütadien Stiren (Re-ABS)

Re-ABS (geri dönüştürülmüş ABS), çevresel sürdürülebilirliği destekleyen, fosil kaynaklara bağımlılığı azaltmak ve plastik atıkların çevreye etkisini en aza indirmek amacıyla geliştirilen bir mühendislik polimeridir [18]. Doğada biyobozunur olmayan ABS, mekanik geri dönüşüm yoluyla yeniden işlenebilmekte, ancak bu süreç sonunda çekme mukavemeti ve darbe dayanımı gibi bazı mekanik özelliklerinde %10-25 oranında azalma gözlemlenmektedir [45,46]. Yine de katkı maddeleri kullanılarak bu kayıplar telafi edilebilmektedir [47]. Re-ABS, otomotiv, ev eşyaları, kısa ömürlü prototipler ve 3B baskı uygulamaları gibi alanlarda maliyet etkin ve çevre dostu bir seçenek olarak değerlendirilmektedir [1,18]. Ayrıca, cerrahi eğitim modelleri gibi biyomedikal alanlarda, doğrudan vücut teması gerektirmeyen uygulamalarda da kullanılabilmektedir [1,18]. Özellikle lignin gibi biyobozunur katkılarla Re-ABS'in darbe dayanımının artırılabildiği çalışmalarla gösterilmiştir [48].

Re-ABS, eklemeli imalat süreçlerinde çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilir üretim döngülerinin sağlanmasında önemli bir rol üstlenmektedir [18]. Yapılan araştırmalar, Re-ABS'nin uçucu kül gibi endüstriyel atıklarla güçlendirilerek alternatif mühendislik çözümlerine dönüştürülebileceğini ortaya koymuştur [49,50].

2.7 Üç Boyutlu (3B) Yazıcılar

Üç boyutlu (3B) yazıcılar, dijital 3B model verilerini katman katman malzeme biriktirerek fiziksel nesnelere dönüştüren bilgisayar kontrollü üretim cihazlarıdır. Bu yazıcılar, genellikle katı, sıvı veya toz formundaki malzemeleri kullanarak, farklı üretim teknikleri aracılığıyla

istenilen nesneleri üretmektedir. 3B yazıcı teknolojisi ilk olarak 1980'li yılların sonunda geliştirilmiş ve başlangıçta prototipleme ile özelleştirilmiş üretim (örneğin medikal implantlar, yedek parçalar, oyuncaklar vb.) gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise bu teknoloji önemli ölçüde gelişmiş ve endüstriyel uygulamalardan ev tipi kullanıma kadar geniş bir alanda yaygınlaşmıştır [1]. Sanayi ve akademi ile birlikte, sağladığı kolaylıklar sayesinde bireysel kullanıcılar tarafından da tercih edilmekte ve her geçen gün daha fazla yaygınlık kazanmaktadır. Öte yandan, büyük hacimli ürünlerin üretiminde, yazıcının tabla hacmi sınırlı olduğundan parçalar küçük ebatlarda üretilerek montaj yoluyla birleştirilmekte ve istenilen boyut elde edilmektedir [51].

3B yazıcılar, farklı baskı teknolojileriyle çalışabilmektedir. Bu teknolojiler arasında Eriyik Yığma Modelleme (FDM), Stereolithography (SLA), Selective Laser Sintering (SLS) ve Electron Beam Melting (EBM) gibi yöntemler bulunmaktadır. Her bir baskı tekniği; kullanılan malzeme türü (plastik, metal, seramik vb.), baskı hassasiyeti ve üretim hızı açısından farklılık göstermektedir [1,18,21]. Günümüzde 3B yazıcılar; otomotiv, havacılık, tıp, mimarlık, moda ve eğitim gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlarda hızlı prototipleme, kişiselleştirilmiş parça üretimi, eğitim amaçlı modelleme ve hatta biyolojik doku yazdırılması (bioprinting) gibi uygulamalara olanak sağlamaktadır [1].

3B yazıcılarda kullanılan filament malzemeler, üretilen nesnenin işlevselliği ve performansı üzerinde doğrudan etkili olan en kritik unsurlardan biridir. Bu malzemeler, çoğunlukla termoplastik esaslı polimerlerden oluşmakta olup, belirli sıcaklık aralıklarında yumuşatılarak katman katman birleştirilmek suretiyle ürün oluşturulmaktadır. Filamentlerin baskı sıcaklığı, çekme dayanımı, esneklik, çözünürlük, biyouyumluluk ve geri dönüşüm potansiyeli gibi özellikleri, seçim kriterleri açısından belirleyici olmaktadır [52].

2.8 Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç Nokta Eğme Deneyi, malzemelerin eğilme altında gösterdiği mekanik davranışları değerlendirmek amacıyla uygulanan standart bir mekanik test yöntemidir. Bu deney, özellikle kompozitler, polimerler, metaller ve seramikler gibi farklı malzeme gruplarının eğilme dayanımı, elastiklik modülü ve kırılma davranışlarının nicel olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır [2].

Üç nokta eğme deney düzeneğinde test numunesi, iki destek noktası üzerine yerleştirilir ve ortasından tek bir yük uygulama noktası aracılığıyla yüklenir. Şekil 2.13'te üç nokta eğme

deneyi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yükleme, numune boyunca bir eğilme momenti oluşturarak hem çekme hem de basma gerilmelerinin eş zamanlı olarak incelenmesine olanak sağlamaktadır. Yük-deformasyon verileri üzerinden malzemenin maksimum eğilme dayanımı (flexural strength) ve elastik bölgedeki eğilme modülü (flexural modulus) hesaplanır. Mukavemet verilerinden yararlanılarak, üç nokta eğme deneyinde kullanılan hesaplamalar Denklem (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir [2].

$$M = \frac{P.L}{4} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max^c}}{I} \quad (2.2)$$

M: Moment

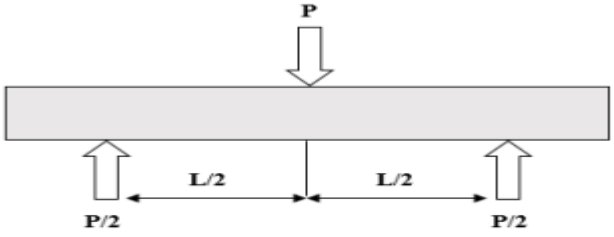
P: Yük sehim eğrisinin kuvveti

L: Mesnetlerin aralığı

σ_{max^c}: Maksimum eğme momenti

σ_{max}: Eğme gerilmesi

Üç nokta eğme deneyi, özellikle homojen olmayan yapıya sahip veya gevrek kırılma eğilimi gösteren malzemelerde, çekme ve basma testleriyle elde edilemeyen önemli veriler sunar. Ayrıca, katkı maddelerinin, üretim parametrelerinin veya geri dönüşüm süreçlerinin malzeme üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla da sıklıkla tercih edilir. Deneysel sonuçlar, malzemenin yapısal uygulamalarda karşılaşabileceği eğilme yükleri altındaki performansını öngörmek açısından kritik bir öneme sahiptir [2]. Şekil 2.13'te üç nokta eğme deneyi şematik olarak gösterilmektedir.



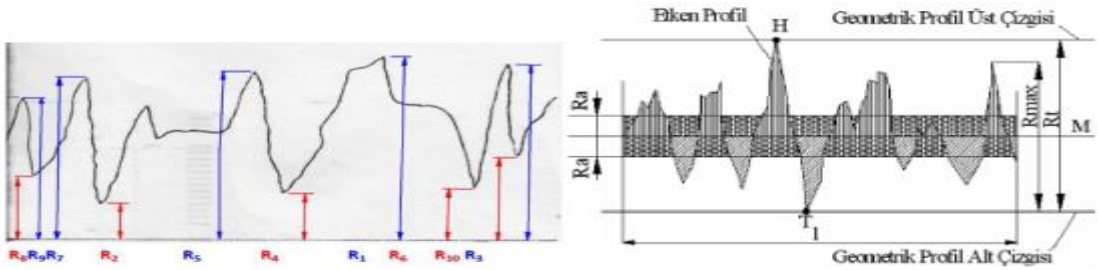
Şekil 2.13: Üç nokta eğme deneyine ait şematik gösterim.

2.9 Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, bir malzemenin veya üretilmiş bir parçanın mikroskobik düzeydeki düzensizliklerini ve yüzey topografyasını tanımlayan önemli bir fiziksel özelliktir. Özellikle mühendislik ve biyomedikal uygulamalarda, yüzey pürüzlülüğü; mekanik dayanım, aşınma direnci, yapışma özellikleri ve biyouyumluluk gibi fonksiyonel özellikleri doğrudan etkilediği için kritik bir parametre olarak kabul edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri genellikle profilometre cihazları ile yapılmakta olup, Ra (aritmetik ortalama pürüzlülüğü), Rt (maksimum tepe-çukur yüksekliği) ve Rz (maksimum pürüzlülük derinliği) gibi standart parametrelerle ifade edilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sayesinde üretim yöntemleri, işlem parametreleri, malzeme tipi veya uygulanan yüzey işlemlerinin yüzey kalitesine etkisi sayısal olarak belirlenebilir. Özellikle biyomedikal alanında implant yüzeylerinin pürüzlülüğü, hücre yapışması ve kemik entegrasyonu gibi biyolojik süreçleri yönlendirdiğinden büyük bir öneme sahiptir. Şekil 2.14'te yüzey pürüzlülüğü parametreleri şematik olarak gösterilmiş, Denklem (2.3)'te ise temel hesaplama yöntemi sunulmuştur [1,4].

$$Ra = \frac{1}{L}\int_0^L |x| dx \quad (2.3)$$



Şekil 2.14: Yüzey pürüzlülüğü Ra, Rt ve Rz ölçümü.

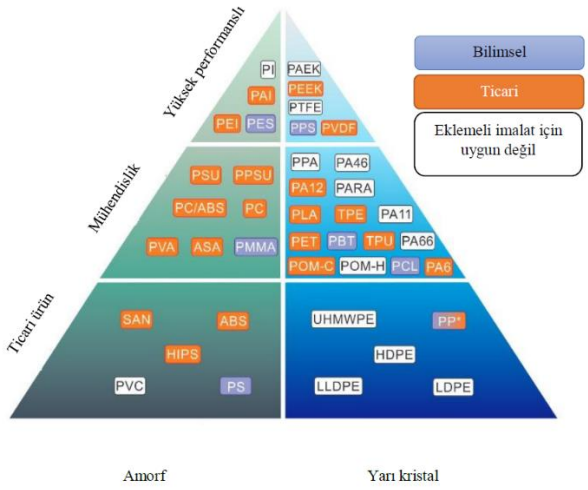
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Polimer malzemeler, geniş uygulama alanları, düşük yoğunlukları, kolay şekillendirilebilirlikleri ve değişken fiziksel-kimyasal özellikleri sayesinde, günümüzde mühendislikten biyomedikale kadar birçok sektörde vazgeçilmez hale gelmiştir. Özellikle son yıllarda hızla gelişen eklemeli imalat teknolojileri, polimerlerin üretim yöntemlerindeki yerini yeniden şekillendirmiştir. Bu teknolojiler, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha az malzeme kaybı, daha karmaşık geometrilerde üretim imkânı ve özelleştirilmiş çözümler sunmaktadır [52]. Ancak her polimer malzeme bu üretim yöntemine uygun değildir. Polimerlerin termal davranışları, kristalinite dereceleri, viskoelastik özellikleri ve nihai uygulamalardaki performans gereksinimleri, eklemeli imalat süreçlerinde doğrudan belirleyici faktörlerdir [53].

Polimerler genel olarak amorf ve yarı kristal olmak üzere iki ana yapısal sınıfa ayrılır. Amorf polimerler düzensiz moleküler zincir yapılarıyla tanımlanırken, yarı kristal polimerler hem amorf bölgeleri hem de düzenli, kristalin fazları içerir. Bu yapısal farklılıklar, erime sıcaklığı, camsı geçiş sıcaklığı, çözünürlük, mekanik mukavemet ve boyutsal kararlılık gibi birçok özelliği etkiler [54,55]. Örneğin; PEEK, PA ve PET gibi yarı kristal polimerler yüksek mekanik dayanım ve kimyasal direnç sunarken, ABS, PC ve PMMA gibi amorf polimerler işlenebilirlik ve boyutsal hassasiyet açısından avantajlıdır [56].

Şekil 3.1'de, polimer malzemeleri kristal yapılarına (amorf ve yarı kristal), performans düzeylerine (ticari ürün, mühendislik sınıfı ve yüksek performans) ve eklemeli imalata uygunluklarına göre üç yönlü bir sınıflandırma içerisinde sunulmaktadır. Söz konusu diyagramda polimerlerin bilimsel veya ticari bağlamda yaygın kullanım durumları renklerle belirtilmiş; eklemeli imalat süreçleriyle uyumlu olmayan malzemeler ise ayrıca işaretlenmiştir. Bu sınıflandırma sayesinde malzeme seçiminde mühendislik, biyomedikal veya endüstriyel uygulamalara yönelik doğru yönlendirme yapılabilmekte, özellikle eklemeli imalat teknolojilerinin malzeme bazlı sınırları daha net bir şekilde anlaşılabilmektedir [57,58]. Örneğin, amorf ABS ve yarı kristal yapılı PLA gibi düşük sıcaklıkta işlenebilen ve yaygın ticari kullanıma sahip polimerler FDM teknolojisinde sıklıkla tercih edilirken, yüksek performanslı PEI, PEEK veya PPSU gibi polimerlerin işlenmesi, özel donanım ve koşullar gerektirmektedir.

Dolayısıyla bu yapısal, termal ve performans temelli sınıflandırma, hem malzeme mühendisleri hem de eklemeli imalat alanında çalışan araştırmacılar için polimer bazlı üretim stratejilerinin doğru planlanmasına önemli katkılar sunmaktadır. Literatürde bu tür sistematik sınıflamalar, malzeme-makine-uygulama etkileşimini optimize etmek için temel teşkil etmekte ve yeni nesil fonksiyonel ürün tasarımına giden yolda yol gösterici olmaktadır [59].



Şekil 3.1: Polimer malzemelerin yapısal (amorf, yarı kristal) ve kullanım alanlarının şematik gösterimi [60].

Bu bölümde, çalışmada üretilen test numunelerine ait ölçü bilgileri, tasarımları, kullanılan yazılımlar ve üretimin gerçekleştirildiği makinelere ilişkin ayrıntılı bilgiler sunulmuştur. Ayrıca, üretilen parçalar üzerinde yapılan karakterizasyon çalışmalarının detaylarına da yer verilmiştir

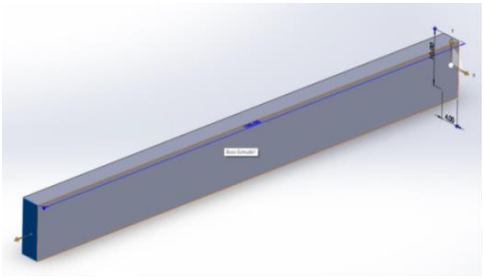
3.1 Kullanılan Malzeme ve 3B Yazıcı Özellikleri

Bu çalışmada, PLA ve ABS numunelerinin üretiminde malzeme olarak ELAS 3B markasına ait "PLA PLUS ve ABS PLUS" filamentleri tercih edilmiştir. Re-PLA ve Re-ABS numunelerinin üretiminde ise, PLA PLUS ve ABS PLUS filamentlerinden 3B yazıcıyla üretilen hatalı ürünlerin geri dönüştürülmesiyle elde edilen filamentler kullanılmıştır.

Tüm numuneler, Creality markasına ait CR-6 SE model 3B yazıcı kullanılarak, FDM (Eriyik Biriktirme Modellemesi) yöntemiyle üretilmiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te sırasıyla çalışmada kullanılan 3B yazıcı ve test numunesine ait teknik çizim gösterilmiştir. Tablo 3.1'de PLA, Tablo 3.2'de ise ABS malzemesine ait üretim parametreleri ve numune sayıları verilmiştir. Bu parametrelerin her biri, mekanik özellikler üzerinde nasıl bir etki yarattığını incelemek amacıyla sistematik olarak değiştirilmiştir.



Şekil 3.2: Creality markalı ve CR 6 SE modelli üç boyutlu yazıcı.



Şekil 3.3: Numunenin teknik çizimi.

Tablo 3. 1: PLA numune üretim parametreleri

No	Malzeme	Doluluk oranı, %	Katman kalınlığı, mm	Üretim açısı, °	Geri dönüştürülmüş, adet	Orijinal, adet
1	PLA	25	0,15	0	3	3
2				45	3	3
3				90	3	3
4			0,2	0	3	3
5				45	3	3
6				90	3	3
7			0,25	0	3	3
8				45	3	3
9				90	3	3
10		50	0,15	0	3	3
11				45	3	3
12				90	3	3
13			0,2	0	3	3
14				45	3	3
15				90	3	3
16			0,25	0	3	3
17				45	3	3
18				90	3	3
19		75	0,15	0	3	3
20				45	3	3
21				90	3	3
22			0,2	0	3	3
23				45	3	3
24				90	3	3
25			0,25	0	3	3
26				45	3	3
27				90	3	3
Toplam					**81**	**81**

Tablo 3. 2: ABS numune üretim parametreleri.

No	Malzeme	Doluluk oranı, %	Katman kalınlığı, mm	Üretim açısı, °	Geri dönüştürülmüş, adet	Orijinal, adet
1	ABS	25	0,15	0	3	3
2				45	3	3
3				90	3	3
4			0,2	0	3	3
5				45	3	3
6				90	3	3
7			0,25	0	3	3
8				45	3	3
9				90	3	3
10		50	0,15	0	3	3
11				45	3	3
12				90	3	3
13			0,2	0	3	3
14				45	3	3
15				90	3	3
16			0,25	0	3	3
17				45	3	3
18				90	3	3
19		75	0,15	0	3	3
20				45	3	3
21				90	3	3
22			0,2	0	3	3
23				45	3	3
24				90	3	3
25			0,25	0	3	3
26				45	3	3
27				90	3	3
Toplam					**81**	**81**

3.2 Geri Dönüştürme İşlemi

Geri dönüşüm sürecinde, 3B yazıcılarda üretim sonrasında oluşan hatalı parçalar toplanarak öncelikle temizleme işlemine tabi tutulmuştur. 3B baskı atıkları, endüstriyel koşullarda 85 °C sıcaklıkta, %1 NaOH ve %3 oranında aktif yüzey temizleyici içeren bir çözelti ile yıkanarak temizlenmiştir. Temizlik işleminin ardından malzemeler vakum altında kurutulmuştur. Geri dönüştürülmüş filament üretimi, 60 rpm vida devrine sahip ve L/D oranı 20 olan Rondol Microlab çift vidalı ekstrüderde gerçekleştirilmiştir.

3.3 Sterilizasyon İşlemi

Numuneler test işlemleri öncesinde 121°C'de, 15 dakika ve 1 bar basınçlı buhara maruz bırakılarak sterilizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Sterilizasyon işlemi sayesinde numunelerin sıcaklık değişimi altında nasıl bir bozuluma uğrayacağı gözlemlenmiştir. Bu sayede üretim

parametrelerinin hangisinin sterilizasyon işlemine daha uygun olduğu saptanmıştır. Şekil 3.4'te sterilizasyon cihazı ve numune örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Sterilizasyon cihazı ve numune örneği.

3.4 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, bir malzemenin eğilme dayanımı, esneklik modülü ve kırılma davranışlarını belirlemek amacıyla uygulanan standart bir mekanik test yöntemidir. Bu testte numune, iki destek noktası arasında yerleştirilmekte ve ortasından tek bir yük uygulanarak kırılma veya deformasyona uğraması sağlanmaktadır. Bu çalışmada, testler ISO 178 (destekler arası mesafe 64 mm, eğme hızı 2 mm/dak ve ortam sıcaklığı 21±3°C olarak) standardına uygun şekilde Zwick markalı Proline modelli üç nokta test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5'te üç nokta eğme cihaz görseli verilmiştir.



Şekil 3.5: Üç nokta eğme cihaz görseli.

3.5 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü, bir malzemenin yüzey kalitesini ve üretim sürecine ait parametrelerin (doluluk oranı, katman kalınlığı, üretim açısı) yüzeye etkisini değerlendirmede kritik bir ölçüttür. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Mutituyo markalı Surftest SJ-210 modeli

yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde en sık kullanılan Aritmetik Ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri esas alınmıştır. Test öncesinde numunelerin yüzeyleri temizlenmiş, herhangi bir fiziksel darbe ya da deformasyondan arındırılmıştır. Ölçümler, her numune için beş farklı noktadan alınarak ortalama değer hesaplanmıştır. Şekil 3.6'da yüzey pürüzlülüğü cihazı ve ölçümü düzeneği gösterilmiştir.



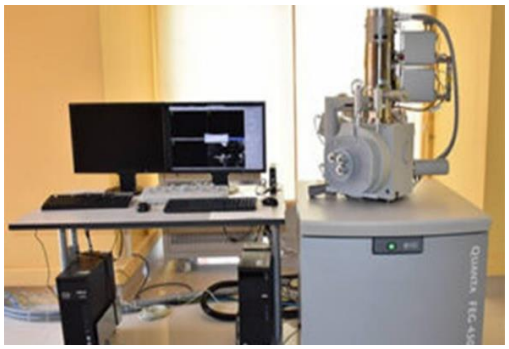
Şekil 3.6: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm düzeneği.

3.6 SEM Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM), polimer malzemelerin mikroyapısal karakterizasyonunda sıklıkla kullanılan, yüksek çözünürlüklü ve yüzeye duyarlı bir analiz tekniğidir. Bu yöntem, özellikle 3B baskı ile üretilen numunelerin katman yapısını, ara yüzey bütünlüğünü, gözenek oluşumlarını, tabaka ayrılmalarını ve mikroskobik çatlakları detaylı biçimde gözlemlemek açısından büyük avantaj sağlamaktadır [61].

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle üretilen orijinal ve geri dönüştürülmüş PLA ve ABS numunelerin yüzey morfolojileri, SEM analizi ile değerlendirilmiştir. Üretim parametrelerinin (geri dönüştürme) ve otoklav sterilizasyon yönteminin polimer mikroyapısı üzerindeki etkileri, SEM görüntüleri üzerinden analiz edilmiştir. Özellikle katmanlar arası yapışma, mikroskobik çatlak oluşumu, gözeneklilik düzeyi ve olası faz ayrışmaları SEM ile detaylı biçimde incelenmiştir [62,63].

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelere ait SEM çekimleri, İstanbul Arel Üniversitesi Polimer Teknolojileri ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi (Arel POTKAM)'nde bulunan FEI QUANTA 450 FEG ESEM marka ve FEG 450 model cihaz kullanılarak, 61x, 100x, 250x, 500x ve 1000x büyütmeler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7'de SEM cihazı gösterilmektedir.



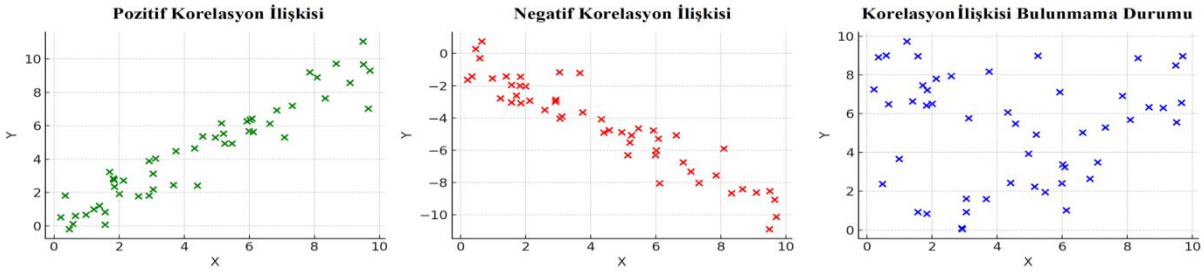
Şekil 3.7: SEM cihazı.

3.7 Matematiksel Modelleme

Katmanlı üretim teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, özellikle Polilaktik Asit (PLA) ve geri dönüştürülmüş PLA (Re-PLA) gibi biyobozunur termoplastiklerin kullanım alanları hızla genişlemiştir. Bu malzemelerin üretim süreçlerinde kullanılan parametreler - örneğin doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı ile sonrasında uygulanan sterilizasyon işlemlerinin malzeme performansı üzerindeki etkileri oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir [64,65]. Özellikle sterilizasyon işlemi, malzeme içerisinde mikro çatlak oluşumu ve içyapısal gerilimlerin yeniden dağılımı gibi fiziksel değişikliklere yol açarak, mekanik özellikleri önemli ölçüde etkileyebilmektedir [66,67].

Bu tür çok değişkenli sistemlerin analizinde, matematiksel modelleme yaklaşımları önemli bir rol oynamaktadır. Matematiksel modelleme, sistemin davranışını tanımlamak ve açıklamak için gözlemsel verilerle sayısal ilişki kuran matematiksel ifadeler geliştirmeyi amaçlar [68]. Bu tür çalışmalarda çoğunlukla doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon teknikleri, varyans analizi (ANOVA), korelasyon testleri ve çok değişkenli istatistiksel yöntemler kullanılmaktadır [69,70]. Bu sayede hem üretim sürecine ait parametrelerin hem de malzeme türü ve işlem geçmişi gibi faktörlerin çıktılar üzerindeki etkisi kantitatif olarak değerlendirilebilmektedir.

Korelasyon ilişkisi, iki değişken arasındaki ilişkinin yönünü ve derecesini belirleyen istatistiksel bir ölçüttür. Bir değişkendeki artışın diğer değişken üzerindeki etkisini gösterir; ancak bu durum, neden-sonuç ilişkisini ifade etmez. Pozitif korelasyon durumunda her iki değişken birlikte artar; negatif korelasyon durumunda ise bir değişken artarken diğeri azalır. Korelasyon katsayısı (r) –1 ile +1 arasında bir değer alır. $r \approx 0$ ise değişkenler arasında anlamlı bir ilişki yoktur; $r > 0$ ise pozitif, $r < 0$ ise negatif yönde bir ilişki olduğu söylenebilir. Şekil 3.8'de değişkenlerin korelasyon durumları örneklenmiştir.



Şekil 3.8: Değişkenlerin korelasyon ilişkisi.

Regresyon Analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi inceleyen bir yöntemdir. Doğrusal Regresyon, değişkenler arasındaki doğrusal ilişkiyi modellendirirken; Doğrusal Olmayan Regresyon, ilişki doğrusal olmadığında eğrisel veya karmaşık fonksiyonlarla bu ilişkiyi tanımlar. Best-Fit Modelleme ise, mevcut veri setine en iyi uyum sağlayan matematiksel modeli belirleyerek modelin tahmin gücünü en üst seviyeye çıkarmayı amaçlar ve genellikle R^2, AIC, BIC gibi kriterlerle değerlendirilir.

Bu tez kapsamında, 3B yazıcı ile üretilmiş PLA, Re-PLA, St-PLA, St-Re-PLA, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinin üretim parametrelerine karşı gösterdiği deformasyon davranışları (σ_{max}: Eğilme dayanımı (MPa), Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)) deneysel olarak analiz edilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak regresyon temelli matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller aracılığıyla, malzeme ve işlem parametrelerinin deformasyon üzerindeki etkileri istatistiksel olarak yorumlanmakta ve üretim sürecinin optimizasyonuna yönelik çıkarımlar sunulmaktadır.

Matematiksel modelleme ve analiz işlemleri için Wolfram Mathematica kullanılarak veri seti tanımlanmıştır. Her malzeme türü için bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkenler içeren veri alt kümeleri hazırlanmıştır. Bu çalışmada, 3B yazıcıyla üretilmiş ABS ve PLA türevlerine ait numunelerin σ_{max}: Eğilme dayanımı (MPa), Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm) değerleri, üç temel üretim parametresine (Doluluk Oranı – DO, Katman Kalınlığı – KK, Üretim Açısı – UA) bağlı olarak modellenmiştir. Parametreler arası olası doğrusal olmayan ilişkiler ve etkileşimleri göz önünde bulundurmak amacıyla ikinci dereceden çoklu regresyon modeli (quadratic multiple regression) tercih edilmiştir. Her bir PLA ve ABS türevi için, hem σ_{max} hem de Ra'ya ilişkin olmak üzere ayrı regresyon modelleri kurulmuştur. Mathematica yazılımı kullanılarak LinearModelFit fonksiyonu ile her model eğitilmiş, model yapısında yer alan tüm terimler dahil edilmiştir.

Doluluk oranı (X_1, DO), katman kalınlığı (X_2, KK) ve üretim açısı (X_3, UA) gibi üretim değişkenlerinin hem bireysel hem etkileşimsel katkıları değerlendirildiğinde, malzeme türüne göre farklı model davranışları incelenmiştir. Genel matematiksel form her bir model için aşağıdaki şekilde alınmıştır:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (1)$$

Burada Y hedef değişken olup σ_{max} ve Ra bağımlı değişkenlerine karşılık gelmektedir. Model katsayıları olan β_i değerleri varyanta göre belirlenmiş ve ikinci dereceden regresyon yöntemiyle tahmin edilmiştir. X_i $(i = 1, 2, 3)$ bağımsız değişkenleri de, sırasıyla, doluluk oranı (DO), katman kalınlığı (KK) ve üretim açısı (UA) dır.

DesignMatrix = PolynomialFeatures[{X1, X2, X3}, 2];

Regresyon katsayıları (β_i), en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmıştır:

β = LinearModelFit[DesignMatrix, Y, Variables];

Modelin gerçek değer ile olan uyumu; determinasyon katsayısı (R^2), ortalama mutlak hata (MAE) ve karekök ortalama hata (RMSE) kriterleri ile değerlendirilmiştir.

Bu model, literatürde FDM ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini tahmin etmekte yaygın olarak kullanılmaktadır [59,71] Model çıktılarında yer alan katsayılar **(**βi**)**, her bir parametrenin ve etkileşimlerinin bağımlı değişken üzerindeki etkisini nicel olarak tanımlar. Model performansları, test verileri üzerinde şu metriklerle değerlendirilmiştir: R^2 (Determination Coefficient): modelin açıklayıcılığı, RMSE (Root Mean Square Error): ortalama hata karelerinin karekökü, MAE (Mean Absolute Error): ortalama mutlak hata. Bu metrikler, hem hata büyüklüğünü hem de modelin genel doğruluğunu değerlendirmede kullanılır [69].

Model Eğitimi: veri setleri %70 eğitim, %30 test olacak şekilde ayrılmıştır (SeedRandom). Her malzeme türü için LinearModelFit kullanılarak 10 terimli regresyon denklemi oluşturulmuştur. Modele ait istatistiksel değerlendirme, ParameterTable komutuyla alınan katsayı, standart hata, t-istatistik ve p-değeri gibi ölçütlerle yapılmıştır. Model başarıları şu üç temel metrikle ölçülmüştür; R^2 (Determination Coefficient): modelin açıklayıcılığını gösterir. 1'e yaklaştıkça model daha başarılıdır [72]. MAE (Mean Absolute Error): tahmin ile gerçek

değer arasındaki mutlak farkların ortalaması. Bu değerin düşük olması istenir. RMSE (Root Mean Square Error): hataların karelerinin ortalamasının karekökü. Büyük hatalara karşı duyarlıdır [73].

Birleşik Model Girişimi: tüm PLA - ABS modellerinden elde edilen katsayıların ortalaması alınarak birleşik model kurulmuştur. Bu yaklaşım, genel eğilimleri yansıtacak tek bir modelle tahmin yapmayı amaçlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tıp ve biyomedikal alanlarda biyomalzeme olarak yaygın şekilde kullanılan PLA, geri dönüştürülmüş PLA (Re-PLA), ABS ve geri dönüştürülmüş ABS (Re-ABS) malzemelerine ilişkin gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Uygulanan testler sonucunda elde edilen veriler analiz edilmiş; gözlemlenen sonuçların ardında yatan olası etkiler ve nedenler ayrıntılı şekilde tartışılmıştır. Her bir testin bulguları ayrı ayrı ele alınarak değerlendirmeler yapılmış ve raporlanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak matematiksel modelleme gerçekleştirilmiştir.

4.1 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Bu çalışmada, üç nokta eğme testleri ISO 178 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de, deney numunesinin üç nokta eğme testine ait görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 4.1: Üç nokta eğme testi.

4.1.1 PLA Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen eğilme dayanımı değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.2'de PLA deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerindeki artış ve azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.2'de, PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre

verilmiştir. Ek-1 ve Ek-2'de, %25 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip St-PLA numunesine ait üç nokta eğme testi cihazından elde edilen sonuç raporu örnekleri verilmiştir.

Tablo 4.1: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları.

Doluluk Oranı, %	Katman Kalınlığı, mm	Üretim Açısı, °	σ_{max} PLA, Mpa	σ_{max} Re-PLA, Mpa	σ_{max} St-PLA, Mpa	σ_{max} St-Re-PLA, Mpa
25	0,15	0	53,4	65,0	65,4	68,4
		45	49,5	62,1	72,6	67,2
		90	65,4	76,2	57,0	64,8
	0,2	0	60,3	70,8	49,2	49,8
		45	60,9	70,5	57,6	63,0
		90	66,9	70,2	46,8	46,2
	0,25	0	65,7	72,6	46,2	57,6
		45	66,6	76,2	47,4	49,2
		90	65,1	66,6	42,6	45,6
50	0,15	0	57,6	63,9	71,4	70,8
		45	60,6	73,5	60,0	51,0
		90	65,7	69,3	58,2	61,2
	0,2	0	65,7	69,0	45,6	67,2
		45	56,7	72,0	39,0	69,0
		90	67,2	67,5	48,6	60,0
	0,25	0	70,5	87,9	51,6	55,2
		45	70,5	76,2	49,8	51,6
		90	67,8	78,9	39,0	65,4
75	0,15	0	75,0	80,1	75,6	53,4
		45	69,9	72,3	50,4	57,0
		90	75,3	75,9	61,8	66,6
	0,2	0	70,8	75,6	43,2	46,8
		45	70,5	76,8	46,2	56,4
		90	74,7	78,9	64,2	63,6
	0,25	0	73,8	90,0	60,6	58,2
		45	72,9	87,0	45,0	69,6
		90	75,6	69,0	60,0	59,4

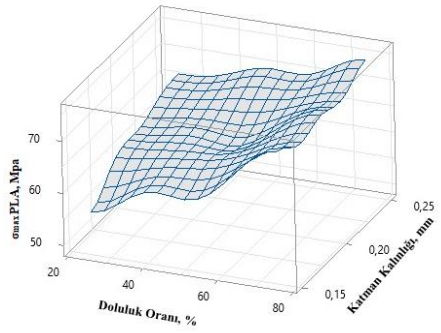
Tablo 4.2: PLA grubu numunelerin eğilme dayanımı ve % değişim oranları.

Doluluk	PLA	Re-PLA	St-PLA	St-Re-PLA
%25	61,533	70,022	53,867	56,867
%50	64,700	73,133	51,467	61,267
%75	73,167	78,400	56,333	59,000
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	5,146	4,443	-4,455	7,737
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	13,086	7,201	9,456	-3,700

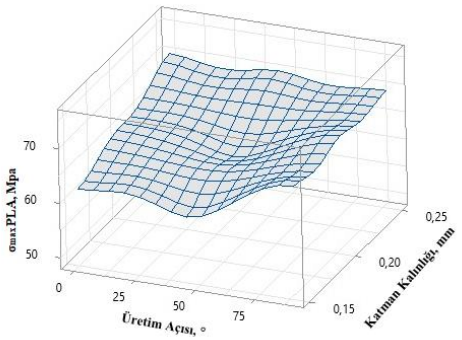
Tablo 4.2 (devamı): PLA grubu numunelerin eğilme dayanımı ve % değişim oranları.

Katman				
0,15mm	63,600	70,922	63,600	62,267
0,2mm	65,967	72,367	48,933	58,000
0,25mm	69,833	78,267	49,133	56,867
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	3,721	2,037	-23,061	-6,852
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	5,862	8,153	0,409	-1,954
Açı				
0°	65,867	74,989	56,533	58,600
45°	64,233	74,067	52,000	59,333
90°	69,300	72,500	53,133	59,200
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	-2,480	-1,230	-8,019	1,251
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	7,888	-2,115	2,179	-0,225

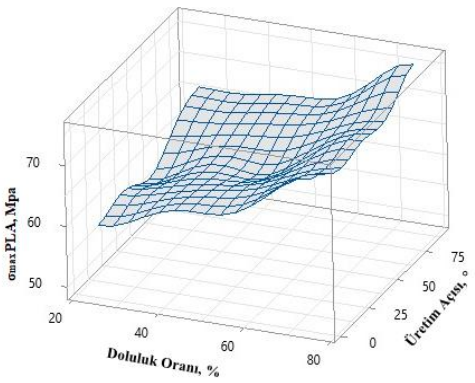
(a)



(b)



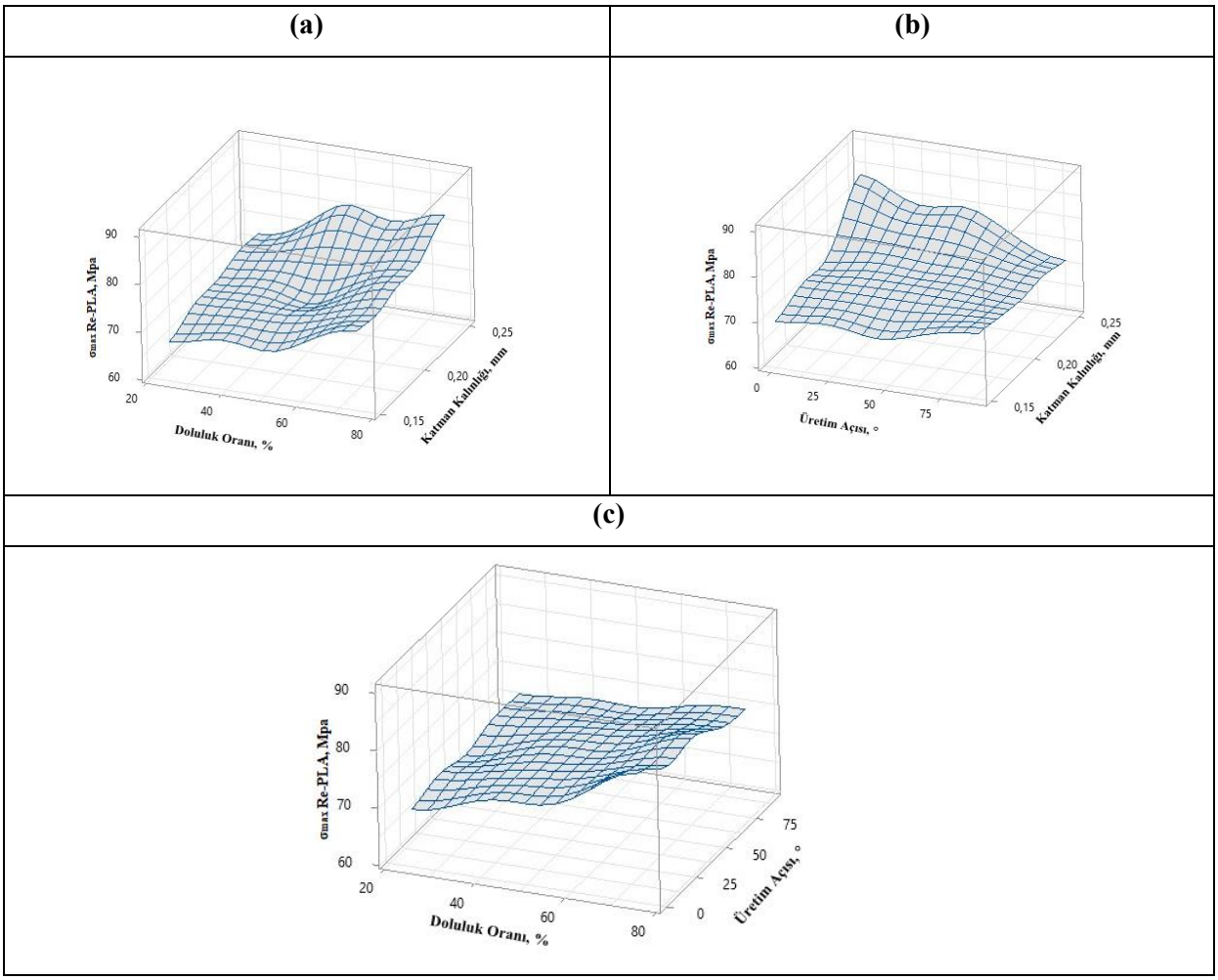
(c)



Şekil 4.2: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.2 ve Şekil 4.2 (a), (b) ve (c)'de verilen grafikler ve sonuçlar incelendiğinde; PLA numunelerinde doluluk oranı, üretim açısı ve katman kalınlığı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımının %5,146 oranında; %50'den %75'e artırılmasıyla ise %13,086 oranında arttığı görülmüştür. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında %3,721; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye artırılmasıyla yaklaşık %5,862 civarında bir artış olduğu tespit edilmiştir. Üretim açısına göre değerlendirildiğinde, açının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla %2,48 oranında bir azalma olduğu; ancak 45°'ten 90°'ye çıkarılmasıyla %7,888 oranında bir artış gerçekleştiği görülmüştür. PLA numunelerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu belirlenmiştir. Doluluk oranı malzemenin fiziksel yapısını ve iç dayanıklılığını doğrudan değiştirdiği için, diğer parametrelere kıyasla eğilme dayanımı üzerinde daha belirgin ve güçlü bir etkiye sahip olduğu görülmüştür [2–4]. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,25 mm katman kalınlığına ve 90° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür.

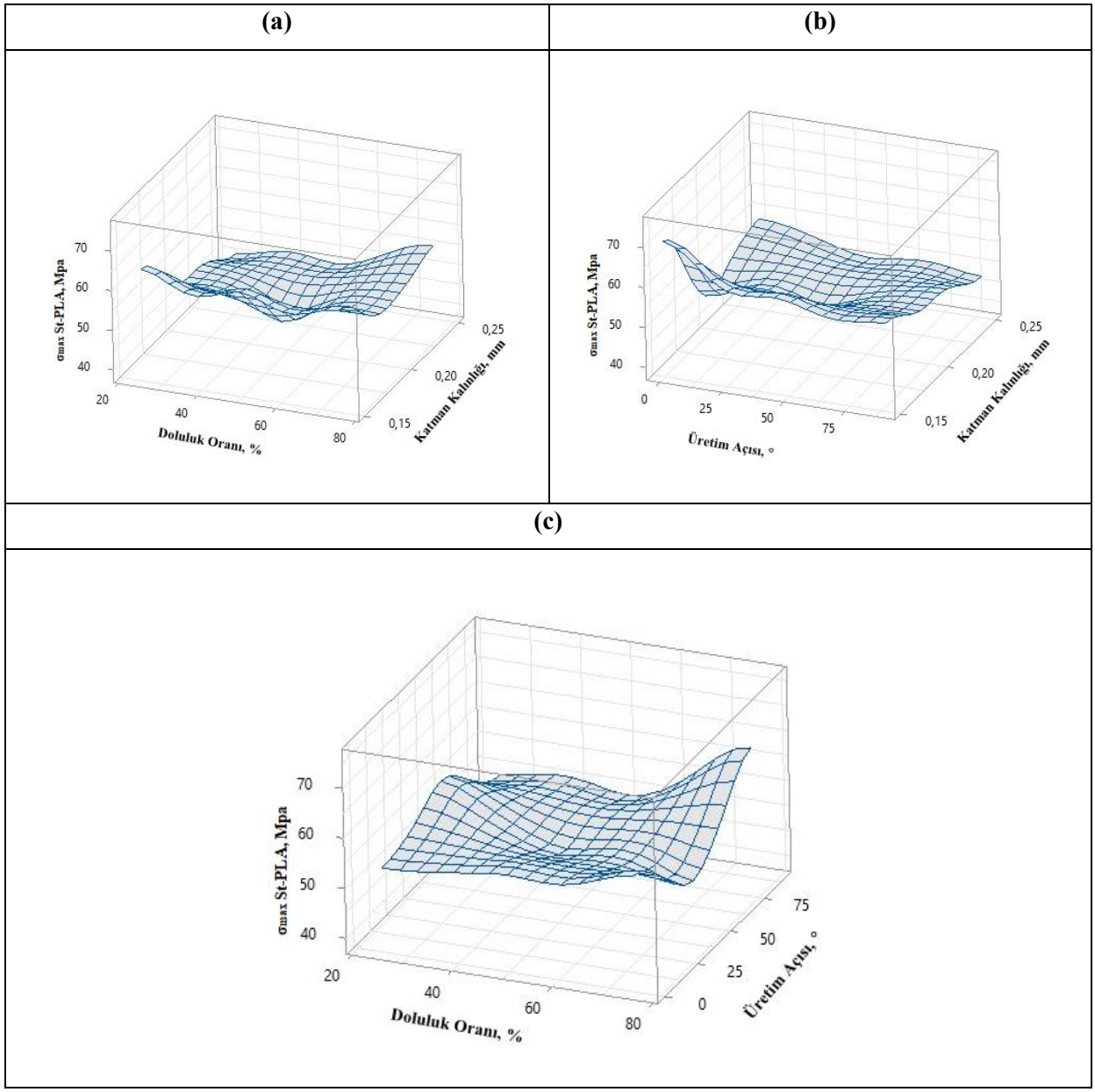
Şekil 4.3'te, Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



Şekil 4.3: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.2 ve Şekil 4.3 (a), (b) ve (c)'de verilen grafikler ve sonuçlar incelendiğinde; Re-PLA numunelerinde doluluk oranı ve katman kalınlığı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı, ancak üretim açısının artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında %4,443 oranında; %50'den %75'e artırılmasıyla ise %7,201 oranında artış olduğu görülmüştür. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %2; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye artırılmasıyla %8,153 civarında artış tespit edilmiştir. Üretim açısına göre ise, üretim açısının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla ≈ %1; 45°'ten 90°'ye çıkarılmasıyla ise ≈ %2 oranında azalma olduğu görülmüştür. Re-PLA numunelerinde doluluk oranı ile katman kalınlığının neredeyse aynı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Üretim açısının artması, katmanlar arası yapışmayı ve yük taşıma yönünü olumsuz etkileyerek eğilme dayanımında azalmaya neden olduğu düşülmektedir [2–4]. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,25 mm katman kalınlığına ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür.

Şekil 4.4'te, St-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

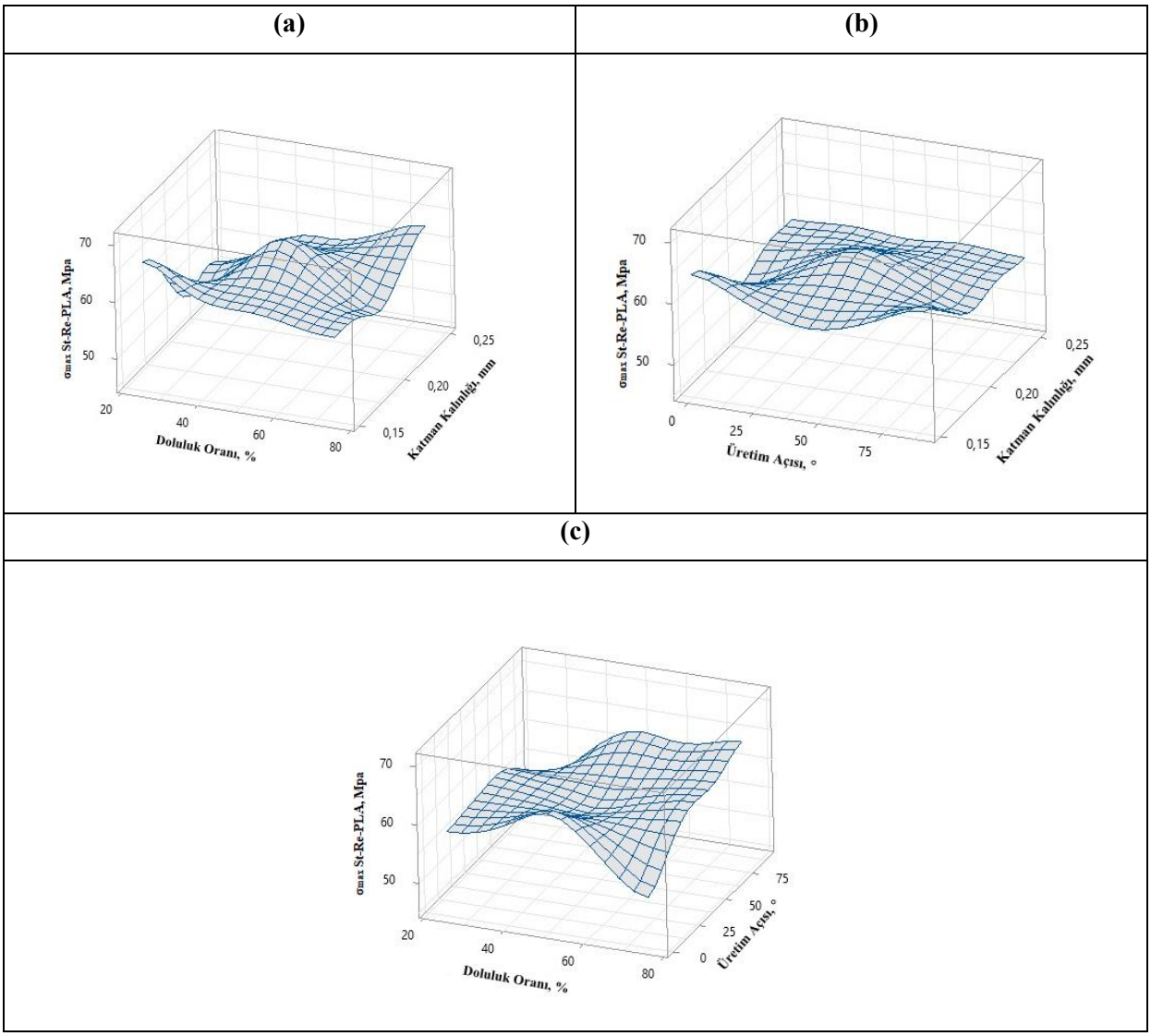


Şekil 4.4: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.2 ve Şekil 4.4 (a), (b) ve (c)'de verilen grafikler ve sonuçlar incelendiğinde; St-PLA numunelerinde doluluk oranının, katman kalınlığının ve üretim açısının etkili parametreler oldukları gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında %4,455 oranında azalma olduğu; ancak doluluk oranının %50'den %75'e artırılmasıyla %9,456 oranında artış gösterdiği ölçülmüştür. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %23 oranında azalma; 0,20 mm'den 0,25

mm'ye artırılmasıyla ise ≈ %0,4 civarında artış tespit edilmiştir. 0,20 mm kalınlığın kritik bir eşik olabileceğini ve katmanlar arası yapışmanın bu değerde minimum seviyeye düştüğünü göstermektedir. Üretim açısına göre ise, üretim açısının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %8 oranında azalma, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla ise ≈ %2 oranında artış olduğu gözlemlenmiştir. St-PLA numunelerinde katman kalınlığının eğilme dayanımı üzerinde daha yüksek bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir [1–4]. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,15 mm katman kalınlığına ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür.

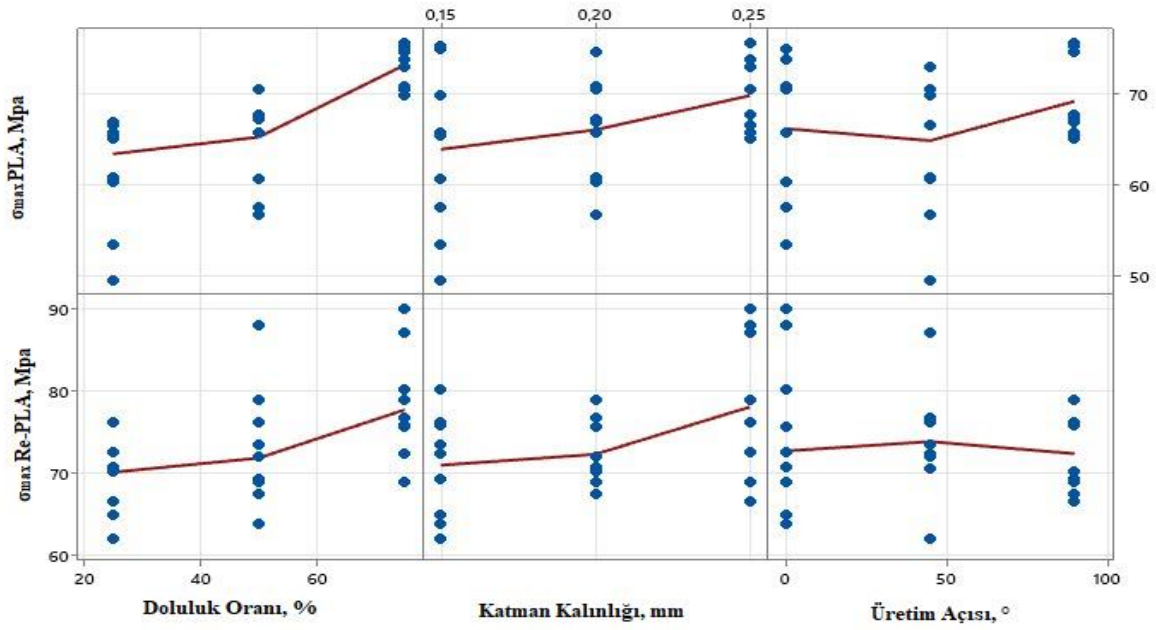
Şekil 4.5'te, St-Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



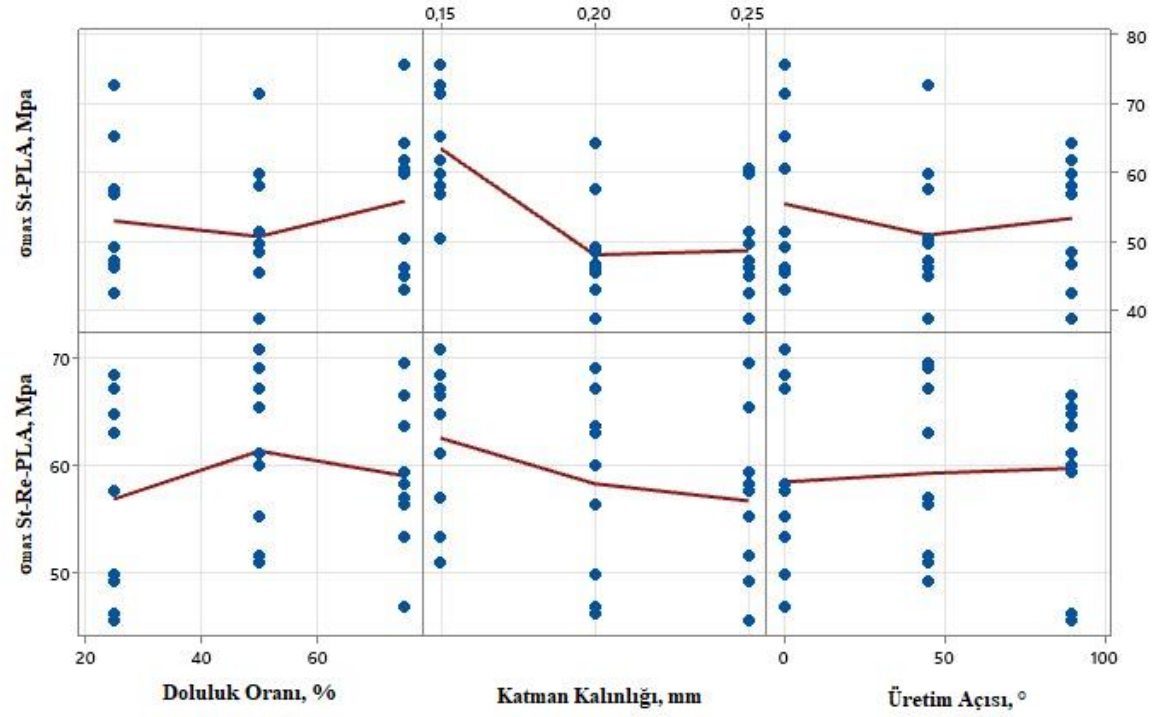
Şekil 4.5: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.2 ve Şekil 4.5 (a), (b) ve (c)'de verilen grafikler ve sonuçlar incelendiğinde, St-Re-PLA numunelerinde doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısının eğilme dayanımı üzerinde etkili parametreler olduğu gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında %7,737 oranında artış olduğu; ancak %50'den %75'e artırılmasıyla ise %3,7 oranında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında %6,852 oranında azalma; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılmasıyla ise ≈ %2 oranında ilave bir azalma gözlenmiştir. Üretim açısına göre değerlendirildiğinde, üretim açısının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %1 oranında artış; 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla ise neredeyse hiç etkilenmediği görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı, %50 doluluk oranına, 0,15 mm katman kalınlığına ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Genel olarak grafiklerde belirli bir düzenlilik gözlenememiştir. Bu durumun, numunelerin sterilizasyon ve geri dönüşüm işlemlerine tabi tutulmuş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [2–4,18].

Farklı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini daha genel bir bakış açısıyla değerlendirebilmek adına, malzeme türlerine göre elde edilen tüm veriler grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 4.6'da PLA ve Re-PLA numunelerine ait doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısına göre eğilme dayanımı test sonuçları; Şekil 4.7'de ise St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikler sayesinde, ilgili parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri daha net ve bütüncül bir şekilde yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.6: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri.



Şekil 4.7: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri.

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulan veriler doğrultusunda, PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme dayanımı testlerinin genel değerlendirmesi yapıldığında; doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı gibi üretim parametrelerinin her bir numune türü üzerinde farklı oranlarda etkili olduğu görülmektedir. Genel olarak PLA ve

Re-PLA numunelerinde doluluk oranının artması eğilme dayanımını artırırken; üretim açısının artışı PLA numunelerinde sınırlı düzeyde etki göstermekte, Re-PLA numunelerinde ise dayanımı düşürmektedir. Katman kalınlığının artışı her iki malzeme türünde de genellikle eğilme dayanımını artırmış, ancak bu artış bazı durumlarda sınırlı kalmıştır.

St-PLA numunelerinde doluluk oranındaki artışın başlangıçta eğilme dayanımını azaltması, ardından artış göstermesi bu parametrenin malzeme içyapısıyla olan karmaşık etkileşimini ortaya koymaktadır. Ayrıca, katman kalınlığına karşı daha yüksek hassasiyet gösteren St-PLA numunelerinde 0,20 mm kalınlığın kritik bir eşik olduğu belirlenmiştir. St-Re-PLA numunelerinde ise hem doluluk oranı hem de katman kalınlığı belirli aralıklarda eğilme dayanımında azalmaya neden olmuş, bu durum sterilizasyon ve geri dönüşüm süreçlerinin malzeme özellikleri üzerindeki olumsuz etkilerine bağlanmıştır.

Üretim açısının artışı ise genel olarak tüm numune türlerinde eğilme dayanımında sınırlı düzeyde azalmaya yol açmış, ancak bu etki bazı durumlarda ihmal edilebilecek seviyede kalmıştır. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda PLA tabanlı numunelerde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu; sterilizasyon ve geri dönüşüm işlemlerinin ise malzeme davranışını daha öngörülemez hâle getirdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş biyopolimerlerde üretim parametrelerinin daha dikkatli ve hassas şekilde optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [1–4,18].

Deformasyon testleri, bir malzemenin dış yükler altındaki mekanik davranışını değerlendirmek amacıyla uygulanan temel mühendislik testleridir. Malzemenin elastik, plastik ve kırılma davranışları; gerinim (strain) ve gerilme (stress) parametreleri üzerinden nicel olarak analiz edilerek, kullanım ömrü, dayanıklılık ve mühendislik tasarımlarına uygunluk gibi kritik veriler elde edilir. Özellikle son yıllarda, 3B yazıcılardan elde edilen geri dönüştürülmüş polimer malzemelerin performansını değerlendirmek amacıyla deformasyon testlerinin önemi artmıştır.

PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait deformasyon test sonuçları Tablo 4.3'te verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen deformasyon değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.4'te PLA deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak deformasyon değerlerindeki artış ve

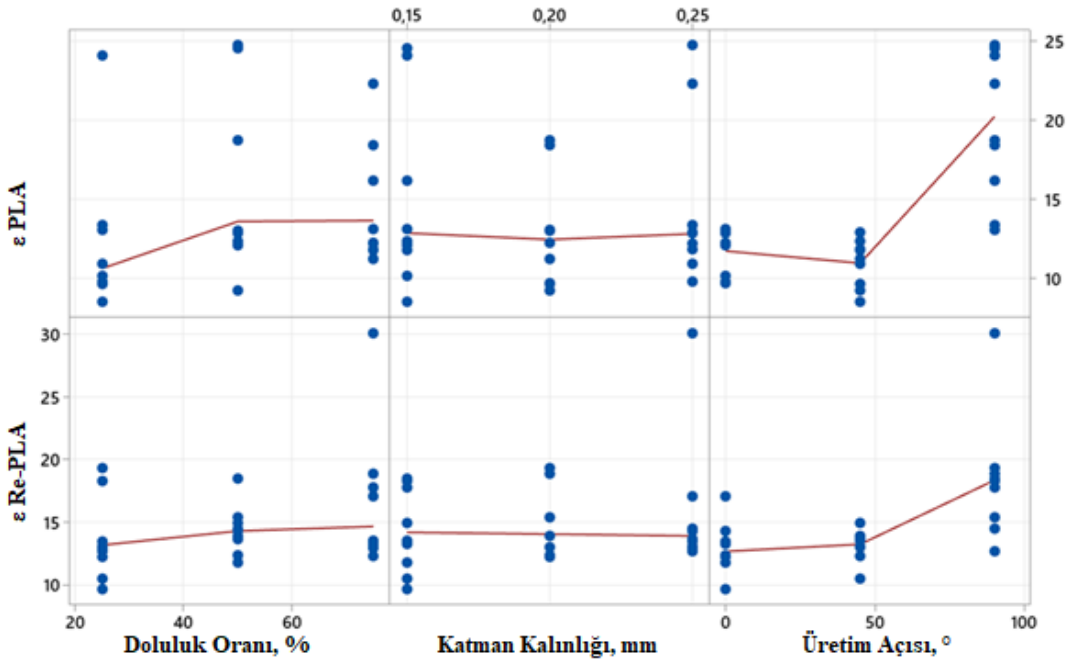
azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.8'de PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri, Şekil 4.9'da St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 4.3: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait şekil deformasyonu test sonuçları.

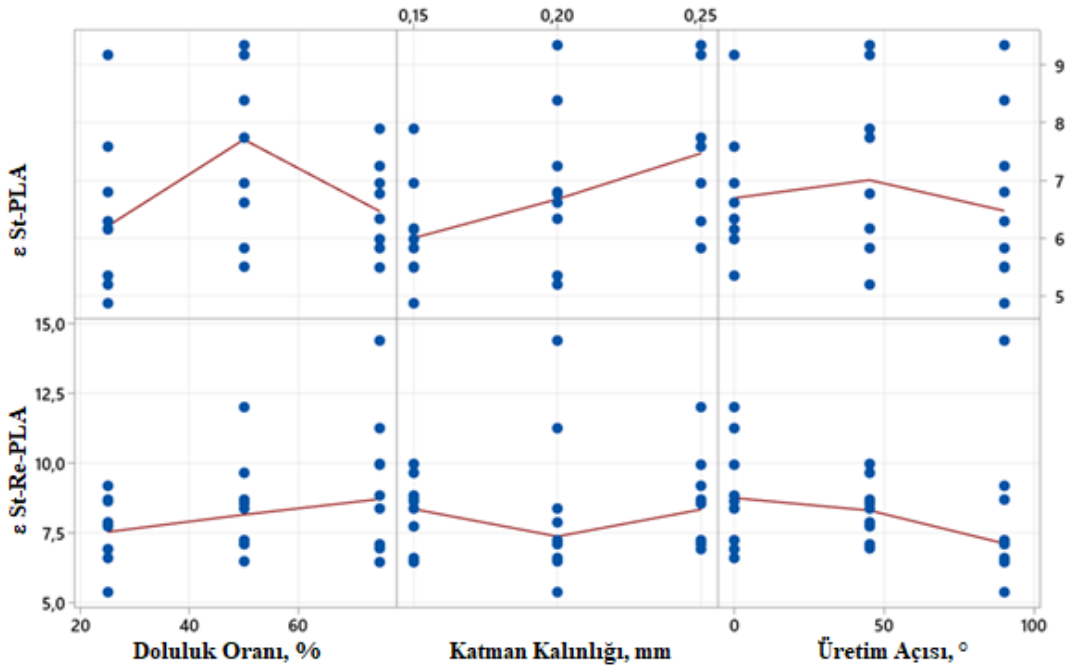
Doluluk Oranı, %	**Katman Kalınlığı, mm**	**Üretim Açısı, °**	**ε PLA**	**ε Re-PLA**	**ε St-PLA**	**ε St-Re-PLA**
25	0,15	0	10,189	9,633	6,148	8,651
		45	8,537	10,510	6,173	7,734
		90	24,023	18,296	4,871	6,621
	0,2	0	9,741	12,260	5,347	6,615
		45	9,662	12,988	5,193	7,890
		90	13,056	19,355	6,792	5,375
	0,25	0	9,811	13,453	7,581	6,942
		45	10,918	13,060	9,172	8,699
		90	13,387	12,670	6,299	9,189
50	0,15	0	12,113	11,781	6,949	8,389
		45	12,357	14,964	5,827	9,656
		90	24,491	18,487	5,509	8,706
	0,2	0	13,024	12,344	6,612	7,259
		45	9,248	13,928	9,340	7,102
		90	18,698	15,435	8,387	6,479
	0,25	0	12,887	14,306	9,168	12,013
		45	12,899	13,683	7,736	8,551
		90	24,723	14,492	9,340	7,249
75	0,15	0	13,142	13,295	5,989	8,854
		45	11,803	13,531	7,886	9,980
		90	16,150	17,761	5,490	6,462
	0,2	0	12,274	12,289	6,338	11,263
		45	11,248	12,283	6,771	8,381
		90	18,402	18,864	7,250	14,408
	0,25	0	12,192	17,088	6,945	9,964
		45	11,869	12,978	5,828	6,946
		90	22,278	30,140	5,827	7,106

Tablo 4.4: PLA grubu numunelerin şekil deformasyonu ve % değişim oranları.

Doluluk	PLA	Re-PLA	St-PLA	St-Re-PLA
%25	12,14	13,58	6,39	7,52
%50	15,60	14,38	7,65	8,37
%75	14,37	16,47	6,48	9,26
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	28,46	5,88	19,61	11,35
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	-7,89	14,53	-15,31	10,55
Katman				
0,15mm	14,75	14,25	6,09	8,33
0,2mm	13,01	14,41	6,89	8,30
0,25mm	14,55	15,76	7,54	8,51
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	9,45	1,16	13,10	-0,37
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	11,84	9,34	9,45	2,52
Açı				
0°	11,70	12,93	6,78	8,88
45°	10,94	13,10	7,10	8,32
90°	19,46	18,38	6,64	7,95
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	-6,48	1,26	4,66	-6,26
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	77,80	40,34	-6,50	-4,46



Şekil 4.8: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri.



Şekil 4.9: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri.

Tablo 4.4, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulan deformasyon (ε) verileri doğrultusunda, PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numuneleri üzerinde uygulanan üretim parametrelerinin şekil değişimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Üretim parametreleri olarak ele alınan doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısının, numune türüne bağlı olarak farklı oran ve yönlerde deformasyon davranışını etkilediği tespit edilmiştir.

PLA numunelerinde doluluk oranı %25'ten %50'ye artırıldığında deformasyon %28,46 oranında artarken, %50'den %75'e artışta %7,89 oranında bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, doluluk oranının artışıyla içyapıda boşlukların azalması ve malzemenin yük altındaki deformasyon kapasitesinin artmasına bağlanabilir. Ancak %75 doluluk oranında, yapı daha rijit hâle geldiği için deformasyon kapasitesinde bir azalma meydana gelmiş olabilir. Re-PLA'da ise benzer şekilde %25'ten %50'ye geçişte artış sınırlı %5,88 kalmış, %50'den %75'e geçişte ise %14,53 oranında artmıştır. Bu da Re-PLA'nın içyapısındaki düzensizlikler nedeniyle doluluk oranına PLA kadar duyarlı olmadığını göstermektedir [1–4,18]. Sterilize edilmiş numunelerde (St-PLA ve St-Re-PLA) deformasyon artışı doluluk oranıyla daha düzensiz ilerlediği tespit edilmiştir. St-PLA'da %25'ten %50'ye artışta deformasyon %19,61 artarken, %50'den %75'e artışta %15,31 oranında azalmıştır. Bu durum, sterilizasyon sonrası içyapıda oluşan mikroçatlakların dolulukla birlikte etkisini yitirdiğini düşündürmektedir

[66,69,74,75]. St-Re-PLA'da ise doluluk oranı arttıkça deformasyondaki artış düzensiz olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulan deformasyon (ε) verileri katman kalınlığına göre incelendiğinde; PLA numunelerinde katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artmasıyla deformasyon %9,45 oranında artarken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkmasıyla %11,84 artmıştır. Bu durum, ince katmanda daha kırılgan bir yapı oluşurken, kalın katmanda katmanlar arası bağın nispeten zayıflamasına rağmen deformasyon kapasitesinin artabileceğini göstermektedir. Re-PLA'da bu farklar oldukça düşük kalmış, katman kalınlığına karşı daha stabil bir yapı sergilemiştir. St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinde ise katman kalınlığı arttıkça deformasyonun düzensiz olduğu görülmüştür. Özellikle St-PLA'da %13,10 ve %9,45 gibi dalgalı artış sonuçları, sterilizasyon sonrası katmanlar arası yapının zayıflamasına bağlanabilir. St-Re-PLA'da değişim daha stabil olup çok sınırlı etki göstermiştir.

Aynı tablo ve şekiller üretim açısı sonuçlarına göre değerlendirildiğinde; PLA numunelerinde üretim açısı 0°'den 45°'ye çıkarıldığında deformasyonda %6,48 düşüş, 45°'ten 90°'a çıkarıldığında ise %77,80 gibi oldukça yüksek bir artış gözlenmiştir. Bu durum, 90° üretim açısında yükleme yönünün katmanlar arası bağlara dik olması nedeniyle deformasyonun daha kolay gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Re-PLA'da benzer şekilde %40,34 artışla, üretim açısının deformasyon üzerindeki etkisi doğrulanmıştır ancak etkisi PLA kadar yüksek değildir. Geri dönüştürülmüş malzemelerde üretim açısı değişimi daha sınırlı etki yaptığı görülmüştür [1–4,18]. St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinde üretim açısına bağlı deformasyon dalgalı seyretmiş, St-PLA'da %0°-45° arası %4,66 artış, 45°-90° arası %6,50 azalma gözlenmiştir. St-Re-PLA'da ise değişimler sınırlı kalmış ve üretim açısının etkisinin sterilizasyonla birlikte azaldığı görülmüştür [1–4,64,65,67,70].

4.1.2 ABS Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları Tablo 4.5'te verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen eğilme dayanımı değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.6'da ABS deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak eğilme dayanımı değerlerindeki artış

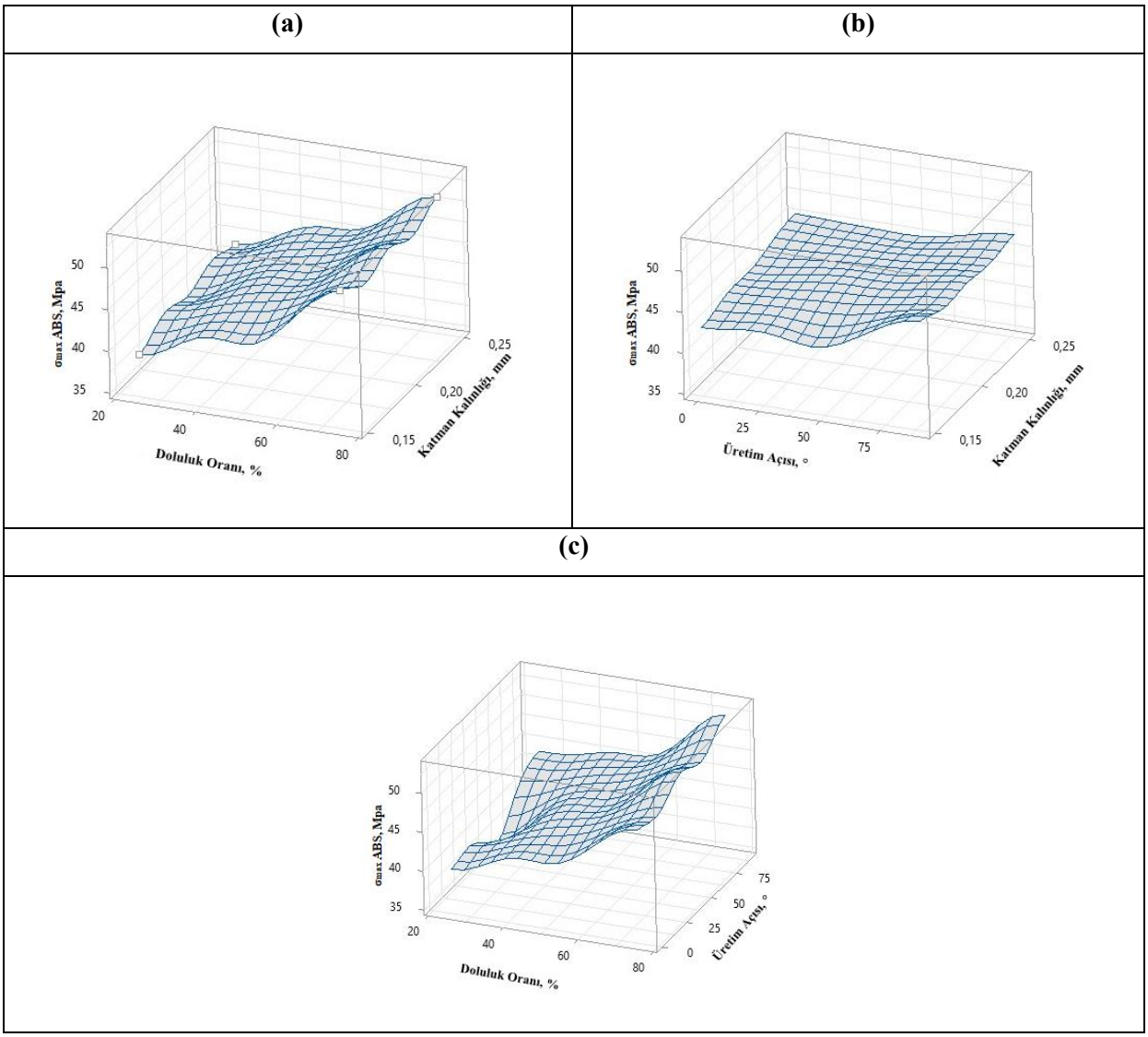
ve azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.10'da, ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

Tablo 4.5: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları.

Doluluk Oranı, %	**Katman Kalınlığı, mm**	**Üretim Açısı, °**	**σ_{max} ABS**	**σ_{max} Re-ABS**	**σ_{max} St-ABS**	**σ_{max} St-Re-ABS**
25	0,15	0	39,6	43,5	42,0	37,8
		45	35,4	45,3	43,8	40,2
		90	43,2	43,8	37,2	40,2
	0,2	0	39,0	38,4	49,8	40,8
		45	38,7	42,6	50,4	42,0
		90	44,1	41,1	43,8	43,2
	0,25	0	41,4	33,9	45,6	43,2
		45	38,1	37,2	42,0	45,0
		90	44,1	42,6	42,0	31,8
50	0,15	0	39,3	43,2	46,2	48,0
		45	41,7	45,3	52,2	48,6
		90	46,8	48,3	36,0	39,6
	0,2	0	43,8	47,1	48,0	49,8
		45	45,9	46,2	48,6	51,0
		90	44,4	42,9	45,6	31,2
	0,25	0	45,0	48,6	58,8	47,4
		45	45,6	49,8	49,2	46,8
		90	44,4	44,7	42,0	42,0
75	0,15	0	49,2	54,0	60,6	64,2
		45	50,4	59,4	60,5	62,4
		90	53,1	55,2	52,8	54,6
	0,2	0	48,3	54,9	55,8	58,8
		45	51,0	56,1	56,4	56,4
		90	51,6	51,9	50,4	51,0
	0,25	0	49,2	50,7	57,6	54,6
		45	50,7	57,0	55,2	54,0
		90	52,2	51,9	49,8	53,4

Tablo 4.6: ABS grubu numunelerin eğilme dayanımı ve % değişim oranları.

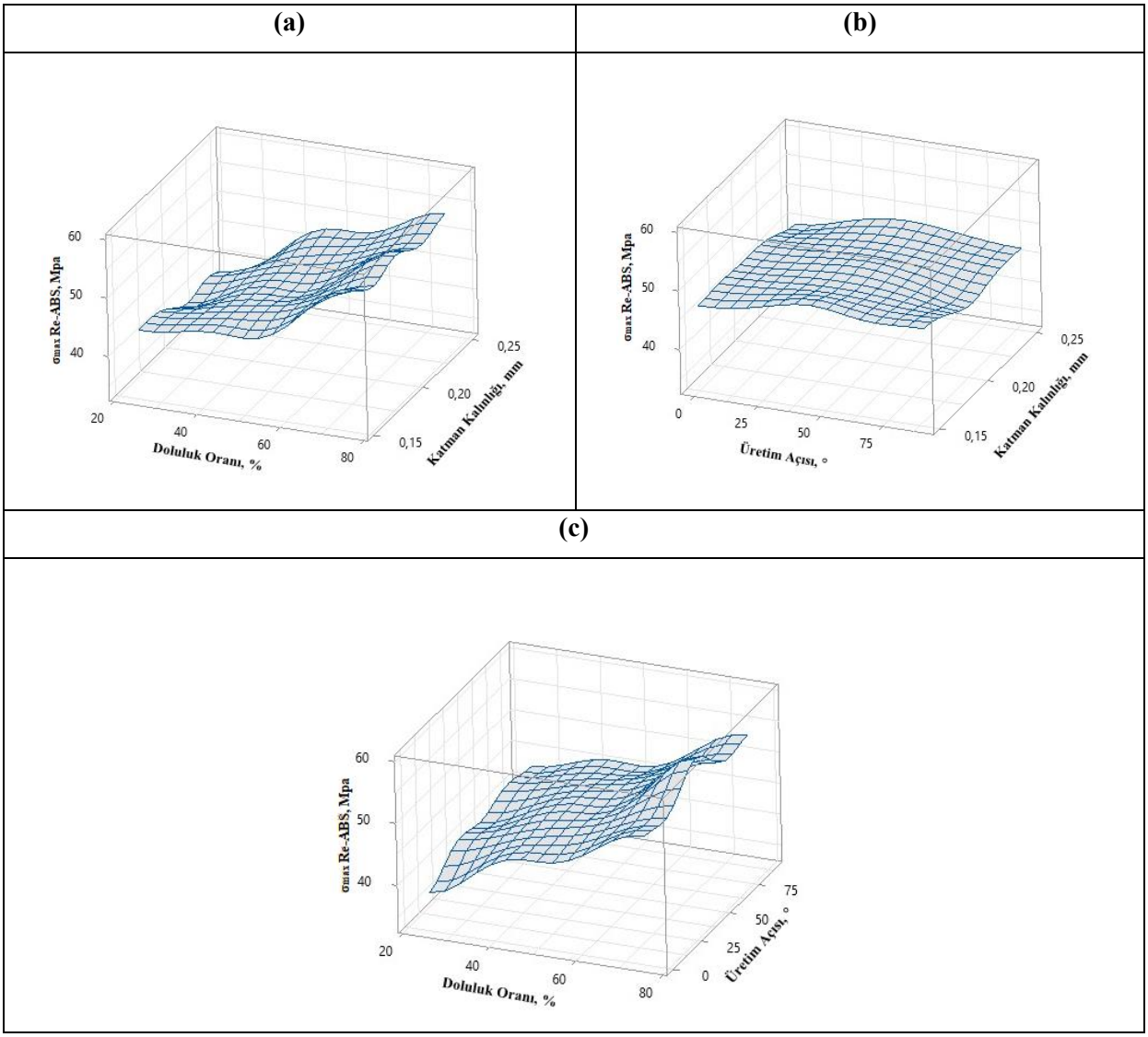
Doluluk	**ABS**	**Re-ABS**	**St-ABS**	**St-Re-ABS**
%25	40,400	40,933	44,067	40,467
%50	44,100	46,233	47,400	44,933
%75	50,633	54,567	55,467	56,600
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	9,158	12,948	7,564	11,038
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	14,815	18,025	17,018	25,964
Katman				
0,15mm	44,300	48,667	47,933	48,400
0,2mm	45,200	46,800	49,867	47,133
0,25mm	45,633	46,267	49,133	46,467
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	2,032	-3,836	4,033	-2,617
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	0,959	-1,140	-1,471	-1,414
Açı				
0°	43,867	46,033	51,600	49,400
45°	44,167	48,767	50,933	49,600
90°	47,100	46,933	44,400	43,000
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	0,684	5,938	-1,292	0,405
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	6,642	-3,759	-12,827	-13,306



Şekil 4.10: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.6 ve Şekil 4.10 (a), (b) ve (c)'de verilen grafikler ve sonuçlar incelendiğinde; ABS numunelerinde doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %9 oranında, %50'den %75'e artırılmasıyla ise %14,815 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %2 oranında, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye artırılmasıyla ise yaklaşık ≈ %1 oranında artış meydana geldiği belirlenmiştir. Üretim açısının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %0,7 oranında artış olduğu; 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla ise bu artışın ≈ %6,7 oranına ulaştığı gözlemlenmiştir. ABS numunelerinde, eğilme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu görülmüştür. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,15 mm katman kalınlığına ve 90° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür [4,21].

Şekil 4.11'de, Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

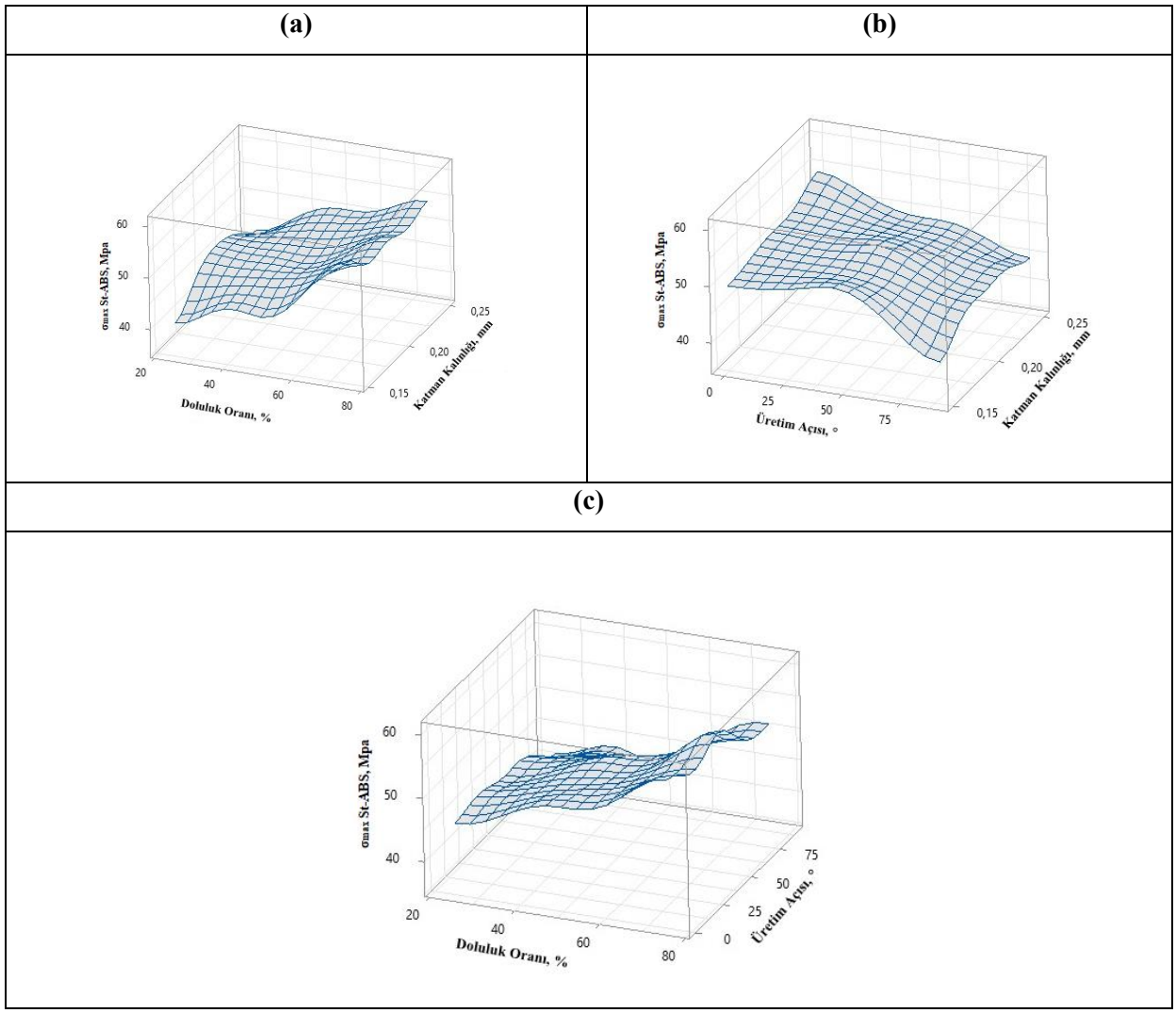


Şekil 4.11: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.6 ile Şekil 4.11 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve sonuçlar incelendiğinde, Re-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça eğilme dayanımının arttığı, katman kalınlığı arttıkça eğilme dayanımının azaldığı ve üretim açısının ise belli bir değerden sonra artıştan azalmaya geçtiği gözlemlenmiştir. Yapılan analizlerde, doluluk oranının %25'ten %50'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında yaklaşık %13, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise yaklaşık %18 oranında bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılması, eğilme dayanımında yaklaşık %4'lük bir azalmaya; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılması ise yaklaşık %1 oranında ek bir azalmaya neden olmuştur. Üretim açısının

0°'den 45°'ye yükseltilmesiyle eğilme dayanımı yaklaşık %6 oranında artarken, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla %3,759 oranında bir azalma gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, Re-ABS numunelerinde eğilme dayanımı üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu tespit edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,15 mm katman kalınlığına ve 45° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür [18,21].

Şekil 4.12'de, St-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



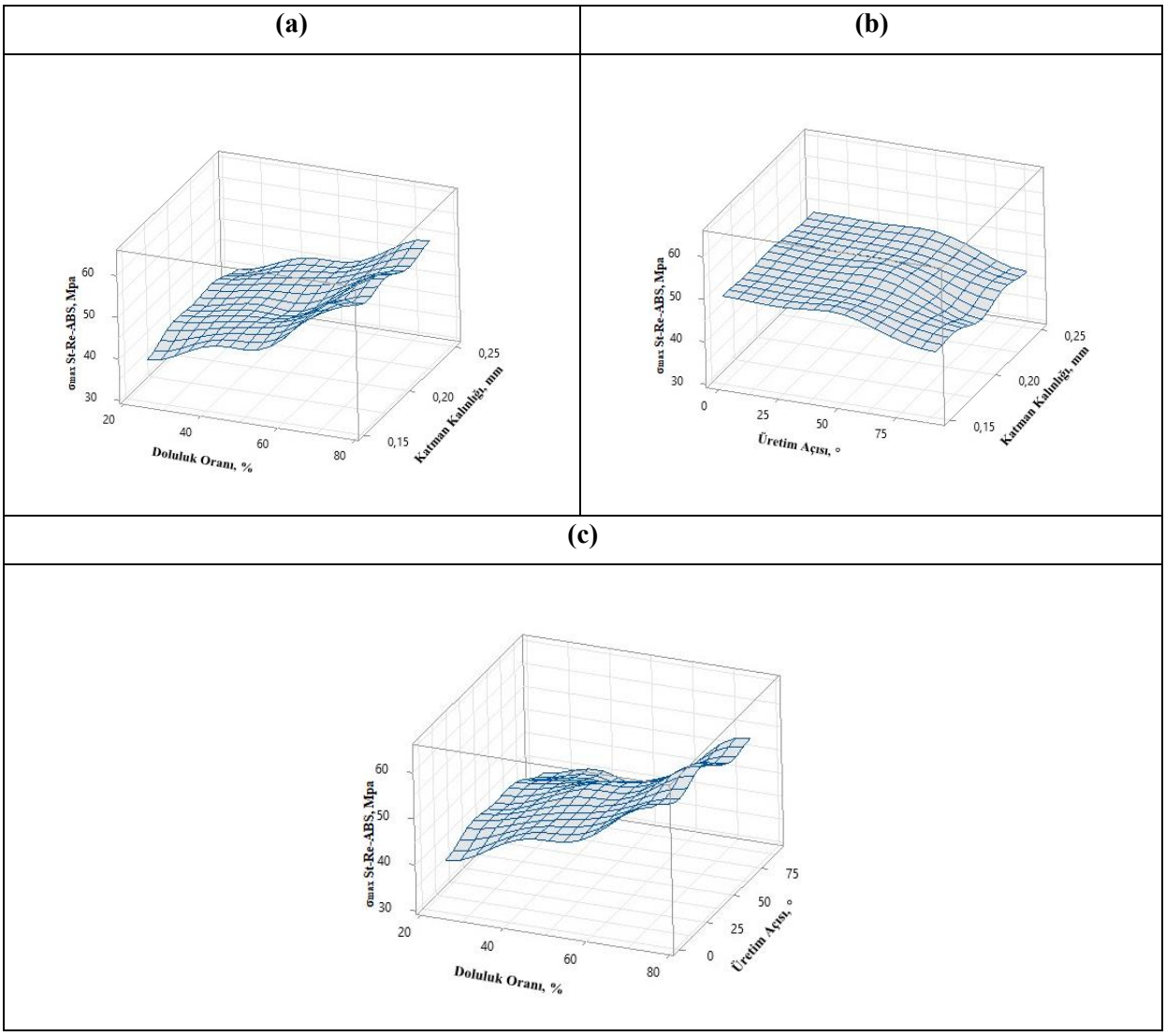
Şekil 4.12: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.6 ve Şekil 4.12 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve sonuçlar incelendiğinde, St-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı, buna karşılık üretim açısının artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten

%50'ye çıkarılmasıyla eğilme dayanımında %7,564 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise ≈ %17 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %4 oranında bir artış gözlenirken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye artırılması durumunda eğilme dayanımında ≈ %1,5 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, 0,20 mm katman kalınlığının kritik bir eşik olabileceğini ve bu değerde katmanlar arası yapışmanın minimum seviyeye düştüğünü göstermektedir [2,4,21].

Üretim açısının 0°'den 45°'ye yükseltilmesiyle eğilme dayanımında %1,292 oranında azalma görülürken, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla bu azalmanın %13,306'ya ulaştığı belirlenmiştir. En yüksek eğilme dayanımı, %75 doluluk oranına, 0,15 mm katman kalınlığına ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür [2,21].

Şekil 4.13'de, St-Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



Şekil 4.13: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-ABS numunelerinin eğilme dayanımı test sonuçları.

Tablo 4.6 ve Şekil 4.13 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve sonuçlar incelendiğinde, St-Re-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça eğilme dayanımının da arttığı; buna karşılık katman kalınlığı ve üretim açısının artmasıyla eğilme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %11 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise %25,964 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum, doluluk oranının artmasıyla içyapıda daha fazla malzeme hacmi oluşması ve iç destek yapıların mekanik yükleri daha etkin taşıyabilmesi ile açıklanabilir [4,18,21].

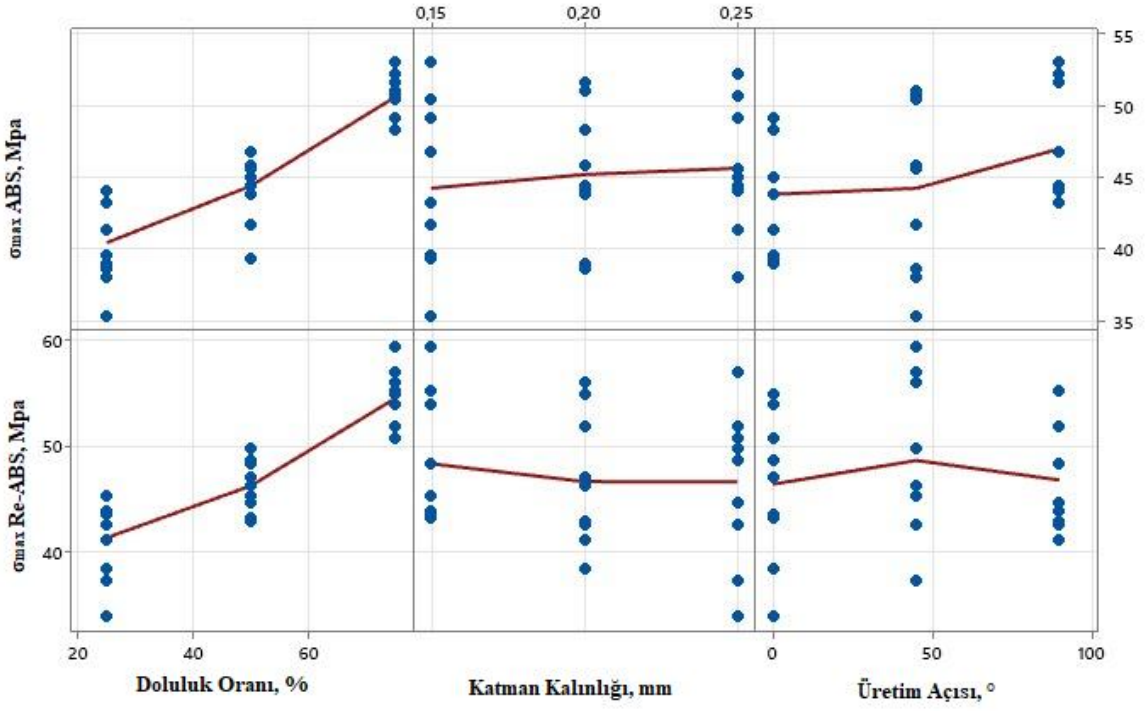
Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla eğilme dayanımında ≈ %2,5 oranında bir azalma gözlenirken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye artırılması durumunda ise eğilme dayanımında ≈ %1,5 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Katman kalınlığındaki artış, katmanlar arası bağlanma kalitesini düşürebileceğinden, katmanlar arası yapışma

mukavemetinin azalmasına yol açmış ve bu durum eğilme dayanımının düşmesine neden olmuştur. Özellikle geri dönüştürülmüş malzemelerde, termal geçmişin bu yapışma kalitesini daha da olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir [2,18].

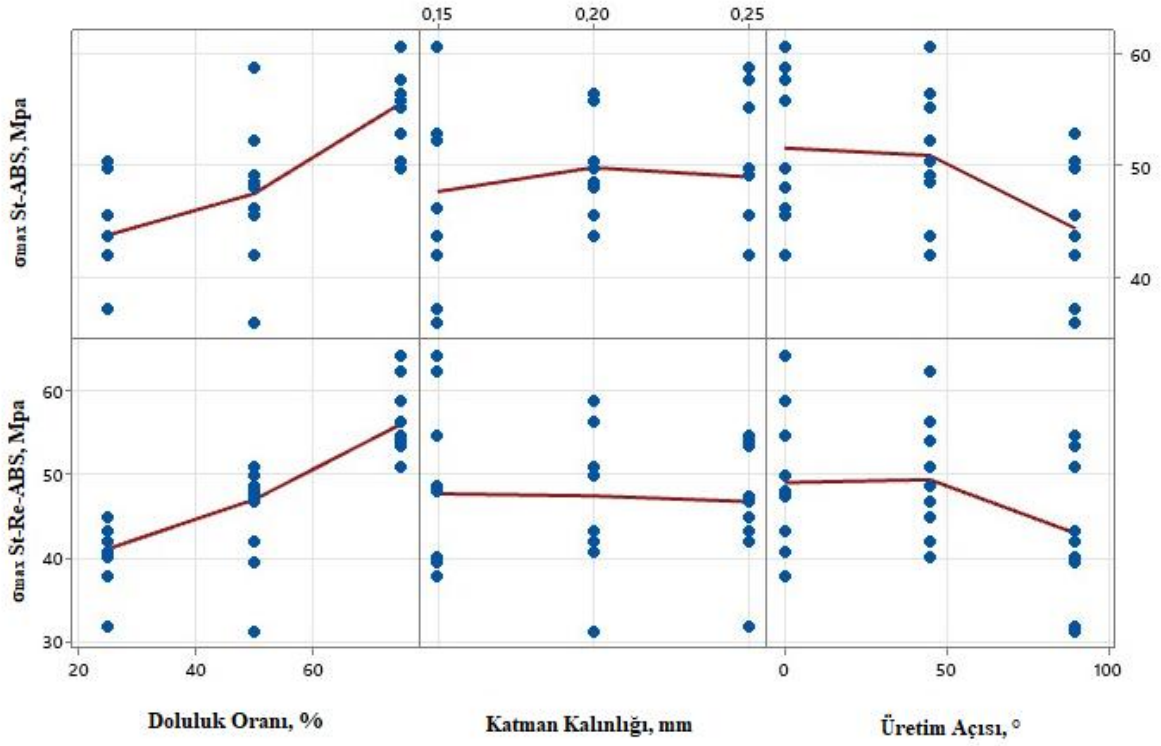
Üretim açısının 0°'den 45°'ye yükseltilmesiyle eğilme dayanımında %0,4 oranında sınırlı bir artış gözlemlenmiştir. Ancak, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla %13,3 oranında belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalma, üretim açısının 90°'ye yükseltilmesiyle numune yapısında oluşan yük aktarım yönünün katmanlar arası yapışma yönüne ters düşmesiyle ilişkilendirilebilir. Katmanlar arası ayrılma eğilimi bu açıda artmakta, bu da eğilme dayanımının düşmesine neden olmaktadır [2].

Elde edilen bulgular doğrultusunda, eğilme dayanımının en yüksek olduğu numunenin; %75 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip olan numune olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerin kombinasyonu, hem içyapısal bütünlüğü artırmış hem de katmanlar arası yapışma kalitesini koruyarak mekanik performansa olumlu katkı sağlamıştır [21].

Farklı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini daha genel bir bakış açısıyla değerlendirebilmek adına, malzeme türlerine göre elde edilen tüm veriler grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 4.14'te ABS ve Re-ABS numunelerine ait doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısına göre eğilme dayanımı test sonuçları; Şekil 4.15'te ise St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikler sayesinde, ilgili parametrelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri daha net ve bütüncül bir şekilde yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.14: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri.



Şekil 4.15: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sunulan grafiklere göre yapılan genel değerlendirmede, tüm malzemelerde doluluk oranı eğilme dayanımı üzerinde en belirgin etkiye sahip parametre olarak öne çıkmıştır. Doluluk oranının artması, içyapıda daha fazla malzeme hacmi oluşturmakta ve bu durum yük taşıma kapasitesini ve yapısal bütünlüğü artırarak eğilme dayanımını doğrudan olumlu yönde etkilemektedir. Buna karşın, katman kalınlığı ve üretim açısı parametrelerinin etkisinin malzeme türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir [2–4,21].

Orijinal ABS ve Re-ABS numunelerinde, her üç parametredeki artış genel olarak eğilme dayanımını artırmış; özellikle Re-ABS numunelerinde elde edilen sonuçların orijinal ABS'ye oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, geri dönüşüm işleminin mekanik özellikler üzerinde önemli bir olumsuz etkisinin bulunmadığını ortaya koymaktadır. Öte yandan, sterilize edilmiş ABS (St-ABS) ve geri dönüştürülüp sterilize edilmiş ABS (St-Re-ABS) numunelerinde, doluluk oranı arttıkça eğilme dayanımında artış gözlemlenirken; katman kalınlığı ve üretim açısı arttıkça eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir. Özellikle geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş numunelerde, uygulanan termal ve kimyasal işlemlerin katmanlar arası yapışma kalitesini olumsuz etkilediği değerlendirilmektedir.

Elde edilen tüm bu bulgular, 3B yazıcı ile üretilen ABS esaslı malzemelerin mekanik performansını artırabilmek için üretim parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, geri dönüşüm süreçlerinin uygun şekilde yönetilmesi durumunda, malzemelerin performansında ciddi bir kayıp yaşanmayacağı anlaşılmaktadır [1,2,18,21].

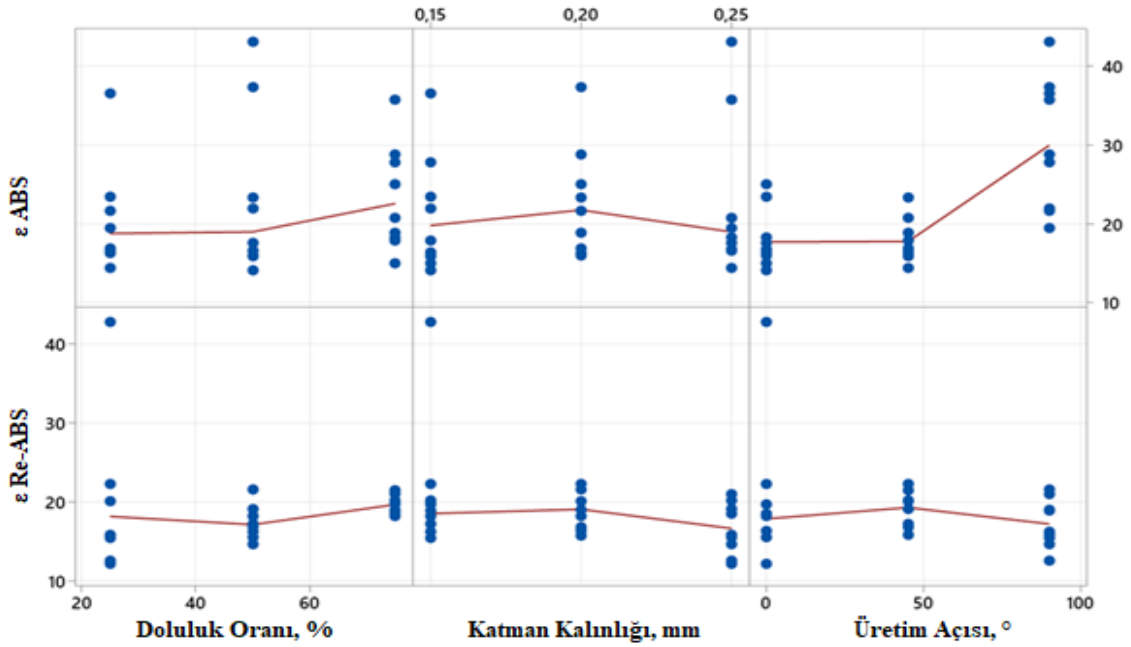
ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait deformasyon test sonuçları Tablo 4.7'de verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen deformasyon değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.8'de ABS deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak deformasyon değerlerindeki artış ve azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.16'da ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri, Şekil 4.17'de St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 4.7: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait şekil deformasyonu test sonuçları.

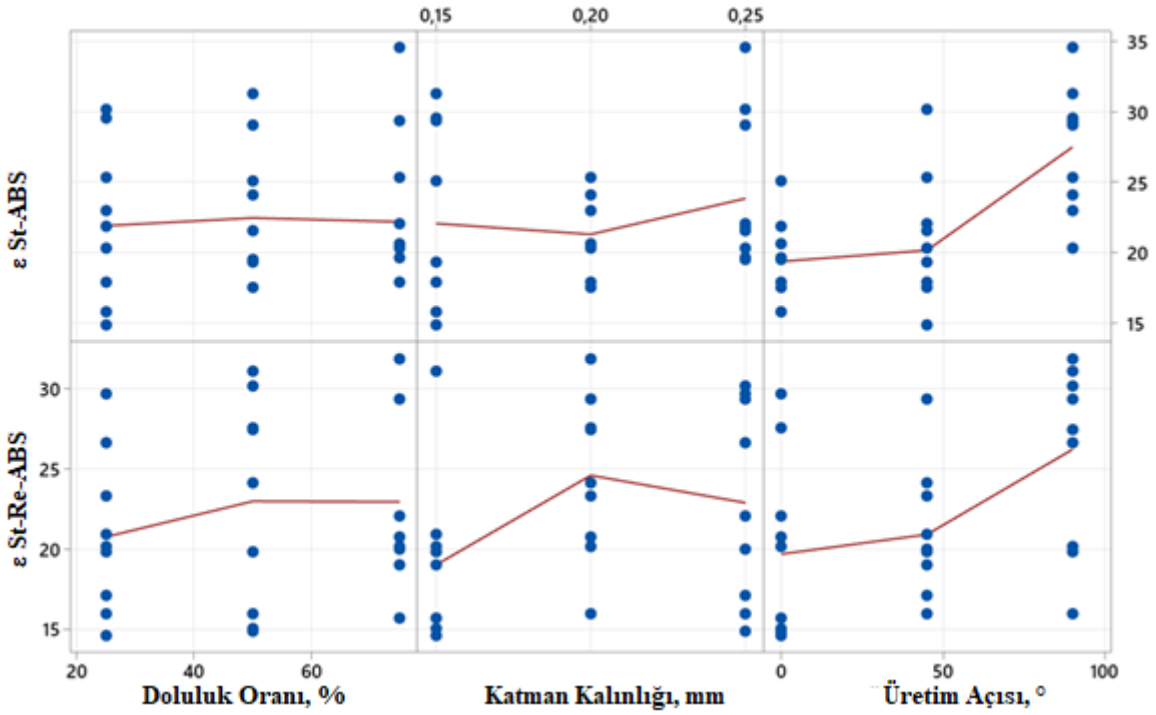
Doluluk Oranı, %	Katman Kalınlığı, mm	Üretim Açısı, °	ε ABS	ε Re-ABS	ε St-ABS	ε St-Re-ABS
25	0,15	0	23,397	42,844	15,829	14,592
		45	16,401	22,3615	14,876	20,935
		90	36,521	15,5255	29,532	19,819
	0,2	0	16,308	22,336	17,913	20,159
		45	16,877	20,1455	25,350	23,304
		90	21,636	15,766	23,015	15,999
	0,25	0	16,786	12,1795	21,886	29,68
		45	14,385	15,926	30,160	17,106
		90	19,426	12,658	20,328	26,624
50	0,15	0	14,094	18,2325	25,067	15,06
		45	15,922	17,274	19,364	19,825
		90	21,982	16,3135	31,252	31,091
	0,2	0	15,989	16,3835	17,582	27,587
		45	23,314	16,8785	17,581	24,132
		90	37,312	21,6515	24,107	27,448
	0,25	0	17,597	15,618	19,540	14,876
		45	16,561	19,1215	21,588	15,993
		90	43,039	14,7315	29,052	30,16
75	0,15	0	15,042	19,737	17,925	15,681
		45	17,841	20,222	17,929	19,04
		90	27,746	18,9615	29,368	20,141
	0,2	0	25,038	18,231	20,624	20,769
		45	18,877	21,5715	20,315	29,359
		90	28,786	19,018	25,350	31,894
	0,25	0	18,316	18,538	19,683	22,093
		45	20,781	20,214	22,044	20,024
		90	35,693	21,021	34,563	29,359

Tablo 4.8: ABS grubu numunelerin şekil deformasyonu ve % değişim oranları.

Doluluk	ABS	Re-ABS	St-ABS	St-Re-ABS
%25	20,19	19,97	19,94	18,94
%50	22,86	17,35	22,79	22,90
%75	22,83	19,72	23,08	22,74
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	13,24	-13,09	14,31	20,89
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	-0,14	13,64	1,30	-0,70
Katman				
0,15mm	20,99	21,27	22,34	19,57
0,2mm	22,68	19,10	21,31	24,51
0,25mm	22,51	16,66	24,31	22,87
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	8,04	-10,17	-4,62	25,23
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	-0,76	-12,77	14,07	-6,67
Açı				
0°	18,06	20,45	19,41	20,05
45°	17,88	19,30	21,02	20,97
90°	30,23	17,29	27,39	25,83
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	-0,98	-5,64	8,30	4,59
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	69,07	-10,40	30,31	23,16



Şekil 4.16: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri.



Şekil 4.17: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin şekil deformasyonu üzerindeki etkileri.

Tablo 4.8, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de sunulan deformasyon (ε) verileri doğrultusunda, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numuneleri üzerinde uygulanan üretim parametrelerinin şekil değişimi üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Üretim parametreleri olarak ele alınan doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısının, numune türüne bağlı olarak farklı oran ve yönlerde deformasyon davranışını etkilediği tespit edilmiştir.

ABS ve Re-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça deformasyon davranışında bazı farklılıklar gözlemlenmiştir. ABS numunelerinde, doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılması deformasyonda %13,24 oranında bir artışa neden olurken, %50'den %75'e artırılması durumunda deformasyon oranında kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Re-ABS numunelerinde ise %25'ten %50'ye artış deformasyonu %13,09 oranında azaltırken, %50'den %75'e artış %13,64 oranında tekrar artırmıştır. Bu durum, Re-ABS malzemelerde geri dönüşüm kaynaklı içyapıdaki düzensizliklerin deformasyon davranışını daha kararsız hâle getirdiğini göstermektedir [48,76,77]. St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça deformasyon genellikle artmıştır. Özellikle St-Re-ABS numunelerinde %25'ten %50'ye geçişte %20,89 artış, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ≈ %1 çok düşük bir azalma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar sterilizasyon ve geri dönüşüm

süreçlerinin birlikte uygulandığı numunelerde, doluluk oranının deformasyon davranışını belirgin şekilde etkilediğini göstermektedir [77].

Tablo 4.8, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de sunulan deformasyon (ε) verileri katman kalınlığına göre incelendiğinde; ABS numunelerinde katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla deformasyonda %8,04 oranında artış meydana gelmiş, ancak 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılması durumunda deformasyonda ≈ %1 oranında bir azalma görülmüştür. Re-ABS numunelerinde ise katman kalınlığının artışı deformasyonu genel olarak azaltmış ve sırasıyla %10,17 ve %12,77 oranlarında düşüşler tespit edilmiştir. St-ABS numunelerinde ise katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye artırılmasıyla deformasyonda %4,62 oranında azalma görülmüş, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarıldığında ise %14,07 oranında artış meydana gelmiştir. Bu durum, sterilizasyon işleminin katmanlar arası bağlarda düzensizlik ve kırılganlık oluşturduğuyla açıklanabilir. Özellikle yüksek sıcaklık ve basınç altında yapılan sterilizasyon işlemleri, polimer yapıların mikro düzeyde bütünlüğünü bozarak, katmanlar arası yapışma kalitesini olumsuz etkileyebilmekte ve bu da deformasyon davranışında beklenmeyen dalgalanmalara yol açabilmektedir. St-Re-ABS numunelerinde ise katman kalınlığının artışı ilk aşamada %25,23 oranında artış, ardından %6,67 oranında azalma göstermiştir. Özellikle 0,20 mm kalınlığında deformasyonun artması, sterilizasyonun belirli kalınlıklarda içyapıyı zayıflatarak deformasyon davranışını olumsuz etkilediğini işaret etmektedir [77].

Aynı tablo ve şekiller üretim açısı sonuçlarına göre değerlendirildiğinde; ABS numunelerinde 0°-45° arası deformasyon ≈ %1 azalmış, 45°-90° arası %69,07 artmıştır. Bu artış, 90° üretim açısında yükün katmanlara dik uygulanması nedeniyle deformasyon kapasitesinin artmasından kaynaklanmaktadır [72]. Re-ABS numunelerinde ise üretim açısı arttıkça deformasyon azalmıştır. 0°-45° arası %5,64 düşüş, 45°-90° arası ise %10,40 azalma meydana gelmiştir. St-ABS numunelerinde üretim açısı arttıkça deformasyon genellikle artmıştır. 0°-45° arasında %8,30, 45°-90° arasında ise %30,31 artış tespit edilmiştir. Bu durum, sterilizasyonun katmanlar arası bağları zayıflatması sonucu 90° açıda kırılganlığın arttığını göstermektedir. St-Re-ABS numunelerinde benzer şekilde 0°-45° arasında %4,59, 45°-90° arasında %23,16 artış meydana gelmiştir.

4.2 Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Yüzey pürüzlülüğü, bir ürünün kalite seviyesi, işlevselliği ve maliyet açısından verimliliği üzerinde doğrudan etkili olan temel bir parametredir. Üretim teknolojilerindeki ilerlemeler ve araştırma-geliştirme faaliyetlerinin artması, daha yüksek yüzey kalitesine ulaşmak amacıyla üretim parametrelerinin optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, 3 boyutlu (3B) baskı teknolojisiyle imal edilen PLA, Re-PLA, ABS ve Re-ABS esaslı malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesi, bu malzemelerin yüzey karakteristikleri hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Çalışmada, PLA, St-PLA, Re-PLA, St-Re-PLA, ABS, St-ABS, Re-ABS ve St-Re-ABS olmak üzere toplam sekiz farklı numune türü üzerinde, her numune için beş farklı noktadan gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalamaları sunulmuştur.

4.2.1 PLA Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü test sonuçları Tablo 4.9'da verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.10'da PLA deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki artış ve azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.18'de, PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir. Ek-3'te, %50 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip Re-PLA numunesine ait yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazından elde edilen sonuç raporu örneği verilmiştir.

Tablo 4.9: PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları.

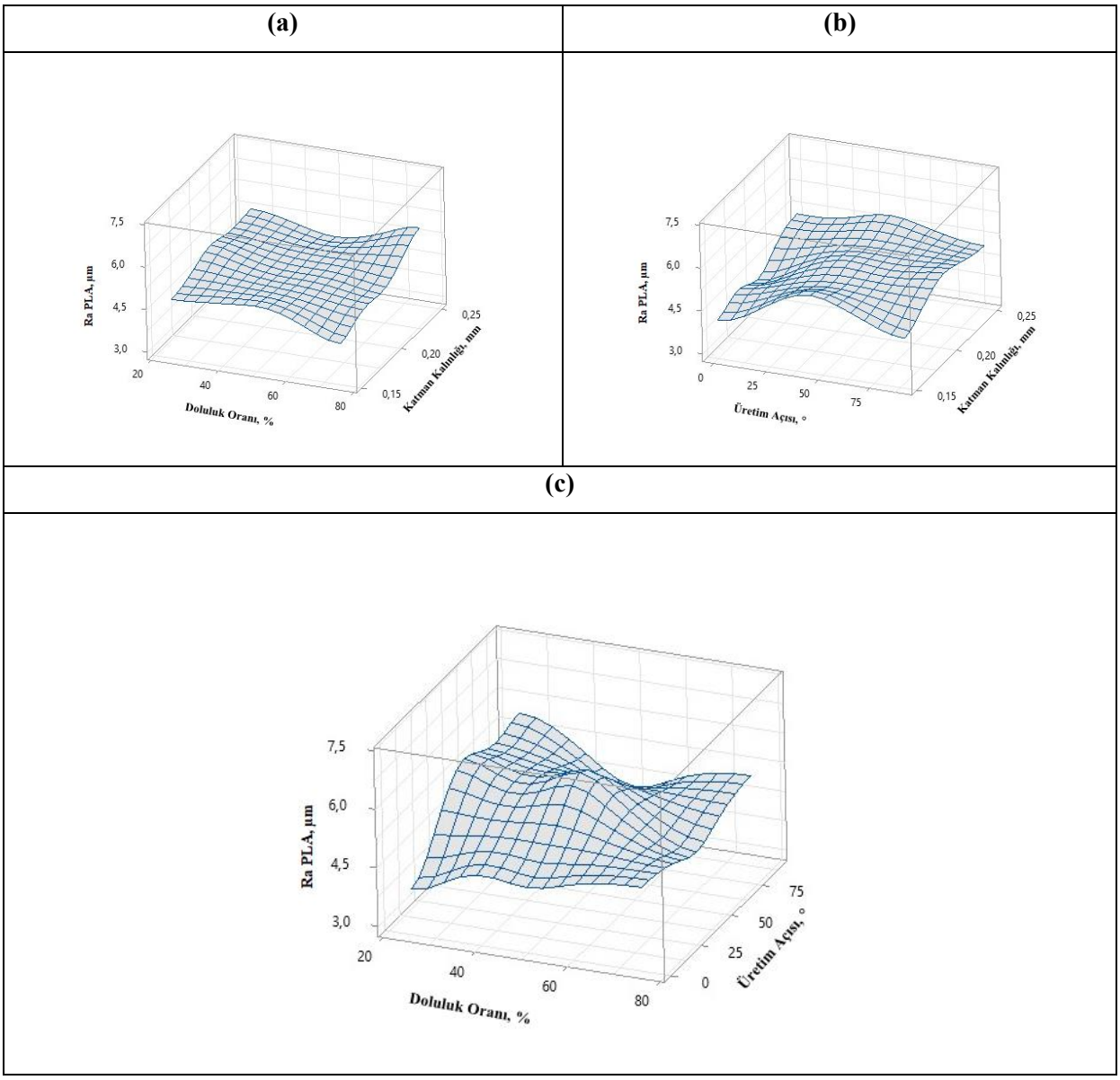
No	Doluluk oranı, %	Katman kalınlığı, mm	Üretim açısı, °	PLA, µm	Re-PLA, µm	St-PLA, µm	St-Re-PLA, µm
1	25	0,15	0	4,191	6,541	3,721	7,412
2			45	5,266	6,210	4,517	6,587
3			90	4,970	8,010	7,617	7,021
4		0,2	0	3,400	7,720	6,625	7,335
5			45	6,570	5,498	3,755	11,553
6			90	6,050	4,674	4,921	7,642
7		0,25	0	4,093	3,555	5,453	7,818

Tablo 4.9 (devamı): PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları.

8			45	5,711	5,300	6,719	8,105
9			90	5,848	8,699	5,911	5,499
10			0	3,265	7,782	4,479	3,778
11		0,15	45	7,031	6,336	5,772	7,154
12			90	4,830	4,254	6,797	7,391
13			0	4,607	7,018	3,437	7,523
14	50	0,2	45	5,116	5,715	6,776	8,666
15			90	4,788	7,638	6,508	9,433
16			0	5,360	6,688	6,398	6,712
17		0,25	45	5,757	5,003	3,721	3,299
18			90	2,974	7,105	4,917	7,612
19			0	4,814	3,333	5,617	5,895
20		0,15	45	4,111	7,002	6,625	8,184
21			90	3,648	4,958	3,755	6,412
22			0	4,285	5,690	4,921	6,587
23	75	0,2	45	4,133	6,318	5,453	3,021
24			90	5,252	7,572	6,719	7,335
25			0	5,559	6,778	3,911	5,553
26		0,25	45	4,946	5,999	4,479	7,642
27			90	5,971	6,309	6,772	6,818

Tablo 4.10: PLA grubu numunelerin yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri ve % değişim oranları.

Doluluk	**(Ra, µm)** **PLA**	**(Ra, µm)** **Re-PLA**	**(Ra, µm)** **St-PLA**	**(Ra, µm)** **St-Re-PLA**
%25	5,122	6,245	5,471	7,664
%50	4,859	6,393	5,423	6,841
%75	4,747	5,995	5,361	6,383
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	-5,143	2,370	-0,881	-10,735
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	-2,307	-6,222	-1,133	-6,693
Katman				
0,15mm	4,681	6,047	5,433	6,648
0,2mm	4,911	6,427	5,457	7,677
0,25mm	5,135	6,160	5,365	6,562
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	4,926	6,278	0,440	15,478
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	4,566	-4,161	-1,698	-14,526
Açı				
0°	4,397	6,123	4,951	6,513
45°	5,405	5,931	5,313	7,135
90°	4,926	6,580	5,991	7,240
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	22,912	-3,129	7,304	9,551
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	-8,861	10,936	12,757	1,483

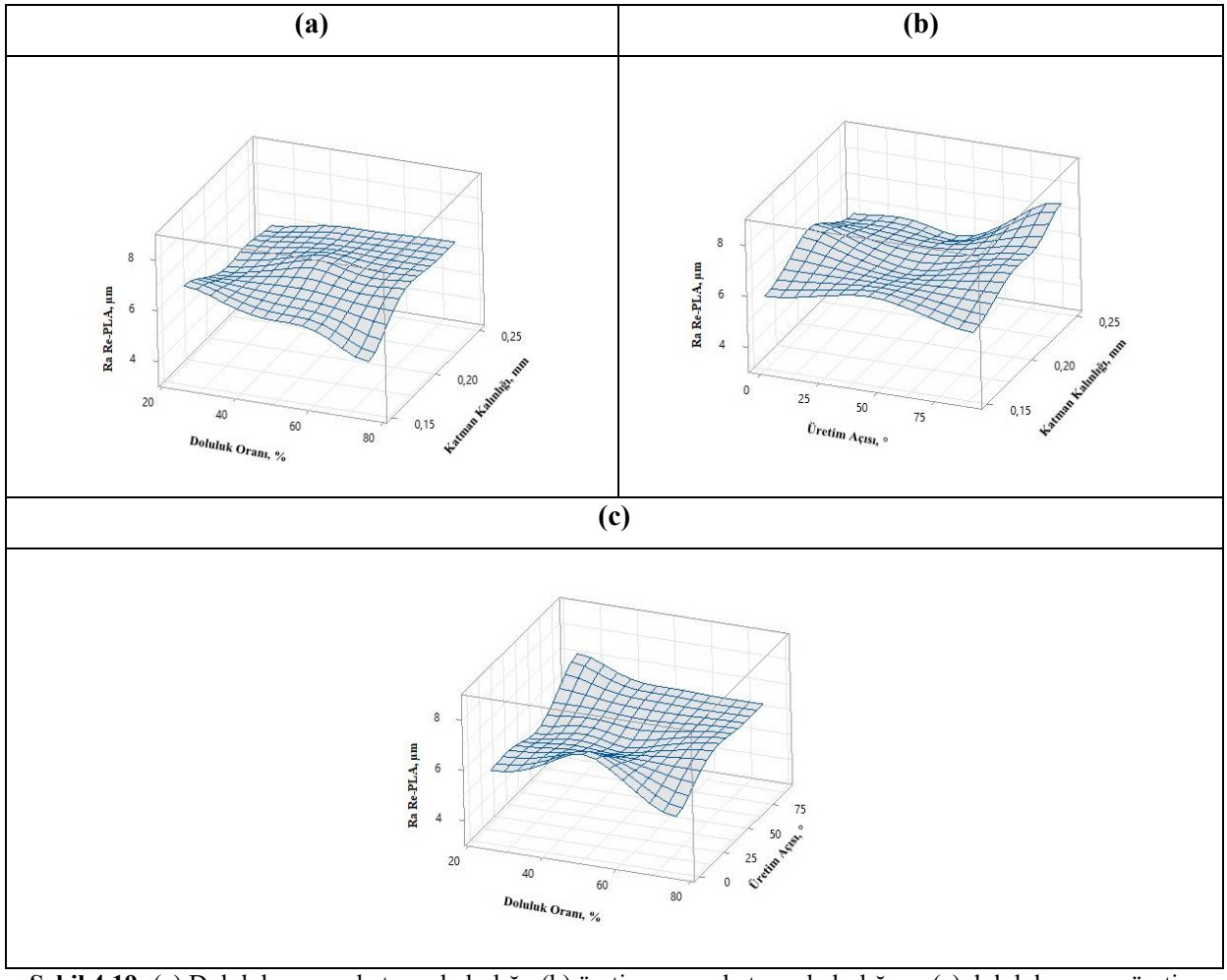


Şekil 4.18: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.10 ve Şekil 4.18 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde; PLA numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, buna karşılık katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü (Ra değeri) %5,143 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise %2,3 oranında azalma göstermiştir. Bu durum, artan doluluk oranının yapı içindeki boşlukları azaltarak daha düzgün bir yüzey oluşumuna katkı sağlamasıyla açıklanabilir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılmasıyla Ra değeri %4,926; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılmasıyla ise ≈ %4,5 oranında artmıştır. Kalın katmanlar, katmanlar arası geçişlerin daha belirgin hale gelmesine neden olarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Üretim açısı açısından bakıldığında, 0°'den 45°'ye

çıkarıldığında yüzey pürüzlülüğü ≈ %23 oranında artmış, 45°'ten 90°'a çıkarıldığında ise ≈ %9 oranında azalmıştır. Bu değişim, üretim açısının malzeme birikimi ve tabaka yerleşimi üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, PLA numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı, yüzey kalitesini en olumsuz etkileyen parametrenin ise üretim açısı olduğu belirlenmiştir [2,4]. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %50 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %50 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün doluluk oranı, üretim açısı ve katman kalınlığı gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir.

Şekil 4.19'da, Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



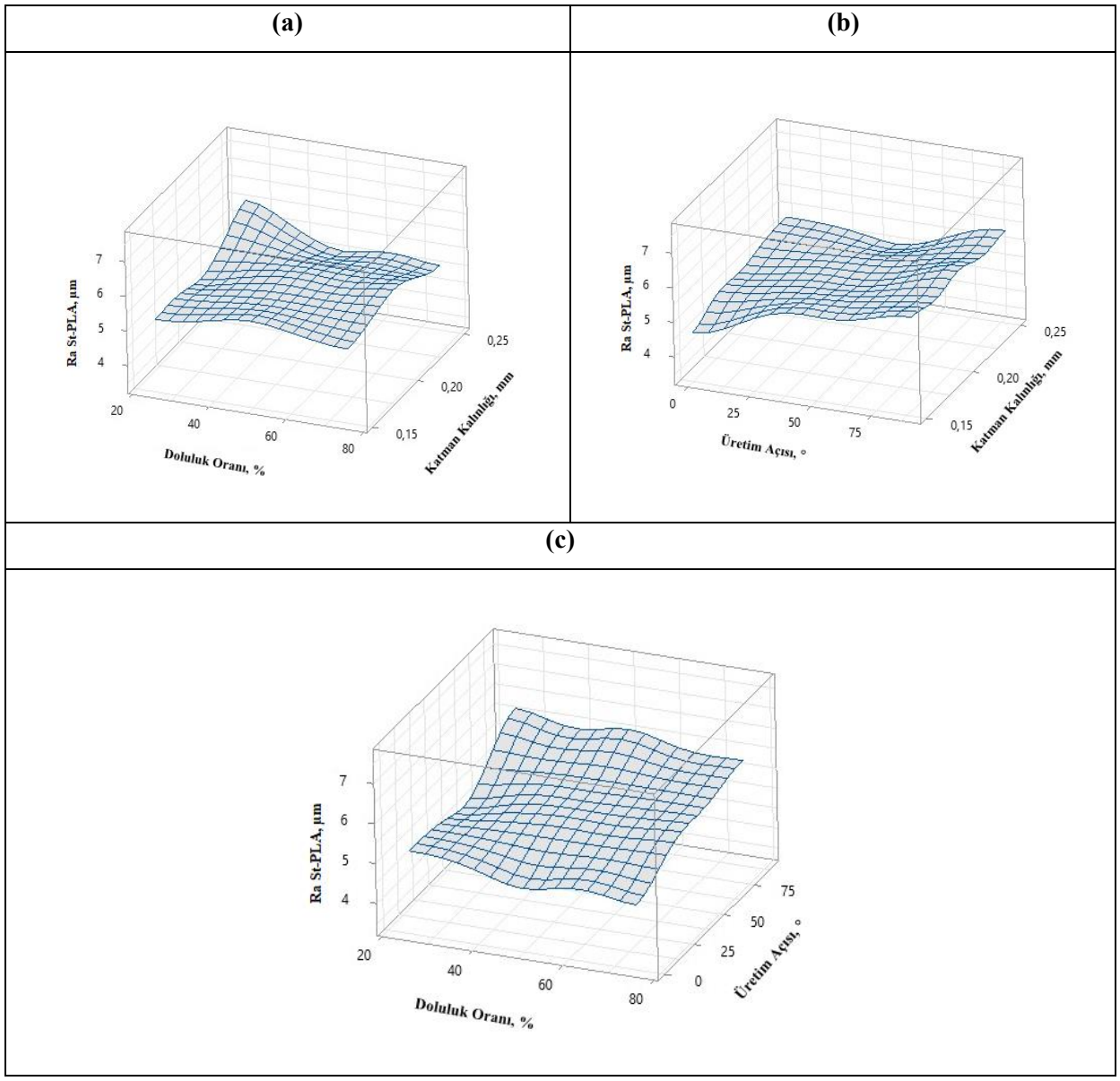
Şekil 4.19: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.10 ve Şekil 4.19 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde, Re-PLA numunelerinde doluluk oranı ve katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde başlangıçta bir artış, ardından azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü (Ra değeri) %2,37 oranında artarken, %50'den %75'e çıkarılmasıyla %6,22 oranında azalma gerçekleşmiştir. Bu durum, orta seviyedeki dolulukta içyapının düzensizliği nedeniyle yüzeyin daha pürüzlü hale gelmesi; yüksek dolulukta ise boşlukların azalmasıyla yüzeyin daha düzgün olmasıyla açıklanabilir [3,18].

Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması, Ra değerinde %6,278 oranında artışa neden olmuş; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılması ise yaklaşık %4,161 oranında azalma sağlamıştır. Bu durum, belirli bir kalınlıktan sonra katman geçişlerinin daha uyumlu hale gelerek yüzey pürüzlülüğünü azaltmasıyla ilişkilendirilebilir [2].

Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü ≈ %3 oranında azalmış; 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla ise ≈ %11 oranında artış meydana gelmiştir. Bu artış, üretim açısının 90°'ye ulaşmasıyla katmanların düşey yönde birikerek daha belirgin yüzey izlerine yol açmasıyla açıklanabilir [2]. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %25 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, Re-PLA numunelerinde yüzey pürüzlülüğünü en olumsuz etkileyen parametrenin üretim açısı olduğu, doluluk oranı ve katman kalınlığının ise yüzey kalitesini hem olumlu hem olumsuz yönde etkileyebildiği belirlenmiştir [2,18].

Şekil 4.20'de, St-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



Şekil 4.20: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

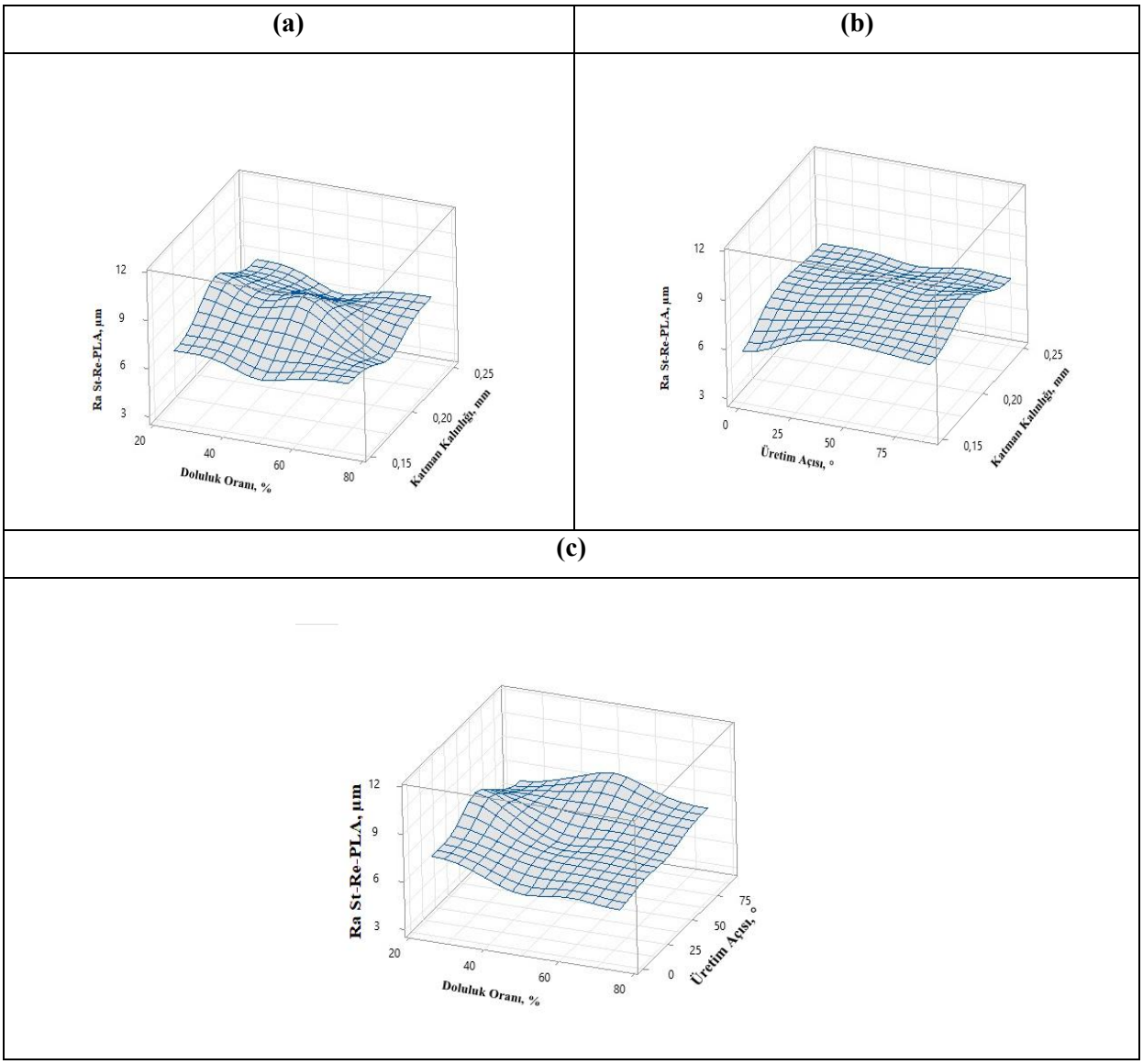
Tablo 4.10 ve Şekil 4.20 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde; sterilizasyon işlemine tabi tutulmuş PLA (St-PLA) numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, buna karşılık katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün önce arttığı, ardından azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, üretim açısının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığı ve yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir [2,4].

Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü (Ra değeri) ≈ %1 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise ≈ %1,2 oranında azalma göstermiştir. Bu durum, artan doluluk oranının içyapıyı daha sıkı hale getirerek yüzeydeki boşluk ve bozulmaları azaltmasıyla açıklanabilir [4].

Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması Ra değerinde %0,44'lük hafif bir artışa neden olurken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılmasıyla yaklaşık %1,98 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, belirli bir kalınlıktan sonra katmanlar arası hizalanmanın daha düzgün gerçekleşmesiyle yüzeyin daha düzgün hale gelmesiyle ilişkili olabilir [2].

Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, açının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %7,3 oranında artarken, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla bu artış %12,757'ye ulaşmıştır. Üretim açısının artmasıyla katmanlar arası geçiş çizgilerinin daha belirgin hale gelmesi ve baskı yönünün yüzeyle daha dik açı oluşturması, bu artışı açıklamaktadır [2]. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %50 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %50 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, St-PLA numunelerinde yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen parametrenin üretim açısı olduğu, doluluk oranının ise yüzey kalitesini iyileştirme açısından olumlu katkı sağladığı belirlenmiştir [2,4].

Şekil 4.21'de, St-Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

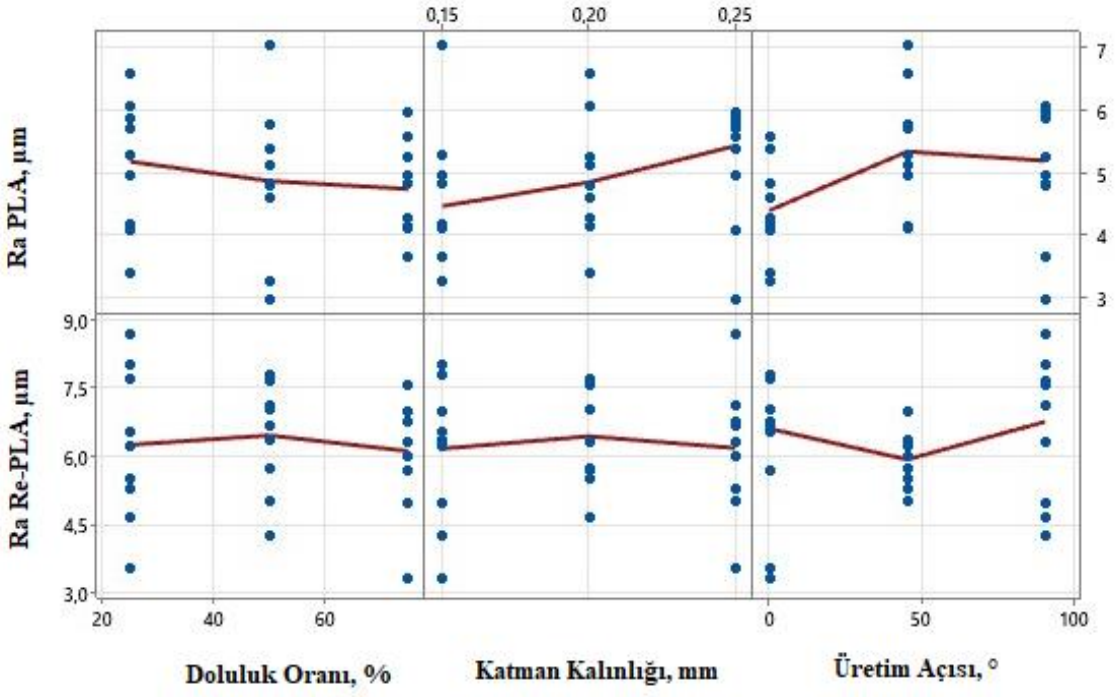


Şekil 4.21: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-PLA numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

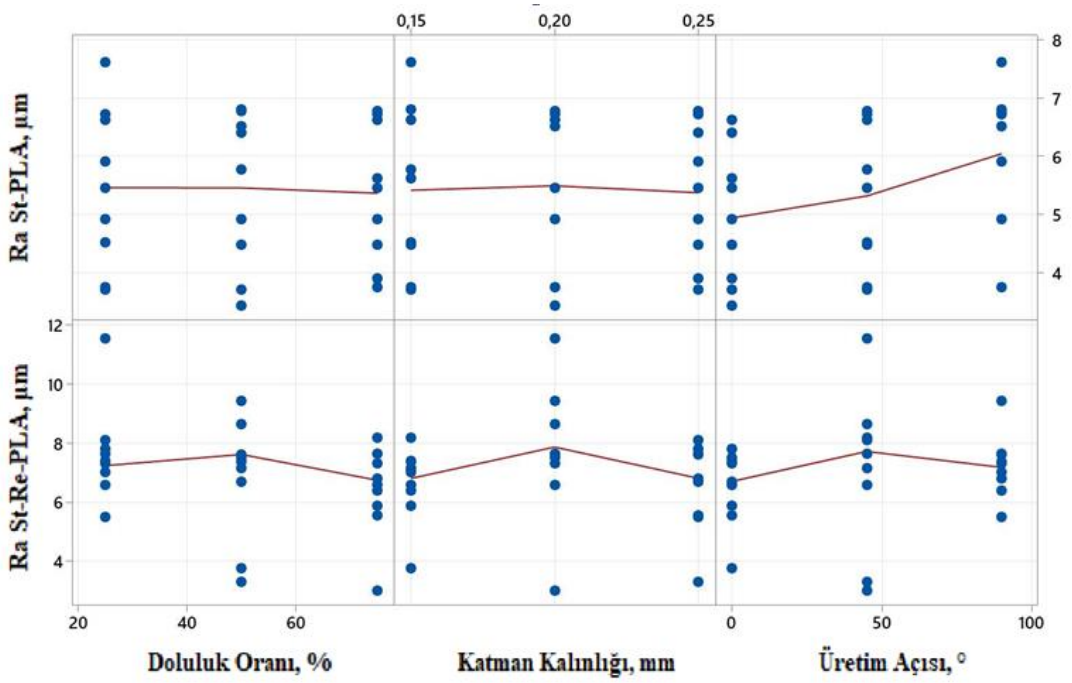
Tablo 4.10 ve Şekil 4.21 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde; St-Re-PLA numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, buna karşılık Re-PLA ve St-PLA numunelerine benzer bir şekilde katman kalınlığı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve belli bir değer sonrası azaldığı görülmüştür. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü (Ra değeri) %10,735 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise ≈ %7 oranında azalma göstermiştir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılmasıyla Ra değeri %15,478 değerinde artığı; 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılmasıyla ise ≈ %14,5 oranında azalmıştır. Üretim açısı açısından bakıldığında St-PLA numunelerine benzer şekilde sadece artış gösterdiği tespit edilmiştir, 0°'den 45°'ye çıkarıldığında yüzey pürüzlülüğü %9,55 oranında artmış, 45°'ten 90°'a çıkarıldığında ise %1,48 oranında artmıştır.

En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %25 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, PLA numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı, yüzey kalitesini en olumsuz etkileyen parametrenin ise üretim açısı olduğu belirlenmiştir [2,4,18].

Farklı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini daha genel bir bakış açısıyla değerlendirebilmek adına, malzeme türlerine göre elde edilen tüm veriler grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 4.22'de PLA ve Re-PLA numunelerine ait doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısına göre yüzey pürüzlülüğü test sonuçları; Şekil 4.23'te ise St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü etkileri grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikler sayesinde, ilgili parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri daha net ve bütüncül bir şekilde yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.22: PLA ve Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.



Şekil 4.23: St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'da verilen grafiklerde gösterilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) testlerinin genel değerlendirmesine göre, doluluk oranının artırılması tüm numune türlerinde yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı bir etki yaratmıştır. Bunun nedeni, doluluk oranı yükseldikçe yapı içerisindeki boşlukların azalması ve malzeme yoğunluğunun artarak yüzeyin daha düzgün bir yapıya kavuşmasıdır. Özellikle St-Re-PLA numunelerinde bu etki çok daha belirgin olmuş, yüksek doluluk oranlarında pürüzlülük değerinde %10'a varan azalmalar gözlemlenmiştir. Re-PLA numunelerinde ise orta düzey doluluk oranlarında içyapının daha düzensiz olması nedeniyle kısa süreli bir artış gözlenmiş, ancak yüksek doluluklarda bu durum yerini düzgün yüzey oluşumuna bırakmıştır [3,4,18].

Katman kalınlığı parametresi ise numune türüne göre farklı etkiler göstermiştir. Katman kalınlığı arttıkça, yüzey pürüzlülüğü genellikle önce artmış, ardından belirli bir değerden sonra azalmaya başlamıştır. Bu durum, düşük kalınlıklarda katmanlar arası geçişlerin daha hassas ve düzgün olmasıyla yüzeyin düzgünleşmesi; orta kalınlıklarda geçişlerin belirginleşmesiyle pürüzlülüğün artması; yüksek kalınlıklarda ise katman hizalanmasının yeniden uyumlu hale gelmesiyle yüzeydeki dalgalanmaların azalması şeklinde açıklanabilir. Özellikle St-Re-PLA numunelerinde katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye

çıkarılmasıyla %15,5 oranında artış, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılmasıyla %14,5 oranında azalma görülmesi bu eğilimin belirgin bir örneğini sunmuştur [2].

Üretim açısı ise incelenen tüm numune türlerinde yüzey pürüzlülüğünü en olumsuz etkileyen parametre olarak öne çıkmıştır. Üretim açısının artırılmasıyla birlikte, katmanlar yüzeye daha dik açıyla yerleşmekte ve bu durum katman izlerinin yüzeyde daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır. Bu da yüzey pürüzlülüğünü artırarak yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Özellikle PLA ve St-PLA numunelerinde 0°'den 45°'ye çıkıldığında pürüzlülükte %23'e kadar artış gözlenmiştir. Re-PLA numunelerinde üretim açısının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü azalmış, 45°'ten 90°'a çıkıldığında ise tekrar artış göstermiştir. Bu durum, geri dönüştürülmüş malzeme yapısının üretim açısına karşı daha farklı ve karmaşık bir tepki verdiğini göstermektedir [2,18].

4.2.2 ABS yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları Tablo 4.11'de verilmiştir. Bu tabloda sunulan verilerin daha anlaşılır hâle getirilmesi amacıyla, elde edilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin yüzde değişim oranları hesaplanmış; ayrıca ilgili tablo sonuçları Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab Statistical Software 22 programı kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Tablo 4.12'de ABS deney numunelerinin üretim parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki artış ve azalışa ait yüzde değişim oranları sunulmuştur. Şekil 4.24'te, ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

Tablo 4.11: ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları.

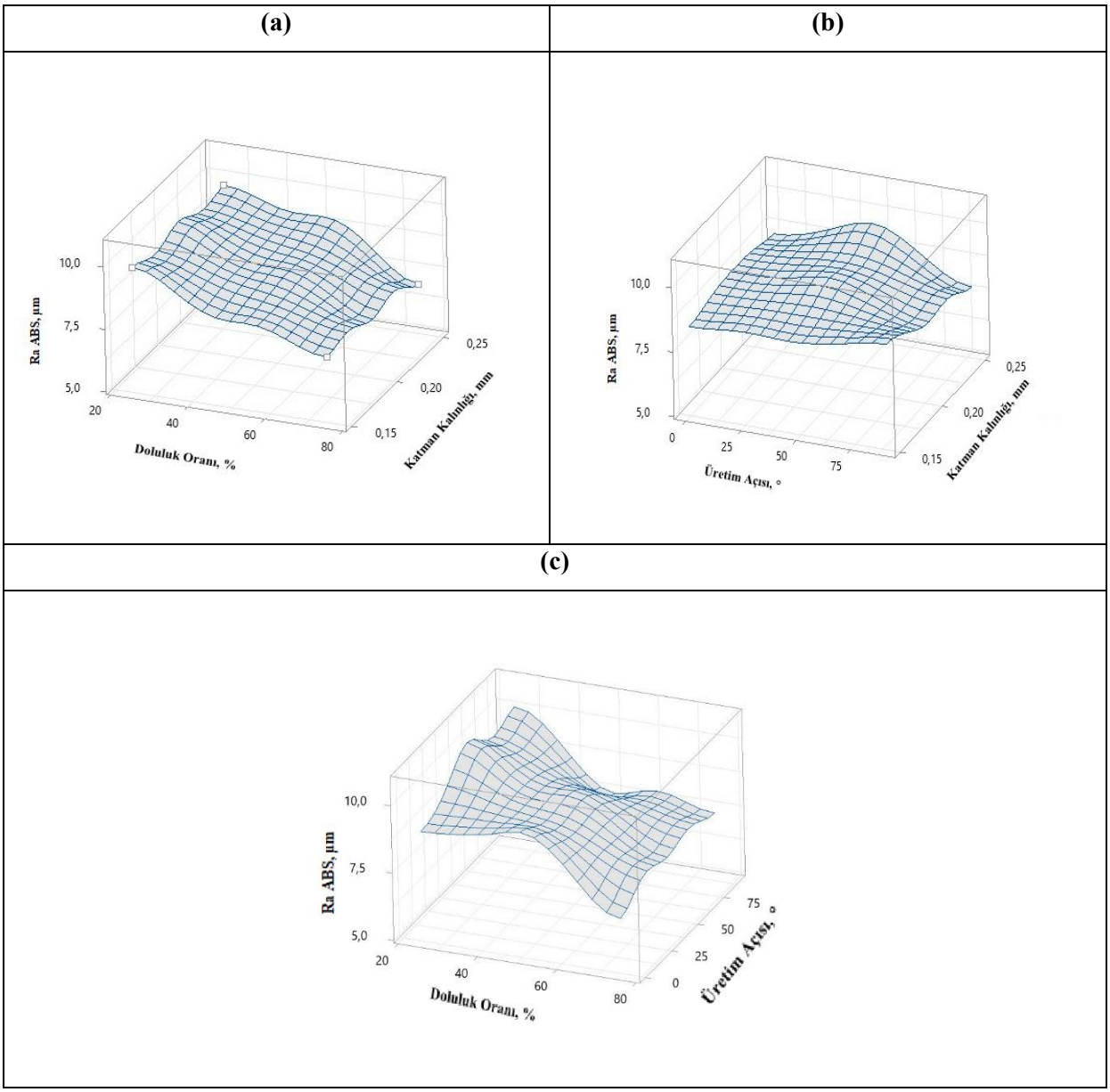
No	Doluluk oranı, %	Katman kalınlığı, mm	Üretim açısı, °	(Ra, µm) ABS	(Ra, µm) Re-ABS	(Ra, µm) St-ABS	(Ra, µm) St-Re-ABS
1	25	0,15	0	9,641	11,517	10,536	12,935
2			45	10,517	11,617	8,319	11,198
3			90	9,617	9,625	8,642	10,461
4		0,2	0	8,625	12,755	9,125	9,724
5			45	10,517	11,921	9,483	13,987
6			90	10,755	12,453	9,756	14,250
7		0,25	0	8,673	8,719	10,112	8,514
8			45	10,482	14,911	10,389	13,776
9			90	9,755	10,479	10,674	11,039
10	50	0,15	0	8,921	10,772	11,024	10,302

Tablo 4.11 (devamı): ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları.

11			45	7,453	9,797	10,536	12,935
12			90	8,719	10,437	8,319	11,198
13		0,2	0	8,911	10,776	8,642	10,461
14			45	10,479	12,508	9,125	9,724
15			90	6,772	12,398	9,483	13,987
16		0,25	0	10,797	11,680	9,756	14,248
17			45	9,437	8,532	10,112	8,514
18			90	6,776	11,517	10,389	13,776
19	75	0,15	0	6,508	8,617	10,674	11,039
20			45	7,398	9,625	11,023	10,302
21			90	8,680	9,755	10,536	12,935
22		0,2	0	8,610	11,921	8,317	11,198
23			45	6,419	8,453	8,642	10,461
24			90	6,747	9,719	9,125	9,724
25		0,25	0	5,721	11,911	9,483	13,987
26			45	8,496	8,479	9,756	14,248
27			90	6,465	9,772	10,112	8,513

Tablo 4.12: ABS grubu numunelerin yüzey pürüzlülüğü Ra değerleri ve % değişim oranları.

Doluluk	**(Ra, µm)** **ABS**	**(Ra, µm)** **Re-ABS**	**(Ra, µm)** **St-ABS**	**(Ra, µm)** **St-Re-ABS**
%25	9,842	11,555	9,861	12,019
%50	8,696	10,935	9,926	12,427
%75	7,227	9,806	9,725	11,472
%25-%50 ortalama farkı yüzdesi	-11,647	-5,366	0,657	3,397
%50-%75 ortalama farkı yüzdesi	-16,893	-10,329	-2,031	-7,681
Katman				
0,15mm	8,606	10,196	9,665	11,726
0,2mm	8,648	11,434	9,645	11,876
0,25mm	8,511	10,667	10,202	12,316
0,15mm-0,20mm ortalama farkı yüzdesi	0,492	12,142	-0,209	1,278
0,20mm-0,25mm ortalama farkı yüzdesi	-1,584	-6,709	5,776	3,709
Açı				
0°	8,490	10,963	9,633	11,515
45°	9,022	10,649	9,738	12,765
90°	8,254	10,684	10,141	11,637
0°-45° ortalama farkı yüzdesi	6,270	-2,863	1,088	10,856
45°-90° ortalama farkı yüzdesi	-8,513	0,326	4,143	-8,834



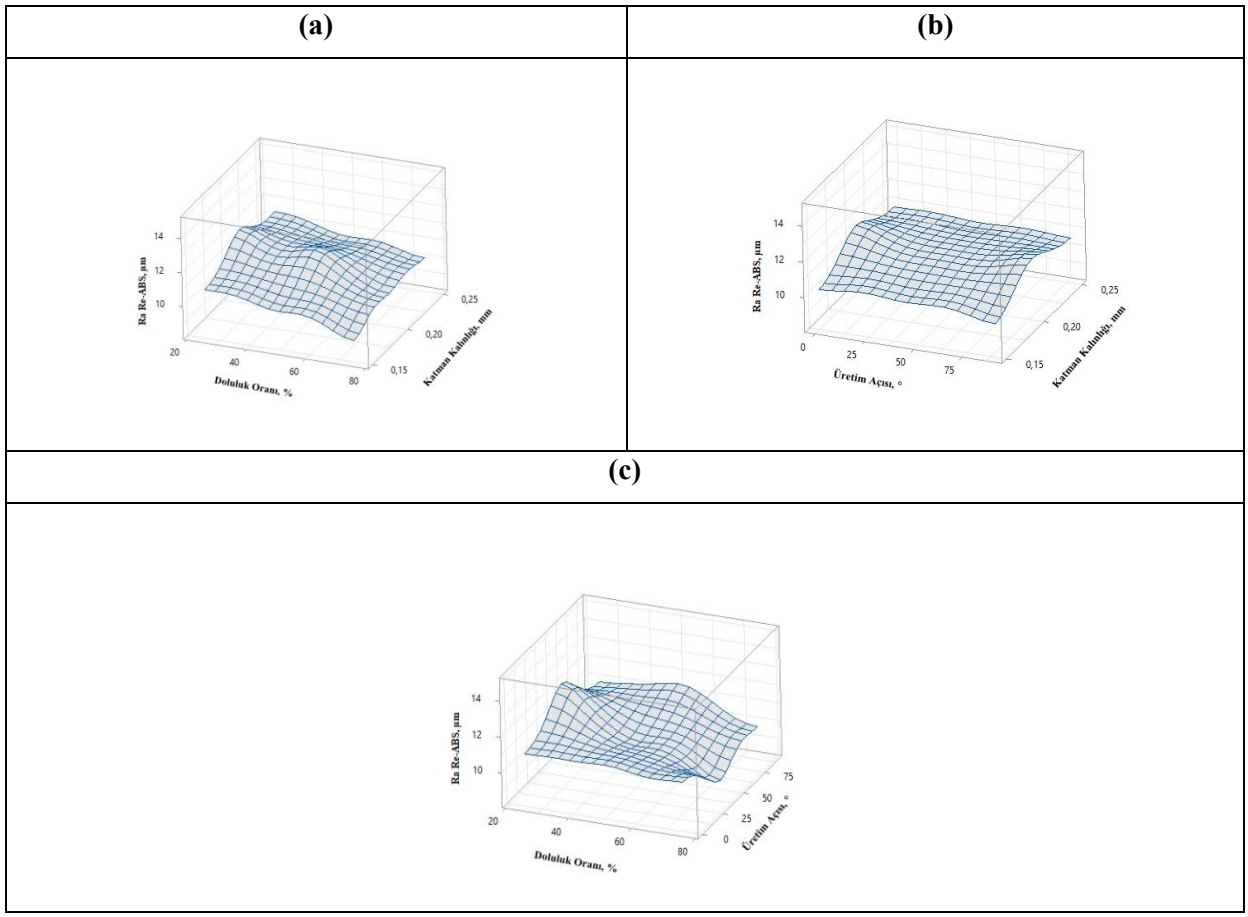
Şekil 4.24: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.12 ve Şekil 4.24 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde, ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, katman kalınlığı ve üretim açısı arttıkça ise yüzey pürüzlülüğünün başlangıçta arttığı, ardından azaldığı tespit edilmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü (Ra değeri) ≈ %11,5 oranında, %50'den %75'e çıkarılmasıyla ise ≈ %17 oranında azalma göstermiştir. Bu durum, artan doluluk oranının yapı içindeki boşlukları azaltarak daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamasıyla açıklanabilir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması Ra değerinde ≈ %0,5'lik hafif bir artışa yol açarken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılması ≈ %1,5 oranında bir azalma sağlamıştır. Bu değişim, belirli bir kalınlıktan sonra

katmanlar arası geçişlerin daha uyumlu hale gelmesiyle yüzey kalitesinin iyileşmesine bağlanabilir. Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, açının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü %6,27 oranında artarken, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla %8,51 oranında azaldığı görülmüştür. Bu durum, 90° üretim açısında katmanların daha düzgün bir şekilde üst üste gelmesiyle yüzey izlerinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir.

En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %50 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, ABS numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu belirlenmiş, katman kalınlığı ve üretim açısının ise yüzey kalitesine ikincil düzeyde etkiler sunduğu görülmüştür [2,4,21].

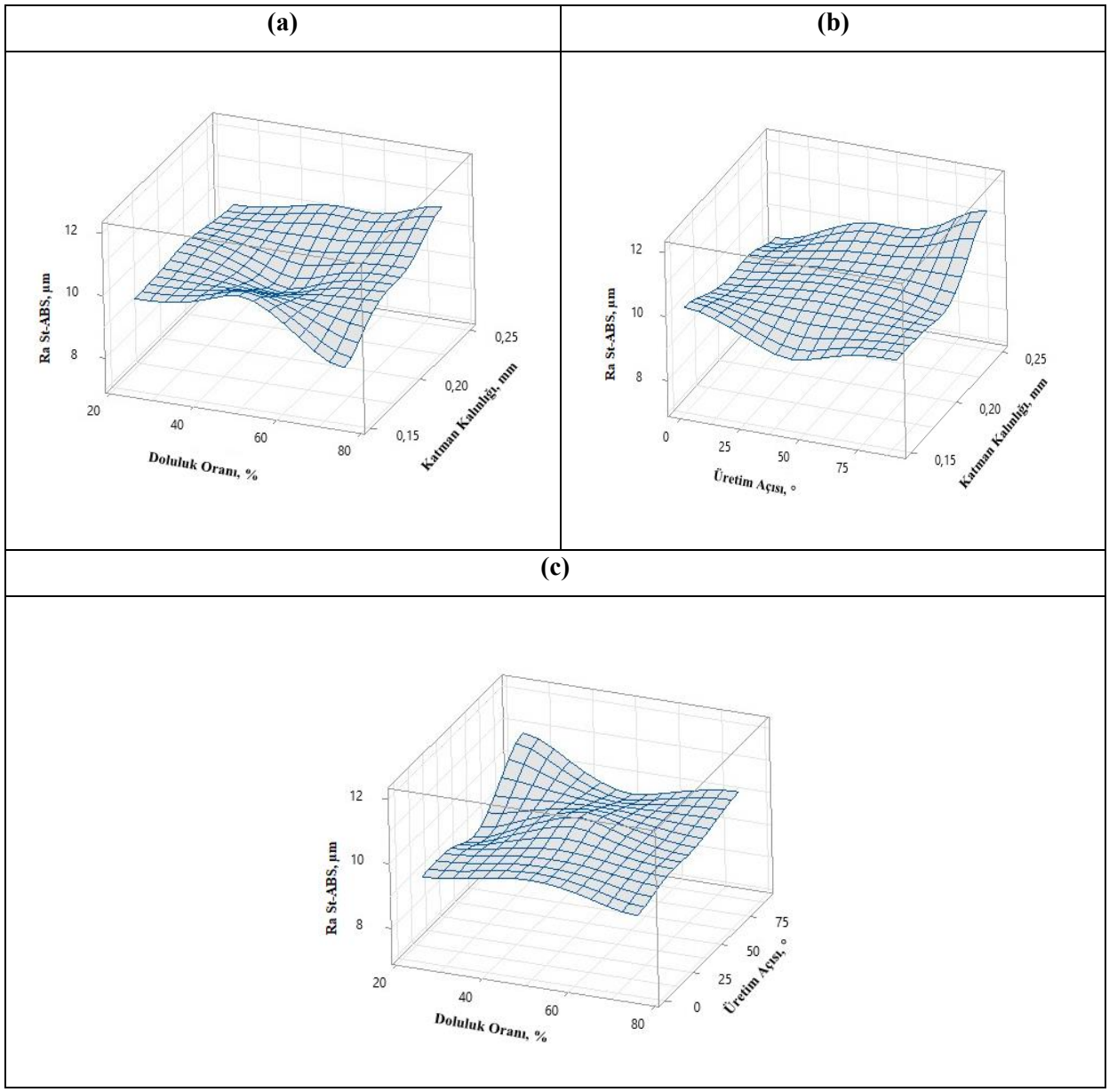
Şekil 4.25'te, Re-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



Şekil 4.25: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre Re- ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.12 ve Şekil 4.25 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde, Re-ABS numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, katman kalınlığının artmasıyla ise yüzey pürüzlülüğünde önce bir artış, ardından bir azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılması Ra değerinde %5,3, %50'den %75'e çıkarılması ise %10,329 oranında azalma sağlamıştır. Bu azalma, doluluk oranının artmasıyla yapı içerisindeki boşlukların azalması ve daha düzgün yüzeylerin oluşmasıyla açıklanabilir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması Ra değerinde ≈ %12'lik önemli bir artışa neden olurken, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarıldığında %6,7 oranında bir azalma görülmüştür. Bu durum, belirli bir kalınlıktan sonra katmanların daha iyi hizalanarak yüzey geçişlerinin yumuşamasıyla ilişkilendirilebilir. Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, açının 0°'den 45°'ye çıkarılması yüzey pürüzlülüğünü %2,86 oranında azaltırken, 45°'ten 90°'a çıkarılması neredeyse etkisiz kalmış ve yalnızca %0,3'lük küçük bir artış meydana getirmiştir. Bu da, Re-ABS numunelerinde üretim açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %25 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, Re-ABS numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu, katman kalınlığının ise dikkatli seçildiğinde yüzey kalitesini iyileştirebileceği belirlenmiştir [2,18,21].

Şekil 4.26'da, St-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.

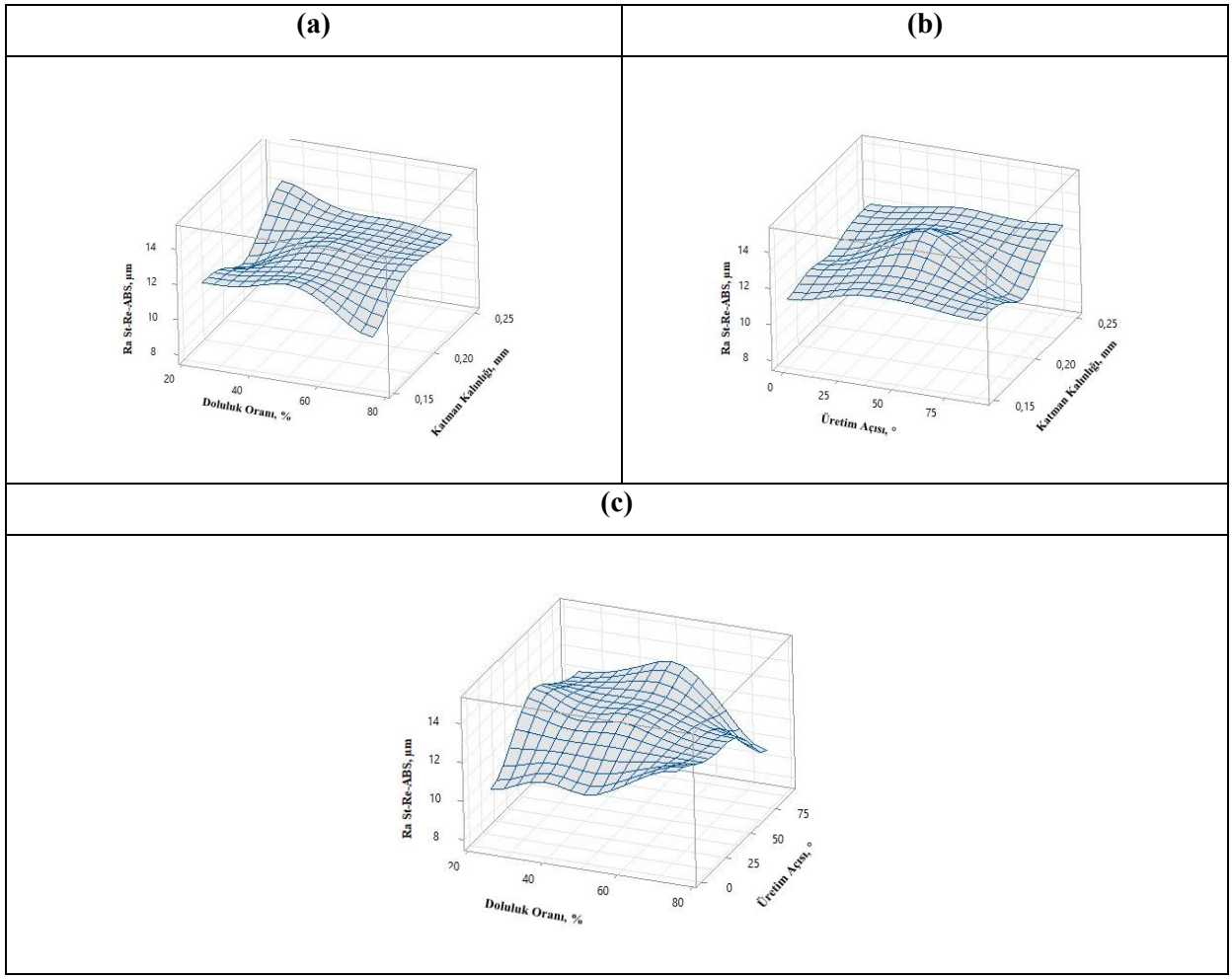


Şekil 4.26: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.12 ve Şekil 4.26 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafik ve veriler incelendiğinde, sterilizasyon işlemine tabi tutulmuş ABS (St-ABS) numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, katman kalınlığının artmasıyla ise yüzey pürüzlülüğünün belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılması Ra değerinde kayda değer bir değişim yaratmazken, %50'den %75'e çıkarıldığında %2,03 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, doluluk oranı belli bir seviyeyi aştığında yüzeydeki boşlukların azalmasıyla daha düzgün bir yapı oluşmasına bağlanabilir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması yüzey pürüzlülüğünde ihmal edilebilir düzeyde bir değişime yol açmış, ancak 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarıldığında %5,77 oranında artış gözlenmiştir. Bu artış, daha kalın katmanların yüzeyde daha belirgin izler

bırakmasından kaynaklanmış olabilir. Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, açının 0°'den 45°'ye çıkarılması yüzey pürüzlülüğünü ≈ %1, 45°'ten 90°'a çıkarılması ise ≈ %4 oranında artırmıştır. Bu durum, üretim açısının baskı sırasında katman yerleşimini etkileyerek yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %50 doluluk oranı, 0,15 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, St-ABS numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin doluluk oranı olduğu, ancak katman kalınlığı ve üretim açısının da yüzey kalitesini olumsuz etkileyebileceği belirlenmiştir [2,4].

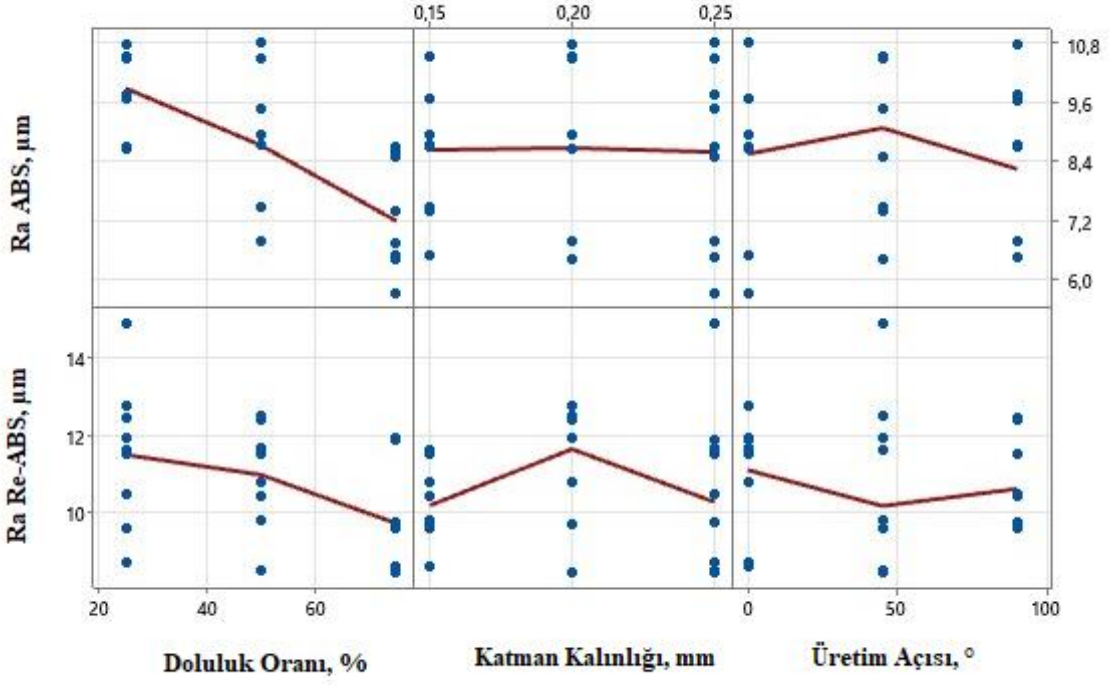
Şekil 4.27'de, St-Re-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçlarının grafiksel görüntüleri sırasıyla; (a) doluluk oranı-katman kalınlığı, (b) üretim açısı-katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı-üretim açısının etkilerine göre verilmiştir.



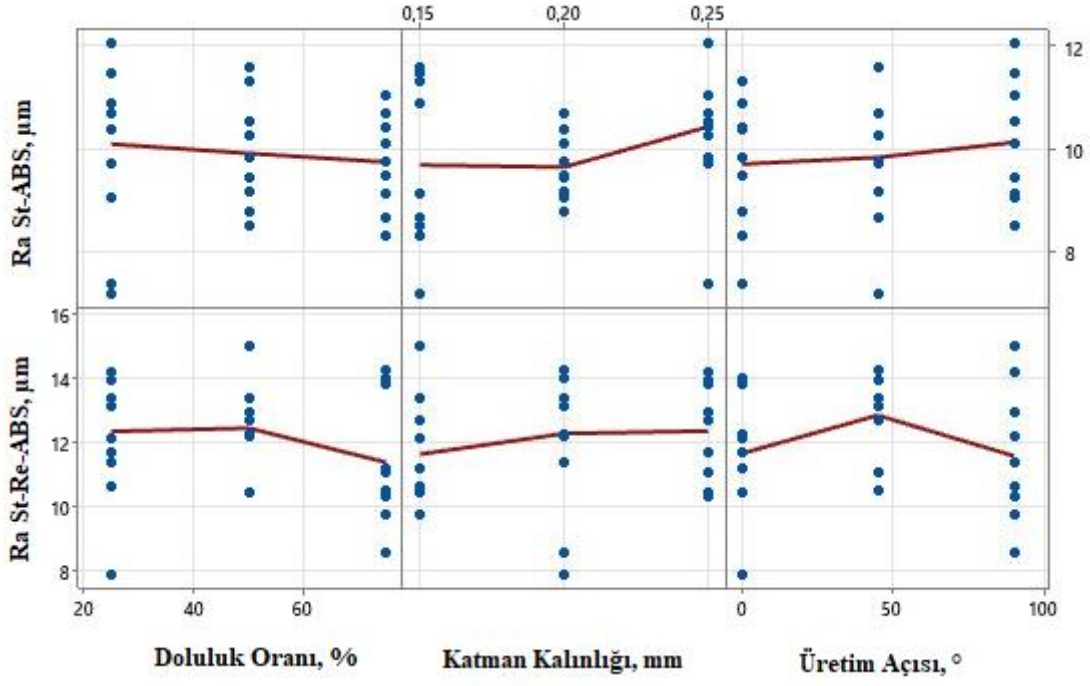
Şekil 4.27: (a) Doluluk oranı - katman kalınlığı, (b) üretim açısı - katman kalınlığı ve (c) doluluk oranı - üretim açısının etkilerine göre St-Re-ABS numunelerinin yüzey pürüzlülüğü test sonuçları.

Tablo 4.12 ve Şekil 4.27 (a), (b) ve (c)'de sunulan grafikler ve veriler incelendiğinde, sterilizasyon işleminden geçmiş geri dönüştürülmüş ABS (St-Re-ABS) numunelerinde doluluk oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün başlangıçta arttığı, ancak daha yüksek doluluk oranlarında azaldığı; katman kalınlığı arttıkça ise yüzey pürüzlülüğünün düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle doluluk oranının %25'ten %50'ye çıkarılması Ra değerinde ≈ %3,4'lük bir artışa neden olurken, %50'den %75'e çıkarılması ile %7,68 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Bu durum, düşük doluluk oranlarında yapı bütünlüğünün tam sağlanamaması nedeniyle pürüzlülüğün artması, daha yüksek doluluk oranlarında ise malzeme yoğunluğunun artarak yüzeyin daha düzgün hale gelmesiyle açıklanabilir. Katman kalınlığının 0,15 mm'den 0,20 mm'ye çıkarılması Ra değerinde %1,278 oranında artışa, 0,20 mm'den 0,25 mm'ye çıkarılması ise %3,7'lik ek bir artışa neden olmuştur. Bu sonuç, kalın katmanların yüzeyde daha belirgin katman çizgileri oluşturmasıyla ilişkilendirilebilir. Üretim açısı açısından değerlendirildiğinde, tıpkı orijinal ABS numunelerde olduğu gibi, açının 0°'den 45°'ye çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü ≈ %11 oranında artarken, 45°'ten 90°'a çıkarılmasıyla %8,83 oranında azalma gözlenmiştir. Bu değişim, üretim açısının katmanların yönelimi üzerindeki etkisiyle açıklanabilir. En düşük yüzey pürüzlülüğü, %75 doluluk oranı, 0,25 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısına sahip numunede elde edilirken; en yüksek Ra değeri ise %25 doluluk oranı, 0,2 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısına sahip numunede ölçülmüştür. Sonuç olarak, St-Re-ABS numunelerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin üretim açısı olduğu belirlenmiştir; doluluk oranı ve katman kalınlığı da bu özelliği önemli ölçüde etkilemektedir [2,4,18,21].

Farklı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini daha genel bir bakış açısıyla değerlendirebilmek adına, malzeme türlerine göre elde edilen tüm veriler grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 4.28'de ABS ve Re-ABS numunelerine ait doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısına göre yüzey pürüzlülüğü test sonuçları; Şekil 4.29'da ise St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü etkileri grafiksel olarak verilmiştir. Bu grafikler sayesinde, ilgili parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri daha net ve bütüncül bir şekilde yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.28: ABS ve Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.



Şekil 4.29: St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait aynı üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri.

Şekil 4,28 ve Şekil 4.29'da sunulan grafikler ve veriler bir bütün olarak incelendiğinde, genel olarak doluluk oranı, numunelerin çoğunda yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı bir rol oynamıştır.

Yüksek doluluk oranları, yapı içindeki boşluk miktarını azaltarak daha kompakt ve düzgün yüzeyler oluşturmakta, bu da pürüzlülüğün düşmesine neden olmaktadır. Özellikle orijinal ABS ve Re-ABS numunelerinde doluluk oranının artışı, Ra değerlerinde anlamlı oranda azalmalar sağlamıştır. Ancak St-Re-ABS numunelerinde doluluk oranının belirli bir eşik değerine kadar artması yüzey pürüzlülüğünü artırmış, daha sonra ise azaltmıştır. Bu durum, düşük doluluk oranlarında yeterli yapı bütünlüğünün sağlanamaması ve bu nedenle daha pürüzlü yüzeylerin oluşması ile açıklanabilir [4,18,21].

Katman kalınlığı parametresi ise genel olarak yüzey pürüzlülüğünü artırıcı bir etkiye sahiptir. Özellikle St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinde katman kalınlığındaki artış, daha belirgin katman çizgilerine yol açarak yüzeyin pürüzlü hale gelmesine neden olmuştur. Ancak orijinal ABS ve Re-ABS numunelerinde bu etki daha sınırlı düzeyde gözlenmiş, bazı durumlarda katman kalınlığındaki artışın yüzey geçişlerini yumuşatarak pürüzlülüğü azaltabildiği görülmüştür. Bu farklılık, malzeme yapısındaki değişimlerin ve sterilizasyon gibi işlemlerin baskı kalitesi üzerindeki etkileriyle ilişkilendirilebilir [2,18].

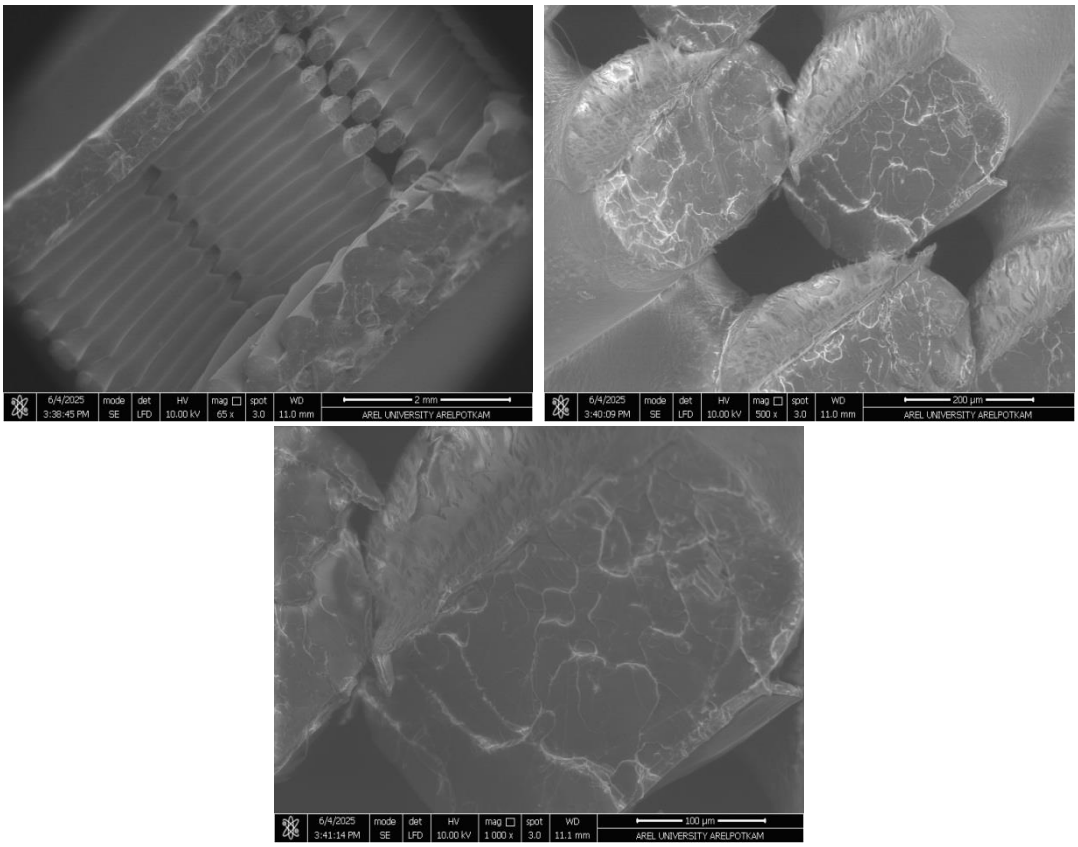
Üretim açısı parametresi ise numunelere göre değişken etkiler göstermiştir. Orijinal ABS ve St-Re-ABS numunelerinde üretim açısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde önce bir artış, ardından bir azalma meydana gelmiştir. Özellikle 45° üretim açısı, pürüzlülüğün en yüksek olduğu açı olarak öne çıkarken, 90° açıda yüzeyin daha düzgün hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, üretim açısının katmanların üst üste geliş şeklini değiştirmesi ve bu nedenle yüzey izlerinin oluşumunu doğrudan etkilemesiyle açıklanabilir. Buna karşın, St-ABS numunelerinde üretim açısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi oldukça sınırlı kalmış ve üretim açısındaki değişimin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir [2,18,21].

4.3 SEM Analizi

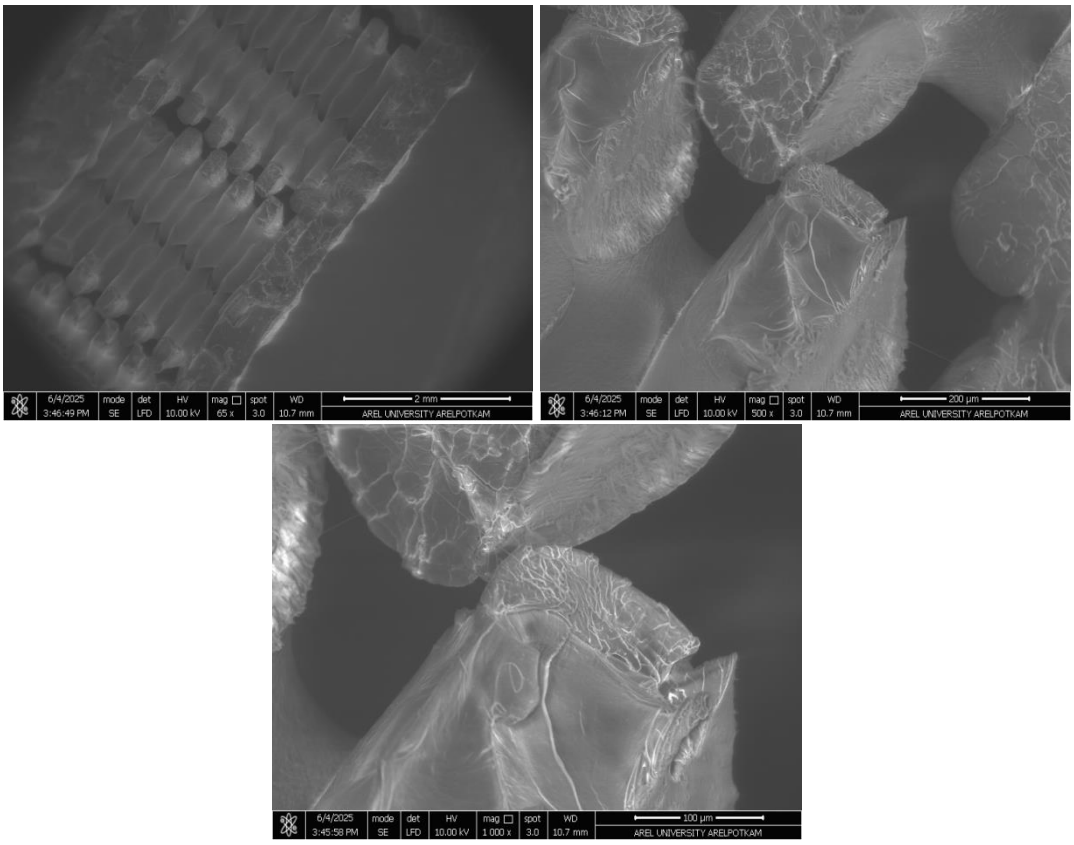
Mekanik testler sonrasında oluşan kırık yüzeylerin analizi, malzemenin mikroyapısal özelliklerini ve hasar oluşum mekanizmalarını değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, %25, %50 ve %75 doluluk oranlarında üretilen PLA, Re-PLA, St-PLA, St-Re-PLA, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait kırık yüzeyler, sabit üretim parametreleri (0,2 mm katman kalınlığı ve 45° üretim açısı) esas alınarak sınıflandırılmış ve SEM görüntüleri üzerinden yorumlanmıştır. Çalışmada kullanılan SEM görüntüleri, 65X, 500X ve 1000X büyütmelerle elde edilmiştir.

4.3.1 PLA Malzemelerinin SEM Analizi

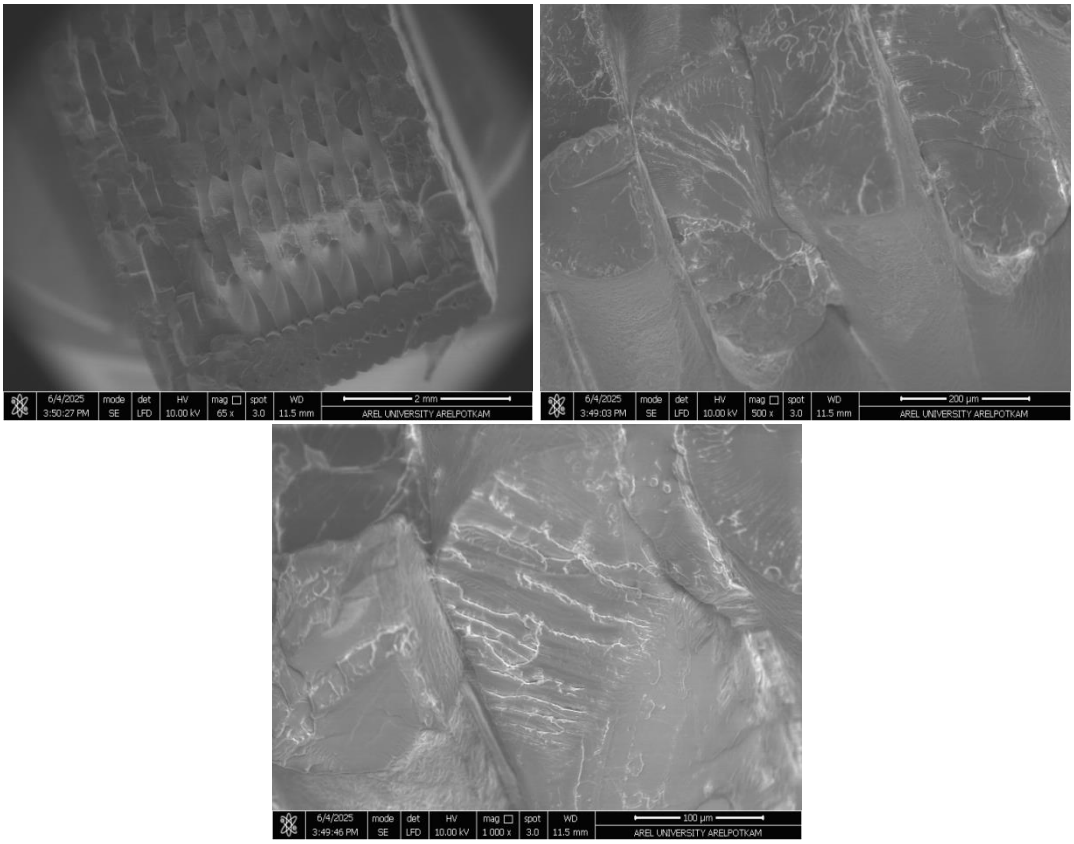
Şekil 4.30 ile Şekil 4.41 arasında, sırasıyla %25, %50 ve %75 doluluk oranlarıyla üretilmiş PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine uygulanan eğme testleri sonrasında elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri sunulmuştur.



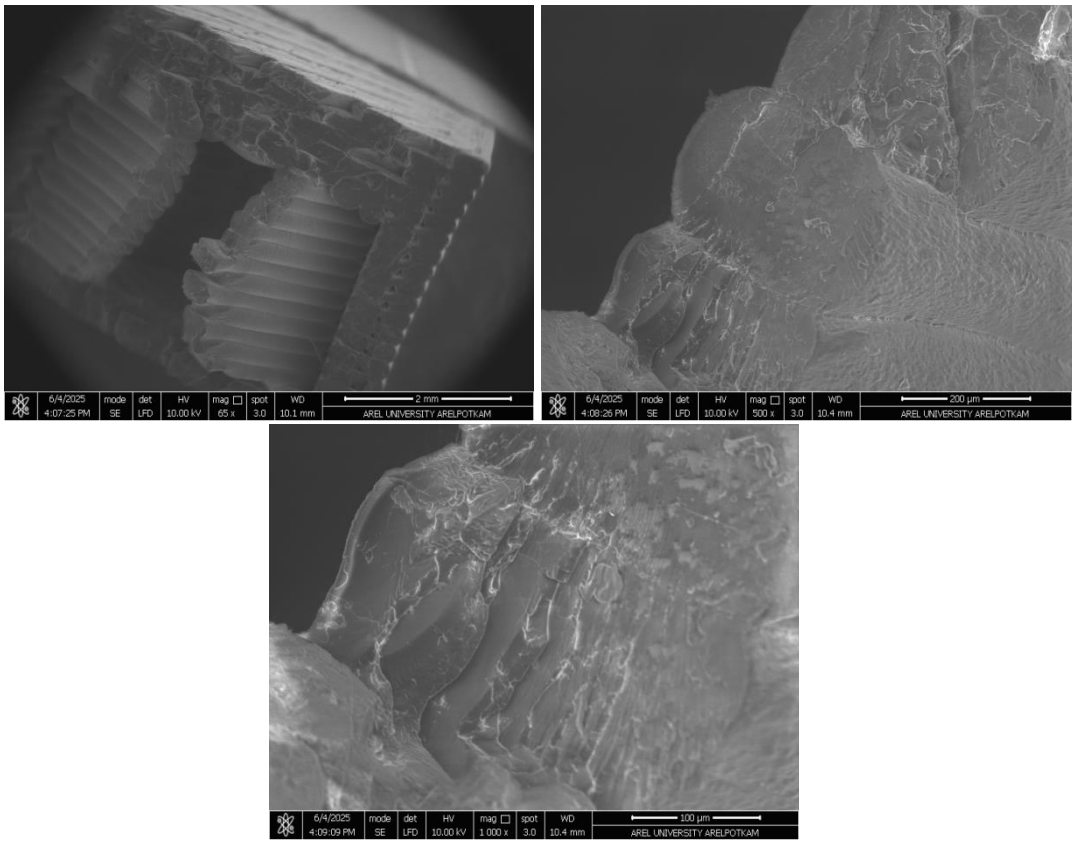
Şekil 4.30: %25 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



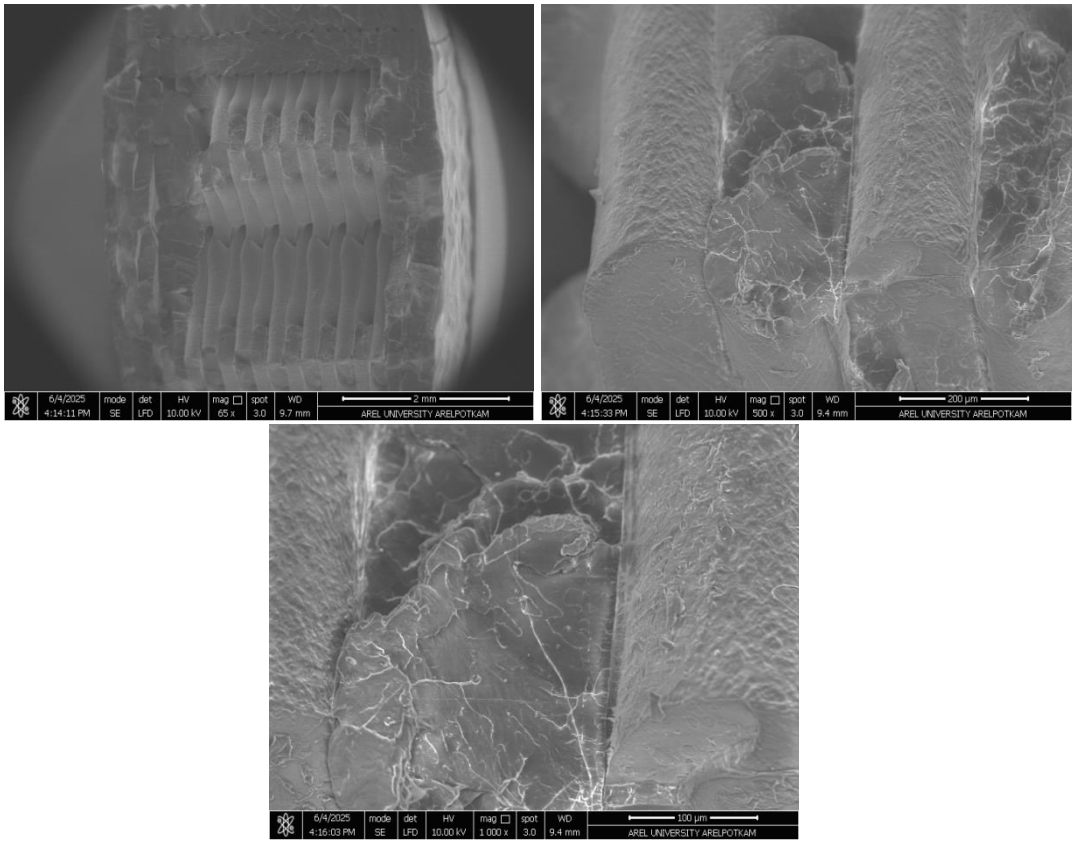
Şekil 4.31: %50 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



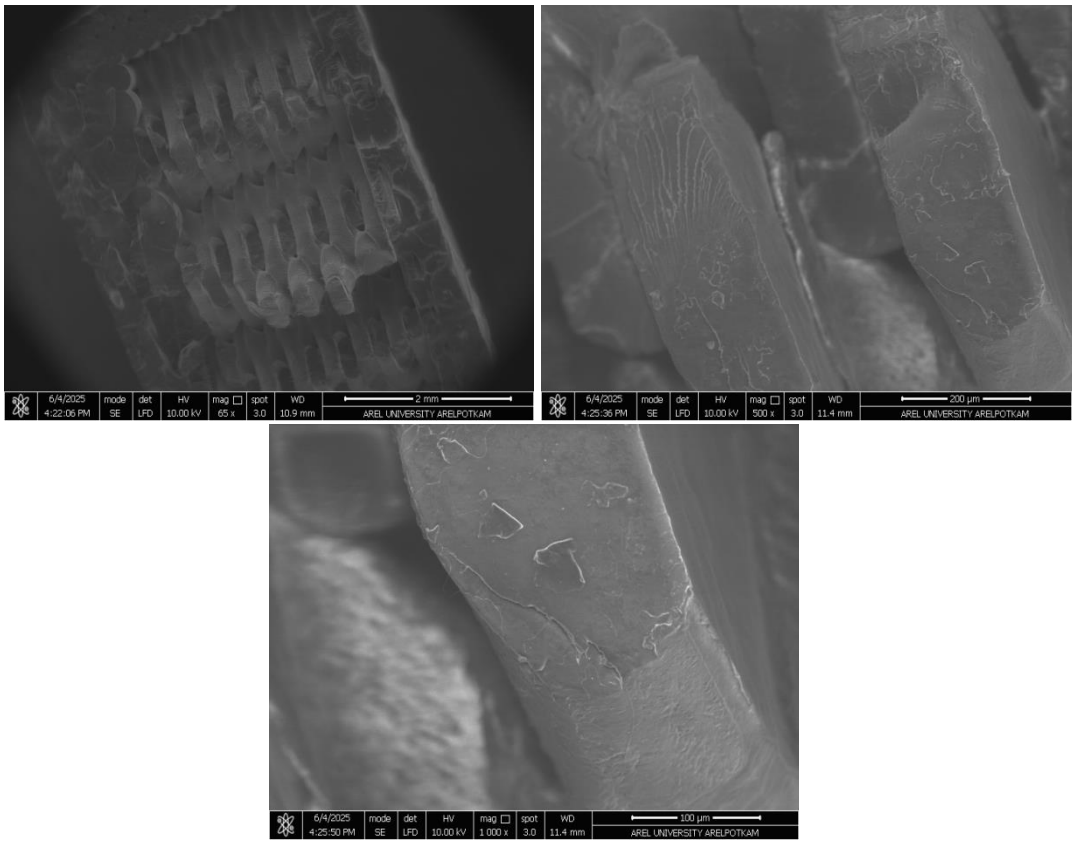
Şekil 4.32: %75 doluluk oranıyla üretilmiş PLA numunenin SEM görüntüsü.



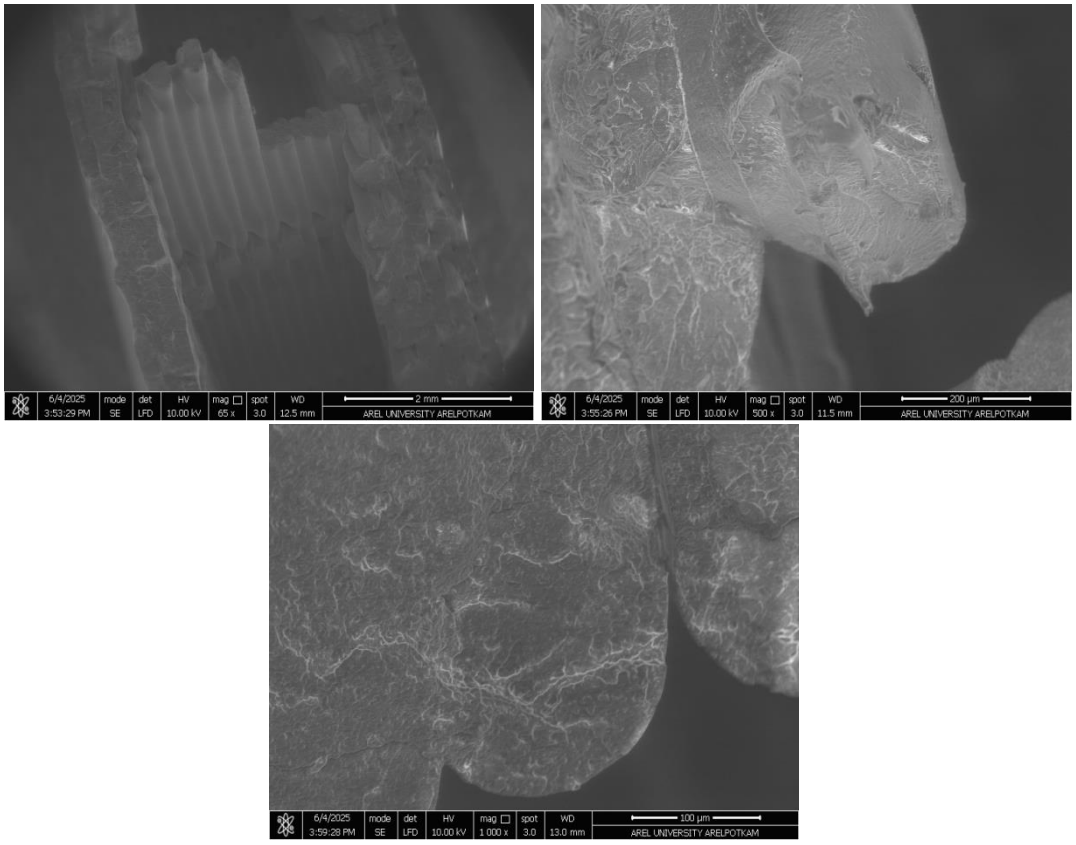
Şekil 4.33: %25 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



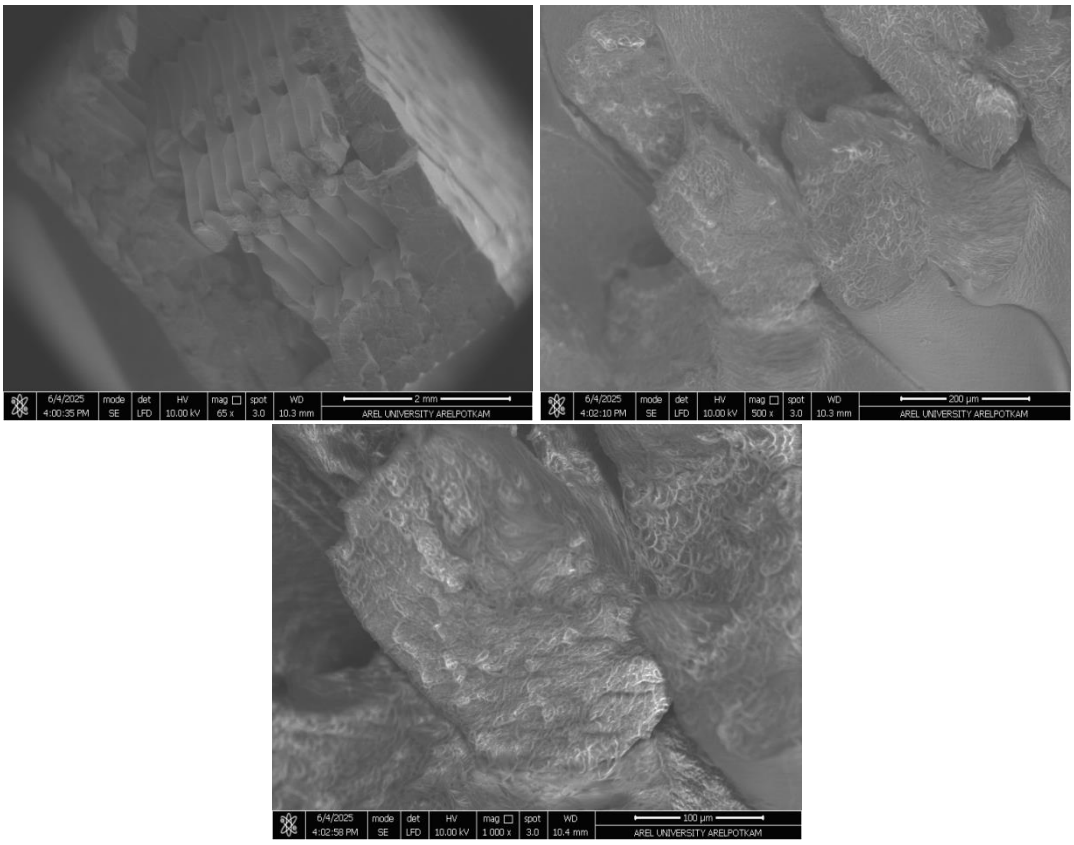
Şekil 4.34: %50 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



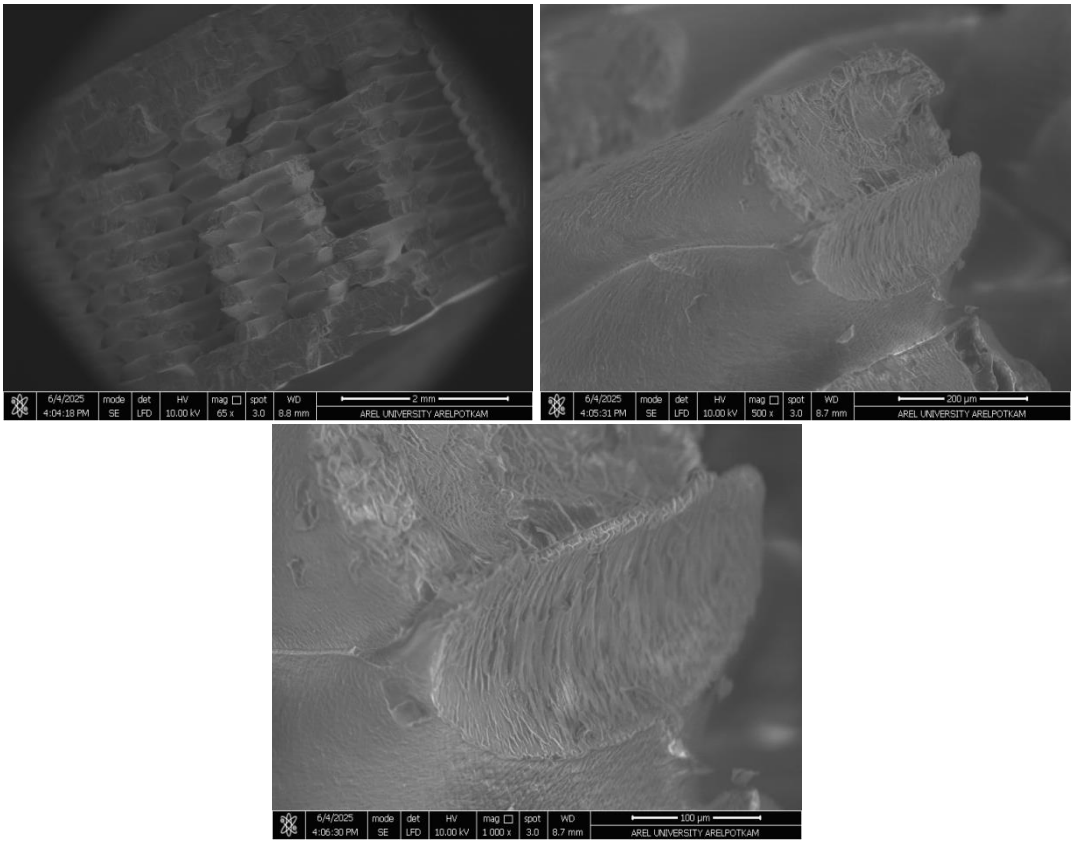
Şekil 4.35: %75 doluluk oranıyla üretilmiş Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



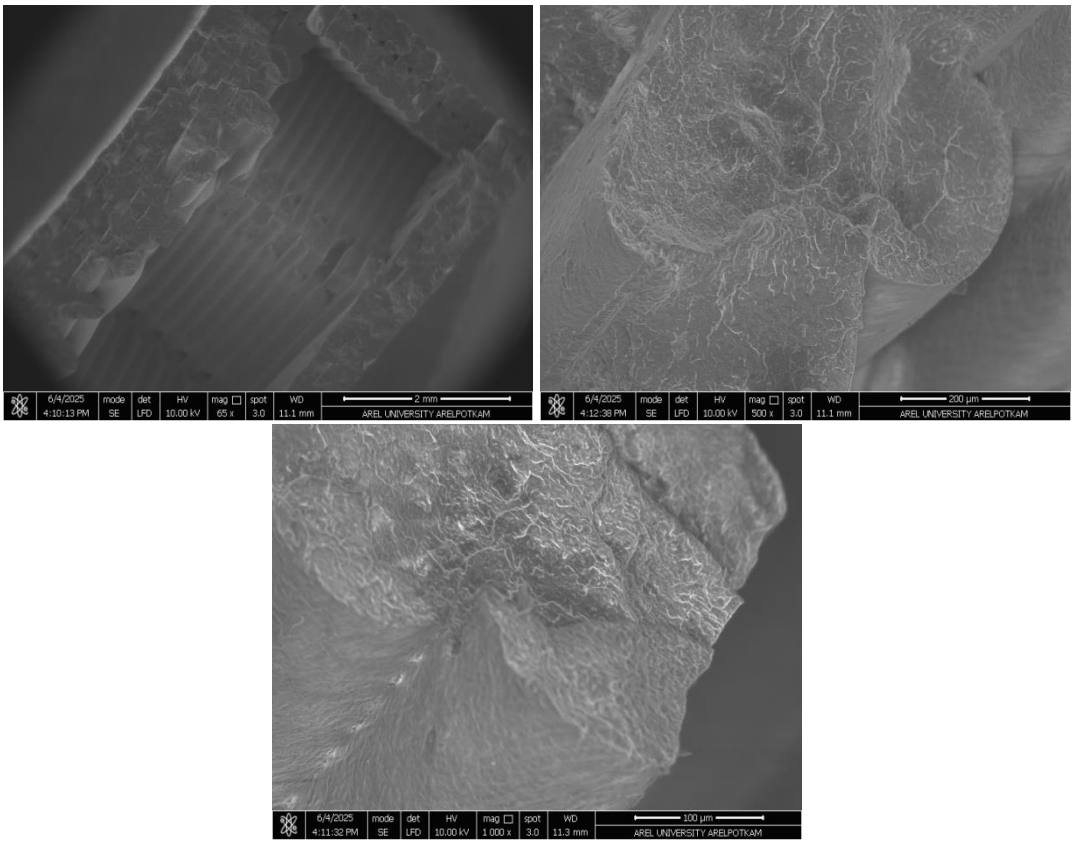
Şekil 4.36: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü.



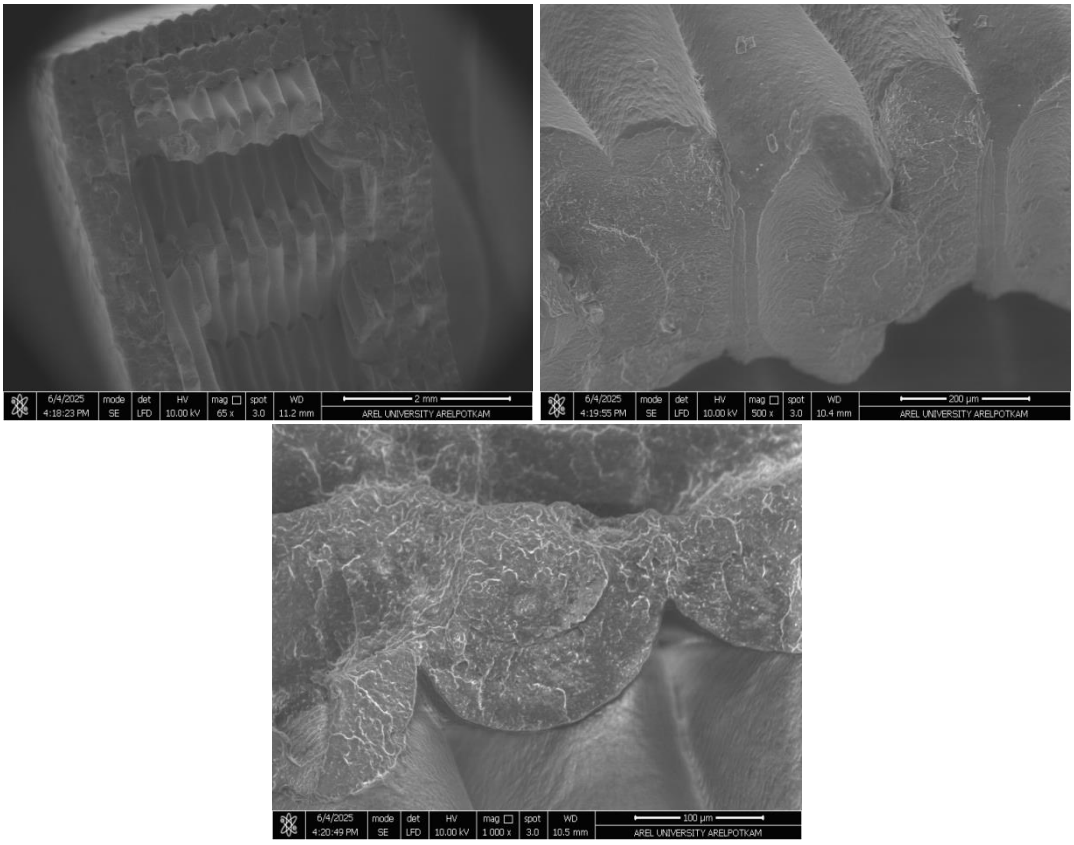
Şekil 4.37: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü.



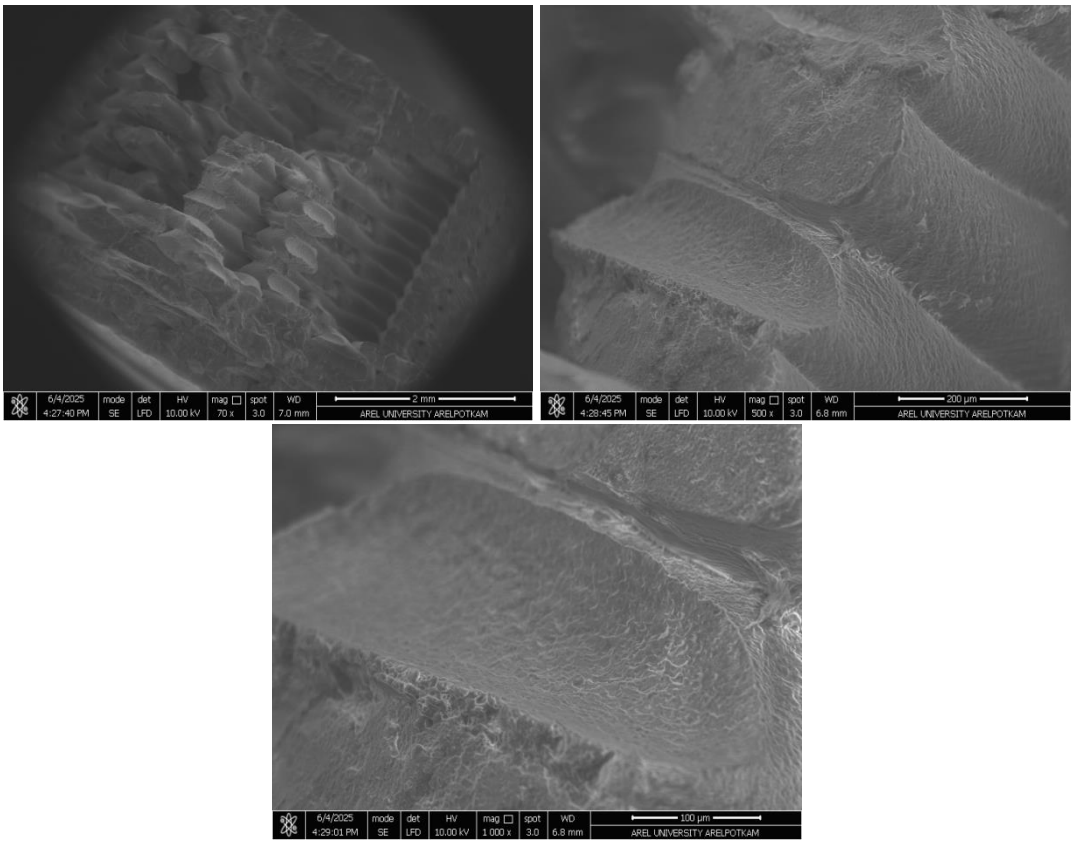
Şekil 4.38: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.39: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.40: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.41: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-PLA numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.30-Şekil 4.41 arasında yer alan SEM görüntüleri incelendiğinde, numunelerde doluluk oranının artmasıyla birlikte filamentler arası mikroyapısal boşlukların (katmanlar arası boşluklar ve hapsolmuş hava kabarcıkları) belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durumun, malzemenin nozülden çıkışı sırasında meydana gelen türbülanslı akışın etkisiyle, ekstrüde edilen yol izleri arasında kalan boşlukların daha etkin biçimde doldurulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [78].

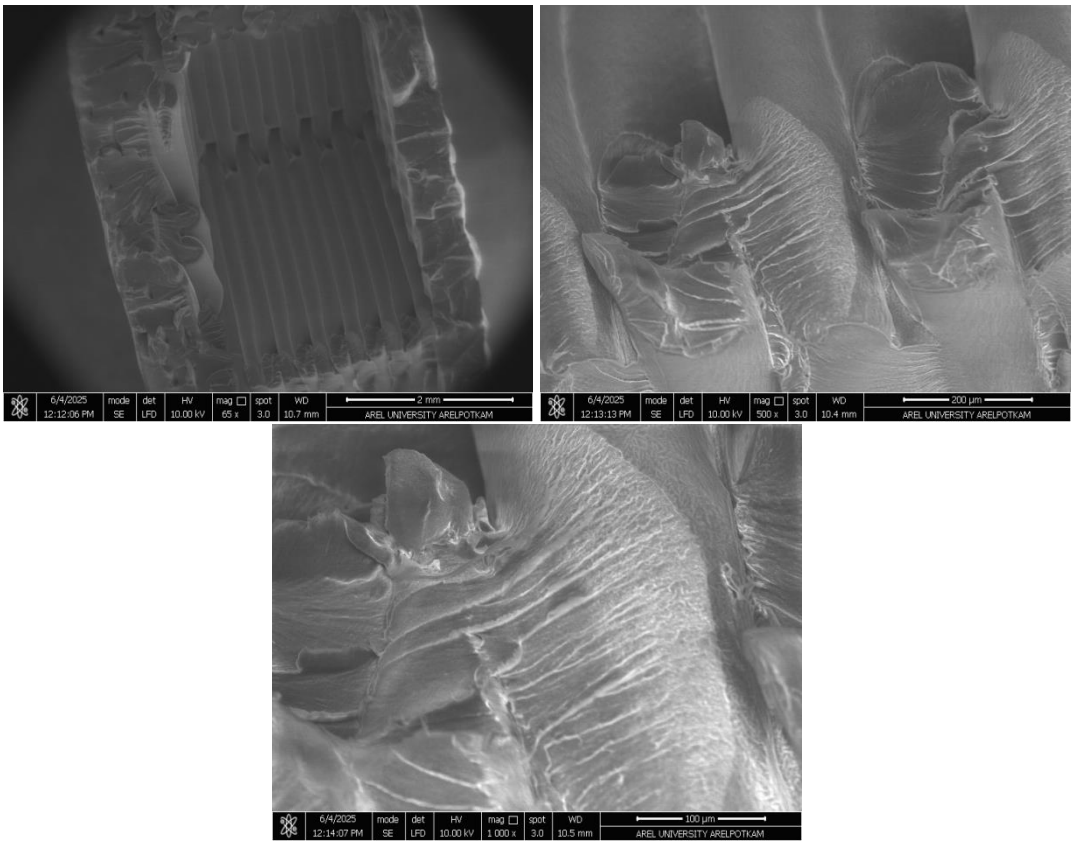
Katmanlar arası boşlukların ve hava kabarcıklarının azalması, malzemenin mekanik performansını önemli ölçüde etkilemektedir. PLA numunelerinde kırılmanın daha keskin kenarlara sahip olduğu ve tipik bir gevrek kırılma davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu numunelerde filamentler arası yapışmanın düzgün ve kusursuz şekilde gerçekleştiği de dikkat çekmektedir. Re-PLA numunelerinde de benzer şekilde, kırılmanın gevrek karakterde olduğu ve doluluk oranının artmasıyla birlikte hava kabarcıklarının azaldığı, buna paralel olarak filamentler arası yapışmanın iyileştiği görülmüştür.

St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinde ise kırık yüzeylerde belirgin plastik deformasyon izleri gözlemlenmiş; bu da kırılmanın sünek karakterde gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Ayrıca,

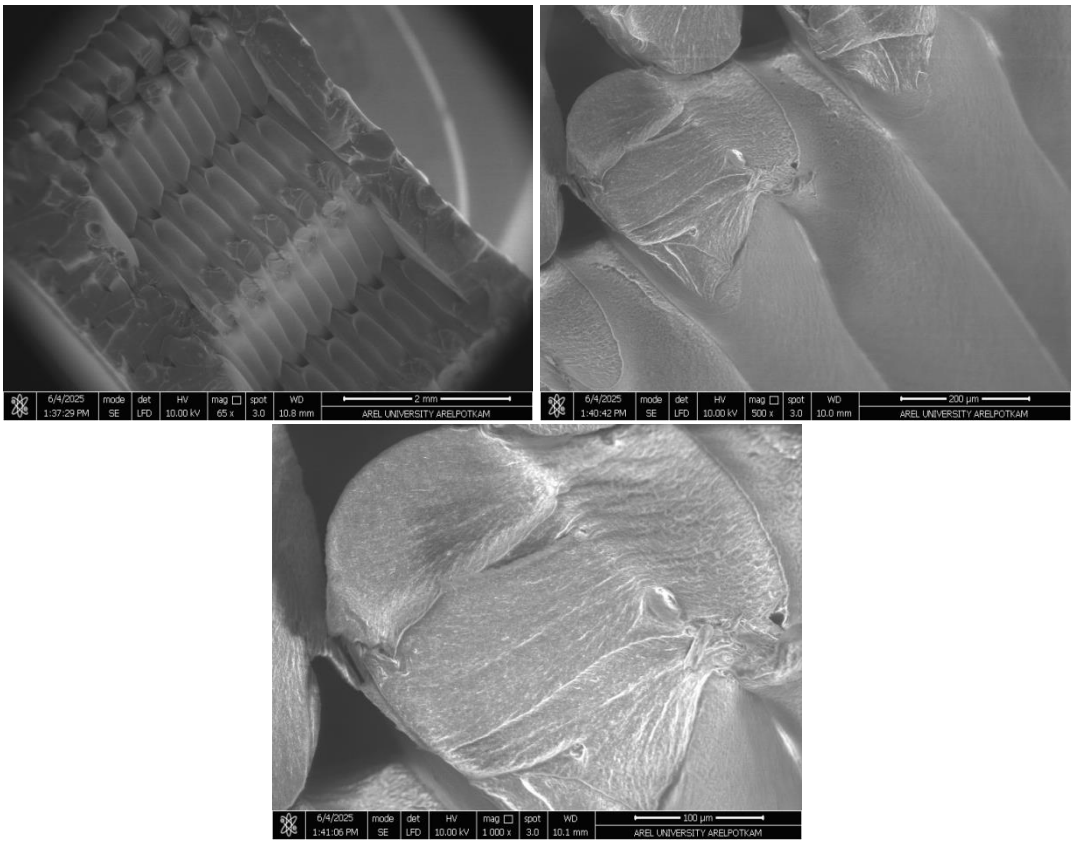
bu numunelerde filamentlerin dairesel biçiminden daha yassı bir şekle geçtiği ve kırık yüzeylerde katmanlar boyunca üst üste oluşmuş sünek kırılma izlerinin yer aldığı belirlenmiştir. Bu morfoloji, yüzey kalitesinde bir düşüşe işaret etmektedir. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının, SEM görüntüleriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Elde edilen bulguların, literatürde yer alan önceki çalışmalarla da uyum gösterdiği tespit edilmiştir [78–80].

4.3.2 ABS Numunelerinin SEM Analizi

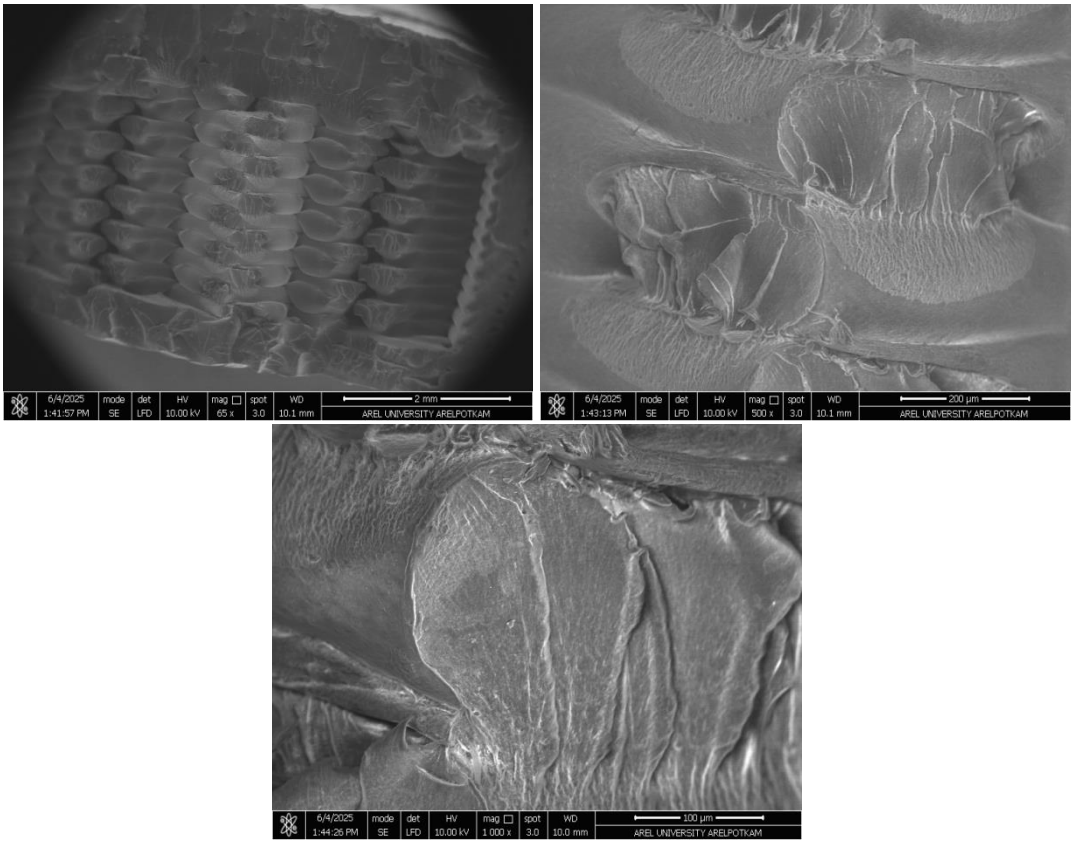
Şekil 4.42 ile Şekil 4.53 arasında, sırasıyla %25, %50 ve %75 doluluk oranlarıyla üretilmiş ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine uygulanan eğme testleri sonrasında elde edilen kırık yüzeylere ait SEM görüntüleri sunulmuştur.



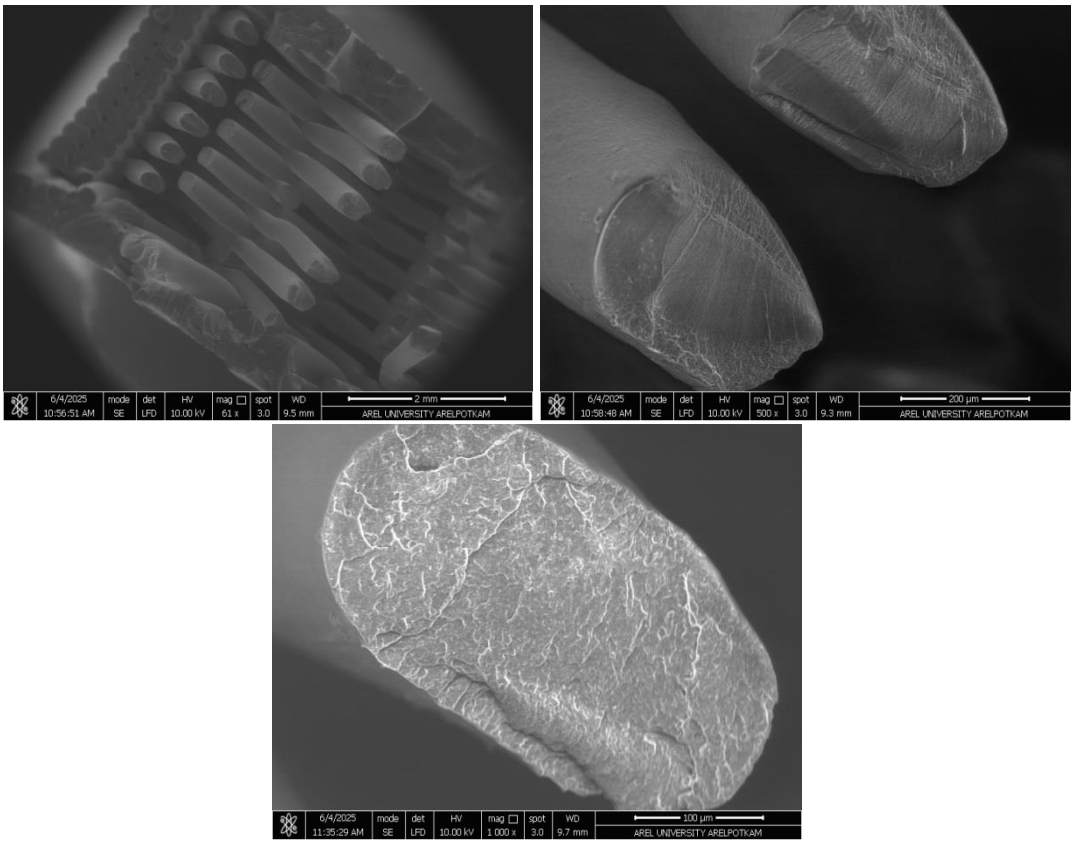
Şekil 4.42: %25 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü.



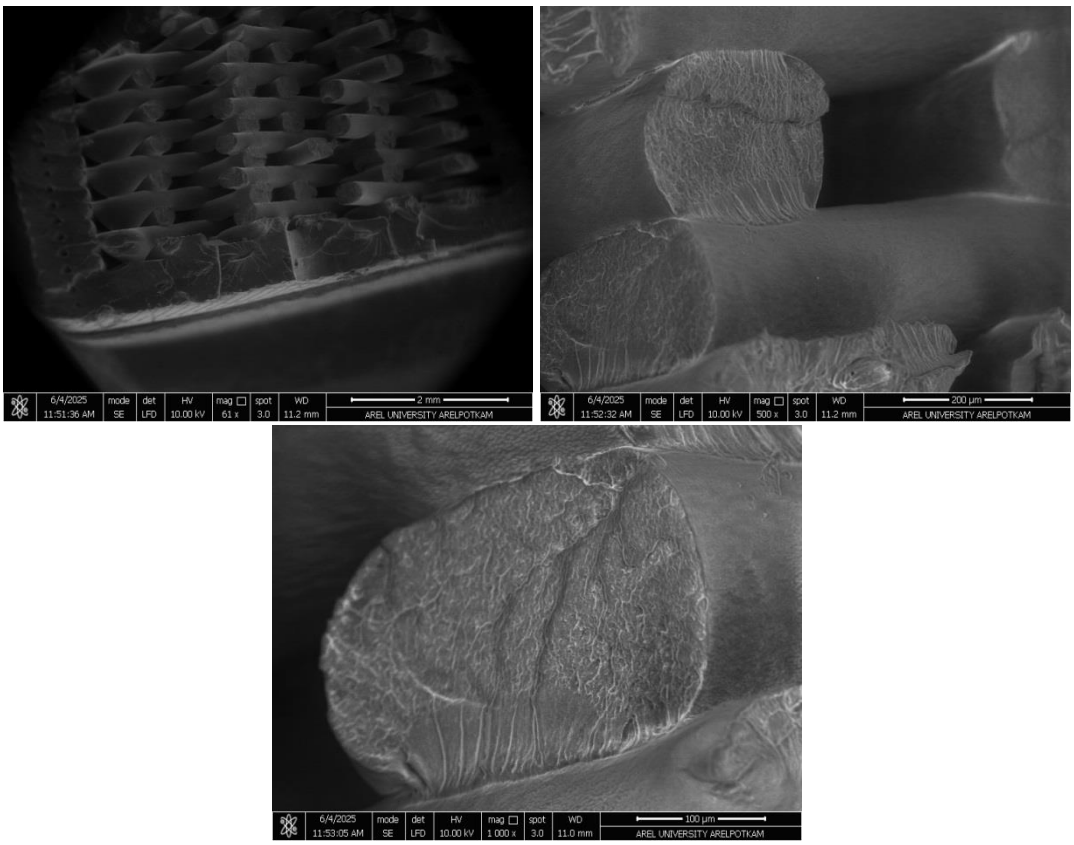
Şekil 4.43: %50 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü.



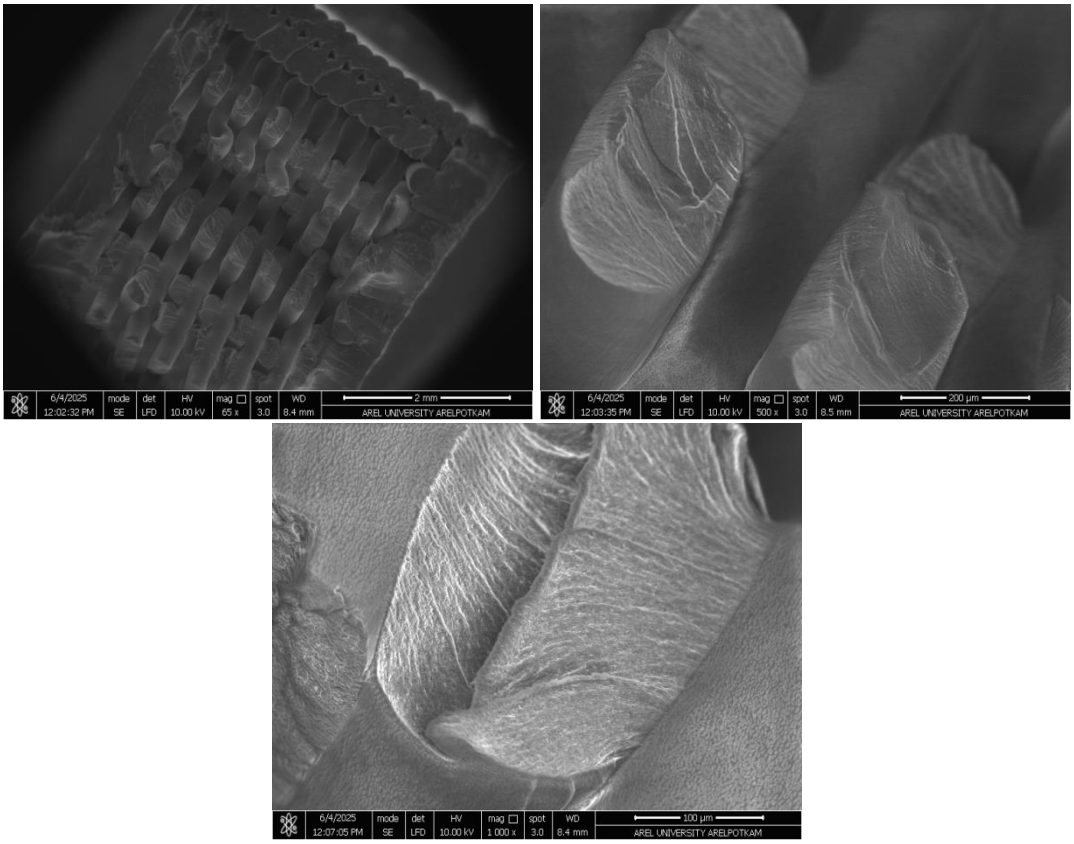
Şekil 4.44: %75 doluluk oranıyla üretilmiş ABS numunenin SEM görüntüsü.



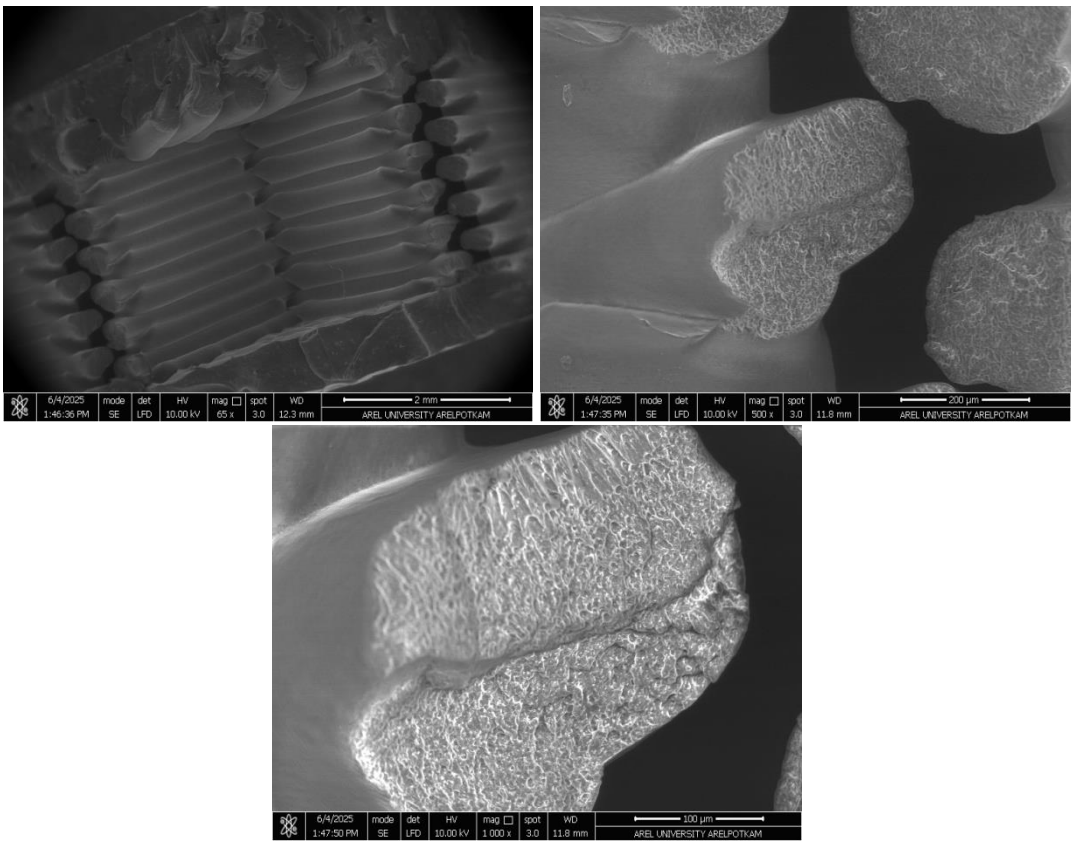
Şekil 4.45: %25 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.



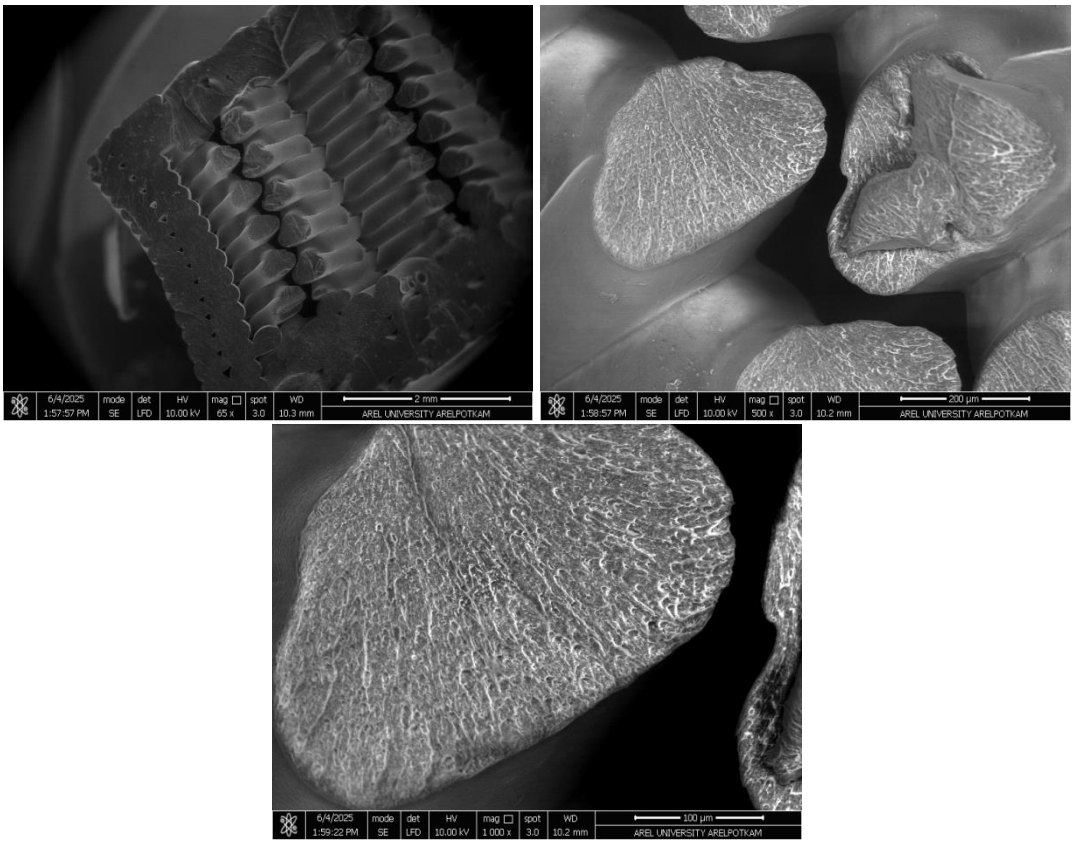
Şekil 4.46: %50 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.



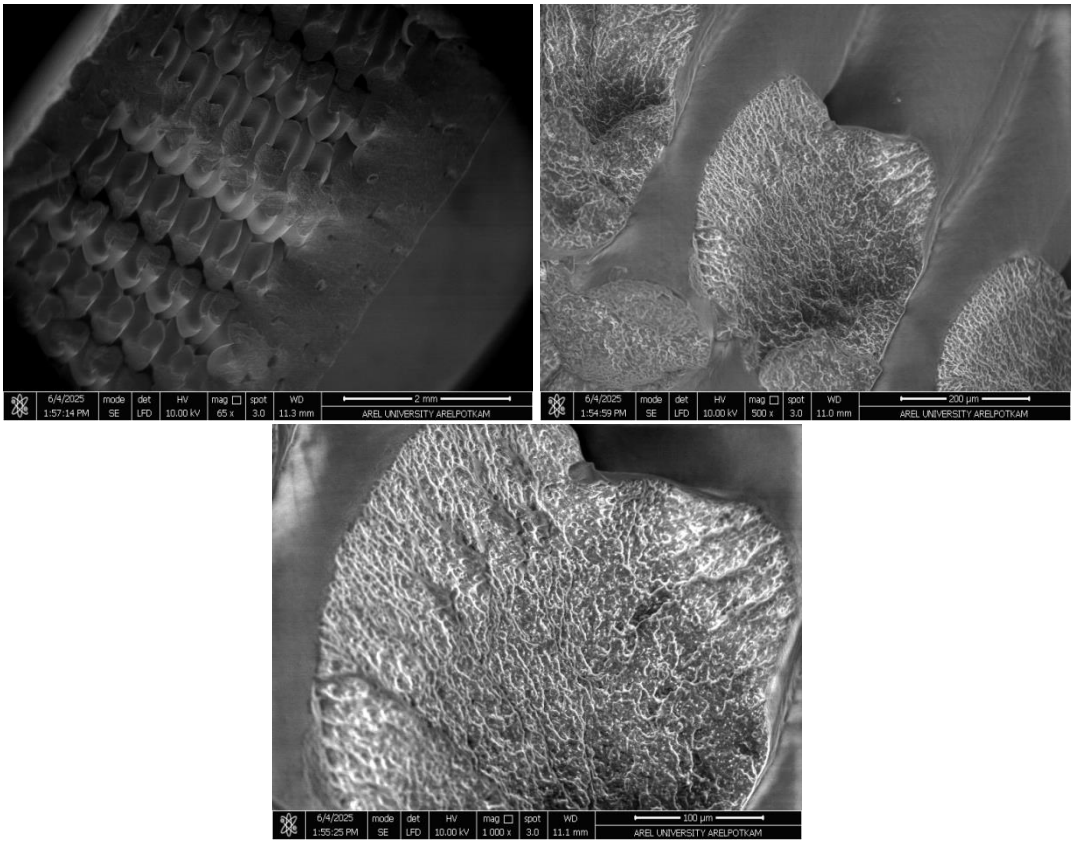
Şekil 4.47: %75 doluluk oranıyla üretilmiş Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.



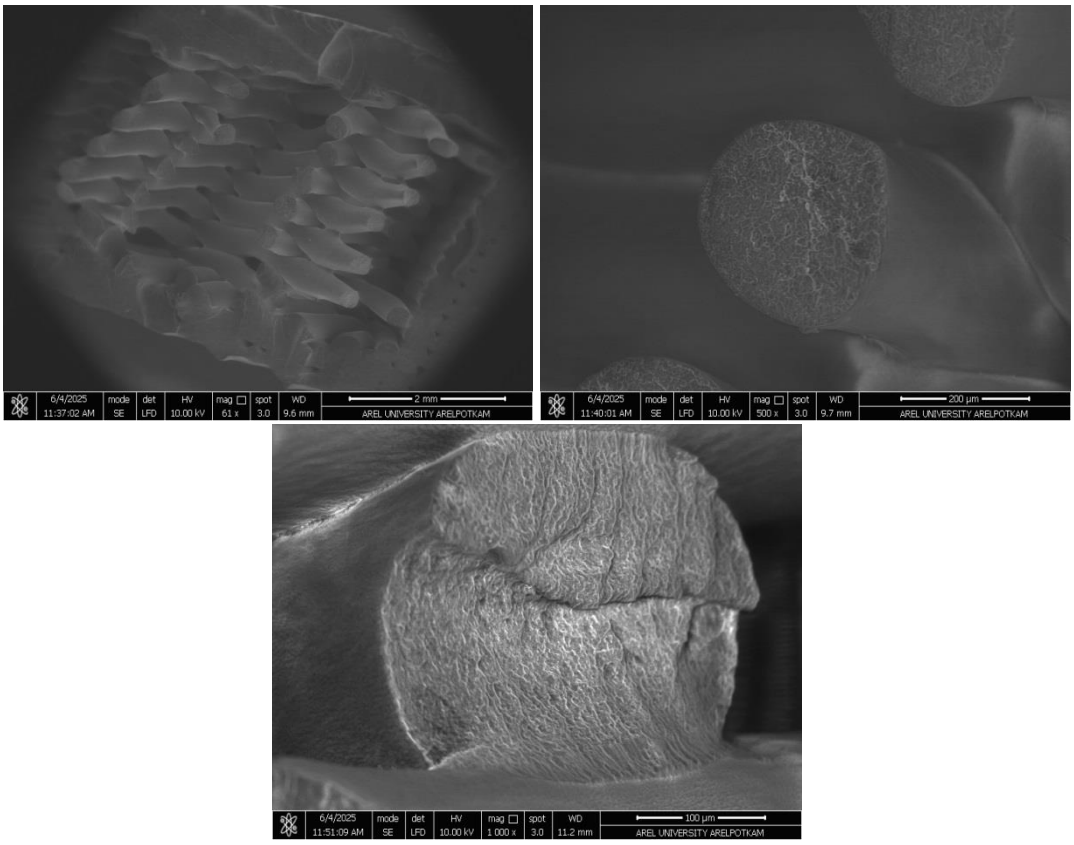
Şekil 4.48: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü.



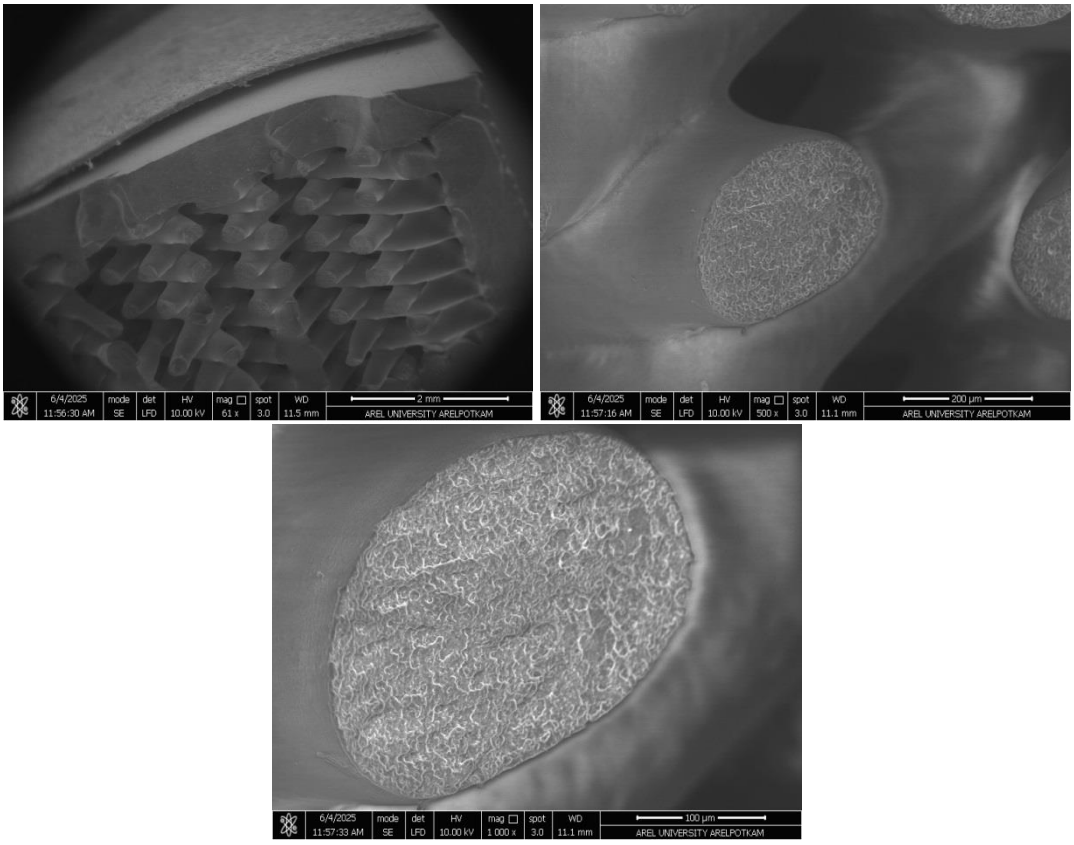
Şekil 4.49: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü.



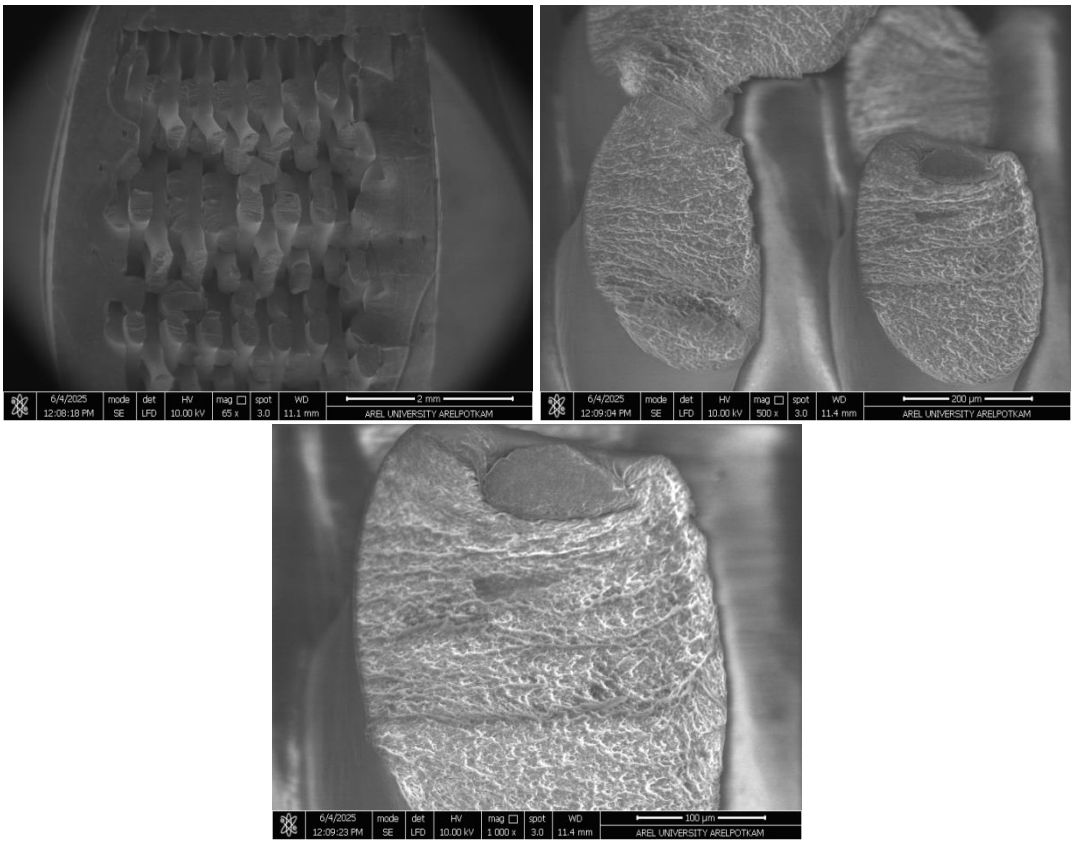
Şekil 4.50: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-ABS numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.51: %25 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.52: %50 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 4.53: %75 doluluk oranıyla üretilmiş St-Re-ABS numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.42-Şekil 4.53 arasında yer alan SEM görüntüleri incelendiğinde, bütün filamentler için üst ve alt katmanların birbirine mükemmel bir şekilde yapıştığı ancak PLA numunelerine göre ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinde hava boşlukların ve katmanlar arasında boşluklar içeren gözenekli yapıların daha fazla olduğu görülmektedir. ABS numunelerinde eğilme dayanımındaki düşüş bu gözenekli yapıların oluşumunun neden olduğu düşünülmektir. Benzer bir çalışmada, Özsoy ve diğ., PLA numunelerinin ABS numunelerine göre daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğunu bildirmişlerdir ve bu durumu numune üretim sürecinde tabakalar arasında sağlanan bağın PLA malzeme numuneleri için ABS numunelerine göre daha iyi olması ile açıklamışlardır [81].

Şekil 4.42–Şekil 4.53 arasında yer alan ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS malzemelerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, tüm numunelerde kırılmanın sünek şekilde gerçekleştiği açıkça görülmüştür. Bu numunelerin kırık yüzeylerinde, özellikle PLA malzemelere göre daha düşük yüzey kalitesi gözlemlenmiş ve bu durum sünek kırılma davranışını desteklemiştir [82]. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri de bu bulgularla uyum göstermektedir. Bununla birlikte, uygulanan sterilizasyon işleminin filamentlerin şekli ve yüzey yapısı üzerinde olumsuz etkiler yarattığı; kırık yüzeylerde ise düzensizliklerin arttığı gözlemlenmiştir.

Gözlemler, geri dönüştürülmüş filamentlerin saf malzemelere kıyasla daha düzensiz bir yüzey morfolojisine ve artmış gözenekliliğe sahip olduğunu göstermektedir. Sterilizasyon işlemleri sonrası ise, bazı numunelerde katman ayrışmaları ve mikroçatlaklar tespit edilmiştir. Bu tür yapısal bozulmalar, mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olmakta olup, SEM analizleri sayesinde bu durum mikroyapı düzeyinde desteklenmiştir [62].

Sonuç olarak, SEM analizi; polimer bazlı 3B baskı ürünlerinde hem üretim sürecine hem de sonrasındaki işlem adımlarına bağlı mikroyapısal değişimleri ortaya koymakta ve mekanik test sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, yapı-özellik ilişkilerinin bütünsel olarak anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

4.4 Matematiksel Analiz

Bu çalışmada, FDM yöntemiyle üretilmiş PLA ve ABS bazlı polimer numunelere ait mekanik özellikler; eğilme dayanımı (σ_{max}) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) performansları, çok değişkenli regresyon modelleri kullanılarak üretim parametreleriyle ilişkilendirilmiştir. Doluluk oranı (X_1, DO), katman kalınlığı (X_2, KK) ve üretim açısı (X_3, UA) gibi üretim değişkenlerinin hem bireysel hem etkileşimsel katkıları değerlendirildiğinde, malzeme türüne göre farklı model davranışları incelenmiştir.

4.4.1 Matematiksel Modelleme İşlemleri

Her bir varyant (PLA, Re-PLA, St-PLA, St-Re-PLA, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS) için çok değişkenli ikinci dereceden polinom regresyon modelleri kurulmuş, modellerin açıklayıcılığı ve hata metrikleri bağımsız test verisi üzerinden değerlendirilmiştir.

Veri setleri, Wolfram Mathematica ortamında yapılandırılarak sırasıyla:

1. Eğilme dayanımı $\left(\sigma_{max} = f(X_1, X_2, X_3)\right)$
2. Yüzey pürüzlülüğü $\left(Ra = g(X_1, X_2, X_3)\right)$

şeklinde regresyon yöntemi ile modellenmiştir. Regresyon modeli olarak çoklu ikinci derece polinom regresyon (multiple quadratic polynomial regression) yöntemi tercih edilmiştir. Çoklu ikinci dereceden regresyon, genel olarak;

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (4.1)$$

formunda ifade edilmeke beraber, bu çalışmada, basitliğin hatırına, yukarıdaki genel form her bir model için aşağıdaki şekilde alınmıştır:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 \quad (4.2)$$

Burada Y hedef değişken olup σ_{max} ve Ra bağımlı değişkenlerine karşılık gelmektedir. Model katsayıları olan β_i değerleri varyanta göre belirlenmiş ve ikinci dereceden regresyon yöntemiyle tahmin edilmiştir. X_i $(i = 1, 2, 3)$ bağımsız değişkenleri de, sırasıyla, doluluk oranı (DO), katman kalınlığı (KK) ve üretim açısı (UA) dır.

Çalışmanın başlangıç aşamasında, üretim parametrelerinin eğilme dayanımı ve yüzey pürüzlülüğü gibi çıktılar üzerindeki etkilerini ön değerlendirme amacıyla doğrusal regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, hızlı ve temel bir değerlendirme sağlayabilmeleri açısından Microsoft Excel ortamında uygulanmış; ancak elde edilen sonuçların deneysel verilerle sınırlı bir uyum gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, ilgili bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal bir yapıda olmayabileceğine işaret etmiştir.

Bu bağlamda, üretim parametreleri ile mekanik ve yüzeysel özellikler arasındaki ilişkilerin daha doğru modellenebilmesi adına çoklu ikinci dereceden regresyon modeli tercih edilmiştir. Modelin katsayıları ayrı ayrı belirlenerek yapılan analizlerde, elde edilen sonuçların deneysel bulgularla daha yüksek oranda örtüştüğü görülmüştür. Nitekim literatürde de üretim süreçlerinin optimizasyonunda ve etkileşimli parametre analizlerinde ikinci dereceden regresyon modellerinin yaygın biçimde tercih edildiği bilinmektedir. Özellikle Response Surface Methodology (RSM) çerçevesinde, bu tür modellerin, deneysel verilerle yüksek uyum sağlayan matematiksel temsiller sunduğu sıklıkla rapor edilmektedir.

İlgili modelleme çalışmaları nihai olarak Wolfram Mathematica yazılımı ile gerçekleştirilmiş; modelin bazı doğrulama ve görselleştirme süreçleri ise Python/Google Colab platformları kullanılarak desteklenmiştir.

Matematiksel hesaplamalar ve modelleme işlemleri için; Tablo 4.1'de yer alan; PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları, Tablo 4.5'te yer alan; ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerine ait eğilme dayanımı test sonuçları, Tablo 4.9'da yer alan; PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları ile Tablo 4.11'de yer alan ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-

ABS numunelerine ait yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçlarına ait deney veri setleri kullanılmıştır.

4.4.2 Matematiksel Model Performans Kriterleri

Modellerin doğruluğunu ve güvenilirliliğini test etmek için göz önüne alınan istatistiksel metrikler şunlardır:

- R^2 (Determinasyon Katsayısı): Modelin bağımlı değişkendeki toplam değişimin ne kadarını açıkladığını gösteren istatistiksel bir ölçüdür. $R^2 = 1$ ise mükemmel açıklama yani verilere tamamen uyan model elde edilmiş demektir. Literatürde genellikle 0.7 ve üzeri R^2 değerleri kabul edilebilir düzeyde açıklayıcılık olarak değerlendirilir. $R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}$. Modelin verilerin ne kadarını açıkladığını gösterir.
- MAE (Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)): Gerçek değerler ile model tarafından tahmin edilen değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. $MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i|$. Hataların genel düzeyini verir.
- RMSE (Karekök Ortalama Hata (Root Mean Square Error)): Tahmin hatalarının karesinin ortalamasının kareköküdür. $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}$. Uç değerlerin model performansını nasıl etkilediğini yansıtır.

4.4.3 PLA Numunelerine Ait Matematiksel Analiz

4.4.3.1 Eğilme dayanımı modelleri

Dört PLA varyantına yönelik eğilme dayanımı modelleri için Wolfram Mathematica paket programı kullanılarak elde edilen ikinci dereceden regresyon modelleri Denklem (4.3-6)'daki gibidir:

PLA Modeli:

$$\sigma_{max} = 0.2087\,X_1 + 68.8333\,X_2 + 0.0959\,X_3 + 0.0042 \cdot X_1^2 - 1.8000\,X_1X_2$$

$$-0.0009\,X_1X_3 + 300.0000\,X_2^2 - 0.8111\,X_2X_3 + 0.0017\,X_3^2 \quad (4.3)$$

Re-PLA Modeli:

$$\sigma_{max} = 0.0088 \cdot X_1 - 221.0000 \cdot X_2 + 0.4433 \cdot X_3 + 0.0017 \cdot {X_1}^2 + 0.3733 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$- 0.0020 \cdot X_1 \cdot X_3 + 891.1111 \cdot {X_2}^2 - 1.7926 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0002 \cdot {X_3}^2 \quad (4.4)$$

St-PLA Modeli:

$$\sigma_{max} = -1.0900 \cdot X_1 - 1487.0000 \cdot X_2 - 0.3793 \cdot X_3 + 0.0058 \cdot {X_1}^2 + 2.4400 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$+ 0.0016 \cdot X_1 \cdot X_3 + 2973.3333 \cdot {X_2}^2 + 0.6889 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.0014 \cdot {X_3}^2 \quad (4.5)$$

St-Re-PLA Modeli:

$$\sigma_{max} = -0.3680 \cdot X_1 - 497.6667 \cdot X_2 - 0.1563 \cdot X_3 - 0.0053 \cdot {X_1}^2 + 3.8800 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$+ 0.0037 \cdot X_1 \cdot X_3 + 626.6667 \cdot {X_2}^2 - 0.0222 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0002 \cdot {X_3}^2 \quad (4.6)$$

4.4.3.2 Yüzey pürüzlülüğü modelleri

Aynı varyantlar için elde edilen yüzey pürüzlülüğü regresyon modelleri Denklem (4.7-10)'daki gibidir:

PLA Modeli:

$$Ra = -0.0388 \cdot X_1 - 1.5439 \cdot X_2 + 0.0677 \cdot X_3 + 0.0001 \cdot {X_1}^2 + 0.1785 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$- 0.0004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1.2667 \cdot {X_2}^2 - 0.0517 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0004 \cdot {X_3}^2 \quad (4.7)$$

Re-PLA Modeli:

$$Ra = -0.0529 \cdot X_1 + 20.3478 \cdot X_2 - 0.0526 \cdot X_3 - 0.0004 \cdot {X_1}^2 + 0.4667 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$- 0.0000 \cdot X_1 \cdot X_3 - 129.4222 \cdot {X_2}^2 + 0.2047 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.0002 \cdot {X_3}^2 \quad (4.8)$$

St-PLA Modeli:

$$Ra = 0.0392 \cdot X_1 + 23.0367 \cdot X_2 + 0.0226 \cdot X_3 - 0.0000 \cdot {X_1}^2 - 0.2042 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$+ 0.0000 \cdot X_1 \cdot X_3 - 23.3111 \cdot {X_2}^2 - 0.0931 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.0001 \cdot {X_3}^2 \quad (4.9)$$

St-Re-PLA Modeli:

$$Ra = -0.0595 \cdot X_1 + 180.0972 \cdot X_2 + 0.0301 \cdot X_3 + 0.0003 \cdot {X_1}^2 - 0.0587 \cdot X_1 \cdot X_2$$

$$+ 0.0004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 428.8444 \cdot {X_2}^2 - 0.1442 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.0001 \cdot {X_3}^2 \quad (4.10)$$

4.4.3.3 Matematiksel model performans kriterleri

Her model için matematiksel olarak hesaplanıp öngörüde bulunulan veriler üzerindeki performans metrikleri aşağıdaki Tablo 4.13 ve Tablo 14'te verilmiştir. İstatistiksel bir değerlendirmede bulunabilmek amacıyla R^2, MAE, RMSE metriklerinin değerleri Tablo 4.13 ve Tablo 4.14'te listelenmektedir.

Tablo 4.13: Eğilme Dayanımı Modelleri için performans metrikleri.

Model	R^2	**MAE**	**RMSE**
σ_{max}-PLA	0.87	1.92	2.41
σ_{max}-Re-PLA	0.69	3.30	3.81
σ_{max}-St-PLA	0.61	5.32	6.27
σ_{max}-St-Re-PLA	0.46	4.53	5.68

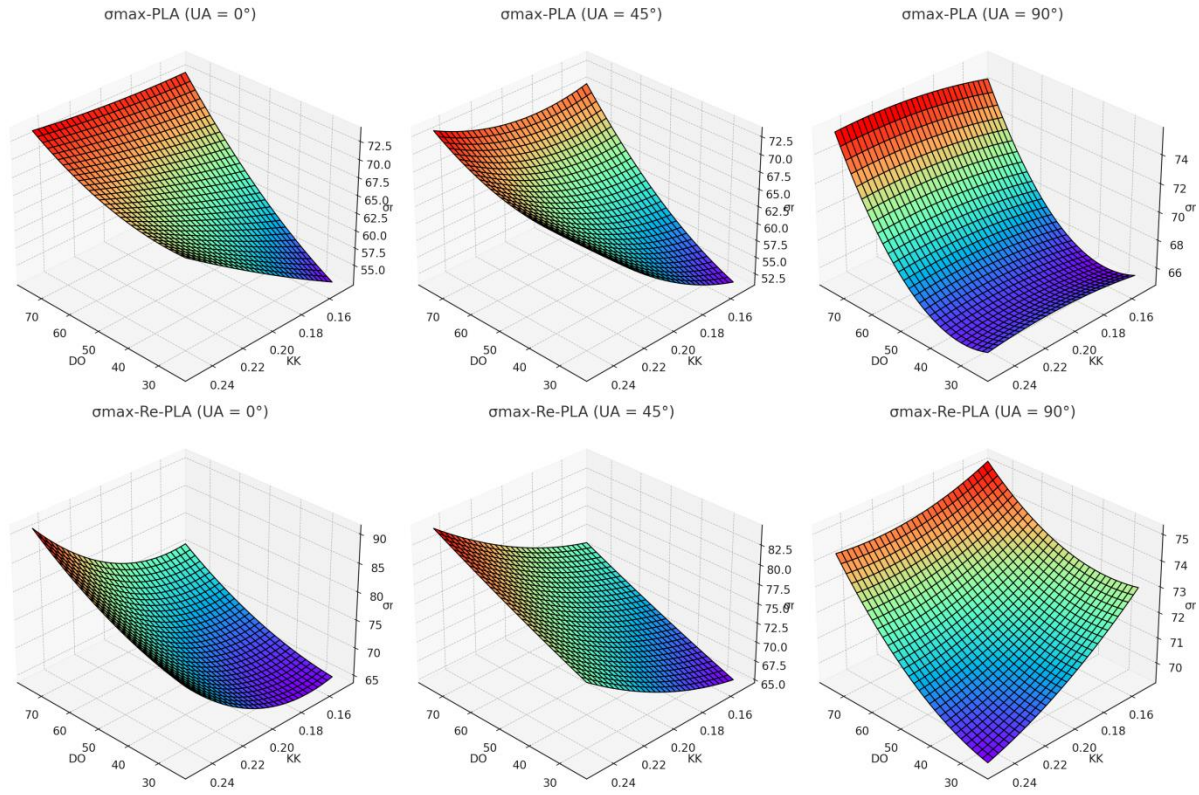
Tablo 13 iincelendiğinde. En yüksek doğruluk (R^2 = 0.87 ile) PLA modelindedir. En düşük hata değerleri (MAE=1.92 ve RMSE=2.41 ile) yine PLA modelindedir. Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA varyantlarında hem hata büyümüş hem de R^2 değeri düşmüş olduğundan sterilizasyon ve geri dönüşüm işlemlerinde üratim parametrelerinin dikkatle seçilmesi gerektiği sonucuna ulaşılabilmektedir.

Tablo 4.14: Yüzey Pürüzlülüğü Modelleri için performans metrikleri.

Model	R^2	**MAE**	**RMSE**
Ra-PLA	0.34	0.62	0.80
Ra-Re-PLA	0.21	0.95	1.17
Ra-St-PLA	0.16	0.93	1.12
Ra-St-Re-PLA	0.25	1.11	1.50

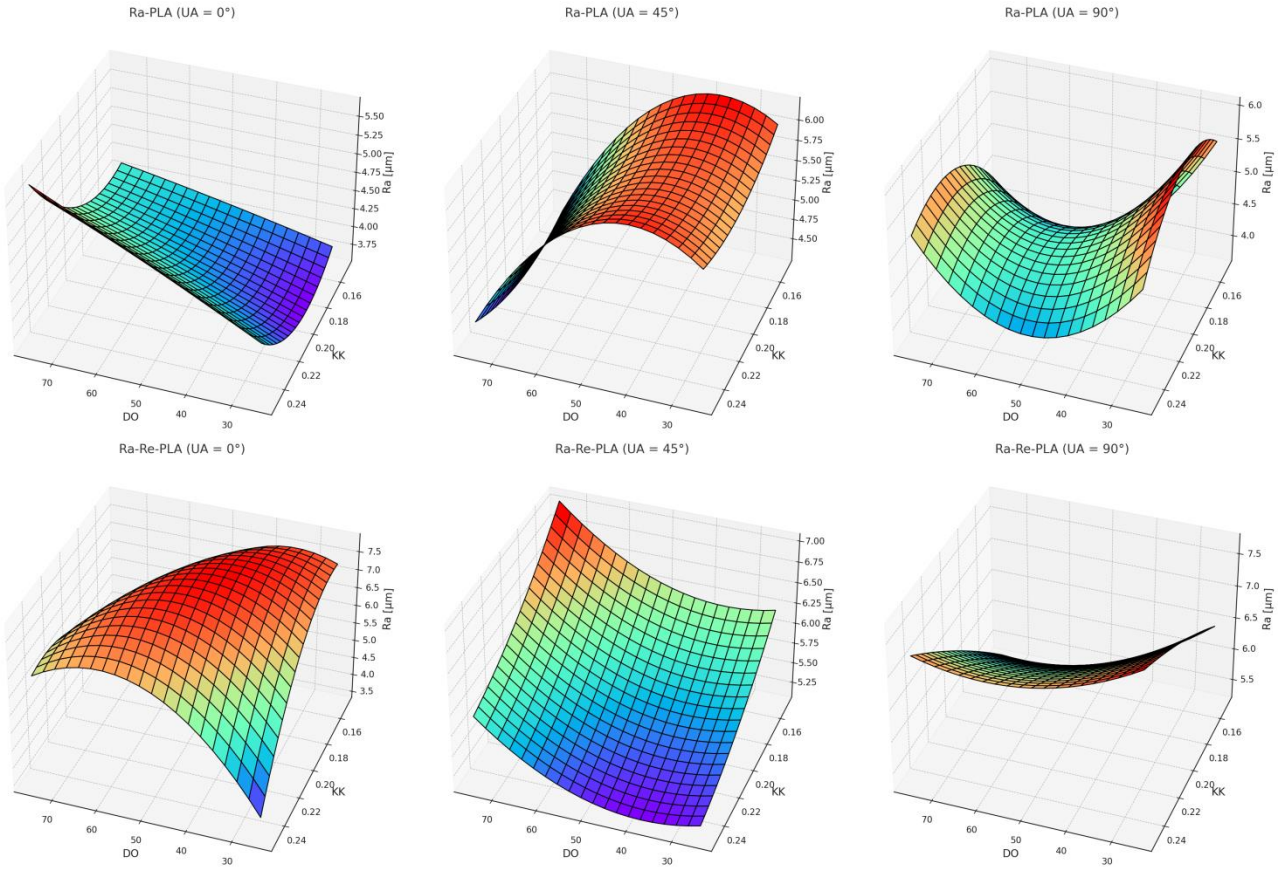
Tablo 4.14 incelendiğinde; R^2 değerlerinin mükemmel değer olan 1'e hayli uzak olması yüzey pürüzlülüğü modelleme işlemleri için daha kapsamlı modelleme ve örneklem çalışmalarına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Üretim açısının $(UA = 0°, 45°, 90°)$ alındığı durumlar için doluluk oranı ve katman kalınlığı parametrelerinin σ_{max} üzerindeki etkisinin görsel olarak temsili aşağıdaki Şekil 4.54'te verilmektedir.



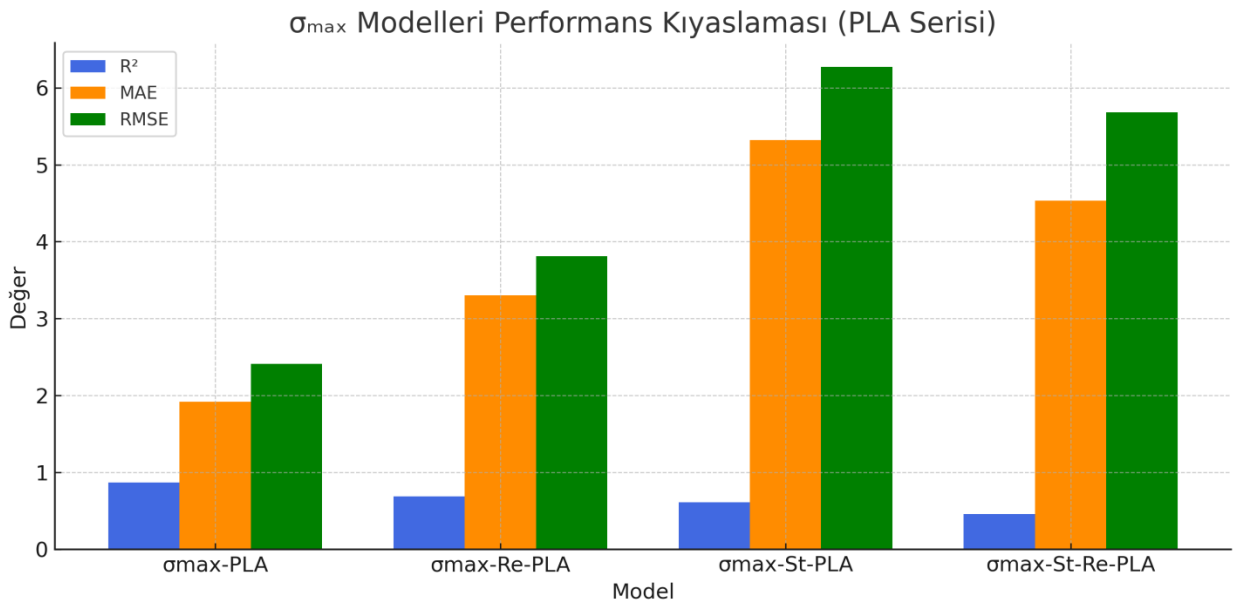
Şekil 4.54: Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabit tutulduğunda, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin eğilme dayanımı (σ_{max}) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili.

Benzer şekilde yine üretim açısının $(UA = 0°, 45°, 90°)$ alındığı durumda doluluk oranı ve katman kalınlığı parametrelerine karşılık yüzey pürüzlülüğü değerlerinin görsel temsili Şekil 4.55'te sunulmaktadır.



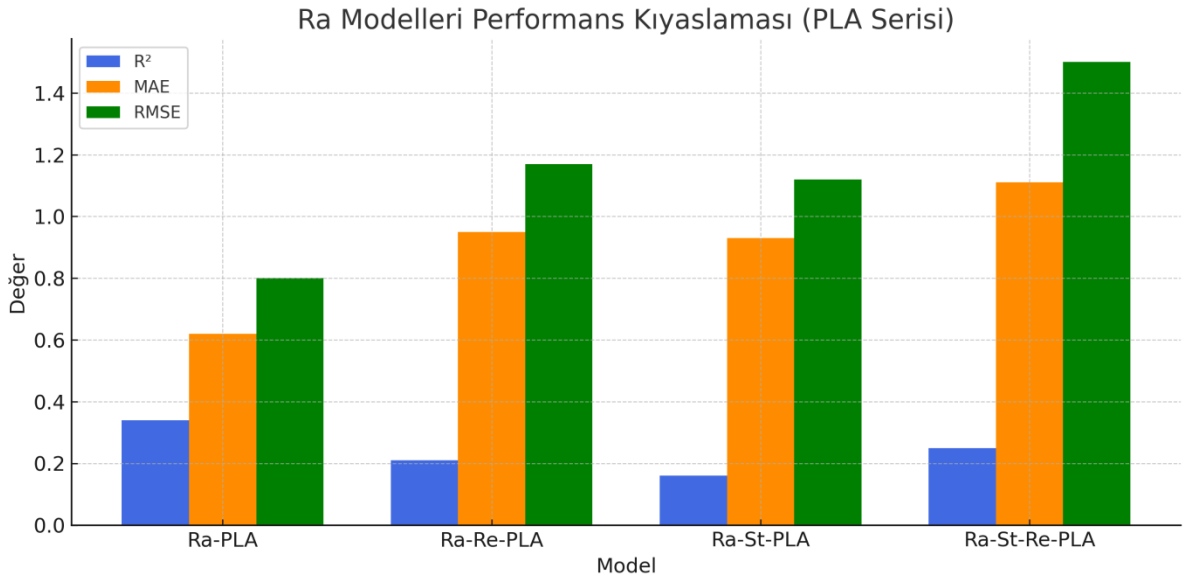
Şekil 4.55: Üretim açısı Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabitken, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili.

Modellerin ait reel veriler ile uyumlarının kendi aralarında karşılaştırılması amacıyla Pyton / Colab kullanılarak elde edilen grafikler, σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması Şekil 4.56'da gösterilmektedir. PLA modelinin en yüksek doğruluk ve en düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.56: σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması.

Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması Şekil 4.57'de verilmiştir. Açıklayıcılık (R^2) düşerken, hata metrikleri görece düşük kalmaktadır.



Şekil 4.57: Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması.

PLA model denklemleri ve performans kriterleri incelendiğinde PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinin eğilme dayanımı modellerine ait en yüksek açıklayıcılık (R^2 = 0,87) PLA modelinde gözlenmiş, buna karşın St-Re-PLA modeli daha düşük uyum ve yüksek varyans (R^2 = 0,46) sergilemiştir. Elde edilen regresyon modelleri, üretim parametrelerinin mekanik davranış üzerindeki etkisini başarıyla ortaya koymuş; özellikle doluluk oranı ve katman kalınlığı tüm varyantlar içerisinde belirgin etkileyici üretim parametreleri olarak öne çıkmıştır.

Tablo 4.14 incelendiğinde St-PLA grubunun R^2 = 0.68 ile en yüksek açıklayıcılığı sağladığı, St-Re-PLA grubunun ise R^2 = 0,12 değeriyle en düşük uyum başarımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Katman kalınlığı (X_2), hemen her varyantta yüzey pürüzlülüğü üzerinde en belirleyici parametre olmuş, özellikle kalın katmanlarda yüzeyin daha dalgalı ve düzensiz olduğu gözlemlenmiştir.

Geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş PLA numunelerinde yüzey pürüzlülüğünün öngörülebilirliği azalmıştır. Bu durum, literatürde belirtilen geri dönüşümün polimer zincir yapısını zayıflatması ve termal bozunmanın yüzeyde mikroskobik bozukluklara neden olması ile uyumludur [83,84]. Sonuç olarak, Ra değerinin modellenmesinde mekanik dayanım kadar yüksek başarı elde edilememekle birlikte, özellikle St-PLA varyantı gibi belirli gruplarda regresyon modelleri istatistiksel olarak güvenilir sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, üretim parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve literatürle uyumlu şekilde yüzey davranışının oldukça değişken olabileceğini göstermektedir [85].

PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA için mekanik ve yüzey Pürüzlülüğü modelleme çalışmaları değerlendirildiğinde; PLA, geri dönüştürülmüş PLA (Re-PLA), steril PLA (St-PLA) ve steril geri dönüştürülmüş PLA (St-Re-PLA) numunelerine ait eğilme dayanımı (σ_{max}) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) özellikleri, üretim parametrelerine bağlı olarak çok değişkenli ikinci dereceden regresyon modelleriyle incelenmiştir. Eğilme dayanımı modellerinde açıklayıcılık ($R^2 \geq 0,69$) olarak gözlemlenirken, yüzey pürüzlülüğü modelleri daha düşük açıklayıcılığa ($R^2 \leq 0,34$) sahip olmuştur. Bu durum, mekanik özelliklerin üretim parametreleriyle daha doğrudan ve düzenli ilişkiler göstermesine karşın, Ra'nın mikroyapısal bozukluklara ve dışsal etkilere daha açık olmasıyla açıklanabilir. Özellikle katman kalınlığı (X_2) hem dayanım hem yüzey kalitesi üzerinde en belirleyici parametre olurken, üretim açısı (X_3) eğilme dayanımında etkili fakat Ra üzerinde sınırlı kalmıştır. Geri dönüşüm ve sterilizasyon işlemleri varyansı artırmış, bu da özellikle Ra modellerinde hata paylarını

yükseltmiştir. Sonuçlar, FDM ile üretilen PLA esaslı parçaların mekanik dayanımının parametrik modelleme ile öngörülebileceğini, ancak yüzey pürüzlülüğünün daha karmaşık modelleme yaklaşımlarını gerektirdiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, PLA numunelerinde eğilme dayanımı üretim parametreleriyle güçlü ilişkiler gösterdiği için regresyon modelleme yöntemi ile yüzey pürüzlülüğü verilerine göre daha yüksek başarımla modellenebilmiştir. Ancak yüzey pürüzlülüğü daha karmaşık, mikro düzeyli etkiler taşıdığı için daha gelişmiş, doğrusal olmayan yaklaşımlar gerekebilir.

Geri dönüştürülmüş veya sterilize edilmiş polimer malzemelerin üretim açısına karşı gösterdiği kararsız tepkiler, yönelime bağlı yapısal zayıflıklarla açıklanabilir. Üretim açısının artması durumunda gözlenen deformasyon eğilimleri, bu malzemelerdeki içyapısal düzensizliklerin bir sonucu olabilir [70,86]. Bu nedenle, geliştirilecek modellerin sadece doğrusal değişkenleri değil, aynı zamanda malzemenin termomekanik geçmişini ve anizotropik davranışını da dikkate alması gereklidir.

Yüzey pürüzlülüğü modelleri, düşük R^2 ve yüksek varyans ile klasik regresyon tekniklerinin yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu bağlamda, spline regresyon, Random Forest (RF), Support Vector Machines (SVM) gibi daha esnek modeller önerilmektedir [32].

Elde edilen bulgular, FDM süreç parametrelerinin polimer tabanlı numunelerin hem mekanik hem yüzey özellikleri üzerindeki etkisini çok değişkenli bir yaklaşımla ortaya koymuştur. Çalışma, farklı malzeme türlerinin üretim sonrası süreçlere (geri dönüşüm, sterilizasyon) verdiği tepkileri model bazında karşılaştırmalı olarak ortaya koyması açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

4.4.4 ABS Numunelerine Ait Matematiksel Analiz

4.4.4.1 Eğilme dayanımı modelleri

Dört ABS varyantına yönelik eğilme dayanımı modelleri için Wolfram Mathematica paket programı kullanılarak elde edilen ikinci dereceden regresyon modelleri Denklem (4.11-14)'teki gibidir:

ABS Modeli:

$$\sigma_{max} = 24.611 + 0.062\,X_1 + 87.167\,X_2 + 0.055\,X_3 + 0.0023\,X_1^2 - 0.400\,X_1X_2$$

$$-0.00009\,X_1X_3 - 93.333\,X_2^2 - 0.367\,X_2X_3 + 0.00065\,X_3^2 \quad (4.11)$$

Re-ABS Modeli:

$$\sigma_{max} = 56.828 - 0.061\,X_1 - 162.667\,X_2 + 0.161\,X_3 + 0.0024\,X_1^2 + 0.660\,X_1X_2$$

$$-0.0009\,X_1X_3 + 266.667\,X_2^2 - 0.022\,X_2X_3 - 0.0011\,X_3^2 \quad (4.12)$$

St-ABS Modeli:

$$\sigma_{max} = 10.344 + 0.111\,X_1 + 294.333\,X_2 + 0.115\,X_3 + 0.0038\,X_1^2 - 1.200\,X_1X_2$$

$$-0.0005\,X_1X_3 - 533.333\,X_2^2 - 0.200\,X_2X_3 - 0.0014\,X_3^2 \quad (4.13)$$

St-Re-ABS Modeli:

$$\sigma_{max} = 36.933 + 0.067\,X_1 + 6.667\,X_2 + 0.142\,X_3 + 0.0058\,X_1^2 - 1.400\,X_1X_2$$

$$-0.0009\,X_1X_3 - 120.000\,X_2^2 - 0.089\,X_2X_3 - 0.0017\,X_3^2 \quad (4.14)$$

4.4.4.2 Yüzey pürüzlülüğü modelleri

Aynı varyantlar için elde edilen yüzey pürüzlülüğü regresyon modelleri Denklem (4.15-18)'deki gibidir:

ABS Modeli:

$$Ra = 19.007 - 0.162\,X_1 - 53.641\,X_2 + 0.0073\,X_3 + 0.0020\,X_1^2 - 0.291\,X_1X_2$$

$$-0.0005\,X_1X_3 + 125.022\,X_2^2 + 0.123\,X_2X_3 - 0.00008\,X_3^2 \quad (4.15)$$

Re-ABS Modeli:

$$Ra = 12.309 - 0.090\,X_1 + 14.588\,X_2 - 0.028\,X_3 + 0.0010\,X_1^2 - 0.199\,X_1X_2$$

$$-0.00006\,X_1X_3 - 14.000\,X_2^2 - 0.0052\,X_2X_3 + 0.00027\,X_3^2 \quad (4.16)$$

St-ABS Modeli:

$$Ra = 8.439 + 0.051\,X_1 + 11.159\,X_2 - 0.066\,X_3 + 0.00034\,X_1^2 - 0.450\,X_1X_2$$

$$+0.0002\,X_1X_3 - 0.533\,X_2^2 + 0.254\,X_2X_3 + 0.00006\,X_3^2 \quad (4.17)$$

St-Re-ABS Modeli:

$$Ra = 8.993 + \ 0.033\,X_1 + 14.229\,X_2 + 0.050\,X_3 + 0.00026\,X_1^2 - 0.259\,X_1X_2$$

$$-0.00034\,X_1X_3 - 4.689\,X_2^2 - 0.088\,X_2X_3 - 0.00019\,X_3^2 \quad (4.18)$$

4.4.4.3 Matematiksel model performans kriterleri

Her model için matematiksel olarak hesaplanıp öngörüde bulunulan veriler üzerindeki performans metrikleri aşağıdaki Tablo 4.15 ve Tablo 16'da verilmiştir. İstatistiksel bir değerlendirmede bulunabilmek amacıyla R^2, MAE, RMSE metriklerinin değerleri Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'da listelenmektedir.

Tablo 4.15: Eğilme Dayanımı Modelleri için performans metrikleri.

Model	R^2	**MAE**	**RMSE**
σ_{max}-ABS	0.860	1.247	1.334
σ_{max}-Re-ABS	0.738	2.220	2.628
σ_{max}-St-ABS	0.705	2.224	3.280
σ_{max}-St-Re-ABS	0.844	2.208	2.803

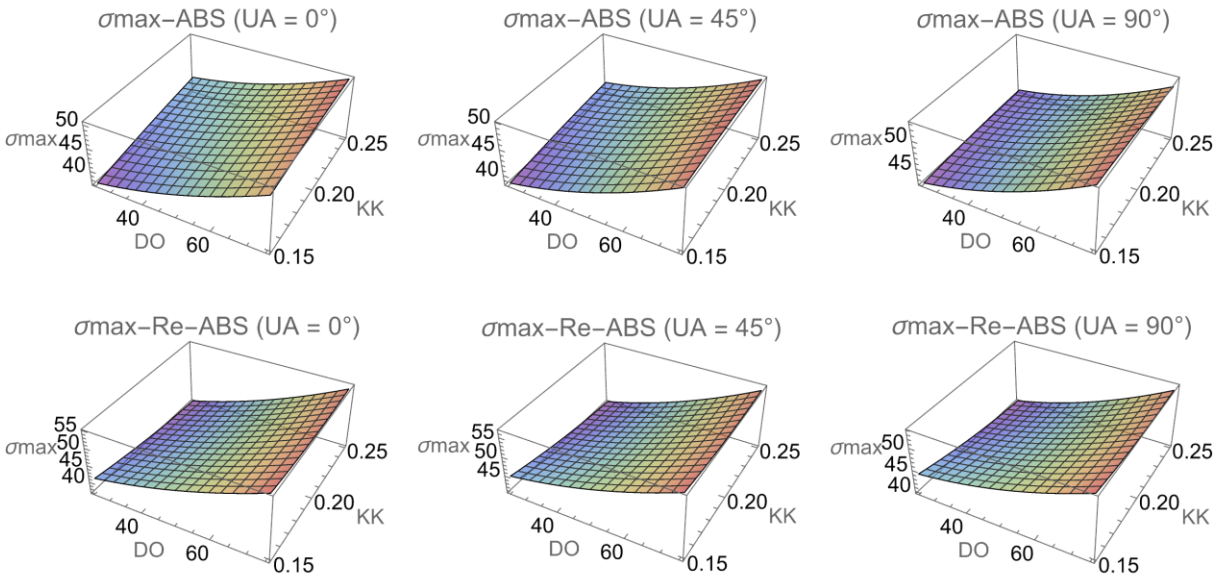
Tablo 15 incelendiğinde en yüksek doğruluk (R^2 = 0.860 ile) ABS modelindedir. En düşük hata değerleri (MAE=1.247 ve RMSE=1.334 ile) yine ABS modelindedir. Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS varyantlarında hem hata büyümüş hem de R^2 değeri düşmüş olduğundan sterilizasyon ve geri dönüşüm etkisinin anlamlı şekilde başarıyı bozmuş olduğu gösterilmektedir.

Tablo 4.16: Yüzey Pürüzlülüğü Modelleri için performans metrikleri.

Model	R^2	**MAE**	**RMSE**
Ra-ABS	0.629	0.772	0.927
Ra-Re-ABS	0.269	1.021	1.271
Ra-St-ABS	0.461	0.496	0.654
Ra-St-Re-ABS	0.068	1.538	1.812

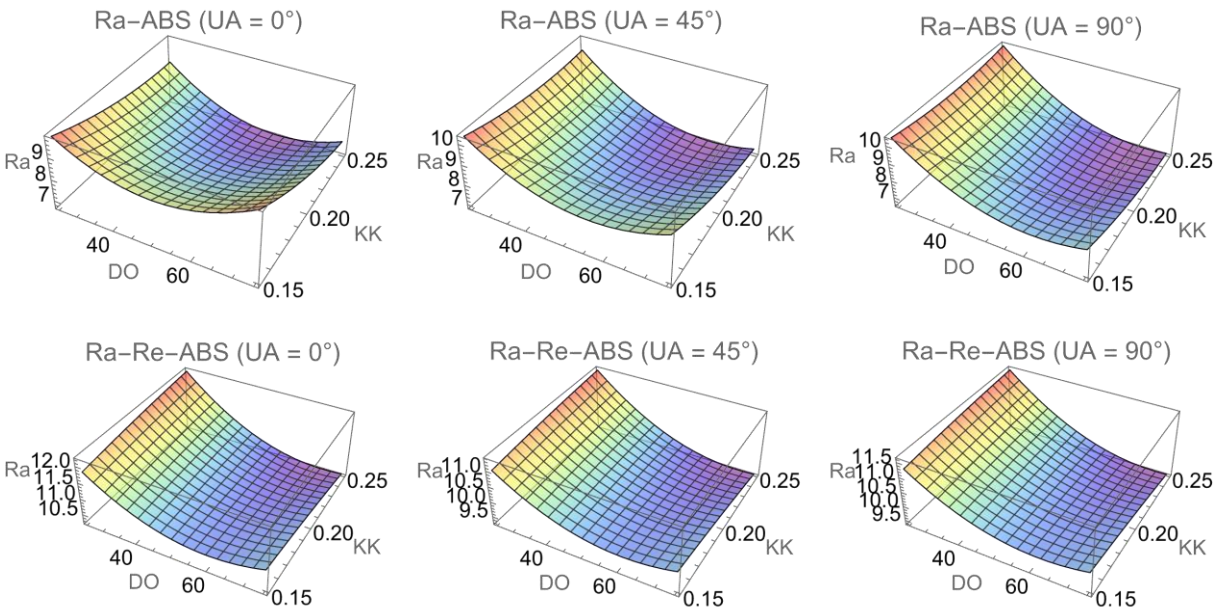
Tablo 4.13 incelendiğinde değerlendirmeler şöyle olmaktadır. R^2 değerlerinin düşüklüğü dikkat çekiyor, özellikle St-Re-ABS için 0.068; bu, modelin açıklayıcılığının çok zayıf olduğunu gösterir. Ayrıca MAE ve RMSE değerleri yüksek, yani model başarısızdır.

Üretim açısının $(UA = 0°, 45°, 90°)$ alındığı durumlar için doluluk oranı ve katman kalınlığı parametrelerinin σ_{max} üzerindeki etkisinin görsel olarak temsili aşağıdaki Şekil 4.58'de verilmektedir.



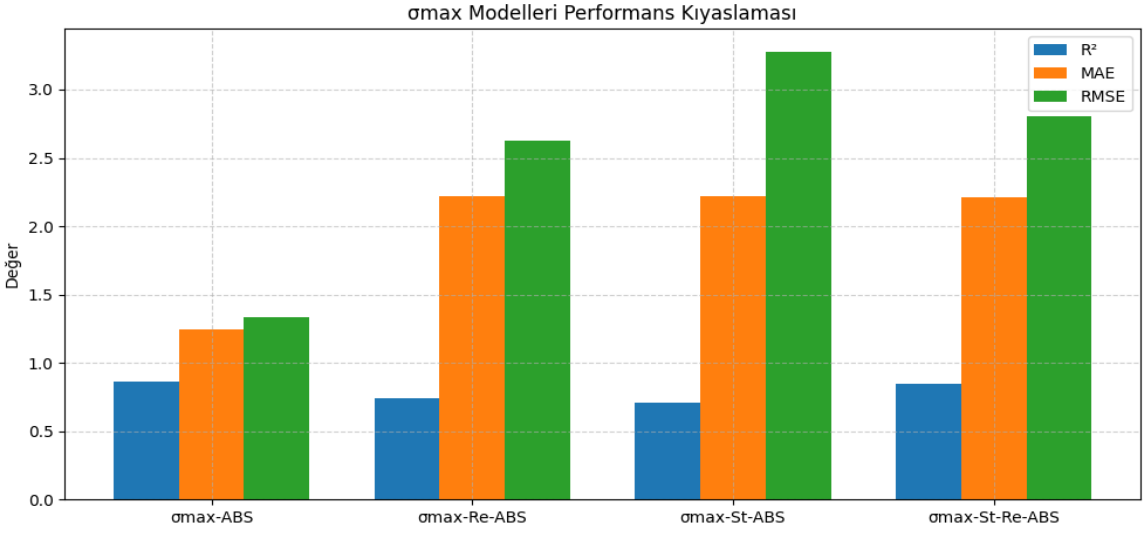
Şekil 4.58: Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabit tutulduğunda, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin eğilme dayanımı (σ_{max}) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili.

Benzer şekilde yine üretim açısının $(UA = 0°, 45°, 90°)$ alındığı durumda doluluk oranı ve katman kalınlığı parametrelerine karşılık yüzey pürüzlülüğü değerlerinin görsel temsili Şekil 4.59'da sunulmaktadır.



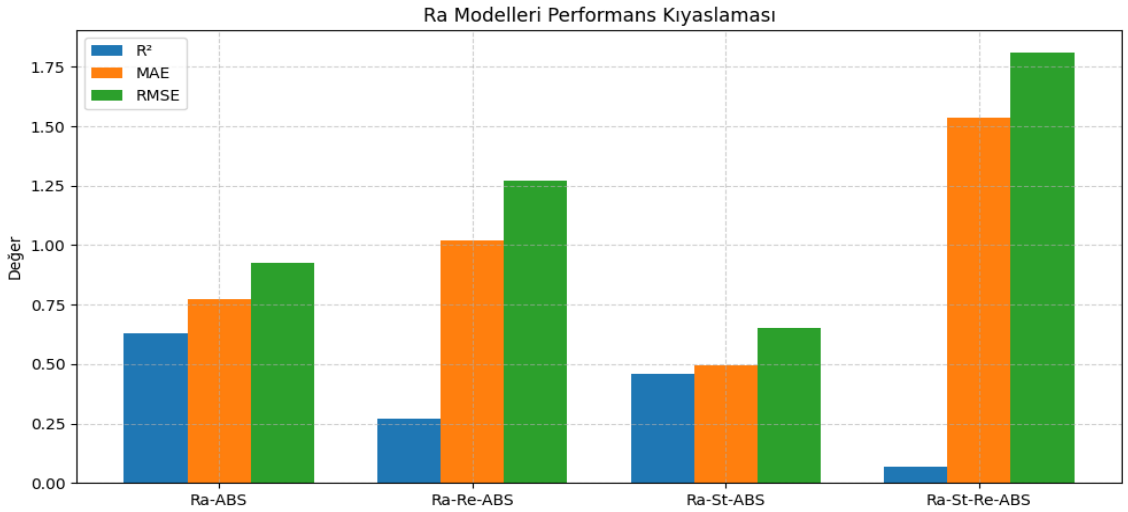
Şekil 4.59: Üretim açısı Üretim açısı (UA = 0°, 45°, 90°) sabitken, doluluk oranı (DO) ve katman kalınlığı (KK) parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkisinin üç boyutlu temsili.

Modellerin ait reel veriler ile uyumlarının kendi aralarında karşılaştırılması amacıyla Pyton / Colab kullanılarak elde edilen grafikler, σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması Şekil 4.60'ta gösterilmektedir. ABS modelinin en yüksek doğruluk ve en düşük hata değerlerine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.60: σ_{max} regresyon modellerinin doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre karşılaştırılması.

Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması Şekil 4.61'de verilmiştir. Açıklayıcılık (R^2) düşerken, hata metrikleri görece düşük kalmaktadır.



Şekil 4.61: Ra modelleri için doğruluk (R^2) ve hata (MAE, RMSE) metriklerine göre performans karşılaştırması. Açıklayıcılık (R^2) düşerken, hata metrikleri görece düşük kalmaktadır.

Yine Pyton / Colab üzerinden modellerin performansları için ekran görüntüsü aşağıdaki Şekil 4.62'de yer almaktadır.

σmax Model Performansları:

Model	R²	MAE	RMSE
σmax-ABS	0.860	1.247	1.334
σmax-Re-ABS	0.738	2.220	2.628
σmax-St-ABS	0.705	2.224	3.280
σmax-St-Re-ABS	0.844	2.208	2.803

Ra Model Performansları:

Model	R²	MAE	RMSE
Ra-ABS	0.629	0.772	0.927
Ra-Re-ABS	0.269	1.021	1.271
Ra-St-ABS	0.461	0.496	0.654
Ra-St-Re-ABS	0.068	1.538	1.812

Şekil 4.62: Oluşturulan regresyon modellerinin Python/Colab ortamında performans çıktıları (R^2, MAE, RMSE). (Grafiklerle desteklenen değerlere doğrudan karşılık gelen hesaplamalar bu tabloda dijital olarak sunulmuştur.)

Şekil 4.60'ta görüldüğü üzere, σ_{max} -ABS modeli $R^2 = 0.860$ değeri ile en yüksek doğruluk seviyesine ulaşmıştır. En düşük hata metrikleri de bu modele aittir (MAE = 1.247, RMSE = 1.334). Diğer varyantlarda, özellikle St-ABS ve St-Re-ABS modellerinde hatalar belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, sterilizasyon ve geri dönüşüm işlemlerinin mekanik özellikler üzerindeki karmaşık etkilerini yansıtmaktadır.

Şekil 4.61'de Ra modellerinin genel olarak daha düşük açıklayıcılığa sahip olduğu gözlemlenmektedir. En yüksek R^2 değeri Ra-ABS modeli için elde edilmiştir ($R^2 = 0.629$). Ancak St-Re-ABS modelinde bu oran 0.068'e kadar düşmüş ve modelin güvenilirliği neredeyse kaybolmuştur. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün sadece üretim parametrelerinden değil, üretim sürecindeki mikro düzeydeki değişimlerden de etkilendiğini göstermektedir.

Elde edilen yukarıdaki sonuçlar göstermektedir ki, eğilme dayanımı modelleri yüksek açıklayıcılığa sahiptir (R2 > 0.70) ve düşük hata değerleriyle güvenilir tahminler sunmaktadır. Özellikle temel ABS varyantı için R2 = 0.860 ile model oldukça başarılıdır. Buna karşılık, yüzey pürüzlülüğü modelleri için daha düşük R2 değerleri gözlemlenmekte ve varyantlar arasında belirgin farklılıklar görülmektedir. En düşük uyum, St-Re-ABS varyantında (R2 = 0.068) gözlenmiştir. Bu fark, mekanik özelliklerin üretim parametrelerine karşı daha deterministik bir yapı sergilemesine karşın, yüzey özelliklerinin mikroyapısal bozukluklar, çevresel koşullar ve üretim süreci içi istikrarsızlıklar gibi dışsal faktörlere daha duyarlı olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle X_2 (katman kalınlığı) hem σ_{max} hem de Ra üzerinde en baskın parametre olmuştur. Diğer yandan, geri dönüşüm ve sterilizasyon işlemleri, varyansı artırarak özellikle yüzey modellerinde hata oranlarının yükselmesine neden olmuştur.

Neticede; ABS numunelerine ait mekanik özellikler klasik regresyon modelleri ile güvenilir şekilde tahmin edilebilmekte; ancak yüzey pürüzlülüğü için daha girift modelleme yaklaşımlarının uygulanması gerekliliğine işaret etmektedir.

ABS materyallerine ait performans metriklerine ait tablolar göz önüne alındığında; ABS, Re-ABS, St-ABS, St-Re-ABS ve tüm bu verileri içeren birleşik modele ait eğilme dayanımı (σ_{max}) regresyon analizleri; istatistiksel performans ölçütleri, mühendislik yorumu ve akademik bağlamda kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Temel ABS modeli, R^2 = 0,908, MAE = 1,244 ve RMSE = 1,451 değerleriyle yüksek doğruluk sunmuş, üretim parametrelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini güçlü şekilde temsil etmiştir. Re-ABS

modelinde R^2 = 0,875 ile açıklayıcılık bir miktar azalsa da, model hâlâ güçlüdür; geri dönüşüm işlemi varyansı artırmış ve hata oranlarında hafif bir artışa neden olmuştur. St-ABS modelinde sterilizasyonun etkisiyle R^2 = 0,795'e düşüş gözlenmiş, MAE ve RMSE değerleri belirgin şekilde artmıştır; bu durum, malzemenin termal işlem sonrası mikroyapısal değişimlerden etkilendiğini göstermektedir. Benzer şekilde, St-Re-ABS modeli de R^2 = 0,853 ile açıklayıcı kalmakla birlikte en yüksek hata değerlerine ulaşmıştır (MAE = 2,307, RMSE = 3,170). Bu sapmalar, hem geri dönüşümün hem de sterilizasyonun birlikte etkisiyle açıklanabilir. Parametre etkileri açısından incelendiğinde, doluluk oranı (X_1) tüm modellerde eğilme dayanımını pozitif yönde etkilemiş; bu durum içyapı doluluğunun malzeme direncine doğrudan katkısını yansıtmaktadır. Katman kalınlığı (X_2), ilk etapta dayanımı artırıcı bir etki gösterse de, X_2^2 teriminin negatifliği, belirli bir kalınlıktan sonra mekanik zayıflamaya neden olduğunu ortaya koymuştur. Üretim açısı (X_3) ise daha sınırlı, çoğunlukla pozitif etkiler göstermiştir. Özellikle $X_1 \cdot X_2$ ve X_2^2 gibi etkileşim terimleri modelin doğrusal olmayan yapısını vurgulamakta ve modelleme başarısını güçlendirmektedir. Birleştirilmiş model ise R^2 = 0,931 ile tüm varyantlar arasında en yüksek açıklayıcılığı sağlamış, hem varyantlar arası farkları hem de genel eğilimleri temsil edebilmiştir. MAE ve RMSE değerleri sırasıyla 1,221 ve 1,507 olarak hesaplanmış ve modelin hem istatistiksel doğruluğunu hem de mühendislik uygulanabilirliğini teyit etmiştir. Bu doğrultuda, ABS esaslı numunelerin çok değişkenli regresyon ile yüksek doğrulukta modellenebildiği, geri dönüşüm ve sterilizasyon gibi işlemlerin varyansı artırsa da bu modellerin güvenilirliğini zedelemediği görülmüştür. Bulgular, literatürde ABS'nin FDM üretim sürecinde yüksek öngörülebilirliğe sahip, dayanımı modellemeye uygun bir malzeme olduğunu belirten çalışmalarla tutarlılık göstermektedir. Torrado & Roberson, ABS malzemede yönlenme etkisinin sınırlı ancak doluluk ve katman kalınlığının belirleyici olduğunu raporlamıştır [84]. Sun vd., ABS'nin üretim parametrelerine karşı yüksek öngörülebilirliğe sahip olduğunu ve doğru modelleme ile dayanım optimizasyonunun mümkün olduğunu göstermiştir [83].

Bu bağlamda, yüzey pürüzlülüğü gibi mikromorfolojik özelliklerin modellenmesinde daha gelişmiş yapay zekâ veya makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanılması gerekebilir. Bulgular, literatürde Ra'nın çok sayıda dışsal etkene (soğuma hızı, çevresel nem, nozul durumu vb.) duyarlı olduğunu bildiren çalışmaları destekler niteliktedir [85].

ABS esaslı numunelere ait mekanik (σ_{max}) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra) modelleme sonuçları kıyaslandığında, mekanik özelliklerin regresyon modelleriyle daha yüksek doğrulukta temsil

edilebildiği gözlemlenmiştir. Tüm varyantlarda eğilme dayanımı için R^2 değerleri 0,795 ila 0.931 arasında değişirken, yüzey pürüzlülüğü modelleri genellikle daha düşük açıklayıcılığa (R^2 = 0,123–0,676) sahiptir. Bu fark, σ_{max}'ın üretim parametrelerine karşı daha tutarlı ve öngörülebilir tepkiler verdiğini, Ra değerlerinin ise mikroyapısal ve çevresel faktörlere daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle St-ABS varyantı her iki model türünde de güçlü sonuçlar verirken, St-Re-ABS varyantı yüzey pürüzlülüğünde en yüksek varyansı sergilemiştir. Bu durum, işlem geçmişinin Ra açısından daha karmaşık sonuçlara yol açtığını ortaya koymaktadır. Genel olarak, mekanik dayanım modelleri mühendislik açısından daha güvenilir tahminler sunarken, yüzey kalitesi için daha gelişmiş modelleme yaklaşımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA malzemelerinde, doluluk oranı eğilme dayanımını en çok etkileyen parametre olmuştur. PLA ve Re-PLA numunelerinde doluluk oranı ve katman kalınlığı arttıkça eğilme dayanımı artarken, üretim açısının etkisi sınırlı ya da olumsuz olmuştur. St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinde ise üretim parametrelerine karşı daha düzensiz bir dayanım davranışı gözlenmiş, özellikle katman kalınlığı ve doluluk oranı bazı durumlarda dayanımı azaltmıştır.
- PLA numunelerinde deformasyon üzerinde en etkili parametreler doluluk oranı ve üretim açısı olmuştur. Doluluk oranı ve üretim açısı, özellikle PLA malzemeleri üzerinde belirgin bir etkiye sahipken, diğer üç malzeme (Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA) numunelerinde daha düzensiz etkiler gözlemlenmiştir. Özellikle sterilizasyon işlemi sonrasında malzemelerin mikroyapısında meydana gelen bozulmalar nedeniyle deformasyon miktarında farklılıklar ortaya çıkmıştır. Re-PLA ve St-Re-PLA numunelerinin üretim açısına ve katman kalınlığına karşı deformasyon davranışlarının daha stabil olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, geri dönüştürülmüş malzemelerin içyapısındaki düzensizlik nedeniyle daha izotropik bir davranış sergilemeleri olarak açıklanmaktadır. Bu bulgular, literatürde belirtilen geri dönüşüm ve sterilizasyon işlemlerinin malzeme yapısında düzensizlik, boşluk ve mikro çatlaklar oluşturduğuna dair sonuçlarla uyum içerisindedir.
- ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS malzemeleri üzerine doluluk oranı parametresi tüm numunelerde en etkili değişken olmuştur. Doluluk oranı arttıkça eğilme dayanımı da artış göstermiştir. Katman kalınlığı ve üretim açısı ise malzeme türüne göre farklılık göstermiştir. Özellikle geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş numunelerde, katman kalınlığı ve üretim açısı artışının eğilme dayanımını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Geri dönüşüm işlemlerinin Re-ABS numunelerinde mekanik performansı önemli ölçüde düşürmediği, hatta orijinal ABS'ye yakın değerler sağladığı görülmüştür.
- ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinde doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı gibi üretim parametreleri, deformasyon davranışını farklı oranlarda

etkilemiştir. Özellikle geri dönüşüm ve sterilizasyon işlemleri, malzemelerin içyapısında düzensizlik ve zayıflamalara yol açarak deformasyon üzerinde kararsız ve beklenmeyen sonuçlara neden olmuştur. Doluluk oranı ve üretim açısının artışı genellikle deformasyonu artırırken, katman kalınlığına bağlı değişimler ise malzeme türüne göre farklılık göstermiştir. Bu durum, üretim parametrelerinin deformasyon davranışı üzerindeki etkilerinin hem malzeme yapısına hem de uygulanan işlem geçmişine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

- PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA malzemelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları, doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı gibi üretim parametrelerinin yüzey kalitesi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu açıkça ortaya koymuştur. Özellikle doluluk oranının artırılmasının, tüm numune türlerinde yüzey pürüzlülüğünü azaltıcı bir etki gösterdiği; bu etkinin St-Re-PLA numunelerinde daha belirgin hâle geldiği ve yüksek doluluk oranlarında %10'a varan bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Katman kalınlığı parametresi ise doğrusal olmayan bir etki göstermiş; orta kalınlıklarda yüzey pürüzlülüğü artarken, daha yüksek değerlerde bu etkinin azaldığı tespit edilmiştir. Üretim açısı ise genel olarak pürüzlülüğü artırıcı bir eğilim göstermiş; özellikle PLA ve St-PLA numunelerinde açı artışıyla birlikte yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin artışlar gözlenmiştir. Re-PLA numunelerinde ise üretim açısına karşı daha karmaşık ve malzeme yapısına özgü bir tepki ortaya çıkmıştır.
- ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS malzemelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) test sonuçları, doluluk oranı, katman kalınlığı ve üretim açısı gibi üretim parametrelerinin yüzey kalitesi üzerinde belirleyici etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Doluluk oranının artırılmasının Ra değerini azalttığı tespit edilmiş, özellikle orijinal ABS ve Re-ABS numunelerinde daha düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Katman kalınlığının artmasıyla birlikte, özellikle sterilize edilmiş numunelerde pürüzlülüğün arttığı; buna karşın bazı orijinal numunelerde bu etkinin sınırlı ve yer yer olumlu olduğu gözlemlenmiştir. Üretim açısı parametresi ise özellikle orijinal ABS ve St-Re-ABS numunelerinde en belirgin etkiye sahip olmuş; 45° açıda yüzey pürüzlülüğü artarken, 90° açıda yüzeyin daha düzgün hâle geldiği tespit edilmiştir. Re-ABS gibi bazı malzemelerde ise bu etkinin oldukça sınırlı kaldığı görülmüştür.
- PLA, Re-PLA, St-PLA ve St-Re-PLA malzemelerinin SEM sonuçları, doluluk oranının artmasıyla birlikte filamentler arası mikroyapısal boşluklar ve hava kabarcıklarının azaldığı, bunun da malzemenin mekanik performansını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. PLA ve Re-PLA numunelerinde gevrek kırılma davranışı ve

düzgün filament yapışması gözlemlenirken, St-PLA ve St-Re-PLA numunelerinde plastik deformasyon izleri ve sünek kırılma karakteri tespit edilmiştir.

- ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS numunelerinin SEM sonuçları, bu numunelerin PLA kıyasla, katmanlar arasında daha fazla hava boşluğu ve gözenekli yapı oluştuğu, bunun da özellikle ABS numunelerinde eğilme dayanımını olumsuz etkilediği belirlenmiştir. ABS grubu numunelerde kırılmanın sünek karakterde olduğu ve yüzey kalitesinin PLA numunelerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş ve sterilize edilmiş numunelerde yüzey düzensizlikleri, gözeneklilik ve mikroçatlakların arttığı, bu yapı bozukluklarının mekanik özellikleri zayıflattığı tespit edilmiştir.
- PLA numuneleri için elde edilen ikinci dereceden regresyon modeli $R^2 = 0,87$, MAE = 1,92 ve RMSE = 2,41 ile yüksek açıklayıcılık sunmuştur. En baskın üretim parametresi katman kalınlığı olmuştur.
- ABS numuneleri için oluşturulan modelde $R^2 = 0,908$, MAE = 1,244 ve RMSE = 1,451 gibi değerlerle en güçlü açıklayıcılık sağlanmıştır. Geri dönüşüm ve sterilizasyon işlemleri varyansı artırmış, ancak model başarısı korunmuştur.
- Bu çalışmada kullanılan ikinci dereceden polinom regresyon modelleri, özellikle eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler açısından yüksek açıklayıcılığa ulaşmış ve üretim parametreleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkilerin güvenilir biçimde analiz edilebileceğini göstermiştir. Buna karşılık, yüzey pürüzlülüğü gibi mikroyapısal değişkenlerde elde edilen düşük açıklayıcılık değerleri ve yüksek hata oranları, klasik regresyon yöntemlerinin bu tür karmaşık çıktılar için yetersiz kalabileceğini düşündürmektedir. Bu durum, yüzey özelliklerinin üretim sürecindeki düzensizlikler ve dışsal etkilerden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Geliştirilen modeller mekanik performans tahmini açısından yeterli doğruluk sağlarken, yüzey kalitesinin modellenmesinde daha gelişmiş yöntemlerin kullanılmasının uygun olacağı anlaşılmaktadır.

5.2 Öneriler

Bu çalışmanın, PLA, Re-PLA, St-PLA, St-Re-PLA, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS malzemelerinin kırılma davranışları üzerine yapılacak çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Ayrıca, üretilen polimer malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak anlayabilmek için daha fazla test ve araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmanın devamı niteliğinde aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması tavsiye edilmektedir:

- Farklı hücre şekilleri, nozzle sıcaklıkları ve baskı hızlarının PLA, Re-PLA, St-PLA, St-Re-PLA, ABS, Re-ABS, St-ABS ve St-Re-ABS malzemeleri üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Çekme, basma, sertlik ve aşınma gibi mekanik özellikler üzerine detaylı çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Bu çalışmada üretilen numunelerin salım, antibakteriyel özellikleri ve biyouyumlulukları araştırılabilir.
- Farklı polimerik malzemeler kullanılarak, sterilizasyon ve geri dönüşüm süreçlerinin mekanik ve biyolojik özellikler üzerindeki etkileri incelenebilir.
- İleri imalat yöntemleri kullanılarak üretim süreçleri gerçekleştirilebilir ve bu kapsamda mekanik ve biyolojik özellikler detaylı şekilde araştırılabilir.
- Farklı matematiksel modelleme yöntemleri kullanılabilir.

EKLER

EK-1

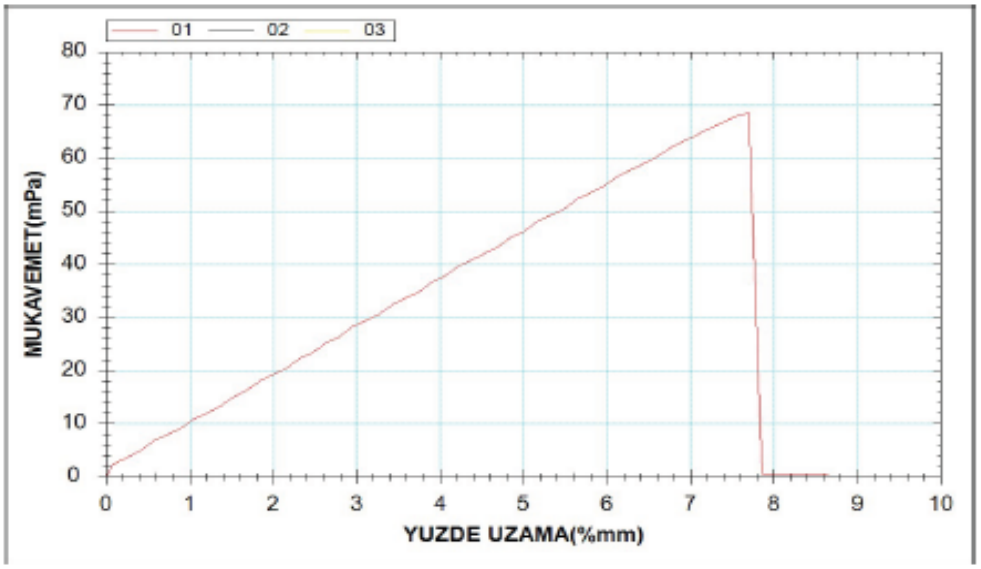
Firma Adı(Customer Name): yunusemre
Mamul No(Part No) : PLa
Referans No(Ref. No) : pla

Tarih(Date) : 3.06.2025
Test Standardı(Standart of Test) :
Şarj No(Heat No) :

No = 1

pmax(kN)	Deformasyon	σmax(N/mm²)	Sehim
0.114	8.651	68.400	8.651

σy	Py	Me	Wb	f	l	E	En
							10



Rp02 - % 0,2 lik Akma Dayanımı – 0,2 % Yield Strength
Rm – Çekme Dayanımı – Tensile Strength
A5 – Kopma Uzaması – Elongation at Fracture

At – Toplam Uzama – Total Elongation
Agt – Eş Uzama - Uniform Elongation
Z – Kesit Daralması – Reduction of Area

TESTİ YAPAN (Controlled by)

ONAYLAYAN (Approved by)

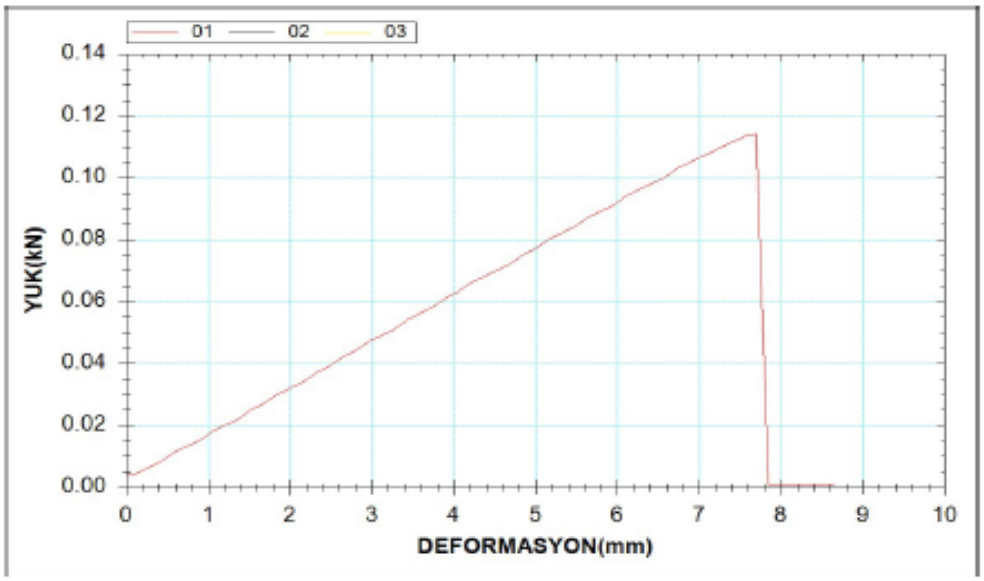
EK-2

Firma Adı(Customer Name): yunusemre	Tarih(Date) : 3.06.2025
Mamul No(Part No) : PLa	Test Standardı(Standart of Test) :
Referans No(Ref. No) : pla	Şarj No(Heat No) :

No = 1

pmax(kN)	Deformasyon	σmax(N/mm²)	Sehim
0.114	8.651	68.400	8.651

σy	Py	Me	Wb	f	l	E	En
							10



Rp02 - % 0,2 lik Akma Dayanımı – 0,2 % Yield Strength
Rm – Çekme Dayanımı – Tensile Strength
A5 – Kopma Uzaması – Elongation at Fracture

At – Toplam Uzama – Total Elongation
Agt – Eş Uzama - Uniform Elongation
Z – Kesit Daralması – Reduction of Area

TESTİ YAPAN (Controlled by)

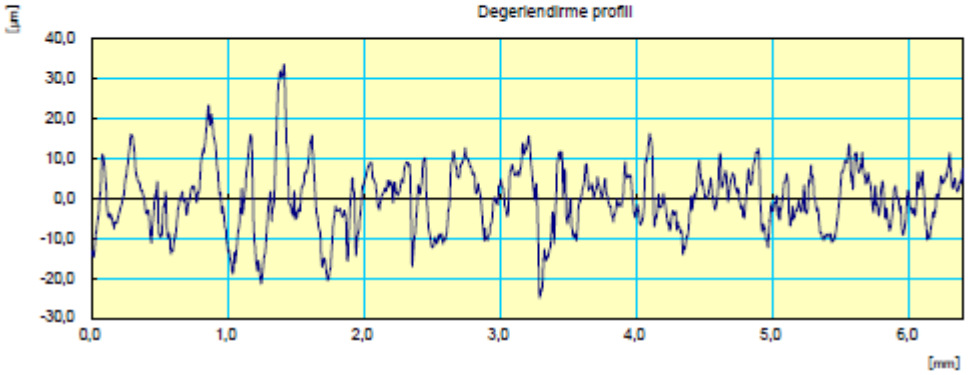
ONAYLAYAN (Approved by)

EK-3

Mitutoyo

10-Mart-2025

KONTROL SERTIFIKASI

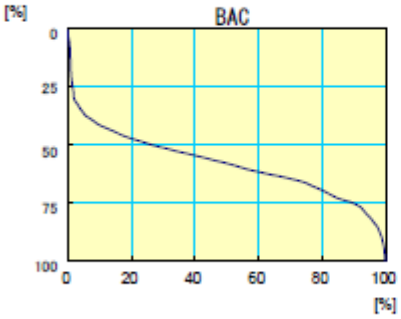


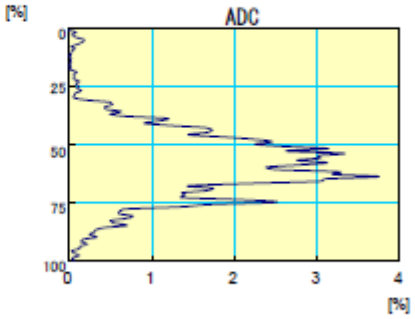
Calisma adi	Ornek	Operator	Mitutoyo
Olcum Cihazi	SurfTest	Aciklama	Ver2.00

Standart	ISO 1997	N	8
Profil	R	Adım	0.8mm
λs	2.5µm	Filtre	GAUSS

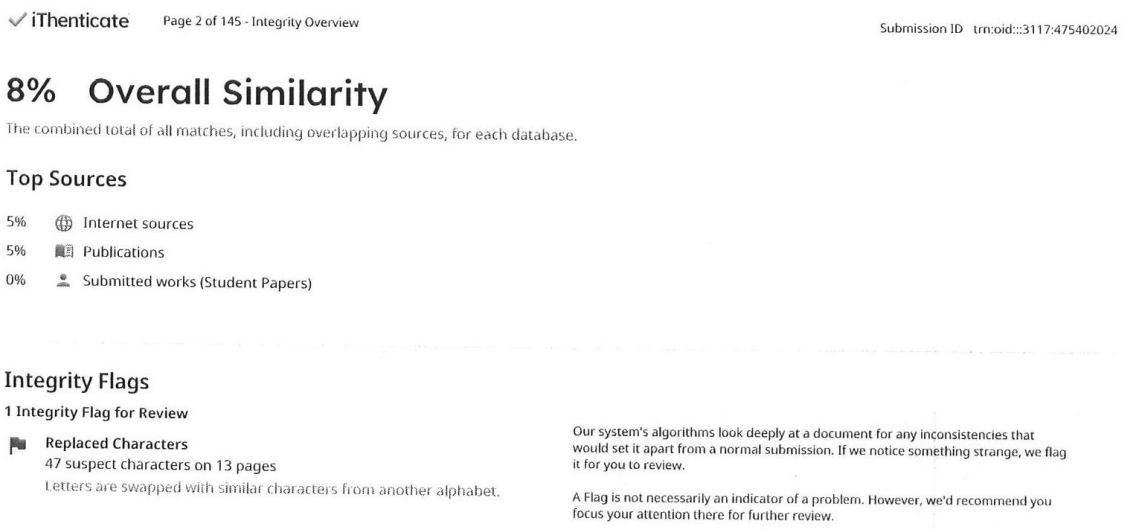
Ra	6.336 µm

Copyright (C) 2013 Mitutoyo Corporation





EK-4


iThenticate
Page 2 of 145 - Integrity Overview
Submission ID trn:oid:::3117:475402024
8% Overall Similarity
The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.
Top Sources
5% Internet sources
5% Publications
0% Submitted works (Student Papers)
Integrity Flags
1 Integrity Flag for Review
Replaced Characters
47 suspect characters on 13 pages
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.
Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.
A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

KAYNAKLAR

[1] A.M.E. Arefin, N.R. Khatri, N. Kulkarni, P.F. Egan, Polymer 3D Printing Review: Materials, Process, and Design Strategies for Medical Applications, Polymers 13 (2021) 1499. https://doi.org/10.3390/polym13091499.

[2] K.G. Jaya Christiyan, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu, Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer, J. Inst. Eng. India Ser. C 99 (2018) 363–367. https://doi.org/10.1007/s40032-016-0344-8.

[3] A. Kaptan, F. Kartal, The Effect of Fill Rate on Mechanical Properties of PLA Printed Samples, Iğdır Üniv. Fen Bil Enst. Der. 10 (2020) 1919–1927. https://doi.org/10.21597/jist.706003.

[4] K. Özsoy, A. Erçetin, Z.A. Çevik, Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing, EJOSAT (2021) 802–809. https://doi.org/10.31590/ejosat.983317.

[5] A. Sengupta, S. Pattnaik, M.K. Sutar, Physio-mechanical and thermal characteristics of Mimosa pudica microfibers impregnated novel PLA biocomposite, Iran Polym J 34 (2025) 499–515. https://doi.org/10.1007/s13726-024-01387-6.

[6] Plastics Europe, Plastics – the Facts 2022: An analysis of European plastics production, demand and waste data, (2022).

[7] R.T.L. Ferreira, I.C. Amatte, T.A. Dutra, D. Bürger, Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers, Composites Part B: Engineering 124 (2017) 88–100. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013.

[8] G. Atakok, M. Kam, H.B. Koc, Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation, Journal of Materials Research and Technology 18 (2022) 1542–1554. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.013.

[9] V. Chandran, J. Kalman, K. Fayazbakhsh, H. Bougherara, A comparative study of the tensile properties of compression molded and 3D printed PLA specimens in dry and water saturated conditions, J Mech Sci Technol 35 (2021) 1977–1985. https://doi.org/10.1007/s12206-021-0415-5.

[10] S. Brischetto, R. Torre, Tensile and Compressive Behavior in the Experimental Tests for PLA Specimens Produced via Fused Deposition Modelling Technique, Journal of Composites Science 4 (2020) 140. https://doi.org/10.3390/jcs4030140.

[11] M. Bembenek, Ł. 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. https://doi.org/10.3390/polym14122446.

[12] F. Ramli, M.R. Alkahari, M.N. Sudin, S. Mat, Influence of layer thickness and infill design on the surface roughness of PLA, PETG and metal copper materials, in: 2020.

[13] T.J.A.G. Münker, S.E.C.M. Van De Vijfeijken, C.S. Mulder, V. Vespasiano, A.G. Becking, C.J. Kleverlaan, A.G. Becking, L. Dubois, L.H.E. Karssemakers, D.M.J. Milstein, S.E.C.M. Van De Vijfeijken, P.R.A.M. Depauw, F.W.A. Hoefnagels, W.P. Vandertop, C.J. Kleverlaan, T.J.A.G. Münker, T.J.J. Maal, E. Nout, M. Riool, S.A.J. Zaat, Effects of sterilization on the mechanical properties of poly(methyl methacrylate) based personalized medical devices, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 81 (2018) 168–172. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.033.

[14] M.M. Hanon, J. Dobos, L. Zsidai, The influence of 3D printing process parameters on the mechanical performance of PLA polymer and its correlation with hardness, Procedia Manufacturing 54 (2021) 244–249. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.038.

[15] Eryıldız, Meltem, Effect of Build Orientation on Mechanical Behaviour and Build Time

of FDM 3D-Printed PLA Parts: An Experimental Investigation, (n.d.). https://dergipark.org.tr/en/pub/ems/issue/62799/881254 (accessed April 28, 2025).
[16] S. Fafenrot, N. Grimmelsmann, M. Wortmann, A. Ehrmann, Three-Dimensional (3D) Printing of Polymer-Metal Hybrid Materials by Fused Deposition Modeling, Materials 10 (2017). https://doi.org/10.3390/ma10101199.
[17] E. Brancewicz-Steinmetz, J. Sawicki, Bonding and Strengthening the PLA Biopolymer in Multi-Material Additive Manufacturing, Materials 15 (2022) 5563. https://doi.org/10.3390/ma15165563.
[18] C. Maraveas, I.V. Kyrtopoulos, K.G. Arvanitis, Evaluation of the Viability of 3D Printing in Recycling Polymers, Polymers 16 (2024) 1104. https://doi.org/10.3390/polym16081104.
[19] H. Dou, Y. Cheng, W. Ye, D. Zhang, J. Li, Z. Miao, S. Rudykh, Effect of Process Parameters on Tensile Mechanical Properties of 3D Printing Continuous Carbon Fiber-Reinforced PLA Composites, Materials 13 (2020) 3850. https://doi.org/10.3390/ma13173850.
[20] A. Nassar, M. Younis, M. Elzareef, E. Nassar, Effects of Heat-Treatment on Tensile Behavior and Dimension Stability of 3D Printed Carbon Fiber Reinforced Composites, Polymers 13 (2021) 4305. https://doi.org/10.3390/polym13244305.
[21] A.P. Agrawal, V. Kumar, J. Kumar, P. Paramasivam, S. Dhanasekaran, L. Prasad, An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication, Heliyon 9 (2023) e16531. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16531.
[22] J. Bochnia, M. Blasiak, T. Kozior, A Comparative Study of the Mechanical Properties of FDM 3D Prints Made of PLA and Carbon Fiber-Reinforced PLA for Thin-Walled Applications, Materials 14 (2021) 7062. https://doi.org/10.3390/ma14227062.
[23] M. Günay, S. Gündüz, H. Yilmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu, Politeknik Dergisi 23 (2020) 73–79. https://doi.org/10.2339/politeknik.422795.
[24] 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.
[25] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, A. Fernando, Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures, International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 3 (2020) 284–297. https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.
[26] M.S. Kamer, Ş. TemiZ, Dr.H. Yaykaşli, A. Kaya, O. Akay, 3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 37 (2022) 1197–1212. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.961981.
[27] O. Gülcan, Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri, MATİM 19 (2021) 17–34.
[28] Muzaffer ZEREN, Neşe Çakıcı ALP, Şüheda ÖZEL, Eklemeli İmalatta Eriyik Yığma Modelleme (FDM) Yöntemi İle Otomotiv Parçalarının Prototipleme Çalışması, (n.d.). https://kalipdunyasi.com.tr/tr/guncel/84/eklemeli-imalatta-eriyik-yigma-modelleme-fdm-yontemi-ile-otomotiv-parcalarinin-prototipleme-calismasi.html (accessed November 4, 2024).
[29] A. Dey, N. Yodo, A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics, Journal of Manufacturing and Materials Processing 3 (2019) 64. https://doi.org/10.3390/jmmp3030064.
[30] N. Alharbi, R. Osman, D. Wismeijer, Effects of build direction on the mechanical

properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations, J Prosthet Dent 115 (2016) 760–767. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.12.002.
[31] 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.
[32] B. Li, J. Yang, H. Gu, J. Jiang, J. Zhang, J. Sun, Surface roughness of PLA parts by FDM with chemical treatment, J. Phys.: Conf. Ser. 1948 (2021) 012199. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1948/1/012199.
[33] M.M. Hanon, Y. Alshammas, L. Zsidai, Effect of print orientation and bronze existence on tribological and mechanical properties of 3D-printed bronze/PLA composite, Int J Adv Manuf Technol 108 (2020) 553–570. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05391-x.
[34] A. Milovanović, A. Sedmak, A. Grbović, Z. Golubović, G. Mladenović, K. Čolić, M. Milošević, Comparative analysis of printing parameters effect on mechanical properties of natural PLA and advanced PLA-X material, Procedia Structural Integrity 28 (2020) 1963–1968. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.019.
[35] B.D. Ratner, Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine, Academic Press, 2013.
[36] Ş. Güven, Biyouyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 2 (2014) 303–311.
[37] Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys | Request PDF, in: ResearchGate, n.d. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4_7.
[38] Z.D. Çırak, D.B. Yakıncı, Tibbi uygulamalarda kullanılan biyouyumlu biyomalzemeler, İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi 8 (2020) 515–526.
[39] S. Aydın, Biyopolimerler ve kullanım alanları, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
[40] H. Evlen, M.A. ÖzdemiR, A. Çalişkan, Effects of Filling Percentage on Mechanical Properties of PLA and PET Materials, Journal of Polytechnic 22 (2019) 1031–1037. https://doi.org/10.2339/politeknik.426413.
[41] A.B.H. Yoruç, V. Uğraşkan, Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 17 (2017) 318–337.
[42] J.E. Heer, D.J. Hagerty, Handbook of solid waste disposal: materials and energy recovery, Van Nostrand Reinhold, 1975.
[43] A. Güney, E.A. Yüce, O.M. Kangal, Plastik atıkların geri kazanımına yönelik uygun flotasyon proseslerinin geliştirilmesi, İTÜ Maden Fakültesi, Cevher HazırlamaMüh. Bölümü, TÜBİTAK MAG, 1001Araştırma Projesi, Proje No:108M042, Aralık (2010).
[44] H.B. Koç, Üç boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere geri dönüştürülmüş PLA filamentle basılan parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, (2022). https://katalog.marmara.edu.tr/veriler/cokluortam/cokluortam/D/A/B/B/A/61e587db80e45.pdf (accessed November 4, 2024).
[45] C. Junior, Osswald, Menges Material Science of Polymers for Engineers, (n.d.). https://www.academia.edu/44094840/Osswald_Menges_Material_Science_of_Polymers_for_Engineers (accessed April 29, 2025).
[46] C. Abeykoon, others, Mechanical properties of recycled ABS blends, Composites Part B (2019). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836819331944.
[47] Y. Zhou, others, Thermal properties of recycled ABS under extrusion, Industrial Crops and Products (2019). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669019322235.
[48] W. Zhao, S. Van der Zwaag, W.A. Groen, Recycling of PLA/ABS waste for sustainable 3D printing, Journal of Cleaner Production 198 (2018) 1191–1200.
[49] F. and E. Tümer H.Y., Geri dönüştürülmüş PET şişelerden filament üretimi ve

karakterizasyonu, Polimer Teknolojileri Dergisi 34 (2021) 101–108.
[50] M. and A. Kazanç D. and Güler, O., Uçucu kül katkılı Re-ABS filamentlerin geliştirilmesi ve test edilmesi, Malzeme Bilimi Araştırmaları 8 (2022) 211–220.
[51] B.S. Elmas, Üç boyutlu (3D) yazıcıda üretilen polilaktik asit (pla) numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, MSc. Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, 2021. http://dspace.kocaeli.edu.tr:8080/xmlui/handle/11493/18016 (accessed February 8, 2024).
[52] I. Gibson, Additive Manufacturing Technologies, Springer, 2015.
[53] T.D. Ngo, Additive manufacturing: A review, Composites Part B: Engineering 143 (2018) 172–196.
[54] W.D. Callister, D.G. Rethwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th ed., Wiley, 2020.
[55] A.B. Strong, Plastics: Materials and Processing, Pearson Prentice Hall, 2006.
[56] D.V. Rosato, D.V. Rosato, Plastics Engineered Product Design, Elsevier, 2004.
[57] A.R. Torrado Perez, Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials, Journal of Failure Analysis and Prevention 14 (2014) 343–353.
[58] L.; S. Wang R.M.;. Cooper, P.R.;. Lawson, M.;. Triffitt, J.T.;. Barralet, J.E., Evaluation of PLA scaffolds with polydopamine coating and loaded with BMP-2 for bone tissue engineering, Biomaterials 86 (2016) 36–45.
[59] S. Kumar, S. Tiwari, S. Ramakrishna, Polymeric materials for additive manufacturing: State-of-the-art, prospects and future directions, Composites Part B: Engineering 223 (2021) 109115.
[60] Ü. Tayfun, V.M. Yilmaz, Ç. Arslan, EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİNDE FİLAMENT OLARAK KULLANILAN POLİMERİK MALZEMELER, (n.d.).
[61] İ. Coşkun, S. Öztürk, Farklı dolgu oranlarının 3B baskı PLA numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi, Politeknik Dergisi 24 (2021) 1305–1312. https://doi.org/10.2339/politeknik.885847.
[62] M.G. Aydın, Farklı sterilizasyon yöntemlerinin PLA filamentlerin mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2019. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=hzCJxDpY3XYx3vPbU6oJrw&no=QogzlmUIQ8A2OUnrcXJK3Q.
[63] A. Tetik, M. Duman, Geri dönüştürülmüş ABS polimerlerinin mekanik ve morfolojik özelliklerinin incelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 10 (2022) 823–835. https://doi.org/10.21923/mbtd.1061369.
[64] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, M. Martorelli, The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer, Rapid Prototyping Journal 21 (2015) 604–617.
[65] R. Scaffaro, A. Maio, E.F. Gulino, M. Morreale, Recycling of PLA for 3D printing: The effect of thermal-mechanical degradation on printed part performance, Polymer Degradation and Stability 165 (2019) 110–116.
[66] A. Gleadall, J. Pan, M. Kruft, Effects of sterilization on 3D printed polymer medical devices, Additive Manufacturing 26 (2019) 138–145.
[67] Y. Tao, Y. Wang, Y. Deng, Z. Wang, Effect of sterilization on mechanical and thermal properties of 3D printed polymers, Additive Manufacturing 34 (2020) 101192.
[68] D.C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, 2017.
[69] V. Mazzanti, L. Malagutti, F. Mollica, Fused deposition modelling (FDM) process parameters optimization to maximize the mechanical properties of printed parts using a design of experiment approach, Materials 12 (2019) 1861.
[70] M. Spoerk, C. Holzer, J. Gonzalez-Gutierrez, Anisotropic mechanical properties of fused filament fabricated parts described by classical laminate theory, Composites Part A:

Applied Science and Manufacturing 105 (2017) 35–45.
[71] O.A.; M. Mohamed S.H.;. Bhowmik, J.L., Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review, Advances in Manufacturing 3 (2015) 42–53.
[72] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, P.K. Wright, Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, Rapid Prototyping Journal 8 (2002) 248–257. https://doi.org/10.1108/13552540210441166.
[73] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, Materials & Design 124 (2017) 143–157. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065.
[74] M.C. Berg, B.A. Stump, Effect of sterilization on the properties of polylactide materials, Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 88B (2009) 129–137.
[75] J. Pallari, K. Dalgarno, J. Woodburn, Mass customization of foot orthoses for rheumatoid arthritis using selective laser sintering, IEEE Transactions on Biomedical Engineering 57 (2010) 1750–1756.
[76] S. Çelik, Y. Gür, The effect of printing parameters on mechanical properties of ABS and carbon fibre reinforced ABS composites fabricated with 3D printer, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 23 (2020) 200. https://doi.org/10.25092/BAUNFBED.847864.
[77] A. Martín-López, M.C. Domínguez-Cárceles, S. Torres-Giner, Comparative analysis of sterilization techniques for additive manufactured PLA-based scaffolds, Polymers 13 (2021) 2561.
[78] E. Diederichs, M. Picard, B.P. Chang, M. Misra, A. Mohanty, Extrusion Based 3D Printing of Sustainable Biocomposites from Biocarbon and Poly(trimethylene terephthalate), Molecules 26 (2021) 4164. https://doi.org/10.3390/molecules26144164.
[79] K. Benabderazag, Z. Belouadah, M. Guebailia, L. Toubal, Characterization of thermomechanical properties and damage mechanisms using acoustic emission of Lygeum spartum PLA 3D-printed biocomposite with fused deposition modelling, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 186 (2024) 108426. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108426.
[80] H. Liu, H. He, X. Peng, B. Huang, J. Li, Three-dimensional printing of poly(lactic acid) bio-based composites with sugarcane bagasse fiber: Effect of printing orientation on tensile performance, Polymers for Advanced Technologies 30 (2019) 910–922. https://doi.org/10.1002/pat.4524.
[81] K. Özsoy, A. Erçetin, Z.A. Çevik, Comparison of Mechanical Properties of PLA and ABS Based Structures Produced by Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing, EJOSAT (2021) 802–809. https://doi.org/10.31590/ejosat.983317.
[82] Y. Kuruoğlu, M. Akgün, H. DemiR, FDM YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ABS, PLA VE PETG NUMUNELERİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ VE ÇEKME DAYANIMININ MODELLENMESİ VE OPTİMİZASYONU, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 6 (2022) 358–369. https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1148923.
[83] Y. Sun, J. Zhang, M. Cao, Data-driven prediction of mechanical properties in FDM: A machine learning approach, Materials Today Communications 26 (2021) 102112. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102112.
[84] A.R. Torrado, C.M. Shemelya, J.D. English, Y. Lin, R.B. Wicker, D.A. Roberson, Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, Additive Manufacturing 6 (2015) 16–29.

[85] M. Ghazlan, S.M. Sapuan, E.S. Zainudin, M.A. Maleque, Review on the surface quality of PLA-based parts in additive manufacturing, Journal of Materials Research and Technology (2023).
[86] J. Zuniga, D. Katsavelis, J. Peck, J. Stollberg, M. Petrykowski, Effects of Steam, Dry Heat, and Chemical Sterilization on 3D Printed ABS and PLA Parts for Medical Applications, Journal of Medical Devices 12 (2018) 031003.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yunus KARAYER

Lisans Üniversite : Erciyes Üniversitesi