



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN
BASKI PARAMETRELERİNİN ÜÇ-NOKTA-EĞİLME
DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Selim ÖZDOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak - 2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır.

TEZ KABUL VE ONAYI

Selim Özdoğan tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilen Parçaların Baskı Parametrelerinin Üç Nokta Eğilme Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması/...../..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Ahmet CAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet MERAM

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Emre Burak ERTUŞ

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Selim ÖZDOĞAN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİYLE ÜRETİLEN PARÇALARIN BASKI PARAMETRELERİNİN ÜÇ-NOKTA-EĞİLME DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Selim ÖZDOĞAN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet MERAM

2020, 63 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet MERAM

Doç. Dr. Ahmet CAN

Dr. Öğr. Üyesi Emre Burak ERTUŞ

Bu çalışmada, eklemeli imalat parametrelerinden doluluk oranı, katman kalınlığı, nozul sıcaklığı ve tarama açısının PLA malzeme üzerindeki akma mukavemeti, maksimum eğilme gerilmesi, rezilyans, tokluk, elastiklik modülü gibi mekanik özelliklere ve baskı süresine etkileri incelenmiştir. Doluluk oranı 20%, 40, 60, 80, katman kalınlığı 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 mm, nozul sıcaklığı 210, 220, 230 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ ve $0/90^\circ$ parametreleriyle toplamda 10 farklı numune grubu üretilmiştir. ASTM D790 standartlarına uygun üç noktada eğilme testleri Shimadzu marka eğilme testi cihazında yapılmıştır. Elde edilen kuvvet - deplasman verilerinden ve grafiklerden yararlanarak; akma gerilmesi, maksimum eğilme gerilmesi, elastisite modülü, rezilyans, tokluk ve birim uzama değerleri hesaplanmıştır.

Maksimum eğilme gerilmesi ve elastiklik modülü için minimum değer katman kalınlığı 0,20 mm, doluluk oranı %20, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ için 39,6 MPa ve 1,4 GPa elde edilirken; maksimum değer katman kalınlığı 0,2 mm, doluluk oranı %80, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ değerlerinde 50,66 MPa ve katman kalınlığı 0,2 mm, doluluk oranı %40, tarama açısı $\pm 45^\circ$ ve nozul sıcaklığı 210 °C için 1,71 GPa değeri elde edilmiştir. Uç değerler arasındaki fark; maksimum eğilme gerilmesinde %28, elastiklik modülünde %22,1'dir. Tokluk için minimum değer katman kalınlığı 0,20 mm, doluluk oranı %40, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $0/90^\circ$ için 1,14 J elde edilirken; maksimum değer katman kalınlığı 0,3 mm, doluluk oranı %40, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ değerlerinde 4,79 J değeri elde edilmiştir. Uç değerler arasındaki fark %320'dir. Akma gerilmesi için minimum değer katman kalınlığı 0,30 mm, doluluk oranı %40, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ için 28,6 MPa elde edilirken; maksimum değer katman kalınlığı 0,2 mm, doluluk oranı %80, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ değerlerinde 41,6 MPa değeri elde edilmiştir. Uç değerler arasındaki fark; %45,4'tür. Rezilyans için minimum değer katman kalınlığı 0,20 mm, doluluk oranı %40, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $0/90^\circ$ için 0,23 J elde edilirken; maksimum değer katman kalınlığı 0,2 mm, doluluk oranı %80, nozul sıcaklığı 210 °C ve tarama açısı $\pm 45^\circ$ değerlerinde 0,52 J değeri elde edilmiştir. Uç değerler arasındaki fark %126'dır. Baskı süreleri ise katman kalınlığı ve sıcaklıkla doğru, tarama açısı ve doluluk oranı ile ters orantılıdır.

Anahtar Kelimeler: eklemeli imalat, filament, mekanik özellikler, PLA malzeme, üç noktada eğme testi, yazdırma parametreleri

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF THE PRINTING PARAMETERS ON THE THREE POINT BENDING BEHAVIOR OF THE PRODUCTS MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Selim ÖZDOĞAN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet MERAM

2020, 63 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Ahmet MERAM

Assoc. Prof. Dr. Ahmet CAN

Asst. Prof. Dr. Emre Burak ERTUŞ

In this study, the effects of filling ratio, layer thickness, nozzle temperature and raster angle on mechanical properties such as yield strength, tensile strength, resilience, toughness, modulus of elasticity and printing time on PLA material were investigated. A total of 10 different sample groups were produced with %20, 40, 60, 80 filling ratio, 0,15, 0,20, 0,25 and 0,30 mm layer thickness, 210, 220, 230 °C nozzle temperature and $\pm 45^\circ$ and $0/90^\circ$ raster angle parameters. Three-point bending tests in accordance with ASTM D790 standards were performed on the Shimadzu bending machine. Using the obtained force - displacement data and graphics; yield stress, maximum bending stress, modulus of elasticity, resilience, toughness and strain values were calculated.

Minimum value of maximum bending stress and modulus of elasticity has been obtained for; layer thickness is 0,20 mm, filling ratio is %20, nozzle temperature is 210 °C and 39,6 MPa and 1,4 GPa are obtained for raster angle $\pm 45^\circ$. Maximum value of maximum bending stress has been obtained for; layer thickness is 0,2 mm, the filling ratio is %80, the nozzle temperature is 210 °C and the raster angle $\pm 45^\circ$ values are 50,66 MPa. Maximum value of modulus of elasticity has been obtained for; layer thickness is 0,2 mm, the filling ratio is %40, the nozzle temperature is 210 °C and the raster angle $\pm 45^\circ$ values are 1,71 GPa. The difference between extreme values, %28 in maximum bending stress and %22,1 in elastic modulus. Minimum value for toughness(1,14 J) for 0,20 mm, the filling ratio is %40, the nozzle temperature is 210 °C and the raster angle is for $0/90^\circ$; maximum value (4,79 J) for toughness, for layer thickness 0,30 mm, filling ratio %40, nozzle temperature 210 °C and raster angle $\pm 45^\circ$ were obtained. The difference between extreme values equal to %320. Minimum value for yield strength (28,6 MPa) for; 0,30 mm, the filling ratio is 40%, the nozzle temperature is 210° C and the raster angle is for $\pm 45^\circ$. Maximum value (41,6 MPa) for yield strength; for layer thickness 0,2 mm, filling ratio %80, nozzle temperature 210° C and raster angle $\pm 45^\circ$ were obtained. The difference between extreme values equal to %45,4. Minimum value for resilience (0,23 J) for; 0,20 mm, the filling ratio is %40, the nozzle temperature is 210° C and the raster angle is for $0/90^\circ$; Maximum value (0,52 J) for resilience; for layer thickness 0,2 mm, filling ratio %80, nozzle temperature 210 °C and raster angle $\pm 45^\circ$ were obtained. The difference between extreme values equal to %126. Printing times are accurate with layer thickness and temperature, and inversely proportional to raster angle and filling ratio.

Keywords: additive manufacturing, filament, mechanical properties, PLA material, printing parameters, three point bending test

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Meram'a teşekkürü bir borç bilirim.

Numunelerin testleri boyunca ve sonrasında tecrübelerini paylaşarak yardımcı olan Doç. Dr. Necati Ataberk'e gösterdiği destek için teşekkürlerimi sunarım.

İhtiyacım olduğunda bilgi birikimlerinden yararlandığım, kıymetli tavsiye ve yardımlarını esirgemeyen Ege Gökçe Savaş, Mustafa Tahir Doğançay ve Veli Ahmet Akteke'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca hayatımın her döneminde bana destek olduğundan emin olduğum, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Selim ÖZDOĞAN
KONYA / 2021

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Tanımı ve Kısa Tarihi.....	3
2.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin İmalata Kazandırabilecekleri ve Sınırları	3
2.3 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin İşlem Adımları	5
2.3.1 CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım).....	5
2.3.2 STL Formatına Dönüştürme ve Dosya İşleme	5
2.3.3 Baskı	6
2.3.4 Baskı Sonrası İşlemler.....	6
2.4 Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Geleneksel Üretim Yöntemlerinin Kıyaslanması	7
2.4.1 Hız.....	7
2.4.2 Tek Kademeli İmalat.....	7
2.4.3 Karmaşıklık ve Tasarım Özgürlüğü	8
2.4.4 Özel Üretim	8
2.5 Eklemeli İmalat Yöntemleri Sınıflandırılması.....	8
2.5.1 Stereolitografi (SLA)	9
2.5.2 Eriyik Yığılma ile Modelleme (FDM)	11
2.5.3 Yapıştırıcı ile Eklemeli İmalat Yöntemi (Binder Jetting)	12
2.5.4 Malzeme Püskürtme Yöntemi	12
2.5.5 Alaşımlar için Eklemeli İmalat	13
2.5.5.1 Elektron ışını eritme metodu (EBM).....	13
2.5.5.2 Seçici Lazer Sinterleme ve Eritme Metodu (SLS/SLM)	13
2.5.5.3 Direkt Metal Lazer Sinterleme	14
2.5.5.4 Lamine Nesne Üretimi (LOM)	14
2.6 Başka Çalışmalarda Yapılan Testlerin İncelenmesi.....	15
2.6.1 Malzeme Yapısına Göre Yapılan Testler	15
2.6.2 Doluluk Oranı Testleri	18
2.6.3 Katman Kalınlığı Testleri.....	19
2.6.4 Nozul Sıcaklığı Testleri.....	20
2.6.5 Tarama Açısı Testleri.....	20
2.6.6 Diğer Parametrelere ve Özelliklere Bağlı Testler	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM	22
3.1 Numunelerin Üretim Prosesi	22
3.1.1 Tiplerine Göre Deney Numuneleri	23
3.1.2 Baskı Parametreleri ve Simplfy 3D Yazılımında Baskı Parametresi Ayarları	24
3.2 Numunelerin Üç Noktada Eğilme Testi	26

3.3 Numunelerin Mekanik Karakterizasyonu	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	30
4.1 Katman Kalınlığına Göre Sonuçların Değerlendirilmesi	41
4.2 Doluluk Oranına Göre Sonuçların Değerlendirilmesi.....	44
4.3 Tarama Açısı Parametresine Göre Sonuçların Değerlendirilmesi	48
4.4 Nozul Sıcaklığı Parametresine Göre Sonuçların Değerlendirilmesi	52
5. SONUÇLAR, ÖNERİLER VE TARTIŞMA	58
6. KAYNAKLAR.....	60
EKLER	64
EK-1	64
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

μm	: Mikrometre
b	: En
e	: Birim şekil değişimi
E	: Elastisite modülü
GPa	: Gigapascal
H	: Kalınlık
J	: Joule
L	: Mesnetler arası mesafe
Mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
N	: Kuvvet
P_{max}	: Numuneye uygulanan maksimum kuvvet
U_R	: Rezilyans modülü
U_T	: Tokluk modülü
Δ	: Sehim
ϵ	: Şekil değiştirme
σ	: Gerilme

Kısaltmalar

ABS: Akrilonitril Bütadien Stiren
CNC: Computer numerical control
DMLS: Direct Metal Laser Sintering
EBM: Electron Beam Melting
FDM: Fused Deposition Modelling
HDPE: Hight Density Polyethylene
LOM: Laminated object manufacturing
NC: Numerical Control
PBF: Powder Bed Fusion
PET: Polietilen Tereftalat
PLA: Polilaktik asit
PP: Polipropilen
SHS: Selective Heat Sintering
SLM: Selective Laser Melting
SLS: Selective Laser Sintering
STL: Standard Tessellation Language
SLA: Stereolitografi
TPE: Termoplastik Elastomerler
TPU: Termoplastik Poliüretan

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, yapıları oluşturmak için malzemeleri katman katman biriktirerek üretim yapmaya olanak tanır. Süreç, malzemeyi herhangi bir yöntemle (püskürtme, eritme, yapıştırma) baskı makinasının tablasına aktararak; adım adım katmanların oluşturulması ile ilerler.

Tornalama, frezeleme, taşlama, delme, döküm, lazerle kesme gibi geleneksel imalat yöntemleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler her ne kadar teknolojinin gelişmesi ile daha verimli hale gelse de, geleneksel yöntemlerin belli sınırları vardır. Çünkü kesici takımlar ve parça geometrisi yapının işlenme kabiliyetini sınırlar. Ayrıca, işlenebilecek farklı malzemeler için farklı kurulum işlemleri ve ayarlar «kesici takım ayarı, ayna ayarı, tezgâh devir ayarı gibi » gerekmektedir. Ancak, günden güne artan malzeme çeşidi, kolaylaşan kurulum işlemleri gibi özellikler ile eklemeli imalat yöntemleri kullanarak nesnelere daha pratik şekilde üretmek mümkündür.

Geleneksel yöntemde bir hammadde işlenerek yeni bir mamul oluşturulur. Yani, büyük bir hammaddeye bazı işlemler uygulanarak daha küçük bir mamul elde edilir. Eklemeli imalat yönteminde ise süreç eklemeli olarak işler. Böylece, eklemeli imalat sonucunda hurda talaş, parçanın farklı tezgâhlarda ve farklı kesici uçlarla belli operasyonlardan geçmesi gibi zaman ve maddi kayıplar doğuran durumlar oluşmaz (Huang ve ark., 2013).



Şekil 1.1: Genelleştirilmiş eklemeli imalat süreci (Kara. N., 2013)

Eklemeli imalat yöntemlerinde hem geometri hem malzeme açısından daha farklı, pratik ve daha ucuz olabilecek imkânlar sunabilir. Nano ölçekte yapıların üretimine imkân tanır. Talep üzerine özel üretimlerin yapılmasını sağlayabilir. Maliyetli aletlere ve kalıplara ihtiyacı yoktur. Atık malzemeler eklemeli imalat sistemlerinde geri dönüştürülebilir (Karaarslan, M.Halid, 2013).

Elbette eklemeli imalat yöntemlerinde de bazı sınırlar mevcuttur. Üç boyutlu yazıcılarda bazı yapıları yazdırırken oluşan katman kayması durumu, bazı parçaların tablaya sağlıklı yapışmaması, belli ölçülerde parça yazdırabilme, büyük parçaları yazdırma sırasında oluşan zorluklar, mekanik özelliklerin bazı yapılarda istenen seviyede olmaması, düşük ölçüsel hassasiyete sahip olması, yeni gelişen bir teknoloji olduğu için standartların yetersiz olması gibi durumlar eklemeli imalat yöntemlerinin dezavantajlarından sayılabilir.

Ayrıca, yapılan bazı araştırmalarda, ticari amaçlı üç boyutlu yazıcıların emisyon oranlarının mikro düzeyde de olsa tehlikeli olabileceği öngörülmektedir. Bu sebeple, özellikle endüstriyel olarak kullanılacak olan baskı makinalarında yayılan parçacıkların insanlar tarafından solunmasını engellemek amacıyla filtre kullanılması gerekebilir (Stephens ve ark., 2013).

Eklemeli imalatta kullanılan çeşitli yöntemlerin temel çalışma prensiplerinin açıklanması, üretilen yapıların uygulama alanları, eklemeli imalatta kullanılacak malzemeler bu çalışmada incelenmiştir. Ayrıca katman kalınlığı, sıcaklık, doluluk oranı ve tarama açısı gibi farklı parametrelere sahip üç noktada eğme numuneleri üretilerek bu yapıların akma mukavemeti, maksimum eğilme gerilmesi, elastiklik modülü, rezilyans ve tokluk değerleri gibi mekanik özellikleri ile birlikte; üretilen numunelerin baskı süreleri mukayese edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Tanımı ve Kısa Tarihi

Eklemeli imalat, geçmişten günümüze kadar olan imalat süreçlerinin tersine işleyen bir yapıya sahiptir. Uzun yıllardır bir hammaddeye belli operasyonlar uygulayarak yeni bir ürün oluşturma işlemi ile süregelen imalat, eklemeli imalat süreçlerinin de gelişmesiyle farklı bir hal almıştır. Katmanları üst üste ekleyerek mamulün son halini alma işlemi birçok sektör için yeni bir alternatif oluşturmuştur. Diş hekimliğinden havacılık sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaya başlanan eklemeli imalat yöntemleri günden güne gelişmektedir. Yapılan bir çalışmada bir hastanın kafatası modellenerek üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Hasarlı bölge için ise bir protez tasarlanmıştır. Bu sayede, hasarlı bölgeye müdahale etmeden hastanın implant kontrolü operasyon öncesinde yapılabilmektedir (A. Çelebi ve ark., 2017).

Eklemeli imalat, 1980'lerde ortaya çıkmıştır. Charles Hull'un 1986 yılında tasarladığı ve patentini aldığı SLA (Stereolithografi) makinesi en eski 3D yazıcı olarak eklemeli imalatın temelini oluşturmuştur (Hull, 2015). Bununla birlikte 1988'de ise 3D Systems firmasını kuran Hull, bu tür sistemlerin gelişmesinde önemli adımlar atmıştır (ASME,2016). Ardından eriyik katı modelleme (FDM) gibi birçok çeşidin ortaya çıkması ile birçok sektörde eklemeli imalat ile üretilen ürünler kullanılmaya başlandı.

2.2 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin İmalata Kazandırabilecekleri ve Sınırları

Her imalat yönteminin tercih edilme sebepleri vardır. Eklemeli imalat tasarım, zaman ve maddi kazançlar için tercih edilen yöntemdir. Bu yöntem için bazı genel sebepler şunlardır:

- ❖ Geleneksel yöntemlerde tasarımcı, model oluştururken tasarladığı yapının işleme kabiliyeti hakkında fikir sahibi olmalıdır; eklemeli imalatla ise direkt olarak baskı ile yapıların üretilmesi mümkün olduğu için tasarımcılar için biraz daha avantajlıdır.
- ❖ Geleneksel yöntemlerde malzeme işlenirken kesici takımlara ihtiyaç duyulur. Farklı imalat süreçleri için farklı kesici takımlar gerekir. Kesici takımların belli bir ömrü vardır. Bu durum yüksek maliyetler doğurabilir. Ancak eklemeli imalat yöntemlerinde böyle bir durum yoktur.
- ❖ Talaş kaldırma gibi bir operasyon olmadığı için hurda talaş diye bir durum yoktur. Gelişmekte olan eklemeli imalat teknolojisi, her geçen gün daha büyük boyutlarda yapıların üretimine olanak sağlamaktadır.
- ❖ Endüstriyel amaçlı düşünüldüğünde yekpare parçalar üretilmediği için, imalatla kullanılan kaynak ve lehimleme gibi yöntemlere gerek yoktur. Malzeme yekpare olduğu için genellikle daha rijit bir yapı elde edilebilir. Ancak mümkün olan baskı boyutlarının

dışına çıkıldığında parçalar yekpare üretilmeyebilir. Bu durumda yine cıvata veya kaynak bağlantılı birleştirmelerle yeni ürünler oluşturulabilir.

- ❖ Kullanılabilecek malzemeler günden güne artarak, üretici için farklı seçenekler sunmaktadır. Bu durum, baskı ile üretilen yapıların günümüzdeki yapılarla test edilerek yeni seçenekler ve ekonomik çözümler oluşturmasını sağlayabilir.
- ❖ Tasarlanan bir yapının prototipini kısa zamanda oluşturarak, modelde oluşabilecek olası hataları görmeyi sağlar. Böylelikle tasarımcı, modelde değişiklikler yaparak çok daha az bir maliyetle modelde iyileştirme yapabilir.
- ❖ Kişiyeye özel medikal tasarımların (implant, organ) üretilmesine olanak sağlar. Hızlı prototipleme özel cerrahi uygulamalar için uygundur ve bu uygulamaların geliştirilmesi için önemli bir potansiyele sahiptir (Rengier ve ark., 2010).

Elbette imalat yöntemlerinin bütçe, zaman, malzeme, işçilik gibi birçok faktöre bağlı olarak tercih edilme veya edilmeme durumları vardır. Üretici, kendi yapısına göre en uygun yöntemi seçerek kendisi için bu faktörleri optimize etmeye çalışır. Bu noktada, eklemeli imalat yöntemlerinin de bazı dezavantajları vardır.

Bu dezavantajlardan bazıları şu şekildedir:

- ❖ Malzeme çeşitliliğini sağlamak açısından günden güne gelişme yaşansa da, eklemeli imalata uygun malzemeler sınırlıdır. Genelde plastik malzemelerin türevleri tercih edilmektedir. Plastik malzeme ile oluşturulabilecek modellerin mekanik özellikleri üreticileri tatmin etmeyebilir. Bu sebeple metal veya kompozit yapıların eklemeli imalat ile üretilmesi endüstriyel açıdan daha önemlidir.
- ❖ Eklemeli imalata uygun standartların şu an için mevcut değildir.
- ❖ Evler gibi kapalı alanlarda kullanılan 3D baskı makineler, potansiyel olarak kanserojen partiküller meydana getirebilir. Nozul ucundan eriyerek çok ince olarak çıkan malzeme bazen çapak haline gelir. Bu malzemeyi insanın soluyacağı düşünülürse, sağlık açısından bazı sorunlar ortaya çıkabilir.
- ❖ Eklemeli imalatta kullanılan yöntemler, seri üretim için düşünüldüğünde zaman açısından verimli olmayabilir.
- ❖ Yapılan bazı baskılarda elde edilen yüzey pürüzlülüğü operatöre bağlıdır.
- ❖ Hassas ölçülere sahip parçaların üretimi için yüksek maliyetli makineler gerekir.
- ❖ Eklemeli imalat ile yapılacak olan üretimler daha pratik olduğu için, insanlar tasarladığı bir silahı veya patlayıcı bir maddeyi kolayca üretebilirler. Bu da, bireysel silahlanmaya yol açabilir.



Şekil 2.1: Üç boyutlu baskı ile üretilen “Liberator” adlı silah (Honsberger ve ark.,2018)

- ❖ 2013 yılında üç boyutlu baskı yöntemi ile üretilen ve şu an Londra’da Victoria-Albert Müzesi’nde sergilenen “Liberator” isimli silah, bu yöntemin bireysel silahlanma amacıyla kullanılabileceğine dair ilk tehdit olarak öngörülebilir (Lee B. ve ark., 2013). Liberator, her türlü uygulamada kullanılabilecek ABS malzemeden üretilmiştir. Baskı işlemi -parametrelere bağlı olarak değişmekle birlikte- yaklaşık 20 saat sürer ve parçalar tek bir metal bileşen ile monte edilebilir.

2.3 Eklemeli İmalat Yöntemlerinin İşlem Adımları

Eklemeli imalat yöntemlerinde, neredeyse tüm yöntemler için standart hale gelmiş bazı işlem adımları izlenir.

2.3.1 CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım)

Eklemeli imalatta model oluşturmak için genelde CAD programları kullanılır. Tersine mühendislik, üç boyutlu tarama yöntemi ile de dijital bir model oluşturulabilir.

2.3.2 STL Formatına Dönüştürme ve Dosya İşleme

Geleneksel üretim metodlarından farklılık gösteren bu süreçte, modelin bir STL (stereolitografi) dosyasına dönüştürülmesi gerekir. STL, bir nesnenin yüzeylerini tanımlamak için çokgenleri kullanır.

Bir STL dosyası oluşturulduktan sonra, dosya bir dilimleme programına alınır. Bu program STL dosyasını alır ve G koduna dönüştürür. G kodu, NC bir programlama dilidir. Bu kodlar aynı zamanda CAM ile CNC tezgâhların kontrolü amacıyla kullanılır.

Dilimleme programı ayrıca tasarımcının katman kalınlığı, doluluk oranı, tarama açısı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, baskı hızı gibi parametreleri kontrol etmesini sağlar. Böylece, motorların hareketi bu parametrelere uygun bir şekilde sağlanır ve yazdırma işlemi başlar.



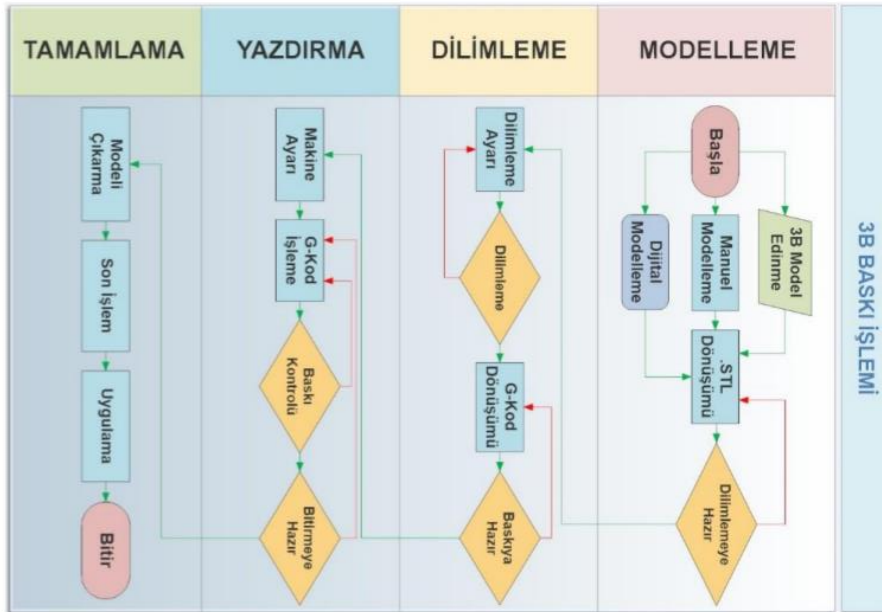
Şekil 2.2: CAD modeli (solda) ve STL formatına dönüşmüş hali (sağda) (GIBSON, Ian, et al.2014)

2.3.3 Baskı

Bu aşamada, baskı malzemesi makineye yüklenir. Eklemeli imalatta kullanılan hammaddeler genellikle sınırlı bir raf ömrüne sahiptir. Çoğu makinenin, baskı başladıktan sonra takip edilmesi gerekmez. Makine otomatik bir işlem adımını izleyecektir. Genelde makine hammadde bittiğinde veya yazılımda bir hata olduğunda durur.

2.3.4 Baskı Sonrası İşlemler

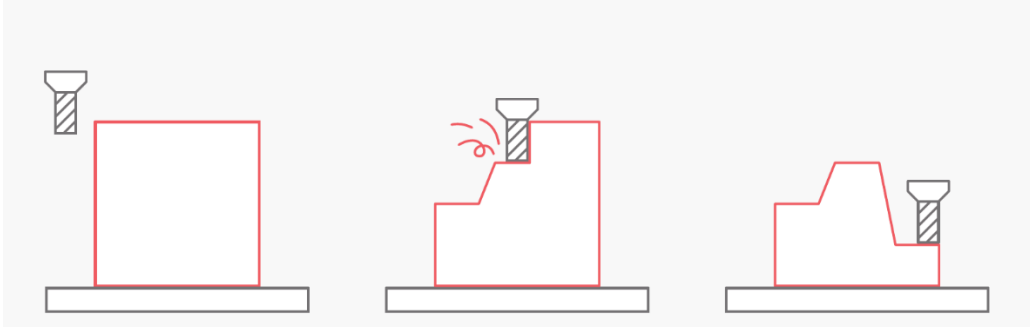
Baskı tamamlandıktan sonra, parçanın yapısını bozmadan istenen yapının son haline ulaşılmalıdır. Bazı eklemeli imalat teknolojileri için, baskının kaldırılması yazdırılan parçayı ısıtma tablasından ayırmak yeterlidir. Bazen ise temizleme işlemlerine gerek duyulmaktadır. İşlem sonrası proses yazıcı teknolojisine göre değişim gösterir. Örneğin, SLA kullanımdan önce UV altında kürlenecek bir bileşene ihtiyaç duyar. FDM baskı ile üretilen parçalar ise hemen kullanılabilir.



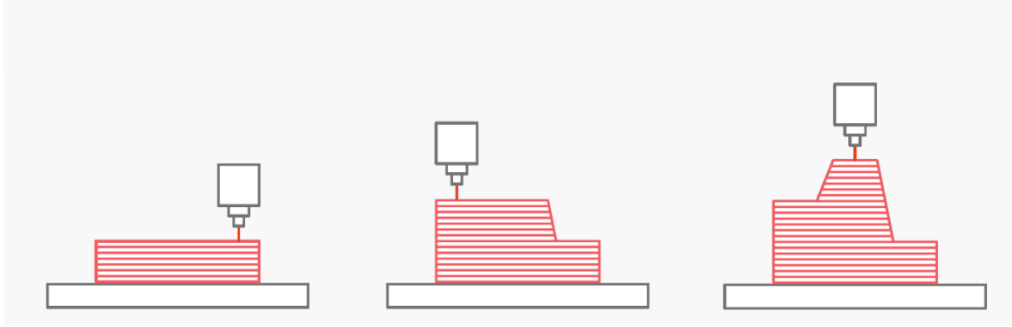
Şekil 2.3: Adım adım eklemeli imalat süreci (AYDIN, Levent; KÜÇÜK, Serdar,2017)

2.4 Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Geleneksel Üretim Yöntemlerinin Kıyaslanması

3D baskının birçok geleneksel üretim yönteminin yerini alması kısa vadede pek mümkün değildir. Ancak 3D yazıcının hızlı bir şekilde, işlevsel bir malzemeden yüksek hassasiyetle bir tasarım sunabileceği uygulamalar vardır. Prosesleri için özel bir takıma ihtiyaç duymadıklarından kurulum maliyetleri düşüktür. Geleneksel üretim yöntemleri düşünüldüğünde, özellikle konvansiyonel tezgâhlarla kıyaslandığında büyük avantajlara sahiptir.



Şekil 2.4: Universal tezgâhta işlenen bir parçanın şematik gösterimi



Şekil 2.5: Eklemeli imalat ile üretilen bir parçanın şematik gösterimi

2.4.1 Hız

Eklemeli imalatta parçaların üretilebilme hızları daha yüksektir. Karmaşık tasarımlar CAD modelinden yüklenip birkaç saat içerisinde yazdırılabilir. Bunun avantajı, tasarım fikirlerinin hızlı bir şekilde doğrulanması ve geliştirilmesidir.

2.4.2 Tek Kademeli İmalat

Geleneksel yöntemlerde bazı parçalar çok sayıda operasyondan geçtikten sonra son haline ulaşır. Bu operasyonlar tasarımın üretilebilirliğini, tekrarlanabilirliğini ve maliyetini etkiler. Buna örnek olarak bir civatanın imalat süreci ele alınabilir. Öncelikle, hammaddenin civatanın gerektirdiği çapta ve boyda kesilmesi gerekir. Cıvata kesildikten sonra bir cıvata başına ihtiyaç vardır. Bir ucu metali yumuşatmak amacı ile bakır bir halka ile indüksiyonla ısıtılır ve 1150 °C civarında, şekil verilebilecek bir hal alır. Cıvatanın sıcaklıkla yumuşatılmış başı, altıgen şekline getirebilmek için bir presin içine koyulur. Başı şekillendirmek için preste kuvvet uygulanır.

Cıvatalara şekil verildikten sonra bir sepetin içine yerleştirilip ocakta sertleştirilmek üzere, alevlerin içerisine gönderilir. Ocağa girdikten sonra cıvatalar yaklaşık 800 °C sıcaklığa getirilir ve ani soğumayla sertleştirilir. Böylece dişlerin açılmasına hazır hale gelir. Cıvatalara diş açılması için ovalama makinasından geçer.



Şekil 2.6: Standart civata işleme prosesi

Cıvata işleme sürecinde kullanılan teknolojiler düşünüldüğünde büyük yatırım ve emeğe mal olabilir. Aynı cıvataların eklemeli imalat yöntemi ile üretildiğini düşünülecek olursa bu işlemlere ve kullanılan ekipmanlara ihtiyaç kalmayabilir. Her ne kadar eklemeli imalat ile üretilebilecek cıvatalar mukavim olmasa da, bu örnekte bir kıyaslama yaparak işlem sayısındaki azalmayı görülebilir.



Şekil 2.7: Eklemeli imalat ile civata işleme prosesi

2.4.3 Karmaşıklık ve Tasarım Özgürlüğü

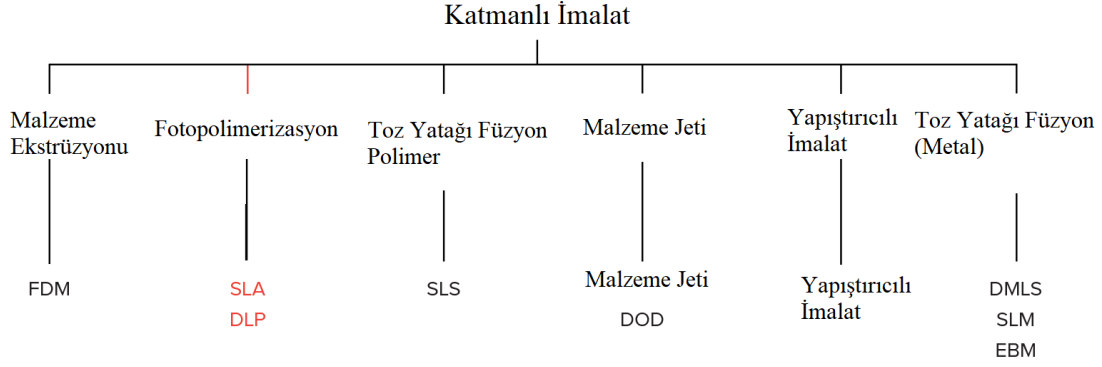
Geleneksel imalat yöntemlerinin getirdiği kısıtlamalar, genellikle eklemeli imalatla söz konusu değildir. Örneğin, pompa çarkları için çok uğraştırıcı proseslerle uğraşmak yerine metal baskı yapabilen üç boyutlu baskı makinaları ile kolay çözüm sağlanabilir.

2.4.4 Özel Üretim

Eklemeli imalat yöntemleri tasarımların tamamen özelleştirilmesine imkan sağlar. Mevcut eklemeli imalat teknolojileri, tek seferlik üretimler için daha uygundur. Bu durum, özel protez ve implant üretimi gibi konularda daha geçerli olduğundan tıp/diş hekimliği alanındaki yetkililer tarafından benimsenmiştir.

2.5 Eklemeli İmalat Yöntemleri Sınıflandırılması

Eklemeli imalatta kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemler, baskı yapılacak malzemeye, tasarıma, maliyete göre seçilir.



Şekil 2.8: Farklı eklemeli imalat yöntemleri

2.5.1 Stereolitografi (SLA)

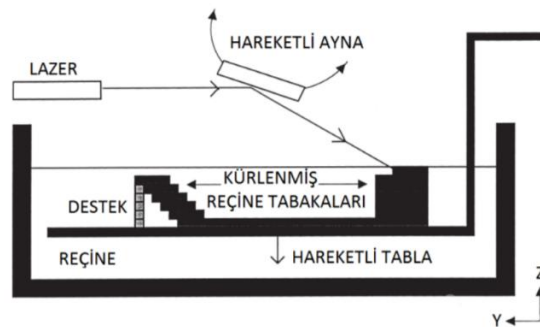
Bu teknik, yüksek hassasiyette üç boyutlu parçaların üretimi için sıvı malzemenin veya kompozitlerin katı kesitler halinde katman katman CAD verilerine göre doğrudan üretilmesidir (Melchels ve arkadaşları., 2010).

3D Systems 1987 yılında Stereolithografi (SLA) tekniği olarak bilinen plastik işleme yöntemi ile parçaların çok daha kısa sürelerde üretilebilmesini sağlamıştır. Bu süreç kabaca Stereolithograf aparatı (SLA) olarak adlandırılan 3B baskı makinesinin sıvılaştıran plastiği katı nesnelere dönüştürdüğü süreçtir. SLA bir reçine kürleme işlemidir. Stereolithografinin gelişmesi fotopolimerizasyona dayanır.

Fotopolimerizasyon ışığın farklı dalga boylarına sahip olmasından faydalanır. Bu dalga boylarının etkisi ile, fiziksel ve kimyasal değişime uğrayabilen maddelere fotopolimer denir. Sıvı haldeki polimerler, ışık kaynağına maruz kaldığında katılaşır.

SLA makineleri genelde dört ana bölümden oluşur:

- Sıvı fotopolimer reçine ile doldurulmuş bir tank
- Tankın içerisine batırılmış delikli bir platform. Platform, tankın içine indirilir ve baskı işlemine göre aşağıya veya yukarıya hareket ettirilir.
- Ultraviyole lazer
- Hem platformu, hem de lazer hareketlerini yöneten bir bilgisayar arayüzü



Şekil 2.9: SLA yönteminin temsili gösterimi (Baş, H., 2015)

Birçok eklemeli imalat yönteminde olduğu gibi, ilk adım bir yapının üç boyutlu modellenmesidir. Ortaya çıkan CAD dosyası, istenen nesnenin dijitalleştirilmiş temsilidir. CAD dosyasının STL formatına dönüştürülmesi gerekir. STL formatı eklemeli imalata özgü bir dosya formatıdır.

3D dilimleme yazılımı ile oluşturulan STL dosyası desteklenmelidir. Çünkü 3D yazıcılar G kodları ile çalışır. Dilimleme yazılımları ise STL formatındaki verileri G kodlarına dönüştürür. Baskı başladığında lazer, ilk katmanı ışığa duyarlı reçineye doğru çeker. Lazer her vurduğunda sıvı katılır. Lazer, bilgisayar kontrollü bir ayna ile uygun koordinatlara yönlendirilir. İlk katmandan sonra, platform katman kalınlığına göre yükseltilir (tipik olarak yaklaşık 0,1 mm) ve ilave reçinenin önceden basılmış kısmın altına akmasına izin verilir. Lazer daha sonra bir sonraki kesiti katılaştırır ve işlem ürün tamamlanıncaya kadar tekrar edilir. Lazerle temas etmeyen reçine, tankın içinde kalır ve tekrar kullanılabilir.

Malzeme polimerizasyonunu bitirdikten sonra, platform tanktan yükselir ve fazla reçine boşaltılır. İşlemin sonunda, ürün platformdan çıkarılır, fazla reçineden arındırılır ve daha sonra son kütleme için bir UV fırınına yerleştirilir. Baskı sonrası kütleme, nesnelerin mümkün olan en yüksek dayanıma ulaşmalarını sağlar. SLA, piyasadaki en hassas 3D baskı tekniklerinden biridir.

Prototipler son derece yüksek kalitede, ince detaylara sahip özellikler (ince duvarlar, keskin köşeler, vb.) ve karmaşık geometrik şekiller ile oluşturulabilir. Baskı yüzeyleri pürüzsüzdür.

Stereolitografi için bazı dezavantajlar da vardır. Bunlar;

- Bazı yapılar, statik olarak yetersiz olursa çökme meydana gelebilir.
- Reçineler gevrekler. Dolayısıyla mekanik testler ve fonksiyonel prototipler için uygun değildir.
- Reçineler çoğunlukla tescillidir ve bu sebeple farklı markaların makineleri arasında farklı reçinelerin kullanımı mümkün değildir.
- Gerekli teçhizat ve laboratuvar ortamı düşünüldüğünde nispeten pahalı bir yöntemdir.



Şekil 2.10: SLA yöntemi ile üretilmiş bir parçanın görünümü (Choudhari ve ark., 2016)

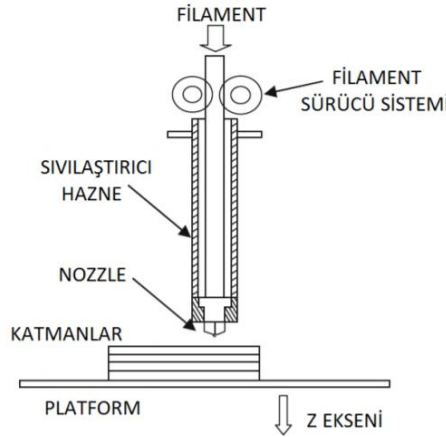
2.5.2 Eriyik Yığıma ile Modelleme (FDM)

Bu teknoloji kapsamında çalışan üç boyutlu yazıcılar, “hot-end” denilen sıcak baskı ucu vasıtasıyla eritilen termoplastiği (filament) baskı tablası üzerine katman katman yerleştirerek üç boyutlu nesneyi oluşturur. Termoplastik malzemelerin davranışları sıcaklığa bağlı olduğu için ısıl değişkenler bu tip baskıda önem arz eder. Çünkü her bir termoplastik türü için erime ve camlaşma sıcaklığı birbirinden farklıdır.

Dolayısıyla, bu teknoloji ile çalışan yazıcıların baskısı yapılmak istenen ürüne uygun seçilmiş bir termoplastiğin erime sıcaklığına göre ve yine bu erime sıcaklığına bağlı olacak şekilde tabla ayarının yapılarak çalıştırılması önemlidir.

FDM prosesi şu şekilde çalışır:

FDM tekniğinde tel şeklindeki plastik veya mum malzeme bir nozul içerisinde ekstrüde edilir. Nozul içerisinde malzemeyi ergime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta tutacak bir ısıtıcı vardır. Bu ısıtıcı vasıtasıyla eriyen malzeme nozul içerisinden aktıktan sonra sertleşmekte ve altındaki katmana yapışmaktadır. Bir çalışmada kum döküm modellerinin yapımında FDM yöntemini kullanarak yeni bir döküm tekniği geliştirmişlerdir (Jain ve arkadaşları., 2013).



Şekil 2.11: FDM yöntemiyle parça baskısının gösterimi (Baş H., 2015)

Bir katman bittiğinde, tabla aşağı doğru hareket eder ve yeni bir katman biriktirilir. Bu işlem, parça tamamlanana kadar tekrar edilir. Çoğu FDM sisteminde nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, baskı hızı, katman kalınlığı, tarama açısı ve doluluk oranı da dahil olmak üzere çeşitli işlem parametrelerinin ayarlanması gerekir. FDM'de kullanılan katman yüksekliği genellikle 50 ila 400 µm arasında değişir.

2.5.3 Yapıştırıcı ile Eklemeli İmalat Yöntemi (Binder Jetting)

Çoğunlukla kalıp imalatı, döküm modelleri için kullanılan bu yöntemde toz malzeme üzerine, mürekkepli yazıcılar benzeri hareketli bir kafa ile yapıştırıcı uygulanır ve üzerine yeni malzeme katmanı serilerek sertleştirilir.

Bağlayıcı, toz tabakaları arasında bir yapışkan görevi görür. Bağlayıcı genellikle sıvı halde ve yapı malzemesi toz halindedir. Genellikle granül ve toz formundaki yapı malzemesi katmanları, yapıştırıcı kullanılarak bir arada tutulur. Baskı kafası, bağlama malzemesini mikro miktarlarda biriktirir ve toz malzeme, toplam parça kütlelerinin çoğunluğunu oluşturur.

Bir baskı kafası, makinenin x ve y eksenleri boyunca yatay olarak hareket eder.

İşlem sırası şöyledir:

- Toz malzeme bir rulo kullanılarak baskı tablasına yayılır.
- Baskı kafası, yapıştırıcıyı gerektiğinde tozun üzerine biriktirir.
- Baskı tablası, modelin katman kalınlığına göre azaltılmıştır.
- Bir başka toz tabakası önceki tabakaya yayılır. Parça, tozun sıvıya bağlı olduğu yerde oluşturulur.
- Bağlanmamış toz, parçayı çevreleyen konumda kalır.
- İşlemler, tüm parça son halini alana dek tekrar edilir.

Bu yöntemle metal, polimer ve seramik malzemeler üretilir.

2.5.4 Malzeme Püskürtme Yöntemi

Malzeme püskürtme yöntemi, iki boyutlu yazıcılara benzer şekilde çalışan bir yöntemdir. Standart mürekkep püskürtmeli yazıcılarda da bulunan yazıcı kafası ile ultraviyole ışığı altında katılaşabilen, ışığa duyarlı bir malzemenin damlacıklarını bir platforma çok sayıda nozul yardımı ile dağıtır. Bu da kat kat katman oluşturur. Ultraviyole ışığı, malzemenin sertleşmesini sağlar.

Proseste ilk olarak sıvı reçine baskı için uygun viskoziteyi elde etmek amacıyla ısıtılır. Ardından, baskı kafası tablanın üzerinde ilerler. Parçanın nihai haline gelmesi için küçük damlalar gerekli yerlere püskürtülür. Baskı kafasına takılmış olan bir ultraviyole ışık kaynağı tablada biriken malzemeyi sertleştirir ve katılaştırır. Böylece parçanın ilk katmanı oluşmuş olur. Katman tamamlandıktan sonra, tabla oluşturulan katmanın kalınlığı kadar aşağıya iner ve proses tüm parça tamamlanmaya dek devam eder.

Birden fazla mürekkep püskürtmeli baskı kafası yan yana aynı tablaya doğru ve tüm baskı yüzeyinde biriken malzemeye tutturulmuştur. Bu, farklı baskı kafalarının farklı malzemeleri dağıtmasına da olanak sağlar. Bu nedenle çok malzemeli ve renkli baskıda yaygın şekilde

kullanılır. Sıvı malzeme, SLA yöntemi fotopolimerizasyon yöntemi ile sertleşir. Oluşan yapı homojen mekanik ve ısıl özelliklere sahiptir. Ancak, SLA'nın aksine çok küçük katman kalınlıkları ile malzeme oluşturulduğundan tatmin edici mekanik değerlerin sağlanması için ek olarak kütleme operasyonuna ihtiyaç duyulmamaktadır.

Kullanılacak olan malzemenin damlalar halinde birikmesi gerektiği için bu yöntemde malzeme seçeneği sınırlıdır. PP, HDPE, ABS tarzı polimerler kullanılabilir. Bu polimerler gevrek bir yapıya sahiptir. Bu malzemelerin mürekkep benzeri formları bu sistemlerde kullanıldığı için maliyetleri yüksektir. Bu yöntemde, tek bir parça için farklı malzemeler kullanabilmek de mümkündür. Proses, damlacıkların birbiri üstüne binmesi şeklinde devam ettiği için çok hassas boyutsal toleranslara sahip parçaların imalatı için uygundur.

2.5.5 Alaşımlar için Eklemeli İmalat

Toz yatağı füzyon (PBF) yöntemleri, malzeme tozunu eritmek ve birleştirmek için bir lazer veya elektron ışını kullanır. Elektron ışını eritme (EBM) ise vakum gerektirir ancak fonksiyonel parçaların oluşturulmasında kullanılabilir. Tüm PBF işlemleri, toz malzemenin önceki katmanlara yayılmasından ibarettir. Yatağın altındaki bir haznedeki malzeme temini sağlanır.

Bu yöntem birkaç farklı türde baskı yöntemini içerir: Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), Elektron ışını eritme (EBM), Seçici ısı sinterleme (SHS), Seçici lazer eritme (SLM) ve Seçici lazer sinterleme (SLS).

2.5.5.1 Elektron ışını eritme metodu (EBM)

Bu üretim şeklinde katmanlar, metal tozlarını eritmek için bir elektron ışını kullanılarak kaynatılır. Işını ve vakum basıncını kontrol etmek için elektromanyetik bobinler kullanılır. EBM, füzyon sırasında oluşan eşit sıcaklık dağılımından dolayı iyi ve homojen dayanım özelliklerine sahip modeller sunar. Havacılık ve tıbbi uygulamalarda bu yöntem sayesinde yüksek kalitede ürünler üretilir.

2.5.5.2 Seçici Lazer Sinterleme ve Eritme Metodu (SLS/SLM)

Bu sistemlerde; toz içerisinde tasarımın bir kesiti lazer ile eritilir ve üzerine yeni bir katman toz ilave edilerek sıradaki katman eritilerek eklenir.

SLS, küçük partikülleri bir arada tutmak için yüksek güçlü lazer kullanan bir teknolojidir. Plastik, metal, seramik, naylon gibi geniş bir malzeme çeşitliliğine sahiptir. Oldukça çeşitli parçaları, tek seferde üretme yetkinliğine sahip olan bu yöntemle, SLA yöntemine kıyasla düşük yüzey kalitesi elde edilmektedir.

Seçici lazer sinterleme (SLS) makinelerinin üç bileşeni vardır: bir ısı kaynağı, bu ısı kaynağını kontrol etmek için bir aygıt ve önceki malzemeye yeni malzeme katmanları eklemek için bir mekanizma.

Lazer, tozu ya kaynama noktasının hemen altına (sinterleme) ya da kaynama noktasının üstüne (erime) kadar ısıtır; bu da toz içindeki parçacıkları birlikte katı bir formda birleştirir. İlk katman oluşturulduktan sonra, SLS makinesinin platformu bir miktar alçalır. Lazerin kaynatması için yeni bir toz tabakası ortaya çıkar. Bu işlem, ürün tamamen yazdırılana kadar tekrar tekrar devam eder.

SLM (Seçici Lazer Eritme) ise 3D Baskı metal alaşımları için kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Metal tozu parçacıklarını erime sürecinde birbirine karıştırarak ilave parçalar oluşturur. SLS işleminde olduğu gibi, metal parçanız da 3D modelinize göre kat kat üretilecektir. DMLS'den farklı olarak SLM tozu tamamen eritir ve bu nedenle bu diğer metal 3D baskı tekniğinden daha yüksek bir sıcaklığa ulaşması gerekir. Yapı haznesi, erime için mükemmel koşullar oluşturmak üzere bir soygazla (argon veya azot) doldurulur.

Tam erime işlemi metalin iyi dayanımlı ve homojen bir katman oluşturmasını sağlar. Titanyum veya alüminyum gibi saf metaller için mükemmel uygundur. Malzemeyi tamamen eritmek için çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulacağından, soğuma için de bekleme süreleri fazla olmaktadır.

2.5.5.3 Direkt Metal Lazer Sinterleme

Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) temel olarak bir lazer kullanarak parçaları kaynaklı olarak birleştirir. Lazer teknolojisi kullanılarak metal tozları eritilir. Metal tozu bir kaba konur ve özel bir baskı yatağı, lazerin erimesi için gereken miktarda tozu alır. Baskı yatağı, gerekli katmanlar yapılıncaya kadar hareket eder. DMLS yöntemi ise, bir lazer ışını polimer gibi herhangi bir bağlayıcı malzeme kullanılmaksızın metal tozları doğrudan sinterlemek için kullanılmaktadır.

DMLS, karmaşık nesnelere için çok yararlı olan yüksek hassasiyetinin yanı sıra yüksek ayrıntı seviyesiyle de bilinir. DMLS, diş hekimliği ve tıp endüstrisinde hassas ve karmaşık cerrahi aletlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik ve titanyum, bu 3B Baskı işleminde en sık kullanılan metallere ikisidir. Geleneksel üretim yöntemlerinden olan döküm ve işleme ile titanyum alaşımlarını işlemek zor olduğundan dolayı DMLS yönteminde titanyum alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Medikal alanda titanyum alaşımları mükemmel mekanik özellikleri ve korozyon direnci, düşük ağırlık oranından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim hızının yavaş ve sarf malzemesi pahalı olması dezavantajdır (S. Turhan ve arkadaşları ., 2016).

2.5.5.4 Lamine Nesne Üretimi (LOM)

LOM işlemi sırasında, plastik veya kağıt katmanları ısı ve basınç kullanılarak bir araya getirilir ve ardından bilgisayar kontrollü bir lazer veya bıçakla istenen şekilde kesilir. LOM, 3D prototip

oluşturmanın en hızlı ve en uygun yollarından biridir. Metalik parçaların LOM'unda, lazer veya mekanik kesiciler genellikle katman oluşturmak için kullanılır ve farklı katman malzemelerinin yapıştırılması işlemi kimyasal yapıştırıcılar, termal yapıştırma veya lehimleme ve kaynaklama yaklaşımlarıyla sağlanır.

LOM karmaşık geometrilere sahip nesnelere oluşturmak için ideal değildir ve içi boş nesnelere oluşturamaz. Bu işlem oldukça hassas parçalar üretmez. LOM esas olarak form veya tasarım için test edilebilecek basit prototipler oluşturmak için kullanılabilir.

2.6 Başka Çalışmalarda Yapılan Testlerin İncelenmesi

2.6.1 Malzeme Yapısına Göre Yapılan Testler

Rohan Bajracharya ve arkadaşları, yaptığı çalışmalarda PLA esaslı kompozit malzemelerin kimyasal kompozisyonlarında revizyonlar yaparak üretilen ASTM D790 standardına göre üç noktada eğilme testine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada üniversal test cihazının 2 mm/dk hızında kullanılmıştır. Test numuneleri kompozisyonu ve eğilme gerilmesi değerleri şu şekildedir; Saf PLA(89,2MPa), C10(49,2MPa), C20(21,1MPa), C30(21,12MPa), F10C20(6,39MPa), F20C10(13,99MPa), F30(27,74MPa). Görüldüğü gibi saf PLA için maksimum eğilme gerilmesi elde edilmiştir. Karbonfiber-PLA kimyasal kompozisyonları için karbonfiber değeri arttıkça eğilme gerilmesi değeri düşmüştür. Karbonfiber-keten-PLA'nın farklı kimyasal kompozisyonları için ise keten katkısı arttıkça eğilme gerilmesi değeri artmıştır. En düşük eğilme gerilmesi F10C20 yani %10 keten, %20 karbonfiber katkılı kimyasal kompozisyon için ortaya çıkmıştır (Rohan ve ark., 2017).

Liu ve arkadaşları; alüminyum, bakır, ahşap, seramik ve karbonfiber katkılı PLA'nın mekanik karakteristiğinin tespiti için çekme ve eğme testleri yapmıştır. Ayrıca numuneler x,y,z eksenlerine dik olacak şekilde üç farklı şekilde üretilmiştir. Çekme ve eğilme özelliklerinin genel olarak, saf PLA filamente seramik, bakır ve alüminyum tozları eklenerek, gerilme ve eğilme modülü, kopmadaki kuvvet yanı sıra, farklı baskı oryantasyonları ve tarama açıları altında saf PLA ile hemen hemen aynıdır.

Bu çalışmadan şu sonuçlar çıkmaktadır: Saf PLA, ahşap ve karbon fiber bazlı PLA, dik yönde baskıda seramik, bakır ve alüminyum bazlı PLA'dan daha iyi baskı şekillendirilebilirliğe sahiptir.

Saf PLA'ya ahşap ve karbon fiber katkısı yapmak, mekanik özelliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, $\pm 45^\circ$ tarama açılarıyla kenar (on-edge) oryantasyonunda basılan PLA kompozit örnekleri çoğu durumda en yüksek mekanik güce sahiptir.

Bununla birlikte, dik oryantasyon boyunca basılan tüm numuneler, en zayıf mekanik değerlere ve modüle sahiptir.

Parçalarının mekanik davranışlarını daha iyi anlamak için tüm numuneler için bir kırık morfolojisi analizi yapılmıştır. Seramik, bakır ve alüminyum bazlı PLA numunelerinde, ahşap ve karbon fiber bazlı PLA'lardaki numunelerden, saf PLA'ya çok yakın olan daha yoğun tabakalar arası yapıların gözlemlendiği açıktır. Ahşap ve karbon fiber bazlı PLA numunelerinin düşük mukavemeti, yüksek gözeneklilik, ve filament tabakaları arasında yapışmama gibi kusurlara sahip olduğu söylenebilir. (Liu ve ark., 2019)

Samet Yaman, yaptığı çalışmada ağırlıkça %40 PLA %60 ABS filament malzemedan üretilen yeni malzemenin FDM yöntemi ile numunelerini üretmiştir. İzod darbe deneyi, yoğunluk, akış, çekme ve sertlik testleri yapılmıştır. Elde edilen verilerle mekanik ve termal özellikleri incelemiştir. Çekme gerilmesinde en yüksek değer doluluk oranından bağımsız olarak, zigzag işleme yönü ile elde edilmiştir. Üretimi yapılan malzeme, beklenildiği gibi tüm şartlarda ABS'den daha yüksek PLA'dan daha düşük gerilme değerleri göstermiştir (Yaman, S. 2019).

Nikola Palic ve arkadaşları, yapmış olduğu çalışmada PLA numunesini 0,1 mm katman kalınlığı ile üretilmiştir ve üç noktada eğilme testine tabi tutulmuştur. Numuneler %100 dolgu ile üretilmiş ve elde edilen eğilme mukavemeti 214 MPa olmuştur (Palic N. ve ark., 2019).

Zeki Yahya Patan, yaptığı çalışmada ağırlıkça %12 karbonfiber takviyeli CF0 ABS ve takviyesiz Performance ABS filamentler ile çekme, basma ve eğme numuneleri üretmiştir. Bu numunelerin testini gerçekleştirerek, karbon fiber takviyeli filamentin mekanik özelliklere ne şekilde etkidiğini incelemiştir.

Çekme testi numuneleri için, CF0 ABS numunelerinin ortalama değeri 30,4 MPa iken ABS numunelerin ortalama değeri 30,45 MPa'dır. Çekme testinde oluşan değerler arasında büyük bir fark bulunmamaktadır. Bu sebeple, numuneler standart sapma değerleri kontrol edilmiştir. CF0 ABS numunelerin standart sapma değeri daha düşük olduğu için, CF0 ABS çekme mukavemeti için daha mukavemettir denebilir.

Basma testi numunelerinde ise ABS 56,55 MPa iken CF0 ABS numunelerinin değeri 70,07 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple, CF0 ABS numuneler %23,9 daha mukavemettir.

Üç nokta eğilme testi uygulanan numuneler için ABS numunelerinin ortalama değeri 37,37 MPa'dır. CF0 ABS numunelerinin değeri ise 42,88 MPa'dır. CF0 ABS numuneleri eğilme kuvveti etkisinde %14,75 daha mukavimdir (Patan Z., 2019).

Caminero ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada PLA malzeme çekme ve üç noktada eğme testine tabi tutmuşlardır. Bu üç tür filament düz (flat), yan (on edge) ve dik (upright) olarak üç farklı şekilde üretmişlerdir.

Bu sonuçlara göre, çekme testi sonuçları yan (66,5 MPa), düz (49,5 MPa), dik (26,1 MPa) değerlerini almıştır. Eğme testi sonuçları ise yan (98,6 MPa), düz (93,5 MPa) ve dik (42,3 MPa) şeklindedir.

Oryantasyonlar içerisinde çekme ve eğme testinde en yüksek mukavemet değerini düz oryantasyonu verirken, en düşük mukavemet değerini iste (dik) oryantasyonu vermektedir. (Yan > Düz > Dik) (Caminero ve ark., 2019).

Ben Wittbrodt ve arkadaşları, PLA filament ile renklerde numuneler üreterek çekme mukavemetine etkisi gözlenmiştir. Sırası ile şeffaf renk için 57,16 MPa, siyah 52,81 MPa, gri 50,84 MPa, mavi 54,11 MPa, beyaz 53,97 MPa olarak gözlenmiştir. Uç değerler arasındaki fark yaklaşık %12'dir. Şeffaf renkteki numunelerin çekme mukavemeti değeri en yüksek iken gri renkteki numunelerin çekme mukavemeti değeri en düşüktür (Wittbrodt B. ve ark., 2015).

Svensson yaptığı çekme testleri sonucunda malzemelerin gerilme-gerinim grafiklerini oluşturmuştur. PLA 62,2 MPa, ABS 35,1 MPa, Nylon 29,2 MPa, TPU 55 MPa değerlerini vermiştir. PLA ve ABS için yüksek gerilme değeri elde edilirken gerinim değeri düşüktür. Nylon ve TPU için gerinim değerleri daha yüksektir (Svensson, 2017).

Johanson ABS, PET ve PLA malzemelerden oluşan numuneleri çekme testine tabi tutmuştur. ABS, PET ve PLA'nın gerilme özellikleri arasında oldukça büyük bir fark görülmektedir. Sonuçlara göre PLA sert ve kırılğan bir malzeme olarak göze çarpmaktadır. PET, biraz daha esnek bir malzemedir. ABS'nin gerilim-gerinim eğrisi, PLA'dan biraz daha yumuşak bir malzeme olduğunu gösterir. ABS, gerilim-gerinim davranışında PLA ve PET arasında bir yerdedir (Johansson,2016).

Lanzottia ve arkadaşları, saf PLA malzemeyi teste tabi tutup, geri dönüşümünü sağlayarak tekrar tekrar mekanik testler uygulamıştır. Geri dönüşümü yapılmış ürünlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Numuneler ASTM D2344'e göre saf PLA ve 1, 2 ve 3 kez geri dönüştürülmüş PLA malzemedan üretilmiştir. ASTM D2344 kısa kiriş metodu olarak da geçmektedir. Bu test de bir eğme testidir. Fakat mesnetler arası mesafenin kalınlığına oranı (s/t) 4:1'dir.

Doğal olarak, geri dönüşümü yapılan malzemenin mukavemet değeri; normal yöntemlerle üretilmiş malzemenin mukavemet değerinden düşük olduğu fakat birinci ve ikinci geri dönüşüme dek farkın yaklaşık %10 olduğu gözlenmiştir. Üçüncü dönüşümde ise bu fark yaklaşık %38 civarındadır (Lanzotti ve ark., 2016).

2.6.2 Doluluk Oranı Testleri

Samet Yaman, yaptığı çalışmada ağırlıkça %40 PLA %60 ABS filament malzemeden üretilen yeni malzemenin FDM yöntemi ile numunelerini üretmiştir. Elde edilen sonuçlara göre doluluk oranının düşürülmesi ile çekme mukavemeti değeri %60'a kadar düşebilmektedir (Yaman S., 2019).

Aloyaydi Bandar ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada ASTM D790 standardına uygun olarak PLA malzemeden üretilmiş numuneleri test ederek PLA malzemenin üç noktada eğme davranışlarını incelemişlerdir. Bu numuneler, farklı doluluk oranlarında üretilerek ortalama değerleri alınmıştır. Doluluk oranı ile eğme gerilmesindeki artış doğru orantılıdır. %100 doluluktaki numunelerin eğme gerilmesi değeri %80 doluluktaki numunelerin yaklaşık 2 katıdır (Aloyaydi ve ark., 2019).

Ahmet İpekçi ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada %20, 50 ve 80 doluluk oranında PET-G malzemeyi çekme testine tabi tutarak (TS-138-A) çekme mukavemeti ve yüzde uzama verilerini kıyaslamışlardır. Doluluk oranı, şüphesiz ki malzemenin mukavemeti ile doğru orantılıdır. Doluluk oranına göre mukavemet verileri %80 > %50 > %20 şeklindedir. Değerler ise 49,41 > 47,98 > 30,71 MPa şeklindedir (Ahmet İpekçi ve ark., 2019).

Johnson ve arkadaşları, çalışmalarında doluluk oranlarının farklı malzemeler üzerindeki etkisini çekme testi yaparak mekanik değerleri incelemişlerdir. En düşük doluluk oranı olan %15'te tüm malzemeler en düşük mukavemet değerindedir. %30 doluluk oranında PLA'nın akma dayanımı 30,1 MPa iken Naylon 910'un akma dayanımı 13,1 MPa'dır.

%50 doluluk oranında, 30MPa (ABS) ile 15,6 MPa (Naylon 910) arasında değişen daha dar bir gerilme mukavemetine sahiptir. % 50 doluluk üzerinde akma dayanımları önemli ölçüde artmaya başlamıştır.

%75 doluluk oranında, PETG'nin ortalama akma dayanımı 36.1 MPa iken ASA'nın ortalama gerilme akma dayanımı 19.1 MPa'dır.

%100 doluluk oranında, Naylon, 69,9 MPa'lık bir ortalama akma dayanımına sahiptir ve bu da onu test edilen en mukavim malzeme haline getirmiştir. % 100 doluluk oranında en zayıf malzeme olan PLA'nın ortalama akma gerilimi 32,98 MPa idi.

Nylon910 malzemesi doluluk oranından en fazla etkilenen malzemedir. %15 dolulukta 12,7 MPa gelen akma dayanımı değeri, %100 dolulukta 69,9 MPa gelmiştir (Johnson ve ark., 2017).

Fadıl Abbas ve arkadaşları PLA malzemenin basma mukavemeti üzerinde çalışmalar yapmıştır. Farklı doluluk oranlarında (%20, %35, %50, %65, %80) üretmiş olduğu numunelerin basma mukavemetinde değerleri arasında en fazla %50 fark oluşmuştur. Bu numuneler için

değerler sırası ile 20,5 MPa, 23MPa, 25MPa, 27,5 MPa ve 30 MPa elde edilmiştir (Abbas F. ve ark., 2017).

Hatice Evlen, yapmış olduğu çalışmada TPE ve TPU malzemelerin doluluk oranlarını (%40, 60, 80 ve 100) değiştirerek çekme ve basma testlerine tabi tutmuştur. TPE malzemeden üretilen numuneler için doluluk oranı ile basma ve çekme mukavemeti değerleri doğru orantılı olarak artmıştır. Fakat TPU malzemede doluluk oranı %80'e kadar çıkarıldığında doğru orantılı olarak artmıştır. Daha sonra %100 doluluk oranında çekme ve basma mukavemetleri düşmüştür (Evlen H., 2019).

2.6.3 Katman Kalınlığı Testleri

Nadir Ayrılmış ve arkadaşları ahşap katkılı PLA filamentler ile üretilmiş parçaların üzerinde katman kalınlığının etkisini görmek adına deneyler yapmış ve bazı veriler elde etmişlerdir. Ağırlıkça %30 ahşap %70 PLA içerikli filament kullanılmıştır. Numuneler 0,05mm, 0,1mm, 0,2mm ve 0,3mm olan dört katman kalınlığında üretilmiştir. Eğilme mukavemeti değerleri sırası ile 128 MPa, 121,7 MPa, 113,6 MPa ve 84,3 MPa'dır. Çekme mukavemeti değerleri ise sırası ile 35,5MPa, 33,9MPa, 28,7 MPa, ve 20,5 MPa'dır.

Katman kalınlığı azaldıkça mukavemet değerleri artmaktadır. Eğme mukavemetinde yaklaşık %34 bir artış söz konusu iken çekme mukavemetinde yaklaşık %42 artış vardır (Ayrılmış N. ve ark., 2019).

Peng Geng ve arkadaşları, katman kalınlığı parametresinin ABS malzeme üzerine etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu sonuçlara göre katman kalınlığı (0,2, 0,3, 0,4 mm) değerleri için çekme mukavemeti değerleri sırası ile 40,1 MPa, 56,6 MPa ve 32,4 MPa'dır. Eğilme mukavemeti için ise bu değerleri 52,1 MPa, 56,1 MPa ve 48,7 MPa şeklindedir. Verilere göre bu üç katman kalınlığı değeri arasında en mukavim olanı 0,3 mm değeridir (Peng Geng ve ark.,2015).

Shubham ve arkadaşları, 230 °C'de üretilmiş ABS numuneler 5 farklı katman kalınlığı değerinde(0,075 mm, 0,1 mm, 0,25 mm, 0,5 mm) üretilmiştir. Çekme testleri sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.Bu testlerden elde edilecek sonuçlara göre beklenildiği gibi katman kalınlığı ile çekme mukavemeti değeri artmaktadır. En düşük katman kalınlığı değeri(0,075 mm) ile en yüksek katman kalınlığı değeri (0,5 mm) arasında (27.5 MPa - 19.2 MPa) %30 fark vardır (Shubham ve ark., 2016).

Fernandes ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada katman kalınlığı parametresini PLA malzeme üzerinde incelemişlerdir. 0,1 mm katman kalınlığına sahip numuneler 0,2 mm olanlara kıyasla, %40'tan %60'a kadar daha mukavemettir (Fernandes ve ark., 2018).

Tymrak ve arkadaşları, PLA malzeme için yaptığı testlerde katman kalınlığının azalması ile çekme mukavemeti değerinde bir artış olduğu sonucuna varmıştır. PLA malzeme için ise, 0,2 mm kalınlıktaki çekme mukavemeti değeri, 0,3 mm kalınlıktaki çekme mukavemeti değerine göre yaklaşık %22 daha mukavemetlidir (Tymrak ve ark., 2014).

2.6.4 Nozul Sıcaklığı Testleri

Ebubekir Çantı ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada baskı hızı ve sıcaklığın ABS malzemenin çekme değerleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nozul sıcaklığı 230, 240 ve 250 °C için üretilen numuneler çekme testine tabi tutulmuştur. Baskı hızı ise 30, 50 ve 70 mm/s olarak seçilmiştir ve toplamda 9 farklı numune grubu için üretim ve çekme testi yapılmıştır.

Tüm numuneler arasında 73 MPa'lık en yüksek mukavemet değeri, 230 °C'lik bir nozul sıcaklığı ile 50 mm/s'lik bir hızda basılan numuneye aittir.

66,4 MPa'lık en düşük çekme mukavemeti değeri, 250 ° C'lik bir nozul sıcaklığı ile 30 mm /s hızında basılmış olan numuneye aittir. Sonuçlar, baskı sıcaklığı, baskı hızı ve sonuçtaki mekanik özellikler arasında doğrudan bir ilişki olmadığını göstermiştir.

Ancak, tüm numuneler arasında en yüksek çekme mukavemeti değerine 50 mm/s baskı hızında ulaşılmıştır (Çantı E. ve ark., 2017).

M. Bazin ve arkadaşları, ABS filament ile üretilen numunelerin eğme davranışının optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Baskı hızı 30, 50, 70 mm/s ve nozul sıcaklığı 220, 240, 260 °C olarak üretilen numuneler ASTM D790 standardına göre üç noktada eğme testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuç 30 mm/s baskı hızı, ve 260 °C nozul sıcaklığı optimum eğme karakteristiğini verdiğini göstermektedir(Bazin M. ve ark.,2019).

Ben Wittbrodt ve arkadaşları, PLA filament ile farklı nozul sıcaklıklarında (190, 200, 210 ve 215 °C) numuneler üreterek çekme mukavemetine etkisi gözlenmiştir. Sıcaklık farklılığından dolayı çekme mukavemeti üzerinde maksimum %10 değişiklik meydana gelmiştir (Wittbrodt B. ve ark., 2015).

Dey ve Yodo, nozul sıcaklığının, baskı numuneleri üzerindeki çekme mukavemeti ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini yaptıkları çalışmada kanıtlamışlardır (Dey ve Yodo, 2019).

2.6.5 Tarama Açısı Testleri

Peng Geng ve arkadaşları, tarama açısı (0/90°, 30/-60°, 45/-45°) parametresinin çekme ve eğme mukavemetine etkisini incelemişlerdir. 0/90° için en yüksek değerler elde edilmiştir (Peng Geng ve ark., 2015).

Fernandes ve arkadaşları, tarama açısının PLA malzeme üzerindeki etkilerini incelemiştir. 0/90° ile ±45° arasında yapılan kıyasta çekme mukavemeti değeri için 0/90° tarama açısının yaklaşık %17 daha mukavemetli olduğu gözlenmiştir (Fernandes ve ark., 2018).

Letcher ve arkadaşları, eklemeli imalat ile üretilen yapıların mekanik özelliklerinin, tarama açısının değiştirilerek geliştirilebileceğini veya daha az mukavemetli ürünler ortaya çıkarılabileceğini göstermiştir. 3 boyutlu yazdırma teknolojisi ile yazdırılan numunelerin çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerinin, numunenin tarama açısının değiştirilmesiyle geliştirilebileceğini göstermiştir (Letcher ve Waytashek, 2014).

Tymrak ve arkadaşlarının, ABS malzeme için yaptığı testlerde 45° tarama açısında üretilen numunelerin çekme dayanımı daha yüksek iken, 0°/90° tarama açısındaki numunelerin elastiklik modülü daha yüksektir (Tymrak,2014).

2.6.6 Diğer Parametrelere ve Özelliklere Bağlı Testler

Goulas ve arkadaşları farklı baskı hızlarında malzemelerin yalıtkanlığını incelemiştir. Bu çalışmada, baskı hızlarına bağlı olarak oluşturulan numunelerin görüntüleri bize baskı hızının önemi hakkında önemli bir kaynak sağlamaktadır. Baskı hızı azaldıkça katmanlar birbiri üzerine daha rahat yerleşeceğinden üretilen ürün rijit bir hal almaktadır. Bu numuneler nispeten küçük boyutta oldukları için 50 mm/s gibi bir hızda bile çok sağlıklı sonuçlar alınamamıştır. Örneğin, bu numuneler 10:1 ölçekte üretilmiş olsa idi, 50 mm/s baskı hızında bir katman oluşturulurken nozul numunenin bir ucundan diğeri ucuna gidene kadar yeterli soğuma gerçekleşecekti ve katmanlar birbiri üzerine daha sağlam yapışarak daha rijit bir yapı oluşturacaktı (Goulas ve ark., 2019).

Ludmila Novakova ve arkadaşları, yapmış olduğu çalışmada ABS malzeme için çekme numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numuneler teste tabi tutulduğunda ortalama olarak mukavemet değeri 28,1 MPa olarak hesaplanmıştır (L. Novakova ve ark., 2013).

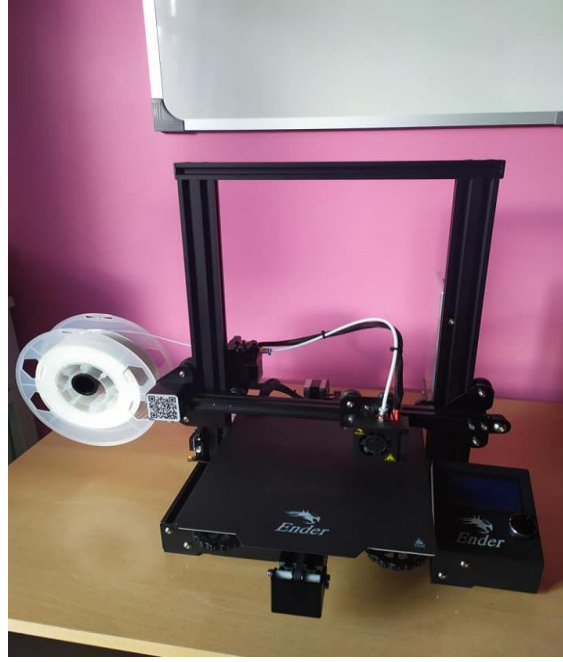
Hernandez ve arkadaşları ABS P430 filamentini kullanarak numuneler üretti ve eğilme, basma, çekme testlerine tabi tuttu. Çekme mukavemeti için belirgin bir fark bulunmaz iken, basma ve eğilme mukavemetinde 0 derece XY en mukavemetli; 45 derece XY mukavemeti en düşük malzeme olmuştur (Hernandez ve ark., 2016).

Nozul çap değerinin değişmesi malzemenin kalitesini ve yazdırma prosesini etkileyen bir değişkendir (Lanzotti ve ark., 2015).

Manikandan ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada nozul geometrisinin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kare nozul tipinin, daire şeklindeki nozul tipine göre basma mukavemeti daha yüksek baskılar (yaklaşık %12) yaptığı sonucuna ulaşmışlardır (Manikandan ve ark., 2020).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, Ender 3 Pro yazıcıyla PLA filament kullanılarak ASTM D790 standardına uygun şekilde üç noktada eğme testi numuneleri üretilmiştir. Shimadzu test cihazında üç noktada eğilme testine tabi tutulan numuneler için kuvvet - şekil değiştirme, gerilme – gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Akma gerilmesi, maksimum eğilme gerilmesi, rezilyans, tokluk, elastiklik modülü, numunelerin yazdırma süreleri kıyaslanmıştır.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan üç boyutlu yazıcı, Ender 3 Pro

3.1 Numunelerin Üretim Prosesi

Üretilen numunelerin ölçüleri ASTM D790 standardında belirtilmektedir. Mekanik özellikleri belirleyen unsur filamentlerin malzemesi ve baskı parametreleridir. Numunelerin hepsi, kıyaslama yapabilmek için özdeş kalite, marka ve renkte PLA filament kullanılarak üretilmiştir. Eğer ki parça yük altında ve baskı halinde çalışıyor ise yüksek doluluk oranı, düşük katman kalınlığı değerlerinde üretilmelidir. Yük taşımayan ve mukavemetin önemsiz olduğu yerlerde kullanılan süs eşyası gibi parçalar % 0-30 doluluk oranlarında ve büyük katman kalınlığı değerlerinde üretilebilir. Genel olarak katman kalınlığı azaldıkça ve doluluk oranı arttıkça malzemenin dayanımının artması beklenmektedir.

ASTM D790 standardına uygun şekilde SolidWorks programı kullanılarak katı modeli oluşturulan numuneler, Simplfy 3D dilimleme programına aktarılarak numuneler yazdırmaya hazır hale getirilmiştir. Ardından farklı parametrelerde üretilen numuneler, standartlara uygun şekilde üç noktada eğilme testine tabi tutularak mekanik değerler elde edilmiştir.

Testlerde alınacak sonuçların sağlıklı olması açısından numuneler kumpas ile ölçülmüştür ve ölçülerin ASTM D790 standardına uygunluğu onaylanmıştır.

3.1.1 Tiplerine Göre Deney Numuneleri

Yapılan testler için üretilen numuneler toplamda 10 farklı çeşittedir. Ancak 2 numaralı numune grubu tüm parametreler için ortaktır.

Tablo 3.1: Deney numunelerinin baskı parametresi değeri

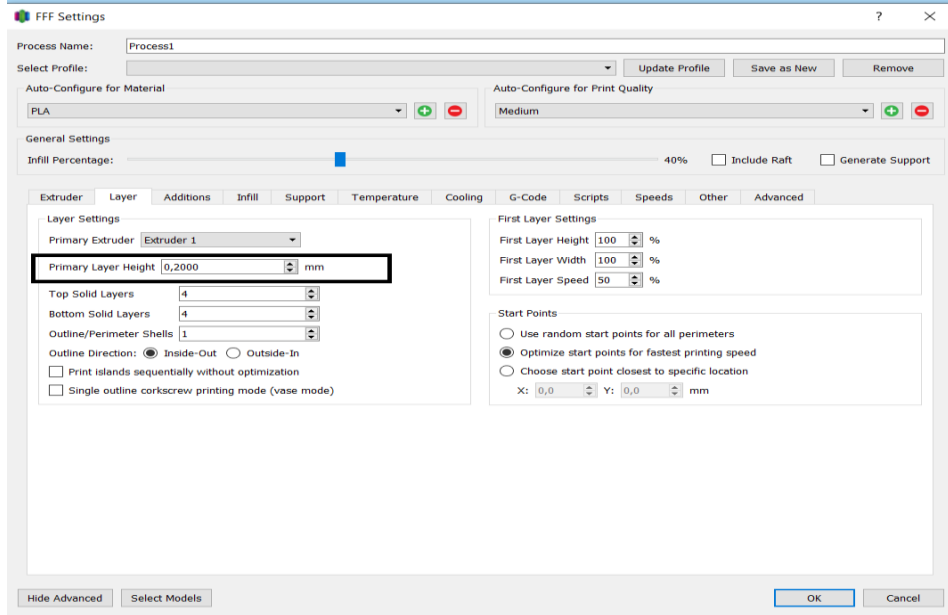
DENEY NO	KATMAN KALINLIĞI (mm)	DOLULUK ORANI (%)	TARAMA AÇISI (°)	NOZUL SICAKLIĞI (°C)
1	0,15	40	±45	210
2	0,2	40	±45	210
3	0,25	40	±45	210
4	0,3	40	±45	210
5	0,2	20	±45	210
6	0,2	60	±45	210
7	0,2	80	±45	210
8	0,2	40	0/90	210
9	0,2	40	±45	220
10	0,2	40	±45	230

Üretilen numunelerden elde edilen test sonuçları ile eğilme gerilmesi, maksimum yük, şekil değiştirme ve elastiklik modülü hesaplanmıştır. Elde edilen değerler birbiri ile kıyaslandığı gibi, deneysel veriler ile formüller ile teyit edilmiştir. Numuneler arasında mekanik değerler arasında ciddi farklar oluşması ve testin daha uygun, tutarlı sonuçlar vermesi açısından koşullar sabit olarak tutulmuştur. Ortam sıcaklığı sabit olacak şekilde numune üretimi yapılmıştır. Ayrıca, üç boyutlu yazıcı rijit şekilde baskı yapacak şekilde bir masaya monte edilmiştir.

Bu çalışmada katman kalınlığı, nozul sıcaklığı, doluluk oranı ve tarama yönünün malzemenin eğilme davranışına etkisi incelenecektir. Katman kalınlığı için 0,15, 0,20, 0,25, 0,3 mm değerlerine sahip numuneler, nozul sıcaklığı için 210, 220, 230 °C'deki numuneler, doluluk oranı için %20, 40, 60, 80 oranındaki numuneler ve tarama yönü içinse 0/90° ve ±45°'deki numuneler üretilmiştir. Numune grubu 2, üretim şekli yönünden tüm parametreler için ortaktır. Testi yapılan numune gruplarını katman kalınlığına göre (1-2-3-4), doluluk oranına göre (2-5-6-7), tarama açısına göre (2-8) ve nozul sıcaklığı değerine göre ise (2-9-10) olarak ayrılmaktadır.

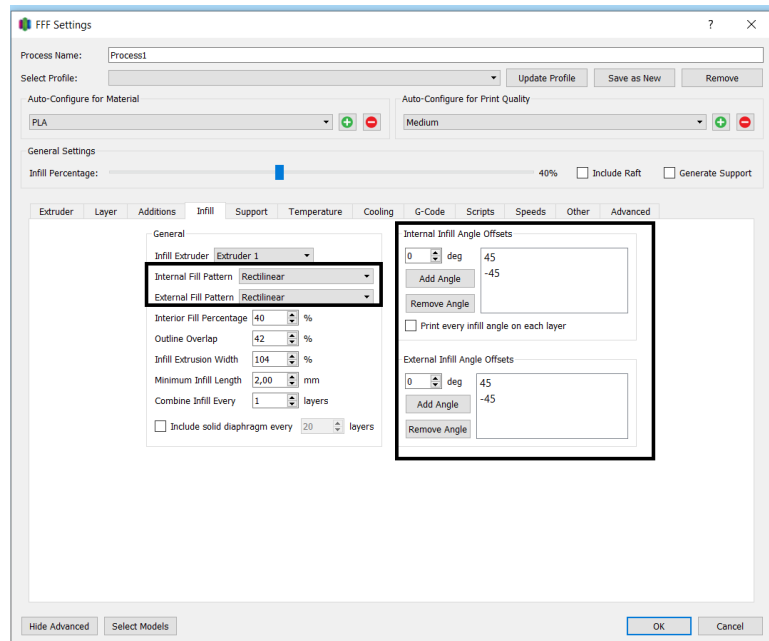
3.1.2 Baskı Parametreleri ve Simplfy 3D Yazılımında Baskı Parametresi Ayarları

Katman Kalınlığı: FDM teknolojisinde kullanılan yöntem değişik hammaddelerin eritilerek katmanlar oluşturmaya dayanır. Oluşturulan ilk katman üzerine yeni katmanlar eklenerek ürün son haline getirilir. Katman kalınlığı, üst üste binen katmanların her birinin kalınlık ölçüsüdür.



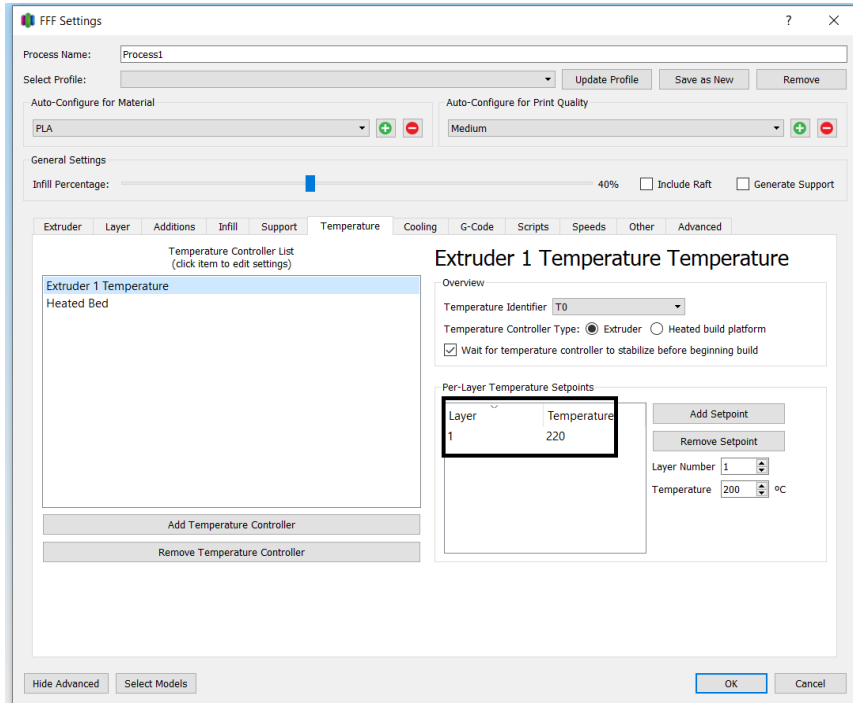
Şekil 3.2. Simplfy 3D programı için katman kalınlığı ayarı

Tarama açısı: Tarama açısı, katmanların oluşması esnasındaki yönü ifade eder. $\pm 45^\circ$, $0/90^\circ$ gibi standart değerler alabileceği gibi tasarımcının insiyatifine göre açılar değişebilir.



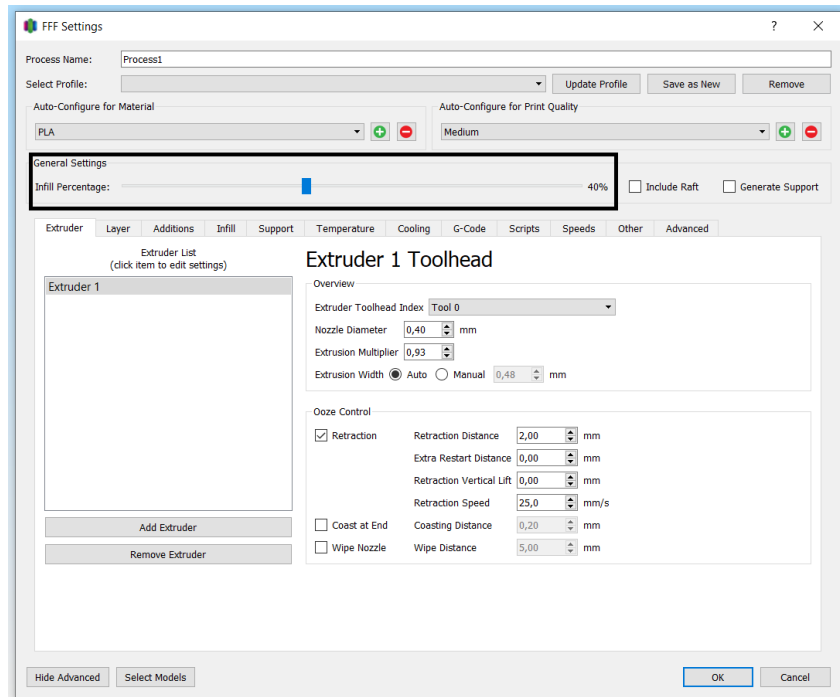
Şekil 3.3. Simplfy 3D programı için dolgu deseni ve tarama açısı ayarı

Nozul sıcaklığı: Nozul, filamentin eridiği haznedir. Bu haznenin sıcaklığı üretilecek olan ürünün mekanik özelliklerine etki eder.



Şekil 3.4. Simplify 3D programı için nozul ve tabla sıcaklığı ayarı

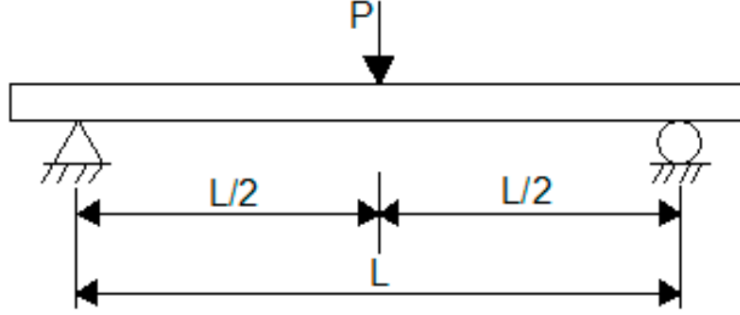
Doluluk oranı: Üretilecek olan ürünün ne yoğunlukta olacağı da ürünün mekanik özellikleri açısından önemlidir.



Şekil 3.5. Simplify 3D programı için doluluk oranı ayarı

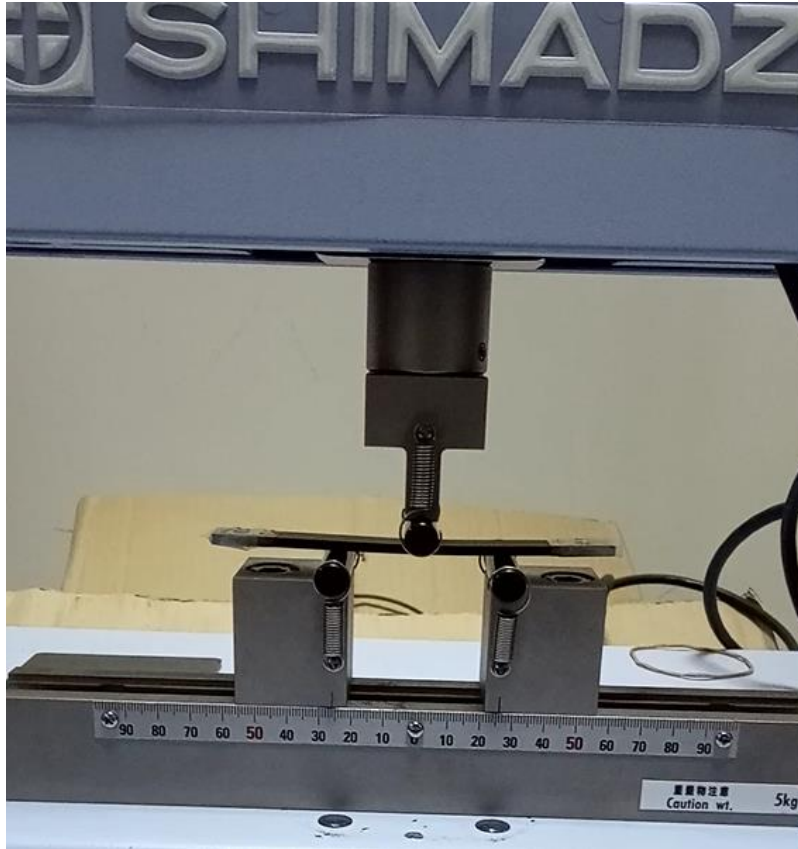
3.2 Numunelerin Üç Noktada Eğilme Testi

ASTM D790'a göre 125x12,7x3,2 mm ölçülerinde dikdörtgen kesitli bir parça halinde olan numuneler üretilmiştir (EK-1). Kalınlık ve mesnet açıklığı oranı 16 olarak alınmıştır. Testler 2 mm/dk hızında yapılmıştır (ASTM C,1958).

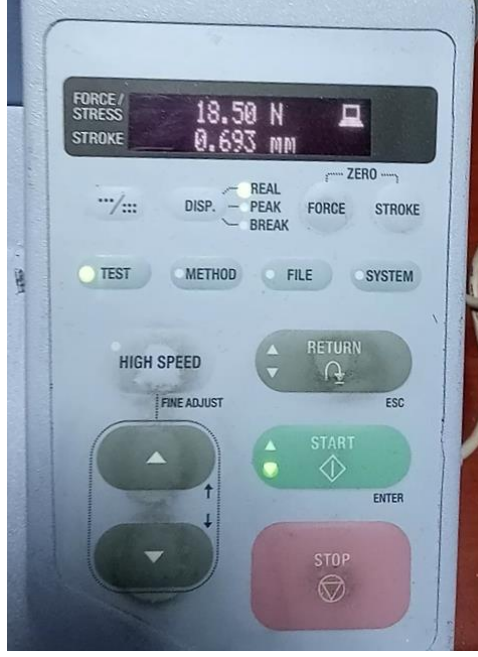


Şekil 3.6: Üç noktada eğilme testinin şematik gösterimi

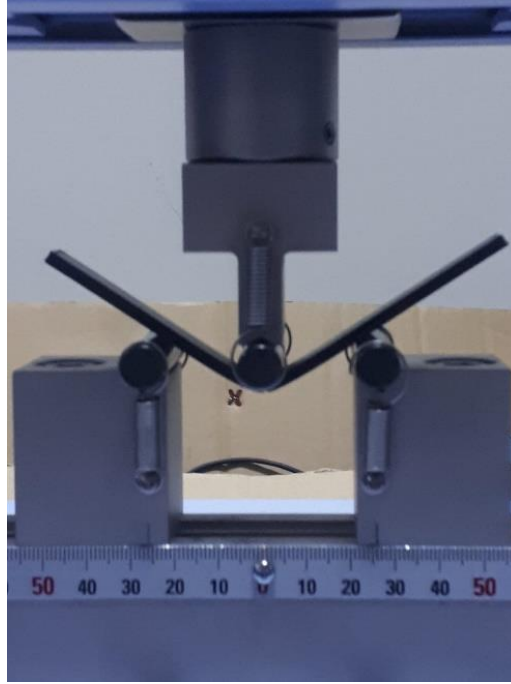
Test cihazı olarak Shimadzu marka makine kullanıldı. Test numuneleri ASTM D790 standardı gereğince beşer adet üretildi. 50 adet numunenin ve 10 farklı numune grubunun değerleri kaydedildi.



Şekil 3.7: Eğme testi başlangıcında bir numune



Şekil 3.8: Üç noktada eğilme testi yapılırken kontrol panelinin görüntüsü



Şekil 3.9: Eğme testi tamamlanan bir numune ve deforme olmuş hali

3.3 Numunelerin Mekanik Karakterizasyonu

Numuneye uygulanan yük değerleri P, sehim değerleri δ olarak rapora eklenmiştir.

$$\sigma_{\text{emax}} = \frac{3P_{\text{emax}}L}{2bh^2} \quad (3.1)$$

Maksimum eğilme gerilmesi (σ_{emax}) denklem 3.1'e göre hesaplanacaktır. P_{emax} numuneye uygulanan maksimum kuvvet (N), L mesnetler arası mesafe (mm), b numunenin eni (mm), h ise numunenin kalınlığıdır.

$$\epsilon_{bmax} = \frac{6\delta_e h}{L^2} \quad (3.2)$$

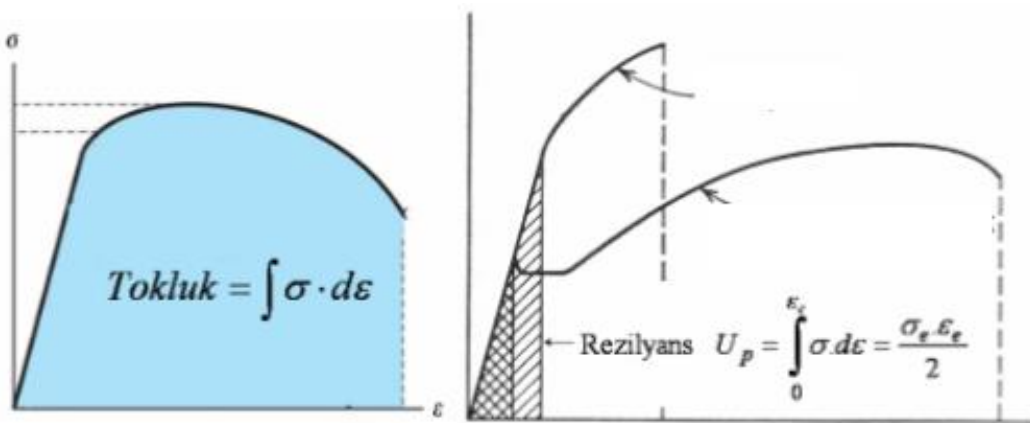
Numunenin şekil değişimi Denklem 3.2'ye göre hesaplanacaktır. En büyük şekil değiştirme miktarını (mm/mm), δ orta noktadaki sehimini (mm), L mesnetler arası açıklığı (mm) ve h ise numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir.

$$E_e = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.3)$$

Eğilme elastisite modülü ise Denklem 3.3'e göre hesaplanmaktadır Elastisite modülü (E), Young modülü olarak da bilinir ve gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin başlangıçtaki elastik deformasyon bölgesinin eğimi olarak tanımlanır.

Akma mukavemeti küçük bir miktar plastik deformasyon üretecek gerilme değeridir. Söz konusu plastik deformasyon miktarı $e=0.002$ ya da $e=0.001$ (% 0,2 ya da % 0.1 birim şekil değişimi) olarak alınır ve bu değerlerden gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin elastik kısmına çizilen paralel çizgiyle bulunan gerilme değeri, akma mukavemeti olarak alınır.

Elastik limit ya da orantı sınırının ölçülmesindeki pratik güçlüklerden dolayı, % 0,2 birim şekil değişim değerinden hareketle hesaplanan akma mukavemeti değeri, tasarım ve standardizasyon amaçlı olarak geniş ölçüde kullanılır ve $\sigma_{0,2}$ şeklinde gösterilir (Callister ve ark., 2020).



Şekil 3.10: Tokluk ve rezilyansın grafik olarak gösterimi

Rezilyans, bir malzemenin elastik deformasyon bölgesi içerisinde birim hacim başına enerji absorplama yeteneğinin bir ölçüsüdür. Gerilme- birim şekil değişimi eğrisinde, elastik

deformasyon bölgesinin alanı olarak tanımlanır, rezilyans modülü (U_R) ile gösterilir. Buna göre rezilyans (U_R),

$$U_R = \frac{\sigma_a e_e}{2} \quad (3.4)$$

Tokluk, bir malzemenin kırılmaya kadar ki deformasyon bölgeleri içerisinde birim hacim başına enerji absorbe etme yeteneğidir. Gerilme-birim şekil değişimi eğrisi altındaki toplam alan olarak tanımlanır, tokluk modülü (U_T) ile gösterilir. (Beer ve ark., 2002)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, üç boyutlu yazıcı kullanılarak PLA filament ile üretilen eğilme testi numuneleri üretilmiştir. Elde edilen veriler ile mekanik özellikler ile ilgili hesaplamalar ve grafiklerin oluşturulması sağlandı. Yapılan üç noktada eğilme testinin doğruluğunun teyidi için teorik hesaptan elde edilen sonuç ile deneysel verilerin tutarlı olması gerekmektedir. Bu sebeple Tablo 4.1 oluşturuldu ve verilerin kıyaslanması yapıldı. Tablodan da anlaşılacağı üzere iki değer arasındaki farklar ihmal edilebilecek kadar düşük seviyelerdedir.

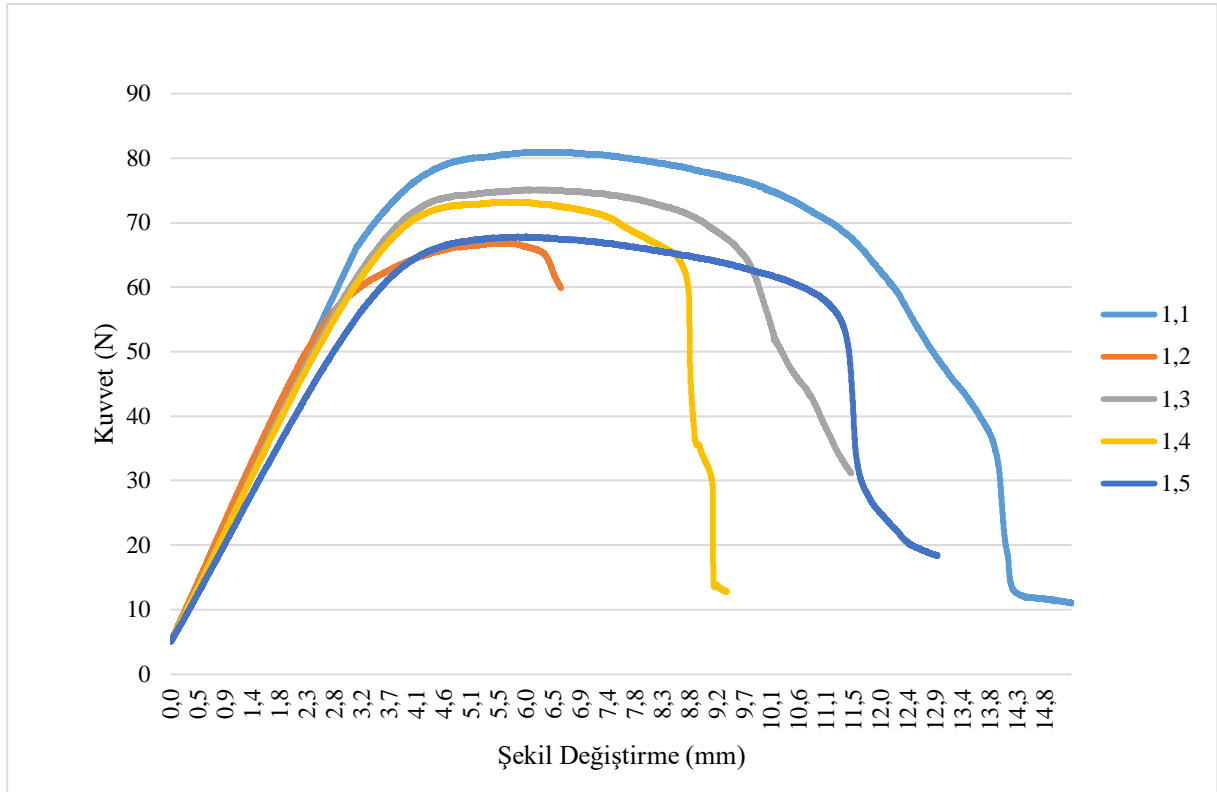
Tablo 4.1: Eğilme gerilmesinin deneysel ve teorik hesap değerlerinin mukayese tablosu(binde)

NUMUNE	DENEY (MPa)	TEORİK (MPa)	FARK(‰)	NUMUNE	DENEY (MPa)	TEORİK (MPa)	FARK(‰)
1 _ 1	48,5956	48,5956	0,0003	6 _ 1	52,7712	52,7712	0
1 _ 2	40,1215	40,1215	0,0001	6 _ 2	41,2348	41,2369	-0,0052
1 _ 3	45,0683	45,0683	0,0002	6 _ 3	52,2478	52,2478	0
1 _ 4	43,9338	43,9339	-0,0005	6 _ 4	47,6833	47,6833	0
1 _ 5	40,7183	40,7183	0,0001	6 _ 5	47,1685	47,1685	0,0001
2 _ 1	52,0552	52,0552	-0,0002	7 _ 1	52,7836	52,7836	0
2 _ 2	51,2735	51,2735	0,0004	7 _ 2	44,8824	44,8824	0
2 _ 3	46,6318	46,6318	0	7 _ 3	53,3298	53,3298	0
2 _ 4	51,8302	51,8302	-0,0001	7 _ 4	49,3840	49,3840	0,0001
2 _ 5	45,4239	45,4239	0,0006	7 _ 5	52,9323	52,9323	0
3 _ 1	44,4439	44,4439	0	8 _ 1	42,7126	42,7127	0
3 _ 2	38,7258	38,7259	-0,0005	8 _ 2	48,6776	48,6776	0
3 _ 3	45,7319	45,7318	0,0008	8 _ 3	43,3018	43,3018	0
3 _ 4	41,8556	41,8556	-0,0001	8 _ 4	36,9880	36,9880	0,0001
3 _ 5	46,2714	46,2714	0,0003	8 _ 5	46,9740	46,9740	0
4 _ 1	45,5116	45,5116	0,0003	9 _ 1	46,3019	46,3019	0,0001
4 _ 2	41,7307	41,7307	0	9 _ 2	47,0303	47,0303	0
4 _ 3	45,4897	45,4897	-0,0004	9 _ 3	46,4783	46,4783	0
4 _ 4	48,0322	48,0322	-0,0001	9 _ 4	47,2943	47,2943	0
4 _ 5	47,6956	47,6957	-0,0004	9 _ 5	47,0274	47,0274	0
5 _ 1	42,4057	42,4057	-0,0004	10 _ 1	45,7719	45,7719	0
5 _ 2	39,7993	39,7993	0,0006	10 _ 2	47,3306	47,3305	0,0001
5 _ 3	34,3787	34,3787	-0,0001	10 _ 3	48,5155	48,5155	0
5 _ 4	39,2826	39,2826	0,0004	10 _ 4	46,0464	46,0464	0
5 _ 5	42,2036	42,2036	0,0004	10 _ 5	46,6384	46,6384	0

Üç noktada eğilme testi sonucunda elde edilen gerilme değerleri ile teorik hesap ile elde edilen gerilme değerleri arasında ihmal edilebilecek seviyede farklar bulunmaktadır. Bu da yapılan

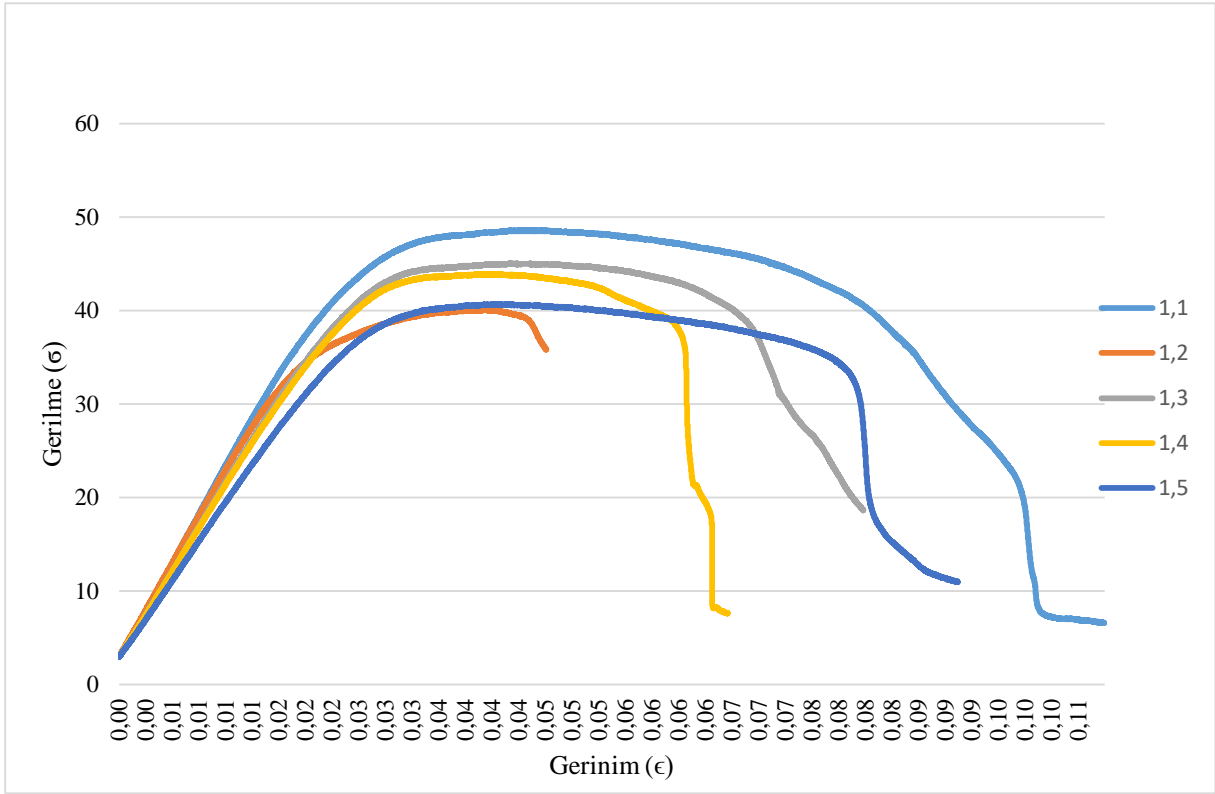
testin sağlıklı sonuçlar verdiğine dair bir sağlama yapılmasını sağlamaktadır. Ender 3 Pro yazıcı kullanılarak üç noktada eğilme testi için numuneler üretilmiştir. ASTM D790 standartlarına uygun ölçüde üretilen numunelere, aynı standartta belirtilen teknik değerlere göre üç noktada eğilme testi yapılmıştır. Aynı özelliğe sahip beşer adet numune üretilerek, bu testler sonucundaki ortalama değerler alınmıştır. Üretim, test ve yorumlama işlemlerinin tamamı ASTM D790 standardına göre yapılmıştır. Deneysel olarak elde edilen veriler ilgili formüllerde yerine yerleştirilerek; akma gerilmesi, maksimum eğilme gerilmesi, birim şekil değiştirme, elastiklik modülü, rezilyans, tokluk değerlerine ulaşılmıştır. Üretim sürecinde, numunelerin mekanik özelliğine ciddi oranda etki edecek şartlar ortadan kaldırılmıştır. Ortamın sıcaklığı da numunenin mekanik özelliklerine etkileyeceği için numuneler yakın tarihlerde ve saatlerde üretilmiştir. Üç boyutlu yazıcının titreşimini azaltmak için, yazıcının üstünde bulunduğu masa ile arasına aparatlar tutturularak sabitleme yapılmıştır. Böylelikle, daha dengeli ve titreşimsiz bir ortam oluşturulmuştur.

Grafik 4.1: 1 Numaralı numune grubuna ait kuvvet - şekil değiştirme grafiği



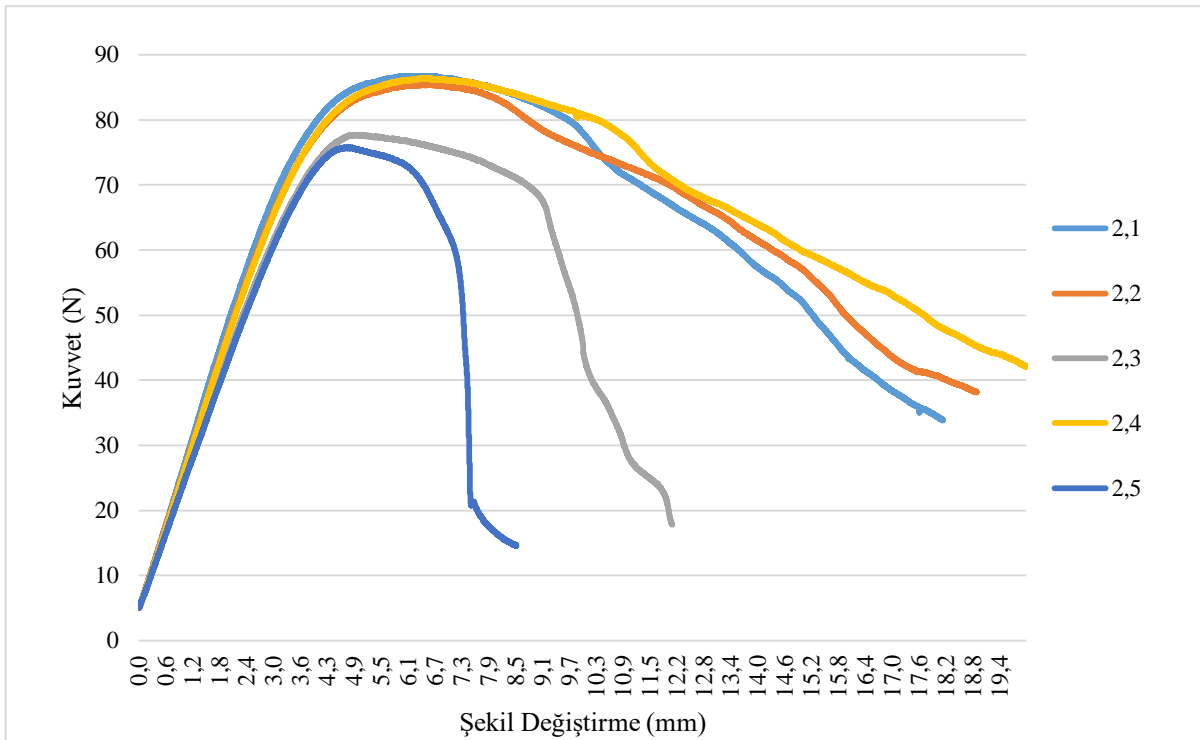
1 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 81 N, 66,9 N, 75,1 N, 73,2 N, 67,9 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehim değeri 6,49 mm, 5,60 mm, 6,05 mm, 5,78 mm ve 6 mm'dir.

Grafik 4.2: 1 Numaralı numune grubuna ait gerilme – gerinim grafiği



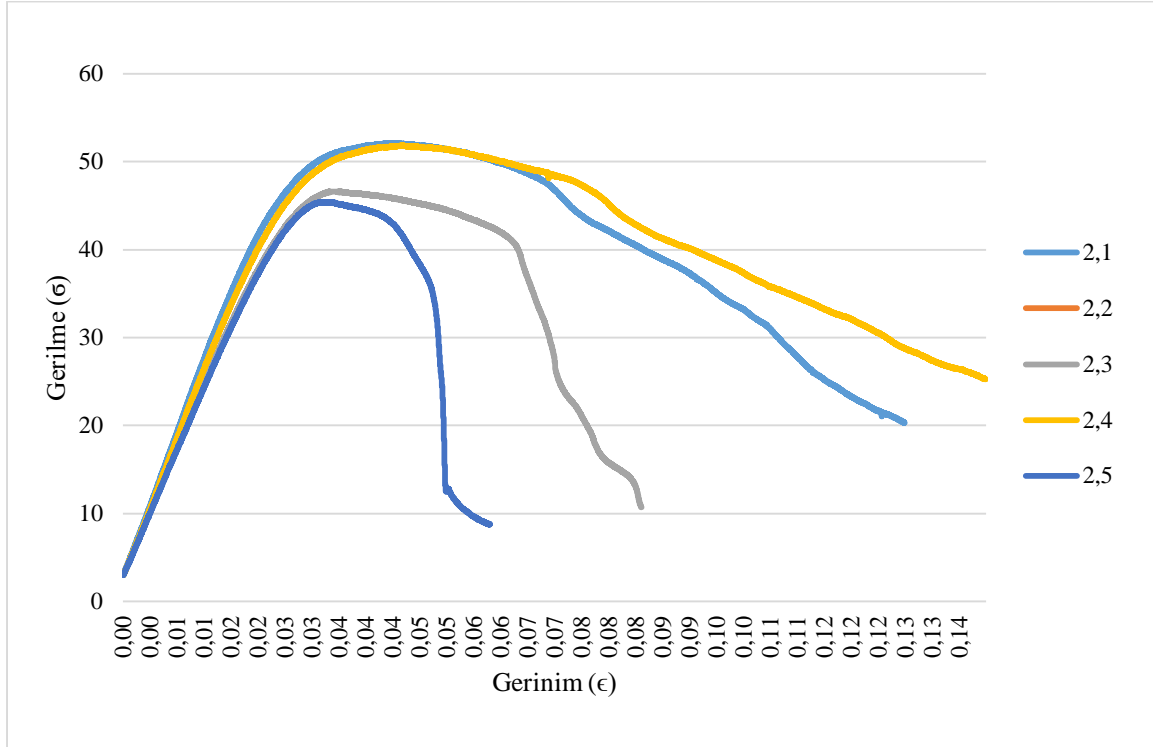
1 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değerleri 48,6 MPa, 40,1 MPa, 45 MPa, 43,9 MPa ve 40,7 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.3: 2 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değiştirme grafiği



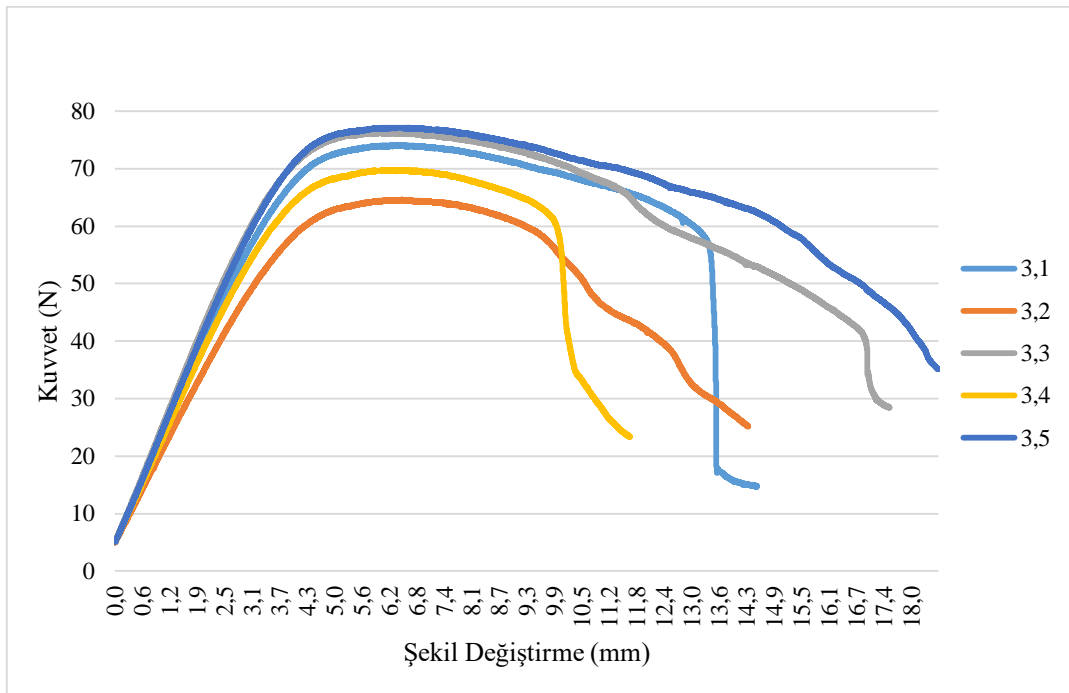
2 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 86,8 N,85,5 N, 77,7 N,86,4 N ve 75,7 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehım değeri 6,3 mm, 6,57 mm, 4,87 mm, 6,47 mm ve 4,66 mm'dir.

Grafik 4.4: 2 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



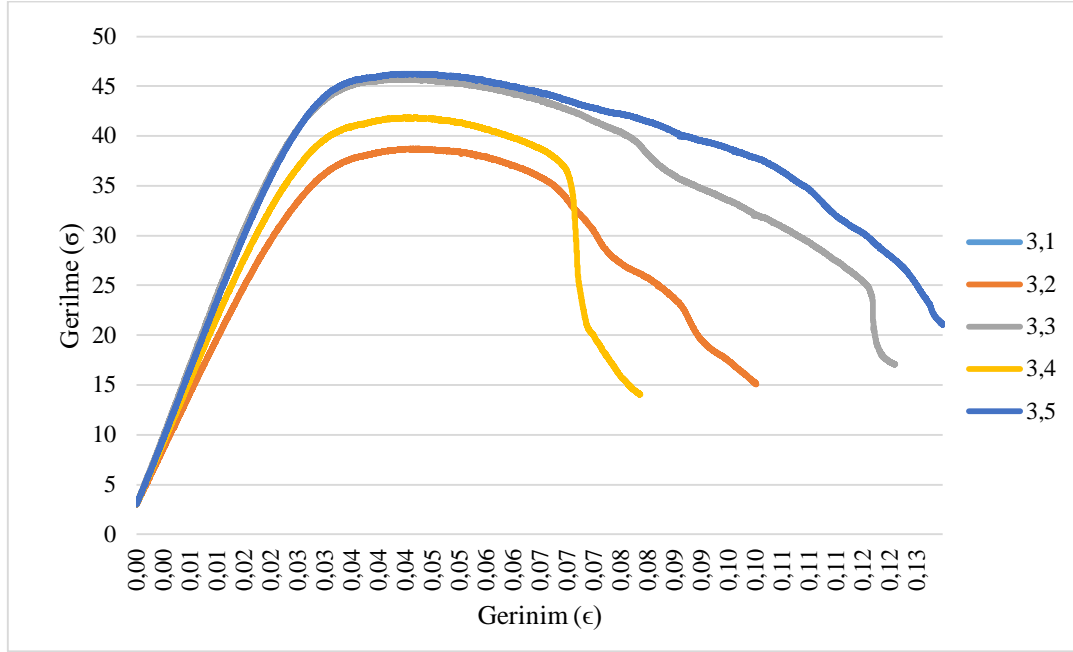
2 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değeri 52 MPa, 51,3 MPa,46,6 MPa,51,8 MPa ve 45,4 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.5: 3 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değıştirme grafiği



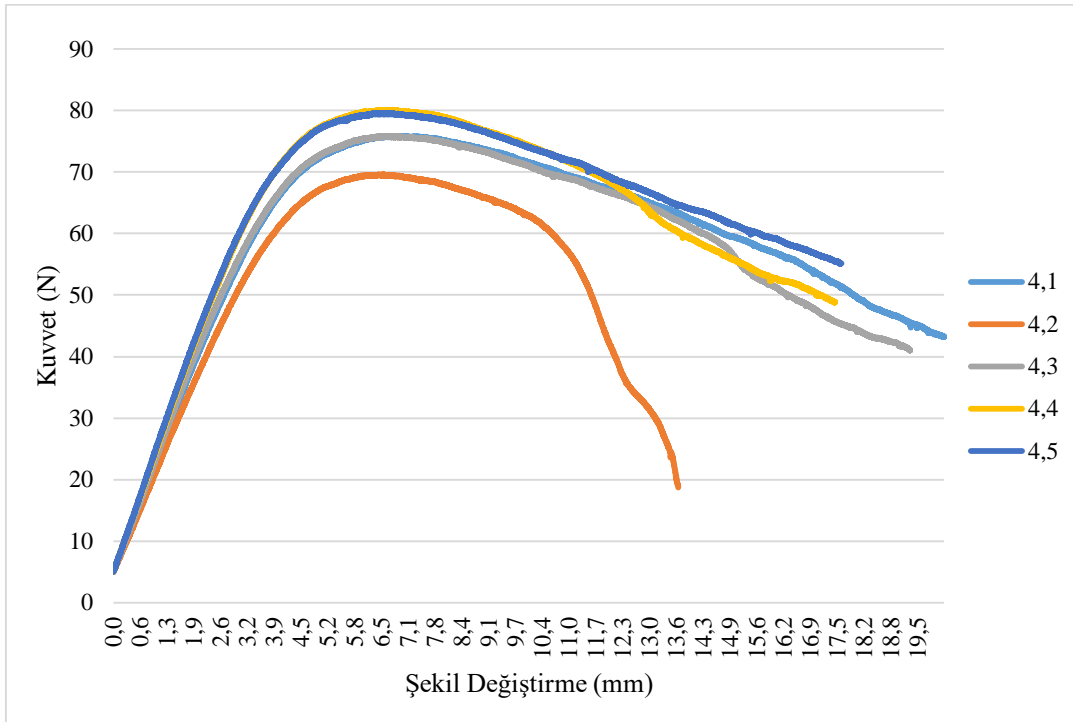
3 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 74,1 N, 64,5 N, 76,2 N, 69,7 N ve 77,1 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehım değeri 6,45 mm, 6,48 mm, 6 mm, 6,46 mm ve 6,45 mm'dir.

Grafik 4.6: 3 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



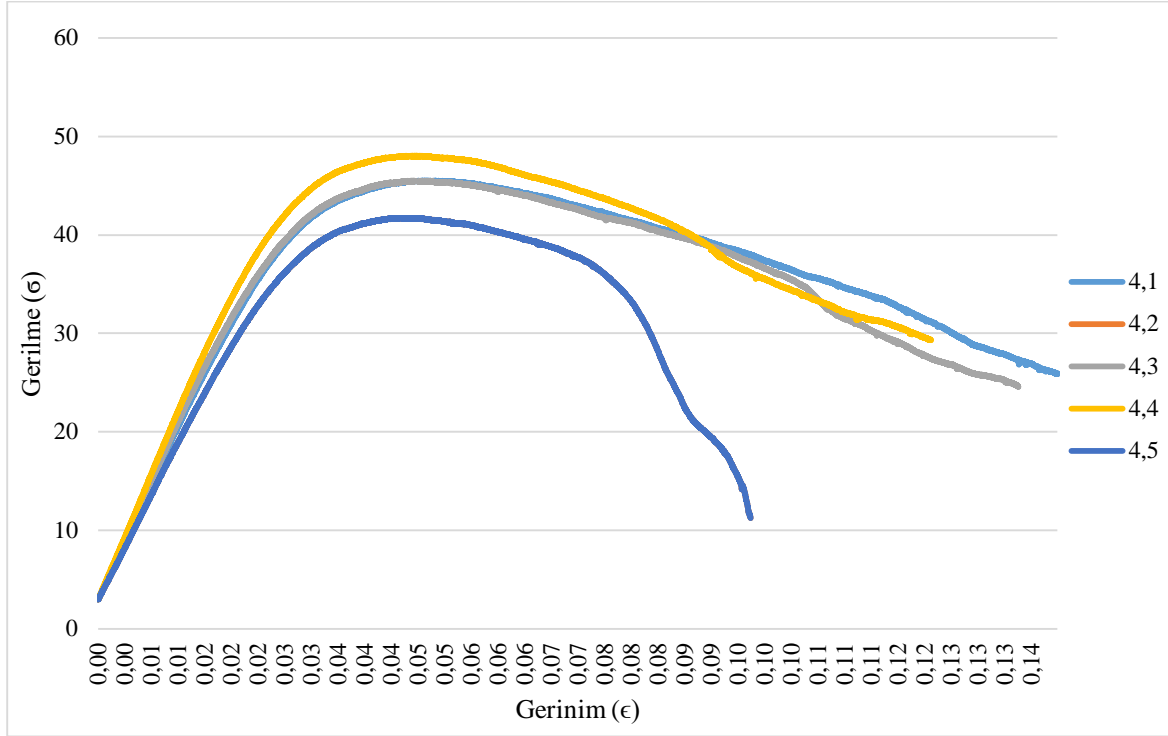
3 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değeri 44,4 MPa, 38,7 MPa, 45,7 MPa, 41,9 MPa ve 46,2 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.7: 4 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değıştirme grafiği



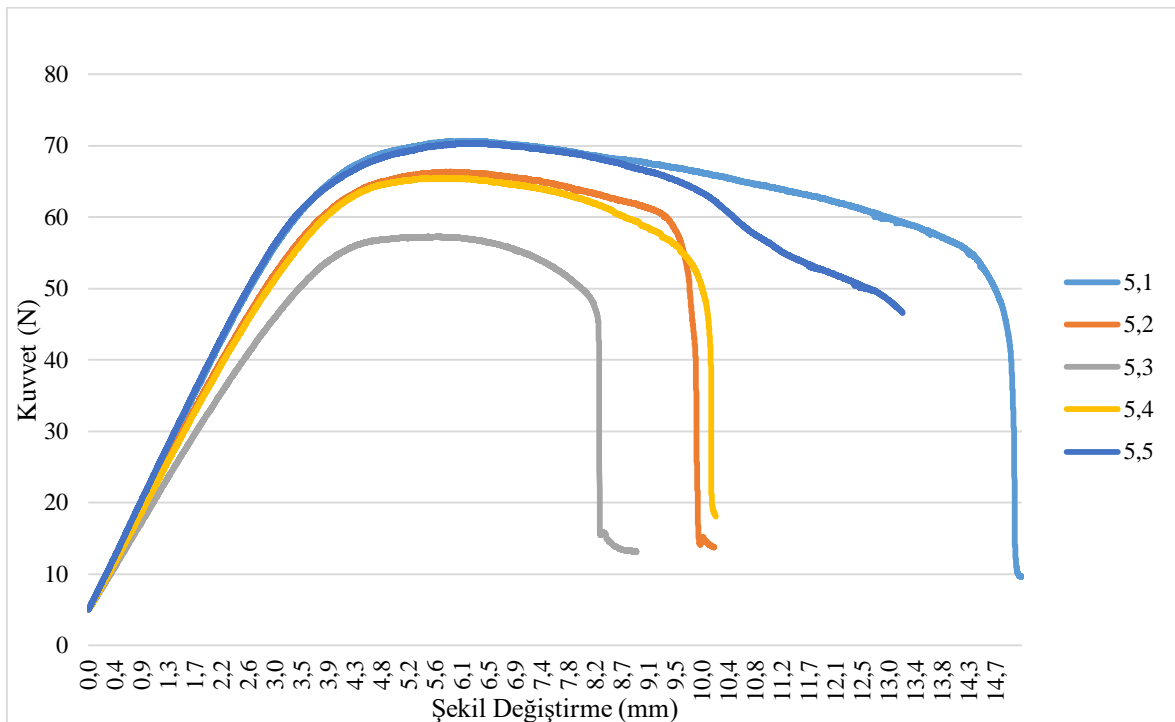
4 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 75,9 N, 69,6 N, 75,8 N, 80 N ve 79,5 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehim değeri 6,81 mm, 6,53 mm, 6,56 mm, 6,64 mm ve 6,6 mm'dir.

Grafik 4.8: 4 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



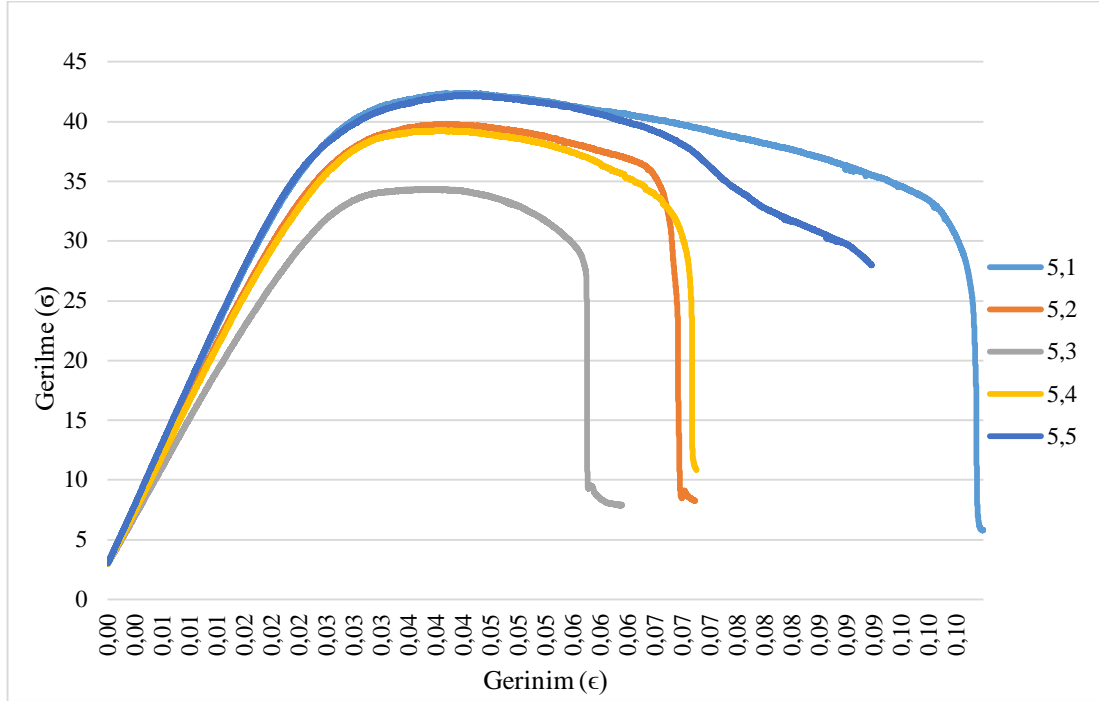
4 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değerleri 45,5 MPa, 41,7 MPa, 45,5 MPa, 48 MPa ve 47,7 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.9: 5 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değıştirme grafiği



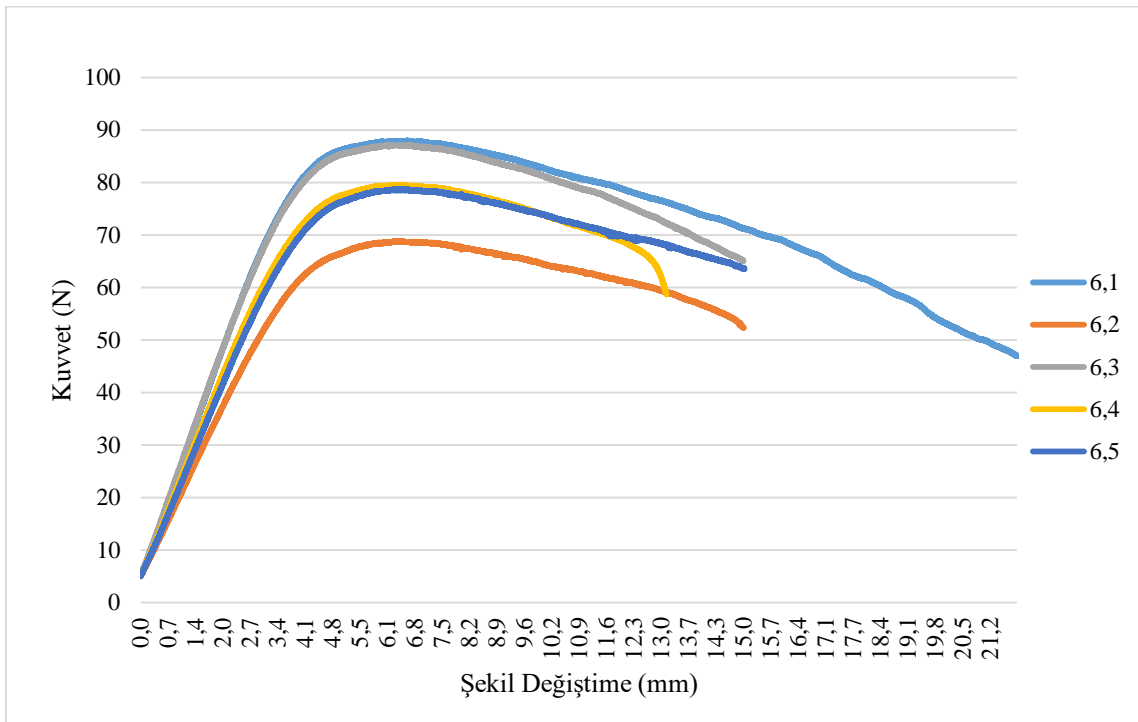
5 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 70,7 N, 66,4 N, 57,3 N, 65,5 N ve 70,3 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehîm değeri 6,1 mm, 5,9 mm, 5,6 mm, 5,8 mm ve 6,2 mm'dir.

Grafik 4.10: 5 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



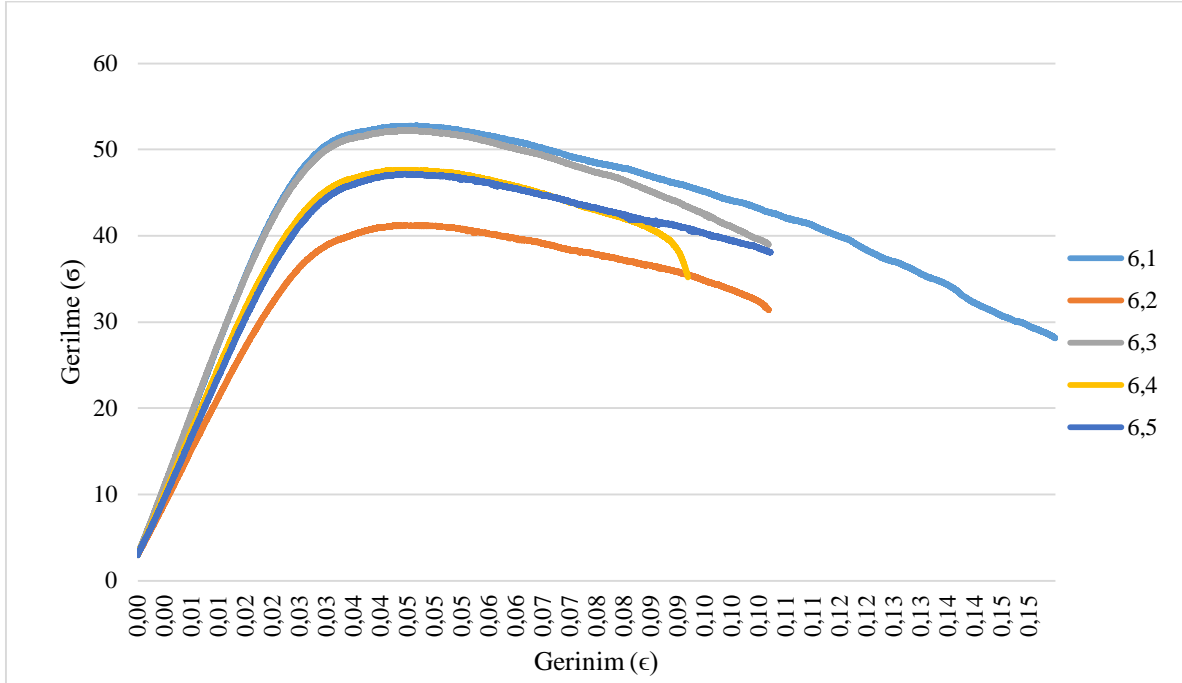
5 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değeri 42,4 MPa, 39,8 MPa, 34,4 MPa, 39,3 MPa ve 42,2 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.11: 6 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değıştirme grafiği



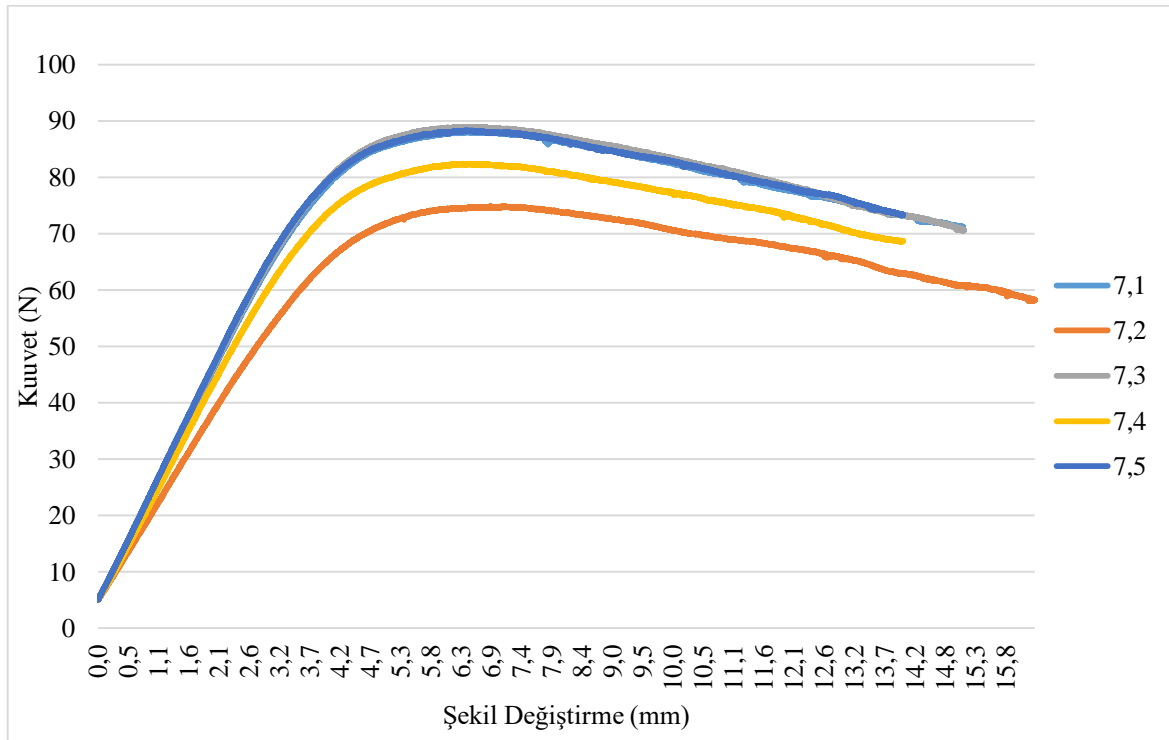
6 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 88 N, 87,1 N, 68,7 N, 79,5 N ve 78,6 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehim değeri 6,64 mm, 6,36 mm, 6,46 mm, 6,33 mm ve 6,38 mm'dir.

Grafik 4.12: 6 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



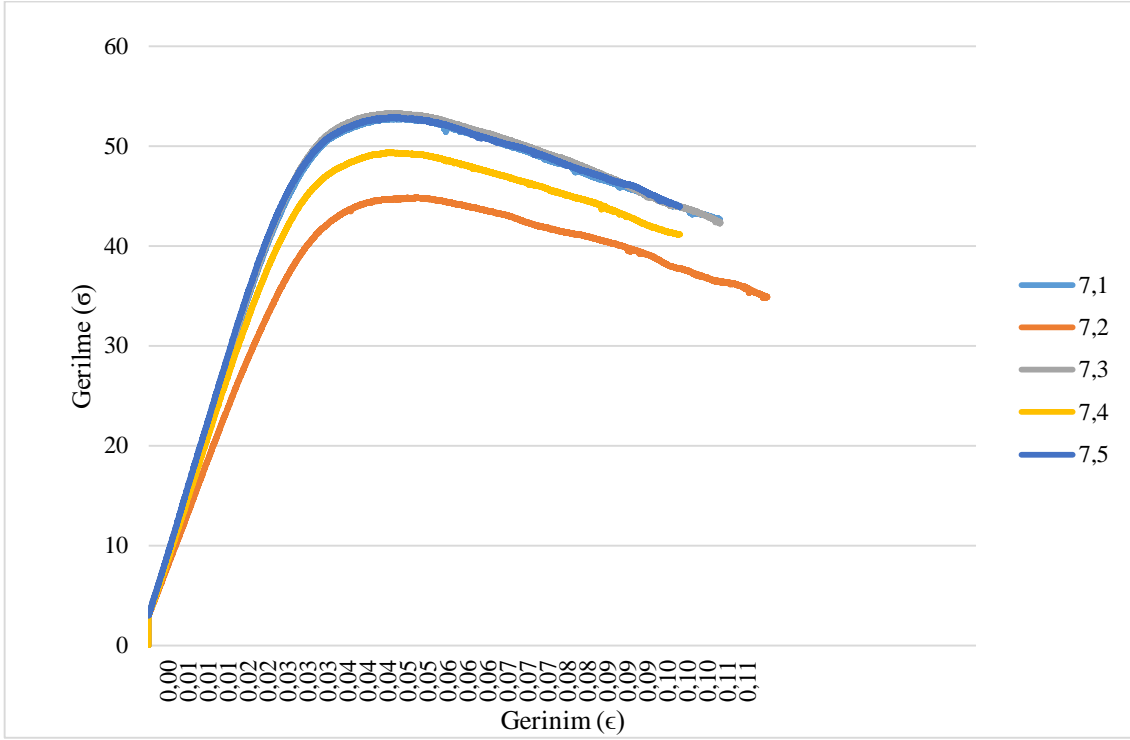
6 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değerleri 52,8 MPa, 41,2 MPa, 52,2 MPa, 47,7 MPa ve 47,2 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.13: 7 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değiştirme grafiği



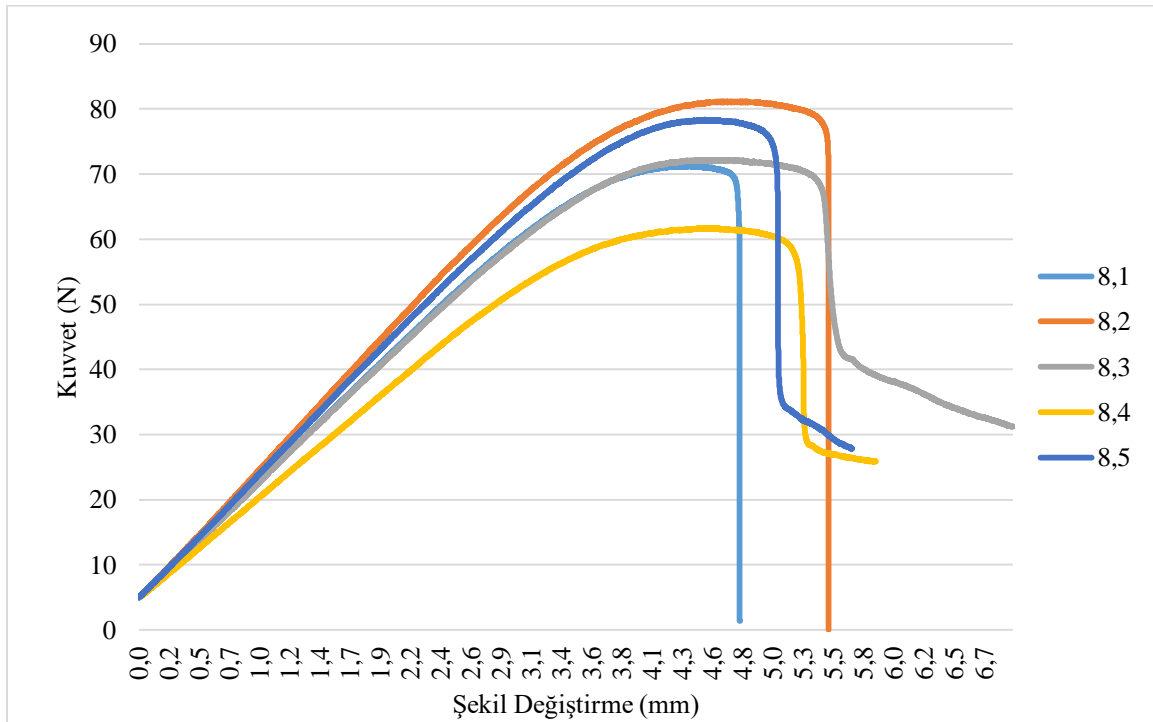
7 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 88 N, 74,8 N, 88,9 N, 82,3 N ve 88,2 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehim değeri 6,63 mm, 6,83 mm, 6,36 mm, 6,37 mm ve 6,50 mm'dir.

Grafik 4.14: 7 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



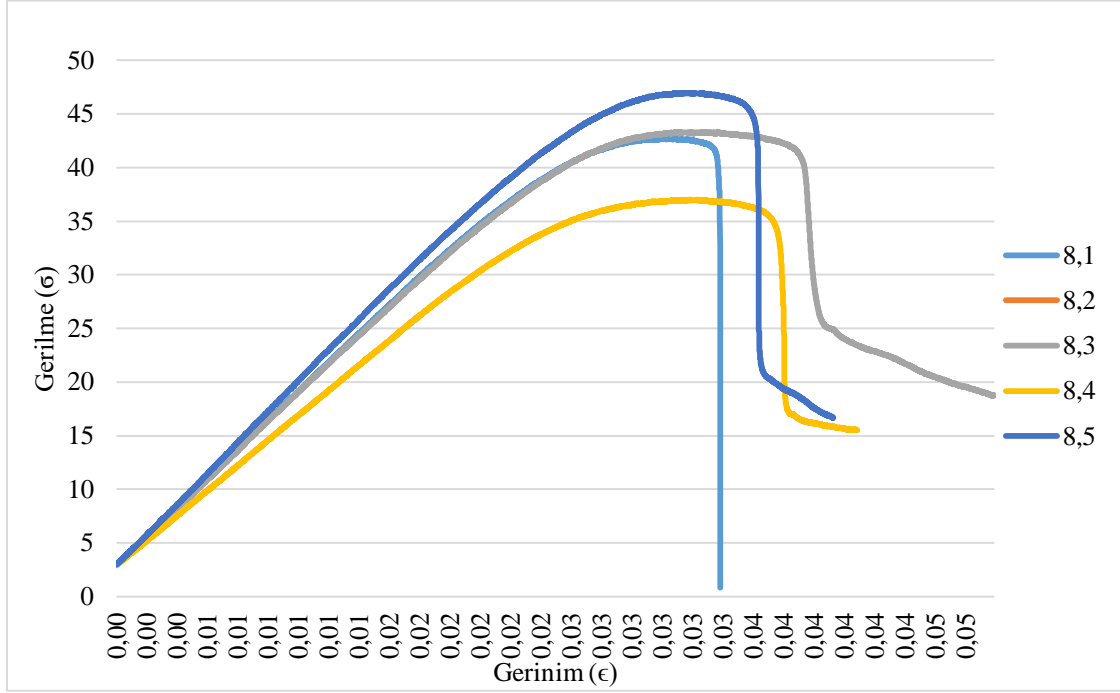
7 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değerleri 52,8 MPa, 44,9 MPa, 53,3 MPa, 49,4 MPa ve 52,9 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.15: 8 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değiştirme grafiği



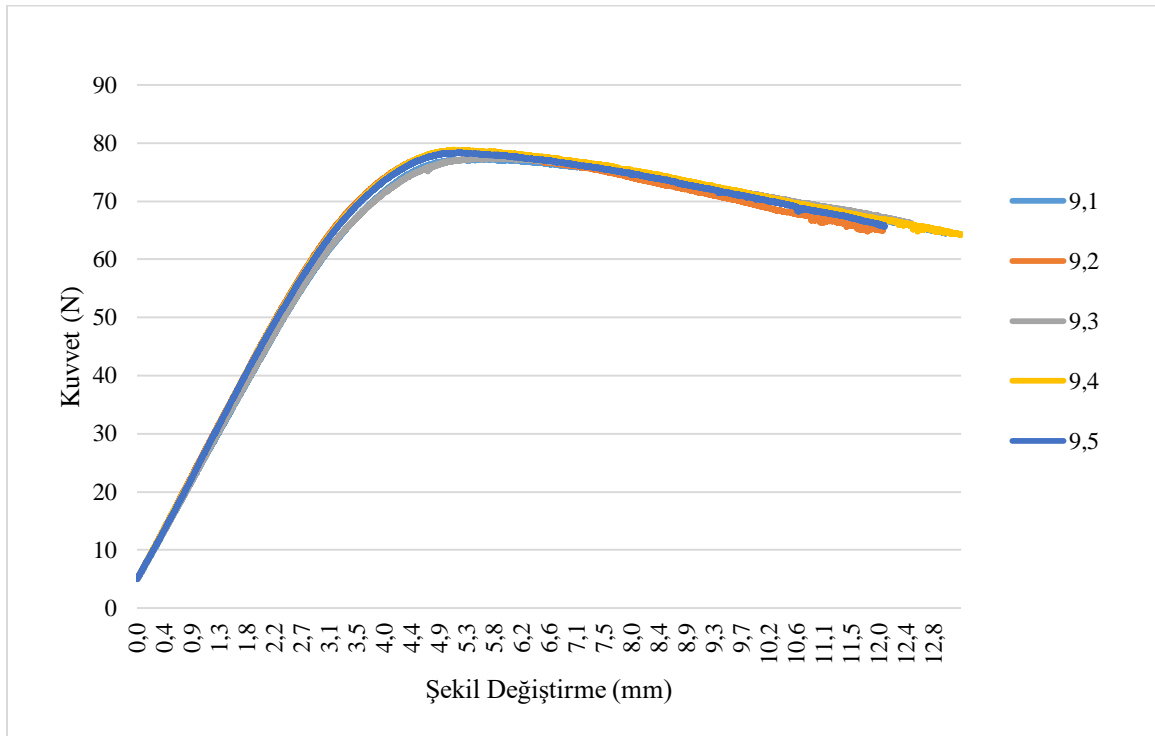
8 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 71,2 N, 81,2 N, 72,2 N, 61,6 N ve 78,3 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehım değeri 4,37 mm, 4,71 mm, 4,5 mm, 4,53 mm ve 4,49 mm'dir.

Grafik 4.16: 8 numaralı numune grubu için gerilme - gerinim grafiği



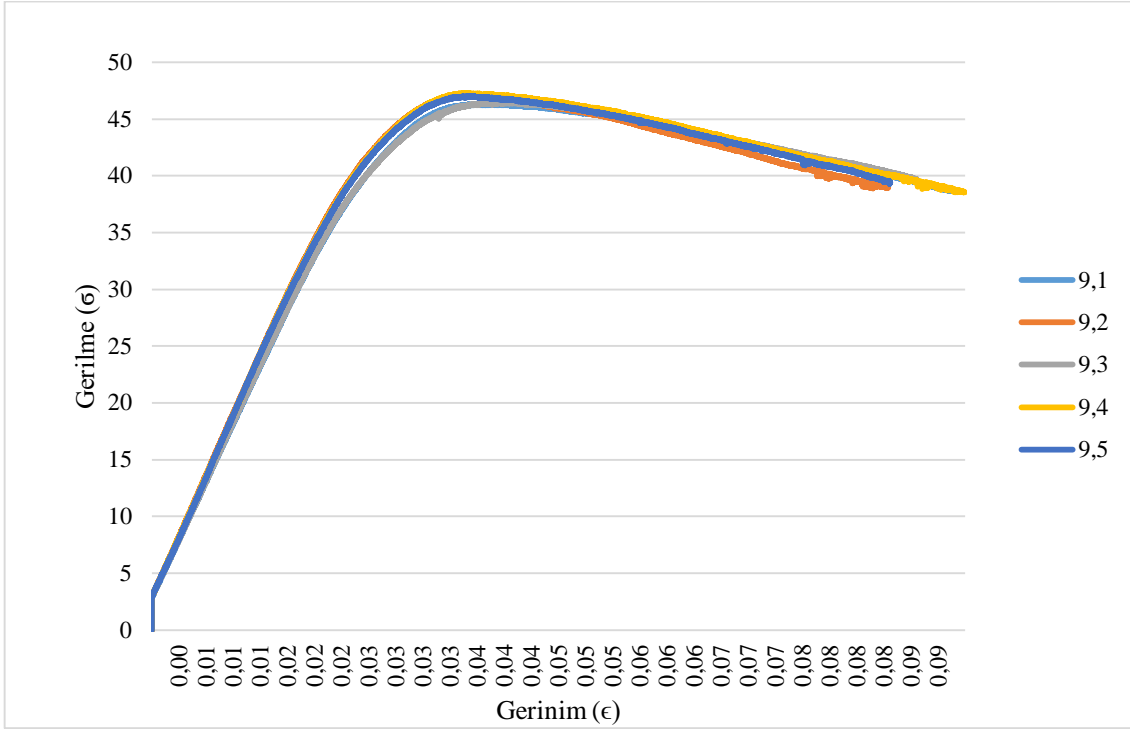
8 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değeri 42,7 MPa, 48,7 MPa, 43,3 MPa, 37 MPa ve 47 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.17: 9 numaralı numune grubu için kuvvet - şekil değıştirme grafiği



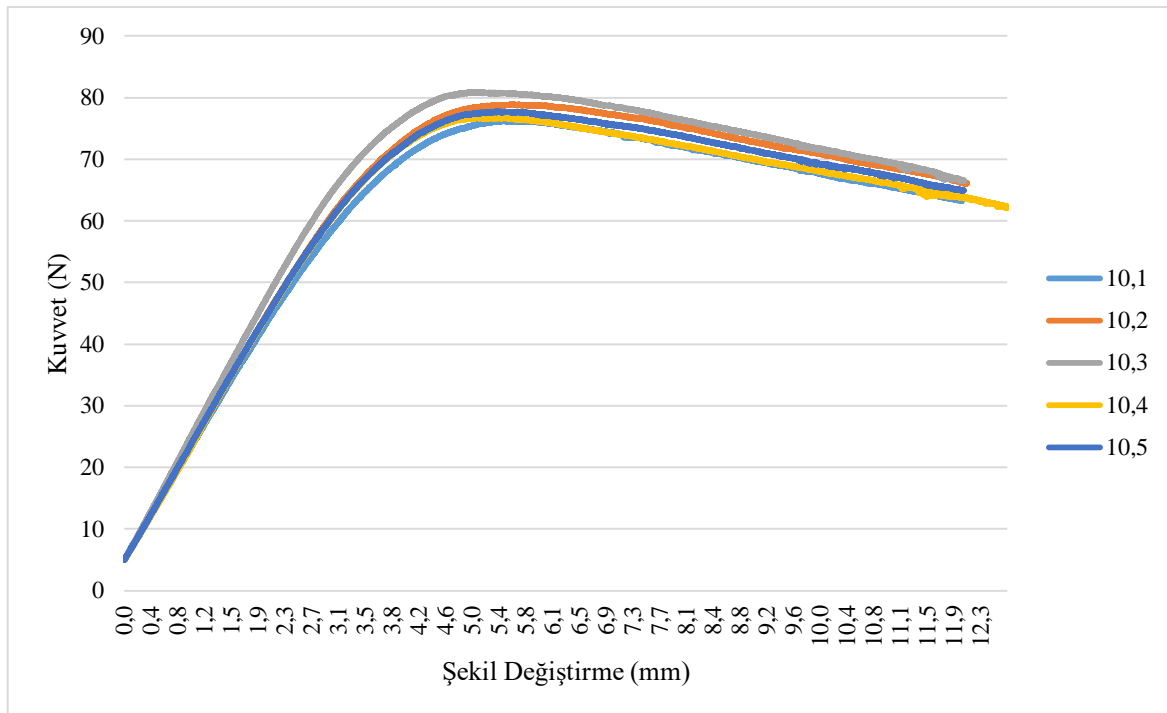
9 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 77,2 N, 78,4 N, 77,5 N, 78,8 N ve 78,4 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehım değeri 5,57 mm, 5,22 mm, 5,78 mm, 5,1 mm ve 5,22 mm'dir.

Grafik 4.18: 9 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği



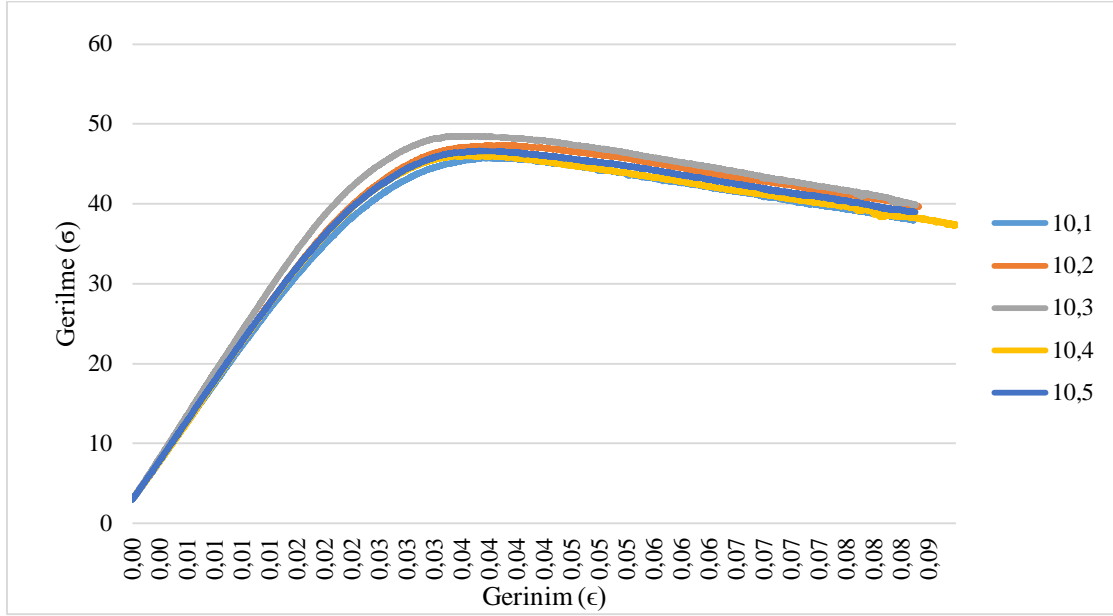
9 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değeri 46,3 MPa, 47 MPa, 46,5 MPa, 47,3 MPa ve 47 MPa elde edilmiştir.

Grafik 4.19: 10 numaralı numune grubu için kuvvet – şekil değıştirme grafiği



10 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum kuvvet değerleri 76,3 N, 78,9 N, 80,9 N, 76,8 N ve 77,7 N elde edilmiştir. Orta noktadaki sehim değeri 5,55 mm, 5,54 mm, 5,15 mm, 5,11 mm ve 5,39 mm'dir.

Grafik 4.20: 10 numaralı numune grubu için gerilme – gerinim grafiği

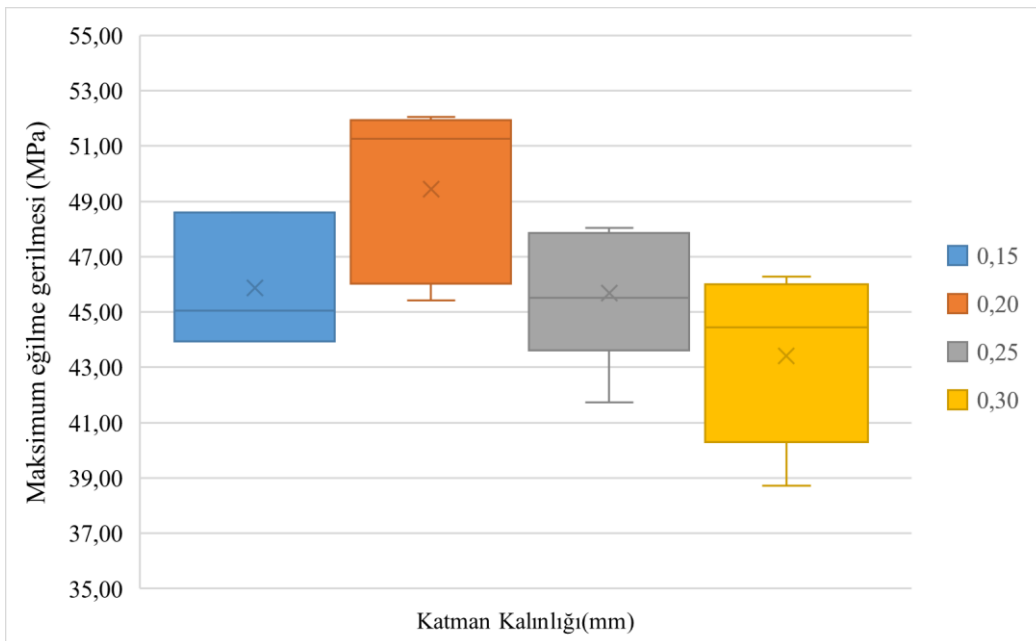


10 numaralı numune grubuna ait beş numune için maksimum eğilme gerilmesi değerleri 45,8 MPa, 47,3 MPa, 48,5 MPa, 46 MPa ve 46,6 MPa elde edilmiştir.

4.1 Katman Kalınlığına Göre Sonuçların Değerlendirilmesi

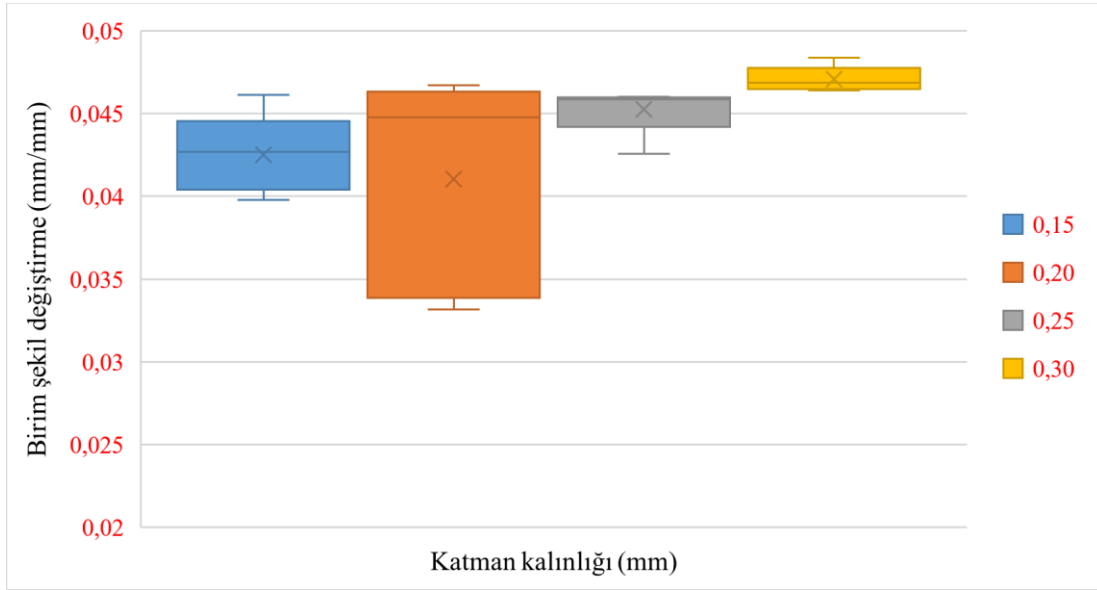
Katman kalınlığı parametresi için referans değerler olan 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 mm için maksimum eğilme gerilmesi, şekil değiştirme, elastiklik modülü, akma gerilmesi, rezilyans, tokluk ve baskı süresi değerleri kıyaslanmıştır.

Grafik 4.21. Maksimum eğilme gerilmesi – katman kalınlığı grafiği



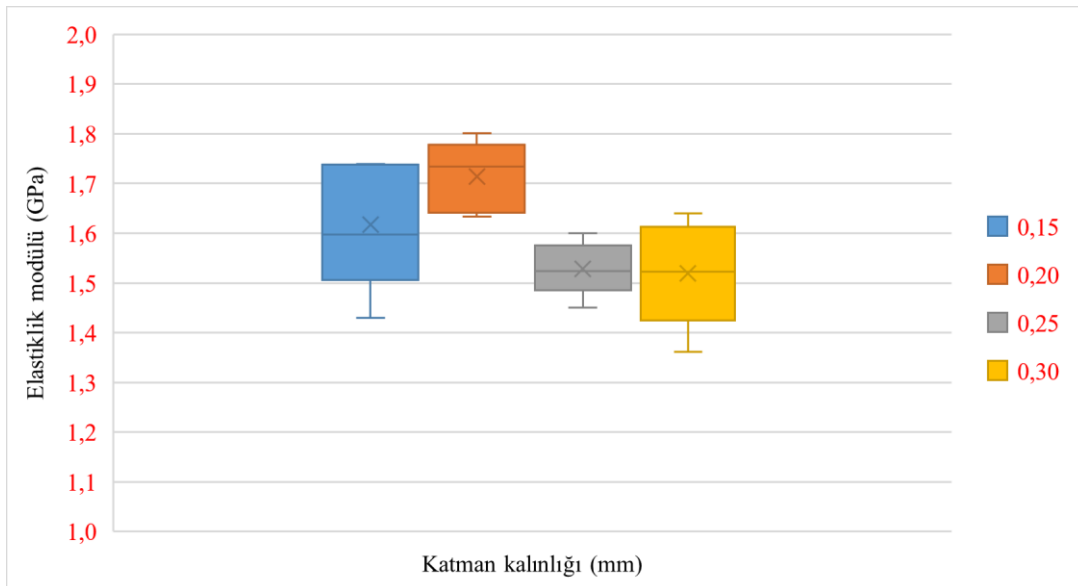
Katman kalınlığı parametresi için üretilen numunelerin değeri 0,15, 0,2, 0,25, 0,3 mm'dir. Bu numunelerde sırası ile 45,9, 49,44, 45,69, 43,41 MPa eğilme gerilmesi değeri ölçülmüştür. Katman kalınlığı 0,2 mm olan numunenin eğilme gerilmesi; 0,25 mm olana göre yaklaşık %8, 0,3mm olana göre yaklaşık %14 daha fazladır.

Grafik 4.22. Şekil değıştirme – katman kalınlığı grafiğı grafiğı



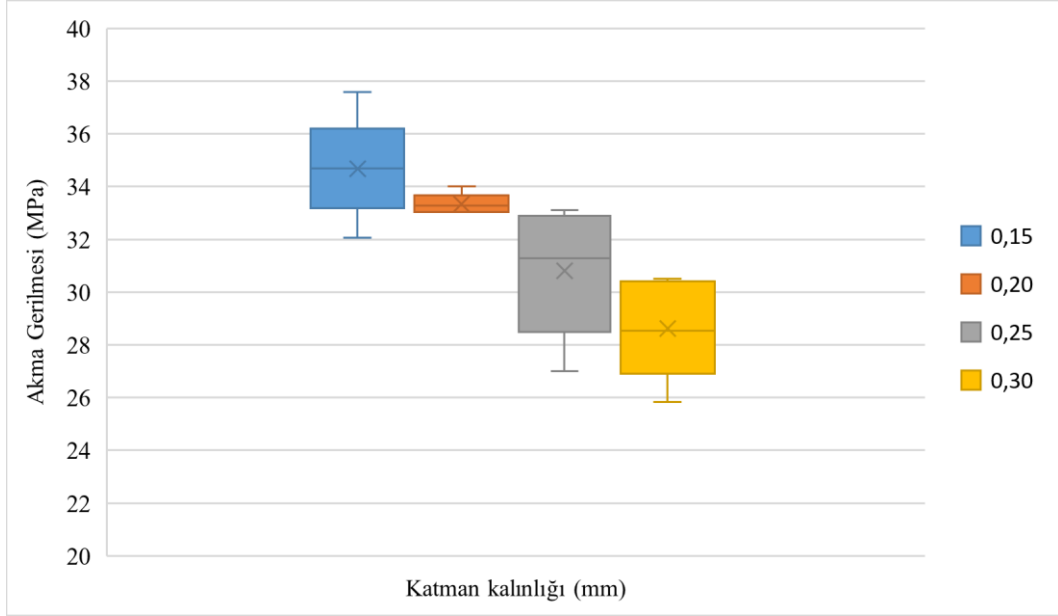
Maksimum kuvvet noktasındaki şekil değıştirme değeri ϵ_{bmax} , 0,2 mm kalınlıktan sonra katman kalınlığı artması ile birlikte artmaktadır. 0,15 mm katman kalınlığı ile 0,20 mm katman kalınlığı arasında %10 fark vardır. Katman kalınlığı 0,2 mm değeri için 0,41 mm/mm iken; 0,25 mm için %10, 0,30 mm değeri için yaklaşık %4 oranında artmıştır.

Grafik 4.23. Elastiklik modülü – katman kalınlığı grafiğı



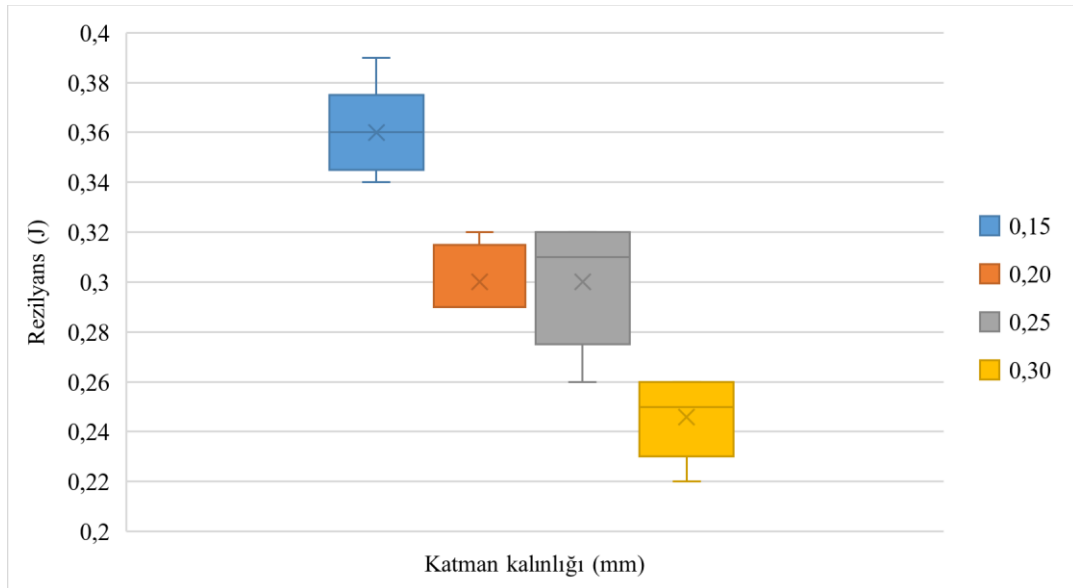
Elastiklik modülü de eğilme gerilmesine uygun bir şekilde sonuç vermiştir. Katman kalınlığı 0,2 mm değeri için en yüksek değer elde edilirken; bu değer katman kalınlığı 0,25 ve 0,30 mm değerlerinden yaklaşık %12 daha fazladır. Katman kalınlığı 0,15 mm için elde edilen değer ise ortanca değerdir.

Grafik 4.24.: Akma gerilmesi – katman kalınlığı grafiği



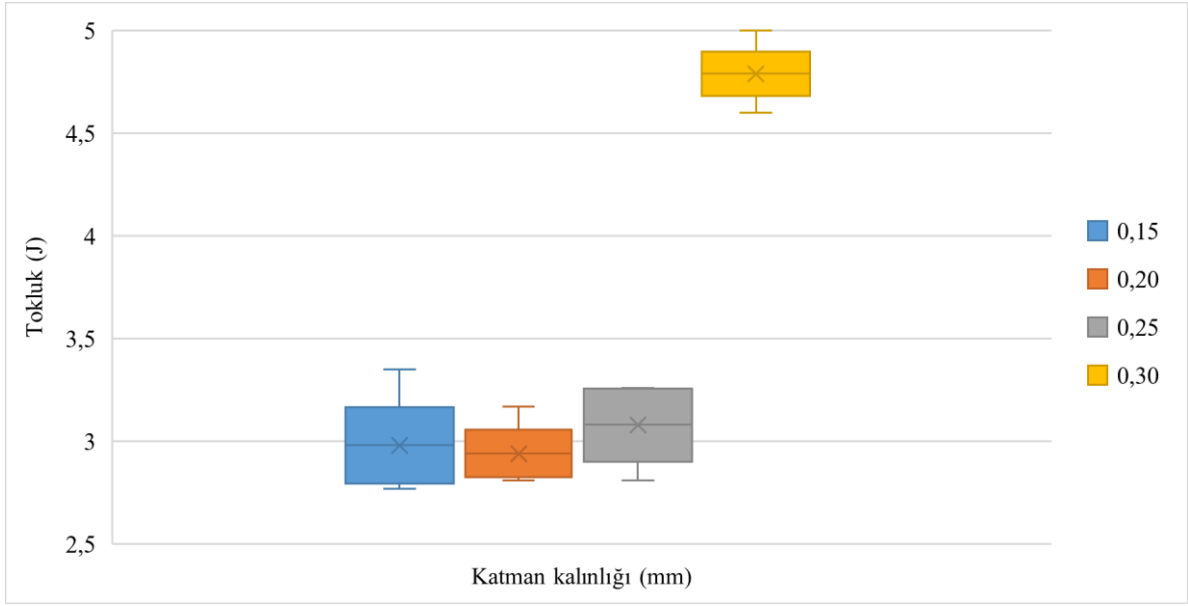
Katman kalınlığı parametresi için maksimum değer 0,15 mm katman kalınlığı için elde edilmiştir. Bu değer 0,20 mm için %4, 0,25 mm için %11,2 ve 0,30 mm için %17,5 azalma meydana gelmiştir.

Grafik 4.25.: Rezilyans – katman kalınlığı grafiği



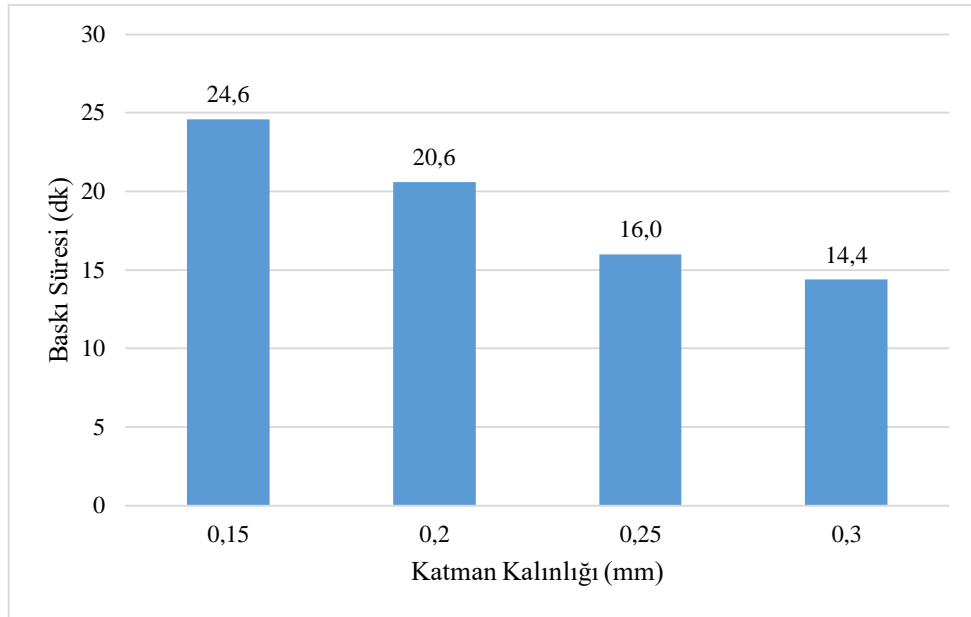
Rezilyans değeri için maksimum değer 0,15 mm katman kalınlığı için elde edilmiştir. 0,20 ve 0,25 mm katman kalınlığı için bu değer %16,5 civarında azalırken, 0,30 mm için %31 azalmıştır.

Grafik 4.26.: Tokluk – katman kalınlığı grafiği



Tokluk değeri için maksimum değeri 0,3 mm katman kalınlığı için 4,79 J elde edilmiştir. 0,25 3,08 J, 0,20 mm için 2,94 J, 0,15 mm için ise 2,98 J seviyesine gelmiştir.

Grafik 4.27: Baskı süresi – katman kalınlığı grafiği

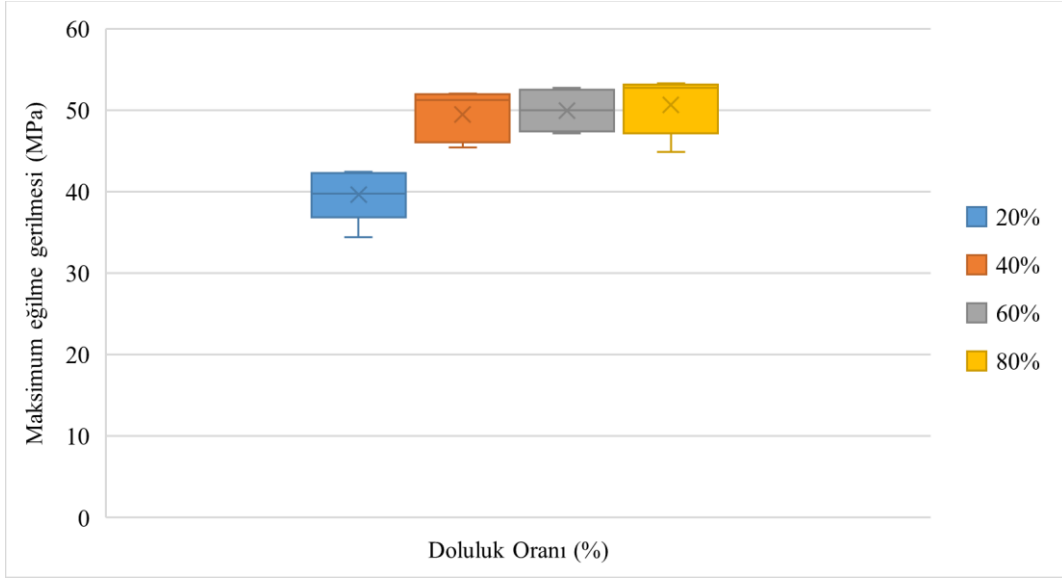


Katman kalınlığı parametresi büyüdükçe baskı süresi azalmaktadır. Sebebi ise katman kalınlığı arttıkça katman sayısının azalmasıdır. Uç değerler arasında yaklaşık %40 fark vardır.

4.2 Doluluk Oranına Göre Sonuçların Değerlendirilmesi

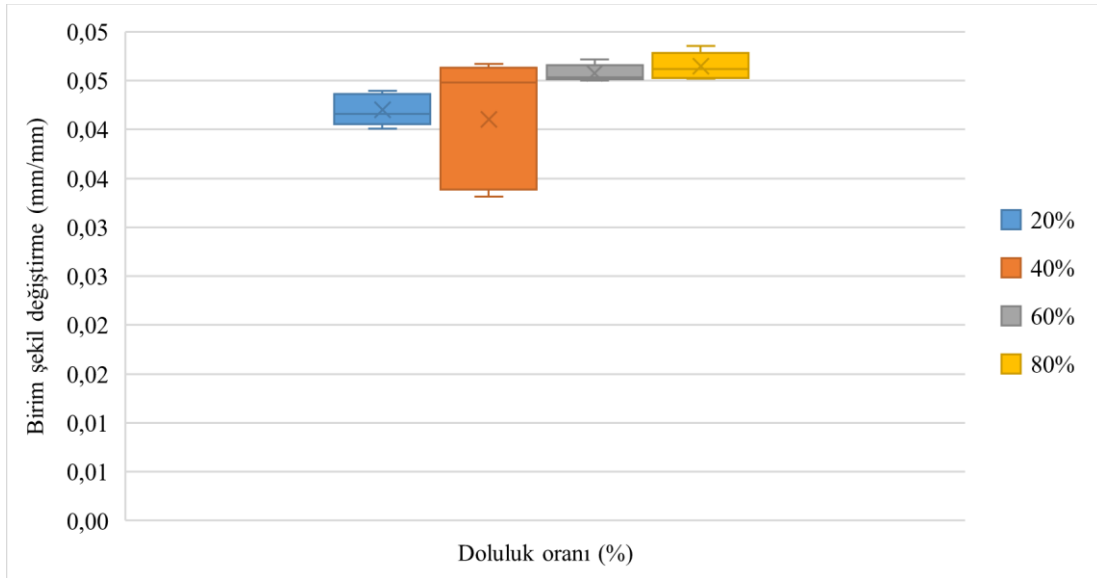
Doluluk oranı için %20, 40, 60 ve 80 olarak parametreleri seçimi yapılmış ve bu değerler arasındaki fark mukayese edilmiştir.

Grafik 4.28. Maksimum eğilme gerilmesi – doluluk oranı grafiği



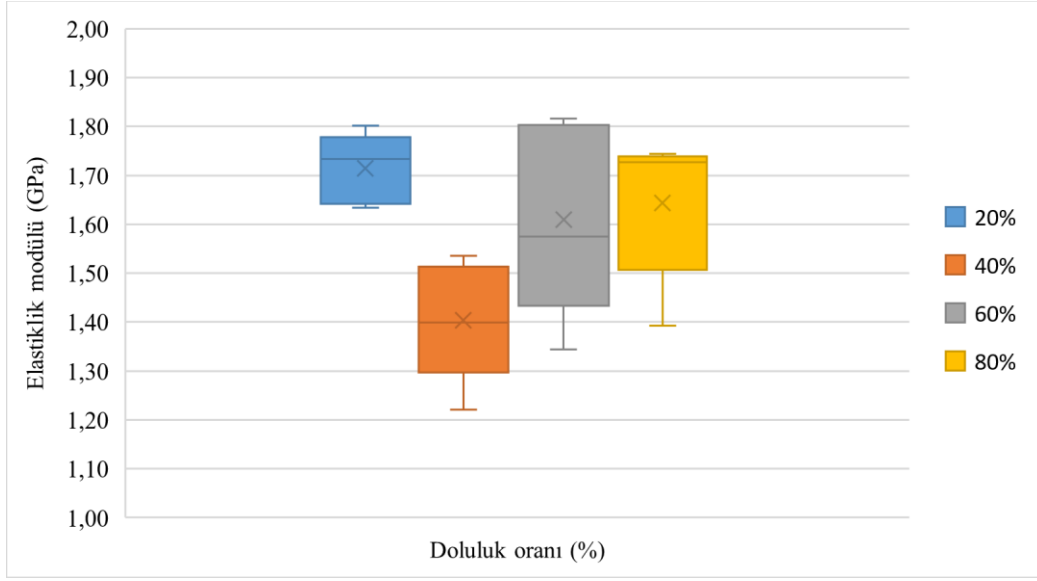
Doluluk oranı %20 için eğilme gerilmesi değeri 39,61 MPa elde edilirken; %40 için %24,8 artarak 49,44 MPa, %60 için %26,1 artarak 49,97 MPa, %80 için ise %27,9 artarak 50,66 MPa olmuştur.

Grafik 4.29. Şekil değiştirme – doluluk oranı grafiği



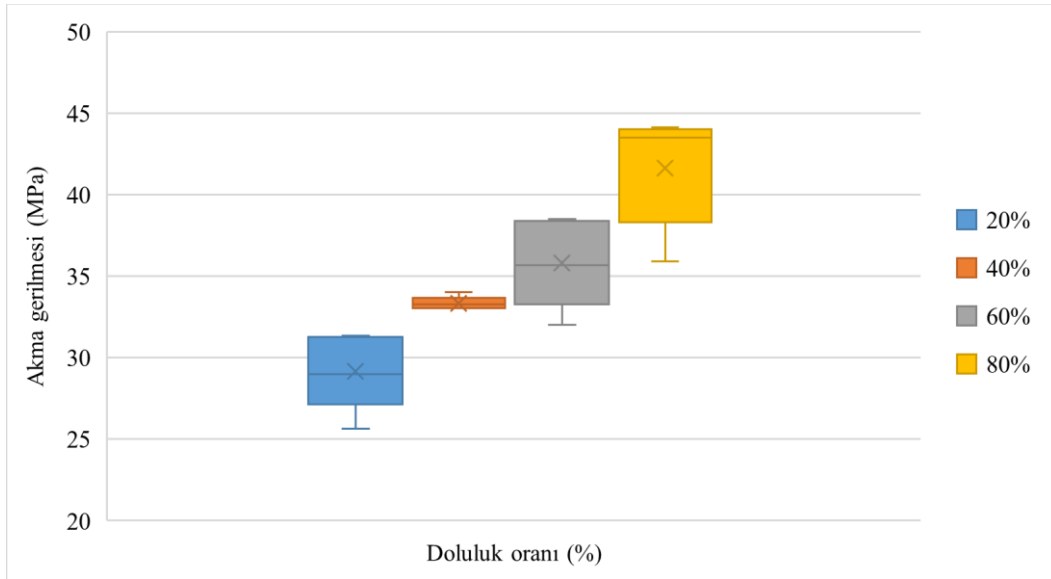
Doluluk oranı parametresine göre maksimum kuvvet noktasındaki birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_{bmax}) %20 ve %40 için ihmal edilebilir seviyededir. Yaklaşık olarak aynıdır. %60 ve %80 doluluk oranı için yaklaşık olarak %11,7 ila %14,5 değerinde artmaktadır. Buradan yola çıkarak, malzemenin şekil verilebilirlik kabiliyetinin de doluluk oranı ile bir miktar arttığı gözlenmiştir.

Grafik 4.30. Elastiklik modülü – doluluk oranı grafiği



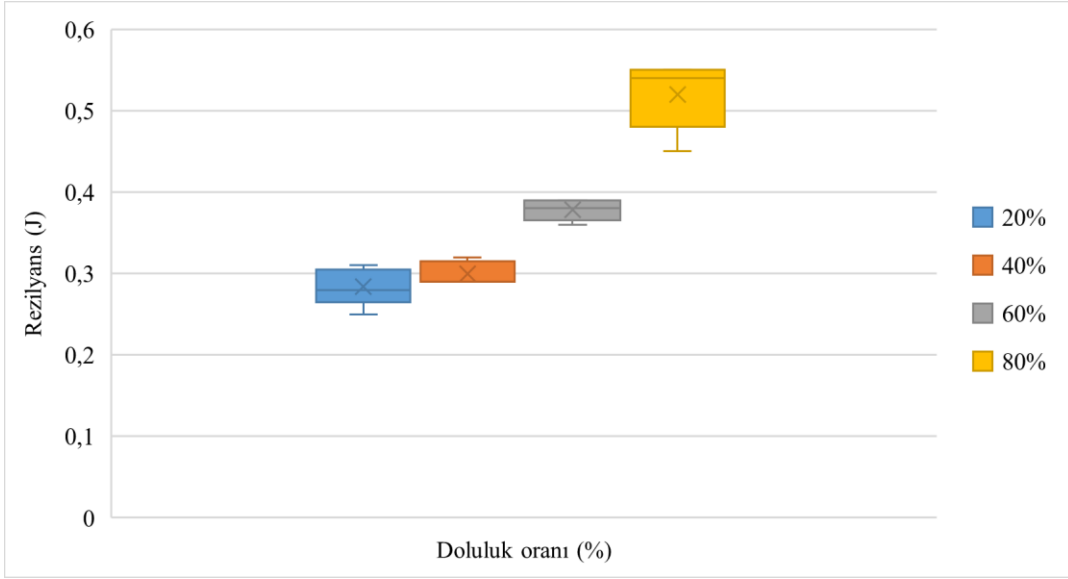
Elastiklik modülü için, doluluk oranı parametresinde elde edilen verilere göre %20 dolulukta en düşük, %40 dolulukta en büyük değer sağlanmıştır. Bu iki değer arasında yaklaşık %22 fark vardır.

Grafik 4.31. Akma gerilmesi – doluluk oranı grafiği



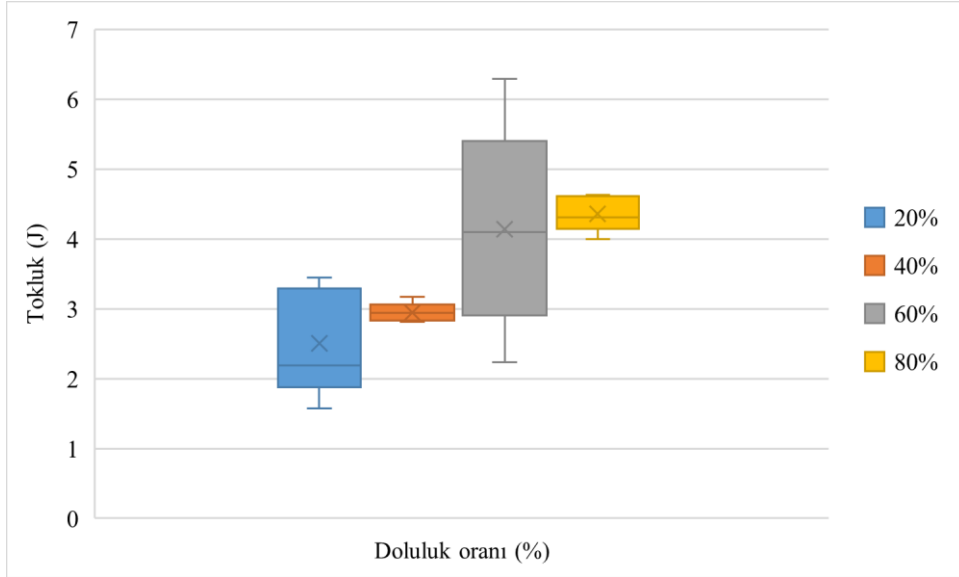
Akma gerilmesi; doluluk oranı %20 için en düşük değerdedir. Bu değer, %40, 60 ve 80 için %14, 22,6 ve 42,4 oranlarında artmıştır. Bu sonuçlara göre elastik şekil değiştirme özelliği doluluk oranı ile artmaktadır.

Grafik 4.32: Rezilyans – doluluk oranı grafiği



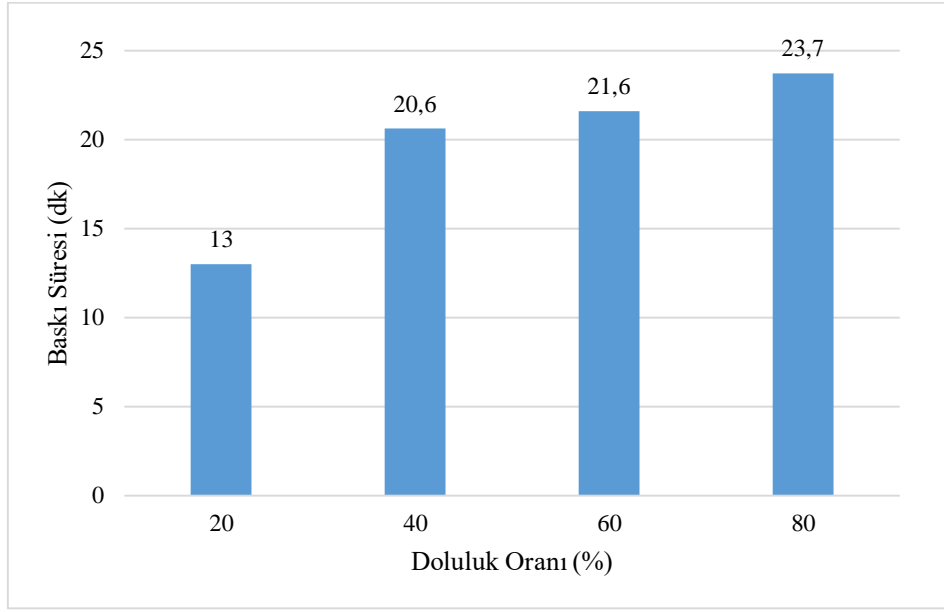
Rezilyans değeri; doluluk oranı %20 için en düşük değerdedir. %40, 60 ve 80 için %5,4, 32,4 ve 82,4 oranlarında artmıştır. Yani, elastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji doluluk oranı ile artmaktadır.

Grafik 4.33: Tokluk – doluluk oranı grafiği



Tokluk değeri; doluluk oranı %20 için en düşük değerdedir. %40, 60 ve 80 için %17,7, 65,3 ve 73,8 oranlarında artmıştır. Yani, plastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji doluluk oranı ile artmaktadır.

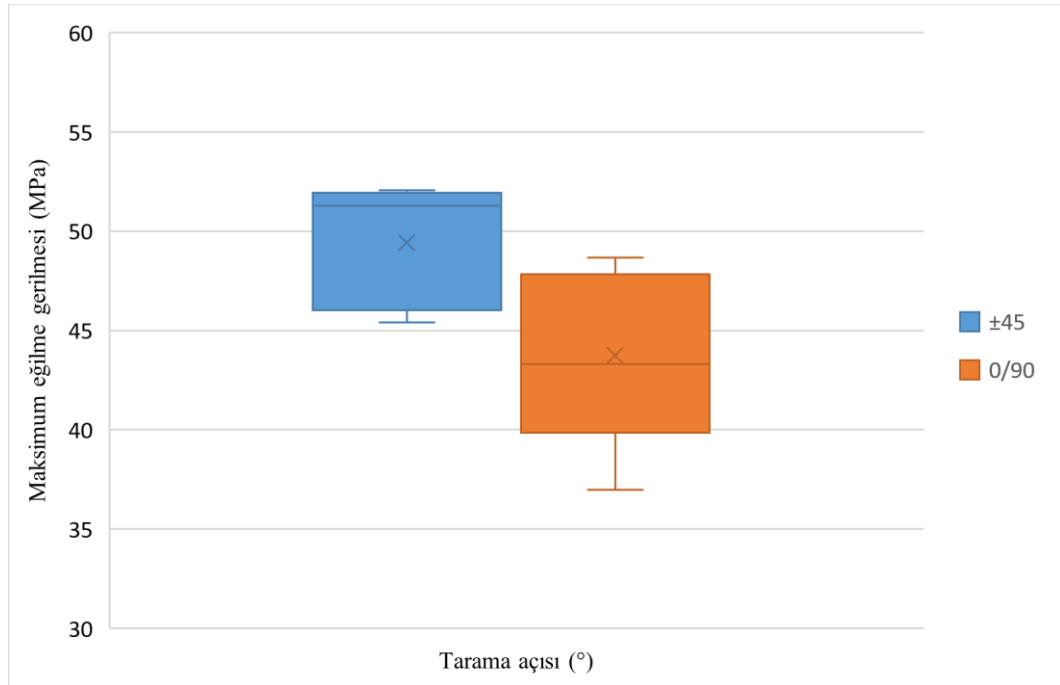
Grafik 4.34: Baskı süresi – doluluk oranı grafiği



Baskı süresi; doluluk oranı %20 için en düşük değerdedir. %40, 60 ve 80 için %58, 66,1 ve 82,3 oranlarında artmıştır. Yani, plastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji doluluk oranı ile artmaktadır.

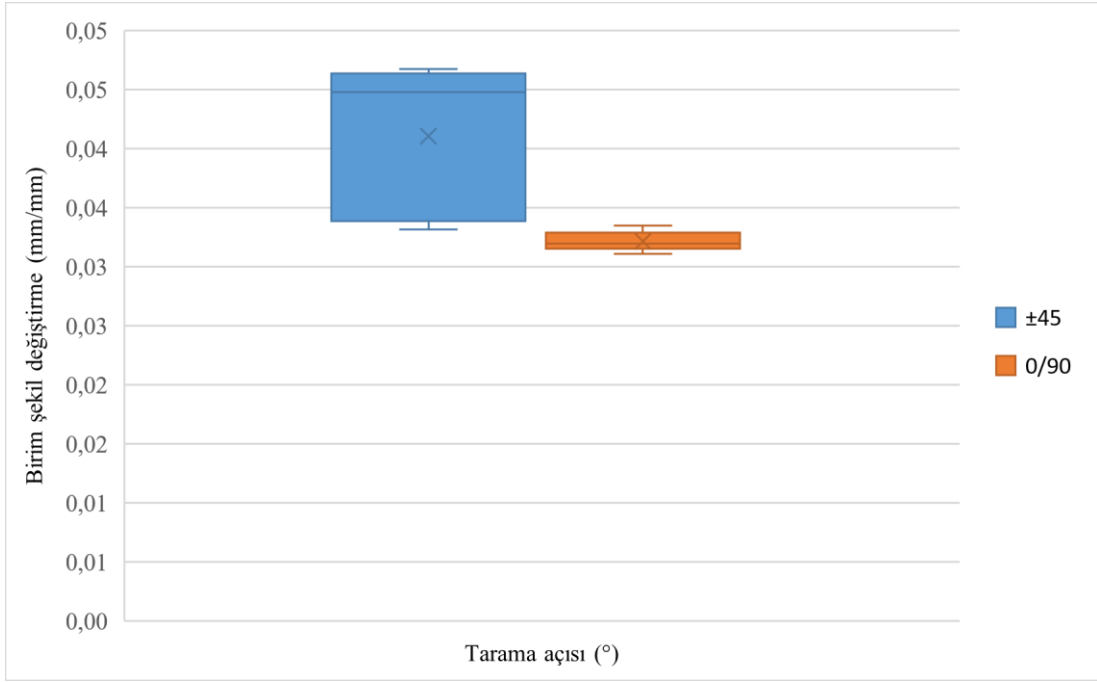
4.3 Tarama Açısı Parametresine Göre Sonuçların Değerlendirilmesi

Grafik 4.35. Maksimum eğilme gerilmesi – tarama açısı grafiği



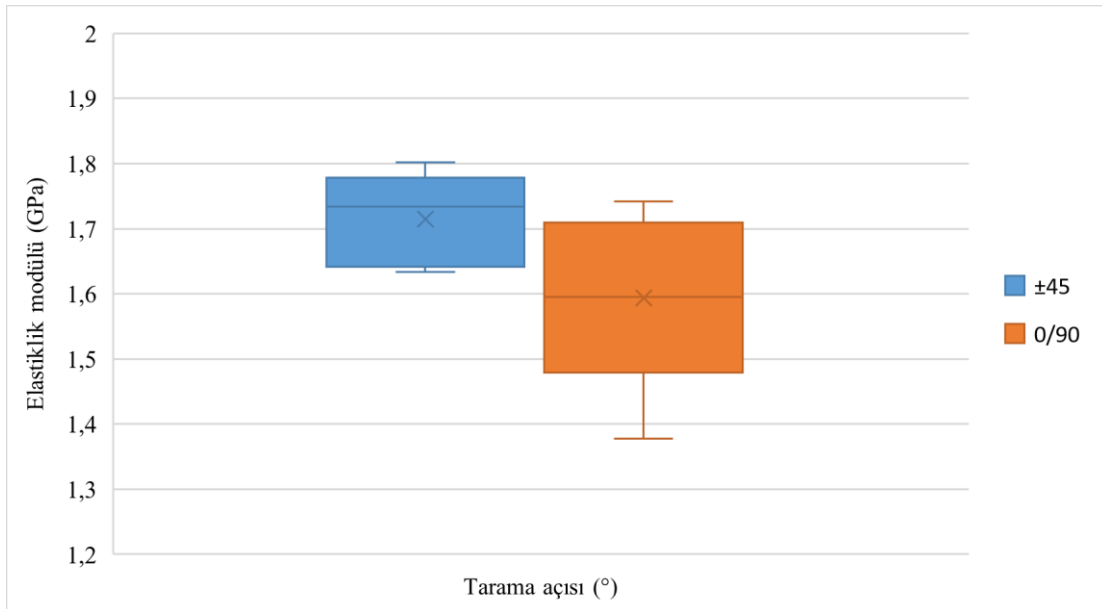
+45/-45° tarama açısı için ölçülen 49,44 MPa eğilme gerilmesi değeri, 0/90° için ölçülen 43,7 MPa değerinden yaklaşık %13 fazladır.

Grafik 4.36. Şekil değiştirme – tarama açısı grafiği



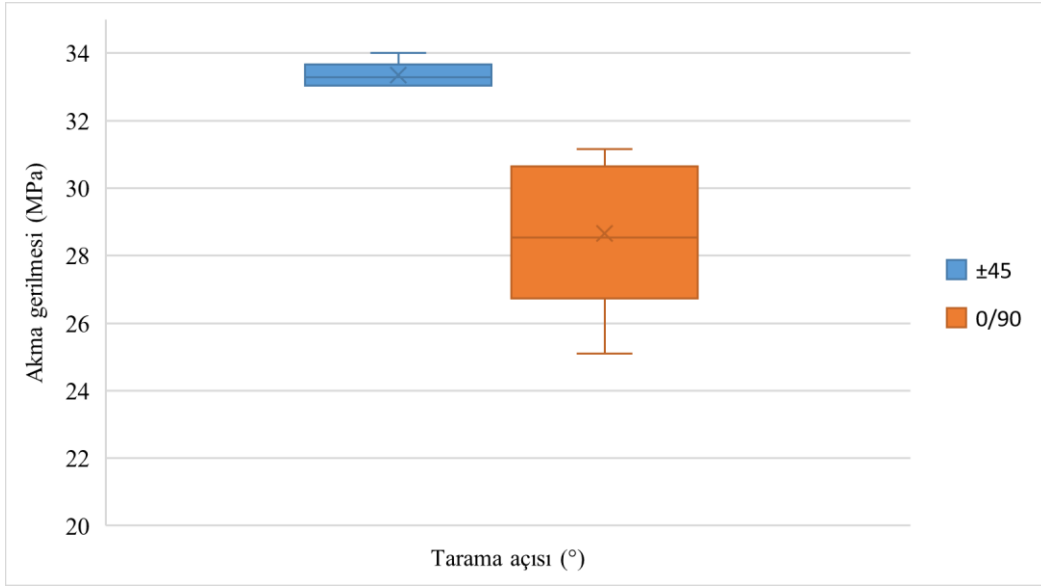
Tarama açısı +45/-45° yaklaşık olarak %28 artan şekil değiştirme değeri, malzemenin eğilme mukavemeti ile birlikte şekil verilebilme kabiliyetinin de arttığını göstermektedir.

Grafik 4.37: Elastiklik modülü – tarama açısı grafiği



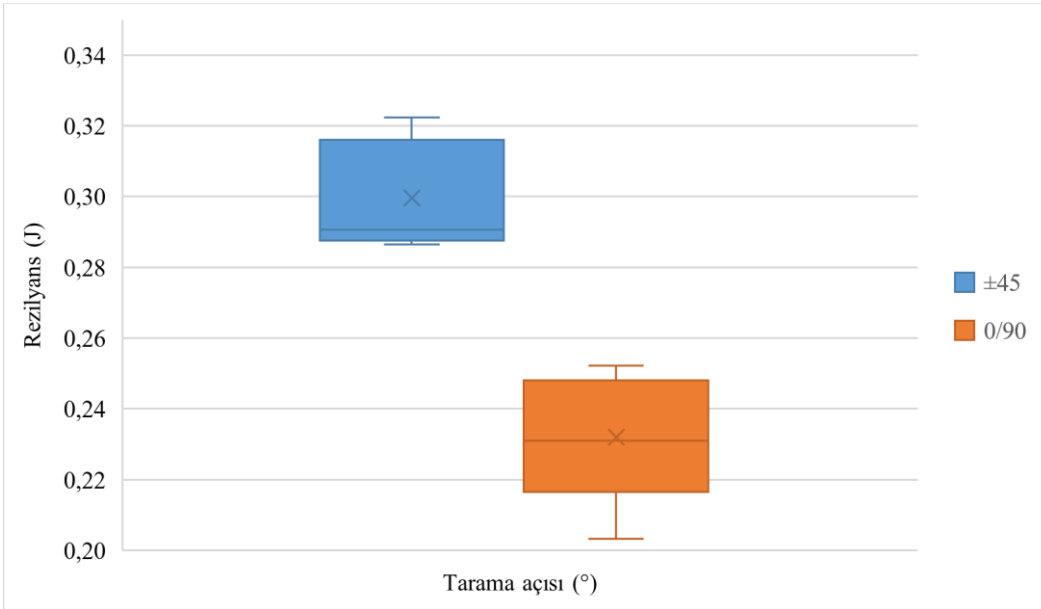
Tarama açısı ±45° için ölçülen 1,71 GPa elastiklik modülü değeri, 0/90° için 1,59 GPa olarak ölçülmüştür. Elastiklik modülü yaklaşık %8 oranında artmıştır. Fakat elastiklik modülü için ciddi bir fark değildir.

Grafik 4.38: Akma gerilmesi – tarama açısı grafiği



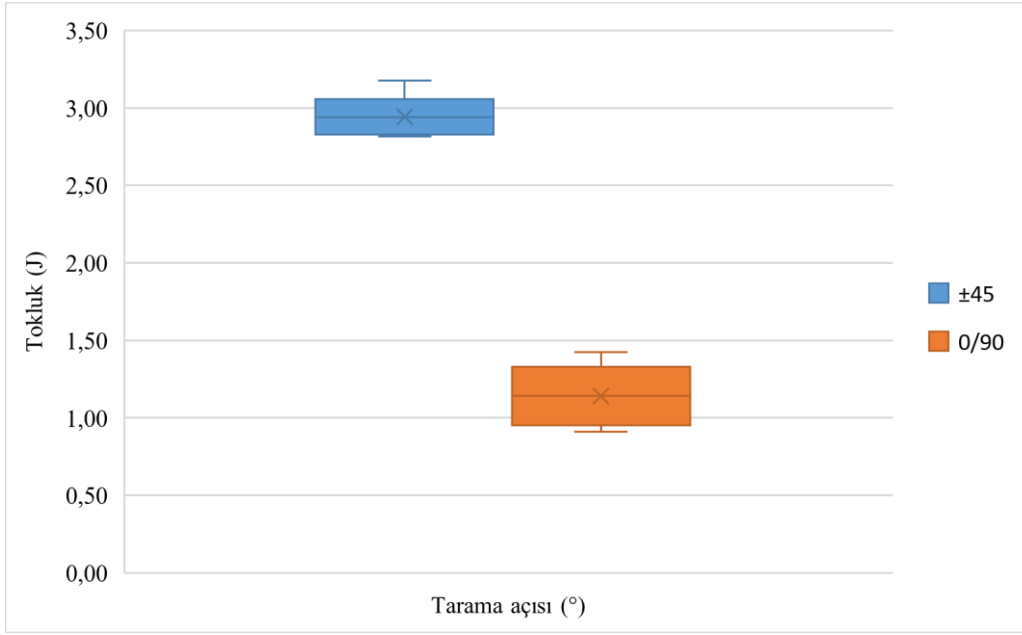
Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için ölçülen 33,3 MPa akma gerilmesi değeri, $0/90^\circ$ için 28,7 MPa olarak ölçülmüştür. Akma gerilmesi yaklaşık %16 oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre elastik şekil değiştirme özelliği tarama açısı $\pm 45^\circ$ için daha iyidir.

Grafik 4.39: Rezilyans – tarama açısı grafiği



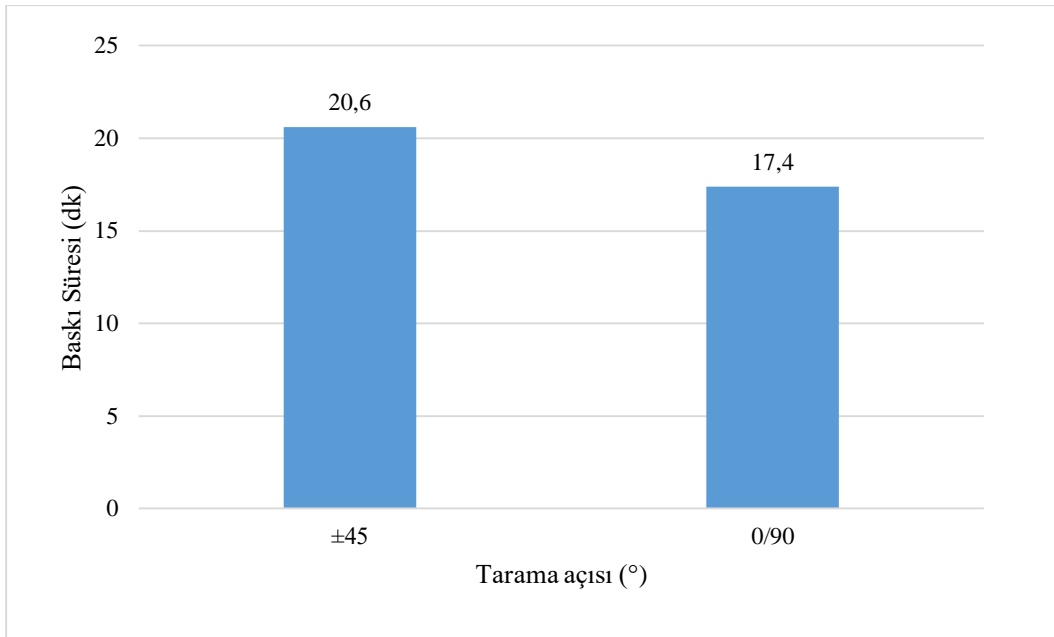
Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için hesaplanan 0,30 J rezilyans değeri, $0/90^\circ$ için 0,23 J olarak hesaplanmıştır. Rezilyans yaklaşık %29 oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre elastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji $\pm 45^\circ$ tarama açısı parametresi için daha iyi seviyededir.

Grafik 4.40: Tokluk – tarama açısı grafiği



Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için hesaplanan 2,94 J tokluk değeri, 0/90° için 1,14 J olarak hesaplanmıştır. Rezilyans yaklaşık %160 oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre plastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji $\pm 45^\circ$ tarama açısı parametresi için daha iyi seviyededir.

Grafik 4.41: Baskı süresi – tarama açısı grafiği

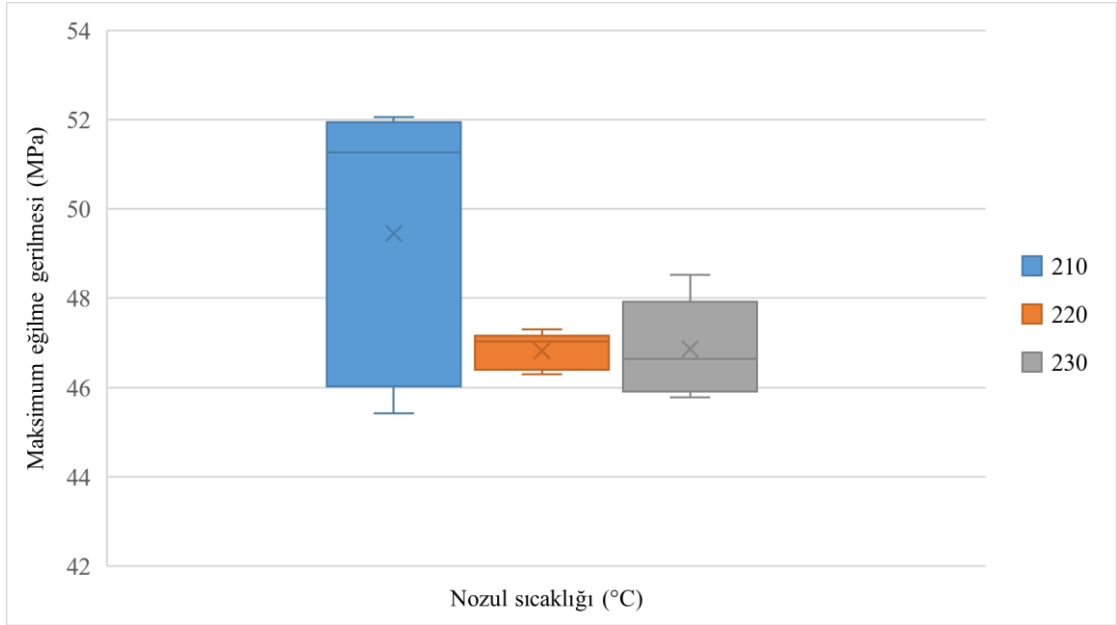


Tarama açısının baskı süresine etkisi grafikteki gibi gözlenmiştir. %18 dolayında bir fark mevcuttur. Bunun sebebi de ekstrüderin yazdırma sırasında $\pm 45^\circ$ tarama açısında 0/90° tarama açısına göre daha uzun bir yol almasıdır.

4.4 Nozul Sıcaklığı Parametresine Göre Sonuçların Değerlendirilmesi

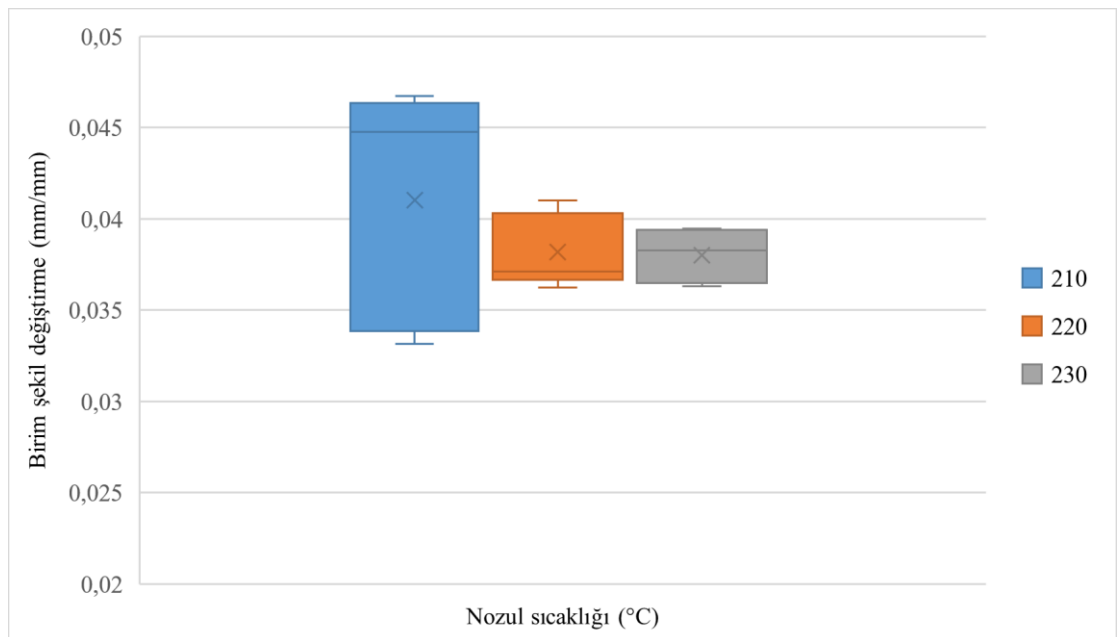
Nozul sıcaklığı için üç farklı değer 210, 220 ve 230 °C’de üretilen numunelerin mukayesesi yapılmıştır.

Grafik 4.42. Maksimum eğilme gerilmesi - nozul sıcaklığı grafiği



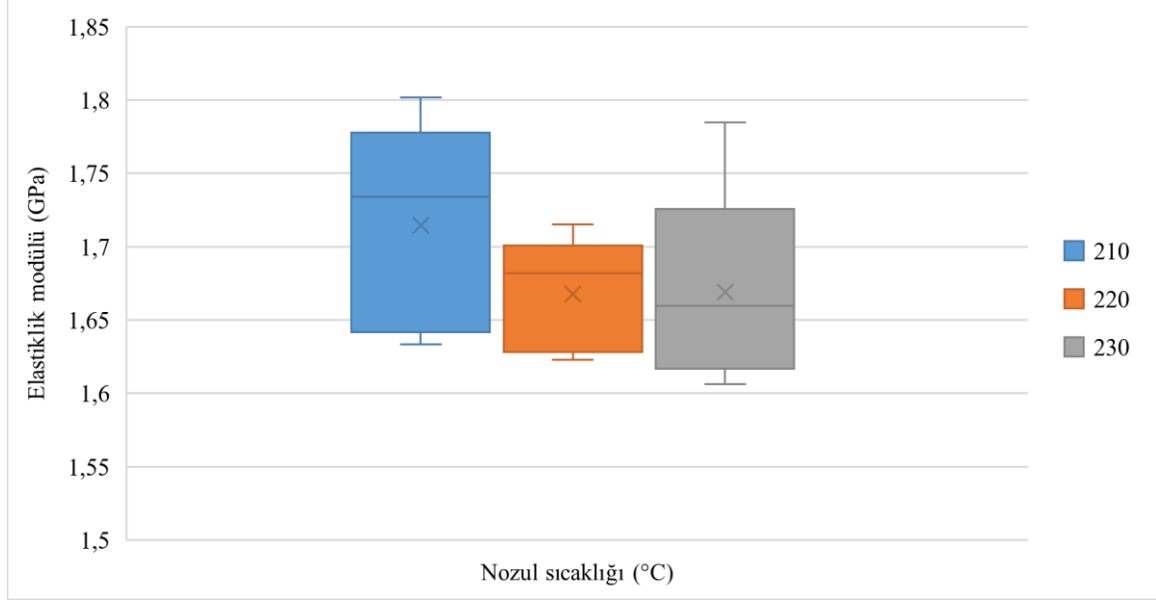
210 °C için maksimum eğilme gerilmesi değeri 49,44 MPa’dır. Bu değer yaklaşık olarak aynı olan 220 °C ve 230 °C’deki değerden yaklaşık %5,5 daha fazladır. Bu durum, 210 °C’nin katmanlar arasında diğer sıcaklık değerlerine göre daha iyi ve rijit yapışmaya sebep olduğunun bir göstergesidir.

Grafik 4.43. Şekil değiştirme - nozul sıcaklığı grafiği



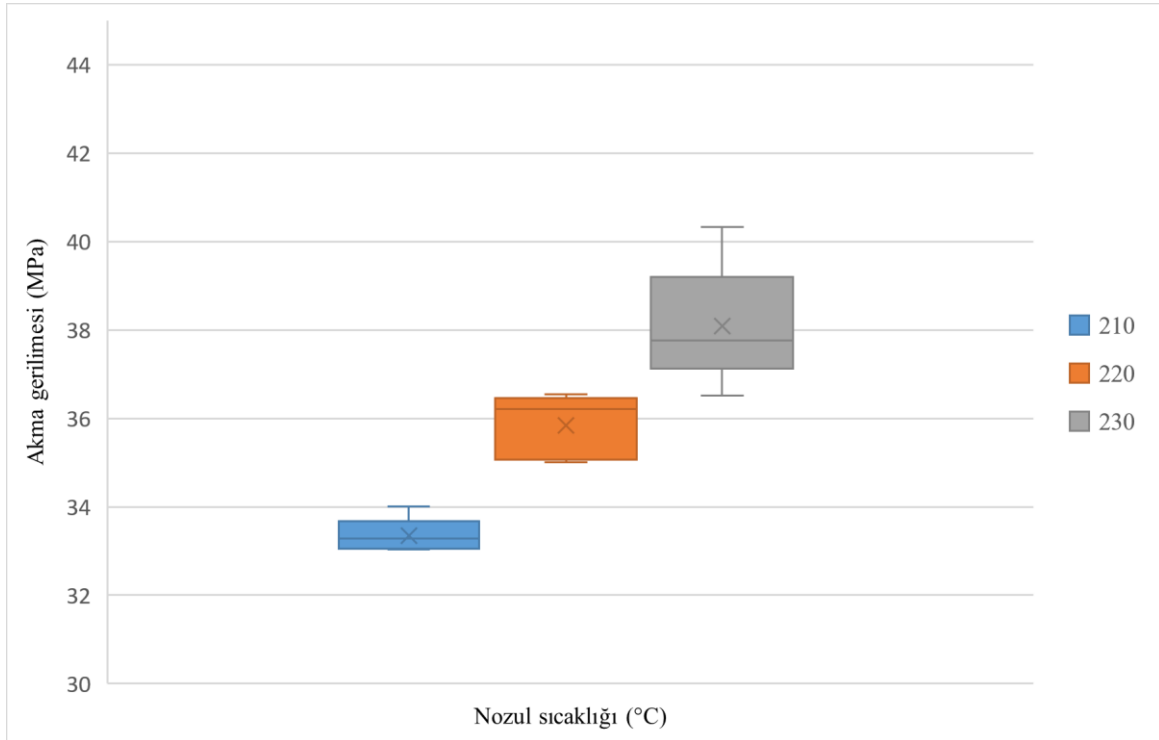
Nozul sıcaklığı 220 ve 230 °C değerleri için maksimum kuvvet noktasındaki birim şekil değiştirme değeri arasındaki fark ihmal edilecek seviyededir. 210 °C için üretilen numunenin şekil değiştirme kabiliyeti %7 daha iyidir.

Grafik 4.44. Elastiklik modülü - nozul sıcaklığı grafiği



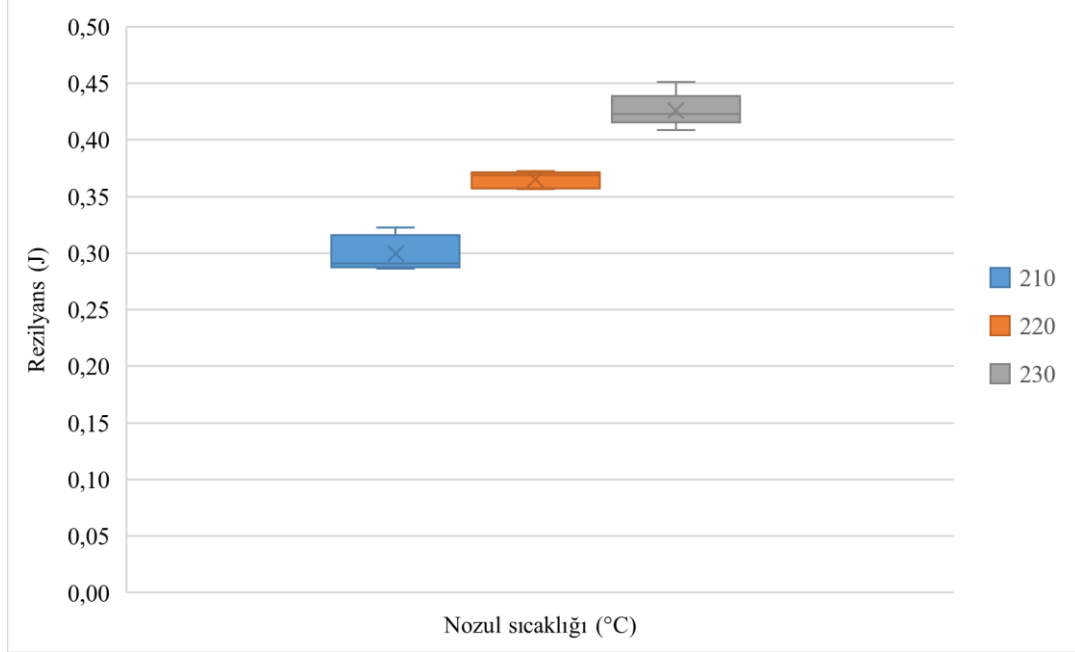
Elastiklik modülü değeri, diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi 220 ve 230 °C için ihmal edilebilecek seviyededir ve aynı kabul edilebilir. 210 °C için üretilen numunenin elastiklik modülü değeri ise yaklaşık olarak %3 daha yüksektir.

Grafik 4.45. Akma gerilmesi - nozul sıcaklığı grafiği



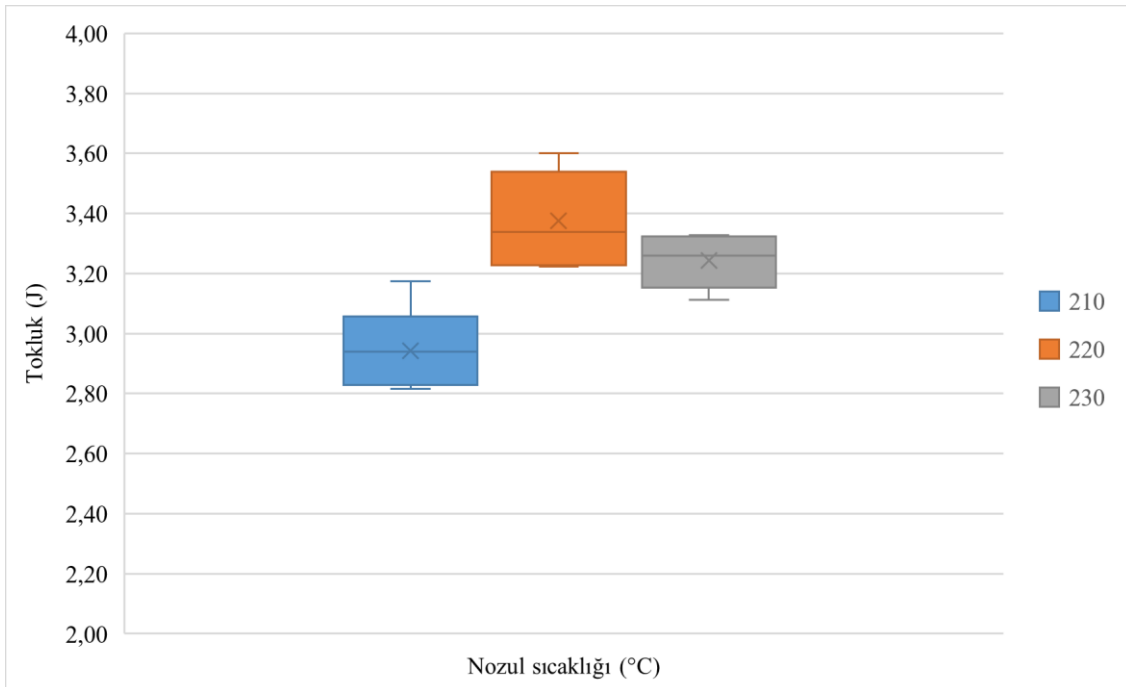
210 °C Nozul sıcaklığı için ölçülen 33,3 MPa akma gerilmesi değeri, 220 °C için 35,9 MPa ve 230 °C için 38,1 MPa olarak elde edilmiştir. Akma gerilmesi sıcaklıktan dolayı sırasıyla yaklaşık %7,8 ve %14,4 oranında artmıştır.

Şekil 4.46. Rezilyans – nozul sıcaklığı grafiği



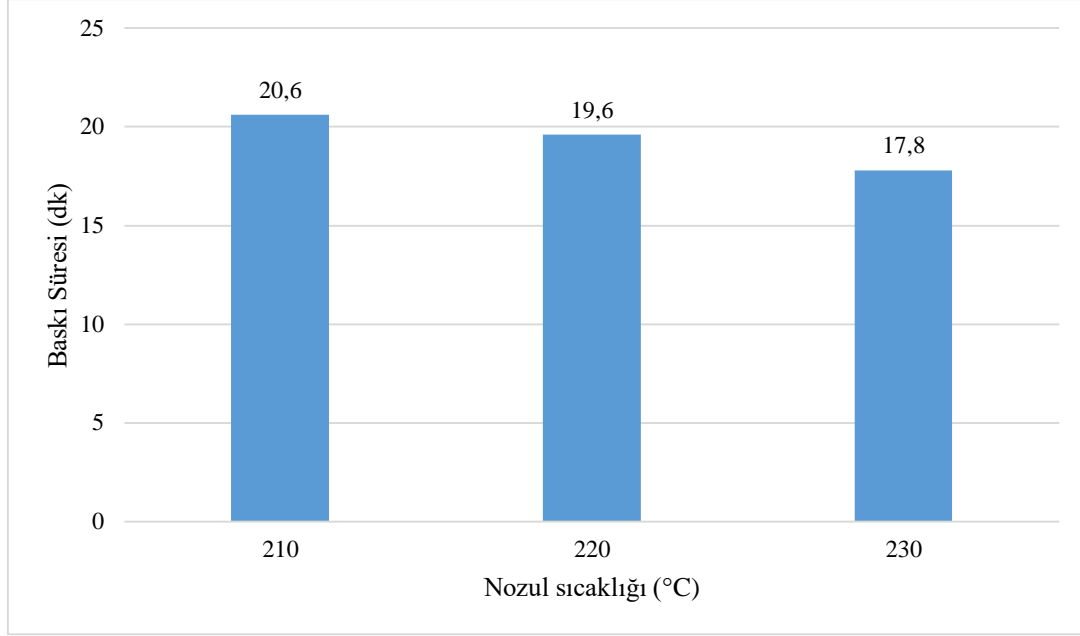
210 °C nozul sıcaklığı için hesaplanan 0,3 J rezilyans değeri; 220 °C için 0,37 J, 230 °C için 0,43 J olarak hesaplanmıştır. Rezilyans sırasıyla %21,8 ve %42,3 ve oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre, elastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji nozul sıcaklığı ile doğru orantılıdır.

Grafik 4.47: Tokluk – nozul sıcaklığı grafiği



210 °C nozul sıcaklığı için hesaplanan 2,94 J tokluk değeri; 220 °C için 3,37 J, 230 °C için 3,24 J olarak hesaplanmıştır. Tokluk sırasıyla %12,5 ve %9,8 oranında artmıştır. Bu sonuçlara göre, plastik şekil değiştirmede absorbe edilen enerji Nozul sıcaklığı net bir bağlantı kurulamamaktadır.

Şekil 4.48: Baskı süresi – nozul sıcaklığı grafiği



Grafikte de görüldüğü gibi baskı süresi için az da olsa farklılıklar meydana gelmiştir. Baskı süresi maksimum 210 °C nozul sıcaklığı için elde edilirken 220 °C için %5 azalırken, 230 °C için %13,5 oranında azaldığı görülmüştür.

Tablo 4.2: Test numunelerinin özellikleri ve elde edilen mekanik değerler

No	Katman Kalmılığı	Doluluk Oranı	Tarama Açısı	Nozul Sıcaklığı	Maksimum eğilme gerilmesi (MPa)	E_{bmax} (mm/mm)	Elastiklik modülü (GPa)	Akma gerilmesi (MPa)	Rezilyans (J)	Tokluk (J)	Baskı süresi (dk)
1	0,15	40	45/45	210	45,9	0,04	1,64	34,7	0,36	2,98	24,6
2	0,2	40	45/45	210	49,44	0,04	1,71	33,3	0,3	2,94	20,6
3	0,25	40	45/45	210	45,69	0,05	1,52	30,8	0,3	3,08	16
4	0,3	40	45/45	210	43,41	0,05	1,52	28,6	0,25	4,79	14,4
5	0,2	20	45/45	210	39,6	0,04	1,4	29,2	0,28	2,5	13
6	0,2	60	45/45	210	49,97	0,05	1,61	35,8	0,38	4,14	21,6
7	0,2	80	45/45	210	50,66	0,05	1,64	41,6	0,52	4,36	23,7
8	0,2	40	0/90	210	43,7	0,03	1,59	28,7	0,23	1,14	17,4
9	0,2	40	45/45	220	46,8	0,04	1,67	35,9	0,37	3,37	19,6
10	0,2	40	45/45	230	46,9	0,04	1,67	38,1	0,43	3,24	17,8

Maksimum eğilme gerilmesi değeri katman kalınlığı 0,15 mm için 45,9 MPa, 0,2 mm için 49,44 MPa, 0,25 mm için 45,69 MPa ve 0,3 mm için 43,41 MPa'dır. Katman kalınlığı ile

doğrudan bir bağlantı kurulamamaktadır. Uç değerler arasındaki fark yaklaşık %16 elde edilmiştir. Doluluk oranı %20 için 39,6 MPa, %40 için 49,44 MPa, %60 için 49,97 MPa, %80 için 50,66 MPa'dır. Doluluk oranı ile maksimum eğilme gerilmesi doğru orantılı olarak artmıştır. Uç değerler arasındaki fark %28'dir. $\pm 45^\circ$ için 49,44 MPa iken $0/90^\circ$ için 43,7 MPa'dır. $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %13 daha yüksektir. Bu değer 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 49,44 MPa, 46,8 MPa ve 46,9 MPa değerleri elde edilmiştir. Nozul sıcaklığı ile maksimum eğilme gerilmesi arasında doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır.

Elastiklik modülü değeri katman kalınlığı 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 mm için 1,64 GPa, 1,71 GPa, 1,52 GPa ve 1,52 GPa'dır. Uç değerler arasındaki fark %12,5 civarındadır. Bu değer %20, %40, %60 ve %80 doluluk oranı için sırasıyla; 1,40, 1,71, 1,61, 1,64 GPa değerlerine sahiptir. Uç değerler arasındaki fark %15'tir. $\pm 45^\circ$ için 1,71 GPa iken $0/90^\circ$ için 1,59 GPa'dır. $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %7.5 daha yüksektir. Ayrıca, 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 1,71 GPa, 1,67 GPa ve 1,67 GPa'dır. Uç değerler arasındaki fark %2'dir.

Akma gerilmesi katman kalınlığı 0,15 mm için 34,7 MPa, 0,2 mm için 33,3 MPa, 0,25 mm için 30,8 MPa ve 0,3 mm için 28,6 MPa'dır. Katman kalınlığı değeri arttıkça malzemenin akma gerilmesi değerinin düştüğü, yani sünekliğin azaldığı söylenebilir. Uç değerler arasındaki fark %28,1'dir. Doluluk oranı %20 için 29,2 MPa, %40 için 33,3 MPa, %60 için 35,8 MPa, %80 için 41,6 MPa'dır. Doluluk oranı ile maksimum eğilme gerilmesi doğru orantılı olarak artmıştır. Uç değerler arasındaki fark %42.5'dir. Süneklik, doluluk oranı ile doğru orantılıdır denebilir. $\pm 45^\circ$ için 33,3 MPa iken $0/90^\circ$ için 28,7 MPa'dır. Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %16 daha yüksektir. Bu değer 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 33,3 MPa, 35,9 MPa ve 38,1 MPa değerleri elde edilmiştir. Nozul sıcaklığı ile akma gerilmesi doğru orantılı olarak artmaktadır. Uç değerler arasındaki fark %14,4'tür.

Rezilyans değeri 0,15, 0,20, 0,25 ve 0,30 mm katman kalınlıkları için sırasıyla 0,36 J, 0,3 J, 0,3 J ve 0,25 J'dür. Uç değerler arasındaki fark %44,9 civarındadır. Doluluk oranı %20 için 0,28 J, %40 için 0,3 J, %60 için 0,38 J, %80 için ise 0,52 J'dür. Uç değerler arasındaki fark %82 civarındadır. Doluluk oranı ile rezilyansın arttığı söylenebilir. Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için 0,3 J iken $0/90^\circ$ için 0,23 J'dür ve $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %29 daha yüksektir. Nozul sıcaklığı 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 0,3 J, 0,37, ve 0,43 J'dür. Nozul sıcaklığı ile rezilyansın doğru orantılı olduğu sonucu çıkarılabilir. Uç değerler arasındaki fark %42,3'tür.

Tokluk değeri katman kalınlığı 0,15 mm için 2,98 J, 0,2 mm için 2,94 J, 0,25 mm için 3,08 J ve 0,3 mm için 4,79 J'dür. Uç değerler arasındaki fark yaklaşık %60 elde edilmiştir. Doluluk

oranı %20 için 2,5 J, %40 için 2,94 J, %60 için 4,14 J, %80 için 4,36 J'dir. Doluluk oranı ile tokluk doğru orantılı olarak artmıştır. Uç değerler arasındaki fark %73,5'tir. Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için 2,94 J iken $0/90^\circ$ için 1,14 J'dür ve $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %158 daha yüksektir. Nozul sıcaklığı 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 2,94 J, 3,37 J ve 3,24 J'dür. Nozul sıcaklığı ile tokluk arasında net bir ilişki kurulamamıştır. Uç değerler arasındaki fark %14,7 civarındadır.

Baskı süresi katman kalınlığı 0,15 mm için 24,6 dk, 0,2 mm için 20,6 dk, 0,25 mm için 16 dk ve 0,3 mm için 14,4 dk'dır. Katman kalınlığı arttıkça baskı süresi kısalmaktadır. Uç değerler arası fark %71'dir. Doluluk oranı %20 için 13 dk, %40 için 20,6 dk, %60 için 21,6 dk, %80 için 23,7 dk'dır. Doluluk oranı ile baskı süresi doğru orantılı olarak artmıştır. Uç değerler arası fark %82,3'tür. Tarama açısı $\pm 45^\circ$ için baskı süresi 20,6 dk iken $0/90^\circ$ için 17,4 dk'dır ve $\pm 45^\circ$ için elde edilen değer %18,3 daha yüksektir. Ekstrüderin $\pm 45^\circ$ için daha fazla yol kat etmesi bunun asıl sebebidir. Nozul sıcaklığı 210, 220 ve 230 °C için sırasıyla 20,6 dk, 19,6 dk ve 17,8 dk değerleri elde edilmiştir. Nozul sıcaklığı arttıkça baskı süresi azalmaktadır. Uç değerler arası fark %15,7'dir.

Tüm numuneler arasında en az maksimum eğilme gerilmesi 0,20 mm katman kalınlığı, %20 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 39,6 MPa elde edilmiştir. Maksimum değer ise 0,20 mm katman kalınlığı, %80 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 50,66 MPa elde edilmiştir. Fark %28'dir.

Tüm numuneler arasında en az akma gerilmesi 0,30 mm katman kalınlığı, %40 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 28,6 MPa elde edilmiştir. Maksimum değer ise 0,20 mm katman kalınlığı, %80 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 41,6 MPa elde edilmiştir. Fark %45'tir.

Tüm numuneler arasında en az rezilyans değeri 0,20 mm katman kalınlığı, %40 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $0/90^\circ$ tarama açısı için 0,23 J elde edilmiştir. Maksimum değer ise 0,20 mm katman kalınlığı, %80 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 0,52 J elde edilmiştir. Fark %123'tür.

Tüm numuneler arasında en az tokluk değeri 0,20 mm katman kalınlığı, %40 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $0/90^\circ$ tarama açısı için 1,14 J elde edilmiştir. Maksimum değer ise 0,20 mm katman kalınlığı, %80 doluluk oranı, 210 °C nozul sıcaklığı ve $\pm 45^\circ$ tarama açısı için 4,79 J elde edilmiştir. Uç değerler arasındaki fark %320'dir.

5. SONUÇLAR, ÖNERİLER VE TARTIŞMA

FDM yöntemi ile ASTM D790 standardına uygun şekilde üç noktada eğilme testi numuneleri PLA tip filament ile üretildi. Numunelerin üretim aşamasında öncelikle baskı parametrelerine karar süreci yaşanmıştır. Bu karar sürecinde, mekanik özelliklere doğrudan etkisi olan parametreler seçilmiştir. Böylece mekanik özelliklere en yüksek seviyede etki edebileceği düşünülen parametrelerin değişimleri ve bu parametrelerin mekanik özelliklere ne kadar etki ettiğini gözlemek hedeflenmiştir. Baskı parametrelerinin etkisi önceden tahmin edilebilse de parametrelerin değişmesiyle elde edilen etkinin yüzde olarak azımsanmayacak seviyede olduğu görüldü.

Katman kalınlığı, doluluk oranı, tarama açısı ve nozul sıcaklığı parametrelerinin mekanik özelliklere(maksimum eğilme gerilmesi, akma gerilmesi, tokluk, rezilyans, elastiklik modülü) ve baskı süresine etkisi incelendi. Numuneler arasındaki farkın belirgin olması için parametrelerden bir tanesi değişirken diğer parametreler sabit tutulmuştur. Örneğin; katman kalınlığı parametresi için 0,15 mm, 0,20 mm, 0,25 mm ve 0,30 mm olarak seçilen parametrelerde doluluk oranı, tarama açısı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, nozul çapı, baskı hızı gibi parametreler sabit tutuldu. Aynı şekilde, seçilen herhangi bir doluluk oranı parametresi için de katman kalınlığı, nozul sıcaklığı ve tarama açısı parametreleri sabit tutuldu. Bu sayede dört farklı parametrenin mekanik özelliklere ve baskı süresine etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Deneysel sonuçlar çoğu durumda katman kalınlığının azalması, doluluk oranının artması, nozul sıcaklığının artması ile mekanik özelliklerin iyileştiği sonucuna varıldı. Ayrıca yapılan testler baskı süresinin de doluluk oranı ile doğru, katman kalınlığı ve sıcaklık ile ters orantılı olduğunu gösterdi. Tarama açısı ile ilgili olarak ise $\pm 45^\circ$ ile üretilen numunelerin 0/90 tarama açısına göre daha mukavim olduğu fakat baskı süresinin daha uzun sürdüğü gözlenmiştir. Sıcaklık ile ilgili olarak; genellikle sıcaklık arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiği kanıtlanmıştır. Fakat sıcaklık için 210 °C için maksimum eğilme gerilmesi en yüksek değeri elde ederken, 220 ve 230 °C ile üretilen numunelerin birbirine çok yakın değerlere sahip olduğu gözlemlendi. Tokluk ve rezilyans özellikleri için bazı parametrelerde uyumsuzluklar gözlemlenmesine rağmen genel olarak bakıldığında öngörülen mekanik değerler ve baskı süreleri deneysel sonuçlar ile bir uyum sağlamaktadır. Parametrelerin tam olarak ne kadar mekanik özelliklere nasıl ve ne derecede etki ettiğini görmek açısından faydalı bir çalışma olmuştur.

Zhaobing Liu ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada 65 °C tabla sıcaklığı, 200 °C nozul sıcaklığı, 80 mm/dk baskı hızı, tarama açısı $\pm 45^\circ$, doluluk oranı %100 ve 0,3 mm katman

kalınlığındaki PLA malzemeler için yapmış oldukları üç noktada eğme testi sonucunda 2,45 GPa elastiklik modülü ve 79,5 MPa maksimum eğilme mukavemeti değerine ulaşmışlardır.

Bu baskı parametrelerine en yakın numune grubu, 7 numaralı numune grubudur. Katman kalınlığı 0,2 mm, doluluk oranı %80, nozul sıcaklığı 210°C ve baskı hızı 60 mm/dk ve 60°C tabla sıcaklığıdır. 7 numaralı numune grubunun elastiklik modülü değeri 1,64 GPa iken maksimum eğilme gerilmesi değeri 50,66 MPa'dır. Liu ve arkadaşlarının seçmiş oldukları parametrelere kıyasla bu çalışmada elde edilen değerlerin tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Eklemeli imalat yakın zamanda yaygınlaşmaya başlayan bir üretim yöntemi olduğu için zamanla baskı parametreleri, malzeme çeşidi, makina tipleri açısından birçok farklılık yaşanması muhtemeldir.

Daha sonraki yapılacak çalışmalarda ABS, PETG, karbonfiber ve metal katkılı filamentler gibi hazır filamentler kullanılacağı gibi, yeni ve özgün bir filamentin üretimi sağlanarak mevcut filamentler ile arasındaki farklar araştırılabilir. Malzeme çeşitliliğinin artması ve istenen veya istenmeyen mekanik özelliklere uygun şekilde üretim yapmak için yeni alternatifler ortaya çıkabilir. Bu çalışmada incelenmeyen yüzey pürüzlülüğü, sertlik, yorulma gibi mekanik davranışlar incelenerek günümüz teknolojisi ile mukayese edilip endüstriyel uygulamalarda hayata geçirilebilir.

Nozul çapı, baskı hızı, çeşitli yazdırma desenleri, tabla sıcaklığı gibi parametrelerin hangi özelliğe veya değere ne kadar etki ettiği gözlemlenebilir. Böylece diğer parametreler için optimizasyon sağlanarak, tasarlanan veya üretilmek istenen ürün için istenen mekanik ve fiziksel değerler sağlanabilir. Örneğin eğilmeye zorlanan bir ürün tasarlanacak olursa parametrelerin eğilme davranışına göre optimize edilerek ayarlanması ve bu ayarın yapılırken de ekonomik olmasının hesaba katılması (kullanılan filamentin parça başına ağırlığı, elektrik sarfıyatı) gibi seçenekler mevcuttur. Baskı parametrelerinin değeri üretilmesi hedeflenen ürünün sayısı arttıkça artacaktır. Üretim küçük sayılardan seri üretime doğru yaklaştıkça parametrelerin kıymeti artacaktır.

Günümüzde birçok filament üreticisi filamentlere bazı katkılara yaparak yeni filamentler ortaya çıkarmaktadır. Üretilcek herhangi bir yeni filamentler için çeşitli simülasyon programları ile elde edilen sonuçlar, teorik hesaplamalar ve deneysel sonuçlar kıyaslanabilir. Yeni üretilen bir filamentte ait özelliklerin hesaplanması böylelikle sağlanabilir.

Eklemeli imalat yöntemlerinde birçok parametre olduğu için, parametrelerin seçimi ve kontrolü çok hassas bir şekilde yapılmalıdır. Çünkü bir parametreyi incelemek için diğer bütün parametrelerin sabit tutulması, aynı şartlarda üretim yapılmalıdır. Yapılacak olan çalışmalarda özellikle bu hususa dikkat edilmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Alani, T. F., Othman, F. ve Ali, H.B., 2017, Effect of infill parameter on compression property in FDM process, *dimensions*, 7, 16-19.
- Aloyaydi, B. A., Sivasankaran, S. ve Ammar, H.R., 2019, Influence of infill density on microstructure and flexural behavior of 3D printed PLA thermoplastic parts processed by fusion deposition modeling, *AIMS Mater. Sci*, 6 (6), 1033-1048.
- ASTM D790-17, 2017, Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, *ASTM International*, West Conshohocken, <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D790-17> [Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2019].
- Aydın, L., Küçük, S., 2017, Üç boyutlu yazıcı ve tarayıcı ile hastaya özel medikal ortez tasarımı ve geliştirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 20 (1), 1-8.
- Ayrilmis, N., Kariz, M. ve ark., 2019, Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 2195-2200.
- Bajracharya, R. M., Dilpreet, S. B., ve Sreekala, G. B., 2017, Mechanical properties of polylactic acid composites reinforced with cotton gin waste and flax fibers, *Procedia Engineering*, 200, 370-376.
- Baş, H., Yapıcı, F., 2015, Ergonomik tasarım ve üretimde hızlı prototipleme teknolojisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3 (3), 199-204.
- Bazin, M. M., Othman M.Z.M., ve ark., 2019, Optimisation of 3D printing parameter for improving mechanical strength of ABS printed parts, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 225-260.
- Beer, Ferdinand P., ve ark., "4 Pure Bending." (2002).
- Caminero, M. Á., Chacon J.M. ve ark., 2019, Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: Effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture, *Polymers*, 11 (5), 799.
- Can, A., Aslan, İ., 2018, Katmanlı üretim ile elde üretilmiş kum döküm kalıpların incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4), 1269-1282.
- Cantrell, J. ve ark., 2017, Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts, *Rapid Prototyping Journal*, 3, 89-105.
- Callister, Jr., William, D., ve Rethwisch, D. G., 2020, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach, Hoboken, John Wiley & Sons.
- Choudhari, C. M., ve Patil V. D., 2016, Product development and its comparative analysis by SLA, SLS and FDM rapid prototyping processes, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 149.
- Çantı, E., Aydın, M., ve ark., 2017, Investigation of the FDM process performance at different printing parameters, *Conference: International Symposium on 3D Printing Technologies 3D-PTS2017*, İstanbul.
- Çelebi, A., Tosun, H. ve Önçağ, A.Ç., 2017, Hasarlı bir kafatasının üç boyutlu yazıcı ile imalatı ve implant tasarımı, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1, 27-35.
- Çelik, İ., Karakoç, F. Ve ark., 2013, Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 031, 53- 70.
- Dey, A. ve Yodo, N., 2019, A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3 (3), 64.

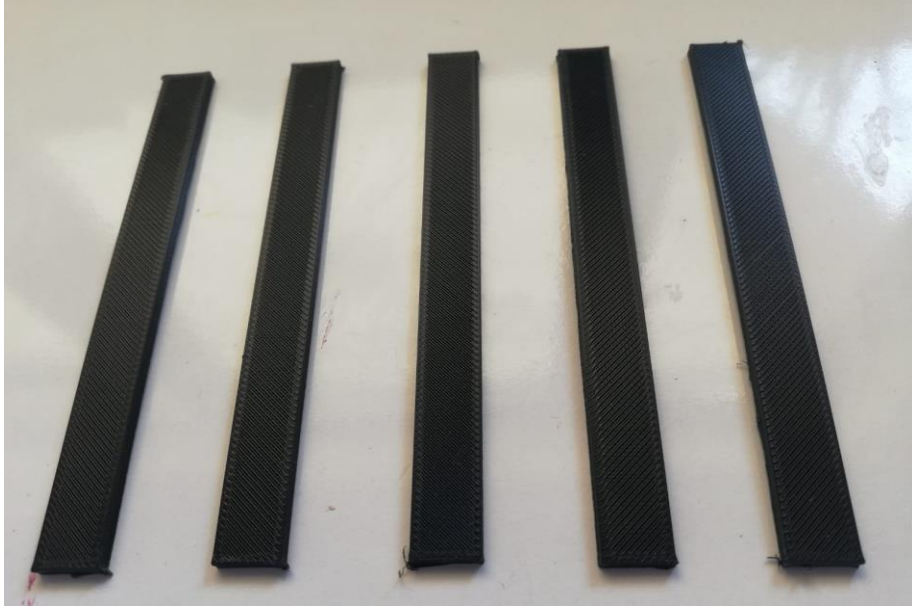
- Evlen, H., 2019, Doluluk oranının 3B yazıcıda üretilen TPU ve TPE numunelerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21 (63), 793-804.
- Gallup, N., Pringle A. M., ve ark., 2020, Parametric nasopharyngeal swab for sampling COVID-19 and other respiratory viruses: Open source design, SLA 3-D printing and UV curing system, *HardwareX*, 8.
- Gibson, I., Rosen, D. ve ark., 2015, Additive manufacturing Technologies, *Springer-Verlag New York*, New York.
- Goulas, A., Zhang S. ve ark., 2019, The impact of 3D printing process parameters on the dielectric properties of high permittivity composites, *Designs*, 3 (4), 50.
- Gregrucic, L., 2019, What is material jetting? – 3D printing simply explained, <https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/> [Ziyaret Tarihi: 12 Nisan 2019].
- Hernandez, R., Slaughter, D. ve ark., 2016, Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling, *27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, San Marcos, Texas.
- Huang, S. H., Lie, P. ve ark., 2012, Additive manufacturing and its societal impact: a literature review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191-1203.
- Honsberger, H., Rhumorbarbe, D., ve ark., 2018, How to recognize the traces left on a crime scene by a 3D-printed Liberator?: Part 1. Discharge, exterior ballistic and wounding potential, *Forensic science international*, 286, 245-251.
- Hull, C. W., 2015, The birth of 3D printing, *Research-Technology Management*, 58 (6), 25-30.
- Hull, C.C., 2016, The First 3D Printing Technology [online], *ASME Historic Mechanical Engineering Landmark*, https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/about_asme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/261-stereolithography.pdf [Ziyaret Tarihi: 4 Haziran 2019].
- İpekçi, A., Kam, M., ve Saruhan, H., 2018, Investigation of 3D printing occupancy rates effect on mechanical properties and surface roughness of PET-G material products, *Journal of New Results in Science*, 7 (2), 1-8.
- Jain, P., ve Kuthe, A. M., 2013, Feasibility study of manufacturing using rapid prototyping: FDM approach. *Procedia Engineering*, 63, 4-11.
- Johansson, F., 2016, Optimizing fused filament fabrication 3D printing for durability: Tensile properties and layer bonding, Yüksek lisans tezi, *Blekinge Institute of Technology*, İsveç.
- Johnson, G. A., ve French, J. J., 2018, Evaluation of infill effect on mechanical properties of consumer 3D printing materials, *Advances in Technology Innovation*, 3 (4) (2018): 179-184.
- Kam, M., Saruhan, H., ve İpekçi, A., 2019, Farklı doldurma şekillerinin üç boyutlu yazıcılarda üretilen ürünlerin mukavemetine etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (3), 951-960.
- Karaarslan, M. H., 2015, 3 Boyutlu yazdırma teknolojisi: sosyo-ekonomik etkileri için yeni ufuklar, *Girişimcilik ve Kalkınma Dergisi*, 10 (1).
- Kovan, V., Tezel, T. ve ark., 2018, Printing parameters effect on surface characteristics of 3D printed PLA materials, *Machines. Technologies. Materials.*, 12 (7), 266-269.
- Kuznetsov, V. E., Solonin, A. N., 2018, Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process." *Polymers* 10 (3), 313.
- Lanzotti, A., Del Giudice, D. M., Lepore, A., ve ark., 2015, On the geometric accuracy of RepRap open-source three-dimensional printer, *Journal of Mechanical Design*, 137 (10).

- Lanzotti, A., Martorelli, M. ve ark., 2019, A comparison between mechanical properties of specimens 3D printed with virgin and recycled PLA, *Procedia CIRP*, 79, 143-146.
- Lee, B., 2014, Where Gutenberg meets guns: The liberator, 3D-printed weapons, and the first Amendment, *North Carolina Law Review*, 92, 1393.
- Leite, M., Deus A. M. ve ark., 2018, Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA, *Conference: 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*, Singapur.
- Letcher, T., ve Waytashek, M., 2014, Material property testing of 3D-printed specimen in PLA on an entry-level 3D printer, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2.
- Liu, Z., Lei, Q. ve Xing, S., 2019, Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (5), 3741-3751.
- Longhitano, G. A., Larosaa, M. A. ve ark., 2015, Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering, *Materials Research* 18 (4), 838-842.
- Manikandan, K., Jiang, X. ve ark., 2020, Effects of nozzle geometries on 3D printing of clay constructs: Quantifying contour deviation and mechanical properties, *Procedia Manufacturing*, 48, 678-683.
- Melchels, F. P. W., Feijen, J., Grijpma, D. W., 2010, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*, 31 (24), 6121-6130.
- Novakova-Marcincinova, L., ve Novak-Marcincin, J., 2013, Verification of mechanical properties of abs materials used in FDM rapid prototyping technology, *Proceedings in manufacturing systems*, 8 (2), 87-92.
- Özkan, Ö., Aydın, M. ve ark., 2018, Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan doluluk oranının hasar yüküne olan etkisinin belirlenmesi, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2 (1), 32-39.
- Özsoy, K., Duman, B., 2017, Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1 (1), 36-48.
- Palic, N., Zivic, F. ve ark., 2019, Mechanical behaviour of small load bearing structures fabricated by 3D printing, *Applied Engineering Letters: Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4, 88-92.
- Patan, Z. Y., 2019, Karbon fiber takviyeli abs kompozitlerin fdm 3b yazıcı ile üretimi ve ansys ile modellenmesi, Yüksek lisans tezi, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çanakkale.
- Rajpurohit, S., ve Dave, H., 2018, Tensile properties of 3D printed PLA under unidirectional and bidirectional raster angle: a comparative study, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 12 (1), 6-11.
- Rengier, F., Mehndiratta, A. ve ark., 2010, 3D printing based on imaging data: review of medical applications, *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 5 (4), 335-341.
- Shubham, P., Sikidar, A. ve Chand, T., 2016, The influence of layer thickness on mechanical properties of the 3D printed ABS polymer by fused deposition modeling, *Key Engineering Materials*, 706, 63-67.
- Stephens, B., Azimi, P., Orch, Z. E., Ramos, T., 2013, Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers, *Atmospheric Environment*, 79, 334-339.
- STM Mühendislik & Teknoloji & Danışmanlık, 2018, Katmanlı imalat yöntemleri ve havacılık uygulamaları, https://thinktech.stm.com.tr/uploads/raporlar/pdf/1472017131430826_satm_bb_17_0200_sektor_raporlari_katmanli_260417.pdf [Ziyaret Tarihi: 01 Mart 2019].

- Svensson, E., 2017, Material characterization of 3D-printed energy-absorbent polymers inspired by nature, Yüksek lisans tezi, *Chalmers University of Technology Department of Materials and Manufacturing Technology*, İsveç.
- Threeding, 2016, Binder jetting 3-B printing technology, <https://www.threeding.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology> [Ziyaret Tarihi:10 Ağustos 2020]
- Turhan, S., 2016, DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarında lazer parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, Yüksek lisans tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Isparta.
- Tymrak, B. M., Megan K., ve Pearce J. M., 2014, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, *Materials & Design*, 58, 242-246.
- Vikas, B., Hussain, M. M., Reddy C.S., 2019, Optimization of 3D printing process parameters of poly lactic acid materials by fused deposition modeling process, *International Journal of Engineering Development and Research*, 7 (3), 189-196.
- Wittbrodt, B., ve Pearce, J. M., 2015, The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components, *Additive Manufacturing*, 8, 110-116.
- Wu, W., Geng, P. ve ark., 2015, Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS, *Materials*, 8(9), 5834-5846.
- Xometry, 2017, Comparing 3D Printing Processes, <https://www.xometry.com/blog/3d-printing-processes> [Ziyaret Tarihi:08 Ağustos 2020].
- Yaman, S., 2019, 3B yazıcı ile üretilen Pla40/Abs60 malzemesinin termal ve mekanik özelliklerinin deneysel incelenmesi, Yüksek lisans tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Düzce.

EKLER

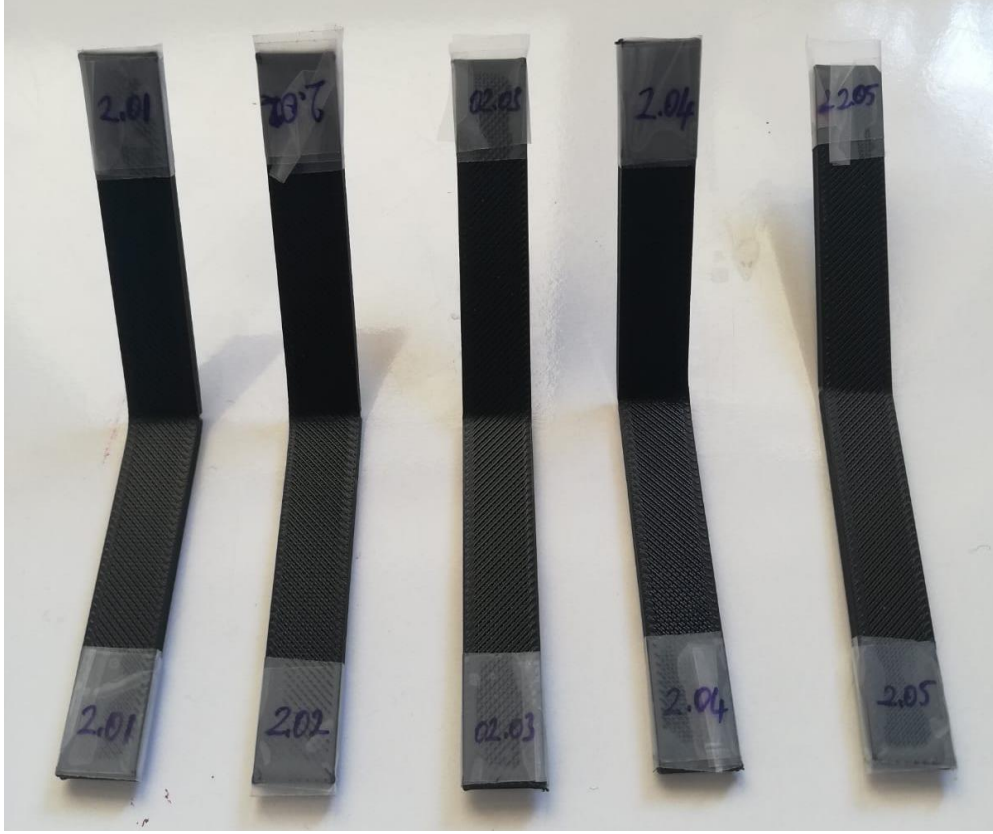
EK-1



Şekil Ek 1.1: Beşer adet aynı özellikte bir test numunesi grubunun test öncesi durumu



Şekil Ek 1.2: 1 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



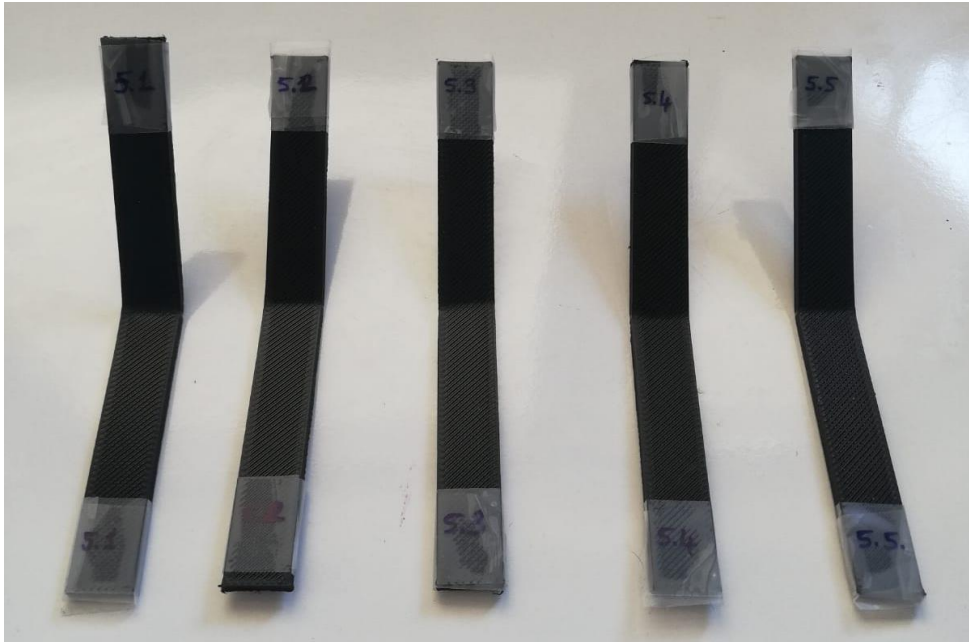
Şekil Ek 1.3: 2 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



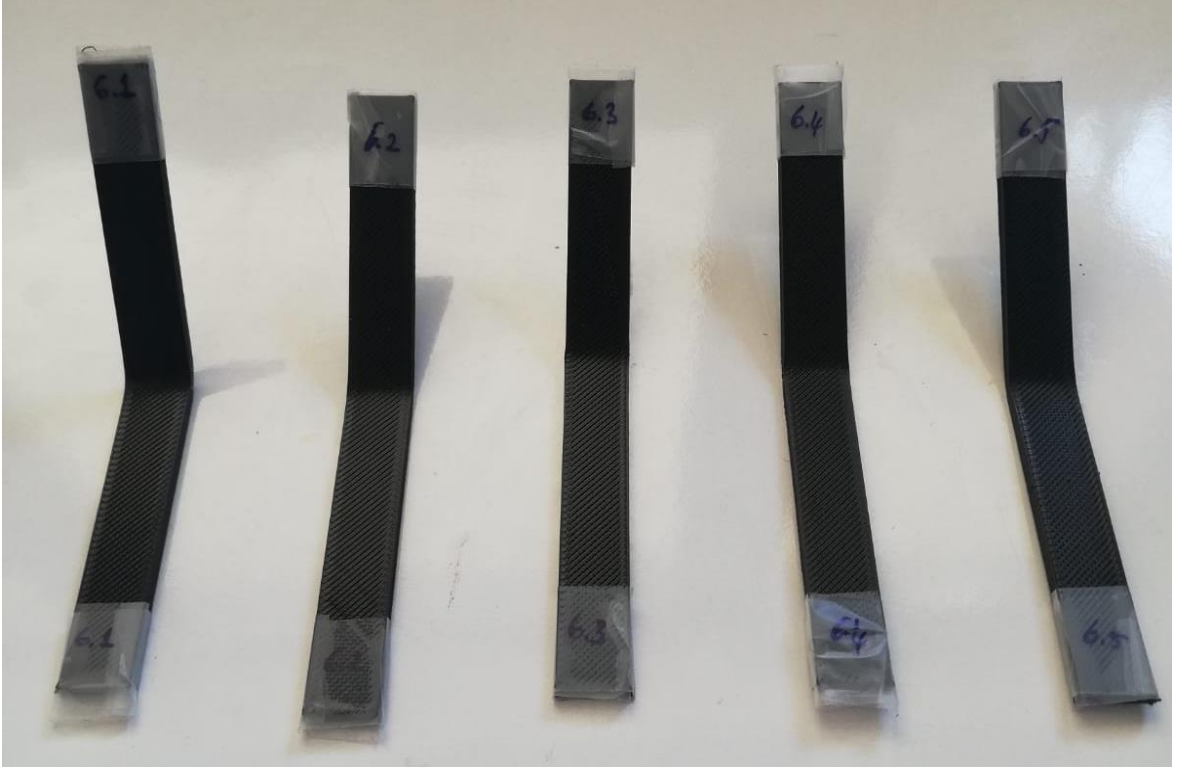
Şekil Ek 1.4: 3 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.5. 4 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.6. 5 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.7: 6 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



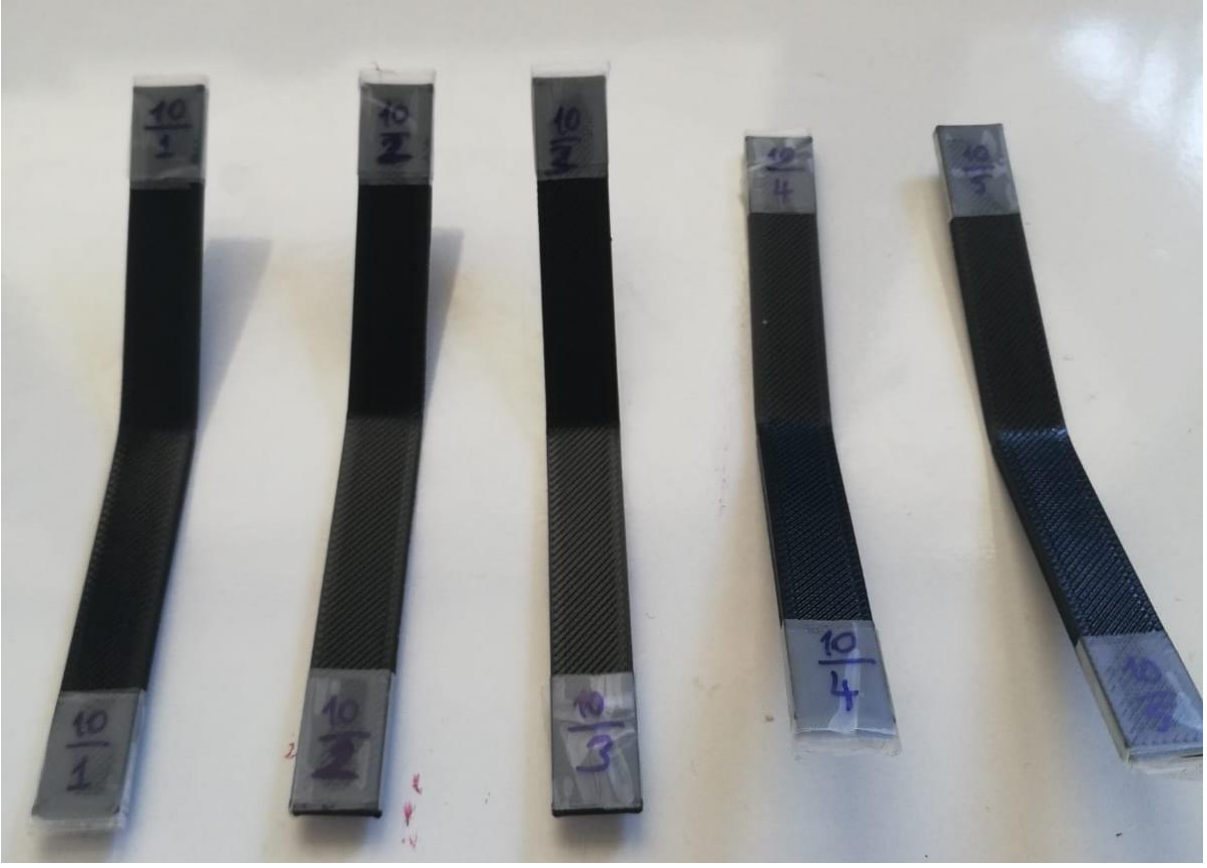
Şekil Ek 1.8: 7 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.9. 8 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.10. 9 numaralı numune grubunun test sonrası durumu



Şekil Ek 1.11. 10 numaralı numune grubunun test sonrası durumu

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Selim ÖZDOĞAN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Karaman / 14.06.1995
Telefon :
e-mail : selimozdogann@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Abdullah Tayyar Anadolu Lisesi / Karaman	2013
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, Selçuklu/KONYA	2017
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Meram/KONYA	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017-2019	KAYAHAN A.Ş	Üretim Planlama Mühendisi
2019-(Devam)	SEB TRANS ULUSLARARASI TAŞIMACILIK İÇ VE DIŞ TİCARET LTD. ŞTİ.	Müdür