EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN NUMUNELERİN KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Merve HATİPOĞLU

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN NUMUNELERİN KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Merve HATİPOĞLU
501910046
(0000-0003-3424-1489)

Doç.Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN
(Danışman)
0000-0003-1739-1143

YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN NUMUNELERİN KIRILMA ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Merve HATİPOĞLU

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Teknolojideki gelişimler dolayısıyla karmaşık geometrilere sahip, fonksiyonel parçalara gereksinim artmıştır. Geleneksel üretim yöntemleri ile karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretiminde yaşanan zorluklar, yüksek maliyet ve üretim süresi nedeniyle yerini hızla gelişen eklemeli imalat yöntemlerine bırakmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinin en bilinenlerinden birisi malzeme ekstrüzyonu (Fused Deposition Modeling-FDM) yöntemidir. Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçalar artık sadece görsel değil fonksiyonel amaçlarla kullanılmaktadır. Bu nedenle geleneksel üretim yöntemleriyle üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan çekme, basma, eğme gibi testlerin eklemeli imalat ile üretilen parçalara da uygulanması önem kazanmıştır ve bu konudaki literatürdeki çalışmalar giderek artmıştır. Buna rağmen henüz, eklemeli imalat ile üretilen parçaların kırılma davranışlarının incelendiği, az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu motivasyonla bu çalışmada, FDM yöntemiyle ile üretilen parçaların çentik içermesi durumunda kırılma özelliklerinin nasıl etkilendiği deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı çentik tiplerini (O, V ve U tipi) içeren geometrilere sahip çekme numunelere çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca yazdırma açısının etkisini de değerlendirmek amacıyla numuneler çekme yönüyle farklı açılar yapacak (0º, ±45º) ve konsantrik yazdırma desenine sahip şekillerde de üretilmiştir. Böylece hem çentik tipi hem de yazdırma açısının kırılma kuvveti, kırılma uzaması ve kırılma enerjisini nasıl etkilediği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: eklemeli imalat, malzeme ekstrüzyonu, kırılma davranışı, çentik, çekme testi

2022, vii + 51 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DETERMINATION OF FRACTURE PROPERTIES OF SAMPLES

MANUFACTURED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Merve HATİPOĞLU

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc.Prof. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN

Due to the developments in technology, the need for functional parts with complex geometries has increased. One of the most well-known additive manufacturing methods is the material extrusion (Fused Deposition Modeling-FDM) method. For this reason, the application of tests such as tensile, compression and bending, which are used to determine the mechanical properties of the parts produced by traditional production methods, has gained importance on the parts produced by additive manufacturing, and the studies in the literature on this subject have gradually increased. However, there are few studies examining the fracture behavior of parts produced by additive manufacturing. With this motivation, in this study, it has been experimentally investigated how the fracture properties of the parts produced by FDM method are affected in case of notch. Tensile test was applied to tensile specimens with geometries including different notch types (O, V and U type). In addition, in order to evaluate the effect of the printing angle, the samples were produced in shapes that will make different angles (0º, ±45º) with the drawing direction and have a concentric printing pattern. Thus, how both the notch type and the printing angle affect the breaking force, breaking elongation and breaking energy was investigated.

Key words: additive manufacturing, material extrusion, fracture behavior, notch, tensile testing

2022, vii + 51 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının yürütülmesinde destek ve yardımlarını esirgemeyen, yüksek lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı yapan ve akademik anlamda gelişimime destek olarak değerli bilgilerini benimle paylaşan Doç. Dr. Betül GÜLÇİMEN ÇAKAN 'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez sürecim boyunca ihtiyaç duyduğum her konuda yardımlarını esirgemeyen ve verdiği motivasyonlarla süreci kolaylaştıran sevgili müdürüm Sena KILIÇ'a ve tüm RePG Enerji Sistemleri San. ve Tic. A.Ş ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan sonsuz desteklerini her daim hissettiğim canım aileme teşekkürlerimi sunarım.

Merve HATİPOĞLU

…/…/…….

İÇİNDEKİLER

sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vi
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1.GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 2
2.1 Eklemeli Üretim 2
2.1.1 Malzeme ekstrüzyonu (FDM) 4
2.1.2 Çok Jetli Modelleme (MJM) 7
2.1.3. Fotopolimerizasyon (SLA) 8
2.2 Eklemeli İmalat ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri 9
2.2.1 Gerilme Yığılması 10
2.2.2 FDM ile Üretilmiş Parçalarda Kırılma 14
3.MATERYAL ve YÖNTEM 15
3.1 Materyal 15
3.2 Yöntem 16
3.2.1 Numunelerin Üretilmesi 16
3.2.2 Çekme Deneyi 18
3.2.3 Çentikli Çekme Numuneleri 20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 25
4.1 Çekme Testi Sonuçları 27
4.2 Doldurma Açısının Mekanik Özelliklere Etkisi 31
4.3 Çentik Tipinin Mekanik Özelliklere Etkisi 36
4.4 Kırılma Yüzeyleri 41
5. SONUÇ 43
KAYNAKLAR 45
ÖZGEÇMİŞ 47

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
σ_f	Kırılma enerjisi
$\sigma_{kırılma}$	Kırılma gerilme değeri
σ_{max}	Maksimum kırılma gerilme değeri
σ_{nom}	Nominal gerilme değeri
$\varepsilon_{kırılma}$	Gerilme şekil değiştirme
D	Çap değeri
h	Uzunluk değeri
K	Gerilme yığılma katsayısı
K_t	Gerilime yığılma katsayısı
K_{tu}	Gerilime yığılma katsayısı
$K_{t\theta}$	Gerilime yığılma katsayısı
l	Uzunluk değeri
r	Yarıçap değeri
t	Kalınlık değeri
W	Genişlik değeri

Kısaltmalar	**Açıklama**
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
MN	Mega Newton
mm	milimetre
MJM	Çok Jetli Modelleme
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ASTM	American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
PLA	Polilaktik Asit
TPU	Termoplastik Poliüretan
PEEK	Polieter Eter Keton
SLM	Seçici Lazer Eritme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
FDM	Eriyik Biriktirme Modelleme
SLA	Tarayarak Işıkla Kürleme
MJM	Çok Jetli Modelleme

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2. 1.	Eklemeli üretim işlemi akış şeması.....	4
Şekil 2.2.	Malzeme ekstrüzyonu (FDM) yönteminin a) üretim aşamaları (Leary 2020), b) çalışma prensibi (Tian ve ark. 2016)	6
Şekil 2.3.	Çok Jetli Modelleme (MJM) yönteminin a) şematik çalışma prensibi, (Chua ve ark. 2010), (b) MJM yöntemi ile üretilmiş parçalar (http://www.3dsystems.com, (2013)	7
Şekil 2.4.	Fotopolimerizasyon (SLA) yöntemi çalışma prensibi ("Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now" Formlabs, Jun. 20, 2018.)…….....	9
Şekil 2.5.	Çentiksiz numunede gerilme dağılımı	
Şekil 2.6.	O Çentik numunede gerilme dağılımı	11
Şekil 2.7.	U çentik numunede gerilme dağılımı.....	12
Şekil 2.8.	V çentik numunede gerilme dağılımı.....	13
Şekil 2.9.	Malzeme ekstrüzyonu ile yazdırılmış olan parçalarda kırılma davranışı (Young ve ark. , 2016)	14
Şekil 3.1.	FDM yönteminde yazdırma yönleri (https://www.porima3d.com/Uploads/Dosyalar/porima-tds-r.pdf).....	18
Şekil 3.2.	Creality Ender 6 pro 3 boyutlu yazıcı görseli.....	19
Şekil 3.3.	FDM yönteminde ait katman yüksekliği ve ekstrüzyon genişliği.....	20
Şekil 3.4.	ASTM D638 standardına göre çekme numunesi ve boyutları.....	21
Şekil 3.5.	WDW-100C çekme testi cihazına yerleştirilen ASTM 638 deney numunesi.....	22
Şekil 3.6.	Üretilen çentikli numuneler a) O çentik b) U çentik c) V çentik.....	23
Şekil 3.7.	0º doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri.....	24
Şekil 3.8.	± 45º doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri.....	24
Şekil 3.9.	Konsantrik doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri.....	25
Şekil 3.10.	0º doldurma açılı ASTM D638 numune görselleri.....	25
Şekil 3.11.	Konsantrik doldurma açılı U, O, V çentik numune.....	26
Şekil 3.12.	0º doldurma açılı U, O, V çentik numune.....	26
Şekil 3.13.	± 45º doldurma açılı U, O, V çentik numune.....	26
Şekil 4.1.	Konsantrik doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği.....	27
Şekil 4.2.	Konsantrik doldurma açılı V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği.....	27
Şekil 4.3.	Konsantrik doldurma açılı sahip U çentik numunelere ait kuvvet uzama grafiği.....	28
Şekil 4.4.	±45º doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği	28
Şekil 4.5.	±45º doldurma açılı V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği	29
Şekil 4.6.	±45º doldurma açılı U çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği	29
Şekil 4.7.	0º doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği.....	30
Şekil 4.8.	0º doldurma açılı V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği.....	30
Şekil 4.9.	0º doldurma açılı U çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği....	31
Şekil 4.10.	U çentik numune ile ASTM numunenin kuvvet- uzamama değerleri karşılaştırma grafiği.....	31
Şekil 4.11.	Konsantrik doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri.....	30

Şekil 4.12.	0º doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri.....	30
Şekil 4.13.	±45º doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri	31
Şekil 4.14	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin uzama grafiği	32
Şekil 4.15	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin kuvvet grafiği.....	32
Şekil 4.16	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin enerji grafiği.....	33
Şekil 4.17	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin uzama grafiği	34
Şekil 4.18	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin kuvvet grafiği	34
Şekil 4.19	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin enerji grafiği	35
Şekil 4.20	0º, ±45º ve konsantrik doldurma desenine sahip V çentik numunenin uzama grafiği	35
Şekil 4.21	0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı V çentik numunenin kuvvet grafiği	36
Şekil 4.22	0, ±45º ve konsantrik doldurma açılı V çentik numunenin enerji grafiği	36
Şekil 4.23	Çentik tipinin kırılma uzama değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)...	37
Şekil 4.24	Çentik tipinin kırılma kuvveti değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)	38
Şekil 4.25	Çentik tipinin kırılma enerjisi değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)	38
Şekil 4.26	Konsantrik yazdırma desenine sahip O çentik numunenin kırılma görüntüleri.....	41
Şekil 4.27.	Konsantrik yazdırma desenine sahip U çentik numunenin kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü	42
Şekil 4.28.	Konsantrik yazdırma desenine sahip V çentik numunelerin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü.....	42
Şekil 4.29.	0º yazdırma desenine sahip O çentik numunenin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü.....	43
Şekil 4.30.	0º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü.....	43
Şekil 4.31.	0º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü.....	44
Şekil 4.32.	±45º yazdırma desenine sahip O çentik numunenin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü.....	44
Şekil 4.33.	±45º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin makroskobik görüntüleri	45
Şekil 4.34.	±45º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin makroskobik ve kırılma yüzeyinin mikroskobik görüntüsü	45
Şekil 4.35.	±45º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin makroskobik görüntüleri	45
Şekil 4.36.	±45º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Porima PLA filamentin fiziksel ve mekanik özellikleri 15
Çizelge 3.2. Porima PLA filamente ait yazdırma parametreleri için önerilen değerler 16
Çizelge 3.3. Creality Ender 6 pro 3 boyutlu yazıcı teknik özellikleri 17
Çizelge 3.4. 0º, ± 45º doldurma açılı ve konsantrik basımlı numunelerin geometrik ölçüleri (birimler mm cinsindendir) 21
Çizelge 3.5. Numune tipine bağlı olarak adetler 21
Çizelge 4.1. Çentik tipine bağlı olarak ASTM çekme numunesine göre kırılma gerilmesindeki düşüş değerleri ($(\%\Delta\sigma_{kırılma})$ ve literatürle karşılaştırma 39
Çizelge 4.2 Çentik tipine bağlı olarak çekme numunelerinin gerilme yığılma katsayısı (K) , kırılma gerilme $(\sigma_{kırılma})$ ve $\varepsilon_{kırılma}$ (%) değerleri 40

1.GİRİŞ

Geleneksel üretim yöntemleri ile üretilmesi zor olan karmaşık yapıdaki ürünlerin üretilmesine olanak sağlayan 3 boyutlu yazım tekniklerinin kullanımı gelişen teknoloji ile her geçen gün artmaktadır.

3 boyutlu yazım tekniğinde geleneksel üretiminden farklı olarak polimer, reçine, kompozit gibi birçok hammaddeden ürün üretilebilmektedir. Prototip, yedek parça, medikal uygulamalar, kalıp oluşturma gibi çeşitli amaçlara yönelik kullanım sağlamaktadır. 3 boyutlu yazım tekniği ile üretilen parçaların üzerinde değişikliklerin hızlı yapılması, maliyetinin diğer yöntemlere göre daha ucuz olması, malzemelerin dönüştürülebilir olması büyük kolaylık sağlamaktadır. Teknik, tasarımların dijital ortamda hazırlanması esnasında ürünün doldurma açısı, doluluk oranı, katman kalınlığı gibi parametreler ile çeşitlilik elde edilmesine imkân tanımaktadır.

Geleneksel üretim yöntemlerinde ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için eğme, çekme, basma, yorulma gibi testler ile numunelerin kırılma özelliklerinin incelendiği pek çok çalışma mevcut iken 3 boyutlu yazım tekniği ile üretilen numunelerin kırılma davranışlarının incelendiği, bahsi geçen testleri içeren az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, 3 boyutlu yazım tekniği ile üretilen parçaların çentik içermesi durumunda kırılma özelliklerinin nasıl etkilendiği deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı çentik tiplerini (O, V ve U tipi) içeren geometrilere sahip çekme numuneleri malzeme ekstrüzyonu (FDM) ile üretilmiştir. Ayrıca yazdırma açısının etkisini de değerlendirmek amacıyla numuneler çekme yönüyle farklı açılar yapacak (0º, ±45º) ve konsantrik yazdırma desenine sahip şekillerde de üretilmiştir. Böylece hem çentik tipi hem de yazdırma açısının kırılma kuvveti, kırılma uzaması ve kırılma enerjisini nasıl etkilediği incelenmiştir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Eklemeli Üretim

Eklemeli (katmanlı) üretim metal, plastik, kompozit ve organik malzemeler kullanılarak 3B model verilerinden geleneksel imalat yöntemlerinin aksine, oluşturulan katmanların üst üste eklenmesi şeklinde gerçekleştirilen imalat yöntemi olarak tanımlanır. (ASTM F2792e12a, 2012) 1970'lerde parça numuneleri üretmek amacıyla hayatımıza giren ve 1980'lerin başında gerçekleştirilen numune tasarımları ile 1990'larda metal ve seramik malzemeden mamul son kullanım amacıyla üretilen numunelerde uygulanmıştır. (Shellabear ve ark. 2004, Alcisto ve ark. 2011)

Günümüzde havacılık, uzay, savunma sanayi, biomedikal, mimari ve sağlık gibi pek çok alanda eklemeli imalat teknolojilerinin örnekleri görülmektedir. (Guo ve Leu 2013) Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin kolay elde dilebilir olması ve düşük maliyetleri sebebi ile her alanda hızla yaygınlaşmaya ve geliştirilmeye başlamış ve bu süreç günümüzde de devam etmektedir. Eklemeli imalat teknolojileri dünya çapında her geçen gün büyüyen bir endüstri haline gelmektedir. (Horn ve Ola 2012)

Eklemeli üretim yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan malzemelerden bazıları polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), polieter eter keton (PEEK)'dur. Bu malzemeler ile eklemeli imalat usullerine uygun üretilen numunelerin izotropik malzemelerden farkı tarama yönü, tarama deseni ve inşa yönüne bağlı olarak anizotropik özellik göstermesidir. Bahsedilen işleme parametreleri numunenin mekanik özellikleri açısından önemli olup mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için yazdırma parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu konu kapsamında dilimleme parametreleri, inşa yönü ve sıcaklık koşulları olarak üç temel husus bulunmaktadır.

Dilimleme parametreleri: Üretilecek numunelerin mekanik davranışları üzerinde etkili olan yazıcının nozzle çapı, üretilecek numunenin katman kalınlığı, yazıcının basım sırasında yüksek sıcaklıkta normale göre daha sıvı bir hal almış filamanetinin akış hızı, ekstrüzyon hızı, yazıcı işleme hızı, numunenin doluluk oranı, tarama açısı ve doldurma

deseni gibi parametreler bulunmaktadır.

İnşa yönü: Eriyik yığma modelleme yöntemi ile üretilen numuneler doldurma deseni, doldurma açısı ya da yazıcı üzerine konumlandırılan eksen yönüne bağlı olarak anizotropik özellikler göstermektedirler. Üretilecek parçaların dikey, yatay ya da yanal inşa yönünde üretilmesi, yapının mekanik özelliklerinin farklılaşmasına yol açmaktadır.

Sıcaklık koşulları: Eriyik yığma modelleme yönteminde kullanılan termoplastikten mamul malzemeler, yazdırma işleminin gerçekleştiği çevre sıcaklığı, yazıcının ekstrüzyon sıcaklığı ve yazıcı içerisinde numunenin konumlandırıldığı tabla sıcaklığının değişimi malzemenin mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana getirmektedir.

Geleneksel kompozit üretim teknolojilerine kıyasla, 3B baskı daha basittir ve yeniden kullanılabilir ham maddeler sayesinde malzeme kullanım oranı daha yüksektir, bu da kompozit parçaların üretim maliyetini büyük ölçüde azaltır. Aynı zamanda, 3B baskı karmaşık yapıların hızlı prototipini kalıplara ve bağlantı süreçlerine gerek olmadan gerçekleştirebilmektedir. (Parandoush ve ark. 2018) Gelecekte büyük uygulama beklentilerine sahip gelişmiş kompozit parçaların düşük maliyetli ve hızlı üretimi için etkili bir yol sağlamaktadır.

3 boyutlu baskı, bilgisayar ortamında ve bilgisayar kontrolü altında malzemelerin eritilip birleştirilerek üst üste gelecek şekilde 3 boyutlu fiziksel nesnelere dönüştürülmesini sağlayan kolay bir yöntemdir. Talaşlı imalat tekniklerinin ile tam tersi şeklinde gerçekleştirilir. Talaşlı imalatta üretilmek istenen 3 boyutlu nesne, kendi boyutlarını kapsayan malzeme bloklarından kesilerek oluşturulur. 3B üretim yöntemlerinde ise bilgisayar ortamında tasarlanmış olan nesne malzeme katmanlarının üst üste birleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu nedenle bahsi geçen talaşlı imalat yöntemlerinde meydana gelen gereksiz malzeme kullanımı engellenmiş olmakla birlikte geometrileri karmaşık yapıdaki nesnelerin üretimi de kolaylaşmaktadır (Sürmen 2019). Eklemeli imalat işlemi akış şeması Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. 1. Eklemeli üretim işlemi akış şeması

Günümüzde havacılık, uzay, savunma sanayi, biyomedikal, mimari ve sağlık gibi pek çok alanda eklemeli imalat teknolojilerinin örnekleri görülmektedir. (3) (Guo ve Leu 2013) Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin kolay elde dilebilir olması ve düşük maliyetleri sebebi ile her alanda hızla yaygınlaşmaya ve geliştirilmeye başlamış ve bu süreç günümüzde de devam etmektedir. Eklemeli imalat teknolojileri dünya çapında her geçen gün büyüyen bir endüstri haline gelmektedir. (Horn ve Ola 2012)

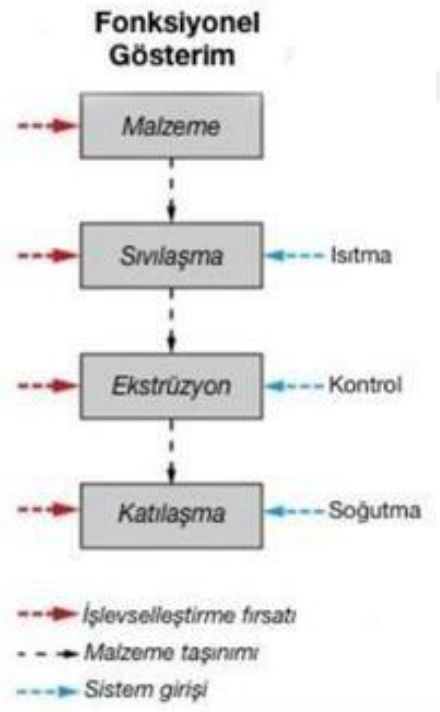
Çok sayıda eklemeli imalat yöntemi bulunmaktadır. Fakat bahsi geçen yöntemlerde malzeme katmanlarının biriktirilmek sureti ile oluşturulması, parça oluşturulması ya da çalışma prensibi olarak farklılık içermektedir. Seçici lazer eritme (SLM), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik biriktirme (FDM) gibi katmanların üretilmesi malzemenin eritilmesi ile gerçekleştirilir. Stereolitografi (SLA) yönteminde ise sıvı malzemelerin birleştirilmesi gerçekleştirilmektedir. Her yöntem kendi içerisinde farklı avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Üretim yapılacak alan belirlenerek malzeme seçimi toz ya da polimer şeklinde gerçekleştirilir.

2.1.1 Malzeme ekstrüzyonu (FDM)

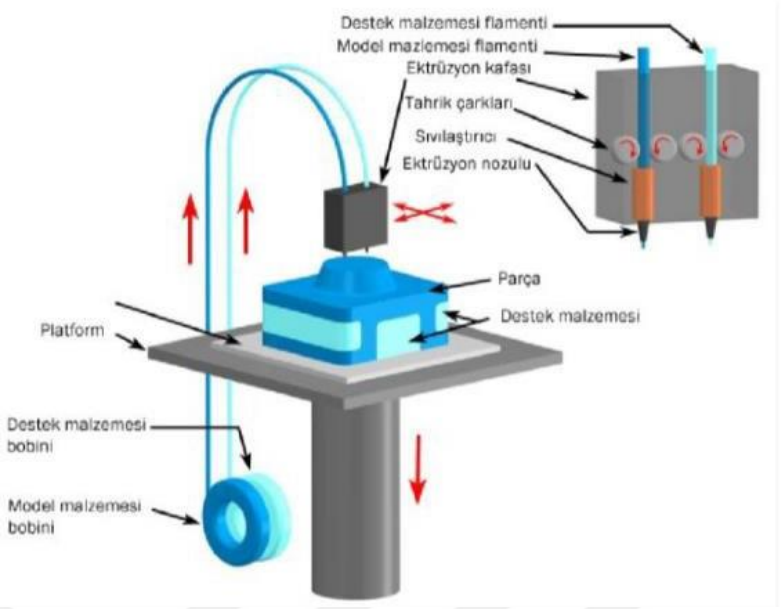
Malzeme ekstrüzyonu veya eriyik yığma modelleme (Fused Deposition Modelling, FDM) yönteminde kullanılan malzeme filament (ince plastik tel) şeklindedir. Bazı kullanımlarda filamente alternatif olarak hazneden beslenen plastik granülde kullanılmaktadır. Filament şeklindeki polimer malzemenin XYZ koordinatlarına sahip hareketli bir sisteme bağlı ekstrüderden geçirilirken nozul, malzemenin plastik filament halindeki ergime noktasının hemen üzerinde bir sıcaklıkta tutulmasını sağlayan ısıtıcı eleman içerir ve böylece plastik kolayca nozul üzerinden akararak katman oluşturmaya uygun hale gelir. Eriyik haline alan plastik filament tel malzemenin bir program dahilinde üretilecek fiziksel parçanın daha önceden dilimlenmiş kesiti üzerinde geometrik olarak

gezdirilerek o anki tabakanın üretilmesi ve tabaka üretimi sonrası platformun seçilen tabaka kalınlığı kadar aşağı indirilerek nozulun bir sonraki tabakanın imal etmesi ile devam eder. Malzeme ekstrüderden aktıktan sonra aniden sertleşir ve katmanların inşa edilmesi sağlanır.

Nozulun üretilecek fiziksel parçanın daha önceden belirlenmiş şekli çerçevesinde geometrik olarak katman üzerinde gezdirilmesi üzerinde çeşitli araştırmalar yapılmış, basma ve çekme gerilmelerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir (Ahn ve ark 2002). Üretim platformu üzerindeki dilimlenmiş BDT verisinin tüm tabakalarının üretiminin tamamlanması ile son bulur. Numunelerin istenilen baskı kalitesinde üretilmeleri için ekstrüzyon nozulunun çapı büyük önem arz etmektedir. Katman kalınlığı ve düşey boyut hassasiyeti nozulun çapına bağlıdır. Bahsi geçen nozulun çap değerleri 0.178 mm ile 0.356 mm arasında değişmektedir. Numune yazdırma ekseni olarak XY düzlemi seçildiği taktirde 0.025 mm çözünürlüğe ulaşılabilir. Sistemin uygulama aşamaları ve çalışma prensibi Şekil 2.2.' de verilmiştir. (Leary 2020)



(a)



(b)

Şekil 2. 2. Malzeme ekstrüzyonu (FDM) yönteminin a) üretim aşamaları (Leary 2020), b) çalışma prensibi (Tian ve ark. 2016)

Yöntemin avantajları şu şekildedir:

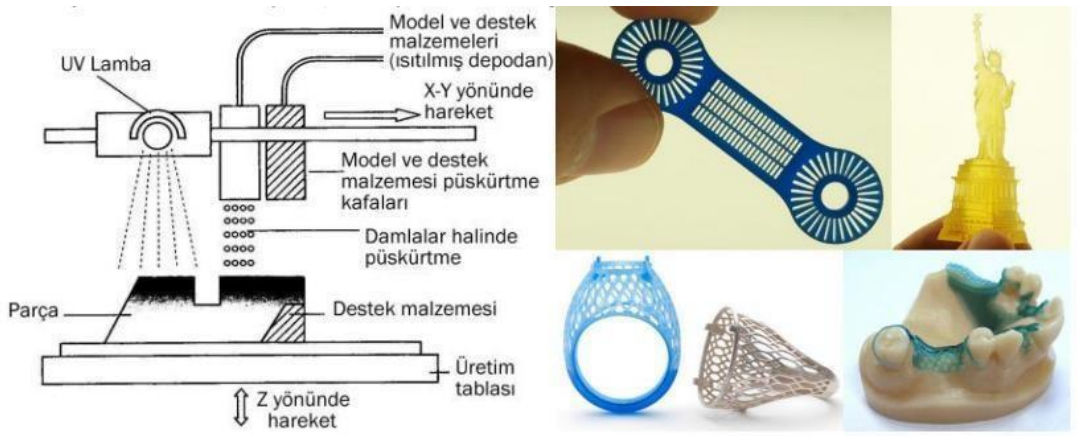
- Yöntem ve araçların kullanımı kolaydır ve kullanılan ekipmanlar fazla yer kaplamamaktadır.
- Kullanılan yöntem basit olmakla birlikte hızlıdır.
- Otomatik destek tasarlayıcı mevcuttur.
- Kullanılan malzeme üretimi gerçekleştiren operatöre zarar vermez ve çevreye duyarlıdır.

FDM yöntemi ile üretilecek parçanın basımı esnasında parça geometrisi, tabaka kalınlığı , takım yollarının seçimi, parça geometrisine göre destek verilecek noktalar ve destek geometrileri, mukavemet değerini önemli ölçüde etkileyen yüzey pürüzlülüğü için önemli parametrelerdir. 3D yazıcılarda basımı yapılacak olan parçalar için malzemenin ekstrüzyon sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, kafanın hareket hızı üretilecek parçanın kalitesini doğrudan ilgilendirdiği için uygun bir şekilde ayarlanmalıdır. (Daminabo ve ark. 2020, Sathies ve ark. 2020) ABS, poliamid, polikarbonat, polietilen, polipropilen malzemeler çok parçalı, hareketli mekanizmaların imalatı için kullanılabilir.

2.1.2 Çok Jetli Modelleme (MJM)

Çok jetli modelleme (Multi-Jet Modelling, MJM) tekniği, yazıcılarda kullanılan mürekkep püskürtmeye benzer şekilde yüzlerce nozula sahip baskı kafası kullanarak CAD verilerinden 3D plastik modeller üreten hızlı prototipleme tekniğidir. Bu teknikte mum benzeri termoplastik 300 dpi ve daha yüksek bir çözünürlükte ısıtılmış bir baskı kafası ile ince damla olarak püskürtülür ve hemen UV ışığı ile kürlenen malzeme sıcaklıkla katılaşır. Çıkıntılar için, düşük erime noktalı balmumundan yapılan, sonradan elle veya sıcak havayla uzaklaştırılabilen destek yapısı inşa edilir.

Model imalatı operatörün CAD işleme ünitesinden işlenecek parçayı ölçeği ve parça sayısını girmesiyle başlamaktadır. Yöntemde model imalatı aşağıdan yukarı doğru, malzeme biriktirmesi ise X yönündedir. Mevcut parçanın eni MJM cihazının kafasından büyük ise işleme platformu y ekseninde ilerletilir. Numune modelinin üretimi sırasında ilk katman tamamlanır ve platform aşağı doğru Z ekseninde hareket etmeye devam ederek diğer katın inşasını gerçekleştirir. Bu işlem numune modelinin tamamı inşa edilene kadar tekrarlanır. Yazıcı kafası X-Y ekseninde hareket ederken üretim tablası Z-ekseninde hareket eder. Şekil 2.3'te prosesin şematik çalışma prensibi ve üretilmiş parçaların görselleri verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 2. 3. Çok Jetli Modelleme (MJM) yönteminin a) şematik çalışma prensibi (Chua ve ark. 2010), (b) MJM yöntemi ile üretilmiş parçalar (http://www.3dsystems.com, (2013).

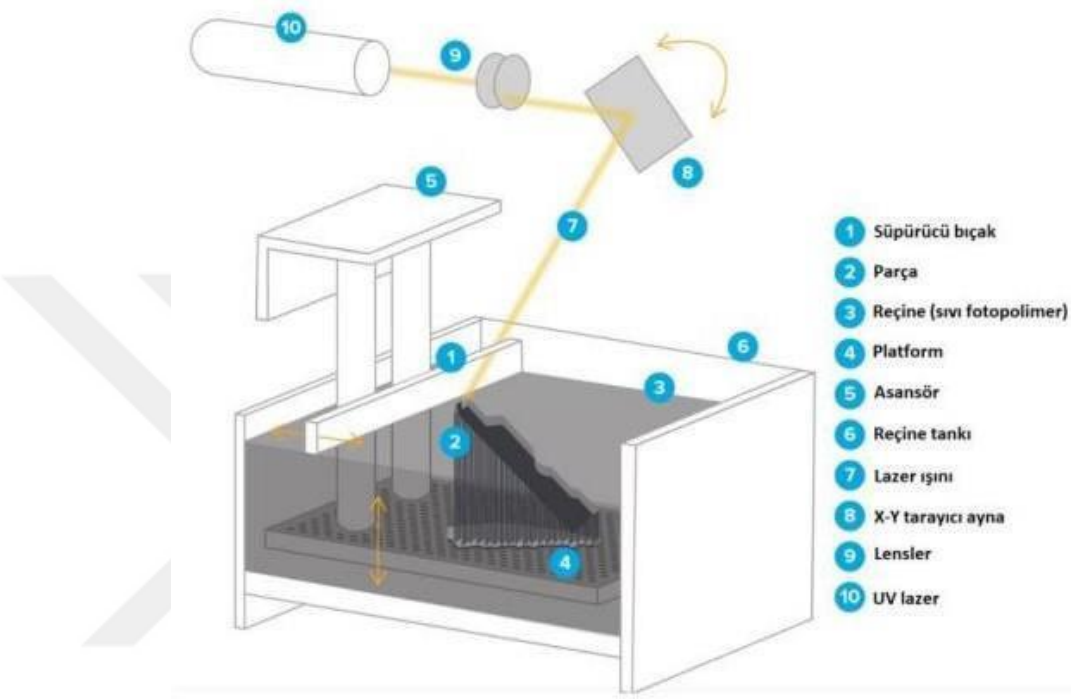
2.1.3. Fotopolimerizasyon (SLA)

Fotopolimerizasyon (Steree Lithography Apparatus, SLA) tekniği fotopolimerizasyona bağlı olmasından dolayı en dikkat çeken yöntemlerden biridir. Araştırmacılar kullanım alanı geniş olan bu yöntem için pek çok çalışma yaparak üretilen parçaların çok daha fonksiyonel olmasını sağlamışlardır. SLA yönteminin pek çok avantajı bulunmasına rağmen üretilen numunelerin fonksiyonel kullanıma engel olan zayıf mekanik özellikleri mevcuttur. (Karalekas 2004). Bu yüzden üç boyutlu polimer yapılardan elde edilen performans düşük olmakta ve ekstra proses ihtiyacı doğurmaktadır. Yapılan geliştirmeler ile akışkan ve fotoduyarlı malzemenin lazer ışığı ile vektörel taranarak kürlenmesi elde dilen yapıların boyut hassasiyetlerinde yüksek verim alınmasını sağlamaktadır. (Taormina ve ark. 2018, Manapat ve ark. 2017)

SLA, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi (ultraviyole) lazer ışını vasıtasıyla belirli kısımlarının kürleştirilmesi (katılaştırılması) prensibine dayanmaktadır. Üretilen numunelerin kürleme seviyesi termal ısıl işlem ve ultraviyole (UV) radyasyon gibi ikincil kürleme teknikleri ile değiştirilebilmektedir. Zhao ve arkadaşları elde edilen numunelerin çekme dayanımı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü vb. özelliklerini incelemiş ve UV ile yapılan kürleme işlemi ile mikrodalga ile yapılan kürleme işlemlerinde iyileştirmeler gerçekleştirmişlerdir. (Zhao ve ark. 2020, Karalekas ve ark. 2003). Ultraviyole kürleme tekniği ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinde ve parça geometrisinde meydana gelen sorunlar ve/veya hasarlar daha az meydana geldiğinden bahsi geçen teknik daha fazla tercih edilmektedir. (Salmoria ve ark. 2009) Mendes-Filipe ve ark. Yaptıkları çalışmalarda tarayarak ışıkla kürleme yönteminde kullanılan farklı foto duyarlı reçinelerde farklı ikincil kürleme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Ultraviyole ikincil kürleme üretim aşamaları ile homojen yüksek çapraz bağlı, mekanik özellikleri daha iyi malzemeler elde edilmiştir (Mendes ve ark. 2018).

Yöntem fotopolimer sıvı reçine dolu bir hazne içine doldurulması ve bir asansör kullanılması ile başlamaktadır. Sisteme yüklenen CAD modelinin ardından sıvı reçine yüzeyinde daha önceden yazılımla dilimlenmiş kesitlere karşılık gelen kısımlar, hareketli tarama sistemi ile lazer ışınını reçine tabakası üzerinde parça geometrisine göre gezdirerek ilk katmanı oluşturur. Bir katmanın tarama işlemi tamamlandıktan sonra

parçanın bulunduğu platform, katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bir kanat aracılığı ile yeni bir kat sıvı fotopolimer ilk katın üzerine sıvanır ve kürleştirme işlemi parça üretimi tamamlanana kadar sırası ile devam eder. Parça yapımı devam ettikçe parçanın dengeli durabilmesi için destekler kullanılır. İşlem tamamlandıktan sonra reçine havuzundan çıkarılan parçaların destekleri ayrıştırılır. (Çelik ve ark. 2013)



Şekil 2. 4. Fotopolimerizasyon (SLA) yöntemi çalışma prensibi ("Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now" Formlabs, Jun. 20, 2018.)

2.2 Eklemeli İmalat ile Üretilen Parçaların Mekanik Özellikleri

Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalarda yazdırma parametrelerine göre mekanik özellikler değişkenlik gösterebilmektedir. Bu parametreler yazdırma yönü, yazdırma hızı, tabla sıcaklığı, doluluk oranı, katman yüksekliği ve kalınlığı vb. olarak oldukça çeşitlidir.

Tüm bunların yanında filamentin belli bir yönde ve katman katman serilmesi sebebiyle parçaların yöne bağlı özellikleri değişmekte yani anizotropik özellik göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı eklemeli imalat ile üretilen parçaların mekanik özellikleri geleneksel yöntemlerle üretilen parçalardan farklı olmaktadır.

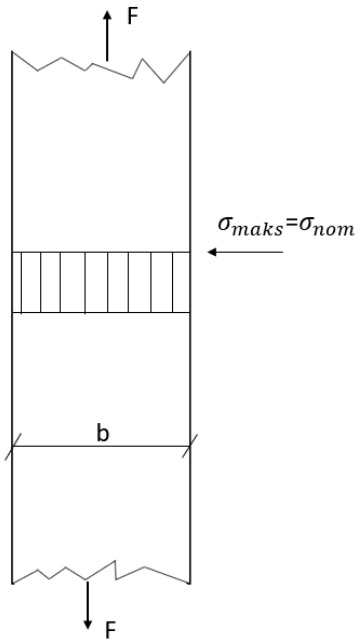
2.2.1 Gerilme Yığılması

Kuvvet etkisi altındaki bir parçanın içerisinde bulunan geometrik süreksizlikler (çatlak, boşluk, çentik vb.), parçada uniform gerilme dağılımı olmasını engeller ve gerilme gradyanı oluşturur. İşte bir elemanın küçük, bölgesel bir alanında daha büyük bir gerilim gradyanı oluştuğunda buna gerilim yığılması veya konsantrasyonu adı verilir. Bahsi geçen gerilim gradyanı yapının geometrik değişikliklerinin yakınında gerilim akışından farklı olarak, parçada oluşan ortalama ve/veya nominal gerilme değerlerinden daha yüksek gerilim eğimlerine neden olmaktadır. Oluşan en yüksek gerilme değerinin ortalama yani nominal gerilmeye oranına gerilme yığılması katsayısı (K) denir.

$$K=\frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nom}} \tag{2.1}$$

Çentik çevresinde meydana gelen gerilme yığılması ve gerilme dağılımının bulunmasına dair birden çok metot bulunmaktadır. Bunlardan bazıları; lineer elastik analiz, sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel metotlardır.

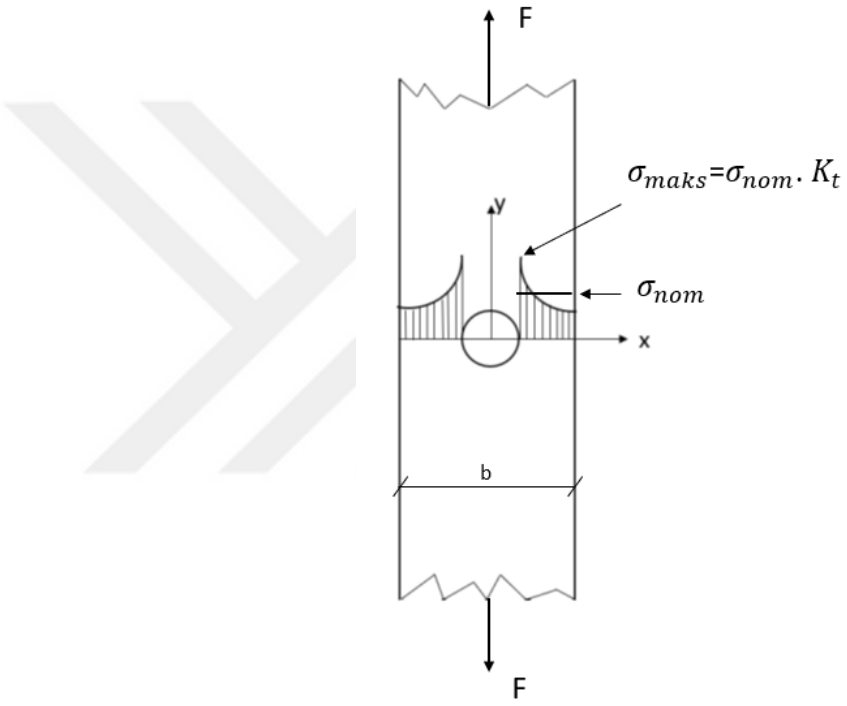
Aşağıdaki şekillerde (Şekil 2.5-2.8) dikdörtgen kesitli çentiksiz ve farklı çentik tipleri (O,V, U çentikli) içeren elemanlarda oluşan gerilme dağılımları gösterilmiş ve gerilme yığılma katsayısı (K_t) hesaplamaları verilmiştir



Şekil 2.5. Çentiksiz numunede gerilme dağılımı

Şekil 2.5'te dikdörtgen kesitli t kalınlığında çentik içermeyen bir elemana ait gerilme yığılma görseli verilmiş olup çentiksiz çekme numunesinde nominal gerilme değeri 2.2 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{nom}=\frac{F}{bt} \tag{2.2}$$

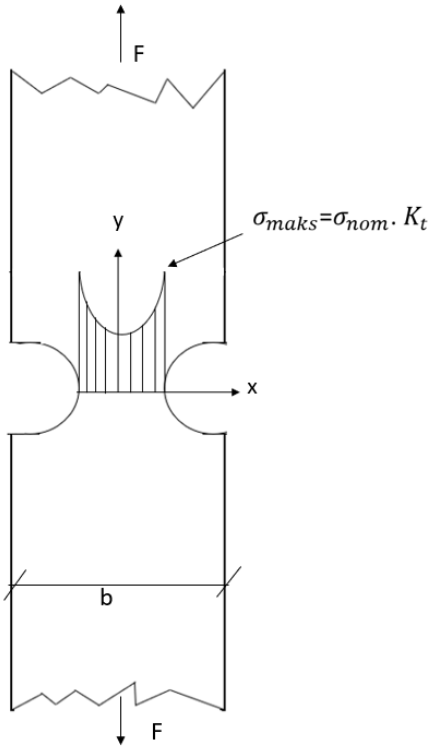


Şekil 2.6. O çentik numunede gerilme dağılımı

Aynı şekilde t kalınlığındaki orta noktasında r yarıçaplı bir dairesel deliğe sahip numuneye ait gerilme yığılma görseli Şekil 2.6'da verilmiş olup, gerilme yığılma katsayısı (K_t) 2.3 numaralı denklem ve nominal gerilme değeri (σ_{nom}) 2.4 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{max}= K_t\ \sigma_{nom} \tag{2.3}$$

$$\sigma_{nom}=\frac{P}{t(b-2r)} \tag{2.4}$$

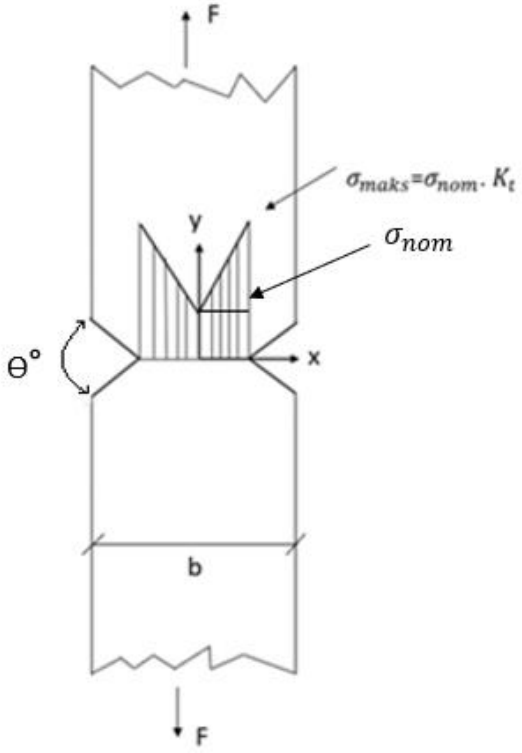


Şekil 2.7. U çentik numunede gerilme dağılımı

U formunda ve r yarıçapında çentik içeren numuneye ait gerilme yığılma görseli Şekil 2.7'de verilmiş olup, gerilme yığılma katsayısı (K_t) 2.5 numaralı denklem ile hesaplanmaktadır (Roark ve ark. 2002). Burada h çentik yüksekliğidir.

$$K_t = C_1 + C_2(\frac{2h}{b}) + C_3(\frac{2h}{b})^2 + C_4(\frac{2h}{b})^3 \quad (2.5)$$

	0.254 ≤ h/r ≤ 2.0	**2.0 ≤ h/r ≤ 50.0**
C_1	0.850 + 2.628 $\sqrt{h/r}$ – 0.413 h/r	0.833 +2.069 $\sqrt{h/r}$ – 0.009 h/r
C_2	- 1.119 $\sqrt{h/r}$ - 4.826 + 2.575 h/r	2.732- 4.157 $\sqrt{h/r}$ + 0.176 h/r
C_3	3.563 -0.514 $\sqrt{h/r}$ - 2.402 h/r	-8.859 + 5.327 $\sqrt{h/r}$ – 0.320 h/r
C_4	-2.294 + 2.713 $\sqrt{h/r}$ + 0.240 h/r	6.294 – 3.239 $\sqrt{h/r}$ + 0.154 h/r



Şekil 2.8. V çentik numunede gerilme dağılımı

V formunda çentik içeren numuneye ait gerilme yığılma görseli Şekil 2.8'de verilmiş olup, 2.6 ve 2.7 numaralı denklemler kullanılarak gerilme yığılma katsayısı ($K_{t\theta}$) elde edilmektedir (Roark ve ark. 2002).

$$K_{t\theta} = K_{tu}$$

$\frac{2h}{b}$ = 0.40 ve $\theta \leq 120°$ ise;

$$K_{t\theta} = 1.11\, K_{tu} - [0.0275 + 0.000145\theta + 0.0164\,(\frac{\theta}{120})^8]\, {K_{tu}}^2 \qquad (2.6)$$

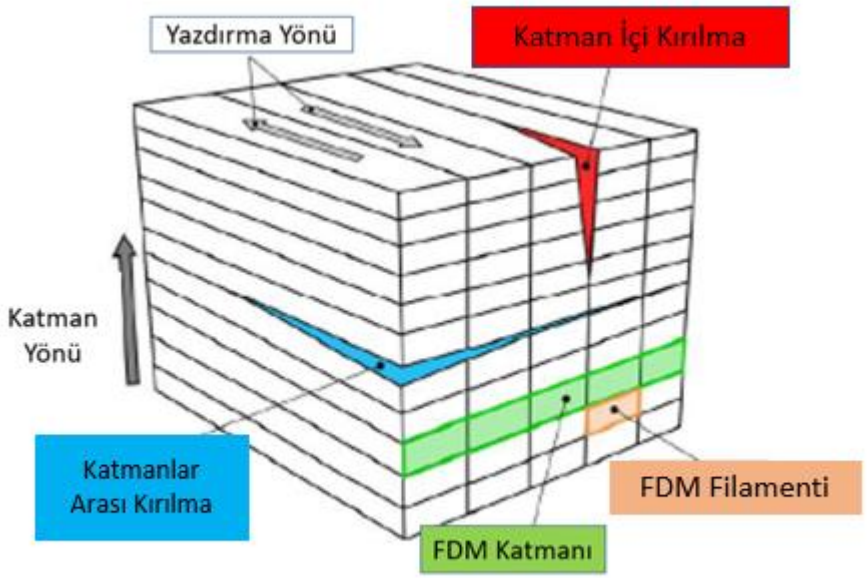
$\frac{2h}{b}$ = 0.667 ve $\theta \leq 120°$ ise;

$$K_{t\theta} = 1.11\, K_{tu} - [0.0275 + 0.00042\theta + 0.0075\,(\frac{\theta}{120})^8]\, {K_{tu}}^2 \qquad (2.7)$$

2.2.2 FDM ile Üretilmiş Parçalarda Kırılma

FDM ile üretilmiş parçalarda kırılma, kendine has oluşan mikroyapısı sebebiyle geleneksel yöntemlerle üretilen parçalardan farklıdır. Parçanın yazdırma yönü başta olmak üzere diğer yazdırma parametrelerine bağlı olarak Şekil 2.5'te verildiği gibi farklı kırılma tipleri oluşmaktadır. Mekanik özellikler gerçekleşen kırılma tipine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Katmanlar arası kırılma ve katman içi kırılma olmak üzere iki tür kırılma modu vardır. Kırılma modu, katmanlar arası kırılma mukavemeti esas olarak katmanlar arası bağlanma mukavemetine ve tabaka içi kırılma malzemenin mukavemetine bağlıdır. Genel olarak bağ mukavemeti daha düşük olduğu bu tip kırılma gerçekleştiğinde elde edilen mekanik dayanım daha düşük olur. Bu sebeple yazdırma yönünün olabildiğince maruz kalınan kuvvete paralel olması tercih edilmelidir.



Şekil 2.9. Malzeme ekstrüzyonu ile yazdırılmış olan parçalarda kırılma davranışı (Young ve ark. , 2016)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

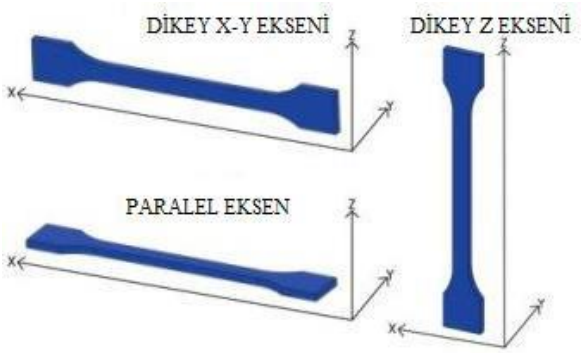
3.1 Materyal

Bu çalışmada diğer kompozit malzemelere göre çevre dostu olma özelliği taşıyan mısır nişastasından mamul polilaktik asit (PLA) kullanılmıştır. Mevcut uygulamalarda komponent türlerinin büyük çoğunluğu petrol bazlı yakıtlardan elde edilmektedir. Ambalaj ve gıda sektöründe yiyeceklerle temas eden malzemelerin insan sağlığına zarar vermeyen çevre dostu olması göz önünde bulundurulduğundan doğal organik kimyasallardan üretilen PLA yaygın olarak tercih edilen bir termoplastik malzeme haline gelmiştir. Biyobozunur ve saydam özellikte olması sağlık alanındaki uygulamalarda dikkat çekmesini sağlamıştır (Koening 1995, Maria ve ark. 2010).

Bu çalışmada, Porima firmasına ait 1,75 mm çapa sahip PLA filamentleri kullanılarak test numuneleri üretilmiştir. Tüm numuneler ASTM D638 "American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" standardına uygun olacak şekilde üretilmiştir (ASTM D638, 2014). Numunelerin kalınlığı 5 mm'dir. Çalışmada kullanılmış olan PLA filamentinin, firma katalog datasında yer alan fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Porima PLA filamentin fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değer	Birim	Test Metodu
Özkütle	1,23	g/ cm^3	ISO 1183
Eriyik Akış İndeksi	17,3	g /10 dk	ISO1183
Mekanik Özellikler			
Çekme Mukavemeti	56	MPa	ISO 527
Elastik Modül	2850	MPa	ISO 527
Kopma Uzaması	7	%	ISO 527
Çentikli Darbe Testi	14,2	kJ $/m^2$	ISO 179
Termal Özellikler			
Isıda Eğilme Sıcaklığı	55	°C	ASTM D648
Camsı Geçiş Sıcaklığı	55-60	°C	ASTM D3418
Elektriksel Özellikler			
Yüzey Direnci	$>10^9$	Ohm/sq	ASTM D257



Şekil 3.1. FDM yönteminde yazdırma yönleri (https://www.porima3d.com/Uploads/Dosyalar/porima-tds-tr.pdf)

Şekil 3.1.'de FDM yönteminde kullanılan 3 boyutlu yazıcıda yazdırma yönleri (dikey XY, dikey Z ve paralel) gösterilmiş olup, firmanın teknik verilerinde tüm bu yönler için Porima PLA filamentine ait yazdırma parametreleri için önerilen değerler Çizelge 3.2.' de verilmiştir. Bu çalışmada da bu çizelgedeki değerlerden yararlanılıp, paralel yönde basım gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. 2. Porima PLA filamente ait yazdırma parametreleri için önerilen değerler

Katman kalınlığı	0,2 mm
Doldurma Yüzdesi	%100
Yazdırma hızı	50 mm/s
Nozul sıcaklığı	200-210 °C
Tabla sıcaklığı	60 °C

3.2 Yöntem

3.2.1 Numunelerin Üretilmesi

Deneysel çalışmada kullanılan tüm numuneler Creality Ender 6 Pro 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş olup Çizelge 3.3.'de yazıcıya ait teknik veri bilgileri verilmiştir.

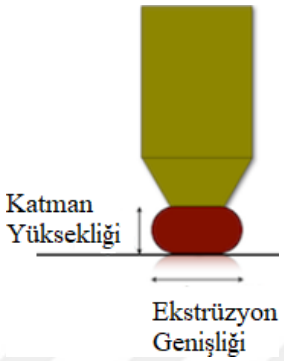


Şekil 3. 2. Creality Ender 6 Pro 3 boyutlu yazıcı görseli

Çizelge 3. 3. Creality Ender 6 Pro 3 boyutlu yazıcı teknik özellikleri

Hassasiyet	0,1 mm
Katman Kalınlığı	0,1 mm
Ekstrüder (Baskı kafası)	1 adet, uzaktan besleme
Nozzle Çapı	0,4 mm
Baskı Hacmi	250 x 250 x 400 mm
Maks. Baskı Hızı	150 mm/s
Kapalı Kasa	Evet (yarı kapalı, isteğe bağlı)
Otomatik yatak kalibrasyonu	Var
Yatak Isıtıcı	Var
Ekran	4.3 HD dokunmatik renkli ekran
Bağlantı	SD kart
Elektrik Sistemi Kesintisi	Var

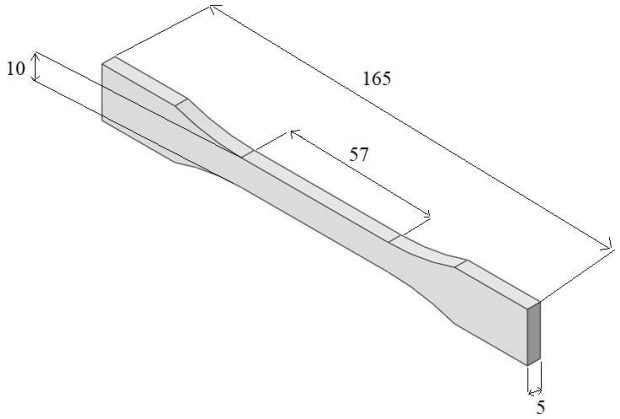
Yazıcı teknik datasında önerilen yazdırma değer aralıkları baz alınarak PLA malzemeden katman yüksekliği 0,2 mm, ekstrüzyon genişliği 0,4 mm, nozul sıcaklığı 200℃, baskı hızı 50 mm/s ve tabla sıcaklığı 60℃ olan yazdırma parametreleri kullanılarak %100 dolu olarak numune üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 3. FDM yönteminde ait katman yüksekliği ve ekstrüzyon genişliği

3.2.2 Çekme Deneyi

Çekme deneyi malzemelerin tek eksenli çekme etkisi altında mekanik davranışlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen temel mekanik testlerden biridir. Çekme deneyinin yapılışı standartlarla (ISO, ASTM) belirlenmiştir. Bahsi geçen standartlarda numune geometri ve boyutları, çekme hızı gibi numunelerle ve testin yapılışıyla alakalı detaylı bilgiler yer almaktadır. Çekme deneyi, standartlara uygun olacak şekilde dikdörtgen veya daire kesitli test numunelerinin tek eksende, sabit hızla koparılıncaya kadar çekilmesi işlemidir. Çekme cihazı ise birbirine göre aşağı ve yukarı yönde hareket etme özelliğine sahip deney parçasının bağlandığı iki çene ve bunlara hareket veya kuvvet veren, bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşur. Çenelerden birisi iki çene arasına sabitlenmiş deney parçasına uygulanması istenen değişken kuvvet değerlerini sabit hızda uygular ve uygulanan değişkene kuvvete karşılık gelen uzama değerleri kaydedilir.



Şekil 3. 4. ASTM D638 standardına göre çekme numunesi ve boyutları

Bu çalışmada Şekil 3.3'te verilen ASTM 638 standardına göre tasarlanmış çekme numunesinde dar bölüm uzunluğu 57 mm olup, çekme deneyi esnasında ekstansometre (uzama ölçer) bu kısma irtibatlandırılmış, yük hücresindeki kuvvet değerleri kaydedilerek birim şekil değiştirme ve gerilme değerleri elde edilmiştir. Numunenin dar bölüm genişliği 10 mm, tam uzunluğu 165 mm ve kalınlığı 5 mm'dir. (ASTM D638, 2014)

Deney sırasında girilen kuvvet, uzama ve numune boyutları verileri ile deney sonunda gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Bahsi geçen eğriden kırılmanın meydana geldiği maksimum yük, maksimum yük sapması, maksimum uzama ve elastisite modülü gibi mekanik özellikler belirlenir.

Üretilen deney numunelerinin çekme testleri WDW-100 elektronik universal test cihazı ile 5 mm/dk hızda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4.'de WDW-100C çekme cihazı ile çekme testi yapılan ASTM deney numunesinin deney esnasında çekilmiş görüntüsü yer almaktadır.



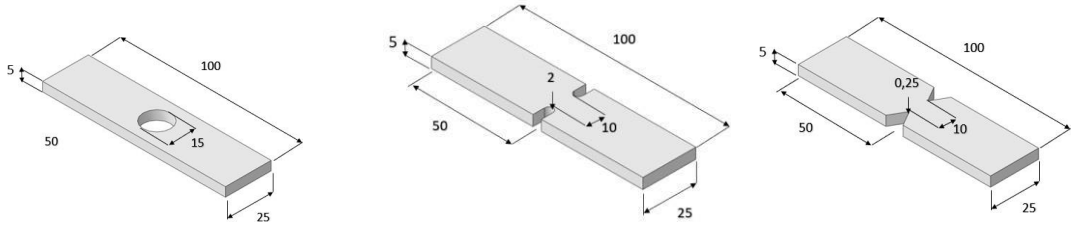
Şekil 3. 5. WDW-100C çekme testi cihazına yerleştirilen ASTM 638 deney numunesi

Çekme cihazından elde edilen kuvvet-uzama verileri bilgisayar yardımı ile grafiklere dönüştürülmekte ve grafikten elde edilen veriler işlenmektedir. Numuneler çekme cihazının çeneleri arasına düzgün ve ortalayacak şekilde yerleştirilir. Numunelerin test cihazına bağlanmasının ardından deneye başlanarak kuvvet-uzama

grafiği bilgisayar monitöründen izlenerek gerekli veriler kayıt altına alınmıştır. Grafikler yapılan deneyler sonucu çekme cihazının kaydetmiş olduğu veriler ile çizdirilmiştir.Deney sırasında kaydedilen verilerin deney sonrası çizdirilen grafiklerden bağımsız olarak da kullanılabilmesi için veri dosyası şeklinde kaydedilmiştir.

3.2.3. Çentikli Çekme Numuneleri

Çekme yükü altında farklı çentik tiplerini içeren numuneler her doldurma açısı sırasıyla 0º, ±45º ve konsantrik olarak test edilmiştir. Her çentik geometrisi için 3 adet 3 farklı doldurma desenine sahip numune üretilerek test gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyine ait numunelerinin boyutları Şekil 3.6.'te ve Çizelge 3.4.'de verilmiştir.



(a) (b) (c)

Şekil 3.6. Üretilen çentikli numuneler a) O çentik b) U çentik c) V çentik

Berto ve ark. (2017), Şekil 3.5'te verilen numune geometrilerini kullanarak farklı yoğunluklarda ticari poliüretan köpüklere çekme testi uygulamıştır. Çalışmalarında aynı zamanda farklı çentikleri içeren bu geometriler için şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu teorisini kullanarak, nümerik olarak maksi mum kuvvet yani kırılma kuvvet değerlerini hesaplamıştır. Nümerik değerlerle, deneysel kuvvet değerlerini karşılaştırmışlardır. Aynı zamanda çentik içermeyen normal çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu tez çalışmasında, bu çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmaya da yer verilmiştir.

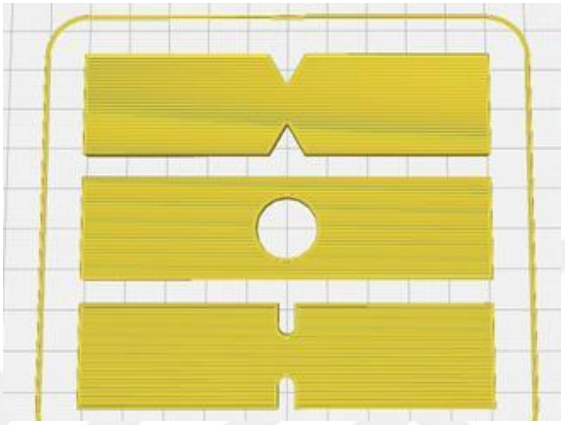
Çizelge 3. 4. 0º, ± 45º ve doldurma açılı ve konsantrik basımlı numunelerin geometrik ölçüleri (birimler mm cinsindendir)

Çentik Tipi	**l**	**W**	**b**	**D**	**R**	**t**
V çentik	100	25	10	-	0,25	5
U çentik	100	25	10	-	2	5
O çentik	100	25	-	15	-	5

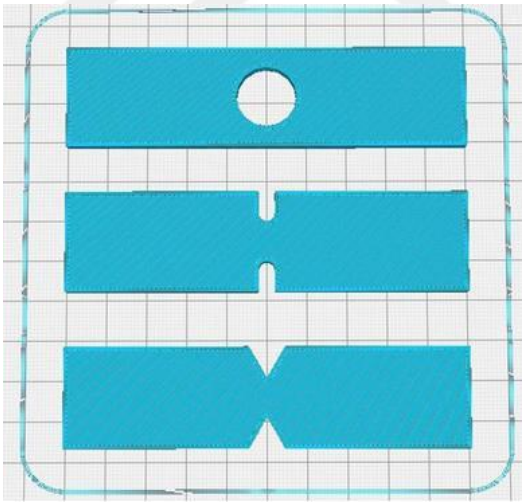
Çizelge 3. 5. Numune tipine bağlı olarak adetler

Çentik Tipi	**0º**	**±45º**	**Konsantrik**
O çentik	3	3	3
V çentik	3	3	3
U çentik	3	3	3
ASTM D638	3	-	-

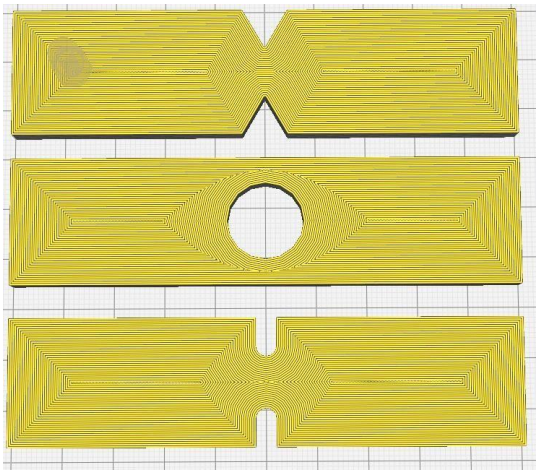
CAD modeller, Solidworks programı kullanılarak oluşturulmuştur. Dilimleme programı Cura'ya alınabilmesi için. stl (Standard Tessellation Language) formatına dönüştürülmüştür. Cura programında oluşturulan numunelerin doldurma açısı görüntüleri Şekil 3.7. ve 3.8., 3.9. ve 3.10'da verilmiştir.



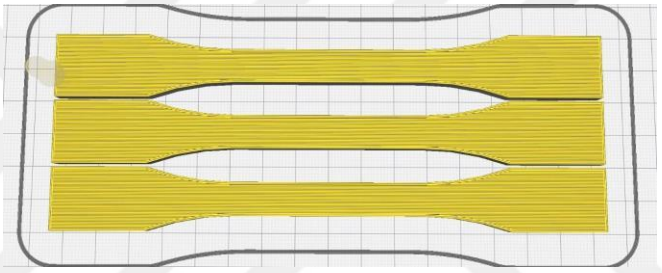
Şekil 3. 7. 0º doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri



Şekil 3. 8. ± 45º doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri

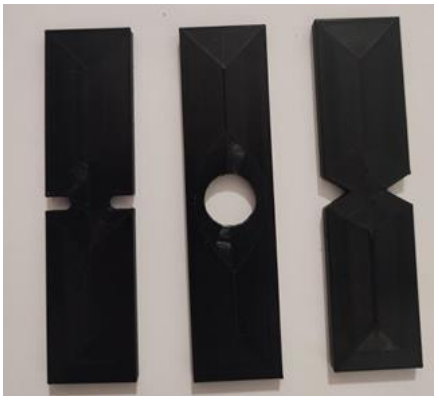


Şekil 3. 9. Konsantrik doldurma açılı V, O, U çentikli numune görselleri

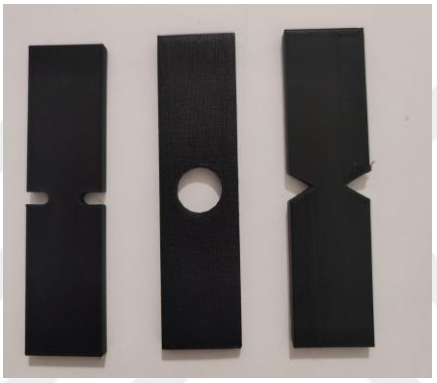


Şekil 3. 10. 0º doldurma açılı ASTM D638 numune görselleri

CURA dilimleme programında malzemenin cinsi ve istenen özelliklere göre yazdırma parametreleri belirlenmektedir. Şekil 3.11, 3.12 ve 3.13'de %100 doluluk oranına, 0º, ±45 º ve konsantrik doldurma açısına sahip olarak üretilen O, V ve U çentik numune görselleri verilmiştir.



Şekil 3. 11. Konsantrik doldurma açılı U, O, V çentik numune



Şekil 3. 12. 0º doldurma açılı U, O, V çentik numune

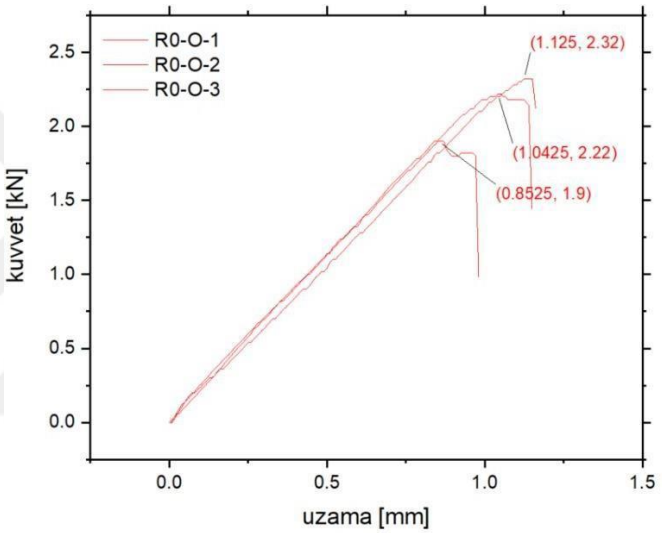


Şekil 3. 13. ± 45º doldurma açılı U, O, V çentik numune

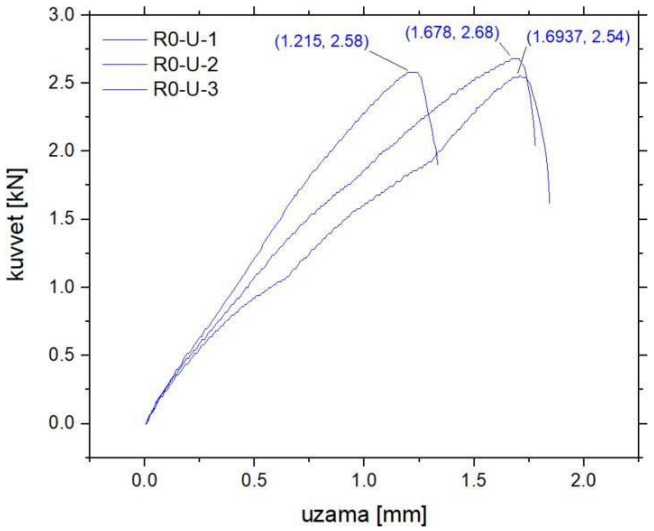
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Çekme Testi Sonuçları

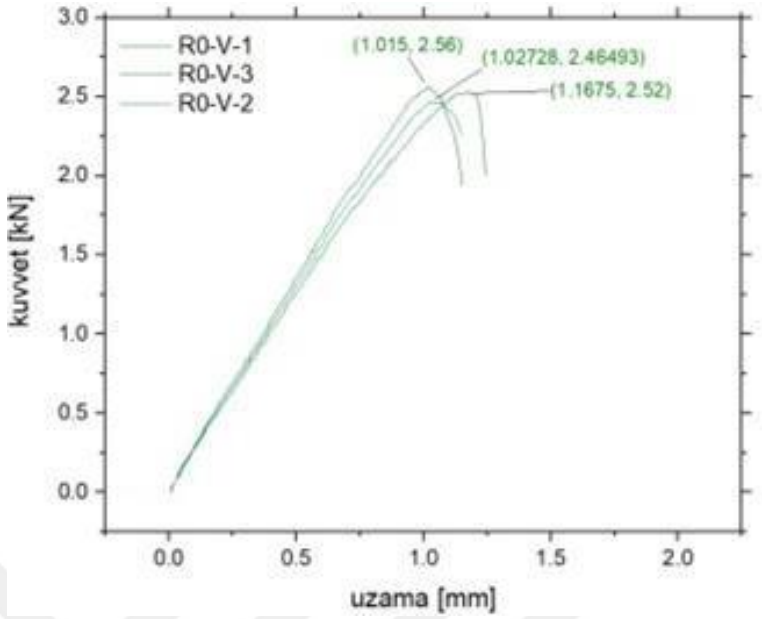
Yapılan deneysel çalışmada 0º, ±45 º ve konsantrik doldurma açısı ve O çentik, V çentik, U çentik tipi parametreleri değiştirilerek etkin parametrenin belirlenmesi amacı ile çekme testi gerçekleştirilmiştir. Farklı her çentik tipi ve doldurma deseni için üçer numune üretilmiş olmuş toplam yirmi yedi numune ve üç adet 0º doldurma desenine sahip ASTM standartlarına uygun çekme numunesi ile analiz yapılmıştır. Çekme testlerinden elde edilen kuvvet- uzama eğrileri aşağıda verilmiştir.



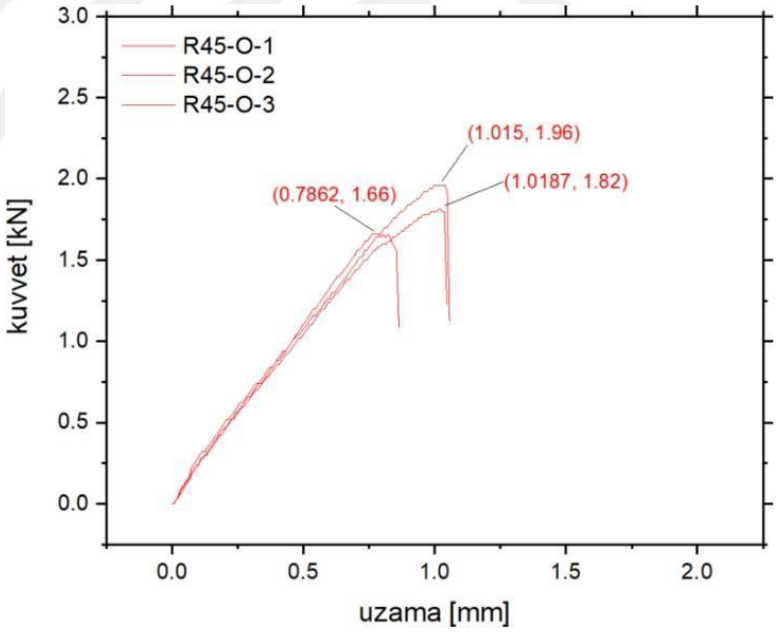
Şekil 4. 1. 0º doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



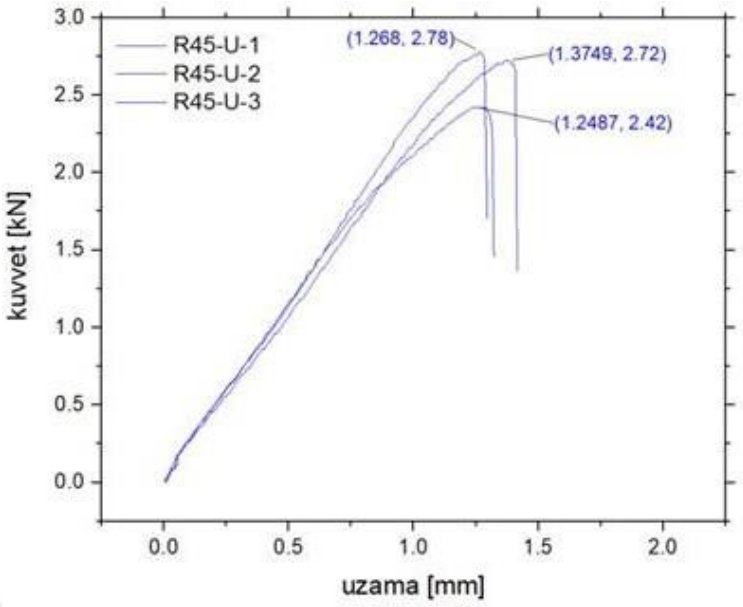
Şekil 4. 2. 0º doldurma açılı U çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



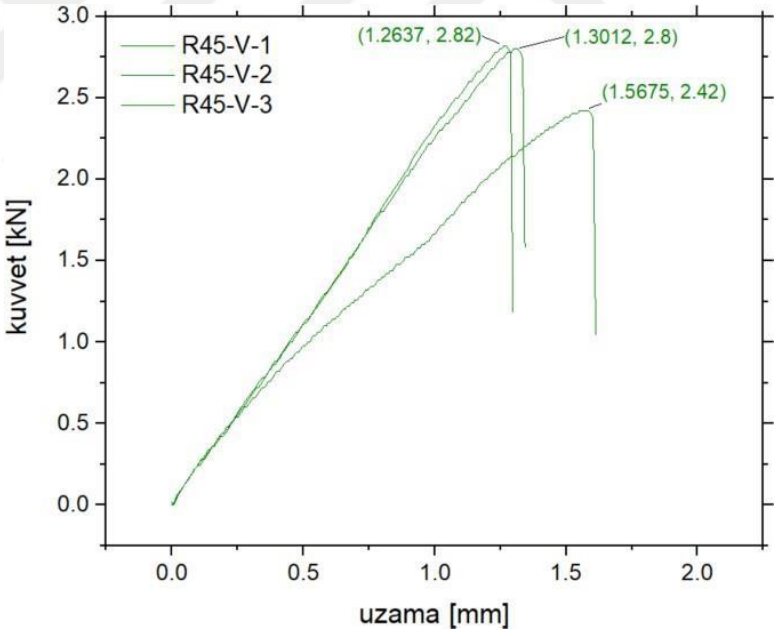
Şekil 4. 3. 0º doldurma açılı sahip V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



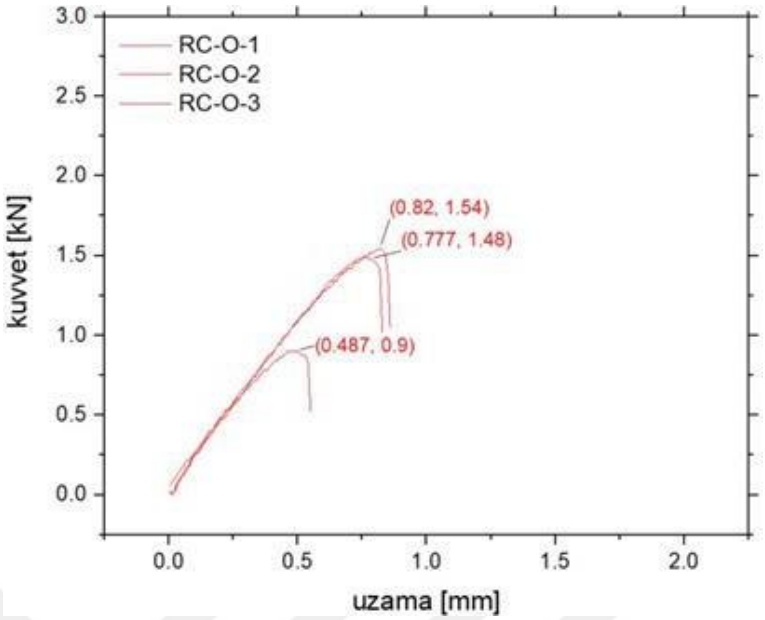
Şekil 4. 4. ±45º doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



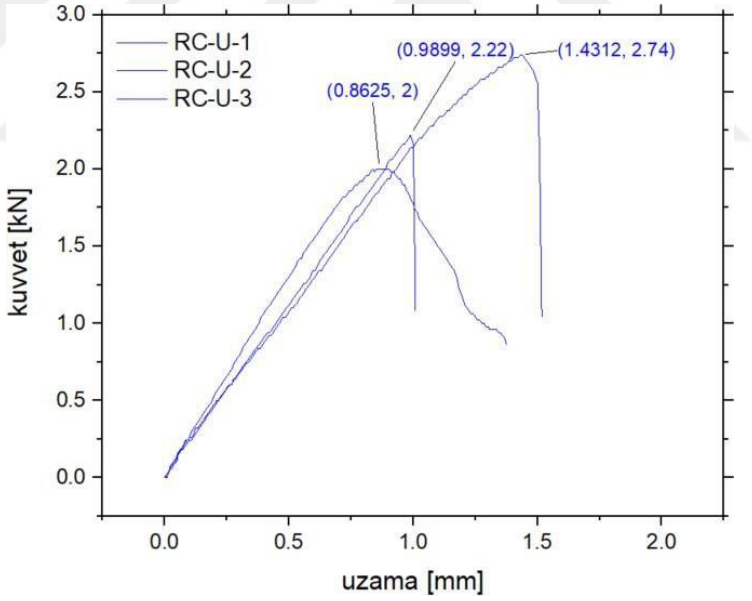
Şekil 4. 5. ±45º doldurma açılı U çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



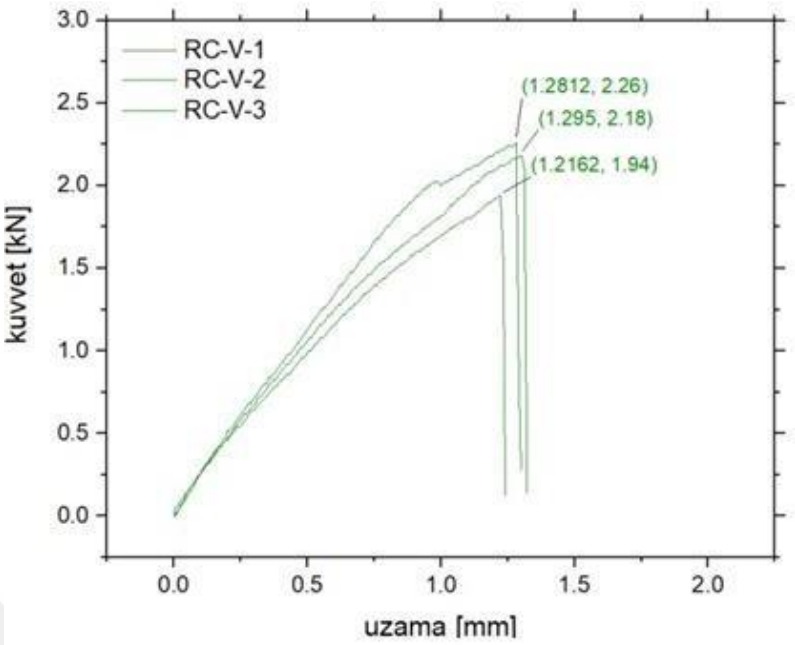
Şekil 4. 6. ±45º doldurma açılı V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



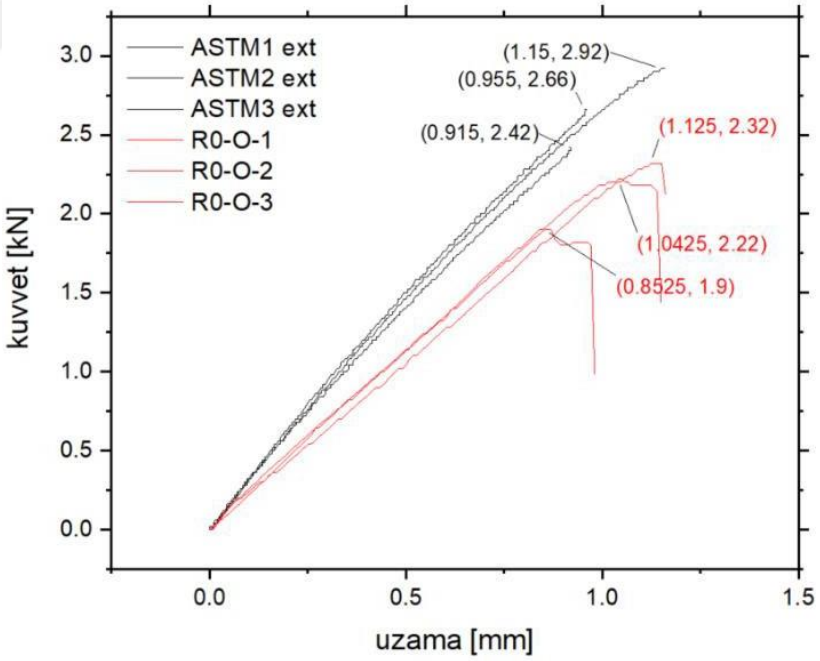
Şekil 4. 7. Konsantrik doldurma açılı O çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



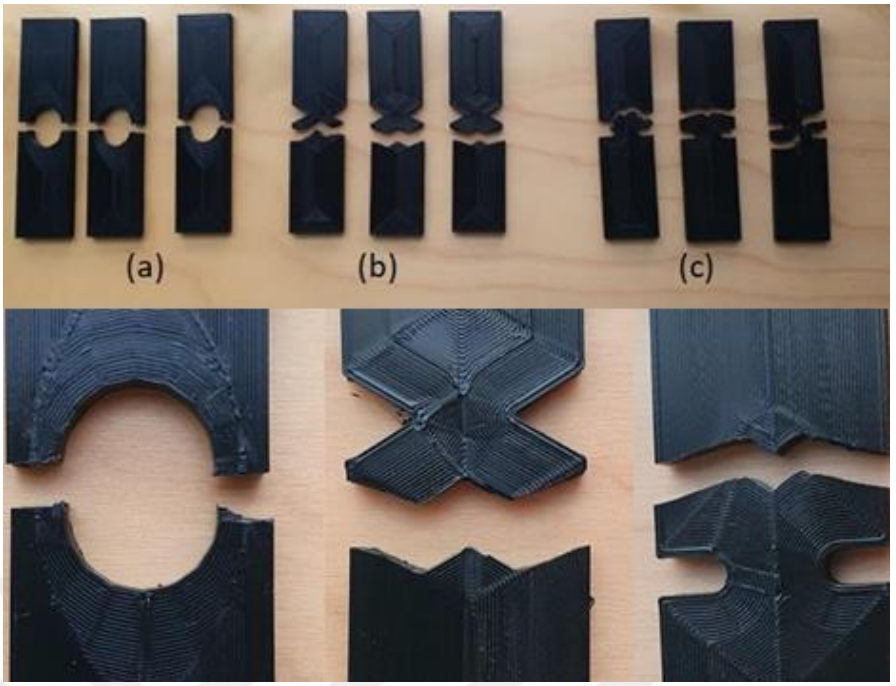
Şekil 4. 8. Konsantrik doldurma açılı U çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



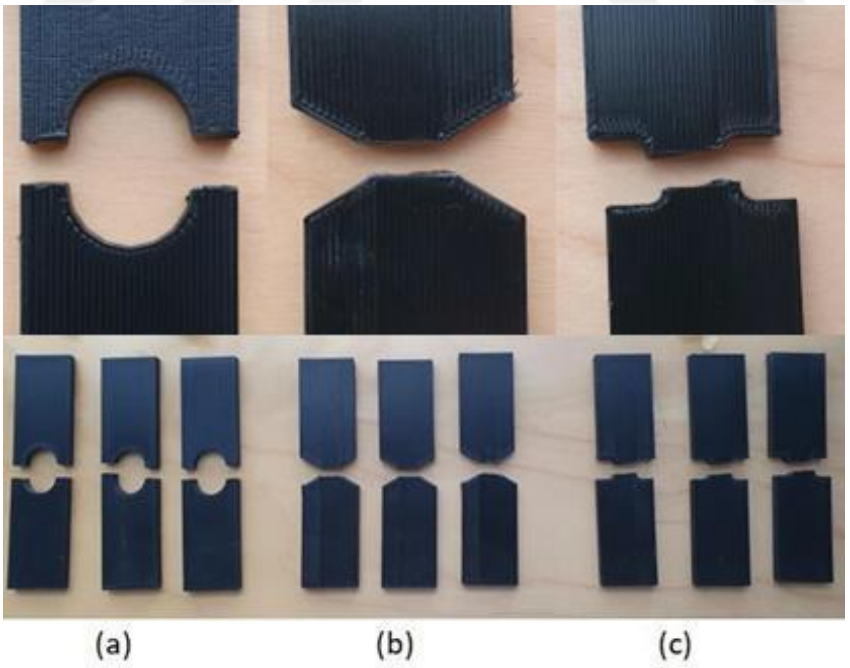
Şekil 4. 9. Konsantrik doldurma açılı V çentik numunelere ait kuvvet-uzama grafiği



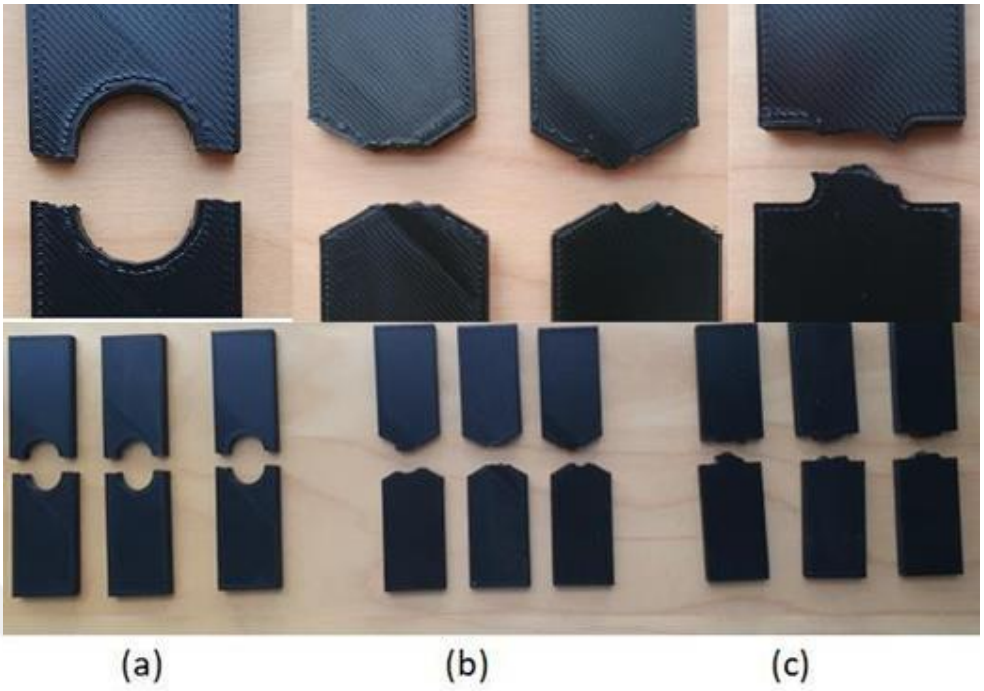
Şekil 4. 10. O çentik numune ile ASTM numunenin kuvvet- uzamama değerleri karşılaştırma grafiği



Şekil 4. 11. Konsantrik doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri



Şekil 4. 12. 0º doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri



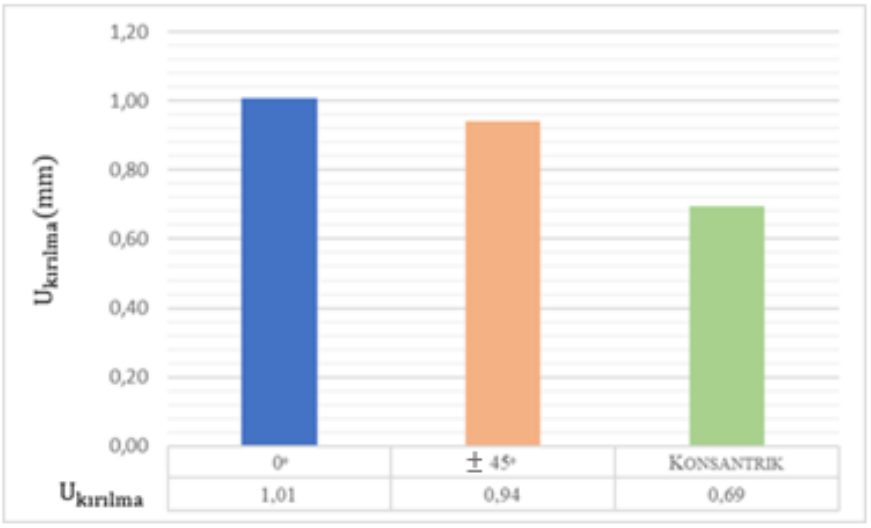
Şekil 4. 13. ±45º doldurma desenine sahip a) O çentikli b) V çentikli c) U çentikli numunelerin deney sonrası görselleri

4.2 Doldurma Açısının Mekanik Özelliklere Etkisi

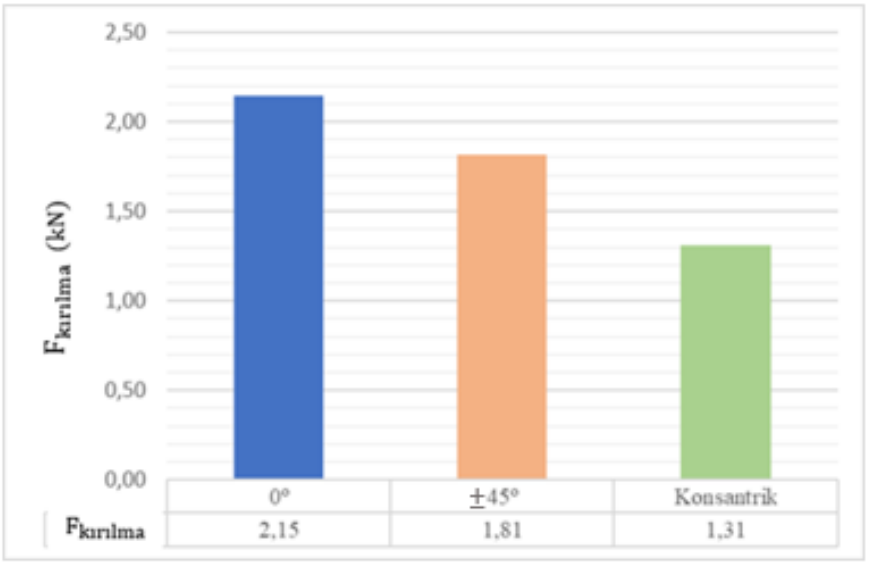
Yapılan çalışmada 3 farklı doldurma deseni ve 3 farklı çentik parametresi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla üretilen 30 adet numuneye çekme deneyi uygulanmıştır. Yapılan 3 deneyin ortalama değerleri alınarak ortalama uzama, kuvvet ve enerji değerleri elde edilmiş ve grafikler oluşturulmuştur.

Şekil 4.15 'te verilen O çentik numunelerin verileri incelendiğinde konsantrik doldurma desenine sahip numunelerin uzama miktarı diğer çentik tiplerine kıyasla en düşük 0,69 mm iken 0º doldurma açısında en yüksek olarak 1,01 mm olarak ölçülmüştür. Tüm yazdırma açıları için O çentik numunelerinde kırılma benzer olarak çentikten gerçekleşmiştir (Şekil 4.11-13). Konsantrik basımda çentik çevresindeki yazdırma yönlerindeki değişim dolayısıyla düzensizlik daha fazla olmakta bu da bu bölge civarındaki kusurları (mikro boşluklar gibi) arttırmaktadır. Bu sebeple bu numunelerde daha erken kırılma meydana gelmiştir. Hem kırılma uzaması hem de kırılma kuvveti

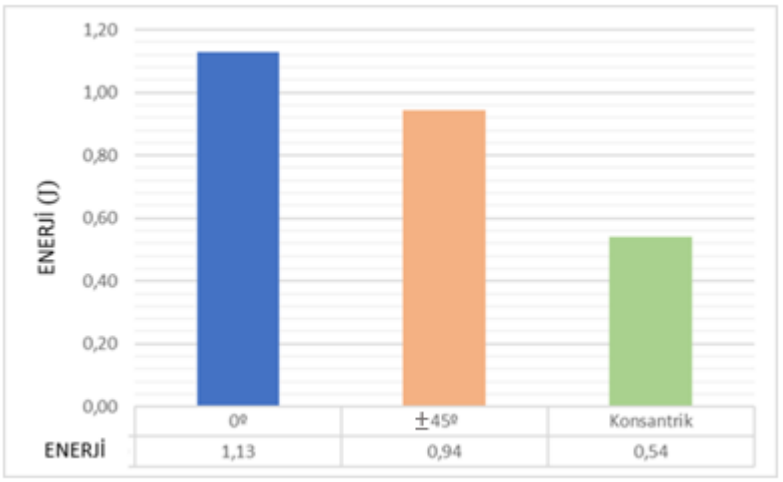
değerleri diğer doldurma açılarına göre daha düşük olarak elde edilmiştir. Bu sebeple kuvvet-uzama eğrileri altında kalan alan yani kırılma enerjisi de daha düşük olmuştur. O tipi çentik için en yüksek kuvvet değerleri de uzamada olduğu gibi 0º doldurma açısında elde edilmiştir. Hesaplanan en yüksek ortalama enerji değeri de de bu yazdırma açısı için elde edilmiştir.



Şekil 4. 14 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin uzama grafiği

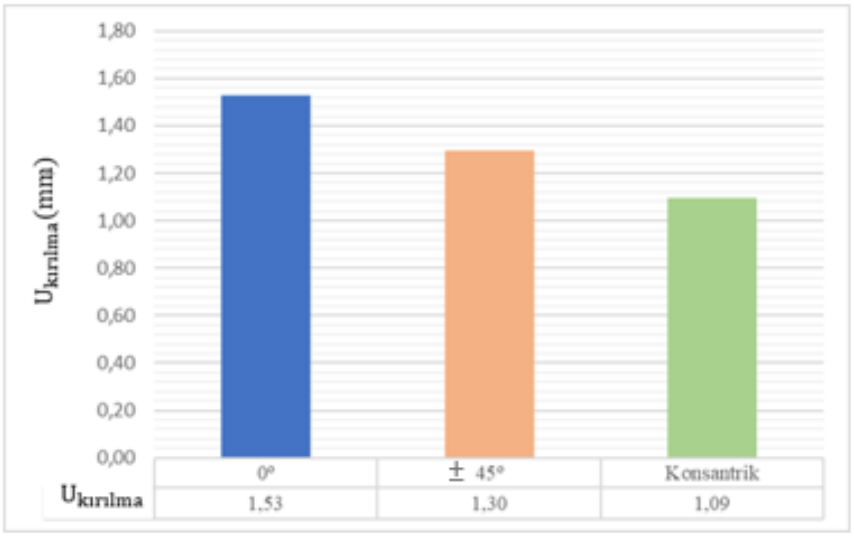


Şekil 4. 15. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin kuvvet grafiği

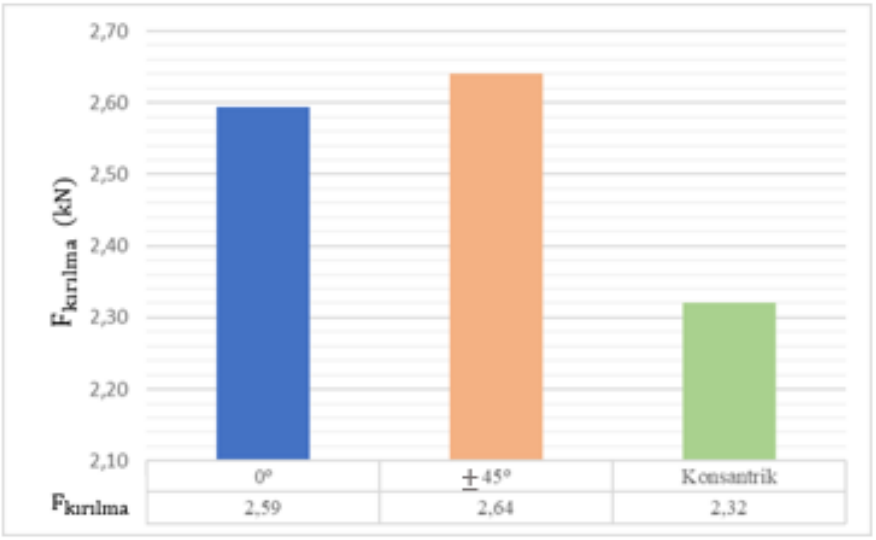


Şekil 4. 16. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı O çentik numunenin enerji grafiği

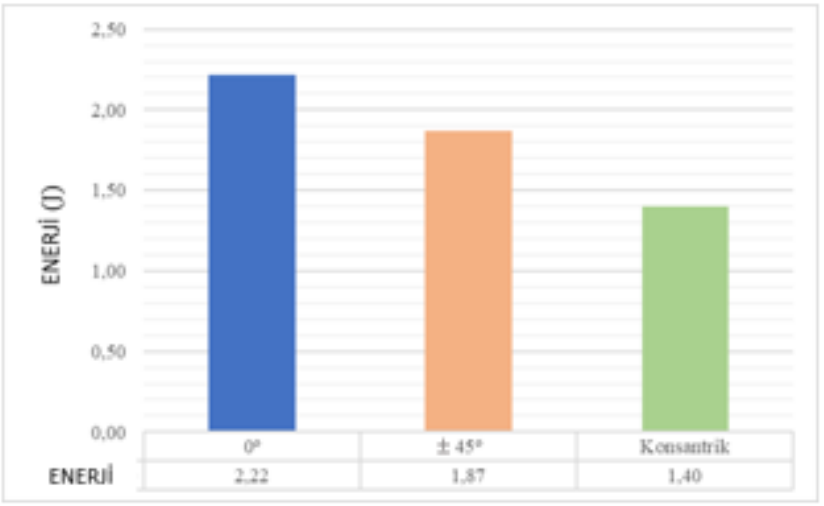
Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'de U çentik numunelerin kuvvet, uzama ve enerji grafikleri verilmiştir. Bu çentik tipinde yine en yüksek ortalama kırılma uzaması 0º doldurma açılı numunede olmuştur. Kırılma kuvvetine gelince, ±45º açılı doldurma numunenin ortalama değeri en yüksek değere sahiptir. Yine de enerji ortalamalarında 0º doldurma açılı numunenin enerjisi diğerlerine göre yüksektir. O çentikli numune sonuçlarına benzer şekilde, konsantrik basım desenine sahip numune kuvvet, uzama ve enerji için en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Kırılmış olan numune görselleri incelendiğinde (Şekil 4.11-13) 0º ve ±45º açılı doldurma numunelerde çentik dibinde kırılmanın başlayarak tüm numune kesiti boyunca ilerleyip, hasar gerçekleşmiştir. Konsantrik doldurma deseninde daha önce bahsedilen çentik dibinden daha uzak kısımlardaki mikro düzensizlikler ve boşlukların oluşturduğu gerilim yığılması, çentiğin oluşturduğundan daha yüksek olmuş ve kırık çentik dibinden değil daha üst kısımdan başlamış ve numune tamamen kopana kadar devam etmiştir.



Şekil 4. 17. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin uzama grafiği

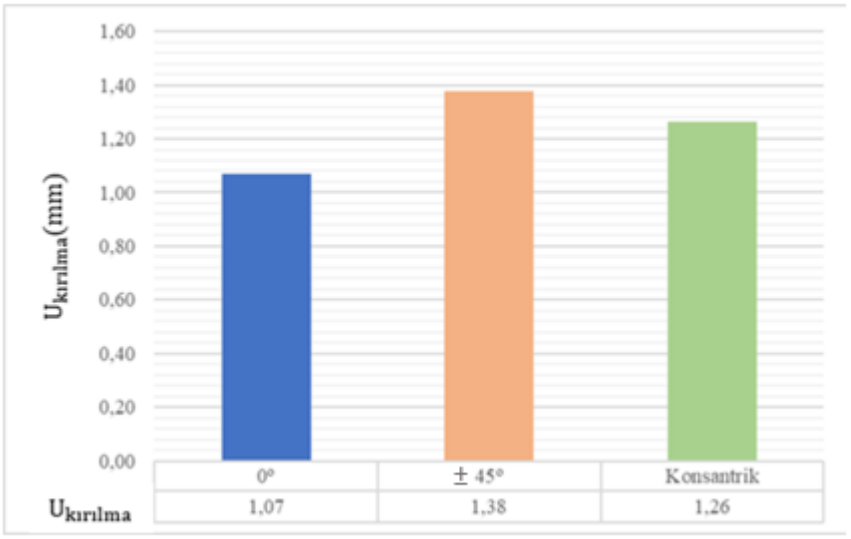


Şekil 4. 18. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin kuvvet grafiği

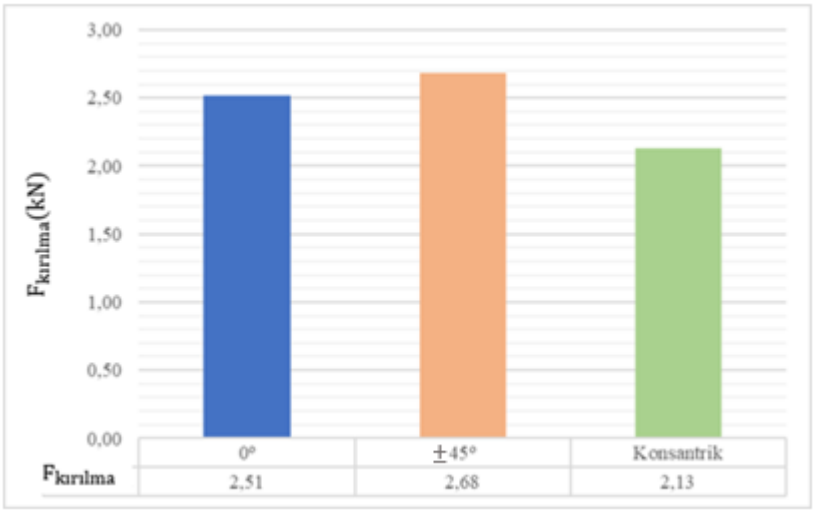


Şekil 4. 19. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı U çentik numunenin enerji grafiği

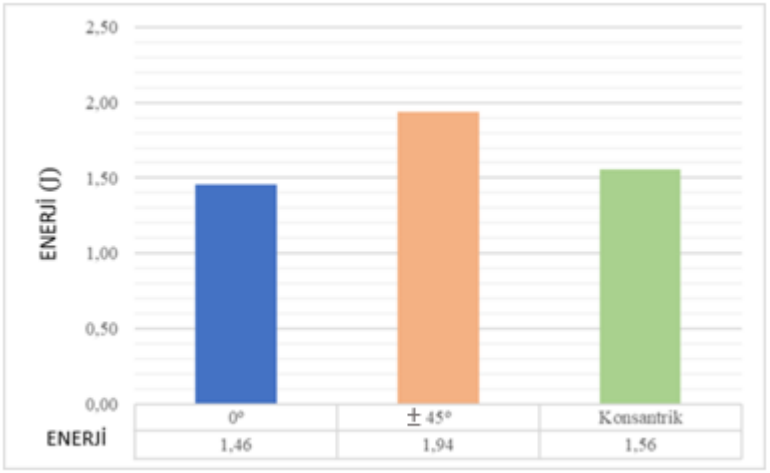
Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'te V çentik numunelerin kuvvet, uzama ve enerji grafikleri verilmiştir. Diğer çentik tiplerinden farklı olarak bu çentik tipinde ±45º doldurma açısında en yüksek kırılma kuvveti, uzama ve enerji değerleri elde edilmiştir. En düşük uzama ve kuvvet değerleri sırasıyla 0º ve konsantrik yazdırılmış numunelerde gerçekleşmiş, bu 2 numune tipinin enerji değerlerinin ise birbirine daha yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.11-13'e görüldüğü üzere konsantrik doldurma desenine sahip numunede kırılma U çentikte olduğu gibi yine çentik dibinde gerçekleşmemiştir. 0º ve ±45º doldurma açılarında ise kırık çentik dibinde başlayıp, ilerlemiştir.



Şekil 4. 20. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma desenine sahip V çentik numunenin uzama grafiği



Şekil 4. 21. 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılı V çentik numunenin kuvvet grafiği



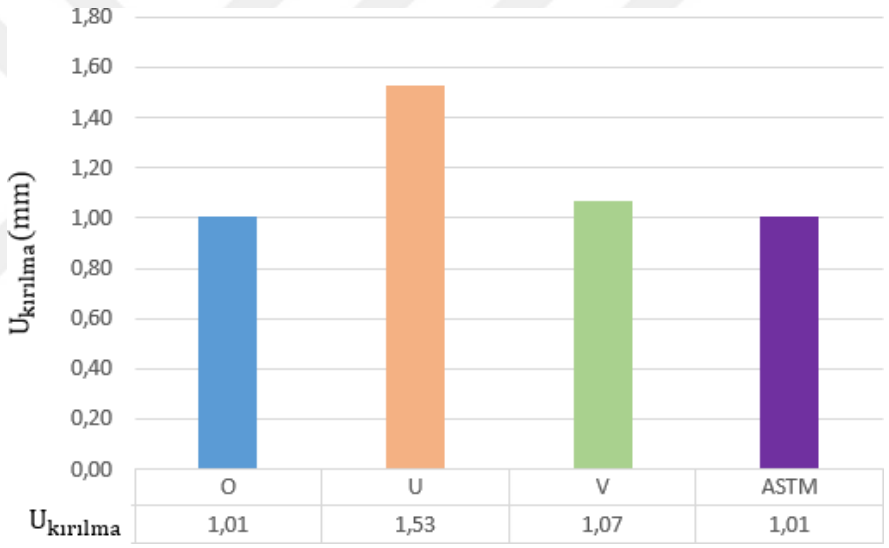
Şekil 4. 22. 0, ±45º ve konsantrik doldurma açılı V çentik numunenin enerji grafiği

4.3 Çentik Tipinin Mekanik Özelliklere Etkisi

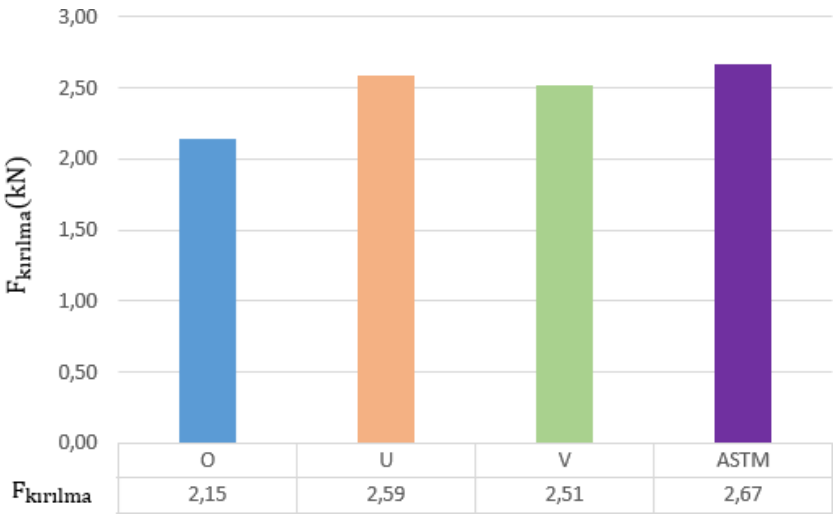
0º doldurma desenine sahip O çentik numune ile ASTM test numunesinin uzama ve kuvvet değerleri karşılaştırılmıştır. Uzama miktarları her iki numunede de 1,01 ölçülmüş, O çentiğin 0º doldurma deseninde uzama miktarı üzerinde

bir etkisi görülmediği sonucu elde edilmiştir.

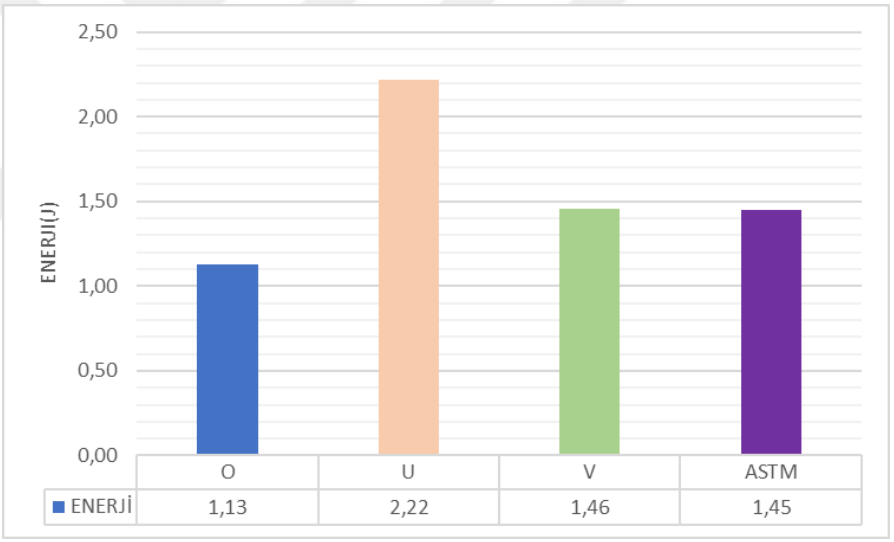
Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'te 0º doldurma desenine sahip O, V, U çentik numunelerin ASTM numunesi ile çentik tipine göre kıyaslama grafikleri verilmiştir. 0º doldurma desenine sahip ASTM numunesinde maksimum kırılma kuvvet değeri 2,67 kN iken O çentik numunenin kuvvet değeri 2,15 kN olarak ölçülmüştür. Yine aynı numunelerin uzama değerleri kıyaslandığında U çentik numune 1.53 mm ile maksimum uzama değerini vermektedir. Bu durum çentik geometrisine dik gelen basım yönü açısının artması ile gerilme yığılmalarının meydana geldiğini ve buna paralel olarak uzama miktarının arttığını göstermektedir.



Şekil 4. 23. Çentik tipinin kırılma uzama değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)



Şekil 4. 24. Çentik tipinin kırılma kuvveti değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)



Şekil 4. 25. Çentik tipinin kırılma enerjisi değerlerine etkisi (0º doldurma açısı)

Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'te 0º doldurma açısı sahip O, V, U çentik numunelerin ASTM numunesi ile çentik tipine göre kıyaslama grafikleri verilmiştir. Çentik olmayan ASTM numunelerde beklendiği gibi en yüksek kırılma kuvvetleri görülmekle beraber, kuvvetteki en büyük düşüş O çentikli numunede olmuş sonrasında U ve V çentikler takip etmiştir. Numuneler uzama ve enerji değerleri bakımından kıyaslandığında en yüksek uzama ve enerji değerleri U çentik numunede olmuştur. Bu durum 0º doldurma

deseninin çentik geometrisine denk gelme açısı ile ilgilidir. Açının dik gelme oranı ile doğru orantılı olarak çentik çevresinde gerilme yığılmaları artmakta ve buna bağlı olarak enerji ve uzama değerleri de artış göstermektedir. Kıyaslama sonucunda beklenildiği üzere enerji ve uzama miktarlarında en yüksek düşüş yine O çentik numunede olmuştur.

Çizelge 4. 1. Çentik tipine bağlı olarak ASTM çekme numunesine göre kırılma gerilmesindeki düşüş değerleri (%$\Delta\sigma_{kırılma}$) ve literatürle karşılaştırma

Çentik Tipi	Mevcut çalışma	Berto ve ark. (2017)
O çentik	19 MPa	17 MPa
U çentik	3 MPa	19 MPa
V çentik	6 MPa	29 MPa

Çizelge 4.1'de çentik tipine bağlı olarak ASTM çekme numunesine göre kırılma gerilmesindeki düşüş değerleri ve Berto ve ark. (2017) literatürle karşılaştırması verilmiştir. O, V ve U çentik numunelerin Şekil 4.24'te $F_{kırılma}$ verilen değerleri kesit alanına bölünerek %$\sigma_{kırılma}$ kuvveti elde edilmiş ve Çizelge 4.1' de yer alan Berto ve ark. (2017) çalışması ile kıyaslanmıştır. Beklendiği üzere çentik etkisiyle kırılma gerilme değerlerinde düşüşler olmuştur. Bu tez çalışmasında U çentik numuneye kıyasla V çentik numune geometrisinde mevcut olan daha keskin açı numunenin çentik kısmında gerilme yığılmasının artmasına bağlı olarak gerilme değerinde artış meydana getirmiştir. Üç farklı çentik tipi kıyaslandığında maksimum %$\sigma_{kırılma}$ O çentik numunede gerçekleşmiştir. U çentik numunede ölçülen % $\sigma_{kırılma}$ 3 MPa iken V çentik numunede 6 MPa olarak ölçülmüştür. Bu durum literatürde yer alan Berto ve ark. (2017)'larının yaptığı çalışmada U çentik numunesinin % $\sigma_{kırılma}$ değerinin 19 MPa ve V çentik numunenin 29 MPa %$\sigma_{kırılma}$ değerini vermesi ile aynı şekilde sonuçlanmıştır.

Berto ve ark. (2017) çalışmalarında benzer çentikli numuneleri kullanmışlardır ve yine tek eksenli çekme testleri de gerçekleştirmişlerdir. Testleri farklı yoğunlukta poliüretan köpük numunelerle yapmışlardır. Aynı polimer malzeme olmasa da bu çalışmayla daha sağlıklı kıyaslama yapabilmek adına kompozit malzemelerin sahip olduğu katı yapıya

en yakın poliüretan köpük malzemenin en yoğun numunesinin O, V ve U çentik değerleri kullanılarak $\sigma_{kırılma}$ değerleri hesaplanmış ve ASTM çekme numunesine ait değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bahsi geçen çalışmada maksimum % $\sigma_{kırılma}$ değerini veren numune V çentik numune olmuştur. Yapmış olduğumuz deneysel çalışma sonuçlarında maksimum değerin O çentik numune çıkması durumu ile literatür sonuçları kıyaslandığında kompozit malzemeden eklemeli üretim yöntemleri ile üç boyutlu yazıcıda üretilen numunelerin basım sırasında basım yönü, filament özellikleri, yazıcı özellikleri vb. pek çok parametreden kaynaklı farklı sonuçlar verebileceği görülmektedir.

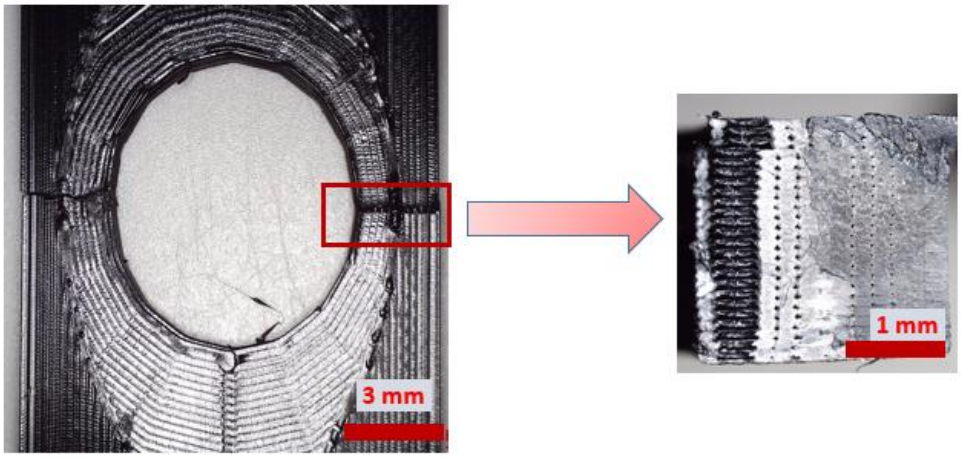
Yapılan çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden FDM ile üretilmiş çekme numunelerinin çentik tiplerine göre kırılma parametrelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Bu sayede tasarımda çentik tipinin FDM yöntemiyle üretilmiş numunelerde gerilme yığılması katsayısını nasıl etkilediği irdelenmiştir. 0º doldurma desenine sahip ASTM, O, U ve V çentik numuneler için gerilme yığılma katsayısı hesaplamasında kullanılan denklemler Bölüm 2'de verilmiş. Buna göre; denklem 2.4 kullanılarak 0º doldurma desenine sahip O çentik numunenin gerilme yığılma katsayısı K_t= 2.11 olarak elde edilmiştir. Aynı numunenin nominal gerilme değeri σ_{nom} = 43 kPa olarak elde edilmiştir. Denklem 2.5 kullanılarak 0º doldurma desenine sahip U çentik numunenin gerilme yığılma katsayısı K_t= 2.24 olarak elde edilmiştir.Denklem 2.7 kullanılarak 0º doldurma desenine sahip V çentik numunenin gerilme yığılma katsayısı K_t= 2.24 olarak elde edilmiştir. Bu değerler kırılma gerilmesi ve kırılma şekil değiştirme değerleriyle beraber Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Çentik tipine bağlı olarak çekme numunelerinin gerilme yığılma katsayısı (K) , kırılma gerilme ($\sigma_{kırılma}$) ve $\varepsilon_{kırılma}$ (%) değerleri

	K	$\sigma_{kırılma}$ **(MPa)**	$\varepsilon_{kırılma}$ **(%)**
Çentiksiz (ASTM D638)	1,0	53,4	1,77
O Çentik	2,11	43	1,01
V Çentik	2.22	50,2	1,07
U Çentik	2.24	51,8	1,53

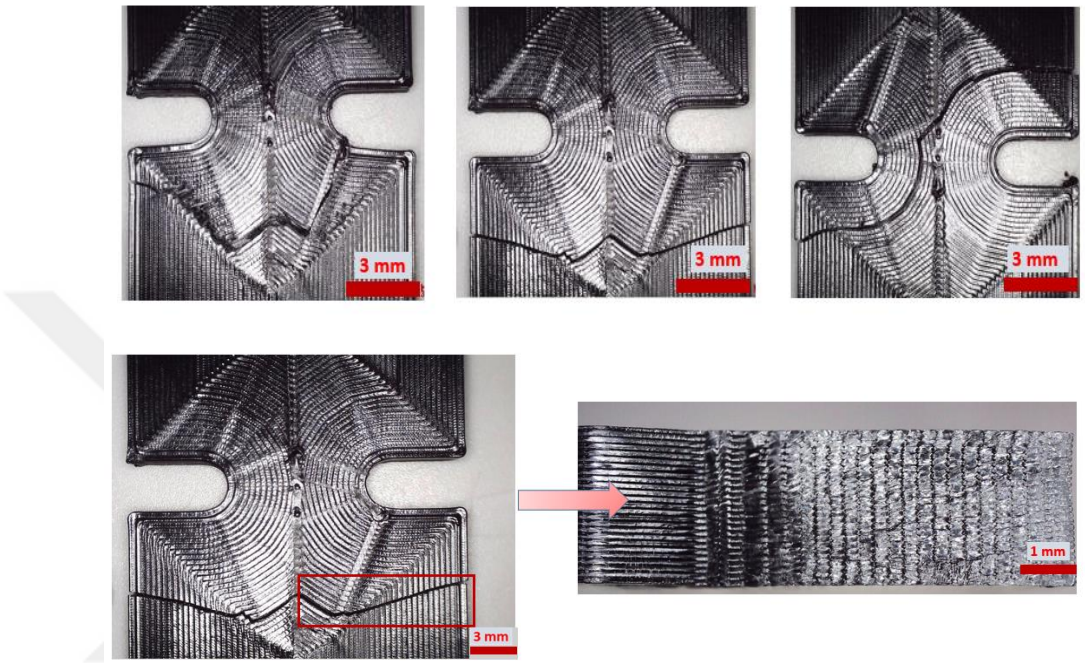
4.4. Kırılma Yüzeyleri

Hasara uğramış numunelerin kırılmanın geçekleştiği bölgeyi ve kırılma yüzeylerini gösteren mikroskobik görüntüleri aşağıda verilmiştir. Şekil 4.26'da konsantrik basılmış O çentik numunesi verilmiştir. Bu numune tipinde kuvvete dik olarak kırık gerçekleşmiştir. Kırılmada etkin olan mekanizma filamentlerin kopması olmuştur. Merkeze doğru filamentlerin kuvvete paralel değil açıyla gelmiş olması sebebiyle filamentler arası boşlukların merkeze doğru küçüldüğü görülmektedir.

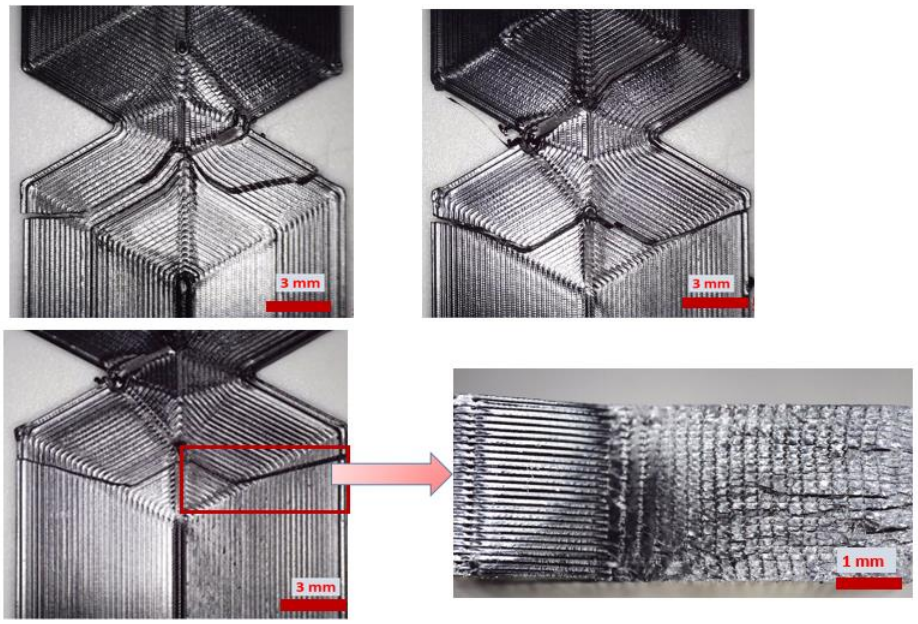


Şekil 4.26 Konsantrik yazdırma desenine sahip O çentik numunenin kırılma görüntüleri

Konsantrik U çentikli numunelerde kırık farklı doğrultular boyunca gerçekleşmiş olduğu Şekil 4.27'de görülmektedir. Bu numunelerde kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılmanın yer yer filamentin kopması yani katman içi kırık, bazı yerlerde de katmanlar arası kırılma olarak gerçekleştiği görülmektedir. Benzer durum Şekil 4.28'de konsantrik yazdırma desenine sahip V çentik numuneler için de geçerlidir.



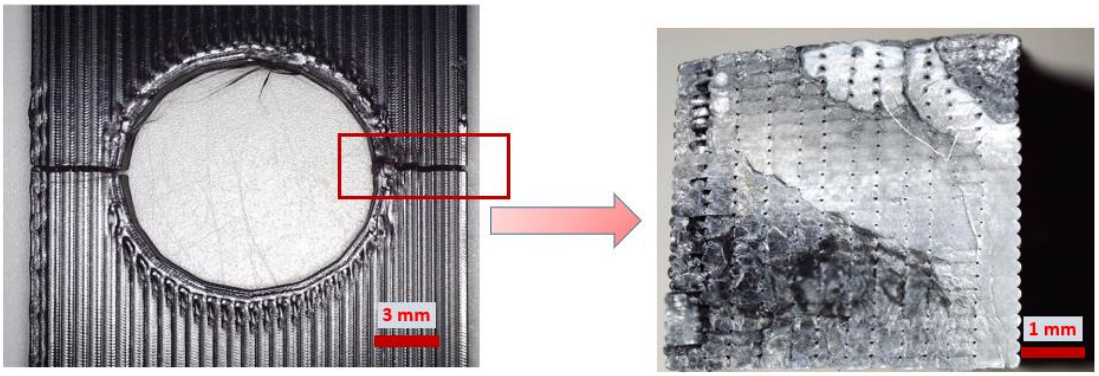
Şekil 4.27. Konsantrik yazdırma desenine sahip U çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi



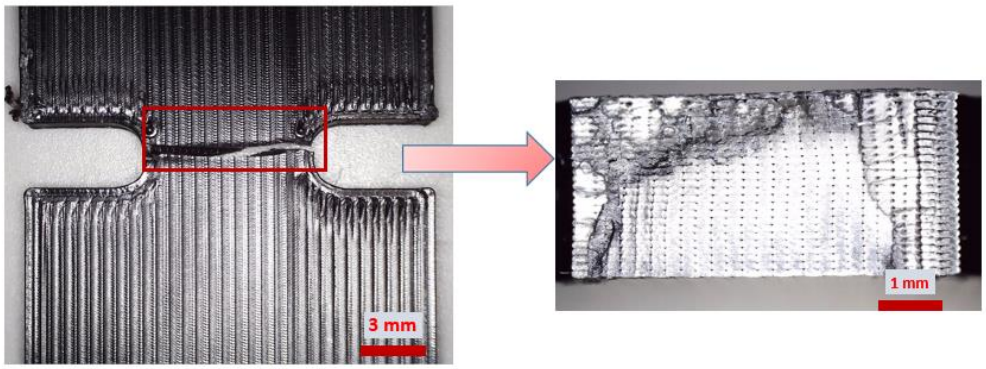
Şekil 4.28. Konsantrik yazdırma desenine sahip V çentik numunelerin kırılma ilerleyişi

ve kırılma yüzeyi

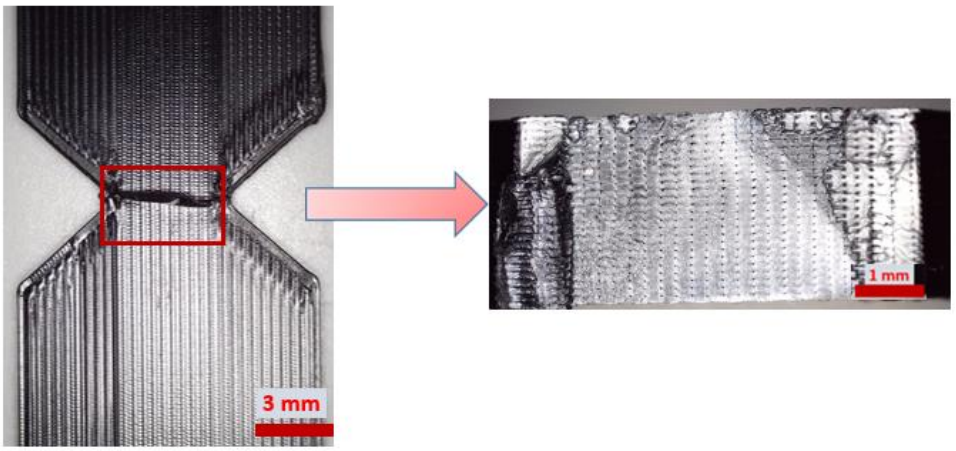
0º yazdırma desenine sahip hem çentikli hem de çentiksiz numunelerde kırılma kuvvet yönüne dik gerçekleşmiştir. Dolayısıyla bu numunelerde kırılma yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 4.29, 4.30 ve 4.31) filamentin kopması yani katman içi kırık gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.29 0º yazdırma desenine sahip O çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi

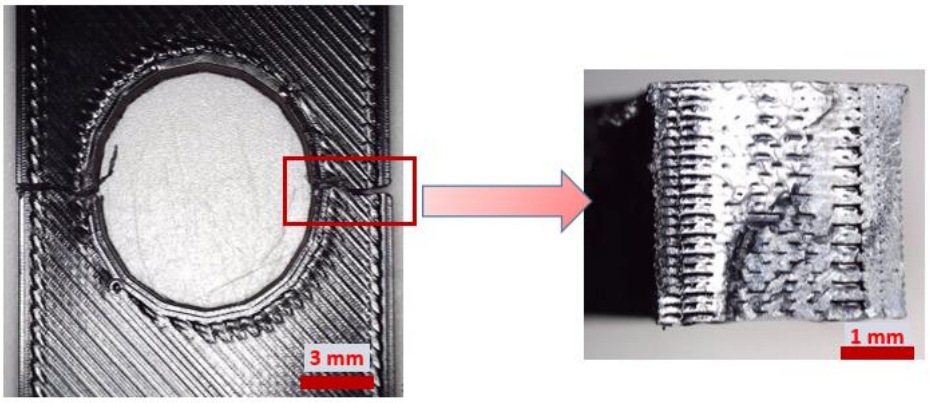


Şekil 4.30. 0º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi



Şekil 4.31. 0º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi

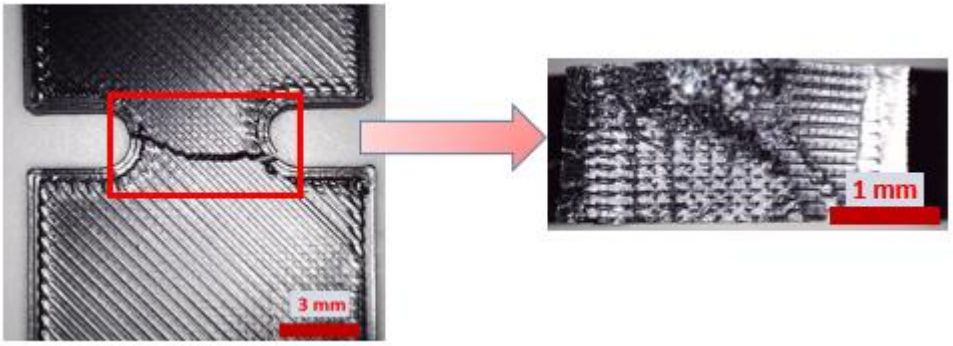
0º yazdırma desenine sahip çentikli numunelerin görüntüleri Şekil 4.29, 4.30 ve 4.31'de verilmiştir. Burada yine tüm çentik tipleri için genel olarak şu sonuca varılabilir; kırık ilerlemesi kuvvete yer yer dik ilerlese de bazı yerlerde farklı doğrultularda devam etmiştir. Bunun sonucu olarak kırık yüzeyleri incelenirse kırılma tipinin hem katman arası hem de katman içi olduğu görülmektedir.



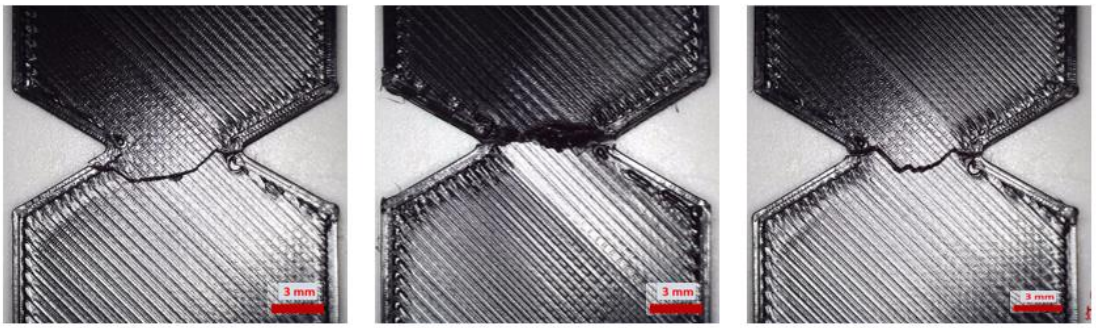
Şekil 4.32. ±45º yazdırma desenine sahip O çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi



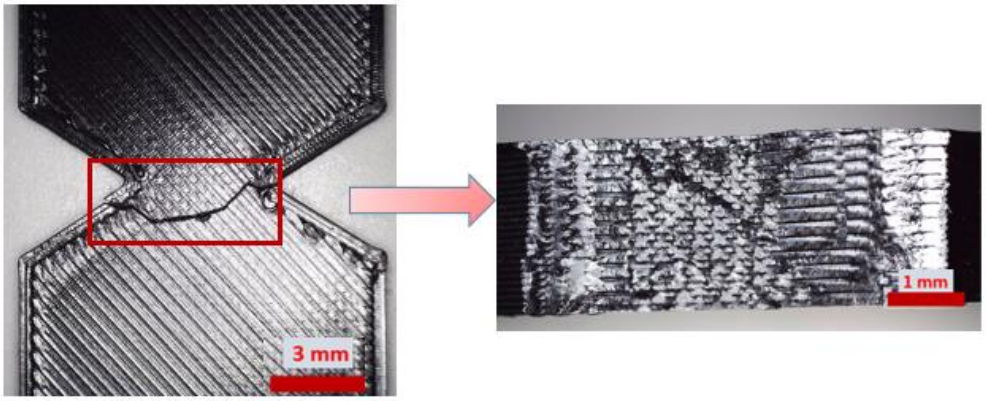
Şekil 4.33. ±45º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma ilerleyişi



Şekil 4.34. ±45º yazdırma desenine sahip U çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi



Şekil 4.35. ±45º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin kırılma ilerleyişi



Şekil 4.36. ±45º yazdırma desenine sahip V çentik numunenin kırılma ilerleyişi ve kırılma yüzeyi

5 . SONUÇ

Alınan çekme testi analiz sonuçlarına göre tüm numuneler için F_{max} , U_{max} , E_{max} değerleri ayrı ayrı hesaplanarak analiz edilmiştir.

Numuneler doldurma açısının ve çentik tipinin mekanik özelliklere etkisi bakımından karşılaştırıldığında;

- 0º doldurma desenine sahip O, V, U çentik numunelerin ASTM numunesi ile çentik tipine göre kıyaslaması yapılmış olup maksimum kırılma kuvveti değeri 2,59 kN değeri ile U çentik numunede gerçekleşmiştir. Bunun sırasıyla V ve O çentikli numuneler takip etmiştir. Bu grup için uzama değerleri karşılaştırıldığında yine U çentik 1.53 mm ile en yüksek kopma uzaması değerine sahiptir. Diğer çentikler de yine V ve en düşük O çentiğin değeri gelmekte fakat bu değerler birbirine yakındır.
- O çentik numunenin 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılarına göre kıyaslaması yapıldığında uzama değeri, kırılma kuvveti ve enerji değerleri 0º doldurma açısında maksimum değerleri vermiştir. Sırasıyla ±45º ve konsantrik doldurma açılarına sahip numunelerde azalma gözlenmiştir.
- U çentik numunenin 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılarına göre kıyaslaması yapıldığında 0º doldurma açısında en yüksek uzama değeri 1,53 mm ve en yüksek enerji değeri olarak 2,22 J olarak görülmüştür. Bahsi geçen numunenin en yüksek kuvvet değeri ise ±45º 'de 2,68 kN olarak ölçülmüştür.
- V çentik numunenin 0º, ±45º ve konsantrik doldurma açılarına göre kıyaslaması yapıldığında en yüksek uzama, kırılma kuvveti ve enerji değerlerine sahip numunenin ±45º doldurma açısına sahip numune olduğu görülmüştür. Özetle, Tüm çentik tipleri ele alındığında genel olarak konsantrik basımın daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Kırılma yüzeylerinin yapılan mikroskobik incelemeler sonucu;

- 0º yazdırma desenine sahip hem çentikli hem de çentiksiz numunelerde kırılma, kuvvet yönüne dik gerçekleşmiş ve katman içi kırık şeklinde görülmüştür. Konsantrik basım ve ±45º açılı basımda kırık ilerlemesi yer yer kuvvete dik olsa da doğrultu değiştirip açıyla ilerlediği kısımlar da olmuştur. Kırılma yüzeylerinde de hem katman içi hem de katmanlar arası kırılma gözlenmiştir.

- Farklı çentik tiplerinin geometri ve boyutlarına göre hesaplanan gerilme yığılması katsayıları en düşük O sonra V ve U çentik olarak devam etmektedir. En yüksek gerilme yığılması katsayısı teorik olarak U çentik de olmasına rağmen en yüksek kırılma gerilmesi bu numune de olmuştur. Bu da eklemeli imalatın kendi içerisinde barındırdığı süreksizlikler (filamentler arası boşluk, duvarlara yakın bölgelerde oluşacak boşluklar vb.) dolayısıyla geleneksel yöntemlere kıyasla gerilme yığılmansın farklı olabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR

Alkılıçgil, Ç. (2006). *Development of a new method for mode I fracture toughness test on disc type rock specimens* (Master's thesis, Middle East Technical University). American Psychological Association, 2019. *Style and Grammar Guidelines*

ASTM International. (2014). *Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM international.

Berto, F., Marsavina, L., Razavi, S. M. J., & Ayatollahi, M. R. (2017). On the fracture behavior of polyurethane notched components. *Procedia StructuralIntegrity*, *3*, 144-152.

Chua, C. K., Leong, K. F., & Lim, C. S. (2010). *Rapid prototyping: principles and Applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company CustomPartNet, 2008. Inc., http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanlari. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (031), 53-70.

Karalekas, D., & Antoniou, K. (2004). Composite rapid prototyping: overcoming the drawback of poor mechanical properties. *Journal of materials processing technology*, *153*, 526-530.

Karalekas, D., & Aggelopoulos, A. (2003). Study of shrinkage strains in a stereolithography cured acrylic photopolymer resin. *Journal of materials processing technology*, *136*(1-3), 146-150.

Koenig, M. F., & Huang, S. J. (1995). Biodegradable blends and composites of polycaprolactone and starch derivatives. *Polymer*, *36*(9), 1877-1882.

Korkut, S. (2017). Statik ve dinamik yükler altında kompozit plakaların hasar durumlarına karşı davranışlarının incelenmesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Bilim Dalı, İstanbul*.

Liu AF. 2015. *Deformation and fracture mechanisms and static strength of metals,* Mechanics and Mechanisms of Fracture. An Introduction, ASM International,United States of America.

Manapat, J. Z., Chen, Q., Ye, P., & Advincula, R. C. (2017). 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromolecular Materials and Engineering*, *302*(9), 1600553.

Mendes-Felipe, C., Patrocinio, D., Laza, J. M., Ruiz-Rubio, L., & Vilas-Vilela, J. L. Evaluation of postcuring process on the thermal and mechanical properties of the Clear02™ resin used in stereolithography. *Polymer Testing*, *72*, 115-121.

Porima 3d. 2022.05.12. *Creality Ender 6 pro. https*://www.porima3d.com/Uploads/Dosyalar/porima-tds-tr.pdf adresinden erişildi.

Salmoria, G. V., Ahrens, C. H., Beal, V. E., Pires, A. T. N., & Soldi, V. (2009). Evaluation of post-curing and laser manufacturing parameters on the properties of SOMOS 7110 photosensitive resin used in stereolithography. *Materials & Design*, *30*(3), 758-763.

Sanchez-Garcia, M. D., & Lagaron, J. M. (2010). On the use of plant cellulose nanowhiskers to enhance the barrier properties of polylactic acid. Cellulose, 17(5), 987-1004.

Stereolithography 3D Printing, From the 1980s to Now, Formlabs, 23.03.2022 tarihinde https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d- printing/. erişildi.

Taormina, G., Sciancalepore, C., Bondioli, F., & Messori, M. (2018). Special resins for stereolithography: Insitu generation of silver nanoparticles. *Polymers*, *10*(2), 212.

Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *88*, 198-205.

Young, W. C., Budynas, R. G., & Roark, R. J. (2002). *(Formulas for stress and strain); Roark's formulas for stress and strain*. McGraw-Hill.

Young, D., Wetmore, N., & Czabaj, M. (2018). Interlayer fracture toughness of additively manufactured unreinforced and carbon-fiber-reinforced acrylonitrile butadiene styrene. *Additive Manufacturing*, *22*,508-515.

Zhao, J., Yang, Y., & Li, L. (2020). A comprehensive evaluation for different post-curing methods used in stereolithography additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, *56*, 867-877.

Wang CH., (1996). *Introduction to Fracture Mechanics,* Department of Defence, Australia,.758–763.

3D SYSTEM. (2022).4.08. *MJM Yöntemi*. http://www.3dsystems.com adresinden erişildi.