

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

VAKUM ORTAMINDA ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
KOMPOZİTLERİN ERİYİK YIĞMA METODU İLE EKLEMELİ ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BAHRİ BARİŞ VATANDAŞ

TEMMUZ 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**VAKUM ORTAMINDA ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
KOMPOZİTLERİN ERİYİK YIĞMA METODU İLE EKLEMELİ ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Bahri Barış VATANDAŞ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
" MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ "**
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03/06/2024

Tezin Savunma Tarihi : 23/07/2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Recep GÜMRÜK

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Vakum Ortamında Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Eriyik Yığma Metodu ile Eklemeli Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca beni yönlendiren, eklemeli imalat ve uygulama yöntemlerinde bana çalışma fırsatı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Recep GÜMRÜK’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tez çalışma sürecim boyunca katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ömer Necati CORA’ya, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan Öğr. Üyesi Altuğ UŞUN ve Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre KARABACAK’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Makina Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan başta evimizin temel taşı babaannem Nurten VATANDAŞ, annem Hanife VATANDAŞ, babam Turgay VATANDAŞ’a, ablam Ezgi Deniz VATANDAŞ ve tez süreci boyunca her zaman motivasyon ve desteğini hissettiğim İnşaat Mühendisi Büşra YAKAK’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bahri Barış VATANDAŞ
TEMMUZ 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Vakum Ortamında Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Eriyik Yığılma Metodu ile Eklemeli Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Recep GÜMRÜK’ün sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/07/2024

Bahri Barış VATANDAŞ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri	2
1.3. Polimer Esaslı Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Eklemeli İmalat ile Üretimi.....	5
1.3.1. Eriyik Yığılma Metodu (Fused Deposition Modeling, EYM)	6
1.3.2. Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing, LOM)	9
1.3.3. Büyük Hacimli Eklemeli imalat (Big Area Additive Manufacturing, BAAM).....	9
1.3.4. Otomatik Elyaf Serme Yöntemi (Automated Fiber Placement, AFP)	10
1.4. EYM Yöntemi ile Kısa ve Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Uygulamaları	11
1.5. EYM Yöntemi ile Üretilen Kısa ve Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Meydana Gelen Yapısal Hatalar.....	13
1.6. EYM Yöntemi ile Üretilen Saf/Kırpılmış/Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini İyileştirme Yöntemleri.....	14
1.7. Vakum Ortamında Daha Önce Yapılmış Çalışmalar	19
1.7.1. EYM ve Vakum Ortamı İlişkisi	19
1.7.2. EYM Yöntemi ile Vakum Ortamında Eklemeli Üretim	20
1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı	24
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	25
2.1. Malzeme ve Özellikleri	25
2.2. Vakum Kabini Tasarımı ve Modifiye Edilmiş 3D Yazıcı.....	25
2.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Filament Üretim Hattı ve Üretimi.....	32

2.4.	Vakum Ortamında 3D yazıcı kullanarak SKETTK Test Numunelerinin Üretimi.....	40
2.5.	Vakum Ortamında KKETTK Test Numunelerinin 3D Yazıcı Kullanarak Üretimi.....	42
2.6.	Vakum Ortamında Kızılötesi Isıtıcı Kullanarak KKETTK Test Numunelerinin 3D Yazıcı Kullanarak Üretimi	42
2.7.	Mekanik Testler.....	43
2.7.1.	SKETTK Filament Çekme Testleri.....	43
2.7.2.	Üç Noktalı Eğilme Testi	44
2.8.	Mikroyapısal Analiz	45
2.9.	Termal Karakterizasyon	46
3.	BULGULAR VE İRDELEME	47
3.1.	SKETTK Filament Çekme Testi Sonuçları ve Mikroyapısal Özellikleri.....	47
3.2.	Vakum Ortamında Üretilen SKETTK Numunelerin Mekanik, Mikroyapısal ve Termal Özellikleri	49
3.2.1.	Vakum Ortamının Eğilme Davranışına Etkisi	49
3.2.2.	Nozul Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi	53
3.2.3.	Baskı Tablası Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi	56
3.2.4.	Baskı Hızının Eğilme Davranışına Etkisi	59
3.2.5.	Mikroyapısal Analiz.....	62
3.2.6.	DSC Analizi	66
3.3.	Vakum Ortamında Üretilen KKETTK Numunelerin Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri.....	67
3.3.1.	Vakum Ortamının Eğilme Davranışına Etkisi	67
3.3.2.	Nozul Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi	70
3.3.3.	Baskı Tablası Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi	72
3.3.4.	Baskı Hızının Eğilme Davranışına Etkisi	74
3.3.5.	Mikroyapısal Analiz.....	76
3.4.	Vakum Ortamı ve Kızılötesi Isıtıcı Kullanarak KKETTK Numunelerinin Mekanik Özellikleri.....	80
3.4.1.	Kızılötesi Isıtıcı Konumuna Göre Baskı Tablası Sıcaklık Artış Grafiği	80
3.4.2.	Üç Noktalı Eğilme Testi Sonuçları	80
3.4.3.	Mikro Yapısal Analiz.....	82
3.4.4.	X-ışını kırınımı (XRD) Kristallik Testi Sonucu	86
4.	SONUÇLAR.....	89
5.	ÖNERİLER.....	91

6. KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

VAKUM ORTAMINDA ELYAF TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ERİYİK YIĞMA METODU İLE EKLEMELİ ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bahri Barış VATANDAŞ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Recep GÜMRÜK
2024, 108 Sayfa

Termoplastik kompozit parçaların üretimi Eklemeli İmalat (Eİ), teknolojilerinden Eriyik Yığma Metodu (EYM) ile günümüzde oldukça popülerlik kazanmıştır. Ancak, EYM kullanılan yazıcılar ile üretilen parçalar düşük mekanik özellikler göstermektedir. Literatürde EYM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek adına birçok çalışmalar mevcuttur. Bu tez çalışmasında sürekli karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozit (SKETTK) ve kısa karbon elyaf takviyeli termoplastik kompozit (KKETTK) parçaların vakum ortamında EYM baskısı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, vakum ortamına ek olarak kızılötesi ısıtıcı destekli KKETTK parçaların EYM baskısı yapılmış olup vakum miktarının, baskı parametrelerinin ve hibrit etkinin (vakum+ kızılötesi ısıtıcı) mekanik özelliklere etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. SKETTK ve KKETTK parçaların düşük vakum miktarlarında ve optimum baskı parametreleriyle üretimi sonucu oluşan gelişmiş katmanlar arası bağlanma nedeniyle, maksimum eğilme gerilmesi ve elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürekli Karbon Takviyeli Termoplastik Kompozit (SKETTK), Kısa Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit (KKETTK), Vakum Ortamı, Mekanik Özellikler

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES PRODUCED BY FUSED DEPOSITION MODELING IN A VACUUM ENVIRONMENT

Bahri Barış VATANDAŞ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Recep GÜMRÜK
2024, 108 Pages

The production of thermoplastic composite parts has gained popularity in recent times, with the advent of Additive Manufacturing (AM) and the Fused Deposition Modelling (FDM) in particular. However, it has been demonstrated that parts produced with printers using EYM exhibit low mechanical properties. There are many studies in the literature to improve the mechanical properties of parts produced with FDM. This thesis presents a study of the EYM printing of continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic composite (CCRTTC) and short carbon fiber-reinforced thermoplastic composite (SCCRTTC) parts in a vacuum environment. In addition to the vacuum environment, infrared heater-assisted FDM printing of SCCRTTC parts was carried out, and the effects of vacuum degree, printing parameters, and hybrid effect (vacuum + infrared heater) on mechanical properties were experimentally investigated. It was observed that the maximum flexural strength and modulus of elasticity increased due to the improved interlayer bonding resulting from the production of SKETTK and KKETTK parts at high vacuum levels and optimum printing parameters.

Keywords: Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite (CCRTTC), Short Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite (SCCRTTC), Vacuum Environment, Mechanical Properties

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Eklemeli imalat ile üretim işlem adımları (Sürmen, 2019)	1
Şekil 2. Eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi (Dilberoglu vd., 2017).....	3
Şekil 3. EYM yönteminin şematik resmi (Elisetti vd., 2023).....	8
Şekil 4. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik parçaların EYM yöntemi ile üretim yöntemleri (Mashayekhi vd., 2021)	8
Şekil 5. Lamine nesne imalat yöntemi şematik resmi (Dermeik ve Travitzky, 2020).....	9
Şekil 6. BAAM yönteminin şematik resmi (Biswas vd., 2016).....	10
Şekil 7. ATP yönteminin şematik resmi (Guo ve Wang, 2021)	11
Şekil 8. 3D baskı ile elde edilen motosiklet fren sistemi hava soğutma kanalı (URL-2)	12
Şekil 9. SKETTK uygulamaları; (a) Uçak koltuk desteği (URL-3), (b) yedi eksenli robot kol (URL-5), (c) kaldırma aparatı (URL-6).....	12
Şekil 10. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik parçaların iç yapısındaki kusurlar (Goh vd., 2018; Rarani vd., 2019; Kim ve Lee, 2016; Liu vd., 2020)	14
Şekil 11. EYM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirme yöntemleri	15
Şekil 12. Mikroyapıda meydana gelen boşluklar; (a) atmosfer, (b) vakum ortamında üretilen numunelerin gözeneklerin boyutları (O'Connor ve Dowling, 2018)	20
Şekil 13. Vakum ortamında EYM 3D baskı işlemleri; (a) vakum ortamında EYM 3D baskısının etki şeması (Slejko vd., 2023), (b) vakum kabini içindeki EYM yazıcının modifikasyonu (O'Connor ve Dowling, 2019), (c) vakum kabini ve kabin içine yerleştirilecek EYM cihazı (Quinn vd., 2021), (d) CFRPC üretimi yapılan vakum kabini içinde EYM sistemi (Li vd., 2021).....	23
Şekil 14. Vakum kabini ve ekipmanlarının resmi; (a) katı model çizimi, (b) üretilmiş gerçek boş hali, (c) EYM yazıcıyla birlikte hali.....	26
Şekil 15. Modifiye edilmiş 3D yazıcı	28
Şekil 16. Vakum kabini üzerindeki su ve elektrik bağlantıları; (a) su soğutma portları katı model görüntüsü, (b) bağlantı pinleri katı model görüntüsü, (c) su soğutma portları gerçek hali, (d) bağlantı pinleri gerçek hali.....	29

Şekil 17.	Vakum ortamında kullanılan 3D yazıcının modifiye edilmiş ekstrüder sistemi.....	30
Şekil 18.	Vakum ortamında kullanılan 3D yazıcıya kızılötesi ısıtıcının konumlandırılması; (a) katı model görüntüsü, (b) gerçek hali	32
Şekil 19.	Sürekli elyaf takviyeli filament üretim hattının görüntüleri; (a) katı model görüntüsü, (b) üretilmiş üretim hattı.....	33
Şekil 20.	Elyaf üretim hattı yardımcı ekipmanları; (a) elyaf gerdirme, (b) gerginlik ölçüm cihazı	35
Şekil 21.	Kalıp içerisinde açılmış fiber (w=15mm) görseli.....	36
Şekil 22.	Filament üretim hattı emprenye bölgesi; (a) bölgenin genel resmi, (b) kullanılan kalıplar ve yardımcı ekipmanlar, (c) polimer emprenye mili	37
Şekil 23.	SKETTK filament üretim hattında kullanılan dairesel şekil verme kalıbı	39
Şekil 24.	Filament sarma bölgesi	39
Şekil 25.	Geliştirilen python kodu ile oluşturulmuş üç noktalı eğilme test numunesinin G-kodu hareketleri	41
Şekil 26.	Vakum ortamında üretilen üç noktalı eğilme test numuneleri.....	41
Şekil 27.	Vakum ortamında üretilen SKETTK numunelerinin üç noktalı eğilme testi ölçüleri ve tarama deseni.....	42
Şekil 28.	SKETTK filament çekme testi ve filament çekme numunesi	44
Şekil 29.	Üç noktalı eğilme testi	45
Şekil 30.	SKETTK filament çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	48
Şekil 31.	SKETTK filamentin optik görüntüleriyle gözeneklilik hesaplaması; (a) kesit görüntüsü, (b) gösterilen gözeneklilik	48
Şekil 32.	Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 0.5 mbar, (b) 10 mbar, (c) 100 mbar, (d) farklı vakum değerleri için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	50
Şekil 33.	Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı vakum miktarlarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 0.5 mbar, (b) 10 mbar, (c) 100 mbar.....	51
Şekil 34.	Literatürde karşılaşılan SKETTK kompozitlerinin kırılma mekanizması tipleri (Ding vd., 2023).	52
Şekil 35.	Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 400, (b) 430, (c) 450°C, (d) farklı nozul sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	54
Şekil 36.	Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı nozul sıcaklıklarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 400°C, (b) 450°C.....	56

Şekil 37.	Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 100, (b) 130, (c) 150°C, (d) farklı baskı tablası ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	57
Şekil 38.	Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı baskı sıcaklıklarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 130°C, (b) 150°C.....	59
Şekil 39.	Farklı baskı hızlarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 1.67 mm.sn ⁻¹ , (b) 2.5 mm.sn ⁻¹ , (c) 5 mm.sn ⁻¹ , ve (d) farklı baskı hızları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	60
Şekil 40.	Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı baskı hızında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 5 mm.sn ⁻¹ , (b) 1.67 mm.sn ⁻¹	62
Şekil 41.	Farklı koşullarda basılan SKETTK numunelerin optik görüntüleri: (a) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 400°C, baskı tablası sıcaklığı 100°C, baskı hızı 2.5 mm.sn ⁻¹ , (b) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 450°C, baskı tablası sıcaklığı 100°C, baskı hızı 2.5 mm.sn ⁻¹ , (c) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 450°C, baskı tablası sıcaklığı 130°C, baskı hızı 2.5 mm.sn ⁻¹	63
Şekil 42.	Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) 0.5, (b) 10 ve (c) 100 mbar.	65
Şekil 43.	Farklı baskı hızında basılan SKETTK numunelerinin DSC testinden elde edilen eğrileri; (a) ısıtma taraması ve (b) soğutma taraması.....	66
Şekil 44.	Farklı vakum miktarlarında üretilen KKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) atmosfer, (b) 100, (c) 10, (d) 0.5 mbar, (d) farklı vakum miktarları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	69
Şekil 45.	Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen KKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 430, (b) 450°C, (d) farklı nozul sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	71
Şekil 46.	Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen KKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 100, (b) 130, (c) 150°C, (d) farklı baskı tablası sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	73
Şekil 47.	Farklı baskı hızında üretilen KKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 30 mm.sn ⁻¹ , (b) 50 mm.sn ⁻¹ , (d) farklı baskı hızı için ortalama eğrilerin karşılaştırılması.....	75
Şekil 48.	Farklı vakum miktarlarında üretilen KKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) 0.5, (b) 10, (c) 10 mbar, (d) atmosferde.....	77
Şekil 49.	Farklı vakum miktarında KKETTK numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a) atmosferde, (b) 100, (c) 10, (d) 0.5 mbar	79

Şekil 50.	Zaman içinde farklı ısıtma bölgelerindeki ısıtıcı konumuna göre alt tabaka sıcaklık değişimi.....	80
Şekil 51.	Farklı şartlarda basılan KKETTK numunelerin üç noktalı eğilme testinden elde edilen eğriler	82
Şekil 52.	Farklı şartlarda basılan KKETTK numunelerin üç noktalı eğilme testi sonuçları.....	82
Şekil 53.	Farklı şartlarda üretilen KKETTK numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a) atmosfer, (b) vakum, (c) kızılötesi ön ısıtma, (d) vakum ve kızılötesi ön ısıtma	83
Şekil 54.	Farklı şartlarda üretilen KKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) atmosfer, (b) vakum, (c) kızılötesi, (d) vakum ve kızılötesi ısıtıcı.....	85
Şekil 55.	Farklı şartlarda üretilen KKETTK örneklerinin XRD grafikleri.....	87

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Farklı vakum ve baskı parametrelerinde üretilen SKETTK üç noktalı eğilme testi numunelerinin özeti.....	41
Tablo 2. Farklı vakum ve baskı parametrelerinde üretilen KKETTK üç noktalı eğilme testi numunelerinin özeti.....	42
Tablo 3. Kızılötesi ısıtıcı destekli ve vakum ortamında üretilen KKETTK test numunelerinin baskı parametreleri	43
Tablo 4. Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	50
Tablo 5. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	55
Tablo 6. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	58
Tablo 7. Farklı baskı hızlarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	61
Tablo 8. Farklı vakum basınçlarında üretilen numunelerden hesaplanan gözeneklilik oranı	64
Tablo 9. DSC eğrilerinden hesaplanan sıcaklık ve kristallik değerleri.....	67
Tablo 10. Farklı vakum miktarlarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	70
Tablo 11. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	72
Tablo 12. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti	74
Tablo 13. Farklı baskı hızında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti.....	76
Tablo 14. Farklı vakum miktarlarında altında basılı numunelerin gözeneklilik oranı	78
Tablo 15. Farklı şartlarda basılı numunelerin gözeneklilik oranı	85
Tablo 16. Farklı şartlarda üretilen KKETTK numunelerinin kristallik derecesi	88

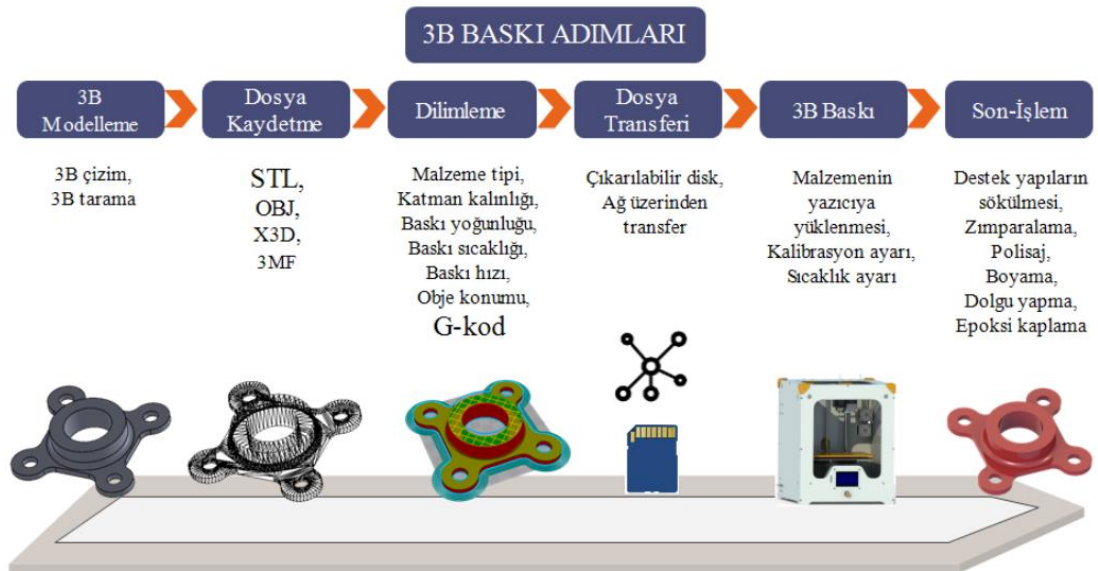
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ_E	: Eğilme Gerilmesi (MPa)
X_c	: Kristallik oranı (%)
ΔH_m	: Erime entalpisi (J/g)
$\Delta H_{m,PEEK}^0$	: %100 saf kristal PEEK için erime entalpisi (J/g)
w	: Elyaf ağırlık yüzdesi (%)
E	: Elastisite modülü (GPa)
AM	: Eklemeli İmalat (AM, Additive Manufacturing)
EYM	: Eriyik Yığılma Metodu (FDM, Fused Deposition Modelling)
SKETTK	: Sürekli Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit (CCRTTC, Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite)
KKETTK	: Sürekli Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit (CCRTTC, Continuous Carbon Fiber-Reinforced Thermoplastic Composite)
PEEK	: Polieter Eter Keton

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

3 boyutlu baskı olarak da bilinen eklemeli imalat yöntemleri, talaşlı imalat (Freze, Torna, Delme vb.) yöntemlerinin aksine üretilmek istenilen parçanın katman katman eklenmesi prensibine dayanmaktadır. Eklemeli imalat ilk olarak hızlı prototipleme amacıyla 1980’lerde geliştirilmiştir (Nguyen ve Vignat, 2016). Prototip ürünler, çeşitli testlerle tabi tutulup uygun olduğuna karar verildiğinde, ürünün seri üretimi başlar. Eklemeli imalat ile üretilen parçaların, iyi bir yüzey kalitesi için ekstra işlem gerektirmesi ve diğer konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalara göre nispeten daha düşük mekanik özellik sergilemelerinden dolayı sadece prototip ürün üretiminde kullanılmıştır (Campbell vd., 2012; Kruth vd., 1998; Tezel vd., 2018). Eklemeli imalat teknolojisi, kullanılan malzeme teknolojisi ve yönteminin gelişmesiyle birçok eklemeli imalat yöntemleri keşfedilmiş olup kullanım alanı gelişmiştir (Gardner, 2023; Odera ve Idumah, 2023).



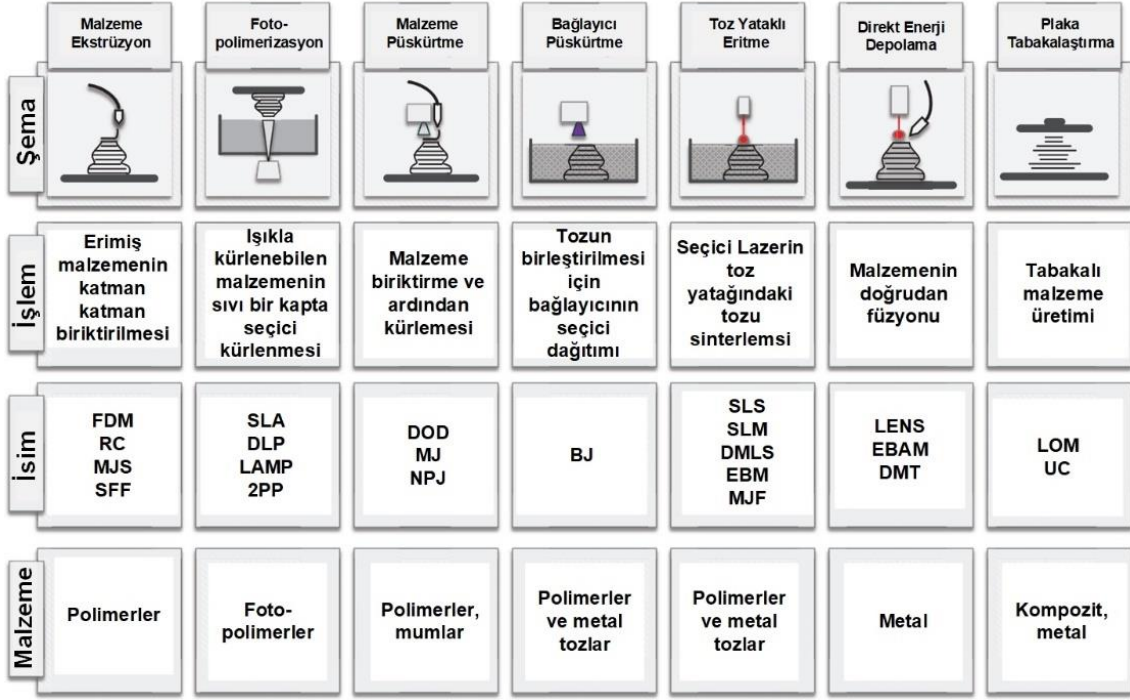
Şekil 1. Eklemeli imalat ile üretim işlem adımları (Sürmen, 2019)

Eklemeli imalat yöntemlerinin işlem adımları Şekil 1’de gösterilmiştir. İlk olarak baskı yapılacak parçanın geometrisinin üç boyutlu modeli bilgisayar destekli tasarım (Computer-Aided Design, CAD) programı ile oluşturulmaktadır. Üç boyutlu model oluşturulması

ardından, model dilimlenebilmesi için ilgili CAD programında ‘. stl’ dosya formatında kayıt edilmektedir. Uygun formatta kaydedilen 3D modeller, paket dilimleme programlar (Slic3r, Cura, Craftware vb.) vasıtasıyla dilimlenmektedir. Dilimleme işleminin amacı, parçayı katman katman dilimlere ayırarak baskı parametreleri (baskı hızı, baskı sıcaklığı, destek parçası, soğutma, ortam sıcaklığı, parçanın iç doluluk oranı vb.) dikkate alınarak baskı yollarının “G-kodu” olarak adlandırılan bir bilgisayar kodu dosyasının elde edilmektedir. Dilimleme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen G-kodu bir taşınabilir bellek vasıtasıyla veya kablolu/kablosuz bağlantı ile yazıcıya yüklenmektedir. Yazıcıda gerekli temizlik ve kalibrasyonlar (baskı tablası kalibrasyonu, nozul sıcaklığı kalibrasyonu vb.) yapıldıktan sonra eklemeli imalat süreci başlar. Baskı işlemi başladıktan bitine kadar cihaza hiçbir müdahale yapılmamaktadır. Baskı tamamlandıktan sonra parça platformdan alınarak, yüzeyindeki desteklerden arındırılır ve talep edilirse yüzey işlemleri (zımparalama, parlatma) yapılarak yüzeyler pürüzsüz hale getirilmektedir.

1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri, mühendislik, tıp, havacılık, otomotiv ve sanayi ürünleri gibi birçok farklı sektörde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Eklemeli imalat yöntemleri, tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, malzeme çeşitliliği ve düşük maliyetli üretim gibi avantajlar sunmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisini daha iyi anlamak ve bu yöntemlerin üretim prosesindeki önemini, mevcut durumunu ve gelecekteki potansiyel konumunu kavrayabilmek için, bu yöntemlerin üretim mantığı ve geliştirilen teknolojiler üzerine odaklanmak gerekmektedir. Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen malzemeler arasında geleneksel termoplastikler, termosetler, metaller, ve seramikler yer almaktadır (Praveena vd., 2022). Eklemeli üretim yöntemleri, her birinin kendine özgü çalışma prensibi olan bir dizi ayrı süreçten oluşmaktadır. Buna rağmen eklemeli imalat yöntemlerindeki temel mantık, malzemeyi katman katman ekleyerek nesnelerin üretildiği bir dizi teknolojiyi ifade etmektedir. Eklemeli imalat teknolojileri, malzeme ekstrüzyon, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, toz yataklı eritme, direkt enerji depolama, plaka tabakalaştırma yedi ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Şekil 2’de eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılmasının şematik hali gösterilmiştir.



Şekil 2. Eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi (Dilberoglu vd., 2017)

Şekil 2’de verilen eklemeli imalat yöntemleri sayesinde metal esaslı ve polimer esaslı parçaların üretilmesi mümkün hale gelmiştir.

Metal esaslı eklemeli imalat ile alüminyum alaşımları, titanyum, kobalt-krom, östenitik paslanmaz çelik vb. parçalar üretilmektedir. Dört temel metal eklemeli üretim olup bunlar: i) toz yatağı ergitme, ii) doğrudan enerji depolama, iii) malzeme püskürtme, iv) bağlayıcı püskürtme yöntemidir (Herzog vd., 2016).

Metal esaslı eklemeli üretim yöntemlerinden en sık kullanılan toz yataklı ergitme stratejisine dayanan Seçici Lazer Eritme (Selective Laser Melting, SLM) yöntemi, metal tozlarının lazer kaynağı kullanılarak eritilmesiyle elde edilen 3D parçaların üretildiği eklemeli imalat yöntemidir. SLM yöntemi ile baskı, toz malzemeler tablanın üzerine dağıtılması ile bir tabaka oluşturularak başlar. Katmanların geometrik bilgileri ile yönlendirilen lazer ışını, metal tozları eritir. Ardından tekrardan toz malzemeler tablanın üzerine dağıtılarak tekrardan aynı işlemler tekrarlanır (Kruth vd., 2005; Prashanth vd., 2014; Vilaro vd., 2011).

Polimer esaslı malzemelerin eklemeli imalatı, çeşitli polimerlerin üç boyutlu baskı teknolojileri kullanılarak katman katman üretilmesi sürecidir. Farklı mekanik ve termal özelliklere sahip çeşitli polimerler (Termoplastikler, fotopolimerler ve kompozit malzemeler vb.) kullanılması sayesinde geniş çapta malzeme seçeneği vardır. Polimer esaslı eklemeli

imalatın yaygın yöntemleri arasında şunlar bulunmaktadır: i) Malzeme ekstrüzyon, ii) fotopolimerizasyon, iii) malzeme püskürtme, iv) bağlayıcı püskürtme yöntemi, v) toz yatağı ergitme, vi) plaka tabakalaştırma yöntemleridir.

Polimer esaslı eklemeli üretim yöntemlerinden fotopolimerizasyon stratejisine dayanan Modern Stereolitografi (SLA) yöntemi, 1970’lerde eklemeli imalat alanındaki ilk önemli çalışma olarak bilinmektedir (Huang vd., 2020). Bu yöntem, akışkan fotosensitif malzeme, lazer kaynağı ile kürlenip, yüksek hassasiyetli üç boyutlu polimer parçalar üretilir. Sterolitografi yöntemi ile üretilecek parçaların 3D modelleri bilgisayar destekli paket programlar vasıtasıyla hazırlanır ve dilimleme işlemleri gerçekleştirilir. Platform, üzerine eklenen her yeni katman katıldıktan sonra eksenel olarak aşağı yönde hareket eder ve bu şekilde üretim tamamlanır (Karagöz vd., 2021). SLA yöntemi ile yüksek hassasiyetli parçalar üretilmesine rağmen polimer parçaların mekanik performansları oldukça düşük kalmaktadır (Aktitiz vd., 2020; Kazemi ve Rahimi, 2018). Ayrıca SLA yöntemi kullanılarak elde edilen parçaların ultraviyole (UV) ışığa karşı hassas oldukları için kullanım alanlarını kısıtlamıştır (Watters ve Bernhardt, 2018). Bu yüzden SLA yöntemi yüksek mukavemet talep edilmeyen, prototip veya model olarak kullanılacak parçaların üretiminde kullanılmaktadır.

Polimer esaslı eklemeli üretim yöntemlerinden en sık kullanılan, malzeme ekstrüzyon stratejisine dayanan Eriyik Yığma Metodu (EYM), kolay erişim, hızlı prototipleme, karmaşık geometriler üretebilme gibi yeteneklerden dolayı günümüzde popüler olarak kullanılan eklemeli imalat teknolojisidir (Marwah vd., 2017; Masood ve Song, 2004). EYM, dairesel kesitlere sahip olan polimer esaslı filament, bir çekme motoru vasıtasıyla ekstrüzyon başlığına kılavuz yollar vasıtasıyla iletilir. Ekstrüzyon başlığı, diğer yöntemlere benzer olarak hazırlanan G-kodu vasıtasıyla X, Y ve Z eksenleri boyunca hareket edebilecek bir sistem üzerine bağlanmıştır. Ekstrüzyon başlığındaki nozul, ilgili polimerin erime sıcaklığının üzerine kadar ısıtılmıştır ve motorun polimeri itmesi ile eriyik polimer baskı tablasına ekstrüde eder. G-kodu ile belirlenmiş olan yol boyunca bu işlem devam eder ve ilk katman böylelikle tamamlanır. İlk katman basıldıktan sonra baskı tablası ekstrüder başlığından uzaklaşır ve bir sonraki katman için aynı işlemler tekrar eder. Böylelikle üretilcek parça eklemeli olarak imal edilmiş olur.

Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen parçaların mekanik özellikleri, geleneksel üretim yöntemleri (talaşlı imalat, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon vb.) ile üretilen parçalara göre düşük mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine sahip olmaktadır. Bu

durum ise, eklemeli imalat yönteminin başlıca dezavantajları arasında yer alır. Bunun başlıca sebepleri, katmanlar arası zayıf bağ etkileşimi ve anizotropidir. Günümüzde bu konuyla ilgili akademide yoğun bir çalışma başlamıştır. Bu çalışmalar, üretim parametrelerinin optimizasyonu (Krajangsawasdi, Blok, Hamerton, ve Longana, 2021), basınçlı ortam üretim (Werken vd., 2021) ve vakum ortamında üretim (O'Connor ve Dowling, 2018), nanoparçacık ilavesi (Chen vd., 2019) vb. gibi yöntemler olup, bu yöntemler sayesinde daha düşük gözenekli ve yüksek mukavemetli parçalar elde edilebilmiştir. Bu çalışmalarda üretim parametrelerinin optimizasyonuna yönelik pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, nozul sıcaklığı (Ning vd., 2017), baskı hızı (Zhang vd., 2018), tarama deseni (Zhang vd., 2018), katman kalınlığı (Wu vd., 2015), tabla sıcaklığı (Chadha vd., 2019), gibi pek çok parametrelerin etkileri açık şekilde ortaya konulmuştur. Vakum ortamında üretim üzerine yapılan çalışmalar genellikle sınırlı olup, yakın zamanda yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Maidin vd. (2017), vakum ortamında 3D Baskı çalışmaları yapmıştır. Yalnızca üretimin vakumlu ortamda yapıldığı bu çalışmalarda, ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) polimerler için çekme mukavemetlerinde yaklaşık %12 iyileşme elde edilmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu iyileşme parçalardaki soğuma oranının yavaşlamasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

1.3. Polimer Esaslı Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Eklemeli İmalat ile Üretimi

Polimer esaslı kompozit malzemeler hafif ve yüksek dayanımlı malzemeler olması sebebiyle özellikle havacılık sektöründe metal esaslı malzemelerden daha çok kullanım alanına sahiptirler (Li vd., 2022). Polimer esaslı kompozit malzemeler; termoplastik ve termoset kompozitler olarak iki gruba ayrılırlar. Günümüz teknolojisinde termoset kompozitler termoplastik kompozitlere kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduklarından dolayı daha geniş kullanım alanına sahiptir. Son zamanlarda gelişen teknolojiyle birlikte termoplastik kompozit malzemelerin artan mekanik özellikleri ve daha düşük maliyetleri sebebiyle termoplastik kompozit malzeme kullanımı giderek artmaktadır. Termoplastik matrisin kısa ve/veya sürekli elyaflarla güçlendirilerek elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemeler üretilmesi, son zamanlarda oldukça popülerlik kazanmıştır (Garofalo ve Walczyk, 2021; Tekinalp vd., 2014). Özellikle havacılıkta ve diğer endüstriyel alanlarda kullanılan elyaf takviyeli parçaların üretimini eklemeli imalat teknolojileriyle mümkün hale gelmiştir (Ye vd., 2022; Zhang vd., 2022).

Kısa elyaf takviyeli termoplastik kompozitler (KKETTK); ekstrüzyon yöntemleri ve enjeksiyon kalıplama yöntemi dahil olmak birçok yöntemle imal edilebilmektedir. Bu üretilere ilaveten günümüzde eklemeli imalat teknolojisi de polimer kompozitlerin etkin üretimi için alternatif bir üretim yöntemi olarak popülerlik kazanmıştır. KKETTK parçalar eklemeli imalat yöntemlerinden EYM yöntemi ile yaygın olarak üretilmektedir (Li vd., 2019; Tekinalp vd., 2014). Geleneksel EYM yazıcılarında KKETTK parçalar üretilmeye başlamadan önce yazıcının nozulu sertleştirilmiş çelik ile değiştirilmesi tavsiye edilmektedir (URL-1). Bunun ana sebebi kırılmış elyaf takviyesinin nozulu aşındırıp nozul geometrisinde sapmalar meydana getirmesidir.

Sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitler (SKETTK); yüksek mekanik karakteristikleri, düşük termal genleşmesi, yüksek termal iletkenliği ve hafiflik talep edilen uygulamalar nedeniyle gözde bir malzeme grubu olup, metal esaslı yapılar için alternatif bir seçenek haline gelmiştir (Chen vd., 2021; Kwon vd., 2021; Obande vd., 2021; Pegoretti, 2021). SKETTK eklemeli olarak üretim yöntemleri; EYM, Otomatik Elyaf Serme (Automated Fiber Placement, AFP), Termal Şekillendirme, elyaflara önceden termoplastik reçine kaplanması ile elde edilen pre-preg şeritlerin kullanılmasıyla Lamine Nesne İmalatı (Laminated object manufacturing, LOM), Büyük Hacimli Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Üretimi (Big Area Additive Manufacturing, BAAM) gibi yöntemlerdir.

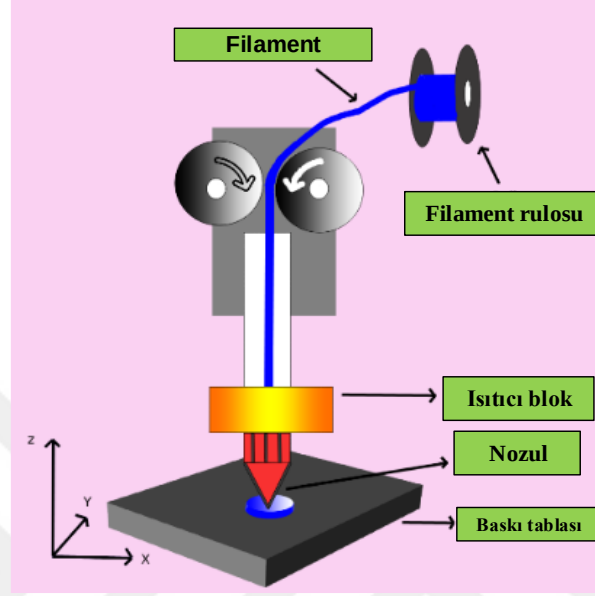
1.3.1. Eriyik Yığılma Metodu (Fused Deposition Modeling, EYM)

3D baskı yöntemi olarak da bilinen EYM yöntemi, temel olarak, filament olarak adlandırılan hammaddenin bir sıcak nozuldan geçirilerek eriyik hale getirilmesi ile eriyik olan malzemenin baskı tablası üzerine sermesi ile başlar. Ardından bu adımlar katmanlar boyunca tekrarlanır ve eklemeli imalat tamamlanmış olur. Şekil 3'te EYM yönteminin şematik resmi gösterilmiştir. Son zamanlarda, SKETTK parçaların EYM yöntemi ile üretilmesi üzerine yapılan çalışmalarda büyük bir artış olduğu gözlenmektedir (Caminero vd., 2018; Garofalo ve Walczyk, 2021; Luo vd., 2020; Mosleh vd., 2021). EYM yöntemi diğer SKETTK kompozitleri için uygun olan eklemeli imalat yöntemlerinden hem uygulama hem de maliyet açısından oldukça avantajlıdır. Bir EYM yazıcısı üzerinde bazı parçaların modifiye edilmesi ile SKETTK kompozit parçaların üretimi oldukça kolaydır. Markforged adındaki firma MarkOne adında sürekli elyaf destekli termoplastik kompozit parçalar

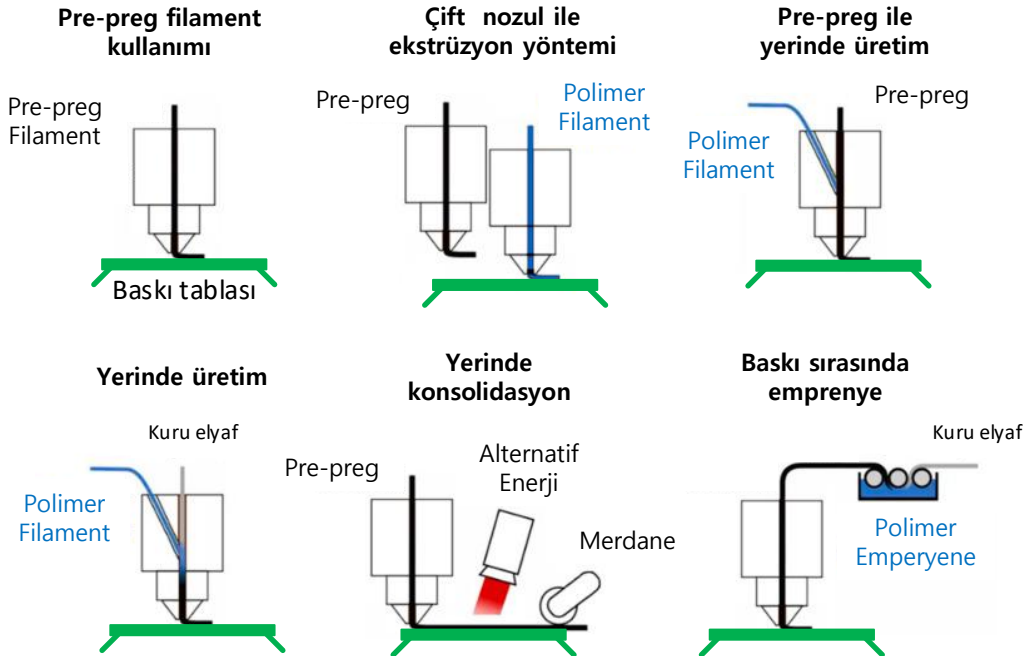
üretebilen platformu piyasaya sunmuştur. Cihazda yaygın olarak karbon, kevlar gibi çeşitli elyaflar takviyeli naylon filament ile kullanılmaktadır. MarkOne'nın piyasaya sürülmesinden itibaren, 3D yazıcılarda üretilen termoplastik kompozit parçaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Der Klift vd., 2016).

SKETTK kompozitlerin EYM yöntemi ile çeşitli ekstrüzyon ve emprenye yöntemleriyle baskı yönteminin uygulanışı Şekil 4'te gösterilmiştir. Pre-preg (önceden emprenye edilmiş sürekli elyaf) filament kullanımı yönteminde, sürekli elyafın filamentleri, doğrudan ekstrüzyon başlığından geçerek baskı tablası yapışmasıyla gerçekleşmektedir. Geleneksel yazıcılarda kullanılan nozulalar, SKETTK baskılarda elyaf ayrılması ve tıkanıklığa neden olabileceği için nozulun değiştirilmesi gereklidir. SKETTK baskısı için modifiye edilen yeni nozul, 2 mm delik çapına sahiptir ve kenarları yuvarlatılmıştır. Kenarlarının yuvarlatılmasının sebebi, nozula yapışmayı önlemek ve filamentin zarar görmesini engellemek için yapılmıştır. Ayrıca, karmaşık geometrili parçaların baskısında, sürekli elyaf filament kesici aparatına ihtiyaç vardır. Bu yöntem, tek SKETTK filamentin ekstrüzyonunu içerir ve genellikle termoplastik malzemelerle kullanılır. Çift nozul yöntemi ile ekstrüzyon yönteminde, pre-preg filament ve bir polimer filament iki ayrı ekstrüzyon başlığından ekstrüde edilir. Bu yöntemle, elyaf ve polimerin belirli bir sırada yapışması sağlanır. Pre-preg ile yerinde üretim yönteminde, pre-preg ve saf polimer filament, aynı ekstrüzyon başlığında birleştirilir. Bu yöntem, standart yazıcılarda sadece ısıtıcı alüminyum bloğun değiştirilmesi ile elde edilebilmektedir. Saf termoplastik filament, pre-preg filamentin üzerine ekstrüde edilerek elyafların emprenyesi sağlanır. Yerinde üretim yönteminde, önceden emprenye edilmemiş kuru elyaflar, ekstrüzyon başlığından geçerken polimer filament ile birleşerek ekstrüde edilir. Polimer filament, elyaflara bulunduğu anda yerinde emprenye edilerek elyafların polimerle kaplanmasını sağlar. Yerinde konsolidasyon yönteminde, pre-preg filament ekstrüde edildikten sonra, alternatif enerji kaynakları (örneğin, lazer, kızılötesi ısıtıcı, plazma) ve bir merdane kullanılarak yerinde konsolidasyon sağlanır. Bu yöntem, elyaf ve polimerin daha güçlü arayüz ve katmanlar arası yapışması sağlanır. Baskı sırasında emprenye yönteminde, kuru elyaflar, ekstrüzyon başlığından geçerken bir polimer emprenye ünitesine yönlendirilir. Kuru elyaflar, polimer emprenye ünitesinde polimerle kaplanarak baskı yapılır. Bu yöntemler içinden en sık pre-preg filament kullanımı yöntemi kullanılır. Yöntemin uygulanışı ve daha az maliyet ve diğerlerine göre daha hızlı üretim hızı sağlanır. Çift nozul yöntemi ile ekstrüzyon yönteminde çift nozul üretim maliyetini artırmaktadır. Ayrıca, pre-preg ile yerinde üretim ve yerinde üretim yönteminde

emprenye süreci yazıcı hızını düşürmektedir. Yerinde konsolidasyon yöntemi ile mukavemetli SKETTK parçalar üretebilme avantajı varken, ekstra ekipman (lazer, kızılötesi ısıtıcı, plazma vb.) maliyet ve enerji tüketimini artırır.



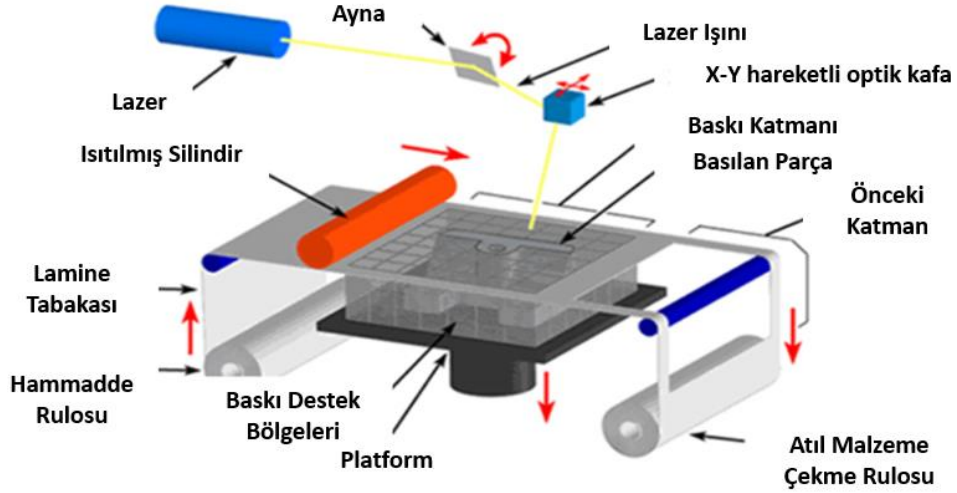
Şekil 3. EYM yönteminin şematik resmi (Elisetti vd., 2023)



Şekil 4. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik parçaların EYM yöntemi ile üretim yöntemleri (Mashayekhi vd., 2021)

1.3.2. Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing, LOM)

LOM yöntemiyle ince katmanlar halinde kesilmiş malzemeler üst üste yapıştırılarak nesneler oluşturulur. LOM teknolojisi, baskı tablası üzerine gönderilen bir levha (metal, kompozit, kâğıt vb.) sistem üzerindeki lazer kaynağı ile uygun kod vasıtasıyla kesilir. Ardından artık malzeme bir makara vasıtasıyla tablanın karşı tarafından sarılır. Bir sonraki katman için aynı adım tekrar edilir ve sıcak bir merdane vasıtasıyla katmanlar birbirleri üzerine preslenir. Bu işlemler parça tamamlanana kadar tekrar eder eder ve bu şekilde üretim tamamlanır. Şekil 5'te LOM yönteminin şematik resmi verilmiştir. Zhang vd. (2001), yapmış oldukları çalışmada 0.7 mm kalınlığa sahip Al_2O_3 seramik yeşil parçalarını LOM yöntemi ile kullanarak imalatını gerçekleştirmişlerdir. LOM tekniği kullanılarak hazırlanan Al_2O_3 seramiklerinin mekanik özellikleri, anizotropik özelliklerinden dolayı geleneksel üretim prosesi ile hazırlanan Al_2O_3 ürünlerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

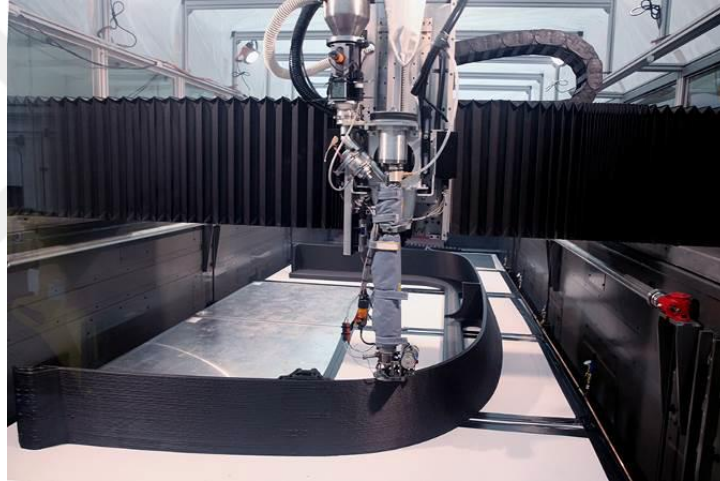


Şekil 5. Lamine nesne imalat yöntemi şematik resmi (Dermeik ve Travitzky, 2020)

1.3.3. Büyük Hacimli Eklemeli imalat (Big Area Additive Manufacturing, BAAM)

Eklemeli imalat teknolojisinin hızla gelişmesiyle bu teknoloji ile büyük hacimli parçalar (uçak kanatlar parçaları, rüzgâr türbinleri vb.) üretilmesi ilgi görmüştür. BAAM teknolojisi genel olarak eriyik yığma yöntemi ile baskının büyük ölçekli halidir. Bu teknolojide, vidalı ekstrüderler genel olarak tercih edilmektedir. Bu sebeple, BAAM sisteminde, hammadde olarak filament yerine granül kullanılmaktadır. BAAM

teknolojisinde vidalı ekstrüderlerin tercih edilmesi ve ham madde olarak granül parçacıklarının kullanılması ile hızlı ve düşük maliyetli parçaların üretilmesini mümkün kılmaktadır. Motora bağlı olan vida erimiş olan malzemeyi dışarıya iterek baskı platformuna yapıştırarak ilk katman oluşturulmaktadır. Böylece katman katman üretim süreci başlayarak aynı adımlar tekrar edilmektedir. Şekil 6'da BAAM yönteminin şematik resmi verilmiştir. Duty vd. (2017), BAAM teknolojisi kullanılarak basılan parçanın yapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışmada saf ABS ve karbon elyaf takviyeli ABS kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, saf ABS enjeksiyonla kalıplanmış malzemeyle göre birbirlerine çok yakın bir sertliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca elyaf takviyeli ABS kullanılmasıyla birincil biriktirme yönü boyunca sertlik ve mukavemeti artırmıştır, fakat yüksek miktarda anizotropi sağladığı bulunmuştur.

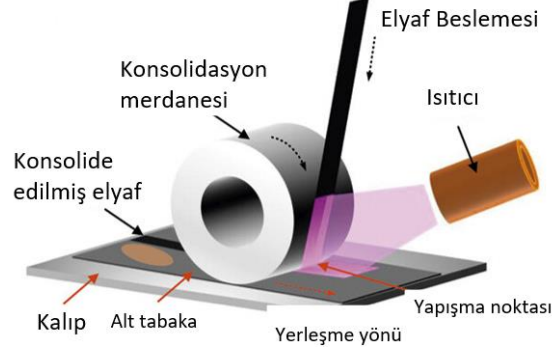


Şekil 6. BAAM yönteminin şematik resmi (Biswas vd., 2016)

1.3.4. Otomatik Elyaf Serme Yöntemi (Automated Fiber Placement, AFP)

AFP yöntemi, yüksek mekanik özelliklere sahip sürekli elyaf takviyeli şerit bantlar, otomatik elyaf serme makinası vasıtasıyla baskı platformumu üzerine serilmektedir. AFP teknolojisi bilgisayar destekli tasarım kullandığı için, şeritleri farklı oryantasyonlarda (yan yana, farklı uzunluklarda, farklı desenlerde) yerleştirebilmektedir. Bu otomatik elyaf serme makinaları, yönlendirici vasıtasıyla farklı genişliklerdeki (15,75,300 mm vb.) şerit bantları bir kat boyunca sererek katmanı tamamlamaktadır. Ardından bu işlem bir sonraki kat için devam eder ve bu şekilde katmanlı üretim tamamlanır. AFP yönteminde, yaygın olarak termoplastik şerit bantlar kullanılsa da nadiren termoset şeritlerde kullanılmaktadır.

(Dhinakaran vd., 2020). Ayrıca bu yöntem, büyük hacimli parçalar üretilmesine elverişlidir. Şekil 7’de AFP yönteminin şematik resmi verilmiştir.



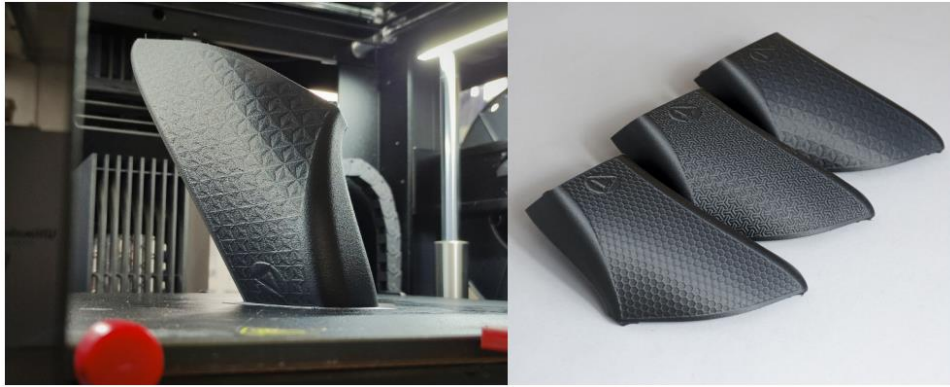
Şekil 7. ATP yönteminin şematik resmi (Guo ve Wang, 2021)

1.4. EYM Yöntemi ile Kısa ve Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Uygulamaları

EYM yöntemi kullanılarak özellikle kırılmış veya parçacık takviyeli kompozit uygulamaları ile biyomedikal, havacılık uygulamaları ve prototipleme üzerine birçok ürün geliştirilmektedir (J. Gardner vd., 2016; Senatov vd., 2016; Sinkez ve De Backer, 2019; X. Wang vd., 2017). Kısa elyaf takviyeli kompozit parçaların üretimi sürekli elyafa göre üretim esnekliği bakımından oldukça avantajlıdır. Raise 3D şirketi bir motosiklet fren sistemi hava soğutma kanalını tasarlamak amacıyla Raise3D yazıcıyı kullandı. Raise 3D %100 geri dönüştürülmüş kırılmış karbon elyaf takviyeli polipropilen filament kullanmıştır (URL-2). Şekil 8’de 3D baskı ile elde edilen motosiklet fren sistemi hava soğutma kanalı gösterilmiştir. Kırılmış elyaf takviyesine kıyasla, EYM yöntemi ile üretilen sürekli elyaf takviyeli kompozitler uygulamaları diğer takviyeli kompozitlere kıyasla gelişim aşamasındadır. Buna rağmen gelişen EYM teknolojiyle birlikte Sürekli elyaf takviyeli kompozit uygulamaları son yıllarda araştırmacıların ve eklemeli imalat üretimi yapan şirketlerin ilgi konusu olmuştur.

Şekil 9(a)’da Anisoprint şirketi tarafından 3D yazıcı ile üretilen, yolcu uçaklarında kullanılan alüminyum koltuk desteklerinin yerine SKETTK koltuk destek parçası gösterilmektedir. 3D kompozit baskı ile alüminyum koltuk desteklerine kıyasla parçanın ağırlığı 400 gramdan 250 grama %40 oranında ağırlığı azalmıştır (URL-3). Ayrıca yine Anisoprint şirketi tarafından, sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozit filament kullanarak 3D yazıcı kullanarak bisiklet gidonu üretilmiştir (URL-4). Bisiklet gidonu, metal

muadili ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Bu avantajların başında metallere göre hafif ve mukavemetli olmasıdır. Ayrıca, üretimi planlanan parçanın baskı işleminden önce parçadaki elyafların parçaya uygulanacak yük yönüne göre optimum yönlendirilmesi gibi imkanların olmasıdır. Tüm bu avantajlara ek olarak, elyaf yollarının yönlendirilmesi, parçanın anizotropisinden yararlanmayı sağlar ve yüksek dayanımlı parçalar elde etmeye ve aynı zamanda daha az malzeme kullanmaya ve atığı önlemeye olanak tanımıştır. 3D baskı ile üretilen yedi eksenli robot kol Şekil 9(b)'de gösterilmiştir (URL-5). Şekil 9(c)'de dört kat güvenlik katsayısına sahip olmak üzere 240 kg yük kaldıracabilen EYM yöntemi ile üretilmiş SKETTK yük kaldırma aparatı gösterilmiştir (URL-6). Bu parça metale göre %75 daha hafif olmaktadır. Ayrıca, üretimin kolay ve daha az üretim aşamasından geçmesi nedeniyle önemli ölçüde ekonomik fayda sağlamıştır.



Şekil 8. 3D baskı ile elde edilen motosiklet fren sistemi hava soğutma kanalı (URL-2)



Şekil 9. SKETTK uygulamaları; (a) Uçak koltuk desteği (URL-3), (b) yedi eksenli robot kol (URL-5), (c) kaldırma aparatı (URL-6)

Şekil 9'un devamı

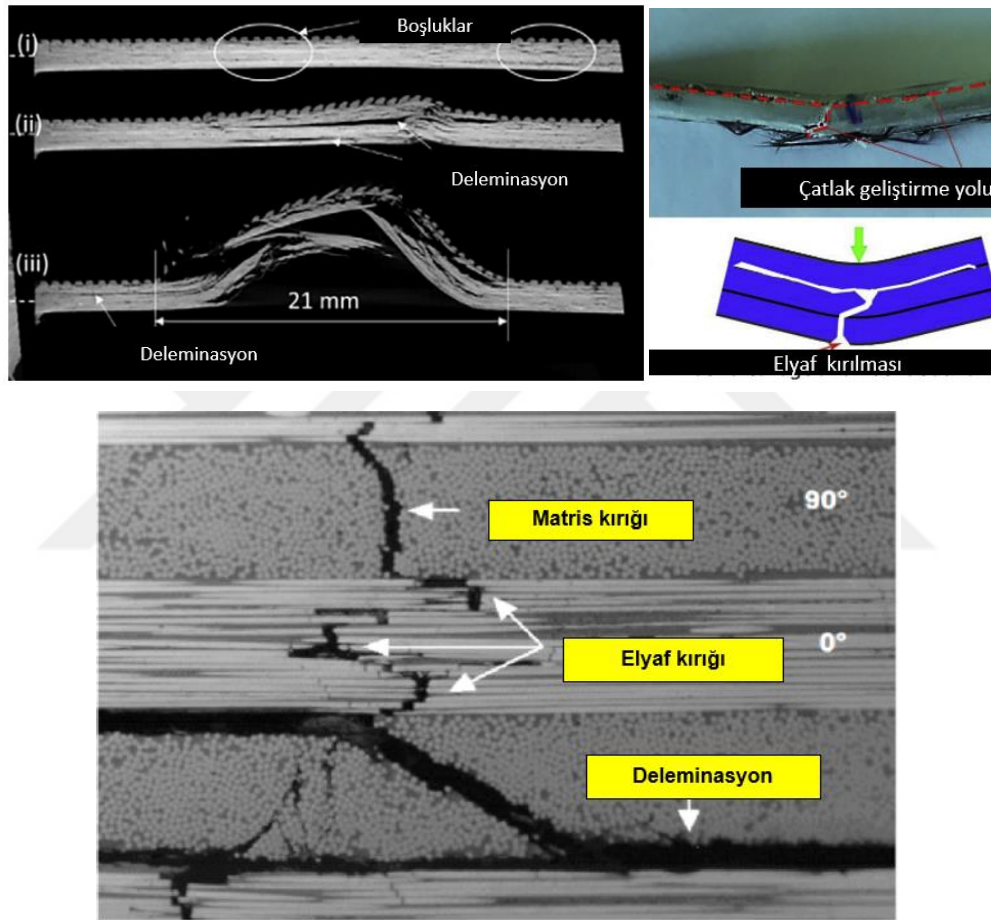


(c)

1.5. EYM Yöntemi ile Üretilen Kısa ve Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerde Meydana Gelen Yapısal Hatalar

EYM teknolojisi, gelişen teknolojiyle birlikte belirli bir seviyeye gelmesine rağmen bu yöntemle imal edilen parçalar mekanik açıdan geleneksel yöntemlere imal edilen parçalara kıyasla oldukça düşük seviyededir. Bunun sebebi EYM baskısında meydana gelen hataların basılan parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilemesidir. Bu hatalar, üretim esnasında meydana gelen parçanın iç yapısındaki makro ve mikro boşluklar, homojen olmayan sıcaklık gradyanından kaynaklanan geometrik bozulmalar, elyaf takviyeli termoplastik filament içindeki düzensiz elyaf dağılımı, elyaflar ve polimer matris arasındaki zayıf kimyasal bağlanma, katman izinin neden olduğu yüzey üzerindeki pürüzler, sürekli elyaf takviyeli kompozit baskılarında hatalı köşe baskıları vb. kusurlar olarak tanımlanmıştır (Caminero vd., 2018; Du vd., 2016). EYM yöntemiyle üretilen SKETTK parçalarında meydana gelen kusurlar, delaminasyon, gözenek ve boşluk oluşumu, matris çatlağı, elyaf çekmesi vb. olup Şekil 10'da özetlenmiştir. Delaminasyon, diğer bir adıyla katmanlar arası çatlak, mevcut olması ve büyümesi kompozit malzemede ciddi hasarlara neden olmaktadır (Wang, 1983). Ayrıca gözenek ve boşluk oluşumu baskı esnasında olabileceği gibi, sürekli elyaf takviyeli kompozit filament üretiminden de kaynaklanmaktadır (Kabir vd., 2020). Elyaf ile matris arasındaki bağ zayıf olduğunda elyaf çekilmesi meydana gelmektedir (Yang ve Yeh, 2020). Arayüz bağının güçlendirilmesi için elyafların matrisle homojen bir şekilde kaplanması gerekmektedir. Eğer elyafın ıslatabilirliği

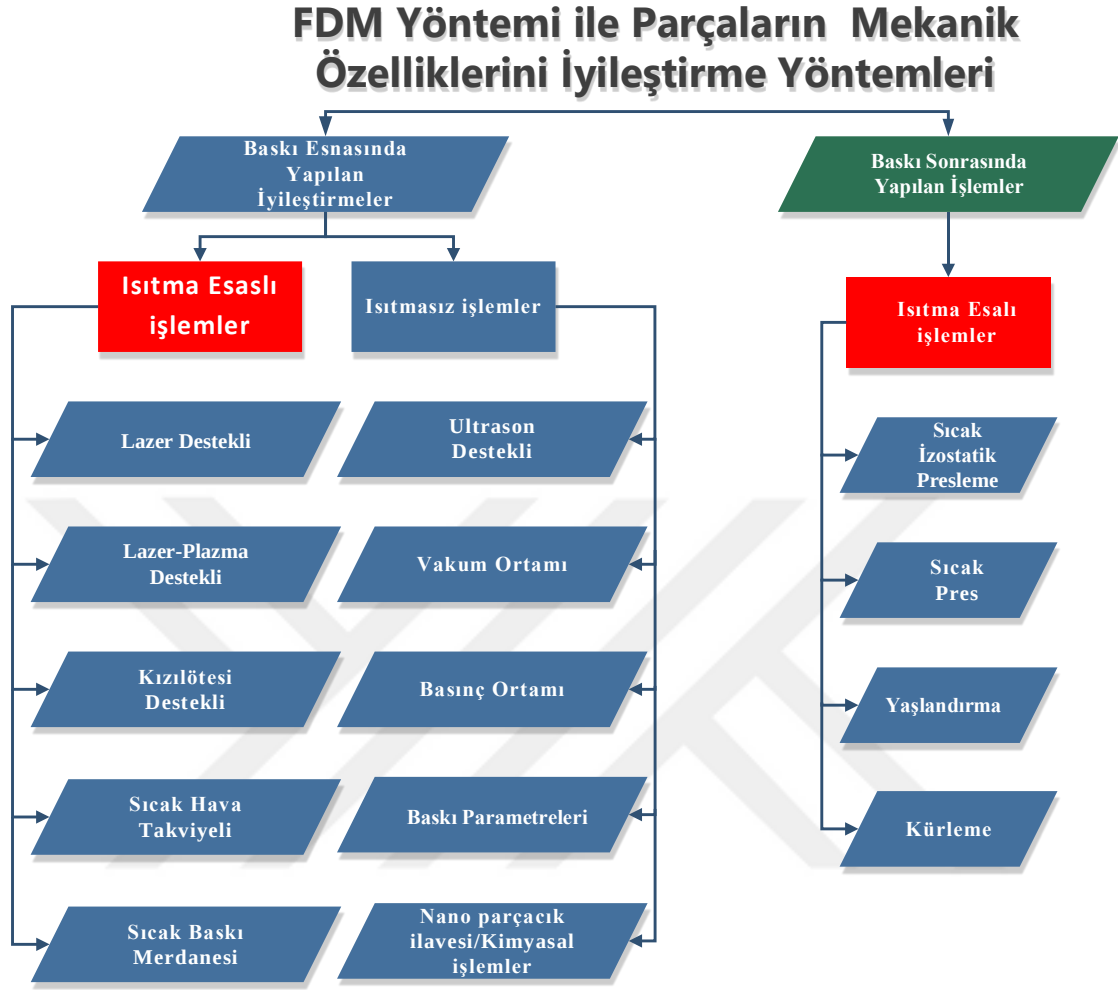
zayıfsa, zayıf emprenye nedeniyle matrisle olan bağ zayıflamaktadır (Lozada vd., 2019). Bu, EYM ile SKETTK üretim sürecinde göze çarpan bir başka dezavantajdır. EYM yöntemi ile üretilen kısa ve sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde, baskı parametrelerinin optimizasyonu ile parçaların hem mekanik hem de fiziksel özellikleri belli oranda iyileştirdiği görülmüştür (Krajangsawasdi vd., 2021). Buna rağmen giderilmeyen bazı kusurlar üzerine araştırmalar devam etmektedir.



Şekil 10. Sürekli elyaf takviyeli termoplastik parçaların iç yapısındaki kusurlar (Goh vd., 2018; Rarani vd., 2019; Kim ve Lee, 2016; Liu vd., 2020)

1.6. EYM Yöntemi ile Üretilen Saf/Kırpılmış/Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerini İyileştirme Yöntemleri

Bölüm 1.5’te incelenen kusurların üstesinden gelebilmek için geliştirilen yöntemler, Şekil 11’de verildiği gibi baskı esnasında ve baskı sonrasında iyileştirme yöntemleri olmak üzere iki ana başlıkta incelenmiştir. Bu bölümde bu yöntemlerle ilgili çalışmalar incelenecektir.



Şekil 11. EYM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirme yöntemleri

Baskı esnasında ısıtmaya dayalı işlemler incelenecek olursa, Luo vd. (2018), yüksek performanslı 3D baskıyı gerçekleştirmek için lazer destekli malzeme ekstrüzyonu kullanıldı. Lazer destekli işlemin uygulanmasıyla, poli-eter-eter-eton (PEEK) optimal katmanlar arası kayma mukavemeti %45'ten fazla artırmış ve PEEK'in kristallik derecesi aynı anda %34.5'e kadar iyileştirmiştir. Chen vd. (2022), sürekli karbon fiber takviyeli PEEK filament üretip, lazer destekli bir katmanlı imalat cihazı koaksiyel kızılötesi sıcaklık ölçüm sistemine dayalı olarak ön ısıtma sıcaklığını doğru bir şekilde toplamak ve kontrol etmek için kurulmuştur. Lazerle önceden ısıtılan numuneler, ön işleme tabi tutulmamış numunelerle karşılaştırıldığında katmanlar arası kayma mukavemeti değeri (33.48 MPa) %157 artmıştır. Katmanlar arası kayma mukavemeti değerindeki artış, PEEK moleküler zincir uçlarının bitişik katmanlar arasına nüfuz etmesinin teşvik edilmesi, akışkanlığın arttırılması ve bitişik

filament arasındaki bağlanma etkisinin artırılması ile iç elyafların emprenye davranışının iyileştirilmesine atfedilmiştir. Deshpande vd. (2019), katmanlar arası arayüz sıcaklığını arttırmak için bir süreç içi lazer yerel ön biriktirme ısıtma (Laser Local Pre-Deposition Heating, LLPH) yöntemiyle ve LLPH yöntemi olmadan ara katman arayüzünün sıcaklık geçişinin ayrıntılı bir analizi yapmıştır. LLPH yönteminin kullanımına bağlı olarak termal bağlanma potansiyelindeki artış, bileşenlerin ara katman bağ tokluğuna ve en yüksek eğilme mukavemetine etkisiyle sonuçlanmıştır. Katmanlar arası bağ dayanıklılığında %77'lik bir artış kanıtlanmıştır. Luo vd. (2020), iki ölçekli katmanlar arasını geliştirmek için plazma-lazer iş birliğiyle desteklenen bir EYM baskı işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazer ve plazma işlemleri etkisiyle tabakalar arası kayma mukavemeti 5.78 MPa'dan 39.05 MPa'ya artmıştır. (Kishore vd., 2017), bileşenlerin ara katman mukavemetini geliştirmek amacıyla yeni malzemenin biriktirilmesinden hemen önce basılı katmanın yüzey sıcaklığının artırılması için kızılötesi ön ısıtma prosesi geliştirmiştir. Bir önceki yüzey sıcaklığı, kızılötesi ön ısıtma kullanılarak Tg (Camsı Geçiş Sıcaklığı)'nin altından Tg'ye yakın veya üstüne çıkarıldığında %20 kısa karbon fiber ile güçlendirilmiş akrilonitril bütadien stirenin (ABS) birikmesi için bağ mukavemetinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Vatandaş vd. (2023), EYM baskılı PEEK matrisli SKETTK numunelerin katmanlar arası bağlanmasını geliştirmek için bir kızılötesi ısıtıcı kullanıldı. Kızılötesi ısıtıcı, laboratuvar koşullarında 5 cm dirençli tel ve sıcaklığa dayanıklı bir kalıp kullanılarak yapıldı. Ek olarak, kontrollü bir DC güç kaynağı kullanılarak kızılötesi ısıtıcıya 12-15A aralığıyla yüzdeki sıcaklık 350°C'ye çıkarılması sağlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde %58.80 elyaf hacmine sahip örneklerde maksimum çekme gerilmesi 859.82 MPa ve elastisite modülü değeri 33.06 GPa olarak elde edilmiş olup aynı elyaf oranında kızılötesi ısıtıcı kullanılmadan üretilen numunelerle karşılaştırıldığında çekme gerilmesi ve elastisite modülü %10.83 ve %6.17 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Prajapati vd. (2021), baskı kafasına entegre edilmiş nozullardan sıcak hava yerel olarak verilerek, filament etrafında sıcak bir mikro-ortam sağlayarak EYM ile üretilen parçaların mekanik ve termal özelliklerini arttıran bir araştırma yapmıştır. Sıcak hava sayesinde iyileştirilmiş termal filament geçmişi, boyun boyutunda artışa ve dolayısıyla %35 termal iletkenlik, %19 çekme dayanımı ve %145 çekme tokluğunda artış tespit edilmiştir. Ueda vd. (2020), EYM yazıcı kullanarak basılan CFRTP baskı sürecine sıcak baskı merdanesi entegre etmiştir. Bu çalışmada, her yeni serilen CFRTP katmanlarından arkasından gelen sıcak baskı merdanesi sayesinde gözenekliliği azaltmak ve katmanlar arası güçlü bağlanma amaçlanmıştır. Sıcak baskı silindirinin etkinliğini anlayabilmek için çekme ve eğilme testi numuneleri

basılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, Sıcak baskı silindiri kullanarak kullanılan ve kullanılmadan üretilen numunelerin eğilme modülü ve eğilme mukavemeti sırasıyla 65.7 GPa ve 945 MPa, 52.1 GPa ve 583 MPa hesaplamıştır. Böylece eğilme elastisite modülünde ve gerilmesinde sırasıyla %26, %62 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Baskı esnasında ısıtmasız işlemler incelenecek olursa, Wu vd. (2022), EYM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için yeni bir ultrasonik destekli üretim yöntemi önermiştir. Ultrasonik titreşim parametrelerinin ve baskı parametrelerinin, mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırıldı. 12 μ m ultrasonik genlikle basılan numunelerin çekme ve eğilme gerilmesi, ultrasonik titreşim olmadan basılan numunelere kıyasla sırasıyla %13.2 ve %12.6 oranında artmıştır. Shaik vd. (2022), EYM süreci sırasında yüksek ortam basıncının, katmanların bağlanma davranışına ve mekanik özelliklerinin etkisini araştırmıştır. EYM yazıcıyı özel bir kabin içine yerleştirmiş olup çekme, eğilme ve darbe testleri yapılmış ve basınç ile sıcaklığın 3D baskılı numuneler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Yüksek basınç ortamında üretilen parçalarda, eğilme gerilmesi hem enine hem de boyuna yönlerde yaklaşık %150 arttı. Darbe testinde darbe dayanımı %80'e kadar artmıştır. Ayrıca basınç koşulları nedeniyle çekme enine yönde %147.8 oranında iyileştirilmiştir.

Ayrıca, üretim parametrelerinin optimizasyonuna yönelik çalışmalar yapılmış olup nozul sıcaklığı, baskı hızı, tarama deseni, katman kalınlığı, tabla sıcaklığı gibi pek çok parametrelerin etkileri açık şekilde ortaya konulmuştur. Wang vd. (2021) ağırlıkça %5 karbon fiber kompozit filamentler hazırlayıp nozul sıcaklığı, platform sıcaklığı, baskı hızı ve katman kalınlığı gibi çeşitli baskı parametrelerinin mekanik özellikler (çekme gerilmesi, eğilme gerilmesi ve darbe mukavemeti dahil) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Optimum baskı parametreleri ile yaklaşık 170 MPa maksimum eğilme gerilmesi elde edilmiştir. Saf termoplastik 3D baskıların mekanik özelliklerini iyileştirmek için kısa elyaf takviyesi popüler bir yöntemdir. Tekinalp vd. (2014), ABS polimeri ile yapılan çalışmada %10 kısa elyaf katkısının en iyi sonucu verdiğini ortaya koymuştur. Ning vd. (2015), ABS termoplastik peletlerden ve karbon fiber parçalarından (farklı elyaf oranları (3, 5, 7.5, 10, ve %15) ve uzunluk) kısa elyaf takviyeli termoplastik kompozit (SF RTP) filament üretilip EYM yazıcı kullanarak test numuneleri basmıştır. Ardından kompozit test numunelerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ağırlıkça %5 karbon fiber içeriğine sahip numune, en büyük çekme gerilmesi (42 MPa) ve ağırlıkça %7.5 karbon fiber içeriğine sahip numune, en büyük elastisite modülü (2.5 GPa) değerini bulmuştur. Benzer şekilde Liao vd. (2018), PA12 matrisli SF RTP filament kullanarak bir çalışma yürütmüştür. %10 oranında

kısa elyaf eklenmesi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ancak, Zhang vd. (2018), çalışmasına göre, ABS matrisine kısa CF eklenmesinin, saf ABS polimer baskıya kıyasla basılı parçanın gözenekliliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Diğer yöntemler arasından, daha iyi mukavemet elde edebilmek için nanoparçacık ilave üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Tourani vd. (2013), nanopartiküllerin PEEK matrisli SFRTTP kompozitlerinin mekanik ve biyolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, %2'ye kadar nano-SiO₂ parçacıklarının eklenmesi, elastisite modülü, çekme gerilmesi artmıştır. Liu vd. (2018), sürekli elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin EYM baskı ile üretim sürecinde, ara yüzey performansını iyileştirmek amacıyla kimyasal bir cilalama prosedürü kullanmışlardır. Cilalı karbon elyaf ile takviye edilmiş PA6, cilasız karbon fiber (CKF) ile takviye edilmiş PA6'ya kıyasla %42.2 daha yüksek ara katman kayma mukavemeti sergilemiştir. Jing vd. (2023), CF ve naylon 6 (PA6) matris arasındaki bağı iyileştirmek için CF'yi cilalama amacıyla nano-SiO₂ ile poliüretan (PU/SiO₂) kullanılmıştır. Sonuçlar, cilalanmamış CF ile karşılaştırıldığında, cilalanmadan sonra CF ve PA6'nın ara yüzey kayma mukavemeti %316.93 arttığını göstermektedir. Ayrıca, cilalanmamış örneklerle kıyasla eğilme gerilmesinin %33.87, çekme gerilmesinin %20.75 ve tabakalar arası kayma mukavemetinin %66.54 arttığını göstermektedir.

Baskı sonrasında ısıtmaya dayalı işlemler incelenecek olursa, Werken vd. (2021), PEEK matrisli SKETTK kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla sıcak izostatik presleme (Hot Isostatic Pressing, HIP) yöntemini araştırmaktadır. İç boşlukları sıkıştırmak, PEEK kristalleşmesini teşvik etmek ve filamentler arası polimer difüzyonunu artırmak için 200 psi basınç ve yüksek sıcaklıklar kullanılmıştır. Üç farklı HIP sıcaklığı (200, 250, 300°C) değerlendirilmiştir. Sonuçlar, HIP işleminden sonra maksimum eğilme gerilmesi ve katmanlar arası kayma mukavemetinde %46 ve %30'a kadar iyileşme olduğunu göstermiştir. Çekme gerilmesi ve modülü ise 1312 MPa ve 92 GPa gibi yüksek değerlere ulaşmıştır. Mei vd. (2019), karışık izotropik karbon fiber 3D baskılı kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemeyi değişen sıcaklık, basınç ve süre ile araştırmayı amaçlamaktadır. 200°C sıcaklıkta, sıcak preslenmiş kompozitler, sıcak preslenmemişlere göre en yüksek çekme gerilmesi (98 MPa) ve modül (3.93 GPa) göstermiştir. Szust ve Adamski (2022), EYM parçalarının baskı parametrelerinin (baskı yönü ve katman yüksekliği), termal tavlama işleminin ve tuz yeniden eritme işleminin mekanik özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. 60°C sıcaklıkta 1 saat yapılan termal tavlama işlemi, işlem görmemiş numuneye kıyasla, çekme gerilmesinde %24 oranında artış sağlanmıştır. Ek olarak, tuz yeniden eritme işlemi

sonrasında, z yönünde ölçülen EYM parçalarının çekme gerilmesi %300'ün üzerinde artmıştır. Wach vd. (2018), EYM ile üretilen polilaktik asit (PLA) parçalarda aşırı soğuma olayını araştırmak ve maksimum kristallik derecesini elde etmek için üretilen parçaların termal tavlama sıcaklığını ve süresini optimizasyonu araştırılmıştır. Örneklerin termal işleminden geçirilmesiyle, maksimum eğilme gerilmesi yaklaşık %11–17 oranında artarken, eğilme modülde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Akderya (2023), EYM ile üretilen PLA numunelerine ultraviyole kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Ultraviyole kürleme işleminin, maksimum eğilme gerilmesi ve diğer özellikler üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Ultraviyole kür sonrası numunelerin eğilme gerilmesi, kürlenmemiş numunelere göre daha yüksek olmasına rağmen 30 dakikadan sonra azalma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

1.7. Vakum Ortamında Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

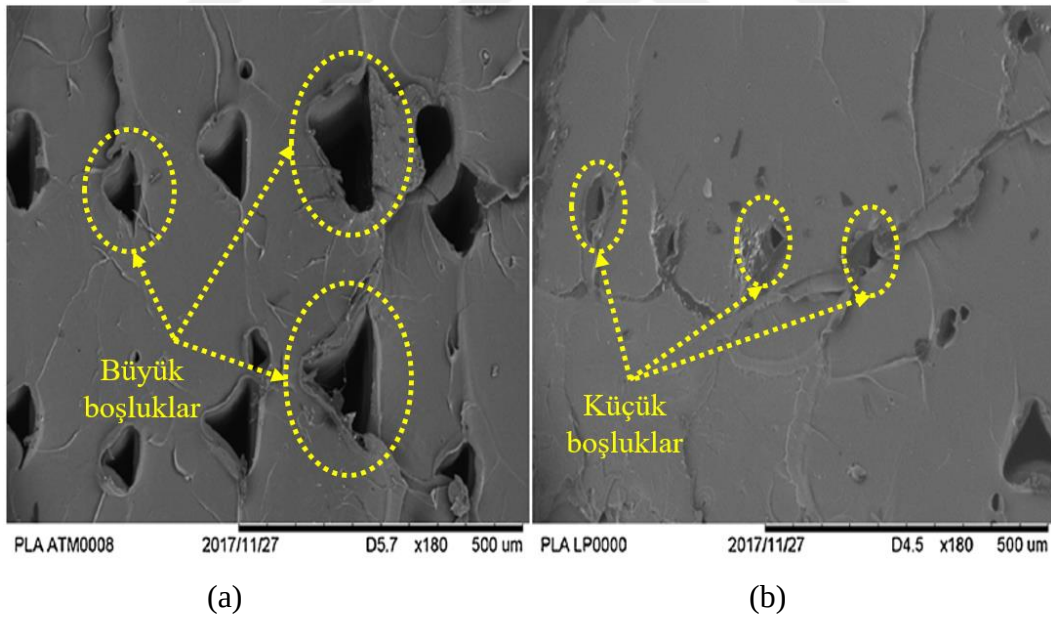
Bu bölümde, tez çalışmasının amacına uygun olarak, vakum ortamında eklemeli imalat yöntemlerinden EYM kullanılarak gerçekleştirilen baskıların üretim süreci, vakum ortamının mekanik özellikler üzerindeki etkisi ve vakum koşullarında karşılaşılan zorluklar detaylı bir şekilde incelenecektir.

1.7.1. EYM ve Vakum Ortamı İlişkisi

Atmosfer ortamında EYM yöntemi ile üretilmiş parçaların arayüz ile ara katmanlarda meydana gelen zayıf bağlanma nedeniyle mekanik özellikleri kısıtlamaktadır. Bunun ana nedenlerinden biri, baskı sırasında katmanlar arası yapışmanın çok hızlı gerçekleşmesi ve bu nedenle katmanlar arasında gözenek ve boşlukların oluşmasıdır (Maidin vd., 2017). Baskı esnasında eriyik filamentin sıcaklığının nozulun ucundan oda sıcaklığına ani düşmesi, kısmi bağlanmalara neden olur. Eriyik filament bir önceki katmana serilirken kristallik sıcaklığında, hatta daha yüksek bir sıcaklıkta olmalıdır (Shanmugam vd., 2021). Bu durumun sağlanabilmesi ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için EYM ile üretilen parçaların birçok yöntem önerilmiş olup, bu yöntemler arasında ısı kaybının azaltılması amacıyla vakum ortamı üzerine yapılan çalışmalar da bulunmaktadır.

Atmosfer ortamında ısı transferi, hava moleküllerinin varlığından dolayı iletim, konveksiyon ve radyasyon yoluyla aktarılır. Vakum ortamında iletim yoluyla ısı transferi yalnızca EYM yazıcının içinde temas halinde olan yazıcı parçalarında meydana gelir

(O'Connor ve Dowling, 2018). Vakumlama seviyesine bağlı olarak hava moleküllerinin yoğunluğunun düşük olması nedeniyle vakumda konveksiyonla ısı transferi daha az etkilidir. Ancak ışıınım yoluyla ısı transferi devam etmektedir. Bu durumda iletim ve radyasyon birincil ısı transfer mekanizmaları haline gelir. Örn, PEEK gibi yüksek sıcaklıktaki polimerlerin eklenmesiyle üretilen katmanlar arasında güçlü bir bağ oluşturmak için sıcak bir ortam gerekmektedir (Li vd., 2021; Ritter vd., 2023; Sikder vd., 2022). Atmosfer ortamında EYM ile üretilen parçalar, harici bir ısı kaynağı yoksa katmanlar arasında yeterli yapışma oluşmayabilir ve bunun sonucunda zayıf mekanik özellik sergilemektedir (Hoshikawa vd., 2021; Omuro vd., 2017). Vakum ortamında parçalar, vakum odasında sıkışan ısı ile çok daha yavaş soğur ve konveksiyon yoluyla ısı kaybını azaltır, bu da baskı sırasında katmanların daha iyi yapışmasını sağlamaktadır (Maidin vd., 2017; Seijas vd., 2024). Şekil 12'de O'Connor ve Dowling (2018), tarafından yapılan çalışmada vakum ortamı etkisinin parçanın içyapısındaki boşluk ve gözeneklerin azaldığı net bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 12. Mikroyapıda meydana gelen boşluklar; (a) atmosfer, (b) vakum ortamında üretilen numunelerin gözeneklerin boyutları (O'Connor ve Dowling, 2018)

1.7.2. EYM Yöntemi ile Vakum Ortamında Eklemeli Üretim

Vakum ortamında EYM yöntemi ile eklemeli imalat için bir vakum kabini ve bir EYM 3D yazıcı ile üretim yapmak düşünüldüğü gibi kolay olmamaktadır. Vakum ortamına hava molekülleri az olacağından EYM yazıcının bazı komponentleri kabin içerisine hapsolan ısı

tarafından zarar görebilmektedir (Maidin vd., 2017). Bu sebeple Slejko vd. (2023), EYM yazıcıya bazı parçalarını vakum kabini dışını taşımış bazılarının ise yerlerini değiştirmiştir. Ayrıca ekstrüder soğutma sistemini (fan ve aparatlar) kendi geliştirmiş olduğu bakır tellerin olduğu iletken bir soğutma sistemi kullanarak değiştirmiştir. Bakır iletken teller vasıtasıyla ekstrüderdeki ısı, yazıcıyı metal şasesine taşınmıştır. Modifikasyonlar tamamlandıktan sonra EYM yazıcı vakum ortamına yerleştirilmiş ve vakum kabinin kapağı kapatılmıştır. Ardından vakum pompası çalıştırılarak sistem arzu edilen vakum miktarına gelene kadar beklenmiştir. Sistem dengeye ulaşınca EYM yazıcı dışarıdan başlatılıp yazdırma işlemi başlamıştır. Yazdırma işlemi bittiğinde öncelikle EYM yazıcı kapatılıp vakum kabini içerisindeki vakum tahliye vanalarıyla tahliye edilmiştir. Son olarak yazıcı tablasının üzerindeki parça alınarak ilk olarak gözle muayene edilmiştir. Şekil 13'te literatürde mevcut olarak çalışılan termoplastik/termoplastik kompozitlerin vakum ortamında üretimi için kullanılan bazı sistemler gösterilmiştir. Son zamanlarda, saf polimer ve kırılmış elyaf takviyeli termoplastik parçaların yanı sıra SKETTK'nın vakum ortamında basılması konusunda ciddi bir araştırma ilgisi olmuştur. SKETTK üretimi üzerine vakum ortamında yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Maidin vd. (2017), çeşitli vakum ortamlarında (30 ila 10 inHg arasında, 1bar=29.52 inHg) saf termoplastikleri üretmiştir. Parçaların baskısı sırasında daha yavaş soğuması nedeniyle ABS polimerlerinde çekme dayanımında yaklaşık %12'lik bir artış gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan görüldüğü gibi, vakum destekli baskı işlemi doğası gereği konveksiyon yoluyla ısı transferini en aza indirir, bu da daha yavaş soğuma ve daha homojen bir sıcaklık dağılımına yol açmış ve böylece katmanlar arasındaki bağlanmayı artırmıştır. Ayrıca, düşük soğutma hızı, moleküler difüzyon için yeterli zaman ve bağlanma dayanıklılığı sağlayarak, artan kristallik, daha iyi katman arası bağlanma dayanıklılığı ve daha az çarpılmaya neden olmuştur (Sun vd., 2008). Ayrıca, vakumla etkisiyle boşluk oluşumunu azaltır, bu da daha güçlü katmanlar arası yapışma ile sonuçlanmıştır.

O'Connor ve Dowling (2019), karbon, cam ve kevlar elyaf takviye edilmiş naylon ile infüze edilmiş SKETTK parçalarını basmak için 1 Pa'lık ($1 \text{ bar} \approx 10^5 \text{ Pa}$) bir vakum odası kullanmıştır. Atmosferik basınç altında basılan numunelere kıyasla, karbon, cam ve kevlar elyaf takviyeli polimer kompozitlerinde katmanlar arası kayma dayanımında sırasıyla %33, %22 ve %12 artış göstermiştir. Bu çalışmalar, SKETTK parçalarının vakum ortamında basılmasının mekanik ve fiziksel özellikleri artırabileceğini göstermiştir.

Li vd. (2021), PLA polimeri ile basılan SKETTK parçalarının mekanik performansını 0.099 MPa (1 bar=0.1 MPa) basınçlı bir vakum ortamında incelemiştir. Basılmış numunelerin gözenekliliği %13.93'ten %4.18'e düştü. Mekanik özellikler incelendiğinde maksimum eğilme gerilmesi ve elastisite modülü sırasıyla %24.51 ve %8.35 arttı ve böylece vakum ortamının mekanik özelliklere olumlu etkisini göstermiştir.

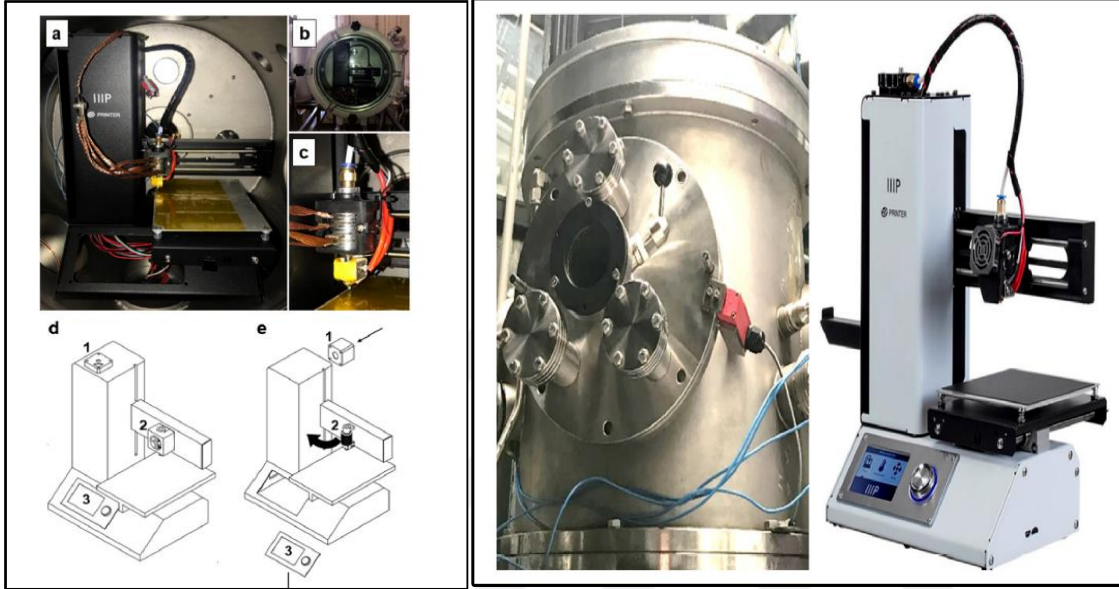
Quinn vd. (2021), polikarbonat (PC) termoplastik filament kullanılarak 10 mbar (1bar=1000 mbar) vakum ortamına eğilme, çekme ve basma test numuneleri üretmiştir. Vakum ortamında üretilen test numunelerinin, atmosfer ortamında üretilenlere göre %5.4 daha yüksek çekme gerilmesi ve %59 daha yüksek kopma uzaması ile sonuçlanmıştır. Basma testinde vakum ortamındaki numuneler, yaklaşık %11.2 daha yüksek basma gerilmesine sahip olduğunu tespit etmiştir. Eğilme testi sonucunda gözle görülür bir farka rastlanmamıştır.

Slejko vd. (2023), organik lifler ve inorganik liflerle takviye edilmiş termoplastik polimerlerin geleneksel numunelerini bir vakum odasında üretmiştir. Bu numunelerin mekanik ve termal özelliklerini vakum ortamının etkileriyle ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak, bir önceki katmanın üzerinde ıslanabilirlik eğiliminin yüksek olduğunu ve bu da daha geniş ancak daha ince örneklerin elde edilmesine yol açmıştır.

Liu vd. (2023), geleneksel EYM baskılarda meydana gelen zayıf katmanlar arası bağlanma performansı, düşük kristallik oranı ve mekanik özellikler gibi bazı olumsuz durumları iyileştirmek için bir vakum ortamında (100 Pa, 1 bar=10⁵ Pa) EYM ile saf PEEK termoplastik basmıştır. Vakum ortamda üretilen baskı numunelerinin kristallliği, atmosfer ortamında basılan karşılaştırılmıştır. Kristallik, atmosferik ortamda %14.9'dan vakum ortamında %27.8 ila %86.6 arasında artış sağlanmıştır. Ayrıca, atmosferik ortamda numuneler sünek kırılma davranış sergilerken, vakum ortamında artan kristallik nedeniyle kırılma kırılma davranışı gözlenmiştir. Ek olarak arayüz bağlanma mukavemeti, vakum ortamında üretilen numunelerindeki bitişik filamentler ve katmanlar arasında daha güçlü moleküler difüzyon ile gözeneklilik oranı %0.63 olarak elde edilmiştir.

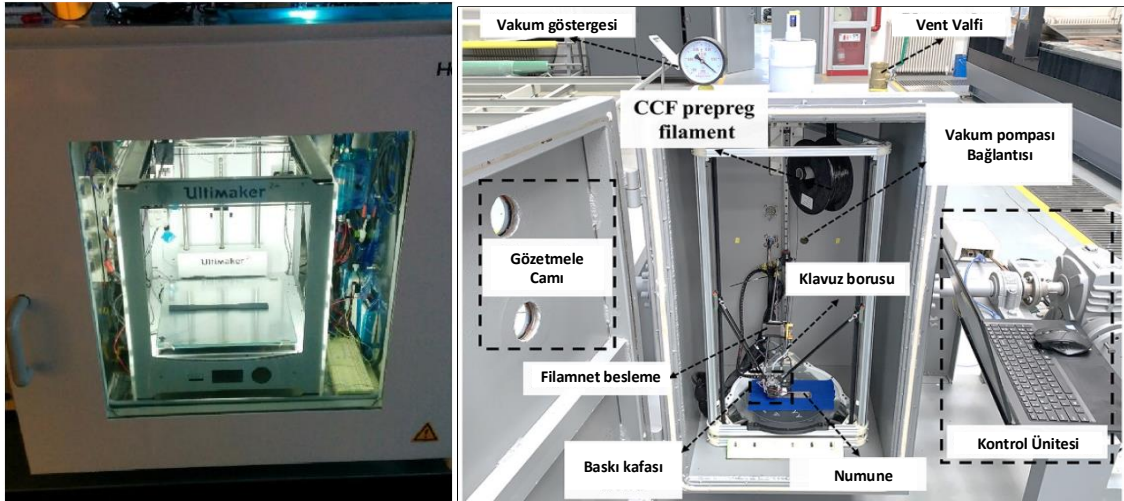
Seijas vd. (2024), PEEK filament ekstrüzyonlu EYM cihazı geliştirip, cihaz sert uzay ortamını kısmen taklit etmek amacıyla bir vakum odası içine yerleştirilmiştir. Basılmış numuneler üzerinde mekanik ve termal (termogravimetrik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre ve dinamik mekanik analiz) testler yapılmıştır, ayrıca UV yaşlandırmasına maruz kaldıktan sonra test edilmiştir. Atmosfer ortamında ve vakum koşullarında basılan PEKK örnekleri için çekme gerilme testi sonuçları sırasıyla 67.23 MPa ve 82.59 MPa olarak

elde edilmiştir. Eriyik katmanların soğuma hızı ve katılaşma kinetiği, atmosferde basılanlara göre gecikir, bu da hızlı soğumanın katmanlar arasındaki yapışmanın azaltmasına ve ardışık olarak biriktirilen edilen iki katman arasındaki ara katman bağını artırmasına katkıda bulunmasına atfedilmiştir.



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 13. Vakum ortamında EYM 3D baskı işlemleri; (a) vakum ortamında EYM 3D baskısının etki şeması (Slejko vd., 2023), (b) vakum kabini içindeki EYM yazıcının modifikasyonu (O'Connor ve Dowling, 2019), (c) vakum kabini ve kabin içine yerleştirilecek EYM cihazı (Quinn vd., 2021), (d) CFRPC üretimi yapılan vakum kabini içinde EYM sistemi (Li vd., 2021).

1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı

Tez kapsamında, polimer esaslı kompozit malzemelerin vakum ortamında EYM yöntemi ile eklemeli olarak üretilmesi ve bu süreçte vakum ortamının mekanik ve mikroyapısal özelliklere etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, farklı üretim koşulları altında elde edilen parçalar üzerinde mekanik testler ve mikroyapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Araştırma konusunda kullanılan KKETTK filament ticari bir firmadan satın alınmış olup, SKETTK filament için ise özgün bir filament hattı kurularak üretilmiştir. Vakum ortamı için, 10^{-2} mbar miktarlarında vakum kabini tasarlanıp imal edilmiştir. Bu alandaki ilgili literatür incelendiğinde, vakum ortamında EYM kullanılarak saf ve kompozit parçalar üretilmesine rağmen, vakum ortamında EYM kullanılarak yapılan baskılarda yaşanan zorlukların detaylı olarak ele alınması ve yüksek elyaf oranına sahip kompozit filamentlerin üretilmesi çalışmalarıyla ilgili literatürde bir boşluk olduğu tespit edilmiştir. %30 oranında karbon elyaf içeren KKETTK filament kullanılarak hem vakum ortamında hem de kızılötesi destekli ön ısıtma işlemi ile basılan kompozit malzemelerin eklemeli üretimine yönelik çalışmalar bu alanda ilk defa gerçekleştirilmiştir. Kızılötesi ısıtıcı, kızılötesi ışınları belirli bölgeye yönlendirerek lokal ısıtma sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, EYM baskı parametrelerinin (nozul sıcaklığı, baskı tablası sıcaklığı, baskı hızı) mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmesi ve optimum baskı parametrelerinin tespit edilmesi diğer amaç olarak hedeflenmiştir. Tez kapsamında amaçlanan çalışmaların tamamlanması için aşağıdaki incelemeler yapılmıştır:

- Vakum ortamı kurulması ve EYM 3D yazıcının modifikasyonu
- SKETTK filament üretimi hattının kurulması ve üretimi
- Vakum ortamında farklı baskı parametrelerinde yazdırılan SKETTK parçaların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi
- Vakum ortamında farklı baskı parametrelerinde yazdırılan KKETTK parçaların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi
- Vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak yazdırılan KKETTK parçaların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi
- Taramalı elektron mikroskobu ile KKETTK ve SKETTK yapıların geometrilerinin görüntülerinin alınması
- Mikroskop görüntüler üzerinden iç yapı içerisinde meydana gelen boşluk oranının hesaplanması ve analizi

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

KKETTK ve SKETTK numuneler, farklı vakum miktarlarında (100, 10, 0.1 mbar) ve çeşitli baskı parametrelerinde (nozul sıcaklığı, baskı tablası sıcaklığı, baskı hızı) EYM yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Ayrıca, bu tez kapsamında vakum ortamına ilaveten EYM yazıcıya kızılötesi ısıtıcı sistem entegre edilerek, vakum ortamında kızılötesi ön ısıtmanın hibrit etkisinin mekanik ve mikroyapısal özelliklere etkisi de araştırılmıştır. Üretilen bu test numuneleri, mekanik ve mikroyapısal testlere tabi tutulmuştur. Mekanik testler kapsamında maksimum eğilme gerilmesi değerleri elde edilirken mikroyapısal testler ile de gözenek oranı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalarla ilgili detaylar aşağıdaki başlıklar altında sunulmuştur.

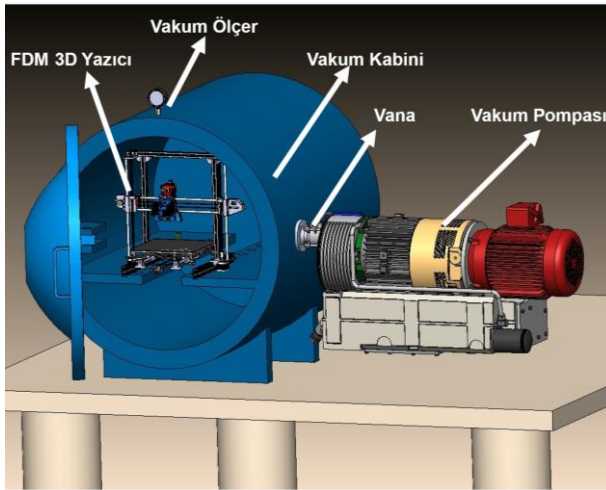
2.1. Malzeme ve Özellikleri

KKETTK filament, %30 oranında kısa karbon elyaf takviyeli PEEK matris içerip 1.75 mm çapına sahip olup Ensinger tarafından temin edilmiştir. KKETTK filament, 190 MPa çekme gerilmesine ve 17.5 GPa elastisite modülüne sahiptir. Ayrıca, KKETTK filament 260°C servis sıcaklığına, 147°C cam geçiş sıcaklığına ve 341°C erime sıcaklığına sahiptir. SKETTK filamentin üretiminde ise, 3800 MPa maksimum çekme gerilmesine, 245 GPa elastisite modülüne, 1.8 g/cm³ yoğunluğa ve 7 µm iplik çapına sahip DowAksa firması tarafından temin edilen 3K karbon fiber demetleri kullanılmıştır. SKETTK filamentte matris olarak kullanılan PEEK, VICTREX firmasından temin edilen, 1.75 mm çapında, 98 MPa maksimum çekme gerilmesine ve 4 GPa elastisite modülüne sahiptir. SKETTK ve KKETTK filamentinin ısıtılmış baskı tablasına yapışmasını sağlamak için yüksek baskı sıcaklıklarında çalışacak şekilde geliştirilen Magigoo Pro HT kullanılmıştır (Hjermann, 2022).

2.2. Vakum Kabini Tasarımı ve Modifiye Edilmiş 3D Yazıcı

Vakum ortamında üretim yönteminde, üretilen parçanın hava ile teması azaltıldığından, parçalar çok daha yavaş soğumaktadır. Soğumanın yavaşlatılmasıyla parça üzerinde homojen sıcaklık dağılımı sağlanmaktadır. Daha da önemlisi, geç soğuma, polimerin daha uzun süre akışkan kalmasına sebep olmaktadır. Bu sayede, yeni gelen katmanlar tamamıyla soğuk olmayan alt katmana daha düzgün bir şekilde yapışma

sağlanmaktadır. Ayrıca, bu esnada vakumlama etkisiyle daha az boşluk oluşacağı öngörülmektedir. Böylece daha yüksek mukavemetli parçaların eklemeli üretiminin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik öncelikle vakum kabini tasarımı yapılmıştır. Vakum kabini tasarımı Şekil 14'te gösterilmiştir. Vakum ortamı, vakum kabini, vakum pompası, bağlantı vanaları, vakum göstergesi ve EYM tipi 3D yazıcıdan oluşmaktadır. Vakum odası tasarımında öncelikle, iç hacmin içerisine yerleştirilecek olan 3D yazıcının platformunu içine alabilecek büyüklükte olmasına dikkat edilmiştir. Vakum odasının 10^{-2} mbar vakum miktarına dayanabilecek şekilde et kalınlığı ve kapak tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kapak kısmında ise vakum tipi contalar ile sızdırmazlık sağlanmıştır. Vakum kabinindeki havayı tahliye etmek için BSV40 40 m³/h vakum pompa kullanılmıştır. Vakumlama etkisinin durdurulması talep edildiği durumlarda vakum kabini ve vakum pompası arasında bir küresel vana vasıtasıyla gerçekleştirmiştir. Ayrıca, vakum değerini dijital olarak okumak için atmosfer basıncından 2×10^{-3} mbar'a kadar ölçüm yapabilen Vacuum View Extended® vakum ölçüm sensörü kullanılmıştır. Vakum ölçüm sensörünün doğru değeri gösterdiğinden emin olabilmek için ilk olarak vakum sensörü direk olarak vakum pompası ucuna bağlanarak pompanın sağlayacağı maksimum vakum miktarı ölçülmüş ve teyit edilmiştir.



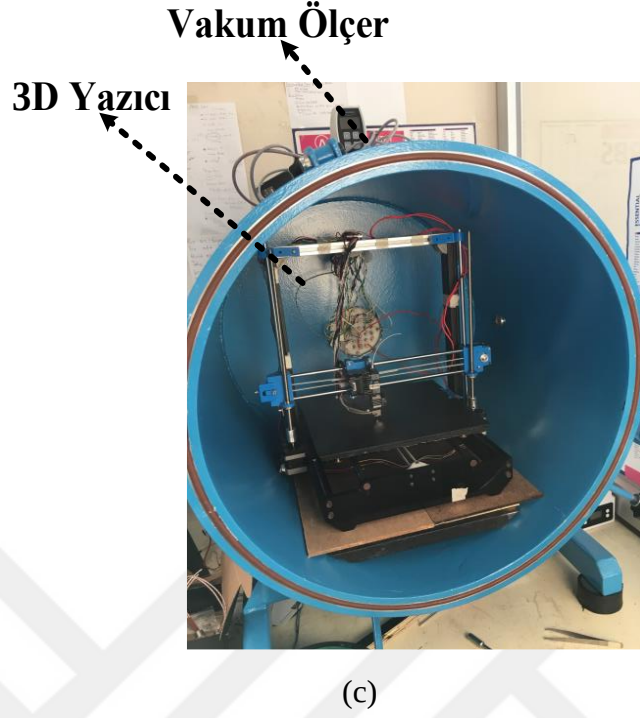
(a)



(b)

Şekil 14. Vakum kabini ve ekipmanlarının resmi; (a) katı model çizimi, (b) üretilmiş gerçek boş hali, (c) EYM yazıcıyla birlikte hali

Şekil 14 'ün devamı

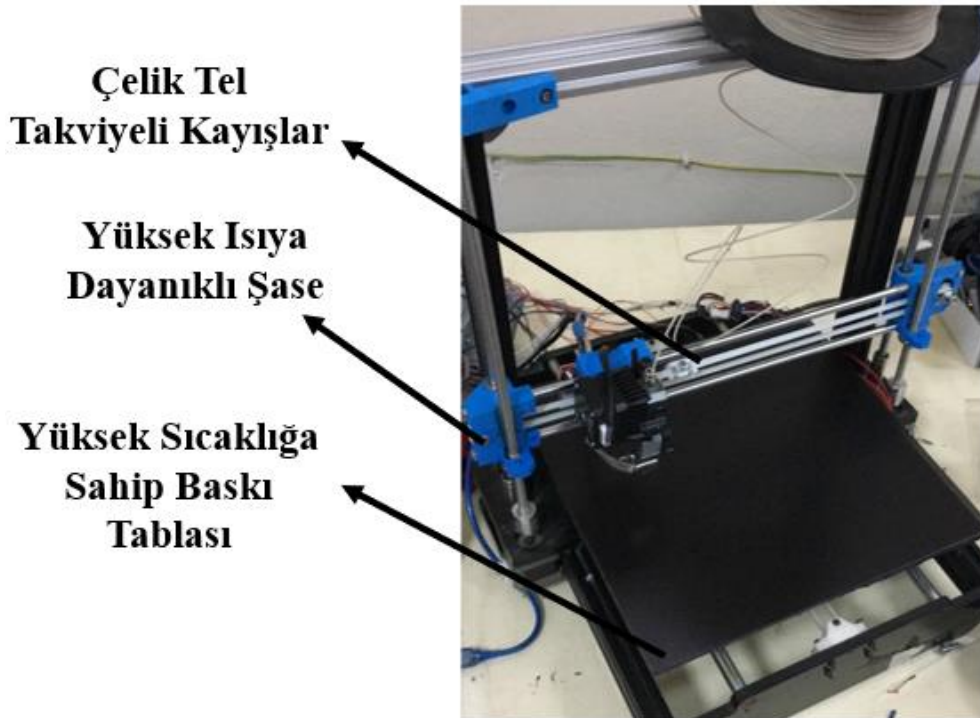


Vakum ortamında hava moleküllerinin çok az miktarda olduğundan konveksiyonla ısı transferi çok düşük düzeyde kalmaktadır. Isı transferi, çoğunlukla radyasyon yoluyla gerçekleştiğinden, kabin içerisindeki EYM yazıcının parçaların yüksek sıcaklıklara maruz kalabilir (Liu vd., 2023) ve yazdırma sırasında yazıcı ana iskeletindeki plastik bileşenler sertliğini kaybederek deformasyona uğramaktadır. Bu sebeple EYM yazıcının şasi malzemesi sert akrilik pleksi ve PETG termoplastik malzemesi tercih edilmiştir.

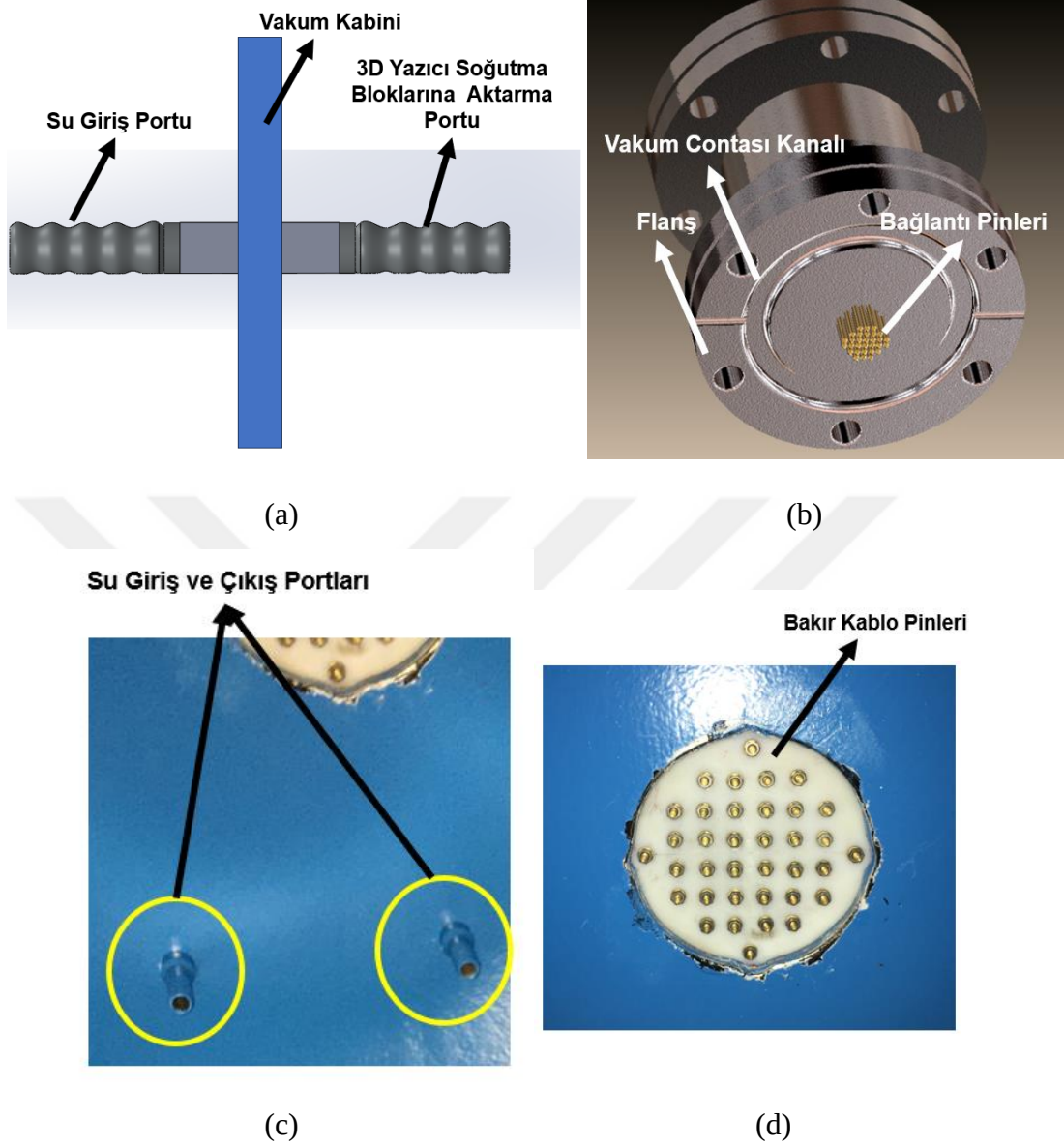
Adım motorların tahrik mekanizması için çelik takviyeli kayışlar kullanılmıştır. Bu seçimin sebebi, takviyeli kayışların daha yüksek sıcaklıklara ve gerilmelere dayanmaları ve vakum ortamında 3D yazıcılar için en uygun seçim haline gelmesidir. Buna karşılık, takviyesiz kayışlar genellikle kauçuk, poliüretan veya benzeri malzemelerden oluşmaktadır. Çelik takviyeli kayışlar vakum ortamındaki yüksek ısıdan etkilenmeden ve gelişmiş performans sunarken, takviyesiz kayışlar yüksek ısı nedeniyle yumuşayabilir ve adım motorunun adım atmasına neden olmaktadır.

Ayrıca bu çalışmada kullanılan CF-PEEK filament diğer polimerlere (Bellehumeur vd., 2004; Bettini vd., 2017; Nakagawa vd., 2017; Yan vd., 2018) kıyasla daha yüksek baskı tabla sıcaklıklarında üretilmektedir. Bunun sebebi polimerin yüksek sıcaklıkta erimesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple 150°C sıcaklıklarına ulaşabilen bir ısıtıcı tabla kullanılmıştır. Modifiye edilmiş 3D yazıcı Şekil 15'te gösterilmiştir. Ayrıca, vakum

ortamında 3D yazıcının yerleştirilmesinin bir dezavantajı vardır. Elektronikler ve yazıcı elemanları hapsolmuş ısıdan etkilenir ve bu ekipmanlar hava ile soğutma işlemi vakumdan dolayı mümkün olmamaktadır. Bundan ötürü tasarlanan vakum sisteminde su soğutma uygulaması yapılmıştır. Şebeke suyu kullanılarak sürekli sistem üzerinden akan suyla birlikte baskı kafasının ve adım motorlarının soğutulması gerçekleştirilmiştir. Soğutma konusunda dikkat edilmesi gereken başka bir husus ise elektronik devrelerdir. Özellikle güç kaynağının ve motor sürücülerinin soğutulması hayati önem taşımaktadır. Ayrıca düşük vakum miktarlarında, lehimle birleştirilen kısımlar, lehim içerisinde bulunabilecek boşluklardan dolayı zarar görebilmektedir. Bu sebeple minimum lehim gerektirecek bir tasarım seçilmiştir. Vakum sisteminin arka kısmında mekanik olarak bağlantı yapılabilen bakır kablo pinleri kullanılmıştır. İçeriden ve dışarıdan kablolar bağlanarak bütün elektronik donanım dışarı taşınmıştır. Şekil 16'da vakum kabini içerisindeki bağlantı pinleri tasarımı ve adım motorlarını soğutma için kullanacak olan su soğutma bağlantısı gösterilmiştir. Ayrıca, tüm sistem vakum kabini içine yerleştirildikten sonra vakum kabinine sızdırmazlık testine tabi tutulmuş olup, vakum kabini içinde vakum değeri 10^{-2} mbar olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, herhangi bir kaçağın olmadığını göstermiştir.



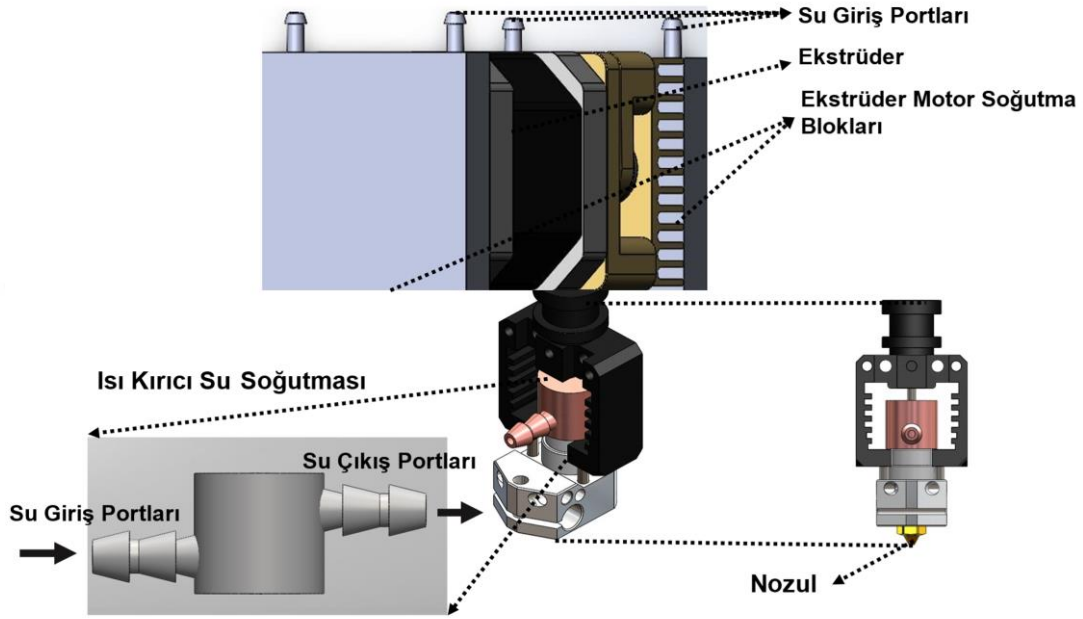
Şekil 15. Modifiye edilmiş 3D yazıcı



Şekil 16. Vakum kabini üzerindeki su ve elektrik bağlantıları; (a) su soğutma portları katı model görüntüsü, (b) bağlantı pinleri katı model görüntüsü, (c) su soğutma portları gerçek hali, (d) bağlantı pinleri gerçek hali

Ekstrüder de ki sıcak uç olarak tabir edilen ısı kırıcı kısmı atmosfer koşullarına fan ile soğutulmaktadır. Isı kırıcı kısmının yeterli soğutulmaması durumunda termoplastik filamentin erken şişmesine ve ısı kırıcı kısmının tıkanmasına da sebep olmaktadır. Ancak, vakum ortamında fan ile soğutma yapılan sistemlerin verimsiz olacağı göz önüne alındığında, adım motorları ve ısı kırıcı bölgelerinde ek önlemler alınması gerekmektedir (Maidin vd., 2017; Slejko vd., 2023). Bundan dolayı, Şekil 17’de görüldüğü gibi vakum ortamında çalışacak olan EYM yazıcının adım motorları ve ısı kırıcı kısmında su soğutma

sistemi geliştirilmiştir. Su soğutmalı soğurma sistemi, bağlantı hortumları ile birbirlerine bağlanan sıvı soğutma blokları, ana şebeke su ile sürekli çevrimde bir eşanjör mantığında çalışmaktadır. Sürekli olarak sistem üzerinden akan su, ısı kırıcı ve adım motorlarının soğutulmasını sağlamak için devamlı olarak çalışmaktadır.



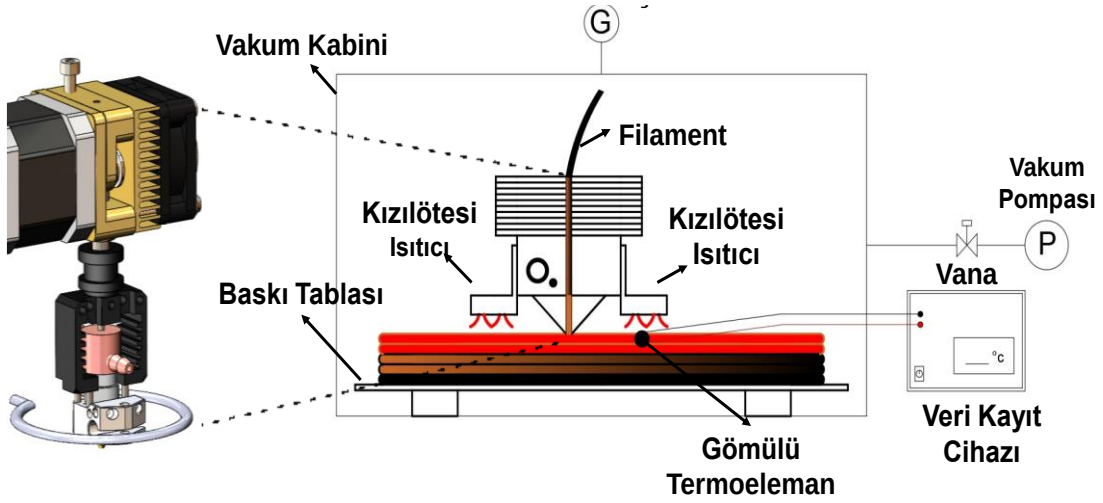
Şekil 17. Vakum ortamında kullanılan 3D yazıcının modifiye edilmiş ekstrüder sistemi

EYM yazıcıyla üretilen parçaların mekanik özelliklerinin hala enjeksiyon kalıplamayla üretilen parçaların seviyesine ulaşmadığını görülmektedir (Das vd., 2020). Bilim insanları, bu zorluğun üstesinden gelmek için çeşitli çalışmalar başlatmıştır. EYM ile üretilen parçaların katmanlar arası bağlanma mekanizması üç ana başlıkta incelenmektedir. Bu mekanizmalar arayüz-arafaz, katman içi ve katmanlar arası bağlanmadır (Sabyrov vd., 2020; Yin vd., 2018; W. Zhang vd., 2018a). Kompozit malzemelerde, arayüz takviye malzemesi ile takviye malzemesi üzerindeki kaplama malzemesi arasındaki, arafaz ise matris ile arayüz arasındaki parçanın genel performansında kritik bir rol oynamaktadır (Amir vd., 2017; Eyckens vd., 2021; Mrozek vd., 2015). Katman içi bağlanma, iki bitişik filament arasında bağ oluşumu olarak tanımlanıp, EYM parçaların mekanik özelliklerinde diğer bir önemli rol oynamaktadır (Spoerk vd., 2017). Katmanlar arası bağlanma, baskı esnasında yeni katman daha önce basılan katman üzerine serilerek yapışma sağlanmaktadır (Gurralla ve Regalla, 2014). Yeni katman ile önce basılan katmanla temas ederek yeniden ısınmaktadır.

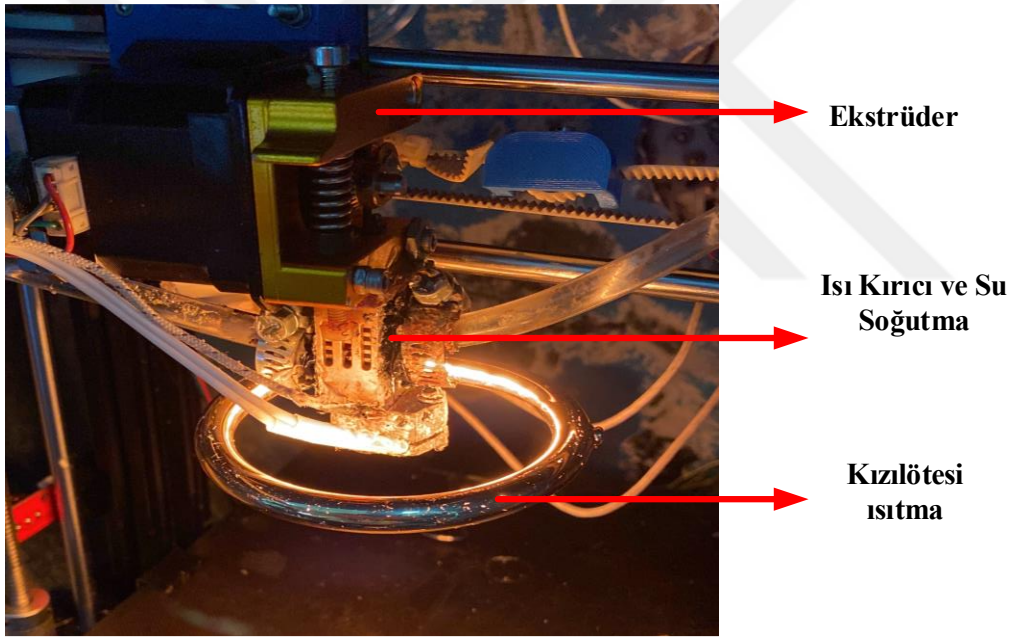
Temas noktalarındaki sıcaklık, polimerin kristalleşme sıcaklığına ulaştığında veya aştığında bağlanma gerçekleşmektedir. Yerleştirilen filamentin soğuma ve kristallenme oranı, eklemeli üretim sürecinde arayüz ve katmanlar arası bağlanma üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Polimer eklemeli imalat yöntemlerinde soğuma hızı, malzemenin eriyik halden katı duruma geçiş süresini belirleyen önemli bir parametredir. Soğuma hızı, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir ve malzemenin mekanik özelliklerini, katmanlar arası bağlanma kalitesini ve nihai parçanın performansını etkilemektedir.

Yüksek soğuma hızı, iç gerilmelerin artmasına neden olabilir ve yüksek soğuma oranıyla yerleştirilen katman, moleküler zincirlerinin yeniden düzenlenmesi için yeterli zamana sahip olmayarak zayıf bir arayüz ve katmanlar arası bağlanmayla sonuçlanmaktadır. Yavaş soğuma hızında ise, daha iyi bir katmanlar arası füzyon sağlayabilir. Bu iki faktör, malzemenin mekanik özelliklerini ve genel performansını belirler (Vanaei vd., 2020). Bu nedenle, arayüz ve katmanlar arasındaki malzeme kristalleşmesini teşvik etmek ve yeni katmanın yerleştirilmesi sırasında moleküler zincirin daha iyi yeniden düzenlenmesine için, daha önceki katman sıcaklığının en azından kristalleşme sıcaklığında olması gerekmektedir (Vanaei vd., 2020). Bu sebeple, arayüz ve katmanlar arası bağlanmayı güçlendirmek için yerinde ısıtma (in-situ heating) işlemleri uygulanmaktadır (Prajapati vd., 2021; Vatandaş vd., 2023). Bu yöntemler, daha düşük gözenekliliğe ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip parçalar elde etmede başarılı olmuştur (Kishore vd., 2017).

Vakum ortamında çalışan EYM yazıcıya katmanlar arası bağlanma mukavemetini geliştirmek amacıyla yeni katman baskısından hemen önce basılı katmanın yüzey sıcaklığının artırılması için kızılötesi ısıtıcı Şekil 18’teki gibi konumlandırılmıştır. Kızılötesi ısıtıcı halka konumunda olup nozul etrafına beş cm çapında bir alana etki etmektedir. 3D yazıcıya dahil edilen kızılötesi ısıtıcı ile elde edilen baskılar için, test numunesi haricinde bir numune üzerinde ısıtıcının derecesi kalibre edilmiştir. Test numunesinin yazdırılan katmanları içine gömülen termoeleman vasıtasıyla baskı esnasında sıcaklık kaydedilmiştir. PEEK matrisin kristalleşme sıcaklığına yakın sıcaklığı sağlayan voltaj ve amper değerleri veri kayıt cihazına kaydedilmiştir. Ardından kızılötesi ısıtıcı belirlenen değerde çalıştırılır ve sistem kararlı hale geldiğinde yazdırma işlemi başlatılmıştır. Son olarak vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcının hibrit etkisini incelemek için önce sistem final vakumuna getirildi ardından tekrardan vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kalibre edildi ve test numunesi yazdırılmıştır.



(a)



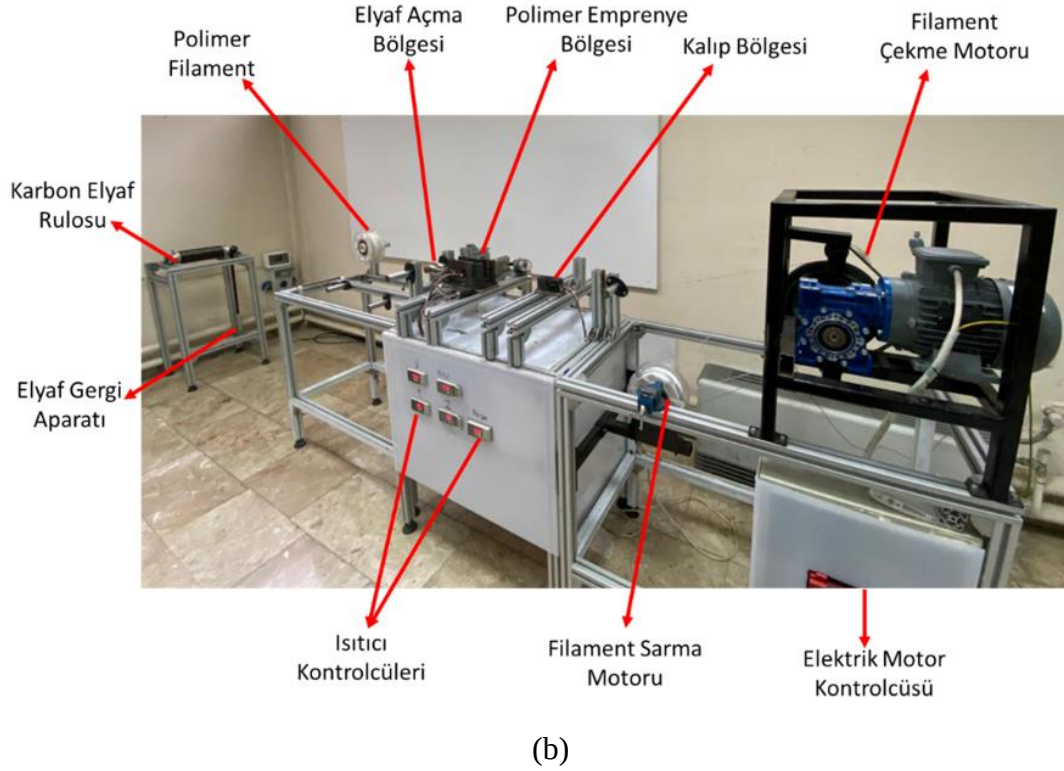
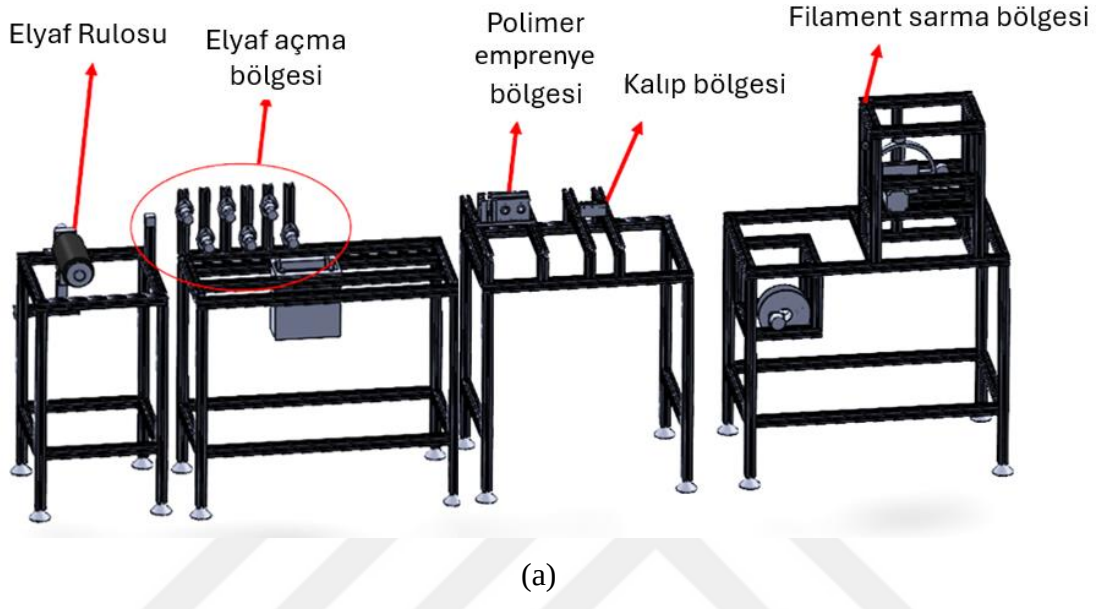
(b)

Şekil 18. Vakum ortamında kullanılan 3D yazıcıya kızılötesi ısıtıcının konumlandırılması; (a) katı model görüntüsü, (b) gerçek hali

2.3. Sürekli Elyaf Takviyeli Filament Üretim Hattı ve Üretimi

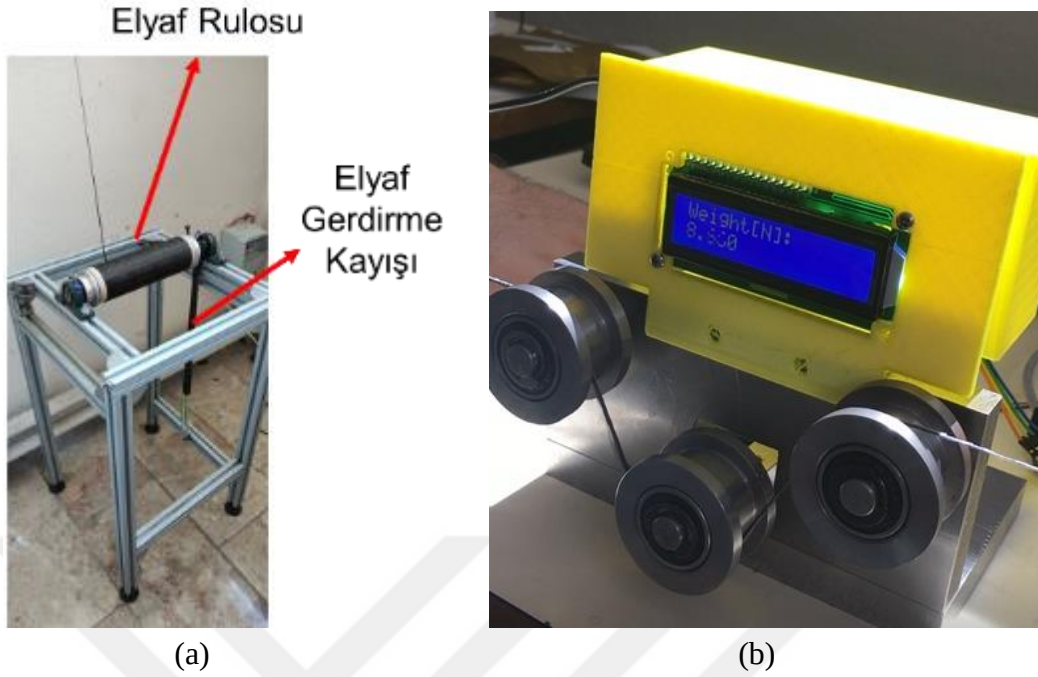
Vakum ortamında SKETTK kompozit test numunelerinin üretilebilmesi için ilk olarak özgün bir SKETTK filament üretim hattı tasarlanmış ve üretilmiştir. Tez çalışması boyunca aynı koşullar altında SKETTK filament üretim hattından temin edilmiştir.

Tasarım için hazırlanan katı model ve sigma profiller kullanılarak imalatı yapılan filament üretim hattının resmi Şekil 19’da verilmektedir. Üretim hattı dört ana bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler; elyaf açma bölgesi, polimer emprenye bölgesi, kalıp bölgesi ve filament sarma bölgesinden meydana gelmektedir.



Şekil 19. Sürekli elyaf takviyeli filament üretim hattının görüntüleri; (a) katı model görüntüsü, (b) üretilmiş üretim hattı

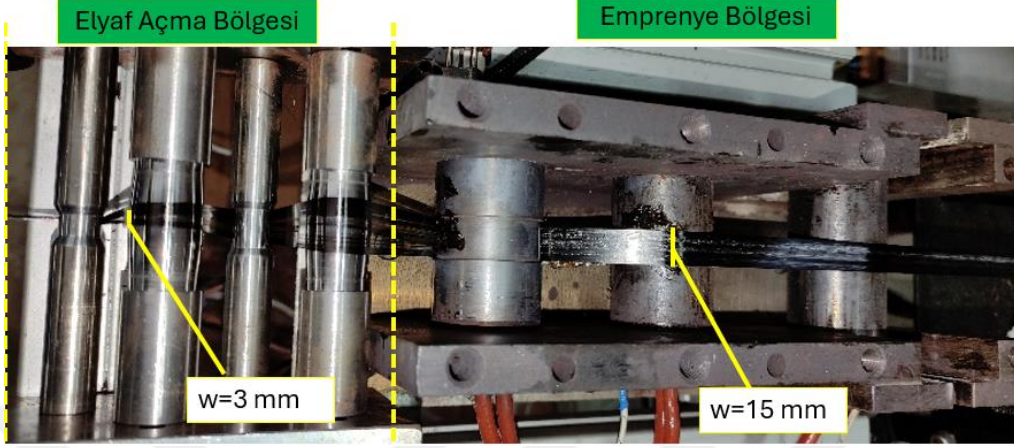
Elyaf açma bölgesi, termoplastik polimerin daha kolay elyaf içerisine emprenye olabilmesi için elyafı yayvan hale getirerek daha geniş bir temas yüzeyine sahip olmasını sağlamaktadır. SKETTK filamentin ve filamentten elde edilen test numunenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, öncelikle elyaf-polimerin homojen dağılmasına dayalıdır. 3K (3000 tel) karbon elyafın her bir telinin düzgün bir şekilde ıslatılması ile, parça üzerine gelen yükler verimli olarak elyaflara aktarılabilir. Homojen bir ıslatma sağlamak için polimer ve çevre arasındaki basınç artırılması ya da elyaf yüzeyinin genişletilmesi gerekmektedir (Garofalo ve Walczyk, 2021; Kaczmarek vd., 2021; Lekakou vd., 1996). Literatürde, Liu vd. (2020), mini ekstrüzyon sistemi tasarlayıp yüksek basınçta elyaf-polimer karışım elde etmişlerdir. Böylece SKETTK parçalarda oldukça yüksek mekanik özelliklere ulaşılmıştır. Bu tez çalışmasında ise elyafların yüzey alanının genişletilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu sebeple literatürdeki çalışmalardan yola çıkılarak (Kaczmarek vd., 2021) elyaf açma bölgesi içerisinde dış bükey bombeli miller kullanılmıştır. Elyaf demeti üzerinde oluşturulan gerilme elyafların üzerinde oluşan kuvvet ile elyaflar yanal olarak açılmaya diğer bir tabirle yayılmaya zorlanmıştır. Elyaf gerginliği ve bombeli miller yüzeyinde oluşan basınç ile elyafların açılması hedeflenmiştir. Elyaf gerginliğinin kontrolü için karbon elyaf rulosunun bağlı olduğu mil Şekil 20'de gösterildiği gibi frenleme mekanizması (elyaf gerdirme kayışı) bağlanmıştır. Kayış, karbon elyaf rulosunun olduğu merdane etrafına sarılıdır. Vidalı ayar mekanizması ile kayışın mil yüzeyine uyguladığı sürtünme direncinin değiştirilmesi sureti ile elyafın gerginliği kontrol edilmektedir. Karbon elyaf şeridinin gerginliğinin ölçülmesi için 20kg kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Yük hücresinin görüntüsü Şekil 20(b)'de verilmiştir. Elyafın belli bir oranda açılabilmesi ve homojen emprenye işlemi için, elyaf gerginliği çok önemli bir parametredir ve literatürden 8-10 N'luk bir gergi kuvvetinin yeterli olduğu görülmüştür (Liu vd., 2020; Moradi vd., 2023; Niu vd., 2023). Kullanılan yük hücresinde algılanan ağırlık değeri arduino kontrolü ile ekrana yansıtılmaktadır. Sistemde üç adet döner merdaneler bulunmaktadır. Elyaf bu üç merdane arasında 60° açı ile yerleştirilmiştir. Çalışma boyunca yük hücresinde 8 N'luk bir değer okunmuş olup, bu değer sabit kalabilmesi için frenleme mekanizması 8 N'da kuvvet kalacak pozisyonda sabitlenmiştir.



Şekil 20. Elyaf üretim hattı yardımcı ekipmanları; (a) elyaf gerdirme, (b) gerginlik ölçüm cihazı

Filament üretim hattında karbon elyafın açılması üzerine literatürde yeni geliştirilen bir yöntem kullanıldı (Garofalo ve Walczyk, 2021). Bu yöntemde çapları 15 mm olan dört adet milden oluşan bir açma aparatı kullanılmaktadır. Şekil 21’de görüldüğü gibi dört milden 2 tanesi bombeli geometriye sahiptir. Diğer ikisi istenilen elyaf genişliğine uygun çevresel kanallara sahiptir. Şekilden görüldüğü gibi elyaf bu miller arasından geçirilmektedir ve elyaf emprenye kalıbının hemen önüne monte edilmiştir. Bombeli miller yardımıyla elyafın 15mm’lik şerit halinde açılabilirdiği görülmüştür. Fakat elyafın aşırı açılması sonucunda sürtünmeye bağlı ortaya çıkan yüksek gergi kuvvetleri fiberlerin zamanla zarar görmesine ve bombeli miller üzerinde birikmesine sebep olmakta ve bunun sonucunda sürekli üretimi engellemektedir. Elyaf açıklığının 5-10 mm arasında tutulduğunda homojen ve sürekli üretimin yapılabilirdiği görülmüştür. Bombeli miller vasıtasıyla elyaf başlangıç genişliğinin 6-8 kat fazlasına elyaf açılabilir. Üretim hattında stabilite açısından 8 mm genişliğin oldukça iyi bir karışım için yeterli olduğuna yapılan pek çok deneme sonunda karar verilmiştir. Filament üretiminde 3K karbon elyaf kullanılmıştır. Üretilen elyafların kalitesi hem optik inceleme hem de çekme testleri vasıtasıyla kontrol edilmiştir. Optik incelemede elyaf dağılımı ve gözenek (boşluk) miktarı gözlemlenirken, çekme testleri ile maksimum

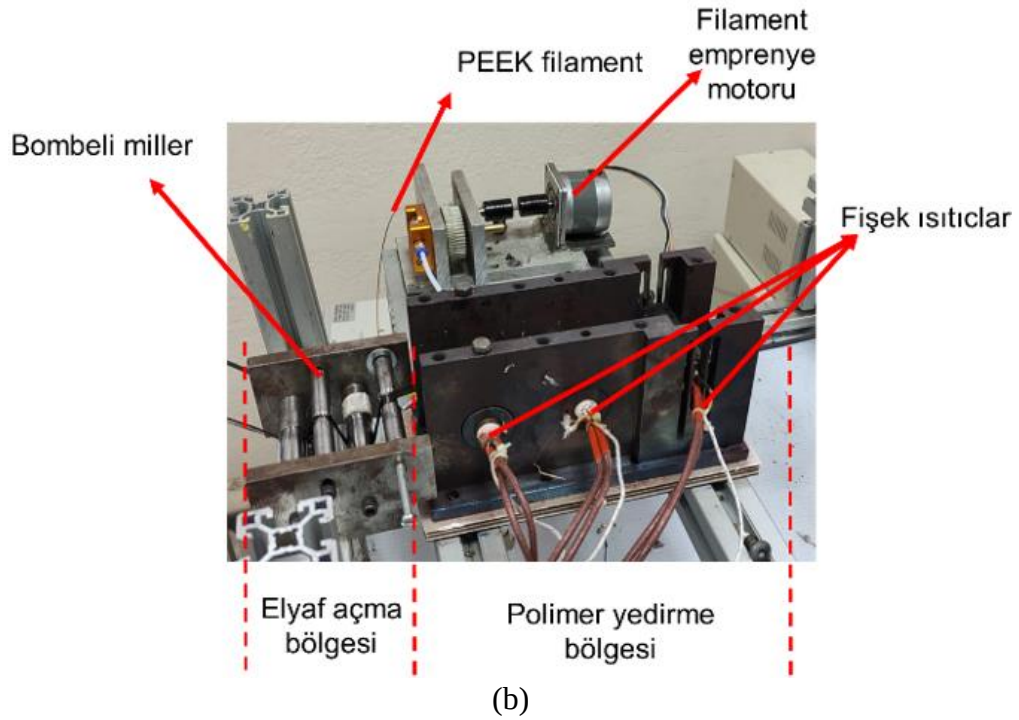
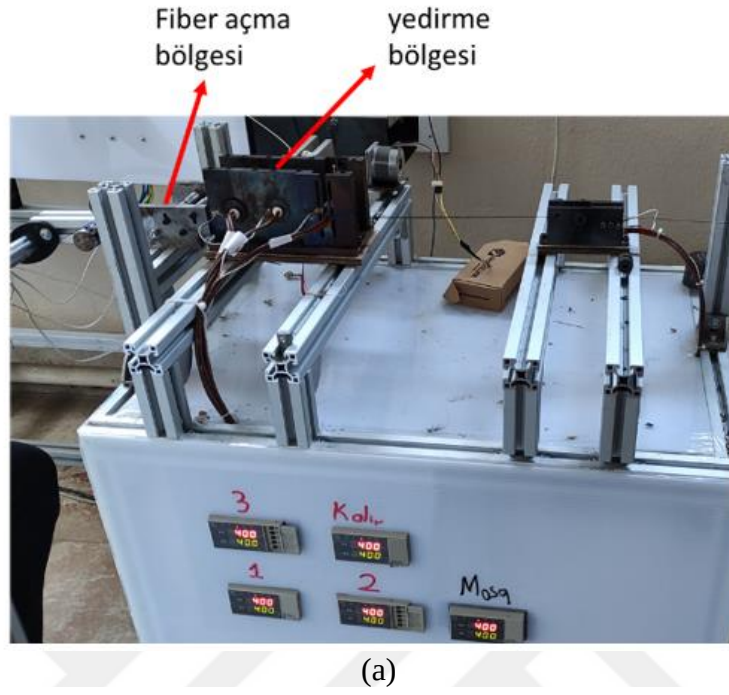
çekme gerilmesi değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu gözlemler ile optimum filament üretim parametreleri ortaya çıkarılmıştır (Vatandaş vd., 2023).



Şekil 21. Kalıp içerisinde açılmış fiber (w=15mm) görseli

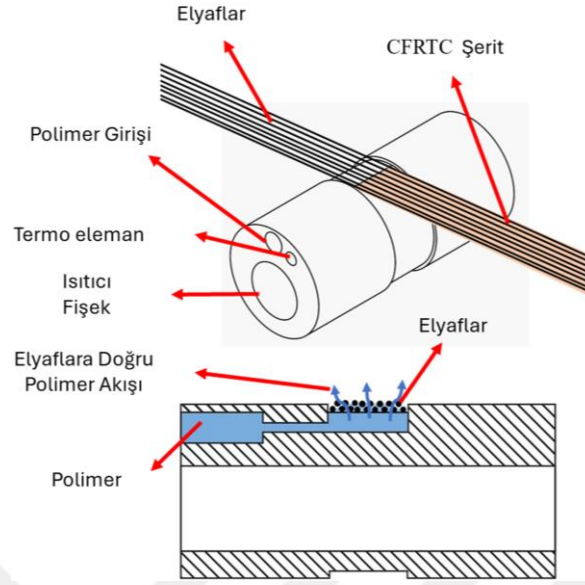
Polimer emprenye bölgesi Şekil 22(a)'da gösterilmiştir. Bu bölgede, termoplastik polimerin erime sıcaklığına getirilerek 8mm'ye açılan elyaf ile emprenye için 30 mm çapında üç adet mil kullanılmıştır. Miller birbirine paralel olarak kalıba yerleştirilmiştir. Millerden biri polimer emprenye mili olarak kullanılmak sureti ile Şekil 22(c)'de gösterildiği gibi merkezinden kaçık 2 mm çapında delik ve bu deliğe radyan yönde 0.4 mm (CNC Tel Erozyon yöntemi ile açılmış) çapında 24 adet iki sıralı mikron delikler ile imal edilmiştir. Deliklerin bulunduğu çevresel kanalın genişliği 12 mm olarak alınmıştır. Milleri ısıtmak için fişek ısıtıcılar millerin ortasına açılan deliklere yerleştirilmiştir. Fişek ısıtıcıların sıcaklık kontrolü için termokupl, sıcaklık rölesi ve göstergelerden yararlanılmış olup; kontrolcüler programlanmıştır. Ayrıca Şekil 22(b)'de gösterildiği gibi filamentin kalıp içine itilmesi için ilave bir step motoru ve dişli mekanizması tasarlanmıştır. Bu ilave step motoru kontrolünde arduino ve ramps 1.4 programından yararlanılmıştır. Polimerin elyaf içerisine emprenye etmesini sağlayan, emprenye mili Şekil 22(c)'de verilmiştir. 1.75 mm piyasada hazır satılan ticari PEEK filamentler bu mekanizma ile polimer emprenye mili içerisine itilmektedir ve itilen filament milin sıcaklığı ile erimekte ve akabinde radyal mikro delikler vasıtasıyla milin yüzeyine çıkmaya zorlanmaktadır. Yüzeyden geçen açılmış elyafların üzerine gönderilmekte ve böylece emprenye işlemi gerçekleştirilmektedir. Emprenye edilmiş karbon elyaf, emprenye millinde taşan polimer veya emprenye esnasında meydana gelen boşlukların

azaltılması için ikinci ve üçüncü sıcak miller arasından geçirilmek suretiyle polimer/elyaf karışımı daha homojen hale getirilmektedir.



Şekil 22. Filament üretim hattı emprenye bölgesi; (a) bölgenin genel resmi, (b) kullanılan kalıplar ve yardımcı ekipmanlar, (c) polimer emprenye mili

Şekil 22'nin devamı



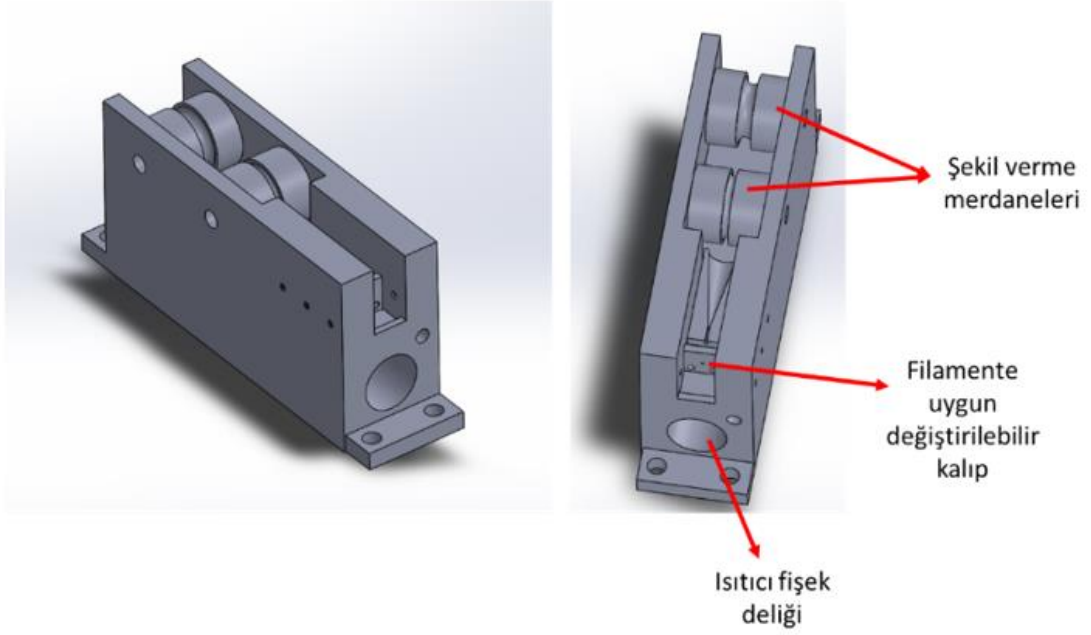
(c)

Emprenye bölgesinden sonra kalıp bölgesi gelmektedir. Homojen karışım sağlamak amacıyla yüzey alanı açılan elyafların EYM tipi yazıcıda kullanmak üzere dairesel kesit alanına dönüştürülmesi burada gerçekleştirilmektedir. Elyaflara zarar vermemek adına şerit geometriden kademeli olarak çap daraltılmaktadır. Bu amaçla Şekil 23'te görülen parça kullanılmıştır. Filament buradan çıktıktan sonra 0.6 mm delik çapındaki nozullarından geçirilerek şekillendirilmiştir. Elde edilen filamentlerin çaplarına göre matematiksel olarak hesap yapılarak elyaf oranları hesaplanabilir. Bunun için Denklem 1-3'ten yararlanılmıştır. Her SKETTK filament için elyaf oranı sabittir fakat filament çapı diğer bir deyişle nozul alanı ya da polimer miktarı değişmektedir.

$$Toplam Elyaf Alanı = 3000 \times \frac{\pi \times (Elyaf \text{ Çapı})^2}{4} \quad (1)$$

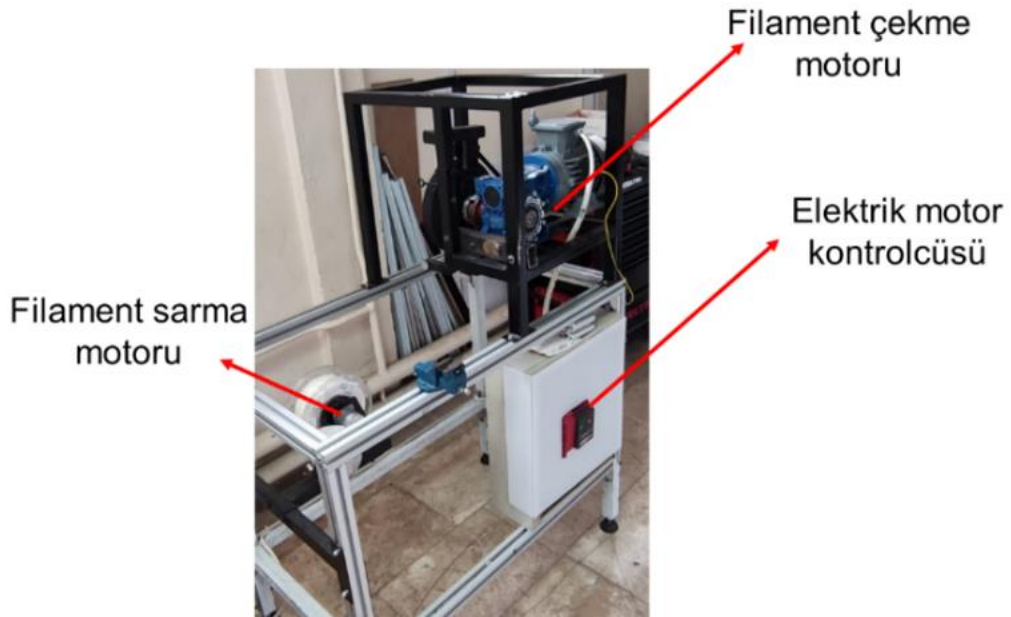
$$Nozul Alanı = \frac{\pi \times (Nozul \text{ Çapı})^2}{4} \quad (2)$$

$$Hacimsel Elyaf Oranı (\%) = \frac{Toplam Elyaf Alanı}{Nozul Alanı} \times 100 \quad (3)$$



Şekil 23. SKETTK filament üretim hattında kullanılan dairesel şekil verme kalıbı

Üretim hattının son bölümü, filament sarma bölgesinden Şekil 24’te gösterilmiştir. Nozul kalıptan geçen filament dönme hızı kontrol edilebilen bir elektrik motor vasıtasıyla çekilmektedir. Çekilen filament bir başka filament rulosuna sarılmaktadır.



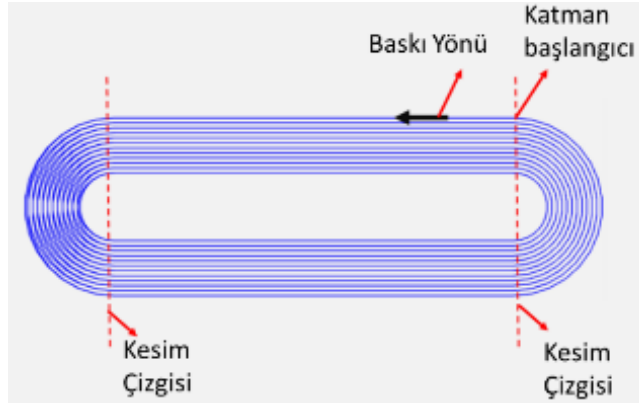
Şekil 24. Filament sarma bölgesi

2.4. Vakum Ortamında 3D yazıcı kullanarak SKETTK Test Numunelerinin Üretimi

Vakum ortamında, SKETTK filamentler kullanılarak SKETTK parçaların eklemeli olarak üretilmesi için sürekli elyaf için baskı yolu planlaması veya elyaf kesimi gerektirir (Uşun ve Gümrük, 2021; Vatandaş vd., 2023). Bu sebeple, Şekil 25'te gösterildiği gibi G kodu yolu geliştirildi. G-kodu, eş merkezli yol kullanılarak tek bir sürekli filamentten üretilmesi ve baskı sırasında filament kesmeye gerek kalmaması için halka şeklinde yapılandırılmıştır. Daha sonra yazdırılan parçalar, Üç nokta eğme testleri ISO 14125 ($100 \times 15 \times 2 \text{ mm}^3$)'e uygun hale getirebilmek amacıyla Şekil 25'te belirtilen çizgiler boyunca kesilmiştir. Vakum ortamında yazdırma işlemi aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

- Filament hazırlığı: SKETTK filament makarası, EYM yazıcının yuvasına dikkatlice yerleştirildi. Filament beslemesi kontrol edilerek herhangi bir tıkanıklık veya hata olup olmadığı doğrulanmıştır.
- Sistem kontrolleri: Yazıcı ve filament sisteminin son kontrolleri yapıldı. Yazdırma başlatılmadan önce tüm bileşenlerin doğru şekilde çalıştığı kontrol edilmiştir.
- Vakum kabini hazırlığı: Vakum kabinin kapağı kapatıldı ve kilit mekanizması aktive edildi. Su soğutma vanaları açılarak sistemin uygun sıcaklıkta çalışması sağlanmıştır.
- Vakum pompası çalıştırılması: Vakum pompası devreye alındı ve sistemin istenilen vakum miktarına ulaşması beklendi. Vakum miktarının belirlenen parametrelere ulaştığı doğrulanmıştır.
- Yazdırma işlemi: Vakum miktarı uygun seviyeye ulaştığında, 3D yazıcıya dışarıdan komut verilerek yazdırma işlemi başlatıldı. Yazdırma süreci boyunca vakum kabinindeki gözetleme camından kontrol sağlanarak herhangi bir olumsuzluk durumunda sistem durdurulmak üzere hazırda bekletilmiştir.
- Yazdırma sonrası işlemler: Yazdırma işlemi tamamlandığında vakum kabininin içindeki vakum tahliye edildi. Vakum miktarı normale döndüğünde, kabin açıldı ve test numunesi dikkatlice baskı tablasından alınmıştır.

Vakum ortamında SKETTK numunelerinin yazdırma parametreleri Tablo 1'de özetlenmiştir. SKETTK numuneleri için literatürde sıklıkla kullanılan katman kalınlığı seçilmiştir. Son olarak, ortam vakumlu olduğu için başlangıç oda sıcaklığı düşük seviyede tutulmuştur. Şekil 26'da vakum ortamında üretilen SKETTK üç noktalı eğilme test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 25. Geliştirilen python kodu ile oluşturulmuş üç noktalı eğilme test numunesinin G-kodu hareketleri

Tablo 1. Farklı vakum ve baskı parametrelerinde üretilen SKETTK üç noktalı eğilme testi numunelerinin özeti

Parametreler	Değer
Vakum miktarı (mbar)	0.5, 10, 100
Nozul sıcaklığı (°C)	400, 430, 450
Baskı tablası sıcaklığı (°C)	100, 130, 150
Yazdırma hızı (mm.sn ⁻¹)	1.67, 2.5, 5
*Katman kalınlığı (mm)	0.24
*Oda sıcaklığı (°C)	20

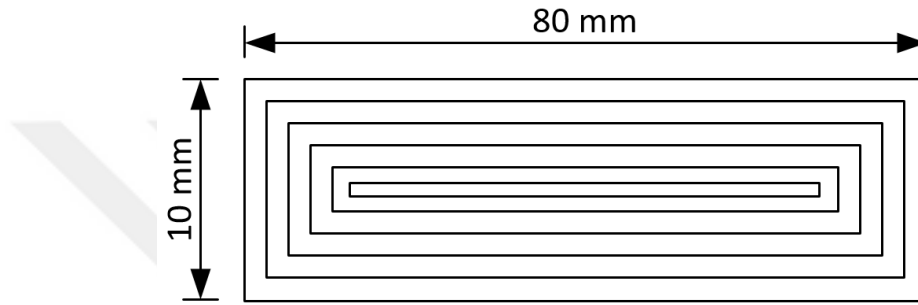
* Katman kalınlığı ve kabin sıcaklığı tüm SKETTK parçaların baskılarında sabit tutulmuştur.



Şekil 26. Vakum ortamında üretilen üç noktalı eğilme test numuneleri

2.5. Vakum Ortamında KKETTK Test Numunelerinin 3D Yazıcı Kullanarak Üretimi

Vakum ortamında çeşitli parametrelerde eğilme davranışını incelemek için ISO 178 (80x10x4 mm³) standartlarında üç noktalı eğilme numunesi öncelikli olarak Solidworks katı model programında çizilmiştir. Ardından 3D yazıcı dilimleyicisi olarak bilinen Cura paket programında dilimlenmiştir. Modelin baskı deseninin eş merkezli versiyonu Şekil 27’de sunulmaktadır. Vakum ortamında KKETTK numunelerinin baskı parametreleri Tablo 2’de özetlenmiştir. Yazdırma işleminin adımları, SKETTK numunelerinin üretimi ile aynıdır.



Şekil 27. Vakum ortamında üretilen KKETTK numunelerinin üç noktalı eğilme testi ölçüleri ve tarama deseni

Tablo 2. Farklı vakum ve baskı parametrelerinde üretilen KKETTK üç noktalı eğilme testi numunelerinin özeti

Parametreler	Değer
Vakum miktarı (mbar)	0.5, 10, 100
Nozul sıcaklığı (°C)	430, 450, 470
Baskı tablası sıcaklığı (°C)	100, 130, 150
Yazdırma hızı (mm.sn ⁻¹)	30, 50, 70
*Katman kalınlığı (mm)	0.12
*Oda sıcaklığı (°C)	20

* Katman kalınlığı ve kabin sıcaklığı tüm KKETTK parçaların baskılarında sabit tutulmuştur.

2.6. Vakum Ortamında Kızılötesi Isıtıcı Kullanarak KKETTK Test Numunelerinin 3D Yazıcı Kullanarak Üretimi

Vakum ortamına 3D yazıcıya kızılötesi ısıtıcı sistem entegre edilerek, vakum ortamı ve kızılötesi ön ısıtmanın hibrit etkisinin katmanlar arası yapışma etkisini inceleyebilmek için Şekil 27’de gösterilen ISO 178 (80x10x4 mm³) standartlarında üç noktalı eğilme numunesi 3D yazıcı ile yazdırılmıştır. 3D baskı parametreleri Tablo 3’te verilmiştir. Bu

çalışmada, yalnızca atmosfer ortamında baskı, yalnızca vakum ortamında baskı, yalnızca kızılötesi ısıtıcı ile baskı ve hem kızılötesi ısıtıcı destekli hem de vakum ortamında baskı yapılarak mekanik ve mikroyapısal özellikler incelenmiştir. Bu dört durumun için baskı parametreleri bir önceki deney setinden en yüksek eğilme gerilmesine sahip değerler seçilmiştir. Ayrıca KKETTK 3D baskısı için literatürde sıklıkla kullanılan katman kalınlığı seçilmiştir. Ek olarak, ortam vakumlu olduğu için başlangıç oda sıcaklığı düşük seviyede tutulmuştur. Tablo 3'te baskı parametreleri özetlenmiştir. Atmosfer ortamında geleneksel 3D yazdırma prensibiyle gerçeklemiştir. Sistem final (0.5 mbar) vakum miktarına ulaştığında yazdırma işlemi başlatıldı. 3D yazıcıya dahil edilen kızılötesi ısıtıcı ile elde edilen baskılar için, test numunesi haricinde bir numune üzerinde ısıtıcının derecesi kalibre edilmiştir. Test numunesinin yazdırılan katmanları içine gömülen termokupl vasıtasıyla baskı esnasında sıcaklık kaydedilmiştir. PEEK matrisin kristallenme sıcaklığına yakın sıcaklığı sağlayan voltaj ve amper değerleri veri kayıt cihazına kaydedilmiştir. Ardından kızılötesi ısıtıcı belirlenen değerde çalıştırılarak sistem kararlı hale geldiğinde yazdırma işlemi başlatılmıştır.

Tablo 3. Kızılötesi ısıtıcı destekli ve vakum ortamında üretilen KKETTK test numunelerinin baskı parametreleri

Parametreler	Değer
Vakum miktarı (mbar)	0.5
Nozul sıcaklığı (°C)	450
Baskı tablası sıcaklığı (°C)	150
Yazdırma hızı (mm.sn ⁻¹)	30
*Katman kalınlığı (mm)	0.12
*Oda sıcaklığı (°C)	20

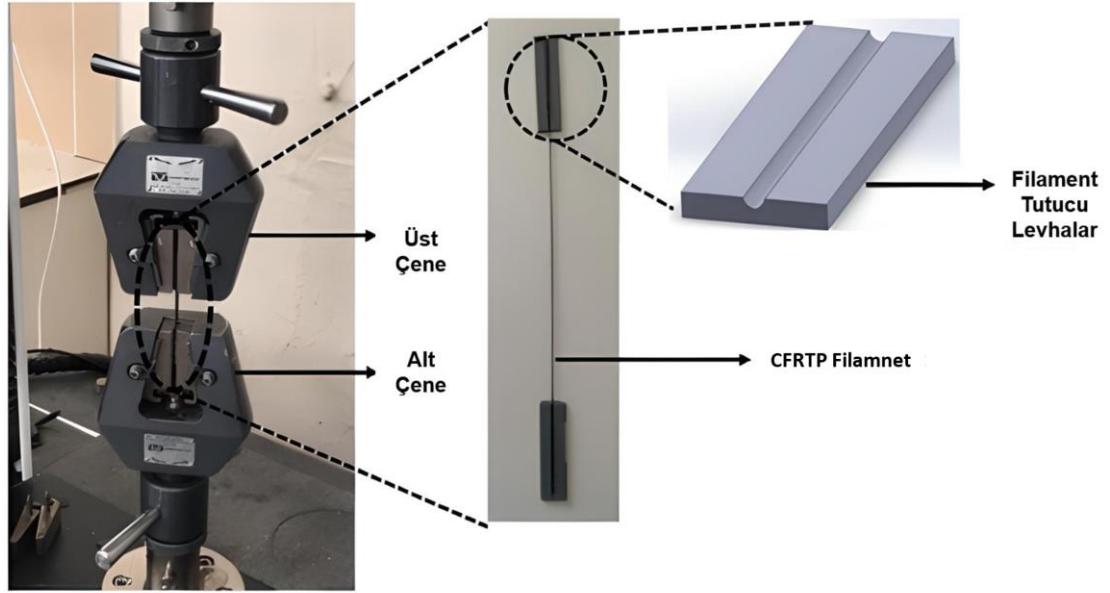
* Katman kalınlığı ve oda sıcaklığı tüm parametreler için sabit olarak alınmıştır.

2.7. Mekanik Testler

2.7.1. SKETTK Filament Çekme Testleri

Şekil 28'de gösterildiği gibi filament çekme testi gerçekleştirilmiştir. SKETTK filamentleri, çekme testi için uygun bir boyutta kesilmiştir. Filamentlerin çapı küçük olduğundan, çekme cihazının çenelerine sabitlemek amacıyla Şekil 28'de gösterilen levhalar kullanılmıştır. Filamentler, bu levhalara çift fazlı bir yapıştırıcı levha ile güçlü bir şekilde

yapıştırılmıştır. Filament çekme testleri, test sonuçlarının güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak amacıyla beş kez tekrarlanmıştır.



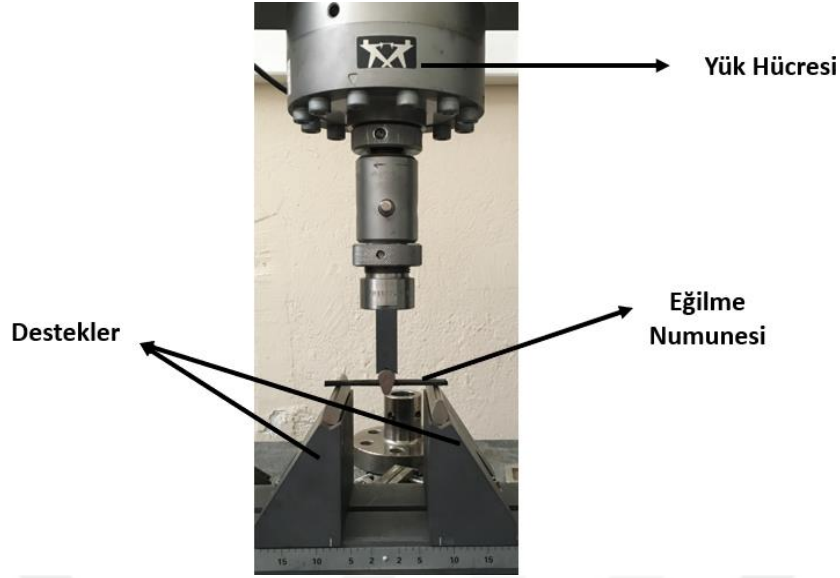
Şekil 28. SKETTK filament çekme testi ve filament çekme numunesi

2.7.2. Üç Noktalı Eğilme Testi

Eğilme testleri 100 kN kapasiteli Instron cihazında yapılmıştır. Eğilme testi, 5 mm.dk⁻¹ hızında gerçekleştirmiştir. Destekler arası mesafe SKETTK numuneleri için 80 mm KKETTK numuneleri için 60 mm olarak konumlandırılmıştır. Test sonuçlarının güvenilirliğini ve doğruluğunu sağlamak adına beş kez tekrarlanmıştır. Eğilme gerilmesi, Denklem 4'te verilen teorik formülasyon yardımıyla belirlemiştir.

$$\sigma_E = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

Burada, F (N) yük-uzama eğrisi üzerinde belirli bir noktadaki yük, L (mm) Destek açıklığı, b (mm) test kirişinin genişliği, d (mm) test edilen kirişin derinliği veya kalınlığı vermektedir. Üç noktalı eğilme testi Şekil 29'de gösterilmiştir.



Şekil 29. Üç noktalı eğilme testi

2.8. Mikroyapısal Analiz

Üretilen test numunelerinin iç yapıları ve kırılma yüzeylerini incelemek için taramalı elektron (SEM) ve optik mikroskoplar kullanılarak mikroyapısal incelemeler yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu için hasara uğramamış numunelerinden bir parça kesilerek taramalı elektron mikroskobu için hazırlanmıştır. Ayrıca vakum ortamında SKETTK eğilme numunelerinin optik inceleme için numuneler metografik görüntülemek için bir kalıp hazırlanmıştır. Kalıp numune yüzeyleri 200 ile 2000 grit arasında değişen ince silisyum karbür aşındırıcılar ile yüzeyleri taşlanmıştır. Bir sonraki aşamada, numune yüzeyleri 1 μm alümina partiküllü polisaj süspansiyonları kullanılarak yüzeyleri parlatılmıştır. SEM ve optik görüntüleri elde etmek için sırasıyla ZEISS EVO LS 10 ve ZEISS Observer kullanılmıştır.

Numunelerin gözenek oranları, dijital formatta ImageJ yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. ImageJ, optik veya taramalı elektron mikroskoplardan elde edilen görüntüleri analiz etmek ve numunenin kesitlerindeki gözenek oranını hesaplamak için kullanılan bir görüntü işleme programıdır. Program, kesitin siyah bölgelerini, boşluklar olarak adlandırdığımız bölgeleri analiz ederek bu bölgelerin alanını hesaplayarak gözenek oranını belirlenmiştir.

2.9. Termal Karakterizasyon

Termal karakterizasyon, tez kapsamında 3D basılan polimer matrisli kompozit malzemelerin termal özelliklerini ve davranışlarını incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu analizin asıl amacı, polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik performansındaki değişimin nedeni belirlemek için kritik öneme sahiptir. Tez çalışması kapsamında kristallik oranının hesaplanması için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) testleri yapılmıştır.

DSC, malzemenin ısı akışını kontrol edilen bir sıcaklık programı altında ölçüm yapan bir termal analiz cihazıdır. DSC ölçümleri, Perkin Elmer DSC 4000 cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Test öncesinde, tüm numuneler etanol ile temizlendi ve 80 °C'de 24 saat kurutuldu. Her bir örnek, azot atmosferi altında 40 °C'den 450 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda dakikada 10 °C hızla homojen bir şekilde ısıtıldı. DSC eğrilerinde cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, erime sıcaklığı değerleri tespit edilmiştir.

XRD, her bir kristal düzenine sahip malzemelerin kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olacak şekilde, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanan bir yöntemdir. Her bir kristal ya da faz için bu kırınım desenleri parmak izlerine benzer mantıkta o kristali tanımlar. Bu teknikte incelenecek olan toz numune 25 µ tane boyutuna gelene kadar öğütülerek toz hale getirilmekte ve XRD analiz cihazları ile analiz edilmektedir. X-Işını Kırınım analiz metodu, analiz sırasında numuneyi tahrip etmeden ve küçük miktarlardaki numunelerin dahi analizlerinin yapılmasını sağlar. Test sonucunda elde edilen X-ışını difraktogramları High Score Plus yazılımındaki veri tabanları kullanılarak gerekli pik düzeltmeleri yapılmaktadır. Dört farklı test numunesi 5-90° açıları arasında 30 dk. boyunca analiz yapılmıştır. Elde edilen grafiklerden kristal piklerin alanının tüm alana (kristal bölge alanı + amorf bölge alanı) oranı kristallik oranını vereceği için bu alanlar hesaplanıp kristallik oranı bulunmuştur (Sasaki ve Matsuki, 1998; Soliman ve Furuta, 2014).

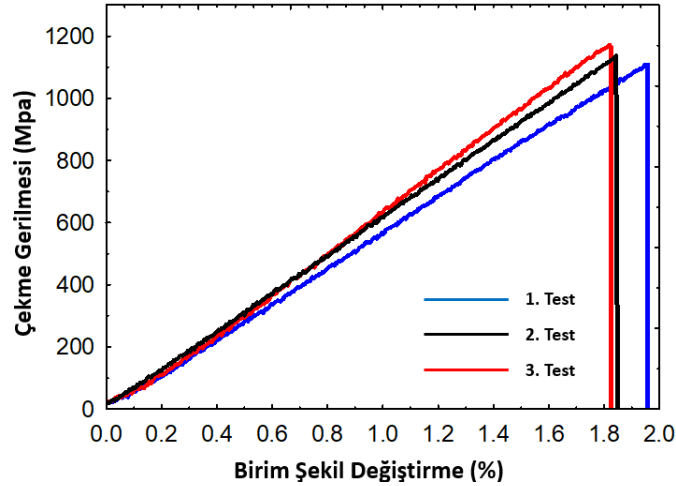
3. BULGULAR VE İRDELEME

Bu bölümde vakum ortamında eklemeli olarak üretilen SKETTK ve KKETTK numuneleri mekanik, mikroyapısal ve termal davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalara ait bulgular verilmiştir. Bunlara ek olarak vakum ortamında kızılötesi ön ısıtma destekli KKETTK numunelerinin mekanik, mikroyapısal ve termal özelliklerinin sonuçları irdelenmiştir.

3.1. SKETTK Filament Çekme Testi Sonuçları ve Mikroyapısal Özellikleri

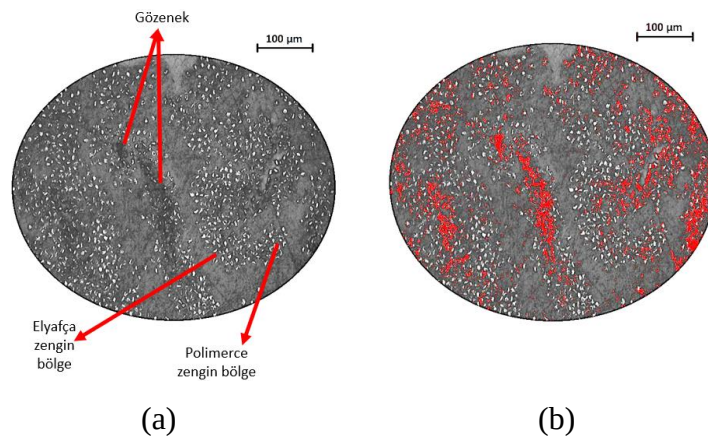
Bu tez çalışmasında, SKETTK filamentinin elyaf hacim oranı Denklem 1-3'e göre matematiksel olarak hesaplanmış olup 0.6 mm nozul çapına göre %40.83 hacim oranı olarak belirlenmiştir. Filament çekme testlerinden elde edilen eğriler Şekil 30'da gösterilmiştir. Filament çekme testleri üç kez tekrarlanmıştır. Eğriler de gözlemlendiği gibi, doğrusal yükleme sonucunda ani bir kırılma meydana gelmiştir. Ortalama olarak, maksimum çekme gerilmesi 1155.67 (± 31.97) MPa ve elastisite modülü 55.54 (± 2.64) GPa olarak elde edildi, ki bu da önceki makale çalışmamızda eşdeğer elyaf hacim fraksiyonu ile bulunan değerle tutarlı sonuçlar vermektedir (Vatandaş vd., 2023). Sonuçları incelediğimizde, örnekler arasında küçük farklılıklar tespit edilmiştir. Ayrıca, Chen vd. (2022), çeşitli koşullarda % 24.7 oranına sahip sürekli elyaf takviyeli PEEK kompozit filament üretmiş olup çekme testine tabi tutmuştur. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek filament çekme gerilmesini yaklaşık olarak 662.33 MPa hesaplamış olup bu tez çalışmasında elde edilen değerden düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bunun nedeni düşük elyaf oranıdır.

Ek olarak, literatürdeki önceki çalışmalarda, Uşun ve Gümrük (2021), %40 elyaf hacim fraksiyonuna sahip PLA matris SKETTK filamentlerinin çekme gerilmesini 988.78 MPa olarak hesaplamıştır. Elyaf hacim fraksiyonu bu çalışma ile aynı olsa da çekme gerilmesindeki fark, polimer matrisindeki farktan kaynaklanmaktadır.



Şekil 30. SKETTK filament çekme testlerinden elde edilen gerilme-birim şekil değişirme eğrileri

%40.83 hacim oranı elyaf hacim fraksiyonlarına sahip SKETTK filamentteki elyaf dağılımı Şekil 31(a)'daki gibi optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Şekilde de gözüktüğü gibi elyafların birçoğu filamentin içerisine eşit olarak dağıtılmıştır. Ancak bazı bölgelerde polimer ve elyafların bir yığın halinde olduğu gözükmemektedir. Bunun sebebi filament üretim esnasında meydana gelen eriyik polimerin basıncı ve çekme hızı ile ilişkilidir (H. Li vd., 2021b). Ek olarak Şekil 31(b)'de gözenekler kırmızı renkle belirtilip olup ImageJ programı vasıtasıyla 3.33 ± 0.12 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç EYM yöntemi ile CFRTP baskısı için oldukça düşüktür (Mashayekhi vd., 2021). Ayrıca, CFRTP filamentin elyaf hacim oranının belirli bir oranda artmasıyla mekanik özellikler artabilir. Eğer elyaf oranı çok fazla arttırılırsa, elyaf emprenyesi ve baskı esnasında yapışma gibi zorluklar ortaya çıkacağı tahmin edilmektedir.



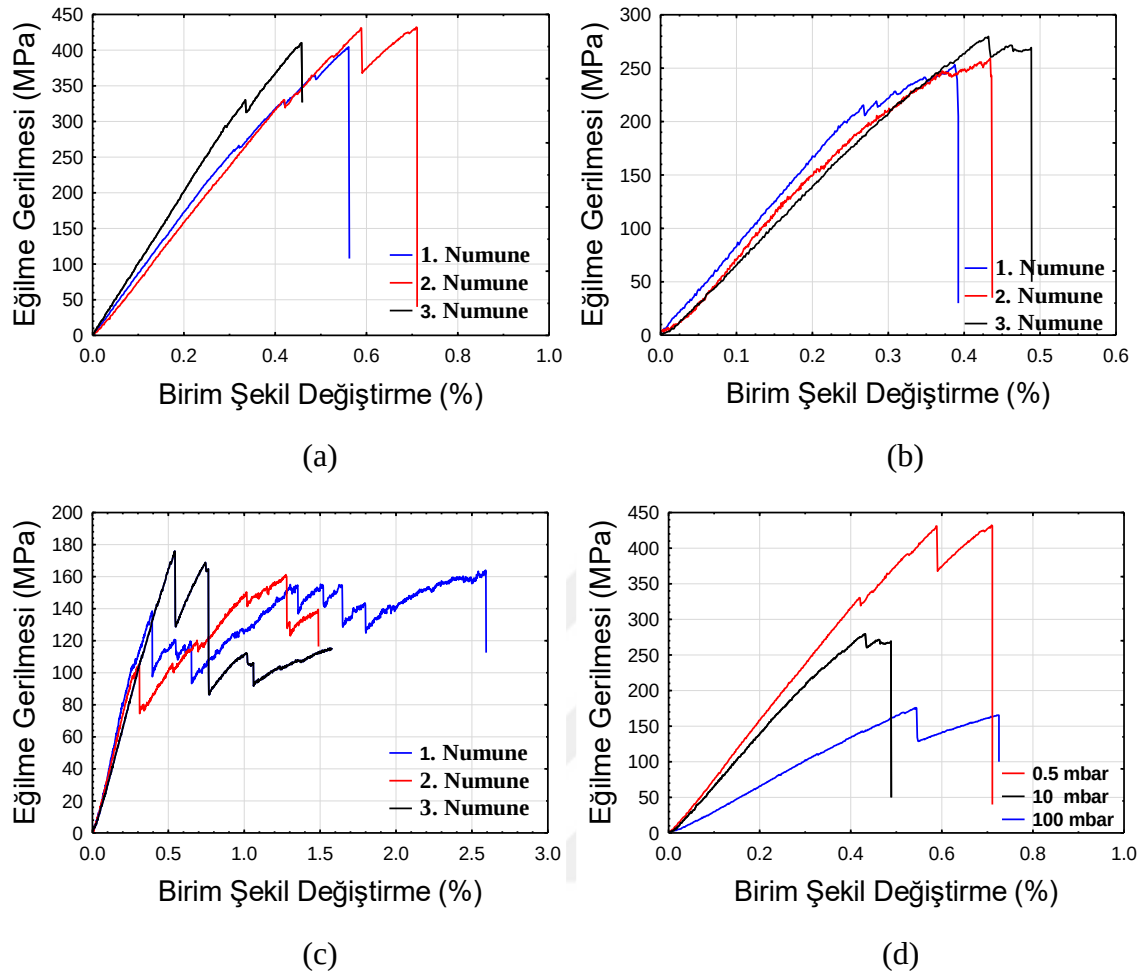
Şekil 31. SKETTK filamentin optik görüntüleriyle gözeneklilik hesaplaması; (a) kesit görüntüsü, (b) gösterilen gözeneklilik

3.2. Vakum Ortamında Üretilen SKETTK Numunelerin Mekanik, Mikroyapısal ve Termal Özellikleri

Bu bölümde öncelikle SKETTK filament çekme testi sonuçları verilir, ardından vakum ortamında baskı parametrelerinin etkileri ayrı ayrı sunulmuştur. Ayrıca optik görüntüler aracılığıyla hasar mekanizması yorumlanıp ve gözeneklilik oranları hesaplanmıştır. Son olarak kristalleşme sıcaklığı, erime sıcaklığı ve kristalleşme oranlarını incelemek için DSC eğrileri verilmiştir.

3.2.1. Vakum Ortamının Eğilme Davranışına Etkisi

Farklı vakum miktarlarının eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek için, nozul sıcaklığı 430°C, baskı tablası sıcaklığı 100°C ve baskı hızı 2.5 mm.sn⁻¹ olacak şekilde baskı parametreleri sabit tutulmuştur. Üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 32'de gösterilmiştir. Eğriler incelendiğinde, kompozit numuneler için doğrusal elastik deformasyon ve ardından kalıcı hasar ile sonuçlanan tipik bir davranış sergilemektedir (Ding vd., 2023; Rarani vd., 2019; Z. Liu vd., 2019; Yu vd., 2019). Düşük vakum miktarlarında (0.5 mbar), kırılma sonrası dalgalanma daha az belirgindir; ancak vakum miktarı arttıkça, özellikle 100 mbar'da, farklı kırılma davranışı ortaya çıkmıştır. Tekrarlanabilirlik açısından, özellikle elastik bölgede, tüm üç vakum seviyesinde önemli bir tekrarlanabilirlik elde edilmiştir. Bununla birlikte, maksimum eğilme gerilmesi değerlerinde kısmen tekrarlanabilir bir davranış gözlemlenmektedir. Vakum miktarı arttıkça, numunelerin kalitesi ve katmanlar arası iyileştirme, maksimum eğilme gerilmesi değerlerinde daha tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, vakum miktarı azaldıkça, özellikle hasar sonrası davranış, tekrarlanabilirlik bakımından istikrarsız hale gelmiştir. Bu durum, baskı sırasında numune içinde kontrolsüz mikro gözeneklerin oluşmasından ve katmanlar arası yapışmanın yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 32'de gösterildiği gibi, 100, 10 ve 0.5 mbar vakum miktarlarında basılan numunelerin maksimum eğilme gerilmesi sırasıyla 169.14, 264.12 ve 415.04 MPa olarak hesaplanmıştır. 0.5 mbar'da basılan örnek, 100 mbar altında basılanına göre %145 artan bir maksimum eğilme gerilmesi sergilemektedir. Vakum miktarları 100 mbar, 10 mbar ve 0.5 mbar'da basılan numunelerin eğilme modülü değerleri sırasıyla 36.72, 72.60 ve 89.13 GPa olarak hesaplanmıştır. 0.5 mbar'da basılan numune, 100 mbar'da basılanına göre %143 artan bir eğilme modülü elde edilmiştir. Tablo 4'de sonuçların özeti verilmiştir.



Şekil 32. Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 0.5 mbar, (b) 10 mbar, (c) 100 mbar, (d) farklı vakum değerleri için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

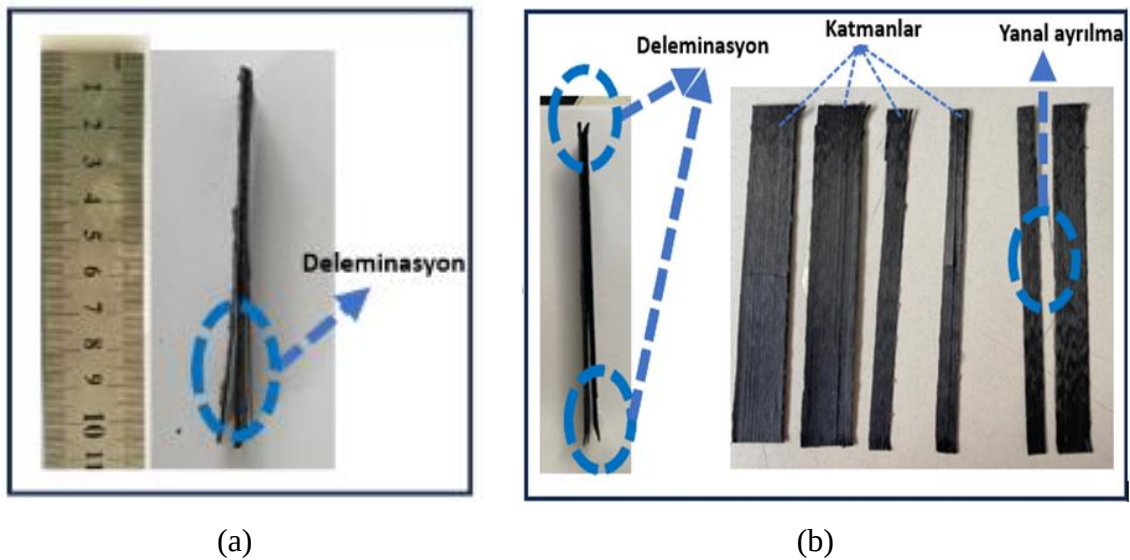
Tablo 4. Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Vakum Miktarı (mbar)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
0.5	89.13 (± 21.05)	143**	415.04 (± 27.13)	145**
10	72.60 (± 8.96)	115**	264.12 (± 13.83)	56**
100	36.72 (± 4.60)	-	169.14 (± 15.38)	-

*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

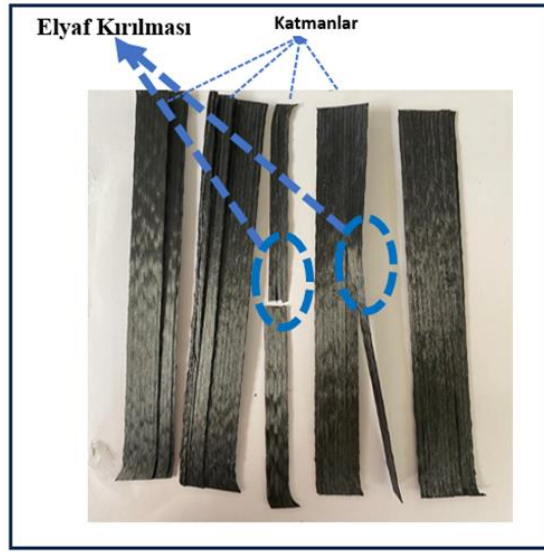
**Bu değerler 100 mbar vakum miktarında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

Hasara uğrayan numuneler Şekil 33'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, elyaf kırılmaları ve tabakalarda yan ayrılmalar meydana gelmiştir. Temel hasar mekanizması, katman delaminasyonu şeklinde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu durumun zayıf katmanlar arası yapışmadan meydana geldiği kolayca anlaşılmaktadır. Şekil 33(a)-(b)'de görüldüğü gibi, katmanlar arası yapışma güçlü olduğunda elyaf kırılması gözlemlenmemiş olup maksimum eğilme gerilmesi daha yüksek değerlere ulaşmış, deformasyon katmanlar boyunca ani bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu durum, eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrilerinden daha net bir şekilde anlaşılmıştır. Gerilme değerlerindeki ani düşüşlerin, bazı lokal katman ayrılımlarından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Şekil 33(c)'de, 100 mbar vakumda katmanlar arası yapışma zayıf olduğu için daha yoğun ve erken başlangıçlı lokal katman ayrılımları meydana gelmiştir. 100 mbar vakum miktarında, maksimum eğilme gerilmesi diğerlerine kıyasla en düşük seviyededir. Yük arttıkça daha fazla lokal katman ayrılması meydana gelmiş olup maksimum eğilme gerilmesi artışı sınırlanmıştır. Ek olarak, önemli miktarda yerel katman ayrımları numunenin esnekliğini arttırmış olup, nihai (toplam) hasardan önce önemli bir deformasyona ulaşılması sağlanmıştır. Bu süreçte, yükleme etkisindeki bazı katmanlarda kısmi elyaf kırılmalarının meydana gelmiştir. Özetle vakum ortamıyla birlikte maksimum gerilme değerlerinde artışlar meydana gelmesine rağmen delaminasyon hasar mekanizması devam ettiği görülmektedir.



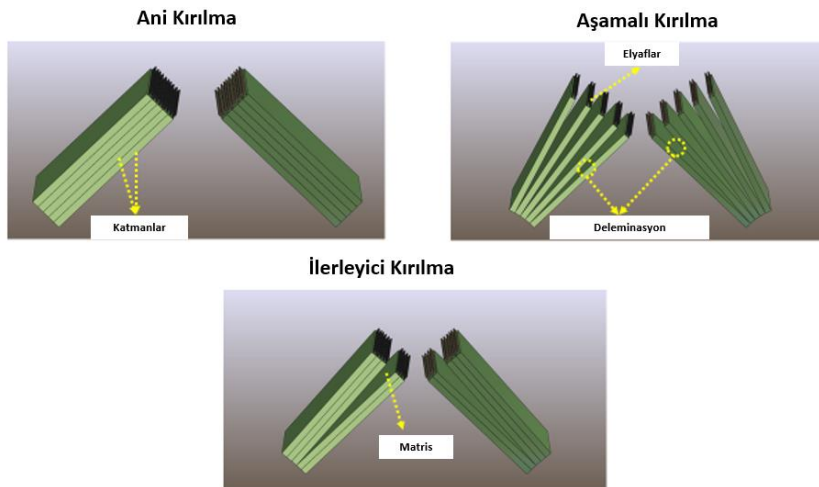
Şekil 33. Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı vakum miktarlarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 0.5 mbar, (b) 10 mbar, (c) 100 mbar

Şekil 33'ün devamı



(c)

Literatürde SKETTK'nın kırılma mekanizması Şekil 34'te gösterildiği gibi üç ana başlık altında sınıflandırılmaktadır (Ding vd., 2023). Ani kırılma, yüklemekten hemen sonra önemli bir katman ayrılması olmaksızın ani bir kırılma olarak meydana gelmektedir. Aşamalı kırılma, tipik olarak katmanların birbirinden kademeli olarak ayrıldığı arayüzdeki zayıf yapışmadan kaynaklanan bir kırılma mekanizmasıdır. İlerleyici kırılma, genellikle parçanın belirli katmanlarının ayrılmasından dolayı meydana gelmektedir. Kompozit parçalardaki yüksek mukavemetli bileşenlerin kırılması ani kırılma mekanizmasıyla sonuçlanır (Ding vd., 2023).



Şekil 34. Literatürde karşılaşılan SKETTK kompozitlerinin kırılma mekanizması tipleri (Ding vd., 2023).

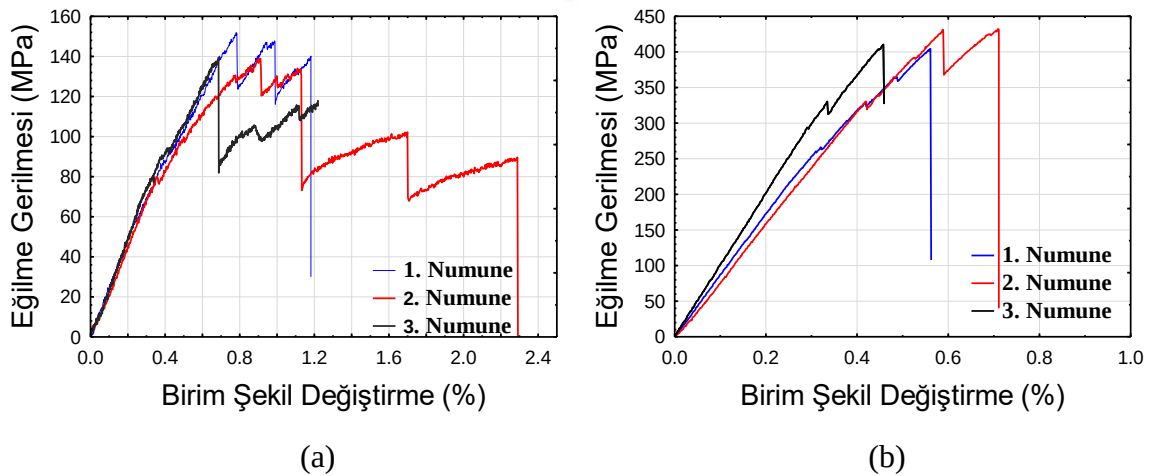
Bu çalışmada elde edilen kırılma görüntüleri, Şekil 34'te verilen kırılma mekanizmalarına göre değerlendirildiğinde, 0.5 mbar ve 10 mbar vakum miktarlarında basılan SKETTK, ilerleyici kırılma davranışı sergileyerek, delaminasyona neden olmaktadır. Öte yandan, 100 mbar'da ki numuneler, katmanlar arası yapışmanın çok zayıf olduğunu gösteren, aşamalı kırılma davranışı sergilemiştir. Düşük vakum miktarı eğilme gerilmesini bir dereceye kadar arttırmıştır. Ayrıca vakum miktarı azaldıkça soğutma hızı da önemli ölçüde azalmaktadır. Sonuç olarak PEEK matrisinin daha fazla kristalleşmeye maruz kaldığına ve bunun da gerilmesin artmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, kristallik oranı testi ile bölüm 3.2.6'da vermiştir. Ancak vakum miktarının önemli ölçüde azalmasının bazı sorunları beraberinde getirebileceği öngörülmektedir. Düşük bir vakum seviyesinde, soğutma hızında önemli bir düşüşe yol açarak bunun sonucunda erimiş filamentin sertleşmesi için yeterli zaman olmamaktadır. Bu durumun çözümü için ileri soğutma tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

3.2.2. Nozul Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi

Nozul sıcaklığı, SKETTK parçalarının kalitesini, katmanlar arası bağlanma gücünü ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilemektedir (Krajangsawasdi, Blok, Hamerton, ve Longana, 2021; F. Wang vd., 2021). SKETTK numuneler 400°C, 430°C ve 450°C farklı nozul sıcaklıklarında eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek için, 0.5 mbar vakum miktarında, baskı tablası sıcaklığı 100°C ve baskı hızı 2.5 mm.sn⁻¹ olacak şekilde baskı parametreleri sabit tutuldu. Şekil 35'te, farklı nozul sıcaklıklarında basılan SKETTK numunelerinin elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 32'deki eğrilere benzer özellikler göstermektedir. Ancak, nozul sıcaklığının numunelerin maksimum eğilme gerilmesini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu davranış, vakumsuz ortamda üretilen örneklerle yapılan çalışmalarla tutarlıdır (Fujihara vd., 2004; Ma vd., 2022). Üç farklı nozul sıcaklığında üretilen SKETTK numuneleri, yükleme altında değişken bir hasar davranışı sergilemiştir. Şekil 35(a)'da 400 °C'de basılan parçalarda ilk katman kırıldıktan sonra bir miktar daha yük taşımıştır. Ancak, diğer sıcaklıklarda üretilen numunelere kıyasla oldukça düşük maksimum eğilme gerilmesi ile sonuçlanmıştır. Bunun nedeni, güçlü katmanlar arası yapışma için 400°C'nin yeterli bir sıcaklık olmamasıdır. Ayrıca Şekil 35(b)'de 430 °C'de elde edilen birim şekil değiştirme oranı diğerlerine göre nispeten daha düşük görünmektedir.

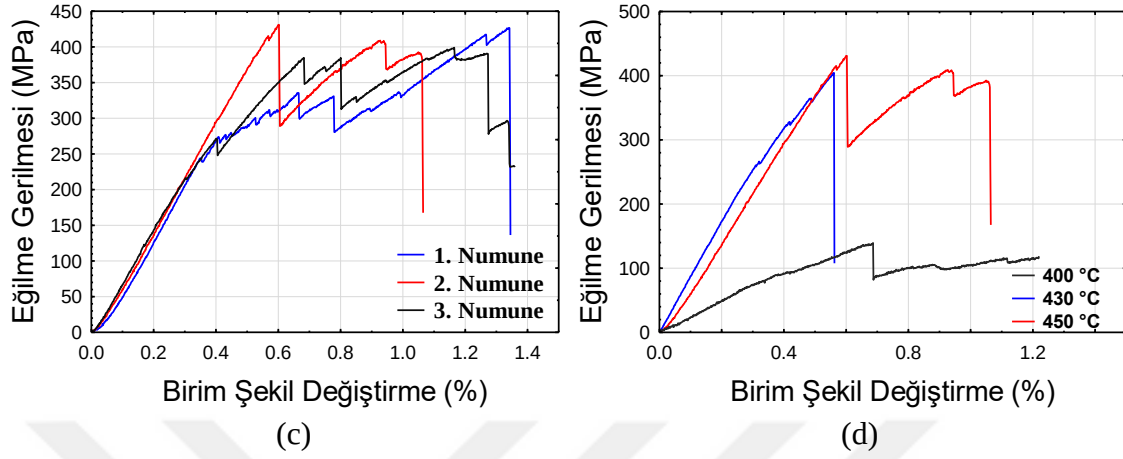
Numuneler kendi içlerinde tekrarlanabilirlik açısından oldukça tutarlı görünmektedir. Şekil 35(c)'de 450°C'de basılan parçalar için Şekil 32(a)'da kine benzer bir davranış gözlemlenmesine rağmen maksimum eğilme gerilmesi bir miktar artmıştır. Nozul sıcaklığının artmasıyla birlikte eğilme yükleme sırasında kopma öncesinde salınımın meydana gelmesi, katmanların yeterince yapışmadığını gösterir.

Özetle, Şekil 35'te, nozul sıcaklıklarının 430°C'den 450°C'ye artmasıyla eğilme gerilmesinde hafif bir artış göstermiştir. Ancak, yüksek sıcaklık, eğilme gerilmesinde artış meydana getirirken elastisite modülünde bir miktar azalma meydana getirmiştir. 400°C, 430 ve 450°C'de basılan numunelerin maksimum eğilme gerilmesi sırasıyla 143.46, 415.04 ve 419.00 MPa olarak elde edilmiştir. 450°C'de basılan numune, 400°C'de basılan numuneyle karşılaştırıldığında maksimum eğilme gerilmesinde %192'lik bir artış sergilemiştir. 400, 430 ve 450°C'de basılan numunelerin eğilme modülü sırasıyla 18.53, 89.13 ve 72.1 GPa'dır. 450°C'de basılan numune, 400°C'de basılan numuneyle karşılaştırıldığında eğilme modülünde %289'luk bir artış gösterir. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen numunelerin maksimum eğilme gerilmesi birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 35(d)'de ve sonuçların özeti Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 35. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 400, (b) 430, (c) 450°C, (d) farklı nozul sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 35'in devamı



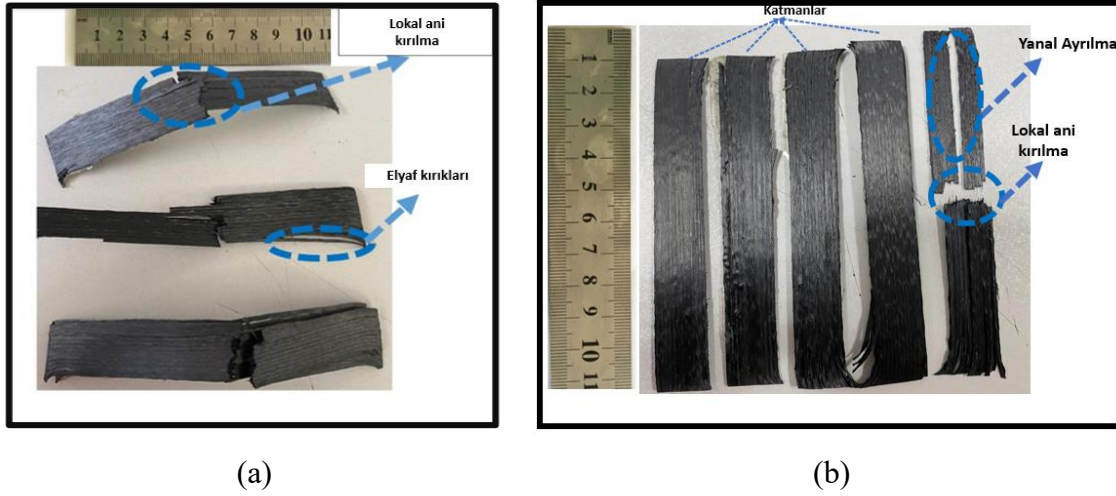
Tablo 5. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Nozul Sıcaklığı (°C)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
400	18.53(±1.67)	-	143.46(±7.32)	-
430	89.13(±21.05)	381**	415.04(±27.13)	189**
450	72.10(±5.14)	289**	419.00(±17.48)	192**

*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 400 °C nozul sıcaklığında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 36'da kırılan eğilme numuneleri gösterilmektedir. Şekil 36(a)'da görüldüğü gibi Şekil 34'te verilen kırılma mekanizmalarından aşamalı kırılma davranışında, yükleme arttıkça daha fazla lokalize delaminasyonun meydana geleceği öngörülmektedir. Yükleme arttıkça bu lokal delaminasyonlar büyüyerek katmanların tamamen ayrılmasına yol açarak bu işlem sırasında gerilme değerleri tekrarlanan davranışlar sergilemiştir. Nozul sıcaklığının artmasıyla birlikte, Şekil 36(b)'de gösterildiği gibi, bazı test numunelerinde kırılma mekanizmalarından lokal ani kırılma meydana geldiği tespit edilmesine rağmen tüm yükleme boyunca diğer bir kırılma mekanizma tipi olan ilerleyici kırılma mekanizması baskın olduğu gerilme-birim şekil değiştirme eğrilerinden tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük nozul sıcaklıklarında kırılma sırasında tüm katmanlar arasında tabakalara ayrılma meydana geldiği görülmüştür.



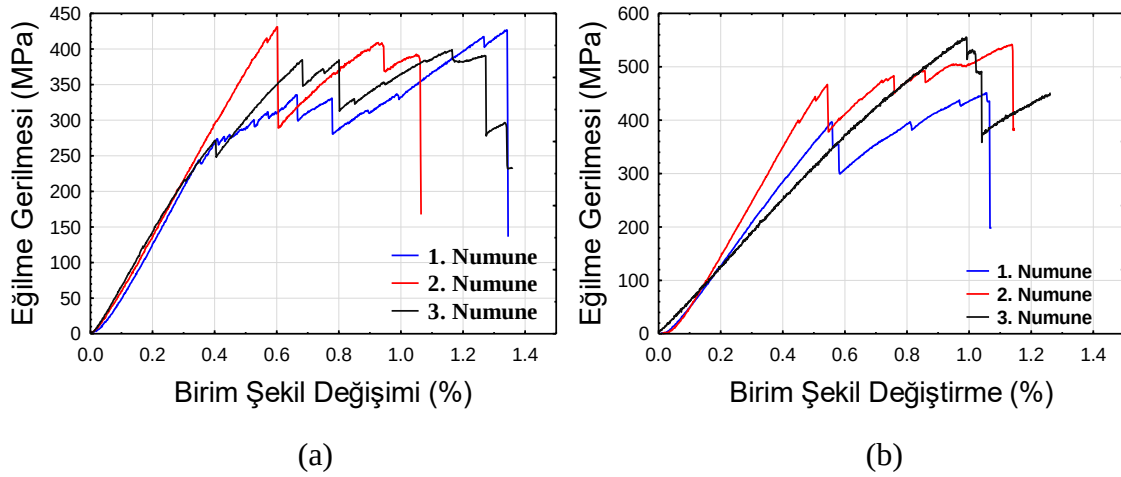
Şekil 36. Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı nozul sıcaklıklarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 400°C, (b) 450°C

Sonuç olarak, nozulun daha yüksek sıcaklıkları, katmanlar arasındaki moleküler difüzyonu kolaylaştırmak için gerekli enerjiyi ve zamanı sağlayabilir, bu da katmanlar arası bağlanma kuvvetinin gelişmesine neden olmaktadır (Sun vd., 2008). Buna karşın nozul sıcaklığındaki aşırı artış, polimerin yanmasına veya bozulmasına neden olabilir ve bu da polimerin yanmasına veya bozulmasına neden olabilmektedir (Ji vd., 2023). Böylece, mekanik özellikleri olumsuz etkilenmektedir. Ek olarak, sonuçlar nozul sıcaklığının artırılmasının delaminasyon hasarının azaltacağını düşünülmektedir.

3.2.3. Baskı Tablası Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi

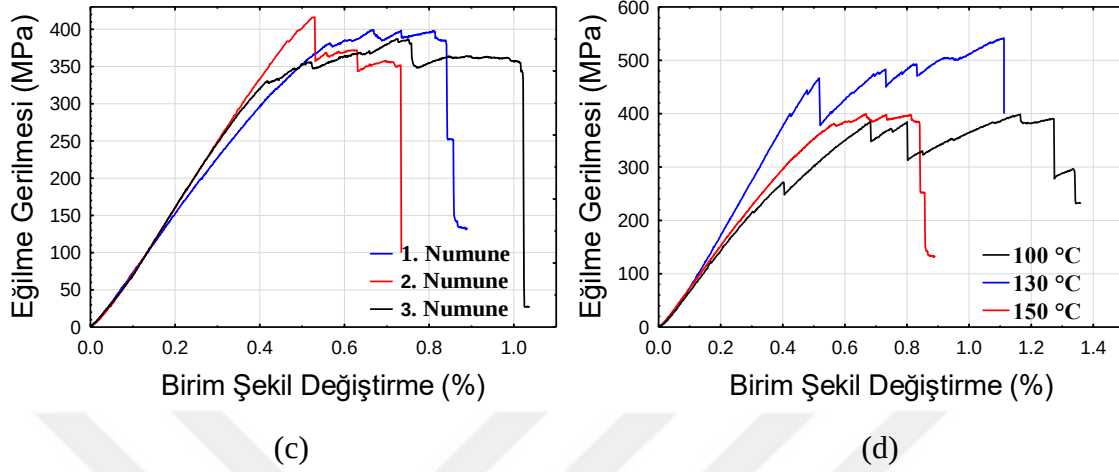
Baskı tablası sıcaklığı, SKETTK parçalarının baskı platformuna düzgün şekilde yapışması, katmanlar arasında güçlü bağlanma sağlanması ve son basılan parçanın boyutsal doğruluğu ve stabilitesinin sağlanması için önemli bir parametredir (Silva ve Rezende, 2013; Xiaoyong vd., 2017). Farklı baskı tablası sıcaklıklarının maksimum eğilme gerilmesi üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, 0.5 mbar vakum miktarı, 450°C nozul sıcaklığı ve 2.5 mm.sn⁻¹ baskı hızı sabit tutuldu. Şekil 37, farklı baskı tablası sıcaklıklarında basılan SKETTK eğilme numunelerinin elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafikleri gösterir. Şekil 37(a)-(c)'de elastik bölgede oldukça kararlı bir davranış sergilerken, Şekil 37(b)'de elastik bölgede zayıf tekrarlanabilirlik göstermektedir. Bunun, eklemeli imalatın doğasında bulunan, baskı işlemi sırasında oluşabilecek kusurlardan (gözeneklilik,

yapısal kusurlar vb.) kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 37(b)-(c)'de, 130 ve 150°C'lik baskı tablası sıcaklıklarında basılan numuneler, tabaka kırılma salınımları meydana gelse bile, gerilmesi önemli ölçüde azaltmadıkları kırılmadan önceki davranışları göstermektedir. Bunun nedeni, tüm katmanlar dikkate alındığında az sayıda katmanın hasar görmesi ve yükü taşıyan sağlam katmanların sayısının fazla olmasıdır. 100 ve 130°C'de elde edilen gerinim oranları benzer olmakla birlikte, 150°C'de nispeten düşük bir gerinim oranı elde edilmektedir. 100, 130 ve 150°C baskı tablası sıcaklıklarında basılan numunelerin maksimum eğilme gerilimi değerleri sırasıyla 419.00, 516.39 ve 401.01MPa'dır. 130°C'de basılan numune, 100°C'de basılan numuneye kıyasla maksimum eğilme gerilmesi %23'lük bir artış sergilemiştir. Ancak 150°C'de basılan numune, 100°C'de basılan numuneyle karşılaştırıldığında maksimum eğilme gerilmesi %4'lük bir azalma gösterir. 100, 130 ve 150°C nozul sıcaklıklarında basılan numunelerin eğilme modülü sırasıyla 72.1, 88.67 ve 85.55 GPa'dır. 100°C'de basılan numunenin eğilme modülünde, 130°C'de basılan numuneye kıyasla %23'lik bir artış vardır. Sonuçlar incelendiğinde maksimum eğilme gerilmesi 130°C'de basılan eğilme numunesinde ulaşılmıştır. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen numunelerin maksimum eğilme-gerilmesi birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 37(d)'de ve sonuçların özeti Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 37. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 100, (b) 130, (c) 150°C, (d) farklı baskı tablası ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 37'nin devamı



Tablo 6. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

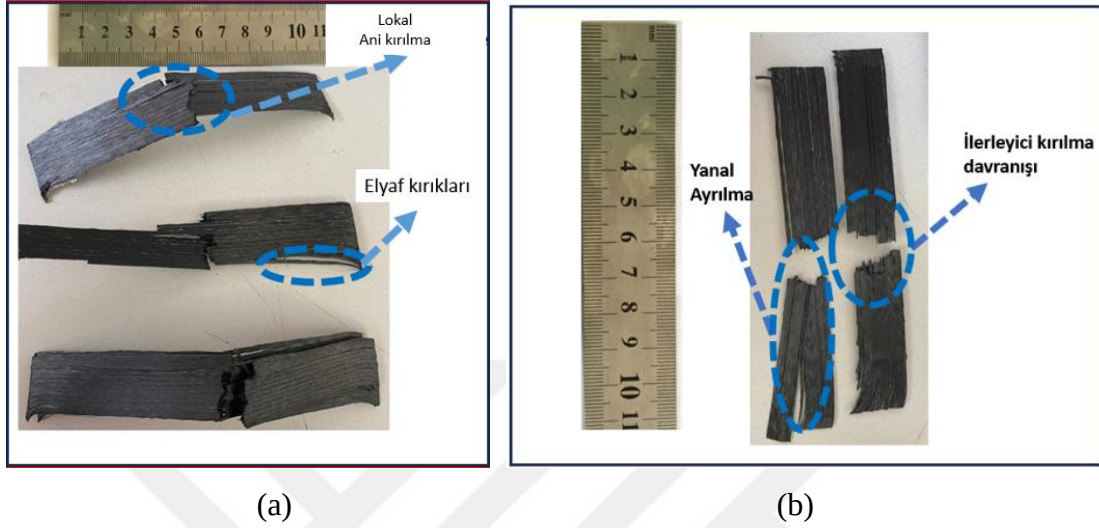
Baskı Tablası Sıcaklığı (°C)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
100	72.1 (±5.14)	-	419.00 (±17.48)	-
130	88.67(±24.92)	23**	516.39(±66.43)	23**
150	85.55(±1.52)	19**	401.01(±14.61)	-4**

*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 100°C baskı tablası sıcaklığında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 38'de kırılan eğilme numunelerini göstermektedir. Şekil 38(a)'da görüldüğü gibi, 100°C'deki numunelerde, bazı katmanlar Şekil 34'te verilen kırılma tiplerinden lokal ani kırılmalara benzer olsa da genel olarak ilerleyici kırılma davranışı sergilemiştir. Sonuç olarak daha zayıf bağlanma ve mekanik özellikler göstermiştir. Ayrıca, Şekil 38(b)'de gösterildiği gibi bazı test numunelerinde kırılma sırasında bazı elyafların ayrıldığı görülmektedir. Ayrıca burada da ilerleyici kırılma tipi tespit edilmiştir. 100°C'ye kıyasla 150°C'lik daha yüksek ısıtılmış yatak sıcaklığında katmanlar arası difüzyonun daha güçlü olması nedeniyle gerilmenin artacağı beklentisine rağmen, numunelerin mukavemet değerleri düşmüştür. Chadha vd. (2019), ısıtılmış yatak sıcaklığının daha da artmasıyla benzer bir düşüş gözlemlemiştir. Mevcut literatür çalışmalarına dayanarak, mukavemetteki azalmanın soğuma hızındaki azalmaya bağlı olabileceği ileri sürülmektedir (Lanzotti vd.,

2015). Ek olarak, vakum ortamıyla birlikte ortam sıcaklığındaki aşırı bir artış, sürekli elyaf bağlanması meydana gelmeden önce katmanlar arasında delaminasyon potansiyeline yol açmaktadır. Bu durumun ara tabaka gerilmesini zayıflatabileceği sonucuna varılmıştır.

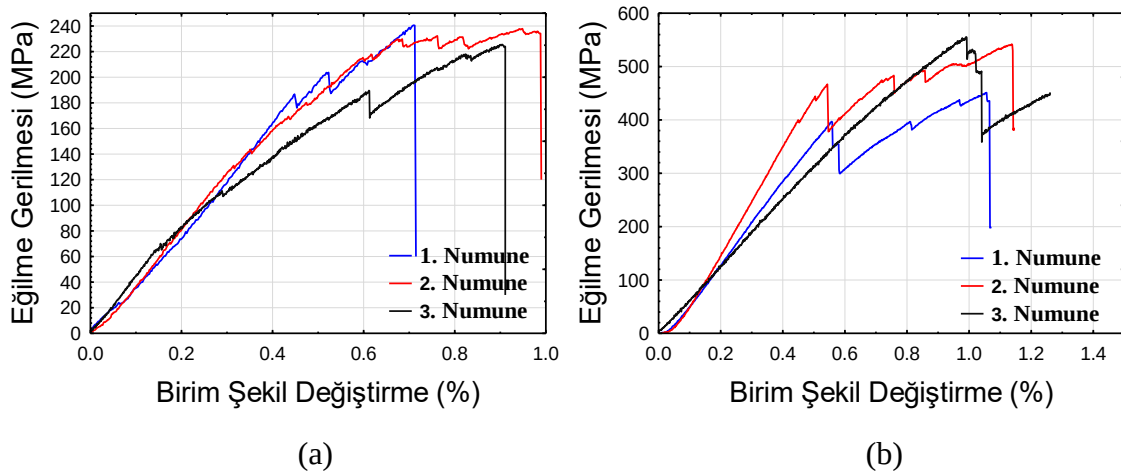


Şekil 38. Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı baskı sıcaklıklarında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 130°C, (b) 150°C

3.2.4. Baskı Hızının Eğilme Davranışına Etkisi

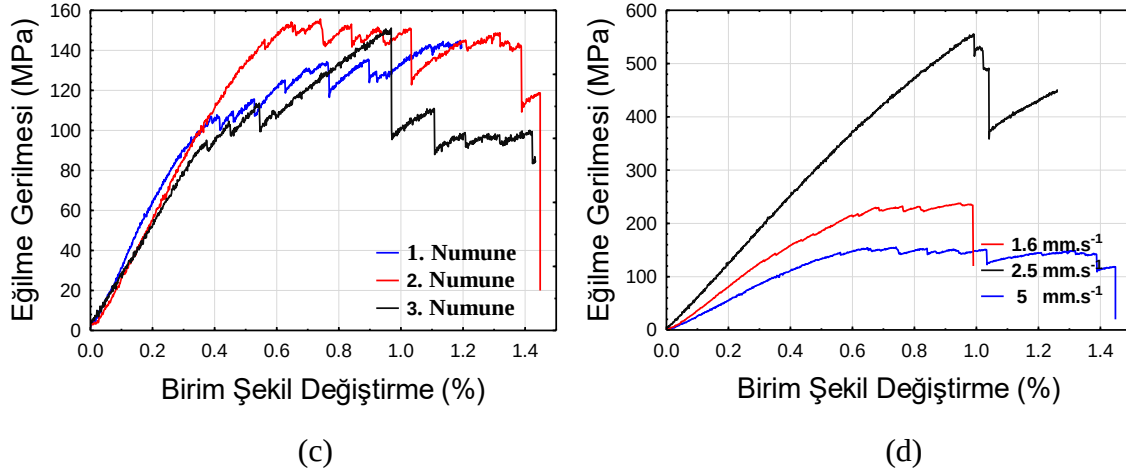
EYM baskılarında baskı hızı, baskı kalitesi ve baskı parçasının mekanik özelliklerini ciddi derecede etkilemektedir (Lanzotti vd., 2015). Daha yüksek bir yazdırma hızı, üretimi hızlandırabilir ancak baskı kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir ve katmanlar arası bağlanmayı zayıflatabilmektedir. (Tekinalp vd., 2014). Baskı hızının maksimum eğilme gerilmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, 0.5×10^{-4} mbar vakum miktarı, 450°C nozul sıcaklığı ve 130°C baskı tablası sıcaklığı sabit tutuldu. Üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 39'da verilmiştir. Düşük baskı hızlarında (1.67 ve 2.5 mm.sn⁻¹), yüksek eğilme gerilmesiyle kırılma meydana gelmiştir. Tüm eğrilerin kırılmadan önceki davranışları incelendiğinde ani düşme meydana gelmeden lineer olarak arttığı için kısmen delaminasyonun elimine oldukları görülmüştür. Bunun nedeninin önceki bölümlerde tartışıldığı gibi orta düzeydeki vakum miktarı olduğu düşünülmektedir. Özellikle 1.67 mm.sn⁻¹ baskı hızında üretilen numunelerde, 2.5 mm.sn⁻¹'e kıyasla maksimum eğilme geriliminde bir azalma görüldü. Bu etki muhtemelen polimerin daha uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından kaynaklanan kristallik değişiminden kaynaklanmaktadır. Kristallik değerleri hakkında daha fazla bilgi edinmek için DSC

analizleri yapıldı ve sonraki bölümlerde sunuldu. 1.67 mm.sn^{-1} baskı hızında daha az katmanlara ayrılma gözlemlendi ancak ortadan kaldırılamadı, bu da kısmen aşamalı kırılma davranışına neden olmuştur. 2.5 mm.sn^{-1} hızında üretilen numuneler, güçlü katmanlar arası difüzyon bağlanması için yeterli süre nedeniyle diğer baskı hızlarında üretilenlerle karşılaştırıldığında maksimum eğilme gerilmesi sergilemiştir. Bu baskı hızındaki numunelerin neredeyse tamamı ani kırılma davranışı gösterdi. 5 mm.sn^{-1} baskı hızı numune eğrileri, katmanlar arasındaki yetersiz bağlanma nedeniyle aşırı katmanlara ayrılma göstererek hasara neden olmuştur. Buna benzer şekilde Zhang vd. (W. Zhang vd., 2018b) ve Doshi vd. (Doshi vd., 2022) çalışmalarında baskı hızı arttıkça gerilmenin azaldığı sonucuna varmıştır. Tüm baskı hızlarında elde edilen birim şekil değiştirme oranları yaklaşık %1 oranıyla sonuçlanmıştır. 1.67 , 2.5 ve 5 mm.s^{-1} 'de basılan numunelerin maksimum eğilme gerilimi sırasıyla 237.40, 516.39 ve 150.58 MPa'dır. 2.5 mm.sn^{-1} 'de basılan numune, 1.67 mm.sn^{-1} 'de basılana kıyasla maksimum eğilme gerilmesinde %117'lik bir artış gösterirken, 5 mm.sn^{-1} 'de basılan numune ile 1.67 mm.sn^{-1} 'de basılan numune ile karşılaştırıldığında eğilme gerilmesinde %36'lık bir azalma sergilemiştir. 1.67 , 2.5 ve 5 mm.sn^{-1} olarak basılan numunelerin eğilme modülü sırasıyla 39.33, 88.67 ve 28.83 GPa olarak belirlenmiştir. 2.5 mm.sn^{-1} 'de basılan numune, 1.67 mm.sn^{-1} ile kıyasla eğilme modülünde %125'lik bir artış gösterirken, 5 mm.sn^{-1} basılan numune, 1.67 mm.sn^{-1} ile kıyasla eğilme modülünde %27'lük bir azalma göstermiştir. En yüksek eğilme gerilmesine 2.5 mm.sn^{-1} baskı hızında basılan eğilme numunesinde ulaşılmıştır. Sonuçların özeti Tablo 7'de verilmiştir.



Şekil 39. Farklı baskı hızlarında üretilen SKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 1.67 mm.sn^{-1} , (b) 2.5 mm.sn^{-1} , (c) 5 mm.sn^{-1} , ve (d) farklı baskı hızları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 39'un devamı



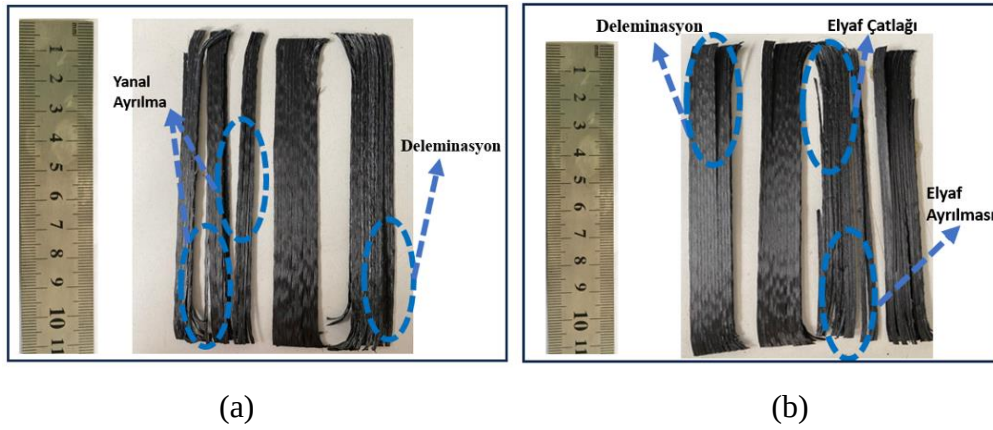
Tablo 7. Farklı baskı hızlarında üretilen SKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Baskı Hızı (mm.sn ⁻¹)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
1.67	39.33 (±2.95)	-	237.40 (±3.49)	-
2.5	88.67 (±24.92)	125**	516.39 (±66.43)	117**
5	28.83 (±3.68)	-27**	150.58 (±5.36)	-36**

*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 1.67 mm.sn⁻¹ baskı hızında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 40'ta kırılan eğilme numuneleri gösterilmektedir. Şekil 40(a) incelendiğinde, hızlı baskı sonucu katmanlar arasındaki zayıf bağlanma nedeniyle Şekil 34'te verilen kırılma tiplerinden delaminasyon kırılma davranışına benzer olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak Şekil 40(b), bazı test numunelerinde elyaf çatlağını ve katman şeritlerinin ve burada da delaminasyonun meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni hızlı baskının köşelerin yapışmadan kalkmasına yol açmasıdır. Ayrıca baskı hızının artmasıyla birlikte bir önceki katmana tam olarak yapışması için yeterli zaman kalmamakta ve bu da zayıf bir yapıya neden olmaktadır. Bu da mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler (T. C. Yang ve Yeh, 2020).



Şekil 40. Üç noktalı eğilme testi sonrası hasara uğrayan farklı baskı hızında baskılı SKETTK numuneleri; (a) 5 mm.sn^{-1} , (b) 1.67 mm.sn^{-1}

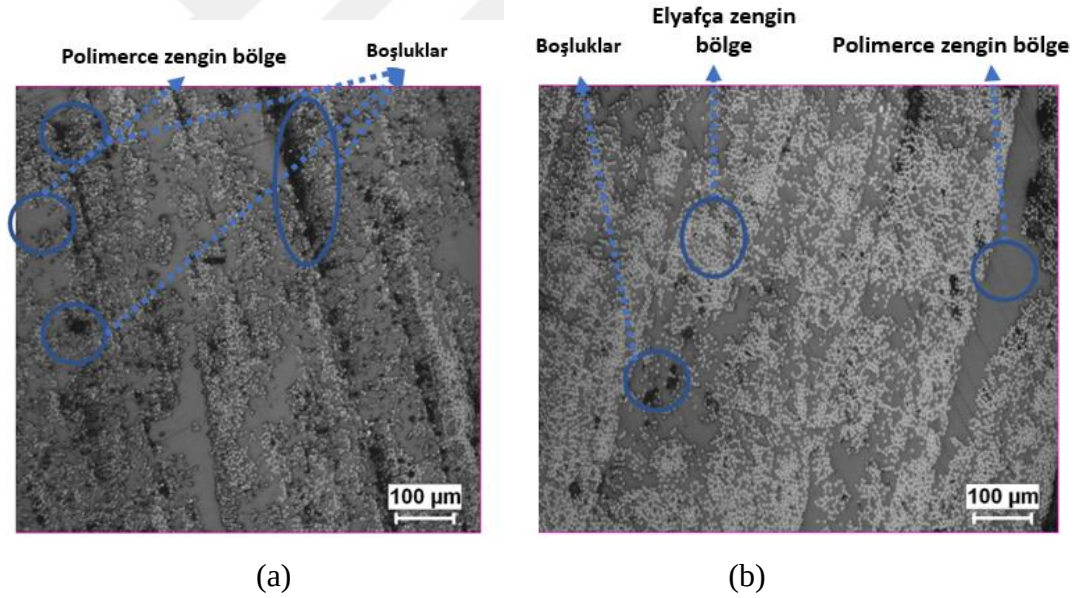
Genel olarak sonuçlarda değerlendirildiğinde, farklı vakum miktarlarında üretilen numuneler incelendiğinde 0.5 mbar 'da üretilen numune ile 100 mbar 'da üretilen numunelerin eğilme gerilmesinde arasında ciddi farklar olduğu ve maksimum eğilme gerilmesi 0.5 mbar 'da, farklı nozul sıcaklıklarında üretilen numuneler incelendiğinde, 430°C ve 450°C üretilen numunelerin maksimum eğilme gerilmesi nerdeyse benzer olup 400°C 'deki numunenin eğilmesi oldukça düşük olup maksimum eğilme gerilmesi 450°C 'de, farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen numuneler incelendiğinde, 100°C ve 150°C üretilen numunelerin maksimum eğilme gerilmesi nerdeyse benzer olup maksimum eğilme gerilmesi 130°C 'de, farklı baskı hızında üretilen numuneler incelendiğinde, en düşük eğilme gerilmesi 5 mm.sn^{-1} 'de ve en yüksek eğilme gerilmesi 2.5 mm.sn^{-1} 'de elde edilmiştir.

3.2.5. Mikroyapısal Analiz

SKETTK kompozit parçaların vakum ortamında baskısı sırasında hava moleküllerinin azalması nedeniyle konveksiyon ve gözeneklilik yoluyla ısı kaybının azalması beklenmektedir (O'Connor ve Dowling, 2018). Bu etkiyi daha iyi analiz edebilmek için bu bölümde optik mikroskop kullanılarak kesit görüntüleri analiz edilerek katmanlar arasındaki arayüzey bağları, fiber-matris karışımının kalitesi ve iç yapıdaki kusurlar incelenmiştir.

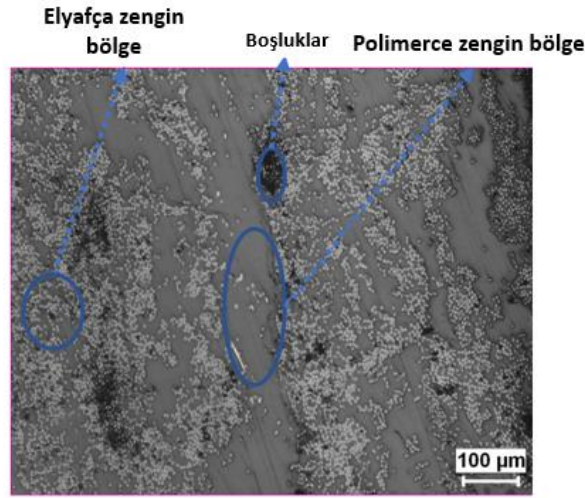
Vakum ortamında basılan parçaların kesit görüntüleri Şekil 41'de gösterilmektedir. Şekil 41(a)'da en düşük vakum miktarında (0.5 mbar) basılan parçanın kesit görünümü, polimer ve elyafların genel olarak homojen dağılımını göstermektedir. Bununla birlikte, baskı işlemi sırasında filamente uygulanan basınç nedeniyle katmanın bir tarafında birikme

eğilimine atfedilen hem elyaf hem de polimer açısından zengin bölgeler gözlenmektedir. Bu bölgeler, yükleme esnasında yükün büyük bir kısmını polimerin taşıması gibi dezavantajlar yaratmaktadır. Ek olarak, bazı bölgelerde gözenek meydana geldiği görülse de genel anlamda büyük miktarda boşlukların olmadığı dikkat çekmektedir. Bu süreksiz boşlukların eklemeli imalatın doğasında var olan baskı esnasında meydana geldiği düşünülmektedir (Gade vd., 2023). Şekil 41(b)'de, 450°C nozul sıcaklığıyla basılan parçanın enine kesit görünümü incelendiğinde, vakum miktarının optimizasyonu ve yüksek nozul sıcaklığı ile katmanlar arası ve katman içi boşlukların azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu numune de elyaf ve polimerce zengin bölgeler tespit edilmiş olsa da genel olarak homojen bir dağılım olduğu tespit edilmiştir. Şekil 41(c)'de 130°C baskı tablası sıcaklığında basılan parçanın kesit görünümü incelendiğinde, baskı esnasından kaynaklan bazı lokal boşluklar meydana gelse de genel hatlarıyla fazla bir boşluk tespit edilmemiştir. Ek olarak bir önceki numunelere benzer olarak elyaf ve polimerce zengin bölgeler tespit edilmiştir.



Şekil 41. Farklı koşullarda basılan SKETTK numunelerin optik görüntüleri: (a) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 400°C, baskı tablası sıcaklığı 100°C, baskı hızı 2.5 mm.sn⁻¹, (b) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 450°C, baskı tablası sıcaklığı 100°C, baskı hızı 2.5 mm.sn⁻¹, (c) vakum miktarı 0.5 mbar, nozul sıcaklığı 450°C, baskı tablası sıcaklığı 130°C, baskı hızı 2.5 mm.sn⁻¹

Şekil 41'in devamı



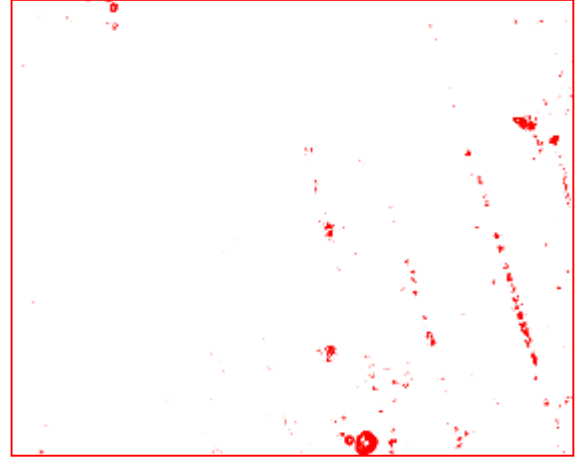
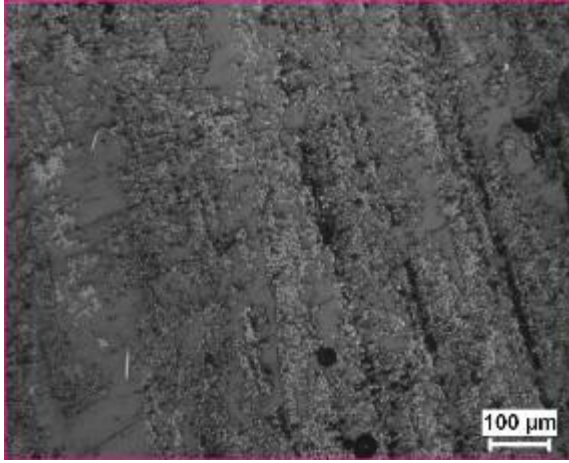
(c)

Şekil 42(a)-(c), çeşitli vakum miktarlarında gözenekliliği hesaplamak için kullanılan temsili görüntüleri gösterilmiştir. Gözeneklilik hesabında, bir numunenin farklı beş kesitinden ölçüm alınmıştır olup ortalama bir gözeneklilik oranı hesaplanmıştır. SKETTK parçalardaki gözeneklilik mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Chacón vd., 2019; Uşun ve Gümrük, 2021; Vatandaş vd., 2023; Wickramasinghe vd., 2020). Ek olarak boşluklar veya hava kabarcıkları gerilme konsantrasyonları lokal zayıflıklara yol açabilmektedir. Bu, parçanın gücünü ve esnekliğini azaltabilir. Analiz sonuçlarına göre 0.5 mbar da üretilen numunede %1.19 gözeneklilik oranı, 10 mbar da üretilen numunede %2.93 gözeneklilik oranı ve 100 barda üretilen numune için %5.27 gözeneklilik oranı hesaplanmıştır. En düşük gözeneklilik oranı 0.5 Mbar da üretilen numune için hesaplanmıştır ve Şekil 42(a)'da görüldüğü gibi gözeneklilik oranı azaldığında eğilme gerilimi diğer vakum miktarlarına göre daha yüksektir. Bu nedenle düşük gözenekliliğin eğilme gerilmesine olumlu katkı sağladığına inanılmaktadır. Vakum ortamı altında üretilen numunelerin gözenek oranlarının hesaplanmasından elde edilen sonuçlar Tablo 8'de özetlenmiştir.

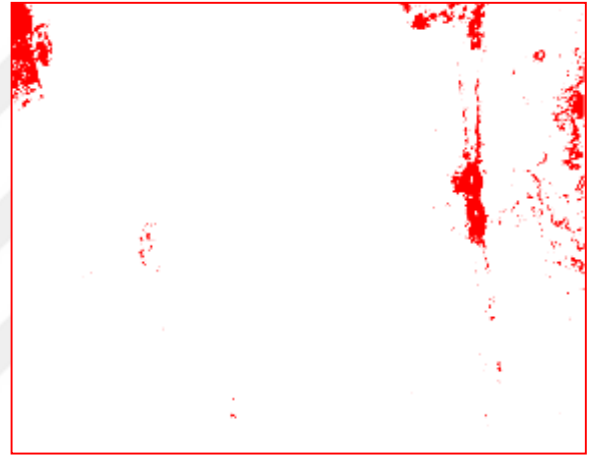
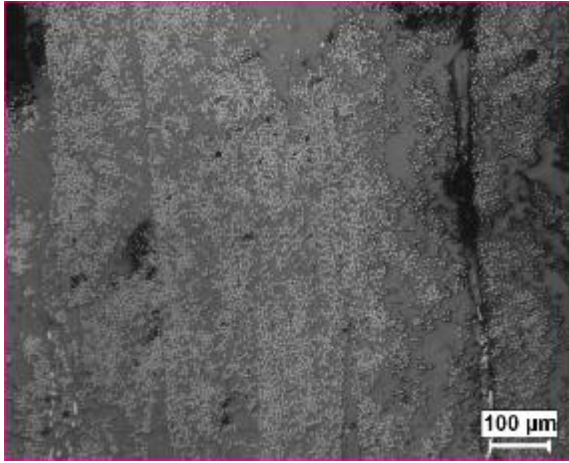
Tablo 8. Farklı vakum miktarlarında üretilen numunelerden hesaplanan gözeneklilik oranı

Vakum Miktarı (Mbar)	100	10	0.5
Gözenek Oranı (%)	5.27 (± 0.09)	2.93 (± 1.45)	1.19 (± 0.27)

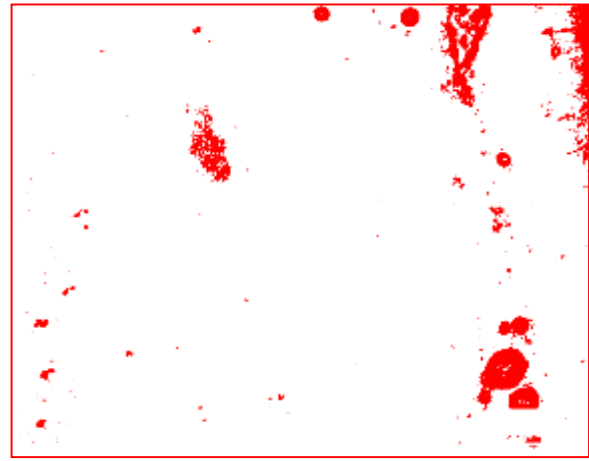
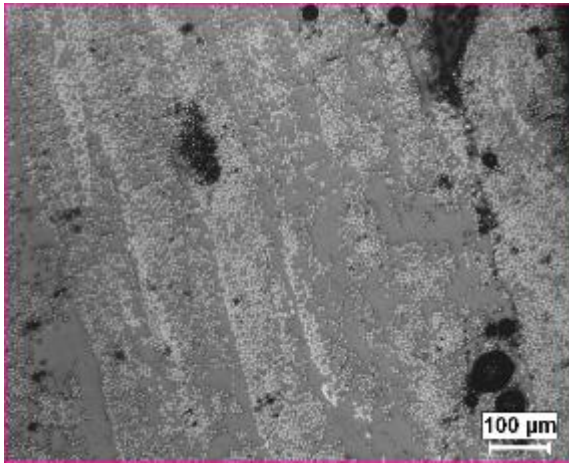
*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.



(a)



(b)



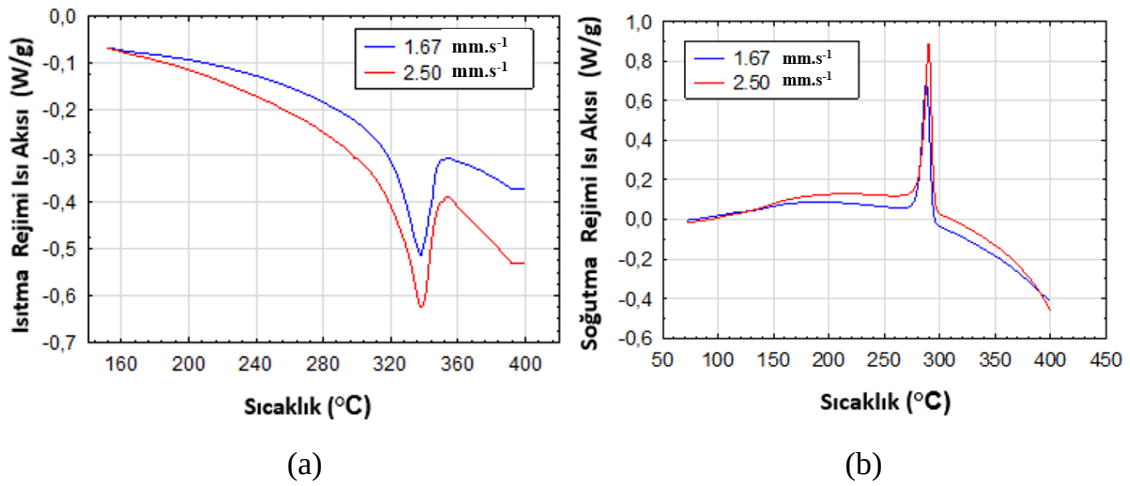
(c)

Şekil 42. Farklı vakum miktarlarında üretilen SKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) 0.5, (b) 10 ve (c) 100 mbar.

3.2.6. DSC Analizi

EYM ile üretilen parçalarda, düşük yazdırma hızında parçanın mekanik özellikleri artmaktadır (Krajangsawasdi vd., 2021). Ancak bu çalışmada baskı hızı düşürülmesine rağmen maksimum eğilme gerilmesi azalmıştır. Bu durumun nedeni için termal analiz yöntemlerinden DSC yöntemine başvurulmuştur. Çeşitli baskı hızlarına (1.67 ve 2.5 mm.sn⁻¹) sahip DSC eğrileri Şekil 43'te verilmiştir. DSC eğrilerinden elde edilen camsı geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, erime sıcaklığı değerleri Tablo 9'de özetlenmiştir. $\Delta H_{m,PEEK}$ = 130 J/g'lik (Blundell ve Osborn, 1983; Wang vd., 2020) %100 saf kristal PEEK için (ΔH_m), elyaf ağırlık yüzdesi (w) ve teorik erime entalpisi kullanılarak, kristallik oranı Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır (Naffakh vd., 2003). Tablodan görüldüğü gibi 2.5 mm.sn⁻¹ numunenin kristallik oranı artırılmıştır. Bunun nedeni, eklemeli imalat sırasında artan baskı hızının neden olduğu artan kesme hızı ve azalan soğutma hızıdır (McIlroy ve Graham, 2018; McIlroy vd., 2019; Nazari vd., 2016). Ek olarak, tüm numuneler için aynı matris ve fiber fraksiyonu kullanıldığından, her iki numune de çok benzer erime, cam geçiş ve kristalizasyon sıcaklıkları göstermiştir.

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{(1 - w)\Delta H_{m,PEEK}^0} \quad (5)$$



Şekil 43. Farklı baskı hızında basılan SKETTK numunelerinin DSC testinden elde edilen eğrileri; (a) ısıtma taraması ve (b) soğutma taraması

Tablo 9. DSC eğrilerinden hesaplanan sıcaklık ve kristallik değerleri

Numuneler	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)	Kristallik oranı (%)	Kristalleşme Sıcaklığı (°C)	Erime Sıcaklığı (°C)
1.67 mm.sn ⁻¹	147.89	21.02	288.07	338.49
2.5 mm.sn ⁻¹	149.56	27.45	290.53	338.19

Kristallik oranı, termoplastik matrisin katı haldeki moleküler düzenliliği ile ilgilidir (Chen vd., 2020; Kulkarni ve Narayan, 2021). Kristallik oranı malzemenin kimyasal yapısına, sıcaklık ve basınca maruz kalma süresine ve soğuma hızına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Makhlouf, 2017). Yüksek kristallığe sahip SKETTK parçaları yüksek mekanik mukavemet ve sertlik sunmaktadır (Ji vd., 2023). Buna dayanarak Bölüm 3.2.4'de tartışıldığı gibi 1.67 mm.sn⁻¹ baskı hızında üretilen numunenin 2.5 mm.sn⁻¹ baskı hızında üretilen numuneye göre daha düşük eğilme gerilmesinin nedeni, 1.67 mm.sn⁻¹ baskı hızında azalan kristallik ve katmanlar arasındaki zayıf difüzyondan kaynaklandığına inanılmaktadır. Benzer şekilde Jayswal ve Adanur (2022), kristallığı artırarak mekanik özelliklerin iyileştiğini gözlemlediler; bu da polimer zincir hareketliliğini artırarak biriken katmanlar arasında güçlü bağlanmayı desteklemiştir.

3.3. Vakum Ortamında Üretilen KKETTK Numunelerin Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri

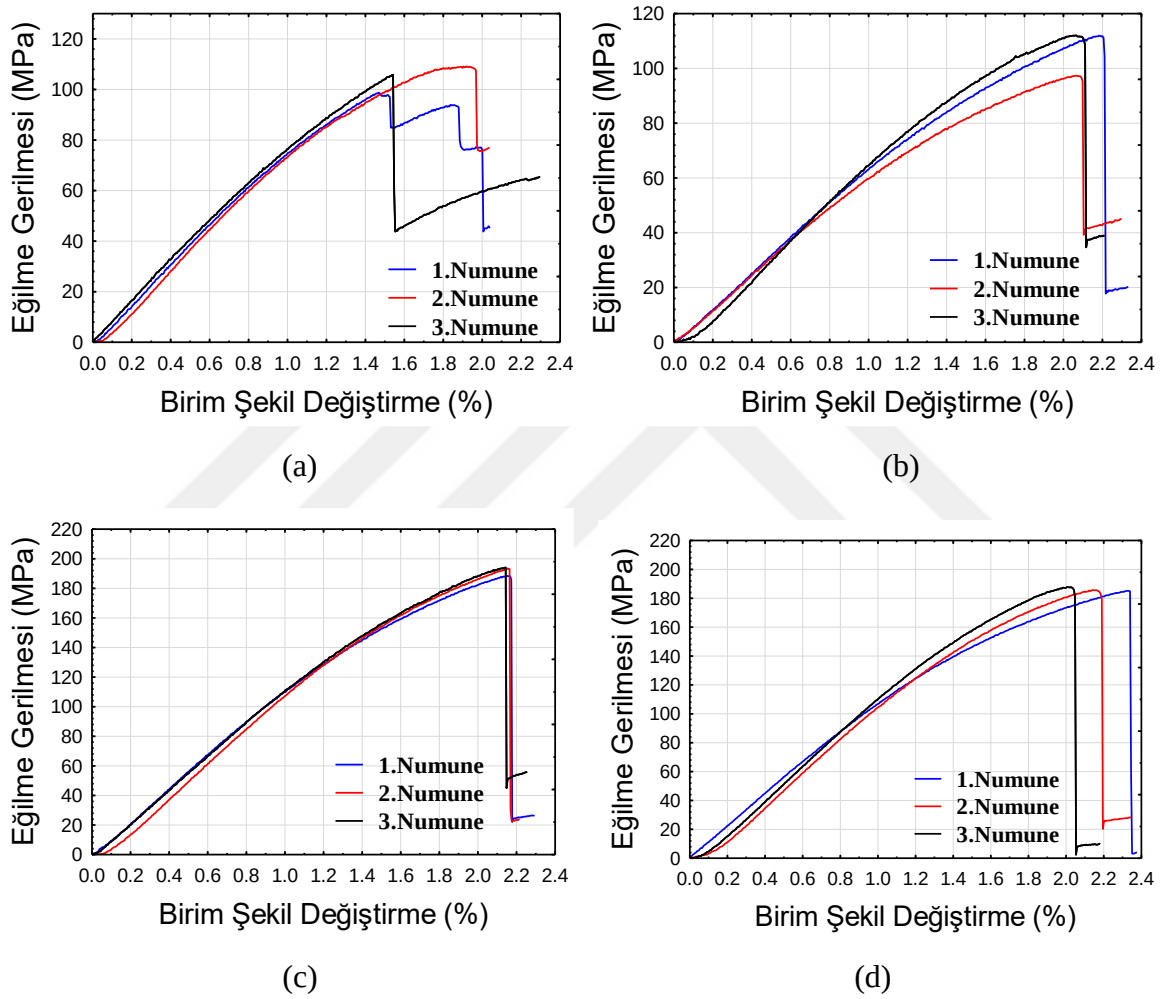
Bu bölümde vakum ortamında üretilen KKETTK numunelerin baskı parametrelerinin eğilme davranışına etkileri ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ayrıca, mikroyapısal özellikler optik görüntüler kullanılarak analiz edilmiş, hasar mekanizmaları yorumlanmış ve gözeneklilik oranları hesaplanmıştır.

3.3.1. Vakum Ortamının Eğilme Davranışına Etkisi

Atmosferik bir ortamda, hava moleküllerinin varlığından dolayı ısı, iletkenlik, konveksiyon ve radyasyon yoluyla aktarılmaktadır. Vakum ortamında ise, ısı transferi iletim yoluyla yalnızca EYM içinde temas halindeki parçalarda gerçekleşmektedir (O'Connor ve Dowling, 2018). Vakum da hava moleküllerinin yokluğu nedeniyle konveksiyon yoluyla ısı transferi mümkün değildir. Ancak, radyasyon yoluyla ısı transferi devam etmektedir. Bu durumda, iletim ve radyasyon ana ısı transfer mekanizmaları haline gelmektedir. Bu

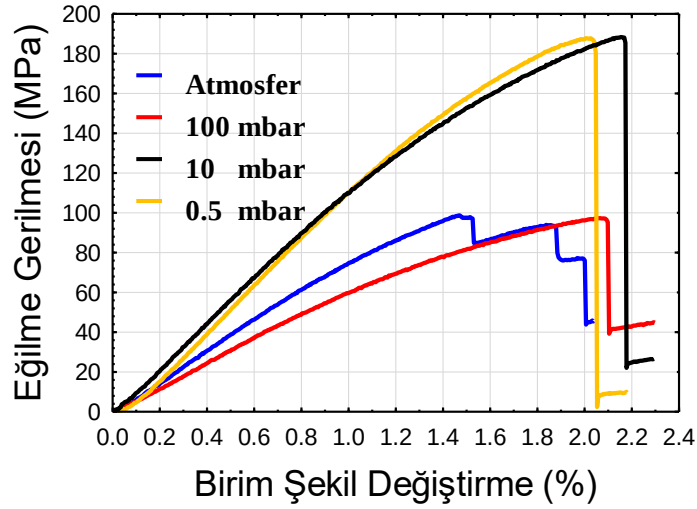
çalışmada PEEK gibi yüksek sıcaklık polimerlerinin eklenmesiyle üretilen katlar arasında güçlü bir bağ oluşturmak için sıcak bir ortam gereklidir (Li vd., 2021; Ritter vd., 2023; Sikder vd., 2022). Atmosferik ortamda dış bir ısı kaynağı olmaması durumunda, katmanlar arasında yeterli yapışma gerçekleşmeyebilir (Hoshikawa vd., 2021; Omuro vd., 2017). Vakum ortamında ise, parçalar vakum odasında sıkışıp kalan ısı ile daha yavaş soğur ve konveksiyon yoluyla ısı kaybı azalır, bu da baskı sırasında katların daha iyi yapışmasını sağlamaktadır (S. Maidin vd., 2017; Ortega Varela de Seijas vd., 2024). Farklı vakum miktarlarının maksimum eğilme gerilmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, 430 °C nozul sıcaklığı, 130°C tabla sıcaklığı ve 50 mm.sn⁻¹ baskı hızı sabit tutularak üç noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirildi. Farklı vakum miktarlarında basılan KKETTK eğilme numuneleri üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 44'te verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, kompozit numuneler için doğrusal elastik deformasyon ve ardından kalıcı hasar ile sonuçlanan tipik bir davranış sergilemektedir (Ding vd., 2023; Rarani vd., 2019; Z. Liu vd., 2019; Yu vd., 2019). Ayrıca bütün vakum miktarlarındaki eğriler incelendiğinde tekrarlı numunelerin üretilmesi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 44(a)'da atmosfer ortamında üretilen numunelerde delaminasyon meydana gelmiştir. Delaminasyonun nedeni, atmosfer ortamındaki EYM yöntemi ile yapılan baskılarda ortam sıcaklığının düşük seviyede tutulmasıyla katmanlar arası zayıf bağlanma meydana gelmesidir. Zanjani vd. (2020), düşük ortam sıcaklıklarında nozul ile baskı ortamı arasında önemli bir sıcaklık farkı olduğunu bulmuşlardır, bu da PEEK zincirlerinin hızlı soğumasına (kusurlu kristalleşme) ve eğilme gerilmesinin düşüşüne neden olmaktadır. Ayrıca, Rodzeń vd. (2021), ortam sıcaklığını kademeli olarak artırarak CF/PEEK'ı bir 3D yazıcı ile bastırılmış ve daha yüksek ortam sıcaklıklarında daha yüksek eğilme gerilmesine ulaşmıştır. Şekil 44(b)-(c)'de vakumun artmasıyla maksimum eğilme gerilmesinde bir artış meydana gelmiştir. Bu, daha sıcak bir ortam ve artan vakum miktarı ile ilişkilendirilen katlar arasındaki bağın güçlenmesinin bir işaretidir. 0.5 mbar'da elde edilen maksimum eğilme gerilmesi için elde edilen eğilme-birim şekil değiştirme eğrilerinin incelenmesinde, katmanların ani bir şekilde kırıldığı, yani delaminasyon meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Gerilme değeri açısından değerlendirildiğinde, atmosfer, 100, 10, 0.5 mbar vakum miktarlarında yazdırılan numunelerin eğilme gerilmeleri sırasıyla 103.61, 107.11, 184.61 ve 186.24 MPa olarak elde edilmiştir. 0.5 mbar'da basılan numune, atmosfer şartlarında yazdırılan numuneyle karşılaştırıldığında eğilme gerilmesinde %80'lik bir artış sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, atmosfer, 100, 10 ve 0.5 mbar vakum miktarlarında

yazdırılan numunelerin eğilme modülü 7.84, 5.99, 11.28 ve 10.93 GPa olarak bulunmuştur. 0.5 mbar'da yazdırılan numune atmosfer şartlarında yazdırılan numuneye kıyasla eğilme modülünde %39'lük bir artış göstermiştir. Sonuçlar değerlendirdiğinde, vakum ortamında 3D yazdırma sonucunda eğilme performansı üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir. Farklı vakum miktarlarında üretilen numunelerin eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 44(e)'de ve sonuçların özeti Tablo 10'da verilmiştir.



Şekil 44. Farklı vakum miktarlarında üretilen KETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) atmosfer, (b) 100, (c) 10, (d) 0.5 mbar, (d) farklı vakum miktarları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 44'ün devamı



(e)

Tablo 10. Farklı vakum miktarlarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Vakum Miktarı (mbar)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
0.5	10.93(±0.66)	39**	186.24(±1.33)	80**
10	11.28(±0.42)	43**	184.61(±14.90)	78**
100	5.99(±0.63)	-23**	107.11(±8.51)	3**
Atmosfer	7.84(±0.62)	-	103.61(±17.43)	-

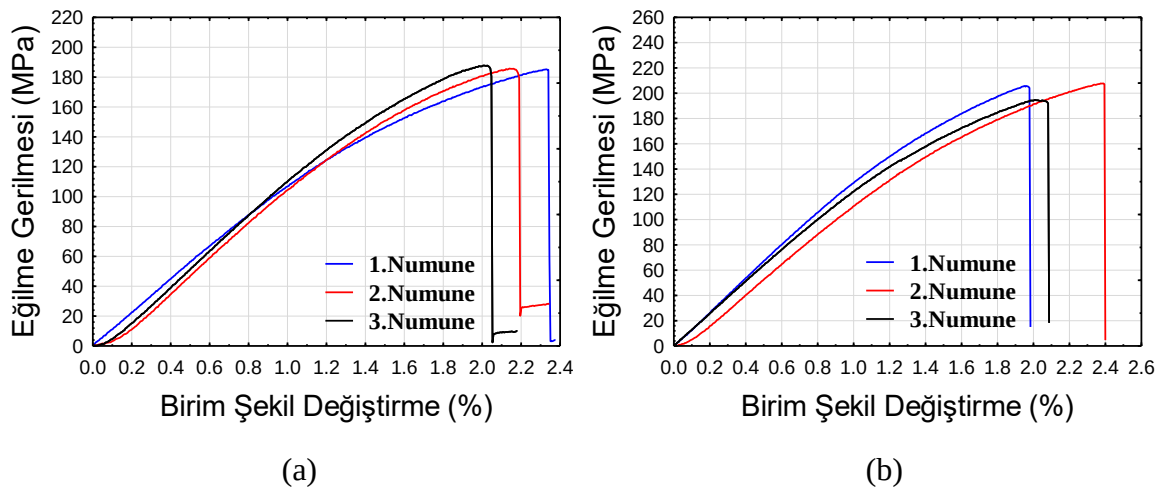
* Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler atmosfer ortamında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

3.3.2. Nozul Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi

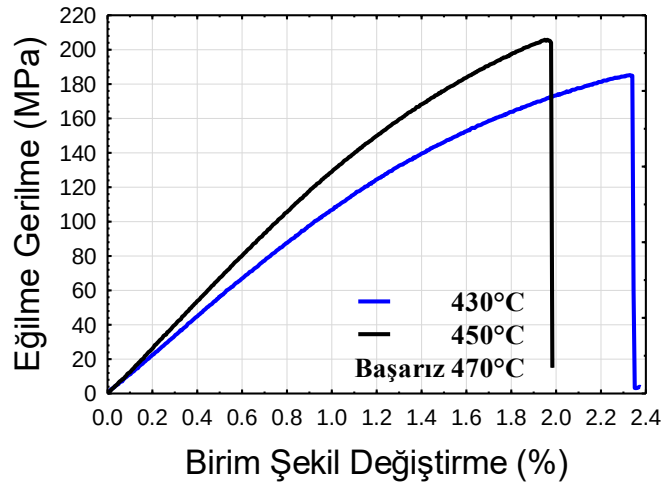
Farklı nozul sıcaklıklarının maksimum eğilme gerilmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, 0.5 mbar vakum miktarı, 130°C tabla sıcaklığı ve 50 mm.sn⁻¹ baskı hızı sabit tutuldu. Çeşitli nozul sıcaklarında yazdırılan KKETTK eğilme numuneleri üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 45'te verilmiştir. 430°C ve 450°C numuneler başarı ile yazdırılmış olup 470°C nozul sıcaklığında üretilen numune nozulda tıkanma meydana gelmesi ile başarısızlıkla sonuçlanmıştır. 470°C sıcaklıkta nozul tıkanmasının ana nedeni, ekstrüderdeki sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki ayrımın eksikliğidir. Su soğutmalı bir ekstrüder tasarlanmasına rağmen, 470°C çok yüksek

bir sıcaklıktır (Tlegenov vd., 2018). Soğuk bölgenin bu sıcaklıkta su ile soğutulmasına rağmen, tıkanma hala meydana gelmiştir. Bu sorunu çözmek için suyun akış hızı artırılmıştır; ancak tıkanma çözülmemiştir. Şekil 45(a) incelendiğinde, 430°C'de baskı yapılmasından dolayı delaminasyon hatası olmadığı umut vericidir. Ayrıca, 430°C'de üretilen örnekler, elastik aralıkta ve gerilmede tutarlı bir davranış sergilemektedir. Ancak, sıcaklıkta hafif bir artışla, Şekil 45(b), 430°C'ye kıyasla 450°C'de gerilmenin hafifçe arttığını göstermektedir. Wang vd. (2020), nozul sıcaklığı 400°C'den 440°C'ye çıktıkça CF/PEEK ve GF/PEEK'in eğilme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bu nedenle, elde edilen sonuçların literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar gerilme değeri açısından değerlendirildiğinde, 430°C ve 450°C yazdırılan numunelerin eğilme gerilmeleri sırasıyla 186.24 ve 202.75 MPa olarak elde edilmiştir. 450°C'da basılan numune, 430°C yazdırılan numuneye kıyasla eğilme geriliminde %9'lık bir artış sergilemiştir. Ayrıca, 430 ve 450°C yazdırılan numunelerin eğilme modülü 10.93 ve 13.54 GPa olarak bulunmuştur. 450°C basılan numune 430°C yazdırılan numuneye kıyasla eğilme modülünde %51'lük bir artış gösterir. Sonuçlar değerlendirdiğinde, vakum miktarının bir önceki bölümde optimum seviyesi tespit edilmesi ve nozul sıcaklığının bir miktar artırılması ile de mukavemet artışı başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen numunelerin eğilme gerilmesi birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 45(c)'de ve sonuçların özeti Tablo 11'de verilmiştir.



Şekil 45. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen KETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 430, (b) 450°C, (d) farklı nozul sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 45'in devamı



(c)

Tablo 11. Farklı nozul sıcaklıklarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Nozul Sıcaklığı (°C)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
430	10.93(±0.66)	-	186.24(±1.33)	-
450	13.54(±1.65)	51**	202.75(±7.03)	9**
470	Başarısız	Başarısız	Başarısız	Başarısız

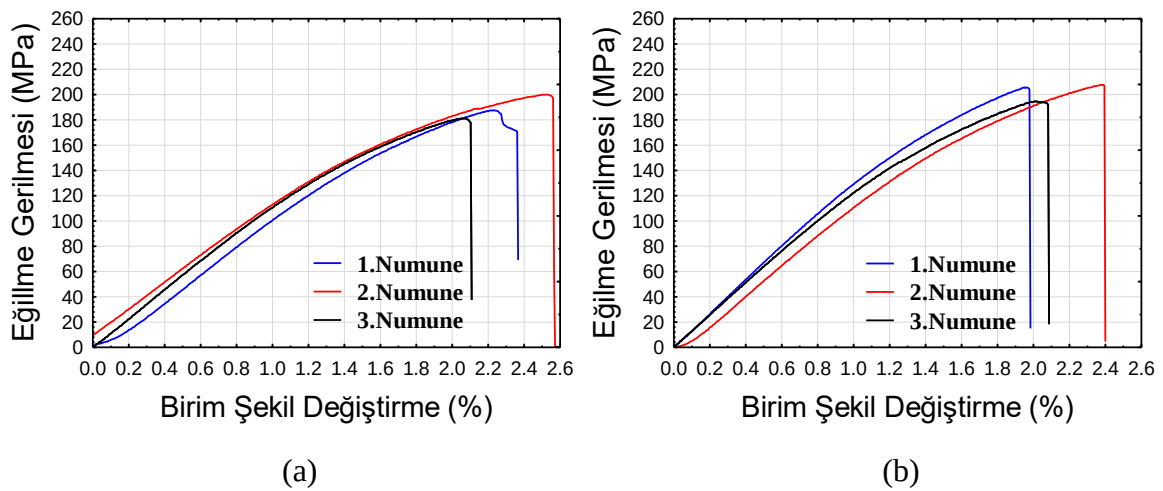
*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 430°C nozul sıcaklığında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

3.3.3. Baskı Tablası Sıcaklığının Eğilme Davranışına Etkisi

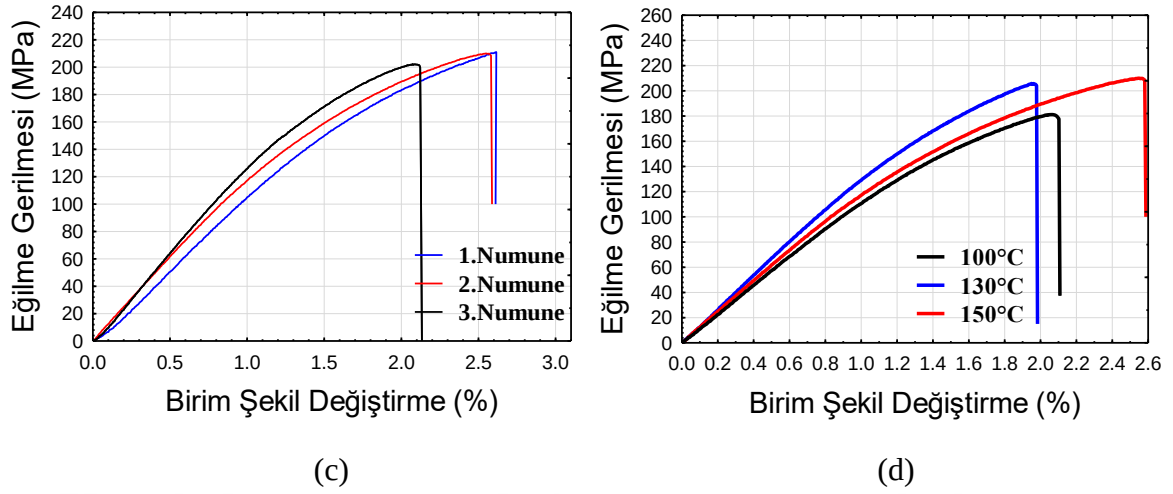
Çeşitli tabla sıcaklıklarının eğilme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmak için, 0.5 mbar vakum miktarı, 450°C nozul sıcaklığı ve 50 mm.sn⁻¹ baskı hızı sabit tutuldu. Çeşitli tabla sıcaklarında yazdırılan KKETTK eğilme numuneleri üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 46'da verilmiştir. Şekil 46(a) incelendiğinde, 100°C tabla sıcaklığında üretilen numuneler delaminasyon meydana gelmeden ani kırılma davranışı göstermişlerdir. Ayrıca, üç farklı test numunelerinin elastik bölgelerinin kararlı olması dikkat çekmiştir. Bunlara ek olarak birim şekil değiştirmeler incelendiğinde bazı farklar tespit edilmiştir. Bunun sebebi eklemeli imalattaki bazı kalıtsal sorunlardan olduğu düşünülmektedir (Madrid vd., 2019; Wong ve Hernandez, 2012). 130

°C tabla sıcaklığında üretilen numuneler Şekil 46(b)'de gösterilmiş olup nerdeyse aynı birim şekil değiştirme özelliğine sahip olduğu tespit edilmiş ve numuneler ani kırılma davranışı göstermişlerdir. Son olarak Şekil 46(c)'de görüldüğü gibi 150°C tabla sıcaklığında üretilen numunelerde maksimum gerilme elde edildiği gözlemlenmiş ve ani kırılma meydana gelmiştir. Wang vd. (2019), 3D yazıcı ile PEEK baskısı yaparken, daha yüksek bina tablası sıcaklıklarında üretilen PEEK baskılarının komşu filamentler arasında daha güçlü arayüz bağlanma sergilediğini bulmuştur. Bu fenomen, daha yüksek bina tablası sıcaklıklarında moleküler difüzyonun daha uzun süreli olmasına bağlanmaktadır. Ayrıca, boşlukların sayısının azalmasına da neden olur (Zanjaniam vd., 2020). Elde edilen sonuçlar gerilme değeri açısından değerlendirildiğinde, 100, 130, ve 150°C yazdırılan numunelerin eğilme gerilmeleri sırasıyla 189.54, 202.75 ve 215.32 MPa olarak elde edilmiştir. 150°C tabla sıcaklığında yazdırılan numune, 100°C yazdırılan numuneye kıyasla eğilme gerilmesinde %14'lik bir artış sergilemiştir. Ayrıca, 100, 130, ve 150°C yazdırılan numunelerin eğilme modülü 9.74, 13.54, ve 11.61 GPa olarak bulunmuştur. 150°C tabla sıcaklığında yazdırılan numune 100°C yazdırılan numuneye kıyasla eğilme modülünde %19 bir artış göstermiştir. Sonuçlar değerlendirdiğinde, vakum miktarı, nozul sıcaklığı bir önceki bölümlerde optimum seviyesi tespit edilmesi ve baskı tablasının sıcaklığı bir miktar artırılması ile de mukavemet artışı başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Farklı baskı tablası sıcaklığında üretilen numunelerin eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması Şekil 46(d)'de ve sonuçların özeti Tablo 12'de verilmiştir.



Şekil 46. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen KETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 100, (b) 130, (c) 150°C, (d) farklı baskı tablası sıcaklıkları için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 46'nin devamı



Tablo 12. Farklı baskı tablası sıcaklıklarında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Tabla sıcaklığı (°C)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülündeki Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
100	9.74(±0.82)	-	189.54(±9.59)	-
130	13.54(±1.65)	39.01**	202.75(±7.03)	7**
150	11.61(±0.86)	19**	215.32(±16.38)	14**

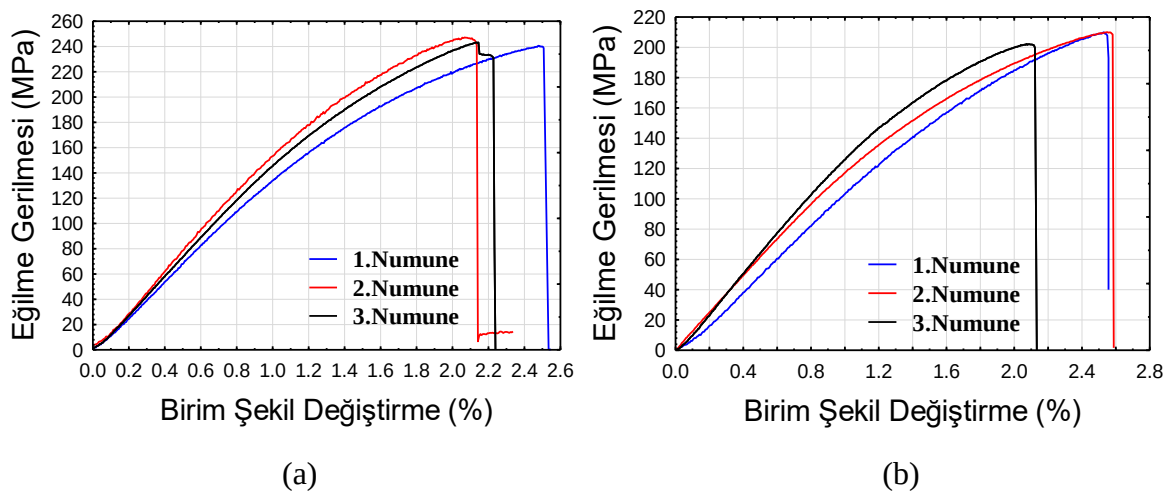
*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 100°C baskı tablası sıcaklığında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

3.3.4. Baskı Hızının Eğilme Davranışına Etkisi

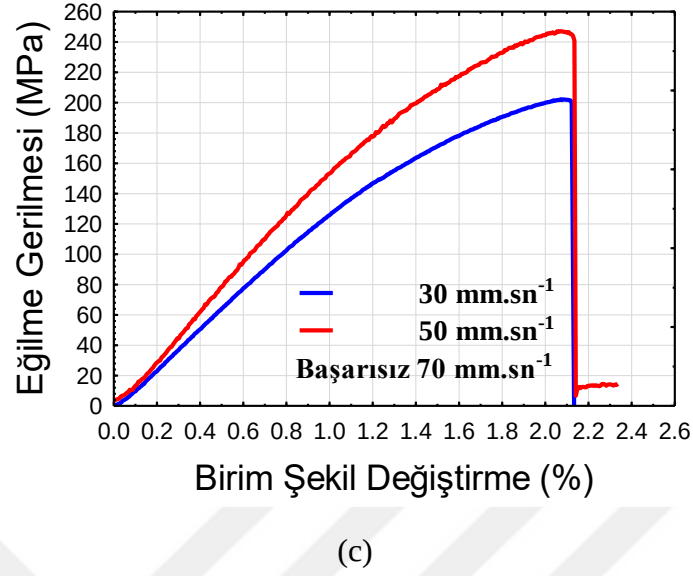
Farklı baskı hızının maksimum eğilme gerilmesi üzerindeki etkisini araştırmak için, 0.5 mbar vakum miktarı, 450°C nozul sıcaklığı ve 150°C tabla sıcaklığı sabit tutulmuştur. Çeşitli baskı hızında yazdırılan KKETTK eğilme numuneleri üç noktalı eğilme testlerinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 47'te verilmiştir. Hızlı bir yazdırma hızı, üretim sürecini hızlandırabilir, ancak baskı kalitesini olumsuz etkiler ve katmanlar arası zayıf bağlanmaya neden olur (Spoerk vd., 2017; Wang vd., 2019). Şekil 47(a)'da 30 mm.sn⁻¹ baskı hızında üretilen numuneler 50 mm.sn⁻¹ hızla üretilen numunelere kıyasla daha güçlü katmanlar arası bağlanma ile sonuçlanmış olup ani kırılma meydana gelmiştir. EYM baskısında, düşük baskı hızlarında, komşu filamentler arasında güçlü bağlanma ve etkileşim sağlar, bu da eğilme gerilmesinde artışa neden olmaktadır (Gao vd., 2022). Ancak, baskı hızı çok yavaşladığında, önceki katmanlardaki polimer moleküllerinin

soğuması için zaman uzar ve üstteki erimiş haldeki malzemenin daha düşük bir sıcaklıkta soğumasına neden olmaktadır. Bu durumda, katmanlar arasındaki moleküler hareket farklılıklarından kaynaklanan zayıf yapışma meydana gelir (Faes vd., 2016). Yüksek baskı hızları baskı verimliliğine katkıda bulunur; ancak, erimiş malzemenin katılaşması için (plastikleşme) zaman yetersizdir, bu da kalıntı gerilmede önemli bir artışa neden olmaktadır (Deng vd., 2018). Bunun ana sebebi, yavaş yazdırma boyunca bir önceki katman ile olan bağ için yeterli süre tanınarak bu sayede güçlü bir bağ oluşturmaktadır. Şekil 47(b)'de 50 mm.sn⁻¹ hızla üretilen numuneler kendi içlerinde bazı tutarsızlıklar gösterse de mukavemet açısından oldukça yüksektir, ancak 30 mm.sn⁻¹ kadar tutarlı değildir. Bunlara ek olarak 70 mm.sn⁻¹ hızında KKETTK parçalar üretilmeye çalışılmıştır. Ancak baskı hızının çok yüksek olmasından dolayı baskı bozulma ve nozulda tıkanmalar meydana gelmiştir. Bunun başlıca sebebi düşük nozul çapında (0.4mm) ve yüksek elyaf içeren KKETTK filament kullanılması, yüksek baskı hızlarında tıkanmaya neden olmuştur. Bu bağlamda baskı hızının optimum çalışma aralığı tespit edilmiş olup literatüre katkıda bulunulmuştur. Elde sonuçlar gerilme değeri açısından değerlendirildiğinde, 30 ve 50 mm.sn⁻¹ yazdırılan numunelerin eğilme gerilmeleri sırasıyla, 243.33 ve 215.32 MPa olarak elde edilmiştir. 50 mm.sn⁻¹ baskı hızında yazdırılan numunelerin eğilme gerilmesi, 30 mm.sn⁻¹ yazdırılan numunelere kıyasla %11 düşmüştür. Ayrıca, 30 mm.sn⁻¹ ve 50 mm.sn⁻¹ yazdırılan numunelerin eğilme elastisite modülleri sırasıyla 14.69 GPa ve 9.83 GPa olarak bulunmuştur. 50 mm.sn⁻¹ baskı hızında yazdırılan numunelerin eğilme elastisite modülü, 30 mm.sn⁻¹ yazdırılan numunelere kıyasla %33 oranında düşmüştür. Sonuçların özeti Tablo 13'te verilmiştir.



Şekil 47. Farklı baskı hızında üretilen KKETTK numunelerinin üç nokta eğilme testinden elde edilen eğriler; (a) 30 mm.sn⁻¹, (b) 50 mm.sn⁻¹, (d) farklı baskı hızı için ortalama eğrilerin karşılaştırılması

Şekil 47'nin devamı



Tablo 13. Farklı baskı hızında üretilen KKETTK parçaların üç nokta eğilme testi sonuçlarının özeti

Baskı Hızı (mm.sn ⁻¹)	Eğilme Elastisite Modülü (GPa)	Eğilme Elastisite Modülü Değişim (%)	Maksimum Eğilme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Eğilme Gerilmesindeki Değişim (%)
30	14.69(±1.22)	-	243.33(±3.51)	-
50	9.83(±1.27)	-33**	215.32(±16.38)	-11**
70	Başarısız	Başarısız	Başarısız	Başarısız

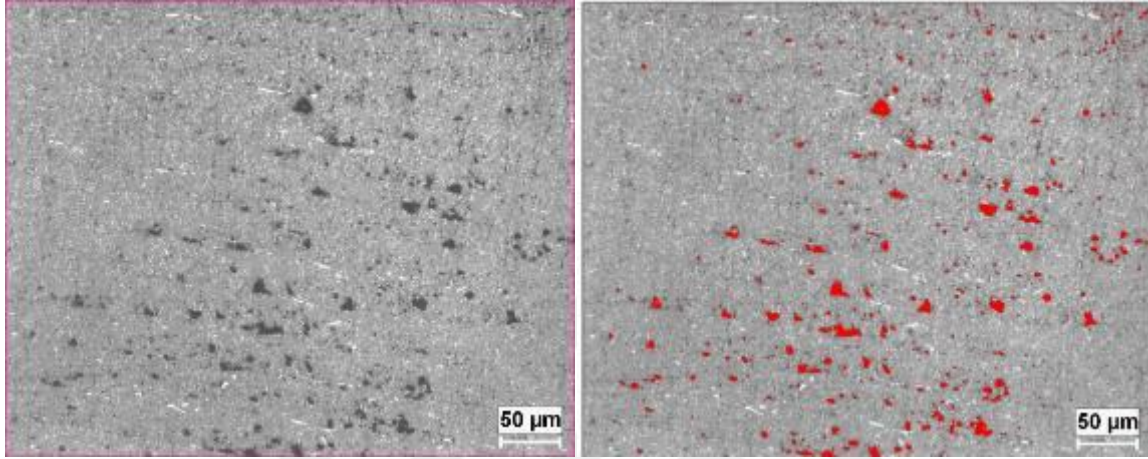
*Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.

**Bu değerler 30 mm.sn⁻¹ baskı hızında basılan numunelere ilişkin sonuçlar referans alınarak hesaplanmıştır.

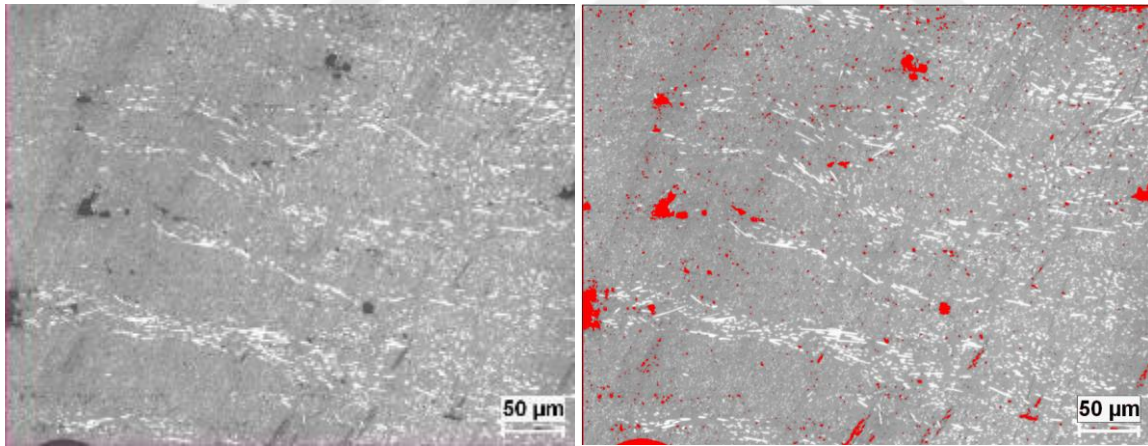
3.3.5. Mikroyapısal Analiz

Şekil 48(a)-(d), farklı vakum miktarlarında gözenekliliği hesaplamak için kullanılan optik mikroskobundan elde edilen görüntüler gösterilmiştir. Bu çalışmada numunelerin farklı bölümlerinden en az beş ölçüm alınmıştır. KKETTK parçalar için malzeme içindeki gözeneklerin boyutu ve yoğunluğu, parça gerilmesini etkiler (Li vd., 2019). Daha büyük veya daha yoğun gözenekler, malzemenin mekanik özelliklerini azaltabilir. Gözenekler genellikle malzeme mukavemetini azaltır, çünkü malzemenin homojen bir şekilde yük taşımasını engellerler ve gerilme konsantrasyonlarına neden olabilirler. Bu nedenle, elyaf takviyeli termoplastik parçaların mukavemetini artırmak için gözenek oluşumunu minimize etmek önemlidir (Wang vd., 2020). Analiz sonuçlarına göre, Atmosfer ortamında %2.82

oranında gözenek oranı hesaplanırken, 0.5 mbar vakum miktarlarında üretilen numunelerde %2.13 oranında gözenek hesaplanmıştır. Ayrıca yukarıda yapılan mekanik testler ile gözenek oranı bir arada değerlendirildiğinde en düşük gözenek oranı hesaplanan 0.5 mbar 'da maksimum eğilme gerilmesi tespit edilmiştir. Bu nedenle düşük gözenekliliğin eğilme gerilmesine olumlu katkı sağladığına inanılmaktadır. Gözeneklilik hacim fraksiyonları ile ilgili hesaplamalar Tablo 14'te özetlenmiştir.



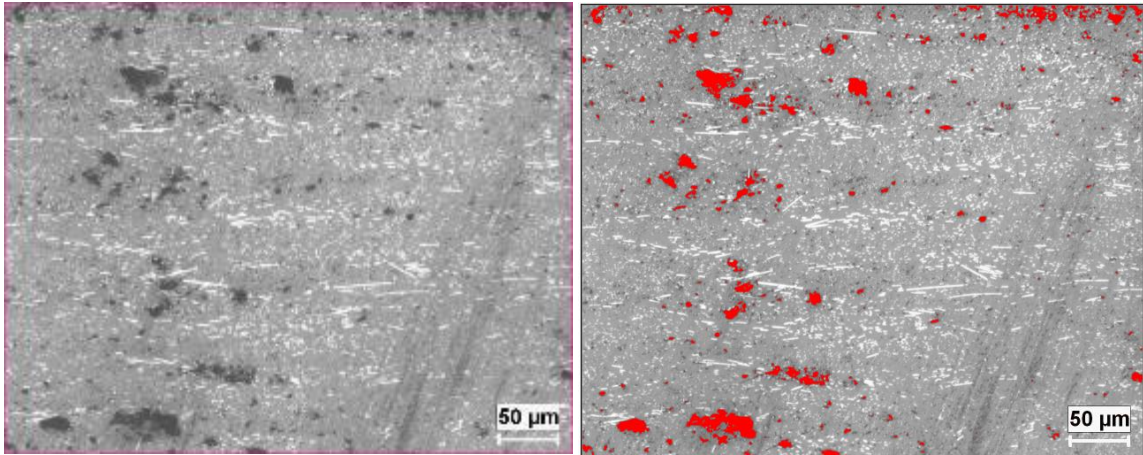
(a)



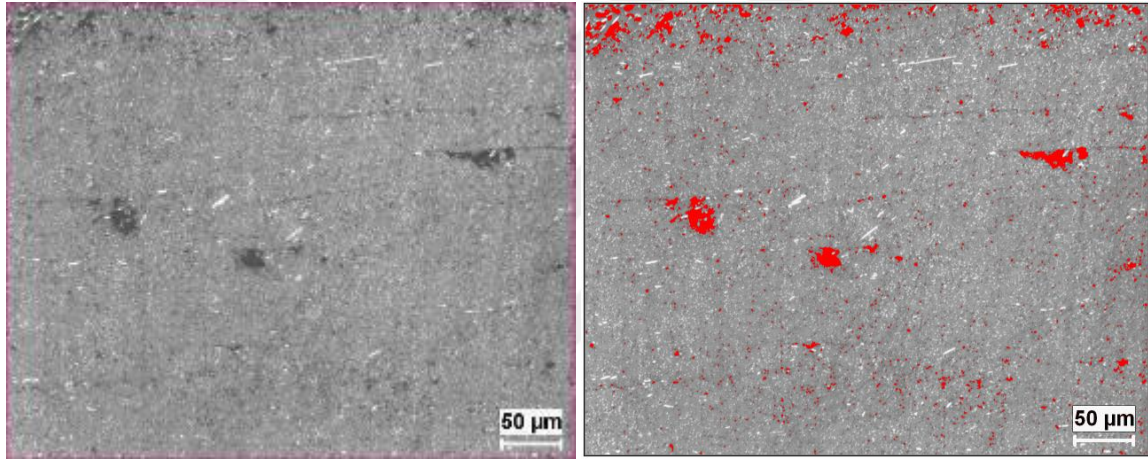
(b)

Şekil 48. Farklı vakum miktarlarında üretilen KKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) 0.5, (b) 10, (c) 10 mbar, (d) atmosferde

Şekil 48'in devamı



(c)



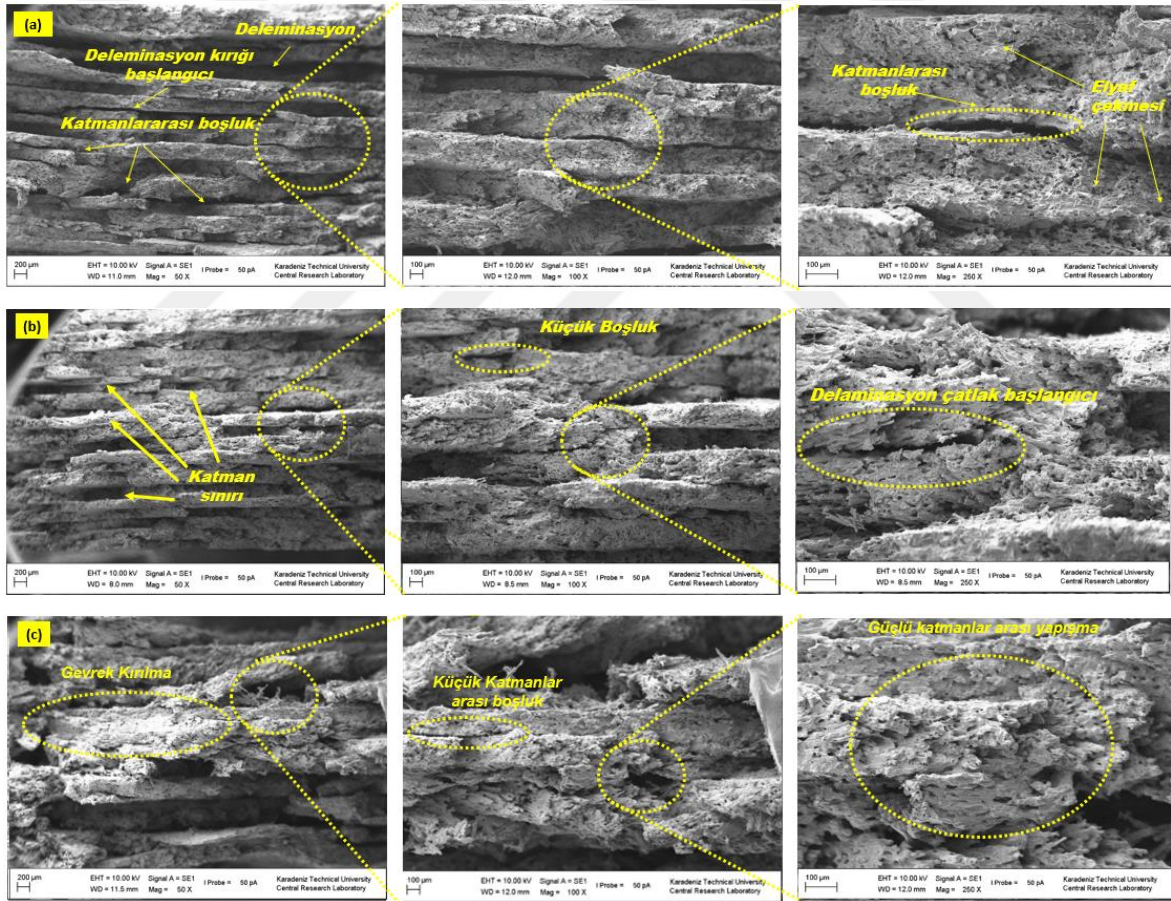
(d)

Tablo 14. Farklı vakum miktarlarında altında basılı numunelerin gözeneklilik oranı

Vakum Miktarı (mbar)	Atmosfer	100	10	0.5
Gözenek (%)	2.82	2.77	2.23	2.13

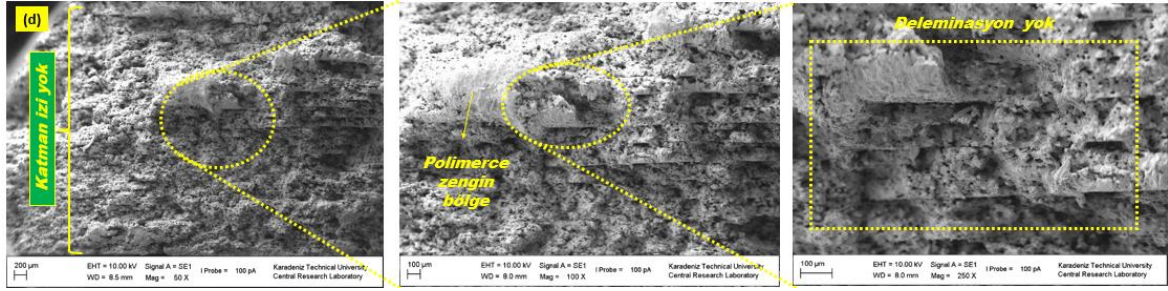
Üç nokta eğilme testi sonrasında KKETTK parçalarının kırılma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri Şekil 49'de gösterilmektedir. Şekil 49(a)'da atmosferik koşullar altında üretilen KKETTK numunelerinde meydana gelen delaminasyon açıkça görülmektedir. Delaminasyon kompozitlerde istenmeyen bir durum olarak tanımlanmaktadır (Caminero vd., 2018; Hoshikawa vd., 2021). Ayrı katmanların birbirinden ayrılmasıyla delaminasyon kolaylıkla fark edilebilir. Ayrıca kırılma sonrasında kırılma yüzeylerinin alt kısmında boşluklar oluşmuştur. Ayrıca kesilmiş elyaf çekilmeleri Şekil 49(a)'da gösterilmektedir.

Şekil 49(b)'de, 100 mbar vakum miktarlarında üretilen numunenin kırılma yüzeyi morfolojisini göstermektedir. Görüntü detaylı incelendiğinde katmanlar açıkça görülebilmekte ve atmosferik koşullar altında üretilen numuneye benzer davranış sergilemektedir. Dolayısıyla 100 mbar'da üretilen numunede vakumun ara katman takviyesinde önemli bir rol oynamadığı sonucuna varılabilir. Şekil 49(c)'de 10 mbar'da üretilen numunede kısmi delaminasyon görülürken numunenin bazı kısımlarında kuvvetli arayüzey yapışması görülmektedir. Son olarak Şekil 49(d)'de 0.5 mbar vakum miktarlarında üretilen numune için güçlü bir vakum ortamının katmanlar arası bağlanmada çok önemli bir rol oynadığı açıkça gösterilmiştir. Görüntü detaylı incelendiğinde katmanlarda herhangi bir delaminasyon gözlemlenmemiştir.



Şekil 49. Farklı vakum miktarında KKETTK numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a) atmosferde, (b) 100, (c) 10, (d) 0.5 mbar

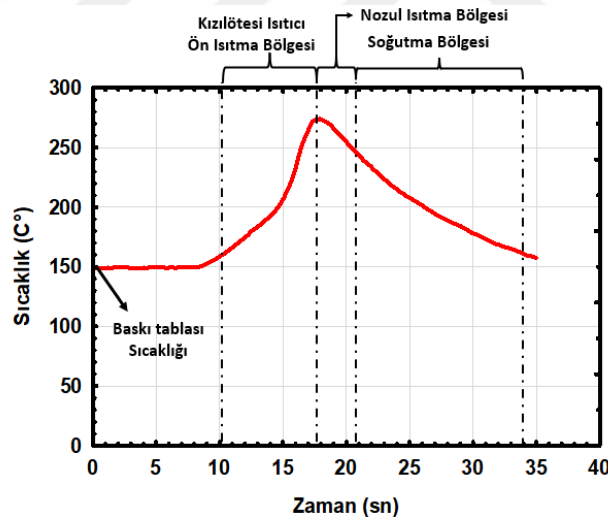
Şekil 49'un devamı



3.4. Vakum Ortamı ve Kızılötesi Isıtıcı Kullanarak KKETTK Numunelerinin Mekanik Özellikleri

3.4.1. Kızılötesi Isıtıcı Konumuna Göre Baskı Tablası Sıcaklık Artış Grafiği

Vakum ortamında kızılötesi ısıtıcının hibrit etkisi incelemek için önce sistem final vakumuna getirildi ardından tekrardan vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kalibre edildi ve test numunesi yazdırılırdı. Şekil 50'de kızılötesi ön ısıtma ile sıcaklık artış grafiği gösterilmiştir.



Şekil 50. Zaman içinde farklı ısıtma bölgelerindeki ısıtıcı konumuna göre alt tabaka sıcaklık değişimi

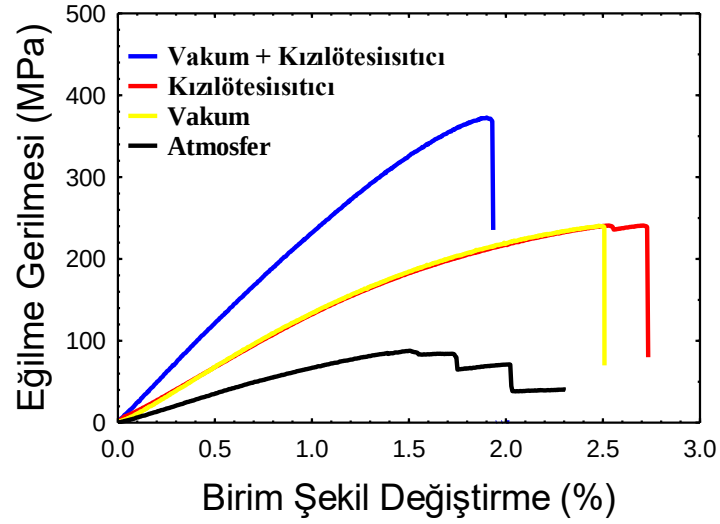
3.4.2. Üç Noktalı Eğilme Testi Sonuçları

Dört farklı koşulda (Atmosfer şartlarında, vakum ortamında, kızılötesi ısıtıcı kullanarak, vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak) basılan olan KKETTK numuneleriyle vakum ve kızılötesi ısıtıcının hibrit etkisinin katmanlar arasını yapışma

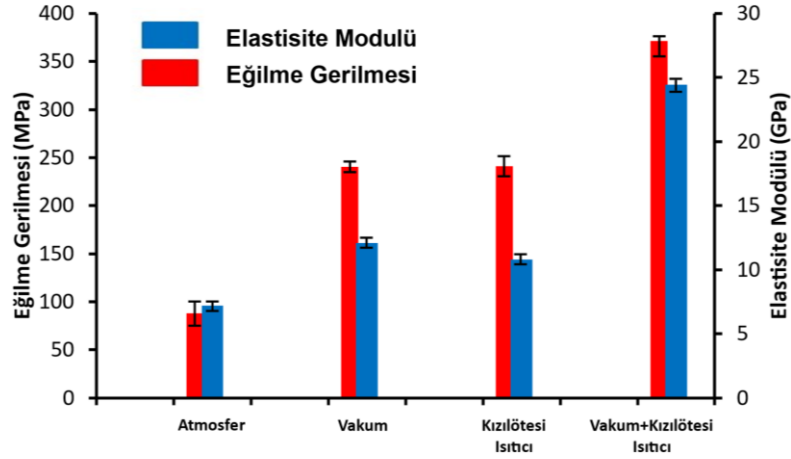
davranışına etkisinin analizi için üç noktalı eğilme testine tabii tutulmuştur. Şekil 51’de dört farklı şartlarda basılan KKETTK numunelerin üç noktalı eğilme testinden elde edilen eğilme gerilmesi-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. KKETTK numuneler için doğrusal elastik deformasyon ve ardından kalıcı hasar ile sonuçlanan tipik bir davranış sergilemektedir (Hassan vd., 2019; Wang vd., 2022). Grafik detaylı incelendiğinde, ilk kırılma sonrasında tekrardan yük taşınmasıyla delemantasyon meydana geldiği rahatlıkla gözlemlenmiştir. Ayrıca atmosfer şartlarında üretilen KKETTK numunesi düşük eğilme gerilmesi ve elastisite modülü ile sonuçlanmıştır. Ek olarak elde edilen birim şekil değiştirme oranı diğer durumlar ile kıyaslandığında düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Literatürdeki sonuçlar incelendiğinde %5, 10, 15 karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerin maksimum eğilme gerilmesi yaklaşık 150 MPa seviyelerinde olduğu bildirilmiştir (Wang vd., 2020). Yapmış olduğumuz çalışmada % 30 elyaf oranında atmosfer ortamında 100 MPa’dan daha az çıkmasının sebebi düşük ortam sıcaklığından kaynaklandığına inanılmaktadır. Sadece vakum ortamı ve sadece Kızılötesi ısıtma kullanarak üretilen KKETTK numunelerin maksimum eğilme gerilmeleri ve birim şekil değiştirme oranları benzer olduğu tespit edilmiş olup mukavemette belirgin bir artış kaydedilmiştir. Vakum ortamı sayesinde konveksiyonla olan ısı kaybı minimize edilmiş olup ortam sıcaklığı artmıştır (S. Maidin vd., 2017; Shajahan Maidin vd., 2023; O’Connor ve Dowling, 2018, 2019; Slejko vd., 2023). Ayrıca bu şartlarda basılan numunelerin eğrileri detaylı bir şekilde incelendiğinde, atmosferde basılan numuneye kıyasla delaminasyon meydana gelmeden ani kırılma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Son olarak vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcının eğilme gerilmesine ciddi derece etki etmiş olup, sadece maksimum eğilme gerilmesi değil aynı zamanda elastisite modülünün de arttığı grafikte açık bir şekilde görülmektedir. Maksimum eğilme gerilmesindeki bu artış bir sonraki bölümde kristallik oranı ile desteklenecektir. Bu hibrit etki ile basılan numunelerin maksimum eğilme gerilmesi ile literatürde %30 oranında karbon elyaf takviyeli PEEK kompozitlerinki karşılaştırıldığında bir ilke imza atılmıştır.

Atmosfer şartlarında, vakum ortamında, kızılötesi ısıtıcı kullanarak ve son olarak, vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan numunelerin en yüksek eğilme gerilmesi, 87.95, 240.66, 240.88, 371.42 MPa bulunmuş olup elastisite modülleri sırasıyla, 7.19, 12.09, 10.82, 24.43 GPa hesaplanmıştır. Vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan test numunesinin maksimum eğilme gerilmesi atmosfer ortamında üretilene kıyasla %324.48 oranında artmıştır. Ayrıca, vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan numuneye test numunesinin eğilme elastisite modülü atmosfer şartlarında basılan numuneye

kıyasla %239.77 oranında artmıştır. Bunlara ek olarak, vakum ortamında kızılötesi ısıtıcının hibrit etkisiyle basılan numunelerin, sadece vakum veya sadece kızılötesi ısıtıcı kullanarak üretilen numune ile maksimum eğilme gerilmesi karşılaştırıldığında %54.58 oranına artış olmuştur. Şekil 52’de üç noktalı eğilme testi özeti sütun grafiğinde gösterilmiştir.



Şekil 51. Farklı şartlarda basılan KKETTK numunelerin üç noktalı eğilme testinden elde edilen eğriler

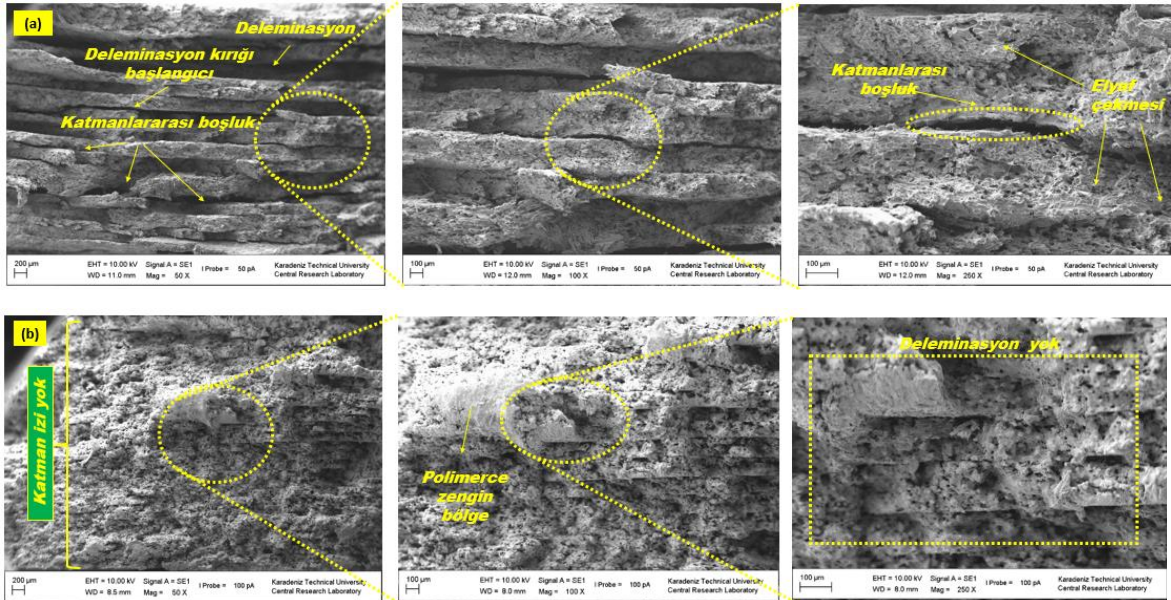


Şekil 52. Farklı şartlarda basılan KKETTK numunelerin üç noktalı eğilme testi sonuçları

3.4.3. Mikro Yapısal Analiz

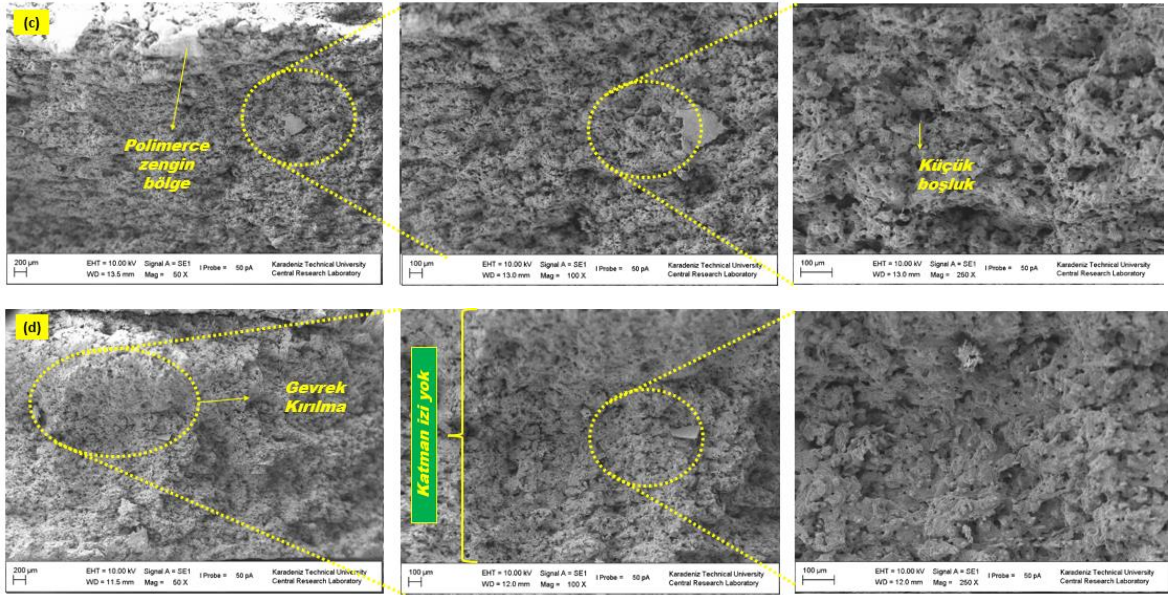
Dört farklı koşullarda test edilen numunelerin kırılma morfolojisi anlayabilmek için kırık yüzeylerin enine kesitleri Şekil 53’te gösterilmiştir. Şekil 53(a)’da atmosfer şartlarında

basılan numunenin kırık yüzeyi incelendiğinde katman çizgilerinin varlığı net bir şekilde görülmektedir. Bunun durum, katmanlar arası yapışmanın zayıf olduğundan kaynaklanmaktadır (Wickramasinghe vd., 2020). Ayrıca katmanlar arası ayrışma olarak da bilinen delaminasyon ve delaminasyon başlangıcı olan küçük boşluklar tespit edilmiştir. Şekil 53(b)'de vakum ortamında üretilen numunelerin kırık yüzey morfolojisi gösterilmektedir. Vakum ortamı ile içeride biriken ısı hapsolacağından dolayı ortam sıcaklığı artmaktadır. Böylece PEEK gibi yüksek sıcaklık polimerlerinin baskı koşullarına ideal bir ortam hazırlanır (Wang vd., 2019). Ortam sıcaklığının artmasıyla delaminasyon ortadan kalktığı sadece delaminasyon sebep olmayacak şekilde küçük boşluklar kalmıştır. Şekil 53(c)'de kızılötesi ısıtıcı ile ön ısıtma yapılarak üretilen KKETTK numunelerin kırılma morfolojisi incelendiğinde vakumlu ortamda üretilen numuneyle benzer davranış sergilemiş olup delaminasyona sebep olacak büyük boşluklar görülmemektedir. Ön ısıtmanın katmanlar arası güçlü bağ kurmaya katkıda bulunmuş olup, delaminasyonun önüne geçildiği görülmüştür. Şekil 53(d)'de hem vakum ortamı hem de kızılötesi ısıtmanın güçlü katmanlar arası yapışmayla sonuçlandığı net bir şekilde görülmektedir. Şekilde gevrek bir kırılma meydana geldiği ve nerdeyse küçük boşluklar dahi kaybolmuştur.



Şekil 53. Farklı şartlarda üretilen KKETTK numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri; (a) atmosfer, (b) vakum, (c) kızılötesi ön ısıtma, (d) vakum ve kızılötesi ön ısıtma

Şekil 53'ün devamı



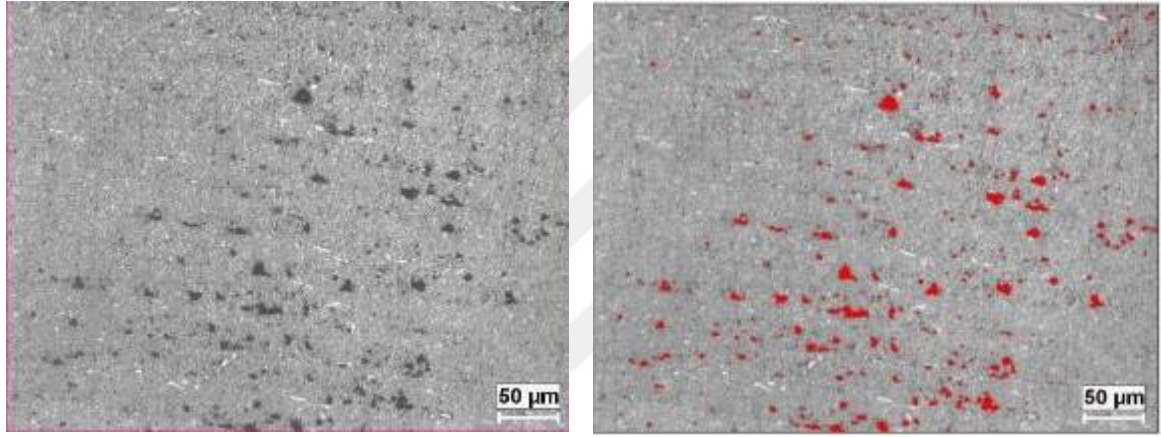
Atmosfer, vakum ortamı, kızılötesi ısıtıcı kullanarak, vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak üretilen numunelerin gözenek oranları hesaplamak için, bilgisayar ortamında ImageJ yazılımı kullanıldı. ImageJ yazılımı, optik veya taramalı elektron mikroskoplarından elde edilen görüntüleri analizi, ölçümü, düzenlenmesi ve numunenin kesitlerindeki gözeneklilik oranını hesaplamak için kullanılan bir görüntü analiz etme yazılımıdır. ImageJ, mikroskoptan elde edilen görüntünün boyutunu, yoğunluğunu, alanını ve diğer özelliklerini ölçmek için çeşitli analiz imkânları sunar. Program kesitte boşluk olarak tanımladığımız siyah bölgeleri analiz edip bu bölgelerin alanını hesaplayarak tüm alanla oranlamasıyla birlikte gözenek oranını belirlenir. Şekil 54(a)-(d), gözenekliliği hesaplamak için kullanılan optik mikroskobundan elde edilen görüntüler gösterilmiştir. Bu çalışmada numunelerin farklı bölümlerinden en az beş ölçüm alınmıştır. Sadece atmosfer, vakum, kızılötesi ısıtıcı, vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak üretilen numunelerin gözenek oranı sırasıyla, $2.82(\pm 0.11)$, $2.13(\pm 0.13)$, $2.08(\pm 0.28)$, $0.66(\pm 0.13)$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 15'te çeşitli koşullar altında numunelerin gözeneklilik hacim fraksiyonları özetlenmiştir. Vakum ve kızılötesi ısıtıcı kızılötesi kullanarak üretilen numunelerin boşluk oranı ile atmosfer şartlarında üretilen numunelerinkine göre %76.38 oranında azalmıştır. Ayrıca vakum ortamında üretilen ve kızılötesi ısıtıcı ortamında üretilen numunelerde boşluk oranları aynı seviyededir. Bu durum, Şekil 51'de elde edilen eğilme gerilmesinin de benzer sonuçlanmasını doğrulamaktadır. Vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcının hibrit etkisi

kullanarak üretilen numunelerin içyapısındaki gözenek oranı neredeyse sıfıra yaklaşmış olup vakum eğilme gerilmesini arttırdığı sonucuna varılabilir.

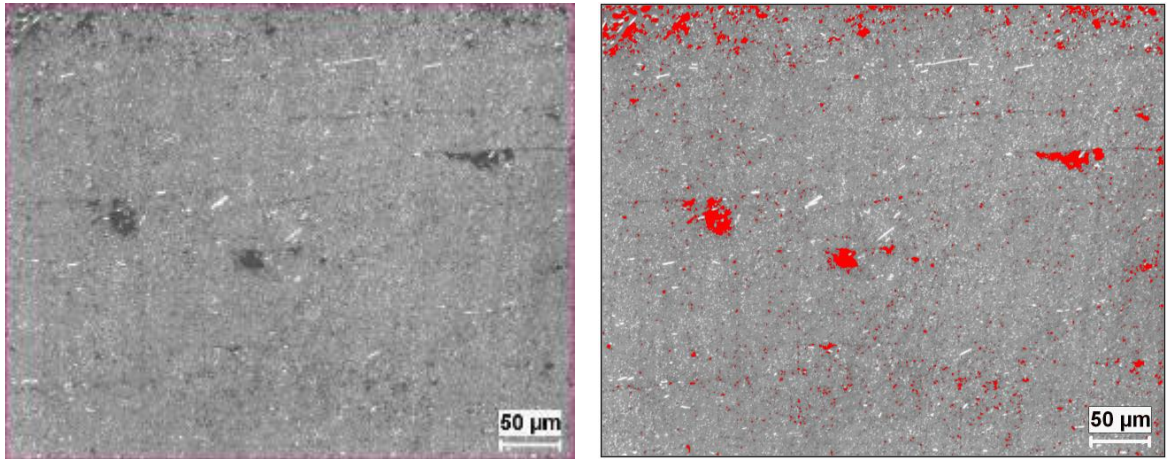
Tablo 15. Farklı şartlarda basılı numunelerin gözeneklilik oranı

Parametreler	Atmosfer	Vakum	Kızılötesi Isıtıcı	Vakum+ Kızılötesi Isıtıcı
Gözenek (%)	2.82 (± 0.11)	2.13 (± 0.13)	2.08 (± 0.28)	0.66 (± 0.13)

* Parantez içindeki değerler standart sapmaları ifade etmektedir.



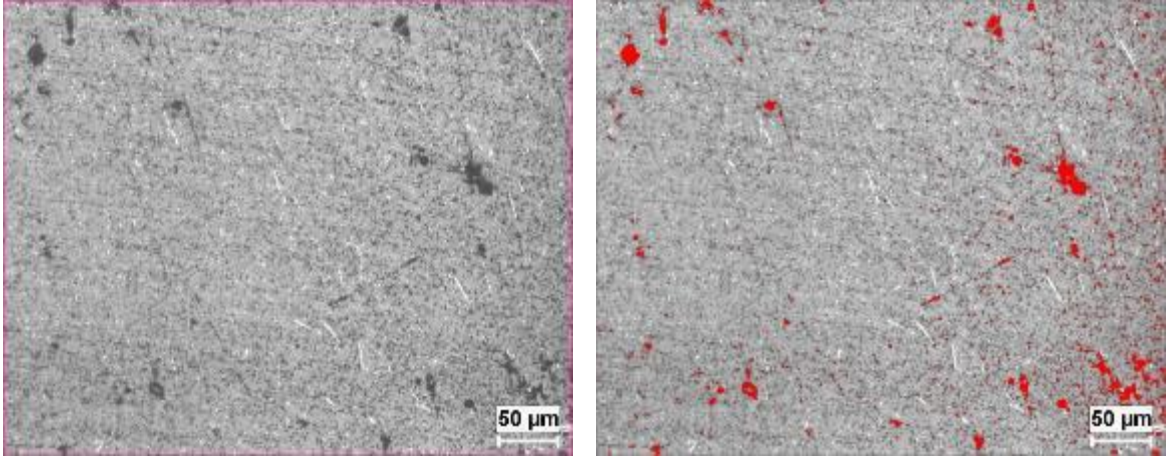
(a)



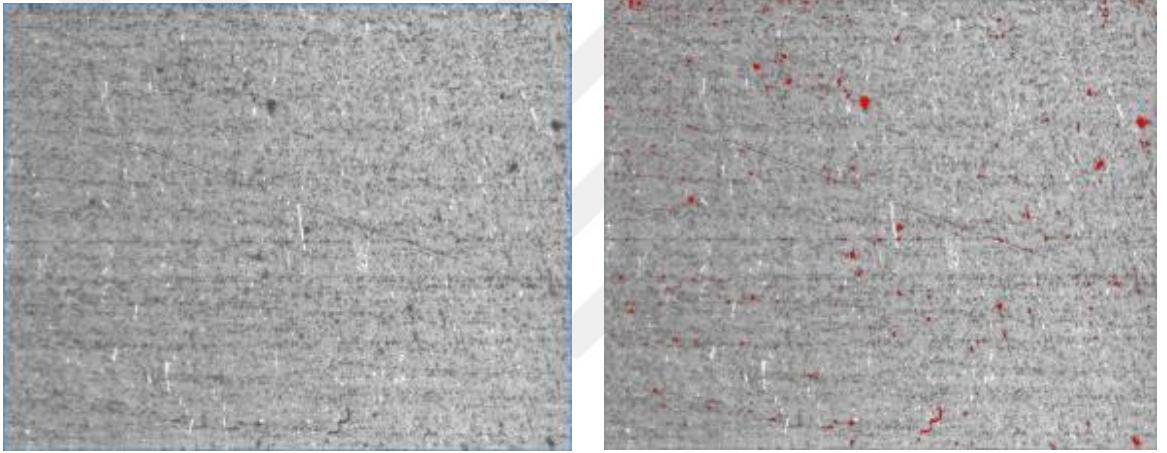
(b)

Şekil 54. Farklı şartlarda üretilen KKETTK parçaların optik mikroskoptan elde edilen enine kesit görüntüleri ve ImageJ programı gözenek dağılım görüntüleri; (a) atmosfer, (b) vakum, (c) kızılötesi, (d) vakum ve kızılötesi ısıtıcı

Şekil 54'ün devamı



(c)

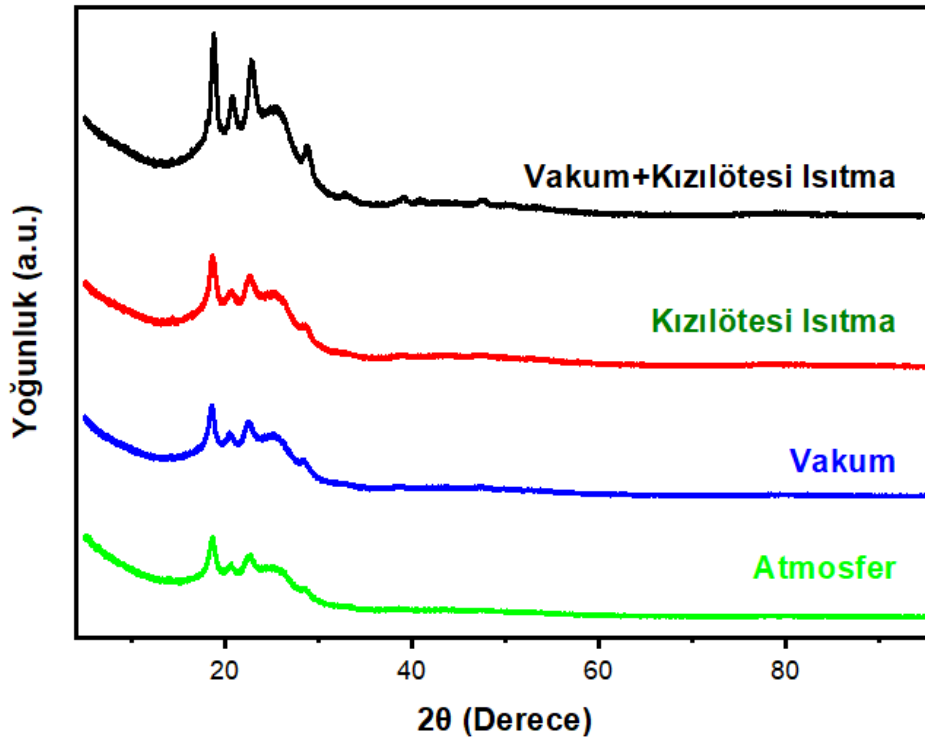


(d)

3.4.4. X-ışını kırınımı (XRD) Kristallik Testi Sonucu

Şekil 55'te dört farklı koşulda üretilen KKETTK numunelerin XRD grafikleri verilmiştir. Şekilde keskin pik noktaları kristal bölgeleri, geniş pik noktaları amorf bölgeleri göstermektedir (Aramesh vd., 2022; Uzun, 2023). Atmosfer şartlarında üretilen numunede kristallik pikleri, vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan KKETTK numunelerine göre oldukça azdır. Bunun sebebi, atmosfer ortamında üretim esnasında hızlı soğumadan kaynaklanmaktadır (Ji vd., 2023). Sadece vakum veya sadece kızılötesi ısıtıcı kullanarak üretilen KKETTK numunelerinde kristallik piklerinin şiddeti bir miktar daha atmosfer ortamında basılan numuneye göre fazla olduğu görülmüştür. Vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan KKETTK XRD eğrileri incelendiğinde diğerlerine kıyasla daha fazla kristal piklerin varlığı görülmektedir. XRD eğrileri Excel yazılımında

atmosfer şartlarında, vakum ortamında, kızılötesi ısıtıcı kullanarak ve vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak hibrit etkiyle basılan KKETTK numunelerin kristallik oranları hesaplanmış olup, sırasıyla, %32.52, 40.71, 40.05, 51.39 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sonuçlar Tablo 16'da özetlenmiştir. Termoplastik polimerlerin kristallik oranı, polimer zincirlerinin düzenlenme derecesini önemli rol oynar (Lee vd., 1995). Daha yüksek kristallik oranı, polimer zincirlerinin daha düzenli olduğu anlamına gelir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan CF-PEEK kompozit malzemelerde, PEEK termoplastik polimeri düşük kristalleşme oranlarında, kırılmış karbon elyaflar ile tutacak kadar güçlü bir bağ kuramadığı ve katmanlar arasında güçlü bir bağ oluşturamadığı için yükleme esnasında PEEK matrisi hem karbon elyaf ile hem de bir sonraki katmandan kolayca ayrışabilir. Yüksek kristallik oranıyla, PEEK termoplastik polimeri kırılmış karbon elyaflar ve katmanlar arasında güçlü bir etkileşim kurulur (Yang vd., 2021). Bu sayede katmanlar arası delaminasyon önlenerek yüksek mekanik özelliklere sahip parçalar elde edilir. Özetle, termoplastik kompozit malzemenin dayanıklılığında PEEK moleküler zincirinin kristallığı önemli ölçüde rol oynar.



Şekil 55. Farklı şartlarda üretilen KKETTK örneklerinin XRD grafikleri

Tablo 16. Farklı şartlarda üretilen KKETTK numunelerinin kristallik derecesi

Numuneler	Kristallik derecesi (%)
Atmosfer	32.52
Vakum	40.71
Kızılötesi ısıtıcı	40.05
Vakum+ Kızılötesi ısıtıcı	51.39

Şekil 51’de elde edilen eğilme gerilmesi birim şekil değiştirme grafiklerinde vakum ortamı ve kızılötesi ön ısıtma kullanarak maksimum (371.42 MPa) eğilme gerilmesi elde edilmesinin neden yukarıda bahsedildiği gibi yüksek kristallik oranı (%51.39) ile açıklanmıştır. Yüksek kristallik oranı sayesinde katmanlar arası güçlü bir bağ oluşturularak yüksek eğilme gerilmesi elde edilmiştir. Ayrıca sadece vakum ve sadece kızılötesi ısıtıcı kullanılarak elde edilen eğilme mukavemetleri (240.66 MPa, 240.88 MPa) kristallik oranlarıyla (%40.71, %40.05) tutarlı olduğu ispat edilmiştir

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada vakum ortamında farklı parametrelerde Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit (SKETTK), Kısa Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin (KKETTK) ve vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı destekli KKETTK parçaların EYM baskısı gerçekleştirilmiştir. Farklı vakum miktarı ve baskı parametrelerinde basılan SKETTK VE KKETTK numunelerin mekanik özellikleri ve mikro yapıları araştırılmıştır.

- SKETTK ve KKETTK ile yapılan çalışmalar sonucunda vakum miktarının SKETTK numunelerinin eğilme gerilmesini ve modülünü önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Daha düşük vakum miktarları, azaltılmış ısı transferi ve gelişmiş katmanlar arası bağlanma nedeniyle eğilme gerilmesini ve modülünü artırmıştır. Bununla birlikte, bazı örneklerde hala katmanlar arası ayrılma gözlemlenmiş olup bu kırılma modunu ortadan kaldırmak için daha fazla optimizasyona ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir.
- Nozul sıcaklığı, SKETTK ve KKETTK parçalarının hem mekanik özelliklerini hem de mikro yapısını etkilediği tespit edilmiştir. Daha yüksek nozul sıcaklıkları, elyaflar ve matris arasında daha iyi arayüzey yapışmasına atfedilen, maksimum eğilme gerilmesi ve modülün artmasına neden olmuştur. Ancak aşırı nozul sıcaklıkları parçalarda deformasyona ve yüzey bozukluklarına neden olmuştur.
- Tabla sıcaklığı, KKETTK parçaların eğilme gerilmesini artırırken, SKETTK parçaların aşırı yüksek sıcaklıklar parça deformasyonu nedeniyle eğilme gerilmesini azaltmıştır. Ek olarak, mikroyapısal analiz, bazı bölgelerde daha yüksek fiber veya matris malzeme konsantrasyonları sergileyerek, fiber ve matris dağılımında farklılıklar ortaya çıkarmıştır.
- Baskı hızı, SKETTK ve KKETTK parçalarının mekanik özelliklerini etkileyerek; optimum baskı hızı, eğilme gerilmesinin artmasına neden olmuştur. Ancak daha yüksek baskı hızları eğilme gerilmesini azalttığından, bunun da üretim verimliliği ile parça kalitesi arasında bir denge bulmanın önemini gösterdiği sonucuna varılmıştır.
- Vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak basılan parçaların eğilme gerilmesi, atmosfer ortamında basılan parçalara kıyasla maksimum eğilme gerilmesi ve

elastisite modülünde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, vakum ortamında kızılötesi ısıtıcı kullanarak üretilen numunelerin gözenek oranı ile atmosfer şartlarında üretilen parçalara kıyasla ciddi derecede azalmıştır.



5. ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, vakum ortamında kompozit malzemelerin eklemeli imalatı üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, sürekli ve kısa karbon elyaf takviyeli polimer kompozit filamentler kullanılarak, üç nokta eğilme testi için numuneler 3D yazıcı ile üretilmiştir. Ayrıca, vakum ortamına ek olarak kızılötesi ısıtıcı kullanılarak kompozit test numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin katmanlar arası yapışma davranışını değerlendirmek amacıyla üç nokta eğilme testleri uygulanmış ve sonuçlar tez boyunca tartışılmıştır. Gelecek çalışmalara ışık tutması açısından aşağıda bazı öneriler sunulmuştur;

- Vakum miktarı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerin dikkatli bir şekilde kontrol edilmesiyle SKETTK parçalarının mekanik performansının ve mikro yapısının iyileştirilmesi mümkündür. Bununla birlikte, delaminasyon ve boşluk oluşumu zorluklarının üstesinden gelmek ve sonuçta üstün mekanik özelliklere ve yapısal bütünlüğe sahip SKETTK parçaları üretmek için yüksek derecede vakum ortamı (örneğin, 1×10^{-5} mbar ve üzeri) önerilmektedir.
- Farklı türde elyaflar (örneğin, cam elyaf) ve matris malzemeleri kullanarak benzer deneyler yapılabilir. Bu, farklı malzeme kombinasyonlarının mekanik özellikler üzerindeki etkilerini inceleme fırsatı sağlayacaktır.
- KKETTK parçalarının vakum ortamında üretilmesinin belirli bir derecede güçlü katmanlar arası bağlanma ile sonuçlandığı sonucuna varmıştır. Gelecekteki araştırmalar için, yüksek oranda elyaf takviyesi (örn; %40-%50) ve düşük vakum miktarının eğilme gerilimi üzerindeki etkisini araştırmak önemlidir.
- Vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanılmasıyla birlikte üretilen KKETTK düşük porozite ve yüksek kristallik oranı elde edilmiştir. Bunun sonucunda literatürde ilk olarak %30 elyaf takviyeli PEEK kompozitler EYM yöntemi ile üretilmiştir. Gelecek çalışmada, elyaf oranının bir miktar daha artırılmasıyla birlikte vakum ortamı ve kızılötesi ısıtıcı kullanarak mekanik özelliklerin incelememesi önerilmektedir. Bu sayede uygun değer elyaf oranı tespit edilerek optimum eğilme gerilmesi elde edileceği düşünülmektedir.

- Vakum ortamında üretilen KKETTK/SKETTK numuneleriyle yorulma testi uygulanarak tekrarlı yükler altında yorulma davranışı incelenebileceği düşünülmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Akderya, T. (2023). Effects of post-uv-curing on the flexural and absorptive behaviour of FDM-3d-printed poly (lactic acid) parts. *Polymers*, 15(2), 348.
- Aktitiz, İ., Aydın, K., & Topcu, A. (2020). Stereolitografi (SLA) Tekniği ile Basılan 3 Boyutlu Polimer Yapılarda İkincil Kırılma Süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 949-958.
- Amir, N., Ariff, K., Abidin, Z., & Binti, F. (2017). Effects of Fibre Configuration on Mechanical Properties of Banana Fibre / PP / MAPP Natural Fibre Reinforced Polymer Composite. *Procedia Engineering*, 184, 573–580.
- Aramesh, N., Bagheri, A. R., Nguyen, T. A., & Bilal, M. (2022). Characterization techniques for nanomaterials used in nanobioremediation. *Nano-Bioremediation: Fundamentals and Applications*, 29–43.
- Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., & Gu, P. (2004). Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(2), 170–178.
- Bettini, P., Alitta, G., Sala, G., & Di Landro, L. (2017). Fused Deposition Technique for Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 843–848.
- Biswas, K., Lind, R., Post, B., Jackson, R., Love, L., Green Jr, J., & Guerguis, A. M. (2016). Big area additive manufacturing applied to buildings. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII International Conference*, s. 583-590. Florida
- Blundell, D. J., & Osborn, B. N. (1983). The morphology of poly(aryl-ether-ether-ketone). *Polymer*, 24(8), 953–958.
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-moreno, I., & Reverte, J. M. (2018). Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*, 68, 415–423.
- Campbell, I., Bourell, D., & Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255–258.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., Núñez, P. J., García-plaza, E., García-moreno, I., & Reverte, J. M. (2019). Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 181, 107688.
- Chadha, A., Ul Haq, M. I., Raina, A., Singh, R. R., Penumarti, N. B., & Bishnoi, M. S. (2019). Effect of fused deposition modelling process parameters on mechanical properties of 3D printed parts. *World Journal of Engineering*, 16(4), 550–559.

- Chen, H., Li, S., Wang, J., & Ding, A. (2021). "A focused review on the thermo-stamping process and simulation progresses of continuous fibre reinforced thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 224, 109196.
- Chen, J., Zhang, T., Wang, K., & Zhao, Y. (2019). Multiscale enhancement behavior of nano-silica modified CF/PEEK composites prepared by wet powder impregnation. *Polymer Composites*, 40(3), 1187–1197.
- Chen, Y. H., Ranganathan, P., Chen, C. W., Lee, Y. H., & Rwei, S. P. (2020). Effect of bis (2-aminoethyl) adipamide/adipic acid segment on polyamide 6: Crystallization kinetics study. *Polymers*, 12(5).
- Chen, Y., Shan, Z., Yang, X., Fan, C., & Song, Y. (2022). Influence of preheating temperature and printing speed on interlaminar shear performance of laser-assisted additive manufacturing for CCF/PEEK composites. *Polymer Composites*, 43(6), 3412–3425.
- Chen, Y., Shan, Z., Yang, X., Song, Y., & Zou, A. (2022). Preparation of CCF/PEEK filaments together with property evaluation for additive manufacturing. *Composite Structures*, 281, 114975.
- Das, A., Chatham, C. A., Fallon, J. J., Zawaski, C. E., Gilmer, E. L., Williams, C. B., & Bortner, M. J. (2020). Current understanding and challenges in high temperature additive manufacturing of engineering thermoplastic polymers. *Additive Manufacturing*, 34, 101218.
- Deng, X., Zeng, Z., Peng, B., Yan, S., & Ke, W. (2018). Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling. *Materials*, 11(2).
- Der Klift, F. Van, Koga, Y., Todoroki, A., Ueda, M., Hirano, Y., & Matsuzaki, R. (2016). 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens. *Open Journal of Composite Materials*, 06(01), 18–27.
- Dermeik, B., & Travitzky, N. (2020). Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based Materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(9), 2000256.
- Deshpande, A., Ravi, A., Kusel, S., Churchwell, R., & Hsu, K. (2019). Interlayer thermal history modification for interface strength in fused filament fabricated parts. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(1), 63–70.
- Dhinakaran, V., Surendar, K. V., Riyaz, M. S. H., & Ravichandran, M. (2020). Review on study of thermosetting and thermoplastic materials in the automated fiber placement process. *Materials Today: Proceedings*, 27, 812–815.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545–554.
- Ding, S., Zou, B., Zhuang, Y., Wang, X., Li, L., & Liu, J. (2023). Hybrid layout and additive manufacturing of continuous carbon/glass fibers reinforced composites, and its effect on mechanical properties. *Composite Structures*, 319, 117133.

- Doshi, M., Mahale, A., Singh, S. K., & Deshmukh, S. (2022). Materials Today : Proceedings Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts : Perspective and prospects. *Materials Today: Proceedings*, 50, 2269–2275.
- Du, J., Wei, Z., Wang, X., Wang, J., & Chen, Z. (2016). An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 234, 332–341.
- Duty, C. E., Kunc, V., Compton, B., Post, B., Erdman, D., Smith, R., Lloyd, P., & Love, L. (2017). Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 181-189.
- Elisetti, S. K., Arora, V., & Sharma, R. B. (2023). Polymers for designing 3D Printed Pharmaceutical Products. *Journal of Research in Pharmacy*, 27(2), 576–594.
- Eyckens, D. J., Stojcevski, F., Hendlmeier, A., Randall, J. D., Hayne, D. J., Stanfield, Walsh, T.R., & Henderson, L. C. (2021). Carbon fibre surface chemistry and its role in fibre-to-matrix adhesion. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(47), 26528-26572.
- Faes, M., Ferraris, E., & Moens, D. (2016). Influence of Inter-layer Cooling time on the Quasi-static Properties of ABS Components Produced via Fused Deposition Modelling. *Procedia Cirp*, 42, 748-753.
- Fujihara, K., Huang, Z. M., Ramakrishna, S., & Hamada, H. (2004). Influence of processing conditions on bending property of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites. *Composites Science and Technology*, 64(16), 2525–2534.
- Gade, S., Vagge, S., & Rathod, M. (2023). A Review on Additive Manufacturing – Methods, Materials, and its Associated Failures. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(3), 40–63.
- Gao, G., Xu, F., Xu, J., Tang, G., & Liu, Z. (2022). A Survey of the Influence of Process Parameters on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling Parts. *Micromachines*, 13(4), 1–28.
- Gardner, J. M., Sauti, G., Kim, J. W., Cano, R. J., Wincheski, R. A., Stelter, C. J., Working, D. C., & Siochi, E. J. (2016). Additive manufacturing of multifunctional components using high density carbon nanotube yarn filaments. *International SAMPE Technical Conference, 2016-Janua*.
- Gardner, L. (2023). Metal additive manufacturing in structural engineering – review, advances, opportunities and outlook. *Structures*, 47, 2178–2193.
- Garofalo, J., & Walczyk, D. (2021). In situ impregnation of continuous thermoplastic composite prepreg for additive manufacturing and automated fiber placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 147, 106446.
- Goh, G. D., Dikshit, V., Nagalingam, A. P., Goh, G. L., Agarwala, S., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2018). Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics.

Materials and Design, 137, 79–89.

- Guo, J., & Wang, S. (2021). Multiphase Flow Coupling Behavior of Bubbles Based on Computational Fluid Dynamics during AFP Process: The Behavior Characteristics of Bubbles during AFP Process. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- Gurralla, P. K., & Regalla, S. P. (2014). Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling: This paper studies how coalescence of filaments contributes to the strength of final FDM part. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 141–149.
- Hassan, E. A. M., Ge, D., Zhu, S., Yang, L., Zhou, J., & Yu, M. (2019). Enhancing CF/PEEK composites by CF decoration with polyimide and loosely-packed CNT arrays. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 127, 105613.
- Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani, M., & Zahedi, A. M. (2019). Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107147.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392.
- Hjermann, N. F. (2022). Mechanical Properties of FDM Manufactured PEEK Components, NTNU, Maske Teknik ve Üretim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Norveç.
- Hoshikawa, Y., Shirasu, K., Tsuyuki, J., Okabe, T., Higuchi, R., Yamamoto, K., & Hirata, Y. (2021). Experimental and Numerical Evaluation of Open Hole Tensile Properties of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics. *Materials System*, 38, 49–54.
- Huang, J., Qin, Q., & Wang, J. (2020). A review of stereolithography: Processes and systems. *Processes*, 8(9), 1138.
- Jayswal, A., & Adanur, S. (2022). Effect of heat treatment on crystallinity and mechanical properties of flexible structures 3D printed with fused deposition modeling. *Journal of Industrial Textiles* 51, 2616–2641.
- Ji, Y., Luan, C., Yao, X., Ding, Z., & Niu, C. (2023). Mechanism and behavior of laser irradiation on carbon fiber reinforced polyetheretherketone (CF / PEEK) during the laser-assisted in-situ consolidation additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 74, 103713.
- Jing, X., Duan, Y., Xie, F., Zhang, C., & Chen, S. (2023). Polyurethane with nano-SiO₂ based surface sizing method for 3D printed carbon fiber reinforced nylon 6 composites. *Polymer Composites*, 44(3), 1546–1561.
- Kabir, S. M. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232, 111476.

- Kaczmarek, D., Walczyk, D., Garofalo, J., & Sobkowicz-Kline, M. (2021). An investigation of in situ impregnation for additive manufacturing of thermoplastic composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 972–981.
- Karagöz, İ., Daniş Bekdemir, A., & Tuna, Ö. (2021). 3D Yazıcı Teknolojileri. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9, 1186–1213.
- Kazemi, M., & Rahimi, A. (2018). Stereolithography process optimization for tensile strength improvement of products. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 688–697.
- Kim, J. W., & Lee, J. S. (2016). Influence of interleaved films on the mechanical properties of carbon fiber fabric/polypropylene thermoplastic composites. *Materials*, 9(5).
- Kishore, V., Ajinjeru, C., Nycz, A., Post, B., Lindahl, J., Kunc, V., & Duty, C. (2017). Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components. *Additive Manufacturing*, 14, 7–12.
- Krajangsawasdi, N., Blok, L. G., Hamerton, I., & Longana, M. L. (2021). Fused Deposition Modelling of Fibre Reinforced Polymer Composites : A Parametric Review. *Journal of Composites Science*, 5(1), 29.
- Krajangsawasdi, N., Blok, L. G., Hamerton, I., Longana, M. L., Woods, B. K. S., & Ivanov, D. S. (2021). Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: A parametric review. *Journal of Composites Science*, 5(1).
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540.
- Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26–36.
- Kulkarni, A., & Narayan, R. (2021). Effects of modified thermoplastic starch on crystallization kinetics and barrier properties of pla. *Polymers*, 13(23).
- Kwon, D. J., Kim, N. S. R., Jang, Y. J., Choi, H. H., Kim, K., Kim, G. H., & Nam, S. Y. (2021). Impacts of thermoplastics content on mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 216, 108859.
- Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G., & Martorelli, M. (2015). The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 604–617.
- Lee, T. H., Boey, F. Y. C., & Khor, K. A. (1995). On the determination of polymer crystallinity for a thermoplastic PPS composite by thermal analysis. *Composites Science and Technology*, 53(3), 259–274.
- Lekakou, C., Johari, M. A. K., Norman, D., & Bader, M. G. (1996). Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27(5), 401–408.

- Li, H., Liu, B., Ge, L., Chen, Y., Zheng, H., & Fang, D. (2021). Mechanical performances of continuous carbon fiber reinforced PLA composites printed in vacuum. *Composites Part B: Engineering*, 225, 109277.
- Li, Q., Zhao, W., Li, Y., Yang, W., & Wang, G. (2019). Flexural properties and fracture behavior of CF/PEEK in orthogonal building orientation by FDM: Microstructure and mechanism. *Polymers*, 11(4).
- Li, Q., Zhao, W., Niu, B., Wang, Y., Wu, X., Ji, J., Li, Y., Zhao, T., Li, H., & Wang, G. (2021). 3D printing high interfacial bonding polyether ether ketone components via pyrolysis reactions. *Materials & Design*, 198, 109333.
- Li, Y., Xiao, Y., Yu, L., Ji, K., & Li, D. (2022). A review on the tooling technologies for composites manufacturing of aerospace structures: materials, structures and processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 154, 106762.
- Liu, H., Liu, J., Ding, Y., Zhou, J., Kong, X., Harper, L. T., Blackman, B. R. K., Falzon, B. G., & Dear, J. P. (2020). Modelling damage in fibre-reinforced thermoplastic composite laminates subjected to three-point bend loading. *Composite Structures*, 236, 111889.
- Liu, T., Tian, X., Zhang, M., Abliz, D., Li, D., & Ziegmann, G. (2018). Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites. *Composites Part A*, 114, 368–376.
- Liu, T., Tian, X., Zhang, Y., Cao, Y., & Li, D. (2020). High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 130, 105770.
- Liu, T., Zhang, M., Kang, Y., Tian, X., Ding, J., & Li, D. (2023). Material extrusion 3D printing of polyether ether ketone in vacuum environment: Heat dissipation mechanism and performance. *Additive Manufacturing*, 62, 103390.
- Liu, Z., Lei, Q., & 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), 3743–3753.
- Luo, M., Tian, X., Shang, J., Yun, J., Zhu, W., Li, D., & Qin, Y. (2020). Bi-scale interfacial bond behaviors of CCF/PEEK composites by plasma-laser cooperatively assisted 3D printing process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 131, 105812.
- Luo, M., Tian, X., Zhu, W., & Li, D. (2018). Controllable interlayer shear strength and crystallinity of PEEK components by laser-assisted material extrusion. *Journal of Materials Research*, 33(11), 1632–1641.
- Ma, X. long, Wen, L. hua, Wang, S. yu, Xiao, J. you, Li, W., & Hou, X. (2022). Inherent relationship between process parameters, crystallization and mechanical properties of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites. *Defence Technology*, 24, 269–284.

- Maidin, S., Wong, J. H. U., Mohamed, A. S., & Mohamed, S. B. (2017). Effect of vacuum assisted fused deposition modeling on 3D printed ABS microstructure. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(15), 4877–4881.
- Maidin, S., Hayati, N. M. N., Rajendran, T. K., & Muhammad, A. H. (2023). Comparative analysis of acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid samples' mechanical properties printed in vacuum. *Additive Manufacturing*, 67, 103485.
- Maidin, S., Wong, J. H. U., Mohamed, A. S., Mohamed, S. B., Rashid, R. A., & Rizman, Z. I. (2017). Vacuum fused deposition modelling system to improve tensile strength of 3D printed parts. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(6S), 839-853.
- Makhlouf, A., Satha, H., Frihi, D., Gherib, S., & Seguela, R. (2016). Optimization of the crystallinity of polypropylene/submicronic-talc composites: The role of filler ratio and cooling rate. *Express Polymer Letters*, 10(3).
- Marwah, O. M. F., Shukri, M. S., Mohamad, E. J., Johar, M. A., & Haq, R. H. A. (2017). Direct Investment Casting For Developed By Desktop 3D Printer Pattern, *MATEC Web of Conferences*, s. 00036.
- Mashayekhi, F., Bardon, J., Berthé, V., Perrin, H., Westermann, S., & Addiego, F. (2021). Fused filament fabrication of polymers and continuous fiber-reinforced polymer composites: Advances in structure optimization and health monitoring. *Polymers*, 13(5), 1–29.
- Masood, S. H., & Song, W. Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. *Materials & design*, 25(7), 587-594.
- McIlroy, C., & Graham, R. S. (2018). Modelling flow-enhanced crystallisation during fused filament fabrication of semi-crystalline polymer melts. *Additive Manufacturing*, 24, 323–340.
- McIlroy, Claire, Seppala, J. E., & Kotula, A. P. (2019). Combining Modeling and Measurements to Predict Crystal Morphology in Material Extrusion. *ACS Symposium Series*, 1315, s. 85–113.
- Mei, H., Ali, Z., Yan, Y., Ali, I., & Cheng, L. (2019). Influence of mixed isotropic fiber angles and hot press on the mechanical properties of 3D printed composites. *Additive Manufacturing*, 27, 150–158.
- Moradi, A., Sun, C., Guan, Z., & Rastegarzadeh, S. (2023). Technology for lateral spreading of fibre bundles for applications in manufacturing thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 167(Ocak), 107422.
- Moreno Madrid, A. P., Vrech, S. M., Sanchez, M. A., & Rodriguez, A. P. (2019). Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds. *Materials Science and Engineering C*, 100(Mart), 631–644.
- Mosleh, N., Rezadoust, A. M., & Dariushi, S. (2021). Determining process-window for manufacturing of continuous carbon fiber-reinforced composite Using 3D-printing. *Materials and Manufacturing Processes*, 36(4), 409–418.

- Mrozek, M., Mrozek, D., & Wawrzynek, A. (2015). Numerical analysis of selection of the most effective configuration of CFRP composites reinforcement of masonry specimens. *Composites Part B: Engineering*, 70, 189-200.
- Naffakh, M., Gómez, M. A., Ellis, G., & Marco, C. (2003). Thermal properties, structure and morphology of PEEK/thermotropic liquid crystalline polymer blends. *Polymer International*, 52(12), 1876–1886.
- Nakagawa, Y., Mori, K. I., & Maeno, T. (2017). 3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 2811-2817.
- Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M. H., & Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 26, 227–241.
- Nazari, B., Rhoades, A. M., Schaake, R. P., & Colby, R. H. (2016). Flow-Induced Crystallization of PEEK: Isothermal Crystallization Kinetics and Lifetime of Flow-Induced Precursors during Isothermal Annealing. *ACS Macro Letters*, 5(7), 849–853.
- Nguyen, D. S., & Vignat, F. (2016). A method to generate lattice structure for Additive Manufacturing. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, s. 966–970.
- Ning, F., Cong, W., Hu, Y., & Wang, H. (2017). Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 451–462.
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B*, 80, 369–378.
- Niu, X., Chen, J., & Zhang, Z. (2023). An Analysis of Lateral-Spreading Mechanism of Fiber Bundle for a Two-Stage Pneumatic Platform. *Fibers and Polymers*, 24(8), 2891–2901.
- O'Connor, H. J., & Dowling, D. P. (2018). Evaluation of the influence of low pressure additive manufacturing processing conditions on printed polymer parts. *Additive Manufacturing*, 21(Mart), 404–412.
- O'Connor, H. J., & Dowling, D. P. (2019). Low-pressure additive manufacturing of continuous fiber-reinforced polymer composites. *Polymer Composites*, 40(11), 4329–4339.
- Obande, W., Brádaigh, C. M. Ó., & Ray, D. (2021). Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion—a review. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108771.
- Odera, R. S., & Idumah, C. I. (2023). Novel advancements in additive manufacturing of PLA: A review. *Polymer Engineering and Science*, 63(10), 3189–3208.

- Omuro, R., Ueda, M., Matsuzaki, R., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2017). Three-dimensional printing of continuous carbon fiber reinforced thermoplastics by in-nozzle impregnation with compaction roller. *In Proceedings of the 21st International Conference on Composite Materials*, s. 20-25, Çin.
- Seijas, M. O. V., Piskacev, M., Celotti, L., Nadalini, R., Dauriskikh, A., Baptista, Berg, M., Caltavitu, F., Major, I., Devine, D. M., Maloney, A., Lafont, U., & Makaya, A. (2024). Closing the loop in space 3D printing: Effect of vacuum, recycling, and UV aging on high performance thermoplastics produced via filament extrusion additive manufacturing. *Acta Astronautica*, 219, 164-176.
- Pegoretti, A. (2021). Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(2), 105–115.
- Prajapati, H., Salvi, S. S., Ravoori, D., Qasaimeh, M., Adnan, A., & Jain, A. (2021). Improved print quality in fused filament fabrication through localized dispensing of hot air around the deposited filament. *Additive Manufacturing*, 40, 101917.
- Prashanth, K. G., Scudino, S., Klauss, H. J., Surreddi, K. B., Löber, L., Wang, Z., & Eckert, J. (2014). Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment. *Materials Science and Engineering A*, 590, 153–160.
- Praveena, B. A., Lokesh, N., Buradi, A., Santhosh, N., Praveena, B. L., & Vignesh, R. (2022). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1309–1313.
- Quinn, M., Lafont, U., Versteegh, J., & Guo, J. (2021). Effect of low vacuum environment on the fused filament fabrication process. *CEAS Space Journal*, 13(3), 369–376.
- Ritter, T., McNiffe, E., Higgins, T., Sam-Daliri, O., Flanagan, T., Walls, M., & Harrison, N. M. (2023). Design and modification of a material extrusion 3D printer to manufacture functional gradient PEEK components. *Polymers*, 15(18), 3825.
- Rodzeń, K., Harkin-Jones, E., Wegrzyn, M., Sharma, P. K., & Zhigunov, A. (2021). Improvement of the layer-layer adhesion in FFF 3D printed PEEK/carbon fibre composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 149(May), 106532.
- Sabyrov, N., Abilgazyev, A., & Ali, M. H. (2020). Enhancing interlayer bonding strength of FDM 3D printing technology by diode laser-assisted system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 603-611.
- Sasaki, T., & Matsuki, J. (1998). Effect of wheat starch structure on swelling power. *Cereal Chemistry*, 75(4), 525–529.
- Senatov, F. S., Niaza, K. V., Stepashkin, A. A., & Kaloshkin, S. D. (2016). Low-cycle fatigue behavior of 3D-printed PLA-based porous scaffolds. *Composites Part B: Engineering*, 97, 193–200.

- Shaik, Y. P., Schuster, J., Katherapalli, H. R., & Shaik, A. (2022). 3D Printing under High Ambient Pressures and Improvement of Mechanical Properties of Printed Parts. *Journal of Composites Science*, 6(1).
- Shanmugam, V., Rajendran, D. J. J., Babu, K., Rajendran, S., Veerasimman, A., Marimuthu, U., & Ramakrishna, S. (2021). The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing. *Polymer testing*, 93, 106925.
- Sikder, P., Challa, B. T., & Gummadi, S. K. (2022). A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures. *Materialia*, 22, 101427.
- Silva, J. V., & Rezende, R. A. (2013). Additive Manufacturing and its future impact in logistics. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(24), 277-282.
- Sinkez, P. G., & De Backer, W. (2019). Design for multi-axis fused filament fabrication with continuous fiber reinforcement: unmanned aerial vehicle applications. *AIAA Scitech 2019 Forum*, s. 0156
- Slejko, E. A., Gorella, N. S., Makaya, A., Gallina, P., Scuor, N., & Seriani, S. (2023). Vacuum 3D printing of highly filled polymeric matrix composites. *Acta Astronautica*, 204, 25-33.
- Soliman, E. A., & Furuta, M. (2014). Influence of Phase Behavior and Miscibility on Mechanical, Thermal and Micro-Structure of Soluble Starch-Gelatin Thermoplastic Biodegradable Blend Films. *Food and Nutrition Sciences*, 05(11), 1040–1055.
- Spoerk, M., Arbeiter, F., Cajner, H., Sapkota, J., & Holzer, C. (2017). Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly(lactic acid). *Journal of Applied Polymer Science*, 134(41), 1–15.
- Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2) 72–80.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- Szust, A., & Adamski, G. (2022). Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints. *Engineering Failure Analysis*, 132, 105932.
- Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., & Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber – polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144–150.
- Tezel, T., Topal, E. S., & Kovan, V. (2018). Hibrit İmalat: Eklemeli İmalat ile Talaşlı İmalat Yöntemlerinin Birlikte Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(3), 60-65.

- Tlegenov, Y., Hong, G. S., & Lu, W. F. (2018). Nozzle condition monitoring in 3D printing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 54(Mayıs), 45–55.
- Tourani, H., Molazemhosseini, A., & Khavandi, A. (2013). Effects of Fibers and Nanoparticles Reinforcements on the Mechanical and Biological Properties of Hybrid Composite Polyetheretherketone/Short Carbon Fiber/Nano-SiO₂. *Polymers and Polymer Composites*.
- Ueda, M., Kishimoto, S., Yamawaki, M., Matsuzaki, R., Todoroki, A., Hirano, Y., & Le Duigou, A. (2020). 3D compaction printing of a continuous carbon fiber reinforced thermoplastic. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 105985.
- URL-1. (2024, Nisan 1). Carbonx Peek+Cf10: <https://www.3dxtech.com/product/carbonx-peek-cf10/> adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Nisan 11). Motorcycle Braking System: <https://www.raise3d.com/case/functional-prototyping-of-the-cooling-duct-of-a-motorcycle-braking-system/> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2024, Nisan 12). Aircraft Seat Support: <https://www.anisoprint.com/cases/aircraft-seat-support/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Nisan 13). Bicycle Handlebar: <https://www.anisoprint.com/cases/continuous-fiber-3d-printed-lightweight-bicycle-handlebar/> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Mayıs 13). 7-axis-robotic-arm: <https://www.markforged.com/additive-manufacturing-movement/haddington-dynamics-7-axis-robotic-arm> adresinden alınmıştır.
- URL-6. (2024, Mayıs 13). Lifting tool: <https://www.mark3d.com/en/wartsila-creates-the-worlds-first-3d-printed-ce-certified-lifting-tool-markforged/> adresinden alınmıştır.
- Uşun, A., & Gümrük, R. (2021). The mechanical performance of the 3D printed composites produced with continuous carbon fiber reinforced filaments obtained via melt impregnation. *Additive Manufacturing*, 46, 102112.
- Uzun, İ. (2023). Methods of determining the degree of crystallinity of polymers with X-ray diffraction: A review. *Journal of Polymer Research*, 30(10), 394.
- Vanaei, H. R., Raissi, K., Deligant, M., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Khelladi, S., & Tcharkhtchi, A. (2020). Toward the understanding of temperature effect on bonding strength, dimensions and geometry of 3D-printed parts. *Journal of Materials Science*, 55(29), 14677–14689.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., Guemruek, R., & Şimşek, C. (2023). The relationship between fiber bundle size and mechanical performance of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 10(6), 1190-1203.

- Vatandaş, B. B., Uşun, A., Yıldız, N., Şimşek, C., Cora, Ö. N., Aslan, M., & Gümrük, R. (2023). Additive manufacturing of PEEK-based continuous fiber reinforced thermoplastic composites with high mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 167, 107434.
- Vilaro, T., Colin, C., & Bartout, J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(10), 3190–3199.
- Wach, R. A., Wolszczak, P., & Adamus-Włodarczyk, A. (2018). Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(9), 1–9.
- Wang, F., Wang, G., Ning, F., & Zhang, Z. (2021). Fiber–matrix impregnation behavior during additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites. *Additive Manufacturing*, 37101661.
- Wang, Pei, Pan, A., Xia, L., Cao, Y., Zhang, H., & Wu, W. (2022). Effect of process parameters of fused deposition modeling on mechanical properties of poly-ether-ether-ketone and carbon fiber/poly-ether-ether-ketone. *High Performance Polymers*, 34(3), 337–351.
- Wang, Peng, Zou, B., & Ding, S. (2019). Modeling of surface roughness based on heat transfer considering diffusion among deposition filaments for FDM 3D printing heat-resistant resin. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114064.
- Wang, Peng, Zou, B., Ding, S., Huang, C., Shi, Z., Ma, Y., & Yao, P. (2020). Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing. *Composites Part B: Engineering*, 198, 108175.
- Peng, W. A. N. G., Bin, Z. O. U., Shouling, D. I. N. G., Lei, L. I., & Huang, C. (2021). Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(9), 236–246.
- Wang, Peng, Zou, B., Xiao, H., Ding, S., & Huang, C. (2019). Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK. *Journal of Materials Processing Technology*, 271, 62–74.
- Wang, S. S. (1983). Fracture mechanics for delamination problems in composite materials. *Journal of composite materials*, 17(3), 210–223.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458.
- Watters, M. P., & Bernhardt, M. L. (2018). Curing parameters to improve the mechanical properties of stereolithographic printed specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 46–51.

- Werken, N., Koirala, P., Ghorbani, J., Doyle, D., & Tehrani, M. (2021). Investigating the hot isostatic pressing of an additively manufactured continuous carbon fiber reinforced PEEK composite. *Additive Manufacturing*, 37, 101634.
- Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. *Polymers*, 12(7), 1–42.
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012(1), 208760.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (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.
- Wu, W., Li, J., Jiang, J., Liu, Q., Zheng, A., Zhang, Z., & Li, G. (2022). Influence Mechanism of Ultrasonic Vibration Substrate on Strengthening the Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 14(5).
- Xiaoyong, S., Honglin, M., Peng, G., Zhanwei, B., & Cheng, L. (2017). Experimental Analysis of High Temperature PEEK Materials on 3D Printing Test. *2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, s. 13–16.
- Yan, M., Tian, X., Peng, G., Li, D., & Zhang, X. (2018). High temperature rheological behavior and sintering kinetics of CF/PEEK composites during selective laser sintering. *Composites Science and Technology*, 165, 140–147.
- Yang, D., Cao, Y., Zhang, Z., Yin, Y., & Li, D. (2021). Effects of crystallinity control on mechanical properties of 3D-printed short-carbon-fiber-reinforced polyether ether ketone composites. *Polymer Testing*, 97, 107149.
- Yang, T. C., & Yeh, C. H. (2020). Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using Fused Deposition Modeling (FDM): The effects of printing speed. *Polymers*, 12(6), 1334.
- Ye, W., Dou, H., Cheng, Y., Zhang, D., & Lin, S. (2022). Mechanical and self-sensing properties of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites. *Polymer Composites*, 43(10), 7428–7437.
- Yin, J., Lu, C., Fu, J., Huang, Y., & Zheng, Y. (2018). Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*, 150, 104–112.
- Yu, T., Zhang, Z., Song, S., Bai, Y., & Wu, D. (2019). Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 225, 111147.
- Zanjanijam, A. R., Major, I., Lyons, J. G., Lafont, U., & Devine, D. M. (2020). Fused filament fabrication of peek: A review of process-structure-property relationships.

Polymers, 12(8).

- Zhang, W., Cotton, C., Sun, J., Heider, D., Gu, B., Sun, B., & Chou, T. (2018). Interfacial bonding strength of short carbon fiber / acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling. *Composites Part B*, 137, 51–59.
- Zhang, Y., He, X., Du, S., & Zhang, J. (2001). Al₂O₃ ceramics preparation by LOM (laminated object manufacturing). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 531-534.
- Zhang, Z., Long, Y., Yang, Z., Fu, K., & Li, Y. (2022). An investigation into printing pressure of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 162, 107162.



ÖZGEÇMİŞ

Bahri Barış VATANDAŞ, lise eğitimi Pazar Necat Sağbaş Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nü bölüm birincisi olarak tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2021 yılında TUBİTAK 1001 proje kapsamında yürütülen “Eriyik Yığılma Yöntemini Esas Alan Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ile Yüksek Mekanik Özelliklere Sahip Sürekli Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzeme Üretimi” adlı projede bursiyer Makina Mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2023 yılında Türk Havacılık ve Uzay Sanayi şirketine Teknoloji Geliştirme olarak çalışmasının ardından, 2024 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. İyi seviyede İngilizce bilmekte olan VATANDAŞ, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde halen görevine devam etmektedir. VATANDAŞ'ın bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Vatandaş, B. B., & Gümrük, R. (2023). Interlayer bonding behaviours of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites 3D printed in vacuum. *3th International İstanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, and Applied Sciences*, İstanbul, Turkey.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2024). Mechanical performances of continuous carbon fiber reinforced PEEK (polyether ether ketone) composites printed in a vacuum environment. *Journal of Manufacturing Processes*, 120, 579-594.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2023). Improving the mechanical properties of continuous fiber reinforced thermoplastic composites manufactured by FDM method with fiber ratio optimization. *6th International Sciences and Innovation Congress*. s223-231. Ankara, Turkey.
- Vatandaş, B. B., Gümrük, R., & Uşun, A. (2023). The relationship between fiber bundle size and mechanical performance of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *3D Printing and Additive Manufacturing*.
- Vatandaş, B. B., Nergün, M., Nafiz, Ö., Uşun, A., & Gümrük, R. (2022). Obtaining high mechanical properties polyamide-continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites with infrared heating. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 36, 222-226.

- Uşun, A., Vatandaş, B. B., & Gümrük, R. (2024). Enhanced Mechanical Properties of Continuous Carbon Fiber Reinforced Polyether-Ether-Ketone Composites via Infrared Preheating and High Fiber Volume Fraction. *Additive Manufacturing*, 104289.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2023). Cabinet design for additive manufacturing under vacuum effect with FDM-type printers. *6th International Sciences and Innovation Congress* (pp. 216-222). Ankara, Turkey.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2022). Effect of printing speed on mechanical properties of continuous fiber reinforced thermoplastic composites. *3rd International Dicle Scientific Research and Innovation Congress* (pp. 1552-1561). Diyarbakır, Turkey.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2022). The effect of PEEK polymer and carbon fiber interface interaction on the mechanical behavior of additively manufactured continuous fiber reinforced composites. *4th International Göbeklitepe Scientific Research Congress* (pp. 1043-1050). Şanlıurfa, Turkey.
- Uşun, A., Vatandaş, B. B., & Gümrük, R. (2022). Improving the interlaminar bonding performance of additively manufactured continuous fiber reinforced thermoplastic composites using an infrared heat source. *2nd International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences* (pp. 462-466). Konya, Turkey.
- Çamtekne, A. H., Vatandaş, B. B., Uşun, A., & Gümrük, R. (2023). The effect of printing parameters on mechanical properties in PLA materials produced by FDM method. *4th Baskent International Conference on Multidisciplinary Studies*, s.1-10, Ankara, Turkey.
- Uşun, A., Gümrük, R., Yıldız, N., & Vatandaş, B. B. (2021). Examination of the influence of printing parameters for the continuous carbon fiber-reinforced thermoplastics based on fused deposition modeling. *The 3rd International Conference of Materials and Engineering Technology (TICMET21)*, s. 257. Gaziantep, Turkey.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., Gümrük, R., & Nergün, M. (2022). The effect of heat treatments applied to continuous fiber reinforced thermoplastic composites on mechanical properties. *Open Journal of Nano*, 7(1), 10-17.
- Vatandaş, B. B., Uşun, A., Yıldız, N., Şimşek, C., Cora, Ö. N., Aslan, M., & Gümrük, R. (2023). Additive manufacturing of PEEK-based continuous fiber reinforced thermoplastic composites with high mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 167, 107434.