

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI
GEOMETRİLERE SAHİP YAPILARIN SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK
ANALİZİ**

Samet KATRE

Ekim, 2022

İZMİR

EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERE SAHİP YAPILARIN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK ANALİZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Samet KATRE

Ekim, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SAMET KATRE tarafından **PROF. DR. BİNNUR GÖREN KIRAL** yönetiminde hazırlanan “**EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERE SAHİP YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK ANALİZİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....

Prof. Dr. Binnur Gören KIRAL

Yönetici

.....

Prof. Dr. Evren Meltem TOYGAR

Jüri Üyesi

.....

Prof. Dr. Murat PAKDİL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŐEKKÖR

Tez çalıőmamın gerçekleőtirilmesinde, tÖm çalışma sÖresince engin bilgilerini benimle paylaőan ve yÖnlendirmelerini eksik etmeyen saygıdeğer danıőman hocam Prof. Dr. Binnur GÖREN KIRAL’a, tecrübe ve çalıőmaya katkılarından istifade ettiğim sevgili Gizem ACAR YAVUZ ve Dilek ATİLLA YOLCU’ya ve çalışma boyunca tÖm zorlukları benimle göğÖsleyen ve hayatımın her adımında yanımda olan biricik aileme sonsuz teőekkÖrlerimi sunarım.

Samet KATRE



EKLEMELİ İMALAT İLE ÜRETİLEN FARKLI GEOMETRİLERE SAHİP YAPILARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK ANALİZİ

ÖZ

Mimariden ağır sanayiye üç boyutlu yazıcıların kullanımı gelişen üretim teknolojileri sayesinde gün geçtikçe artmaktadır. Üretime farklı bir bakış açısı getiren üç boyutlu yazıcılar özellikle geleneksel yöntemlerle üretilmeyecek karmaşık geometriye sahip tasarımların üretilmesine olanak sağlar. Bu yöntemin sağladığı avantaj ile mekanik, titreşim, darbe ve akustik özelliklerini iyileştirecek şekilde farklı geometrilere sahip yapıların üretilmesi mümkündür. Bu çalışmada, kesit alanları yaklaşık eşit olacak şekilde daire, kare, altıgen ve eşkenar dörtgen şeklinde boşluklara sahip numuneler tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Numuneler, üç boyutlu üretimde en çok kullanılan yöntem olan birleştirmeli yığma yöntemi ile ABS (Akrilonitril Butadiyen Stiren), PLA (Polilaktik Asit) ve PETG (Polietilen Tereftalat Glikolle Değişmiş) malzemeleri kullanılarak yüzde yüz doluluk oranında üretilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, şekil ve malzeme etkilerinin karşılaştırılması amacıyla ASTM D790 standardına uygun olarak üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen sayısal sonuçlar deneysel bulgularla karşılaştırılmıştır. Yapısal sonlu elemanlar analizleri belirli kuvvet değerlerindeki yüklemeler için SolidWorks™ yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Eğilme yüklemelerine maruz kalan numune üzerinde sayısal ve deneysel analizlerle elde edilen deformasyon dağılımları iyi bir uyum içindedir.

Anahtar kelimeler: 3B baskı, sonlu elemanlar analizi, 3 nokta eğme deneyi, eklemeli imalat.

ANALYSIS OF STRUCTURES HAVING DIFFERENT GEOMETRIES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

The use of three-dimensional printers from architecture to heavy industry has increased day by day with the developing production technologies. Three-dimensional printers, which bring a different perspective to production allow, the production of designs having geometries that cannot be produced by the conventional methods. By the advantage of this process, it is possible to manufacture structures having different geometries to improve their mechanical, vibration, impact and acoustic properties. In this study, specimens with circular, square, hexagonal and rhombic shaped spaces having approximately equal cross-sectional areas were designed and produced with a three-dimensional printer. The specimens were produced with the fused deposition modeling (FDM) method, which is the most widely used method in three-dimensional production, using PLA (Polylactic Acid), ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) and PETG (Polyethylene terephthalate glycol-modified) materials at 100% fill rate. Within the scope of this thesis, three-point bending tests were carried out in accordance with the ASTM D790 standard in order to compare the shape and material effects. Numerical results which were obtained by the finite element analyses were compared with the experimental findings. Structural finite element analyses were carried out by SolidWorksTM software for loads at certain force values. The deformation distributions obtained by the numerical and experimental analyses on the specimen subjected to bending loads are in good agreement.

Keywords: 3D printing, finite element analysis, three point bending test, additive manufacturing.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - 3B YAZICI TİPLERİ VE FİLAMENTLER.....	4
2.1 Eklemeli İmalat	4
2.2 Filament Çeşitleri ve Özellikleri	7
2.2.1 PLA Filament ve Özellikleri.....	7
2.2.2 ABS Filament ve Özellikleri	7
2.2.3 PETG Filament ve Özellikleri	8
BÖLÜM ÜÇ - NUMUNE TASARIMI VE ÜRETİMİ	10
3.1 Numune Üretimi İçin Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	10
3.2 1. Tip Deney Numunelerinin Tasarımı.....	11
3.3 1. Tip Deney Numunelerinin Basılması	13
3.4 1. Tip Deney Numunelerinin Üç Nokta Eğme Deneyleri	15
3.5 2. Tip Deney Numunelerinin Tasarımı.....	19
3.6 2. Tip Deney Numunelerinin Basılması	21

3.7 2. Tip Deney Numunelerinin Üç Nokta Eğme Deneyleri	23
BÖLÜM DÖRT - SONUÇLAR	27
4.1 Üç Nokta Eğme Deneyleri	27
4.1.1 1. Tip Numune Üç Nokta Eğme Deneyleri	27
4.1.2 2. Tip Numune Üç Nokta Eğme Deneyleri	31
4.2 Sonlu Elemanlar Analizleri	37
4.2.1 1. Tip Numunelerin Sonlu Elemanlar Analizleri.....	40
4.2.2 2. Tip Numunelerin Sonlu Elemanlar Analizleri.....	46
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	52
KAYNAKLAR	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Eklemeli imalat metodu işlem adımları	4
Şekil 2.2 Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması	5
Şekil 2.3 EYM yönteminin şematik gösterimi	6
Şekil 3.1 1. tip deney numunesi genel boyutları	11
Şekil 3.2 1. tip numune tasarımları	12
Şekil 3.3 3B baskı ile üretilen 1. tip numuneler	15
Şekil 3.4 Üç nokta eğme deney düzeneği	15
Şekil 3.5 S1 için üç nokta eğme deney düzeneği	16
Şekil 3.6 S2 için üç nokta eğme deney düzeneği	16
Şekil 3.7 S3 için üç nokta eğme deney düzeneği	17
Şekil 3.8 S4 için üç nokta eğme deney düzeneği	17
Şekil 3.9 S5 için üç nokta eğme deney düzeneği	18
Şekil 3.10 S6 için üç nokta eğme deney düzeneği	18
Şekil 3.11 S7 için üç nokta eğme deney düzeneği	19
Şekil 3.12 2. tip numune tasarımları	20
Şekil 3.13 3B baskı ile üretilen 2. tip numuneler	21
Şekil 3.14 Deney numuneleri	22
Şekil 3.15 Üç boyutlu yazıcı ile üretim süreci	22
Şekil 3.16 Deney setinin şematik gösterimi	23
Şekil 3.17 N1 için üç nokta eğme deney düzeneği	24
Şekil 3.18 N2 için üç nokta eğme deney düzeneği	24
Şekil 3.19 N3 için üç nokta eğme deney düzeneği	25
Şekil 3.20 N4 için üç nokta eğme deney düzeneği	25
Şekil 3.21 N5 için üç nokta eğme deney düzeneği	26
Şekil 4.1 Kuvvet-yer değiştirme eğrileri	29
Şekil 4.2 S6 ve S7 numunelerinin karşılaştırılması	30
Şekil 4.3 Numune tipine bağlı olarak maksimum yük değerleri	30
Şekil 4.4 Maksimum yüklere karşılık gelen yer değiştirme değerleri	31
Şekil 4.5 ABS, PLA ve PETG malzemeleri için kuvvet-yer değiştirme eğrileri	32

Şekil 4.6 Tasarımın kuvvet-yer değiştirme üzerine etkisi.....	33
Şekil 4.7 Tasarımın kuvvet-yer değiştirme üzerine etkisi (devamı)	34
Şekil 4.8 Maksimum kuvvet-maksimum yer değiştirme ile şekil ve malzeme ilişkisi	35
Şekil 4.9 Numune geometrisi ve malzemesinin maksimum kuvvet üzerine etkisi....	36
Şekil 4.10 Numune geometrisi ve malzemesinin maksimum yer değiştirme üzerine etkisi.....	36
Şekil 4.11 Bir boyutlu elemanlar	39
Şekil 4.12 2 boyutlu elemanlar	39
Şekil 4.13 3 boyutlu elemanlar	40
Şekil 4.14 1. tip numune sınır şartları	41
Şekil 4.15 1. tip numuneye ait çözüm ağı görseli	41
Şekil 4.16 Yükleme sonrası S1'in şekil değiştirme davranışı.....	42
Şekil 4.17 Yükleme sonrası S2'nin şekil değiştirme davranışı.....	42
Şekil 4.18 Yükleme sonrası S3'ün şekil değiştirme davranışı.....	42
Şekil 4.19 Yükleme sonrası S4'ün şekil değiştirme davranışı.....	43
Şekil 4.20 Yükleme sonrası S5'in şekil değiştirme davranışı.....	43
Şekil 4.21 Yükleme sonrası S6'nın şekil değiştirme davranışı.....	43
Şekil 4.22 Yükleme sonrası S7'nin şekil değiştirme davranışı.....	43
Şekil 4.23 1. tip numune için sayısal ve deneysel yer değiştirme sonuçları	44
Şekil 4.24 2. tip numunenin sınır koşulları	46
Şekil 4.25 2. tip numunenin sonlu elemanlar modeli.....	46
Şekil 4.26 Yükleme sonrası N1'in şekil değiştirme davranışı	47
Şekil 4.27 Yükleme sonrası N2'nin şekil değiştirme davranışı	47
Şekil 4.28 Yükleme sonrası N3'ün şekil değiştirme davranışı	48
Şekil 4.29 Yükleme sonrası N4'ün şekil değiştirme davranışı	48
Şekil 4.30 Yükleme sonrası N5'in şekil değiştirme davranışı	48
Şekil 4.31 2. tip numune için analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	49

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 ABS, PLA ve PETG malzemelerinin mekanik özellikleri	10
Tablo 3.2 Numune tipleri ve toplam alanları	13
Tablo 3.3 3B yazıcı modeli ve yazılımlar	14
Tablo 3.4 Baskı parametreleri	14
Tablo 3.5 Numune tipleri ve toplam alanları	20
Tablo 3.6 Üretim parametreleri.....	23
Tablo 4.1 Deneysel ve sayısal gerilme dağılımlarının karşılaştırılması (1. numune grubu)	45
Tablo 4.2 Deneysel ve sayısal gerilme dağılımlarının karşılaştırılması (1. numune grubu)	50

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojileri son on yılda önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Bu üretim sürecinde, ardışık hammadde katmanları eklenerek üretim gerçekleştirilmektedir. Katmanlar, yapının ince dilimlenmiş yatay bir bölümü olarak görülebilir (Tarang, 2017). Mevcut üretim tekniklerine alternatif olarak 1984 yılında, Chuck Hull tarafından icat edilen ilk üç boyutlu yazıcı makinesinde Stereolitografi (SLA) sistemleri vardır (Horvath, 2014). Stereolitografik teknik, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan reçinenin lazer ışını ile katılaştırılması ilkesine dayanmaktadır (Özsoy ve Duman, 2017). Eriyik yığılma modeli (FDM), ekstrüzyona dayalı bir teknoloji olan Scott Crump tarafından 1989 yılında geliştirilmiştir (Kai ve Fai, 1997). Eriyik yığılma modeli, 3B modeli oluşturmak için erime noktasına kadar ısıtılan bir polimer veya metal filamentini ekstrüde etmek için hareketli bir meme kullanır. ABS, PLA ve PETG bu teknikte en çok kullanılan malzemelerdir. Literatürde çoğunlukla üç boyutlu yazıcılarla üretilen yapıların baskı doluluk oranları ve malzeme türü farklılıklarının mekanik özelliklerine etkilerinin araştırıldığı gözlemlenmiştir (Abeykoon, Sri-Amphorn ve Fernando, 2020).

Rebenaque ve González-Requena (2019), UNE-EN ISO 178 (2011) standardına göre farklı doluluk oranları ve farklı geometrilerde numuneler üretmiş ve doluluk oranının malzeme özelliklerine etkisini göstermişlerdir.

Kołodziej, Żur ve Borek (2018), ise farklı doldurma hızlarında ve farklı geometrilerde numuneler üretmiş ve doluluk oranının malzeme özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

ABS P340 polimeri için farklı yönlerde üç boyutlu yazıcı ile üretimlerini yapan Hernandez, Slaughter, Whaley, Tate ve Asiabanpour (2016) basılan numunelerin malzeme özelliklerini belirlemişlerdir.

Harshitha ve Rao, (2019) ABS ve PLA malzemeden yapılmış civataların yer değiştirme, çekme ve kesme kuvveti değerlerini sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir.

Abbot, Kallon, Anghel ve Dube (2019) sayısal analiz ve çekme testi sonuçlarını karşılaştırmak için farklı dolgu oranlarına sahip baskılı PLA, PETG, ABS ve TPU kare bloklar imal etmişlerdir. %50 dolgu yoğunluğu simülasyonlarının, %100 dolgu yoğunluğunun boyutlarıyla karşılaştırıldığında, neredeyse iki kat yer değiştirmeyi temsil ettiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, 3B baskılı yapıların dolgu yoğunluğundaki değişimi yakından göstermek için çok gövdeli bir modelin düşünülebileceğini vurgulamışlardır.

Abeykoon vd. (2020) farklı geometrilerin, doldurma hızının, meme sıcaklığının ve doldurma deseni koşullarının etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçları, sonlu elemanlar analizlerinden elde ettikleri sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Sayre (2014) ABS'den yapılmış numunelerin çekme, basma ve eğilme davranışlarını farklı baskı yönelimlerini göz önünde bulundurarak sonlu elemanlar yöntemiyle araştırdı.

Martínez, Diéguez, Ares, Pereira, Hernández ve Pérez (2013) farklı yönlerde sahip FDM'den yapılmış lamine çekme test numunelerinin doğru sonlu eleman modellerini geliştirmek için karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüştür.

Zhou, Hsieh, ve Ting (2018) PLA numunelerinin gerilme koşulları altındaki mekanik davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak ve baskı deseni ve dolgu yoğunluğunun nihai gerilme mukavemeti üzerindeki etkilerini inceledi.

Sarvestani, Akbarzadeh, Mirbolghasemi ve Hermenean (2018) 3B baskılı sandviç yapıların yapısal ve kırılma davranışlarını, enerji absorpsiyon yeteneklerini çekme ve üç nokta eğilme testleri ile araştırmışlar, meta-sandviç yapıların çekirdek topolojisinin

ve geometrik parametrelerinin yorulma mekanizmasını ve enerji emme yeteneklerini belirlemişlerdir.

Ercan, Kanber ve Yunus (2018), üç nokta eğilme deneyi ve sonlu elemanlar analizi ile petek, kübik, iskelet ve kafes olmak üzere dört farklı geometriyi dikkate alarak geometrinin sandviç panellerin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Bu çalışma kapsamında, numune kesitine dik ve paralel olacak şekilde yüklemeler altında, dik yüklemeye yedi farklı topolojiye, paralel yüklemeye ise beş farklı topolojiye sahip üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş üç nokta eğme numunelerinin yapısal davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Ayrıca, baskı malzemesinin mekanik davranış üzerindeki etkisini incelemek üzere, üç nokta eğme numuneleri her geometri için ABS, PLA ve PETG şeklinde üç farklı malzemeden üretilmiştir. Her numunenin üç nokta eğme deneyleri ile elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinden malzeme türünün tasarım üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yapının hasar oluşana kadar dayandığı maksimum kuvvet ve maksimum yer değiştirme değerleri her bir geometri ve malzeme için deneysel olarak belirlenmiştir. Elastik bölgede kalacak şekilde belirli yük değerleri için SolidWorksTM yazılımı yardımıyla sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve bulunan yer değiştirme değerleri ilgili yük değerine karşılık gelen deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

3B YAZICI TİPLERİ VE FİLAMANTLER

2.1 Eklemeli İmalat

Eklemeli imalat 3B çizim programları kullanılarak malzemenin katman katman eklenmesiyle, değişik tipteki parçaların hızlı bir şekilde üretimini sağlayan bir imalat yöntemidir (Duman ve Kayacan, 2017). Bu imalat yöntemi, talaş kaldırma, soğuk ya da sıcak şekillendirme gibi geleneksel imalat yöntemlerinin aksine, üretilmek istenen parçanın ham malzemesine ve kullanılacak yöntemle ilgili olarak lazer kaynağı ile ergitilerek veya akmaya elverişli hale getirilerek katmanlar halinde birbirine eklenmesi ilkesine dayanır (Yalçın ve Ergene, 2017). Günümüzde eklemeli imalat yönteminin kullanımı, otomotiv, havacılık, biyomedikal, tıp, gıda ve eğitim sektörlerinde artmaktadır (Dedekayaoğulları ve Kaçar, 2020). Eklemeli imalatın adımları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Eklemeli imalat metodu işlem adımları (Karabıyık ve Apak, 2021)

Eklemeli imalat yönteminin diğer kullanılan geleneksel yöntemlere kıyasla çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Avantajlar aşağıda belirtilmiştir (Tofail, Koumoulos, Bandyopadhyay, Bose, O'Donoghue ve Charitidis, 2018).

- Tasarımın parçaya doğrudan çevirisi
- Ek alet veya üretim maliyeti olmadan daha fazla parça üretimi
- Karmaşık geometrili parçaların üretilmesine izin veren fonksiyonel tasarım
- İçi boş veya kafes yapılarla esnek ve hafif bileşen üretimi

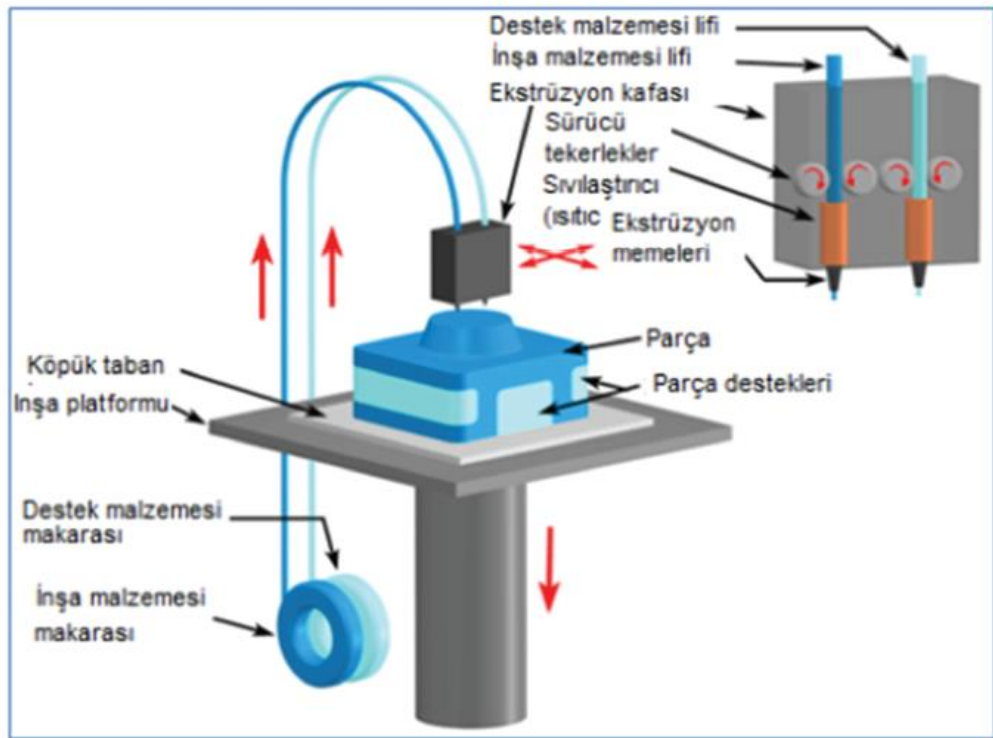
- Bileşenlerin son şekline minimum veya hiç ek işlem olmadan doğrudan üretim yeteneği
- Sıfır atık yaklaşma potansiyeline sahip olup malzeme kullanımını en iyi düzeye çıkarma
- Pazara daha hızlı transfere yol açan genel ürün geliştirme ve üretim süresinde büyük bir azalma
- Çok çeşitli parçaların üretimine yönelik daha küçük operasyonel ayak izi
- İsteğe bağlı üretim, projeksiyona dayalı üretimden uzaklaşma
- Mükemmel ölçeklenebilirlik

Eklemlı imalat yönteminde, sık kullanılan imalat teknolojileri Şekil 2.2’de verilmiştir.

	TIP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
EKLEMELİ İMALAT	SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey iş-sonu -Düşük baskı hızı
		Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
				DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük,projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV ışını	-Çoklu malzeme ile baskı -İyi yüzey iş-sonu -Yüksek doğruluk -Yüksek detay
	KATI	Yapışık objeler	Sac laminasyon	LOM	Kağıt Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey iş-sonu -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
	TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek-Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi -Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
				DMSL	Metal tozu, Seramik tozu		
				SLM		Elektron Işını	
				EBM			
		Direk enerji depolama		LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son-işlem gerekir
EBAM							
Yapıştırma		Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik	

Şekil 2.2 Eklemlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılması (Sürmen, 2019)

3B yazıcılar içerisinde en fazla kullanılan teknik Eriyik Yığınlama Modelleme (EYM) yöntemidir (Sürmen, 2019). EYM tekniğinde üretim malzemesi olarak termoplastik malzeme makaraya sarılmış şekilde filament olarak cihaza beslenir (Özsoy ve Duman, 2017). Bu filament, sıvı hale getirilerek x-y ekseninde hareket edebilen nozul tarafından z ekseninde hareket edebilen imalat platformuna dökülür (Yalçın ve Ergene, 2017). Her bir katmanın üretimi sonrasında, platformun seçilen tabaka kalınlığı kadar aşağı indirilerek bir sonraki katmanın imal edilmesi ile süre gelen bir imalat yöntemidir (Başçı ve Yamanoglu, 2021). Eriyik yığınlama modelinin şematik gösterimi Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 EYM yönteminin şematik gösterimi (Özsoy ve Duman, 2017)

2.2 Filament Çeşitleri ve Özellikleri

2.2.1 PLA Filament ve Özellikleri

PLA, en yaygın plastik filamentlerden, biyolojik olarak parçalanabilen (Ray ve Okamoto, 2003) ve nişastadan türetilen çevre dostu bir plastik Polilaktik Asitten (veya PLA ile kısaltılmış Polilaktid) oluşur. Baskı sırasında kötü kokmaz ve dumanı tehlikeli değildir; bu nedenle özel güvenlik önlemleri veya cebri havalandırma gerektirmez. PLA organik yapıda olan malzemelerden üretilmektedir. PLA, filament olarak en yaygın kullanılan filament tipidir.

Kullanım alanlarından bahsedilecek olursa sağlığa zararlı bir madde olmayıp deri, gıda ile temas edebilecek ürünlerde kullanılabilirler. PLA malzemesinin özellikleri aşağıda verilmiştir. (Artiboyut web sitesi, 2022)

- ABS malzemesine göre basımı daha kolay olup darbelere karşı dayanıklıdır.
- Gevrek yapıda olup esnekliği azdır.
- Aseton ile çözülmesi zordur.
- Baskı sıcaklığı genellikle 190°C – 220°C arasındadır.
- Soğuma sırasında çatlama gibi sorunlar ile karşılaşılmaz.
- Baskı yatağı için 50°C – 70°C sıcaklık aralığı önerilmektedir.
- Bir kere ayarlanmış sıcaklık, yatak kalibrasyonu ve üretim hızı ile sorunsuz basım yapılabilir.

2.2.2 ABS Filament ve Özellikleri

En yaygın diğer bir filament ise Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)’den yapılır. Birçok amaç için kullanılan petrol bazlı bir plastiktir. Dumanı kötü kokar ve hatta sağlığa zararlı olarak kabul edilir; bu nedenle uzun süre ABS yazdırırken ilave havalandırma (Bryley, George, Boyes ve Roger, 2019) kullanılması önerilir. ABS filament, iyi yapışması için genellikle Kapton bantla kaplanmış, ısıtılmış bir yatak üzerine basılır ve yazıcının kendisine maliyet ve karmaşıklık katar. ABS’nin PLA’ya göre avantajı, elde edilen nesnelerin dayanımı daha yüksek, daha az kırılkan olması ve

daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmesidir. PLA'dan sonra en yaygın olarak kullanılan filament ise ABS'dir. Hammadde özellikleri dikkate alındığında PLA'ya göre baskısı görece daha zor olsa da teknik özellikleri açısından birçok kullanım alanında PLA'dan üstündür. Bu nedenle ev eşyaları ve bir çok tüketim ürününde çoğunlukla ABS hammaddeli ürün yer almaktadır. ABS filamentinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir (Artiboyut web sitesi, 2022).

- Sertliği yüksek olup darbelere karşı dirençlidir.
- Nispeten esnekliği azdır.
- Aseton ile çözümlenebilir ve yüzey işlemesi yapılabilir.
- Gıda ile teması önerilmemektedir.
- Baskı sıcaklığı genellikle 230°C – 250°C arasındadır.
- Soğuma sırasında kalkma ve çatlama sorunları ile karşılaşılmasın için kapalı sisteme sahip yazıcı önerilmektedir.
- Yatak sıcaklığı 80°C – 120°C arasında önerilmektedir.
- PLA'ya göre baskısı oldukça zordur.

2.2.3 PETG Filament ve Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan diğer bir malzeme türü ise Polietilen Tereftalat Glikol ile modifiye edilmiş (PETG) malzemedir. PETG malzemesinin karakteristik özellikleri şunlardır: Kokusuz, düşük büzülme oranı, hidrofobiklik (suyu emmeyecek ve bu nedenle ekstrüderleri tıkamayacaktır), olağanüstü tokluk ve yüksek darbe mukavemeti, iyi likidite (sorunsuz akar), yüksek mekanik mukavemet ve mükemmel esneklik, yüksek şeffaflık, iyi parlaklık, geri dönüştürülebilir. Üretim parametreleri ve tasarımın geometrik yapısı mekanik performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

PET (Polietilen tereftalat), dünyada en yaygın kullanılan plastik çeşitidir. Su ve meşrubat şişeleri, mutfak gereçleri, kurabiye kalıpları, giyim lifleri gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. PETG filamentinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir (Artiboyut web sitesi, 2022):

- Yüksek sertliğe sahip olup darbelere karşı dayanıklıdır ve hafiftir.

- ABS ve PLA malzemelerine göre daha sünektir.
- Aseton ile çözümlenemez.
- Gıda ile temasında sakınca yoktur.
- Baskı sıcaklığı genellikle 220°C–250°C arasındadır.
- Soğuma sırasında kalkma ve çatlama sorunları ile görece daha az karşılaşılır.
- Yatak sıcaklığının 60°C–70°C arasında olması önerilmektedir.
- Katmanlar baskı esnasında birbirine sağlıklı bir şekilde yapışmaktadır.



BÖLÜM ÜÇ

NUMUNE TASARIMI ve ÜRETİMİ

3.1 Numune Üretimi İçin Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3B yazıcılarla üretimi yapılabilen çeşitli malzemeler, günümüzde birçok sektörde fonksiyonel tasarımlar ve üretim parametreleri geliştirilerek kullanılmaktadır. Üretim parametreleri ve tasarımın geometrik yapısı mekanik performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Malzeme doluluk oranı, belirlenen üretim dolgu deseni, yapı yönü, katman kalınlığı ve detaylı üretim hızı ayarları gibi üretim parametreleri değiştirilerek malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılabilir. Malzeme özellikleri, geometrik parametreler ve çekirdek hücre topolojisi, yapısal performansı etkiler ve çeşitli mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan topolojilerden biri bal peteğidir (Sarvestani vd., 2018). Literatür, özellikle düşük maliyetli 3B yazıcılar tarafından işlenen parçaların mekanik özellikleri konusunda bir miktar sınırlı kalmaktadır.

Bu çalışmada, numune kesitine dik ve paralel olacak şekilde iki farklı araştırma yapılmıştır. Bunlar tez kapsamında, 1. numune ve 2. numune türü şeklinde adlandırılmıştır. 1. numune üretimi, deneyleri ve sayısal analizlerinde, PLA, ABS ve PETG gibi üç tip baskı malzemesi için yedi farklı topoloji incelenmiştir. 2. numune üretiminde ise, PLA, ABS ve PETG gibi üç tip baskı malzemesi için beş farklı topoloji incelenmiştir.

Tablo 3.1 ABS, PLA ve PETG malzemelerinin mekanik özellikleri

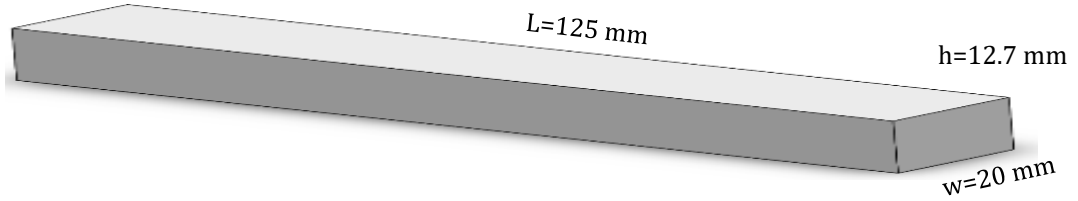
Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı (-)	Özkütle (g/cm ³)
ABS	2100	0.35	1.03
PLA	2300	0.36	1.23
PETG	2100	0.4	1.27

Malzeme doluluk oranı, belirlenen üretim dolgu deseni, yapı yönü, katman kalınlığı ve detaylı üretim hızı ayarları gibi üretim parametreleri değiştirilerek malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Tezde elde edilen optimum üretim

parametrelerinden üretilen numunelere ait sonuçlar paylaşılmıştır. Üretim parametrelerinin yanı sıra tasarım geometrisinin de mekanik performans üzerinde oldukça önemli etkiye sahip olması bu çalışmanın temellerini oluşturmuştur. Bu malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

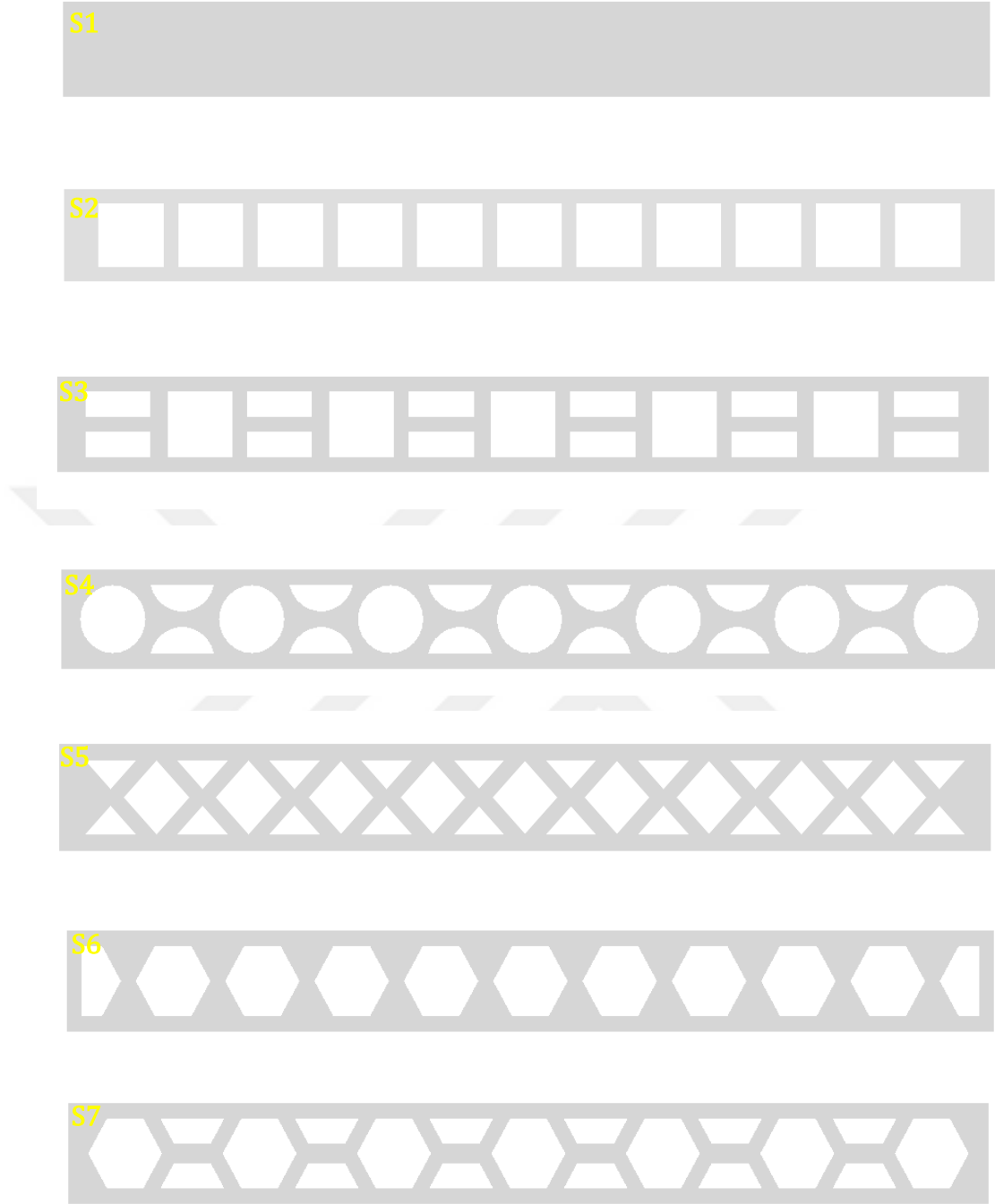
3.2 1. Tip Deney Numunelerinin Tasarımı

Bu çalışmanın temel amacı, model topolojisi ve baskı malzemesinin 3B baskılı yapıların eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemektir. Bu nedenle üç noktalı eğilme numuneleri ABS, PLA ve PETG kullanılarak üretilmiş ve her malzeme için ASTM D790 (ASTM 790) ve ASTM C393 standartlarına (ASTM C393) göre yedi farklı çekirdek topolojisi tasarlanmıştır. Test numunelerinin boyutları Şekil 3.1’de görüldüğü gibi $12.7 \times 20 \times 125 \text{ mm}^3$ ’tür.



Şekil 3.1 1. tip deney numunesi genel boyutları

Numuneler tamamen dolu, kare, daire, eşkenar dörtgen ve altıgen boşluklu olmak üzere yedi farklı tipte tasarlanmıştır. Şekil 3.2’de numunelerin kesit görünüşleri verilmektedir. Dolu olarak tasarlanan numune S1, tek tip kare boşluklu olarak tasarlanan numune S2, kare ve dikdörtgen boşluklara sahip olan numune S3, daire boşluğa sahip olacak şekilde tasarlanan numune S4, eşkenar dörtgen boşluklu numune S5, tek tip altıgen boşluklu olarak tasarlanan numune S6 ve iki tip altıgen boşluklu olarak tasarlanan numune ise S7 olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.2 1. tip numune tasarımları

Deney standartına göre, destek genişliği–derinlik oranı 1:16 olarak tavsiye edilmektedir. Ancak literatürde daha kalın örnekler de mevcuttur (Sarvestani vd., 2018). Geometrik boşluklar arasındaki minimum dikey mesafe 2 mm olarak tasarlanmıştır. Her numune için kullanılan toplam filament hacimleri ve toplam yanıl yüzey alanı Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Numune tipleri ve toplam alanları

Numune	Toplam Alan (mm ²)	Kullanılan Filament (mm ³)
S1	8683,00	32481,54
S2	14673,82	15186,84
S3	16490,56	17359,78
S4	15998,36	18986,89
S5	18452,18	20260,89
S6	13759,78	19220,99
S7	16473,53	17624,09

3.3 1. Tip Deney Numunelerinin Basılması

Üç nokta eğilme deney numuneleri, bir memeden ekstrüde edilen erimiş plastikten karmaşık nesneler oluşturan kaynaşmış çökeltme modellemesi (FDM) ile üretilmiştir. Plastik filament (termoplastik malzeme) bir bobin üzerine sarılıp meme veya nesne iken ekstrüzyon memesine malzeme beslemek için makaradan çıkarılır. Bilgisayar kontrollü bir mekanizma ile üç eksen boyunca hareket ettirilir ve malzeme ekstrüzyondan hemen sonra sertleşmektedir.

SolidWorks™ yazılımı kullanılarak modellenen numuneler, modeli dilimleme programlarında açmak için STL dosya formatına dönüştürülmüştür. ABS malzemeden üretilcek numunelerin modellenebilmesi için, üç boyutlu dilimleme programı PrusaSlicer (Guo ve Leu, 2013) ile STL dosya formatındaki 3B katı modeller katman katman ayrılmıştır. PLA ve PETG numuneleri için başka bir dilimleme programı olan CURA kullanılmıştır. Bu çalışma için hazırlanan numunelerden PLA numuneleri Ultimaker/2+ ile, ABS ve PETG malzemeleri ise Prusa i3 MK3 3D yazıcılar ile üretilmiştir. Yazıcı ve yazılım tipleri Tablo 3.3'te belirtilmiştir. Dilimleme programları farklı olsa da tüm gelişmiş ayarlar aynı şekilde düzenlenmiştir.

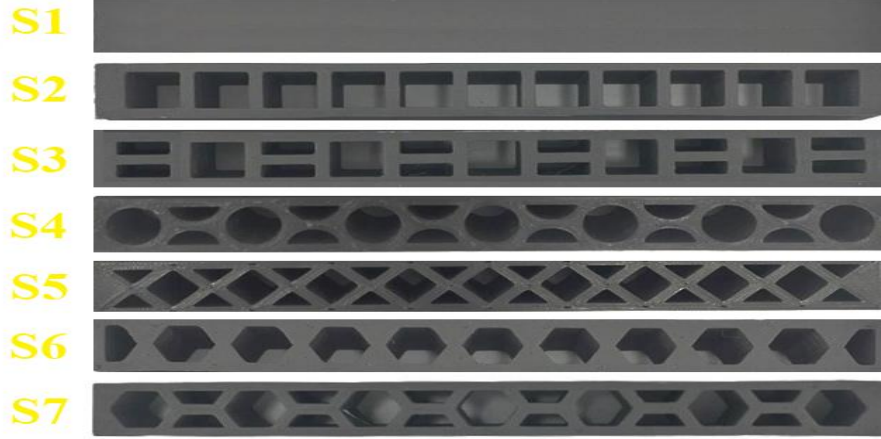
Tablo 3.3 3B yazıcı modeli ve yazılımlar

	ABS	PLA	PETG
FDM Yazıcı	Prusa i3 MK3	Ultimaker / 2 +	Prusa i3 MK3
Yazılım	PrusaSlicer 2.2.0	CURA 4.5.0	CURA 4.5.0

Bu bölümde baskı malzemesi olarak Porima3D (Porima web sitesi, 2020) tarafından üretilen 1.75 mm çapında ABS, PLA ve PETG filamentleri kullanılmıştır. Ürün kataloğunda ABS malzeme için üretim sırasında tavsiye edilen meme sıcaklığı 220-255°C, ısıtıcı plaka sıcaklığı 80-100°C olarak belirtilmiştir. Bu çalışmada meme sıcaklığı 250°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığı 90°C seçilmiştir. PLA malzeme için ürün kataloğunda üretim sırasında tavsiye edilen nozul sıcaklığı 200-220°C ve ısıtıcı plaka sıcaklığı 60-75°C olarak belirtilmiştir. Baskı sırasında meme sıcaklığı 215°C’de ve ısıtıcı plakanın sıcaklığı 60°C’de tutulmuştur. PETG ürün kataloğunda, önerilen meme sıcaklığı ve baskı sırasındaki plaka sıcaklığı sırasıyla 230-265°C ve 90-100°C olarak belirtilmiştir. PETG numunelerinin baskısında, nozul ve ısıtıcı plakanın sıcaklık değerleri sırasıyla 245°C ve 90°C olarak ayarlanmıştır. Tüm malzemeler için x ve y eksenleri için üretim toleransı $\pm 0,05$ mm’dir. Tüm numuneler %100 dolgu yoğunluğuna, 0,2 mm katman yüksekliğine sahiptir ve doğrusal dolgu deseni seçilerek üretilmiştir. Baskı parametreleri ile ilgili detaylar Tablo 3.4’te verilmiştir. Ayrıca cihazın plakasına yatay olarak yerleştirilen numunelerin üretiminde herhangi bir destek malzemesine ihtiyaç duyulmamıştır.

Tablo 3.4 Baskı parametreleri

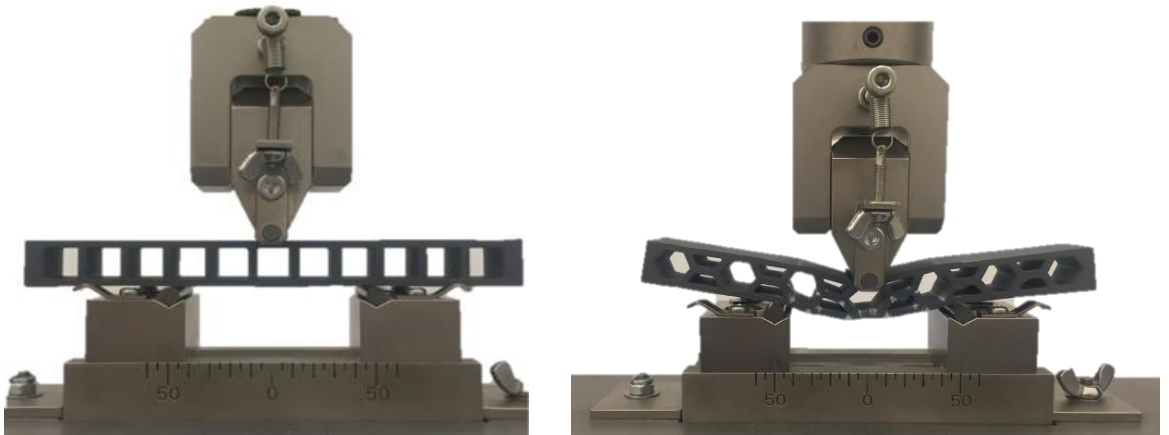
Yazdırma Parametreleri	ABS	PLA	PETG
Nozul Çapı	1.75 mm	1.75 mm	1.75 mm
Katman Uzunluğu	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm
Dolgu Deseni	Doğrusal	Doğrusal	Doğrusal
% Doluluk	100	100	100
Nozul Sıcaklığı	250°C	215°C	245°C
Isıtıcı Plaka Sıcaklığı	90°C	60°C	90°C
X-Y Eksenleri Üretim Toleransı	± 0.05 mm	± 0.05 mm	± 0.05 mm



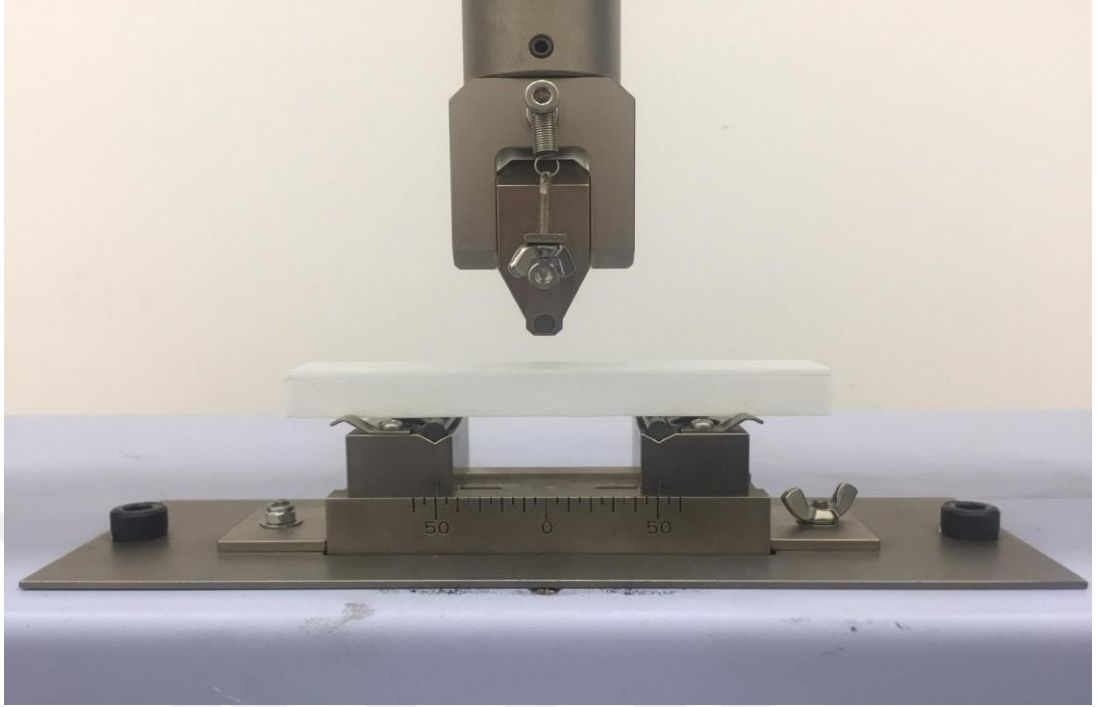
Şekil 3.3 3B baskı ile üretilen 1. tip numuneler

3.4 1. Tip Deney Numunelerinin Üç Nokta Eğme Deneyleri

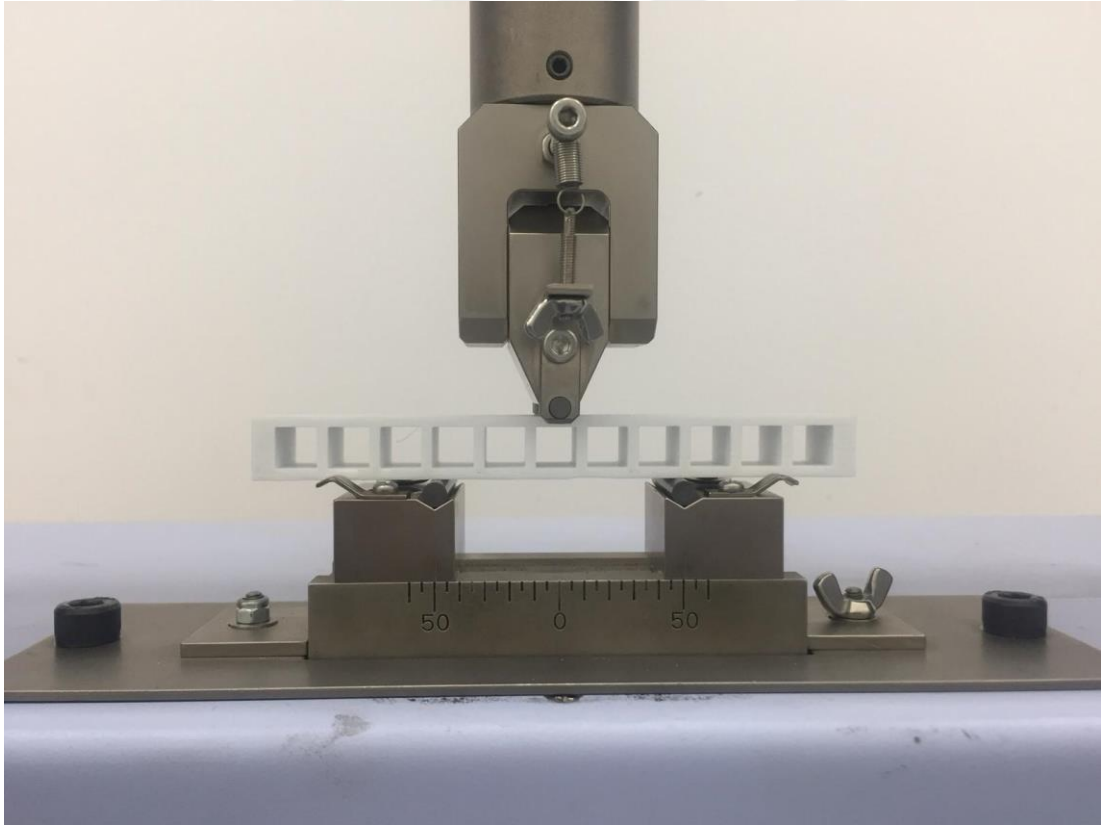
3B baskı ile üretilen numunelerin Shimadzu AG-X çekme test cihazı kullanılarak üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Şekil 3.4'te gösterilen deney düzeneği, 3B baskı numuneleri üzerindeki farklı hücresel şekillerin üç noktalı eğilme kapasitesini belirlemek için kullanılmıştır. Deneyler, oda sıcaklığında 1 mm/dk'lık bir yer değiştirme hızında gerçekleştirilmiştir. Yük, numunenin orta noktasındaki merkezi bir silindir tarafından uygulanırken, iki silindir numuneyi alttan desteklemektedir. Destek açıklığının uzunluğu $L_s=50$ mm olarak seçilmiştir. Üç farklı malzemeden üretilmiş yedi numune bu düzende test edilmiştir. Şekil 3.5-3.11'de 1. tip yükleme durumuna maruz numunelere ait üç nokta eğme deney düzenekleri ve numuneler görülmektedir.



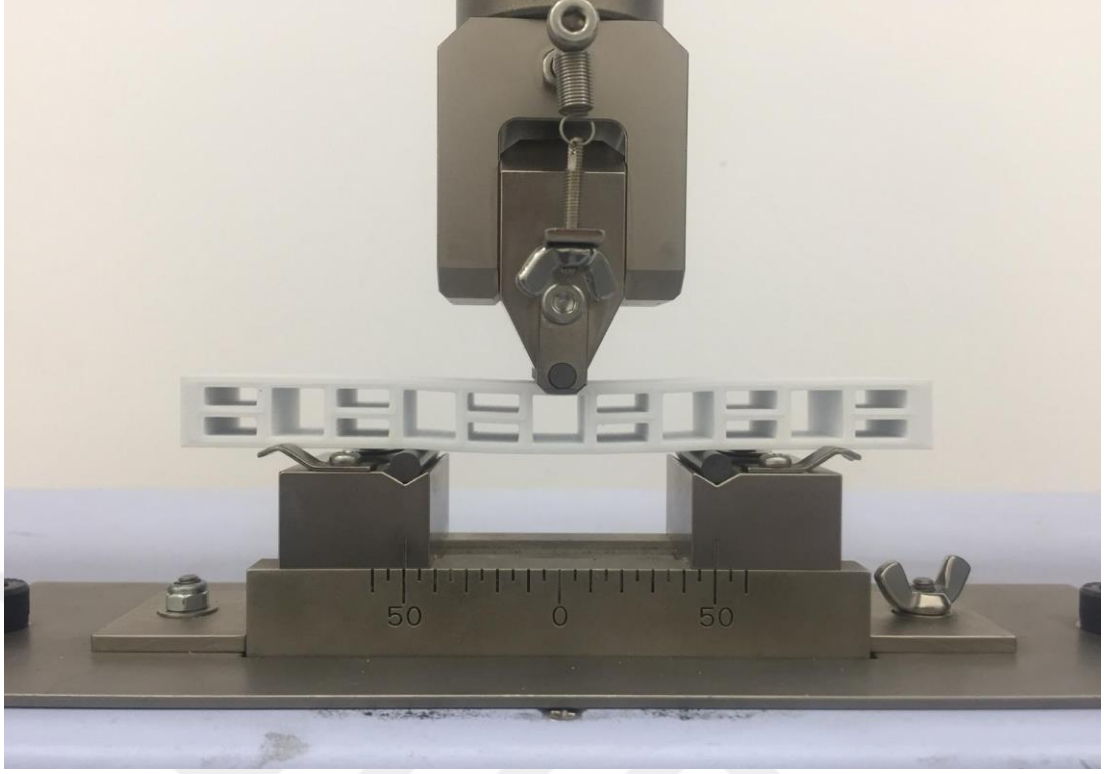
Şekil 3.4 Üç nokta eğme deney düzeneği



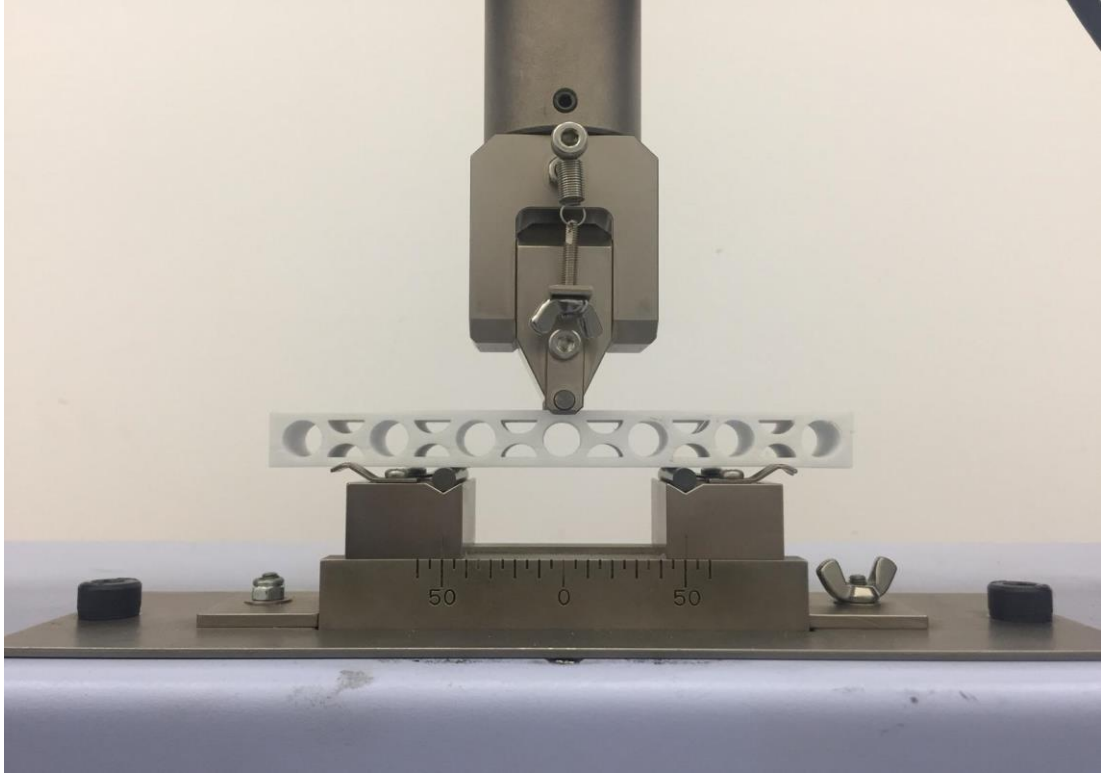
Şekil 3.5 S1 için üç nokta eğme deney düzeneği



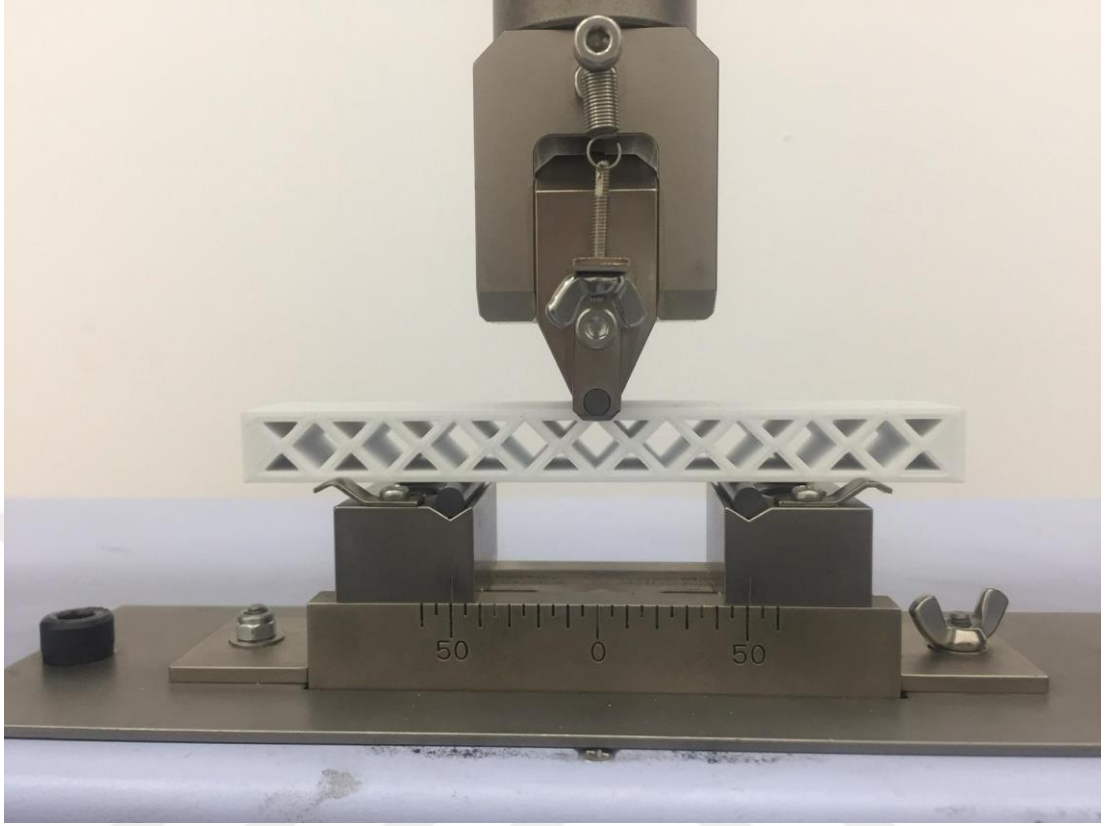
Şekil 3.6 S2 için üç nokta eğme deney düzeneği



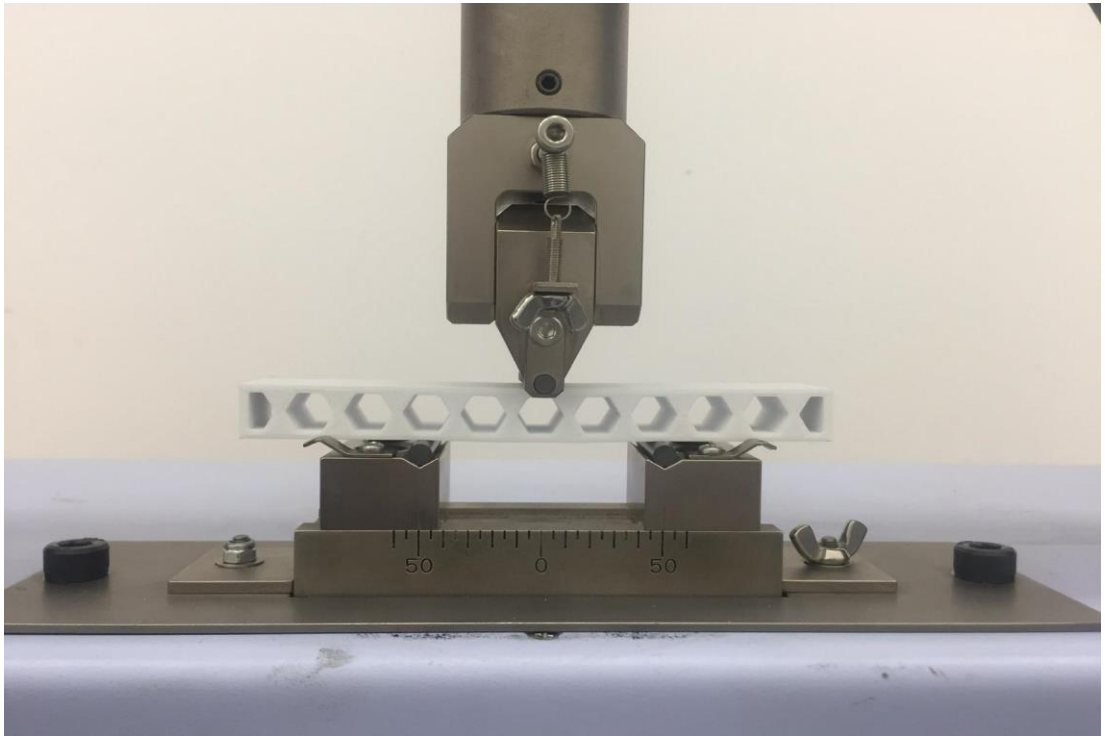
Şekil 3.7 S3 için üç nokta eğme deney düzeneği



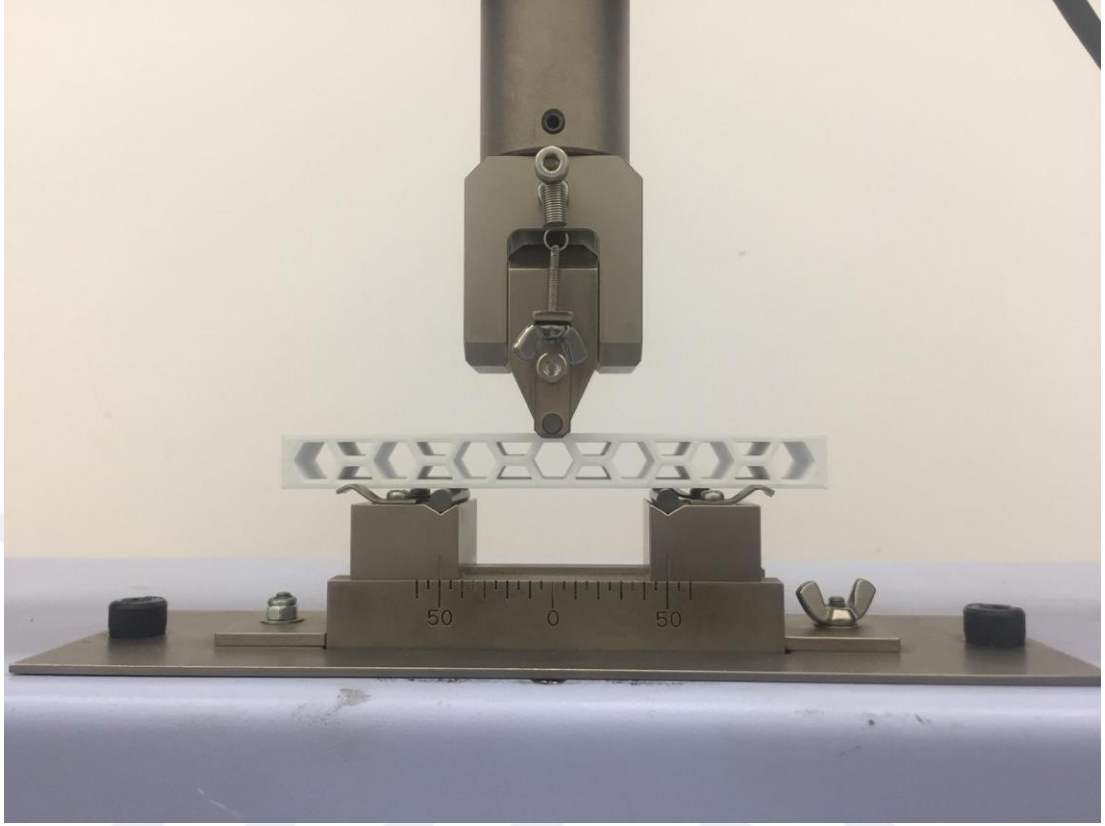
Şekil 3.8 S4 için üç nokta eğme deney düzeneği



Şekil 3.9 S5 için üç nokta eğme deney düzeneği



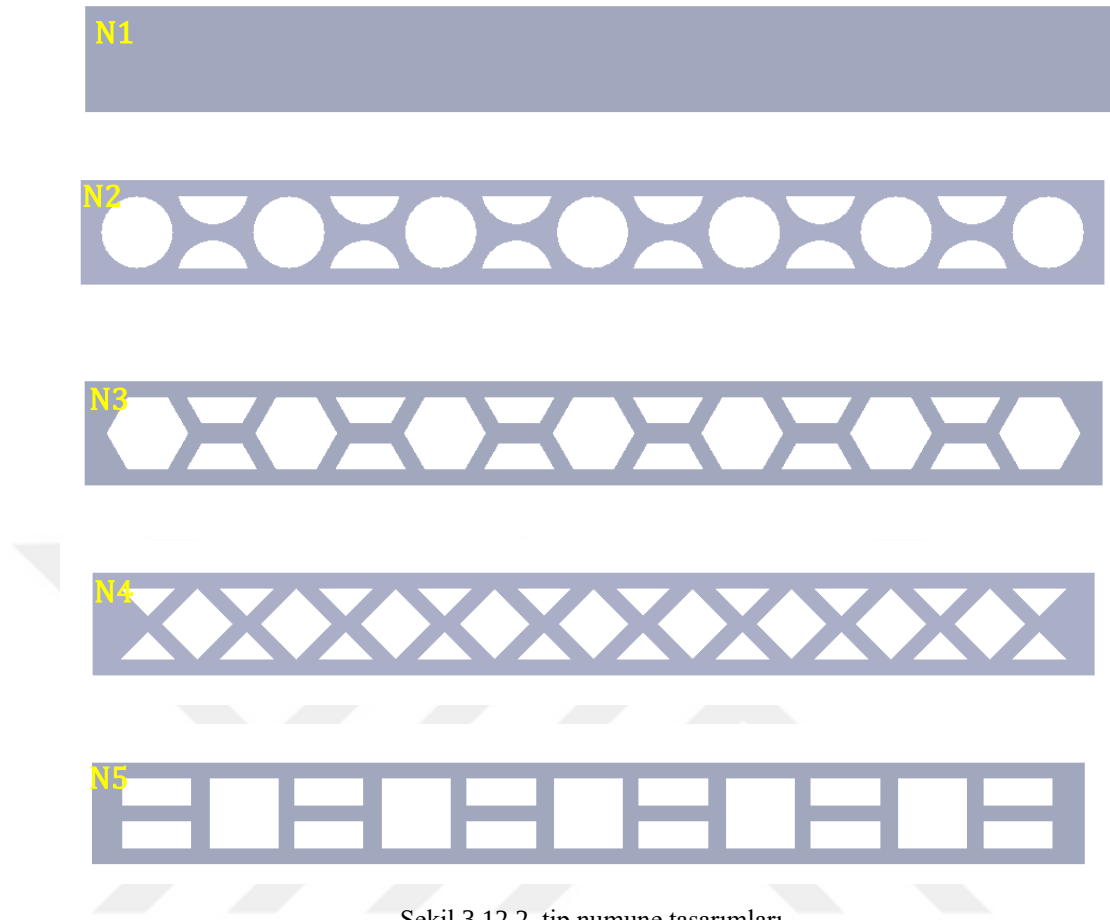
Şekil 3.10 S6 için üç nokta eğme deney düzeneği



Şekil 3.11 S7 için üç nokta eğme deney düzeneği

3.5 2. Tip Deney Numunelerinin Tasarımı

2. tip numunelerin üç nokta eğme deneyleri için ABS (Akrilonitril Butadiyen Stiren), PLA (Polilaktik Asit) ve PETG (Polietilen Tereftalat Glikol-Modifiye) malzemeleri kullanılarak ASTM D790'a göre, beş farklı geometri dikkate alınmıştır. Tasarımlar SolidWorks™ bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak oluşturulmuştur. Tasarımlar Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Tasarımdaki kirişlerde daire, kare, altıgen ve eşkenar dörtgen şeklinde boşluklar bırakılmış ve bu kirişler üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 2. tip numuneler N1, N2, N3, N4 ve N5 şeklinde adlandırılmıştır. Tasarım numunelerinin her birinin genel boyutları $12.7 \times 3.2 \times 125 \text{ mm}^3$ 'dür.



Şekil 3.12 2. tip numune tasarımları

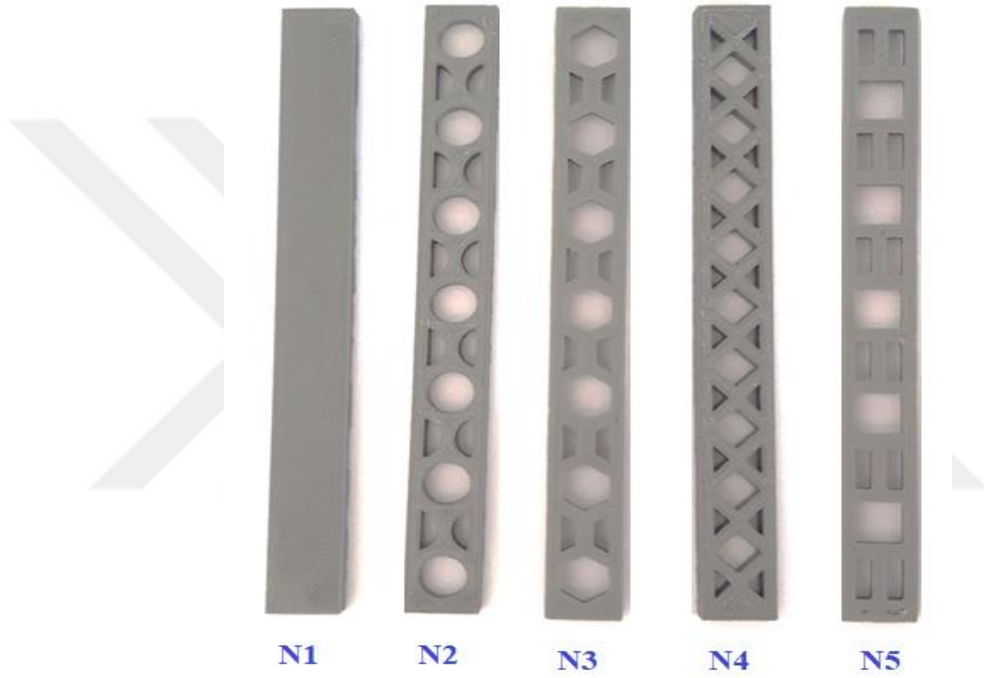
Tablo 3.5 2. tip numunelerin kesit alanlarını göstermektedir.

Tablo 3.5 Numune tipleri ve toplam alanları

Numune	Toplam Alan (mm ²)
N1	4056,28
N2	4102,25
N3	4104,05
N4	4670,10
N5	4082,17

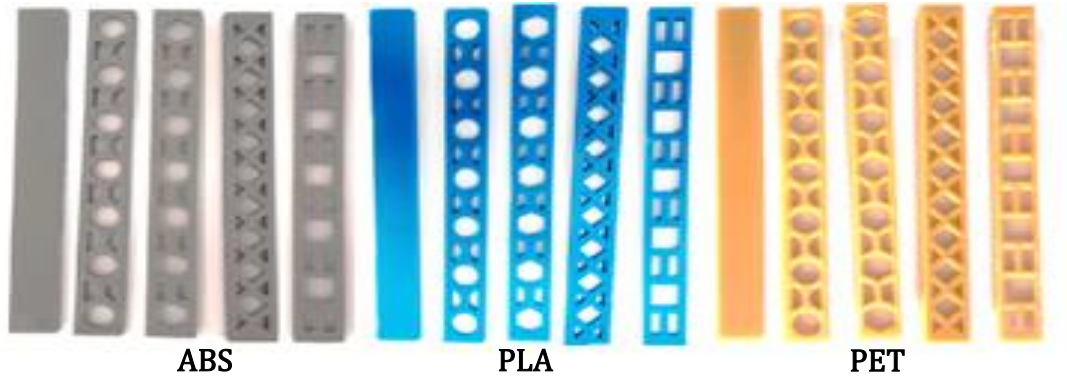
3.6 2. Tip Deney Numunelerinin Basılması

Geometrik yapılar oluşturulurken yüzey alanlarının birbirine yakın olarak belirlenmesi önemli tasarım ölçütüdür. Geometrik delikler eklenen numuneler sırasıyla “N1, N2, N3, N4 ve N5” olarak adlandırılmış ve Şekil 3.13’de beş farklı model topolojisine sahip numunelerin baskıları görülmektedir.



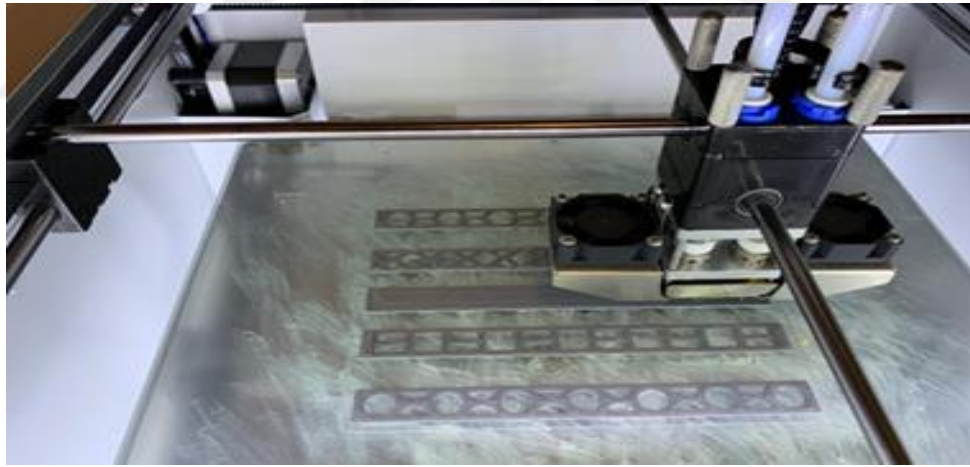
Şekil 3.13 3B baskı ile üretilen 2. tip numuneler

Bu geometrik yapılar oluşturulurken tasarım farklılıklarının üç nokta eğme testi üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Tasarlanan geometriler birleştirmeli yığma modeli (FDM) üretim teknolojisine sahip yazıcılar ile üretilmiştir. Şekil 3.14’de görülen numuneler ABS (gri), PLA (mavi) ve PETG (turuncu) malzemelerinden üretilmiştir. Deney numunelerinin her birinin genel boyutları $12.7 \times 3.2 \times 125 \text{ mm}^3$ ’dür.



Şekil 3.14 Deney numuneleri

Beş farklı geometrik yapı, Şekil 3.15’deki üç boyutlu yazıcı üretim sürecinde gösterildiği gibi, üretim yönleri aynı olacak şekilde ısıtıcı tablaya yerleştirilmiş ve aynı anda üretilmiştir. Bu sayede üretim sürecinden kaynaklı sonuçların mekanik performansta aynı etkiyi göstermesi beklenmiştir.



Şekil 3.15 Üç boyutlu yazıcı ile üretim süreci

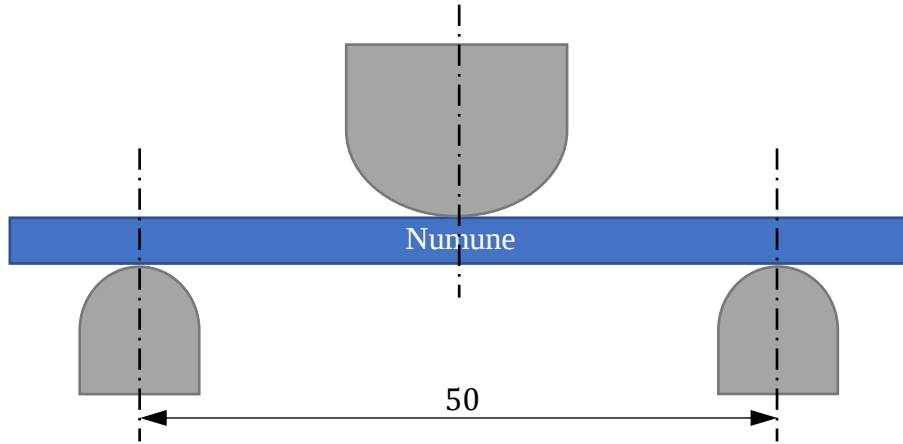
DeneySEL sonuçları hassas bir şekilde karşılaştırılabilmek için tüm numuneler aynı doluluk oranında üretilmiştir. Tasarımsal olarak belirlenen dolgu desenleri için doluluk oranı %100 olarak seçilmiştir. Üretim parametreleri ayrıntılı olarak Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Üretim parametreleri

	ABS	PLA	PETG
Filament rengi	Gri	Mavi	Turuncu
Filament çapı	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm
Nozul Çapı	0,4 mm	0,4 mm	0,4 mm
Katman kalınlığı	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Dolgu oranı (%)	100	100	100
Dolgu deseni	Doğrusal	Doğrusal	Doğrusal

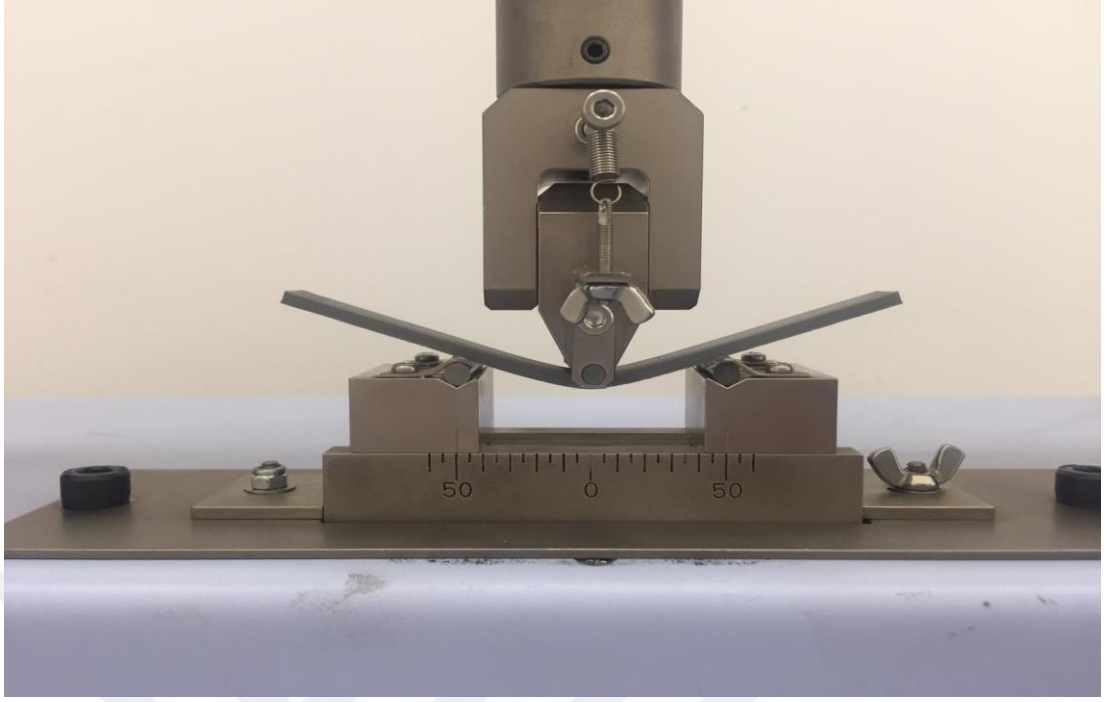
3.7 2. Tip Deney Numunelerinin Üç Nokta Eğme Deneyleri

Bu çalışmada üç malzeme çeşidi ve beş farklı geometrik yapının her biri için, üç özdeş numune üretilmiştir. Üç nokta eğme deneyleri 1 mm/dk hızla Shimadzu AG-X test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazında Şekil 3.4’de gösterildiği gibi destek aralığı 50 mm olarak ayarlanmıştır ve Şekil 3.16’da gösterildiği gibi test cihazına yerleştirilerek testler yapılmıştır.

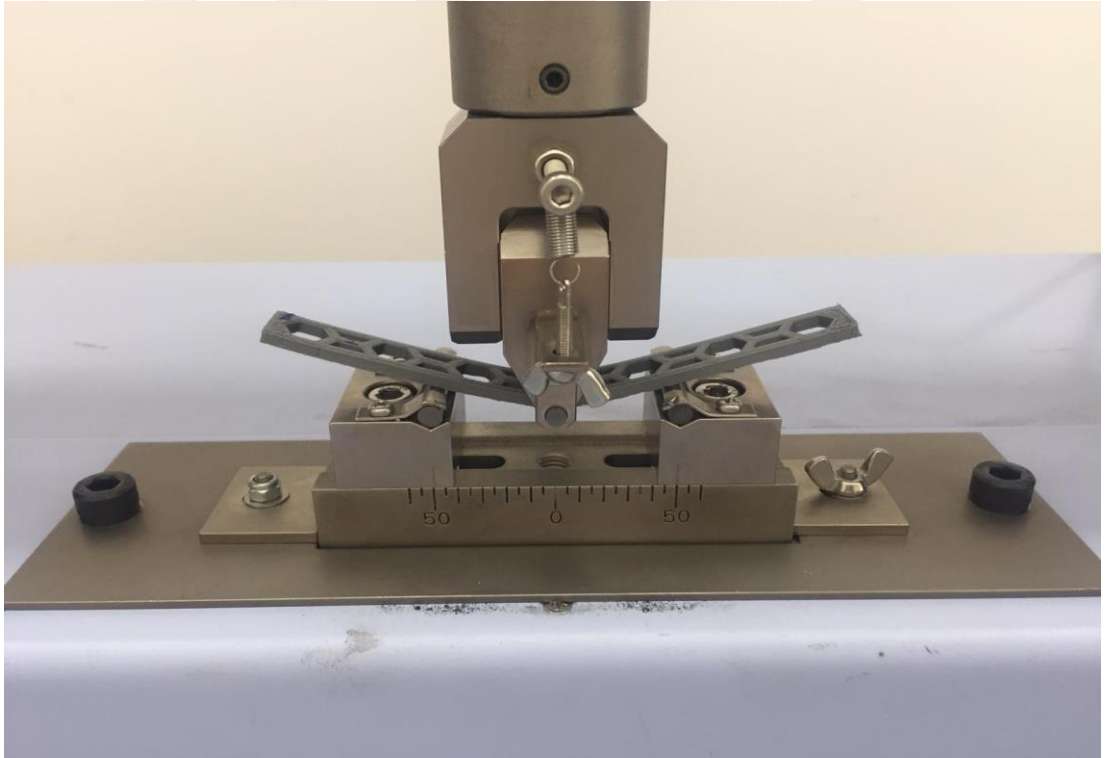


Şekil 3.16 Deney setinin şematik gösterimi

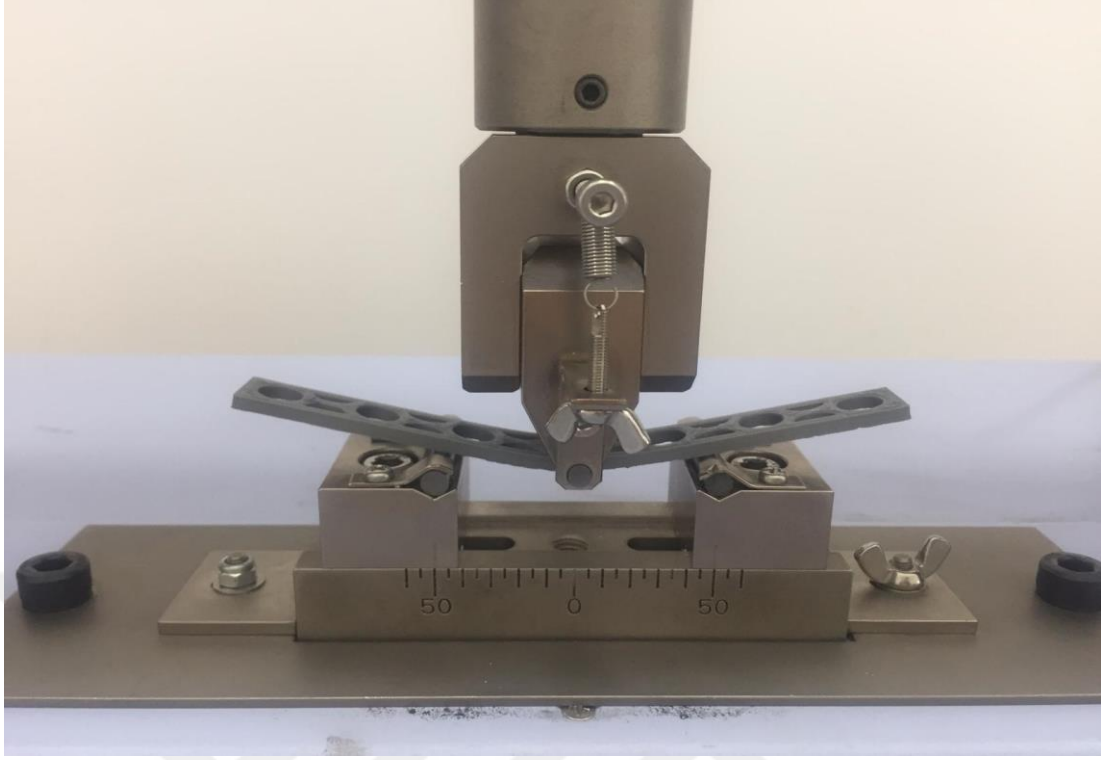
Şekil 3.17-3.21’de 2. tip yükleme durumuna maruz numunelere ait üç nokta eğme deney düzeneği ve numuneler görülmektedir.



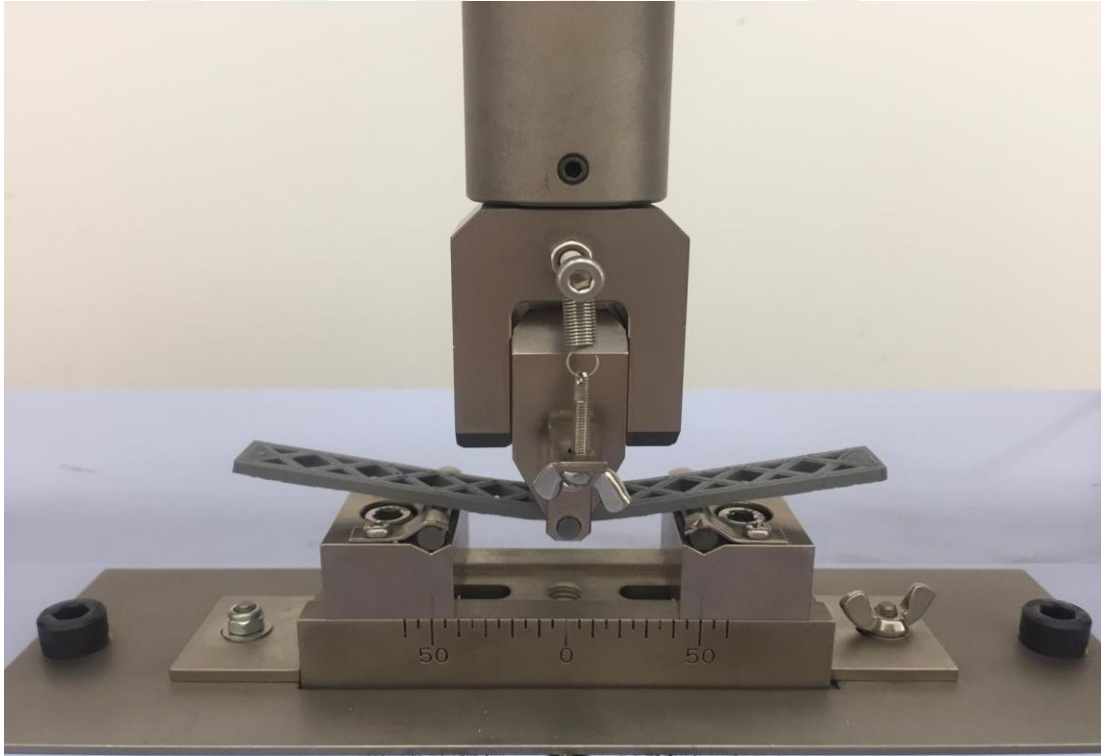
Şekil 3.17 N1 için üç nokta eğme deney düzeneği



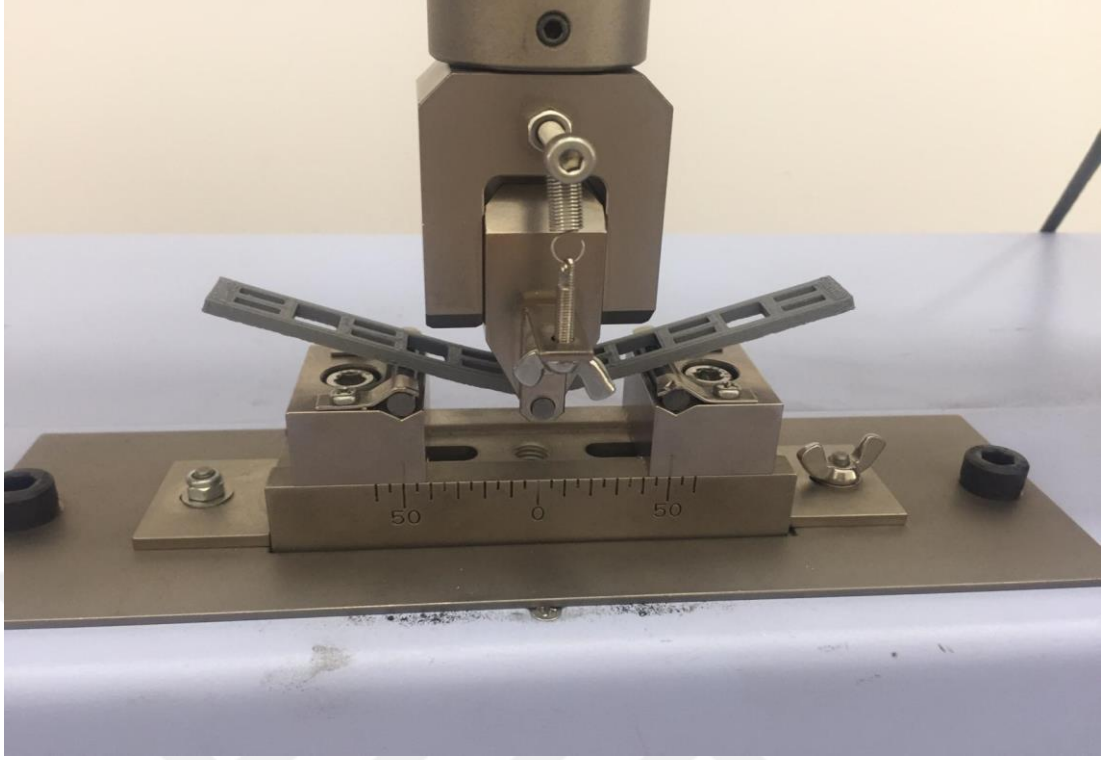
Şekil 3.18 N2 için üç nokta eğme deney düzeneği



Şekil 3.19 N3 için üç nokta eğme deney düzeneği



Şekil 3.20 N4 için üç nokta eğme deney düzeneği



Şekil 3.21 N5 için üç nokta eğme deney düzeneği

BÖLÜM DÖRT

SONUÇLAR

4.1 Üç Nokta Eğme Deneyleri

Bu bölümde, 3B baskılı numunelerin üç noktalı eğme deneylerine ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. Kesit geometrisinin etkisinin daha kolay değerlendirilebilmesi için üç nokta eğilme deney numuneleri en zayıf kesitlerine kuvvet uygulanacak şekilde hazırlanmıştır. Üç nokta eğme deneyleri iki ayrı biçimde üretilmiş olan 1. tip numune ve 2. tip numune olmak üzere iki ayrı şekilde gerçekleştirilmiştir. 1. deney grubu için yedi, 2. deney grubu için ise beş adet olacak şekilde toplam 12 farklı geometriye ve her biri üç farklı malzemeden numunelerin deneyleri gerçekleştirilmiştir.

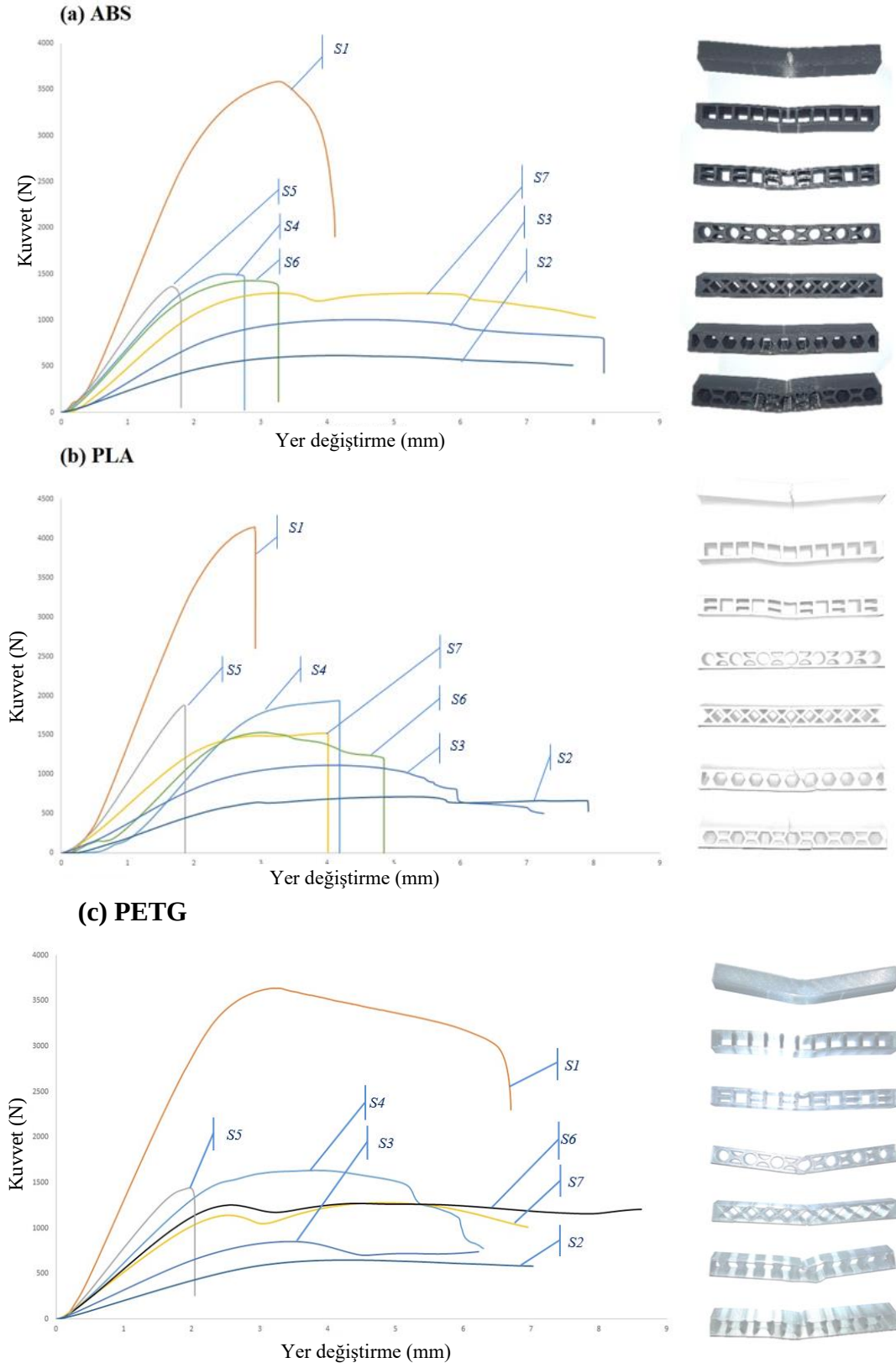
4.1.1 1. Tip Numune Üç Nokta Eğme Deneyleri

Şekil 4.1, yedi farklı model topolojisi ve üç farklı malzeme ile üretilen numuneler için deneysel üç noktalı eğme kuvvet-yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi ABS, PLA ve PETG malzemelerinden yapılmış S1, S2 ve S3 numuneleri, malzeme ne olursa olsun benzer eğilime sahiptir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde PLA malzemeden üretilen diğer numunelerin (S4, S5, S6 ve S7) kırılma davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. PLA kırılma bir malzeme olmasına rağmen, bu malzemeden üretilen tüm numuneler diğer malzemeleden üretilenlere göre en büyük yük değerlerine sahiptir. ABS, PLA ve PETG malzemelerinden yapılmış yedi farklı tasarımın üç noktalı eğilme testi sonucu ortaya çıkan deforme olmuş numunelerin görüntüleri de bu şekilde görülebilir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, model topolojisinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

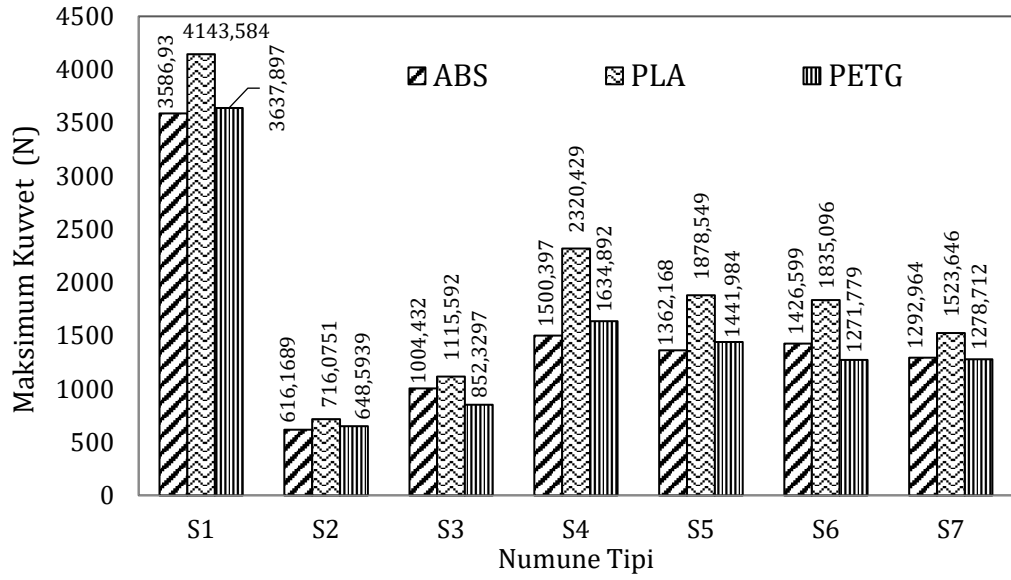
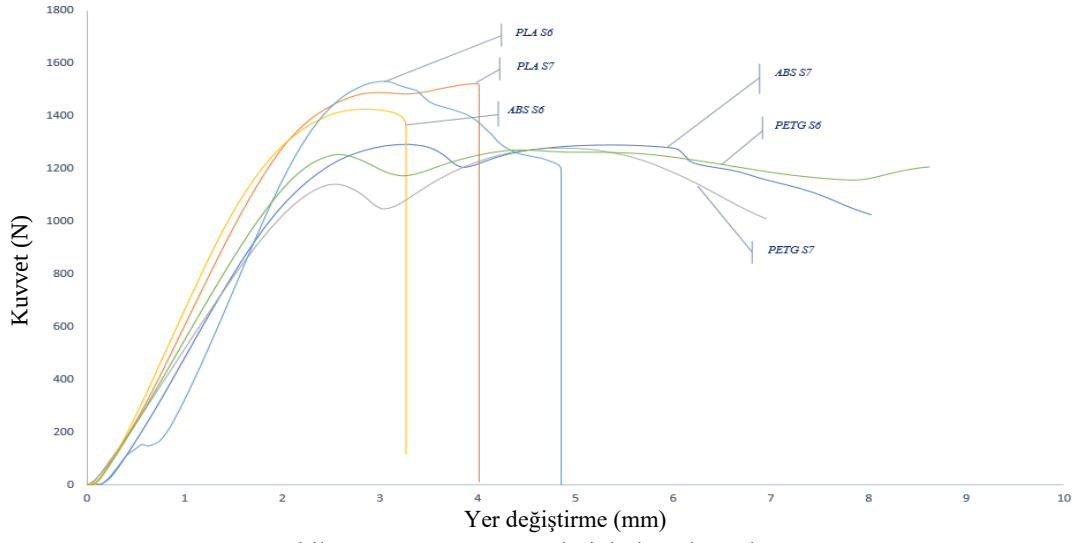
Şekil 4.2, baskı malzemesinin eğilme direngenliği üzerindeki etkisini net bir şekilde sergilemektedir. Anlaşılır olmasını sağlamak amacıyla, kuvvet-yer değiştirme eğrileri yalnızca S6 ve S7 numuneleri için verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ABS ve

PETG malzemelerin eğilme direngenlikleri ve maksimum temas kuvvetleri birbirine yakındır. PLA kullanılarak basılan numuneler, diğer iki malzemeden üretilenlere göre daha yüksek eğilme direngenliğine ve temas kuvvetine sahiptir. Öte yandan, PLA daha kırılgan iken ABS daha sünek davranış göstermektedir. PLA ise maksimum temas kuvvetine sahip olmasına rağmen daha kırılgan bir davranış göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında ABS, PLA ve PETG malzemelerin kullanım alanları dikkate alınarak farklı sektörler için alternatif tasarımlar ve malzemeler seçilebilir. ABS, PLA ve PETG malzemeleri farklı sektörlerde kullanılırken istenilen dayanım ve gerinim değerlerine göre farklı tasarım kriterleri belirlenebilmektedir. Böylece model topolojisinde yapılacak küçük değişiklikler, malzemelerin birbirine alternatifler oluşturmalarına olanak tanır.

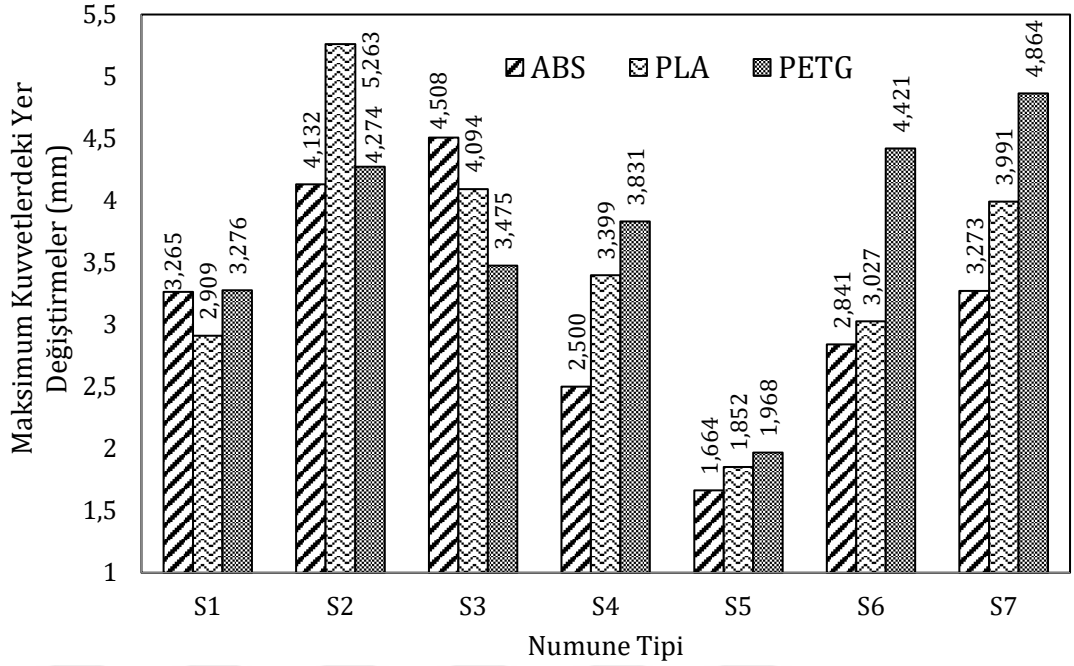
Şekil 4.3 ve 4.4, ABS, PLA ve PETG malzemeleri ile üretilen yedi farklı tasarım için üç noktalı eğme testleri ile elde edilen maksimum yükleri ve bunlara karşılık gelen yer değiştirmeleri göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi, tam dikdörtgen kesitli (12,7 mm×20 mm) numune S1 beklendiği gibi diğer numune türlerinden daha rijittir. S2 ve S3 örnekleri arasında tasarımda küçük bir fark vardır. Ancak Şekil 4.3’de görüldüğü gibi PLA ve PETG malzemeden imal edilen S2 numunelerin maksimum yükte yer değiştirme değerleri daha yüksek iken, ABS’den imal edilen S3 numunesinde daha yüksektir. S7 numunesinde S6 numunesine göre daha az malzeme kullanılması hedeflenmiş, kullanılan filamentin hacminde Tablo 3.2’de görüldüğü gibi %8.31’lik bir azalma sağlanmıştır. ABS ve PLA malzemelerinden yapılan S7 numunesi S6’ya göre daha düşükken, PETG’den yapılan S7 numunesi S6 numunesine göre daha yüksek yük değerine ulaşmaktadır. S6 ve S7 numunelerinin maksimum yüklerde yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığında S7 numunesinin yer değiştirme değerlerinin bu çalışmada kullanılan tüm malzemelerden bağımsız olarak arttığını göstermektedir.



şekil 4.1 Kuvvet-yer değiştirme eğrileri



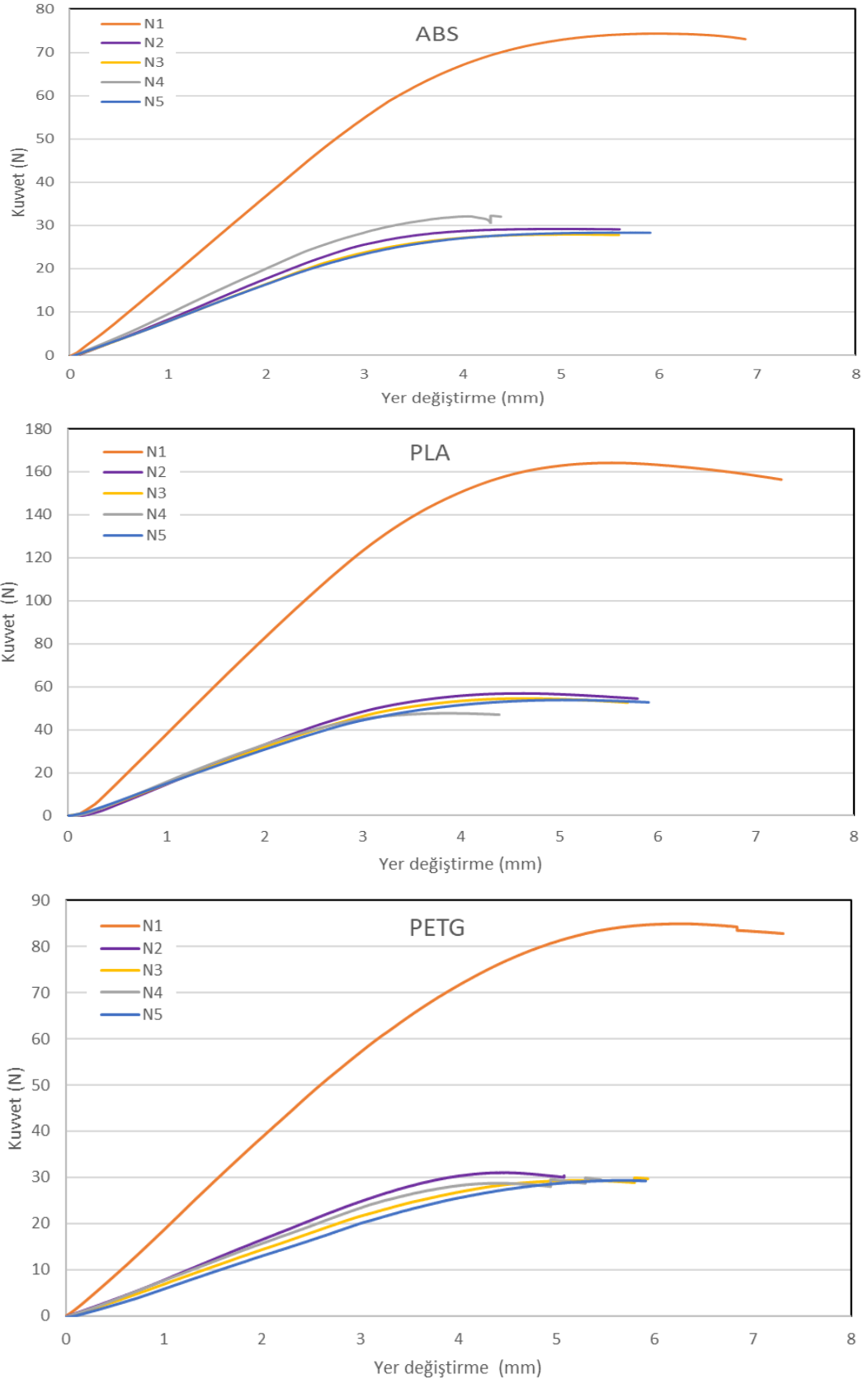
Şekil 4.3 Numune tipine bağlı olarak maksimum yük değerleri



Şekil 4.4 Maksimum yüklere karşılık gelen yer değiştirme değerleri

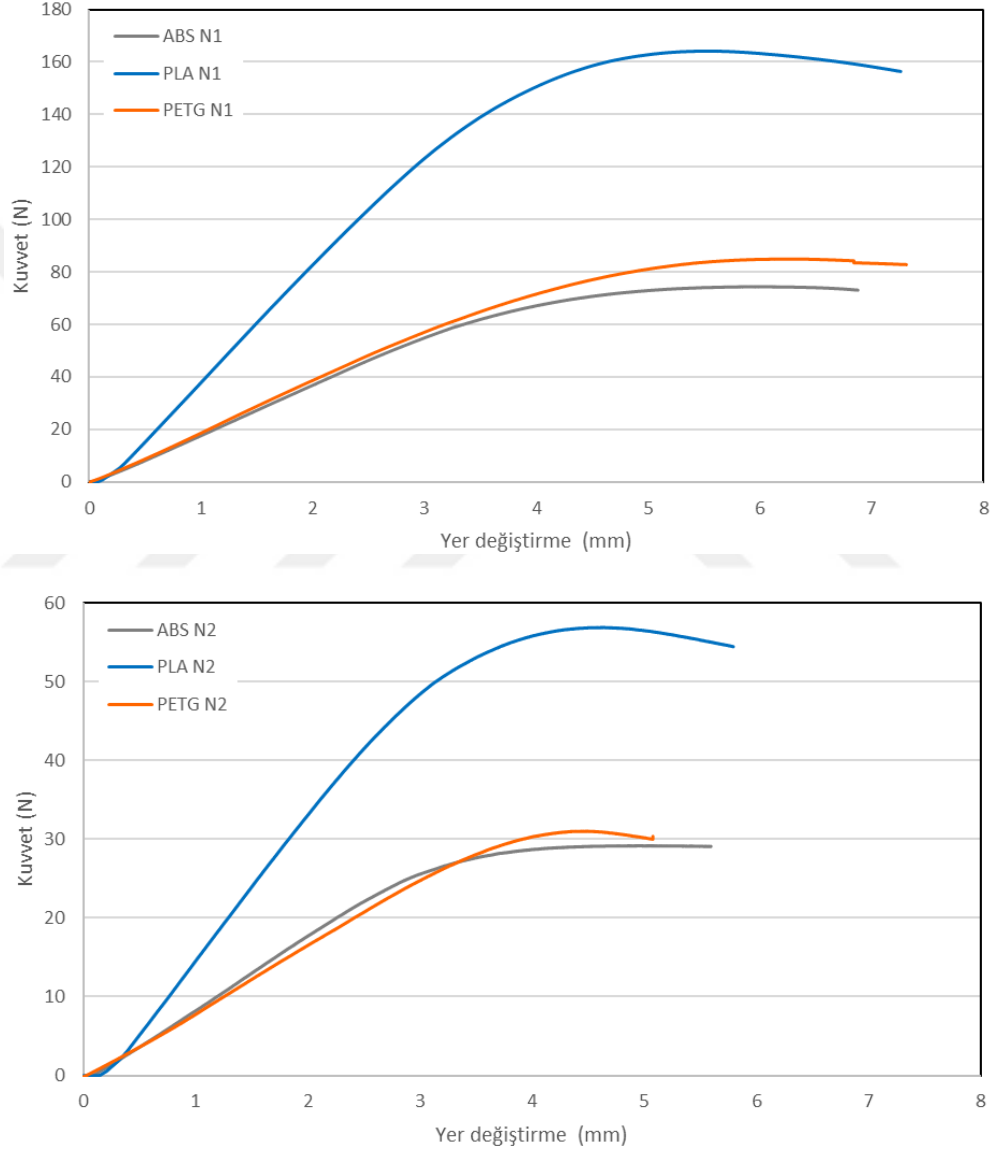
4.1.2 2. Tip Numune Üç Nokta Eğme Deneyleri

Şekil 4.5, beş farklı model topolojisine sahip ve üç farklı malzemeden üretilen numunelerin, üç nokta eğme deneylerinden elde edilen kuvvet–yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Her geometri için üretilen birbirine özdeş üç numunenin, deney sonuçlarının ortalama değerleri belirlenerek grafikler oluşturulmuştur. Deneylerden elde edilen veriler, model topolojisinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

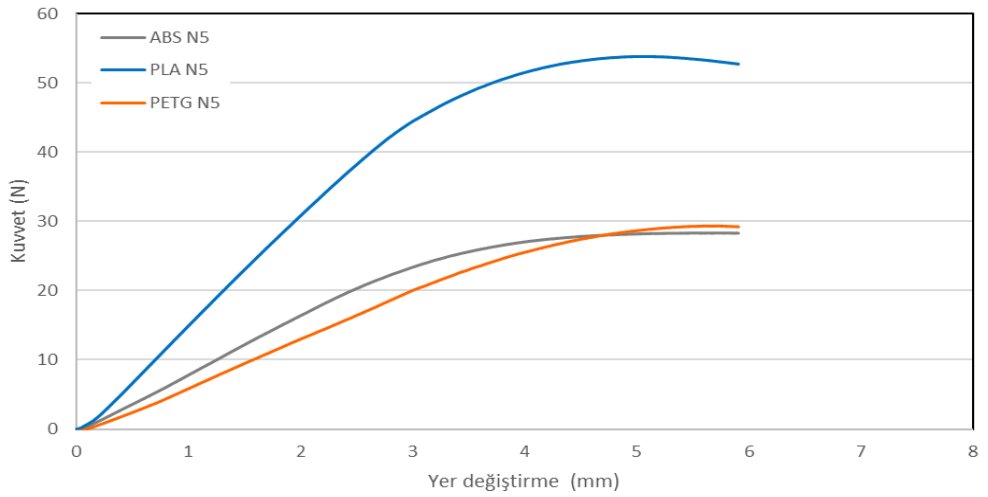
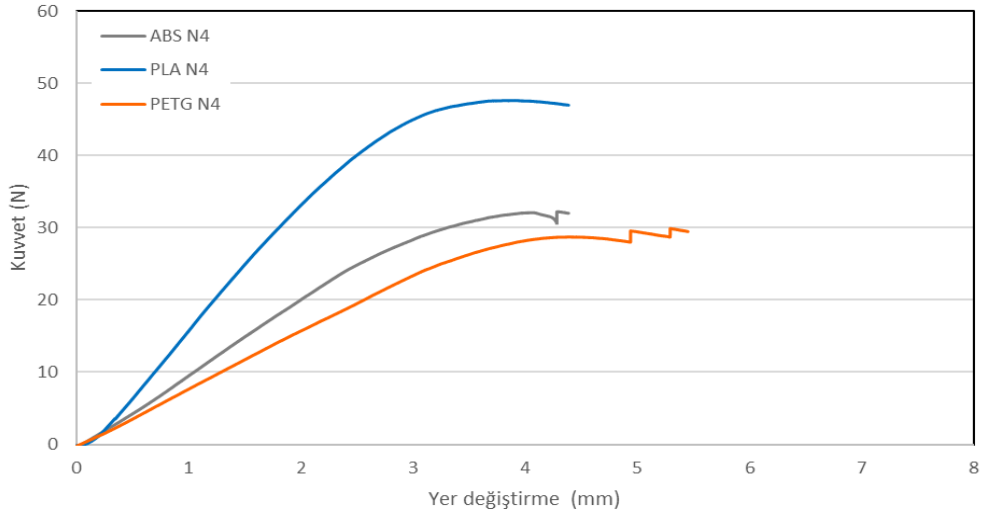
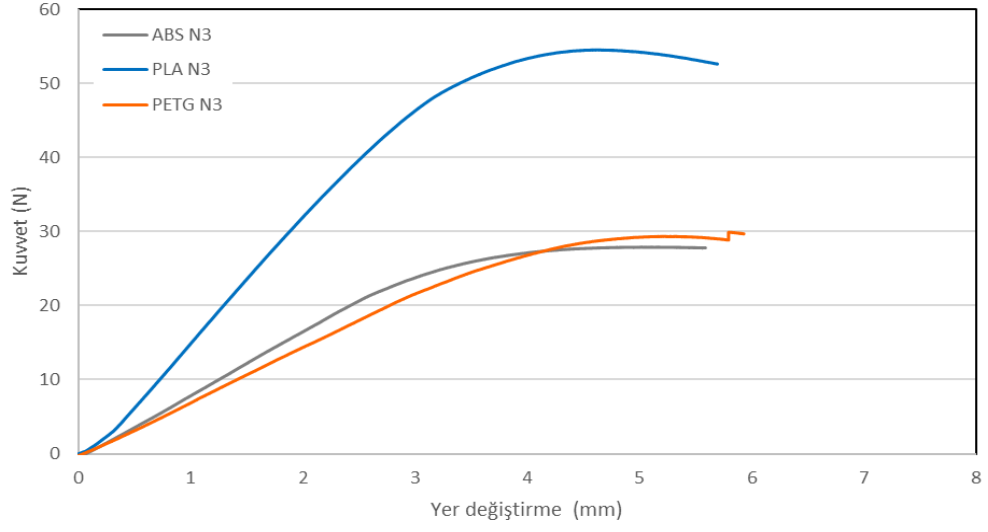


Şekil 4.5 ABS, PLA ve PETG malzemeleri için kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Malzeme etkisini değerlendirmek amacıyla çizilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri şekil 4.6 ve 4.7’de verilmiştir. Bu grafiklerinden de görüldüğü gibi malzemelerin tasarım üzerindeki etkisi karşılaştırıldığı zaman, PLA malzemesinin maksimum kuvvet değerleri ABS ve PETG malzemesine kıyasla oldukça yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmiştir.

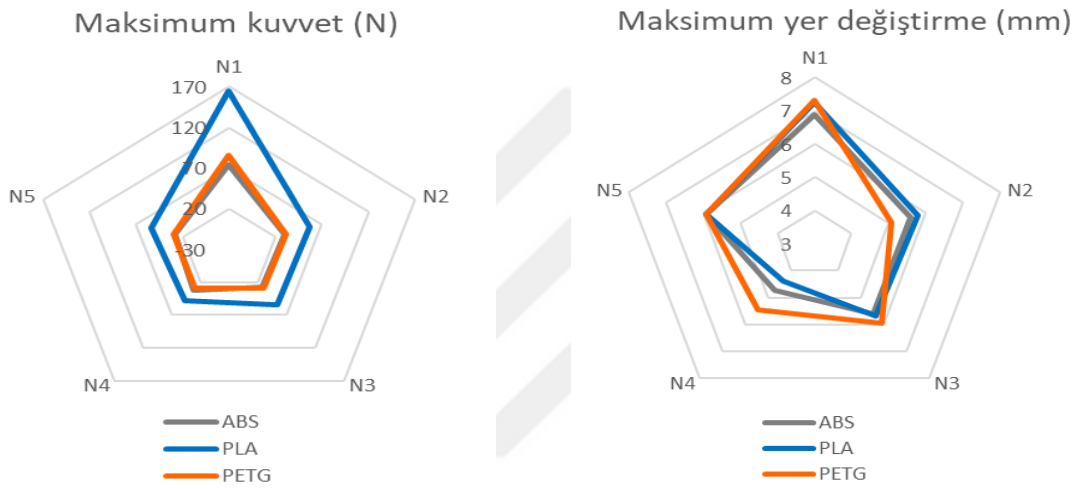


şekil 4.6 Tasarımın kuvvet-yer değiştirme üzerine etkisi



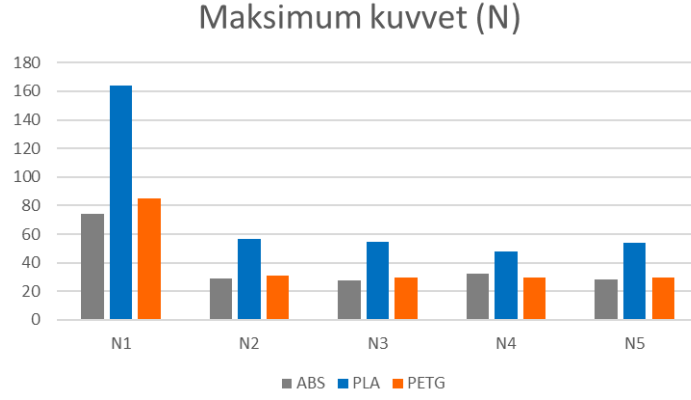
Şekil 4.7 Tasarımın kuvvet-yer değiştirme üzerine etkisi (devamı)

Bu sonuçlar ışığında ABS, PLA ve PETG malzemelerinin kullanım alanları göz önünde bulundurularak farklı sektörler için alternatif tasarım ve malzeme seçilmesi mümkündür. ABS, PLA ve PETG malzemeleri farklı sektörlerde kullanılırken istenilen dayanım ve gerinim değerlerine göre farklı tasarım kriterleri belirlenebilmektedir. Deneylerden elde edilen veriler ile tasarımda yapılan küçük değişikliklerin, malzemelerin birbirine alternatif oluşturmalarına olanak tanıdığı değerlendirilmiştir.

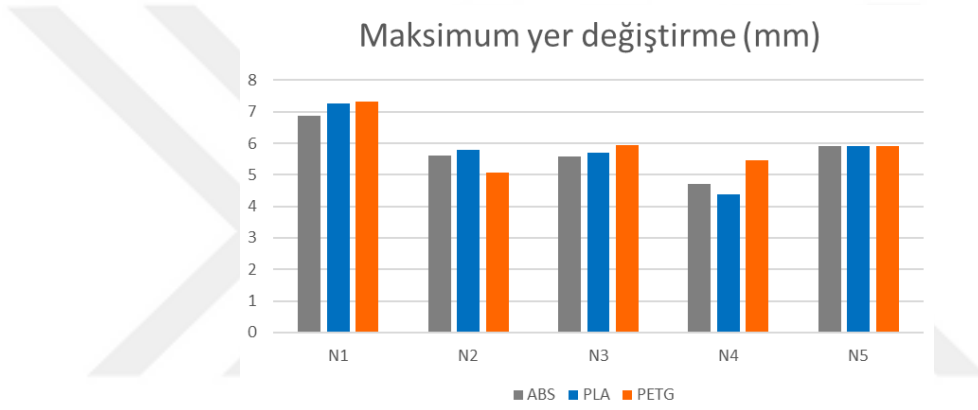


Şekil 4.8 Maksimum kuvvet-maksimum yer değiştirme ile şekil ve malzeme ilişkisi

ABS, PLA ve PETG malzemelerinden üretilen beş farklı tasarımın maksimum kuvvet ve yer değiştirme deney sonuçları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Her bir şekildeki maksimum kuvvet değerleri incelendiğinde PLA malzemesinin diğer malzemelere göre daha fazla kuvvet değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Maksimum kuvvet bilgileri karşılaştırıldığında ABS ve PETG malzemesinin her tasarım için birbirine çok yakın kuvvet değerlerine ulaştığı gözlenmiştir. Maksimum yer değiştirme değerlerinde ise PLA ve ABS malzemeleri N4 tasarımı haricinde birbirine çok yakın değerlerde olduğu değerlendirilmiştir. PLA malzemesi ile üretilmiş N1 tasarımı bütün numuneler karşılaştırıldığında en yüksek kuvvet değerine ulaşabilse de maksimum yer değiştirme bilgileri değerlendirildiğinde birbirine yakın davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9 Numune geometrisi ve malzemesinin maksimum kuvvet üzerine etkisi



Şekil 4.10 Numune geometrisi ve malzemesinin maksimum yer değiştirme üzerine etkisi

Deney sonuçlarından N1 tasarımının maksimum kuvvet değeri PLA malzemesinde 164,16 N değerindedir. N1 tasarımı için maksimum kuvvet değerinin en yüksek değeri PLA malzemesindeyken, ABS malzemesinde bu değer 74,35 N ve PETG malzemesinde ise 84,94 N olarak elde edilmiştir. ABS malzemesinin geometri üzerindeki etkisini maksimum kuvvet değerleri ile karşılaştıracak olursak $N3 < N5 < N2 < N4 < N1$ olarak sıralanabilmektedir. Bu değerler PLA ve PETG malzemeleri için sırasıyla $N4 < N5 < N3 < N2 < N1$ ve $N5 < N4 < N3 < N2 < N1$ olarak gözlemlenmiştir. ABS ve PETG malzemeleri N2, N3, N4 ve N5 tasarımlarında maksimum kuvvet değerleri için makroskobik incelemelerde birbirine yakın davranışlar gösterebilirler de, N2 geometrisi için %6,26 oranında ve N3 geometrisi için %7,2 oranında PETG malzemesi daha büyük maksimum kuvvet değerlerine

ulaşmıştır. N4 tasarımı haricinde PETG malzemesi için maksimum kuvvet değerleri ABS malzemesiyle karşılaştırıldığında PETG malzemesinin daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir. ABS malzemesi PETG malzemesine göre N4 geometrisinde %7,77 oranında daha fazla değerlere ulaşmıştır.

Maksimum yer değiştirme değerleri incelendiği zaman N1 geometrisinde her malzeme için en yüksek değerlere ulaşmıştır ve ABS, PLA ve PETG malzemelerinin sırasıyla değerleri 6,875 mm, 7,257 mm ve 7,308 mm olarak gözlenmiştir. Maksimum yer değiştirme değerleri N5 geometrisinde bütün malzemeler için 5.9072 mm'dir. ABS malzemesinin geometri üzerindeki etkisini maksimum yer değiştirme değerleri ile karşılaştıracak olursak $N4 < N3 < N2 < N5 < N1$ olarak sıralayabiliriz. Bu değerlerde PLA ve PETG malzemeleri için sırasıyla $N4 < N3 < N2 < N5 < N1$ ve $N2 < N4 < N5 < N3 < N1$ olarak gözlemlenmiştir.

4.2 Sonlu Elemanlar Analizleri

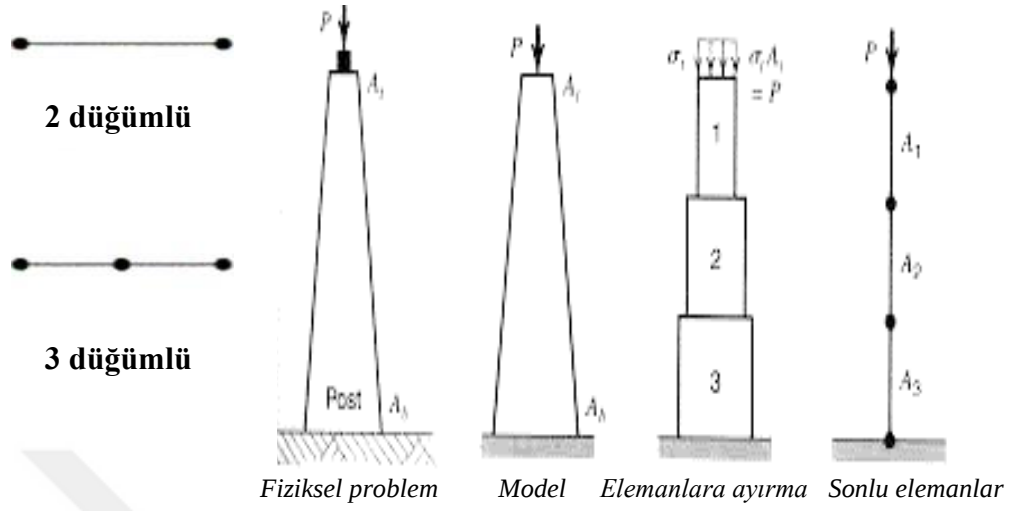
Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikteki çeşitli problemlere çözümler üretmek için uygulanabilen sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar prensibi, geometrileri düğüm noktaları vasıtasıyla küçük elemanlara bölerek ilgili elemanlardaki bulunmak istenen sayısal sonuçları elde edilmesini sağlamaktadır. Modern sonlu elemanlar yönteminin kökeni, bazı araştırmacıların elastik sürekli bir ortamı ayrık eşdeğer elastik çubuklar ile yaklaşık olarak modellendiği 1900'lü yılların başlarına kadar gitmektedir. Bununla birlikte, Courant (1943) sonlu elemanlar yöntemini geliştiren ilk kişidir (Akın, 2006). 1940'lı yılların başında yayınlanan bir makalede, Courant burulma problemlerini incelemek için üçgen şeklindeki alt bölgeler üzerinde parçalı polinom enterpolasyon kullanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemlerinin kullanımındaki bir sonraki önemli adım, Boeing tarafından 1950'lerde Boeing'in uçak kanatlarını modellemede üçgen gerilme elemanları kullanılmasıdır. Ancak, 1960'da Clough, sonlu elemanlar terimini popüler hale getirmiştir. 1960'lı yıllarda araştırmacılar, sonlu elemanlar metodunu, ısı transferi ve sızıntı akış problemleri gibi diğer mühendislik alanlarına uygulamaya başlamışlardır (Uslu, 2019). Zienkiewicz ve Cheung, tamamen sonlu

elemanlar yöntemi konusuna ayrılmış ilk kitabı 1967'de yazmışlardır (Zienkiewicz ve Cheung, 1967).

Sonlu elemanlar analizinde iki veya üç boyutlu geometrilerin gerçeğe uygun modellenmesi yapılır. Modelleme işleminin gerilme ve deplasmanın bulunabilmesi için istenen hassasiyette düğüm noktaları oluşturulur. Bu düğüm noktaları bilgisayar destekli programlar vasıtası veya el ile belirlenebilir. İlgili düğüm noktalarının oluşması ile geometrinin ağ yapısı oluşturulur. Ağ yapısına sahip olan geometrinin her iki düğüm noktası arasında kalan kısmına eleman denir. Düğümler vasıtası ile elemanlara ayrılan geometrinin istenilen herhangi bir noktasında gerilme ve deplasman analizi yapılabilir. Düğüm sayısının artması, analiz hassasiyetini arttıracak ve hesap metodu karmaşıklaşacaktır. Hesap metodunun yapılabilmesi için, geometrinin direngenlik matrisi oluşturulur. Bu matris, çok basit olabileceği gibi çoğu zaman karmaşık bir haldedir. Karmaşık matrisin çözdürülebilmesi adına çoğunlukla bilgisayar ile çözümleme metoduna gidilmektedir. Gerilme, birim şekil değiştirme, reaksiyon kuvvet ve momentleri ve yer değiştirme benzeri sonuçların elde edildiği yapısal analizleri yükleme sonucunda deformasyonlar elastik bölgede kalacak şekilde yapabilmek için yapı ya da makine elemanı malzemesinin Poisson oranı ile elastisite modülü değerlerine ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizinde kullanılan mekanik özellikler deneysel çalışmalardan elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde yapının düğüm ve elemanlar ayrılması, uygun interpolasyon işlemi seçimi, direngenlik matrisi $[K]$ ve yük faktörlerinin eleman denklemleriyle birleştirilmesi sonucunda toplam denklemlerin elde edilmesi, bulunmak istenen düğüm yer değişimleri için çözüm denklemlerinin kullanılarak sonuçların bulunması adımları bulunmaktadır (Güler, M. ve Şen S., 2016).

Sonlu elemanlar analizlerindeki en önemli aşamalardan biri çözüm ağını (mesh) oluşturmak için doğru eleman seçimidir. Analizlerde kullanılan eleman tipleri Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te verilmiştir.

- Bir Boyutlu Elemanlar

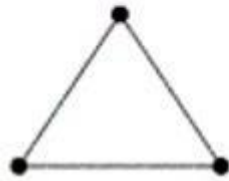


Şekil 4.11 Bir boyutlu elemanlar

- 2 Boyutlu Elemanlar

Triangle (üçgen)

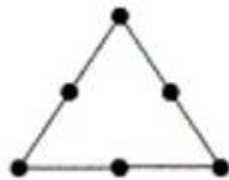
Quadrilateral (dörtgen)



3 düğümlü



4 düğümlü



6 düğümlü

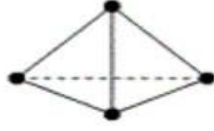


8 düğümlü

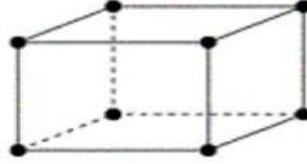
Şekil 4.12 2 boyutlu elemanlar

- 3 Boyutlu Elemanlar

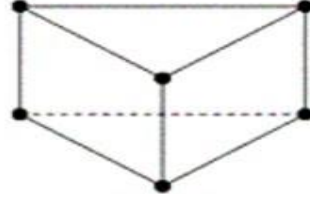
Tetrahedron (düzgün dörtyüzlü) Hexahedron (altı yüzlü) Pentahedron (beş yüzlü)



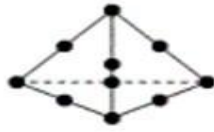
4 düğümlü



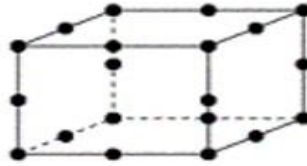
8 düğümlü



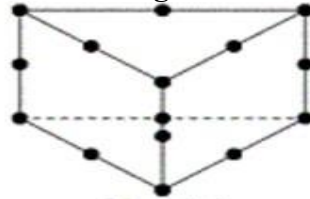
6 düğümlü



10 düğümlü



20 düğümlü



15 düğümlü

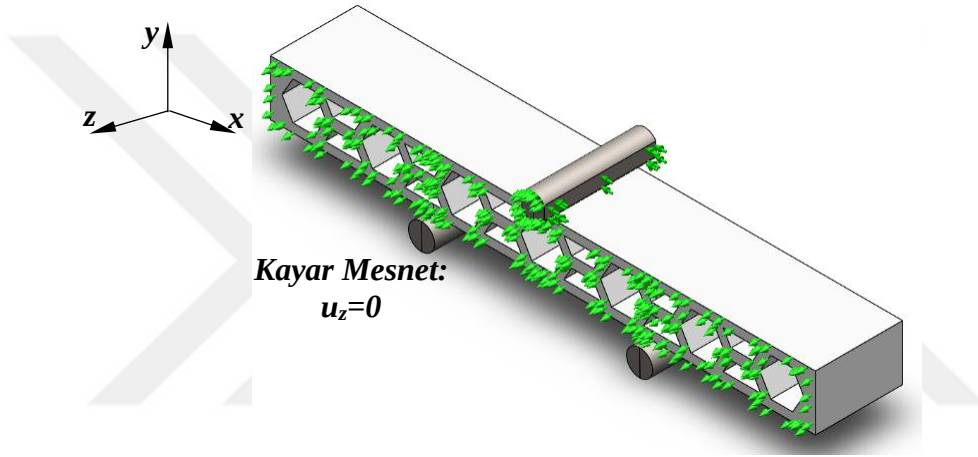
Şekil 4.13 3 boyutlu elemanlar

Bu çalışmada, farklı hücresel yapılara sahip tasarımların, sonlu elemanlar analiz yazılımı SolidWorks™ Simulation ile eğilme yükü altında y eksenini üzerindeki yer değiştirmeleri hesaplanmıştır. Üç noktalı eğme testinin sayısal simülasyonu için, yarıçapları 3 mm olan AISI 1015 çelikten iki sabit destek çubuğu yapılmıştır. Yük, kontak setleri kullanılarak üç noktalı eğme numunesi üzerindeki üst çubuğa maruz bırakılmıştır. Numune ve çubuklar arasındaki temas yüzeyleri sürtünmesiz, penetrasyonsuz ve yüzeyden yüzeye olacak şekildedir. PLA, ABS ve PETG'nin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, deneylerden elde edilen veriler kullanılarak çok doğrusal davranış olarak kabul edilmiştir. Her iki numune grubu için kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Bölüm 3'de yer alan Tablo 3.1'de belirtilen katalog değerleri ile üç nokta eğme deneyi bulguları kullanılarak doğrusal elastik statik sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir.

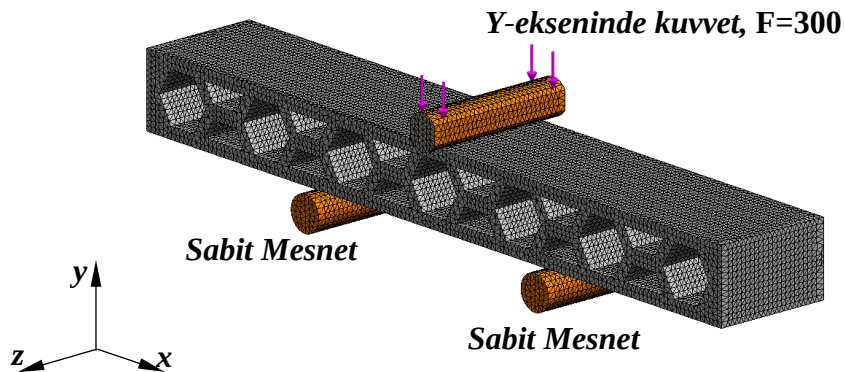
4.2.1 1. Tip Numunelerin Sonlu Elemanlar Analizleri

Bu çalışmada, üç nokta eğme numunelerinin üç boyutlu katı modellemesi ve statik analizleri SolidWorks™ yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli

oluşturulurken 10 düğümlü ve her düğümü üç serbestlik derecesine sahip, toplam 30 serbestlik dereceli tetrahedron elemanlar kullanılmıştır. Üç boyutlu olarak modellenen bir model ortalama olarak 192617 eleman ve 300522 düğümden oluşmaktadır. Şekil 4.14 örnek olarak seçilen altıgen hücreli yapıya sahip üç nokta eğme numunesi için kullanılması gereken sınır koşullarını göstermektedir. Şekil 4.15 ise sonlu elemanlar modeli ile yükleme durumunu göstermektedir. Uygulanan kuvvetin sayısal değeri yapıdaki şekil değişimi elastik bölgede kalacak şekilde deneysel veriler incelenerek 300 N olarak belirlenmiştir.

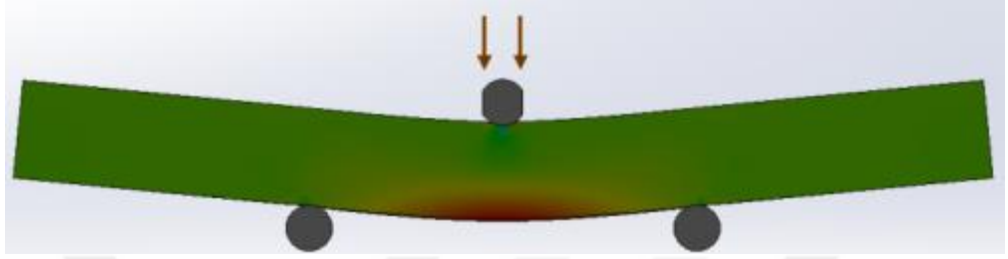


Şekil 4.14 1. tip numune sınır şartları



Şekil 4.15 1. tip numuneye ait çözüm ağı görseli

Elastik sonlu elemanlar analizler sonucunda her bir numunede oluşan şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 ve 4.22’de gösterilmiştir. Analizlerde elde edilen bulgular üç nokta eğme deneylerindeki şekil değiştirme davranışları ile benzerlik göstermektedir.



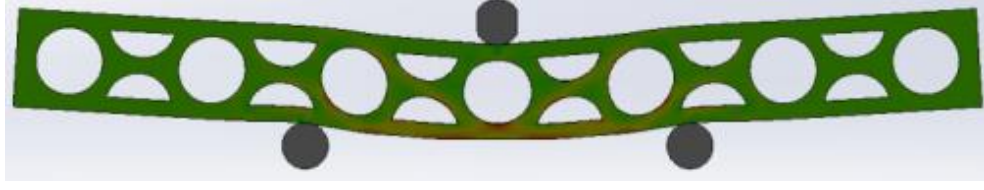
Şekil 4.16 Yükleme sonrası S1’in şekil değiştirme davranışı



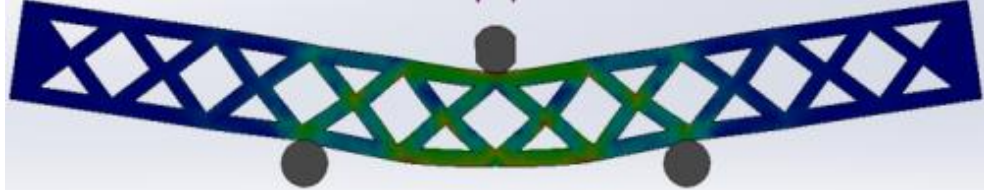
Şekil 4.17 Yükleme sonrası S2’nin şekil değiştirme davranışı



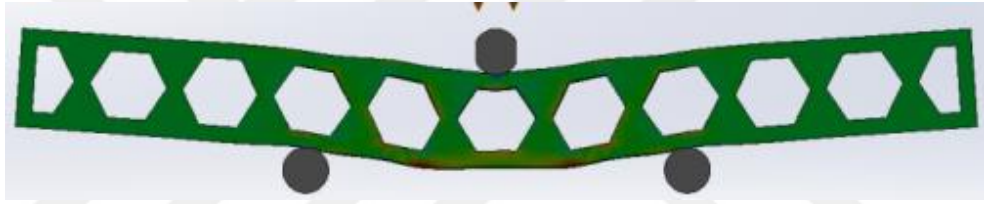
Şekil 4.18 Yükleme sonrası S3’ün şekil değiştirme davranışı



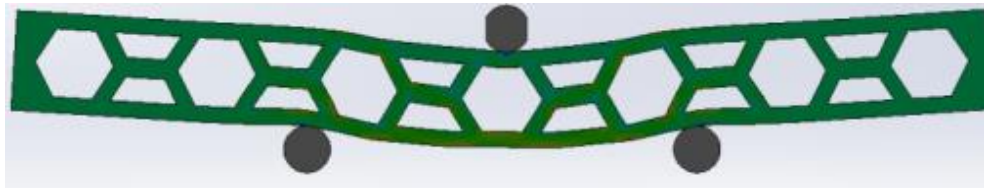
Şekil 4.19 Yükleme sonrası S4'ün şekil değiştirme davranışı



Şekil 4.20 Yükleme sonrası S5'in şekil değiştirme davranışı



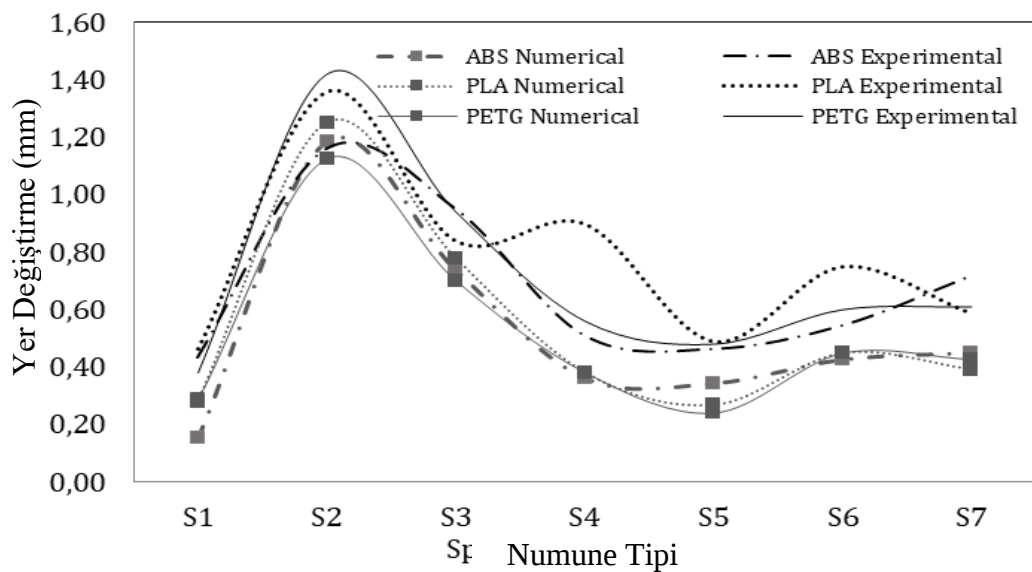
Şekil 4.21 Yükleme sonrası S6'nın şekil değiştirme davranışı



Şekil 4.22 Yükleme sonrası S7'nin şekil değiştirme davranışı

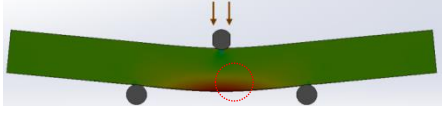
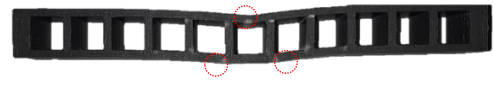
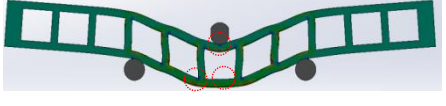
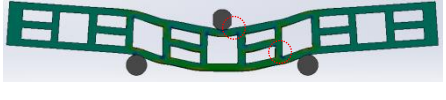
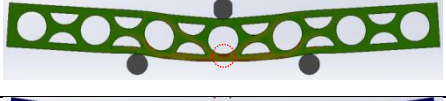
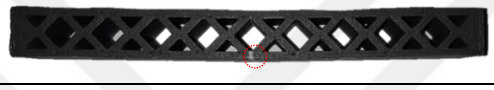
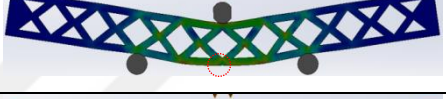
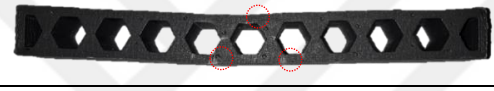
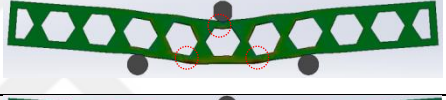
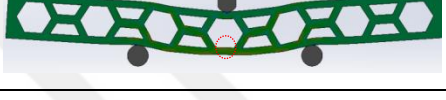
DeneySEL sonuçlar ile yapısal sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırması sonucunda baskı için kullanılan malzemelerin, özellikle PLA'nın baskı sonrasında çok yönlü bir anizotropik davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir. Deneyler süresince, 3B baskılı yapıların direngenliği, akma dayanımının altındaki düşük yüklemelerde bile kırılan bölgeler olduğu için zaman içinde dinamik olarak değişmektedir. Kırılmanın hangi bölge, yön ve zamanda meydana geldiğini belirlemek mümkün olmadığı ve yapının sürekli değişen nonlineerlik göstermesi nedeniyle

gerçekleştirilen sayısız sayısal analiz sonucunda sonlu elemanlar analizlerinin esas olarak model topolojisi etkisini göstermek amacıyla değerlendirilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Özellikle son derece kırılğan bir davranış sergileyen PLA için yapısal sonlu elemanlar analizinden elde edilecek değerlerin belirlenmesinin baskı esnasında liflerin yazılım tarafından random yönlendirmesi nedeniyle de oldukça kompleks olduğu belirtilmelidir. Bu nedenle elde edilen sayısal analiz sonuçlarının eğilimi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.23’de, deneysel ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen 300 N yüke maruz kalan 3B baskılı numunelerin y-yönündeki yer değiştirmelerinin karşılaştırmasını görülmektedir. PLA’dan üretilen S4 ve S6 hariç, PETG ve ABS’den yapılan tüm numuneler için sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki yer değiştirme değerlerinde benzer bir eğilim ve tatmin edici bir uyum gözlemlenebilir. Ayrıca, sonuçların tutarlılığının garanti altına alınması için akma noktasının altındaki birçok yük değeri için sonlu eleman analizleri yapılmış ve benzer sonuçlar bulunmuştur. Tez kapsamında, sadece 300 N için yer değiştirme sonuçları sunulmaktadır. Tablo 4.1, deneyler ve sonlu eleman analizleri ile gözlemlenen kırılma davranışının karşılaştırmasını göstermektedir. Sonlu elemanlar analizleri görselleri kırılğan malzemelerin hasarında dikkate alınması gereken en büyük asal gerilme dağılımına ilişkindir. Şekil 4.23’te, yer değiştirme davranışlarında iyi bir uyum olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.23 1. tip numune için sayısal ve deneysel yer değiştirme sonuçları

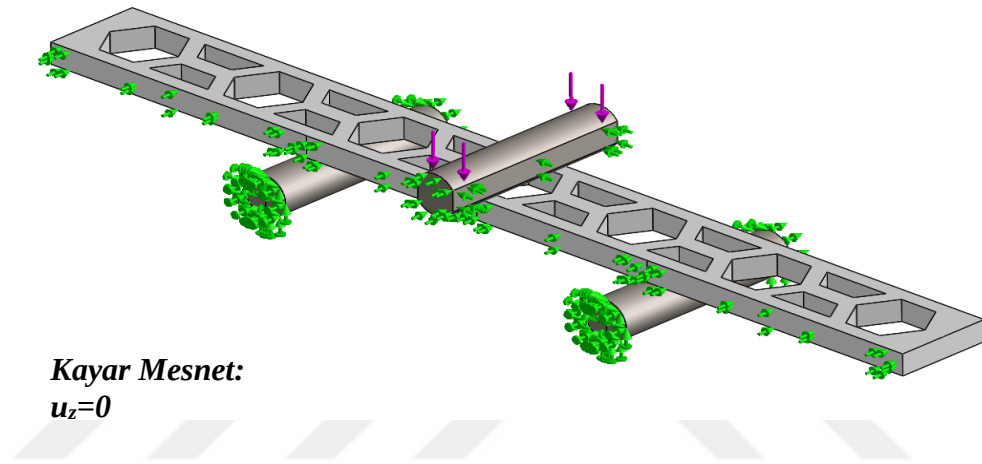
Tablo 4.1 Deneysel ve sayısal gerilme dağılımlarının karşılaştırılması (1. numune grubu)

İsim	Deney	Sonlu Elemanlar
S1		
S2		
S3		
S4		
S5		
S6		
S7		

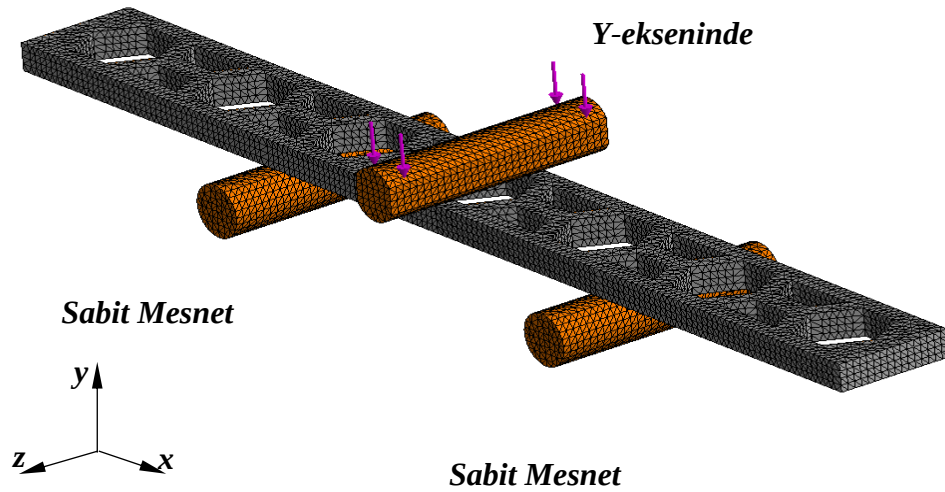
Tabloda verilen tüm şekillerden görüldüğü gibi, kırılğan malzemelerin hasara uğramasına neden olan bu bölgelerde maksimum asal gerilmelerin meydana geldiği yapıların alt bölgelerinin güçlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Kırılma mekanizmalarında model topolojisinin yanı sıra baskı yönlerinin de önemli rol oynadığı sonucuna varılabilir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, genel bir tasarım kriteri olarak bu tür yüklere maruz kalan eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yapıların alt plakasının kalınlaştırılması önerilebilir. Deneyler sonucunda elde edilen üç nokta eğme numunelerinin deforme olmuş şekillerinden de görüldüğü gibi, plastik deformasyonun yanı sıra bazı bölgelerde kırılmaların meydana gelmesi nedeniyle değerlendirme için sadece von Mises kriterini dikkate almak yeterli değildir. Bu nedenle, kırılma mekanizmasının değerlendirilmesi için yükleme altındaki numunede meydana gelen maksimum asal gerilme dağılımı verilmiştir.

4.2.2 2.Tip Numunelerin Sonlu Elemanlar Analizleri

Bu numune tipinde sonlu eleman modeli, ortalama olarak 70868 düğüm ile 10 düğüm ve toplam 30 serbestlik derecesine sahip 40976 tetrahedron elemandan oluşmaktadır. Şekil 4.24 örnek olarak seçilen altıgen boşluğa sahip numunenin üç nokta eğme numunesi için üç boyutlu katı modeli ile gerekli sınır koşullarını göstermektedir.



Şekil 4.24 2. tip numunenin sınır koşulları



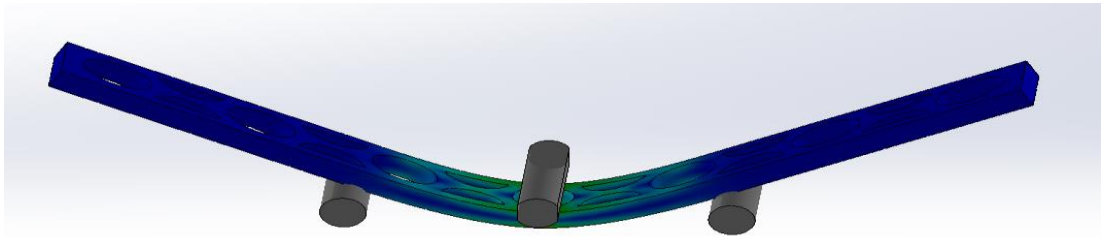
Şekil 4.25 2. tip numunenin sonlu elemanlar modeli

Bu numune grubu ilk gruba göre daha yükleme yönüne göre daha düşük direngenliğe sahip olduğu için uygulanan kuvvetin sayısal değeri yapıdaki şekil değişimi elastik bölgede kalacak şekilde deneysel veriler incelenerek 10 N olarak belirlenmiştir. Şekil 4.25’te aynı numuneye ait sonlu elemanlar modeli görülmektedir.

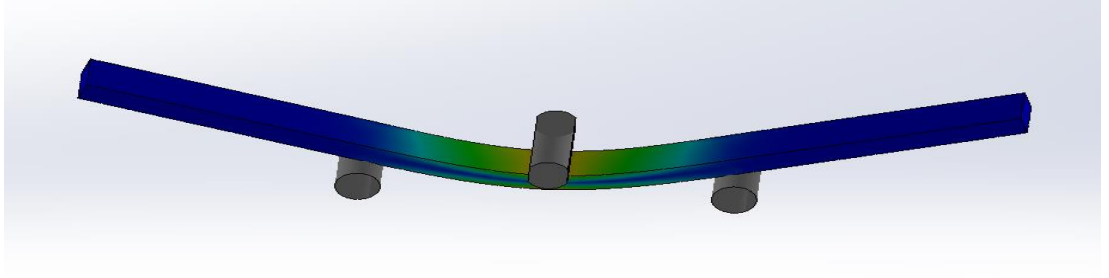
Gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda yükleme sonucunda oluşan şekil değiştirme modelleri Şekil 4.26, 4.27, 4.28, 4.29 ve 4.30’da gösterilmiştir. Analizlerde elde edilen bulgular üç nokta eğme deneylerinde gözlemlenen deformasyon şekilleri ile benzerlik göstermektedir.



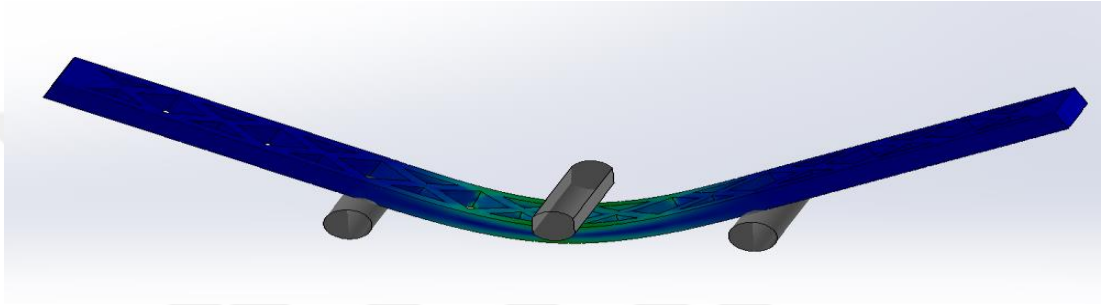
Şekil 4.26 Yükleme sonrası N1’in şekil değiştirme davranışı



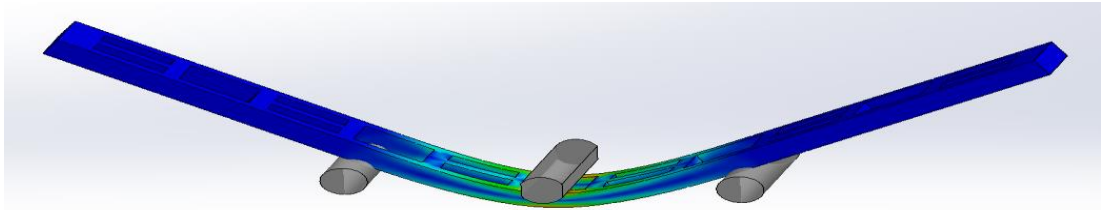
Şekil 4.27 Yükleme sonrası N2’nin şekil değiştirme davranışı



Şekil 4.28 Yükleme sonrası N3'ün şekil değiştirme davranışı



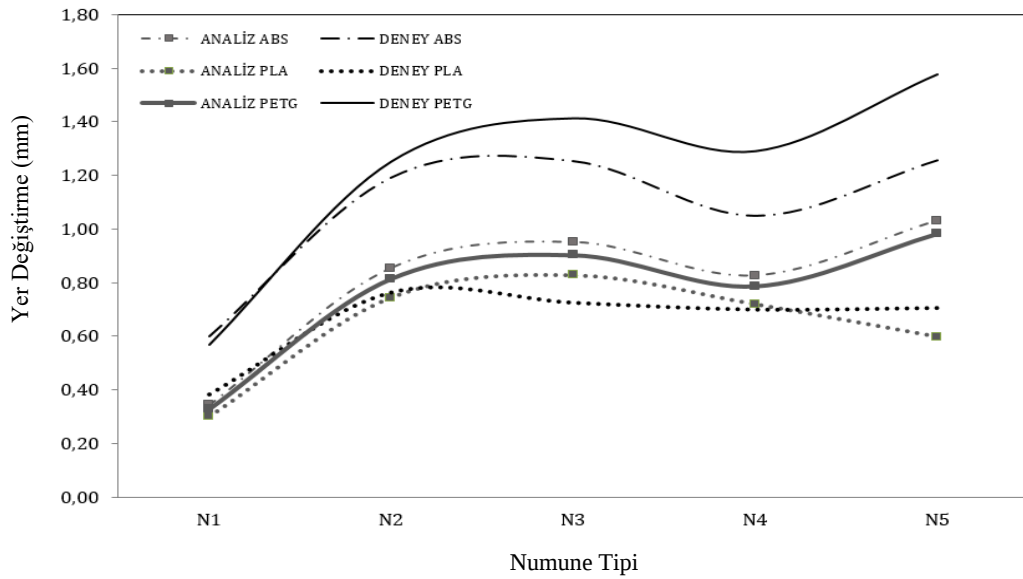
Şekil 4.29 Yükleme sonrası N4'ün şekil değiştirme davranışı



Şekil 4.30 Yükleme sonrası N5'in şekil değiştirme davranışı

İlk numune grubunda olduğu gibi gerek deneysel incelemeler gerek de sonlu eleman analizleri sonucunda baskı malzemelerinin; özellikle de PLA'nın çok yönlü bir anizotropi sergiledikleri gözlemlenmiştir. Deney sırasında, 3B baskılı yapıların eğilme direngenliği, akma dayanımının altındaki düşük yüklemelerde bile kırılan alanlar olduğu için zaman içinde dinamik olarak değişmektedir. Bu nedenle elde edilen sayısal sonuçların eğilimi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4.31, deneyler ve sonlu

eleman analizleri ile elde edilen 10 N yüke maruz kalan 3B baskılı numunelerin y-yönündeki yer değiştirmelerinin karşılaştırmasını sunmaktadır. PLA'dan yapılmış N1 hariç tüm numuneler deney ve analizlerde birbirine yakın sonuçlar gösterirken uzamaları yaklaşık olarak 0,7 mm olarak gerçekleşmiştir. PETG ve ABS'den yapılan tüm numuneler için sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki yer değiştirme değerlerinde benzer bir eğilim ve tatmin edici bir uyum gözlemlenebilir. Akma noktasının altındaki birçok yük değeri için sonlu eleman analizleri yapılmış ve benzer sonuçlar bulunmuştur. Bu çalışmada sadece 10 N için yer değiştirme sonuçları sunulmaktadır. Şekil 4.31, deneyler ve sonlu eleman analizleri ile gözlemlenen hasar davranışının karşılaştırmasını göstermektedir. Deformasyon şekillerinde iyi bir uyum elde edilmiştir.

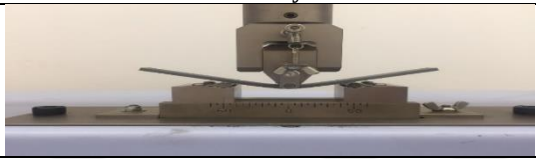
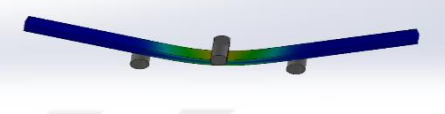
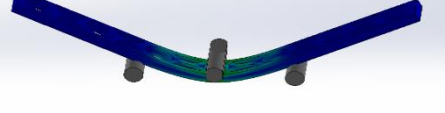
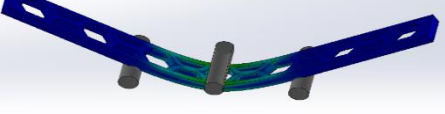
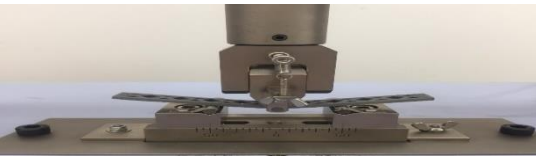
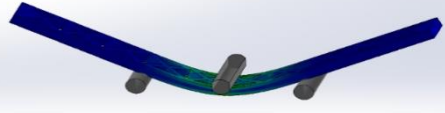
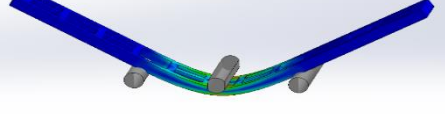


Şekil 4.31 2. tip numune için analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.31'de görüldüğü üzere sayısal ve deneysel sonuçlar birbirleri içerisinde tutarlı sonuçlar göstermektedir. PLA'dan üretilen numunelerin yer değiştirme eğilimi ile ABS ve PETG'den üretilen numunelerin yer değiştirme eğilimi farklılık göstermektedir. Daha açık ifade edilecek olursa, ABS ve PETG malzemelerinden üretilmiş numunelerde hem deney hem de sayısal analizler sonucunda yer değiştirme için olarak $N5 > N3 > N2 > N4 > N1$ şeklinde bir sıralama gözlemlenirken; PLA'da

üretileen numunede deneylerde $N3 > N2 > N4 > N5 > N1$, analizlerde ise $N2 > N3 > N5 > N4 > N1$ olarak gerçekteşmiştir. Bu durumun PLA malzemesinin anizotrop davranış göstermesi, son derece kırılğan olması ve direngenliğinin sürekli değışmesi nedeniyle hem deneysel hem de sayısal olarak nasıl bir davranış göstereceğinin tam olarak kestirilemeyeceğini de vurgulamaktadır.

Tablo 4.2 Deneysel ve sayısal gerilme dağılımlarının karşılaştırılması (2. numune grubu)

İsim	Deney	Sonlu Elemanlar Analizi
N1		
N2		
N3		
N4		
N5		

Bilindiğı gibi kırılğan karakteristiğē sahip yapılan hasar durumunun belirlenmesinde en büyük asal gerilme değērleri dikkate alınmaktadır. Tablo 4.2’de 2. tip numune grubunda sayısal olarak yükleme sırasında ortaya çıkan en büyük asal gerilme dağılımı ile deneysel olarak gözlemlenen deformasyon karşılaştırması yer almaktadır. Bu tip yükleme durumunun zorunlu olması halinde yapıların özellikle alt bölgelerinin güçlendirilmesi gerektiğı sonucuna varılabilir. Sonuçlar değēlendirildiğinde, genel bir tasarım kriteri olarak bu tür yüklere maruz kalan

eklemeli imalat yöntemiyle üretilen yapıların alt plakasının kalınlaştırılması önerilebilir.



BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada PLA, ABS ve PETG şeklindeki üç farklı baskı malzemesi kullanılarak yedi farklı hücre yapısı, 12 farklı numune ve iki farklı yükleme durumunu incelemek üzere nokta eğme numuneleri üretilmiştir. 1. numune grubu tasarımlarında deneyler ve analizlerde uygulanan yük geometriye dik yönden etki ettirilirken, 2. numune tasarımlarında ise geometriye paralel yönde bir yük uygulanmıştır. Tüm numunelerin taşıyabileceği maksimum yük ve buna karşılık gelen yer değiştirme değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen çoklu doğrusal yer değiştirme-kuvveti ve eğilme direngenliği değerlerinden elde edilen elastisite modülleri kullanılarak elastik sonlu eleman analizleri yapılmıştır. 1. tip deney numunelerinde deneysel ve sayısal incelemeler sonucunda elde edilen sonuçlar, maksimum yük değerini destekleyebilen numunenin beklenildiği gibi dolu dikdörtgen kesitli S1 olduğunu göstermektedir. Dairesel boşluğa sahip S4 ise S1'e en yakın kuvvet değerine sahiptir. ABS'den üretilen numunelerin daha sünek, PLA'dan üretilenlerin ise kırılkan davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. PLA, daha yüksek yük değerlerine dayanabilmesine rağmen, maksimum yer değiştirme değerleri dikkate alındığında daha gevrek davranış sergiledikleri açıktır. Sonuçlar, ABS, PLA ve PETG malzemelerinin kullanım alanları göz önüne alındığında, farklı sektörler için alternatif tasarım ve malzeme seçimi için referans sağlayabilir. Hasar mekanizmaları üzerinde baskı malzemesinin yanı sıra baskı yönelimleri de önemli rol oynamaktadır. Baskı malzemeleri, özellikle PLA, çok yönlü bir anizotropik davranış sergilemektedir. 3B baskılı yapıların yükleme altındaki direngenliği dinamik olarak değişmektedir. Sonlu eleman analizleri ile yükleme altındaki 3B baskılı yapıların doğru mekanik davranışını belirlemek için, baskı yönü için malzeme özellikleri bilinmelidir. Akma noktasından sonra, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında büyük farklar olduğu belirlenmiş olup ayrıca yapısal bütünlüğü bozulmadığı yüklemelerde dahi bazı bölgelerde kırılmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

2. tip numune grubunun sonuçları değerlendirildiğinde ise, deneylerden ve analizlerden elde edilen sonuçlar, en yüksek kuvvet değerini destekleyebilen numunenin PLA malzemeden üretilen olduğu rahatlıkla söylenebilir. Kuvvet-yer

değiştirme grafikleri incelendiğinde ABS ve PETG malzemesinden üretilen numunelerin birbirine yakın davranış gösterdiği gözlemlenirken, sadece N5 numunesi üç malzeme için maksimum yer değiştirme değerlerinde aynı değere yaklaşmışlardır. Maksimum kuvvet değerleri dikkate alındığında, PLA'dan üretilen numune daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenirken, N1 numunesi bütün malzemeler için en yüksek kuvvet değerlerinde hasara uğramaktadır. Ancak PLA malzemesi ile üretilen numuneler, daha yüksek yük değerlerine dayanabilmesine rağmen, maksimum yer değiştirme değerleri dikkate alındığında daha gevrek davranış sergilediği gözlenmiştir.

Sonuçlar, ABS, PLA ve PETG malzemelerinin kullanım alanları göz önüne alındığında, farklı sektörler için alternatif tasarım ve malzeme seçimi için bir referans sağlayabilir. Örneğin; maksimum yer değiştirmenin öncelikli olduğu tasarım kriterlerinin söz konusu olduğu durumlarda N5 tipi numune ABS, PLA ve PETG malzemeleri birbirlerine alternatif olarak tercih edilebilir ya da belirli tolerans aralıklarında ise farklı şekiller birbirine alternatif olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbot, D. W., Kallon, D. V. V., Anghel, C. ve Dube, P. (2019). Finite element analysis of 3D printed model via compression tests. *Procedia Manufacturing*, 35, 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.001>
- Abeykoon, C., Sri-Amphorn, P. ve Fernando, A. (2020). Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>
- Akın, E. (2006). *Çentikli çekme deneyinin sonlu eleman yöntemi ile incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- ArtıBoyut. (b.t.). (28 Şubat 2022). *3D yazıcı filament özellikleri*. <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3d-yazici-filament-ozellikleri>
- Başcı, Ü. G., ve Yamanoglu, R. (2021). Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>
- Byrley, P., George, B. J., Boyes, W. K., ve Rogers, K. (2019). Particle emissions from fused deposition modeling 3D printers: Evaluation and meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 655, 395-407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.070>
- Dedeakayoğullari, H., ve Kaçal, A. (2020). Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1), 1-12. <https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca/issue/54121/708049>

Duman, B., ve Kayacan, M. C. (2017). Ar-ge amaçlı doğrudan metal lazer sinterleme (dmls) tezgâhi işlem parametrelerinin araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 15-32.

<https://dergipark.org.tr/en/pub/utbd/issue/36156/406610>

Ercan, N., Kanber, B., ve Yunus, D. E. (2018). 3B eklemeli üretilmiş farklı hücresel yapılı sandviç panellerin sonlu elemanlar yöntemiyle eğilme davranışının incelenmesi. *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies*, 11(3), 232-235

Güler, M., ve Şen, S. (2016). Sonlu elemanlar yöntemi hakkında genel bilgiler. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.

<https://dergipark.org.tr/en/pub/ordubtd/issue/11069/132196>

Guo, N., ve Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*, 8(3), 215-243.

<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>

Harshitha, V., ve Rao, S. S. (2019). Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 19, 583-588. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.737>

Hernandez, R., Slaughter, D., Whaley, D., Tate, J., ve Asiabanpour, B. (2016). Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling. In *2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin. <https://hdl.handle.net/2152/89645>

Horvath, J. (2014). A brief history of 3D printing. *Mastering 3D Printing* içinde (3-10). Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1

Kai, C. C., ve Fai, L. K. (1997). *Rapid Prototyping*. Nanyang technological university. <https://doi.org/10.1142/4605>

Karabıyık, Ö. & Apak, K. (2021). Eklemeli imalat yöntemiyle PLA malzemesinden üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 13(2), 62-68.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/utbd/issue/67952/972120>

Kołodziej, A., Żur, P., ve Borek, W. (2019). Influence of 3D-printing Parameters on Mechanical Properties of PLA defined in the Static Bending Test. *European Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), 65-70.
<https://doi.org/10.33422/EJEST.2019.01.52>

Martínez, J., Diéguez, J. L., Ares, E., Pereira, A., Hernández, P., ve Pérez, J. A. (2013). Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour. *Procedia Engineering*, 63, 878-884.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.230>

Özsoy, K., ve Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/issue/33982/376178>

Porima. (b.t.). (28 Kasım 2020). *Teknik veri sayfası*. <https://www.porima3d.com>

Ray, S. S., ve Okamoto, M. (2003). Biodegradable polylactide and its nanocomposites: opening a new dimension for plastics and composites. *Macromolecular Rapid Communications*, 24(14), 815-840.
<https://doi.org/10.1002/marc.200300008>

- Rebenaque, A. G., ve González-Requena, I. (2019). Study of bending test of specimens obtained through FDM processes of additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 41, 859-866. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.008>
- Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., ve Hermenean, K. (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials & Design*, 160, 179-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.061>
- Sayre, R. (2014). *A comparative finite element stress analysis of isotropic and fusion deposited 3D printed polymer* [Yüksek Lisans Tezi]. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut, USA.
- Standard A. ASTM C393–00 (2000). *Standard test method for flexural properties of sandwich constructions*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Standard A. ASTM D790 (2017). *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*, West Conshohocken, PA.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Tarang, Y. E. (2015). 3d printing additive manufacturing. *International Education and Research Journal*, 1(4), 21-23.
- Tofail, S. A., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*, 21(1), 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>

Uslu, S. (2019). *Üç kanatlı pervanenin işletme şartlarında modal analizi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.

Yalçın, B., ve Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/utbd/issue/36156/406618>

Zhou, X., Hsieh, S. J., ve Ting, C. C. (2018). Modelling and estimation of tensile behaviour of polylactic acid parts manufactured by fused deposition modelling using finite element analysis and knowledge-based library. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 177-190. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1442681>

Zienkiewicz O. C., ve Cheung Y. K. (1967). *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*. McGraw Hill.