



**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN SANDVIÇ YAPILARDA
MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kürşad Ertuğrul BAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kürşad Ertuğrul BAY

30/10/2024

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN SANDVİÇ YAPILARDA MUKAVEMET ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Kürşad Ertuğrul BAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2024

ÖZET

Eklemeli imalat ve bu yöntemle üretilen malzeme teknolojisi her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri arasında Eriyik Biriktirme Yöntemi (FDM) en yaygın kullanılan üretim metodudur. FDM yöntemi, kullanılan makinelerin düşük maliyeti, kompleks geometrili yapıların herhangi bir kesici takıma ihtiyaç duyulmadan kısa üretim döngü sürelerinde üretilmesi ve düşük artık malzeme oranları gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu yöntemle üretilen sandviç yapılar, üstün özellikleri ve fonksiyonellikleri nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Sandviç yapılar, iç ve dış katmanlar arasında bir çekirdek malzeme ile birleştirilen yapılar olarak tanımlanır ve genellikle hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle tercih edilirler. Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda PLA ve TPU polimeri içeren sandviç yapılar, eklemeli imalat yöntemi olan FDM ile üretilmiştir. Üretilen numunelere üç nokta eğme testi, çekme testi ve darbe testi uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Çekme testinde ASTM-D638 Tip 4, üç nokta eğme testinde ASTM-D790 ve darbe testinde ASTM-D6110-18 standartlarına göre test numuneleri üretilmiştir. Sandviç yapılarıdaki PLA oranının artmasıyla çekme mukavemetinin de doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Sandviç yapıdaki PLA oranının %53'ten %66'ya çıkmasıyla çekme mukavemeti 32,71 MPa'dan 47,24 MPa'ya çıkarak %44 oranında artış göstermiştir. Yapılardaki TPU polimerinin varlığı ise mukavemeti bir miktar düşürmesine rağmen esneklik ve darbe dayanımını artırmıştır.

Bilim Kodu : 91448

Anahtar Kelimeler : Eriyik biriktirme yöntemi, sandviç yapılar, mukavemet, eklemeli imalat

Sayfa Adedi : 53

Danışman : Doç. Dr. Gültekin UZUN

INVESTIGATION OF STRENGTH PROPERTIES IN SANDWICH STRUCTURES
PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Kürşad Ertuğrul BAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2024

ABSTRACT

Additive manufacturing and the technology of materials produced through this method are gaining more attention every day. Among additive manufacturing methods, Fused Deposition Modeling (FDM) is the most widely used production method. The advantages of FDM include the low cost of the machines used, the ability to produce structures with complex geometries without the need for cutting tools in short production cycle times, and the low amount of residual material. Sandwich structures produced using this method attract the interest of researchers due to their superior properties and functionality. Sandwich structures are defined as structures bonded with a core material between inner and outer layers and are generally preferred due to their lightness and high strength. In this thesis, sandwich structures containing different ratios of PLA and TPU polymers were printed using the FDM method, an additive manufacturing technique. The printed samples were subjected to three-point bending tests, tensile tests, and impact tests, and the results were evaluated. In the tensile test, ASTM-D638 Type 4, in the three-point bending test, ASTM-D790, and in the impact test, ASTM-D6110-18 standards were considered for the test specimens. It was observed that with the increase in the PLA ratio in the sandwich structures, the tensile strength proportionally increased. As the PLA ratio in the sandwich structure increased from 53% to 66%, the tensile strength increased from 32.71 MPa to 47.24 MPa, showing a 44% increase. Although the presence of TPU polymer in the structures slightly reduced the strength, it was observed that it increased flexibility and impact resistance.

Science Code : 91448

Key Words : FDM, sandwich structures, strength, additive manufacturing

Page Number : 53

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gültekin UZUN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde bana yol gösteren, bilgi ve deneyimlerini paylaşan, her aşamada desteğini esirgemeyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Gültekin UZUN'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bana destek olan ve her zaman yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve bu süreçte bana katkı sağlayan tüm akademik ve idari personellere minnettarım. Son olarak, bu çalışmayı gerçekleştirebilmem için bana olanak sağlayan üniversiteme şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Yapılan Çalışmaların Değerlendirmesi	19
3. EKLEMELİ İMALAT VE POLİMER MALZEMELER.....	21
3.1. Eklemeli İmalatın Tanımı ve Önemi	21
3.2. Polimerlerin Eklemeli İmalatta Kullanımı	21
3.3. FDM Yöntemi ve Polimerler	22
3.4. SLA Yöntemi ve Polimerler.....	22
3.5. SLS Yöntemi ve Polimerler	23
3.6. Polimerlerin Özelliklerinin İyileştirilmesi	24
3.7. Uygulama Alanları	24
4. LAMİNAT YAPILAR.....	25
4.1. Polimer Laminat Yapılar.....	25
5. MATERYAL VE YÖNTEM	27
5.1. Deney Malzemeleri ve Deney Parametreleri	27
5.2. Test Cihazları	28

Sayfa

6. DENEY SONUÇLARI	35
6.1. Eğilme Testi Sonuçları	35
6.2. Çekme Testi Sonuçları	40
6.3. Darbe Testi Sonuçları	44
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	53



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Homojen ve sandviç yapılı numunelerin gerilim-uzama tepkisine ilişkin deneysel sonuçlar	10
Çizelge 2.2. Çekme testi sonuçları.....	14
Çizelge 2.3. Eğilme testi sonuçları	14
Çizelge 2.4. Deney numuneleri tasarımı	17
Çizelge 2.5. Homojen ve çoklu laminat malzemelerin farklı örgü açılarındaki ortalama çekme dayanımı özellikleri	18
Çizelge 5.1. Deney parametreleri ve deney düzeni.....	27
Çizelge 5.2. Üretim parametreleri.....	28
Çizelge 5.3. PLA ve TPU malzemelerinin mekanik özellikleri (Flamix, Sava).....	28
Çizelge 5.4. 3B baskı makinesinin özellikleri	28

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapılı PLA/TPU'nun $\theta = 0^\circ/90^\circ$ ve $90^\circ/0^\circ$ mekanik özellikleri	5
Şekil 2.2. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapılı PLA/TPU'nun $\theta = 45^\circ/-45^\circ$ mekanik özellikleri.....	5
Şekil 2.3. Farklı malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA/TPU numunelerinin gerilme uzama eğrisi	7
Şekil 2.4. Deney numuneleri tasarımı	9
Şekil 2.5. Maksimum Çekme Dayanımı (MPa).....	12
Şekil 2.6. Kuru ve yaşlandırılmış numuneler için homojen malzemelerin üç nokta eğme testlerinden elde edilen veriler	16
Şekil 2.7. Üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuru ve yaşlandırılmış sandviç yapı numunelerinin deney sonuçları	16
Şekil 2.8. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin deney sonuçları	19
Şekil 3.1. 3B baskı adımları.....	21
Şekil 3.2. FDM yöntemi çalışma prensibi	22
Şekil 3.3. SLA yöntemi çalışma prensibi.....	23
Şekil 3.4. SLS yöntemi çalışma prensibi	24
Şekil 4.1. Laminat yapı örneği.....	25
Şekil 5.1. Çekme testi numunesinin teknik resmi.....	29
Şekil 5.2. 0,6 mm katman kalınlığına sahip sandviç yapı numunelerinin çekme testi grafiği.....	29
Şekil 5.3. Çekme testi cihazı.....	30
Şekil 5.4. Çekme testi için hazırlanan deney numuneleri	30
Şekil 5.5. Üç nokta eğme testi numunesinin teknik resmi	31
Şekil 5.6. 0,2 mm katman kalınlığına sahip sandviç yapı numunelerinin eğilme testi grafiği.....	31

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Eğilme testi cihazı.....	32
Şekil 5.8. Eğilme testi için hazırlanan deney numuneleri.....	32
Şekil 5.9. Darbe testi numunesinin teknik resmi	33
Şekil 5.10. Darbe testi cihazı	33
Şekil 5.11. Darbe testi için hazırlanan deney numuneleri	33
Şekil 6.1. 0,2 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi	35
Şekil 6.2. 0,6 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi	36
Şekil 6.3. 1 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi	36
Şekil 6.4. Deney numunelerinin eğilme mukavemeti değerleri.....	37
Şekil 6.5. Deney numunelerinin akma gerilmesi değerleri.....	37
Şekil 6.6. Deney numunelerinin kopma gerilmesi değerleri.....	38
Şekil 6.7. Akma anındaki yük değerleri.....	39
Şekil 6.8. Saf PLA numunesinin çekme testi sonrası görünümü	41
Şekil 6.9. 0,2 mm katman kalınlığındaki numunenin çekme testi sonrası görünümü	41
Şekil 6.10. Deney numunelerinin çekme mukavemeti değerleri	42
Şekil 6.11. Deney numunelerinin çekme uzaması değerleri.....	43
Şekil 6.12. Darbe testi numunelerinin grafiği.....	44
Şekil 6.13. 3 mm katman kalınlığındaki numunenin darbe testi sonrası görünümü.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

dak

Dakika

J

Joule

kN

Kilonewton

mm

Milimetre

MPa

Megapascal

N

Newton

Kısaltmalar

Açıklamalar

3B

3 Boyut

ABS

Akrilonitril Bütadiyen Stiren

ASTM

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

CAD

Bilgisayar Destekli Tasarım

CF-PLA

Karbon Fiber Takviyeli Polilaktik Asit

Eİ

Eklemeli İmalat

FDM

Eriyik Biriktirme Modellemesi

HIPS

Yüksek Etkili Polistiren

PA

Poliamid

PC

Polikarbonat

PLA

Polilaktik Asit

PLA-CB

Polilaktik Asit Karbon Siyahı

PMC

Polimer Matris Kompozit

PMMA

Polimetilmetakrilat

SLA

Stereolitografi

SLS

Seçici Lazer Sinterleme

TPU

Termoplastik Poliüretan

UTS

Maksimum Çekme Dayanımı

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ), geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla sunduğu çeşitli avantajlar sayesinde son yıllarda dikkat çekici bir gelişim göstermiştir [1]. Eİ, "katmanlı üretim" olarak da bilinen ve malzemenin katmanlar halinde eklenerek istenilen şeklin oluşturulması esasına dayanan bir imalat sürecidir [2]. Bu yöntem, tasarım esnekliği, malzeme tasarrufu ve karmaşık geometrilerin üretiminde sağladığı kolaylıklar ile ön plana çıkmaktadır. Eİ, özellikle prototipleme, küçük ölçekli üretim ve özelleştirilmiş ürünler için tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir [3].

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Eriyik Biriktirme Modellemesi (FDM), özellikle yaygınlığı ve kullanım kolaylığı ile dikkat çekmektedir. FDM, termoplastik filamentlerin eritilerek katmanlar halinde üst üste yerleştirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir [4]. FDM'nin avantajları arasında düşük maliyetli malzeme kullanımı, geniş bir malzeme yelpazesi ve nispeten basit bir üretim süreci bulunmaktadır [5]. Ancak, FDM'nin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar arasında, katmanlar arasındaki zayıf bağlanma nedeniyle oluşabilecek düşük mekanik mukavemet, yüzey pürüzlülüğü ve üretim süresinin uzunluğu sayılabilir [6]. Bu nedenle, FDM yöntemi ile üretilen çoklu malzeme yapıların mukavemet özelliklerinin optimize edilmesi önemli bir araştırma konusudur.

Eİ'nin temel avantajlarından biri, çoklu malzeme yapılarının üretimine imkan tanımasıdır. Çoklu malzeme yapıları, tek bir bileşen içinde farklı malzeme özelliklerinin kombine edilmesini sağlar, bu da malzemenin mukavemet, sertlik ve ağırlık gibi kritik mühendislik özelliklerini optimize etmeye olanak tanır [7]. Örneğin, bir uçağın yapısal bileşenlerinde hafif ancak dayanıklı malzemeler kullanılarak yakıt verimliliği artırılabilirken, aynı zamanda daha az bakım gerektiren daha dayanıklı parçalar üretilebilir [8]. Eİ yöntemiyle üretilen parçaların mukavemet özelliklerinin araştırılması, bu teknolojinin daha geniş uygulama alanlarına entegrasyonu için büyük önem taşımaktadır [9].

Mukavemet, bir malzemenin dış kuvvetlere karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür ve malzeme biliminde kritik bir parametredir. Çoklu malzeme yapılarında, farklı malzemelerin birleşim noktaları ve bu noktaların malzeme özelliklerine etkisi büyük önem arz eder [10]. Örneğin, metal ve polimer gibi farklı malzemelerin birleştirildiği yapılarda,

birleşim bölgelerinde oluşabilecek gerilim konsantrasyonları ve bu bölgelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi dikkatle incelenmelidir. Eİ ile üretilen çoklu malzeme yapılarında, malzemelerin birbiriyle nasıl etkileştiği ve bu etkileşimlerin mekanik özelliklere olan etkisi üzerine yapılan araştırmalar, daha dayanıklı ve performanslı malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [11].

Laminat yapılar, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen çoklu malzeme yapılarında önemli bir rol oynamaktadır. Laminat yapılar, farklı malzeme katmanlarının belirli bir düzen içinde üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır [12]. Bu yapılar, her katmanın farklı mekanik özelliklere sahip olmasını sağlayarak, genel yapı üzerinde istenen özelliklerin optimize edilmesine olanak tanır. Laminat yapıların en büyük avantajı, katmanlar arasındaki bağlanma kuvvetinin kontrol edilmesi ve istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesidir. Ancak, laminat yapılarda katmanlar arasındaki bağlanma zayıflıkları ve delaminasyon gibi sorunlar da göz önünde bulundurulmalıdır [13].

Eİ'nin çoklu malzeme yapılarındaki potansiyeli, sadece malzemelerin fiziksel özelliklerinin değil, aynı zamanda kimyasal ve termal özelliklerinin de optimize edilmesine olanak tanır. Örneğin, bir yapının iç kısmında yüksek ısıya dayanıklı bir malzeme kullanılırken, dış kısmında darbelere karşı daha dirençli bir malzeme kullanılabilir. Bu tür kombinasyonlar, geleneksel imalat yöntemleriyle elde edilmesi zor olan üstün performanslı yapılar oluşturulmasına imkân tanır [14].

Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan eriyik biriktirme modellemesi kullanılarak üretilen sandviç yapıların mukavemet özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. 3B baskı makinesiyle farklı oranlarda PLA ve TPU polimeri içeren sandviç yapılar üretilmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak için %100 PLA ve %100 TPU polimerleri de basılmıştır. Baskı parametrelerindeki farklılıklar üretim sürecini etkilemekte ve üretilen parçaların mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bu çalışmada değişken parametre olarak katman kalınlıkları seçilmiştir. Sandviç yapı numunelerinde katman kalınlıkları değişkenlik göstermektedir ve dolayısıyla numune içerisindeki polimerlerin yüzdesi de birbirinden farklıdır. Literatür incelendiğinde üretilen sandviç yapılar genellikle üst ve alt katmanların arasına bir çekirdek polimer yerleştirilerek tasarlanmıştır. Bu çalışmadaki farklılık ise, bir katman PLA bir katman TPU olacak şekilde tüm parçayı çok katmanlı yapıyı ayıracak şekilde tasarlanmasıdır. Üretilen numunelere çekme testi, üç

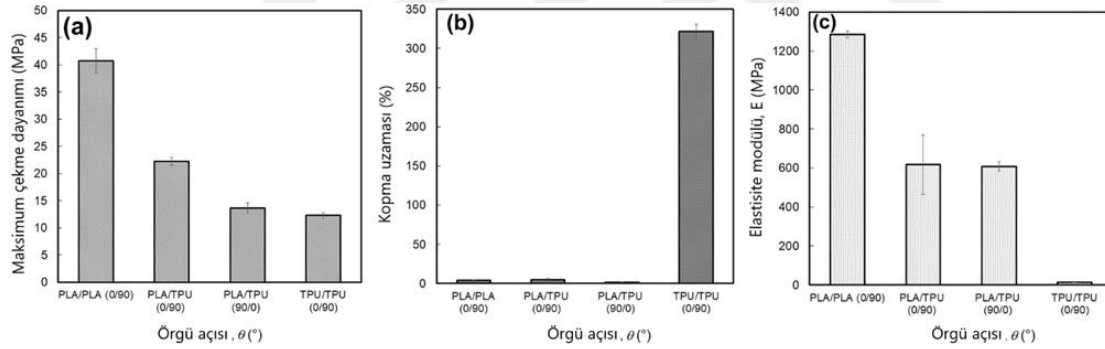
nokta eğme testi ve darbe testleri yapılmıştır. Sandviç yapıların hem kendi aralarında hem de üretilen saf polimerlerle karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışma, sandviç yapıların endüstride daha geniş bir yelpazede kullanılabilmesi için gerekli olan bilgi birikimine katkı sağlamayı hedeflemektedir.



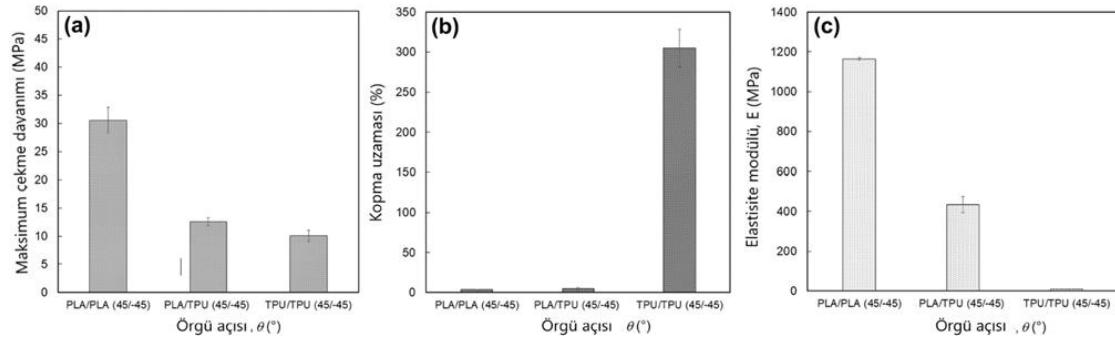
2. LİTERATÜR TARAMASI

Eklemeli imalat yöntemiyle imal edilen polimer sandviç yapıları içeren muhtelif çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Sandviç yapılar konusunda yapılan araştırmalar aşağıda sunulmuştur.

Arifvianto ve diğerleri [15] yaptıkları çalışmada, polilaktik asit (PLA) ve termoplastik poliüretandan (TPU) oluşan sandviç yapılı FDM baskılı çoklu malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. PLA ve TPU polimerlerinden ürettikleri çekme testi numunelerini, ASTM D638-14 standardına göre 115 mm uzunluğunda ve 19 mm genişliğinde hazırlamışlardır. Her numuneyi tekrar tekrar basılan 10 çift PLA ve TPU katmanından oluşturmuşlardır. $\theta = 0^\circ/90^\circ$, $90^\circ/0^\circ$ ve $45^\circ/-45^\circ$ tarama açılarına sahip üç dolgu açısı konfigürasyonu hazırlamışlardır. Numunelerden elde ettikleri deney verileri şekil 2.1 ve şekil 2.2’de gösterilmiştir.



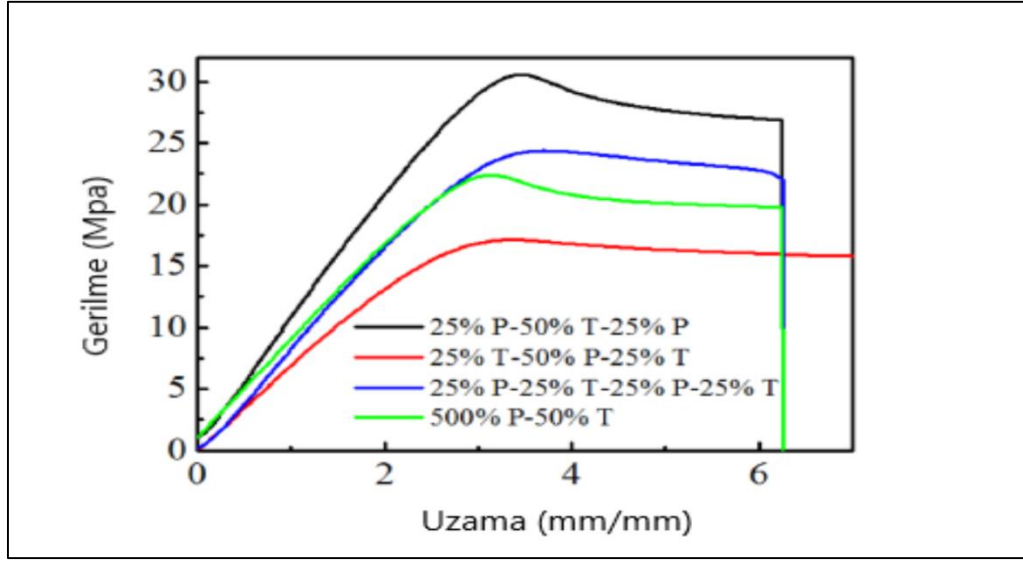
Şekil 2.1. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapılı PLA/TPU'nun $\theta = 0^\circ/90^\circ$ ve $90^\circ/0^\circ$ mekanik özellikleri: a) çekme dayanımı, b) kopma uzaması ve c) elastisite modülü [15]



Şekil 2.2. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapılı PLA/TPU'nun $\theta = 45^\circ/-45^\circ$ mekanik özellikleri: a) çekme dayanımı, b) kopma uzaması ve c) elastisite modülü [15]

PLA/TPU sandviç numunelerinin çekme testini, oda sıcaklığında, 5 mm/dak hızında ve ASTM D638 standardına göre üç kopya halinde gerçekleştirmişlerdir. PLA/TPU çoklu malzemeden yaptıkları sandviç yapıları parçaların gerilme mukavemeti ve elastik modülünün, bastıkları saf PLA'nın özelliklerinden daha düşük, ancak saf TPU'nunkinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. $\theta = 0^\circ/90^\circ$ olarak basılan PLA/TPU numunesinin çekme mukavemeti ve elastikiyet modülünün (22,3 MPa, 617,3 MPa) $\theta = 90^\circ/0^\circ$ olarak basılan PLA/TPU numunesinden (13,6 MPa, 607,3 MPa) daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu bulguya göre, iki bitişik PLA katmanı arasına daha az güçlü TPU katmanlarının yerleştirilmesinin, basılı PLA/TPU sandviç numunesinin mukavemetini bozabileceğini rapor etmişlerdir. Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmaya dayanarak, PLA/TPU'nun sandviç formundaki kombinasyonunun, FDM baskılı saf TPU numunesinin mukavemetini ve elastik modülünü artırabileceği sonucuna varmışlardır [15].

Wang ve diğerleri [16] yaptıkları çalışmada, polilaktik asit (PLA) ve termoplastik poliüretan (TPU) içeren farklı malzeme örneklerini, FDM yöntemi ile laminat biçimde üretmişlerdir. TPU'nun sandviç yapı içerisindeki hacim oranını ve malzeme düzenlerini değiştirmişlerdir. Saf PLA ve saf TPU'nun 3B baskılı numuneleri ile sandviç yapıya sahip PLA/TPU numunelerinin karşılaştırmasını yapıp, mekanik özelliklerini incelenmişlerdir. Hacim oranının ve malzeme yerleşimlerinin, farklı malzemelerle 3B yazdırılan parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak için iki tür numune tasarlamışlardır. İlk tip için %10, %20, %30, %40 ve %50 olmak üzere beş TPU hacim oranı tasarlamışlardır. Bu numuneleri, TPU'nun orta katman olarak kullanıldığı ve PLA'nın alt ve üst katmanlarda kullanıldığı sandviç yapılarda üretmişlerdir. İkinci tip için, TPU'nun aynı hacim oranına (%50) ancak farklı malzeme düzenine sahip dört PLA/TPU numunesi tasarlamışlardır. Bunlar, PLA ve TPU'nun farklı numunelerde farklı katmanlarda yer aldığı sandviç yapılarda üretmişlerdir. Çekme testlerini oda sıcaklığında 5 mm/dak hızında gerçekleştirmişlerdir. Çekme testi sonuçlarına göre %25 PLA-%50 TPU-%25 PLA numunelerinin en yüksek akma gerilmesi ve elastik modüle sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. %25 TPU-%50 PLA-%25 TPU numunelerinin ise bu dört numune türü arasında en zayıf özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. 25 TPU - %25 PLA - %25 TPU - %25 PLA numunesinin çekme mukavemeti yaklaşık 28 MPa olduğunu ve bu değer %50 PLA - %50 TPU numunesinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Numunelere ait gerilme uzama eğrisi şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Farklı malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA/TPU numunelerinin gerilme uzama eğrisi [16]

Sonuç olarak; Laminasyonda 3B baskılı PLA/TPU numunesinin çekme mukavemeti ve elastik modülünün, TPU'nun hacim oranına ve malzeme düzenine duyarlı olduğunu gözlemlemiştir. PLA'nın ise, PLA/TPU numunesinin gerilme mukavemetinde baskın bir rol oynadığını belirtmiştir. TPU'nun aynı hacim oranıyla, yüzey malzemesi PLA ve çekirdek malzemesi TPU olan PLA/TPU numuneleri arasında en yüksek akma gerilimi ve elastik modüle sahip olduğunu raporlamışlardır. Çekirdek malzemesi PLA olan numunelerin ise, test edilen tüm numuneler arasında en düşük özellikleri gösterdiğini gözlemlemiştir [16].

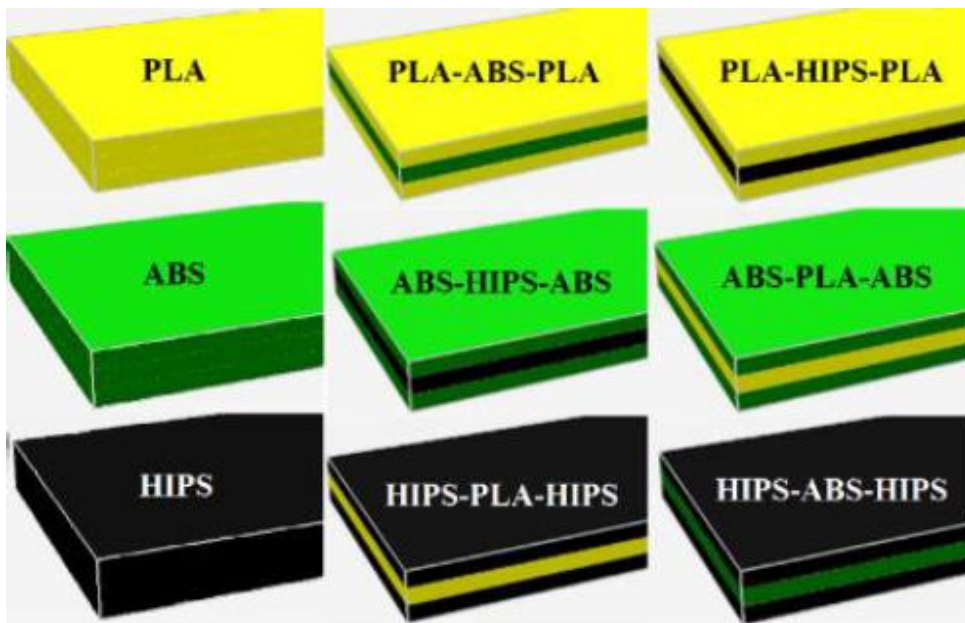
Liu ve diğerleri [17] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemiyle ürettikleri sandviç yapıda yumuşak ve sert polimerlerin üretimi sırasındaki işlem parametrelerinin, eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel ve istatistiksel bir çalışma yapmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada sert polimer olarak PLA'yı yumuşak polimer olarak ise TPU'yu seçmişlerdir. Yumuşak bir çekirdek ve sert dış katmanlardan oluşturdukları sandviç kiriş numunelerini, farklı baskı koşulları altında üretmişlerdir. Baskı hızı ve nozül sıcaklığının yumuşak-sert sandviç kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için bir deney tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Yumuşak-sert sandviç kirişin eğilme davranışını incelemek için, üç nokta eğilme testleri gerçekleştirmişlerdir. Tüm testleri yer değiştirme kontrolü altında 2 mm/dak sabit yer değiştirme hızında gerçekleştirmişlerdir. Yumuşak-sert sandviç kirişlerde kabuk arızası ve ara yüzey arızası olmak üzere iki farklı

arıza modu gözlemlenmişlerdir. Hata modlarının, tüm işlem parametreleri ile yüksek derecede ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. PLA için nozül sıcaklığı en önemlisi olup, onu baskı hızının izlediğini, TPU için ise nozül sıcaklığı ve baskı hızının önemini vurgulamışlardır. PLA ve TPU için nozül sıcaklığı arttıkça, hata modlarının ara yüzey hatasından kabuk hatasına geçtiğini gözlemlenmişlerdir. PLA için baskı hızındaki artışla birlikte hata modları kabuk hatasından ara yüzey hatasına geçtiğini belirtmişlerdir. Kabuk çatlaması nedeniyle başarısız olan numune sayısı ile TPU için baskı hızı arasında monoton bir ilişki olmasa da, TPU için en düşük baskı hızında kabuk çatlaması nedeniyle daha fazla numune başarısız olduğunu gözlemlenmişlerdir. Yumuşak-sert sandviç kirişlerin eğilme mukavemeti için en önemli faktörün PLA için nozül sıcaklığı ondan sonra ise baskı hızının takip etmekte olduğunu gözlemlenmişlerdir. Eğilme modülünün, TPU için ise baskı hızının önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, TPU için nozül sıcaklığı eğilme mukavemeti ve modülü üzerinde önemli bir etki göstermediğini rapor etmişlerdir. PLA ve TPU katmanları birbirinden ayrıldığında kabuk çatlaması nedeniyle başarısız olan numuneler için yapışkan ve kohezif kırılmanın karışık bir başarısızlık modu gözlemlenmiştir. Bunun, PLA ve TPU arasında güçlü ve sert bir ara yüzün açık bir göstergesi olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür güçlü ara yüzeylerin bir sonucu olarak, bu numuneler eğilme mukavemeti ve modülü açısından ara yüzey çatlaması sergileyen numunelerden daha iyi performans göstermiştir [17].

Kumar ve diğerleri [18] yaptıkları çalışmada, FDM teknolojisini kullanarak farklı polimerlerden hazırlanan çok malzemeli bir ABS/TPU test örneğini incelemeyi amaçlamışlardır. ABS ve TPU polimerlerini FDM yöntemiyle 3 katman halinde basmışlar ve lamine etmişlerdir. ABS, TPU, ABS (ATA) ve TPU, ABS, TPU (TAT) olmak üzere iki kategoriye ayırmışlardır. Bu kategoriler için numunelerin eğilme özellikleri, mikroskopik görüntüleme ve gözeneklilik özelliklerini ASTM D790 standartlarına göre test edip incelemişlerdir. ATA numunesindeki 1,54 mm TPU kalınlığı için, 31,38 MPa'lık en düşük eğilme mukavemeti gözlemlenmişlerdir. Bu durumun, zayıf eğilme özellikleri sergileyen ABS katmanları arasında daha fazla TPU hacminin bulunmasından kaynaklanıyor olabildiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 1,10 mm'lik üç katmandan oluşan eşit kalınlığa sahip, ATA numuneleri için 46,49 MPa'lık maksimum eğilme mukavemeti gösterdiğini gözlemlenmişlerdir. Dolayısıyla, daha iyi esneklik ve orta düzeyde eğilme mukavemeti için 1,10 mm'lik bir katman kalınlığı kullanılabileceğini rapor etmişlerdir. ATA bazlı numunelerin, TAT bazlı numunelere göre daha yüksek eğilme mukavemetine

sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. ATA numuneleri arasında en yüksek özellikleri gösteren numune için, kopma uzamasındaki artışı %187 olarak raporlamışlardır. 1,54 mm kalınlıktaki TPU çekirdekli ATA numunesinin, saf ABS numunesine kıyasla kopma uzamasında %327'lik önemli bir artış olduğunu, ancak zayıf eğilme mukavemeti gösterdiğini belirtmişlerdir. TAT bazlı numune için eğilme mukavemetinin yaklaşık 6,8 MPa'dan 13 MPa'ya önemli ölçüde arttığını ve bu değerinde de saf TPU numunesine kıyasla eğilme mukavemetinde yaklaşık %92'lik bir artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir [18].

Lopez ve Ahmad [19] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemiyle polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve yüksek etkili polistiren (HIPS) termoplastiklerini kullanarak sandviç yapılı numuneler üretmişlerdir. Bu çalışmada, aynı geometride farklı sandviç kombinasyonlarının etkisini araştırarak bu malzemelerin bir parçanın mukavemetini artırıp artıramayacağını değerlendirmesini yapmışlardır. Ürettikleri deney numunelerinin toplam kalınlığı 3,6 mm'dir. İki dış katmanın kalınlığı 2,4 mm ve iç katmanın kalınlığı 1,2 mm'dir. Numuneleri ASTM D638 TİP-1 standardına uygun olarak üretmişlerdir. Tüm numuneleri XY düzleminde düz bir yönde, doğrusal bir desenle, 45°/-45° istifleme sırası ile ve Z yönünde dikey olarak yukarı doğru katman katman basmışlardır. Deney numunelerinin tasarımı (Şekil 2.4) ve çekme testi verileri (Çizelge 2.1) aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Deney numuneleri tasarımı [19]

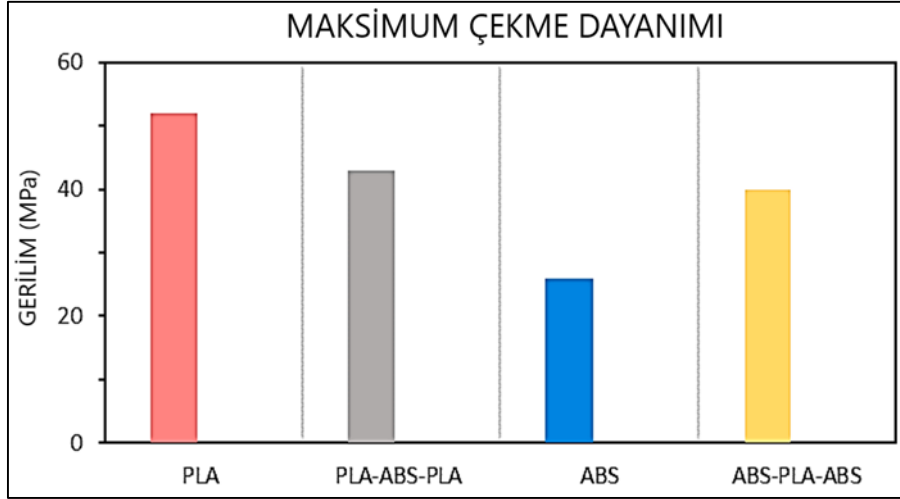
Çizelge 2.1. Homojen ve sandviç yapılı numunelerin gerilim-uzama tepkisine ilişkin deneysel sonuçlar [19]

Sıra	Malzemeler	Çekme dayanımı (MPa)		Kopma uzaması (mm)		Young modülü (MPa)	
		Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma	Ortalama	Standart sapma
1	ABS	32,89	2,32	4,71	1,03	1049,78	54,81
2	PLA	47,46	2,37	4,16	0,20	1396,90	47,33
3	HIPS	20,06	0,26	6,69	1,92	933,33	14,69
4	ABS-PLA-ABS	38,28	0,16	6,02	0,07	1232,96	0,78
5	ABS-HIPS-ABS	29,67	0,07	5,16	0,52	1049,05	4,87
6	PLA-ABS-PLA	44,40	0,26	6,14	0,09	1364,27	16,68
7	PLA-HIPS-PLA	38,77	1,18	5,38	0,38	1351,27	2,50
8	HIPS-PLA-HIPS	25,87	0,06	8,57	1,56	981,45	141,42
9	HIPS-ABS-HIPS	22,21	0,05	6,10	0,12	992,02	3,59

Çekme testinden elde ettikleri mekanik sonuçlar, homojen malzemeler ve sandviç yapıların farklı kombinasyonları arasında farklılıklar gösterdiğini raporlamışlardır. HIPS kaplamalı ve ABS çekirdekli numuneler, 22,21 MPa'lık ortalama çekme gerilimi ile en düşük performansı sergilediğini ve bu değerin, test edilen en iyi sandviç yapı olan PLA-ABS-PLA'dan %50 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. HIPS kaplamalı ve PLA çekirdekli numuneler ise 25,87 MPa'lık düşük bir ortalama gerilme mukavemeti göstermiş, ancak ortalama 8,57 mm ile en yüksek uzamaya ulaştığını belirtmişlerdir. Sandviç numuneler arasında PLA-ABS-PLA kombinasyonunun 44,40 MPa ile en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu değerin saf ABS'ye kıyasla %35 artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu davranışın, her iki polimerin de rijit malzemeler olarak kabul edilmesinden kaynaklanıyor olabildiğini raporlamışlardır. Ayrıca, bu kombinasyonun ortalama 6,14 mm kopma uzamasına sahip olduğunu ve bu değerin saf ABS'ye kıyasla %27 saf PLA'ya kıyasla %44 artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. PLA'nın en yüksek gerilme mukavemetine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak yapılan bu çalışmada, 3B baskı malzemelerine uygulanan sandviç yapının kullanımı, iki

farklı malzemenin özelliklerinin aynı parçaya entegre edilerek tek homojen malzemelere göre daha uzun süre çekme yüküne dayanabilen fonksiyonel parçalar üretmede uygulanabilirlik kazandırdığını raporlamışlardır. Ayrıca, enerjiyi absorbe edebilen ve bu nedenle kırılmadan önce uzun süreli kullanım sağlayan daha yüksek kopma uzaması sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Çok malzemeli ve sandviç yapı yöntemlerinin düşük maliyetli malzemeler kullanılarak çeşitli uygulamaların gereksinimlerini karşılayabileceğini gözlemlemişlerdir [19].

Patro ve diğerleri [20] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemini kullanarak ürettikleri polimer sandviç yapıların mekanik özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Araştırmada, polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) olmak üzere iki polimerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan sandviç yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmanın odak noktası olan iki farklı sandviç yapıyı PLA-ABS-PLA ve ABS-PLA-ABS şeklinde kombinlemişlerdir. Numuneleri ASTM D638 TİP-4'e göre üretmişlerdir. Numuneleri 4 mm kalınlığında tasarlamışlardır. Sandviç yapılarda, dış katmanlar 1,2 mm kalınlığında ve iç katmanlar ise her durumda 1,6 mm kalınlığında olacak şekilde tasarlamışlardır. Çekme testinde her bir numune için seçtikleri gerinim hızı 5 mm/dak olmuştur. Test sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımını PLA'nın gösterdiğini gözlemlemişlerdir (52 Mpa). Sandviç yapıların ise, ABS'den daha güçlü ve daha sert olan PLA'nın varlığı nedeniyle ABS'den (26 MPa) daha iyi mukavemete sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sandviç yapılar arasında PLA-ABS-PLA (43 Mpa) yapısının ABS-PLA-ABS (40 Mpa) yapısına kıyasla daha iyi performans gösterdiğini raporlamışlardır. Sandviç yapılardan ABS-PLA-ABS numunesi saf ABS'ye kıyasla çekme mukavemetinde %53 artış gösterdiğini belirtmişlerdir. PLA-ABS-PLA yapısının ise saf ABS'ye kıyasla %65 artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Çekme testinden elde ettikleri veriler şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Maksimum çekme dayanımı (MPa) [20]

Sandviç yapılar oluşturmak için ABS'ye PLA eklenmesinin, saf ABS'ye kıyasla özellikleri genel olarak geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. PLA-ABS-PLA sandviç yapısının, ABS-PLA-ABS yapısına kıyasla daha üstün özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Yüzeyi ABS ve çekirdeği PLA olan sandviç yapıların yanı sıra yüzeyi PLA ve çekirdeği ABS olan sandviç yapıların da saf ABS çekme yapılarına kıyasla daha iyi özellikler sergilediğini rapor etmişlerdir. Bu sonuçlarla birlikte, sandviç yapıların havacılık ve otomotiv gibi çeşitli endüstrilerdeki yapısal uygulamalar için saf ABS'ye alternatif olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır. PLA ve ABS'den yapılan sandviç yapıların dronlar, gösterge panelleri ve diğer benzer bileşenlerin yapımında kullanılabileceğini belirtmişlerdir [20].

Ahmed ve diğerleri [21] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemiyle Hibrit kompozitler olarak adlandırılan iki farklı laminattan oluşan kompozitler üretmişlerdir. Farklı baskı parametreleri kullanarak akrilonitril bütadien stiren filament (ABS) ve karbon fiber takviyeli polilaktik asit filament (CF-PLA) kullanarak baskı yapmışlardır. Üretilen kompozit numunelerin mekanik performansını incelemek için çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. CF-PLA filamentini kütle olarak %10 ve hacim olarak %6 karbon içeriğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Numuneleri ASTM D638-02 standardına uygun olarak üretmişlerdir. Toplam 22 çekme numunesi üretmişlerdir. Numunelerin katman kalınlığını 0,1mm, 0,3mm ve 0,5mm olarak, baskı hızını 20 mm/s, 52,50 mm/s ve 80 mm/s olarak, Dolgu yoğunluğunu ise %60, %80 ve %100 olarak ayarlamışlardır. Kompozit numunelerin oranını ise %50 CF-PLA - %50ABS, %63 CF-PLA - %37 ABS ve %75 CF-

PLA - %25 ABS olarak tasarlamışlardır. Çekme testlerini, 30 kN yük kapasitesine sahip bir çekme test cihazında gerçekleştirmişlerdir. Test sırasında gerinim hızı 2 mm/dak'da tutmuşlardır. En yüksek çekme mukavemetini, 20 mm/s baskı hızı, %100 dolgu yoğunluğu, 0,10 mm katman kalınlığına sahip, %75CF-PLA - %25ABS kombinasyonunda elde etmişlerdir (51,34Mpa). En yüksek elastikiyet modülünü, 80 mm/s baskı hızı %60 dolgu yoğunluğu 0,10 mm katman kalınlığına sahip, %75CF-PLA - %25ABS kombinasyonunda elde etmişlerdir (2204,45 Mpa). En yüksek uzamayı, 80 mm/s baskı hızı %100 dolgu yoğunluğu 0,10 mm katman kalınlığına sahip, %50CF-PLA - %50ABS kombinasyonunda elde etmişlerdir (%9). Basılan kompozit numunenin, kendisini oluşturan monolitik numunelerden daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bunun, kompozit tabaka üretmek için uygulanan laminasyon yaklaşımının istenen özelliklere sahip fonksiyonel bileşenler üretme potansiyeline sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Düşük baskı hızı, düşük katman kalınlığı ve düşük kaplama oranı değerleri kullanılarak yüksek maksimum çekme mukavemeti (UTS) elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Bu koşulların aynı zamanda yüksek elastikiyet modülü sağladığını raporlamışlardır. Katman kalınlığı ve kaplama oranının dikkate alınan tüm gerilme özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Baskı hızının sadece nihai mukavemeti ve dolgu yoğunluğunun da sadece uzamayı etkilediğini gözlemlemişlerdir. Dikkate alınan çeşitli gerilme özellikleri arasında bir denge sağlayan optimum baskı parametrelerini şu şekilde ifade etmişlerdir: hız = 20 mm/s, dolgu yoğunluğu = %67,838, katman yüksekliği = 0,23 mm ve kaplama oranı = 0,25 [21].

Dhinesh S.K ve diğerleri [22] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemiyle ürettikleri çoklu malzeme yapılarının çekme ve eğilme testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çoklu malzeme yapısı için seçtikleri malzemeleri ABS ve PLA olarak belirlemişlerdir. Çoklu malzemenin bileşimlerini %20 ABS - %80 PLA, %50 ABS - %50 PLA ve %80 ABS - %20 PLA olarak tasarlamışlardır. Çekme testi için ASTM D638 ve Eğilme testi için ASTM D790-17 standartlarını dikkate almışlardır. Kompozisyon numunelerine ek olarak, her bir test için saf ABS ve PLA numuneleri de üretmişlerdir. Değişken parametre olarak, baskı hızı (38 mm/s ve 52mm/s) ve raster açısını (0° ve 90°) kullanmışlardır. 52 mm/sn'de daha yüksek oranlarda ürün üretmelerine rağmen, 38 mm/sn'de ürettikleri numunelerin daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü polimerik mikrofiber yapının çok daha belirgin ve tekdüze olup genel mukavemeti arttırdığını ifade etmişlerdir. PLA'nın ABS ve diğer çok katmanlı numunelere kıyasla daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir.

Bunun sebebinin ise uygulanan yükün kopma yüküne oranının PLA için dikkate alınan diğer numunelerden daha yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çekme mukavemetini tek başına değerlendirdiklerinde PLA'nın etkileyici sonuçlar verdiğini ve minimum miktarda ABS (%20) ile daha fazla miktarda PLA (%80) eklediklerinde sandviç yapının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlemişlerdir (21,4 MPa). ABS'nin bu %20'lik karışımdaki varlığının, sandviçin çekme özelliklerini %100 PLA'dan (20,35 MPa) bile daha iyi performans gösterebilecek şekilde zenginleştirdiğini rapor etmişlerdir. Testlerden elde ettikleri bir diğer önemli çıkarım da yapıdaki PLA miktarı azaldıkça çekme mukavemetinin büyük ölçüde azaldığı olmuştur. Eğilme testinde ise 0° örgü açısı ile birlikte 38 mm/sn ilerleme hızında yapılan numunelerin çok iyi sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Sandviç numuneler arasında %50 PLA -%50 ABS numunesinin maksimum eğilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Deney numunelerinin çekme testi verileri (Çizelge 2.2) ve eğilme testi verileri (Çizelge 2.3) aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 2.2. Çekme testi sonuçları [22]

Malzemeler	Maksimum yük (KN)	Kopma yükü (KN)	Gerilim anındaki yük (8%) (KN)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)
ABS	0,68	0,42	0,42	13,46
PLA	1,03	0,96	0,73	20,35
20%ABS, 80%PLA	1,18	1,07	0,83	21,4
%50%50 SANDVİÇ	0,71	0,53	0,57	14,45
80%ABS, 20%PLA	0,65	0,44	0,43	13,2

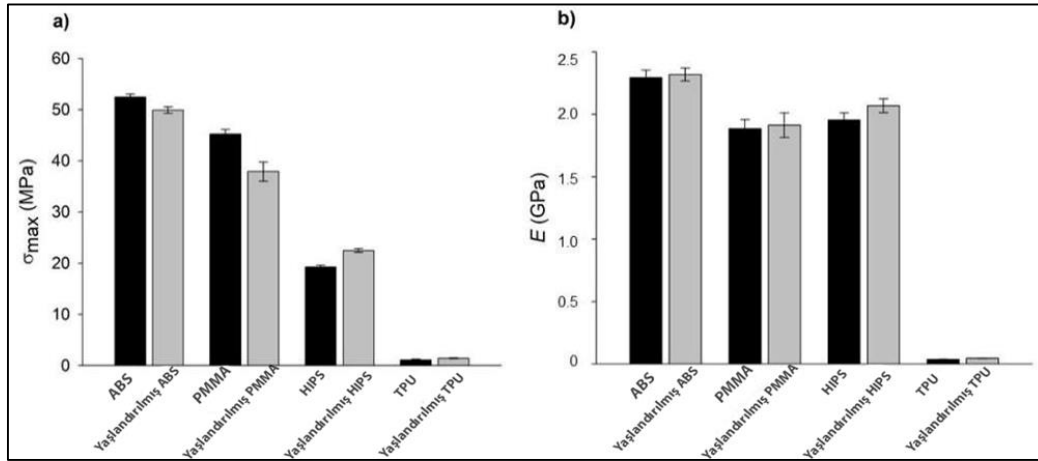
Çizelge 2.3. Eğilme testi sonuçları [22]

Numuneler	Uygulanan maksimum yük (N)	Maksimum gerilim (MPa)	Maksimum gerilimdeki uzama (mm)	Maksimum yükteki uzama (mm)
ABS	34,89637	19,24	0,0556	8,87586
PLA	32,16785	17,90	0,06402	4,62973
20% ABS, 80% PLA	31,6251	16,23	0,06493	6,74632
50%50% SANDVİÇ	34,43876	19,11	0,03173	9,49994
80% ABS, 20% PLA	33,68724	18,03	0,04752	8,9879

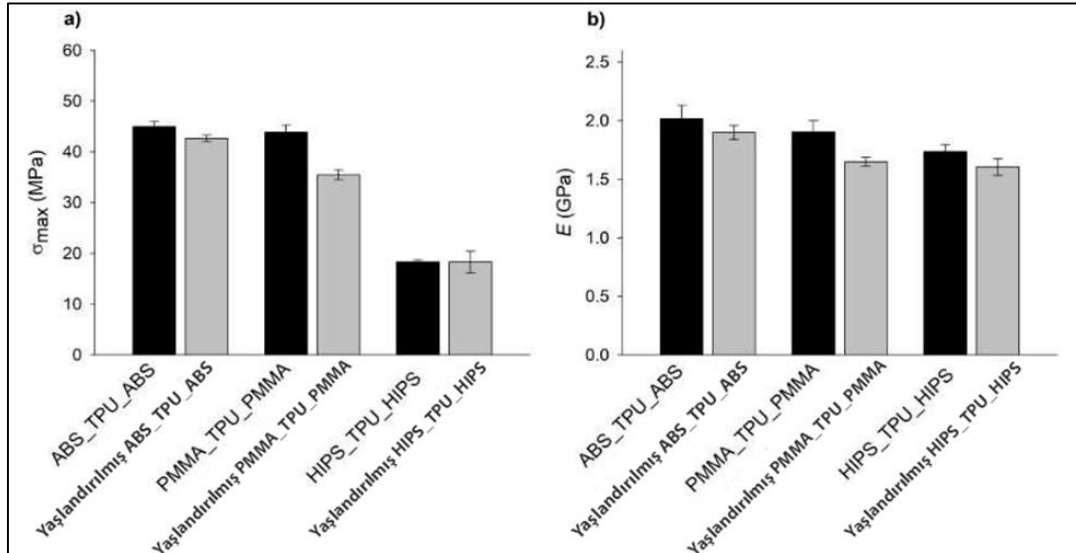
Tüm testlerden elde ettikleri sonuçlardan yola çıkarak, ABS ve PLA'nın sandviçlenmesi konseptinin daha fazla mekanik özellik sağlayabileceğine ve nihayetinde 3B baskının geleceğinde 3B baskı filamentleri için halef rolü oynayabileceğine dair bazı olumlu belirtiler gösterdiğini belirtmişlerdir [22].

Pinho ve Piedade [23] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemini kullanarak çift nozullu bir 3B yazıcıyla ürettikleri çok malzemeli numunelerin mekanik davranışlarını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Bu çalışmada kullandıkları polimerleri, akrilonitril-bütadien-stiren (ABS), yüksek etkili polistiren (HIPS), polimetil metakrilat (PMMA) ve termoplastik poliüretan (TPU) olarak belirlemişlerdir. Sandviç yapıların konfigürasyonunu, TPU'dan bir çekirdek ve diğer üç malzemenin birinden yapılmış dış kaplamalardan oluşturmuşlardır. Mekanik davranışı, üç nokta eğme ve enine darbe testleri ile değerlendirmişler ve tek malzemeli baskılı numunelerle karşılaştırmışlardır. Malzemeleri önce tek malzemeli konfigürasyonda ve daha sonra çok malzemeli konfigürasyonda test etmişlerdir. Tüm numuneler için katman kalınlığını 0,18 mm olarak sabit tutmuşlardır. Hem tek hem de çok malzemeli basılı parçalar için, daha iyi bir gerilim dağılımı ve daha az anizotropik mekanik davranış elde etmek amacıyla %100 çizgi (45°/-45°) dolgu deseni kullanmışlardır. Her bir konfigürasyon türü ve mekanik test için 12 numune basmışlardır. Baskıdan sonra, bastıkları tek ve çok malzemeli numunelerin yarısını (altı adet) mekanik testten önce yapay yaşlandırma işlemine tabi tutmuşlardır. Yapılan testler sonucunda; yaşlandırma işleminin basılan tek malzemeli numunelerin bazıları üzerinde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. 3 nokta eğme testlerinde, PMMA numuneleri için yaşlanma sonrasında σ_{max} ve E değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir. Enine darbe testlerinin ise ABS numunelerinin esnekliğinin ve absorbe edilen enerjisinin yaşlanma sürecinden olumsuz etkilendiğini ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Sandviç yapılarla ilgili olarak, mekanik performanslarının yaşlanma sürecinden önemli ölçüde etkilenmediği gözlemlenmiştir. En iyi eğilme özelliklerini sunan sandviç konfigürasyonlarının ABS-TPU-ABS ve PMMA-TPU-PMMA numuneleri olduğunu raporlamışlardır. Enine darbe testi sonucunda, TPU'nun basılı numunelerin mekanik özelliklerini biraz yükselttiğini belirtmişlerdir. Çekiç darbesiyle indüklenen hasar söz konusu olduğunda ise, tüm sandviç yapıların dış katmanlarda görünür çatlaklar gösterdiğini gözlemlenmiştir. Sandviç yapıların yüzeyinde oluşan çatlakların derinlemesine yayılımının, çekirdek polimer olan TPU'ya ulaştığında durduğunu rapor etmişlerdir. Bu davranışın sebebinin, TPU'nun yapılan testlerde en düşük enerji emilim yüzdesine sahip olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bunun da

TPU'nun büyük bir darbe enerjisi oranını başarıyla dağıtabileceğini ve çatlak kusurları oluşumu olmadan yapısal bütünlüğünü koruyabileceği anlamına geldiğini vurgulamışlardır. En iyi sonuçları veren çoklu malzemenin, tüm malzeme kombinasyonları arasında en yüksek esneklik değerine sahip olması nedeniyle ABS-TPU-ABS olduğunu ifade etmişlerdir. Deney numunelerinin eğilme testi sonuçları Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de gösterilmiştir [23].



Şekil 2.6. Kuru ve yaşlandırılmış numuneler için homojen malzemelerin üç nokta eğme testlerinden elde edilen a) σ_{max} ve b) E'nin çubuk grafik gösterimi [23]



Şekil 2.7. Üç nokta eğme testlerinden elde edilen kuru ve yaşlandırılmış sandviç yapı numunelerinin belirlenen a) σ_{max} ve b) E değerleri [23]

Kumar ve Singh [24] yaptıkları çalışmada, FDM yöntemiyle PLA ve PA6-TiO₂'yi çoklu malzeme olarak üretilen bu malzemenin biyomedikal iskele uygulamaları için elverişli olup

olmadığını anlamak için çeşitli mekanik testler gerçekleştirmişlerdir. PLA'nın biyouyumlu sınıfı olan PA6-TiO₂ (ağırlıkça %70-30) seçmişlerdir. Üretilen numunelerin kombinasyonunu Çizelge 2.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Deney numuneleri tasarımı [24]

	Dolgu hızı (mm/s)	Dolgu deseni	Katman kombinasyonu
Numune-1	30	Doğrusal	5:5 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-2	30	Üçgen	6:4 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-3	30	Bal peteği	7:3 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-4	60	Doğrusal	6:4 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-5	60	Üçgen	7:3 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-6	60	Bal peteği	5:5 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-7	90	Doğrusal	7:3 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-8	90	Üçgen	5:5 (PLA/PA6TiO ₂)
Numune-9	90	Bal peteği	6:4 (PLA/PA6TiO ₂)

Çekme testi sonuçlarına göre, baskı hızı 90mm/s, dolgu deseni üçgen, katman kombinasyonu 5:5 (PLA/PA6TiO₂) olan deney numunesinin çekme mukavemetinin 61,27 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Kırılma mukavemetinin ise 55,14 MPa ile diğer tüm çok katmanlı prototip numuneleri arasında daha yüksek olduğu için en iyi özellikleri gösterdiğini raporlamışlardır. Dolgu hızı 60mm/s, dolgu deseni altıgen, katman kombinasyonu 5:5 (PLA/PA6TiO₂) deney numunesinin ise çekme mukavemetinin 31,77 MPa olduğunu belirtmişlerdir. Kırılma mukavemetinin 28,59 MPa ile tüm numuneler arasında en düşük olduğu için zayıf özellikler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Gözeneklilik analizinden, dolgu hızı 90mm/s, dolgu deseni üçgen, katman kombinasyonu 5:5 (PLA/PA6TiO₂) olan deney numunesinin en az gözenekliliğe sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Dolgu hızı 60mm/s, dolgu deseni altıgen, katman kombinasyonu 5:5 (PLA/PA6TiO₂) olan deney numunesinin; maksimum gözenekliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir; bu nedenle, dolgu hızı 90mm/s, dolgu deseni üçgen, katman kombinasyonu 5:5 (PLA/PA6TiO₂) olan deney numunesinin düşük gözeneklilik nedeniyle en iyi mekanik performansa sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Varyans analizi (ANOVA) kullanarak, Dolgu hızı: 90 mm/sn, dolgu deseni: Doğrusal ve katman kombinasyonu: PLA (5 katman): PA6-TiO₂ (5 katman) kombinasyonunun, katmanlı prototiplerin FDM ile işlenmesi veya tıbbi uygulamalar için iskele baskısı için optimize edilmiş koşullar olduğu gözlemlemişlerdir [24].

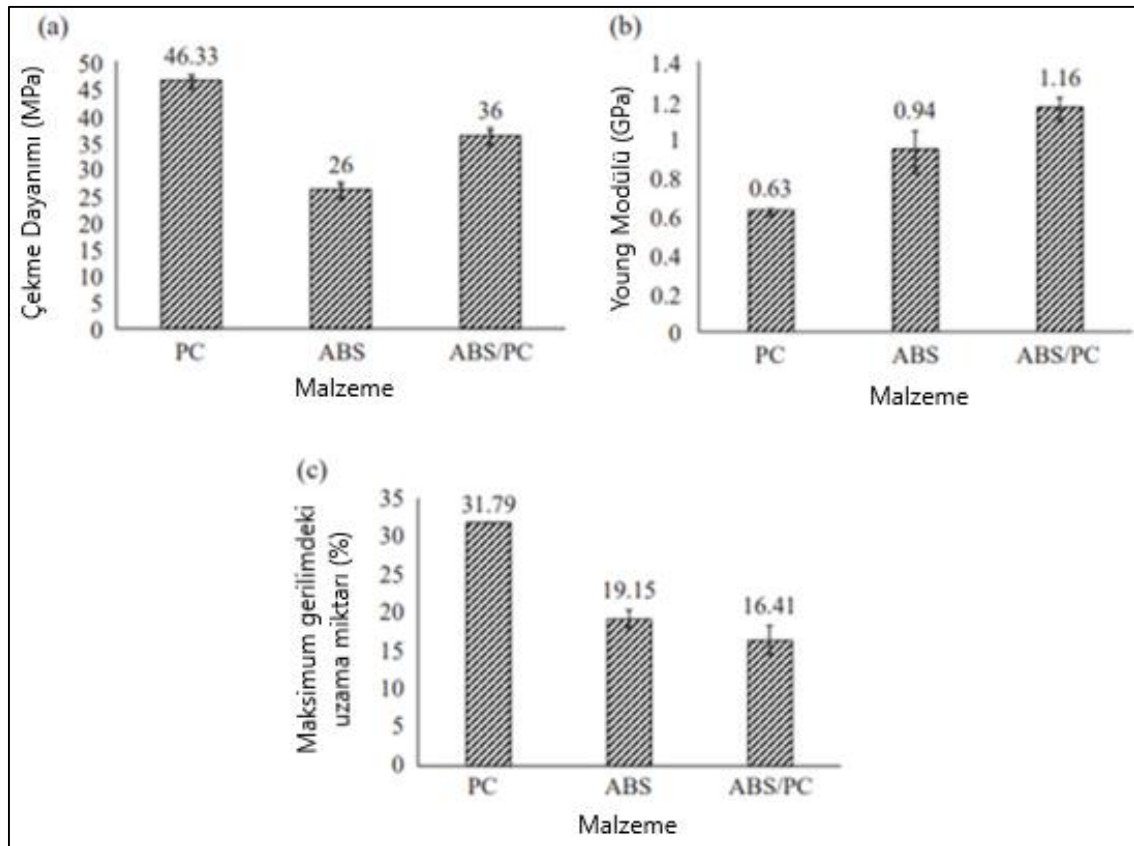
Mishra ve Senthil [25] yaptıkları çalışmada, FDM tekniğini uygulayarak farklı tarama yönelimine sahip iki malzemeli laminat parçaların üretimini yapıp mekanik davranışlarını test etmişlerdir. Hammadde olarak PLA (Polilaktik asit) ve PLA CB (Polilaktik asit karbon siyahı) seçmişlerdir. Deney numunelerinin üretimi için 2,85 mm çapında PLA ve PLA CB filamentleri kullanmışlardır. ASTM 3039-95A standardına göre, PLA+PLA CB laminatın boyutu 90 mm x 25 mm x 3.04 mm olup, laminatı sekiz katmandan oluşturmuşlardır. Çekme testi sonuçlarına göre saf PLA 42,3 MPa, PLA 0° 35,1 MPa, PLA 90° 23,5 MPa, saf PLA CB 34,2 MPa, PLA CB 0° 24,8 MPa ve PLA CB 90° 17,5 MPa değerlerini bulmuşlardır. Tüm laminat modelleri (0°, 45°, 90°) arasında, 0° modelinin daha iyi çekme özellikleri sergilediğini raporlamışlardır. 90° tarama açısına sahip modelin, çoklu malzeme laminat modelleri arasında en yüksek young modülüne (1823,91 Mpa) sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Aynı 90° konfigürasyonunun tüm çoklu malzeme modelleri arasında minimum çekme dayanımı (UTS) (19,94 MPa) ve kopma gerilmesi (%1,42) gösterdiğini ve 45° çoklu malzeme laminat modelinin, diğer modellere kıyasla kopma uzaması açısından daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Deney numunelerinin çekme testi sonuçları Çizelge 2.5’de verilmiştir [25].

Çizelge 2.5. Homojen ve çoklu laminat malzemelerin farklı örgü açılarındaki ortalama çekme dayanımı özellikleri [25]

Numune tipi	Young modülü (MPa)	Maksimum çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)
A1 modeli			
PLA 0°	2236,49 ± 45,09	41,47 ± 2,18	4,49 ± 0,35
PLA CB 0°	1560,42 ± 61,59	21,36 ± 1,45	3,56 ± 0,07
PLA/PLA CB Kompozit 0°	1625,99 ± 77,94	35,09 ± 4,56	4,12 ± 0,10
A2 modeli			
PLA 0°/90°	1959,47 ± 47,02	21,13 ± 5,28	1,49 ± 0,21
PLA CB 0°/90°	1680,19 ± 10,08	15,23 ± 0,26	1,34 ± 0,06
PLA/PLA CB Kompozit 0°/90°	1823,91 ± 66,54	19,93 ± 1,79	1,41 ± 0,06
A3 modeli			
PLA 45°/-45°	1883,60 ± 160,79	38,22 ± 1,79	4,89 ± 0,30
PLA CB 45°/-45°	1626,99 ± 78,67	21,43 ± 1,74	3,69 ± 0,27
PLA/PLA CB Kompozit 45°/-45°	1419,40 ± 81,54	29,08 ± 0,96	4,51 ± 0,43

Yap ve arkadaşları [26] gerçekleştirdikleri çalışmada, değişen baskı hızı, dolgu yoğunluğu

ve nozul çapının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çok malzemeli numuneleri, ana malzeme olarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve takviye malzeme olarak polikarbonat (PC) ile üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, baskı parametrelerinin optimum kombinasyonunun 60 mm/s baskı hızı, %15 dolgu yoğunluğu ve 0,8 mm nozul çapı olduğunu belirtmişlerdir. ABS ve PC malzemelerinin kombinasyonun, saf ABS'ye kıyasla sünekliği %14,31 azaltırken çekme mukavemetini %38,46, arttırdığını gözlemlemişlerdir. Numunelere ait çekme testi verileri Şekil 2.8'de gösterilmiştir [26].



Şekil 2.8. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin a) çekme dayanımı, b) young modülü ve c) maksimum gerilimdeki uzama miktarı [26]

2.1. Yapılan Çalışmaların Değerlendirmesi

Literatür incelendiğinde polimer malzemelerle eklemeli imalat üretiminin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Bunun başlıca sebeplerinden birisi kısa üretim sürelerinde karmaşık geometrili yapıların üretilebiliyor olmasıdır. Eklemeli imalat yöntemlerinden en sık kullanılanı eriyik biriktirme yöntemidir. Bu yöntemde polimer

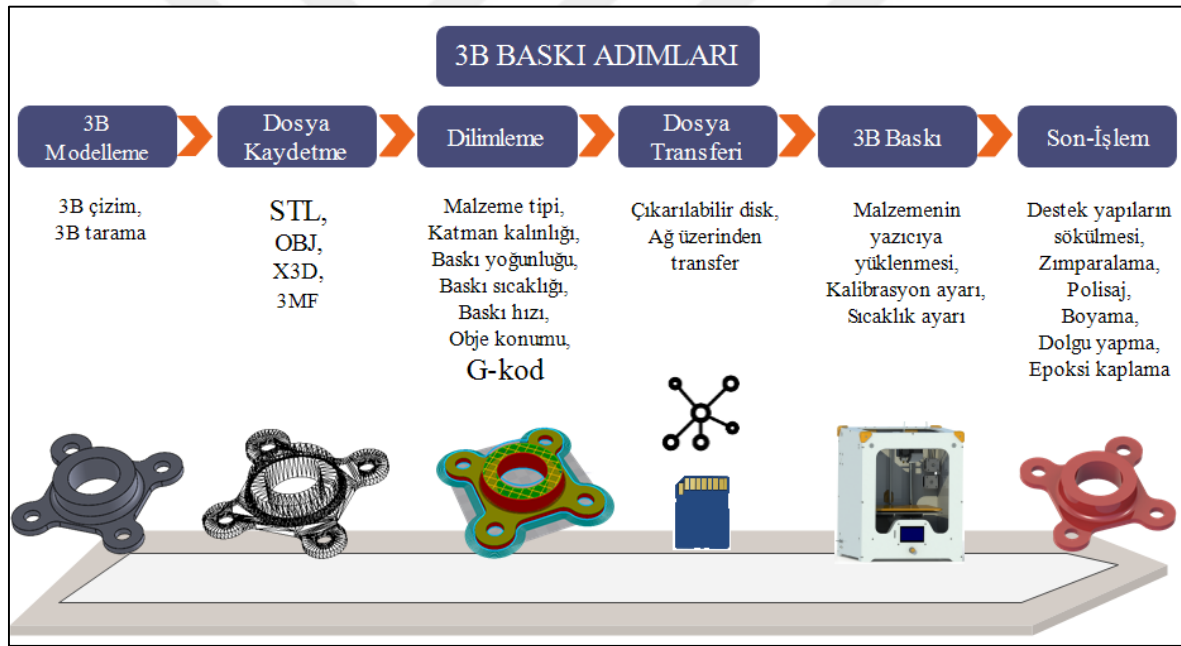
malzeme ergime noktasının biraz üzerinde bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Bir nozül aracılığıyla yapı plakasının üzerine katman katman inşa edilir. Oluşturulan bu yapıların mekanik performansları polimer malzemelerin özelliklerinden dolayı düşük çıkmaktadır. Bu mekanik dayanımları arttırmak için iki farklı polimeri bir araya getirerek sandviç yapılar oluşturulmaktadır. Literatür incelemesinde, bu sandviç yapıların kendilerini oluşturan homojen polimerlerden daha iyi mekanik performans sunabildikleri görülmüştür. Ancak yapılan çalışmaların çoğunda sandviç yapıların iki dış katman arasına bir çekirdek polimer konularak tasarlandığı gözlenmiştir. Bu tez çalışmasında, literatürden farklı olarak, sandviç yapının katman sayısı artırılarak, ardışık olarak sıralanan PLA ve TPU polimerlerinden oluşan bir tasarım yapılmıştır.



3. EKLEMELİ İMALAT VE POLİMER MALZEMELER

3.1. Eklemeli İmalatın Tanımı ve Önemi

Eklemeli imalat, bilgisayar destekli tasarımların (CAD) doğrudan üç boyutlu (3B) fiziksel nesnelere dönüştürülmesi sürecidir. Bu teknoloji, nesnelerin katman katman oluşturulması prensibine dayanır ve geleneksel imalat yöntemlerinden farklı olarak malzemeyi aşındırarak değil, ekleyerek üretim yapar. Bu yöntem, daha az malzeme israfı, düşük üretim maliyeti ve karmaşık geometrilerin üretilebilmesi gibi avantajlar sunar [4]. Eklemeli imalat, ayrıca tasarım özgürlüğü ve hızlı prototipleme imkânı sağlaması nedeniyle ürün geliştirme süreçlerini hızlandırır ve yenilikçiliği teşvik eder [27].



Şekil 3.1. 3B baskı adımları [28]

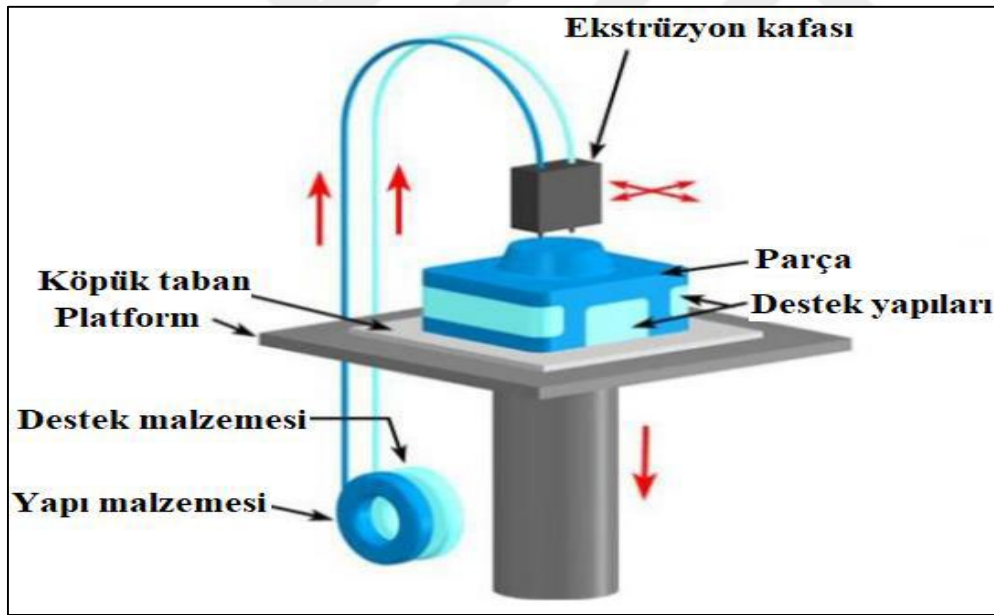
3.2. Polimerlerin Eklemeli İmalatta Kullanımı

Polimerler, eklemeli imalatla yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Termoplastikler ve termosetler, bu alanda en çok tercih edilen polimer türleridir. Termoplastikler, ısıtılarak eriyip yeniden şekillendirilebilmeleri nedeniyle eklemeli imalat için idealdir. Bu özellikleri, termoplastiklerin yeniden kullanılabilirliğini ve işlemler sırasında enerji verimliliğini artırır. Polimer bazlı eklemeli imalat yöntemleri arasında Eriyik Biriktirme

Yöntemi (FDM), Stereolitografi (SLA) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS) öne çıkmaktadır [29].

3.3. FDM Yöntemi ve Polimerler

FDM, polimer filamentlerin ısıtılarak katman katman birleştirilmesiyle nesnelerin üretildiği bir tekniktir. Bu yöntemde genellikle ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) ve PLA (Polilaktik Asit) gibi termoplastik polimerler kullanılır. ABS, yüksek mukavemeti ve ısı direnci nedeniyle mühendislik uygulamalarında tercih edilirken, PLA biyobozunur olması ve düşük erime sıcaklığı ile çevre dostu bir seçenektir [30]. FDM yöntemi, düşük maliyetli olması ve kullanıcı dostu yapısı nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, FDM ile üretilen parçaların mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi, geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen parçalara göre daha düşüktür [31].

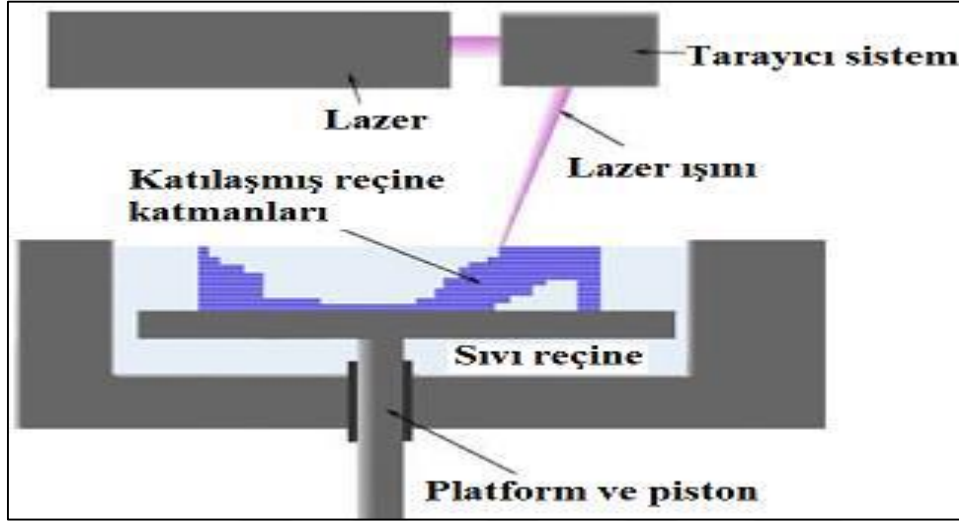


Şekil 3.2. FDM yöntemi çalışma prensibi [28]

3.4. SLA Yöntemi ve Polimerler

SLA, bir polimer reçinesinin lazer ile sertleştirilmesi yoluyla nesnelerin üretildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan fotopolimer reçineler, yüksek çözünürlüklü ve detaylı parçaların üretilmesine olanak tanır. SLA ile üretilen parçalar, genellikle daha yüksek yüzey kalitesine sahip olup, mühendislik ve tıp gibi alanlarda

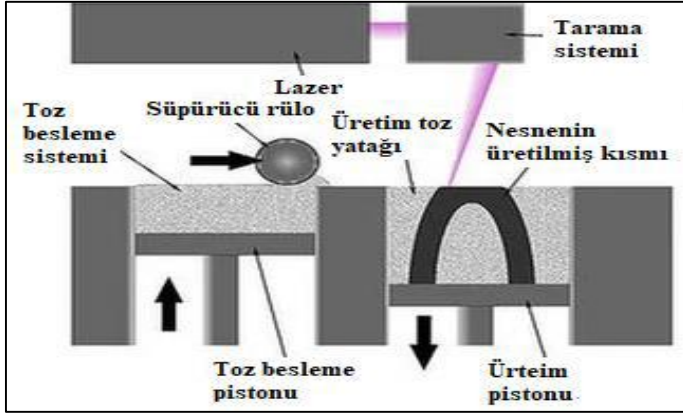
kullanılmaktadır [32]. Fotopolimerlerin, lazerle kürlenme süreci, SLA yöntemini karmaşık ve hassas tasarımlar için ideal kılar. Ayrıca, biyomedikal uygulamalarda, kişiye özel protezler ve diş hekimliği modelleri üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [33].



Şekil 3.3. SLA yöntemi çalışma prensibi [28]

3.5. SLS Yöntemi ve Polimerler

SLS, toz halindeki polimerlerin lazer ile sinterlenmesi suretiyle nesnelerin üretildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde kullanılan polimerler arasında naylon ve poliamid bulunmaktadır. SLS, yüksek mukavemetli ve dayanıklı parçaların üretimine olanak sağlar ve otomotiv ile havacılık gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılır [34]. SLS yöntemi, karmaşık geometrik yapıların ve fonksiyonel parçaların üretiminde önemli avantajlar sunar. Bu yöntemde, malzemenin toz formunda olması, dolgu malzemelerinin ve katkı maddelerinin kolayca karıştırılabilmesini sağlar, bu da malzemenin özelliklerini iyileştirme açısından büyük bir esneklik sunar [35].



Şekil 3.4. SLS yöntemi çalışma prensibi [28]

3.6. Polimerlerin Özelliklerinin İyileştirilmesi

Eklemeli imalat süreçlerinde kullanılan polimerlerin mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Dolgu malzemeleri ve katkı maddeleri kullanılarak polimerlerin mukavemeti ve dayanıklılığı artırılabilir. Örneğin, karbon fiber veya cam fiber gibi dolgu malzemeleri ile güçlendirilmiş polimerler, daha yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [36]. Bu tür kompozit polimerler, mekanik dayanıklılığı artırırken, aynı zamanda ağırlığı azaltarak enerji verimliliğini artırır [37].

3.7. Uygulama Alanları

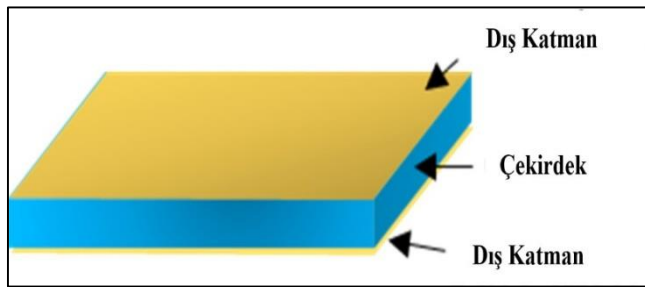
Eklemeli imalat ve polimerler, otomotiv, havacılık, tıp, inşaat ve tüketici ürünleri gibi çeşitli endüstrilerde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Tıp alanında, kişiye özel protezler ve implantlar üretmek için kullanılmaktadır. Hastaya özel ortopedik implantlar, eklemeli imalat ile doğrudan üretilmektedir [5]. Otomotiv endüstrisinde, hafif ve dayanıklı parçaların üretimi için tercih edilmektedir. Örneğin, otomobil motor parçaları, iç mekân bileşenleri ve havalandırma sistemleri gibi çeşitli bileşenler, eklemeli imalat teknolojileri ile üretilmektedir. Havacılık endüstrisinde ise, karmaşık ve hafif yapılar üretmek için eklemeli imalat teknolojilerinden faydalanılmaktadır. Uçak motor parçaları ve iç mekân bileşenleri gibi kritik parçaların üretiminde, eklemeli imalatın sağladığı tasarım özgürlüğü ve malzeme verimliliği büyük avantajlar sunar [38].

4. LAMİNAT YAPILAR

Laminat yapılar, farklı malzeme katmanlarının belirli bir düzen içerisinde bir araya getirilerek oluşturulan kompozit malzemelerdir. Bu yapılar, mekanik mukavemet, hafiflik ve dayanıklılık gibi üstün özellikler sunarak çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Laminat yapılar, genellikle matris malzemesi ve takviye malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Bu iki bileşen, birlikte çalışarak malzemenin performansını optimize eder [39]. Laminat yapılar, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, tasarım esnekliği ve yüksek dayanıklılık gibi avantajlar sunar. Bu özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv, denizcilik, inşaat ve spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, uçak kanatları, araba kaportaları, gemi gövdeleri ve spor malzemeleri gibi ürünler, laminat yapıların sağladığı avantajlardan faydalanmaktadır [40].

4.1. Polimer Laminat Yapılar

Polimer laminat yapılar, matris malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı laminat kompozitlerdir. Polimer matris kompozitler (PMC), yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve iyi yorulma direnci gibi avantajlar sunar. Bu yapılar, genellikle termoplastik veya termoset polimerler ile güçlendirilmiş fiberlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulur [41]. Şekil 4.1 de laminat yapı örneği görülmektedir.



Şekil 4.1. Laminat yapı örneği [42]

Termoset polimerler, bir kez sertleştikten sonra yeniden şekillendirilemeyen polimerlerdir. Yaygın termoset polimerler arasında epoksi, polyester ve vinil ester bulunur. Bu polimerler, yüksek mekanik mukavemet ve kimyasal direnç sunar, bu da onları zorlu çevresel koşullar ve yüksek performans gerektiren uygulamalar için ideal kılar [40]. Epoksi reçineleri, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır, çünkü

yüksek mukavemet ve düşük ağırlık sağlar. Termoplastik polimerler, ısıtıldığında eriyip soğutulduğunda katılaşıp ve bu süreçte defalarca yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Yaygın termoplastik polimerler arasında polilaktik asit (PLA), poliamid (PA), termoplastik poliüretan (TPU), akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve polikarbonat (PC) bulunur. Termoplastikler, kolay işlenebilirlik, hızlı üretim süreçleri ve geri dönüştürülebilirlik gibi avantajlar sunar [43 - 45]. Polilaktik asit, biyobozunur ve biyoplastik bir polimerdir. Mısır nişastası veya şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilir. PLA, düşük erime noktası ve kolay işlenebilirlik özelliklerine sahiptir, bu da onu 3D baskı, ambalaj malzemeleri ve tek kullanımlık ürünler gibi çeşitli uygulamalar için uygun hale getirir [46]. Biyobozunur olması, PLA'yı çevre dostu bir seçenek yapar, ancak ısı ve nem dayanıklılığı gibi özelliklerde bazı sınırlamaları vardır [47]. Poliamid, yüksek mukavemet, sertlik ve ısı direnci ile bilinir. Bu özellikler, PA'yı otomotiv, elektronik ve tekstil endüstrilerinde popüler bir malzeme yapar. Otomotiv sektöründe, PA motor bileşenleri ve yakıt sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. PA'nın yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara karşı dayanıklılığı, onu zorlu çalışma koşullarında bile güvenilir kılar [48]. TPU, esneklik, aşınma direnci ve düşük sıcaklıklarda performans gibi özellikler sunan bir termoplastik elastomerdir. TPU, esnek borular, kablolar, ayakkabı tabanları ve medikal cihazlar gibi uygulamalarda kullanılır. TPU'nun esnekliği ve dayanıklılığı, onu özellikle esneklik ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda ideal bir malzeme haline getirir [49]. ABS, iyi darbe dayanımı, sertlik ve yüzey kalitesi sunan bir termoplastik polimerdir. Elektronik cihaz muhafazaları, otomotiv iç parçaları, oyuncak lego blokları ve boru sistemleri gibi birçok uygulamada kullanılır [50]. ABS'nin işlenmesi kolaydır ve enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termoform gibi çeşitli üretim teknikleri ile işlenebilir [44]. Polikarbonat, yüksek darbe dayanımı ve optik şeffaflık sunar. Elektronik muhafazalar, otomotiv bileşenleri ve inşaat sektöründe cam yerine kullanılır. PC'nin optik berraklığı ve darbe dayanımı, onu koruyucu kalkanlar, güvenlik camları ve aydınlatma kapakları gibi uygulamalarda ideal hale getirir. Ayrıca, PC'nin yüksek sıcaklık dayanımı, onu elektrikli ve elektronik uygulamalarda da popüler bir seçenek yapar [51]. Polimer laminat yapılar, mükemmel mekanik özellikleri ve hafiflik avantajları nedeniyle çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Havacılık endüstrisinde, uçak kanatları, gövdeleri ve iç mekân bileşenleri gibi kritik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. Otomotiv endüstrisinde ise, yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için hafif ve dayanıklı parçalar üretmek amacıyla kullanılır. Ayrıca, spor ekipmanları, rüzgâr türbinleri ve deniz araçları gibi birçok farklı alanda da yaygın olarak kullanılmaktadır [52-53].

5. MATERİYAL VE YÖNTEM

5.1. Deney Malzemeleri ve Deney Parametreleri

Bu çalışmada dış kısımları sert iç kısmı ise yumuşak bir numune üretilmek istenmiştir. Dış kısımların sert olmasıyla darbelere karşı mukavemet göstermesi, yumuşak iç kısmın ise darbeyi sönümlemesi amaçlanmıştır. Bu sebeple çalışmamızda kullanılmak üzere PLA ve TPU polimerleri seçilmiştir. Numuneler Ender3 S1 markalı cihazda üretilmiştir. Üretim sırasındaki parametreler; baskı hızı 60 mm/s, tabla sıcaklığı 75°C, katman yüksekliği 0,1mm, dolgu yoğunluğu %100 ve örgü açısı çizgisel +45°/-45° olarak ayarlanmıştır. Nozul çapı 0,4 mm'dir. Çekme testi ve eğilme testi numuneleri 0,2 mm, 0,6 mm ve 1 mm katman kalınlığı olacak şekilde tasarlanmıştır ve toplam kalınlıkları 3 mm'dir. Darbe testi numuneleri ise 0,6 mm, 1,8 mm ve 3 mm katman kalınlığı olacak şekilde tasarlanmıştır ve toplam kalınlıkları 9 mm'dir. Çekme testi numuneleri ASTM-D638 Tip 4 standartları dikkate alınarak üretilmiştir. Eğilme testi numuneleri ASTM-D790 standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Darbe testi numuneleri ASTM-D6110-18 standartlarına uygun şekilde üretilmiştir. Sandviç yapıların tümünde PLA, yapının en alt ve en üst katmanlarını oluşturmaktadır. Bu durumda, sandviç yapıların elastik deformasyon sırasında bir miktar sertlik sergilemesini sağlamak amaçlanmıştır. Tez kapsamında her bir test için yapılan deneysel çalışma Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de Üretim parametreleri, Çizelge 5.3'de PLA ve TPU Malzemelerin Mekanik Özellikleri ve Çizelge 5.4'de 3B baskı makinesinin özellikleri belirtilmiştir. Her test numunesi üç tekrarlı olarak üretilmiştir.

Çizelge 5.1. Deney parametreleri ve deney düzeni

Deney numarası	Sandviç yapı katman kalınlığı (mm)	PLA sandviç yapı Katman sayısı	TPU sandviç yapı katman sayısı	Toplam sandviç yapı katman sayısı	Yapıdaki PLA –TPU oranları (%)
1	0,2	8	7	15	53,3 – 46,6
2	0,6	3	2	5	60 - 40
3	1,0	2	1	3	66,6 – 33,3
4	0,6	8	7	15	53,3 – 46,6
5	1,8	3	2	5	60 - 40
6	3	2	1	3	66,6 – 33,3
7	3 (%100 PLA)	-	-	-	100 - 0
8	3 (%100 TPU)	-	-	-	0 - 100
9	9 (%100 PLA)	-	-	-	100 - 0
10	9 (%100 TPU)	-	-	-	0 - 100

Çizelge 5.2. Üretim parametreleri

Numara	Baskı parametreleri	Değerler
1	Yatak sıcaklığı	PLA: 75°C TPU: 75°C
2	Nozül sıcaklığı	PLA: 205°C TPU: 235°C
3	Dolgu yoğunluğu	%100
4	Örgü açısı	Çizgisel 45°/-45°
5	Baskı hızı	60 mm/s
6	Baskı yüksekliği	0,1 mm
7	Nozül çapı	0,4 mm

Çizelge 5.3. PLA ve TPU malzemelerinin mekanik özellikleri (Flamix, Sava)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Esneklik modülü (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
PLA	1.24	3500	60	4
TPU	1.22	25,6	9,6	810

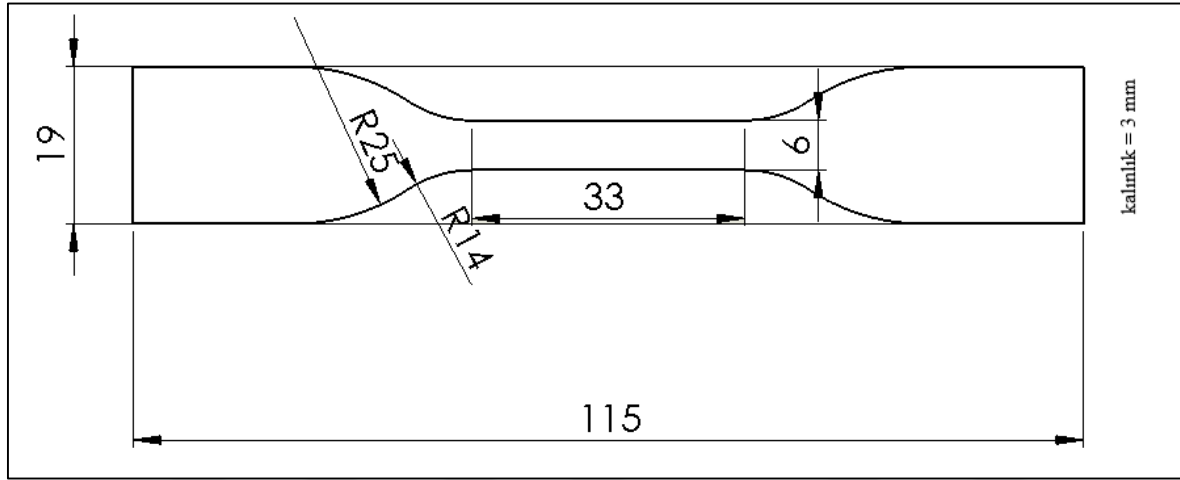
Çizelge 5.4. 3B baskı makinesinin özellikleri

Modelleme teknolojisi	Eriyik biriktirme modellemesi
Desteklenen filamentler	PLA, TPU, PETG, ABS
Baskı katman kalınlığı	0,05 mm – 0,4 mm
Maksimum baskı hızı	150 mm/sn
Baskı hassasiyeti	±0,1 mm
Nozül çapı	0,4 mm
Nozül sayısı	1
Maksimum nozül sıcaklığı	260°C
Maksimum tabla sıcaklığı	100°C
Filament çapı	1,75 mm
Yazıcı boyutu	487x453x622 mm
Baskı ebatı	220x220x270 mm

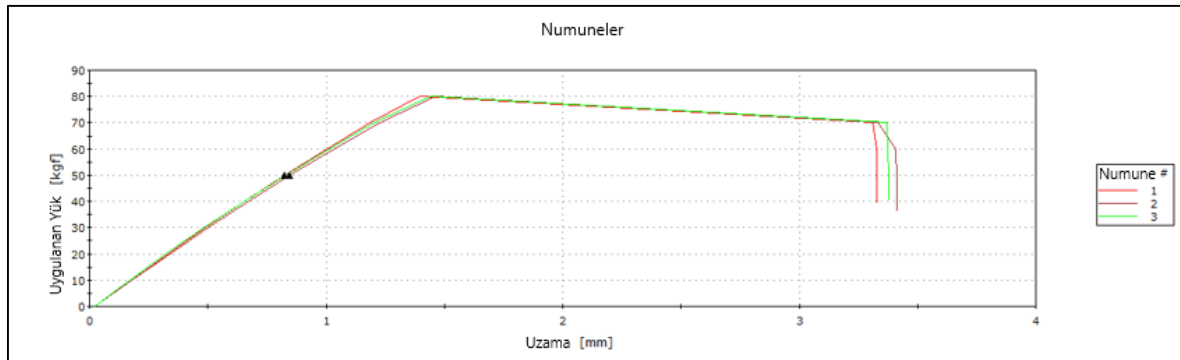
5.2. Test Cihazları

Çekme testi numuneleri ASTM-D638 Tip 4 standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Çekme testleri Instron 5969 markalı cihazda gerçekleştirilmiştir. Cihazın maksimum çekme kuvveti kapasitesi 50 kN'dur. Toplamda 15 adet çekme numunesi hazırlanmıştır.

Her bir grup için 3er adet çekme numunesi üretilmiştir. Tüm numunelerin toplam kalınlıkları 3mm'dir ve numunelerin dış kısımları PLA olacak şekilde tasarlanmıştır. Sandviç numuneler içindeki polimerlerin kalınlıkları ise değişkendir. İlk grup için her bir polimerin kalınlığı 0,2 mm, ikinci grup için 0,6 mm, üçüncü grup için ise 1 mm'dir. Çekme testi sırasında gerinim hızı 5mm/dak olarak ayarlanmıştır. Aşağıda çekme testine ait grafik verilmiştir (Şekil 5.2). Teste dair değerlendirmeler bu grafikler üzerinden yapılmıştır.



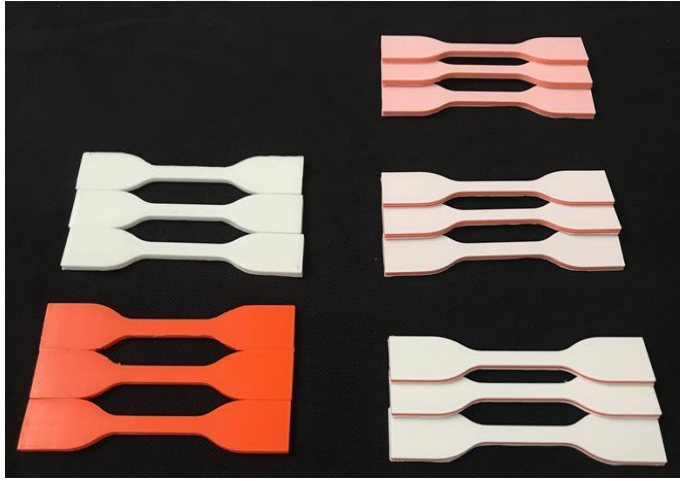
Şekil 5.1. Çekme testi numunesinin teknik resmi



Şekil 5.2. 0,6 mm katman kalınlığına sahip sandviç yapı numunelerinin çekme testi grafiği



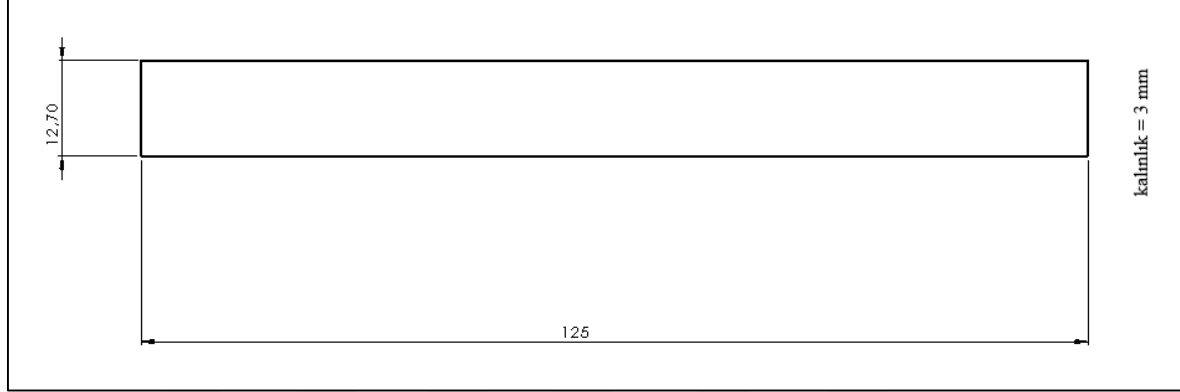
Şekil 5.3. Çekme testi cihazı



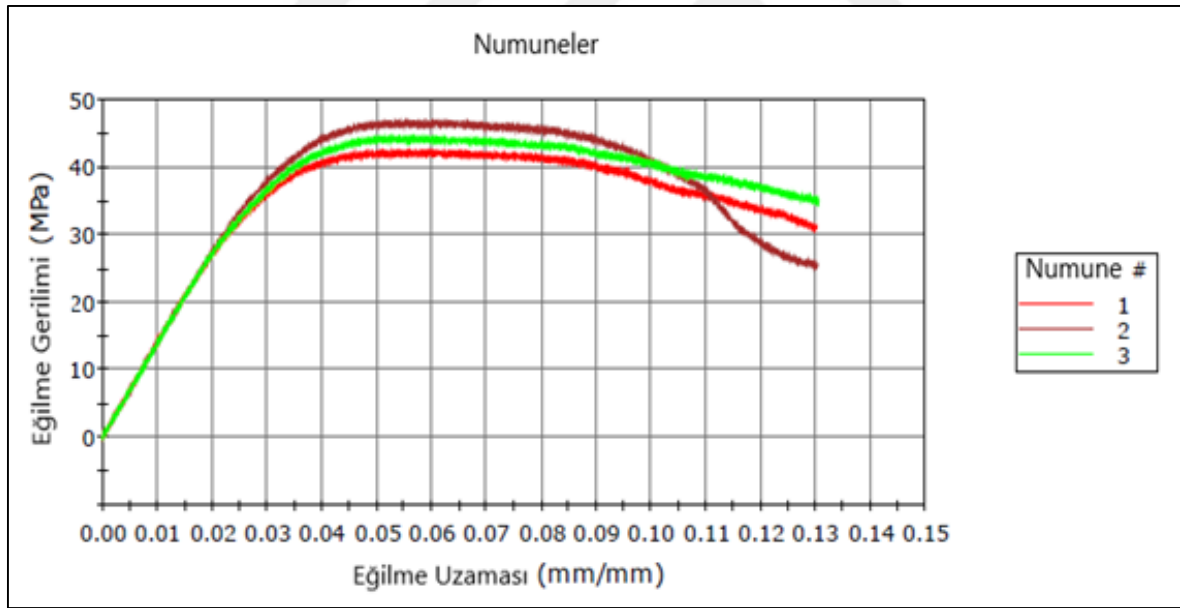
Şekil 5.4. Çekme testi için hazırlanan deney numuneleri

Eğilme testi numuneleri ASTM-D790 standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Eğilme testleri Instron 3369 markalı cihazda gerçekleştirilmiştir. Cihazın kapasitesi 50 kN'dur. Toplamda 15 adet eğilme testi numunesi hazırlanmıştır. Her bir grup için 3'er adet eğilme testi numunesi üretilmiştir. 3 tane sandviç numune grubu vardır. 2 tane saf TPU ve PLA grubu bulunmaktadır. Bu numunelerin toplam kalınlıkları 3 mm'dir. Sandviç numunelerindeki polimerlerin kalınlıkları ise değişkendir. İlk grup için her bir polimerin kalınlığı

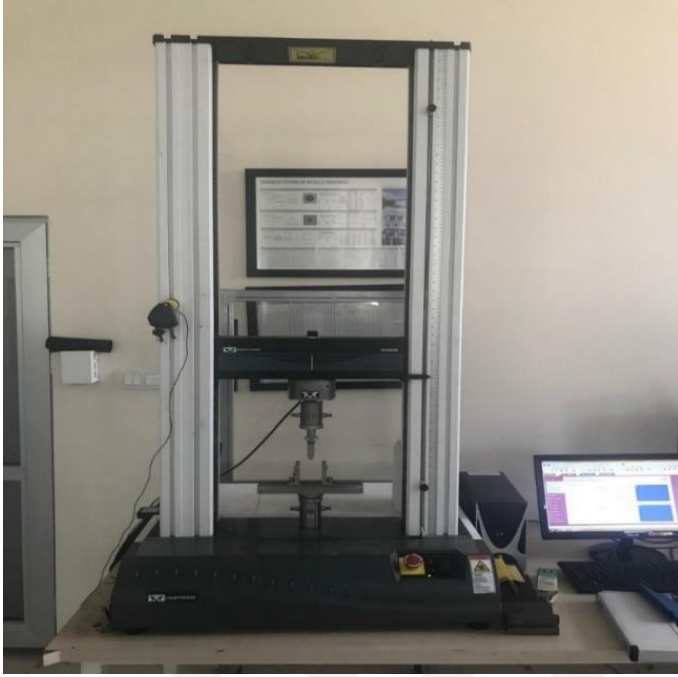
0,2 mm, ikinci grup için 0,6 mm, üçüncü grup için ise 1mm'dir. Eğilme testinde mesnetler arası mesafe 50 mm, eğme hızı ise 2mm/dak olarak ayarlanmıştır. Aşağıda 3 nokta eğme testine ait grafik verilmiştir (Şekil 5.6). Teste dair değerlendirmeler bu grafikler üzerinden yapılacaktır.



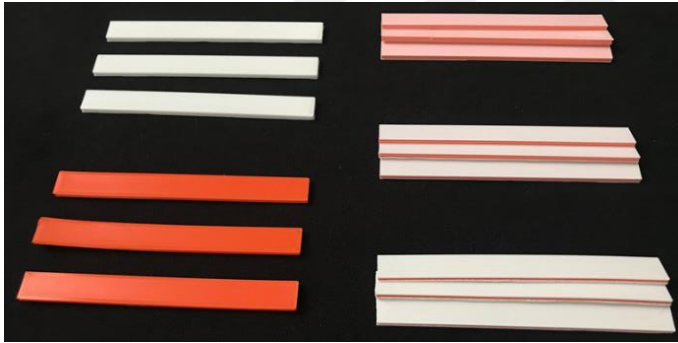
Şekil 5.5. Üç nokta eğme testi numunesinin teknik resmi



Şekil 5.6. 0,2 mm katman kalınlığına sahip sandviç yapı numunelerinin eğilme testi grafiği

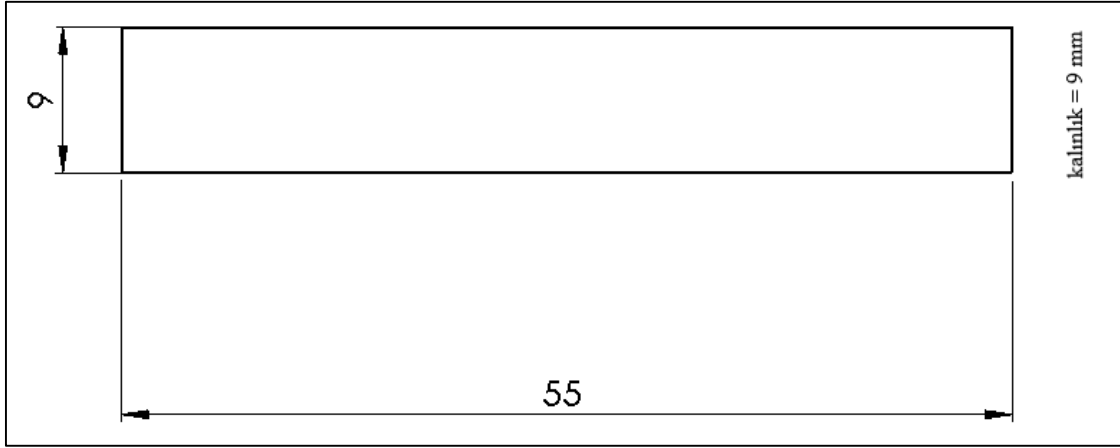


Şekil 5.7. Eğilme testi cihazı



Şekil 5.8. Eğilme testi için hazırlanan deney numuneleri

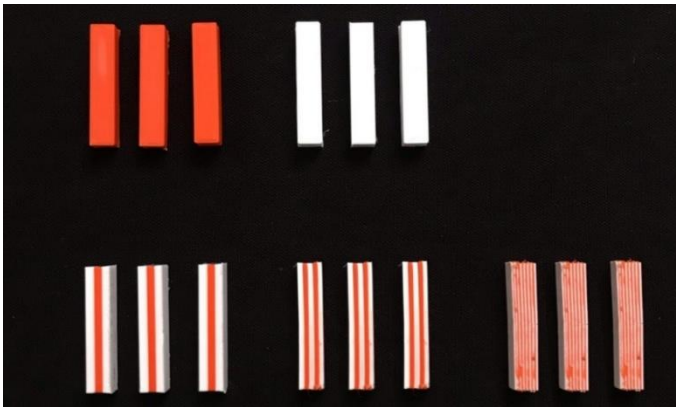
Darbe testi numuneleri ASTM-D6110-18 standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Darbe testleri Alarge markalı cihazda gerçekleştirilmiştir. Cihazın potansiyel enerjisi 5,5 J'dur. Toplamda 15 adet darbe testi numunesi hazırlanmıştır. Her bir grup için 3'er adet darbe testi numunesi üretilmiştir. 3 tane sandviç numune grubu vardır. 2 tane saf TPU ve PLA grubu bulunmaktadır. Bu numunelerin toplam kalınlıkları 9 mm'dir. Sandviç numuneler içindeki polimerlerin kalınlıkları ise değişkendir. İlk grup için her bir polimerin kalınlığı 0,6 mm, ikinci grup için 1,8 mm, üçüncü grup için ise 3 mm'dir. Darbe testinde 5,5 J çekiç kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Darbe testi numunesinin teknik resmi



Şekil 5.10. Darbe testi cihazı



Şekil 5.11. Darbe testi için hazırlanan deney numuneleri



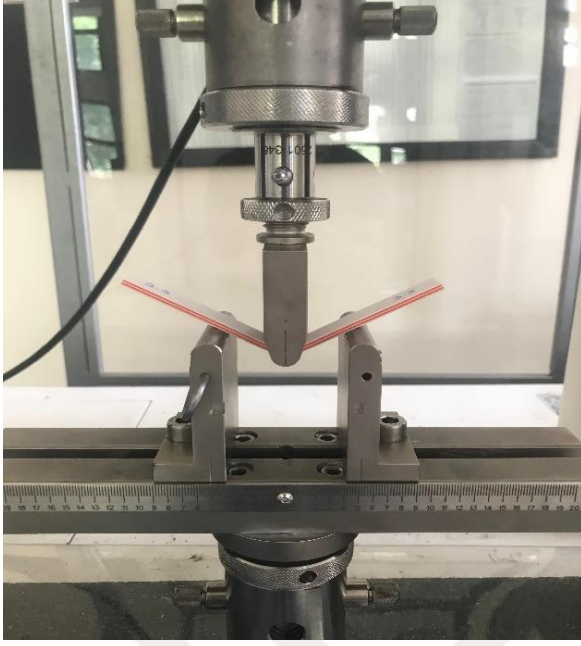
6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Eğilme Testi Sonuçları

Bu çalışmada, PLA ve TPU malzemelerinden oluşan sandviç yapıların mekanik mukavemet özellikleri, üç nokta eğme testi kullanılarak incelenmiştir. Test edilen numuneler, farklı PLA ve TPU oranlarına ve katman kalınlıklarına sahip olup, bu parametrelerin eğme mukavemetine etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu sandviç yapılar saf PLA malzemesi ile karşılaştırılmıştır. Tüm numuneler, aynı toplam kalınlık (3 mm) ve aynı malzeme kombinasyonuna (PLA ve TPU) sahip olmakla birlikte, katman kalınlıkları ve dolayısıyla katman sayıları değişkenlik göstermektedir. İlk numune, her biri 0,2 mm kalınlığında toplam 15 katmandan oluşan bir sandviç yapıdadır. İkinci numune, 0,6 mm kalınlığında 5 katmandan oluşmaktadır. Üçüncü numune ise 1 mm kalınlığında 3 katmandan oluşmaktadır. Dördüncü numune 3mm kalınlığında saf PLA malzemesinden meydana gelmektedir. Beşinci numune 3 mm kalınlığında saf TPU malzemesinden oluşmaktadır fakat bu numune esnek olmasından ötürü üç nokta eğme testinde başarısız olmuş test cihazında hiçbir değer okunamamıştır. Test sırasında sandviç yapıların hiçbirisi kırılmamıştır. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 0,2 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi

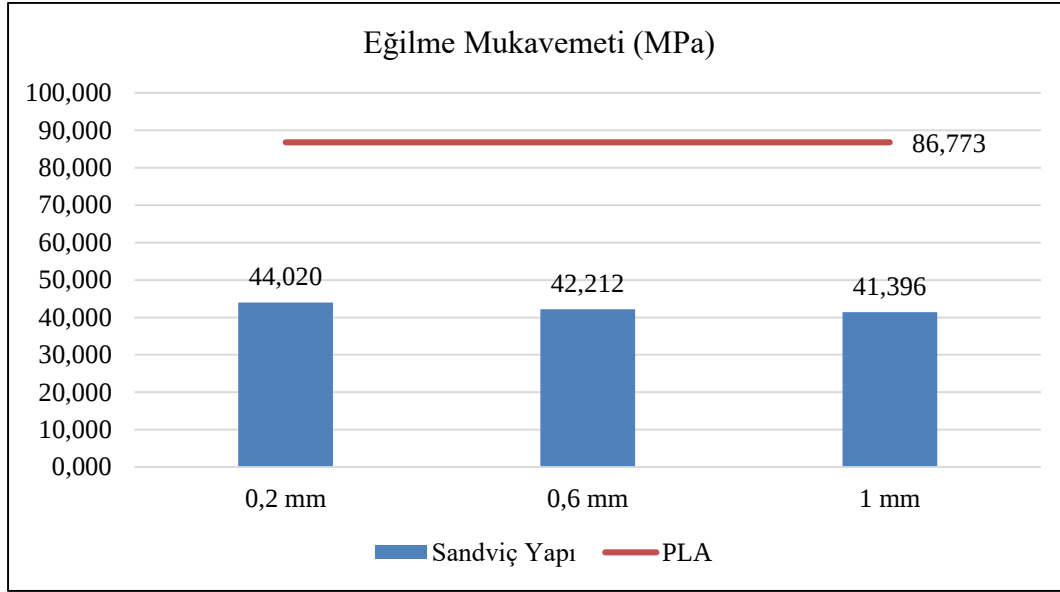


Şekil 6.2. 0,6 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi

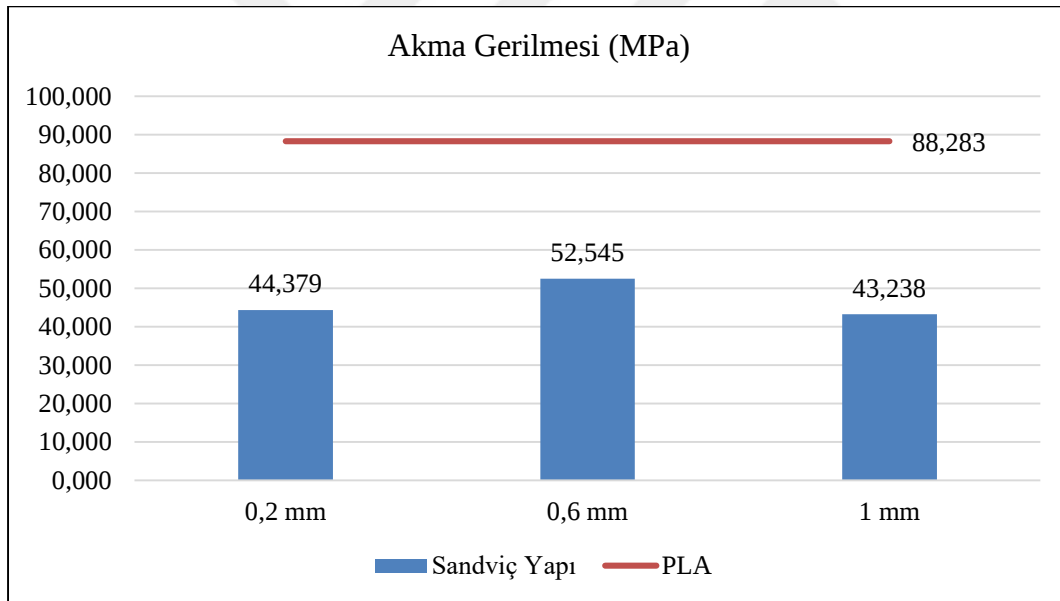


Şekil 6.3. 1 mm katman kalınlığındaki numunenin üç nokta eğme testi

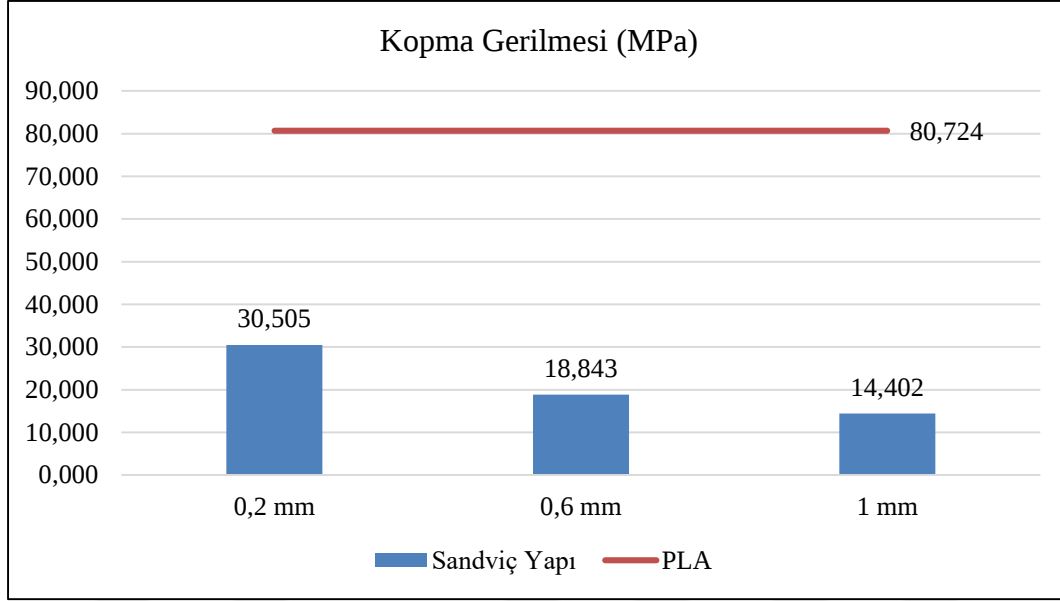
Bu durumun, içinde TPU polimerini barındıran sandviç yapıların elastik deformasyon yeteneğine sahip olduğunu ve enerji soğurma kapasitesinin saf PLA'ya göre daha yüksek olabileceğini göstermektedir. Şekil 6.4, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da eğilme mukavemeti, akma gerilmesi ve kopma gerilmesi sonuçları grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.4. Deney numunelerinin eğilme mukavemeti değerleri



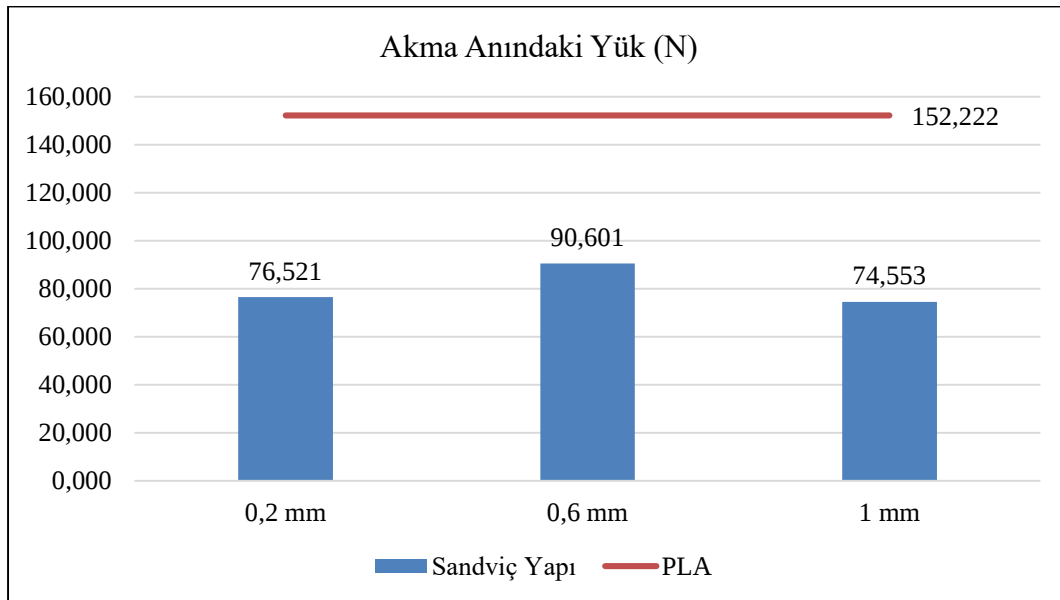
Şekil 6.5. Deney numunelerinin akma gerilmesi değerleri



Şekil 6.6. Deney numunelerinin kopma gerilmesi değerleri

Grafikler incelendiğinde, en yüksek eğme mukavemeti 86,773 MPa ile saf PLA numunesine aittir. Saf PLA numunesi, 86,773 MPa eğme mukavemeti, 88,283 MPa akma gerilmesi ve 80,724 MPa kopma gerilmesi ile en yüksek mekanik performansı göstermiştir. Bu sonuç, PLA'nın sert ve dayanıklı bir malzeme olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, bu yüksek dayanıklılık, malzemenin kırılganlığını da beraberinde getirmekte ve yük altındayken kırılmaya yatkın hale gelmektedir. Buna karşılık, sandviç yapılar esnekliği artıran TPU katmanları içerdiğinden, yük altında kırılmamışlar ve esneklikleri sayesinde darbeye karşı daha dayanıklı olmuşlardır. PLA, yüksek rijitliğe ve kırılma direncine sahip bir termoplastik olduğundan, saf PLA yapının diğer sandviç yapılarla kıyaslandığında daha yüksek eğme mukavemeti sergilemesi beklenen bir sonuçtur [15]. Ancak saf PLA yapının dezavantajı, esneklik ve enerji sönümleme kapasitesinin TPU ile güçlendirilmiş sandviç yapılara kıyasla daha düşük olmasıdır. TPU, daha elastik bir malzeme olup darbeye ve deformasyona karşı daha dayanıklıdır. Bu nedenle, saf PLA yapı yüksek mukavemet sağlasa da, kırılma ya da hasar anında esneklik açısından yetersiz kalabilir. Sandviç yapıların karşılaştırılmasına geldiğimizde, PLA katmanlarının sağladığı sertlikle TPU katmanlarının esnekliğini birleştirerek dengeli bir performans sunmaktadır. İlk numune olan %53,3 PLA ve %46,6 TPU oranına sahip 15 katmanlı sandviç yapı, 44,02 MPa eğme mukavemeti, 44,379 Mpa akma gerilmesi ve 30,505 MPa kopma gerilmesi ile hem yeterli bir dayanım hem de esneklik göstermiştir. Bu numunede PLA ve TPU oranının dengeli olması, malzemenin hem sertlik hem de esneklik gerektiren uygulamalarda

kullanılabileceğini göstermektedir. Bu numunede katman kalınlıklarının daha ince olması ve katman sayısının fazla olması, malzeme dağılımında homojenliği artırarak eğme mukavemetini olumlu yönde etkilemiş olabilir. İkinci numunede %60 PLA ve %40 TPU oranına sahip 5 katmanlı yapı, eğme mukavemetinde düşüş gösterse de (42,212 MPa) daha yüksek akma gerilmesi (52,545 MPa) ile dikkat çekmektedir, bu da malzemenin akma noktasına kadar daha fazla yük taşıyabildiğini göstermektedir. Ancak kopma gerilmesi 18,843 MPa'ya düştüğünden, esneklik azalmış ve numune daha kırılgan hale gelmiştir. Benzer şekilde, 3 katmanlı numunede PLA oranı daha da artarak %66,6 PLA ve %33,3 TPU oranına ulaşmıştır, ancak kopma gerilmesi 14,402 MPa'ya kadar gerilemiştir. Bu, PLA oranı arttıkça malzemenin sertliğinin artmasına rağmen kırılganlığının da yükseldiğini ve esneklik kaybının yaşandığını göstermektedir. Sandviç yapılar, TPU'nun esnekliği ile PLA'nın sertliğini bir araya getirerek dengeli bir mukavemet ve esneklik sunmuşlardır. Bu kombinasyon, yapının belirli bir yük altında elastik deformasyon yapmasını ve enerji sönümlemesini sağlar. Akma noktasındaki eğilme yükü bir malzemenin eğilme testi sırasında, akma noktasına ulaştığı andaki yükü ifade eder. Bu nokta, malzemenin elastik limitini aştığı ve kalıcı deformasyonun başladığı noktadır. Şekil 6.7'de numunelerin akma noktasındaki eğilme yükü grafiği verilmiştir.



Şekil 6.7. Akma anındaki yük değerleri

0,2 mm katman kalınlığına sahip numune 76,521 N, 0,6 mm katman kalınlığına sahip numune 90,621 N, 1 mm katman kalınlığına sahip numune 74,553 N, saf PLA numunesi

ise 152,222 N'luk bir değere sahiptir. Tüm bu numuneleri karşılaştırdığımızda Saf PLA, diğer numunelere kıyasla en yüksek akma noktasındaki eğilme yükünü göstermiştir. Bu durum, PLA'nın homojen yapısının ve yüksek çekme dayanımının bir göstergesidir. 0,2 mm katman kalınlığına sahip yapıda daha ince katmanlar ve daha yüksek TPU oranı bulunmasına rağmen, akma noktasındaki eğilme yükü diğer numunelere göre daha düşüktür. Bu durum, TPU'nun elastik özelliklerinin daha ince katmanlar arasında etkin bir şekilde kullanılmadığını gösterebilir. 0,6 mm katman kalınlığına sahip yapıda ise katman kalınlığının artması ve PLA oranının yükselmesiyle, eğilme yükünde bir artışa neden olmuştur. Bu, PLA'nın yüksek mukavemet özelliklerinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. 1mm katman kalınlığına sahip numune en kalın katmanlara ve en yüksek PLA oranına sahip olmasına rağmen, bu numunenin akma noktasındaki eğilme yükü, diğer numunelerden daha düşüktür. Bu durum, kalın katmanların iç gerilimleri daha iyi dağıtabileceği, ancak belirli bir noktadan sonra daha kalın katmanların negatif etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, sandviç yapıların genel olarak saf PLA yapısına göre esneklik ve enerji sönümleme kapasitesi açısından avantajlı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, eğme mukavemeti açısından saf PLA yapısının üstün olduğu açıktır.

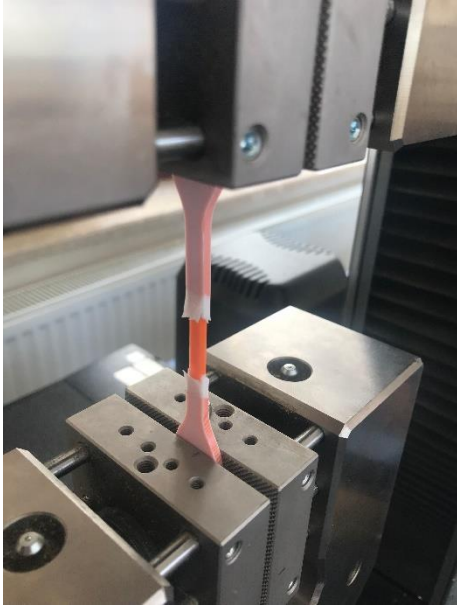
Sandviç yapılar, TPU'nun katkısı sayesinde mukavemetin yanı sıra esneklik ve darbe dayanımı sunmuşlardır. Test sırasında numunelerin kırılmaması bunu açıkça ortaya koymaktadır. PLA ve TPU oranlarının dengeli bir şekilde ayarlanması, bu iki malzemenin avantajlarını en iyi şekilde birleştiren bir yapı elde edilmesini sağlayabilir.

6.2. Çekme Testi Sonuçları

Bu çalışmada, PLA ve TPU malzemelerinden oluşan sandviç yapıların mekanik mukavemet özellikleri, çekme testine tâbi tutularak incelenmiştir. Test edilen numuneler, farklı PLA ve TPU oranlarına ve katman kalınlıklarına sahip olup, bu parametrelerin çekme mukavemetine etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu sandviç yapılar saf PLA malzemesi ile karşılaştırılmıştır. Çekme testi sırasında saf PLA malzemesi kırılmış fakat sandviç numuneler içerdiği TPU polimeri sebebiyle esnemiştir. Bu durum Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da gösterilmiştir.

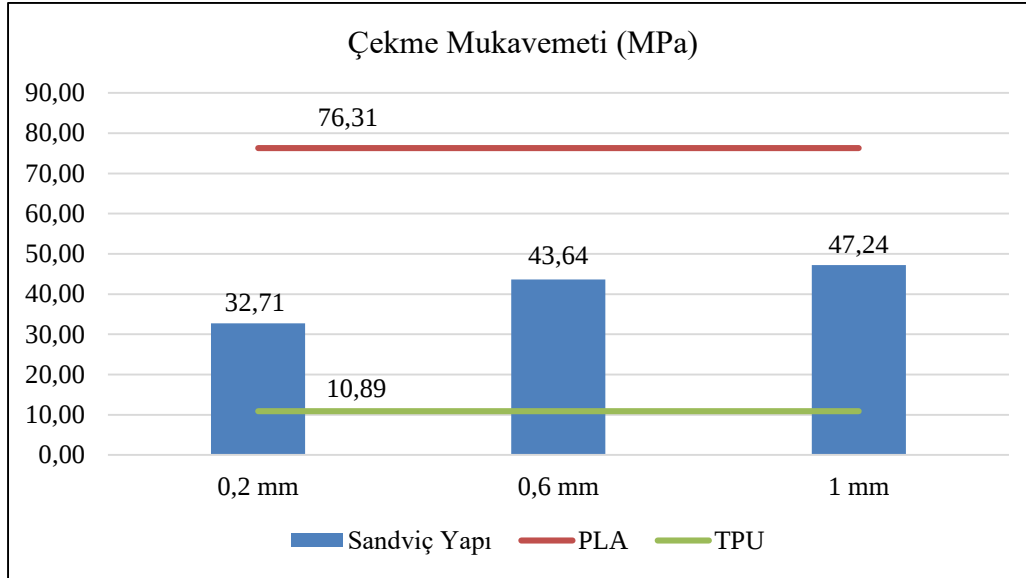


Şekil 6.8. Saf PLA numunesinin çekme testi sonrası görünümü



Şekil 6.9. 0,2 mm katman kalınlığındaki numunenin çekme testi sonrası görünümü

Şekil 6.10’da numunelerin çekme mukavemeti grafiği verilmiştir. Dört numuneyi (üç adet sandviç yapı ve saf PLA yapısı) mukavemet özellikleri açısından analiz ettiğimizde, sandviç yapılar ile saf PLA malzemesi arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir.

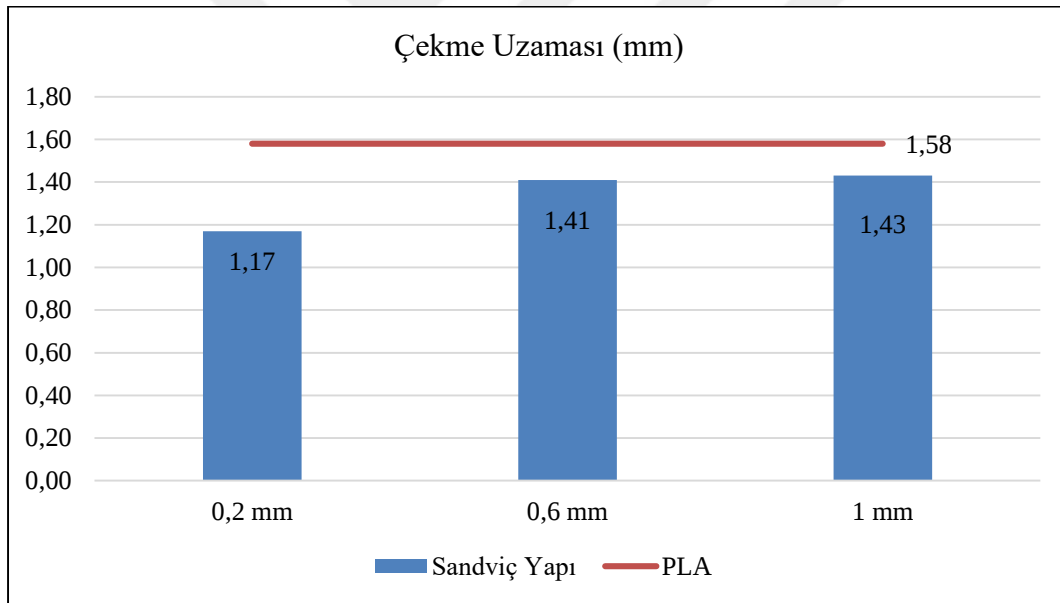


Şekil 6.10. Deney numunelerinin çekme mukavemeti değerleri

Şekil 6.10 incelendiğinde, saf TPU numunesinin çekme mukavemeti 10,89 MPa'dır. Saf PLA numunesinin çekme mukavemeti 76,31 MPa iken, en yüksek çekme mukavemetine sahip olan sandviç yapının 47,24 MPa ile 1 mm katman kalınlığına sahip olan numunede olduğu gözlenmiştir. Bu durum, saf PLA malzemesinin homojen yapısı sayesinde daha yüksek bir mukavemet sunduğunu göstermektedir. Saf PLA, kristalin yapısı ve rijitliği nedeniyle daha güçlü mekanik özellikler sergilerken, sandviç yapılarda TPU'nun elastik özellikleri nedeniyle daha düşük mukavemet gözlenmektedir [19]. TPU'nun daha yumuşak ve esnek bir polimer olması, yapının çekme mukavemetini düşüren bir faktördür [15].

Sandviç yapılar arasında ise katman kalınlıkları ve PLA/TPU oranlarına bağlı olarak önemli farklılıklar mevcuttur. İlk numunede her bir katman 0,2mm kalınlıkta 15 katmandan oluşmakta olup, %53,3 PLA ve %46,6 TPU içermektedir. Bu yapı, diğer sandviç yapılara kıyasla daha yüksek TPU oranına sahip olduğundan diğer sandviç yapılara göre daha düşük bir mukavemet (32,71 MPa) göstermiştir. Katman sayısının artması ve TPU oranının yüksek olması, yapıdaki elastikiyetin artmasına yol açmakta, fakat bu durum çekme mukavemetinde bir düşüşe neden olmaktadır. İkinci numune, %60 PLA ve %40 TPU oranına sahiptir ve katman kalınlıkları 0,6 mm'dir. Bu numunede, 15 katmanlı numuneye kıyasla daha yüksek bir çekme mukavemeti (43,64 MPa) elde edilmiştir. PLA oranının artışı ve katman kalınlığının genişlemesi, numunenin daha rijit ve dayanıklı bir hale gelmesini sağlamıştır [19]. Üçüncü numunede ise PLA oranı %66,6'ya

çıkılmış ve her bir katmanın kalınlığı 1 mm'ye ulaşmıştır. Bu yapı, sandviç yapılar arasında en yüksek çekme mukavemetini (47,24 MPa) sunmuştur. PLA oranının artması ve TPU oranının azalması, numunenin mukavemetini artıran temel faktörlerdir [22]. Sandviç yapıların avantajlarına değinecek olursak, saf PLA yapısına kıyasla daha esnek bir davranış sergiledikleri açıktır. Çekme testi sırasında sandviç yapılar içinde bulunan TPU'nun varlığı nedeniyle kopmamış esnemiştir. TPU'nun elastik özellikleri, darbe dayanımını ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak, bu yapıların dinamik yükler altındaki performansını iyileştirebilir. Ayrıca, sandviç yapıların özelleştirilebilir katman yapısı sayesinde, belirli uygulamalara uygun mukavemet-esneklik dengesi sağlanabilir. Bununla birlikte, saf PLA yapısına kıyasla en büyük dezavantajı, daha düşük çekme mukavemeti sunmalarıdır. Yapıda kullanılan TPU oranı arttıkça esneklik artsa da mukavemet azalmaktadır. Şekil 6.11'de çekme uzaması grafiği verilmiştir.



Şekil 6.11. Deney numunelerinin çekme uzaması değerleri

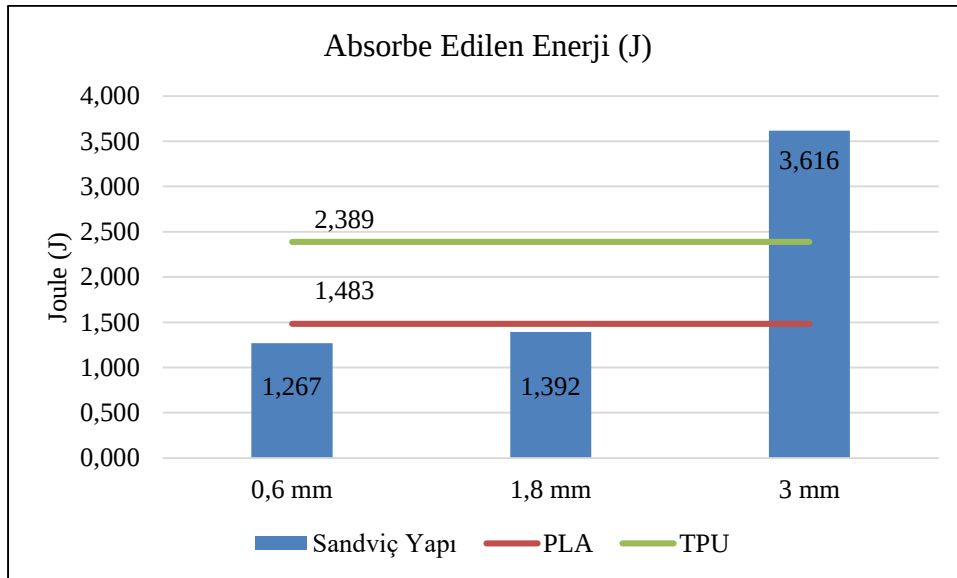
Şekil 6.11 incelendiğinde, test numuneleri arasında en yüksek çekme uzamasını 1,58 mm ile saf PLA numunesi göstermiştir. TPU polimeri esnek polimer olmasından dolayı kopma göstermemiştir. Test, çekme uzaması 61,25 mm olduğunda sonlandırılmıştır. Sandviç numuneler arasında ise en yüksek değer 1,43 mm ile 1mm katman kalınlığına sahip numuneye aittir. 0,6 mm katman kalınlığındaki numune 1,41 mm, 0,2 mm katman kalınlığındaki numune ise 1,17 mm ile en düşük değere sahiptir. Bu durum, katman

kalınlığının yani diğer bir yandan yapı içindeki PLA oranının artmasıyla doğru orantılı olarak çekme uzamasında artışa sebep olmuştur. Teste dair grafikler aşağıda sunulmuştur.

Sonuç olarak, PLA ve TPU oranlarının yapının çekme mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. PLA oranı arttıkça mukavemet ve çekme uzaması artmakta, TPU oranı arttıkça yapı esnekliği artmakta ancak mukavemet azalmaktadır. Bu nedenle, kullanım amacına göre PLA ve TPU oranlarının dikkatlice seçilmesi, yapının performansını optimize etmek açısından kritik öneme sahiptir. Sandviç yapıların hangi uygulama alanında kullanılacağına bağlı olarak, bu yapıların performans gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Örneğin, darbe dayanıklılığı veya hafifliğin daha kritik olduğu alanlarda sandviç yapılar ideal bir çözüm sunabilir.

6.3. Darbe Testi Sonuçları

Bu çalışmada, PLA ve TPU malzemelerinden oluşan sandviç yapıların mekanik mukavemet özellikleri, darbe testi yapılarak incelenmiştir. Numunelerdeki PLA ve TPU oranlarının farklılaşması, darbe dayanımı üzerinde doğrudan etki yaratmıştır. Şekil 6.13’de darbe testi grafiği verilmiştir.



Şekil 6.12. Darbe testi numunelerinin grafiği

Grafik incelendiğinde, %53,3 PLA ve %46,6 TPU oranı bulunan ve 0,6 mm katman kalınlığına sahip olan numunede absorbe edilen enerji 1,267 J olarak ölçülmüştür. Bu,

bütün numuneler arasındaki en düşük değerdir. Katman sayısının fazla olması ve katmanların daha ince oluşu, darbeyi absorbe etme sürecini olumsuz etkilemiş ve yapı üzerinde dağılan enerji miktarını sınırlandırmış olabilir. 5 katmandan oluşan numunede ise %60 PLA ve %40 TPU oranı bulunmaktadır ve 1,8 mm katman kalınlığına sahiptir. Bu numunede absorbe edilen enerji 1,392 J olarak ölçülmüştür. Katman kalınlığının artması dolayısıyla PLA oranının da artmasıyla absorbe edilen enerjide yaklaşık %10 oranında bir artış meydana gelmiştir. 3 katmandan oluşan sandviç yapı, en yüksek PLA oranına (%66,6) ve en kalın katmanlara (her biri 3 mm) sahip olup, darbe testinde en yüksek absorbe edilen enerjiye (3,616 J) ulaşmıştır ve bu da 5 katmanlı yapıya oranla %159'luk bir artışı ifade etmektedir. Bu sonuç, daha kalın katmanların malzemeye darbe dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, katman kalınlığı arttıkça her bir katmanın daha fazla enerji absorbe edebildiği ve daha esnek TPU katmanlarıyla birlikte darbeyi etkili bir şekilde yaydığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, katman kalınlığının artırılması ve PLA oranının yükseltilmesi, sandviç yapılarda daha iyi darbe dayanımı sağlamaktadır. Şekil 6.14'de gösterildiği üzere darbe testi sırasında tüm sandviç numunelerde çekiç sadece yüzeydeki PLA katmanını kırmış, ancak TPU iç katmanları deformasyon göstererek enerjiyi emmiş ve tamamen kırılmamıştır.



Şekil 6.13. 3 mm katman kalınlığındaki numunenin darbe testi sonrası görünümü

Bu durum, TPU'nun yüksek elastikiyet ve esneme kabiliyeti sayesinde darbeyi dağıtarak enerjiyi absorbe etmesine bağlanabilir [23]. Saf PLA numunesinin, en yüksek enerjiyi

absorbe eden 3 katmanlı sandviç yapıdan daha düşük (1,483 J) bir enerji absorbe ettiği göz önünde bulundurulduğunda sandviç yapıların, darbe dayanımı açısından avantaj sağladığı gözlenmiştir. PLA katmanları darbe aldığı anda, TPU'nun esnek yapısı darbe sırasında oluşan enerji yükünü karşılayarak malzemenin tamamen kırılmasını önlemiştir. Dolayısıyla, sandviç yapıların saf PLA'ya kıyasla daha iyi darbe dayanımı sunduğu ve darbe yükleri altında daha yüksek direnç gösterdiği söylenebilir.

Sandviç yapılarda PLA katmanları darbeyi ilk karşılayan yüzeylerde yer aldığından, dış darbelere karşı daha rijit ve sert bir yüzey oluşturur. Sandviç yapılar bu açıdan saf TPU'ya göre daha avantajlı olabilir; çünkü dış yüzeydeki PLA katmanları yapıya belirli bir sertlik kazandırırken, iç katmanlardaki TPU malzemesi esnekliği sayesinde darbe anında deformasyon göstererek enerjiyi dağıtır. Özellikle 3 katmanlı sandviç yapıda PLA oranının daha fazla ve katman kalınlıklarının daha yüksek olması, darbeye karşı TPU ile birlikte bir bütün olarak yüksek direnç göstermesini sağlamış ve saf TPU numunesinden (2,389 J) daha yüksek bir enerji absorbe etme değerine ulaşmıştır (3,616 J). Sandviç yapıların darbe dayanımı açısından sağladığı temel avantaj, iç katmanlardaki TPU malzemesinin yüksek deformasyon kapasitesi sayesinde darbe esnasında kırılmayı geciktirmesi ve darbeyi absorbe etme kabiliyetinin artmasıdır. TPU'nun deformasyon esnekliği, yapıların tamamen kırılmasını önleyerek darbeye karşı dayanıklılığını artırmaktadır [23]. Bu durum, özellikle darbeye maruz kalabilecek yapılarda önemli bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak darbe testleri, PLA ve TPU oranlarının ve katman kalınlıklarının sandviç yapıların darbe dayanımı üzerinde belirgin etkiler yarattığını göstermektedir. PLA oranı ve katman kalınlığı arttıkça darbe dayanımı da artmakta, daha ince katmanlı ve daha düşük PLA oranına sahip yapılar ise darbe yükü altında daha düşük enerji absorbe etmektedir. Sandviç yapılar, saf PLA yapılarına göre daha yüksek darbe dayanımı sunarak, esnek TPU iç katmanları sayesinde kırılmayı önlemekte ve enerji absorbe etmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tüm deneylerde sandviç yapı içerisindeki katman sayılarının değişmesi dolayısıyla yapı içerisindeki PLA ve TPU oranlarının değişmesinin test sonuçlarında belirgin farklılıklara yol açtığı gözlemlenmiştir.

- Sandviç yapıdaki PLA oranının artması çekme dayanımında da doğru orantılı bir şekilde artış sağladığı görülmüştür. PLA oranındaki %13 lük değişim çekme mukavemetinde %44'lük bir artışa neden olmuştur.
- Çekme uzaması sonuçlarına bakıldığında sandviç yapıdaki PLA oranıyla çekme uzaması değerlerinde doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Yapıdaki PLA oranının %53,3'den %66,6'ya çıkmasıyla çekme uzamasında %22,2'lik bir artış kaydedilmiştir.
- Eğilme mukavemeti sonuçları göz önüne alındığında, sandviç yapı içerisindeki TPU polimer oranıyla eğilme mukavemeti arasındaki doğrusal bir ilişki gözlenmiştir. Yapı içerisindeki TPU oranının %13 azalmasıyla, eğilme mukavemetinde %5,96 azalma meydana gelmiştir.
- Akma gerilmesi sonuçları incelendiğinde yapıdaki PLA oranının 53,3'den %66,6'ya çıkmasıyla akma gerilmesinde %18,40'lık bir artış gözlenmiştir.
- Kopma gerilmesi sonuçlarına bakıldığında yapı içerisindeki TPU oranındaki % 13,3 lük artışla kopma gerilmesinde %111,81 lik bir artış kaydedilmiştir.
- Sandviç yapıdaki en fazla TPU oranına (%46,6) sahip numunede eğilme testindeki en yüksek kopma gerilmesi gözlenmiştir.
- Akma noktasındaki yük değerlerine bakıldığında, TPU oranının %46,6'dan %40'a düşmesi ve PLA oranının %53,3'den %60'a çıkmasıyla akma noktasındaki yük değeri de %18,40 oranında artış göstermiştir.
- 3 katmanlı %66,6 PLA ve %33,3 TPU içeren sandviç yapı darbe testinde tüm numuneler içerisinde en yüksek enerjiyi absorbe etmiştir. Saf PLA'dan %143, saf TPU'dan %51 daha yüksek bir değer elde edilmiştir.

Sandviç yapıların hangi uygulama alanında kullanılacağına bağlı olarak, bu yapıların performans gereksinimlerine uygun şekilde tasarlanması büyük önem taşımaktadır. Örneğin, darbe dayanıklılığı veya hafifliğin daha kritik olduğu alanlarda sandviç yapılar ideal bir çözüm sunabilir. Çok malzemeli sandviç yapılar, özellikle darbe direncinin

önemli olduğu uygulamalarda tercih edilebilir. TPU içerikli yapılar, yüksek darbe dayanımı ve enerji dağıtımı özellikleri sayesinde, güvenlik ve dayanıklılık gerektiren alanlarda kullanılabilir. TPU'nun elastik özellikleri, darbe dayanımını ve enerji sönümleme kapasitesini artırarak, bu yapıların dinamik yükler altındaki performansını iyileştirebilir. Ayrıca, sandviç yapıların özelleştirilebilir katman yapısı sayesinde, belirli uygulamalara uygun mukavemet-esneklik dengesi sağlanabilir.



KAYNAKLAR

1. Goh, G. D., Agarwala, S., Goh, G. L., Dikshit, V., Sing, S. L., ve Yeong, W. Y. (2017). Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology*, 63, 140-151.
2. Bănică, C. F., Sover, A., ve Anghel, D. C. (2024). Printing the Future Layer by Layer: A Comprehensive Exploration of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Applied Sciences*, 14(21), 9919.
3. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., ve Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737-760.
4. Acierno, D., ve Patti, A. (2023). Fused Deposition Modelling (FDM) of Thermoplastic-Based Filaments: Process and Rheological Properties—An Overview. *Materials*, 16(24), 7664.
5. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., ve Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
6. Syrlybayev, D., Zharylkassyn, B., Seisekulova, A., Akhmetov, M., Perveen, A., ve Talamona, D. (2021). Optimisation of Strength Properties of FDM Printed Parts—A Critical Review. *Polymers*, 13(10), 1587.
7. Verma, A., Kapil, A., Klobčar, D., ve Sharma, A. (2023). A Review on Multiplicity in Multi-Material Additive Manufacturing: Process, Capability, Scale, and Structure. *Materials*, 16(15), 5246.
8. Singamneni, S., Yifan, L. V., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W., ve Jordison, D. (2019). Additive manufacturing for the aircraft industry: a review. *J. Aeronaut. Aerosp. Eng.*, 8(1), 351-371.
9. Hassan, A., Pedapati, S. R., Awang, M., ve Soomro, I. A. (2023). A Comprehensive Review of Friction Stir Additive Manufacturing (FSAM) of Non-Ferrous Alloys. *Materials*, 16(7), 2723.
10. Freund, R., Watschke, H., Heubach, J., ve Vietor, T. (2019). Determination of Influencing Factors on Interface Strength of Additively Manufactured Multi-Material Parts by Material Extrusion. *Applied Sciences*, 9(9), 1782.
11. Rajendran, S., Palani, G., Kanakaraj, A., Shanmugam, V., Veerasimman, A., Gądek, S., Korniejenko, K., ve Marimuthu, U. (2023). Metal and Polymer Based Composites Manufactured Using Additive Manufacturing—A Brief Review. *Polymers*, 15(11), 2564.
12. Compton, B. G., ve Lewis, J. A. (2014). 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites. *Advanced Materials*, 26(34), 5930-5935.

13. Malekipour, E., ve El-Mounayri, H. (2017). Common Defects and Contributing Parameters in Hybrid Additive Manufacturing: A Case Study of Hybrid Additive Manufacturing of Nickel-Based Superalloys. *Procedia Manufacturing*, 10, 372-382.
14. King, W. E., Anderson, A. T., Ferencz, R. M., Hodge, N. E., Kamath, C., Khairallah, S. A., ve Rubenchik, A. M. (2015). Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Applied Physics Reviews*, 2, 041304, 1-26
15. Arifvianto, B., Satiti, B. E., Salim, U. A., Suyitno, Nuryanti, A., Mahardika, M. (2022). Mechanical properties of the FFF sandwich-structured parts made of PLA/TPU multi-material. *Progress in Additive Manufacturing*, 7(6), 1213-1223.
16. Wang, F., Ji, Y., Chen, C., Zhang, G., Chen, Z. (2022). Tensile properties of 3D printed structures of polylactide with thermoplastic polyurethane. *Journal of Polymer Research*, 29(8), 320.
17. Liu, Q., Zhang, Z., Yavas, D., Shen, W., Wu, D. (2023). Multi-material additive manufacturing: effect of process parameters on flexural behavior of soft-hard sandwich beams. *Rapid Prototyping Journal*, 29(5), 885-896.
18. Kumar, S., Singh, I., Koloor, S. S. R., Kumar, D., Yahya, M. Y. (2022). On laminated object manufactured FDM-printed ABS/TPU multimaterial specimens: An insight into mechanical and morphological characteristics. *Polymers*, 14(19), 4066.
19. Baca Lopez, D. M., Ahmad, R. (2020). Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers*, 12(3), 651.
20. Patro, P. K., Kandregula, S., Khan, M. S., Das, S. (2023). Investigation of mechanical properties of 3D printed sandwich structures using PLA and ABS. *Materials Today: Proceedings*, In Press.
21. Ahmed, S. W., Hussain, G., Altaf, K., Ali, S., Alkahtani, M., Abidi, M. H., ve Alzabidi, A. (2020). On the effects of process parameters and optimization of interlaminar bond strength in 3D printed ABS/CF-PLA composite. *Polymers*, 12(9), 2155.
22. Dhinesh, S. K., Arun, P. S., Senthil, K. K., Megalingam, A. (2021). Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1175-1180.
23. Pinho, A. C., Piedade, A. P. (2021). Sandwich multi-material 3D-printed polymers: influence of aging on the impact and flexure resistances. *Polymers*, 13(22), 4030.
24. Kumar, S., Singh, R., Singh, M. (2022). Multi-material 3D printed PLA/PA6-TiO₂ composite matrix: Rheological, thermal, tensile, morphological and 4D capabilities. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 2329-2348.
25. Mishra, P. K., Senthil, P. (2020). Prediction of in-plane stiffness of multi-material 3D printed laminate parts fabricated by FDM process using CLT and its mechanical behaviour under tensile load. *Materials Today Communications*, 23, 100955.

26. Yap, P. V., Chan, M. Y., Koay, S. C. (2021). Preliminary Study on Mechanical Properties of 3D Printed Multi-materials ABS/PC Parts: Effect of Printing Parameters. *Journal of Physical Science*, 32(2), 87-104.
27. Wohlers, T. T., ve Caffrey, T. (2014). Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. *Wohlers Associates*.
28. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
29. Campbell, I., Bourell, D., ve Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255-258.
30. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
31. Tymrak, B. M., Kreiger, M., ve Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
32. Huang, J., Qin, Q., ve Wang, J. (2020). A Review of Stereolithography: Processes and Systems. *Processes*, 8(9), 1138.
33. Melchels, F. P. W., Feijen, J., ve Grijpma, D. W. (2010). A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*, 31(24), 6121-6130.
34. Kruth, J. P., Levy, G., Klocke, F., ve Childs, T. H. C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals*, 56(2), 730-759.
35. Goodridge, R. D., Tuck, C. J., ve Hague, R. J. M. (2012). Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science*, 57(2), 229-267.
36. Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., ve Roberson, D. A. (2015). Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by fused deposition modeling. *Additive Manufacturing*, 6, 16-29.
37. Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Blue, C. A., ve Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
38. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
39. Agarwal, B. D., Broutman, L. J., ve Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons.

40. Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC Press.
41. Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CRC Press.
42. Kamble Z. (2023). Advanced structural and multi-functional sandwich composites with prismatic and foam cores: a review. *Polym Compos*, 1-28.
43. Dinu, R., Lafont, U., Damiano, O., ve Mija, A. (2022). Development of Sustainable High Performance Epoxy Thermosets for Aerospace and Space Applications. *Polymers*, 14(24), 5473.
44. Chanda, M., ve Roy, S. K. (2016). *Plastics Technology Handbook*. CRC Press.
45. Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., ve Dutta, N. K. (2021). Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. *Polymers*, 13(5), 753.
46. Freeland, B., McCarthy, E., Balakrishnan, R., Fahy, S., Boland, A., Rochfort, K. D., Dabros, M., Marti, R., Kelleher, S. M., ve Gaughran, J. (2022). A Review of Polylactic Acid as a Replacement Material for Single-Use Laboratory Components. *Materials*, 15(9), 2989.
47. Farah, S., Anderson, D. G., ve Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392.
48. Bahrami, M., Abenojar, J., ve Martínez, M. A. (2021). Comparative Characterization of Hot-Pressed Polyamide 11 and 12: Mechanical, Thermal and Durability Properties. *Polymers*, 13(20), 3553.
49. Wang, J., Yang, B., Lin, X., Gao, L., Liu, T., Lu, Y., ve Wang, R. (2020). Research of TPU Materials for 3D Printing Aiming at Non-Pneumatic Tires by FDM Method. *Polymers*, 12(11), 2492.
50. Soltanmohammadi, K., Rahmatabadi, D., Aberoumand, M., Soleyman, E., Ghasemi, I., Baniassadi, M., ... ve Baghani, M. (2024). Effects of TPU on the mechanical properties, fracture toughness, morphology, and thermal analysis of 3D-printed ABS-TPU blends by FDM. *Journal of Vinyl and Additive Technology*.
51. Hasegawa, H., Kida, T., ve Yamaguchi, M. (2022). Novel Transparent Films Composed of Bisphenol-A Polycarbonate and Copolyester. *Polymers*, 14(19), 4146.
52. Seoane-Rivero, R., Germán, L., Santos, F., ve Gondra, K. (2023). Development of New Hybrid Composites for High-Temperature Applications. *Polymers*, 15(22), 4380.
53. Trautmann, M., Mrzljak, S., Walther, F., ve Wagner, G. (2020). Mechanical Properties of Thermoplastic-Based Hybrid Laminates with Regard to Layer Structure and Metal Volume Content. *Metals*, 10(11), 1430.



Gazili olmak ayrıcalıktır