



FDM Yöntemi ile Üretilen Sandviç Yapılarda Üretim Parametrelerinin Mekanik Performans Üzerindeki Etkisi

Kürşad Ertuğrul Bay^{1*} , Gültekin Uzun² 

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 22.05.2024

Kabul: 01.07.2024

Anahtar Kelimeler:

Eriyik biriktirme yöntemi
Sandviç yapılar
Üretim parametreleri
Mukavemet
Eklemeli imalat

ÖZET

Eklemeli imalat ve üretilen malzeme teknolojisi her geçen gün daha fazla ilgi görmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri içinde Eriyik Biriktirme Yöntemi (FDM) en yaygın kullanılan üretim metodudur. Eriyik Biriktirme Yönteminde kullanılan makinelerin maliyetinin ucuz olması, kompleks geometri yapıların herhangi bir kesici takıma ihtiyaç duyulmadan kısa üretim döngü sürelerinde üretilebilmesi ve düşük artık malzeme oranları gibi unsurlar, yöntemin sunduğu avantajlar arasında gösterilmektedir. Bu yöntemle üretilen sandviç yapılar, üstün özellikleri ve fonksiyonelliği nedeni ile araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Sandviç yapılar, iç ve dış katmanlar arasında bir çekirdek malzemesiyle birleştirilen yapılar olarak tanımlanır ve genellikle hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle tercih edilirler. Bu çalışma, sandviç yapıların mukavemetini etkileyen faktörleri, malzeme seçimini, katmanlama yöntemlerini ele almaktadır. Araştırmadan elde edilen önemli bulgu, sandviç yapıyı oluşturan polimerlerin ayrı ayrı sergiledikleri mukavemet özelliklerinin, sandviç yapıyı oluşturmak için bir araya geldiklerinde artırılabilirliği. Yapılan araştırma, Eriyik Biriktirme Yöntemiyle üretilen sandviç yapılarda üretim parametrelerinin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini anlamak, üretim sürecini optimize etmek ve gelecekte yapılacak uygulamalara bir temel oluşturmak için kılavuz sağlamayı amaçlamaktadır.

The Effect of Production Parameters on the Mechanical Performance of Sandwich Structures Manufactured by FDM Method

ARTICLE INFO

Received: 22.05.2024

Accepted: 01.07.2024

Keywords:

FDM
Sandwich structures
Production parameters
Strength
Additive manufacturing

ABSTRACT

Additive manufacturing and the manufactured material technology are gaining increasing attention day by day. Among additive manufacturing methods, Fused Deposition Modeling (FDM) is the most commonly used production method. Factors such as the low cost of machines used in FDM, the ability to produce complex geometric structures in short production cycle times without the need for any cutting tools, and low waste material ratios are among the advantages offered by the method. Sandwich structures produced by this method attract researchers' interest due to their superior properties and functionality. Sandwich structures are defined as structures that are combined with a core material between inner and outer layers and are generally preferred for their lightweight and high strength. This study addresses the factors influencing the strength of sandwich structures, material selection, and layering methods. The most significant finding obtained from the research is that the strength properties exhibited separately by the polymers forming the sandwich structure can be enhanced when they come together to form the sandwich structure. The research aims to provide guidance for understanding the effect of production parameters on the strength properties of sandwich structures produced by Fused Deposition Modeling (FDM), optimizing the production process, and laying the groundwork for future applications.

* Corresponding author, e-mail: kertugrul.bay@gazi.edu.tr

To cite this article: K.E. Bay, G. Uzun, The Effect of Production Parameters on the Mechanical Performance of Sandwich Structures Manufactured by FDM Method, Manufacturing Technologies and Applications, 5(2),75-88, 2024.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1488266>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

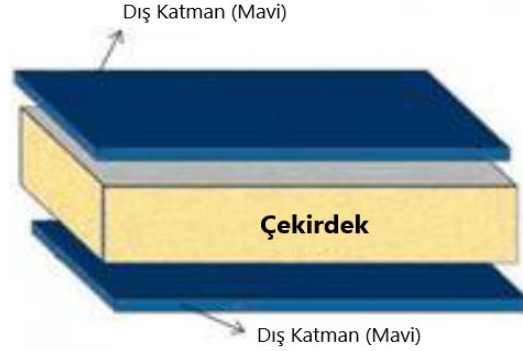
Modern (alışılmamış) imalat yöntemlerinden birisi de eklemeli imalattır. Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) geometrik verileri kullanarak malzemenin katmanlar halinde üst üste eklenmesiyle, kompleks geometriye sahip parçaların hızlı üretimini sağlayan bir tekniktir. Bu teknikte parça, bilgisayar destekli tasarım programları aracılığıyla çizim, tersine mühendislik, gibi farklı metodlarla elde edilen 3B modelden üretilir. 3B model çok sayıda ince katmanlara ayrılır (dilimlenir) ve üretim sistemleri, parçayı tamamlayana kadar her bir katmanı ardışık olarak üretmek için bu geometrik verileri kullanır. Eklemeli imalat teknolojisi, Tıp, Uzay, Havacılık, Otomotiv, Dişçilik, Askeri donanım, Heykelcilik, Kuyumculuk ve Eğitim gibi birçok alanda üretilen parçalar ve ürünlerde kullanılmaktadır. Son yıllarda, eklemeli imalat teknolojisinin kullanım alanı hem yaygınlaşmakta hem de teknolojisi sürekli gelişerek daha fazla alanda uygulanmaktadır [1]. 3 Boyutlu yazıcıların çalışma standartları temelde birbirlerine benziyor olsa da kullanım alanı ve amacına göre malzeme ve yöntemler farklılıklar gösterebilmektedir. 3 Boyutlu yazıcıların çeşitli malzeme ve yöntem uygulamaları şunlardır; Stereolitografi (SLA), Katı Zemin Kırılma (SGC), Lamine Nesne İmalatı (LOM), Eriyik Yığarak Modelleme (FDM), Çok Jetli (Polyjet-Multijet) Modelleme (MJF), Seçmeli Lazer Sinterleme ve Ergitme (SLS/SLE), Elektron Işınli Ergitme (EBM) [2]. Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde FDM yöntemi en yaygın kullanıma sahip ve uygulanabilir imalat metodudur. FDM yönteminde, malzeme katmanlarını 3B yazdırmak için termoplastik bir polimerin filamentini kullanılır. Filament, yarı sıvı bir duruma ulaşmak için nozulde ısıtılır ve daha sonra platform üzerinde veya önceden basılmış katmanların üzerine ekstrüde edilir. Polimer filamentin termoplastik özelliği, filamentlerin baskı sırasında birbirine kaynaşmasını ve baskıdan sonra oda sıcaklığında katılmasını sağlayan bu yöntem için temel bir özelliktir. Düşük maliyet, yüksek hız ve işlemin basitliği FDM'nin temel avantajlarıdır. Öte yandan, zayıf mekanik özellikler, katman katman görünüm, düşük yüzey kalitesi [3-4] ve sınırlı sayıda termoplastik malzeme kullanımı FDM'nin ana dezavantajlarıdır [3-5]. Katman kalınlığı, filamentlerin genişliği ve oryantasyonu ve hava boşluğu (aynı katmanda veya katmanlar arasında), basılı parçaların mekanik özelliklerini etkileyen ana işlem parametreleridir [3]. Son çalışmalar ışığında hafif sandviç panellerin kullanımı, yüksek eğilme dayanımı-ağırlık oranı ve mükemmel ısı yalıtımı gibi özellikleri nedeniyle önem kazanmıştır [6]. Hafif sandviç yapılar günümüzde havacılık, denizcilik, otomobil, yel değirmeni ve bina endüstrisi sektörlerinde, özellikle yüksek eğilme sertliği, ısı yalıtımı ve yüksek enerji emme yetenekleri gibi mükemmel çok işlevli özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Sınırlı enerji ve malzeme kaynaklarıyla ilgili olarak, hafif mikro mimarili sandviç yapılar, yapısal sertlik, ısı alışverişi ve elektriksel özellikler gibi birden fazla işlevi yerine getirirken aynı zamanda yapısal elemanların ağırlığını azaltabildikleri için artan bir ilgi görmektedir [7].

Bu makalede, FDM yöntemi ile üretilen sandviç yapıların genel özellikleri, kullanım alanları, üretim parametrelerindeki değişikliklerin bu yapıların mukavemet performansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

2. SANDVIÇ YAPILAR VE ÖZELLİKLERİ (SANDWICH STRUCTURES AND THEIR CHARACTERISTICS)

Sandviç yapılar genellikle düşük ağırlık, yüksek eğilme mukavemeti ve yüksek enerji emilimi gerektiren yapısal uygulamalar için kullanılır. Deforme olabilen çekirdek, eğilme momentlerine karşı direnç sağlarken, aynı zamanda elastik veya kalıcı olarak deforme olarak yapı üzerindeki herhangi bir darbeye direnmede önemli bir rol oynar [8-9]. Sandviç yapının çok işlevli performansı büyük ölçüde yapı konfigürasyonuna ve sandviç malzeme seçimine bağlıdır. Sandviç yapıların avantajları arasında gelişmiş enerji emme özellikleri, büyük sertlik/ağırlık oranları, mükemmel balistik direnç performansı ve iyi termal ve akustik izolasyon özellikleri yer almaktadır [10]. Genel olarak, endüstriler çeşitli uygulamalar için uygun hafif yapılar aramaktadır ve umut verici performans sunan kategorilerden biri de sandviç yapılarıdır. Bir sandviç yapı, iki yüz tabakası arasına yerleştirilmiş hafif bir çekirdekten oluşur (Şekil 1). Çekirdeğin yapısının, tüm yapının bükülme ve burkulma direnci ile ilgili kritik bir faktörü koruduğuna dikkat edilmelidir. Minimum ağırlıkla gelişmiş mekanik özellikler sunabilen köpük çekirdek ve kafes çekirdek gibi çeşitli sandviç

yapı türleri de vardır [11]. Günümüzde sandviç yapılar en iyi performans gösteren yastıklama çözümleri arasında yer almaktadır. Özellikle metalik, polimerik ve hibrit sandviç yapılar olarak kategorize edilebilirler. Hem metalik bir iç çekirdek hem de kaplamalarla karakterize edilen ilk sandviç yapı kategorisi, metallerin olağanüstü plastikleşme yetenekleri sayesinde yüksek oranlarda darbe enerjisinin emilmesine olanak tanır. Ancak, bu kategoriye ait emiciler neredeyse çoğunlukla ağır olmaktadır. Öte yandan, sandviç yapıların ikinci kategorisi, her ikisi de metalik malzemelere kıyasla genellikle daha hafif olan plastik malzemelerden yapılmış bir iç çekirdek ve kaplamalar ile karakterize edilir. Bununla birlikte, elastik ve kırılma mekanizmalarıyla ilgili enerji emme kabiliyetleri, metalik emiciler tarafından sağlandan çok daha azdır [12]. Sandviç paneller genellikle yüksek hızlı darbelere maruz kalabilecek uygulamalarda kullanılır, bu nedenle darbe yüklemesi altındaki davranışlarını incelemek önemlidir [13].



Şekil 1. Sandviç yapı (Sandwich structure) [14]

3. SANDVIÇ YAPILARDA ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MUKAVEMETE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ (ANALYSIS OF THE EFFECTS OF PRODUCTION PARAMETERS ON THE STRENGTH OF SANDWICH STRUCTURES)

3.1. Üretim Parametrelerinin Çekme Mukavemetine Etkisi (The Effect of Production Parameters on Tensile Strength)

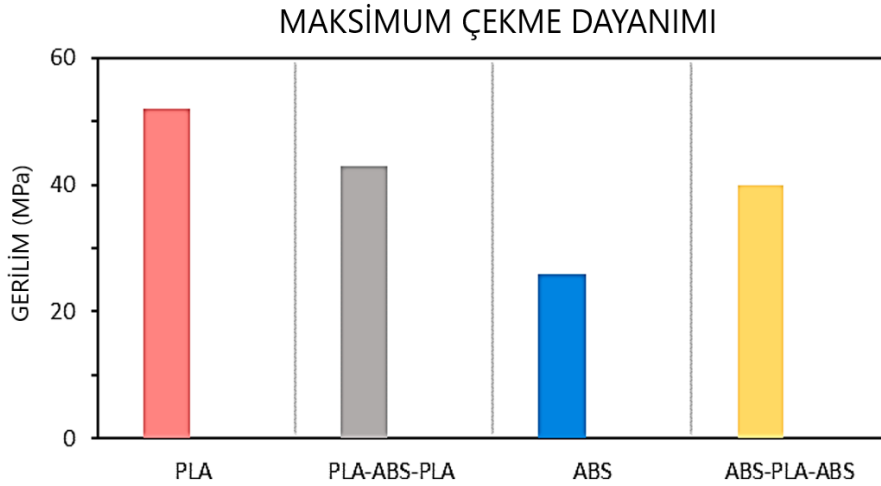
FDM yönteminde üretim parametreleri (Katman kalınlığı, baskı hızı, örgü açısı, tabla ve nozul sıcaklığı vb.) parçaların mekanik özelliklerini etkileyen ana işlem parametreleridir. Özellikle sandviç yapı içerisinde bulunan farklı malzeme konfigürasyonu malzeme mukavemetini etkileyen en önemli parametre olarak ifade edilmektedir. Bu parametrelerin mukavemete olan etkileri literatür ile desteklenerek aşağıda sunulmuştur.

Dhinesh ve arkadaşları, farklı oranlarda ürettikleri polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) numunelerinin mekanik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Testlerde, biri 50'nin altında (38 mm/sn) ve diğeri 50'nin üzerinde (52 mm/sn) olmak üzere iki farklı ilerleme hızı kullanmışlardır. 52 mm/sn'de daha yüksek sayıda ürün üretmelerine rağmen, 38 mm/sn'de üretilen numunelerin daha iyi sonuçlar verdiğini, çünkü polimerik mikrofiber yapının çok daha kesin ve tekdüze olup genel mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir. Buldukları sonuçlarda %20 ABS ve %80 PLA numunesinin en yüksek çekme mukavemetine (21.4 MPa) sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Testten elde ettikleri bir diğer önemli çıkarım da PLA miktarı azaldıkça çekme mukavemetinin büyük ölçüde azaldığı ve dolayısıyla %100 ABS (13.46 MPa) ve %20 PLA - %80 ABS (13.2 MPa) numunelerinin daha az çekme mukavemetine sahip olduğunu rapor etmişlerdir [15]. Çekme testi sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çekme testi sonuçları (Tensile test results) [15]

Malzemeler	Maksimum Yük (KN)	Kopma Yüğü (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 SANDVIÇ	0.71	0.53	0.57	14.45
80%ABS, 20%PLA	0.65	0.44	0.43	13.2

Patro ve arkadaşları, polilaktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimerlerini kullanarak sandviç yapı oluşturmuşlar ve bu yapıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Numuneleri %100 doluluk oranı ve 70 mm/s baskı hızıyla üretmişlerdir. Deneyden elde ettikleri sonuçlar neticesinde sandviç yapıların saf ABS numunelerinden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Test edilen kombinasyonlar arasında, çekirdek olarak ABS ve dış katman olarak PLA içeren yapının en iyi sonuçları gösterdiğini (43 Mpa) gözlemlemişlerdir. Ayrıca çalışma, ABS'nin yüzey ve PLA'nın çekirdek olarak kullanıldığı sandviç yapının (40 Mpa) saf ABS'ye (26Mpa) kıyasla daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu da rapor etmişlerdir [16]. Çekme dayanımı verileri Şekil 2'de gösterilmiştir.



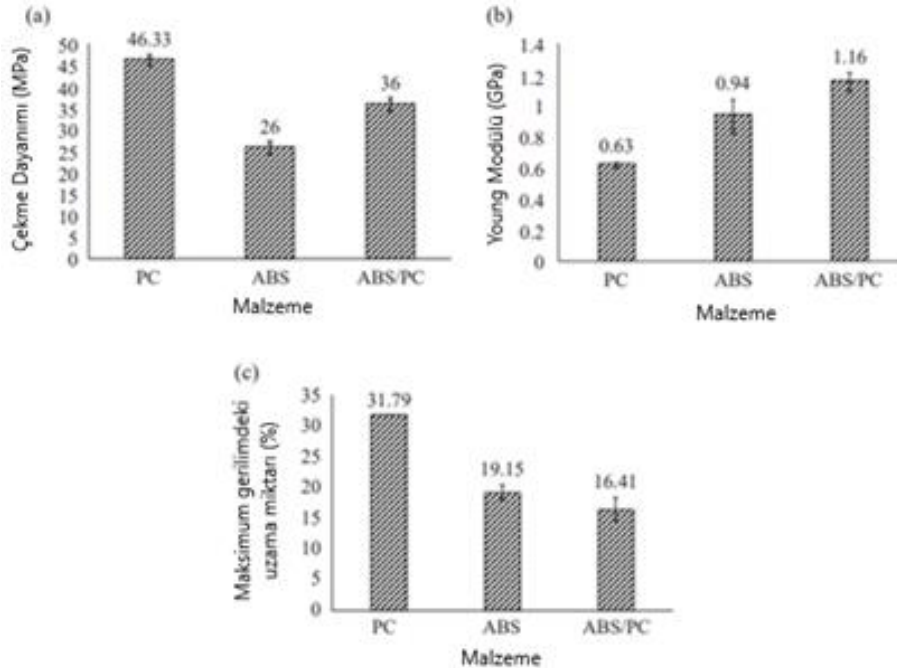
Şekil 2. Maksimum çekme dayanımı (Ultimate tensile strength) [16]

Mishra ve arkadaşları, farklı örgü açısına sahip iki malzemeli laminat yapıların mekanik davranışını gözlemek için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Polilaktik asit (PLA) ve polilaktik asit karbon siyahı (PLA CB), malzemelerini ise hammadde olarak seçmişlerdir. Çok malzemeli yapılar arasında 0° örgü açısıyla üretilen numunenin en yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu (35.09 MPa) ve bunu sırasıyla 45°/-45°, 90° örgü açılarının takip ettiğini belirtmişlerdir. Bu sonuçlara dayanarak çekme yönüne paralel örgü açısının maksimum mukavemet sağladığını rapor etmişlerdir. Dolayısıyla, laminat yapılarda her bir katmanının örgü açısının çekme mukavemeti belirlenmesinde baskın bir rol oynadığını belirtmişlerdir [17]. Çekme dayanımı verileri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Homojen ve Çoklu Laminat Malzemelerin farklı örgü açılarındaki ortalama çekme dayanımı özellikleri (Average tensile properties of mono and bi-material laminates at different raster angle) [17]

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

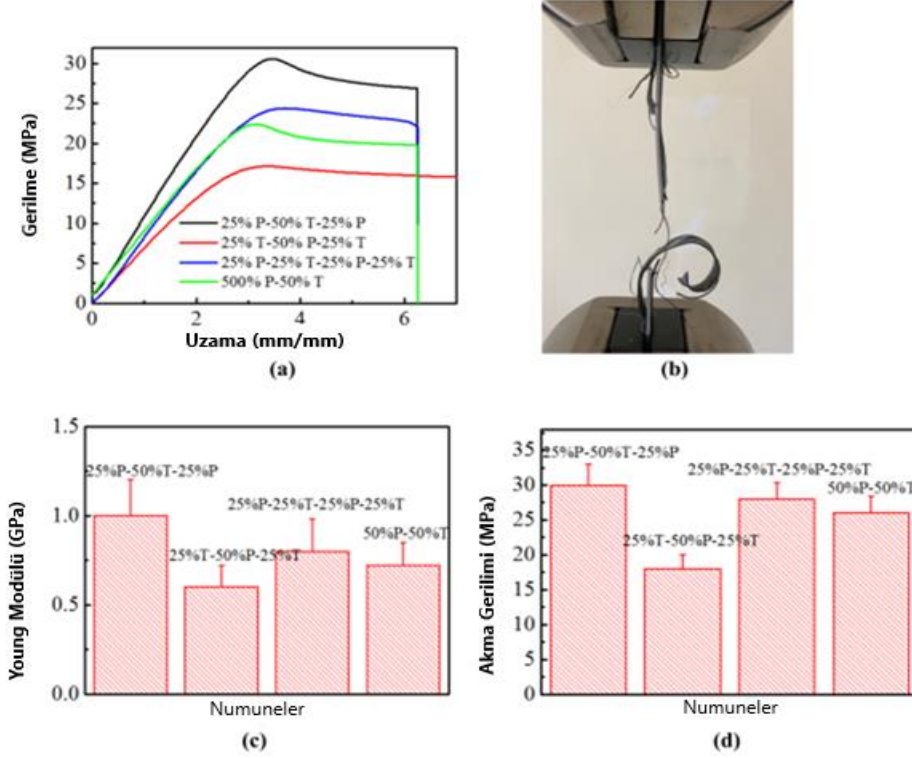
Yap ve arkadaşları, değişen baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve nozul çapının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çok malzemeli numuneleri, ana malzeme olarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve takviye malzeme olarak polikarbonat (PC) ile üretmişlerdir. Elde ettikleri 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 kombinasyonunun, saf ABS'ye kıyasla sünekliği %14.31 azaltırken çekme mukavemetini %38.46, arttırdığını gözlemlemişlerdir [18]. Deney sonuçları Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin a) Çekme dayanımı, b) Young Modülü ve c) Maksimum gerilimdeki uzama miktarı (a) Tensile strength, b) Young's modulus, and c) elongation at maximum stress of 3D printed ABS, PC and multi-material ABS/PC parts) [18]

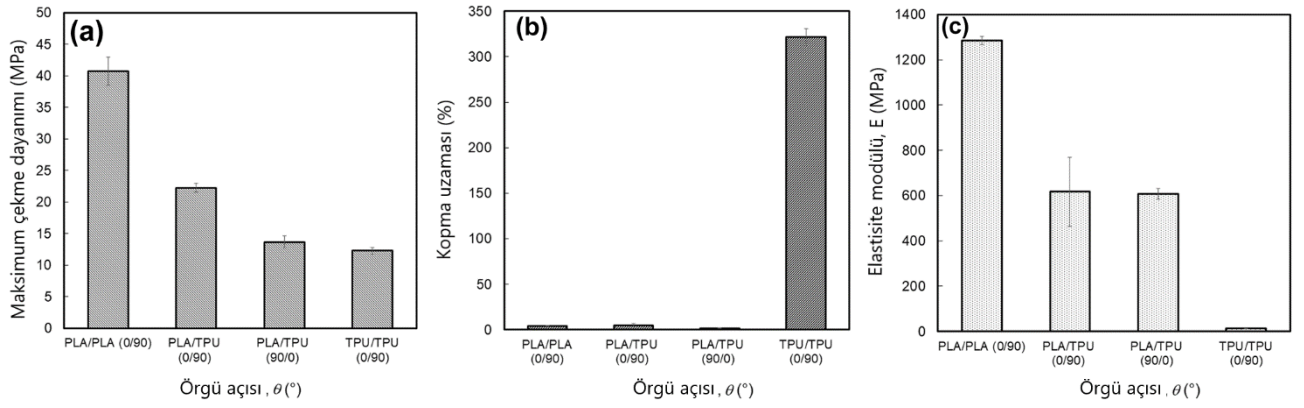
Wang ve arkadaşları, farklı Termoplastik Poliüretan (TPU) hacim oranlarına ve malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA-TPU polimerlerini içeren sandviç yapıların çekme özelliklerini incelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, aynı TPU hacim oranıyla, yüzey malzemesi PLA ve çekirdek

malzemesi TPU olan 3B baskılı PLA/TPU numunesinin (%25 PLA-%50 TPU-%25 PLA) en yüksek akma mukavemeti ve elastik modüle sahip olduğunu belirtmişlerdir. Çekirdek malzemesi PLA olan numunelerin ise test edilen tüm numuneler arasında en düşük özellikleri gösterdiğini rapor etmişlerdir. %25 TPU-%50 PLA-%25 TPU numunesinin, tüm numuneler arasında en zayıf özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [19]. Deney sonuçları Şekil 4’te gösterilmiştir.

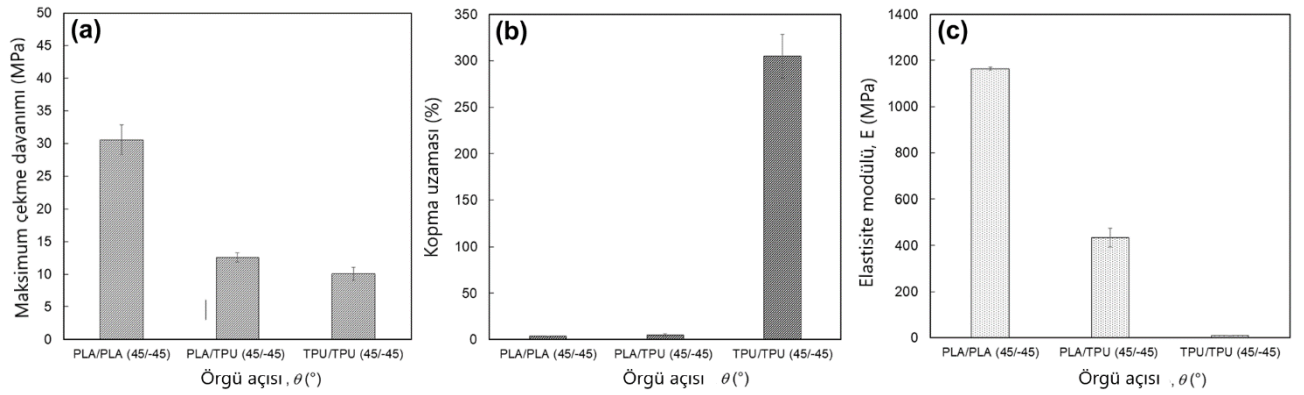


Şekil 4. Farklı malzeme düzenlerine sahip 3B baskılı PLA/TPU numunelerinin gerilme davranışları a) Gerilme-Uzama eğrisi b) Çekme Testi sonrası 25% TPU - 50% PLA - 25% TPU örneği c) Young Modülü d) Akma Gerilimi (Tensile behaviors of 3D printed PLA/TPU samples with different material layouts: a) tensile stress–strain curves; b) failure sample of 25% TPU-50% PLA-25% TPU; c) young’s modulus and d) yield stress) [19]

Arifvianto ve arkadaşları yaptıkları araştırmada, FDM yöntemi ile ürettikleri, sert bir polimer olan polilaktik asit (PLA) ve esnek bir polimer olan termoplastik poliüretandan (TPU) oluşan, sandviç yapılı çok malzemeli numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Üretim parametrelerinde $\theta=0^\circ/90^\circ$ ve $45^\circ/-45^\circ$ olmak üzere iki farklı örgü açısı kullanmışlardır. Test sonuçlarına göre, ürettikleri PLA/TPU sandviç yapılı numunelerinin çekme dayanımı ve elastik modülü, saf PLA'nın özelliklerinden daha düşük, ancak saf TPU'nun özelliklerinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, sandviç numunesinin mekanik özelliklerinin, sandviç numunesinin içyapısındaki PLA ve TPU'nun örgü açısı tarafından etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Sonuçlara göre, $\theta=0^\circ/90^\circ$ 'deki PLA/TPU numunesinin çekme dayanımı ve elastisite modülünün ($\sigma=22.3\pm 0.7$ MPa ve $E=617.3\pm 153.3$ MPa), $\theta=90^\circ/0^\circ$ 'deki sandviç numunesinden ($\sigma=13.6\pm 1.0$ MPa ve $E=607.3\pm 22.9$ MPa) daha yüksek olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bulguya göre, mekanik özellikleri daha zayıf olan TPU katmanlarının iki bitişik PLA katmanı arasına eklenmesinin, ürettikleri PLA/TPU sandviç numunesinin dayanımını zayıflattığını belirtmişlerdir [20]. Test sonuçları Şekil 5 ve Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 5. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapıları 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 (Mechanical properties of the monolithic and the sandwich-structured FFF processed PLA/TPU with $\theta = 0^\circ/90^\circ$ and $90^\circ/0^\circ$: a) tensile strength, b) strain at break, and c) elastic modulus) [20]



Şekil 6. FDM ile işlenmiş homojen ve sandviç yapıları PLA/TPU'nun $\theta = 45^\circ/-45^\circ$ mekanik özellikleri:

a) çekme dayanımı, b) kopma uzaması ve c) elastisite modülü (Mechanical properties of the monolithic and the sandwich-structured FFF printed PLA/TPU with $\theta = 45^\circ/-45^\circ$: a) tensile strength, b) strain at break, and c) elastic modulus) [20]

Kumar ve arkadaşları, PLA ve poliamid 6 (PA6)-TiO₂ (ağırlıkça %70-%30) malzemelerini kullanarak çok malzemeli bir yapı üretilip mekanik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Üretim aşamasında katman kombinasyonları, baskı hızı ve dolgu desenindeki değişikliklerin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir ve en uygun parametrelerin hangisi olduğunu tespit etmek istemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, Dolgu hızı: 90 mm/sn, dolgu deseni: Doğrusal ve katman kombinasyonu: PLA (5 katman): PA6-TiO₂ (5 katman) çok malzemeli fonksiyonel numunelerin FDM baskısı için optimize edilmiş koşullar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, PLA/PA6-TiO₂ kombinasyonunun, saf PLA'nın (42-45 MPa) mukavemetinden daha yüksek olan 61 MPa'lık çekme mukavemeti gösterdiğini gözlemlemişlerdir [21].

Lopez ve arkadaşları, PLA, ABS ve yüksek etkili polistiren (HIPS) polimerlerini kullanarak sandviç yapılar üretmişlerdir. Aynı geometride farklı sandviç kombinasyonlarının etkisini araştırarak bu malzemelerin bir parçanın mukavemetini artırıp artıramayacağını belirlemek istemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, en iyi sandviç yapı kombinasyonunun dış katmanları PLA ve ABS çekirdek kombinasyonu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu numunede, çekme mukavemetinin 44.40 MPa (saf ABS'ye kıyasla %35 daha yüksek) ve Young modülünün 1364.25 MPa (saf ABS'ye kıyasla %30 daha yüksek) olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, bu konfigürasyon için kopma uzamasının (6.14 mm), saf ABS ve PLA örneklerine kıyasla daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. HIPS dış katmanları ve ABS çekirdekleri olan örneklerin ise diğer sandviç örneklerine kıyasla en düşük performansı gösterdiğini rapor etmişlerdir [22]. Test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Homojen ve sandviç yapıli numunelerin gerilim-uzama tepkisine ilişkin deneysel sonuçlar (Experimental results on the tensile stress-strain response for the homogeneous and sandwich-structured specimens) [22]

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

Literatür incelendiğinde, ABS ve PLA polimerleriyle sandviç yapı oluşturulduğunda, Sandviç yapının mukavemetinin saf ABS'nin çekme mukavemetine kıyasla yüksek olduğu ve mukavemeti olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Sandviç yapılarıdaki PLA miktarının yüzde olarak azalması yapının mukavemetini olumsuz yönde etkilediği gözlenmiştir. Düşük baskı hızlarında mukavemetin daha yüksek olduğu bunun da katmanlar arası yapışmanın daha kuvvetli olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Sandviç yapılarında her bir katmanının örgü açısının çekme mukavemeti belirlenmesinde baskın bir rol oynadığını görülmüştür. En yüksek mukavemetin ise çekme yönüne paralel örgü açısında olduğu anlaşılmıştır. PLA polimerinin sandviç yapılarında çekirdek malzeme yerine dış katmanlarda kullanılmasının yapının mukavemeti üzerinde olumlu yönde etkileri olduğu görülmüştür.

3.2. Üretim Parametrelerinin Eğilme Mukavemetine Etkisi (The Effect of Production Parameters on Bending Strength)

Eğilme testi, malzemenin mukavemetine ilişkin tasarım bilgilerini belirlemek ve eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla gerçekleştirilir. Bu test, malzemenin süneklik, eğilme dayanımı, kırılma dayanımı ve kırılmaya karşı direncini ölçmeye olanak tanır. Bu özellikler, bir malzemenin basınç altında bozulup bozulmayacağını değerlendirmek için kullanılabilir.

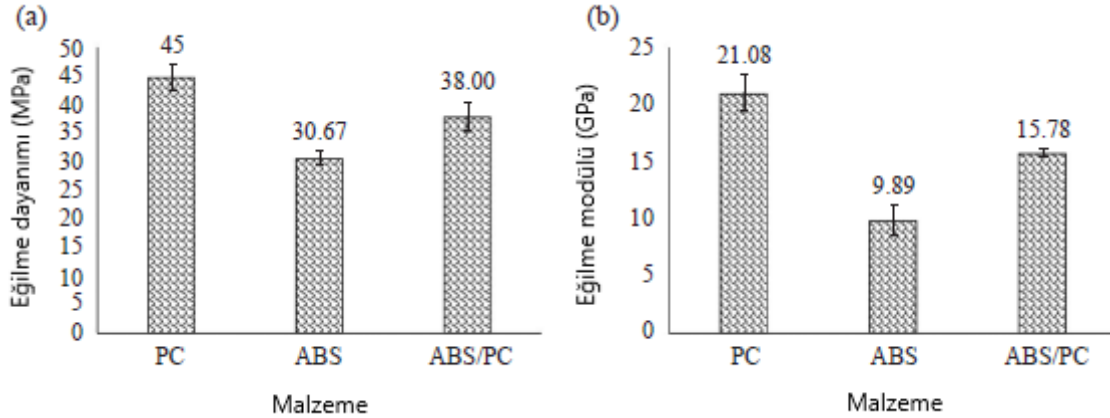
Dhinesh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı oranlarda ürettikleri PLA ve ABS numunelerinin eğme testlerini gerçekleştirmişlerdir. 0° örgü açısı ile birlikte 38 mm/sn ilerleme hızında yapılan numunelerin çok iyi sonuçlar gösterdiğini belirtmişlerdir. Sandviç numuneler arasında %50 PLA -%50 ABS numunesinin maksimum eğilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [15]. Eğme testi sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Eğilme testi sonuçları (Flexural test results) [15]

Numuneler	Uygulanan Maksimum Yük (N)	Maksimum Gerilim (MPa)	Maksimum Gerilimdeki Uzama	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% SANDVIÇ	34.43876	19.11	0.03173	9.49994
80% ABS, 20% PLA	33.68724	18.03	0.04752	8.9879

Liu ve arkadaşları, yumuşak ve sert malzemelerin üretim parametrelerinin, FDM yöntemi kullanarak ürettikleri çok malzemeli yapıların eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel ve istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada sert malzeme olarak PLA, yumuşak malzeme olarak da TPU'yu seçmişlerdir. Yumuşak-sert sandviç yapıların eğilme mukavemeti için en önemli faktörün PLA için nozul sıcaklığı olduğunu belirtmişlerdir. TPU ve PLA için baskı hızlarının da istatistiksel olarak önemli olduğunu gözlemlemişlerdir. Eğilme modülü TPU için baskı hızından önemli ölçüde etkilenirken, bunu PLA için nozul sıcaklığı ve baskı hızının takip ettiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, TPU için nozul sıcaklığının eğilme mukavemeti ve modülü üzerinde önemli bir etki göstermediğini belirtmişlerdir [23].

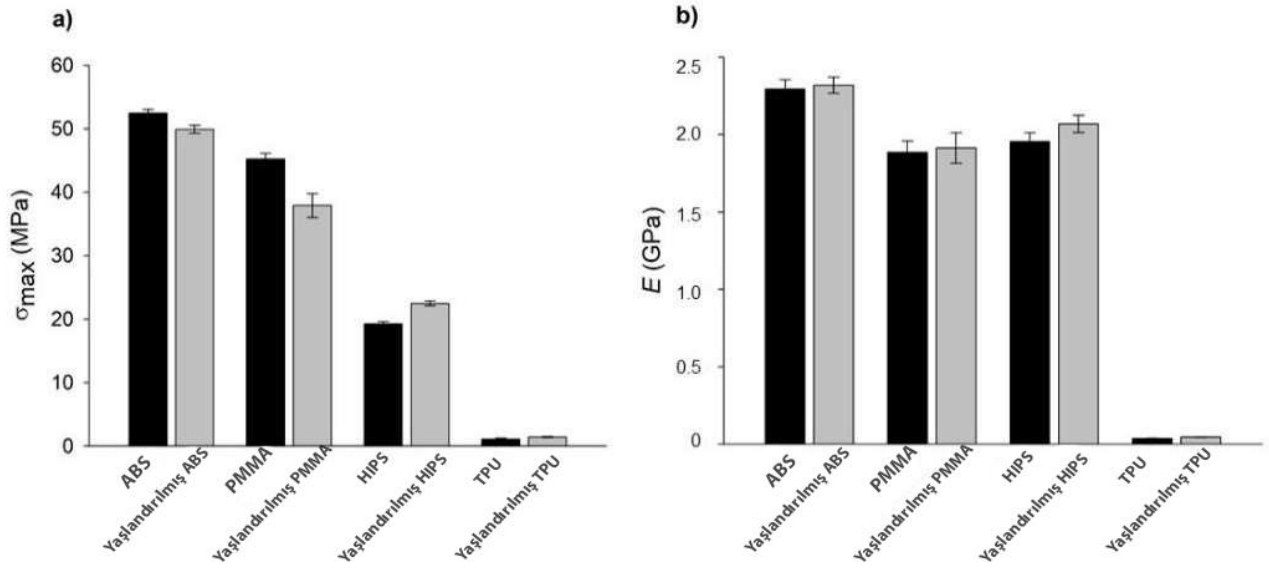
Yap ve arkadaşları, değişen baskı hızı, dolgu yoğunluğu ve nozul çapının numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çok malzemeli numuneleri, ana malzeme olarak akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve takviye malzeme olarak polikarbonat (PC) ile üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, baskı parametrelerinin optimum kombinasyonunu 60 mm/s baskı hızı, %15 dolgu yoğunluğu ve 0,8 mm nozul çapı olarak belirtmişlerdir. Test sonuçlarına göre, ABS numunelerine PC polimeri eklenmesinin, elastikiyet modülünü %23,40, eğilme mukavemetini %23,90 ve eğilme modülünü %37,33 oranında artırdığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, sünekliği de %14,31 oranında düşürdüğünü vurgulamışlardır [18]. Test sonuçları Şekil 7'de gösterilmiştir.



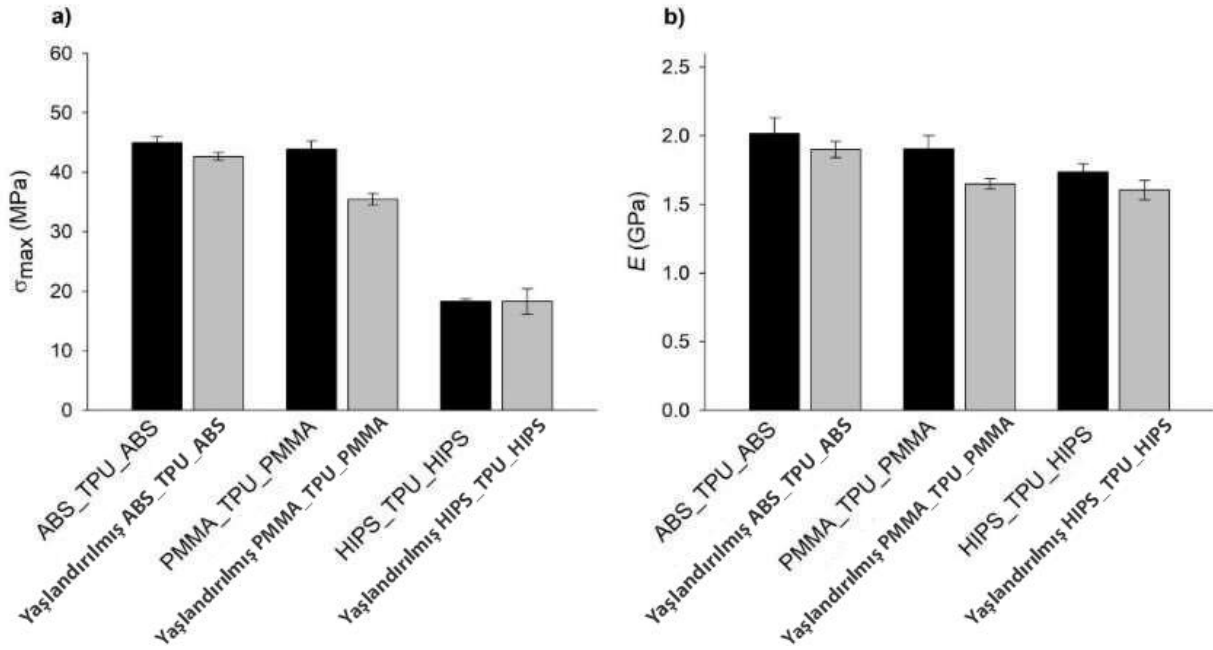
Şekil 7. 3B baskılı ABS, PC ve çok malzemeli ABS/PC numunelerinin a) eğilme dayanımı ve b) eğilme modülü. (a) Flexural strength and b) flexural modulus of 3D printed ABS, PC and multi-material ABS/PC parts [18]

Pinho ve arkadaşları, çift nozullu bir 3B yazıcı kullanarak ürettikleri sandviç yapıları numunelerin mekanik davranışlarını karşılaştırmayı amaçlamışlardır. Ayrıca bastıkları malzemeler için yaşlanmanın etkisini de incelemişlerdir. Çalışmada inceledikleri malzemeler arasında ABS, HIPS, Polimetil metakrilat (PMMA) ve TPU bulunmaktadır. Sandviç yapıların konfigürasyonunu, TPU'dan oluşan bir çekirdek ve diğer üç malzemeden birisiyle yapılan dış katmanlardan oluşturmuşlardır. Üretimi yaparken, daha iyi bir gerilim dağılımı ve daha az anizotropik mekanik davranış elde etmek amacıyla %100 çizgi (45°/-45°) dolgu deseni kullandıklarını belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarına göre en iyi eğilme mukavemetine sahip sandviç kombinasyonunun ABS-TPU-ABS olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, TPU'nun diğer malzemelerle birleştirilmesinin, basılı

numunelerin saf hallerindeki eğilme özelliklerine kıyasla olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [24]. Deney sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Kuru ve yaşlandırılmış numuneler için homojen malzemelerin 3 Nokta Eğme testlerinden elde edilen a) σ_{max} ve b) E'nin çubuk grafik gösterimi. (Bar plot representation of a) σ_{max} and b) E, which were obtained from the 3PB tests of the mono-materials for the dry and aged specimens) [24]



Şekil 9. 3 Nokta Eğme testlerinden elde edilen kuru ve yaşlandırılmış sandviç yapı numunelerinin belirlenen a) σ_{max} ve b) E değerleri. (Determined a) σ_{max} and b) E values of the dry and aged sandwich structure specimens that were obtained from the 3PB tests) [24]

Kumar ve arkadaşları, yaygın olarak kullanılan iki farklı polimer olan ABS ve TPU'nun laminat imalatını ve ASTM D790 standartlarına göre test edilen 3B baskılı numunelerin eğilme mukavemetlerini incelemişlerdir. Numuneleri üç katman halinde laminasyon yapmışlardır. Bunları, ABS-TPU-ABS (ATA) ve TPU-ABS-TPU (TAT) olmak üzere iki kategoriye ayırmışlardır. Deney sonuçlarına göre, ATA kombinasyonlu sandviç yapıların, TAT kombinasyonlu numunelere göre daha yüksek eğilme mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan testlerde saf TPU'nun eğilme mukavemeti 6.8 MPa iken TAT kombinasyonlu örnek için, eğilme mukavemeti 6.8 MPa'dan 13 MPa'ya yükselmiş olup, eğilme mukavemetinde yaklaşık %92'lik bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, ATA örneğinde TPU çekirdeğinin 1.54 mm kalınlığı için, en düşük eğilme mukavemetini (31.38 MPa) gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ancak, üç katmanın her birinin eşit

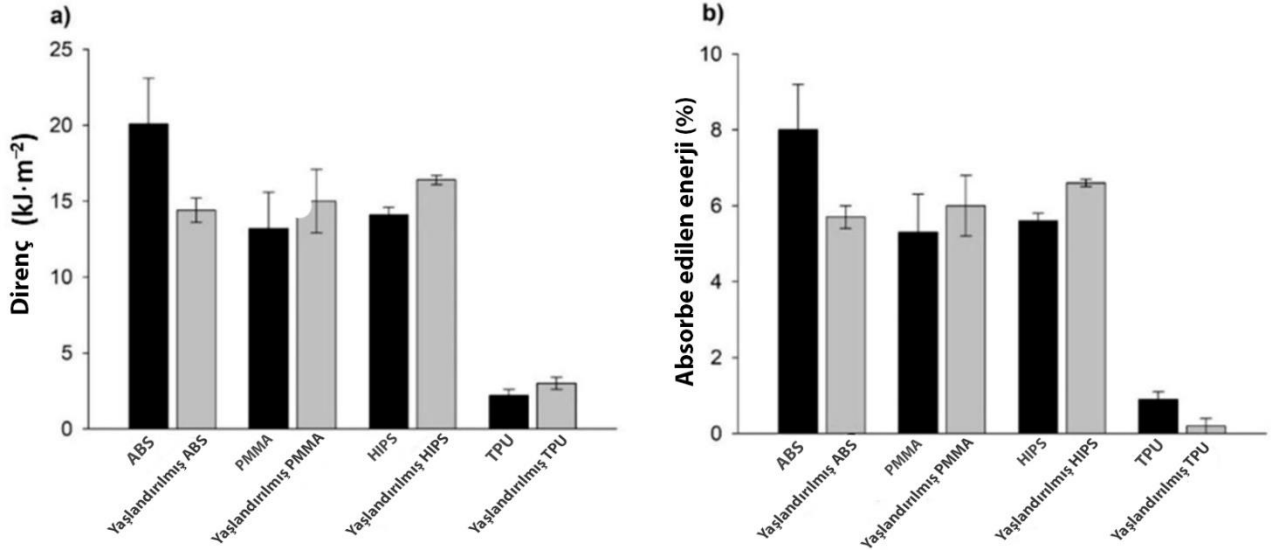
kalınlıkta olduğu (1.10 mm), ATA örnekleri için maksimum eğilme mukavemetinin kaydedildiğini (46.49 MPa) gözlemlemişlerdir [25].

Literatür incelendiğinde, PLA ve ABS karışımının (özellikle %50-%50 oranında) yüksek eğilme mukavemeti sunduğu görülmüştür. ABS polimeri, TPU ve diğer polimerler ile kombine edildiğinde, bu malzemelerin mekanik özelliklerinde belirgin farklılıklar görülmüştür. ABS-TPU-ABS kombinasyonlarının, genellikle daha yüksek eğilme mukavemeti sağladığı gözlenmiştir. PLA için nozul sıcaklığının ve TPU için baskı hızının, eğilme mukavemeti ve eğilme modülü üzerinde önemli etkiler yaptığı görülmüştür. Bu gözlemler, FDM baskı sürecinde doğru parametrelerin seçilmesinin önemini ortaya koymuştur.

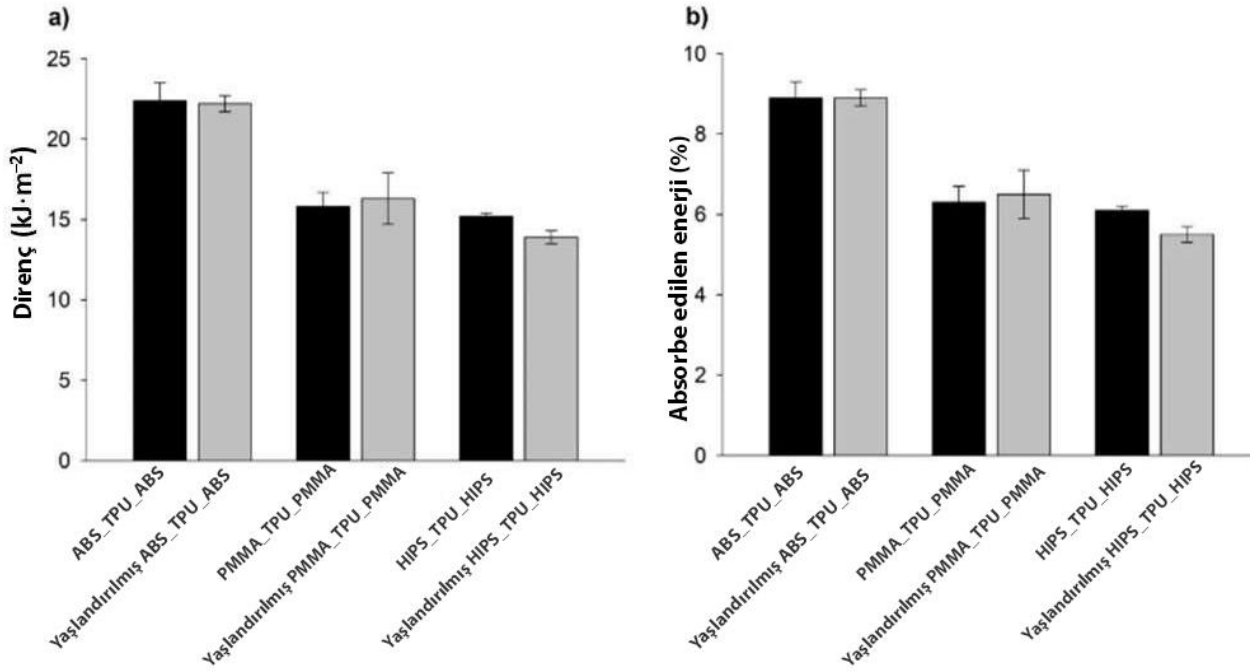
3.3 Üretim Parametrelerinin Darbe Dayanımına Etkisi (Effect of Production Parameters on Impact Strength)

Darbe testinin amacı, bir çarpışma anında malzemenin enerjii emme kapasitesini belirlemektir. Bu enerji, yapılan teste ve belirlenmek istenen özelliğe göre malzemenin tokluğunu, darbe dayanımını, darbe direncini veya kırılma direncini ölçmek için kullanılabilir. Bu değerler, malzemenin araç çarpışmaları gibi ani ve şiddetli yüklemelere dayanacağı uygulamalarda seçilmesi için kritiktir.

Pinho ve arkadaşları, farklı polimerik malzemeler kullanarak üç sandviç konfigürasyonunun mekanik özelliklerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır; ABS-TPU-ABS, PMMA-TPU-PMMA ve HIPS-TPU-HIPS. Basılı çok malzemeli sandviç yapıların mekanik davranışını, aynı baskı parametreleriyle basılan her bir saf malzeme ile karşılaştırmışlardır. Üretimi yaparken, daha iyi bir gerilim dağılımı ve daha az anizotropik mekanik davranış elde etmek amacıyla %100 çizgi (45°/-45°) dolgu deseni kullandıklarını belirtmişlerdir. Test sonuçlarına göre, direnç ve emilen enerji standart sapmaları (maksimum ve minimum değerler) göz önünde bulundurulduğunda, tek malzemeli ve çok malzemeli numuneler arasında önemli bir fark olmadığını, çok malzemeli numuneler için değerlendirilen özelliklerde hafif bir artış eğilimi olduğu gözlemlemişlerdir. Ancak, bahsedilmeye değer tek istisnanın PMMA-TPU-PMMA sandviç yapısı olduğunu, bu kombinasyonda ortalama değerlerde daha belirgin bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Test sonuçları Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 10. 3B baskılı homojen malzeme numunelerinin enine darbe testleri kullanılarak elde edilen a) direnç ve b) absorbe edilen enerjisi. (a) Resilience and b) absorbed energy of the printed mono-material specimens, which were obtained using transverse impact tests) [24]



Şekil 11. Enine darbe testleri ile belirlenen a) direnç ve b) absorbe edilen enerji. (a) Resilience and b) absorbed energy, which were determined by transversal impact tests.) [24].

Çekiç darbesiyle indüklenen hasar söz konusu olduğunda ise, tüm sandviç yapıların dış katmanlarda görünür çatlaklar gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 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 [24]. Bununla ilgili görseller Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Enine darbe testlerinden sonra 3B baskılı sandviç yapı numunelerin yüzey hasarı: a) ABS_TPU_ABS, b) PMMA_TPU_PMMA ve c) HIPS_TPU_HIPS. Ölçek çubuğu: 500 μ m. (Surface damage of the as-printed sandwich-structured specimens after the transversal impact tests: a) ABS_TPU_ABS, b) PMMA_TPU_PMMA, and c) HIPS_TPU_HIPS. Scale bar: 500 μ m) [24]

Literatür incelendiğinde, TPU, darbe enerjisinin büyük bir kısmını emip dağıtarak çatlak oluşumunu engelleyebildiği ve yapısal bütünlüğu koruyabildiği görülmüştür. TPU'nun bu özelliği, sandviç yapıların yüzeyinde oluşan çatlakların derinlemesine yayılımını durdurmaktadır. Çok malzemeli sandviç yapılar, özellikle darbe direncinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

FDM yöntemi ile üretilen sandviç yapılarda malzeme konfigürasyonu ve üretim parametrelerinin malzeme mukavemetine etkilerinin araştırıldığı çalışmamızdan elde edilen çıkarımlar, çok malzemeli sandviç yapıların, saf polimerlere göre üstün mekanik özellikler sunabileceğini göstermektedir. Özellikle, doğru malzeme kombinasyonları ve baskı parametreleri seçildiğinde, bu

yapıların çekme ve eğilme mukavemeti ile darbe dayanımı önemli ölçüde artırılabilir. TPU'nun darbe enerjisini dağıtma yeteneği, sandviç yapıların çatlak oluşumunu engellemede kritik bir rol oynamaktadır. Dolgu desenleri ve örgü açılarının dikkatli seçimi, mekanik özelliklerin optimize edilmesinde anahtar faktörlerdir. Bu bulgular, mühendislik uygulamalarında çok malzemeli 3B baskılı yapıların potansiyel kullanım alanlarını genişletmektedir. Yapılan araştırmada elde edilen bulgular şu şekildedir;

- TPU, büyük bir darbe enerjisi oranını başarıyla dağıtabilmekte ve yapısal bütünlüğü koruyabilmektedir. Bunun sebebi ise TPU'nun düşük enerji emilim yüzdesine sahip olmasından kaynaklanmaktadır.
- Farklı oranlarda üretilen PLA ve ABS numunelerinin eğilme testleri, %50 PLA - %50 ABS sandviç numunesinin maksimum eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Bu kombinasyon, PLA ve ABS'nin avantajlarını birleştirerek daha yüksek bir eğilme dayanımına ulaşmıştır.
- PLA için nozul sıcaklığının yumuşak-sert sandviç yapıların eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, TPU ve PLA için baskı hızlarının da eğilme dayanımını etkilediği gözlemlenmiştir.
- ABS ve PC ile üretilen çok malzemeli numunelerde yapılan testler, optimum baskı parametrelerinin kullanılmasıyla ABS numunelerine PC polimeri eklenmesinin eğilme dayanımını artırdığını göstermektedir.
- Sandviç yapılarda TPU çekirdeğinin kalınlığının eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- Çalışmalardan elde edilen bulgular, farklı malzeme kombinasyonlarının sandviç yapıların mekanik özelliklerini belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle PLA ve ABS gibi farklı polimerlerin bir arada kullanılması, sandviç yapıların çekme mukavemeti ve elastikiyet modülü üzerinde önemli etkilere sahiptir. En iyi performans elde etmek için malzeme kombinasyonlarının dikkatlice seçilmesi gerekmektedir.
- Sandviç yapılarda baskı parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Optimum baskı parametrelerinin belirlenmesi, çekme mukavemetini artırabilir ve elastikiyet modülünü yükseltebilir.
- Örgü açısının çekme mukavemeti üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmüştür. Özellikle çekme yönüne paralel örgü açısının maksimum mukavemeti sağladığı belirtilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. K. Özsoy, B. Duman, Eklemeli imalat (3 boyutlu baskı) teknolojilerinin eğitimde kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1): 36-48, 2017.
2. Ş. Erener, S. Boz, Modern üretim tekniklerinde eklemeli imalat sistemlerinin yeri ve kullanım alanları, *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(1): 47-56, 2021.
3. T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143: 172-196, 2018.
4. J.S. Chohan, R. Singh, K.S. Boparai, R. Penna, F. Fraternali, Dimensional accuracy analysis of coupled fused deposition modeling and vapour smoothing operations for biomedical applications, *Composites Part B: Engineering*, 117: 138-149, 2017.
5. O.A. Mohamed, S.H. Masood, J.L. Bhowmik, Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, *Advances in manufacturing*, 3: 42-53, 2015.
6. B.D. de Castro, F.D.C. Magalhães, T.H. Panzera, J.C. Campos Rubio, An assessment of fully integrated polymer sandwich structures designed by additive manufacturing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30: 5031-5038, 2021.
7. H.Y. Sarvestani, A.H. Akbarzadeh, A. Mirbolghasemi, K. Hermenean, 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability, *Materials & Design*, 160: 179-193, 2018.

8. I. Ullah, M. Brandt, S. Feih, Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures, *Materials & Design*, 92: 937-948, 2016.
9. H. Mozafari, S. Khatami, H. Molatefi, Out of plane crushing and local stiffness determination of proposed foam filled sandwich panel for Korean Tilting Train eXpress–Numerical study, *Materials & Design*, 66: 400-411, 2015.
10. Y. Feng, H. Qiu, Y. Gao, H. Zheng, J. Tan, Creative design for sandwich structures: A review, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17(3): 1729881420921327, 2020.
11. N. Kladovasilakis, P. Charalampous, K. Tsongas, I. Kostavelis, D. Tzetzis, D. Tzouvaras, Experimental and computational investigation of lattice sandwich structures constructed by additive manufacturing Technologies, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3): 95, 2021.
12. V. Acanfora, R. Castaldo, A. Riccio, On the effects of core microstructure on energy absorbing capabilities of sandwich panels intended for additive manufacturing, *Materials*, 15(4): 1291, 2022.
13. A. Rahimijonoush, M. Bayat, Experimental and numerical studies on the ballistic impact response of titanium sandwich panels with different facesheets thickness ratios, *Thin-Walled Structures*, 157: 107079, 2020.
14. H.P. Konka, M.A. Wahab, K. Lian, On mechanical properties of composite sandwich structures with embedded piezoelectric fiber composite sensors, *ASME. J. Eng. Mater. Technol.*, 134(1): 011010, 2012.
15. S.K. Dhinesh, P.S. Arun, K.K. Senthil, A. Megalingam, Study on flexural and tensile behavior of PLA, ABS and PLA-ABS materials, *Materials Today: Proceedings*, 45: 1175-1180, 2021.
16. P.K. Patro, S. Kandregula, M.S. Khan, S. Das, Investigation of mechanical properties of 3D printed sandwich structures using PLA and ABS, *Materials Today: Proceedings*, 2023.
17. P.K. Mishra, P. Senthil, 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, 2020.
18. P.V. Yap, M.Y. Chan, S.C. Koay, 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, 2021.
19. F. Wang, Y. Ji, C. Chen, G. Zhang, Z. Chen, Tensile properties of 3D printed structures of polylactide with thermoplastic polyurethane, *Journal of Polymer Research*, 29(8): 320, 2022.
20. B. Arifvianto, B.E. Satiti, U.A. Salim, Suyitno, A. Nuryanti, M. Mahardika, Mechanical properties of the FFF sandwich-structured parts made of PLA/TPU multi-material, *Progress in Additive Manufacturing*, 7(6): 1213-1223, 2022.
21. S. Kumar, R. Singh, M. Singh, 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, 2022.
22. D.M. Baca Lopez, R. Ahmad, Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling, *Polymers*, 12(3): 651, 2020.
23. Q. Liu, Z. Zhang, D. Yavas, W. Shen, D. Wu, Multi-material additive manufacturing: effect of process parameters on flexural behavior of soft-hard sandwich beams, *Rapid Prototyping Journal*, 29(5): 885-896, 2023.
24. A.C. Pinho, A.P. Piedade, Sandwich multi-material 3D-printed polymers: influence of aging on the impact and flexure resistances, *Polymers*, 13(22): 4030, 2021.
25. S. Kumar, I. Singh, S.S.R. Kolor, D. Kumar, M.Y. Yahya, On laminated object manufactured FDM-printed ABS/TPU multimaterial specimens: An insight into mechanical and morphological characteristics, *Polymers*, 14(19): 4066, 2022.