

3B PLA Esaslı Malzemelerin Sandalye Tasarımı için Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi

Nergizhan Anaç¹

Oğuz Koçar²

Erhan Baysal³

Furkan Parmaksız⁴

Zeynep Hale Şimşir⁵

Bilal Kaya⁶

Özet

Bu çalışmada, ilk olarak eriyik yığılma modelleme (EYM) tekniğiyle farklı nozul çapları (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm) kullanılarak üretilen PLA Wood ve PLA Plus (PLA +, polilaktik asit) parçaların özellikleri (sertlik, çekme ve eğme mukavemetleri, renk, yüzey pürüzlülüğü) incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, 3B yazdırılmış sandalye üretiminde kullanılacak bu malzemelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Daha sonra 3B üretilen malzemelerin verileri kullanılarak bir sandalye tasarımı üzerinde sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Çalışma kapsamında, nozul çaplarının 3B yazdırma ile üretilen parça özelliklerine etkisi ve sandalye malzemesi olarak kullanılabilirliğine ilişkin çeşitli öneriler sunulmuştur. Sonuçlar,

- 1 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 2 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 3 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Zonguldak
- 4 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 5 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye
- 6 Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

nozul çaplarına göre numune renklerinin değişmediğini fakat PLA Plus malzemesinin PLA Wood'a kıyasla daha yüksek sertlik, çekme ve eğme dayanımı sağladığını göstermiştir. PLA Wood parçaların yüzey pürüzlülüğü, PLA Plus numunelerden yüksek bulunmuştur. Sonlu elemanlar ile yapılan analizlerde malzeme türüne (PLA Plus / PLA Wood) bağlı olarak, eşdeğer gerilme değerleri kayda değer farklılıklar göstermemiştir. Her iki malzemede nozul çapına bağlı olarak deformasyon büyüklüklerinde belirli varyasyonlar gözlemlenirken en az deformasyon miktarı 1 mm nozul çapında basılan PLA Plus malzemede meydana gelmiştir.

Giriş

Katmanlı imalat olarak da bilinen eklemeli imalat, son yıllarda imalat sektöründe öne çıkan en yenilikçi yöntemlerden biri olmuş ve kısa sürede yerini sağlamlaştırmıştır. Temel olarak süreç, 3B model verilerine dayanarak malzemenin katman katman üst üste yerleştirilmesiyle nesnelerin oluşturulmasıyla gerçekleşir. Yöntem, talaş kaldırmadan parça üretme esasına dayandığından, talaşlı imalat teknolojisinden oldukça farklıdır. Geleneksel işlemler kullanılarak inşa edilmesi çok zor veya maliyetli olan daha hafif ve karmaşık tasarımların oluşturulmasına imkân tanır. Eklemeli imalatla kullanılabilen çeşitli malzeme grupları (plastik, seramik, metal) ve üretim teknikleri (eriyik yığma modelleme, **stereolitografi**, **seçici lazer sinterleme**, **toz yatak füzyonu vb.**) vardır. Bununla birlikte eklemeli imalat tekniğinde yaygın olarak 3B yazıcılar ile eriyik yığma modelleme tekniği kullanılırken [1], en fazla tercih edilen malzeme polilaktik asit (PLA) olmuştur [2, 3]. PLA; mısır, patates, şeker kamışı, cassava kökleri ve şeker pancarları gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, baskı kolaylığı sağlaması ve çevre dostu olması sebebiyle sevilen bir termoplastik polimerdir. Buna rağmen, darbe dayanımı ve termal etkilere karşı sınırlamalarının bulunması bazı uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır [4]. Bu nedenle son birkaç yıldır polimer harmanlama benzeri teknikler kullanarak PLA'nın özelliklerinin değiştirilmesi için çaba sarf edilmektedir [5]. Kırpılmış karbon, bazalt veya cam elyafı gibi kısa liflerin takviye olarak kullanıldığı PLA karışımları olduğu gibi [6]; bambu, ahşap lifleri, odun unu, zeytin ağacı, soya kabukları ve soya proteini, mantar, kakao çekirdeği kabuğu ve kenevir lifi gibi doğal dolgu maddelerinin olduğu PLA karışımları da vardır [7].

3B yazdırma tekniğinin; birden fazla malzeme içeren, farklı doluluk oranlarına ve desenli içyapılara sahip kompleks parçaların imal edilebilmesine olanak sağlayan özel yetenekleri sayesinde üretim potansiyeli çok yüksektir. Yöntem; havacılık ve uzay, otomotiv, denizcilik, inşaat, gıda, sağlık, mimari ve ev dekorasyon sektörleri olmak üzere birçok alanda kullanılabilmektedir

[8]. Bununla birlikte, 3B yazıcılar ile üretimi yapılan parçaların mekanik özelliklerini ve yüzey özelliklerini etkileyen birçok parametre vardır. Parça yazdırma parametreleri [9, 10]; yazdırılacak malzeme çeşidine, markasına, ortam şartlarına ve baskı alınacak 3B yazıcı cihazının özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Ayrıca katman kalınlığı, nozul çapı, baskı hızı dolgu oranı ve dolgu deseni gibi parametreler ürün kalitesi üzerinde etkili olan diğer işlem parametrelerinden bazılarıdır [11, 12]. Bunların dışında, parça basımıyla ilgili ayarlar dilimleme programları üzerinde yapılarak ürün kalitesi değiştirilebilmektedir [13].

3 boyutlu yazıcı kullanımının artışına bağlı olarak 3B yazdırma; karmaşık geometrilere tasarım özgünlüğü, kişiselleştirilebilir üretim, düşük maliyet ve üretim hızındaki avantajları sayesinde mobilya sektöründe sürdürülebilir yeni bir üretim teknolojisi olarak dikkat çekmiştir [14]. Fakat 3B yazıcı teknolojisinin bu alandaki en büyük kısıtlamalarından biri, polimerlerin filament formunda beslenmesi gerekliliğidir [15]. Mobilya endüstrisinde polimer (matris) ve ahşap (dolgu) kullanılarak oluşturulan geleneksel ahşap-polimer kompozitlerin alternatifi olarak, 3B baskı teknolojisi için içeriğinde gerçek ahşap takviye malzemeleri bulunan filamentler geliştirilmiştir [16]. Filament üreticilerinin ürün bileşimleri % 20-40 ahşap (huş, sedir, bambu, mantar, abanoz, çam, zeytin ve hindistan cevizi vb.) ve % 60-80 oranında polimerden oluşmak üzere içerik farklılıkları göstermektedir [17]. Yakın zamanda biyoplastik granül hammadde kullanımına uygun 3B yazıcıların geliştirilmesiyle 1/1 boyutlarda sandalye, koltuk, tabure, masa gibi mobilya ürünlerinin tasarımı ve üretilmesi mümkün olmuştur [18-21].

3B mobilyalar, dijital ve robotik sistemlere sahip daha büyük ölçekli yazıcılarla basılmaktadır. Oysaki geleneksel mobilya yapımında işçilik önemlidir ve imalat sonrası bol miktarda malzeme atığı ortaya çıkar. 3B yazıcılarla üretimde farklı olarak modüler, sürdürülebilir ve malzeme israfının azaltıldığı bir süreç vardır. 3B tasarım mobilyalarının üretiminde kullanılan yazıcıların büyüklüğü ve nozul çapları, genel kullanıcıların tercih ettiği standart 3B yazıcı boyutları ve nozul çaplarından oldukça fazladır.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, 3B yazıcı teknolojisi hakkında çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen 3B yazıcı ile üretilmiş tasarım mobilyalarla ilgili çalışmaların [22] sınırlı olduğu anlaşılmıştır. Gündelik hayatta konfor için sıklıkla kullandığımız eşyalardan biri, ev ve ofis tipi mobilyalar arasında yer alan sandalyelerdir. 1960'larda plastik malzeme üretim maliyetinin düşmesi ile birlikte seri üretim plastik sandalyeler mobilya sektörüne girmiştir. Piyasada çok fazla çeşidi olan sandalye gibi bir ürünün yıllardır yapılan geleneksel üretiminde dahi mühendislik hesaplamalarının

eksik olduğu düşünüldüğünde [23], 3B teknolojisi ile üretilmiş sandalyelerin dayanıklılığı konusunda üreticiye ve tüketiciye yol göstermeye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu doğrultuda sonlu elemanlar analizleri de kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, tasarlanan modeller, değişken kuvvetlere bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak üretimden önce oluşabilecek riskler belirlenmektedir. Üretici oluşabilecek risklere karşı tasarımı ya da malzemede değişiklik yapabilmektedir. Song ve arkadaşları sonlu elemanlar metodu (SEM) ile dayanım, yorulma ve darbe analizi yaparak prototip bir sandalye üretmiştir. Çalışmaya göre, üretilen model üzerinde yapılan gerçek testlerde yapısal hasara uğramayan sandalye, SEM yazılımlarının yeni ve konforlu eğimli mobilyalarda tasarım verimliliğini artırarak fazla malzeme kullanılmasını engellediğini ifade etmektedir [24]. Ağaç ve ağaç esaslı beş farklı malzemenin (sarıçam, doğu kayını, yonga levha, okume kontrplak ve orta yoğunlukta lif levha) kullanıldığı bir çalışmada araştırmacılar üç farklı tipte olacak şekilde koltukları üretmeden önce iskeletlerini SEM ile analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda kritik birleştirmelerin yerleri belirlenmiş ve kuvvet taşıma kapasiteleri tartışılmıştır. Gerçek testlerde elde edilen bulgular en iyi değerlerin Doğu kayını odununda tespit edilmesine rağmen üretim aşamasında stabilite, kolaylık ve ekonomik nedenlere bağlı olarak okume kontrplak ve orta yoğunlukta lif levha'nın Doğu kayınına tercih edilebileceği sonucuna varmışlardır [25].

Bu çalışmanın amacı 3B malzemelerin mobilya üretiminde kullanılabilirliğini değerlendirmek ve bu malzemelerden üretilen sandalye çerçevelerinin sonlu elemanlar analizini yaparak standartlarda belirtilen yüklemeler altında sandalye çerçevelerinin davranışını önceden tahmin edebilmektir.

MATERYAL VE METOT

Filament Özellikleri

Çalışmada, Esun (Shenzhen, Çin) marka kırmızı renkli PLA + ve Filameon (Kayseri, Türkiye) marka açık kahverengi renkli PLA Wood filamentler kullanılmıştır. Tablo 1'de filament malzemelerin mekanik özellikleri sunulmuştur. Üreticisi tarafından geliştirilmiş bir polilaktik asit (PLA) türü olarak tanımlanan PLA Plus filament, %2 kalsiyum karbonat içeriği sayesinde yüksek çekme mukavemeti ve yüzey kalitesi sağlamaktadır [26, 27]. Bu filament, geleneksel PLA'nın nem emilimi, katman yapışması ve kırılgnalık gibi zayıflıklarını gidermek amacıyla geliştirilmiştir.

PLA Wood [28] ise %30 oranında ahşap tozu takviyesiyle üretilmiş, estetik bir görünüme sahip ancak mekanik dayanımı nispeten daha düşük

olan bir kompozit PLA'dır. Ahşap benzeri dokusu ve görünümü nedeniyle genellikle eğitim, tasarım ve hobi projelerinde tercih edilmektedir.

Tablo 1. Kullanılan Malzemelerin Mekanik Özellikleri [28, 29]

Mekanik Özellikler	PLA +	PLA Wood
Yoğunluk (g/cm ³)	1,24	1,13
Çekme Dayanımı (MPa)	50	47
Çekme Uzaması (%)	20	-
Çapı (mm)	1.75	1.75

Kullanılan Nozuller

Piyasada farklı uç çaplarında ve çeşitli malzemelerden üretilmiş nozul tipleri bulunmaktadır. 3B baskı sürecinde nozul seçimi, kullanılan filament malzemesine ve üretilcek parçanın hassasiyetine göre yapılmaktadır. Bu çalışmada, pirinç malzemeden üretilmiş CSATech (Kocaeli, Türkiye) markalı, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm çaplarında nozuller kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Deneylerde Kullanılan Nozuller a) Kullanılan nozullerin şematik gösterimi b) Baskı işleminden sonra nozullerin görünümü

Literatürdeki çalışmalar, küçük nozul çaplarının daha yüksek yüzey kalitesi ve detay hassasiyeti sağladığını ancak dezavantaj olarak baskı süresini uzattığını göstermektedir. [30, 31]. Nozul çapı, aynı zamanda katmanlar arası

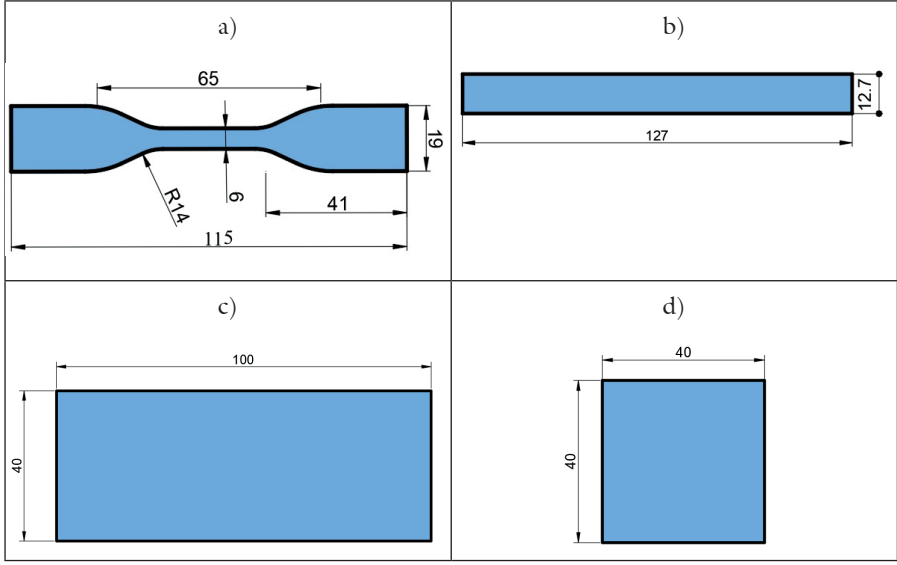
yapışma kalitesini ve parçanın mekanik dayanımını doğrudan etkileyen kritik bir parametredir [32]. Bu parametrenin mekanik özellikler, gözeneklilik, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal kalite ve yoğunluk üzerindeki etkileri, güncel araştırmaların odak noktası olmaya devam etmektedir [32, 33].

Numune Üretim Süreci

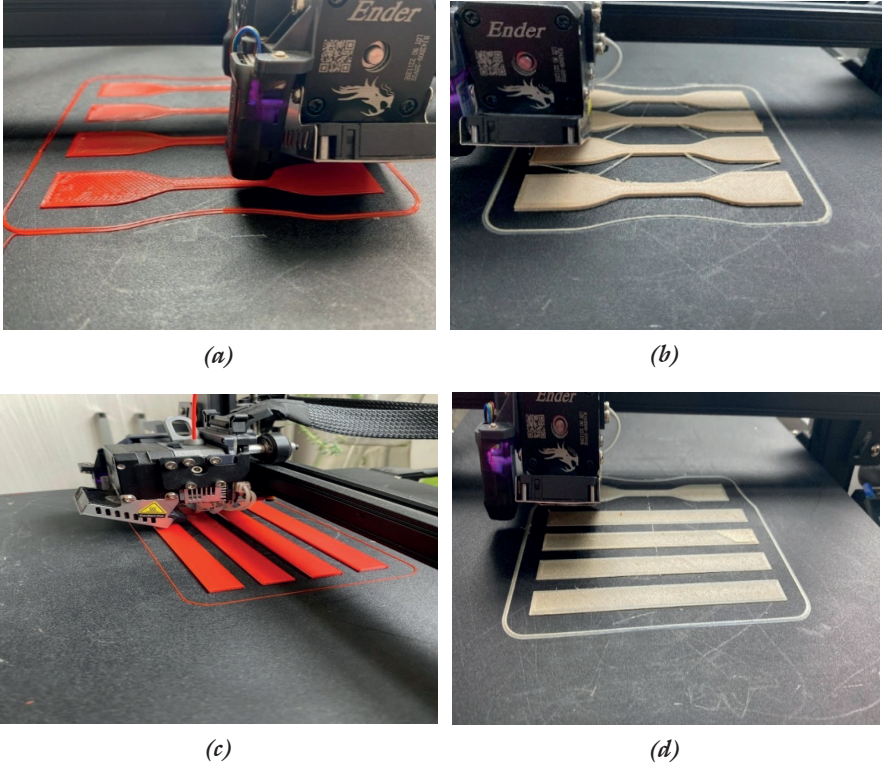
Numunelerin üretimi için EYM prensibiyle çalışan Crealty Ender 3 S1 3B yazıcı kullanılmıştır. Üretilen malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM D790 standartına uygun üç nokta eğme testi [34] ve ASTM D638 Tip IV standartında çekme testi [35] numuneleri üretilmiştir. Bu testlere ek olarak; renk, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerinin tespiti amacıyla 100x40x4 mm boyutlarında dikdörtgen plakalar üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen tüm numunelerin katı modelleri Solidworks 2024 programında hazırlanmış ve “stl” formatına çevrilerek Ultimaker Cura 5.9.0 programı kullanılarak, Tablo 2’de verilen baskı parametreleri kullanılarak dilimlenerek baskıya uygun hale getirilmiştir. Şekil 2’de çekme (a), eğme (b), renk/yüzey pürüzlülüğü (c) ve sertlik (d) ölçüm numunelerinin (yüzey pürüzlülüğü nerede) boyutları gösterilmiştir. Çalışmada, farklı nozul çaplarının (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ve 1.0 mm) etkilerini incelemek amacıyla, her bir çap için ayrı numune setleri basılmıştır. Her baskı seti öncesinde, yazıcıya uygun nozul çapı takılmıştır ve nozul değişim işleminin ardından yazıcının tabla ve nozul kalibrasyonu dikkatle yapılmıştır. Bu sayede nozul değişimi ardından, tabla ile nozul arasında oluşabilecek mesafe farkının önüne geçilerek ilk katman yapışma probleminin önüne geçilmiş, buna bağlı olarak da baskı kalitesi korunmuştur. Şekil 3’te 3B yazıcıda basılan çekme ve eğme numuneleri görülmektedir.

Tablo 2. Baskı Parametreleri

Özellikler	PLA Plus	PLA Wood
Katman Kalınlığı (mm)	0.2	0.2
Doluluk Oranı (%)	100	100
Nozul Sıcaklığı (°C)	207	215
Tabla Sıcaklığı (°C)	60	65
Baskı Hızı (mm/s)	60	50
Duvar Sayısı	3	3



Şekil 2. Çekme (a), eğme (b), renk (c) ve sertlik (d) ölçüm numunelerinin teknik resmi (ölçüler mm'dir)

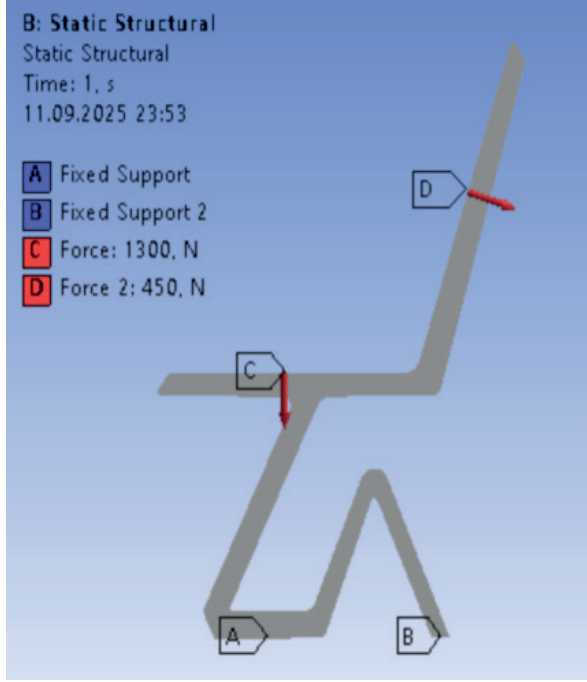


Şekil 3. Çekme numuneleri a) PLA Plus, b) PLA Wood ve eğme numuneleri c) PLA Plus, d) PLA Wood

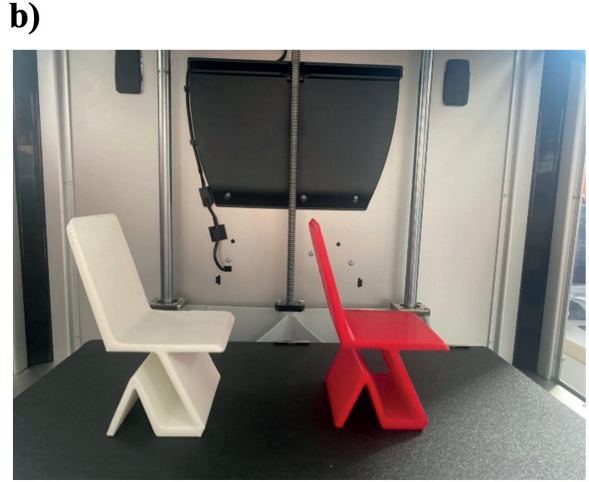
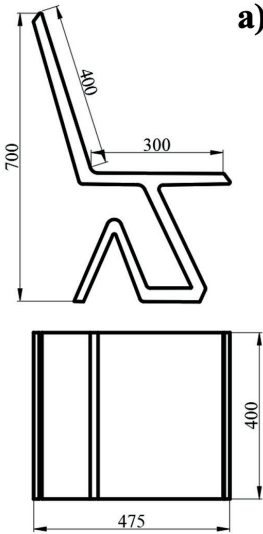
Çalışmada, PLA Wood numunelerin 0.2 mm nozul çapı ile basımı başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Bunun sebebi, filamentin %30 oranında ahşap tozu içermesi ve bu partiküllerin küçük nozul çaplarının kullanıldığı ekstrüzyon işleminde clogging adı verilen yazdırma problemine yol açıp nozülü tıkamasıdır. Küçük nozul çapları, ince detaylı uygulamalar için kritik olan daha yüksek detay ve hassasiyeti sağlamasına rağmen, genellikle daha uzun üretim sürelerine ve tıkanma riskinin artmasına neden olabilmektedirler [31]. Bu nedenle belirli malzeme gruplarının ve uygulama alanlarının gereksinimlerine göre nozul çapının optimize edilmesi, üretim performansını iyileştirecektir.

Sonlu Elemanlar Modeli

Sandalye çerçevesinin yapısal analizi, ticari sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS 2021 R2 Workbench programında yapılmıştır. Sandalye tasarımı Grabcad3B model paylaşım sitesinden alınmıştır [36]. Çizimler Autodesk Fusion programında yapılmış ve parasolid olarak Ansys programına aktarılmıştır. Ansys Workbench malzeme kütüphanesinde çekme testleri sonuçlarına göre her bir nozul çapı için deneysel çalışmalardan elde edilen PLA Plus ve PLA Wood özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. PLA Wood için 0.2 mm nozul çapında baskı alınamadığı için analizlere dahil edilmemiştir. Bölüntüleme sıklığı çözüm sonuçlarını etkilemektedir ve bu nedenle bölüntüleme sıklığı optimizasyonu yapılmıştır. Analizler için 5 mm'den sonra sonuçların pek fazla değişmemesi ve 2 mm'den sonra analiz süresinin çok fazla uzaması nedeniyle bölüntüleme sıklığı 2 mm alınmıştır [37]. Şekil 4'te sandalye tasarımına ait sınır şartları verilmiştir. Şekil 5'te sandalye ölçüleri ve 3B yazıcıda basılmış sandalyenin görseli verilmiştir.



Şekil 4. Sandalye tasarımına ait sınır şartları



Şekil 5. a) Sandalyenin teknik resmi b) Sandalyenin ölçekli prototipi

İlk olarak sandalye, zemine temas eden yüzeylerden sabitlenmiştir. TS 9215 [38] standardına göre referans alınan kuvvet değerleri yaslanma yüzeyine 450

N ve oturma yüzeyine 1300 N olarak uygulanmıştır. Diğer yandan eklemeli imalat ile üretilen parçaların sonlu elemanlar ile incelenmesinde bazı sınırlar bulunmaktadır. Eklemeli imalat, baskı yönüne göre malzemelerin mekanik özellikleri değişkenlik gösterir [39, 40]. Ayrıca eklemeli imalat ile üretilen parçalarda gözenek, çatlak ya da bağlanma gibi kusurlar sonlu elemanlar analizinde hesaba katılmamakla birlikte modellenmesi de zordur. Sayısal modelleme üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır [41]. Bu çalışmada Sonlu elemanlar analizi yapılacak obje olarak sandalye tercih edilmiştir. Çünkü kullanıcı konforunun artmasına yardımcı olacak insan vücudunun şekline uyum sağlayabilen farklı tasarımda sandalyeleri 3B baskı ile üretmek mümkündür [42].

Mekanik ve Optik Özelliklerin Belirlenmesi için Yapılan Testler

Mekanik Testler

3B baskı ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme, üç nokta eğme testleri ve sertlik ölçümü gibi mekanik testler uygulanmıştır. Çekme ve üç nokta eğme testleri WDW-5 model 5 kN kapasiteli universal çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ASTM D638 (Tip IV) standardına göre imal edilen numunelerle çekme, ASTM D790 standardına uygun üretilen numunelerle ise üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Her iki test de oda sıcaklığında dört tekrar olarak gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri 1 mm/dak, eğme testleri ise 5 mm/dak hızında uygulanmıştır.

Sertlik ölçümü

Numunelerin sertlik değerleri, Loyka (İstanbul, Türkiye) LX-D-2 model Shore D durometresi ile ölçülmüştür. Her bir numunenin sertliği, rastgele seçilen beş farklı noktadan alınan ölçümlerin ortalamasıyla belirlenmiştir.

Renk ve yüzey pürüzlülüğü analizi

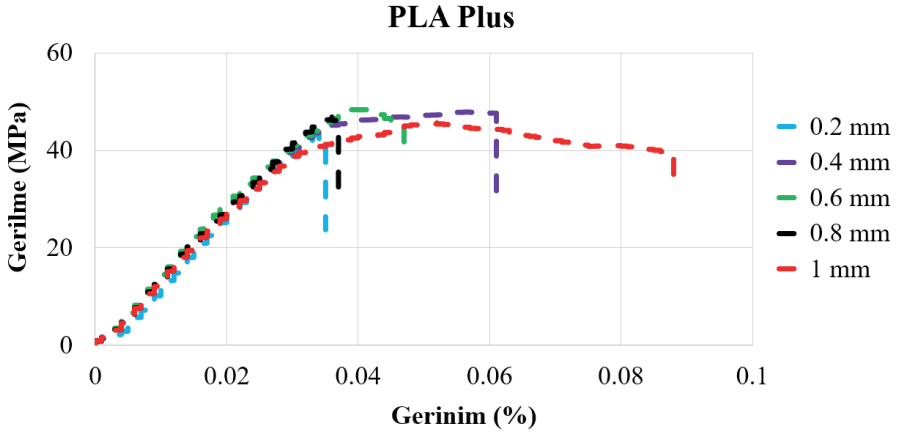
Renk değerlerinin belirlenmesi için CHNSpec (Hangzhou, Çin) marka CS410 model spektrokolorimetre kullanılmıştır. Numunelerin CIELAB skalasında L^* , a^* ve b^* değerleri alınarak renk ölçümü yapılmıştır. Bu sisteme göre L^* (açıklık-koyuluk beyaz için $L^* = 100$, siyah için $L^* = 0$), a^* (yeşil-kırmızı, $+a^*$ kırmızılığı, $-a^*$ yeşili) ve b^* (açık mavi-sarı, $+b^*$ sarılığı, $-b^*$ maviyi) temsil edilen parametrelerdir. CIELAB skalasında bir renk tonunu, $L^*a^*b^*$ koordinatları tanımlar. Çalışmada her bir numune üzerinden dört ölçüm alınmış, farklı renkteki numunelerin renk değerleri bu ölçümlerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Numunelerin aritmetik ortalama yüzey

pürüzlülüğü (Ra) değeri, Mitutoyo (Kawasaki, Japonya) marka SJ301 model portatif yüzey pürüzlülüğü cihazıyla ölçülmüştür. Değerler her numuneden beş tekrarlı olarak okunmuş ve ortalamaları alınmış ve bu değer üzerinden belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

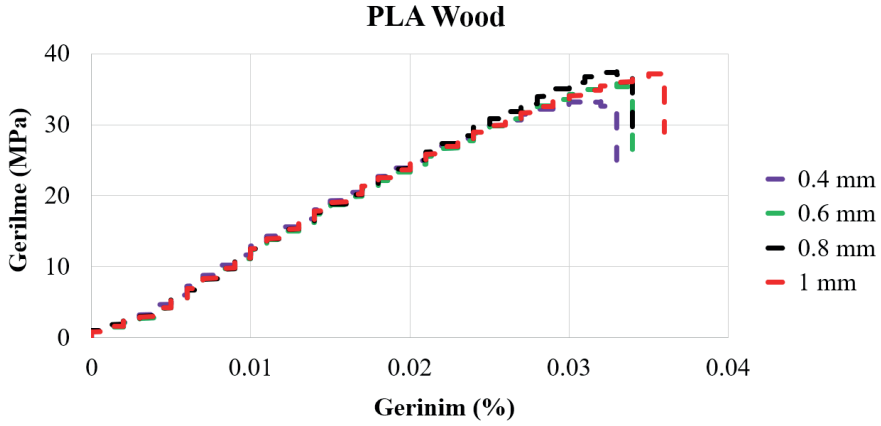
Çekme Test Sonuçları

Şekil 6'da farklı nozul çapları kullanılarak hazırlanan PLA Plus çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. Nozul çapı arttıkça parçalar daha sünek bir performans göstermişlerdir. Nozul çapı 0,6 mm olduğunda en yüksek çekme dayanımı (48.6 MPa) elde edilirken, en fazla şekil değişim miktarı 1 mm nozul çapında meydana gelmiştir.



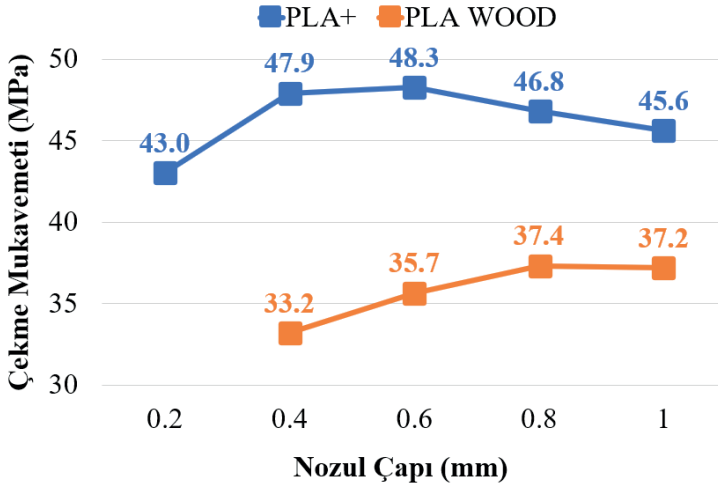
Şekil 6. PLA Plus gerilme-gerinim grafiği

Şekil 7'de farklı nozul çapları kullanılarak hazırlanan PLA Wood çekme numunelerinin gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir. PLA Wood malzemelerde 0.8 mm nozul çapına kadar hem çekme dayanımı hem de şekil değiştirme miktarı artmaktadır. Nozul çapı 0.8 mm'de en yüksek çekme dayanımı (37,4 MPa) elde edilirken 1 mm nozul çapı için çekme dayanımı (37,2 MPa) çok az miktarda düşme eğilimi göstermektedir.



Şekil 7. PLA Wood gerilme-gerinim grafiği

Şekil 8’de nozul çapına bağlı olarak PLA Plus ve PLA Wood malzemelerinin çekme mukavemetleri karşılaştırılmaktadır. PLA Plus numunelerde çekme dayanımı 0.2 mm nozul çapında 43 MPa iken 0.6 mm’de 48.3 MPa ile en yüksek değere ulaşmıştır. 1.0 mm çapında dayanımda hafif bir düşüş (45.6 MPa) gözlenmektedir. PLA Wood numunelerde ise çekme dayanımı nozul çapı arttıkça düzenli olarak yükselmiş ve 0.8 mm’de 37.4 MPa ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



Şekil 8. PLA Plus ile PLA Wood çekme mukavemeti karşılaştırılması

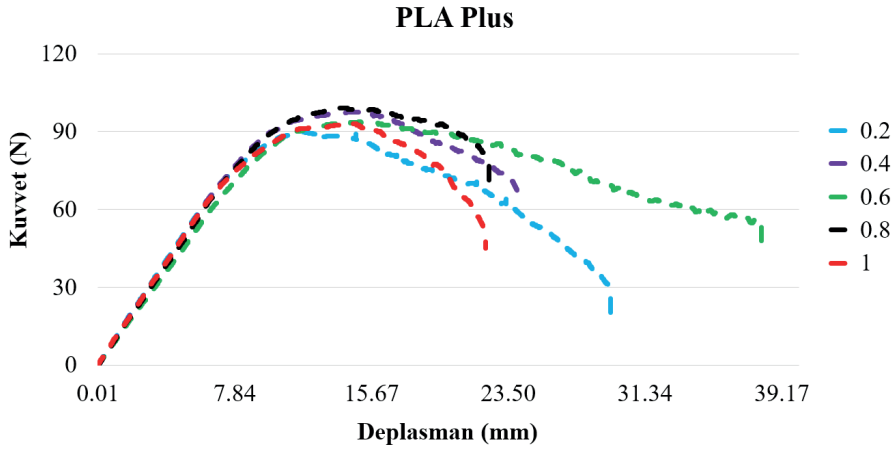
Czyżewski ve çalışma arkadaşları, PLA ürünlerinde farklı nozul çapları (0.2, 0.4, 0.8 ve 1.2 mm) kullanarak gerçekleştirdikleri testlerde, en yüksek çekme dayanımının 0.8 mm nozul çapında, en düşük çekme dayanımının ise 0.2 mm nozul çapında elde edildiğini bildirmiştir. Ayrıca, çalışmada nozul çapının 0.8 mm'den 1.2 mm'ye çıkarılmasıyla PLA'nın çekme dayanımının azaldığı belirtilmiştir [43]. Benzer şekilde, bu çalışmada da PLA Plus için 0.6 mm, PLA Wood için ise 0.8 mm nozul çapından itibaren mekanik özelliklerde bir düşüş gözlenmiştir. Her iki çalışma da belirli bir nozul çapının aşılmasının mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere yol açtığını ortaya koymaktadır. Çekme testinde ölçülen gerilme ve gerinim değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. PLA Plus ile PLA Wood gerilme ve gerinim değerleri

Nozul Çapları	PLA Plus		PLA Wood	
	Gerilme (MPa)	Gerinim (%)	Gerilme (MPa)	Gerinim (%)
0.2 mm	43.0 ± 1.1	2.8	-	-
0.4 mm	47.9±1.9	6.1	33.2±0.9	3.3
0.6 mm	48.3±1.8	4.7	35.7±0.7	3.4
0.8 mm	46.8±0.8	3.7	37.4±0.3	3.4
1 mm	45.6±1.2	8.8	37.2±1.5	3.6

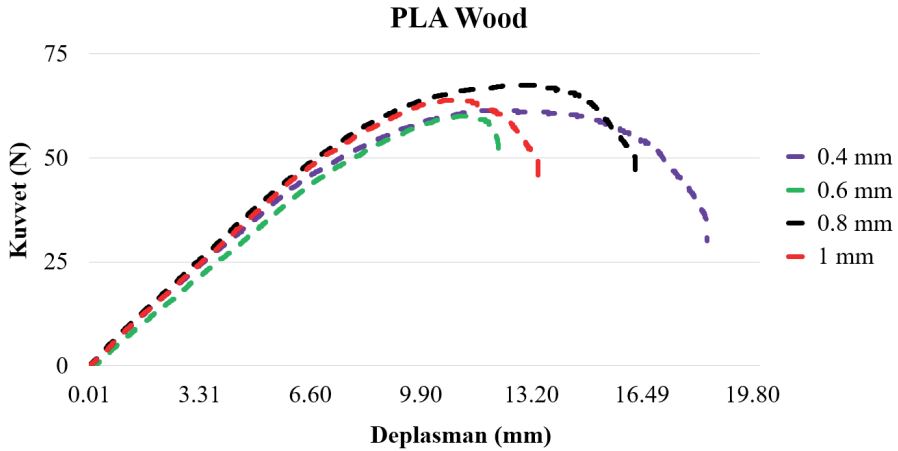
Eğme Test Sonuçları

Şekil 9'da PLA Plus numunelerinin nozul çapına göre karşılaştırılmış eğme testi sonucu kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. PLA Plus'ta eğme kuvveti 0.8 mm çapında nozul için 99.1 N olarak en yüksek değerdedir. Diğer kuvvet değerleri yüksekten düşüğe doğru sırasıyla 0.4 mm nozul çapında 97.4 N, 1 mm nozul çapında 93 N, 0.6 mm nozul çapında 92.8 N ve 0.2 nozul çapında 89.9 N olarak tespit edilmiştir.



Şekil 9. PLA Plus kuvvet- deplasman grafiği

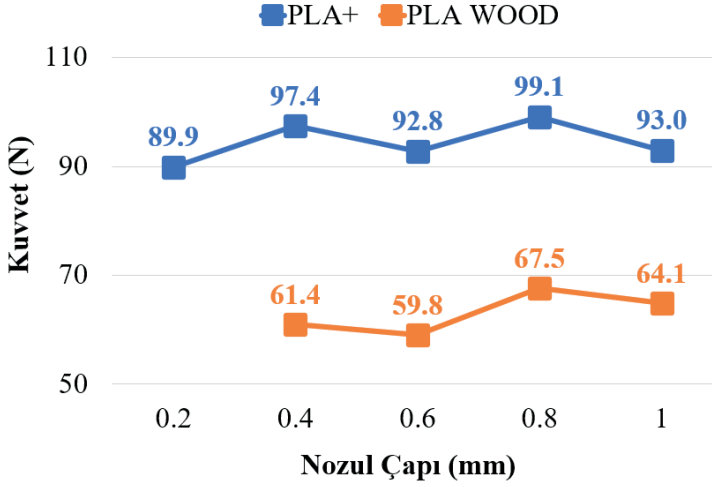
Şekil 10'da ise PLA Wood eğme testlerine ait kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. PLA Wood malzemelerde 0.8 mm nozul çapında en yüksek eğme kuvveti 67.5 N olarak belirlenmiştir. En düşük kuvvet 0.6 mm nozul çapında 59.8 N olmaktadır. Nozul çapının 0.4 mm'den 0.6 mm'ye artışı eğme kuvvetinde azalmaya neden olmaktadır. Yine nozul çapının 0.8 mm'den 1 mm'ye artırılması eğme kuvvetinde azalmaya sebep olmuştur.



Şekil 10. PLA Wood kuvvet- deplasman grafiği

Şekil 11'de nozul çapına bağlı olarak PLA Plus ve PLA Wood malzemelerinin eğme kuvvet değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Hem PLA Plus hem de PLA Wood için 0,8 mm nozul çapı en yüksek mekanik

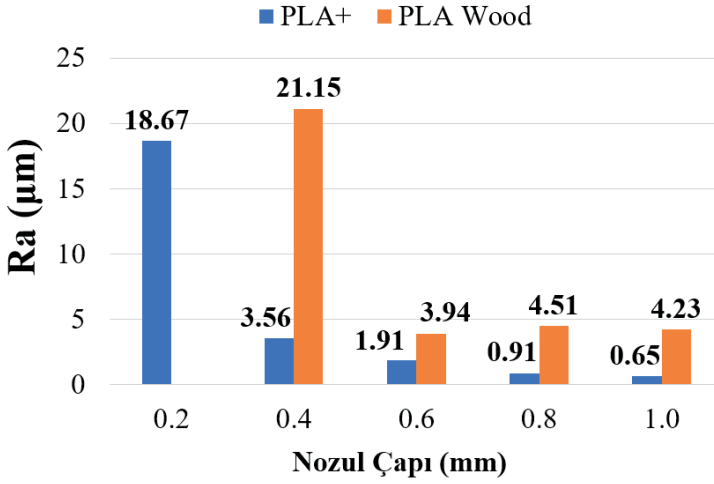
performansı vermiştir. Küçük nozul çapında (0.2 mm) katman hatalarının artması, büyük nozul çapında (1.0 mm) ise katman yapışmasının zayıflaması nedeniyle dayanımın düştüğü düşünülmektedir. Orta çapların (0.4-0.6-0.8 mm) optimum performansı sağladığı anlaşılmıştır.



Şekil 11. PLA Plus ile PLA Wood eğme kuvvetlerinin karşılaştırılması

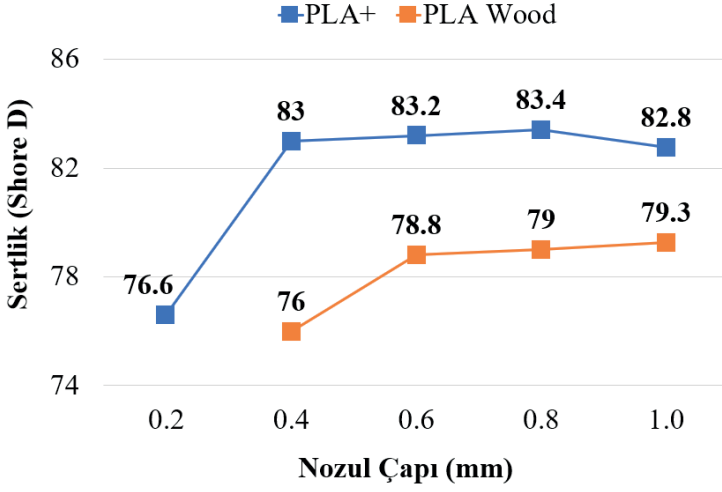
Yüzey Pürüzlülüğü ve Sertlik

Şekil 12’de PLA Plus ve PLA Wood için nozul çapına bağlı aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) verilmektedir. Nozul çapının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendiğinde, PLA Plus numunelerinde nozul çapı arttıkça Ra değerlerinin belirgin biçimde azaldığı gözlenmiştir. 0.2 mm nozul çapında elde edilen 18.67 μm ’lik yüksek pürüzlülük değeri, küçük çaplı nozullerle baskı sırasında oluşan katman hatalarının ve yüzey dalgalanmalarının artmasına bağlanabilir. Nozullerde çap arttıkça (0.6–1.0 mm) Ra değerleri 1.91–0.65 μm aralığına kadar düşmüştür. Bu durum, artan nozul çapının ekstrüde edilen filamentin daha homojen yayılmasını sağlayarak yüzey kalitesini iyileştirmesinden kaynaklanmış olabilir. PLA Wood numunelerinde ise 0.4 mm nozul çapında yüzey pürüzlülük değeri 21.15 μm olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, ahşap katkılı malzemenin 0.4 mm gibi orta çaplı nozulden geçerken lifli heterojen yapısı nedeniyle düzgün ekstrüde olamaması ve yüzeyde birikmeler oluşturması ile açıklanabilir. Daha büyük nozul çaplarında (0.6–1.0 mm) ise pürüzlülük değerleri düşerek 3.94–4.23 μm aralığında sabitlenmiştir. Bu da nozul çapı arttıkça malzemenin akışkanlığının iyileştiğini ve yüzey kalitesinin arttığını göstermektedir.



Şekil 12. PLA Plus ile PLA Wood yüzey pürüzlülük değerleri

Şekil 13'te PLA Plus ve PLA Wood için nozul çapına bağlı değişen Shore D sertlik değerleri verilmektedir. PLA Plus numunelerinde ölçülen sertlik değerleri, 0.2 mm nozul çapında en düşük seviyede (76.6 Shore D) gerçekleşmiştir. Nozul çapının 0.4 mm'ye çıkarılmasıyla birlikte sertlik değerleri 83 seviyesine yükselmiş ve 1.0 mm nozul çapına kadar sertlik değeri pek değişmemiştir. Bu eğilim, küçük nozul çaplarında yetersiz katmanlar arası birleşmede mikro gözenek oluşumunun sertliği düşürmesi; buna karşılık, daha büyük nozul çaplarında katmanlar arası kaynaşmanın iyileşmesiyle malzeme yoğunluğunun ve dolayısıyla sertliğin artmasıyla açıklanabilir. PLA Wood numunelerinde ise sertlik değerlerinin genel olarak PLA Plus'a kıyasla daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. 0.4 mm nozul çapında 76 olarak ölçülen sertlik, nozul çapı 0.6–1.0 mm'de hafif bir artış göstererek 78.8–79.3 aralığında sabitlenmiştir. Bu durum, ahşap katkısının polimer matrisin bütünlüğünü kısmen zayıflatarak sertlik değerlerini sınırlamasının yanı sıra, daha büyük nozul çaplarında liflerin daha homojen dağılmasıyla katman bütünlüğünün artmasına ve dolayısıyla sertliğin kısmen yükselmesine bağlanabilir.



Şekil 13. PLA Plus ile PLA Wood Shore D sertlik değerleri

Renk Ölçümü

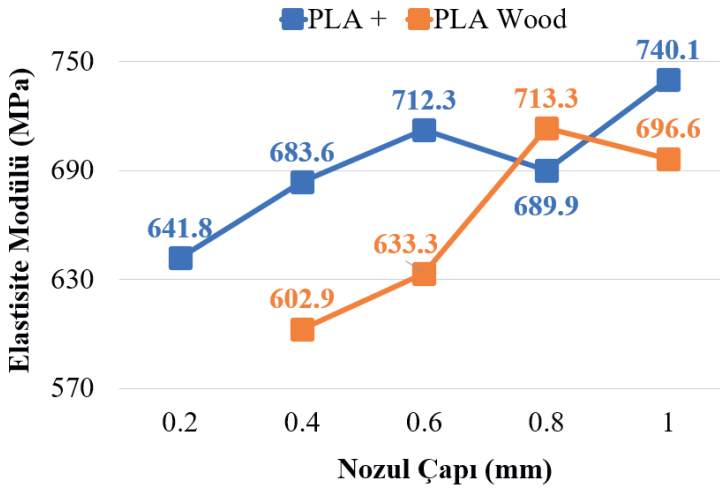
Deneylerde kırmızı renkli PLA Plus ve açık kahverengi renkli PLA Wood olmak üzere iki farklı renkte malzeme kullanılmıştır. Tablo 4'te numunelerin renk ölçümleri verilmiştir. Ölçüm sonuçları, bu malzemelerde nozul çapının değişmesinin parça rengini etkilemediğini göstermiştir.

Tablo 4. PLA Plus ve PLA Wood Renk Ölçüm Sonuçları

Nozul Çapı (mm)		PLA Plus	PLA Wood
0.4	L*	46.93	69.05
	a*	48.06	4.86
	b*	29.16	15.55
0.6	L*	46.69	69.97
	a*	48.43	4.52
	b*	29.93	15.13
0.8	L*	46.63	69.91
	a*	47.92	4.71
	b*	29.45	15.17
1.0	L*	46.68	69.83
	a*	48.07	4.83
	b*	29.59	15.15

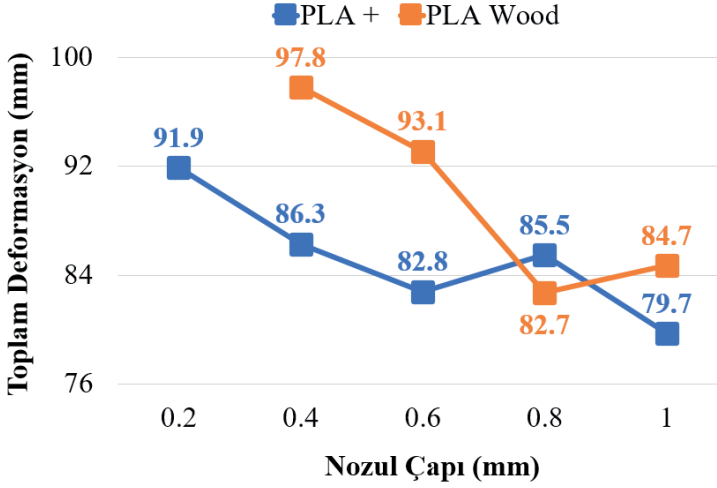
Sonlu Elemanlar Çözümü

Şekil 14'te nozul çapına bağlı olarak değişen elastisite modülleri verilmektedir. PLA Plus için en yüksek elastisite modülü 1 mm nozul çapında 740.1 MPa, en düşük elastisite modülü 0.2 mm nozul çapı için 641.8 MPa olarak belirlenmiştir. Elastisite modülü 0.6 mm nozul çapına kadar artış gösterirken 0.8 mm nozul çapında düşme eğilimi göstermektedir. PLA Wood için en yüksek elastisite modülü 0.8 mm nozul çapında 713.3 MPa ve en az elastisite modülü 0.4 mm nozul çapında 602.9 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. PLA Plus ile PLA Wood malzemelerine ait elastisite modülü değerleri

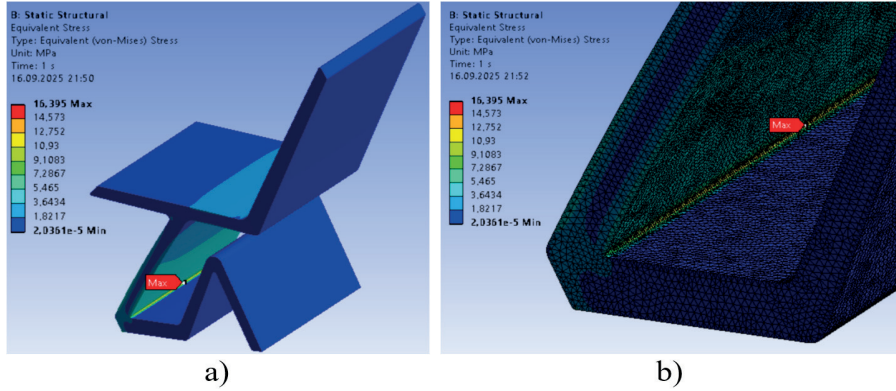
Şekil 15'de ise nozul çapına bağlı olarak değişen toplam deformasyon miktarları verilmektedir. Sonlu elemanlar analizine göre PLA Plus için en fazla deformasyon 91.9 mm olarak 0.2 mm nozul çapında ve en az deformasyon 1 mm nozul çapında 79.7 mm olarak belirlenmiştir. Toplam deformasyon 0.6 mm nozul çapına kadar azalırken 0.8 mm nozul çapında deformasyon miktarı artma eğilimindedir. PLA Wood için en fazla deformasyon 97.8 mm olarak 0.4 mm nozul çapında ve en az deformasyon 0.8 mm nozul çapında belirlenmiştir.



Şekil 15. PLA Plus ile PLA Wood için toplam deformasyon değerleri

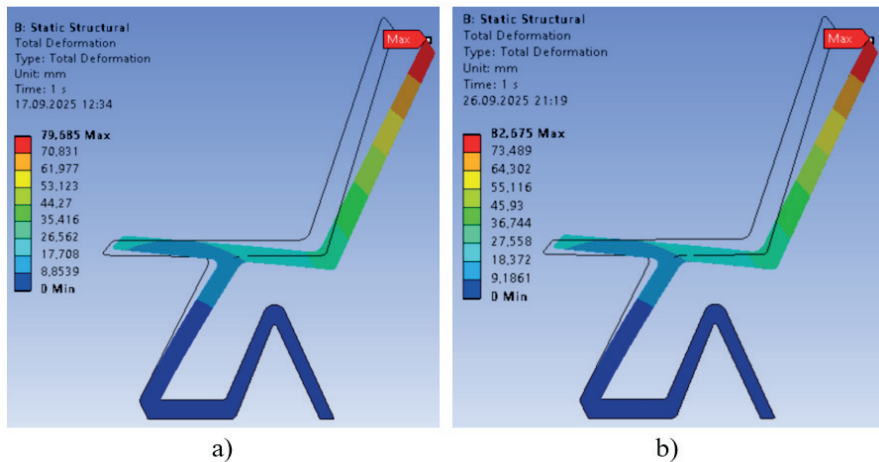
PLA Plus ve PLA Wood için sonlu elemanlar ile yapılan analiz sonuçlarında (Şekil 14 ile Şekil 15 karşılaştırıldığında) 0.8 mm nozul çapı dikkat çekmektedir. PLA Plus 0.8 mm nozul çapında elastisite modülü azalma eğilimine girerken toplam deformasyon miktarı da artma eğilimindedir. PLA Wood için elastisite modülü 0.8 mm nozul çapında en yüksek seviyedeysen toplam deformasyon miktarı en az seviyede kalmaktadır.

Şekil 16'da ise kritik kesitte meydana gelen maksimum eşdeğer gerilme sandalye üzerinde işaretlenmiş (Şekil 16(a)) ve yakınlaştırılmış görüntüsüyle (Şekil 16(b)) birlikte verilmektedir. Kuvvet etkisiyle bütün nozul çaplarında iki malzeme için oluşan eşdeğer gerilme maksimum 16.39 MPa olmaktadır. Sonlu elemanlar analizinde aynı yük ve geometri şartlarında malzeme değişimi genellikle gerilme dağılımını etkilemez fakat toplam yer değiştirmeyi etkiler. Bu durum nozul çapına bağlı olarak değişen toplam deformasyon miktarının değişmesini açıklar.



Şekil 16. Sandalyede meydana gelen a) Maksimum gerilme bölgesi ve b) Bölgenin yakın hali

Şekil 17’de her iki malzemenin yapısal analizlerde en az deformasyona uğradıkları sonlu elemanlar görüntüleri verilmektedir. PLA Plus’a ait en az deformasyon 1 mm nozul çapında 79.7 mm olmaktadır (Şekil 17 a). PLA Wood için ise en az deformasyon 0.8 mm nozul çapında 82.7 mm olmaktadır (Şekil 17 b). Her iki malzeme için de maksimum deformasyonun sandalyenin sırt kısmında ve en üst noktada olduğu görülmektedir. Ceylan ve arkadaşları, ahşap sandalyelerin yapısal analizini SEM yöntemiyle incelemiş; bağlantı bölgelerinde gerilme yoğunlaşmaları olduğunu rapor etmişlerdir. Çalışmada ayrıca serbest uçlardaki deformasyon eğilimleri SEM analizinde gözlenmiştir [44]. Bir başka çalışmada, farklı SEM araştırmaları incelenmiş ve destek noktalarından uzak serbest alanlarda yer değiştirme değerlerinin daha yüksek olabileceği ifade edilmiştir [45].



Şekil 17. Nozul çapı a) 1 mm olan PLA Plus ve b) 0.8 mm olan PLA Wood için toplam deformasyon görüntüsü

Sonlu elemanlar sonuçları doğrultusunda belirlenen sandalye tasarımı ve sınır şartları 1 mm nozul çapında PLA malzemesinin tercih edilebilir olduğunu göstermektedir. Sandalye malzemesi olarak PLA Wood kullanılması istendiği takdirde nozul çapının 0.8 mm seçilmesi öngörülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PLA Wood gibi katkılı filament malzemelerinin standart nozul çapından (0.4 mm) daha küçük nozul çapıyla basılması zordur. 3B yazıcı üreticileri ve ürün tasarımcıları, mobilya sektöründe bu tekniğin olasılıklarını ve sınırlamalarını değerlendirmek, tasarımı ve üretimi araştırarak test etmek için işbirliği içinde çalışmalıdır. Gelecekte 3B baskı mobilya endüstrisini daha fazla değiştirerek, yenilikçi ve özelleştirilmiş tasarımlara olanak sağlayacaktır.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sandalye çerçevesi analizleri, elastik bölgedeki mekanik davranışlara ilişkin güvenilir ve anlamlı veriler sunmaktadır. Zaman tasarrufu sağlaması, tekrarlanabilir testlere olanak tanınması, düşük maliyetli olması ve gerçek yapılara yakın modeller oluşturabilmesi gibi avantajlarının yanı sıra, gelişen bilgisayar teknolojileriyle birlikte değerlendirildiğinde; sonlu elemanlar yönteminin, mobilya sistemlerinin üretim öncesinde analiz edilerek tasarımcılara kapsamlı ön bilgiler sunması bakımından mobilya mühendisliği tasarımlarında etkin bir araç olarak kullanılması önerilmektedir. Yapılan çalışma örneğinde eş değer gerilme değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Analiz sonuçları deformasyona göre değerlendirildiğinde 3B baskıda PLA Plus için 1 mm nozul, PLA Wood için 0.8 mm nozul kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Referanslar

1. Cicek, Y., A. Altinkaynak, and E. Balta, *Numerical and experimental analysis of infill rate on the mechanical properties of fused deposition modelling polylactic acid parts*. Proceedings of the SPE ANTEC®, Anaheim, 2017.
2. Gdr, C., T. Trkoglu, and İ. Eren, *Effect of lattice design and process parameters on the properties of PLA, ABS AND PETG polymers produced by fused deposition modelling*. Journal of Materials and Mechatronics: A, 2023. 4(2): p. 561-570.
3. Çelebi, A. and M.M. İmanç, *Evaluation of Mechanical Properties of PLA Auxetic Structures Produced by Additive Manufacturing*. Journal of Materials and Mechatronics: A, 2023. 4(2): p. 384-396.
4. Hedayati, R., M. Alavi, and M. Sadighi, *Effect of degradation of polylactic acid (PLA) on dynamic mechanical response of 3D printed lattice structures*. Materials, 2024. 17(15): p. 3674.
5. Andrzejewski, J., et al., *The development of poly (lactic acid) (PLA)-based blends and modification strategies: methods of improving key properties towards technical applications*. Materials, 2024. 17(18): p. 4556.
6. Barreto, G., et al., *Rice husk with PLA: 3D filament making and additive manufacturing of samples for potential structural applications*. Polymers, 2024. 16(2): p. 245.
7. Machado, A.C., et al., *Waste Coffee Silver Skin as a Natural Filler in PLA-Based Filaments for Fused Filament Fabrication (FFF) Printing*. Polymers, 2025. 17(13): p. 1766.
8. Shahrubudin, N., T.C. Lee, and R. Ramlan, *An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications*. Procedia manufacturing, 2019. 35: p. 1286-1296.
9. Bekar, K., U. Çıfci, and A. Özkan, *Çok boyutlu yazıcılardan baskısı farklı parametrelerle alınan numunelerin malzeme seçiminin deneysel analizi*. Gmhane niversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2021. 11(3): p. 663-674.
10. Harris, M., et al., *Effect of material and process specific factors on the strength of printed parts in fused filament fabrication: A review of recent developments*. Materials, 2019. 12(10): p. 1664.
11. Solomon, I.J., P. Sevel, and J. Gunasekaran, *A review on the various processing parameters in FDM*. Materials Today: Proceedings, 2021. 37: p. 509-514.
12. Sevlı, O., *3 BOYUTLU BASKIDA KULLANILACAK MALZEMENİN MAKİNE ÖĞRENMESİ TEKNİKLERİ İLE TAHMİNLENMESİ*. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2021. 5(3): p. 596-605.

13. Şahin, K. and B.O. Turan, *ÜÇ BOYUTLU YAZICI TEKNOLOJİLERİ-NİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ*. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2018. 2(2): p. 97-116.
14. Yıldıztepe, B. and B.C. Arabacıoğlu, *Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojisi ile İç Mekanlarda Özgün Tasarımlar*. Kırklareli Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2024. 3(1): p. 1-11.
15. Shaukat, U., E. Rossegger, and S. Schlögl, *A review of multi-material 3D printing of functional materials via vat photopolymerization*. Polymers, 2022. 14(12): p. 2449.
16. Narlıoğlu, N., *3B yazıcı kullanılarak odun-PLA kompozit filamentinden mobilya bağlantı elemanlarının yazdırılması ve katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*. Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 2021. 4(2): p. 183-192.
17. McClements, D. *All About Wood 3D Printing Filament: Materials, Properties, Definition*. 11 November 2022; Available from: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/wood-3d-printing-filament/>.
18. Duran, P., *New 3D Printed Chair Developed by Dassault Systèmes and Patrick Jouin*. June 27 2025.
19. Caracol. *Cloud Chair: shaping sustainable living with 3D Printing*. April 01 2025; Available from: <https://caracol-am.com/resources/case-studies/cloud-chair-sustainable-living-3d-printing>.
20. Furniture, P. *A collaborative course with large scale 3D printer manufacturer BLB Industries* 01 January 2021; Available from: <https://materiability.com/portfolio/printing-furniture/>.
21. Us, F.o. *3D Baskı ile Üretilen Ürünlerimiz*. 23.08.2025; Available from: <https://factoryofus.com/tr/urunler>.
22. Eke, T.E., *Mobilya tasarım Ve üretiminde üç Boyutlu yazıcı Teknolojisi*. 2019, Marmara Üniversitesi (Turkey).
23. Küreli, İ., M. Altunok, and E. Uysal, *Endüstriyel sandalye tasarımında estetiklik ve dayanıklılık optimizasyonu*. Politeknik Dergisi, 2020. 23(4): p. 1413-1421.
24. Song, L., Yu, M., & Sun, D. (2024). Structural design and experimental verification of a thin-walled plastic chairs based on the finite element method. *Scientific Reports*, 14(1), 22285.
25. Kasal, A., Efe, H., & Erdil, Y. Z. (2007). Montaja hazır koltuk iskeletlerinin mukavemetinin sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 10(4), 411-422.
26. Polygenis, T. *PLA vs PLA+: A Comprehensive Comparison*. 31 Oct 2023; Available from: <https://www.wevolver.com/article/pla-vs-pla-plus>.

27. eSUN. *Material Safety data sheet* 23 August 2025; Available from: <https://www.esun3d.com/uploads/PLA%EF%BC%8B-MSDS.pdf>.
28. Filameon. *PLA Wood Filament*. 23 August 2025; Available from: <https://www.filameon.com/urun/pla-wood?srsId=AfmBOop-tfp9ld-jGfX-t6U7AeIfCMGSgLcEXTB5mMWF8D6yUBoAwbyhC>.
29. eSUN. *PLA+*. 01 Nov 2021; Available from: https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf.
30. Hikmat, M., S. Rostam, and Y.M. Ahmed, *Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology*. Results in Engineering, 2021. 11: p. 100264.
31. ELDeeb, I., et al., *Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2025. 9(7): p. 221.
32. Triyono, J., et al., *The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material*. Open Engineering, 2020. 10(1): p. 762-768.
33. Melo, J.T., et al., *Effects of nozzle material and its lifespan on the quality of PLA parts manufactured by FFF 3D Printing*. Engineering Manufacturing Letters, 2022. 1(1): p. 20-27.
34. International, A. *ASTM D790*. 24 July 2017; Available from: <https://store.astm.org/d0790-17.html>.
35. International, A. *ASTM D638*. 21 July 2022; Available from: <https://store.astm.org/d0638-14.html>.
36. GrabCAD. *Tahta Sandalye*. 3 August 2022; Available from: <https://grabcad.com/library/wooden-chair-tahta-sandalye-1>.
37. Baysal, E., Koçar, O., Anaç, N., & Darıcı, F. (2023). Eşit Kanallı Açısall Presleme Yönteminde Kanal Açılarının ve İç Köşe Kavisinin Deformasyona Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 859-873.
38. KALAYCIOĞLU, H., Hasan, A. K. S. U., & Uğur, A. R. A. S. (2015). MOBİLYALARDA UYGULANAN STANDARTLAR (EMNİYET, MUKAVEMET VE GÜVENLİK GEREKLERİ). *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 14(2), 834-853.
39. Vanaei, S., Rastak, M., El Magri, A., Vanaei, H. R., Raissi, K., & Tcharkhtchi, A. *Orientation-Dependent Mechanical Behavior of 3D Printed Polylactic Acid Parts: An Experimental–Numerical Study*. *Machines* 2023, 11(12):1086.
40. Travieso-Rodriguez, J. A., Jerez-Mesa, R., Llumà, J., Traver-Ramos, O., Gomez-Gras, G., & Roa Rovira, J. J. (2019). Mechanical properties of

- 3D-printing polylactic acid parts subjected to bending stress and fatigue testing. *Materials*, 12(23), 3859.
41. Texh3D, R. *3D Printing in The Furniture Industry*. 23 August 2025; Available from: <https://www.rapidtech-3d.de/en/c/3d-printing-in-the-furniture-industry.58183>.
 42. Ezzaraa, I., Ayrilmis, N., Abouelmajd, M., Kuzman, M. K., Bahlaoui, A., Arroub, I., ... & Belhouideg, S. (2023). Numerical modeling based on finite element analysis of 3D-printed wood-polylactic acid composites: a comparison with experimental data. *Forests*, 14(1), 95.
 43. Czyżewski, P., Marciniak, D., Nowinka, B., Borowiak, M., & Bieliński, M. (2022). Influence of extruder's nozzle diameter on the improvement of functional properties of 3D-printed PLA products. *Polymers*, 14(2), 356.
 44. Ceylan, E., Güray, E., & Kasal, A. (2021). Structural analyses of wooden chairs by finite element method (FEM) and assessment of the cyclic loading performance in comparison with allowable design loads. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 23.
 45. Nguyen, M. T., & Hirao, A. (2025). Finite Element Modeling of Human–Seat Interaction and the Integration of 3D-Printed Foam in Enhancing Sitting Comfort: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 15(18), 10193.