



Kafes geometriye sahip sandviç bir yapının mekanik özelliklerinin deneysel ve sayısal analizi

Experimental and numerical analysis of the mechanical properties of a sandwich structure with lattice geometry

İhsan Burak Yeter^{1*}, Hamit Kenan², C. Oktay Azeloglu³

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

ihsan.yeter@std.yildiz.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Antalya, Türkiye.

hamit.kenan@antalya.edu.tr

³Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

azeloglu@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 18.03.2025

Düzeltilme Tarihi/Revision: 30.05.2025

doi: 10.5505/pajes.2025.69607

Kabul Tarihi/Accepted: 10.06.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada polilaktik asit malzemesinden katmanlı üretim yöntemiyle imal edilen sandviç bir kafes yapının basma yükü altındaki mekanik davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda yarı-statik basma testleriyle deneysel olarak ve sonlu elemanlar analizleriyle teorik olarak yapının yer değiştirme karakteristiği, yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyonu gibi özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmış ve yapının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizlerinin etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışma, katmanlı üretim teknolojisi ile kafes yapı geometrileri tasarlayacak ve imalatını gerçekleştirecek araştırmacılar için bir rehber niteliğindedir. Deneysel çalışmaların yüksek maliyetli ve zaman alıcı olması nedeniyle, sayısal analizlerin uygun biçimde kullanılması, kapsamlı deneysel çalışmalar öncesinde tasarım süreçlerinin bilgisayar ortamında sistematik ve verimli bir şekilde yürütülmesine olanak tanımaktadır. Böylece, yapısal performansın ön değerlendirmesi sağlanarak, üretim sürecinde zaman ve maliyet açısından optimizasyon yapılmasına katkı sunulması amaçlanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Katmanlı üretim, Sandviç kafes yapılar, Sonlu elemanlar analizi, Basma testleri

Abstract

In this study, the mechanical behavior of a sandwich lattice structure manufactured using additive manufacturing from polylactic acid material under compressive loading was investigated. For this purpose, the displacement characteristics, load-bearing capacity, and energy absorption properties of the structure were evaluated both experimentally through quasi-static compression tests and theoretically using finite element analyses. Subsequently, the experimental and theoretical results were compared, and the effectiveness of finite element analyses in determining the mechanical properties of the structure was assessed. This study serves as a guide for researchers who aim to design lattice structure geometries and manufacture them using additive manufacturing technology. Due to the high cost and time-consuming nature of experimental studies, the appropriate use of numerical analyses enables the systematic and efficient execution of design processes in a virtual environment before extensive experimental investigations. In this way, the preliminary evaluation of structural performance is ensured, contributing to time and cost optimization in the manufacturing process.

Keywords: Additive manufacturing, Sandwich Lattice structures, Finite element analysis, Compression tests.

1 Giriş

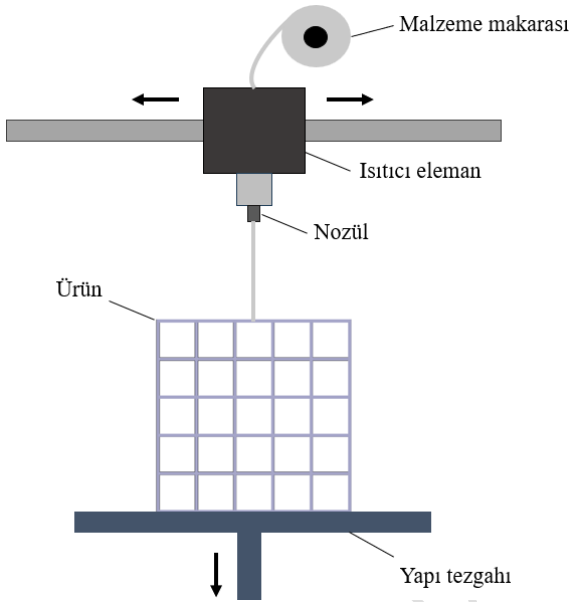
Hücresel kafes yapılar, hafiflikleri ve yüksek özgül dayanımları nedeniyle havacılık, biyomedikal ve otomotiv gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu yapılar, mekanik performanslarını optimize etmek amacıyla farklı geometrik desenler ve malzeme kombinasyonları ile tasarlanabilmektedir [2]. Kafes yapı sistemleri, şekil açısından geniş bir çeşitliliğe sahiptir. Çubuk konfigürasyonunun belirlenmesi, çerçeve yapı tasarım sürecinin ilk aşamasıdır ve bu aşama, çubuk tipi analizleri ile her bir yapısal elemanın boyutlandırılmasından önce gerçekleştirilmelidir. Böylece, kafes sisteminin konfigürasyonu, tasarlanan yapının geometrisine uygun şekilde optimize edilebilir. Kafes yapı sistemleri, tasarımın formuna uyum sağlayabilen esnek yapıları sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu esneklik, sistemin boyutları, çubuk profili ve kullanılan malzemeler açısından çeşitlilik göstermesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, kafes yapı sistemleri yalnızca yapısal bir eleman olarak

değil, aynı zamanda mimari tasarımda estetik bir bileşen olarak da değerlendirilebilir. Yapısal bütünlüğün vurgulanması, kafes sistemlerinin güvenilirliğini artırarak mimari tasarımda daha belirgin bir rol üstlenmesine olanak tanımaktadır [3], [4].

3 boyutlu (3B) baskı teknolojisi, makine mühendisliği, bilgisayar destekli tasarım (CAD), tersine mühendislik, katmanlı imalat, sayısal kontrol teknolojisi ve yeni malzemeleri entegre eden ileri bir üretim teknolojisidir. Geniş bir gelişim ve uygulama potansiyeline sahip olup, insanlık için üçüncü büyük endüstriyel devrim niteliğinde bir teknoloji olarak görülmektedir. 3B baskı olarak adlandırılan bu süreç, bir parçanın üç boyutlu CAD modelinin katmanlara ayrılması, ardından bir yazıcı kullanılarak bu katmanların üst üste basılmasıyla nihai katı modelin elde edilmesi esasına dayanır. Katman-katman baskı prensibine göre, 3B baskı teknolojisi çeşitli şekillendirme süreçlerine ayrılabilir. Yaygın kullanılan yöntemler arasında ışıkla kürleme (SLA), seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLM), ergitme yığma modelleme (FDM) ve üç boyutlu baskı modelleme (3DP)

*Yazışılan yazar/Corresponding author

bulunmaktadır. Bunlar arasında, FDM süreci en yaygın kullanılan teknolojidir. FDM yöntemi, filament halindeki termoplastik malzemenin ısıtılarak eritilmesi, ince bir nozül aracılığıyla dışarıya ekstrüde edilmesi ve dilimlenmiş modele göre katman biriktirilmesi esasına dayanır (Şekil 1). FDM ekipmanlarının üretim maliyeti düşüktür ve kullanımı kolaydır. Baskı hassasiyeti diğer yöntemlere göre nispeten düşük olsa da kullanılan malzemelerin uygun maliyetli olması, ekipman bakımının basit olması ve genel anlamda yüksek maliyet-performans oranına sahip olması nedeniyle geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından tercih edilmektedir. Katman kalınlığı, parça yönelimi, nozül sıcaklığı, dolgu deseni ve yoğunluğu, baskı hızı ve destek türü gibi parametreler doğru şekilde ayarlandığında, akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), polikarbonat (PC), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), naylon ve karbon fiber gibi malzemeler biyomedikal, havacılık, denizcilik, otomotiv ve mimarlık gibi alanlarda kullanılabilir [5].



Şekil 1. FDM üretim diyagramı.

Figure 1. FDM manufacturing diagram.

Katmanlı üretim teknolojilerinin ilerlemesi, karmaşık geometriye sahip kafes yapıların üretilmesini daha erişilebilir hale getirmiştir. FDM yöntemi, düşük maliyetli olması ve üretim esnekliği sağlaması nedeniyle mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir katmanlı üretim yöntemidir [6]. Ancak, FDM ile üretilen yapılar, üretim parametrelerine bağlı olarak değişen mekanik özellikler sergileyebilir ve katmanlar arası bağ zayıflıkları nedeniyle anizotropik davranış gösterebilir [7].

PLA, geniş bir uygulama yelpazesinde geliştirilen yenilikçi malzemelerden biri olup, termoplastik ve biyobozunur özelliklere sahip çevre dostu bir termoplastiktir. Biyoyuymuluğu sayesinde, metabolik olarak zararsız olması nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. PLA, filament formuna getirilerek FDM yöntemiyle işlenebilmekte ve bu sayede yapılara dönüşebilmektedir. Üretim yönü, dolgu deseni ve yoğunluk gibi faktörler, PLA malzemesinin mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır [8]-[10]. Tablo 1'de çalışmada kullanılan geliştirilmiş polilaktik asit - yüksek hız (ePLA-HS) malzemesinin üretici tarafından paylaşılan özellikleri verilmiştir [11].

Tablo 1. ePLA-HS malzemesinin özellikleri [11].

Table 1. Properties of ePLA-HS material [11].

Parametre	Değer	Birim
Yoğunluk	1.24	g/cm ³
Çekme Dayanımı	60	MPa
Kopmada Uzama	18.3	%
Ekstrüder Sıcaklığı	210-230	°C
Tabla Sıcaklığı	45-60	°C
Baskı Hızı	50-350	mm/s

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA), mühendislik yapılarının yükler altındaki tepkilerini simüle ederek, fiziksel prototipler oluşturmadan performans ve güvenlik değerlendirmesi yapma imkânı sağlar. Ancak, doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için dikkatli bir uygulama gereklidir. FEA'da karşılaşılan hatalar genellikle iki ana grupta toplanabilir: ağ oluşturma (mesh) hataları ve yanlış sınır koşullarından kaynaklanan hatalar. Ağ oluşturma, yapının daha küçük ve daha basit elemanlara bölünmesini içerir. Bu aşamada yapılan hatalar, sonuçların doğruluğunu önemli ölçüde etkileyebilir. Sınır koşullarının doğru tanımlanması ise analiz sonuçlarının güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış veya eksik sınır koşulları, yapının gerçek davranışını yansıtmayan sonuçlara yol açabilir. Doğruluğu artırmak ve hatalardan kaçınmak için şu stratejiler uygulanabilir [12]-[14] numaralı kaynaklar şu stratejilerin uygulanmasını önermişlerdir:

- ✓ Doğru Ağ Oluşturma: Elemanların şekil ve boyutlarının uygun olduğundan emin olun. Özellikle karmaşık geometrilerde veya yüksek gerilme bölgelerinde daha ince bir ağ yapısı kullanın.
- ✓ Sınır Koşullarının Doğru Tanımlanması: Modeldeki tüm sınır koşullarının fiziksel durumu doğru bir şekilde yansıttığından emin olun. Eksik veya yanlış tanımlanmış sınır koşulları, analiz sonuçlarını olumsuz etkileyebilir.
- ✓ Doğru Malzeme Modelleri Kullanımı: Malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde tanımlanması, analiz sonuçlarının güvenilirliği için esastır. Malzeme davranışını doğru yansıtan modeller kullanın.
- ✓ Sonuçların Doğrulanması: Analiz sonuçlarını, basit modeller veya analitik çözümlerle karşılaştırarak doğrulayın. Bu, modelinizin doğru çalıştığını ve güvenilir sonuçlar ürettiğini teyit eder.

Literatürde, PLA malzemesinin çekme ve basma yükleri altındaki mekanik davranışlarını inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak, deneysel ve sayısal analizlerin karşılaştırmalı doğrulamasına yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu gözlemlenmektedir [15]-[22]. Özellikle, sayısal modelleme sürecinin nasıl oluşturulması gerektiğine dair sistematik ve standart bir yaklaşımın eksikliği dikkat çekmektedir. Modelleme çalışmalarında, geometri tanımları, sınır koşulları, yükleme senaryoları ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi konularında yeterli açıklık bulunmamakta olup, bu durum farklı çalışmalar arasında doğrudan karşılaştırma yapılmasını güçleştirmektedir. Modelleme sürecine ilişkin bu belirsizlikler, elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle uyumunun değerlendirilmesini de zorlaştırmakta ve doğrulama süreçlerinde belirsizliklere neden olmaktadır. Bu eksikliklerin giderilmesi, malzeme ve yapı sistemlerinin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir.

Son yıllarda, gelişen katmanlı imalat teknolojileri, özellikle 3 boyutlu yazıcılarla üretim süreçlerinin yaygınlaşması, kompleks geometrilere sahip kafes yapı sistemlerinin üretimini mümkün kılmış ve mühendislik uygulamalarında bu yapıların kullanımını teşvik etmiştir. Kafes yapılar, sahip oldukları yüksek özgül dayanım, enerji sönmeme kapasitesi ve optimize edilebilir mekanik özellikleri sayesinde geleneksel mühendislik yapılarında önemli avantajlar sunmaktadır. Bu bağlamda, gerek geleneksel kafes yapılar (pozitif Poisson oranına sahip) gerekse de özketik özellik gösteren yeni nesil kafes tasarımlar (negatif Poisson oranına sahip) üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır [23].

Yukarıda ele alınan literatür incelemesi bu çalışmada kullanılacak kafes yapı geometrisi, üretim yöntemi, malzeme seçimi, sayısal yöntem konusunda gereken alt yapıyı hazırlamıştır. Kafes geometriye sahip sandviç yapılara ilişkin çalışmaların genellikle teorik ve deneysel olarak bir arada yürütüldüğü görülmektedir. Bu sayede deneysel çalışmalarla doğrulanmış sayısal modeller geliştirilerek çalışmaların devamının bilgisayar ortamında sürdürülmesi, böylece zaman ve maliyet açısından kazanç sağlanması düşünülmüştür. Bu nedenle bu makalede seçilen temel bir yapı geometrisi ile teorik olarak yürütülen çalışmanın deneysel çalışmada izlenen strateji ile doğrulanması hedeflenmiştir. Yapı üzerindeki deformasyon mekanizması, yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyon özellikleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonuçları, katmanlı üretim ile üretilen kafes yapıların mekanik karakterizasyonu açısından önemli veriler sunmaktadır.

Bu makale dört ana bölümden oluşmaktadır. Önceki çalışmaların paylaşıldığı makalenin amaç, hedef ve özgün değerinin sunulduğu birinci bölümden sonra ikinci bölümde testlerde ve teorik çalışmalarda kullanılan yöntemler detaylıca açıklanmıştır. Üçüncü bölümde deneysel ve teorik sonuçlar verilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Son bölüm ise tüm sonuçların değerlendirilmesi ve sonlu elemanlar yönteminin etkinliğinin tartışılması üzerinedir.

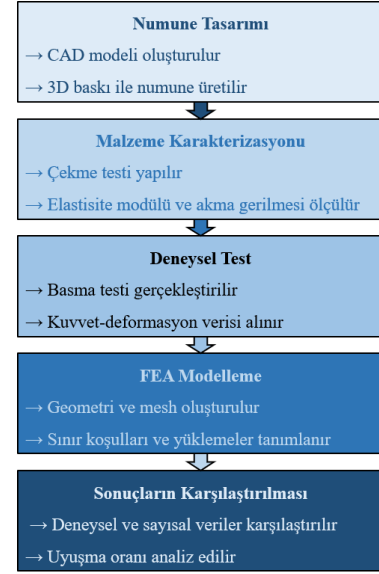
2 Yöntem

Bu bölümde çalışmada kullanılan deneysel ve teorik yöntemler ve bu yöntemlerin uygulanmasına ait detaylar sunulmuştur. Bu amaçla Bölüm 2.1’de FDM yöntemiyle imalatı gerçekleştirilecek PLA malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş, Bölüm 2.2’de tasarlanan kafes yapının geometrisi ve basma testi sonuçları verilmiş, Bölüm 2.3’de ise sonlu elemanlar modelinin (FEM) oluşturulması, analizi ve sonuçları paylaşılmıştır.

Şekil 2’de, çalışmanın bütünsel yapısının ve metodolojik akışının daha açık bir şekilde anlaşılabilmesi için deneysel ve sonlu elemanlar analizine ilişkin süreçler özetleyici biçimde sunulmuştur.

2.1 Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Basma ve çekme test numuneleri, CATIA yazılımı kullanılarak üç boyutlu (3B) olarak tasarlanmıştır. Elde edilen CAD modelleri, PrusaSlicer yazılımı aracılığıyla katmanlara ayrılmış ve 3B yazıcının işleyebileceği G-code formatına dönüştürülmüştür. Üretim sürecine doğrudan etki eden temel yazdırma parametreleri, dilimleme yazılımına tanımlanmış olup, söz konusu parametreler Tablo 2’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Mekanik testler, doğrusal motor kontrollü ve yüksek hassasiyetli bir üniversal test cihazı olan INSTRON 5982 modelinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Metodoloji.

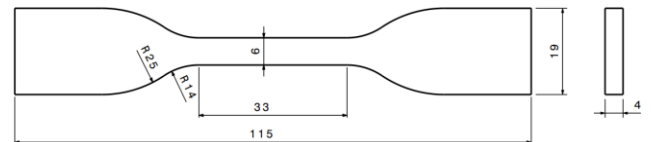
Figure 2. Methodology.

Tablo 2. Baskı parametreleri.

Table 2. Printing parameters.

Parametre	Değer	Birim
Nozul sıcaklığı	215	C°
Tabla sıcaklığı	65	C°
Katman kalınlığı	0.3	mm
Nozul çapı	0.5	mm
Doluluk oranı	%100	-
Baskı hızı	50	mm/s
Dolgu tipi	Düz çizgili	-
Filament çapı	1.75	mm
Malzeme	eSUN ePLA-HS	-

Bu çalışmada çekme testleri, ASTM D638 standardı temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Standartta önerilen beş numune yerine, testler üç numune ile sınırlandırılmıştır. Numune geometrisi, ASTM D638 standardına uygun olarak Tip IV (Şekil 3) şeklinde belirlenmiş ve test hızı 5 mm/dk olarak seçilmiştir. Literatürde, test numunesinin üretimi sırasında neme maruz kalmasının mekanik özellikler üzerindeki etkisine ilişkin çalışmalar mevcuttur. Ancak, ilgili çalışmalarda test ortamının bağıl nem değeri genellikle sabit bir parametre olarak belirtilmemiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen testler, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir ancak kontrollü bir laboratuvar ortamı dışında yürütüldüğü için test ortamının bağıl nem oranı kesin olarak belirlenememiştir [24].

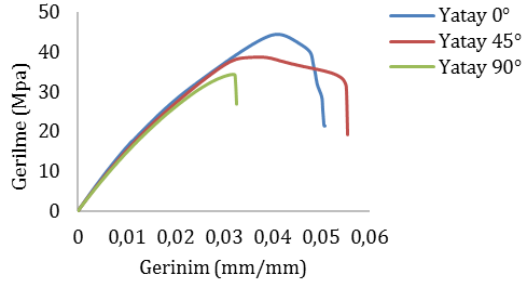


Şekil 3. Tip 4 çekme numunesi ölçüleri [24].

Figure 3. Type 4 tensile specimen dimensions [24].

M. Eryıldız tarafından yürütülen çalışmada, FDM yöntemiyle farklı parça oryantasyonlarında üretilmiş PLA numunelerin mekanik performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, yatay 0° oryantasyonda üretilen numunelerin en yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu ortaya koymuştur [8].

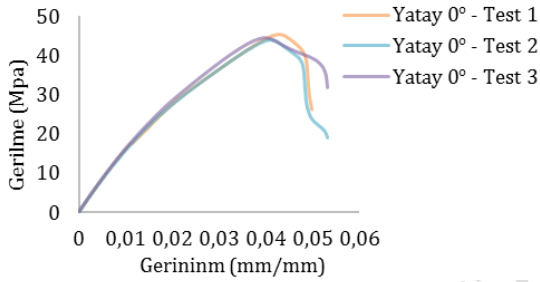
Bu doğrultuda, mevcut çalışmada kullanılan eSUN ePLA-HS malzemesi için parça oryantasyonunun mekanik performans üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Farklı oryantasyonlarda üretilen numunelere uygulanan tekrarlı basma testlerinden elde edilen ortalama sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, yatay 0° oryantasyonun kullanılan malzeme açısından dayanım yönünden avantaj sağladığı görülmektedir. Bu nedenle, çalışmada tüm kafes yapılar yatay 0° oryantasyonda üretilmiştir.



Şekil 4. Parça oryantasyonuna bağlı gerilme-gerinim grafiği.

Figure 4. Stress-strain graph depending on part orientation.

Şekil 5 'te, yatay 0° PLA çekme numunesine ait tekrarlı deney sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5. Çekme numunesine (yatay 0°) ait tekrarlı deney sonuçları.

Figure 5. Repeated tensile test results of the specimen (flat 0°).

Tablo 3'te ise bu testlerin ortalama değerleri ile standart sapmaları verilerek deneysel verilerin istatistiksel değerlendirmesi yapılmıştır.

Tablo 3. Çekme numunesinin mekanik özelliklerine ait ortalama değer ve standart sapma.

Table 3. Mean values and standard deviations of the mechanical properties of the tensile specimen.

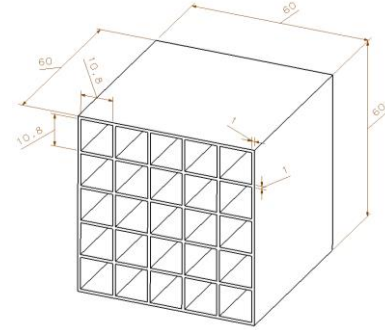
Mekanik Özellik	Ortalama Değer ± Standart Sapma
Elastisite Modülü (MPa)	1700 ± 21.6
Maks. Gerilme (MPa)	44.6 ± 0.38
Kopma Gerinimi (mm/mm)	0.051 ± 0.002

2.2 Kafes yapının mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Yapı boyutları, literatürde çoğunlukla sezgisel yaklaşımlar doğrultusunda tanımlanmaktadır. Bu çalışmada da benzer bir yöntem benimsenmiş ve kontrol hacmi, 60 mm × 60 mm × 60 mm boyutlarında olacak şekilde modellenmiştir. Tasarlanan yapı, toplamda 25 birim hücreden oluşmakta olup, her bir hücrenin duvar kalınlığı 1 mm olarak tanımlanmıştır. Yapıya ait geometrik boyutlar Şekil 6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

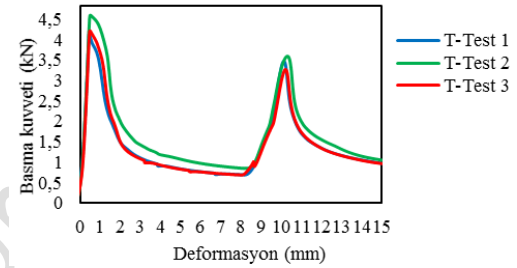
Yapının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, yarı-statik (quasi-static) yaklaşım yöntemi kullanılmış ve testler, baskı

aparâtının 2 mm/dk hızında hareket etmesi sağlanarak gerçekleştirilmiştir [17]. Test doğruluğunu artırmak amacıyla üç adet numune test edilmiştir. Kafes yapının tekrarlı basma testlerinin kuvvet-deformasyon grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Kafes yapının tasarım ölçüleri.

Figure 6. Design dimensions of the truss structure.



Şekil 7. Basma numunesine ait tekrarlı deney sonuçları.

Figure 7. Repeated test results of the compression specimen.

Maksimum basma kuvveti ile enerji absorpsiyonuna ilişkin mekanik özelliklerin ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Basma numunesinin mekanik özelliklerine ait ortalama değer ve standart sapma.

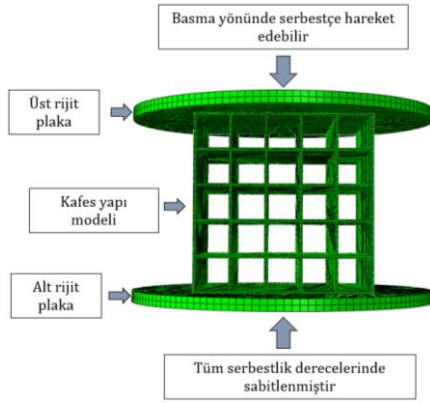
Table 4. Mean values and standard deviations of the mechanical properties of the compression specimen.

Mekanik Özellik	Ortalama Değer ± Standart Sapma
Maks. Basma Kuvveti	4.28±0.12 kN
Enerji Absorpsiyonu	0.018 ± 0.001 kJ

2.3 Sonlu elemanlar modeli ve analizi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), karmaşık geometrilere, malzeme özelliklerine ve sınır koşullarına sahip mühendislik problemlerinin sayısal olarak çözümlenebilmesi amacıyla geliştirilmiş, güçlü bir nümerik analiz yöntemidir. Bu yöntem, çözülmesi zor olan diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerini elde etmek için yapıyı sonlu sayıda küçük ve basit elemanlara bölerek, her bir eleman üzerinde çözüm yapılmasına olanak tanır [13], [14], [25].

FEM, sandviç yapının basma yükü altındaki mekanik davranışını analiz etmek amacıyla ABAQUS® yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi, tüm serbestlik dereceleri sabitlenmiş rijit alt plaka ile basma yönünde serbestçe hareket edebilen rijit üst plaka arasında sıkıştırılan deforme olabilir kafes yapı modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Üst plaka, doğrusal bir yer değiştirme ile 15 mm hareket ettirilerek yapıya eksenel basma yükü uygulanmıştır.

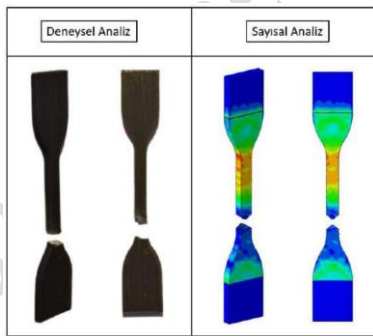


Şekil 8. FEA sınır koşulları.

Figure 8. Boundary conditions for the FEA.

ABAQUS®/Explicit ortamında, yüksek deformasyon altında plastik şekil değiştiren sünek malzemelerin hasar analizlerinde çeşitli hasar modelleri kullanılabilir. Bu modeller, malzemenin davranışını daha doğru temsil etmek ve simülasyon sonuçlarının güvenilirliğini artırmak amacıyla tercih edilir. Hasar modellerinin seçimi, analiz edilen malzemenin mekanik özellikleri, uygulanan yükleme koşulları ve simülasyonun amaçları doğrultusunda belirlenmelidir. Örneğin, yüksek deformasyon hızlarının ve termal etkilerin belirleyici olduğu durumlarda Johnson-Cook hasar modeli tercih edilmektedir. Buna karşın, kesme baskın yükleme koşullarında Shear Damage modeli daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Sac metal şekillendirme süreçlerinde ise Forming Limit modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Basma analizlerinde ise genel olarak sünek malzemeler için Ductile Damage modeli tercih edilmektedir. Ancak, simülasyonun doğruluğunu ve gerçekçiliğini artırmak amacıyla, söz konusu alternatif hasar modellerinin de değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Her bir modelin avantajları ve kısıtlamaları detaylı şekilde göz önünde bulundurularak, analiz gereksinimlerine en uygun modelin seçilmesi gerekmektedir [26].

Önceki çalışmalarda, PLA malzemenin üretim yönüne bağlı olarak sergilediği kırılma davranışı detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu davranış, sünek hasar modeli (ductile damage model) kullanılarak sayısal olarak temsil edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. PLA numunesinin deneysel kırılma davranışı ile sünek hasar modeli esas alınarak oluşturulan sonlu elemanlar analizinden elde edilen kırılma davranışının karşılaştırması [27].

Figure 9. Comparison of the experimental fracture behavior of the PLA specimen with the fracture response predicted by the finite element analysis using a ductile damage model [27].

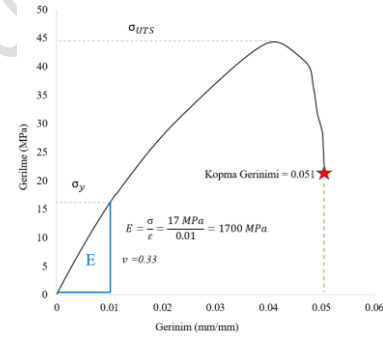
Parça oryantasyonunun 0° olduğu durumda elde edilen deneysel veriler ile sayısal simülasyon sonuçları arasında yalnızca %3,94'lük bir fark gözlemlenmiştir. Bu düşük sapma oranı, geliştirilen modelin kabul ve varsayımlarının doğruluğunu ve fiziksel gerçeklikle olan yüksek uyumunu göstermektedir [27].

Bu doğrultuda, söz konusu yapının kırılma davranışını sayısal olarak simüle edebilmek amacıyla, modellenen analizlerde sünek hasar modeli kullanılmıştır. Malzemenin mekanik davranışının gerçeğe uygun şekilde temsil edilebilmesi için modelde yoğunluk, elastik, plastik ve sünek hasar parametreleri tanımlanmıştır.

Deneysel olarak elde edilen çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi, sonlu elemanlar analiz modelinde kullanılacak malzeme tanımının yapılabilmesi amacıyla değerlendirilmiştir (Şekil 10). Bu doğrultuda, eğrinin doğrusal elastik bölgesi esas alınarak elastik malzeme parametreleri belirlenmiştir. Elastik modül, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak Denklem (1) aracılığıyla hesaplanmıştır [28].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{17 \text{ MPa}}{0.01} = 1700 \text{ MPa} \quad (1)$$

Poisson oranı ise, benzer çalışmalardan elde edilen literatür verilerine dayanarak $\nu=0,33$ olarak kabul edilmiştir [29].

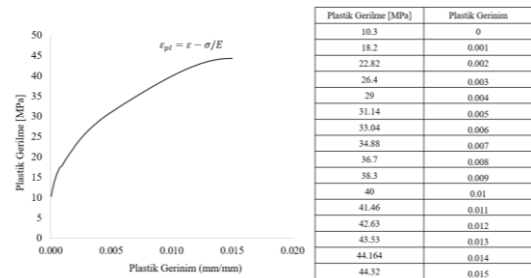


Şekil 10. Çekme numunesinin gerilme-gerinme ortalaması grafiği (yatay 0°).

Figure 10. The average stress-strain graph of the tensile specimen (flat 0°).

Çekme eğrisi grafiğinden elde edilen gerinim değerlerine Denklem (2) uygulanıldığında plastik gerinim (ϵ_{pl}) değerleri hesaplanır. Şekil 11'de plastik gerilme-plastik gerinme grafiği ve analize tanımlanan değerler verilmiştir [30].

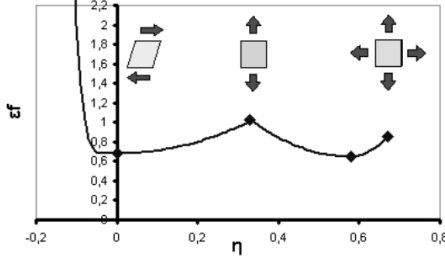
$$\epsilon_{pl} = \epsilon - \sigma/E \quad (2)$$



Şekil 11. Plastik gerilme-plastik gerinme grafiği.

Figure 11. Plastic stress-plastic strain graph.

Test sonucunda elde edilen kırılma şekil değiştirmesi (fracture strain) değeri $\epsilon_f^{pl}=0.051$ olarak belirlenmiş ve bu değer, sayısal analiz modeline tanımlanmıştır. Üç eksenli gerilme faktörü ile kopma şekil değiştirmesi arasındaki ilişki dikkate alınarak, ilgili yükleme koşulları karşılık gelen numune geometrileriyle eşleştirilmiştir (Şekil 12). Çalışmada çekme testi verileri esas alındığından, üç eksenli gerilme oranı $\eta=0,33$ olarak kabul edilmiştir. Analiz modelinin yarı-statik yapıda olması nedeniyle, şekil değiştirme hızı etkisi ihmal edilmiş ve $\dot{\epsilon} \approx 0$ varsayımı yapılmıştır [31], [32].

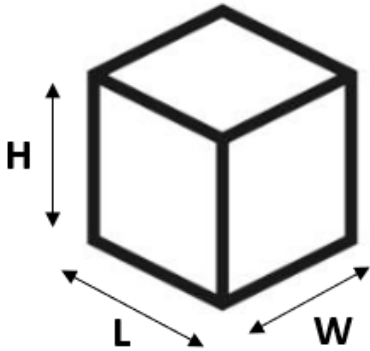


Şekil 12. Kopma gerinimi – üç eksenli gerilme durumu ilişkisi [32].

Figure 12. Failure strain vs. triaxiality [32].

Analize tanımlanan hasar evrimi (damage evolution) parametreleri aşağıda açıklanmıştır:

Hasar evrimi, yer değiştirme (displacement) esaslı olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşımda hasarın ilerleyişi; gerilme (strain) veya enerjiye dayalı bir tanımlama yerine, yer değiştirme üzerinden modellenmiştir. Yumuşama davranışı lineer olarak tanımlanmış olup, malzeme hasar ilerledikçe taşıma kapasitesinde doğrusal bir azalma meydana gelmektedir. Bu, birim şekil değiştirme arttıkça malzeme dayanımında orantılı bir düşüş olduğunu ifade eder. Bu parametre, birden fazla hasar modu bulunduğu, en baskın olanının (maximum) malzemenin taşıma kapasitesinin kaybına neden olacağını belirtmektedir. Başka bir deyişle, analiz sürecinde en kritik hasar mekanizması dikkate alınır. Analiz modeline kopma anındaki yer değiştirme (u_f) tanımlanırken, Denklem (3) ve Denklem (4) ile gösterilen ilgili formülasyonlardan yararlanılmıştır. Bu kapsamda, karakteristik uzunluk L_c değeri, bir sonlu eleman hücresinin hacminin küp kökü alınarak hesaplanmıştır (Şekil 13). Deneysel olarak elde edilen plastik kırılma şekil değiştirmesi (ϵ_f^{pl}) ile L_c çarpılarak, analize tanımlanacak "displacement at failure" değeri elde edilmiştir [26].



Şekil 13. Ağ hücresinin karakteristik uzunluk değerleri.

Figure 13. Characteristic length values of the mesh cell.

$$L_c = \sqrt[3]{V_e} = \sqrt[3]{LWH} \quad (3)$$

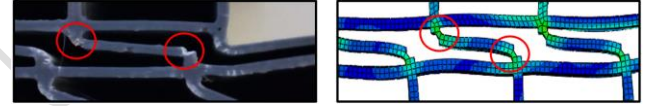
$$L_c = \sqrt[3]{0.5 \times 0.5 \times 2.5} = 0.855 \text{ mm}$$

$$u_f = L_c \times \epsilon_f^{pl} \quad (4)$$

$$u_f = 0.855 \times 0.051 = 0.0436 \text{ mm}$$

ABAQUS®'te eleman silme, hasar ve kırılma analizlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, malzemenin belirli bir deformasyon seviyesine veya hasar eşiğine ulaştığında elemanların simülasyon sırasında silinmesini sağlar. Genellikle Explicit çözüm yönteminde, dinamik analizler ve büyük deformasyonlar altında kullanılır. Eleman silme, özellikle kırılma malzemelerin çatlama ve kopma davranışlarını simüle etmek için tercih edilir. Elemanlar, hasar kriterlerini aştığında, örneğin plastik deformasyon, gerilme veya enerji eşiği aşıldığında silinir. Bu işlem, malzemenin gerçek kırılma davranışını modellemek için gereklidir. Eleman silindiğinde, yapıdaki gerilme dağılımı yeniden hesaplanır ve sistemin davranışı daha gerçekçi hale gelir [26].

Bu çalışmada söz konusu yöntem uygulanmış olup, deneysel ve sayısal kırılma mekanizmaları Şekil 14'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. İlgili şekilde görüldüğü üzere, sayısal simülasyon sonuçları deneysel bulgularla yüksek düzeyde uyum içerisindedir.



Şekil 14. Kafes yapının yüksek deformasyon altındaki kırılma davranışının deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırılması

Figure 14. Experimental and numerical comparison of the fracture behavior of the lattice structure under large deformation.

ABAQUS® yazılımında temas tanımlarının doğru bir şekilde modellenmesi, özellikle katmanlı üretimde elde edilen karmaşık geometrili polimer yapıların mekanik davranışının gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, "All with self" kontağı ve "Tangential behavior: frictional" tanımı, teması modellemek için tercih edilen temel yaklaşımlardan biridir. "All with self" seçeneği, analiz modelinde bulunan tüm yüzeylerin birbirleriyle ve kendi yüzeyleriyle temas kurabileceğini tanımlar. Özellikle özetik veya kafes geometrilerde, yük altında meydana gelen büyük deformasyonlar sırasında elemanların kendi üzerine katlanması veya kendile temas etmesi mümkündür. Bu nedenle, "self-contact" tanımının yapılması gereklidir. Aksi halde, yapının fiziksel davranışı eksik veya hatalı modellenmiş olur. "Tangential behavior" kısmında ise "frictional" model seçilerek PLA malzemesinin metal yüzeyle (veya kendi yüzeyiyle) kuru temas koşulları altında sürtünmeli etkileşimi tanımlanır. Bu, yük aktarımı sırasında yüzeyler arası kayma direncinin dikkate alınmasını sağlar [26].

Sürtünme etkilerinin mekanik testler üzerindeki rolü, literatürde önemli bir araştırma konusu olarak ele alınmıştır. Shil'ko tarafından yapılan çalışmada, sürtünme katsayısının deneysel koşullara bağlı olarak genellikle 0.1 ile 0.5 arasında değiştiği ve bu değişimin deneysel veriler üzerinde bozucu etkiler oluşturduğu vurgulanmıştır [33]. Benzer şekilde, Palaniandy ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise, 3B yazıcıyla üretilmiş PLA numunelerin çelik disk üzerinde farklı

kayma hızlarında yapılan pin-on-disk testlerinde sürtünme katsayısının 0.5243 ile 0.6702 arasında değiştiği belirlenmiştir [34]. Mevcut sayısal modelde ise, temas yüzeyindeki kuru sürtünmenin yapısal performansa olan etkisini parametrik olarak incelemek amacıyla sürtünme katsayısı (μ) değerleri 0.3, 0.4 ve 0.5 olarak seçilmiştir. Bu değerler kullanılarak yapılan analizlerde, her bir sürtünme katsayısına karşılık gelen maksimum basma kuvveti ve spesifik enerji absorpsiyonu değerleri hesaplanmış, elde edilen sayısal sonuçlar deneysel verilerin ortalama değerleri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Sayısal analizlerde kullanılan sürtünme katsayısının, elde edilen mekanik tepki üzerindeki etkisinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Table 5. Comparison of the effect of the friction coefficient used in numerical analyses on the mechanical response with experimental results.

Sürtünme Katsayısı	Maksimum Basma Kuvveti	Enerji Absorpsiyonu
0.3 μ (FEM)	4.178 kN	0.01372 kJ
0.4 μ (FEM)	4.186 kN	0.01391 kJ
0.5 μ (FEM)	4.19 kN	0.014 kJ
Deneysel Ortalama	4.28 kN	0.018 kJ

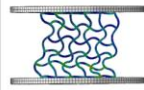
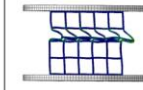
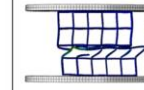
Sürtünme katsayısının artması, temas yüzeylerinde daha fazla yatay direnç oluşturarak yük aktarımını güçlendirir ve bu da yapının taşıma kapasitesini ve enerji absorpsiyonu kabiliyetini doğrudan artırır. Bu durum hem sayısal hem de deneysel çalışmalarla desteklenmektedir. Gosztola ve arkadaşlarının çelik-beton birleşimlerine yönelik gerçekleştirdiği kapsamlı çalışmada, sürtünme katsayısının 0.1'den 0.5'e çıkarılmasıyla yatay yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %50'ye varan bir artış rapor edilmiştir [35]. Benzer şekilde, Yu ve arkadaşları, beton numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalarda, yükleme plakaları ile beton yüzeyi arasındaki uç sürtünmesinin, numunenin hem tepe gerilmesi hem de deformasyon davranışı üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuştur [36].

Sürtünme etkisinin analiz edildiği parametre çalışmaları sonucunda, deneysel verilerle en uyumlu sonucu veren sürtünme katsayısının $\mu = 0.5$ olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, sayısal analizlerin devamında temas yüzeyinde bu sürtünme katsayısı referans alınarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde doğruluk ve hesaplama verimliliği açısından ağ yapısının uygun şekilde tanımlanması kritik bir rol oynamaktadır. Ağ kalitesi, eleman boyutu ve tipi gibi parametreler, yapının gerilme, şekil değiştirme ve genel mekanik davranışının doğru şekilde yakalanmasında doğrudan etkilidir. Özellikle karmaşık geometriye veya yüksek gerilme gradyanına sahip bölgelerde daha ince ve düzenli bir mesh yapısı kullanılması, analiz doğruluğunu artırırken, aşırı sayıda eleman içeren gereksiz detaylar ise hesaplama süresini ve maliyetini önemli ölçüde yükseltebilir. Bu nedenle hem doğru sonuçlar elde edebilmek hem de analiz sürecini optimize edebilmek adına uygun bir ağ stratejisinin belirlenmesi son derece önemlidir [12]-[14].

Şekil 15'de farklı ağ boyutlarına göre elde edilen deformasyon analiz sonuçları verilmiştir. Şekil incelendiğinde, 1 numaralı ağ yapısında elde edilen deformasyon davranışı deneysel sonuçlardan önemli ölçüde sapma göstermiştir. Öte yandan, 3 numaralı ağ yapısında ise yapısal bütünlüğün bozulduğu ve

parça kopmalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deformasyon açısından deneysel sonuçlarla en yüksek uyumu ise 2 numaralı ağ yapısı sağlamıştır.

Çalışma	1)	2)	3)
Ağ Boyutu	1 mm × 1 mm × 5 mm	0.5 mm × 0.5 mm × 2.5 mm	0.25 mm × 0.25 mm × 1.25 mm
Deformasyon			

Şekil 15. Ağ boyutunun deformasyon davranışı üzerine etkisi.

Figure 15. Effect of mesh size on deformation behavior.

Modelde kullanılan yapı duvar kalınlığı 1 mm olduğundan, bu değerden büyük ağ boyutları tercih edilmemiştir. Hesaplama süresinin artmasından ötürü ise en küçük ağ boyutu 0.25 mm olarak belirlenmiş ve bu aralıkta ağ boyutunun analiz sonuçlarına etkisi incelenmiştir.

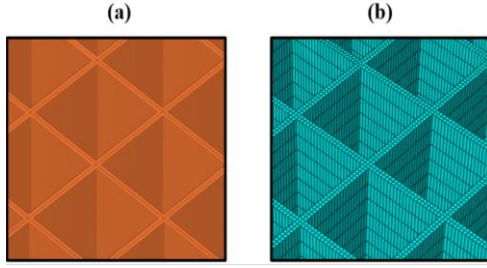
Tablo 6 incelendiğinde, maksimum basma kuvveti açısından 1) numaralı ağ yapısının deneysel veriye kıyasla yaklaşık %13.55 oranında sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Aynı parametre için 2) numaralı ağ yapısına göre fark %2.14, 3) numaralı ağ yapısına göre ise %16.4 olarak hesaplanmıştır. Enerji absorpsiyonu bakımından değerlendirildiğinde, 1) numaralı ağ yapısı ile elde edilen sonuçlar deneysel veriye göre %79.4 oranında sapma göstermektedir. Bu fark, 2) numaralı ağ yapısında %22.2 ve 3) numaralı ağ yapısında %38.9 olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Sayısal analizlerde kullanılan ağ boyutunun, elde edilen mekanik tepki üzerindeki etkisinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Table 6. Comparison of the effect of mesh size used in numerical analyses on the mechanical response with experimental results.

Ağ Boyutu Parametreleri ve Deneysel Veri	Maksimum Basma Kuvveti	Enerji absorpsiyon kapasitesi
1) 1 mm×1 mm×5 mm ağ boyutlu analiz	3.7 kN	0.0037 kJ
2) 0.5 mm×0.5 mm×2.5 mm ağ boyutlu analiz	4.19 kN	0.014 kJ
3) 0.25 mm×0.25 mm×1.25 mm ağ boyutlu analiz	5.12 kN	0.011 kJ
Basma Testi Ortalaması	4.28 kN	0.018 kJ

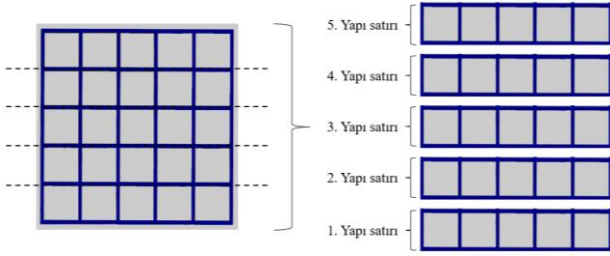
Sayısal analiz sonuçlarının incelenmesi neticesinde, ağ boyutunun azaltılmasının her durumda deneysel verilerle daha yüksek doğrulukta sonuçlar üretmediği gözlemlenmiştir. Yapılan parametrik karşılaştırmalar sonucunda, 2 numaralı ağ yapılandırmasıyla elde edilen sonuçların, deneysel verilerle en yüksek korelasyonu sağladığı belirlenmiştir. Bu sonucun altında yatan temel nedenin, Şekil 16'a da görüldüğü üzere, numunelerin 0.5 mm nozul çapına sahip bir 3B yazıcı ile üretilmiş olması ve 1 mm kalınlığındaki dış duvarların iki eşit katmana bölünerek yazdırılması olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, Şekil 16b'de gösterilen 0.5 mm × 0.5 mm × 2.5 mm boyutlarındaki ağ elemanlarının, katmanlı üretim sürecine özgü malzeme birikimini ve baskı yönelimini daha doğru şekilde temsil etmesi hem deformasyon modlarının hem de elde edilen mekanik tepkilerin daha gerçekçi bir biçimde modellenmesini sağlamıştır.



Şekil 16. a) 1 mm duvarın üretimi, b) 1 mm duvarın ağ yapısı
Figure 16. a) Fabrication of the 1 mm wall, b) Mesh structure of the 1 mm wall

3 Bulgular

Yapı satırı kavramı, göçme davranışlarının anlaşılması açısından önemli bir analiz aracıdır. Bu kavram sayesinde, yapı üzerinde oluşan göçmenin hangi sırayla ve nasıl gerçekleştiği detaylı bir şekilde incelenebilir. Özellikle hüresel veya örgü yapılar gibi kademeli deformasyona maruz kalan sistemlerde, her bir yapı satırının sırayla devreye girmesi ya da göçmesi, yapının genel dayanım ve süreklilik performansını belirlemektedir. Şekil 17’de gösterildiği üzere yapı, yatay düzlemde birbirini izleyen ve düşey doğrultuda konumlanan satırlardan oluşmaktadır. Bu satırlar, yapının yük taşıma kapasitesini sırayla devralan yapısal katmanlar gibi düşünülebilir.



Şekil 17. Yapı satırı

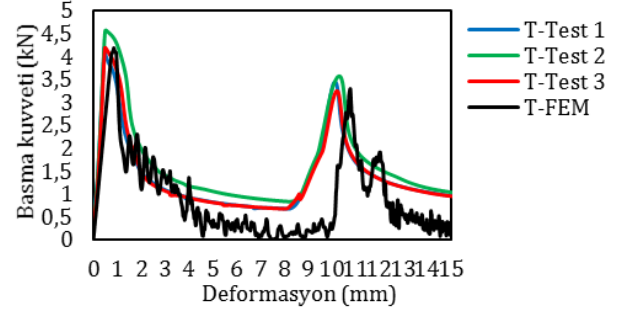
Figure 17. Structural line

Yapı, 15 mm’lik toplam deformasyon süreci boyunca, yaklaşık 0.5 mm deformasyonda maksimum basma kuvvetine ulaşmıştır (deneysel sonuçların ortalaması 4.28 kN). Ancak bu noktadan sonra plastik deformasyonların başlaması ve buna bağlı olarak gerçekleşen kırılmalar, ani bir kuvvet düşüşüne neden olmuştur. Yapı, bir sonraki destek noktasına kadar çökmeye devam etmiş ve ilk kırılan yapı satırı tamamen çöktükten sonra sistemde yeniden süreklilik sağlanmıştır.

Bu aşamada basma kuvveti tekrar artış göstermiştir. Yaklaşık 10 mm deformasyonda, yapı ikinci kez bir maksimum basma kuvveti değerine ulaşmıştır (deneysel sonuçların ortalaması 3.46 kN). Ancak, bu ikinci maksimum kuvvet, ilk pik değerinden daha düşük olmuştur. Bu durum, ilk kırılma ve buna bağlı çökme sonucunda yapısal bütünlüğün bozulmasından kaynaklanmaktadır. Ardından, 10 mm ile 12 mm arasındaki deformasyon sürecinde yapı bir kez daha çökmeye başlamış ve buna bağlı olarak basma kuvvetinde yeniden bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 18).

Gerçekleştirilen deneysel testler ve sayısal analizler, kırılmaların farklı yapı satırlarında gerçekleştiğini göstermektedir. Kırılma, Test 1 ve Test 3’de 2. yapı satırında ve Test 2’de 4. yapı satırında gözlemlenirken, sayısal analiz sonuçlarında 3. yapı satırında kırılma gerçekleşmiştir (Şekil

19). Detaylı incelemeler sonucunda deformasyon ve kırılma mekanizmalarının benzer olduğu gözlemlenmiştir. Farklı satırlarda çökme yaşanmasının temel nedeni, yüklemeye sürecinde yapıda meydana gelen küçük asimetrikliklerin, sistemin kararsız hale gelmesine yol açmasıdır [25].



Şekil 18. Deneysel ve sayısal deformasyon analizlerine ait basma kuvveti-deformasyon grafiği.

Figure 18. Compression force-deformation graph for experimental and numerical deformation analyses.

Deformasyon (mm)	Test 1	Test 2	Test 3	FEM
0				
0.5				
3				
6				
10				
12				
15				

Şekil 19. Basma işleminin farklı aşamalarında deneysel ve sayısal deformasyon analizi.

Figure 19. Experimental and numerical deformation analysis at different stages of the compression process.

Basma kuvveti-deformasyon grafikleri incelendiğinde, deneysel test sonuçlarının genel olarak tutarlı olduğu görülmektedir. Testler arasındaki küçük farklılıkların, üretim sürecinden kaynaklanan değişkenlikler (FDM yöntemi ile imalattan kaynaklanan tolerans farklılıkları, malzeme heterojenliği ve baskı parametreleri gibi etkenler) nedeniyle oluştuğu değerlendirilmektedir.

Sayısal analiz ve deneysel test verileri karşılaştırıldığında, testlerde birinci maksimum basma kuvvetinin ortalama değeri 4.28 kN, ikinci maksimum basma kuvvetinin ortalama değeri ise 3.46 kN olarak elde edilmiştir. Sayısal analiz sonuçları incelendiğinde ise birinci maksimum basma kuvveti 4.19 kN

(%2.1 fark), ikinci maksimum basma kuvveti ise 3.38 kN (%2.31 fark) hesaplanmıştır. Her iki veri seti arasındaki bu küçük farklılıkların, deneysel testlerde meydana gelen sürtünme, temas yüzeylerindeki mikro ölçekteki düzensizlikler ve malzemenin gerilme-altındaki mikroyapısal davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, yapının enerji absorpsiyon kapasitesi değerlendirildiğinde, deneysel testlerden ortalama 0.018 kJ, sayısal analizlerden ise 0.014 kJ değerleri elde edilmiştir. Bu iki sonuç arasında %22.22 oranında bir fark olduğu belirlenmiş olup, bu farklılığın temel sebepleri arasında analizlerde kullanılan sınır şartı kabulleri, sürtünme etkilerinin ve temas bölgesindeki mikro deformasyonların tam olarak modellenememesi yer almaktadır (Tablo 7).

Tablo 7. Mekanik özelliklerin deneysel ve sayısal analiz sonuçları.

Table 7. Experimental and numerical analysis results of the mechanical properties.

Analiz yöntemi	1. Maksimum basma kuvveti	2. Maksimum basma kuvveti	Enerji absorpsiyon kapasitesi
Deneysel analiz	4.28 kN	3.46 kN	0.018 kJ
Sayısal analiz	4.19 kN	3.38 kN	0.014 kJ

Enerji absorpsiyon kapasitesinde gözlenen %22'lik fark, literatürde benzer çalışmalarda da bildirilen yaygın bir durumdur. Bu farkın başlıca nedenlerinden biri, FDM yöntemiyle üretilen PLA malzemelerin gerilme-basma asimetrisi sergilemesidir. Bimodüler karaktere sahip olan bu malzemelerde, çekme ve basma altındaki mekanik tepkiler farklılık göstermekte; bu durum, çekme testlerinden elde edilen malzeme parametrelerinin basma analizlerinde kullanılmasında sınırlamalar yaratmaktadır. Ayrıca, ABAQUS® yazılımında kullanılan ductile damage modeli çekme kaynaklı hasar mekanizmalarını başarıyla yansıtırken, basma altındaki mikrohasarlar ve katmanlar arası deformasyon gibi enerji sönümleme süreçlerini tam olarak temsil edemeyebilir. Bununla birlikte, FDM üretiminde katmanlar arası bağlanma kalitesi ve oluşan mikro yapısal boşluklar, deneysel olarak ölçülen enerji sönümleme davranışına katkıda bulunurken, bu etkilerin sayısal modellemede doğrudan temsil edilmemesi enerji farkına neden olabilmektedir. Literatürde, Ji Qing ve ark. tarafından yapılan çalışmada PLA ve PLA-Cu kompozitlerinde enerji sönümleme kapasitesinin malzeme mikro yapısına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği ve bu etkinin sayısal analizlerde tam olarak yakalanamadığı belirtilmiştir [36]. Benzer şekilde Vyavahare ve Kumar, FDM yöntemiyle üretilen re-entrant yapılar üzerinde gerçekleştirdikleri analizlerde, deneysel ve sayısal enerji sönümleme değerleri arasında %20'ye varan farklar gözlemlenmiş ve bu farklılığı modelleme sınırlamaları ile karmaşık malzeme davranışlarına bağlamışlardır. Bu kapsamda, çalışmada gözlemlenen enerji sönümleme farkının, literatürdeki benzer sonuçlarla tutarlı olduğu ve modelin genel geçerliliğini zayıflatmadığı değerlendirilmektedir [37].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, bir kafes yapının tasarımı gerçekleştirilmiş, ardından tasarlanan yapı PLA malzemedan FDM yöntemiyle üretilerek basma yükü altındaki maksimum yük taşıma ve enerji sönümleme kabiliyetleri yarı-statik basma testleriyle belirlenmiştir. Sonrasında yapının sonlu elemanlar modeli

oluşturulmuş ve mekanik davranışı sayısal analizler yoluyla da incelenmiştir. Sonuçlar, deneysel ve teorik veriler arasında yüksek bir korelasyon olduğunu göstermiş, oluşan bazı farklılıkların olası sebepleri ise aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir:

- ✓ Üretim Kaynaklı Hatalar: Deneysel numuneler, Katmanlı Üretim yöntemi olan FDM ile üretilmiştir. Bu üretim yöntemi, katmanlar arası bağlanma kalitesi, iç boşluklar ve geometrik sapmalar gibi faktörlere bağlı olarak mekanik özelliklerde değişkenliklere yol açabilir.
- ✓ Malzeme Anizotropisi: FDM tekniğinin katmanlı üretim doğası gereği, malzemenin mekanik davranışı baskı yönüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu anizotropik etki, basma ve çekme özelliklerini farklı şekilde etkileyerek deneysel ve sayısal sonuçlar arasında farklılıklara neden olabilir.
- ✓ Sürtünme ve Temas Etkileşimleri: Basma testlerinde numuneler ve test cihazının plakaları arasında sürtünme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu etkileşimlerin tam olarak modellenmesi zordur ve bu nedenle deneysel ölçümler ile sayısal analiz sonuçları arasında küçük sapmalara yol açabilir.
- ✓ Hasar ve Kırılma Modellemesindeki Kısıtlamalar: Sayısal modelde sünek hasar modeli kullanılmıştır, ancak deneysel testlerde gözlemlenen karmaşık kırılma mekanizmaları tam olarak simüle edilememiştir. Mikro ölçekteki kusurlar, lokal burkulmalar ve çatlak ilerleme süreçleri, modellenmesi zor olan mekanizmalardır.
- ✓ Enerji Absorpsiyon Farklılıkları: Deneysel veriler, yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin sayısal analizlere kıyasla biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu farkın temel nedenleri arasında malzemenin gerçek deformasyon davranışının basitleştirilmiş modellerle temsil edilmesi, sürtünme etkilerinin tam olarak dikkate alınamaması ve mikro ölçekli deformasyonların ihmal edilmesi bulunmaktadır.
- ✓ Sınır Koşulları ve Yükleme Şartları: Sayısal modellerde sınır koşulları idealize edilerek homojen yükleme kabul edilir. Ancak, deneysel testlerde küçük hizalama hataları ve yük eksantriklikleri, yapının tepkisini etkileyebilir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte yürütülecek araştırmalarda aşağıdaki iyileştirme ve geliştirme adımları önerilmektedir:

- ✓ Malzeme Modelleme Yaklaşımının Genişletilmesi: Mevcut çalışmada kullanılan PLA gibi termoplastik malzemelerin yanı sıra, izotropik ve homojen malzeme özelliklerine sahip alternatif malzemeler kullanılarak sayısal modellerin oluşturulması mümkündür. Bu tür malzemelerle yapılan analizler, daha kararlı malzeme davranışları üzerinden yürütülerek yük-deformasyon ve enerji absorpsiyon eğrilerinin daha net karşılaştırılmasına olanak sağlayabilir.
- ✓ Çekme ve Basma Test Verilerinin Karşılaştırmalı Kullanımı: Yapılacak çalışmalarda, aynı malzemeye ait çekme testlerinden elde edilen mekanik özellikler

kullanılarak sonlu eleman modelleri kurulabilir. Bu modellerin çıktıları, doğrudan basma testlerine dayalı verilerle kurulan modellerin sonuçları ile karşılaştırılarak, test türüne bağlı modelleme duyarlılığı analiz edilebilir. Bu tür karşılaştırmalar, malzeme karakterizasyonunun sayısal model üzerindeki etkisini değerlendirmek açısından önemlidir.

- ✓ **Explicit Analiz Süresinin Gerçek Test Süresine Yaklaştırılması:** Bu çalışmada sonlu eleman analiz süresi, sınırlı hesaplama kaynakları nedeniyle 0.2 saniye ile sınırlandırılmıştır. Oysa gerçek deneysel test süresi yaklaşık 7 dakika (420 saniye) civarındadır. Analiz süresinin gerçek zamana daha yakın şekilde modellenmesi, atalet etkilerinin azaltılması ve daha gerçekçi deformasyon yanıtlarının elde edilmesi açısından faydalı olacaktır. Bu bağlamda, daha yüksek işlem gücüne sahip donanımlar kullanılarak sürelerin uzatılması, özellikle enerji absorpsiyon hesaplamalarının doğruluğunu artırabilir.

Sonuç olarak, sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu nedenle yöntemle ilişkin bazı kabuller ve kısıtlara rağmen sonlu elemanlar analizlerinin kafes geometriye sahip sandviç yapıların mekanik davranışlarını başarılı bir şekilde yansıttığı söylenebilir. Dolayısıyla bu çalışma, kafes geometriye sahip sandviç yapı tasarlayan ve eklemeli imalat yöntemleri ile üretimini gerçekleştirmek isteyen araştırmacılara bilgisayar ortamında etkin bir şekilde tasarım faaliyetleri sürdürmekte yardımcı olabilir. İleride yazarlar, malzeme modellerinin daha ayrıntılı hale getirilmesi, mikro yapısal etkilerin analiz modellerine dahil edilmesi ve gelişmiş hasar modelleme tekniklerinin kullanılması yoluyla sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki uyumu daha da artırmayı hedeflemektedirler.

5 Conclusions

In this study, a lattice structure was designed and subsequently fabricated using PLA material through the FDM method. The structure's maximum load-bearing capacity and energy absorption capability under compressive loading were determined by quasi-static compression tests. Following this, a finite element model of the structure was created, and its mechanical behavior was investigated through numerical analyses. The results showed a high correlation between experimental and theoretical data, and the potential causes of the observed discrepancies are evaluated as follows:

- ✓ **Manufacturing-Induced Defects:** The experimental specimens were produced using FDM, an additive manufacturing technique. This method can lead to variations in mechanical properties due to factors such as interlayer bonding quality, internal voids, and geometric deviations.
- ✓ **Material Anisotropy:** Due to the nature of the layer-by-layer deposition in FDM, the mechanical behavior of the material varies depending on the printing orientation. This anisotropic effect may cause differences between experimental and numerical results by affecting the tensile and compressive properties differently.
- ✓ **Friction and Contact Interactions:** During compression tests, frictional forces arise between the

specimen and the testing machine plates. Accurately modeling these interactions is challenging, which can lead to slight discrepancies between experimental measurements and numerical analysis results.

- ✓ **Limitations in Damage and Fracture Modeling:** A ductile damage model was employed in the numerical simulations. However, the complex fracture mechanisms observed in experimental tests could not be fully simulated. Micro-scale defects, local buckling, and crack propagation processes are mechanisms that are difficult to model accurately.
- ✓ **Differences in Energy Absorption:** Experimental data showed that the structure's energy absorption capacity was slightly higher than the values obtained from numerical analyses. The main reasons for this discrepancy include the simplification of the material's actual deformation behavior in the models, the inability to fully account for friction effects, and the neglect of micro-scale deformations.
- ✓ **Boundary Conditions and Loading Conditions:** In numerical models, boundary conditions are idealized and homogeneous loading is assumed. However, minor misalignments and load eccentricities in experimental setups can influence the structural response.

Based on the findings of this study, the following improvements and future research directions are proposed:

- ✓ **Expansion of Material Modeling Approaches:** In addition to the PLA thermoplastic material used in this study, numerical models can also be developed using alternative materials with isotropic and homogeneous properties. Analyses performed with such materials can facilitate a clearer comparison of load-deformation and energy absorption curves due to more stable material behavior.
- ✓ **Comparative Use of Tensile and Compressive Test Data:** Future studies may utilize mechanical properties obtained from tensile tests of the same material to build finite element models. The outcomes of these models can then be compared with those constructed based on compressive test data, allowing for an analysis of model sensitivity with respect to test type. Such comparisons are important for evaluating the effect of material characterization on numerical models.
- ✓ **Alignment of Explicit Analysis Duration with Actual Test Time:** In this study, the duration of the finite element analysis was limited to 0.2 seconds due to computational constraints, whereas the actual experimental test duration was approximately 7 minutes (420 seconds). Modeling the analysis duration closer to real time can help reduce inertial effects and yield more realistic deformation responses. Therefore, using hardware with higher computational power to extend the simulation time can significantly enhance the accuracy of energy absorption calculations.

In conclusion, the results obtained from the finite element model are in good agreement with the experimental findings. Thus, despite certain assumptions and limitations, finite element analyses can effectively reflect the mechanical

behavior of lattice-structured sandwich components. Accordingly, this study may assist researchers who aim to design lattice-structured sandwich components and manufacture them using additive manufacturing techniques by providing a useful framework for efficient design activities in a virtual environment. In the future, the authors aim to further improve the correlation between numerical and experimental results by enhancing material models, incorporating microstructural effects into analysis models, and applying advanced damage modeling techniques.

6 Yazar katkı beyanı

Yazar 1, literatür araştırmasını gerçekleştirmiştir. Numuneleri üretmiş ve testleri gerçekleştirmiştir. Sayısal modeli oluşturmuştur. Makalenin yazımında rol almıştır. Yazar 2 ve Yazar 3, test parametrelerini belirlemiş ve sayısal modelin kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sonuçların yorumlanmasına ve makalenin yazımına yardımcı olmuştur.

7 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur"

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır"

8 Kaynaklar

- [1] Gibson LJ, Ashby MF. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2nd ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1997.
- [2] Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. "Auxetic metamaterials and structures: A review". *Smart Materials and Structures*, 27, 023001, 2018.
- [3] Lianto F, Trisno R, Teh S. "The truss structure system". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9, 2460-2469, 2018.
- [4] Xu S. "Research on topology optimization design of truss structure". *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 86, 162-171, 2024
- [5] Mallikarjuna B, Bhargav P, Hiremath S, et al. "A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): Background, materials, process parameters and military applications". *International Journal of Interactive Design and Manufacturing*, 19, 651-665, 2023.
- [6] Turner N, Strong B, Gold SA. "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling". *Rapid Prototyping Journal*, 20, 192-204, 2013.
- [7] Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS". *Rapid Prototyping Journal*, 8, 248-257, 2002.
- [8] Eryildiz M. "Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: An experimental investigation". *European Mechanical Science*, 5, 116-120, 2021.
- [9] Antoniac I, Popescu D, Zapciu A, Antoniac A, Miculescu F, Moldovan H. "Magnesium filled polylactic acid (PLA) material for filament based 3D printing". *Materials*, 12, 719, 2019.
- [10] Kristiawan RB, Imaduddin F, Ariawan D, Ubaidillah, Arifin Z. "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters". *Open Engineering*, 11, 639-649, 2021.
- [11] eSUN Filament. "ePLA-HS Technical Data Sheet". <https://www.esun3d.com/tr/epla-hf-product/> (20.01.2024).
- [12] Structures Centre. "Common errors in finite element analysis and how to avoid them". <https://structurescentre.com/common-errors-in-finite-element-analysis-and-how-to-avoid-them> (13.02.2025).
- [13] Chandrupatla T, Belegundu A. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. 5th ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2021.
- [14] Fish J, Belytschko T. *A First Course in Finite Elements*. West Sussex, UK, Wiley, 2007.
- [15] Bruson D, Iuliano L, Galati M. "Experimental and numerical mechanical characterisation of additively manufactured polymeric lattice structures under uniaxial tensile load". *Meccanica*, 2024.
- [16] Aziz AR, Zhou J, Thorne D, Cantwell WJ. "Geometrical scaling effects in the mechanical properties of 3D-printed body-centered cubic (BCC) lattice structures". *Polymers*, 13, 3967, 2021.
- [17] Dong Z, Li Y, Zhao T, Wu W, Xiao D, Liang J. "Experimental and numerical studies on the compressive mechanical properties of the metallic auxetic reentrant honeycomb". *Materials & Design*, 182, 108036, 2019.
- [18] Alomarah A, Masood SH, Sbarski I, Faisal B, Gao Z, Ruan D. "Compressive properties of 3D printed auxetic structures: Experimental and numerical studies". *Virtual and Physical Prototyping*, 15, 1-21, 2019.
- [19] Ali MH, Batai S, Karim D. "Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structures". *Materials Today: Proceedings*, 42, 1800-1809, 2021.
- [20] Guo S, Ma Y, Liu P, Chen Y. "Mechanical properties of lattice structures with a central cube: Experiments and simulations". *Materials*, 17, 1329, 2024.
- [21] Zhang Y, Jing X, Wu Z, Zhang M, Wang L. "Compression behavior of 3D printed polymer TPU cubic lattice structure". *Materials Research*, 25, 2022.
- [22] Carlson RL, Kardomateas GA, Craig JI. *Mechanics of Failure Mechanisms in Structures*. 1st ed. Atlanta, USA, Springer, 2012.
- [23] Özen M, Kenan H, Azeloğlu CO. "Design and finite element assessment of functionally graded auxetic structures". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8, 303-315, 2024.
- [24] ASTM D638. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics". ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [25] Petryk H. *Material Instabilities in Elastic and Plastic Solids*. 1st ed. Vienna, AUT, Springer, 2014.
- [26] Dassault Systèmes. *ABAQUS® CAE User's Manual*. Vélizy-Villacoublay, FR, 2016.
- [27] Yeter İB, Kenan H, Azeloğlu CO. "Experimental and numerical investigation of the mechanical properties of PLA specimens manufactured by FDM method depending on part orientation". *IV. International Bandırma Scientific Studies Congress*, ASES Publications, 2025.
- [28] Hibbeler RC. *Mechanics of Materials*. 10th ed. Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson Education, 2017.
- [29] Meyers MA, Chawla KK. *Mechanical Behavior of Materials*. 2nd ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2008.
- [30] Okereke M, Keates S. *Finite Element Applications: A Practical Guide to the FEM Process*. Cham, Switzerland, Springer, 2018.

- [31] Peng J, Wang Y, Dai Q, Liu X, Liu L, Zhang Z. "Effect of stress triaxiality on plastic damage evolution and failure mode for 316L notched specimen". *Materials*, 12(19), 3198, 2019.
- [32] Neukamm F, Feucht M, Haufe A, Roll K. "A generalized incremental stress state dependent damage model for forming and crashworthiness simulations". *Proc. Numisheet 2008 – International Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*, Interlaken, Switzerland, 1–5 September, 2008.
- [33] Palaniandy L, Abdullah MMAB, Asyraf MRM, Nik Him NR, Noriman NZ, Radzi R. "Tribological behaviour of 3D printed polylactic acid (PLA) sliding against steel at different sliding speed". *Journal of Physics: Conference Series*, 2542(1), 012003, 2023.
- [34] Shil'ko SV. "The role of friction in mechanical tests of materials". *Journal of Friction and Wear*, 23(3), 98–102, 2002.
- [35] Gosztola D, Szép J, Rad MM. "The effect of the friction coefficient between the steel-concrete connection on the horizontal load capacity". *Material Strength and Applied Mechanics*, October 2024.
- [36] Yu W, Jin L, Du X. "Experiment and meso-scale modelling on combined effects of strain rate and specimen size on uniaxial-compressive failures of concrete". *Materials Strength and Applied Mechanics*, 32(5), 2023.
- [37] Qing J, Wang Z, Wang Y. "Study on the compression energy absorption characteristics of 3D printed PLA and PLA-Cu materials". *Journal of Physics: Conference Series*, 2478(3), 032086, 2023.
- [38] Vyavahare S, Kumar S. "Numerical and experimental investigation of FDM fabricated re-entrant auxetic structures of ABS and PLA materials under compressive loading". *Rapid Prototyping Journal*, 27(2), 223–244, 2021.