



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yazdırma açısının 3B yazıcıda üretilen PLA numunenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi

Investigation of the effects of printing angle on mechanical properties of PLA specimen fabricated with 3D printer by using experimental and finite elements method

Yazar(lar) (Author(s)): Özkan ÖZ¹, Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK²

ORCID¹: 0000-0002-9833-429X

ORCID²: 0000-0001-8025-8236

To cite to this article: Öz Ö., Öztürk F. H., “Yazdırma açısının 3B yazıcıda üretilen PLA numunenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 26(2): 529-540, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Öz Ö., Öztürk F. H., “Yazdırma açısının 3B yazıcıda üretilen PLA numunenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2): 529-540, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.882313

Yazdırma Açısının 3B Yazıcıda Üretilen PLA Numunenin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi

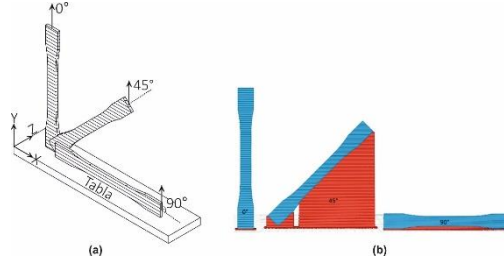
Investigation of the Effects of Printing Angle on Mechanical Properties of PLA Specimen Fabricated with 3D Printer by using Experimental and Finite Elements Method

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Numunelerin farklı yazdırma açılarındaki plastik davranışı Hill akma kriteri ile tanımlanmıştır./ The plastic behavior of the specimens at different printing angles was defined by the Hill yield criterion.
- ❖ Sonlu elemanlar analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır./ The results of finite elements analysis and experimental results were compared.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

3B yazıcı kullanılarak üretilen numunelerde yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi deneysel yöntem ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. / The effect of printing angle on mechanical properties of the specimens fabricated with 3D printer was investigated by experimental and finite elements method.



Şekil. 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için numunelerin a) şematik ve b) destek yapı görüntüsü / **Figure.** Schematic (a) and support structure (b) images of specimens for the printing angles of 0°, 45° and 90°)

Amaç (Aim)

Yazdırma açısının PLA numunenin mekanik özelliklerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / It is aimed to determine the effect of printing angle on the mechanical properties of the PLA specimen.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sonlu elemanlar metodunda numuneler transvers izotropik malzeme olarak kabul edilmiş ve numunenin plastik davranışı Hill akma kriteri ile tanımlanmıştır. / Specimens were accepted as transversely isotropic in the finite elements method and the plastic behavior of the material was defined by Hill yield criterion.

Özgünlük (Originality)

Sonlu elemanlar metodunda Hill akma kriterinin farklı açılarda yazdırılan PLA numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılması literatür açısından bir yeniliktir. / The use of Hill yield criterion in the finite element method to determine the mechanical properties of PLA specimens printed at different angles is an innovation in the literature.

Bulgular (Findings)

Yazdırılan PLA numune dayanımının belirlenmesinde Hill akma kriterinin uygun olduğu görülmüştür. / Hill yield criterion was found to be suitable for determining the strength of the printed PLA specimen.

Sonuç (Conclusion)

Artan yazdırma açısı ile mekanik özelliklerin önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır. / It was concluded that the mechanical properties increased significantly with increasing the printing angle.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.K

Yazdırma Açısının 3B Yazıcıda Üretilen PLA Numunenin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Özkan ÖZ*, Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye
(Geliş/Received : 17.02.2021 ; Kabul/Accepted : 29.11.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 15.12.2021)

ÖZ

Eriyik yığıma modelleme, 3B yazıcıların gelişimi ve çeşitlenmesi ile sanayi ve evsel kullanımda tercih edilen önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Ancak, 3B yazıcılarda yazdırılan parça dayanımını etkileyen parametre sayısı oldukça fazladır. Bu çalışmada, 3B yazıcı kullanılarak üretilen numunelerde yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi deneysel yöntem ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Test numunelerinin yazdırılmasında PLA filament ve farklı yazdırma açıları (0°, 45°, 90°) kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde numuneler transvers izotropik malzeme olarak kabul edilmiştir. Malzemenin plastik davranışı Hill akma kriteri ile tanımlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için sonlu elemanlar analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, yazdırılan numunelerin dayanımının belirlenmesinde transvers izotropik malzeme kabulü ve Hill akma kriterinin kullanılabilirliğini göstermiştir. Çalışmanın son aşamasında, 15°, 30°, 60°, 75° yazdırma açıları için sonlu elemanlar analizleri tekrarlanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçlar, numunelerin mekanik özelliklerinin ve maksimum yük değerlerinin yazdırma açısının artması ile belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, yazdırma açısı, hill akma kriteri, mekanik özellikler.

Investigation of the Effects of Printing Angle on Mechanical Properties of PLA Specimen Fabricated with 3D Printer by using Experimental and Finite Elements Method

ABSTRACT

Fused deposition modeling has become an important technology preferred in industrial and domestic use with the development and diversification of 3D printers. However, the number of parameters that affect the strength of the printed part in 3D printers is quite high. In this study, the effect of printing angle on the mechanical properties of the specimens fabricated with 3D printer was investigated through experimental and finite elements method. PLA filament and different printing angles (0°, 45°, 90°) were used for printing the test specimens. Specimens were accepted as transversely isotropic in the finite elements analysis. The plastic behavior of the material was explained by Hill yield criterion. In the first stage of the study, results of finite elements analysis and experimental study for 0°, 45° and 90° printing angles were compared. Comparison results showed that the acceptance of transversely isotropic material and Hill yield criterion can be used to determine the strength of the printed part. In the last stage of the study, finite elements analysis was repeated for 15°, 30°, 60°, 75° printing angles. The finite element analysis and experimental results showed that the mechanical properties and maximum load values of specimens increased significantly with increasing of printing angle.

Keywords: 3D printer, printing angle, hill yield criterion, mechanical properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli imalat (Eİ), geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda endüstriyel uygulamalarda artan oranlarda kullanılmaya başlayan ve gelişime açık önemli bir imalat teknolojisidir [1-5]. Eİ, bilgisayar destekli tasarım yazılımları ve dijital tarama sistemleri ile elde edilen sanal modellerden üç boyutlu (3B) nesnel oluşturulmasını temel alan imalat yöntemidir. Bu imalat

yönteminde 3B sanal nesne geometrisi baskıya hazırlık aşamasında stereolitografi (STL) dosyasına dönüştürülür. Baskı geometrisi, STL dosyası ve dilimleme yazılımları aracılığı ile baskının yapılacağı makineye tanıtılır ve uygun hammadde kullanılarak nesnel katmanlar halinde son ürüne dönüştürülür [6]. Parçaların imalatında herhangi bir bağlama kalıbına ihtiyaç duyulmaması, talaşlı imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında önemli oranda malzeme tasarrufu sağlaması ve katmanlar halinde karmaşık yapıların imalatının mümkün olması bu yöntemin geleneksel imalat yöntemlerine göre sahip olduğu üstünlükler olarak

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ooz@karabuk.edu.tr

sıralanabilir [7-11]. Eİ yönteminin birden fazla alt grubu bulunmaktadır. En sık kullanılan Eİ yöntemleri olarak, stereolitografi (SLA), eriyik yığıma modelleme (EYM), seçici lazer eritme (SLE) ve seçici lazer sinterleme (SLS) sayılabilir [12-15]. Eİ yöntemlerinden olan EYM, Stratasys. Inc, tarafından geliştirilen ve dünya genelinde evsel ve endüstriyel alanda en çok kullanılan Eİ yöntemlerinden biridir [7]. EYM yönteminde 3B yazıcılar kullanılarak nesnel katmanlı olarak yazdırılır. Bu yöntemde, hammadde termoplastik polimer filamenttir. Poli (laktik Asit) (PLA) ve Akrilonitril bütadien stiren (ABS) termoplastik polimer filamentler EYM yönteminde en çok tercih edilen polimerik hammaddelerdir. Termoplastik polimerler, 3B yazıcılarda, nozullar kullanılarak yarı sıvı forma dönüştürülür. Yarı sıvı formdaki filament daima bir önceki katman üzerine yazdırılır ve katılarak çevreleyen malzemelerle bütün hale gelir. Tüm katman yazdırıldığında, nesneyi destekleyen platform bir katman yüksekliği kadar aşağı iner ve bir sonraki katman yazdırılır.

EYM ile üretilen parçaların mekanik özelliklerini, yazdırılan malzemenin özellikleri ile yazdırma parametreleri etkilemektedir. Bu parametrelere örnek olarak, yazdırma yönü, yazdırma boşluğu, yazdırma genişliği ve katman kalınlığı verilebilir. Parametrelerin etkilerini belirlemek için mekanik test yöntemleri, analitik ve nümerik metodlar kullanılmaktadır. EYM yöntemi kullanılarak yazdırılan parçaların mekanik davranış ve özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar önemli oranda artmıştır.

Lee ve diğ. [16], yazdırma açısı, boşluk, yazdırma genişliği, renk ve model sıcaklığı gibi parametrelerin, yazdırılan parçaların basma dayanımına olan etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar, tüm parçaların basma özelliklerinin anizotropik malzeme davranışına sahip olduğunu göstermiştir. Rodríguez ve diğ. [17], EYM yöntemi ile yazdırılan ABS malzemenin mekanik davranışını incelemiştir. Hammadde olarak kullanılan ABS filamentin dayanımı ile aynı filament ile yazdırılan parça dayanımının birbirinden farklı olduğunu ve yazdırılan parçalarda dayanımın filament dayanımına göre %22-57 oranlarında düştüğünü belirtmişlerdir. Sood ve diğ. [18], katman kalınlığı, yönlenme, yazdırma açısı, yazdırma genişliği ve boşluk gibi işlem parametrelerinin EYM malzemelerin çekme, eğme ve darbe dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Katmanlar arası bozulmaların dayanımda meydana gelen düşüşün temel sebebi olduğunu belirtmişlerdir. Tronvoll ve diğ. [19], boşluk boyutunun, yazdırılan parçanın çekme dayanımı üzerine etkisini araştırmışlardır. Enine olarak yazdırılmış parçanın ortalama boşluk boyutunun, boyuna yazdırılmış parçadan daha fazla olduğunu ve boyuna yazdırma ile karşılaştırıldığında enine yazdırmanın çekme dayanımını düşürdüğünü açıklamışlardır. Ahn ve diğ. [20], teorik çekme dayanımını tahmin etmek için Tsai-Wu hasar kriterini kullanmış ve teorik sonuçların deneysel sonuçlar ile benzer olduğunu belirtmişlerdir. Yao ve diğ. [21], yazdırılan parçada yazdırma açısı ve katman kalınlığının

çekme dayanımına etkisini belirlemek için analitik model oluşturmuşlardır. Analitik model ve deneysel çalışma sonuçlarının birbirine yakın olduğunu belirtmişlerdir. Casavola ve diğ. [22], EYM yöntemi ile yazdırılan parçaların mekanik davranışını klasik lamina teorisi ile açıklamışlardır. Elastik sabitlerin değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Zou ve diğ. [23], 3B yazdırma ile üretilen ABS parçanın yazdırma açısına göre, elastisite modülü ve akma dayanımındaki değişimi incelemiştir. Yazdırma açısının etkisini dikkate alarak anizotropik malzeme modeli kullanmışlardır. Xia ve diğ. [24], yazdırılan parçaların mekanik davranışını tanımlamak amacıyla, Hill akma kriterini kullanmışlardır. Deneysel çalışmada, anizotropik özelliklerin, yazdırılan parçaların elastisite modülü ve dayanımı için önemli olduğunu belirtmişlerdir. Parçaların anizotropik davranışını açıklamak için Hill akma kriterinin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Herhangi bir yönde yazdırılan parçaların elastisite modülü ve akma noktasının önerilen akma kriteri kullanılarak belirlenebileceğini açıklamışlardır.

Yapılan çalışmalar, EYM yöntemi ile yazdırılan parçalarda yazdırma açısının, parçanın mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak, yapılan çalışmalar genel olarak, deneysel veya analitik çözümleri kapsamakta ve sonlu elemanlar analizi (SEA) içeren çalışma sayısı deneysel ve analitik çözümler ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak yapılan çalışmalarda ise genellikle, ABS filament ile yazdırılan parçalarda yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. PLA filament ile yazdırılan numunelerde yazdırma açısının mekanik özelliklere etkisini inceleyen sınırlı sayıda SEM çalışması mevcuttur. Bu çalışmalarda ise EYM yöntemi ile yazdırılan numunelerin anizotropik malzeme davranışını açıklamak için uygunluğu literatürde belirtilen Hill akma kriterinin kullanıldığı çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, %100 doluluk oranında, yazdırma parametreleri (katman kalınlığı, yazdırma hızı, ekstrüzyon ve tabla sıcaklıkları) sabit tutularak, farklı yazdırma açılarının PLA filament ile yazdırılan çekme test numunesinin mekanik özelliklerine etkisi deneysel çalışma ve SEM kullanılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar metodunda, farklı yazdırma açılarında değişen mekanik özelliklerin belirlenmesinde Hill akma kriteri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ve SEA sonuçları karşılaştırılarak, kullanılan akma kriteri doğrulanmış ve deneysel çalışmalarda olmayan farklı yazdırma açısı değerleri için mekanik özelliklerdeki değişim SEM kullanılarak belirlenmiştir.

2. MALZEME ve DENEYSEL ÇALIŞMA (MATERIAL and EXPERIMENTAL STUDY)

2.1 Test Numunelerinin Yazdırılması (Printing of Test Specimens)

Numunelerin yazdırılmasında Şekil 1’de gösterilen Zaxe X1 3B kartezyen tipi yazıcı kullanılmıştır.



Şekil 1. Zaxe X1 3B yazıcı (Zaxe X1 3D printer)

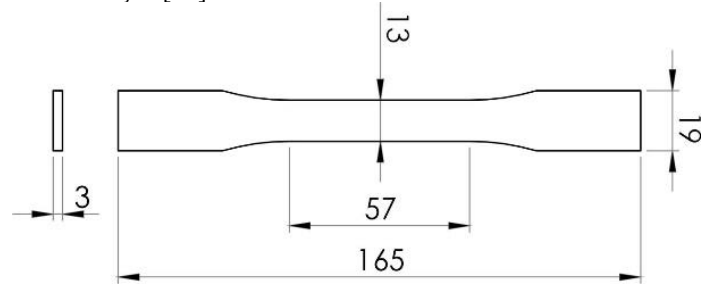
EYM yöntemi ile üretilen parçalarda yazdırma parametreleri parça dayanımını önemli oranda etkilemektedir. Çekme ve eğilme dayanımlarının ekstrüzyon ve tabla sıcaklıklarının artması ile arttığı, yazdırma hızı ve katman kalınlığının artması ile düştüğü konu ile ilgili yapılan çalışmalarda belirtilmektedir [25-28]. Yapılan bu çalışmada, numunelerin yazdırılmasında mekanik özelliklere önemli oranda etkisi olduğu bilinen yazdırma parametreleri sabit tutulmuş ve sadece yazdırma açılarındaki değişimin etkileri göz önüne alınmıştır. Yazdırma hızı, tabla ve ekstrüzyon sıcaklıkları kullanılan yazıcı tarafından önerilen PLA ayarlarına göre seçilmiştir. 3B yazıcıda kullanılan nozul çapı 0.4 mm, katman kalınlığı 0.4 mm, yazdırma hızı 60 mm/s, tabla

sıcaklığı 60 °C ve ekstrüzyon sıcaklığı 210 °C’dir. PLA filament olarak Flashforge (Çin) kullanılmıştır. Kullanılan filamentin özellikleri Çizelge 1’de gösterilmektedir. Çizelge 1’e göre yazıcı tarafından önerilen yazdırma parametreleri, kullanılan PLA filament için üretici firma tarafından önerilen ekstrüzyon sıcaklık aralığı, tabla sıcaklığı ve yazdırma hız aralığı ile uyumludur.

Çizelge 1. PLA filament özellikleri [29] (Properties of PLA filament)

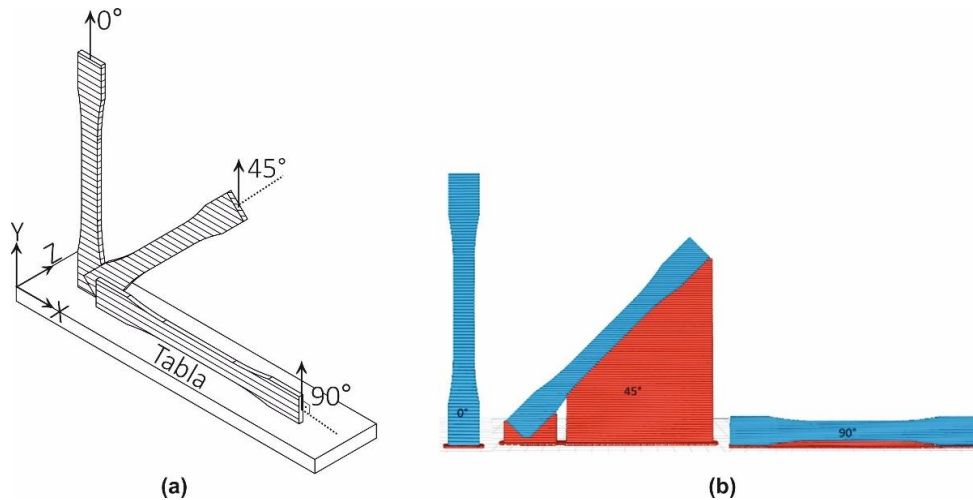
Parametreler	Değer
Ekstrüzyon sıcaklığı (°C)	190-220
Önerilen tabla sıcaklığı (°C)	60
Filament çapı (mm)	1.75
Yazdırma hızı (mm / sn)	40-120
Yoğunluk (23 °C’de g/cm ³)	1.2 ± 0.02

Yazdırılan çekme test numunesi boyutları Şekil 2’de gösterilmektedir. Numunelerin yazdırılmasında toplam uzunluğu 165 mm olan ASTM-D638 Tip I numune kullanılmıştır [30].



Şekil 2. Test numunesi ölçüleri (birim:mm) (Dimensions of test specimen (unit:mm))

Şekil 3’te farklı yazdırma açılarındaki numunelerin şematik görünümü ve destek yapıları gösterilmektedir. Eksenel yazdırma yönleri 0° ve 90°, eksen dışı yazdırma yönü 45° olarak belirlenmiştir. 90° numunelerde yazdırma ve çekme test yükü aynı doğrultudadır. 0° yazdırma yönü çekme yönüne diktir. Yazdırma işlemi sırasında, dilimleme yazılımı ile Şekil 3a’da gösterilen numunelerin yazdırılabilmesi amacıyla, her numune için

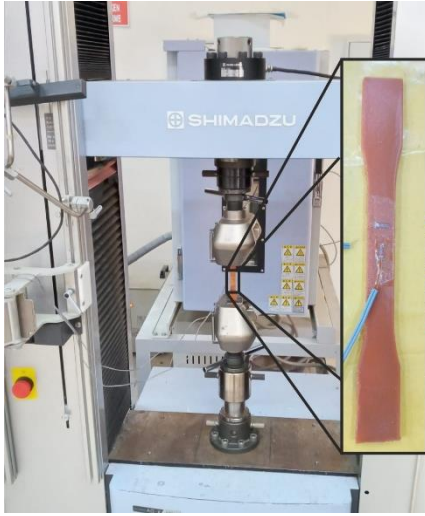


Şekil 3. 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için numunelerin a) şematik ve b) destek yapı görüntüsü (Schematic (a) and support structure (b) images of specimens for the printing angles of 0°, 45° and 90°)

destek yapıları eklemiştir (Şekil 3b). Destek yapıları yazdırma işleminden sonra yüzeylerden kesilerek çıkarılmıştır.

2.2 Tek Eksenli Çekme Testi (Uniaxial Tensile Test)

0°, 45° ve 90° yazdırma açılarındaki numunelerin çekme testi Shimadzu AG-100 kNX çekme test cihazında 5 mm/dk hız ile oda sıcaklığında yapılmıştır. Numuneler hasara uğrayana kadar yüklemeye devam edilmiştir. Tüm yazdırma yönleri için en az üç numune test edilmiştir. Numunenin boyuna ve enine şekil değişimleri ilk ölçüm “gage” bölgesinde numunenin ortasına yapıştırılan iki adet gerinim ölçer (strain-gage) ile belirlenmiştir (Şekil 4).



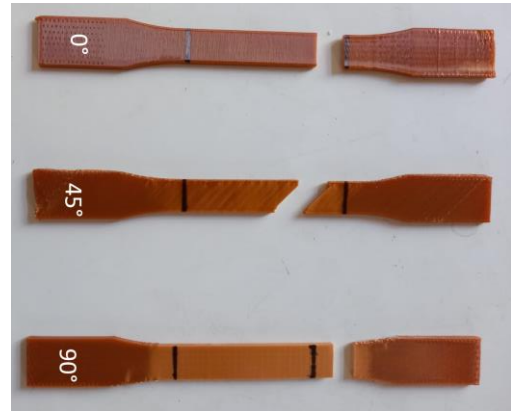
Şekil 4. Çekme test cihazı ve gerinim ölçer bağlantı detayı (Tensile test machine and connection detail of strain-gage)

2.2.1 Tek eksenli çekme test sonuçları (Results of uniaxial tensile test)

Tek eksenli çekme testi sonrası hasara uğrayan numuneler Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te gösterilen hasara uğrayan numuneler için kırılma davranışlarını açıklamadan önce, EYM yöntemi ile yazdırılan parçalarda meydana gelebilecek kırılma tiplerinin belirtilmesi hasar davranışlarını tanımlama açısından önemlidir. Yazdırma açısına bağlı olarak, EYM yöntemi ile yazdırılan numunelerde katman içi ve katmanlar arası kırılma olmak üzere iki farklı hasar davranışı gözlemlenir. Katman içi kırılmada hasar, malzemeyi oluşturan katmanlarda meydana gelmesine rağmen, katmanlar arası kırılmada, birbiri üzerine yapışan polimer fiberler arasında delaminasyon hasarı oluşur [21]. EYM yöntemi ile imal edilen parçalarda, yazdırma yönünün yük yönü ile aynı olması durumunda katman içi kırılma meydana gelir ve yüksek dayanım değerlerine ulaşılır. Katman içi kırılmada numune dayanımını belirleyen etken katmanları oluşturan fiberlerin dayanımıdır. Bu durumda, uygulanan yük, katmanı oluşturan bütün fiberler tarafından taşınır ve fiberler arası yapışmanın yük taşımaya etkisi oldukça sınırlıdır. Yazdırma yönü ile yük doğrultusu arasındaki açısal değişim arttıkça hasar davranışı katmanlar arası

kırılma hasarı gösterir ve dayanım katmanlar arası yapışma ile sınırlanır [31-33].

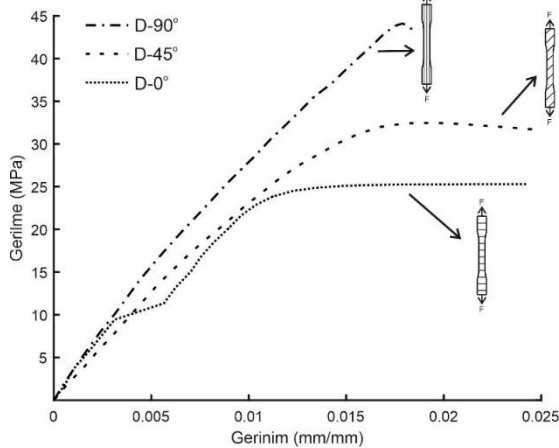
Şekil 5 incelendiğinde, üç farklı yazdırma açısı için çatlak ilerlemesi numunelerin kenarlarından başlayarak genişlik boyunca ilerlemiş ve kırılma hasarı meydana gelmiştir. Yazdırılan numunelerde yazdırma yönüne bağlı olarak katman içi hasar ve katmanlar arası yapışma hasarı gerçekleşmiştir. 0° ve 45° yazdırma açılarındaki çatlak ilerlemesi yazdırma yönü doğrultusunda gerçekleşmiş ve hasar, katmanlar arası yapışma hasarı şeklinde meydana gelmiştir. 90° yazdırma açısı için yazdırma yönüne dik doğrultuda katman içi hasar meydana gelmiştir. Numunelerde hasarın meydana geldiği bölgeler incelendiğinde, 0° ve 45° yazdırma açılarındaki hasar, ölçüm bölgesi içerisinde, 90° yazdırma açısı için ise ölçüm bölgesi dışında fiber yönlenmesinin değişime uğradığı, geometrinin kavis kısmına yakın bölgede meydana gelmiştir.



Şekil 5. Çekme testi sonrası numune hasarları (Failure of specimens after tensile test)

Şekil 6'da yazdırma açılarına göre numunelerin çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri gösterilmektedir. Çekme testi ile numunelerin gerilme-gerinim eğrileri ve mekanik özellikleri (elastisite modülü, akma gerilmesi, maksimum çekme gerilmesi, poisson oranı) belirlenmiştir. Şekil 6'da ve makale içerisinde “D” kısaltması deneysel sonuçları ifade etmek için kullanılmıştır. Yazdırma açısındaki artış ile test numunesi dayanımında belirgin şekilde artma meydana gelmiştir. En yüksek dayanım değeri 90° açı ile yazdırılan numunede, en düşük dayanım değeri ise 0° ile yazdırılan numunede meydana gelmiştir. 0° açı ile yazdırılan numunede dayanımda meydana gelen azalmanın sebebi hasarın katmanlar arası meydana gelmesidir. Katmanlar arası hasar oluşumunda düşük yapışma dayanımı veya oluşabilecek boşluklar, dayanımı belirleyici etkenlerdir. [18]. 45° açı ile yazdırılan numunede dayanım 0° ile yazdırılan numuneden fazla, 90° açı ile yazdırılan numuneden ise düşüktür. 0° ve 45° açı ile yazdırılan numunelerde hasar, benzer şekilde, katmanlar arasında meydana gelmesine rağmen, 45° açı ile yazdırılan numune dayanımının fazla olması, fiberler arası yapışma uzunluğunun artması ve kayma dayanımının etkisinde fiberlerin ayrılmasına

bağlanmaktadır [34]. Ulaşılan maksimum gerinim değerleri karşılaştırıldığında, 45° ve 0° yazdırma açısına sahip numunelerin gerinim değerleri benzer ve 90° açı ile yazdırılan numuneden fazladır. Numunelerde ulaşılan maksimum gerinim değerlerini belirleyici temel faktörler hasar oluşum bölgeleri ile yazdırma açılarıdır. 90° açı ile yazdırılan numunede, yukarıda da belirtildiği gibi 0° ve 45° yazdırma açılarında sahip numunelerden farklı olarak, hasarın ölçüm bölgesi dışında gerçekleşmesi gerinim değerinin beklenenden düşük olmasına neden olmuştur. 0° ve 45° açı ile yazdırılan numunelerde eğrinin lineer bölgeyi takip eden, plastik şekil değişiminin meydana geldiği kısımda gerilme artışı olmadan gerinim artmaya devam etmiştir. Yük yönüne dik veya paralel olmayan 45° yazdırma açısında gerinim değerindeki belirgin artış, fiberlerin yük yönüne doğru yönlendirilerek belirli bir dönüş uğraması ve bu dönüş ile meydana gelen ek uzamanın etkisi göz önüne alınarak açıklanabilir [35]. 0° yazdırma açısı için eğrideki birinci kırılma noktası dikkate alındığında, gerinim değerindeki ek artış fiberler arasında yapışma çizgilerinde karşılaşılabilecek kademeli hasar oluşumuna bağlanabilir ve fiberlerin plastik davranışından bağımsız şekilde uzaması ile açıklanabilir.



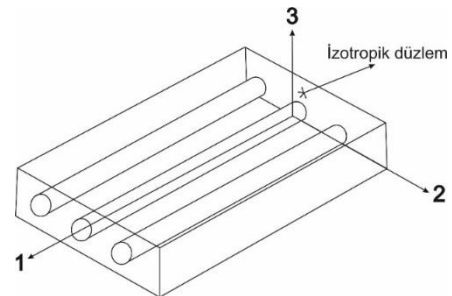
Şekil 6. 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için deneysel gerilme-gerinim eğrileri (Experimental stress-strain curves for the printing angles of 0°, 45° and 90°)

Çekme test sonuçları yazdırma yönü ile çekme yükü yönünün aynı olması durumunda en yüksek dayanıma ulaşıldığını göstermektedir. Çizelge 2’de çekme test sonuçlarına göre elde edilen, numunelerin mekanik özellikleri gösterilmektedir.

3. MALZEME MODELİ (MATERIAL MODEL)

3.1 Elastik Model (Elastic Model)

Yazdırılan numuneler transvers (enine) izotropik olarak kabul edilmiştir. 3B yazıcılar ile yapılan çalışmalarda, yazdırılan parçaların yük altındaki davranışını tanımlamak amacıyla transvers izotropik malzeme kabulü deneysel çalışmalar ile yakın ve uyumlu sonuçlar vermektedir [27]. Transvers izotropik malzeme kabulünde yazdırma yönüne dik kesit izotropik düzlem olarak kabul edilmekte ve bu düzlem içerisinde her doğrultuda mekanik özellikler eşit alınmaktadır. Şekil 7’de gösterilen 2-3 düzlemi, transvers izotropik malzeme kabulüne göre izotropik düzlemdir [36]. İzotropik düzlem aynı zamanda, 90° yazdırma açısına sahip numunenin en kesitidir.



Şekil 7. Transvers izotropik malzeme izotropik düzlemi (Isotropy plane of transversely isotropic material)

Ortotropik malzeme, izotropi düzlemine sahip olduğu durumda transvers izotropik malzeme olarak adlandırılır. Ortotropik malzemelerin elastik davranışını tanımlamak için Hooke kanunu matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir [36].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Yukarıdaki matriste, ε_i ve γ_{ij} ($i, j=1,2,3$) normal ve kayma gerinim bileşenlerini, σ_i , τ_{ij} normal ve kayma gerilme bileşenleri belirtmektedir. 1, 2 ve 3 indisleri asal malzeme yönlerini göstermektedir. Matris içerisindeki sabitler:

Çizelge 2. Yazdırma açısına bağlı deneysel mekanik özellikler (Experimental mechanical properties depending on the printing angle)

Yazdırma açısı	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı	Akma gerilmesi (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)
0°	$E_2 = 2424$	$\nu_{21} = 0.38$	23,8	25,31
45°	$E_{45^\circ} = 3069$	-	26,1	32,49
90°	$E_1 = 3668$	$\nu_{12} = 0.42$	41,5	44,12

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{1}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{33} = \frac{1}{E_3} \\
 S_{44} &= \frac{1}{G_{23}}, S_{55} = \frac{1}{G_{13}}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \\
 S_{21} &= S_{12} = \frac{-\nu_{12}}{E_1} = \frac{-\nu_{21}}{E_2} \\
 S_{31} &= S_{13} = \frac{-\nu_{13}}{E_1} = \frac{-\nu_{31}}{E_3} \\
 S_{32} &= S_{23} = \frac{-\nu_{23}}{E_2} = \frac{-\nu_{32}}{E_3}
 \end{aligned} \tag{2}$$

şeklinde [36]. Sabitler içerisindeki değişkenler E_i , ν_{ij} ve G_{ij} sırasıyla, elastisite modülünü, poisson oranını ve kayma modülünü göstermektedir. Ortotropik malzeme 9 bağımsız değişkene ($E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}$ ve G_{23}) sahiptir. Transvers izotropi durumunda [($S_{13} = S_{12}, S_{33} = S_{22}, S_{55} = S_{66}$), ($E_2 = E_3, \nu_{12} = \nu_{13}, \nu_{21} = \nu_{31}, \nu_{23} = \nu_{32}, G_{12} = G_{13}$)] Denklem (1) aşağıdaki matris formunda tekrar yazılabilir [36]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \tag{3}$$

Transvers izotropik malzeme kabulünde 5 bağımsız elastik sabitin belirlenmesi gerekir. Bu sabitler, 1 ve 2 yönlerindeki elastisite modülleri (E_1 ve E_2), düzlem içi kayma modülü (G_{12}), düzlem içi poisson oranı (ν_{12}) ve düzlem dışı poisson oranı (ν_{23})'dır [36].

2-3 düzlemindeki (düzlem dışı) poisson oranı ve kayma modülünün deneysel olarak hesaplanması zordur. Numune kalınlığının gerinim ölçerlerin bağlanabileceği kalınlıkta olmaması poisson oranının belirlenmesini olanaksız hale getirir. Ancak, aşağıda önerilen denklemler kullanılarak bu değerler teorik olarak belirlenebilir [37].

$$\nu_{23} = \nu_{12} \left(\frac{1 - \nu_{21}}{1 - \nu_{12}} \right) \tag{4}$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \tag{5}$$

Denklem (3)'de verilen transvers izotropi gerilme-gerinim ilişkisi düzlem gerilme durumu göz önüne alınarak ($\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = 0$) sadeleştirilse, aşağıdaki matris formunda tekrar düzenlenebilir:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Denklem (6), rijitlik matrisi Q kullanılarak tekrar düzenlenirse:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{7}$$

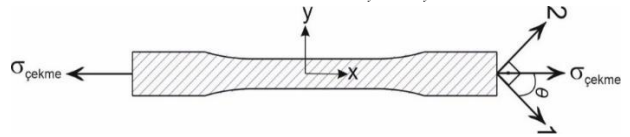
elde edilir. x-y koordinat sisteminde gerilme dönüşüm denklemleri aşağıda belirtilen matris şeklinde yazılabilir [38].

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \tag{8}$$

Gerilme dönüşüm denklemleri ve rijitlik matrisi kullanılarak, herhangi bir yöndeki gerilme-gerinim ilişkisini veren denklem takımı matris formunda yazılabilir [38].

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T]^T \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{9}$$

Şekil 8, tek katmanlı malzeme ile x-y koordinat düzleminde çekme testi yük yönünü göstermektedir. Tek eksenli çekme testinde, kuvvet x eksenini boyunca uygulanmaktadır. Bu durumda $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ alınabilir.



Şekil 8. Eksen dışı yüklenme (Off-axis loading)

Denklemler (7-9) kullanılarak Şekil 8'de gösterilen eksen dışı yüklenme durumu için gerilme ve gerinim arasındaki ilişki aşağıdaki şekli ile elde edilir:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \left[\frac{\sin^4 \theta}{E_2} + \frac{\cos^4 \theta}{E_1} + \frac{\sin^2 2\theta}{4} \left(-\frac{2\nu_{12}}{E_1} + \frac{1}{G_{12}} \right) \right]^{-1} \tag{10}$$

Denklem (10) kullanılarak 1-2 düzlemindeki (düzlem içi) kayma modülü, G_{12} , hesaplanabilir.

3.2 Akma Kriteri (Yield Criteria)

Malzemelerin uygulanan yüke bağlı olarak şekil değişimlerinin tanımlanabilmesi, uygun akma kriteri ile malzemenin elastik davranışının sınırlarının belirlenmesi ve akma noktasının ötesinde meydana gelen plastik şekil değiştirme davranışının tanımlanması ile sağlanabilir. İzotropik malzeme kabulü ile birçok malzemenin plastik davranışı von Mises kriteri ile belirlenebilirken, EYM yöntemi ile yazdırılan malzemelerde, yazdırma açısına bağlı olarak, dayanım değerlerinde değişim meydana gelmekte ve anizotropik özellikleri dikkate almayan von Mises kriteri çözüm için yeterli olmamaktadır. Farklı yazdırma açalarına sahip parçalarda mekanik özellikler yazdırma açısına bağlı olarak önemli oranda değişmektedir. Yönlenmeye bağlı mekanik özelliklerin değiştiği malzemelerde Hill akma kriterinin kullanımı birçok çalışmada önerilmektedir [24,27,39]. Hill akma kriteri von Mises akma kriterinin anizotropik malzeme

özelliklerini kapsayacak şekilde genişletilmiş versiyonu olarak düşünülebilir [38]. Bu kriterde asal malzeme yönlerinde hasar dayanımlarının bilindiği kabul edilir. Aşağıda Hill akma kriteri genel denklemi verilmektedir.

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1 \quad (11)$$

Burada, F, G, H, L, M ve N anizotropik malzeme parametreleridir. Asal yönlerdeki hasar dayanımları X, Y ve Z ile tanımlanır [24,38]. Malzemenin asal yönlerinde, diğer tüm gerilmeler sıfır kabul edildiği durumda (örn.: $\sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{12} = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$), anizotropik sabitler F, G ve H:

$$G+H = \frac{1}{X^2}, F+H = \frac{1}{Y^2}, F+G = \frac{1}{Z^2} \quad (12)$$

şeklinde belirtilebilir [38].

Sadece τ_{12} 'nin etkidiği durum düşünüldüğünde:

$$2N = \frac{1}{S^2} \quad (13)$$

Çizelge 3. Elastik malzeme sabitleri (Elastic material constants)

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	ν_{12}	ν_{13}	G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	ν_{23}	G_{23} (MPa)
3668	2424	2424	0.42	0.42	1181	1181	Denk. 4	Denk. 5

N parametresi elde edilir. Burada S, τ_{12} 'nin maksimum değerini göstermektedir. 12 numaralı denklem takımı;

$$2F = \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}, 2G = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2}, 2H = \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \quad (14)$$

F, G ve H asal yönlerdeki dayanımları kapsayacak şekilde tekrar düzenlenebilir. Düzlem gerilme kabulü yapılır ($\sigma_3 = \tau_{13} = \tau_{23} = 0$) ve Şekil 7'de gösterilen 2-3 izotropi düzleminde asal gerilmeler Y ve Z birbirine eşit alınırsa, Hill denklemi:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (15)$$

şeklinde tekrar düzenlenebilir. Herhangi bir yük yönündeki maksimum dayanımının hesaplanmasında aşağıda verilen dönüşüm denklemleri kullanılır [38] (Bknz. Şekil 8).

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta, \sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta, \tau_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta \quad (16)$$

Dönüşüm denklemlerinde σ_x çekme eksenindeki gerilmeyi göstermektedir. Denklem (15), dönüşüm denklemleri kullanılarak tekrar düzenlenirse:

$$\sigma_x = \left[\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Denklem (17) kullanılarak 1-2 düzlemindeki kayma dayanımı (S) elde edilir.

4. SONLU ELEMANLAR METODU (FINITE ELEMENTS METHOD)

Sonlu elemanlar analizleri, ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılmıştır. ABAQUS programında malzemenin yük altındaki davranışı, elastik sabitler, akma kriteri ve deneysel olarak belirlenen gerilme-plastik gerinim eğrisi ile tanımlanmaktadır.

4.1 Elastik Model Sabitlerinin Belirlenmesi (Determination Of Elastic Material Constants)

ABAQUS programı içerisinde transvers izotropik malzeme tanımı için kullanılan elastik sabitler Çizelge 3'te gösterilmektedir. Şekil 7'de gösterilen yönlennmeler ve düzlemler göz önüne alınarak, 1 ve 2 yönlerine ait elastisite modülleri (E_1 ve E_2) ile 1-2 düzlemindeki poisson oranının (ν_{12}) değerleri Bölüm 2.2'de belirtilen çekme testi ile deneysel olarak belirlenmiştir. Transvers izotropik malzeme tanımına bağlı olarak, $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13}$, $G_{12} = G_{13}$ kabul edilmiş ve değerleri Çizelge 3'te belirtilmiştir. 2-3 düzlemindeki (düzlem dışı) poisson oranı (ν_{23}) ve kayma modülünün (G_{23}) değerleri sırasıyla, Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

4.2 Akma Kriteri Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Yield Criteria Parameters)

Çizelge 4'te asal gerilmeler ile kayma gerilmesi değerleri gösterilmektedir. Asal gerilme değerleri farklı yazdırma açıları için deneysel olarak belirlenen maksimum çekme gerilmesi değerleridir. Kayma dayanımının (S) belirlenmesinde denklem (17) kullanılmıştır. 2-3 düzlemi izotropik olarak kabul edildiğinden Y ve Z asal gerilme değerleri birbirine eşittir.

Çizelge 4. Asal gerilmeler ile kayma gerilmesi değerleri (Values of principal stresses and shear stress)

X (MPa)	Y (MPa)	Z (MPa)	S (MPa)
44.12	25.31	25.31	21.19

ABAQUS içerisinde anizotropik malzemenin akma davranışını tanımlamada Hill akma kriterinin kullanılabilmesi için R_{ij} katsayılarına ihtiyaç vardır [39]. R_{ij} katsayıları malzemenin asal yönlerdeki akma veya maksimum gerilme değerlerinin referans gerilme değeri ile orantılanması ile belirlenir. Referans gerilme değeri, σ_0 , 2 yönündeki (0° yazdırma yönü) çekme dayanımı olarak kabul edilmiştir. Referans kayma gerilmesi değerinin hesaplanmasında $\tau_0 = \sigma_0 / \sqrt{3}$ eşitliği kullanılmıştır. R_{ij} oranları anizotropik parametreler kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [24]:

$$\begin{aligned} 1/R_{11}^2 &= (G+H)\sigma_0^2, 1/R_{22}^2 = (F+H)\sigma_0^2 \\ 1/R_{33}^2 &= (F+G)\sigma_0^2, 3/2R_{12}^2 = N\sigma_0^2 \\ 3/2R_{13}^2 &= M\sigma_0^2, 3/2R_{23}^2 = L\sigma_0^2 \end{aligned} \quad (18)$$

Denklem (18) kullanılarak R_{11} , R_{22} , R_{33} , R_{12} katsayıları hesaplanabilir

$$R_{11} = X / \sigma_0, R_{22} = Y / \sigma_0, R_{33} = Z / \sigma_0, R_{12} = S / \tau_0 \quad (19)$$

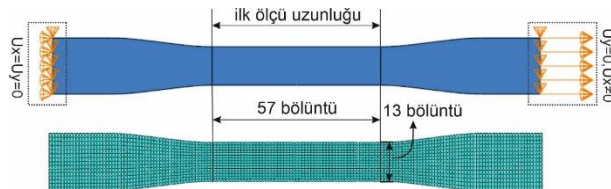
R_{23} oranı 1 olarak kabul edilmiştir [24]. Denklem (19) kullanılarak diğer katsayılar belirlenmiştir. Hesaplanan katsayılar Çizelge 5’te gösterilmektedir.

Çizelge 5. Hill akma kriteri katsayıları (Coefficients of Hill yield criteria)

R_{11}	R_{22}	R_{33}	R_{12}	R_{13}	R_{23}
1.74	1	1	1.45	1.45	1

4.3 Test Numunesi Sonlu Elemanlar Modeli (Finite Element Model of Test Specimen)

2-boyutlu lineer-olmayan sonlu elemanlar analizlerinde numune geometrisinin ağ yapısında dört düğüm noktasına sahip düzlem gerilme elemanları (CPS4R) kullanılmıştır. Şekil 9’da çekme test numunesi sınır şartları ve sonlu eleman ağ görüntüsü verilmiştir. İlk ölçüm bölgesi, uzunluk doğrultusunda 57, genişlik doğrultusunda 13 elemana ayrılmıştır. Sınır şartları çekme testine uygun şekilde belirlenmiştir. Alt düğüm noktaları x ve y yönlerinde sabitlenmiş, üst düğüm noktaları x yönünde harekete engel olmayacak şekilde sadece y yönünde sabitlenmiştir. Sonlu eleman modelinde toplam 2805 düğüm noktası ve toplam 2624 eleman mevcuttur.



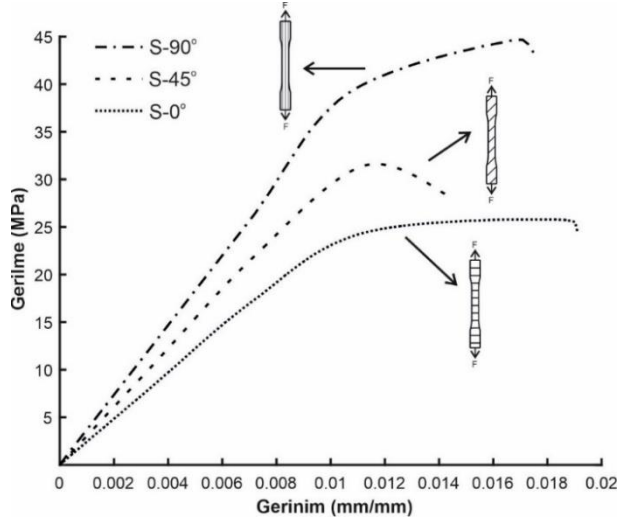
Şekil 9. Sınır şartları ve sonlu eleman ağ görüntüsü (View of boundary conditions and finite element mesh)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

5.1 Sonlu Eleman Modelinin Doğrulanması (Verification of Finite Element Model)

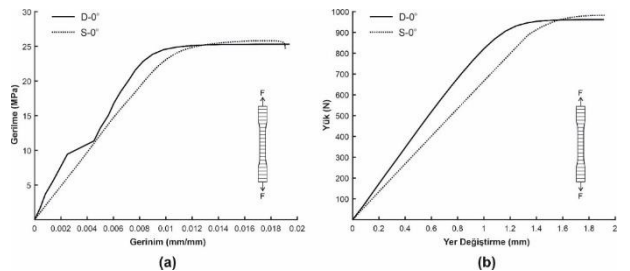
Bu bölümde deneysel ve SEA sonuçlarından elde edilen, numunenin mekanik özellikleri ve yük altındaki davranışları karşılaştırılarak, kullanılan akma kriterinin uygunluğu tartışılmıştır. Şekil 10’da yazdırma açılarına göre numunelerin gerilme-gerinim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 10’da ve makale içerisinde “S” kısaltması SEA sonuçlarını ifade etmektedir Yazdırma açı değerindeki artış ile, deneysel sonuçlara benzer şekilde, dayanımında belirgin şekilde artma meydana gelmiştir (Bknz. Şekil 6). 90° açı ile yazdırılan numuneler en yüksek dayanım

değerlerine ulaşmıştır. 45° açı ile yazdırılan numunelerin dayanım değerleri diğer iki numunenin dayanım ve gerinim değerlerinin ortasında yer almıştır.

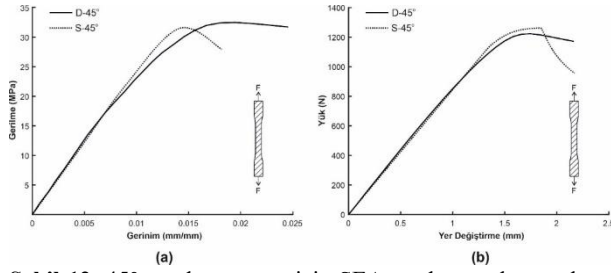


Şekil 10. SEA gerilme-gerinim eğrisi (FEA stress-strain curve)

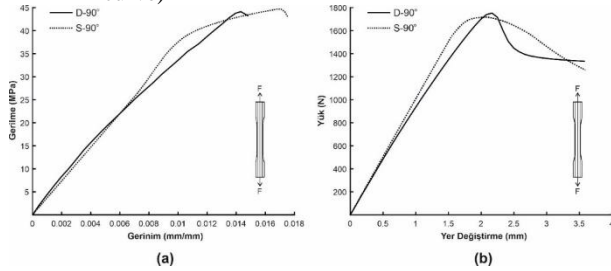
Şekiller 11-13’te 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için deneysel ve SEA sonuçlarından elde edilen gerilme-gerinim ve yük-şekil değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Deneysel çalışma ve SEA ile modellenen numune gerilme-gerinim ile yük yer değiştirme eğrileri her yazdırma açı değeri için aynı grafikler üzerinde karşılaştırmalı olarak verilerle, önerilen akma kriterinin uygunluğu tartışılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde, numunenin gerilme-gerinim eğrilerinin belirlenmesinde, deneysel çalışmaya benzer şekilde ilk ölçüm uzunluğu ortasında, gerinim ölçerlerin bulunduğu konumdaki elemanlar dikkate alınmıştır. Yük-yer değiştirme eğrilerinin hazırlanmasında, sonlu eleman analizleri için üst düğüm noktalarının reaksiyon kuvvetleri ve yer değiştirmeleri kullanılmış, deneysel yük-yer değiştirme eğrilerinin çizdirilmesinde benzer şekilde çekme test cihazı çene yer değiştirmesi dikkate alınmıştır.



Şekil 11. 0° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçların karşılaştırılması: a) gerilme-gerinim eğrisi; b) yük-yer değiştirme eğrisi (Comparison of the experimental and FEA results for the printing angle of 0°: (a) stress-strain curve; (b) load-displacement curve)



Şekil 12. 45° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçların karşılaştırılması: a) gerilme-gerinim eğrisi; b) yük-yer değiştirme eğrisi (Comparison of the experimental and FEA results for the printing angle of 45°: (a) stress-strain curve; (b) load-displacement curve)



Şekil 13. 90° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçların karşılaştırılması: a) gerilme-gerinim eğrisi; b) yük-yer değiştirme eğrisi (Comparison of the experimental and FEA results for the printing angle of 90°: (a) stress-strain curve; (b) load-displacement curve)

0° yazdırma açısı için, her iki yöntemle elde edilen grafiklerin maksimum gerinim ve yer değiştirme değerleri birbirine oldukça yakındır. Ayrıca, ulaşılan maksimum yük ve gerilme değerleri de birbiri ile uyumludur. 45° ve 90° yazdırma açıları için SEA ve deneysel sonuçlardan elde edilen maksimum gerinim değerlerinde farklılıklar olmasına rağmen, 0° yazdırma açısında olduğu gibi her iki yöntemle elde edilen maksimum yük, maksimum gerilme ve yer değiştirme değerleri birbiri ile uyumludur. 45° ve 90° yazdırma açıları durumunda, deneysel ve SEA maksimum gerinim değerleri karşılaştırıldığında, 45° için SEA gerinim değeri, deneysel gerinim değerinden düşük, 90° için SEA gerinim değeri, deneysel gerinim değerinden fazladır. SEA ve deneysel sonuçlar arasında, özellikle maksimum

gerinim değerlerindeki farklılıklar, iki temel etkene bağlı olarak açıklanabilir. Bu etkenler, numune geometrisine bağlı oluşabilecek gerilme yoğunluklu bölgeler ve akma kriteri parametreleridir. Deneysel çalışmada, 90° yazdırma açısında hasar, yazdırma yönünün değiştiği ve gerilme yoğunluğunun arttığı, geometrinin kavis kısmına yakın bölgede meydana gelmiştir (Bknz. Şekil 5). Hasar bölgesinin ölçüm sınırları dışında olması, 90° yazdırma açısı için SEA ve deneysel gerinim değerlerinde meydana gelen farklılıkları açıklamaktadır. ASTM-D638 Tip I geometrisine sahip, 3B yazıcılar ile yük yönüne paralel yazdırılan numunelerde hasarın ölçüm bölgesi dışında meydana gelebileceği farklı çalışmalarda da bildirilmektedir [40-42]. SEA ve deneysel sonuçlarda farklılığa sebep olabilecek diğer etken akma kriteri parametreleridir. Bölüm 4.2, Çizelge 5’de belirtilen Hill akma kriteri katsayılarının malzemenin asal yönlerdeki akma veya maksimum gerilme değerlerinin referans gerilme değeri ile orantılanması amacıyla kullanıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, Bölüm 4.2’de açıklandığı gibi 0° yazdırma yönü için elde edilen gerilme değerleri ve yük altındaki gerilme davranışı referans olarak alınmıştır. Dolayısıyla, diğer yazdırma yönleri için elde edilen gerilme ve gerinim değerleri referans yazdırma yönü ve akma kriteri katsayılarına göre elde edilmiştir. Yukarıda da belirtildiği gibi 0° yazdırma yönü için SEA ve deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın olmasına rağmen, 90° yazdırma yönü için gerinim değerinin SEA gerinim değerinden düşük olması hasarın ölçüm bölgesi içinde gerçekleşmemiş olmasından kaynaklanmaktadır. 45° yazdırma açısı durumunda, Bölüm 2.2.1’de açıklandığı şekli ile fiberlerin yük etkisinde belirli bir dönüşe uğraması ile meydana gelen ek uzamaların SEA ve deneysel sonuçlardan elde edilen gerinim değerlerinde farklılığa sebep olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6’da deneysel ve SEA sonuçlarından elde edilen 0°, 45° ve 90° derece yazdırma açılarına sahip numunelerin mekanik özellikleri detaylı ve karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

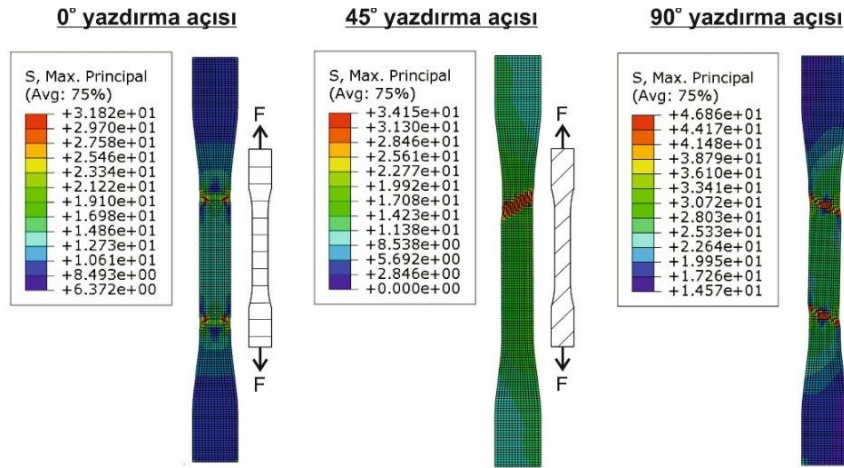
Çizelge 6 incelendiğinde, kullanılan Hill akma kriterinin özellikle gerilme ve yük değerleri açısından deneysel verilere yakın değerler sağladığı görülmektedir. 0°

Çizelge 6. 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için deneysel ve SEA sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the experimental and FEM results for the printing angles of 0°, 45° ve 90°)

Yöntem	Yazdırma açısı	Akma gerilmesi (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Maksimum yük (N)
Deneysel	0°	23.8	25.31	2424	961.72
	45°	26.1	32.49	3069	1223.18
	90°	41.5	44.12	3668	1752.60
SEA	0°	23.63	25.70	2424	984.37
	45°	31.07	31.41	3046	1261.80
	90°	42.12	44.73	3668	1717.67

yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçlar arasındaki en büyük fark %2.33 ile maksimum yük değeri için olmuştur. 45° yazdırma açısında her iki yöntem ile belirlenen akma gerilmesi değerleri arasındaki fark %17.39 olarak hesaplanmıştır. Ancak, maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve maksimum yük değerleri için yapılan karşılaştırmada, birbirine oldukça yakın değerler elde edilmiş ve yüzde fark değerleri yaklaşık %3.4'ün altında kalmıştır. Çekme yükü yönünde yazdırılan 90° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçlar arasındaki en büyük fark, 0° yazdırma açısında olduğu gibi, %2.01 ile maksimum yük değerinde meydana gelmiştir. Deneysel ve SEA sonuçlarının genel karşılaştırılması yapıldığında, özellikle, maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve maksimum yükün belirlenmesinde, transvers izotropik malzeme kabulü ve Hill akma kriteri kullanımının uygun olduğunu göstermektedir.

Şekil 14'te 0°, 45° ve 90° yazdırma yönlerinde numunelerde oluşan maksimum asal gerilme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 14. 0°, 45° ve 90° yazdırma açıları için maksimum asal gerilme dağılımı (Distribution of maximum principal stress for the printing angles of 0°, 45° and 90°)

Çizelge 7. 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° yazdırma açıları için SEA sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of FEA results for the printing angles of 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°)

Yazdırma açısı	Akma gerilmesi (MPa)	Artış (%)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Artış (%)	Elastisite modülü (MPa)	Artış (%)	Maksimum yük (N)	Artış (%)
0°	23.63	-	25.70	-	2424	-	984.37	-
15°	25.88	9.52	26.51	3.15	2500	3.14	1014.49	3.06
30°	27.79	17.60	27.69	7.74	2720	12.21	1106.78	12.44
45°	31.07	31.49	31.41	22.22	3046	25.66	1261.80	28.18
60°	36.86	55.99	37.30	45.14	3377	39.32	1460.81	48.40
75°	40.93	73.21	42.84	66.69	3596	48.35	1642.77	66.89
90°	42.12	78.25	44.73	74.05	3668	51.32	1717.67	74.49

0° ve 90° yazdırma açılarında maksimum asal gerilmelerin pik değerleri gerilme konsantrasyonunun oluştuğu, numunenin kavis (küçük yarıçap geçiş bölgesi)

kısına yakın, ilk ölçü uzunluğunun sınırlarında meydana gelmiştir. 45° yazdırma açısı için gerilme konsantrasyonunun oluştuğu kavis kısmına yakın, 45°'lik düzlem boyunca meydana gelmiştir. Maksimum asal gerilmelerin pik değerlerine ulaştığı kritik kesitlerin konumu, test numunelerinde oluşan hasar bölgeleri ile uyumludur (Bknz. Şekil 5).

5.2 Sonlu Elemanlar Metodu Parametrik Çalışma (Finite Element Method Parametric Study)

Önceki bölümde, Hill akma kriterinin uygunluğu, deneysel ve SEA sonuçları karşılaştırılarak tartışılmıştı. Bu bölümde, deneysel çalışmalarda olmayan, farklı yazdırma açı değerleri (15°, 30°, 60°, 75°) için analizler tekrar edilmiştir. Çizelge 7'de, kullanılan bütün açı değerleri (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) için SEA sonuçlarından elde edilen mekanik özellikler detaylı olarak verilmiştir. Çizelge 7'de, 0° yazdırma açısına göre, diğer açı değerleri için mekanik değerlerdeki artışlar yüzde olarak belirtilmiştir.

yazdırma açılarındaki yüzde artış miktarı, bir önceki açı değerleri (0° ve 75°) ile karşılaştırıldığında düşüktür. İki uç değer 0° ve 90° karşılaştırıldığında, yazdırma açısının 90° olması durumunda, akma gerilmesi, maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve maksimum yük sırasıyla, %78.25, %74.05 %51.32 ve %74.49 oranında artmıştır. Çizelge 7 genel olarak incelendiğinde, yazdırma açısına bağlı olarak en düşük artış oranı elastisite modülünde meydana gelmiştir.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, %100 doluluk oranında, sabit katman kalınlığında ve farklı yazdırma açılarındaki 3B yazıcı ile yazdırılan parçaların mekanik özellikleri deneysel ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar metodunda, farklı yazdırma açılarına sahip numunelerin mekanik özelliklerin belirlenmesinde, transvers izotropik malzeme kabulü ve Hill akma kriteri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ve SEA sonuçları karşılaştırılarak, kullanılan akma kriteri doğrulanmış ve deneysel çalışmalarda olmayan farklı yazdırma açı değerleri için mekanik özelliklerdeki değişim SEA ile belirlenmiştir. Aşağıda, yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilmiştir:

1- Deneysel sonuçlara göre, en düşük mekanik özellikler, 0° yazdırma açısına sahip numunelerde meydana gelmiştir. Yazdırma açısındaki artış ile numunelerin mekanik özellikleri önemli oranda artmıştır. Elde edilen çekme test sonuçları, yazdırma yönü ile çekme yükü yönünün aynı olması durumunda en yüksek dayanıma ulaşıldığını göstermiştir.

2- 0° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçlar arasındaki en büyük fark %2.33 ile maksimum yük değeri için olmuştur. 45° yazdırma açısında her iki yöntem ile belirlenen akma gerilmesi değerleri arasındaki fark %17,39 olarak hesaplanmıştır. Ancak, maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve maksimum yük değerleri için yapılan karşılaştırmada birbirine oldukça yakın değerler elde edilmiş ve yüzde fark değerleri yaklaşık %3,4'ün altında kalmıştır.

3- Çekme yükü yönünde yazdırılan 90° yazdırma açısı için SEA ve deneysel sonuçlar arasındaki en büyük fark, 0° yazdırma açısında olduğu gibi, %2.01 fark ile maksimum yük değerinde meydana gelmiştir.

4- Deneysel ve SEA sonuçlarının genel karşılaştırılması yapıldığında, özellikle, maksimum çekme gerilmesi, elastisite modülü ve maksimum yükün belirlenmesinde transvers izotropik malzeme kabulü ve Hill akma kriteri kullanımını uygun olduğunu göstermiştir.

5- Parametrik çalışmadan elde edilen SEA sonuçları genel olarak incelendiğinde, yazdırma açısına bağlı olarak en düşük artış oranının elastisite modülünde meydana geldiği görülmüştür.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Özkan ÖZ: Sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK: Deneyle ve sonlu elemanlar analizini yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui., "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective", *Compos. B. Eng.*, 110: 442-458, (2017).
- [2] N. Turner, B., Strong, R. and A. Gold, S., "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling", *Rapid Prototyp. J.*, Vol. 20 No.3: 192-204, (2014).
- [3] Utela, B., Storti, D., Anderson, R., and Ganter, M., "A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP)", *J. Manuf. Process.*, 10(2): 96-104, (2008).
- [4] Vaezi, M., Seitz, H., and Yang, S. "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67(5-8): 1721-1754, (2013).
- [5] Parandoush, P., and Lin, D., "A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites", *Compos. Struct.*, 182: 36-53, (2017).
- [6] Redwood, B., Schöffler, F., and Garret, B. "The 3D printing handbook: technologies, design and applications", *3D Hubs*, Netherlands, (2017).
- [7] Chua, C. K., Leong, K. F., and Lim, C. S., "Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)", *World Scientific Publishing Company*, Singapore, (2010).
- [8] Ziemian, C., Sharma, M., and Ziemian, S. "Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling", *Mechanical engineering, IntechOpen*, (2012).
- [9] Zhang, P., Arceneaux, D. J., Liu, Z., Nikaeen, P., Khattab, A., and Li, G. "A crack healable syntactic foam reinforced by 3D printed healing-agent based honeycomb", *Compos. B. Eng.*, 151: 25-34, (2018).
- [10] T. Li and L. Wang, "Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials", *Compos. Struct.*, 175: 46-57, (2017).
- [11] Kao, Y. T., Amin, A. R., Payne, N., Wang, J., and Tai, B. L., "Low-velocity impact response of 3D-printed lattice structure with foam reinforcement", *Compos. Struct.*, 192: 93-100, (2018).

- [12] Jacobs, P. F., "Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography", David T. Reid, *Society of Manufacturing Engineers*, California, (1992).
- [13] Masood, S.H., "Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling", *Rapid Prototyp. J.*, 2(1): 24-33, (1996).
- [14] Yadroitsev, I., Bertrand, P., and Smurov, I., "Parametric analysis of the selective laser melting process", *Appl. Surf. Sci.*, 253(19): 8064-8069, (2007).
- [15] Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H., and Barlow, J., "Direct selective laser sintering of metals", *Rapid Prototyp. J.*, 1(1): 26-36, (1995).
- [16] Lee, C. S., Kim, S. G., Kim, H. J., and Ahn, S. H. "Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts", *J. Mater. Process. Technol.*, 187-188: 627-630, (2007).
- [17] Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., and Renaud, J. E., "Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation", *Rapid Prototyp. J.*, 7(3): 148-158, (2001).
- [18] Sood, A. K., Ohdar, R. K., and Mahapatra, S. S., "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts", *Mater. Des.*, 31(1): 287-295, (2010).
- [19] Tronvoll, S. A., Welo, T., and Elverum, C. W., "The effects of voids on structural properties of fused deposition modelled parts: A probabilistic approach", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97(9): 3607-3618, (2018).
- [20] Ahn, S. H., Baek, C., Lee, S., and Ahn, I. S., "Anisotropic tensile failure model of rapid prototyping parts - Fused Deposition Modeling (FDM)", *Int. J. Mod. Phys. B.*, 17(8-9): 1510-1516, (2003).
- [21] Yao, T., Deng, Z., Zhang, K., and Li, S., "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations", *Compos. B. Eng.*, 163: 393-402, (2019).
- [22] Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V., and Pappalettere, C., "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory", *Mater. Des.*, 90: 453-458, (2016).
- [23] Zou, R., Xia, Y., Liu, S., Hu, P., Hou, W., Hu, Q., and Shan, C. "Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material", *Compos. B. Eng.*, 99: 506-513, (2016).
- [24] Xia, Y., Xu, K., Zheng, G., Zou, R., Li, B., and Hu, P., "Investigation on the elasto-plastic constitutive equation of parts fabricated by fused deposition modeling", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25(3): 592-601, (2019).
- [25] Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., and Núñez, P. J., "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection", *Mater. Des.*, 124: 143-157, (2017).
- [26] Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., Garcia-Granada, A. A., Llumà, J., Borros, S., and Reyes, G., "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts", *Mater. Des.*, 83: 670-677, (2015).
- [27] Zhao, Y., Chen, Y., and Zhou, Y., "Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses", *Mater. Des.*, 181: 1-10, (2019).
- [28] Wang, P., Zou, B., Ding, S., Li, L., and Huang, C., "Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK", *Chinese J. Aeronaut.*, 34-9: 236-246, (2021).
- [29] Material Safety Data Sheet for Flashforge PLA. FlashForge PLA Filament. <http://static.creativetools.se/misc/doc/flashforge/filament/FF-PLA-MSDS.pdf>. (Erişim Tarihi: 12.02.2021).
- [30] ASTM D638-14, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", (2014).
- [31] Dave, H. K., and Davim, J. P., "Fused Deposition Modeling Based 3D Printing", *Springer*, Switzerland, (2021).
- [32] Rajpurohit, S.R., and Dave, H. K. "Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part", *Rapid Prototyp. J.*, 24-8: 1317-1324, (2018).
- [33] Rajpurohit, S.R., and Dave, H. K., "Tensile properties of 3D printed PLA under unidirectional and bidirectional raster angle: a comparative study", *Int. J. Mater. Eng.*, 12-1: 6-11. (2018).
- [34] Rajpurohit, S. R., and Dave, H. K. "Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer", *Int. J. Adv. Manuf. Syst.*, 101-5: 1525-1536, (2019).
- [35] Kiendl, J., and Gao, C., "Controlling toughness and strength of FDM 3D-printed PLA components through the raster layout", *Compos. B. Eng.*, 180: 1-6, (2020).
- [36] Tuttle, M. E., "Structural Analysis of polymeric composite materials—Second edition ", *CRC Press*, New York, (2013).
- [37] Christensen, R. M., "The Numbers of Elastic Properties and Failure Parameters for Fiber Composites." *J. Eng. Mater. Technol.*, 120(2): 110-113. (1998).
- [38] Jones, R. M., "Mechanics of composite materials", *CRC Press*, Virginia, (1998).
- [39] Wang, S., Ma, Y., Deng, Z., Zhang, K., and Dai, S., "Implementation of an elastoplastic constitutive model for 3D-printed materials fabricated by stereolithography", *Addit. Manuf.*, 33: 1-8, (2020).
- [40] Sheth, S., Taylor, R. M., and Adluru, H., "Numerical investigation of stiffness properties of fdm parts as a function of raster orientation", *Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*, USA, 1112-1120, (2017).
- [41] Gordelier, T. J., Thies, P. R., Turner, L., and Johanning, L., "Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review", *Rapid Prototyp. J.*, 25-6: 953-971, (2019).
- [42] Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., and Wright, P. K., "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", *Rapid Prototyp. J.* 8-4: 248-257, (2002).