Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:4 (2023) 2451-2463

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Optimization of additive manufacturing by vacuum infusion method

Raşit Karakuş[1], Çağıl Merve Tanık[2]*
[1]Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Hacettepe University, 06680, Ankara, Türkiye
[2]Aselsan Academy, 06200, Ankara Türkiye

Highlights:

- Optimization of cost and time in 3D printing
- Application of vacuum infusion in 3D printing
- Increasing strength of 3D printed parts

Keywords:

- Additive manufacturing
- 3D Printing
- Vacuum infusion
- Compliant mechanisms

Article Info:

Research Article
Received: 05.05.2022
Accepted: 10.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1112734

Acknowledgement:

This study was completed as a part of TÜBİTAK 1512 Project
Project No: 2210377

Correspondence:

Author: Çağıl Merve Tanık
e-mail: cagilmerve@aselsan.com.tr
phone: +90 535 729 8674

Graphical/Tabular Abstract

This paper investigates the effect of resin filling into 3D-printed parts. The effect of the resin is analyzed for cost, time, and strength. The infill pattern of the 3D-printed part is Gyroid which has an interconnected porous structure. The complete operation is summarized in Figure A specially designed specimen is filled with resin in a vacuum chamber and then subjected to mechanical tests. Obtained results are investigated comprehensively.

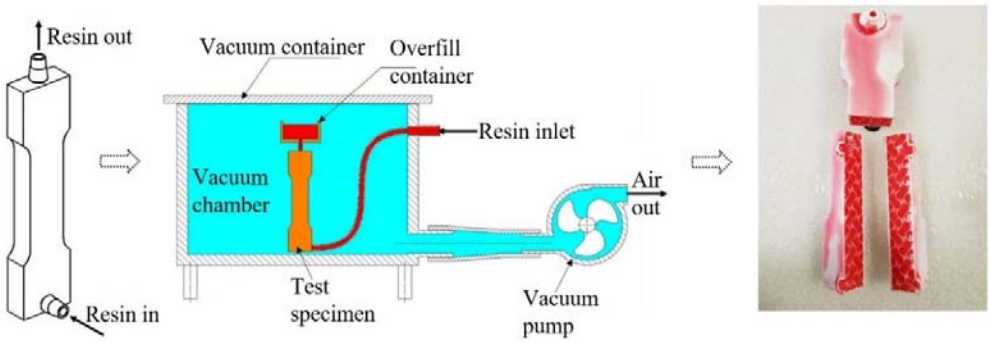


Figure A Tensile test specimen preparation by the vacuum infusion method

Purpose:
Additive manufacturing methods are widely used and are still being improved. This study proposes a new combined production method: decreasing production time and cost while increasing or maintaining the product's strength is the main concern. Furthermore, additive manufacturing methods are aimed to be used for compliant mechanisms more effectively using the proposed method.

Theory and Methods:
The gyroid infill pattern is used in this study. Since the gyroid infill pattern has a porous geometry, produced parts are filled with epoxy resin by the vacuum infusion method. Resin-filled and unfilled samples are subjected to tensile and three-point bending tests. Obtained results are compared through strength, manufacturing time and cost.

Results:
This study proved that the vacuum infusion method is suitable for 3D printed parts with gyroid infill. Resin-filled parts have greater tensile and bending resistance at every infill ratio. Furthermore, it is proven that the manufacturing cost and time can be reduced drastically.

Conclusion:
The manufacturing time, one of the most significant disadvantages of additive manufacturing, is reduced by employing the resin filling by the vacuum infusion method. This method may increase the effectiveness of additive manufacturing. Higher-strength parts with lower cost and manufacturing time can increase the usage of additive manufacturing methods in the industry. Furthermore, obtained results increase the easiness of the production of the compliant mechanisms.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:4 (2023) 2451-2463

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Eklemeli imalat yöntemlerinde vakum infüzyon yolu ile üretim optimizasyonu

Raşit Karakuş[1], Çağıl Merve Tanık[2]*
[1]Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06680, Ankara, Türkiye
[2]Aselsan Akademi, 06200, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Optimization of cost and time in 3D printing
- Application of vacuum infusion in 3D printing
- Increasing strength of 3D printed parts

Makale Bilgileri
Araştırma Makalesi
Geliş: 05.05.2022
Kabul: 10.12.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.1112734

Anahtar Kelimeler:
Anahtar Kelimeler:
Eklemeli imalat,
3B baskı,
vakum infüzyonu,
esnek mekanizmalar

ÖZ

Üç boyutlu yazıcılar yeni bir üretim metodu olarak endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Üretim hızının arttırılarak daha yüksek mukavemetlerde numunelerin elde edilmesi amacıyla testler düzenlenmiştir. Bu amaçla farklı doluluk oranlarında, gyroid geometri kullanılarak test numuneleri hazırlanmıştır. %10, %20, %40 ve %60 doluluk oranlarındaki numunelerin üretim hızları kaydedilmiştir. Her numuneden, beşer adet reçine emdirilmiş ve emdirilmemiş test numuneleri hazırlanmıştır; çekme ve eğilme testleri bu numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar düzenlenerek dayanım, üretim süresi ve üretim maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, vakum infüzyon ile tam olarak doldurulan numunelerin çekmeye karşı olan dirençlerinde, Gyroid geometrisinin doluluk oranlarına göre değişmekle birlikte, %300'e kadar artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, reçine emdirilmiş numunelerin, dolgu oranından asgari seviyede etkilendiği ve tüm doluluk oranlarında, numunelerin 900-1000 N çekme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir.

Optimization of additive manufacturing by vacuum infusion method

H I G H L I G H T S

- Optimization of cost and time in 3D printing
- Application of vacuum infusion in 3D printing
- Increasing strength of 3D printed parts

Article Info
Research Article
Received: 05.05.2022
Accepted: 10.12.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.1112734

Keywords:
Additive manufacturing,
3D Printing,
vacuum infusion,
compliant mechanisms

ABSTRACT

3D printers are widely used in the industry as an innovative manufacturing method. 3D printing also become a common method for compliant mechanism production. This study, it is aimed to increase the effectiveness of 3D printers and to apply this method to compliant mechanisms in future studies. A set of mechanical tests is arranged to produce specimens with higher strengths while increasing the production speed. For this purpose, test specimens are prepared using gyroid infill patterns at different rates. Manufacturing times are recorded for the specimens that have 10%, 20%, 40%, and 60% infill rates. Five resin-filled and five unfilled specimens are prepared and each specimen is subjected to tensile and 3-point bending tests. Results are tabulated and compared for strength, manufacturing time, and cost.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : rasitkarakus@hacettepe.edu.tr, *cagilmerve@aselsan.com.tr /
Tel: +90 535 729 8674

1. Giriş (Introduction)

Üç boyutlu (3B) baskı teknolojisi sayesinde tasarlanan nesneler art arda malzeme eklenmesi ile fiziksel objeler haline getirilebilir [1]. 3B yazıcının ilk ticarileşmesi 1980 yılında Charles Hull tarafından gerçekleşmiştir [2], o günden beri kullanım alanı giderek artmaktadır. Bu teknoloji bilgisayar destekli tasarımların katmanlı üretimi sayesinde ortaya çıkmıştır. Üretim metodu olarak yenilikçi ve çok yönlü bir teknoloji aşamasıdır. Geleneksel termoplastikler, seramikler, grafen bazlı malzemeler ve metaller 3B baskı teknolojisi kullanılarak basılabilen malzemelerdir [3]. Günümüzde 3B baskı tarım, sağlık, otomotiv endüstrisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [4] ASTM standardı F2792'ye göre [5] 3B baskı teknolojileri yedi gruba ayrılmıştır. Bu yedi ana kategori Şekil 1'de gösterilmiştir. Her bir yöntemin, kullanım alanına göre kendine özgü avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Günümüzde 3B baskı sadece prototiplemede değil; giderek artan bir şekilde çeşitli ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır [6].

Bu çalışmada eriyik yığma modelleme FDM (Fused Decomposition Modelling) yöntemi ele alınmıştır. FDM hem hobi kullanıcıları hem de endüstride kullanılan ve hızla büyüyen bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu teknikte kullanılan yaygın malzemeler PLA (polilaktik asit), ABS (akrilonitril bütadien stiren), PET (polietelen tereftalat), PC (polikarbonat), PP (polipropilen) ve naylon gibi termoplastiklerdir. Ayrıca filament olarak kompozit ya da metal kullanabilen yazıcılar da vardır [8].

3B baskıda ilk aşama bilgisayar destekli tasarımın yapılmasıdır. Daha sonra oluşturulan model STL (stereo litografi) formatında Ultimaker Cura gibi tasarımı 3B baskıya hazırlayan programlara tanıtılarak; baskı, katmanlarına ayrılır [9] [10]. Sonuç olarak elde edilen kodlar (G-kodları) yazıcıya aktarılarak üretime başlanabilir. Bu yöntemin avantajları geleneksel teknikler ile üretilmesi mümkün olmayan modellerin elde edilebilmesi ve kalıp imalatına gerek kalmadan prototiplemeye olanak sağlamasıdır.

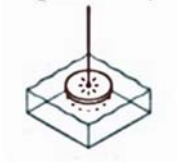
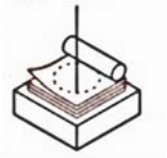
Son yıllarda eklemeli imalat yöntemi ile ilgili birçok çalışmalar yapılmıştır. Sezer vd. ilk kez 6 mm uzunluğunda karbon fiber takviyeli ABS kompozit filamentlerin üretimi ve FDM 3B baskının uygulanabilirliği araştırmıştır [11]. Kuş ve Durmuş'un yaptığı çalışmada ise FDM yöntemiyle üretilen bir ofis koltuğunun; tasarım, analiz, optimizasyon ve testleri gerçekleştirilmiştir [12]. Duman ve Özsoy metal eklemeli imalat cihazı ile yüzey kusuru kontrol modeli oluşturmak için metal parça imalatı gerçekleştirmiş ve öğrenme aktarımı kullanan bir derin öğrenme yöntemi ile sınıflandırmak için imalat katmanı üzerinden çekilen görüntüler ile özgün veri seti oluşturulmuştur [13]. Bir başka çalışmada ise, kompozit eklemeli imalat yöntemi için polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parçaların üretilebilirliği araştırılmıştır [14].

Reçine dolgulu imalat metotlarında, vakum infüzyon yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde atmosfer basıncı ile üretim haznesi arasında oluşturulan basınç farkından faydalanılmaktadır. Üretim haznesi içinde oluşturulan düşük basınç, haznenin içindeki yüksek basınçlı havanın yerine reçine doldurulması ile sonuçlanır. Bu yöntemin en büyük avantajı yeterli oranda reçinenin homojen bir şekilde yapısal matrisin içine nüfuz edebilmesidir. Ürün içinde hava boşlukları kalmadığı için üstün mekanik özellikler elde etmek mümkündür.

Epoksi reçineler Prileschajew [15] tarafından 1909 yılında keşfedilmiştir. Literatürde epoksi reçinelerle ilgili birçok çalışma mevcuttur [16], [17]. Üstün mekanik özellikleri, yüksek yapışma mukavemeti, iyi ısı ve yüksek elektrik direnci sayesinde kaplamalarda, elektronik malzemelerde ve fiber matrislerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3B yazıcılarda epoksi kullanımı ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Ayres vd.'lerinin çalışmasında, binder jetting (bağlayıcı püskürtme) imalat yöntemi kullanılarak üretilen parçaların reçine içinde bekletilerek reçine emdirilmesi yapılmış olduğu ve bu sayede parçanın mekanik ve termal performanslarının iyileştirildiği anlatılmıştır [18]. Bir başka çalışmada da ahşap yapısını ilham alarak 3B yazıcı ile üretilen parçanın metakrilat/selüloz nanokristalin emdirilerek mekanik ve termal özelliklerinin iyileştirildiği ve daha homojen bir iç yapı elde edildiği gösterilmiştir [19]. Literatürde vakum infüzyon ile reçine emdirme yöntemi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Govingnon vd. reçine infüzyon işlemi sırasında kalınlık boyunca deformasyon davranışını modelleyen bir yöntem ortaya koymuştur [20]. Bir başka çalışmada havacılık ile ilgili bir karbon fiber panelin endüstriyel koşulları altında kürlenme süreci incelenmiş ve reçine emdirme işlemi deneysel olarak doğrulanmıştır [21]. Modi vd. vakum infüzyon işlemi sırasında reçine akışını izleyebilen, akış bozukluklarını tanımlayabilen ve gerçek zamanlı olarak uygun düzeltici eylemi gerçekleştirebilen, bilgisayar kontrollü aktif kontrol sistemi önermiştir [22]. Zhang vd. çalışmalarında hızlı kürlenme süresinin karbon fiber ve epoksiden oluşan kompozit yapılar üzerinde etkisini incelemiştir [23]. 3B baskı ile elde edilen ürünün kalitesi ve mekanik özellikleri kullanılan filamentin özelliklerine, baskı parametrelerine, yazıcının kalitesine ve dış faktörlere bağlıdır. Ayrıca filamentin karakteri, yazma yönü, baskı hızı, dolgu deseni ve yoğunluğu, katman yüksekliği, nozül çapı ve hava boşluğu da baskı ürününün kalitesini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir [24], [25]. FDM yönteminde üretim parametrelerinden dolayı üretilen parçaların mukavemetleri değişken olabilir. Bu değişkenliğin azaltılması ve dayanımın iyileştirilmesi amacıyla epoksi reçinelerin kullanılması öngörülmüştür. Literatürde 3B yazıcıların nihai ürün olarak kullanılmasını sağlamak amacıyla için çalışmalar yapılmaktadır. Murdy vd. çalışmasında bir deniz enerji sistemi uygulamasında reçine ve 3B yazıcılar kullanılarak türbin kanadı üretimine değinilmektedir [26]. Bu çalışmada 3B baskı ile elde edilen kalıplar zımparalandıktan sonra epoksi ile kaplanmış ve kompozit üretim sürecine hazırlanmıştır.

Yapılan araştırmalarda, 3B yazıcı ile üretilen parçaların mekanik özelliklerinin ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar olduğu görülmüştür. Lopatine ve Slavkina, Filippova vd. tarafından yapılan çalışmalarda vakum ile reçine emdirilerek bu iyileştirmelerin yapılabileceği önerilmektir [27], [28]. Bu çalışmada, vakum infüzyon yönteminin, eklemeli imalat metotlarında üretim hızını ve parça mukavemetini arttırdığı, üretim maliyetini düşürdüğü yapılan deneylerle kanıtlanmıştır. Bu çalışmada, 3B yazıcıların belli başlı eksikliklerini gidermek, ortaya çıkan ürünün kalitesini arttırmak ve üretim kaynaklı farklılıklarını ortadan kaldırarak bir üretim standardı oluşturmak, doğrudan kullanıma hazır 3B yazıcı ile üretilmiş mamul ortaya çıkartmak için bir metodoloji önerilmiş ve bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma nihayetinde, 3B yazıcı ile üretilmiş mamullerin dayanımını, parçanın dolgu oranının doğrudan bir fonksiyonu olmaktan çıkartılması amacıyla, epoksi reçine ile desteklenmesi önerilmektedir. Bu sayede 3B yazıcı üretim süresinin azaltılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve üretilen parçaların dayanımının arttırılması için çalışılmıştır. Bu iyileştirmelerin yapılabilmesi için, literatürde daha önce görülmemiş şekilde, vakum infüzyon yöntemi ile 3B yazıcı ile üretilmiş mamullere reçine takviyesi yapılması önerilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak, 3B yazıcı mamullerinde reçine ile %100 doluluk oranı sağlanarak, mamul içinde yapıyı zayıflatacak boşluk kalmaması hedeflenmiştir. Bu işlemlerin yapılabilmesi için, 3B yazıcı üretimi esnasında Gyroid adı verilen, sürekli boşluklu dolgu geometrisi kullanılmıştır. Bu iç dolgu geometrisinin, reçine dolgusu yapabilmek için kullanılması da literatürde tarafımızca tespit edilememiştir. Geliştirilen metot ve optimizasyon neticesinde elde edilen nihai malzeme teorik olarak yeni bir kompozit olarak değerlendirilebilir.

İşlem	Açıklama	Teknolojiler
Malzeme ekstrüzyon	Erimiş malzemenin katmanlar halinde yerleştirilmesi	FDM (eriyik yığma modelleme) RC MJS SFF
Fotopolimerizasyon 	Sıvı bir kapta ışıkla sertleşebilen malzemenin seçici olarak sertleştirilmesi	SLA (stereolitografi) DLP (dijital ışık işleme) LAMP 2PP
Toz yataklı eritme	Seçilen bölgeyi eriterek bir yatakta tozun eritilmesi	SLS (seçici lazer sinterleme) SLM (direkt metal lazer sinterleme) DMLS (seçici lazer eritme) EBM (elektron ışını eritme) MJF (multijet eritme)
Malzeme püskürtme	Malzeme biriktirme ve takip eden kürleme	DOD (istek üzerine püskürtme) MJ (malzeme püskürtme) NPJ (nanopartikül püskürtme)
Yapıştırıcı ile katmanlı imalat	Bir yatakta tozu birleştirmek için seçici bağlayıcı dağıtımı	BJ (yapıştırıcı ile katmanlı imalat)
Direkt enerji pompalama	Malzemenin doğrudan füzyonu	LENS (lazer toz şekillendirme) EBAM (elektron ışını eklemeli imalat) DMT
Levha/saç laminasyon methodu 	Malzeme tabakalarının yapıştırılması	LOM (tabakalı obje üretimi) UC

Şekil 1. Son teknolojide eklemeli imalat süreçlerinin sınıflandırılması **[7]**
(Categorization of additive manufacturing processes in the current state-of-the-art)

Sonuç olarak gerek geliştirilen üretim metodolojisi gerek optimizasyon çalışması gerekse de nihai ürün açısından özgün bir çalışma ortaya koyulmuştur.

2. Materyal ve Metot (Material and Methods)

Bu çalışmada, FDM metodu ile üretilen 3B PLA baskı ürünlerinin, farklı dolgu ve epoksi yoğunluğuna göre çekme ve eğilme özellikleri incelenmiştir.

Test için hazırlanan numuneler %10, %20, %40 ve %60 doluluk oranları ile üretilmiştir. Dolgu geometrisi olarak gyroid seçilmiştir. Testlerde çoklu numune yöntemi uygulanmıştır. Her doluluk oranı için üçer adet numune teste tabi tutulmuştur. Testler esnasında ilgili numunenin genel eğilimine bakılarak, bu eğilimden %50 ve üzerinde ayrışan sonuçlar değerlendirmeye katılmamıştır. Çalışma, yeni karakterize edilen bir malzeme yapısıyla ilgili olduğu için, test sonucu kabul aralığının sapma oranı da yüksek tutulmuştur. Bu sayede malzemenin genel karakteristiği daha doğru olarak tanımlanmaya

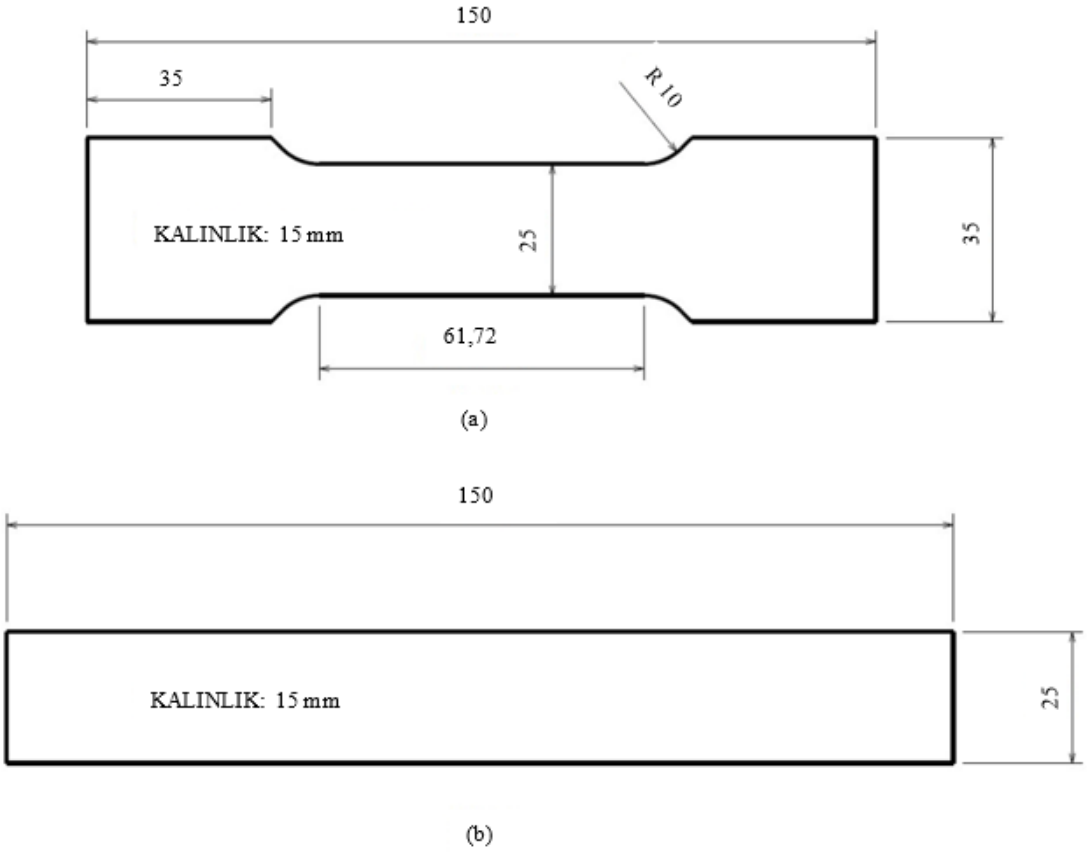
çalışılmıştır. Genel eğilimden %50 ve üzerinde sapan sonuçlarda muhtemel üretim hataları ya da test uygunsuzluğu olabileceği öngörülmüştür. Tutarlı olan üçer adet numunenin test sonuç ortalamaları alınarak veriler yorumlanmıştır.

Gyroid dolgu kalıbının en önemli özelliği diğer dolgu tiplerinin aksine neredeyse izotropik bir yapıda olması ve düşük dolgu yoğunluğuna rağmen yüksek mukavemete sahip olmasıdır. Gyroid yapı ile yapılan çalışmalarda [29], bu yapının yüksek iletkenlik, geniş yüzey alanı, mekanik dayanım ve yüksek akma gerinimine ihtiyaç duyulan yerlerde geniş bir kullanım alanı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca kayma modülü ve elastik modülünün yapısının yoğunluğunun gyroid yapının yoğunluğunun karesiyle arttığı, hacim modülünün ise lineer olarak değiştiği ifade edilmektedir [30]. Sonuç olarak gyroid dolgu kalıbı 3B yazıcılarda kullanıldığında hem mukavemeti hem de baskı hızını arttırmaktadır.

Gyroid dolgu ekstrüderin sürekli dairesel hareketleriyle meydana gelir. Bunun sonucunda düzgün hareketlerle oldukça sabit filamet birikimi oluşur. Çizgiler tüm katman boyunca sürekli olduğu için yapının zayıf noktası yoktur. Bu sayede ektrüzyon ve nozül tıkanma sorunları da azdır. Genellikle bal peteği dolgu ile karşılaştırılır. Aralarındaki en önemli fark ise inşa edilme şekilleridir. Bal peteği dolgu çoğu dolgu geometrisi gibi şeklini her katmanda tekrarlar. Eğer yazıcı tablasının dik ekseni yönünde mukavemeti arttırmak istenirse yüksek bir dolgu yüzdesi seçmek gerekir. Gyroidin izometrik özelliği sayesinde ise düşük dolgu yüzdesi daha iyi sonuçlar verir.

Ağırlık/güç oranı bilinen çoğu modelden daha düşüktür, bu nedenle gyroid geometrisinden üretilen parçalar daha az malzeme kullanımıyla daha büyük yüklere dayanabilirler ve daha kısa sürede daha güçlü yapılar elde edilebilir. Bu sayede maliyetten ve zamandan tasarruf edilir. Aynı dolgu yüzdesinde, gyroid geometrisi, doğrusal desenlerden %2-%5 daha hızlı yazılır [31]. Seri üretim düşünüldüğünde bu değerler önemlidir.

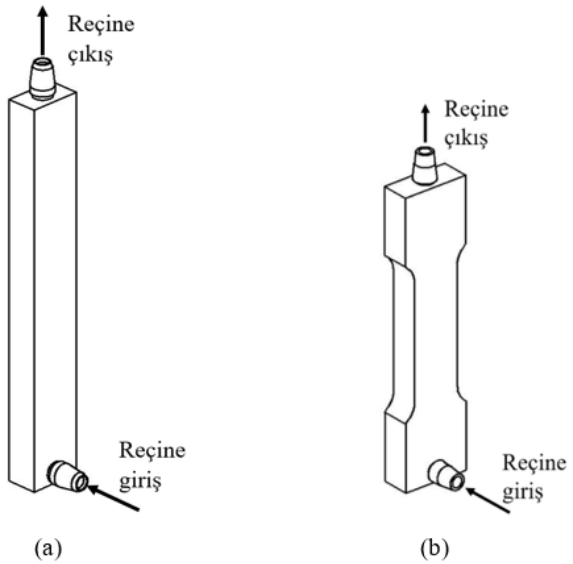
Teknik olarak gyroid Üçlü Periyodik Minimal Yüzeydir (TPMS). Bu yüzeyler birbiriyle kesişmez ve bir labirent oluştururlar. Oluşan geometrik yapının içinde kalan boşluklar, kanallar vasıtasıyla birbirlerine bağlıdırlar. Bu sayede üretilen parçanın iç destek yapısı herhangi bir akışkanla tek noktadan doldurulabilirdir. Yüksek yoğunluklu dolgu oranlarında, gyroid dolgunun birbirine bağlandığı kanalların boyutları da küçüldüğü için bu durumlarda akışkan viskozitesinin düşük olması uygulamada kolaylık sağlamaktadır. Bu gözenekli yapı üretilen parçanın tek bir noktadan doldurulabilmesine olanak sağlar. Gyroid yapı, teknik olarak açık hücrelerden meydana gelir. Bu yapı yazıcıda seçilen dolgu oranına göre farklı boyutlarda hücrelerden oluşabilir. Test numunelerinde farklı dolgu oranları kullanılmakla birlikte, %10 doluluk oranına sahip çekme numunesinin, her biri 10.9 mm³ hacminde olan yaklaşık 490 adet hücreden oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca hücrelerin et kalınlığının da yazdırma ayarları esnasında değiştirilebileceği unutulmamalıdır. Yapılan bu çalışmada Gyroid hücrelerin et kalınlığı olarak 0.8 mm kullanılmıştır. Çalışma; vakum infüzyon ile elde edilen avantajların karşılaştırmalı olarak ortaya konulması üzerine kurulu olduğu için, hücre duvar kalınlıkları, test numunesinin dış duvar kalınlığından fazla olmamak ve tüm numunelerde sabit kalmak üzere belirlenmiştir. Bu çalışmada 3B baskı ile elde edilen test numuneleri, vakum infüzyon yöntemi ile epoksi reçinesi ile doldurulmuştur (Şekil 2).



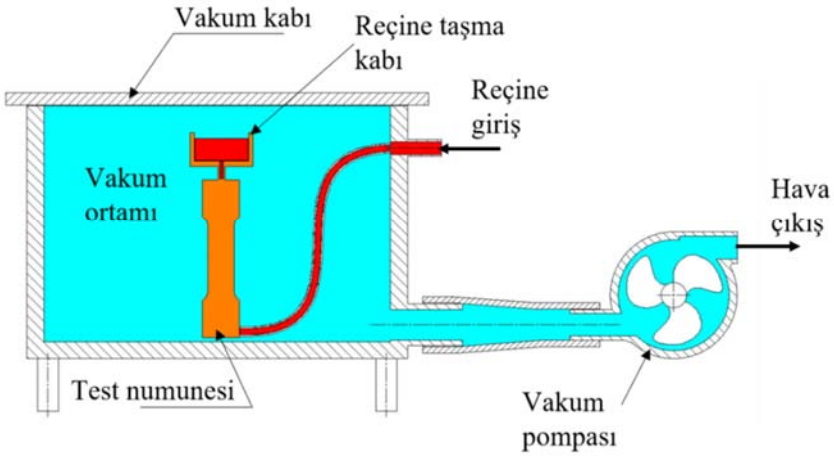
Şekil 2. Çekme (a) ve eğilme (b) test numuneleri (Tension (a), and bending (b) specimens)

Çekme ve üç noktalı eğme testleri için %10, %20, %40 ve %60 dolulukta epoksi emdirilmiş ve emdirilmemiş gyroid geometrili numuneler hazırlanmıştır (Şekil 3). Reçinenin numunenin içine doldurulması için giriş ve çıkış delikleri numunelere eklenmiştir.

Numuneler Şekil 4'te gösterilen düzeneğin içine yerleştirilmiştir. Giriş ağzından reçine akışı sağlandıktan sonra vakum pompası dereye alınmıştır. Vakum kabındaki hava dışarıya atılırken, atmosfere açık olan uçta oluşan basınç farkıyla birlikte numune içine reçine akışı sağlanmıştır. Numune içindeki tüm boşlukların reçine ile dolduğu, reçine taşma kabına sıvının çıkması ile anlaşılmaktadır. Reçine, taşma kabının içine dolmaya başladığında giriş kapatılır. Test numunesine reçine emdirme işlemi yaklaşık 8 dakika sürmektedir. Ancak kabindeki vakum, numune içinde kalabilecek olası hava boşluklarını bertaraf etmek için bir süre daha korunmuştur. Test numunelerine reçine emdirme işlemi, reçinenin viskozitesini düşük tutabilmek ve numuneler arasında uygulama farklarından kaynaklı hataları asgariye indirmek adına sabit 25°C sıcaklıkta yapılmıştır. Ayrıca giriş ağzı ve reçine taşma kabı arasında yükseklik farkı olmamasına dikkat edilmiştir. Bu sayede vakum kapatıldıktan sonra henüz sertleşmemiş olan reçinenin numunenin altından tekrar dışarıya çıkması engellenmiş; taşma kabı ve reçine giriş hattında reçine seviyeleri eşitlenmiştir. Elde edilen reçine emdirilmiş numuneler vakum kabından çıkartıldıktan sonra oda sıcaklığında katılaşmak üzere bekletilmiştir. Numunelerin dış çeperlerinin kapalı olması nedeniyle, reçinenin sertleşmesinde gecikme olabileceğinden ve numunelerin eşit şartlarda testlere tabi tutulabilmesi istendiği için, gerekli kürlenme süresi olan 24 saatin 2 katı süre bekletilmiştir. Çoklu numune üretimi içinse Şekil 5 ile gösterilen model kullanılmıştır. Bu üretim tekniğinde reçine besleme ve taşma kapları üste yerleştirilerek model vakum ortamına bırakılmıştır. Vakum pompası numuneler içindeki havayı çekerken, havanın yerini reçine almıştır. Üretim hızını arttıran bu yöntemin uygulanabilmesi için vakumun tekrarlı şekilde uygulanması gerekmiştir. Mukavemet testlerine başlanmadan önce uygulanan vakum infüzyon tekniğinin etkinliğini kontrol etmek üzere üretilen numunelerden rastgele örnekler seçilmiş ve tahribatlı test yöntemi ile reçine dolgu miktarları incelenmiştir. Gözlem yapmak üzere numuneler bir testere yardımıyla enine ve boyuna kesilmişlerdir.



Şekil 3. Dayanım testleri için reçine emdirilmek üzere hazırlanmış eğilme (a) ve çekme (b) test numuneleri
(Bending (a), and tensile (b) test specimens prepared to be infused with resin for strength tests)



Şekil 4. Test numunesi hazırlama donanımı (Test specimen preparation equipment)

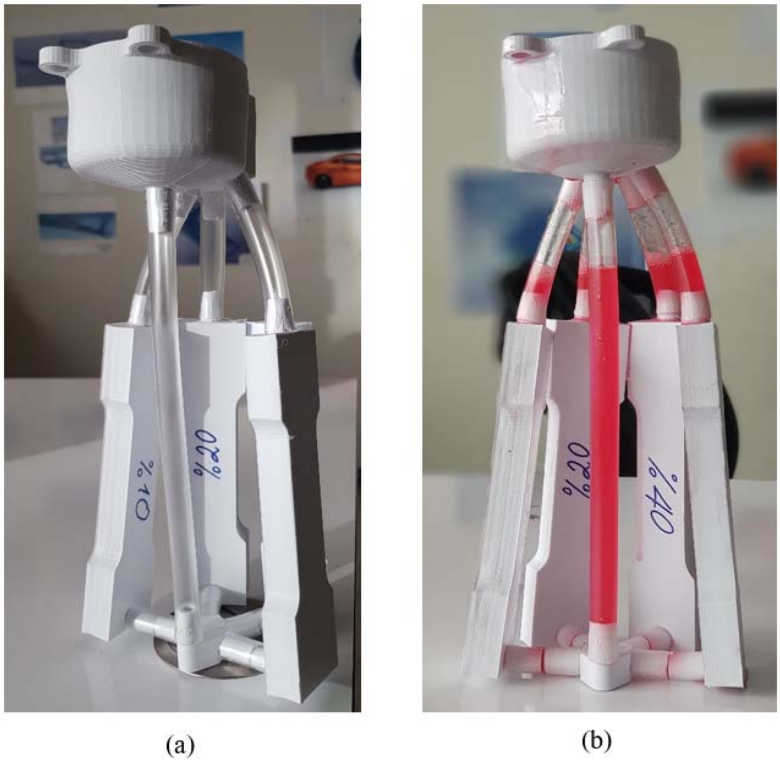
Kesim kaynaklı çapaklar temizlendikten sonra reçine iç dolgu oranı gözlemlenmiş, boşluk tespit edildiğinde sebepleri irdelenmiştir. Bu gözlemlerden elde edilen verilerle numune hazırlama prosedüründe iyileştirmeler yapılmıştır (Şekil 6, Şekil 7). Bu iyileştirmeler kapsamında numuneye reçinenin giriş ve çıkış noktalarının yerleri değiştirilmiş, vakum miktarı arttırılmış, reçine besleme ağzının vakum kabının dışında ya da içinde olmasının farkları incelenmiştir. Ayrıca, reçine emdirme işleminin yapıldığı sıcaklık da gözlemlenerek, akışın 20°C üzerinde olması gerekliliği belirlenmiştir. Sıcaklık değişimi, reçine viskozitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olup, daha yüksek sıcaklıkların akışı kolaylaştırdığı; sonuç olarak %40 ve üzeri dolgu oranlarında düşük viskozitenin tam dolu numune elde etmek için önemli olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin yeterince reçine emmemesi durumunda mukavemet testlerinde tutarsız sonuçların alınması kaçınılmaz olacaktır. Numuneler yeterli dolulukta hazırlandıktan sonra mukavemet testleri yapılmıştır. Bu testler kapsamında %10, %20, %40 ve %60 doluluk oranında reçine emdirilmiş ve emdirilmemiş numuneler karşılaştırmalı olarak çekme ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur.

Çekme testlerinde Alşa KTM 600 eğme testlerinde ise Zwick/Roell Z020 model test makinesi kullanılmıştır. Çalışmada, numuneler karşılaştırma esasına göre test edildikleri için belirli bir test standardı takip edilmemiştir. Testler esnasında tüm koşulların (sıcaklık, konumlandırma, hız vb.) sabit kalması esas alınmıştır. Çekme testinde, kopma bölgesi boyu 62 mm olup, merkezden azami 20 mm uzaklıkta gerçekleşen testlerin sonuçları geçerli olarak kayda girmiştir. Gerek eğilme gerekse de çekme testlerinde 40 mm/dak. sabit ilerleme hızı kullanılmış olup, yüklemenin darbe içermemesine azami özen gösterilmiştir. Testlerden elde edilen veriler kendi içinde tutarlılık arz etmiştir.

3. Mekanik Testler (Mechanical Experiments)

3.1. Çekme testi (Tensile test)

Şekil 2b ile gösterilen numune, reçine emdirilmiş ve emdirilmemiş olarak çekme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Şekil 8 ile gösterilmiştir. İlgili grafikteki veri aralıkları, grafiğin doğrusal



Şekil 5. Çoklu numune üretimi için oluşturulan modelin reçine emdirilmeden önce (a) ve sonra (b) durumu (The model created for multi-sample production before (a) and after (b) resin infusion)

Şekil 6. Reçine dolumu tam gerçekleşmemiş numune (Sample with incomplete resin filling)

çizgiler ile ifade edilebileceği kadar sık olduğu için doğrudan çizgi grafik olarak gösterilmiş, okumayı güçleştiren sık veri noktalarından oluşan grafik kullanılmamıştır.

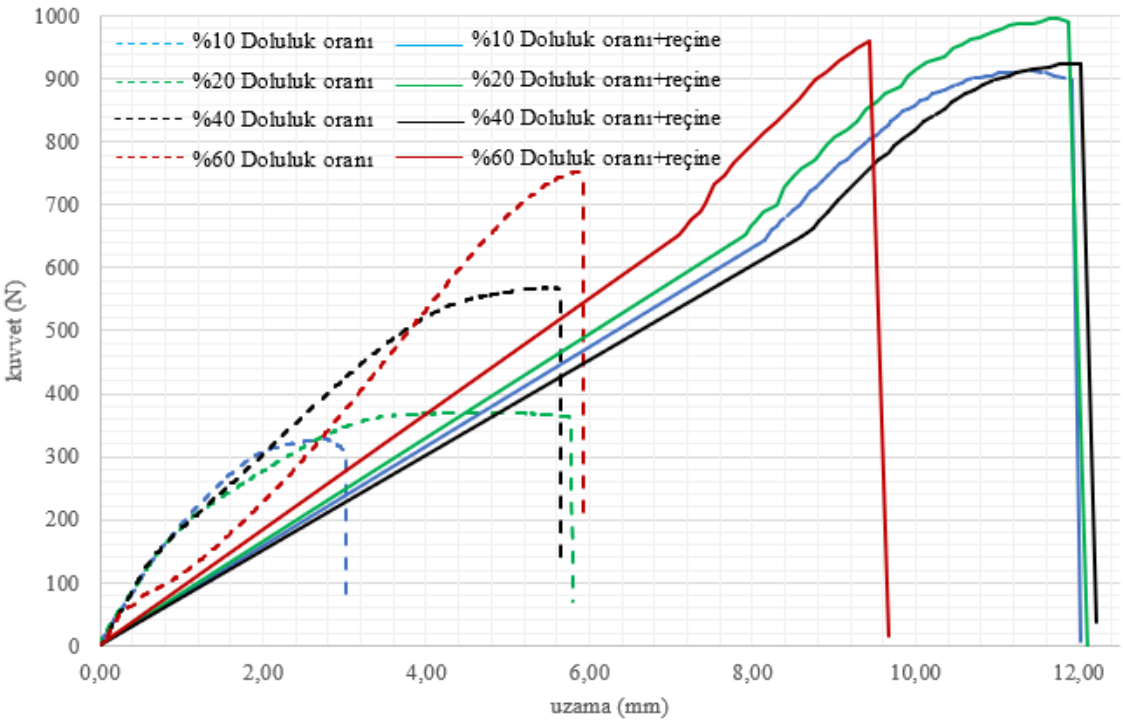
Şekil 7. Tam reçine dolumu gerçekleşmiş numune
(Fully resin filled sample)

Çekme testlerinde elde edilen sonuçlara göre:

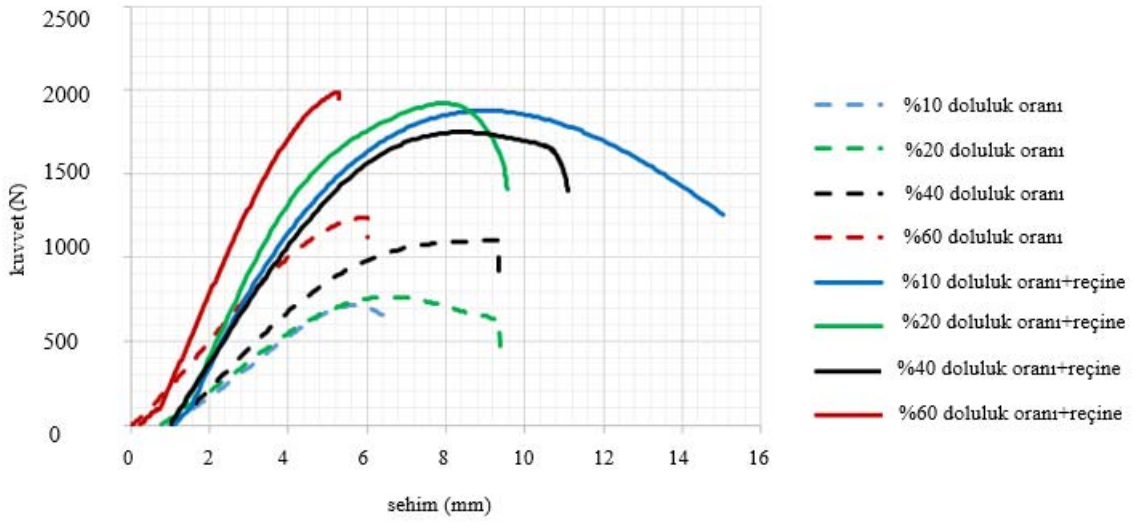
- Reçine emdirilmeyen numuneler daha elastik bir karakter sergilemektedir.
- Reçine emdirilmemiş numuneler arasında %60 doluluk oranına sahip numune en yüksek çekme değerine ulaşmıştır.
- Reçine emdirilmemiş %10 doluluk oranına sahip numune diğer reçinesiz numunelere göre daha kırılgan bir karakter sergilerken, çekme dayanımı %20 doluluk oranına sahip numuneye oldukça yakın bir dayanım sergilemiştir.
- Reçine emdirilmiş numunelerin, emdirilmeyen numunelere göre çekme dayanımı çok daha yüksek mertebelere çıkmıştır.
- Reçine emdirilmiş numuneler daha kırılgan bir yapı sergilemiştir. Elastik deformasyon miktarları görece azdır.
- Reçine emdirilen numunelerin çekme testi dayanım sınırları, emdirilmemiş numunelere göre birbirlerine çok daha yakındır
- Karşılaştırma örneklerinde, reçinesiz numunelerin çekme dayanımının, dolgu oranına bağlı olarak büyük oranda değiştiği, ancak reçine dolgulu numunelerin, 3B yazıcı ile sağlanan dolgu oranlarına bağlı bir fonksiyon olarak değerlendirilemeyeceği görülmüştür. Zira reçine emdirilmiş numunelerin, tüm doluluk oranlarında, birbirine çok yakın çekme dayanımı sergilediği gözlemlenmiştir. Reçine emdirilmeyen numunelerde doluluk oranı arttıkça kuvvet dayanımı artmasına rağmen reçine emdirildikten sonra %20 doluluk oranına sahip numune en yüksek dayanımı sergilemiştir. Bu durum doluluk oranı arttıkça malzeme içindeki kanalların küçülmesi ile ilgilidir. Küçülen kanalları dolduran reçine, daha zayıf bağlar oluşturmuş ve bu bağlar gerekli çekme dayanımını gösterememiştir. Çekme işlemi esnasında oluşan zayıf bağlar daha düşük kuvvetlerde birbirlerinden ayrılmış ve uygulanan kuvvet PLA malzemeye daha fazla tesir etmiştir.

3.2. Eğilme testi (Bending test)

Şekil 2a ile gösterilen numune, reçine emdirilmiş ve emdirilmemiş olarak 3-nokta eğilme testine tabi tutulmuş ve sonuçlar Şekil 9 ile



Şekil 8. Çekme testi sonuçları (kuvvet-uzama grafiği) (Tensile test results (force-elongation graph))



Şekil 9. 3-nokta eğilme testi sonuçları (sadeleştirilmiş) (3-point bending test results (simplified))

sunulmuştur. Elde edilen test grafiğinde, başlangıçta uygulanan kuvvetlerin düşük olması ve parça yüzeyindeki pürüzler nedeniyle, testin başlangıç aşamasında veri okuma hataları gözlemlenmiştir. Diğer taraftan tekrarlanan testlerde tutarlı sonuçlar elde edilmiş ve numunelerin testler esnasında benzer karakteristik özellikler sergilediği gözlemlenmiştir. İlgili grafikteki veri aralıkları, grafiğin doğrusal çizgiler ile ifade edilebileceği kadar sık olduğu için doğrudan çizgi grafik olarak gösterilmiş, okumayı güçleştiren sık veri noktalarından oluşan grafik kullanılmamıştır.

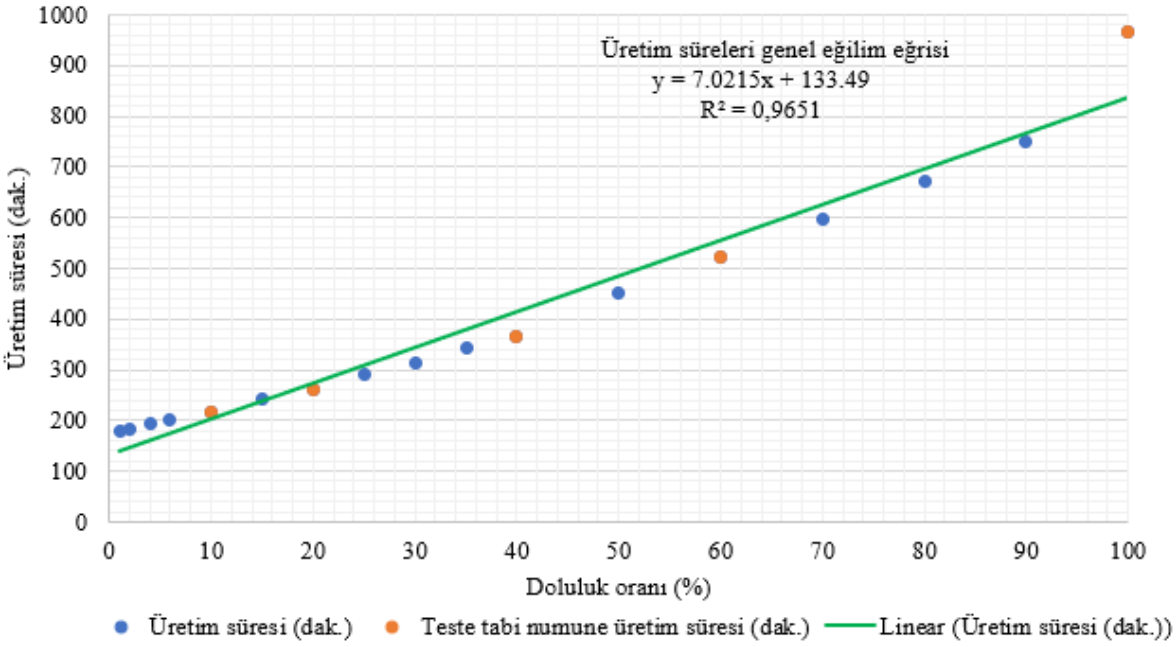
3-nokta eğme testinden elde edilen sonuçlara göre:

- Reçine emdirilmeyen ve emdirilen numuneler benzer elastik kabiliyet sergilemiştir.
- Tüm numuneler kırılma öncesi 5-8 mm aralığında, nispeten yakın değerde deplasmana uğramışlardır.
- Reçine emdirilmemiş numuneler arasında %60 doluluk oranına sahip numune en yüksek eğilme direncine sahiptir. Ancak bu değer de en düşük reçine emdirilmiş numunenin eğilme direncinin altında kalmıştır.
- Reçine emdirilmemiş %10 doluluk oranına sahip numunenin diğer reçinesiz numunelere göre daha düşük bir deplasmanda kırıldığı görülmektedir. %20 doluluk oranına sahip numuneye oldukça yakındır.
- Reçine emdirilmiş numunelerin emdirilmeyen numunelere göre eğilmeye karşı dayanımı çok daha yüksek mertebelere çıkmıştır.
- Reçine emdirilen numunelerin eğme testi dayanım sınırları, emdirilmemiş numunelere göre birbirlerine çok daha yakındır.
- Çekme testinde olduğu gibi, reçine emdirilmiş numunelerin kuvvet dayanımının doluluk oranından bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Bir başka deyişle reçine emdirilmeyen numunelerde dayanım, doluluk oranının bir fonksiyonu olarak artmakta ya da azalmakta iken, numuneler reçine ile doldurulduğunda bu fonksiyon tutarlılığını yitirmektedir. Eğilme testlerinden elde edilen sonuçlara benzer şekilde %20 doluluk oranındaki reçine emdirilmiş numune daha yüksek mertebelere ulaşmıştır. Çekme testinden farklı olarak %60 doluluk oranında olan numune en yüksek eğilme direncine sahiptir.
- Numunelerin çekme ve eğilme testlerinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut olan benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Belter ve Dollar çalışmalarında, 3B yazıcı ile üretilmiş parçaların reçine ile desteklenmesini önermiş, bu amaçla numuneleri el ile doldurulmak üzere özel boşluklu olarak tasarladıklarını belirtmişlerdir [32]. Yapılan çalışmada reçine ile desteklenmiş numunelerin testlerinden parçaların dayanımında %45, sertlikte %25 artış elde edildiği belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu makalede önerilen yöntemle elde edilmiş sonuçlarla tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan Gyroid iç dolgu kullanılmasının daha etkin bir yöntem olarak değerlendirilebileceği de gözlemlenmiştir.

4. 3b Yazıcı Üretim Zamanlarının Karşılaştırılması
(Comparison of 3d Printer Production Times)

Günümüzde çok farklı niteliklerde 3B yazıcılar bulunmaktadır. Bu yazıcılar kendi aralarında üretim hızı açısından farklılık göstermektedirler. Bu çalışmada farklı dolgu oranlarındaki numunelerin üretim süreleri tek bir 3D3 S1 marka ve modelinde [33] 3B yazıcı kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede yazıcı modeli kaynaklı oluşabilecek farklar bertaraf edilerek bir karşılaştırma tablosu elde edilmiştir. Şekil 2b ile gösterilen numune için farklı doluluk oranlarındaki üretim süreleri Şekil 10'da verilmiştir.

3B yazıcılarda üretim süreleri, uygulanan katman yüksekliği ve ilerleme hızı ile doğrudan orantılıdır. Bu çalışmada, 3B yazıcılardan çıkan ürünlerin nihai ürün olarak kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çıkan modelin bir kalıp modeli de olabileceği göz önüne alınmıştır. Bu nedenlerle üretilen modellerde yüzeylerin düzgün olabilmesi adına 0.1mm katman yüksekliği uygulanmıştır. Daha yüksek katman yüksekliklerinde, bilhassa eğimli yüzeylerde, yazıcı ekstrüderi, eğime bağlı olarak yüzeyi kademeli olarak oluşturmaktadır. Eğimli yüzeyin açısına bağlı olarak, belirli mesafelerde katman yüksekliği kadar bir yükseklikte yeni yüzey oluşturur. Bu nedenle yüksek katman yüksekliği, bilhassa eğimli yüzeylere sahip parçalarda, nihai ürün olarak kullanılmasına engel teşkil edecek şekilde ortaya çıkar. Burada durum, yüzey pürüzlülüğü değerinden farklı olarak, üretim katmanlarının belirgin olmasını işaret eder. Sadece eğimli yüzeylerde değil, yazdırma tablasına dik olan yüzeylerde de katmanlar üst üste bindikçe, aralarında, katman yüksekliğine bağlı olarak üretim çizgileri çıplak gözle görünür şekilde ortaya çıkar. Yazıcı katman yüksekliği, üretilen parçanın boyutlarına göre seçilebilir. Örneğin, bu çalışmada kullanılan numunelerde, 0.1 mm katman yüksekliğinin üzerindeki değerlerde, üretilen parçanın bir nihai ürün ya da bir kalıp modeli olmasını engelleyecek şekilde kaba bir yüzey oluşmaktadır. Diğer taraftan yazıcı kodlama ara yüzünde,



Şekil 10. Doluluk oranına göre numune üretim süreleri (Sample production times according to fill rate)

üretim hızını arttırabilmek için mümkün olan en yüksek nozül ilerleme hızı olan 60mm/s belirlenmiştir. İlerleme hızı; kullanılan filamentin tipine, çapına, markasına, kullanılan makinenin kapasitesine, ekstrüder sıcaklığına, yazıcının açık ya da kapalı hazneli olmasına, üretilmek istenen parçanın geometrik olarak karmaşıklığına, ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu parametrelerden kısıtlayıcı olan niteliklerin (makine kapasitesi, filament tipi gibi) izin verdiği alt ve üst limitler arasında kalmak şartıyla, optimum yazdırma hızı, kullanıcı tarafından deneyimle tayin edilir ve bu hız çoğu zaman mümkün olan en yüksek değerde tutulmaya çalışılır.

Numunelerin üretimi esnasında bu temel ayarlar kullanılmış olup, üretim süreleri yazıcı kodlama ara yüzünden alınmış ve üretim esnasında yazıcı üzerinden doğrulaması yapılmıştır. Çalışmada, %60 doluluk oranındaki numuneler, verimlilikleri (uzun yazdırma süresi, yüksek maliyet) düşük olduğu için testlere dahil edilmemiştir. Ancak bu doluluk oranı üzerinde doluluğa sahip numunelerin üretim sürelerinin kaydedilebilmesi için, deneme üretimleri yapılmış ve yine 3B yazıcı ara yüzünden elde edilen, bilgisayar tarafından hesaplanmış sürelerle doğrulaması yapılmıştır.

Numunelerin doluluk oranına göre üretim süreleri büyük oranda değişmektedir. Şekil 10'da görüldüğü üzere %1 doluluk oranından %90 doluluk oranına kadar neredeyse doğrusal bir süre artışı mevcuttur. Ancak %90 doluluk oranından sonra üretim süresi keskin bir şekilde artış göstermektedir. Doluluk oranı, %100'e yaklaştıkça, parçanın iç kısmında birbirine temas eden yüzeylerin de miktarı artmaktadır. Birbirine temas eden katmanlar, extrüder tarafından belirli bir oranda üst üste bindirilerek parçada bütünlük sağlanmış olur. %90 doluluk oranı ve üzerinde, neredeyse bütün katmanlar birleştirilmek zorunda olup, %100 dolulukta tüm katmanlar ve yüzeyler birbirine boşluksuz olarak temas eder. Çalışmada kullanılan %15 üst üste bindirme oranı, %90 üzeri dolulukardaki yazdırma süresi içinde baskın bir etken olarak ortaya çıkmaktadır. %100 doluluk oranı olan numune için geçen üretim süresi bir karşılaştırma parametresi olarak %10 doluluktaki numuneye göre 4,45 kat daha fazladır. Bu durum, 3B yazıcılarda tam dolu parça üretiminde, üretim süresi açısından ciddi bir dezavantaj olarak ortaya çıkar.

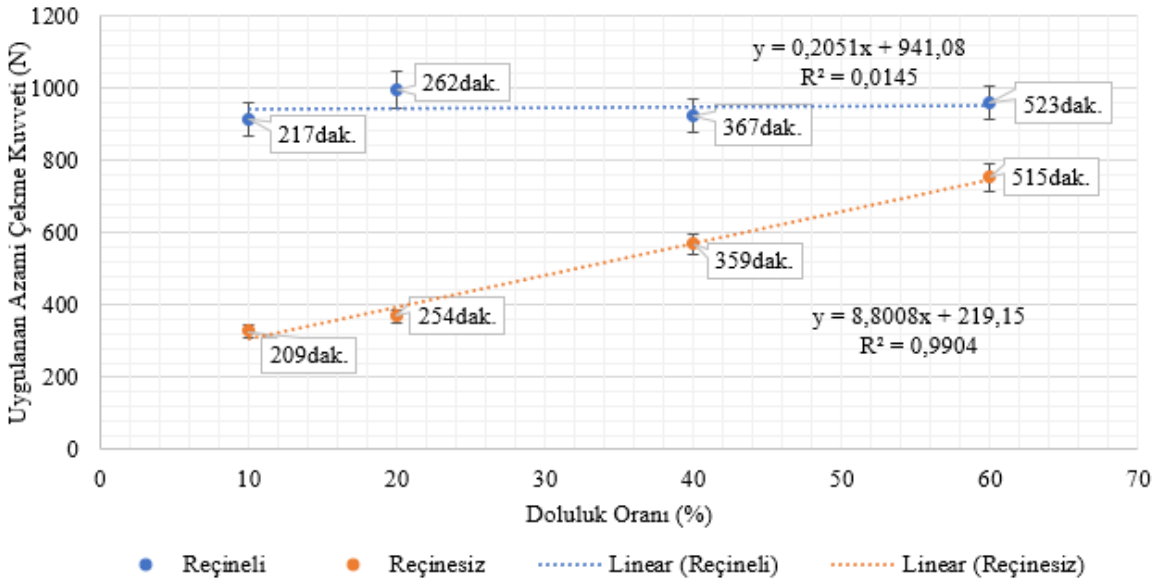
Yapılan reçine emdirme çalışmalarında, numunelerin üretim doluluk oranlarından bağımsız olarak, vakum infüzyon işlemi süresi her defasında aynı olarak ölçülmüştür. Deney düzeneği koşullarında, reçine emdirme işlemi her numune için ortalama 8 dakika sürmüştür. Bu süre, doluluk oranı arttıkça, doldurulması gereken hacim azaldığı için kısalmaya ama kanallar içindeki hidrodinamik direncin artması sebebiyle uzamaya meyillidir. Bu durum, emdirme işlemi süresinin çok fazla değişiklik göstermemesini sağlamaktadır. Diğer taraftan, numune içindeki tüm boşlukların tam olarak doldurulduğundan emin olunabilmesi için, emdirme süresi, testlerde başarılı olmak için tespit edilmiş azami süre olarak belirlenmiştir. Bu süre; ortam sıcaklığı, vakumlama gücü gibi fiziksel dış etmenlerden etkilenmekle birlikte bu etki de sınırlıdır. Diğer taraftan vakum infüzyon yöntemi ile reçine emdirme işlemi süresi, 3B yazıcıların üretim hızıyla kıyaslandığında son derece kısadır. Özellikle %100 doluluk oranına sahip numunenin üretimi için geçen süre ile karşılaştırıldığında, reçine emdirme işlemi toplam sürenin %1'inden daha azdır.

5. 3b Yazıcı Numune Ağırlıklarının Karşılaştırılması (Comparison of 3d Printed Specimen Weights)

3B yazıcı ile üretimde, üretim sürelerinden farklı olarak, mamul ağırlığı ile, dolgu oranı arasında lineer bir bağlantı bulunmaktadır. İç dolgu oranı %0 olan numunelerde, sadece dış cidarların oluşturduğu hacimle ortaya çıkan ağırlık, dolgu oranı arttıkça, mamulün toplam hacmine göre belirlenen dolgu oranının yüzdesi ile aynı oranda artmaktadır.

Numune bazlı yapılmış olan bu incelemede, numunelerin ağırlık değişimi doluluk oranının doğrusal bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmıştır. Numunelerin ağırlıklarındaki bu artış pek çok mühendislik uygulamasında göz ardı edilebilir seviyedeyken, kullanılan hammaddenin maliyete etkisi açısından önem arz etmektedir.

Test numunelerinin hazırlanmasında kullanılan filament hammaddesi PLA'dır. PLA'nın yoğunluğu 1,24 gr/cm^3'tür [34]. Numuneleri doldurmak için kullanılan reçinenin yoğunluğu 1,20 gr/cm^3'tür. Kullanılan bu iki malzemenin yoğunluklarının birbirlerine yakın olması sayesinde tam dolu üretilen numune ile reçine emdirilmiş



Şekil 11. Reçineli ve reçinesiz numunelerin doluluk oranına göre elde edilen çekme dayanımları ve üretim süreleri
(Tensile strengths and production times of specimens with and without resin according to the fill rate)

numunenin ağırlıkları neredeyse aynı kalmaktadır. Sonuç olarak yüksek mukavemet amaçlı tam dolu üretilen 3B yazıcı parçalarında, vakum infüzyon yönteminin ağırlık açısından bir dezavantajı yoktur. Ayrıca vakum infüzyon yöntemi ile reçine emdirilmiş numuneler arasında ağırlık farkı oluşmamaktadır. Başka bir deyişle doluluk oranı ne olursa olsun reçine emdirilen numunelerin hepsi yaklaşık aynı ağırlıktadır.

6. Numune Üretim Maliyeti Karşılaştırması
(Sapmple Production Cost Comparison)

Reçine ve filament maliyetleri çalışma kapsamında karşılaştırılmıştır. Kullanılan PLA tip 3B yazıcı filament fiyatı Ocak 2022 tarihi itibariyle 34 $/kg'dır. Aynı dönemde kullanılan reçine ve sertleştiricinin ortalama fiyatı 12 $/kg olarak tespit edilmiştir. Bu değerler baz alındığında çalışmada kullanılan reçine, PLA filamente göre %65 daha ucuzdur. PLA filamentler 3B yazıcılarda kullanılan en düşük maliyetli çözümlerden birisidir.

Ağırlık için bir hesaplama yapıldığında %20 doluluk oranındaki bir numunenin 32 gr, %100 doluluk oranındaki numunenin ise 87 gr ağırlıkta olduğu görülmektedir. Kullanılan hammadde maliyeti göz önüne alındığında %20 dolulukta olan numunenin reçine emdirilmiş halde toplam maliyeti 1,75 $, %100 dolu üretilen numunenin maliyeti 2,95 $ olmaktadır. Örnek karşılaştırmada reçine emdirilmiş numunenin maliyeti %41 daha düşük çıkmaktadır.

Elde edilen sonuçlar maliyet, üretim süresi ve çekme dayanımı açısından incelenmiş ve aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.

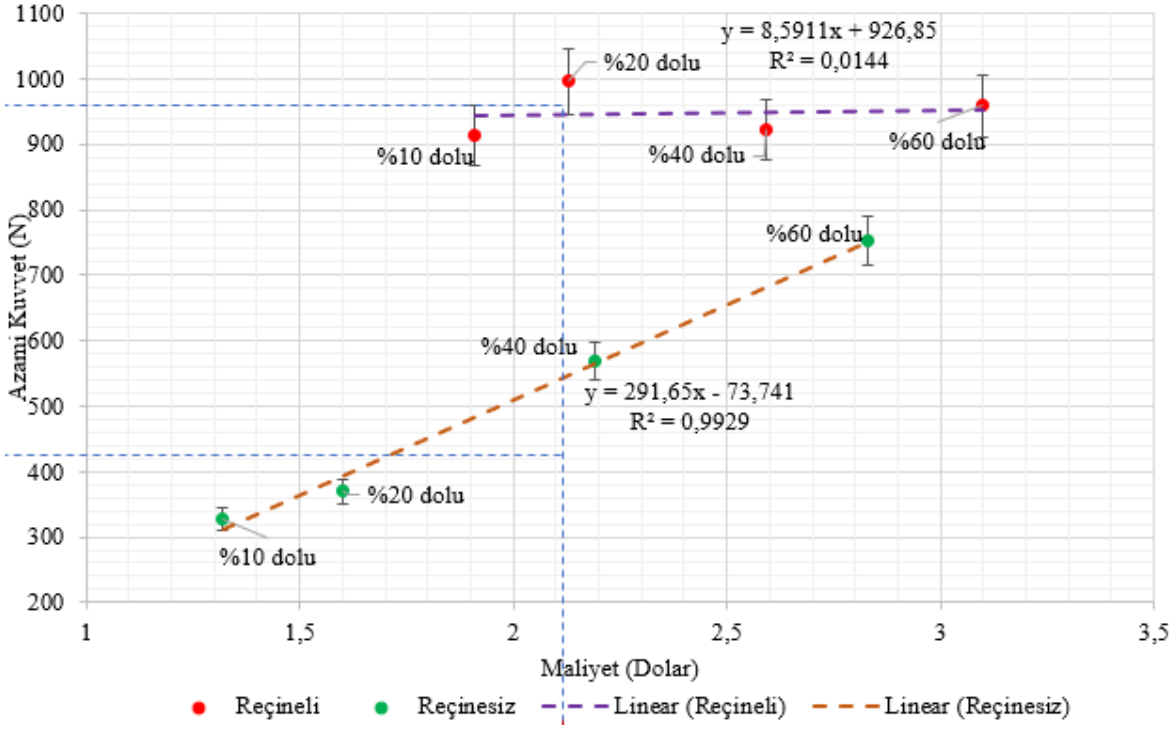
Şekil 11 ve Şekil 12 ile gösterilen grafiklerde, %10, 20, 40 ve 60 doluluk oranlarına sahip reçineli ve reçinesiz numuneler karşılaştırılmıştır. Şekil 12'de % doluluk oranına göre, reçineli numuneler reçinesiz numunelere kıyasla vakum infüzyon işlem süresi kadar daha uzun sürede üretilmiştir. Ancak tüm dolum oranlarında reçineli numunelerin birim süre başına daha fazla çekme kuvvetine dayandığı görülmektedir.

Diğer taraftan Şekil 12 ile verilen grafik incelendiğinde ise reçinesiz numunelerin aynı doluluk oranında daha düşük bir maliyete sahip olduğu görülmektedir. Ancak grafiğe göre %30 doluluk oranından sonra aynı üretim maliyetinde, reçineli numunelerin çekme kuvveti dayanımı, reçinesiz numunelere oranla çok daha yüksek olarak belirlenmiştir. En düşük dolum oranı olan %10 incelendiğinde, reçineli numune %43 daha fazla maliyete sahip olmasına rağmen yaklaşık 3 katı daha yüksek çekme kuvveti dayanımı göstermektedir. Ayrıca not edilmelidir ki reçineli numuneler tüm doluluk oranlarında birbirlerine yakın çekme kuvveti dayanımı sergilemiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12'de elde edilen test verilerinin genel eğilimleri doğrusal bir denklemle gösterilmiştir. Bu gösterimden anlaşıldığı üzere reçineli numunelerin dayanımı hem maliyet hem de dolgu oranına göre çok fazla değişiklik göstermezken, reçine ile desteklenmemiş numunelerin dayanımı, iç dolgu oranına ve maliyete orantılı olarak artış ya da azalış göstermektedir. Elde edilen verilerin anlamlandırılması için Eş. 1 gibi bir avantaj katsayısı ortaya atılmıştır. Katsayıyı belirlerken yüksek olması istenen değerler çarpım, düşük olması istenen değerler bölüm olarak belirlenmiştir.

$$A = \frac{F}{MS} \tag{1}$$

Eş. 1'de A avantaj katsayısı, M maliyet, S üretim süresi ve F uygulanan çekme kuvvetidir. Yapılan çalışmada önerilen kompozit yapının, sadece 3B yazıcı ile üretilmiş mamule göre üstünlükleri bu üç kriter üzerinden değerlendirilmiştir. Maliyet ve üretim süresi azalırken, malzemenin mukavemetinin artırılması temel hedeftir. Numunelerin test esnasındaki davranışları, doluluk oranı ve reçine miktarına göre, kırılgan ya da elastik olabilmekte, bu sebeple de elastik modülleri farklılık göstermektedir. Ortaya atılan karşılaştırma katsayısının daha anlaşılır olabilmesi için, malzemenin akma mukavemeti yerine doğrudan çekme dayanımı kullanılmıştır. Yapılan testlerin sonuçları, çekme kuvveti olarak ifade edildiği için, avantaj katsayısı hesaplanırken de bu değerlerin kullanılması uygun görülmüştür. Bu hesaplama sonucunda doluluk oranına göre yapılmış karşılaştırma Tablo 1 ile verilmiştir. Elde edilen bu veriler neticesinde tüm iç dolgu oranlarında, reçineli numunelerin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Diğer taraftan iç dolgu oranı arttıkça reçine emdirme işleminin etkisinin azaldığı da elde edilen neticelerden birisidir. Reçinesiz numunelerin avantaj katsayısındaki % artış incelendiğinde, %20 doluluk oranında yöntemin optimum değere ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 12. Reçineli ve reçinesiz numunelerin üretim maliyetlerine göre elde edilen çekme dayanımları
(Tensile strengths of specimens with and without resin according to production costs)

Tablo 1. Avantaj katsayısı tablosu (Advantage coefficient table)

% Doluluk oranı	Reçineli *A*	Reçinesiz *A*	Reçine ile % artış oranı
10	2,2	1,15	92,4
20	1,78	0,88	102,2
40	0,97	0,71	37,1
60	0,59	0,51	16,2

Şekil 12'de bu durum grafik üzerinde de gösterilmiştir. Aynı maliyette olan reçineli %20 ve reçinesiz %38 doluluk oranındaki numuneler arasında, %70'ten fazla dayanım farkı mevcuttur. Şekil 11'de bu iki numune arasındaki fark, üretim süresi olarak da karşılaştırılabilir. Bu grafikte, üretim süreleri, reçineli %20 dolulukta numune için 262 dakika iken, reçinesiz %38 doluluktaki numune için 355 dakikadır. Sonuç olarak, aynı maliyette üretim ele alındığında, reçineli numunelerin hem dayanım hem de süre olarak avantajlı olduğu görülmektedir.

7. Sonuçlar (Conclusions)

Eklemeli imalat yöntemlerinde vakum infüzyon reçine emdirme yolu ile üretim optimizasyonu isimli bu çalışmada eklemeli imalat metodunun dezavantajlarının ortadan kaldırılmasına yönelik araştırma ve uygulama yapılmıştır. Eklemeli üretim metodunda üretilmek istenen ve belli bir hacimde olan parçanın iç dolgu oranı miktarının, üretim süresi ve maliyeti üzerinde önemli bir etkisi mevcuttur. Parça dolgu oranını belli bir oranın altında tutmak (ör.%10) ise ürünün kullanımına imkân vermeyecek kadar düşük bir mukavemete sebep olabilir. Mühendislik uygulamalarının çoğunda en düşük süre ve maliyette üretim yapılması ve istenilen özelliklerin sağlanması istenir. Bu çalışmada eklemeli imalat yönteminde, üretim süresi ve maliyeti düşürülürken nihai ürünün dayanımının yükseltilmesi amaçlanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, vakum infüzyon ile tam olarak doldurulan numunelerin çekmeye karşı olan dirençlerinde, Gyroid geometrisinin doluluk oranlarına göre değişmekle birlikte, %300'e kadar artış sağlandığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, %60'tan fazla doluluğa sahip parçalar, üretim süresinin karlılık sınırını aşması nedeniyle incelemeye dahil edilmemiştir. %60'ı aşan doluluk oranı kullanılan malzeme açısından maliyeti arttırmaktadır. Ayrıca uzayan üretim süresi, 3B yazıcının işletme maliyetini ve yıpranma miktarını arttırmaktadır. Reçine takviyesi olmaksızın test edilen numunelerde, çekme dayanımının, doluluk oranı ile doğrusal bir bağlantısı olduğu ve 320 ila 750 N gibi geniş bir aralıkta olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, reçine emdirilmiş numunelerin, dolgu oranından asgari seviyede etkilendiği ve tüm doluluk oranlarında, numunelerin 900-1000 N çekme dayanımı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum reçine emdirme işleminin, çekme dayanımı açısından, üretilen parçaları, tutarlı ve yüksek bir seviyeye çıkardığı söylenebilir. Reçine emdirme işlemi uygulanmış %10 doluluktaki numunelerin başlangıç değeri itibariyle maliyeti, yapılan fazladan işlem sebebiyle, daha yüksektir. Çekme dayanımı ile bu fark göz ardı edilebilir. Ancak, reçine emdirilmemiş numunelerde, %28 doluluk oranından itibaren reçineli ve reçinesiz numunelerin maliyetleri birbirine yakınlaşmaktadır. %20 doluluk oranındaki reçine emdirilmiş numune ile %38 doluluk oranındaki reçinesiz numunenin maliyetleri yaklaşık olarak aynı (2,2$) olmasına rağmen, reçineli numunelerin dayanımı %73 artmaktadır. Ayrıca reçineli numuneler %30 daha düşük üretim süresi ile de avantajlı olmaktadır.

Sonuç olarak vakum infüzyon ile 3B yazıcıda üretilen ürünlerin çok kısa bir sürede %100 doluluk oranına çıkartılmasının mümkün olduğu kanıtlanmıştır. Vakum infüzyon yöntemi, gyroid dolgu kalıbının temel özelliklerini iyileştirerek üründe homojen bir malzeme dağılımı sağlamıştır. Geliştirilmiş olan yöntem endüstride pek çok alanda kullanılabilirdir. Bununla birlikte üretim süresi ve maliyeti açısından seri üretime çok uygun olmadığı düşünülen eklemeli imalat metodunun da önü açılmış olmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. International Organization for Standardization (ISO), Additive Manufacturing, General PrincipleS Part 1: Terminology, ISO DIS 17296-1, Edition 2014.
2. Haolzmann P., Breitenecker R.J., Soomro A.A., Schwarz E.J., User entrepreneur business models in 3D printing, Journal of Manufacturing Technology Management, 28 (1), 75-94, 2017.
3. Ze-Xian L., Yen T.C., Ray M.R., Mattia D., Metcalfe I.S., Patterson D.A., Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques, Journal of Membrane Science, 523 (1), 596-613, 2016.
4. Keles O., Blevins C.W., Bowman K.J., Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS, Rapid Prototyping Journal, 23 (2), 320-328, 2017.
5. ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies, PA, 2012, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
6. Yuanbin W., Xun X., Selection of additive manufacturing processes, Rapid Prototyping Journal, 23 (2), 434-447, 2017.
7. core77, 3D Printing Process, https://www.core77.com/posts/71172/How-to-Select-the-Right-3D-Printing-Process, 17 May 2022.
8. Pandzic A., Hodzic D., Milovanovic A., Influence of Material Colour on Mechanical Properties of PLA Material in FDM Technology, DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, Proceedings: 10.2507/30th.daaam.proceedings.075, Vienna, 2019.
9. 3ders, 3D Printing Application, http://www.3ders.org/articles/20181001-paul-g-allens-stratolaunch-space-venture-uses-3d-printing-to-develop-pga-rocket-engine.html, 20 May 2022.
10. Syed A.M.T., Elias P.K., Amit B., Susmita B., Lisa O., Charitidis C., Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities, Materialstoday, 21 (1),22-37, 2018.
11. Sezer H.K., Eren O., Börklü H.R., Özdemir V., Additive manufacturing of carbon fiber reinforced plastic composites by fused deposition, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (2), 663-674, 2019.
12. Kuş S., Durmuş A., Stress-constrained infill optimization in additive manufacturing for the armrest of an office chair, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (4), 2209-2223, 2021.
13. Duman B., Özsoy K., A deep learning-based approach for defect detection in powder bed fusion additive manufacturing using transfer learning, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 361-376, 2021.
14. Gebel M.E., Ermurat M., Investigation of polymer matrix continuous fiber reinforced composite part manufacturability for composite additive manufacturing, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (1), 57-67, 2021.
15. May C.A. , Epoksi Resins, Chemistry and Technology, New York, Basel: Marcel Dekker, 1988.
16. Petrovića J.M., Bekrićb D.Ž., Vujičića I.T., Dimićc I.D., and Putića S.S., Microstructural characterization of glass-epoxy composites subjected to tensile testing, Acta Periodica Technologica, 44, 151-162, 2013.
17. Zhao Y.Q., Zhou Y., Huang Z.M., and Batra R.C., Experimental and Micromechanical Investigation of T300/7901 Unidirectional Composite Strength, Polymer Composites, 40, 2018.
18. Ayres T.J., Sama S.R., Joshi S.B., and Manogharan P.G., Influence of resin infiltrants on mechanical and thermal performance in plaster binder jetting additive manufacturing, Additive Manufacturing, 2019.
19. Feng X., Yang Z., Rostom S.S.H., Dadmun M., Wang S., Wang Q., Xie Y., Reinforcing 3D printed acrylonitrile butadiene styrene by impregnation of methacrylate resin and cellulose nanocrystal mixture: Structural effects and homogeneous properties, Materials & Design, 138, 62-70, 2018.
20. Govingnon Q., Bickerton S., and Kelly P.A., Simulation of the reinforcement compaction and resin flow during the complete resin infusion process, Composites: Part A, 41 (1), 45-57, 2010.
21. Lionetto F., Moscatello A., Totaro G., Raffone M., and Maffezzoli A., Experimental and Numerical Study of Vacuum Resin Infusion of Stiffened Carbon Fiber Reinforced Panels, Materials, 13(21), 2020.
22. Modi D., Correia N., Johnson M., Long A., Rudd C., and Robitaille F., Active control of the vacuum infusion process, Composites: Part A, cilt 38 (5), 1271-1287, 2007.
23. Zhang K., Gu Y., Li M., and Zhang Z., Effect of rapid curing process on the properties of carbon fiber/epoxy composite fabricated using vacuum assisted resin infusion molding, Materials and Design(1980-2015), 54, 624-631, 2013.
24. Rajan V., Sniderman B., Baum P., 3D opportunity for life: Additive manufacturing takes humanitarian action, Deloitte Review, 19, 1-8, 2016.
25. Keles O., Blevins C.W., Bowman K. J., Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS, Rapid Prototyping Journal, 23 (2), 320-328, 2017.
26. Murdy P., Dolson J., Miller D., Hughes S., and Beach R., Leveraging the Advantages of Additive Manufacturing to Produce Advanced Hybrid Composite Structures for Marine Energy Systems, Applied Science, 11 (3) 2021.
27. Lopatina Y.A., Slavkina V.E. , Development of a High Strength Polymeric Composite Material Using 3D-Printing and Vacuum Impregnation Technology, Advances in Composite Science and Technology, 984, 2019.
28. Filippova A.V., Lopatina Y.A., Sviridov A.S., Study of the tensile strength of a polymer composite material based on ABS-plastic and impregnated in epoxy resin with different types of hardener, Journal of Physics: Conference Series, 1990, 2020.
29. Nakanishi K., Labonte D., Cebo T., Veigang-Radulescu V.P., Fan Y., Brennan B., Pollard A.J., Hofmann S., and Fleck N.A., Mechanical properties of the hollow-wall graphene gyroid lattice, Acta Materialia, 201, 254-265, 2020.
30. Khaderi S.N., Deshpande V.S., and Fleck N.A., The stiffness and strength of the gyroid lattice, International Journal of Solids and Structures, 51 (23-24), 3866-3877, 2014.
31. Abueidda D.W., Elhebeary M., Shiang C.S, Pang S., Al-Rub R.K.A., Jasiuk I.M., Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study, Materials & Design, 165, 2019.
32. Belter J.T., Dollar A.M., Strengthening of 3D Printed Fused Deposition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique, PLoS ONE, 10 (4), 2015.
33. 3D3, S1 Model 3D yazıcı özellikleri, https://dukkan.3d3teknoloji.com/3d3-s1-3d-yazici-pmu199, 22 August 2022.
34. International Organization for Standardization, Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics-Requirements with guidance for use (ISO Standard No. 1183-1:2019), 2019. Available: https://www.iso.org/standard/74990.html.