

EYM ile Üretilen YMK Yapılı Numunelerde Kenar Genişliğinin Basma Dayanımı Üzerine Etkisinin Araştırılması

Oğuz TUNÇEL*¹ ORCID 0000-0002-6886-6367

Mümin TUTAR² ORCID 0000-0002-7286-3433

¹Siirt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Siirt

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Yenisehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bursa

Geliş tarihi: 29.08.2023

Kabul tarihi: 29.09.2023

Atıf şekli/How to cite: TUNÇEL, O., TUTAR, M., (2023). EYM ile Üretilen YMK Yapılı Numunelerde Kenar Genişliğinin Basma Dayanımı Üzerine Etkisinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(3), 851-858.

Öz

Bu çalışmada, 3 boyutlu baskı (3D printing) kullanılarak üretilen farklı kenar genişliklerine sahip yüzey merkezli kübik YMK yapıları numunelerin basma dayanımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. PLA malzemesi kullanılarak Eriyik Yığılma Modellemesi (EYM) yöntemi ile numuneler üretilmiştir. Kenar genişliği arttıkça, maksimum basma yüklerinde ve basma dayanımlarında artışlar gözlenmiştir. En düşük yük 1,2 mm kenar genişliğinde 2849 N iken, en yüksek yük 2,4 mm kenar genişliğinde 6351 N olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, en düşük basma gerilimi 34,76 MPa ile 1,2 mm kenar genişliğinde, en yüksek basma gerilimi ise 40,15 MPa ile 2,4 mm kenar genişliğinde kaydedilmiştir. Kenar genişliğinin artmasıyla birlikte maksimum yük/kütle değeri %33,1 oranında artış göstermiştir. Sonuçlar, 3D baskı üretiminde kenar genişliğinin tasarım faktörü olarak önemini vurgularken, daha geniş kenar genişliklerinin ürünlerin mekanik dayanıklılığını artırabileceğini ve uygulama gereksinimlerine uygunluğunu sağlayabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Eriyik yığılma modelleme, Basma dayanımı, Yüzey merkezli kübik kafes, Kenar genişliği

Investigation of the Effect of Edge Width on Compressive Strength of FCC Structured Specimens Produced with FDM

Abstract

In this study, the effect of different edge widths of face-centered cubic (FCC) lattice structures, manufactured using the Fused Deposition Modeling (FDM) method with PLA material, on compressive strength was investigated using 3D printing technology. As the edge width increased, an increase in maximum compressive loads and compressive strengths was observed. The lowest load was measured as 2849 N for the sample with a 1,2 mm edge width, while the highest load was recorded as 6351 N for the sample with a 2,4 mm edge width. Similarly, the lowest compressive stress was 34,76 MPa for the 1,2 mm

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Oğuz TUNÇEL, oguz.tuncel@siirt.edu.tr

edge width, and the highest compressive stress was 40,15 MPa for the 2,4 mm edge width. An increase in edge width led to a 33,1% increase in the maximum load-to-mass ratio. The results emphasize the significance of edge width as a design parameter in 3D printing production, suggesting that wider edge widths could enhance the mechanical robustness of products and cater to application-specific requirements. This study highlights the importance of considering edge width during the design phase, and further investigations involving various sample designs or material selections could provide deeper insights into the influence of edge width on compressive strength.

Keywords: Fused deposition modelling, Compressive strength, Face centered cubic lattice, Edge width

1. GİRİŞ

Ekleme imalat (Eİ) yöntemi evrensel olarak savunmadan havacılık ve uzay sanayine, otomotivden biyomedikal sektörüne kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Ön plana çıkan ve geniş bir kesimin ilgi odağı haline gelen 3 boyutlu baskı teknolojisi ise mevcut ve gelecekteki imalat sürecini şekillendirecek önemli bir teknolojik gelişmedir [1-3]. Eİ çeşitli teknikler kullanır ve bunlar arasında Eriyik Yığıma Modellemesi (EYM) en yaygın kullanılan ve popüler işlemlerden biridir. EYM işlemi ile termoplastik filament malzeme eritilir ve istenen geometriyi elde etmek için hareketli bir nozul ile katman katman birleştirilir. Ayrıca bu yöntemde Polilaktik asit (PLA), Polipropilen (PP), Akrlonitril bütadien stiren (ABS), Polikarbonat (PC) gibi farklı polimerik malzemeler ve kompozitler kullanılabilir ve böylece farklı mukavemet ve termal gereksinimlere göre yapılar üretilmektedir[4-7].

Kafes yapılar, yüksek özgül mukavemet ve sertlikleri, yüksek darbe direnci ve iyi enerji emme kapasiteleri nedeniyle otomobil, havacılık, denizcilik ve ulusal savunma gibi çok çeşitli mühendislik alanlarında önemli uygulama potansiyeline sahiptir [8,9]. Araştırmacılar, yapısal geometrileri ve mekanik özellikleri arasındaki temel ilişkileri ortaya çıkarmaya odaklanmışlardır. Bal peteği, Kagome, sekizli kafes, yüz merkezli kübik (YMK), hacim merkezli kübik (HMK) ve benzeri birim hücrelerin periyodik olarak bir araya getirilmesiyle birçok kafes yapı inşa edilmiştir [10,11]. Son zamanlarda, Eİ teknolojisinin hızlı gelişimi, karmaşık 3B kafes yapıların imalatını önemli ölçüde kolaylaştırmış ve böylece kafes

yapıların benzeri görülmemiş özelliklerini keşfetmek için avantajlı bir yaklaşım sağlamıştır. Geçtiğimiz on yıl boyunca, mekanik özelliklerini keşfetmek için çeşitli kafes yapıların modellenmesi, üretilmesi ve test edilmesine yönelik bir çok çaba sarf edilmiştir [12-14].

Eİ teknolojisinin hızlı gelişimi, kafes yapılar üzerine yapılan araştırmalara son derece kolaylık ve hatırı sayılır bir özgürlük kazandırmıştır [15]. Yüksek enerji emme performansı elde etmek için birçok yeni ve karmaşık kafes yapı tasarlanmış ve üretilmiştir[16]. Cho ve arkadaşları [17] dört farklı kafes yapısı için gerilme dağılımı ve deformasyon dağılımı doğrulanmıştır. Çalışmalarında YMK yapısında yükün kafes boyunca dağıtıldığı görülmüştür. Dönmez [18] Pla'dan üretilen basit, YMK ve elmas kübik yapıların basma yükü altındaki karakterizasyonunu incelemiştir. İçi boş kafes parametrelili elmas kübik kafes, tek eksenli sıkıştırma yükleme koşulu altında en iyi performansı gösteren kafes olmuştur. Aziz ve arkadaşları [19] ticari olarak temin edilebilen bir PLA polimerin eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarının mekanik özellikleri üzerindeki boyut durumları araştırılmaktadır. Hacim merkezli kübik numunelerde kenar uzunluğu dört kat artırıldığında basınç dayanımının yaklaşık %18 arttığı gösterilmiştir. Bouteldja ve arkadaşları [20] YMK, HMK ve YMK+HMK kafes yapıları Tough-PLA ve ABS malzemelerinden üretilmiş kafes yapıların basma dayanımlarını ölçmüştür. Basma dayanımları sıralaması büyükten küçüğe YMK-HMK, YMK, HMK şeklinde olmuştur. Ayrıca Tough-PLA malzemesi ABS'ye göre daha yüksek dayanım göstermiştir. Garcia ve Chua [21] çalışmalarında eşit miktar malzeme kullanarak

HMK, YMK ve Oktet kafes yapısına sahip 3 dikme tabanlı numuneye basma testi uygulamışlardır. Sonuçlar HMK, YMK ve Oktet kafes yapılarının sırasıyla 11,25 MPa, 8,47 MPa ve 7,44 MPa basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, Şekil 1'de gösterildiği gibi, geleneksel YMK kafes yapılarına dayanarak geliştirilmiş yeni bir yapı önerilmiştir. Bu yeni yapıdan dört farklı kenar genişliğine sahip numune EYM yöntemi ile üretilerek kenar genişliğinin basma dayanımı üzerene etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD

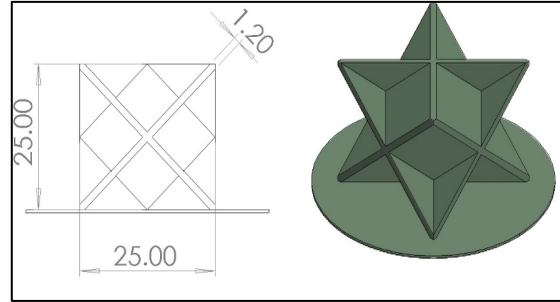
EYM malzeme çeşitleri arasında mühendislik polimerleri (örn. naylon ve PETG), termoplastikler (örn. PLA ve ABS) ve kompozit malzemeler (örn. karbon fiber kompozit ve cam fiber kompozit) yer almaktadır; bunların arasında PLA, biyolojik olarak parçalanabilirliği, toksik olmaması, düşük camı geçiş sıcaklığı, düşük fiyatı ve orta düzeyde esnekliği nedeniyle en yaygın kullanılan filamenttir. Bu çalışmada, numune üretimi için kullanılan malzeme 1,75 mm çapında PLA filamentidir. Simplfy3D dilimleme yazılımı ve Creality Ender3 Pro çalışmada deneysel baskıları üretmek için kullanılmıştır (Çizelge 1). Kullanılan PLA malzeme 56 MPa çekme mukavemeti, 2850 MPA elastik modül, %7 kopma uzaması ve 14.2 kJ/m² çentik darbe dayanımına sahiptir.

Çizelge 1. Üretimde kullanılan yazıcı, dilimleme programı ve sabit parametreler.

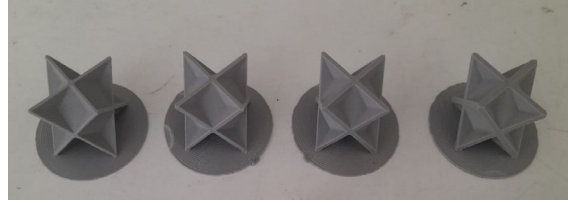
Yazıcı	Creality Ender3 Pro
Dilimleme programı	Simplfy3D
Katman yüksekliği (mm)	0,2
Tabla sıcaklığı (°C)	50
Nozul sıcaklığı (°C)	200

Kafes yapı tasarımı için, araştırma çalışmalarında en yaygın kullanılan türlerden biri olan kübik yapı dikkate alınarak incelenmiştir. Kafes yapı tasarımı için YMK birim hücre tasarlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan birim hücre ve kafes yapılarının bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri Şekil 1'de sunulmuştur. Yazarlar,

kullanılan birim hücre tipinden bağımsız olarak kenar genişliğinin mekanik özellikler üzerindeki etkisinin ne olduğunu tespit etmek için 4 farklı kenar genişliğinde numuneler üretilmişlerdir (Şekil 2). 6 hat içeren 2,4 mm kenar genişliğine sahip numunenin yakından görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 1. 1,2 mm kenar genişliğine sahip bir numunenin çizimi



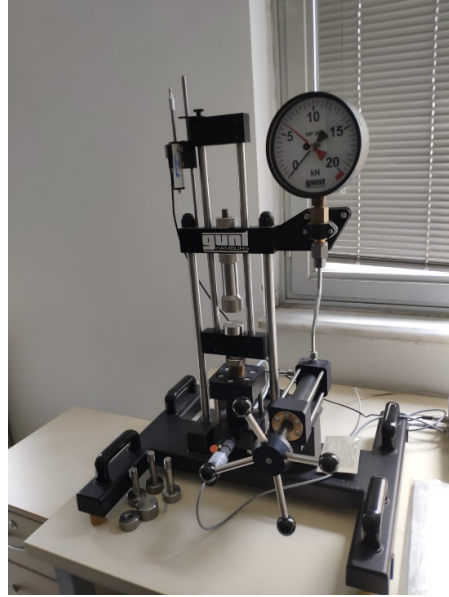
Şekil 2. EYM yöntemi ile üretilen farklı kenar genişliklerinde YMK kafes yapısına sahip numuneler



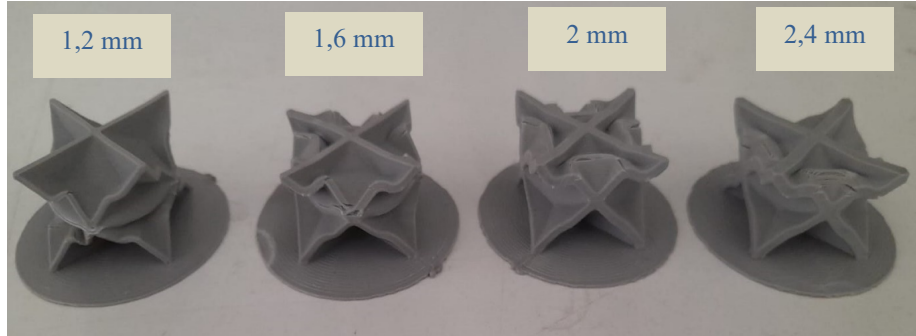
Şekil 3. 6 hat içeren numunenin kenarının (2,4 mm) yakından görünümü. 1 hat 0,4 mm genişliğindedir

Basma testleri, 20 kN yük kapasitesine sahip GUNT WP 300 üniversal malzeme test cihazı kullanılarak 5 mm/dk basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz ve basma testi sonrası numunelerin görüntüleri sırasıyla Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Deneyler

sırasında çene hızı 5 mm/dk seçilmiş ve deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kuvvet değerleri basınç transdüserinden alınmıştır. Her bir kenar genişliği değeri için 4 numune test edilmiştir.



Şekil 4. Deneylerde kullanılan GUNT WP 300 marka üniversal test cihazı

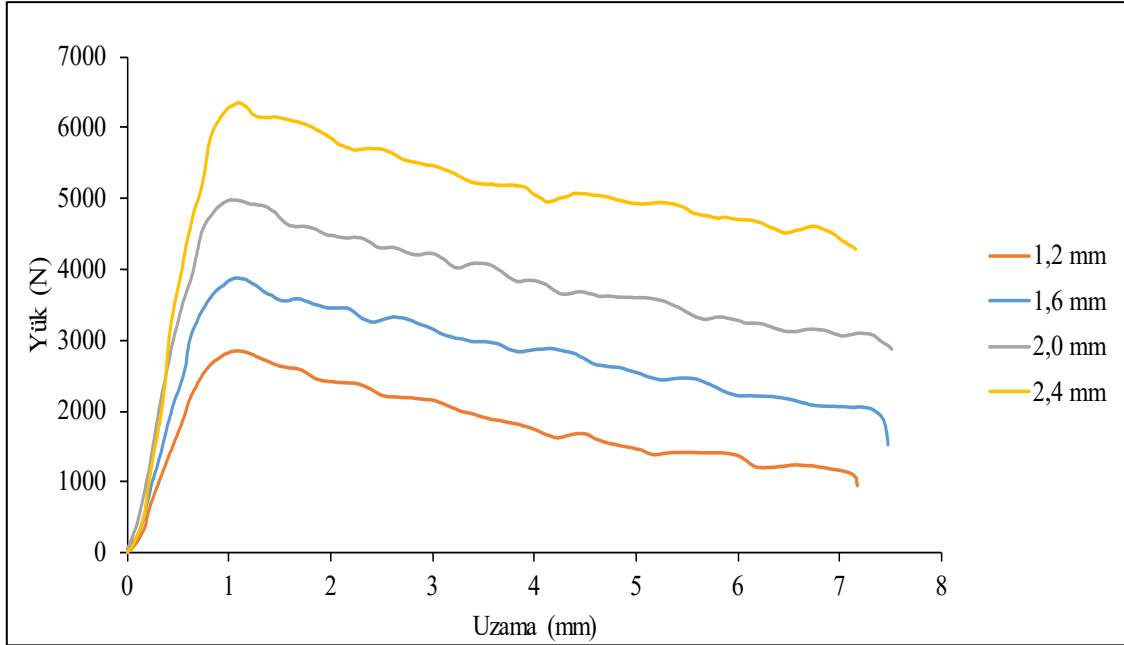


Şekil 5. Basma deneyi sonrası farklı kenar genişliklerindeki numunelerin görünümü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Dört farklı kenar genişliğine sahip PLA 3 boyutlu baskılı numuneler için basma testi grafikleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Verilere dayanarak, PLA 3 boyutlu baskılı numunelerin basma dayanıklılığı üzerinde kenar genişliğinin belirgin bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Kenar genişliğindeki artış

ile birlikte basma yükünde artışlar olmuştur. Dört numune içerisinde en düşük basma yükü 1,2 mm kenar genişliğine sahip numunede 2849 N iken, en yüksek basma yükü 2,4 mm kenar genişliğine sahip numunede 6351 N'dur. Kenar genişliğinin 1,2 mm'den 2,4 mm'ye artışı ile basma yükünde %123'lük bir artış gerçekleşmiştir.



Şekil 6. Farklı kenar genişliklerinde yük-uzama değişim eğrileri

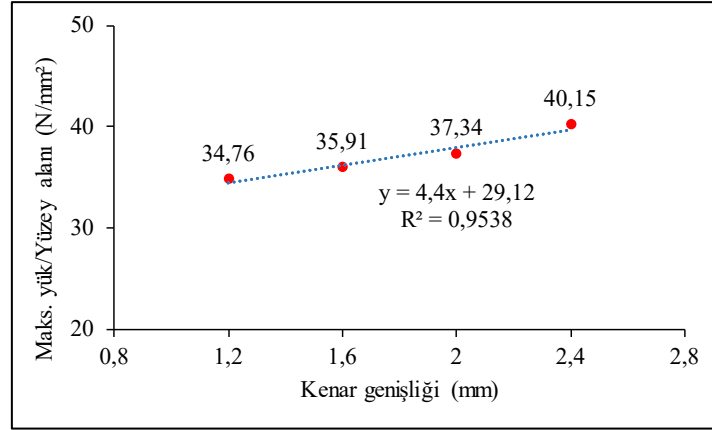
Basma numunelerinin yüzey alanları ile ilişkili olan gerilme değerlerinin karşılaştırılabilmesi için CAD modeli üzerinden yüzey alanı hesabı yapılmıştır. Ayrıca özgül dayanımları değerlendirebilmek için de 0,01 g hassasiyetli Super Scale SS-H modeli hassas terazi ile kütle ölçümleri yapılmıştır. Kenar genişliği ile değişen yüzey alanı (mm^2) ve ölçülen kütle (g) değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir. Daha geniş bir kenar genişliği, daha büyük bir yüzey alanı ve daha yüksek bir kütleyle yol açmıştır.

Çizelge 2. Kenar genişliği değişimi ile yüzey alanı ve kütle değişimi.

Kenar Genişliği (mm)	Yüzey alanı (mm^2)	Kütle (g)
1,2	81,97	4,30
1,6	108,02	5,25
2,0	133,42	6,20
2,4	158,19	7,70

Şekil 6’da gösterilen maksimum basma kuvvetlerinin Çizelge 2’de verilen yüzey alanlarına bölünmesi sonucu basma dayanımları N/mm^2

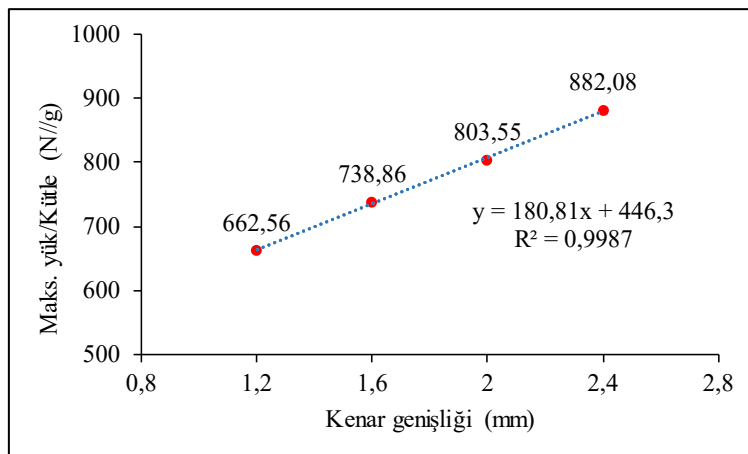
(MPa) cinsinden Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7’de sunulan basma dayanımı sonuçları, numunelerin mekanik performansının daha ayrıntılı bir açıdan değerlendirilmesini sağlar. Kenar genişliği artışı ile birlikte basma gerilmesinde lineere yakın ($R^2=0,9538$) bir artış olmuştur. Bu, kenar genişliği ile basma dayanımı arasında güçlü ve pozitif bir ilişki olduğunu gösterir. En düşük basma gerilmesi 34,76 MPa ile 1,2 mm kenar genişliğine sahip numunede olurken, en yüksek basma gerilmesi 40,15 MPa ile 2,4 mm kenar genişliğine sahip numunededir. Kenar genişliğinin 1,2 mm’den 2,4 mm’ye artışı ile basma gerilmesindeki artış % 15,5 olmuştur. Kenar genişliği artışıyla birlikte basma dayanımında meydana gelen artış, numunelerin daha geniş kesitlere sahip olmalarının etkisi olarak görülmektedir. Bu, tasarım aşamasında kenar genişliği seçiminin ürünün istenilen mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Uzama değerlerine bakıldığında ise genel itibariyle 1 mm basma sonucu yükün maksimum seviyeyi çıktığı görülmektedir.



Şekil 7. Kenar genişliği ile maksimum yük/yüzey alanı değişimi

Kütle artışı ile maksimum yükteki artış kullanılan malzeme miktarı ile elde edilen yük arasında kıyaslama yapmamızı sağlamaktadır. Kenar genişliği ile değişen kütle değişimleri Çizelge 2’de verilmiştir. Dört farklı kenar genişliği için elde edilen maksimum yüklerin kütlelere bölünmesi ile Şekil 8 oluşturulmuştur. Kuvvet ve gerilme grafiklerinde olduğu gibi maksimum yüklerin kütlelere bölünmesi ile elde edilen değerler kenar genişliği artışı ile artmıştır. Bu artış lineer olmuştur ($R^2=0,9987$). Minimum yük/kütle değeri 1,2 mm kenar genişliğine sahip numunede 662,56 N/g olurken, maksimum yük/kütle değeri 2,4 mm kenar genişliğine sahip numunede 882,08 N/g’dir. Kenar genişliğinin 1,2 mm’den 2,4 mm’ye artması ile maksimum yük/kütle değeri % 33,1 kadar artmıştır.

Bu sonuçlar, 3 boyutlu baskı üretiminde kenar genişliğinin önemli bir tasarım faktörü olduğunu vurgulamaktadır. Daha büyük kenar genişlikleri, ürünün mekanik dayanıklılığını artırabilir ve uygulama gereksinimlerine göre daha yüksek yükler altında çalışabilme yeteneği sunabilir. Bu nedenle, tasarım aşamasında kenar genişliği seçiminin dikkatlice yapılması önemlidir. Aynı zamanda, numune boyutları ve geometrisi gibi diğer faktörlerin de sonuçları etkileyebileceğini unutmamak önemlidir. Farklı numune tasarımları veya malzeme seçimleri, kenar genişliğinin basma dayanıklılığına olan etkisini daha ayrıntılı bir şekilde anlamamıza yardımcı olabilir.



Şekil 8. Kenar genişliği ile maksimum yük/kütle değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada EYM prosesi için YMK yapılı numunelerde kenar genişliğinin basma dayanımı üzerine olan etkileri incelenmiştir. Bu araştırmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Verilerin analizi, PLA malzemesi kullanılarak 3 boyutlu yazıcıyla oluşturulmuş dört farklı kenar genişliğine sahip örneklerin basma dayanıklılığı üzerinde kenar genişliğinin belirgin bir biçimde etkili olduğunu ortaya koymuştur.
- Numune kenar genişlikleri arttıkça, maksimum yük de neredeyse lineer bir şekilde artmıştır. En düşük yük, 1,2 mm kenar genişliğinde 2849 N iken, en yüksek yük 2,4 mm kenar genişliğinde 6351 N olarak ölçüldü. Kenar genişliği 1,2 mm'den 2,4 mm'ye çıktığında basma yükü %123 arttı.
- 1,2 mm kenar genişliğine sahip numunede en düşük basma gerilimi 34,76 MPa olarak kaydedildi, 2,4 mm kenar genişliğine sahip numunede ise en yüksek basma gerilimi 40,15 MPa olarak ölçüldü. Kenar genişliği artışıyla basma geriliminde %15,5 oranında bir artış gözlemlendi.

Kenar genişliğinin 1,2 mm'den 2,4 mm'ye artması ile maksimum yük/kütle değeri %33,1 kadar artmıştır. Numunelerin yük taşıma kapasitesinin numune kütlesi ile lineer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Mohanavel, V., Ashraff Ali, K.S., Ranganathan, K., Allen Jeffrey, J., Ravikumar, M.M., Rajkumar, S., 2021. The Roles and Applications of Additive Manufacturing in the Aerospace and Automobile Sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405-409.
2. Bandyopadhyay, A., Heer, B., 2018. Additive Manufacturing of Multi-material Structures. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 129,1-16.
3. Yusuf, S. M., Cutler, S., Gao, N., 2019. Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals*, 9(12),1286.
4. Penumakala, P.K., Santo, J., Thomas, A., 2020. A Critical Review on the Fused Deposition Modeling of Thermoplastic Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, 201, 108336.
5. Demirci, E., Şenaysoy, S., Tuğcu, S.E., 2023. the Effect of Nozzle Diameter and Layer Thickness on Mechanical Behaviour of 3d Printed Pla Lattice Structures Under Quasi-Static Loading. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(1), 105-113.
6. Phan, D.D., Horner, J.S., Swain, Z.R., Beris, A. N., Mackay, M.E., 2020. Computational Fluid Dynamics Simulation of the Melting Process in the Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Technique. *Additive Manufacturing*, 33, 101161.
7. Ergene, B., Bolat, C., 2023. Simulation of Fused Deposition Modeling of Glass Fiber Reinforced ABS Impact Samples: The Effect of Fiber Ratio, Infill Rate, and Infill Pattern on Warp and Residual Stresses. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 10(1), 21-31.
8. Ergene, B., Yalçın, B., 2023. Investigation on Mechanical Performances of Various Cellular Structures Produced with Fused Deposition Modeling (FDM). *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 201-217.
9. Çakan, B.G., Ensarioğlu, C., Küçükakarsu, V. M., Tekin, I.E., Cemal Çakır, M., 2021. Experimental and Numerical Investigation of In-Plane and Out-of-Plane Impact Behaviour of Auxetic Honeycomb Boxes Produced by Material Extrusion. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36(3), 1657-1667.
10. Borikar, G.P., Patil, A.R., Kolekar, S.B., 2023. Additively Manufactured Lattice Structures and Materials : Present Progress and Future Scope. *Korean Society for Precision Engineering*.
11. Sun, Z.P., Guo, Y.B., Shim, V.P.W., 2021. Characterisation and Modeling of Additively-Manufactured Polymeric Hybrid Lattice Structures for Energy Absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*, 191.
12. Wang, P., Yang, F., Li, P., Zheng, B., Fan, H. 2021. Design and Additive Manufacturing of a

- Modified Face-Centered Cubic Lattice with Enhanced Energy Absorption Capability. *Extreme Mechanics Letters*, 47, 101358.
13. Tutar, M., 2023. A Comparative Evaluation of the Effects of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties of Additively Manufactured PA and CF-Reinforced PA Materials. *Polymers*, 15, 38.
14. Chen, L.Y., Liang, S.X., Liu, Y., Zhang, L.C., 2021. Additive Manufacturing of Metallic Lattice Structures: Unconstrained Design, Accurate Fabrication, Fascinated Performances, and Challenges. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 146, 100648.
15. Verma, S., Yang, C.K., Lin, C.H., Jeng, J.Y., 2022. Additive Manufacturing of Lattice Structures for High Strength Mechanical Interlocking of Metal and Resin During Injection Molding. *Additive Manufacturing*, 49, 102463.
16. Zhang, J., Huang, H., Liu, G., Zong, H., Zhang, C., 2021. Stiffness and Energy Absorption of Additive Manufactured Hybrid Lattice Structures. *Virtual and Physical Prototyping*, 16(4), 428-443.
17. Cho, S.G., Lee, J.S., 2021. FEM Analysis of 3D Lattice Structures of ABS Material, *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(6), 648-652.
18. Dönmez, A., 2022. Production and Characterization of Simple, Face Centered and Diamond Cubic Lattices by Fused Deposition Modeling Using Polylactic Acid. Yüksek Lisans Tezi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Bilimleri Ana Bilim Dalı, 94.
19. Aziz, A.R., Zhou, J., Thorne, D., Cantwell, W. J., 2021. Geometrical Scaling Effects in the Mechanical Properties of 3d-Printed Body-Centered Cubic (BCC) Lattice Structures. *Polymers*, 13(22), 3967.
20. Bouteldja, A., Louar, M.A., Hemmouche, L., Gilson, L., Miranda-Vicario, A., Rabet, L., 2023. Experimental Investigation of the Quasi-Static and Dynamic Compressive Behavior of Polymer-Based 3D-Printed Lattice Structures. *International Journal of Impact Engineering*, 180, 104640.
21. Garcia, R.F., Chua, A., 2022. High Compressive Strength 3D Printed Infill Based on Strut-Based Lattice Structure. *ASEAN Engineering Journal*, 12(4), 89-94.