

HÜCRESEL YAPILI TASARIMLARDA HACİMSEL BOŞLUK DEĞERİNİN BELİRLENMESİNE YÖNELİK MATEMATİKSEL YAKLAŞIM

Ahmet Murat DURSUN¹, Rahmi ÜNAL², Oğuzhan YILMAZ², Elmas SALAMCI²

¹ Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Medikal Tasarım ve Üretim Merkezi, ANKARA

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ANKARA

ÖZET

Hücresel yapıların tasarımında kullanılacak olan birim hücre yapılarının geometrik özellikleri oluşturulmak istenen tasarımı doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, 3 farklı birim hücre yapısı (kübik, octahedroid, diamond) için parçada oluşacak hacimsel boşluk değeri ile birim hücre geometrisinin parametreleri olan kolon kalınlığı ve birim hücre boyutu arasındaki matematiksel ilişki incelenmiştir. Hacimsel boşluk değerinin tahmini ve buna bağlı olarak parçanın mekanik özellikleri ile arasında ortaya konulacak ilişkinin basitleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla hedeflenen hacimsel boşluk değerinin elde edilebilmesi için birim hücre boyutu ve kolon kalınlığı parametrelerine bağlı olarak hacimsel boşluk değerini hesaplayan matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model yardımıyla elde edilen hacimsel boşluk değerleri ile hücresel yapı tasarımların oluşturulduğu bilgisayar destekli tasarım yazılımından elde edilen hacimsel boşluk değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde ortaya konan matematiksel modelin kabul edilebilir yakınlıkta sonuçlar ürettiği ve tasarımlarda kullanılabilceği ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Hücresel yapılar, birim hücre yapıları, hacimsel boşluk, kolon kalınlığı, birim hücre boyutu

ABSTRACT

The geometric properties of the unit cell structures to be used in the design of cellular structures directly affect the desired design. In this study, the mathematical relationship between the volumetric gap value of 3 different unit cell structures (cubic, octahedroid, diamond) and the column thickness and unit cell size which are parameters of unit cell geometry has been investigated. It is aimed to simplify the relationship between the estimation of the volumetric gap value and the mechanical properties of the part. For this purpose, a mathematical model has been developed to calculate the volumetric gap value depending on the unit cell size and column thickness variables. The volumetric gap values obtained with the help of the mathematical model developed and the volumetric gap values obtained from the computer aided design software in which the cellular structures are created are compared. On conclusion the comparison show that the results of the mathematical model are acceptable and could be used in designs. **Keywords:** Cellular structures, unit cell structures, volumetric gap, column thickness, unit cell size

1.GİRİŞ

Hücresel yapı tasarımlar birçok mühendislik uygulamalarında maliyet ve hafiflik gibi birçok açıdan avantaj sağlamaktadır. Bu tasarımların geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi problem oluşturmaktadır. Ancak, eklemeli imalat yöntemiyle çalışan üç boyutlu (3B) yazıcılarla bu yapıların üretimi mümkün hale gelmiştir. Ayrıca 3B yazıcılar, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmeyen veya üretilmesi oldukça zor olan tasarımlarda üretim, tasarım, maliyet, işçilik ve zaman açısından avantaj sağlayabilmektedir.

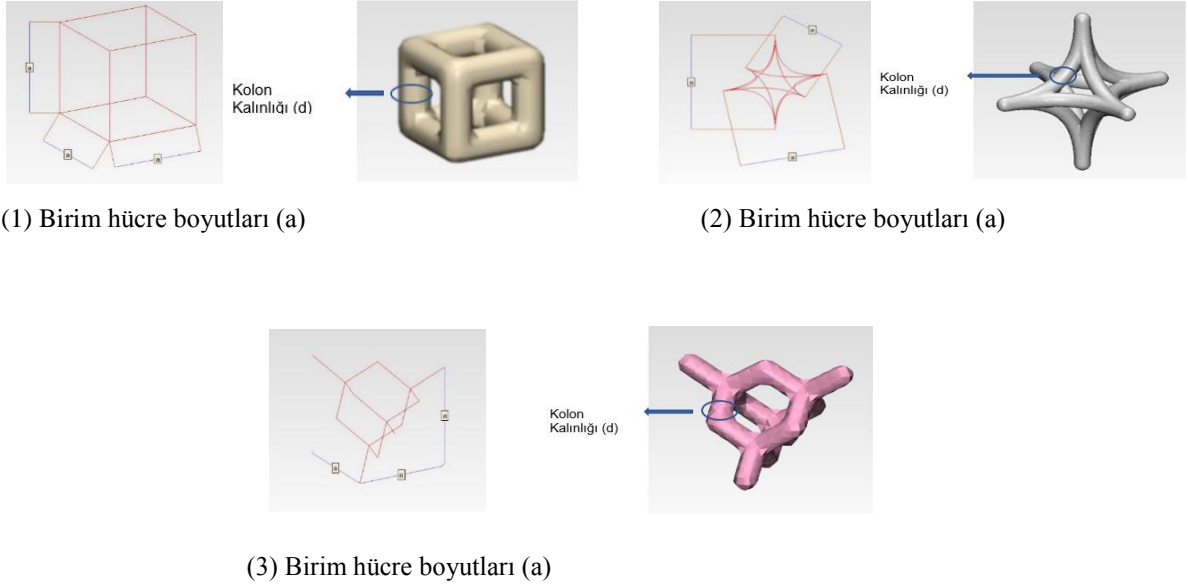
Hücresel yapıların tasarımında "topoloji optimizasyon" fonksiyonu veya çeşitli birim hücre yapıları kullanılmaktadır [Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.-4]. Kullanılan bu birim hücreler, bazı bilgisayar destekli tasarım programlarının yerleşik fonksiyonu olarak tanımlanmış olmasının yanı sıra tasarımcı tarafından tasarım kriterleri doğrultusunda istenilen bir geometride de oluşturulabilmektedir. Birim hücre yapılarının geometrik parametre değerlerinin, parçanın hacimsel boşluk değerine ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerine büyük etkisi bulunmaktadır [4-6]. Birim hücre yapılarının geometrik parametrelerine rastgele sayısal değerler atayarak parçada meydana gelecek hacimsel boşluk değişimini tahmin etmek oldukça zordur.

Son yıllarda çeşitli birim hücreler yardımıyla oluşturulan hücresel yapı tasarımlar kullanılarak başta tıp bilimi olmak üzere birçok alanda kullanılan parçalardaki mekanik özellik değişimleri incelenmiştir [5-10]. Özellikle cerrahi alanlarında kullanılan ve tasarımında hacimsel boşluk yaklaşımı kullanılmamış parçalarda (implant) görülen ve istenmeyen bir durum olan stres kalkanının olumsuz etkisini azaltmak amacıyla hücresel yapı tasarımlar kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir [3,4,8,11]. Yapılan incelemelerde, kullanılan her bir birim hücre yapısı için optimum kolon kalınlığı, birim hücre boyutu ve gözenek büyüklüğü değerlerinin saptanması hedeflenmiş ve farklı sonuçlara ulaşılmıştır [4,12,13].

Bu çalışmaların temelini oluşturan ve birçok akademik çalışmada kendisine yer bulan birim hücre yapılarının geometrileri dikkate alınarak araştırmacıların konu ile ilgili yapılacak çalışmalarda kolaylık sağlaması amaçlanmıştır.

2.YÖNTEM

Kullanılacak birim hücre yapılarının seçiminde, bilimsel araştırmalarda sıkça tercih edilen ve tasarım sonrası üretim aşamasında kullanılacak olan üç boyutlu yazıcının üretim kabiliyetleri de dikkate alınarak “kübik”, “octahedroid” ve “diamond” birim hücre yapıları kullanılmıştır (Şekil 1). Matematiksel hesaplamalarda kullanılan birim hücrelere ait kolon kalınlığı (d) ve birim hücre boyutları (a) Şekil 1.’de gösterilmiştir. Her bir birim hücreyi çevreleyen bir dikdörtgenler prizması (burada küp) dikkate alınarak geometrik parametreler tanımlanmış ve bu parametreler matematiksel ifadelerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tasarım kriterleri ISO 13314 standardına uygun olarak seçilmiştir. Parçaların tasarımında özel bir bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılmıştır (3-Matic, Materialise, Belgium).



Şekil 1. Kübik birim hücre yapısına ait görsel (1) Octahedroid birim hücre yapısına ait görsel (2) Diamond Birim Hücre Yapısına Ait Görsel (3)

3. BULGULAR

Kübik, octahedroid ve diamond birim hücre yapıları kullanılarak oluşturulan hücresel yapılara ait örnekler Şekil 2.’de gösterilmiştir. Aşağıda bu birim hücrelerden yola çıkarak elde edilen matematiksel modeller her bir birim hücre yapısı için ayrı ayrı verilmiştir. Kontrollü bir hacimsel boşluk değeri elde edebilmek için oluşturulan bu matematiksel modeller;



Şekil 2. Kübik birim hücresi ile oluşturulmuş hücresel yapı (a) Octahedroid birim hücresi ile oluşturulmuş hücresel yapı (b) Diamond birim hücresi ile oluşturulmuş Hücresel yapı (c)

Kübik birim hücre yapısı için;

$$\% \text{ Hacimsel Boşluk} = \left[1 - \left(\frac{\left(\frac{3\pi d^2 a}{4} \right) - \left(\frac{\pi d^3}{2} \right)}{a^3} \right) \right] \cdot 100$$

Octahedroid birim hücre yapısı için;

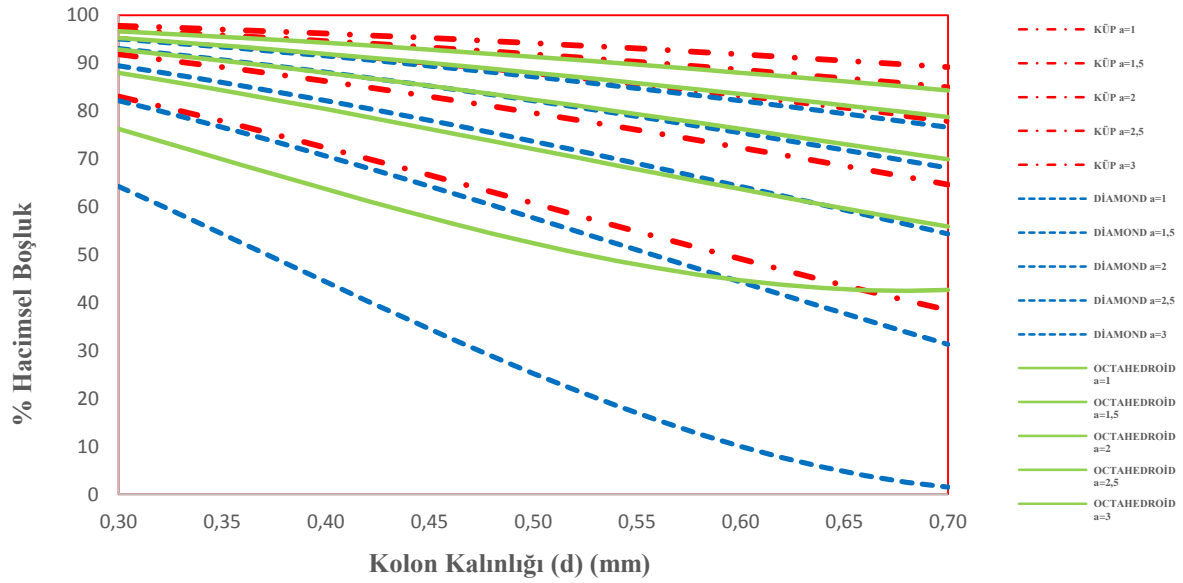
$$\% \text{ Hacimsel Boşluk} = \left[1 - \left(\frac{\frac{3}{4} \pi^2 \left(ad^2 - \frac{11d^2(a+d)}{5\pi\sqrt{2}} \right)}{a^3} \right) \right] \cdot 100$$

Diamond birim hücre yapısı için;

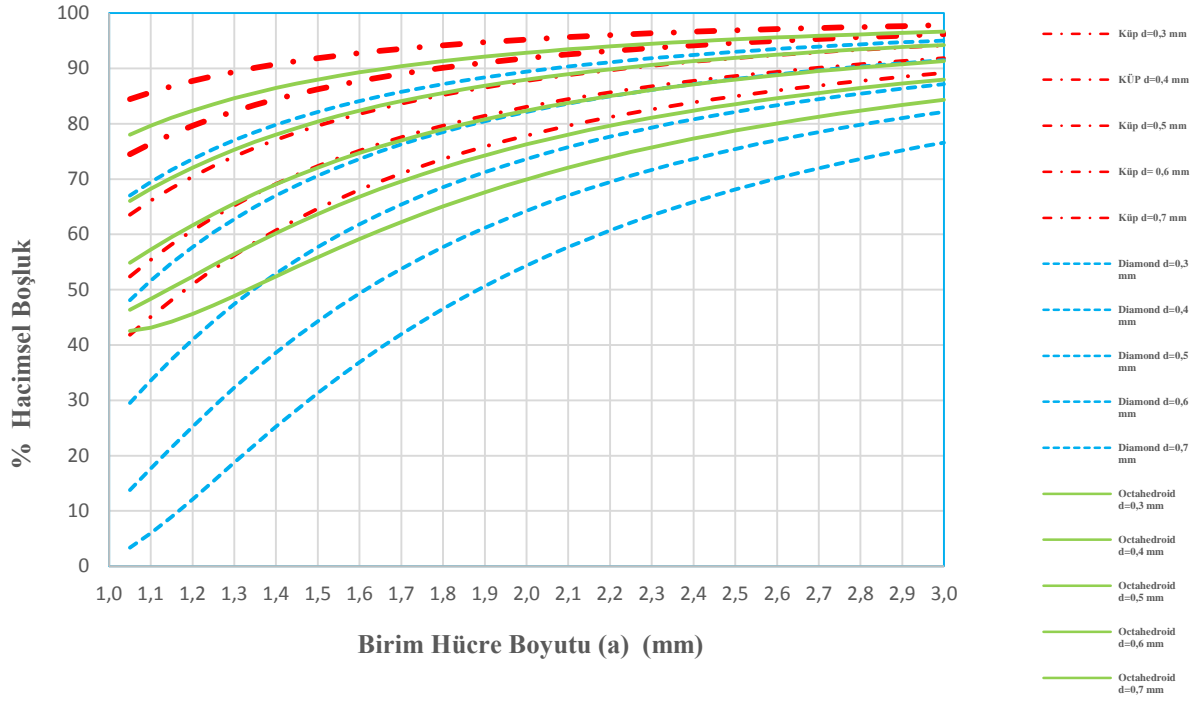
$$\% \text{ Hacimsel Boşluk} = \left[1 - \left(\frac{\pi d^2 \left(a\sqrt{3} - \frac{39}{25}d \right)}{a^3} \right) \right] \cdot 100$$

şeklinde elde edilmiştir.

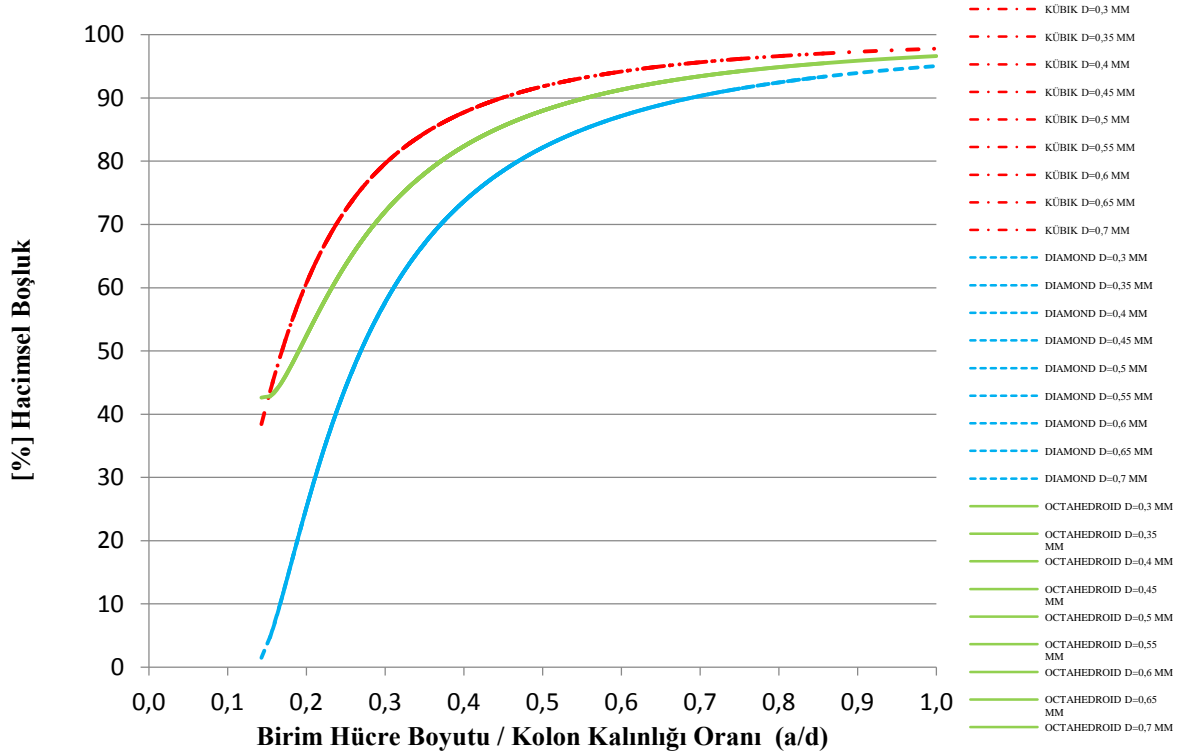
Bu matematiksel modellerden yola çıkarak her bir birim hücre yapısı için kolon kalınlığı- %hacimsel boşluk (Şekil 3.) birim hücre boyutu- % hacimsel boşluk (Şekil 4.) ve birim hücre boyutunun kolon kalınlığına oranı-% hacimsel boşluk (Şekil 5.) grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3. Küp-Diamond-Octahedroid birim hücre yapıları için kolon kalınlığı- % hacimsel boşluk grafiği



Şekil 4. Küp-Diamond-Octahedroid birim hücre yapıları için birim hücre boyutu- % hacimsel boşluk grafiği



Şekil 5. Küp-Diamond-Octahedroid birim hücre yapıları için normalize edilmiş birim hücre boyutu/kolon kalınlığı- % hacimsel boşluk grafiği

Bu grafiklerden elde edilen değerler bilgisayar destekli tasarım yazılımında elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve çıkan sonuçların kabul edilebilir yakınlıkta olduğu gözlemlenmiştir. Karşılaştırma sonucu matematiksel model ile elde edilen değerler ile bilgisayar destekli tasarım yazılımında elde edilen değerler sırasıyla kübik, octahedroid ve diamond birim hücre yapıları için Tablo 1., Tablo 2. ve Tablo 3. de verilmiştir.

Tablo 1. Kübik birim hücre yapısında çeşitli Kolon Kalınlığı (d) ve Birim Hücre Boyutu (a) değerleri için matematiksel model ve bilgisayar destekli tasarım yazılımında elde edilen % hacimsel boşluk değerlerinin karşılaştırma Tablosu

a \ d	0,3 mm		0,5 mm		0,7 mm	
	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)
1 mm	83,03	83,03	60,73	59,79	38,42	34,57
2 mm	95,22	95,49	87,72	88,29	77,87	78,69
3 mm	97,80	97,84	94,18	94,21	89,16	89,24

Tablo 2. Octahedroid birim hücre yapısında çeşitli Kolon Kalınlığı (d) ve Birim Hücre Boyutu (a) değerleri için matematiksel model ve bilgisayar destekli tasarım yazılımında elde edilen % hacimsel boşluk değerlerinin karşılaştırma Tablosu

a \ d	0,3 mm		0,5 mm		0,7 mm	
	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)
1 mm	76,26	76,89	52,40	54,49	42,61	31,19
2 mm	92,82	91	82,37	81,25	69,93	70,66
3 mm	96,62	95,64	91,31	90	84,31	83,85

Tablo 3. Diamond birim hücre yapısında çeşitli kolon kalınlığı (d) ve Birim Hücre Boyutu (a) değerleri için matematiksel model ve bilgisayar destekli tasarım yazılımında elde edilen % hacimsel boşluk değerlerinin karşılaştırma Tablosu

d \ a	0,3 mm		0,5 mm		0,7 mm	
	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Matematiksel model</u> (% Hacimsel boşluk)	<u>Tasarım Yazılımı</u> (% Hacimsel boşluk)
1 mm	64,26	64,38	25,23	25,43	1,47	1,49
2 mm	89,41	89,43	73,64	73,63	54,35	54,62
3 mm	95,04	95,10	87,15	87,28	76,60	76,81

Tasarım sonrası yapılan deneme üretimlerinde, özellikle daha küçük gözenek boyutlarına sahip hücresel boşluklu yapılarda tozların parça aralarına sıkışarak gözeneklerin kısmen ya da tamamen kapanmasına neden olduğu bunu bağlı olarak hacimsel boşluk değerini etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle gözenek boyutu 0,3 mm'nin altında olan hücresel boşluklu yapılarda bu riskin giderek arttığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla tasarımlar oluşturulurken parçanın minimum gözenek boyutunun belirlenmesinde dikkat edilmelidir.

Hücresel boşluklu yapılar üzerindeki çalışmalar son yıllarda giderek artış gösterdiğinden kübik, octahedroid ve diamond birim hücreleri dışında kalan birim hücre yapıları içinde benzer çalışmaların yapılması bu alanda çalışan araştırmacılar için fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmanın devamında, tasarlanan hücresel boşluklu parçalar Seçici Lazer Ergitme (SLM) teknolojisine sahip bir üç boyutlu metal bir yazıcıda üretilecektir. Üretilen parçalar ile matematiksel modelde kullanılan hücre yapılarının parametreleri (birim hücre boyutu, kolon kalınlığı) karşılaştırılarak matematiksel modelin uygunlu irdelenecektir. Aynı zamanda üretilen numuneler mekanik teste tabi tutularak birim hücre yapılarının parametreleri (birim hücre boyutu, kolon kalınlığı) ile yapıların elastiklik modülü gibi çeşitli mekanik özellikleri arasındaki ilişkisinin ortaya konulması amaçlanmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada 3 farklı birim hücre yapısı incelenmiş ve bu doğrultuda sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen matematiksel modeller sayesinde araştırmacının bu çalışmada kullanılan birim hücre yapıları arasından belirlediği bir birim hücre yapısı için herhangi bir tasarım programı kullanmaksızın ulaşmak istediği hacimsel boşluk değerini kolaylıkla elde edebileceği öngörülmektedir. Ayrıca kolon kalınlığı ve birim hücre boyutu gibi parametreler arasındaki bağlantı grafiklerini kullanarak sonuca daha sağlıklı ve hızlı bir şekilde ulaşabilmesi sağlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 116R021 proje numaralı MAG projesi kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından maddi olarak desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Sun, J., Yang, Y., & Wang, D. (2013). Mechanical properties of a Ti6Al4V porous structure produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 49, 545-552.
- [2] Murr, L. E., Gaytan, S. M., Medina, F., Lopez, H., Martinez, E., Machado, B. I., ... & Bracke, J. (2010). Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1917), 1999-2032.

- [3] Weißmann, V., Wieding, J., Hansmann, H., Laufer, N., Wolf, A., & Bader, R. (2016). Specific yielding of selective laser-melted Ti6Al4V open-porous scaffolds as a function of unit cell design and dimensions. *Metals*, 6(7), 166.
- [4] Parthasarathy, J., Starly, B., & Raman, S. (2011). A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2), 160-170.
- [5] Arabnejad, S., Johnston, R. B., Pura, J. A., Singh, B., Tanzer, M., & Pasini, D. (2016). High-strength porous biomaterials for bone replacement: A strategy to assess the interplay between cell morphology, mechanical properties, bone ingrowth and manufacturing constraints. *Acta biomaterialia*, 30, 345-356.
- [6] Li, S. J., Xu, Q. S., Wang, Z., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., & Murr, L. E. (2014). Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta biomaterialia*, 10(10), 4537-4547. [7] Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., & Christensen, A. (2010). Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 3(3), 249-259. [8] Challis, V. J., Roberts, A. P., Grotowski, J. F., Zhang, L. C., & Sercombe, T. B. (2010). Prototypes for bone implant scaffolds designed via topology optimization and manufactured by solid freeform fabrication. *Advanced Engineering Materials*, 12(11), 1106-1110.
- [9] Harrysson, O. L., Cansizoglu, O., Marcellin-Little, D. J., Cormier, D. R., & West II, H. A. (2008). Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering: C*, 28(3), 366-373.
- [10] Choren, J. A., Heinrich, S. M., & Silver-Thorn, M. B. (2013). Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications. *Journal of materials science*, 48(15), 5103-5112. 9
- [11] Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A. C., Anaraki, A. P., Ahmadi, S. M., Zadpoor, A. A., & Schmauder, S. (2015). Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 50, 180-191.
- [12] Nune, K. C., Kumar, A., Misra, R. D. K., Li, S. J., Hao, Y. L., & Yang, R. (2017). Functional response of osteoblasts in functionally gradient titanium alloy mesh arrays processed by 3D additive manufacturing. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 150, 78-88.
- [13] Yavari, S. A., Ahmadi, S. M., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., & Zadpoor, A. A. (2015). Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 43, 91-100.