



# Kafes yapılı femur plakların stres kalkanı üzerindeki etkisinin sonlu elemanlar ile incelenmesi

## Investigation of the effect of lattice-structured femoral plates on stress shielding using finite elements

Ömer Faruk Uzunyol<sup>1</sup>, Erkan Bahçe<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 44200, Malatya/Türkiye,

[omerfaruk.uzunyol@gmail.com](mailto:omerfaruk.uzunyol@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8313-8747>

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 44200, Malatya/Türkiye, [erkan.bahce@inonu.edu.tr](mailto:erkan.bahce@inonu.edu.tr)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5389-5571>

MAKALE BİLGİLERİ	ÖZ
<p><i>Makale Geçmişi:</i></p> <p>Geliş 25 Kasım 2024 Revizyon 6 Ocak 2025 Kabul 10 Ocak 2025 Online 26 Mart 2025</p> <p><i>Anahtar Kelimeler:</i></p> <p>Plak, Stres Kalkanı, Kafes Yapı, Sonlu Eleman Analizi.</p>	<p>İmplant tasarımında uzun vadeli performansın sağlanabilmesi için son yıllarda kafes yapılara olan rağbet artmaktadır. Kafes yapılar sahip olduğu yüksek gözeneklilik özelliği sayesinde implantın elastisite modülünü düşürerek kemik ile implant arasında oluşan stres kalkanının azalmasını sağlar. Gözenekli yapı kontrollü mekanik özellikleri sayesinde, yük dağılımını optimize eder ve kemiğin fizyolojik yüklenme kapasitesini korur. Bu durum hem hasta sonuçlarını iyileştirme hem de sağlık hizmetleri maliyetlerini düşürme açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada da femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklardaki stres kalkanını azaltmak için plağın yarı kalınlığı gözenekli olarak üretildi. Kemiğin kafes yapıya kaynaşmasını önlemek ve tedavi sonrası plağın rahatlıkla çıkarılması için alt katmanı katı olarak oluşturuldu, plağın üst katmanı ise Gövde Merkezli Kübik (BCC), Elmas ve Octet Truss (OT) kafes yapıları ile ayrı ayrı tasarlandı. Daha sonra elde edilen plakların geleneksel olarak kullanılan Katı Plak (KP) ile karşılaştırılması için sonlu eleman analizi uygulandı. Deformasyon ve gerilme değerlerinin incelendiği analizlerde KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC-Elmas, BCC-OT ve Elmas-OT kafes yapıları plak modellerinde sırasıyla 1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerlerinde ise KP modelinde 500,81 MPa gerilme değeri ölçülürken BCC-Elmas kafes yapıları plak modelinde 309.78 MPa ile % 61.66 oranında, BCC-OT kafes yapıları plak modelinde 298.88 MPa ile %72.76 oranında ve Elmas-OT kafes yapıları plak modelinde 253.64 MPa ile %97.44 oranında KP'a göre daha az gerilme saptanmıştır. Bu sonuçlar kafes yapıları plakların KP'a nispeten daha gelişmiş yük taşıma kapasitesine sahip olduğuna işaret etmektedir.</p>
ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received 25 November 2024 Received in revised form 6 January 2025 Accepted 10 January 2025 Available online 26 March 2025</p> <p><i>Keywords:</i></p> <p>Plate, Stress Shield, Lattice Structure, Finite Element Analysis</p> <p>Doi: <a href="https://doi.org/10.24012/dumf.1588755">10.24012/dumf.1588755</a></p> <p>* Sorumlu Yazar</p>	<p>In recent years, the demand for lattice structures has risen to assure the long-term efficacy of implant design. Due to their high porosity, lattice structures diminish the elastic modulus of the implant and alleviate the stress shielding between the bone and the implant. The controlled mechanical features of the porous structure enhance load distribution and maintain the physiological loading capacity of the bone. This possesses significant potential for enhancing patient outcomes and decreasing medical costs. This work involved the production of a half-thickness porous plate to decrease the stress shielding in plates utilized for femur fracture therapy. The lower layer was built as solid to inhibit bone fusion with the lattice structure and facilitate the removal of the plate post-treatment, whilst the top layer of the plate was developed independently using Body Centered Cubic (BCC), Diamond, and Octet Truss (OT) cage structures. Subsequently, finite element analysis was employed to compare the acquired plates with the customarily utilized Solid Plate (KP). In the analyses of deformation and stress values, the KP model exhibited a deformation of 1.9996 mm, while the BCC-Diamond, BCC-OT, and Diamond-OT lattice structured plate models demonstrated deformations of 1.3331 mm, 1.153 mm, and 1.0542 mm, respectively. In terms of maximum stress values, the KP model exhibited a stress value of 500.81 MPa. In contrast, the BCC-Diamond lattice structured plate model demonstrated a 61.66% reduction in stress at 309.78 MPa, the BCC-OT lattice structured plate model showed a 72.76% decrease with 298.88 MPa, and the Diamond-OT lattice structured plate model revealed a 97.44% reduction at 253.64 MPa compared to the KP model. The results demonstrate that lattice-structured plates possess a comparatively enhanced load-bearing performance relative to KP.</p>

## Giriş

Plaklar femur kırıklarının tedavisinde stabilitenin sağlaması ve iyileşmeyi desteklemesi itibarıyla oldukça tercih edilmektedir [1]. Komplikasyon sıklığını azaltarak tedavi sürecini kısaltan plaklar kemik bütünlüğünün yeniden oluşmasına imkân tanır [2]. Ancak kemik ile plak arasında elastik modül farkından dolayı meydana gelen stres kalkanı plakların etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir [3]. Bu sebepten ötürü stres kalkanını azaltmak için çeşitli plak tasarımları geliştirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda ise stres kalkanını azaltmanın yanı sıra plağın yoğunluğunu ve ağırlığını minimum düzeyde tutmak için kafes yapılar tercih edilmektedir.

Femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plakların sertliği arttıkça yükün önemli bir kısmının plak üzerinde yoğunlaştığı bilinmektedir. Stres kalkanı olarak adlandırılan bu durum mekanik uyumsuzluklara sebebiyet vererek plağın gevşemesine ve periprostetik kırıkların oluşumuna neden olur [4]. Stres kalkanı kortikal kemiğin mukavemetini azaltarak plağın aseptik hareketlerine neden olabilir [5]. Plak malzemesi ve kemik özelliklerine bağlı olarak değişen stres kalkanının azaltılması kemik-plak arasındaki mekanik uyuma önemli ölçüde bağlıdır [6,7]. Özellikle son yıllarda trend haline gelen Eklemeli İmalat teknolojilerinin kafes yapıların üretimini mümkün kılması ile plaklar kafes yapılı olarak üretilmeye başlanmıştır [8]. Kafes yapılar sahip olduğu yüksek gözeneklilik özelliği sayesinde yükün plak üzerinde daha homojen bir şekilde yayılmasına izin vererek stres kalkanının önemli ölçüde azalmasını sağlamaktadır [9]. Cortis vd. [10] kafes yapıları ile elde edilen implantların gözenekli yapılarından dolayı daha biyo-uyumlu özellikler sergileyerek stres kalkanını minimize edeceğini belirtmişlerdir. Ayrıca kafes yapılı plaklarda artan gözeneklilik miktarı ile yükün plak üzerinde daha homojen hale gelmektedir [11]. Bu konuda Alkhatip vd., [12] ise femur plağını %20, %50 ve %80 yoğunluklu kafes yapılar ile oluşturdukları çalışmada %80 yoğunluklu kafes yapılı plağın stres kalkanını daha minimize ettiğini ispatlamışlardır.

Femur plakların klinik öncesi etkinliğini test etmek için başvurulan yöntemlerden biri de sonlu eleman analizleridir [13]. Sonlu eleman analizleri ile elde edilen deneysel veriler sayesinde plağın kuvvet karşısında göstereceği fiziksel tepki hesaplanarak en kapsamlı veriler oluşturulmaktadır [14]. Özellikle kemik ile plak arasında meydana gelen stres

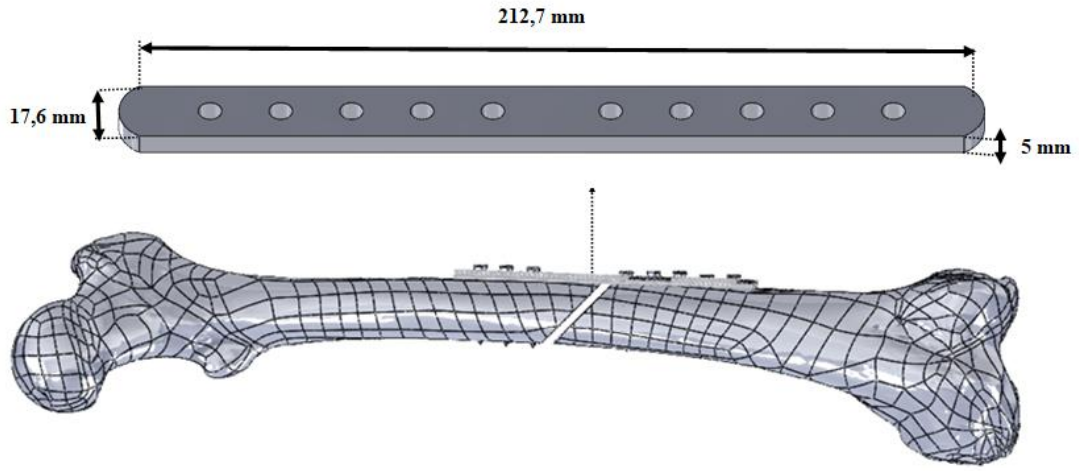
kalkanının incelenmesini mümkün kılan bu yöntem kırığa en uygun plağın tasarımını daha kolay hale getirmektedir [15]. Jia vd., [16] dolu plağa nispeten %40 daha hafif olarak ürettikleri kafes yapılı plakları sonlu eleman analizine tabii tutmuşlardır. Analiz sonucunda kafes yapının plak sertliğini önemli ölçüde azaltarak stres kalkanını daha minimum düzeye indirdiği anlaşılmıştır. Benzer bir çalışmada Alkentar vd., [17] yapmış oldukları sonlu eleman analizleri sonucunda kafes yapılı implantların young modülünü %92'ye kadar azaltabileceğini vurgulamışlardır. Bu azalma plak sertliğini kortikal kemik sertliğine yakınlaştırarak stres kalkanını azaltmada önemli bir etkiye sahiptir [18].

Bu çalışmada, femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklar, kafes yapılar ile tasarlanarak stres kalkanı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kemiğin kafes yapıya entegrasyonunu engelleyerek tedavi sonrası plağın kolayca çıkarılmasını sağlamak amacıyla, plakanın alt katmanı katı bir biçimde, üst katmanı ise iki farklı kafes yapısında tasarlanmıştır. Sonrasında, Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) kullanılarak kemik ile montajlanan plakların ayakta durma esnasındaki deformasyon ve gerilme değerleri sonlu elemanlar analizi ile incelendi.

## Materyal ve Metot

### BDT Modelleme

Femur kemiğinde meydana gelen kırığın tedavisi hakkında ön izlenim sağlamak ve hata oranları hakkında bilgi sahibi olabilmek için BDT (SolidWorks 2022) kullanılmıştır. Bu bağlamda femur kemiği elde edilirken standartlar dikkate alınarak kemiğin korteks kalınlığı 4 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca süngerimsi kemik, yumuşak dokusu nedeniyle stres kalkanına önemli bir etkisi olmayacağı düşünülerek ihmal edilmiştir. Daha sonra BDT ortamında yaklaşık 45° açıyla kırılan femur kemiğinin boyu 212.7 mm, eni 17.6 mm, yüksekliği 5 mm ve vida deliklerinin çapı 4.5 mm olan KP ve kafes yapılı plaklar ile montajı gerçekleştirilmiştir. Montaj esnasında kemik ve plağı rijit bir şekilde sabitlemek amacıyla 8 adet olan 4.5 mm'lik DCP vidaları tercih edilmiştir. Ayrıca kemik kaynamasını olumsuz yönde etkilememesi için plak üzerinde kırık bölgesine denk gelen iki deliğe vida atılmamıştır (Şekil 1). Femur kemiği ve plak ile vidaların ana malzemesi olan CoCrMo alaşımının mekanik özellikleri Tablo-1'de sunulmuştur.



Şekil 1. BDT ortamında elde edilen femur plağının montaj modeli ve ölçülendirilmesi

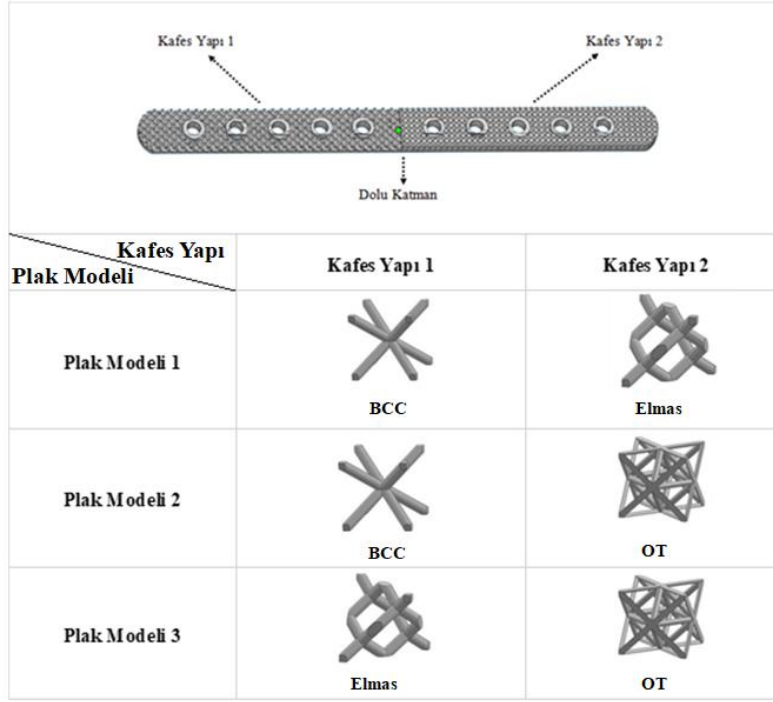
Tablo 1. Femur kemiği ve CoCrMo alaşımının mekanik özellikleri

Parametre	Femur Kemiği	CoCrMo Alaşımı	Referans
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2000	8300	[19], [20]
Elastikiyet Modülü (Gpa)	3-20	248	[20], [21]
Akma Dayanımı (Mpa)	137	827	[22], [23]
Çekme Dayanımı (Mpa)	130-180	1172	[21], [24]
Poisson Oranı	0.35	0.3	[19], [20]

### Plak Tasarımı

Bu çalışmada femur kırıklarının tedavisinde kullanılan plaklar stres kalkanını azaltmak için kafes yapıları ile oluşturulmuştur. Şekil 2'de plak tasarımları gösterilmiştir. Üst katmanı iki farklı kafes yapısı ile oluşturulan plağın kemik ile temas eden yüzeyi kas dokularına zarar vermesini önlemek ve tedavi sonrası plağın kemikten rahat bir şekilde

ayrılmasını sağlamak için katı olarak tasarlanmıştır. Plakların üst katmanı için ise çeşitli alanlarda stres azaltma üzerine literatürde vurgulanan BCC, Elmas ve OT kafes yapıları tercih edilmiştir [25]. Bu bağlamda, birinci plak BCC ve Elmas kafes yapıları, ikinci plak BCC ve OT kafes yapıları, üçüncü plak ise Elmas ve OT kafes yapıları ile oluşturulmuştur.

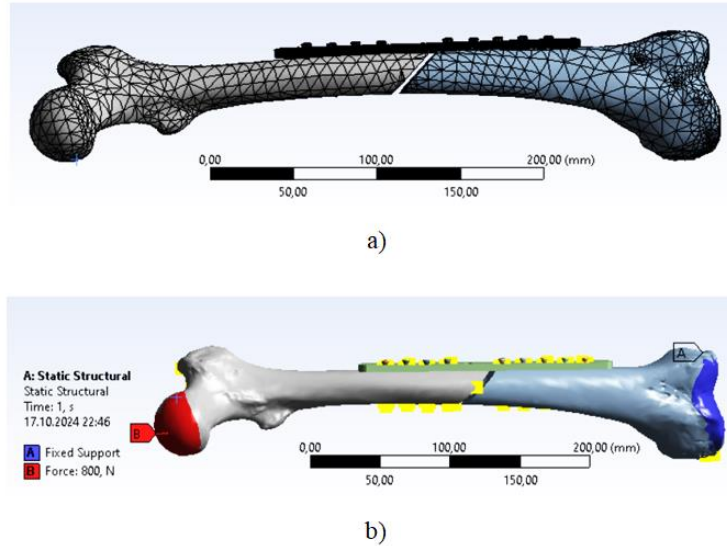


Şekil 2. Femur plağının kafes yapıları ile tasarımı

### Sonlu Eleman Model Ağı ve Sınır Koşulları

BDT ile oluşturulan modellerin yük karşısında gösterdiği deformasyon ve stres değerlerini hesaplamak için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler Ansys 2021 R2 paket programı kullanılarak yapılmıştır. Buna binaen çözüm hassasiyetini arttırmak amacıyla öncelikle ağ iyileştirmesine (meshleme) tabii tutulan modeller statik

analizlerin yapılabilmesi için distal ucundan sabitlenmiştir. Daha sonra ortalama 80 kg ağırlığa sahip bir insanın ayakta durma anını temsilen modellerin proksimal ucundan +X yönünde 800 N statik kuvvet uygulanmıştır. Şekil 3.a'da modellere uygulanan ağ iyileştirmesi görüntüsü verilirken Şekil 3.b'de modellerin sabitleme ve yükleme bölgeleri belirtilmiştir.



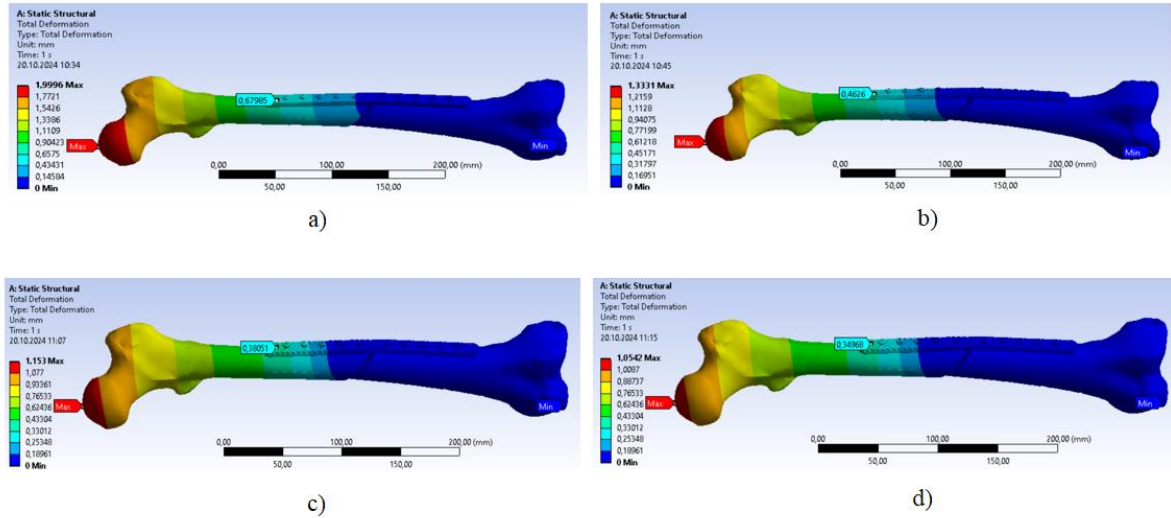
Şekil 3. Modeller üzerine uygulanan a) Mesh yapısı ve b) Yükleme ve sabitleme bölgeleri

## Sonuçlar ve Tartışma

### Toplam Deformasyon ve Maksimum Asal Gerilme Davranışı

Bu çalışmada KP ve kafes yapıları ile oluşturulan modellerin yük karşısında göstereceği şekil değişimleri hakkında ön izlenim sağlamak amacıyla toplam deformasyon analizleri yapıldı. Şekil 4'te modellerde ve plaklarda hesaplanan deformasyon miktarlarına ait görseller verildi. Bu kapsamda KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC- Elmas, BCC-OT ve Elmas -OT plakları ile elde edilen modellerde sırasıyla

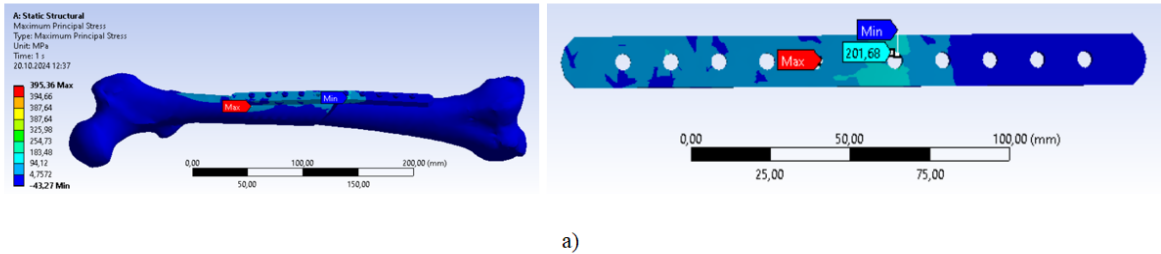
1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon değeri hesaplandı. Plaklar üzerindeki deformasyon değeri incelendiğinde ise en iyi sonuç 0.34968 mm değeri ile Elmas-OT plağında olduğu görülmektedir. Sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda kafes yapıları ile elde edilen plakların KP'ya nispeten daha az deforme olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kafes yapıların sahip olduğu gözenekler sayesinde yükün daha homojen bir şekilde dağıtılmasıdır [26].

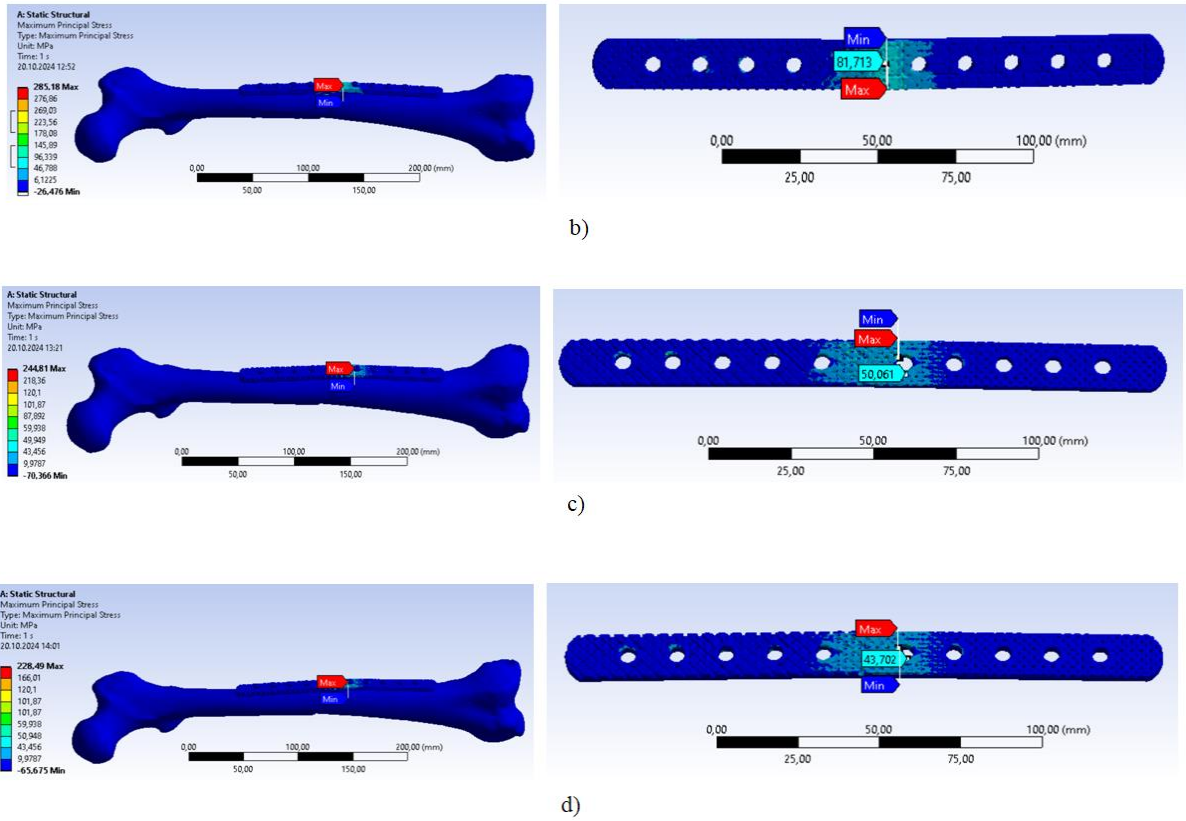


Şekil 4. Modellerin ve plakların toplam deformasyon miktarları a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-Elmas ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Modeller ve plaklar üzerinde 800 N yük altında deformasyonun başlangıcına karşılık gelen maksimum asal gerilme değerleri Şekil 5'te verildi. Şekil incelendiğinde KP modelinde 395.36 MPa olarak hesaplanan gerilme değerinin, kafes yapıları ile elde edilen plaklar kullanılmasıyla minimize edildiği görülmektedir. Buna göre 228.49 MPa gerilme değerine sahip Elmas -OT kafes yapıları modeli en iyi

sonucu verirken BCC-OT kafes yapıları modeli 244.81 MPa, BCC- Elmas kafes yapıları modeli ise 285.18 MPa gerilme sergiledi. Ayrıca plaklar üzerinde hesaplanan maksimum asal gerilme değerleri incelendiğinde ise Elmas-OT kafes yapıları plağın 43.702 MPa gerilme değeri ile diğer plaklara nispeten daha iyi sonuç verdiği belirlendi.





Şekil 5. Modeller ve plakların maksimum asal gerilme değerleri a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-Elmas ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Deformasyon ve maksimum asal gerilme sonuçları beraber değerlendirildiğinde kafes yapıları ile elde edilen plaklar KP'a göre daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Bu durum kafes yapıların sahip olduğu artan gözeneklilik özelliği sayesinde yükün plak yüzeyine daha homojen bir şekilde dağılmasından kaynaklanır [27]. Bu dağılımın kafes yapılar ile oluşturulan plaklarda gösterdiği değişimi açıklamak amacıyla Şekil 6'da BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarının kuvvet dağılım yönleri ve birim hücre geometrileri verildi. Birim kafes yapıların kuvvet dağılım yönleri göz önüne alındığında plağa aktarılan kuvveti paylaşmak için BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarında sırasıyla 4, 6 ve 8 adet dikme yapı bulunduğu dikkat çekmektedir. Birim hücrede dikme yapıların artmasıyla birlikte kuvvetin plak üzerindeki şiddeti azalarak deformasyon ve gerilme değerleri iyileşmektedir [28]. Bu bulgu dikkate alındığında Elmas-OT kafes yapı plakın daha fazla dikmeye sahip olduğu şekilde görülmektedir. Böylelikle analizler sonucunda elde edilen Elmas-OT kafes

yapılı plak modelinin daha az deforme olacağı ve daha düşük gerilme değerlerine sahip olacağı doğrulanmaktadır.

Kafes yapı plaklarda kuvvet dağılımının yanı sıra, deformasyon ve gerilme miktarını etkileyen en kritik hususlardan biri de kafes yapıların birim hücre geometrileridir. Şekil 6'da her bir plakta kullanılan kafes yapıların birim hücre geometrileri belirtildi. Birim hücre geometrileri analiz edildiğinde, daha fazla sayıda dikme içeren OT birim hücre geometrisinin daha büyük bir hacim yoğunluğuna sahip olduğu ve bu hücre geometrisini sırasıyla Elmas ve BCC hücre geometrilerinin izlediği dikkat çekmektedir. Bu kuramdan yola çıkıldığında Elmas-OT kafes yapıyla oluşturulan plağın daha büyük hacim yoğunluğu nedeniyle gelen yüklere karşı daha dirençli olacağı görülmektedir. Öyle ki edinilen bu sonuç birim hücre geometrisinde artan hacim yoğunluğunun deformasyon ve gerilme değerlerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir [29].

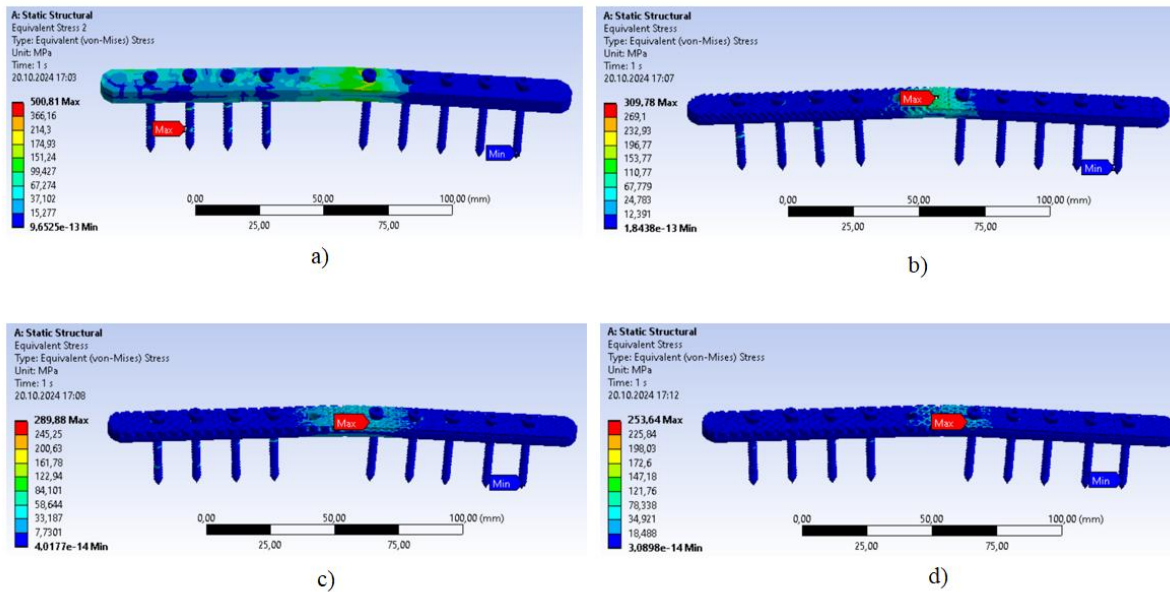
		Kafes Yapı 1		Kafes Yapı 2	
Plak	Kafes Yapı Özellikleri	Kuvvet Dağılım Yönleri	Birim Hücre Geometrisi	Kuvvet Dağılım Yönleri	Birim Hücre Geometrisi
		BCC-Elmas Plak			
BCC-OT Plak					
Elmas-OT Plak					

Şekil 6. BCC, Elmas ve OT birim kafes yapılarının kuvvet dağılım yönleri ve birim hücre geometrileri

### Maksimum von-Mises Gerilmesi Analizi

Deformasyon davranışlarının kalıcı hasara neden olup olmayacağını belirlemek için plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri incelendi. Şekil 7'de KP ve kafes yapı plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri verildi. Bu kapsamda kafes yapı plaklar 500.81 MPa gerilmeye sahip olan KP modeline nispeten daha düşük von-

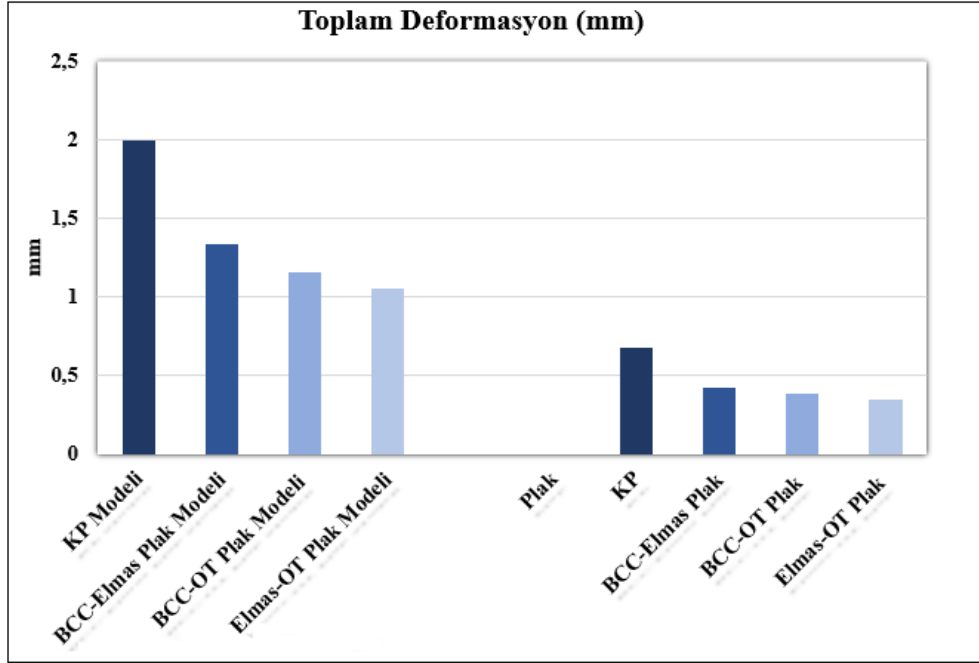
Mises gerilme değerine sahip oldu. Kafes yapı plaklar KP ile karşılaştırıldığında ise BCC-Elmas kafes yapı plak 309.78 MPa ile % 61.66 oranında, BCC-OT kafes yapı plak 298.88 MPa ile % 72.76 oranında ve Elmas-OT kafes yapı plak 253.64 MPa ile % 97.44 oranında daha az gerilme davranışı sergiledi. Bu bulgular daha gözenekli yapıya sahip kafes yapı plakların KP'a nispeten hasara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir [30]



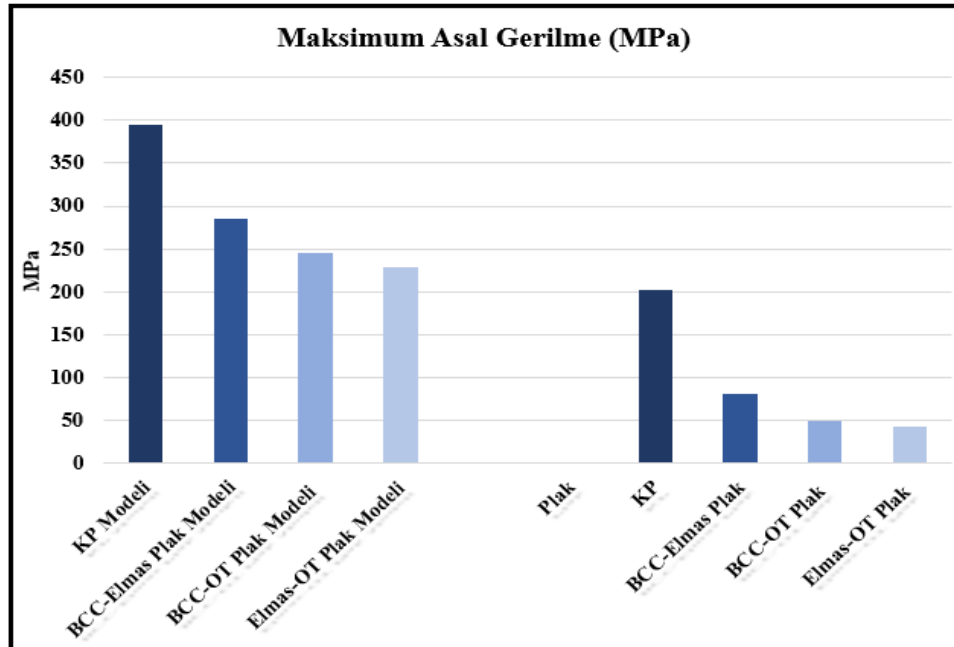
Şekil 7. Plakların maksimum von-Mises gerilme değerleri a) KP, b) BCC-Elmas, c) BCC-OT ve d) Elmas-OT kafes yapıları

Analiz sonuçları genel olarak değerlendirmek için Şekil 8'de deformasyon ve gerilme sonuçlarına ait grafikleri içeren görsel verildi. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere kafes yapı plakalar KP'ya göre daha az deforme olarak daha düşük gerilme değerlerine sahip oldu. Bu bulgu, plaklarda önemli

bir sorun olan stres kalkanının azalmasına büyük bir katkı sağlayacaktır. Ayrıca edinilen sonuçların klinik olarak da iyileşme sürecine önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

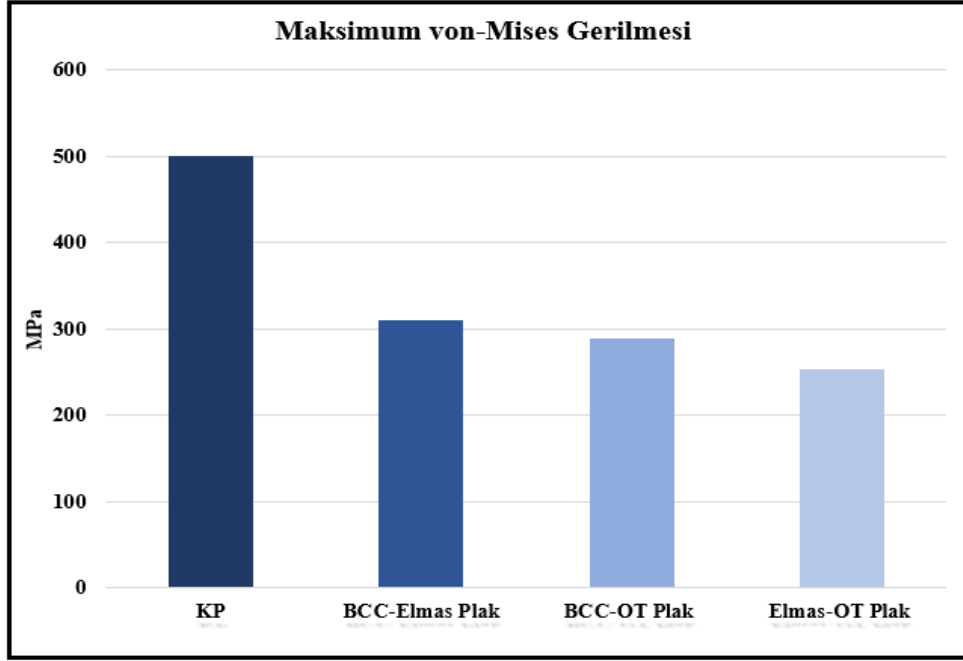


a)



b)





c)

Şekil 8. Deformasyon ve gerilme değerlerine ait grafikler a) Toplam Deformasyon, b) Maksimum Asal Gerilme ve c) Maksimum Von-Mises Gerilmesi

## Sonuçlar

- Bu çalışmada, femur kırıklarının tedavisinde kullanılan KP'lara alternatif olarak BCC, Elmas ve OT kafes yapıları ile üretilen plaklar tasarlanmıştır. Plakların yük altındaki deformasyon ve gerilme davranışlarını incelemek amacıyla Sonlu Eleman Analizleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.
- KP modelinin 1.9996 mm deformasyon değerine karşılık BCC-Elmas, BCC-OT ve Elmas-OT kafes yapıları plak modellerinde sırasıyla 1.3331 mm, 1.153 mm ve 1.0542 mm deformasyon hesaplanmıştır. Maksimum gerilme değerlerinde ise KP modelinde 500,81 MPa gerilme değeri ölçülürken BCC-Elmas kafes yapıları plak modelinde 309.78 MPa ile % 61.66 oranında, BCC-OT kafes yapıları plak modelinde 298.88 MPa ile %72.76 oranında ve Elmas-OT kafes yapıları plak modelinde 253.64 MPa ile %97.44 oranında KP'a göre daha az gerilme saptanmıştır.
- Kafes yapıları plaklar KP'a nispeten daha düşük deformasyon ve gerilme değerlerine sahip olması gelişmiş yük taşıma kabiliyetine işaret etmiştir.
- Kafes yapıları plakalarda gözeneklilik miktarının artmasıyla birlikte deformasyon ve gerilme değerleri olumlu yönde etkilenmiştir.
- Birim kafes geometrisinde dikme sayısı arttıkça yükün plak üzerindeki dağılımı daha düzenli bir hal almıştır. Bu durum gerilme dağılımını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ayrıca birim kafes yapılarında hacim yoğunluğunun artmasıyla plağın gelen yüklere karşı daha dirençli bir tutum sergileyeceği anlaşılmıştır.

## Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur ve herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynakça

- [1] Babhulkar, S., Trikha, V., Babhulkar, S., & Gavaskar, A. S., Current concepts in management of distal femur fractures. *Injury*, 55, 111357, (2024).
- [2] Abdelmonem, A. H., Saber, A. Y., El Sagheir, M., & El-Malky, A., Evaluation of the results of minimally invasive plate osteosynthesis using a locking plate in the treatment of distal femur fractures. *Cureus*, 14(3), (2022).
- [3] Chmielewska, A., & Dean, D., The role of stiffness-matching in avoiding stress shielding-induced bone loss and stress concentration-induced skeletal reconstruction device failure. *Acta Biomaterialia*, 173, 51-65, (2024).
- [4] Safavi, S., Yu, Y., Robinson, D. L., Gray, H. A., Ackland, D. C., & Lee, P. V., Additively manufactured controlled porous orthopedic joint replacement designs to reduce bone stress shielding: a systematic review. *Journal of orthopaedic surgery and research*, 18(1), 42., (2023).
- [5] Jafari Chashmi, M., Fathi, A., Shirzad, M., Jafari-Talookolaei, R. A., Bodaghi, M., & Rabiee, S. M., Design and analysis of porous functionally graded femoral prostheses with improved stress shielding. *Designs*, 4(2), 12., (2020).
- [6] Savio, D., & Bagno, A., When the total hip replacement fails: A review on the stress-shielding effect. *Processes*, 10(3), 612., (2022).
- [7] Ahirwar, H., Gupta, V. K., & Nanda, H. S., Finite element analysis of fixed bone plates over fractured femur model. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 24(15), 1742-1751., (2021).
- [8] Pan, C., Han, Y., & Lu, J., Design and optimization of

- lattice structures: A review. *Applied Sciences*, 10(18), 6374., (2020).
- [9] Wang, H., Wan, Y., Li, Q., Xia, Y., Liu, X., Liu, Z., & Li, X., Porous fusion cage design via integrated global-local topology optimization and biomechanical analysis of performance. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 112, 103982., (2020).
- [10] Cortis, G., Mileti, I., Nalli, F., Palermo, E., & Cortese, L., Additive manufacturing structural redesign of hip prostheses for stress-shielding reduction and improved functionality and safety. *Mechanics of Materials*, 165, 104173., (2022).
- [11] Wang, X., Zhang, L., Song, B., Zhang, J., Fan, J., Zhang, Z., ... & Shi, Y., Anisotropic mechanical and mass-transport performance of Ti6Al4V plate-lattice scaffolds prepared by laser powder bed fusion. *Acta Biomaterialia*, 148, 374-388., (2022).
- [12] Alkhatib, S. E., Tarlochan, F., Mehboob, H., Singh, R., Kadirgama, K., & Harun, W. S. B. W., Finite element study of functionally graded porous femoral stems incorporating body-centered cubic structure. *Artificial organs*, 43(7), E152-E164., (2019).
- [13] Cheng, C. K., Wang, X. H., Luan, Y. C., Zhang, N. Z., Liu, B. L., Ma, X. Y., & Nie, M. D., Challenges of pre-clinical testing in orthopedic implant development. *Medical Engineering & Physics*, 72, 49-54., (2019).
- [14] Yan, L., Lim, J. L., Lee, J. W., Tia, C. S. H., O'Neill, G. K., & Chong, D. Y., Finite element analysis of bone and implant stresses for customized 3D-printed orthopaedic implants in fracture fixation. *Medical & biological engineering & computing*, 58, 921-931., (2020).
- [15] Naidubabu, Y., Mohana Rao, G., Rajasekhar, K., & Ratna Sunil, B., Design and simulation of polymethyl methacrylate-titanium composite bone fixing plates using finite element analysis: optimizing the composition to minimize the stress shielding effect. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(23), 4402-4412., (2017).
- [16] Jia, D., Li, F., Zhang, C., Liu, K., & Zhang, Y., Design and simulation analysis of Lattice bone plate based on finite element method. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(13), 1311-1321., (2021).
- [17] Alkentar, R., & Mankovits, T., Investigation of the performance of Ti6Al4V lattice structures designed for biomedical implants using the finite element method. *Materials*, 15(18), 6335., (2022).
- [18] Chmielewska, A., & Dean, D., The role of stiffness-matching in avoiding stress shielding-induced bone loss and stress concentration-induced skeletal reconstruction device failure. *Acta Biomaterialia*, 173, 51-65., (2024).
- [19] Maharaj, P. S., Maheswaran, R., & Vasanathanan, A., Numerical analysis of fractured femur bone with prosthetic bone plates. *Procedia Engineering*, 64, 1242-1251., (2013).
- [20] Sadiq, K., Sim, M. A., Black, R. A., & Stack, M. M., Mapping the micro-abrasion mechanisms of CoCrMo: some thoughts on varying ceramic counterface diameter on transition boundaries in vitro. *Lubricants*, 8(7), 71., (2020).
- [21] Eldesouky, I., Abdelaal, O., & El-Hofy, H., Femoral hip stem with additively manufactured cellular structures. In *2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)* (pp. 181-186). IEEE., (2014, December).
- [22] Asgharpour, Z., Fressmann, D., Schuller, E., & Peldschus, S., Implementation of a Strain Rate Dependent Human Bone Model. In *8th European LS-DYNA Users Conference*, Strasbourg., (2011).
- [23] Bordin, A., Ghiotti, A., Bruschi, S., Facchini, L., & Bucciotti, F., Machinability characteristics of wrought and EBM CoCrMo alloys. *Procedia Cirp*, 14, 89-94., (2014).
- [24] Fazira, M. F., Mohammad, M., Roslani, N., Saleh, M. H., & Ahmad, M. A. Low strain rate upset forging of preformed CoCrMo powder alloy for load bearing application: A review. *Procedia Engineering*, 68, 405-410., (2013).
- [25] Ali, M., Sajjad, U., Hussain, I., Abbas, N., Ali, H. M., Yan, W. M., & Wang, C. C., On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 93-116., (2022).
- [26] Bandyopadhyay, A., Mitra, I., Avila, J. D., Upadhyayula, M., & Bose, S., Porous metal implants: processing, properties, and challenges. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3), 032014., (2023).
- [27] Khiavi, S. G., Sadeghi, B. M., & Divandari, M. Effect of topology on strength and energy absorption of PA12 non-auxetic strut-based lattice structures. *Journal of materials research and technology*, 21, 1595-1613., (2022).
- [28] Ye, J., Sun, Z., Ding, Y., Zheng, Y., & Zhou, F., The deformation mechanism, energy absorption behavior and optimal design of vertical-reinforced lattices. *Thin-Walled Structures*, 190, 110988., (2023).
- [29] Vilardell, A. M., Takezawa, A., Du Plessis, A., Takata, N., Krakhmalev, P., Kobashi, M., ... & Yadroitsev, I. Topology optimization and characterization of Ti6Al4V ELI cellular lattice structures by laser powder bed fusion for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: A*, 766, 138330., (2019).
- [30] Alkentar, R., Klavovasilakis, N., Tzetzis, D., & Mankovits, T., Effects of pore size parameters of titanium additively manufactured lattice structures on the osseointegration process in orthopedic applications: a comprehensive review. *Crystals*, 13(1), 113., (2023).