



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Mekanik performans ve hafiflik için kiral kafes yapıların optimizasyonu

## *Optimization of chiral lattice structure for mechanical performance and lightweight*

Yazar(lar) (Author(s)): Erhan ÖZDOĞAN<sup>1</sup>, İlyas KACAR<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0009-0003-9442-3513

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5887-8807

**To cite to this article:** Ozdogan E. and Kacar I., “Mekanik Performans ve Hafiflik İçin Kiral Kafes Yapıların Optimizasyonu”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290309:1-11 (2026).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Özdoğan E. ve Kacar İ., “Mekanik Performans ve Hafiflik İçin Kiral Kafes Yapıların Optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290309:1-11 (2026).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.1650169

# Mekanik Performans ve Hafiflik İçin Kiral Kafes Yapıların Optimizasyonu

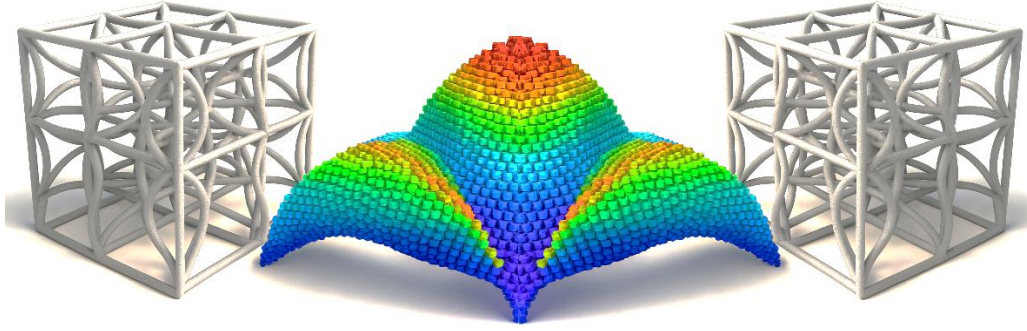
## Optimization of Chiral Lattice Structure for Mechanical Performance and Lightweight

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Optimize edilmiş kafes yüksek mukavemete sahiptir. / The optimized lattice is of high strength.
- ❖ Yapı, negatif Poisson oranı gösterir. / The structure shows a negative Poisson ratio.
- ❖ Kafes aksenal yer değiştirmeye dayanır. / The lattice endures axial displacement.
- ❖ Tepki fonksiyonu, giriş-çıkış ilişkilerini açıklar. / The response function clarifies in-out relationships.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu makalede, hafif ve yüksek mukavemetli bir kiral kafes yapının tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. / In this study, the design and optimization of a lightweight and high-strength chiral lattice structure were accomplished.



Şekil. Kafes yapı ve cevap yüzeyi /Figure. Lattice structure and response surface

### Amaç (Aim)

Hafif ve dayanıklı bir kiral kafes yapının optimum boyutları belirlenmiştir. / Optimal dimensions of a lightweight and durable chiral lattice structure is determined.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sonlu eleman analizleri ve genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon kullanılmıştır. / Finite element analyses and a genetic algorithm-based optimization are used.

### Özgünlük (Originality)

Negatif Poisson oranına sahip kiral bir kafes yapının optimizasyonu bakımından özgündür. / Optimization of a chiral lattice with negative Poisson properties is novel.

### Bulgular (Findings)

Düşük kütle ile yüksek dayanımlı biçim elde edilmiştir. / A high strength shape is obtained with low mass.

### Sonuç (Conclusion)

Elde edilen sonuçlar, kiral kafes yapıların hafif ve dayanıklı mühendislik uygulamaları için etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir. / The results indicate that chiral lattice structures offer an effective solution for lightweight and durable engineering applications.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

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

# Mekanik Performans ve Hafiflik için Kiral Kafes Yapıların Optimizasyonu

*Araştırma Makalesi/ Research Article*

**Erhan ÖZDOĞAN<sup>1</sup>, İlyas KACAR<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, 51240, Türkiye  
(Geliş/Received : 03.03.2025 ; Kabul/Accepted : 14.10.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 01.12.2025 )

## ÖZ

Bu çalışma kapsamında kübik geometriye haiz kiral bir kafes yapı tasarlanmıştır. Söz konusu yapıda, kiriş elemanların ayrıt kesitleri dairesel biçimdedir. Yapının imalatında yapı malzemesi olarak polietilen tercih edilmiştir. İnşa olunan yapının bir ucu ankastre mesnet ile tespit edilmiş, diğer serbest ucu ise eksel doğrultuda yer değiştirmeye mâruz bırakılmıştır. Yapısal cevabın hesaplanması için sonlu eleman metoduna dayalı sayısal bir simülasyon icra edilmiştir. Bu simülasyon neticesinde; gerilme dağılımı, yanal deformasyon miktarları, Poisson oranları ve iç enerji sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu parametrik veriler, genetik algoritmaya istinaden yürütülen bir optimizasyon işlemine tâbi tutulmuştur. Bu kapsamda, asgari boyutlara haiz olan yapı vasıtasıyla azamî mekanik mukavemetin temin edilmesi amaçlanmıştır. Hafif yapıların, hem üretim safahatı hem de malzeme tüketimi cihetinden ekonomik üstünlük arz ettiği dikkate alınarak, en uygun geometrik boyut tespit edilmiştir. İlâveten, incelenen parametreler arasındaki ilişkileri veren bir cevap fonksiyonu teşkil edilmiştir. Yapının optimum kesit çapı  $\phi 1,2$  mm olarak tayin olunmuştur ve bu yapı, 5,83 mm'lik eksel yer değiştirmeye mukavemet göstermektedir. En yüksek 6,66 MPa mertebesinde gerilme meydana gelmiş olup bu değer malzemenin akma dayanımından düşüktür. Optimum tasarım neticesinde elde edilen yapının toplam kütlesi 49,28 gram olarak belirlenmiştir. Tasarımı icra olunan kafes yapı negatif Poisson oranına sahiptir. Mezkûr yapı, özketik karakteristikler arz etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu eleman simülasyonu, Polietilen, 3B kiral özketik kafes, optimizasyon.

## Optimization of Chiral Lattice Structure for Mechanical Performance and Lightweight

### ABSTRACT

In the present study, a chiral lattice structure possessing a cubic configuration has been designed. The edge sections of the beam elements within this structure have been configured in a circular geometry. Polyethylene has been preferred as the material for the fabrication of the structure. One end of the structure has been fixed via a cantilever support, while the free end has been subjected to axial displacement. In order to examine the structural response, a simulation based on the finite element method has been conducted. As a result of this simulation, distributions of stress, lateral deformations, Poisson's ratios, and internal energy values have been obtained. These parametric data have been subjected to an optimization process grounded in genetic algorithm methodology. Within this framework, it has been aimed to ensure maximum mechanical strength for a structure with minimal dimensions. Considering that lightweight structures offer economic advantages in terms of both production stages and material consumption, the most appropriate geometric dimension has been determined. Moreover, a response function that defines the relationships among the analysed parameters has been constructed. The optimum cross-sectional diameter of the structure has been determined as  $\phi 1.2$  mm, and the structure has exhibited resistance to 5.83 mm of axial displacement. A maximum stress of 6.66 MPa has been observed, which remains below the yield strength of the material. The total mass of the structure obtained through optimal design has been determined as 49.28 grams. The designed lattice structure possesses a negative Poisson's ratio. The structure exhibits auxetic characteristics.

**Keywords:** Finite element simulations, Polietilen, 3D chiral auxetic lattice, optimization.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kiral kafes yapılar, dönel simetriye ve kiraliteye (aynasal görüntüsünün kendisiyle örtüşmediği bir geometrik özelliğe) sahip, genellikle periyodik bir desen hâlinde tasarlanmış hücreli yapılar.

Kiral yapılar, eşsiz termomekanik ve optik özellikleri sayesinde malzeme bilimi, inşaat, makine ve mimarlık dâhil çeşitli disiplinlerde önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Hafif yapıları ve yüksek mekanik dayanımları sayesinde, havacılık ve uzay mühendisliği alanlarında, darbe emme ve enerji sönümlenme özellikleri

nedeniyle otomotiv endüstrisinde, biyomedikal uygulamalarda kemik implantları olarak ve ısı değişim ile dağıtım sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Hücre tipi, hücre boyutu, payanda-dikme-kiriş ayrıt kesiti, yapı yoğunluğu ve doluluk oranı gibi parametrelerin mekanik performans üzerinde belirleyici olduğu rapor edilmiştir [2]. Kafes yapılar, içi boş veya gözenekli geometrileri nedeniyle yüksek mukavemet/ağırlık oranı sunabilen (hafif) malzemelerdir. Eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, bu yapıların karmaşık

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ikacar@gmail.com

geometrilerinin üretimi de artık mümkün hale gelmiştir. Kafes yapıların mekanik performansı, geometrik parametrelerin optimize edilmesiyle artırılabilir [3].

Ökzetik kafesler, Poisson oranının ayarlanabilir olduğu ve negatif değerlere sahip yapılardır. Seçici elektron ışını eritme, sonlu eleman analizi (SEA) ve rezonans modelleri gibi yöntemlerle bu yapıların performansı değerlendirilmiştir. Kiral yapılar, patlama dayanımı, akustik dalga kılavuzluğu ve optik uygulamalarda önemli avantajlar sunmaktadır [4]. Örneğin, farklı hücre tipleri ve boyutlarıyla tasarlanan kafes yapılar üzerinde yapılan SEA sayesinde belirli yüke dayanabilen en uygun tasarım seçilebilmiştir [5]. Kafes yapıların mekanik performansı ve hafifliği, geometrik parametrelerin optimize edilmesiyle önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir [6]. Gelecekte, farklı malzeme kombinasyonları ve üretim teknikleri, enerji emme kapasitesi, Poisson oranı ve kayma modülü üzerine etkileri daha fazla araştırmaya ihtiyaç duymaktadır [7].

Kiral kafeslerin optimizasyonunda, genetik algoritma [8] ve yanıt yüzeyi yöntemleri (YYY'leri) kullanılarak yapısal parametreler belirlenebilmiştir [9]. Bununla birlikte, literatürde bu yapıların optimizasyonu ve tasarım yöntemleri sınırlıdır [10]. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak iki boyutlu giyotinsiz kesme probleminin çözümü yapılmıştır. Sıralamaya dayalı çaprazlama tekniği en iyi sonucu vermektedir [11]. SEA ile çatlakların, bal peteği ve re-entrant (içe bükülen, geriye kıvrılan) yapıların mekanik davranışlarına etkisi incelenmiştir. İçe-bükük yapılar negatif Poisson oranı nedeniyle farklı tepkiler vermektedir [12]. Ayrıca, hiperküp esaslı yeni bir katman tasarım algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, ortalama düğüm sayısını düşürerek daha verimli bir kafes deseni sağlamaktadır [13]. Gradyan düşüş yöntemi kullanılarak Warren tipi kafes köprülerin şekil ve boyut optimizasyonu yapılmıştır. Optimum yapı, parbole yakın bir form almaktadır [14]. Kafes sistemlerin bilgisayar destekli optimizasyonunda imalat kısıtları incelenmiştir. Mevcut bilgisayar gücünün bu tür karmaşık problemleri çözmede yetersiz olduğu görülmüştür [15]. Negatif Poisson oranına sahip stentlerin üç katmanlı arter ve asimmetrik plak yapısındaki davranışı incelenmiştir. Stentlerin damar içi daralmayı azalttığı ve tedavi sonrası damarın tekrar daralması riskini düşürdüğü belirlenmiştir [16]. Çok amaçlı genetik algoritma kullanılarak kanat kiriş kesitinin optimizasyonu yapılmıştır. Birinci doğal frekans yüksek değerlere ötelenebilmiş ve kanat kütlelerinde azalma sağlanmıştır [17]. Ayrıca, kafes sistemlerin optimizasyonunda bulanık mantık kullanıldığı da görülmüştür [18].

Kiral yapılar farklı geometrik şekilleri ve benzersiz özellikleri nedeniyle halen bir araştırma boşluğuna sahiptir. Bilhassa, kiral yapılarda enerji absorpsiyon kapasitesi, sönümleme, ağırlık kazanımı konusuna ilişkin kapsamlı çalışmaların eksik olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kiral ökzetik kafes yapıları için etkin tasarım

yöntemlerinin henüz gelişim aşamasında olduğu anlaşılmıştır.

Yukarıda verilen literatür taraması incelendiğinde ve araştırma boşluğu dikkate alındığında, kiral kafes tasarımlarının yapısal mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanıldığı ve optimizasyonun tasarım süreçlerinde önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Ne var ki, mevcut ilmî literatürde kiral yapıların optimizasyonuna matuf çalışmaların az olduğu müşahade edilmiştir. İşbu çalışmada, kübik formda oluşturulan bir kiral kafes yapının yapısal simülasyonu ile genetik algoritma esaslı bir optimizasyon süreci neticesinde optimal geometrik boyut tespit edilmiştir. Parametreler arasındaki ilişkiler, korelasyon, YYY vasıtasıyla elde edilmiştir. Tasarım noktalarının oluşturulmasında Latin hiperküp örnekleme usulü tatbik edilmiştir. Yanıt fonksiyonunun teşkilinde Kriging metodu kullanılmıştır.

Bu çalışmada tasarlanan kübik kiral kafes yapı, literatürdeki benzerlerinden farklı olarak, genetik algoritma tabanlı çok amaçlı optimizasyon süreciyle çok kriterli (kesit çapının azaltılması, dayanımın artırılması) bir yöntem benimsemiştir. Ayrıca, polietilen malzeme kullanılarak negatif Poisson oranına sahip ökzetik davranışın mekanik performansla dengelenmesi, özellikle hafiflik ve darbe emilimi gerektiren endüstriyel uygulamalarda yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu tasarım, mevcut çalışmaların aksine, Latin hiperküp örnekleme ve Kriging tabanlı cevap yüzeyi modellemesiyle desteklenen kapsamlı bir parametrik analiz de içermektedir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Malzeme olarak polietilen, yöntem olarak sonlu eleman analizi ve optimizasyon kullanılmıştır.

### 2.1 Kiral Kafes Yapının Tanımı ve Malzeme

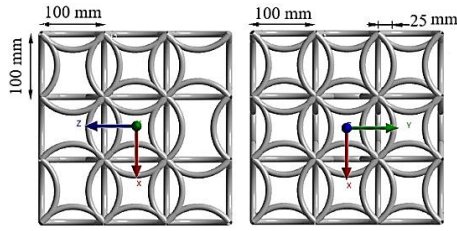
#### Özellikleri (Definition and Material Properties of Chiral Lattice Structure)

Kafes yapı, birbirine bağlı çubukların bir ağ oluşturmasını sağlamaktadır. Böylece yükün çubuklar üzerine dağıtılması sağlanmaktadır. Sonuç olarak da daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip daha hafif yapıların elde edilmesi mümkündür. Kiral kafes yapısı ise geleneksel kafes yapılarından farklı olarak kiral hücre dizilimine sahiptirler.

Birim hücreler, ( $x$ ,  $y$  ve  $z$ -eksenleri boyunca tekrarlanarak, 3B bir kafes yapı oluşturulabilmektedir. Buna desen tasarımı denmektedir. Örneğin,  $3 \times 3 \times 3$  deseni, birim hücrenin her bir koordinat ekseninde üç kez ötelenerek tekrarlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu desene sahip, kübik biçimli bir kafes yapının basmaya karşı dayanımının iyi olduğu raporlanmıştır [19, 20]. Bu nedenle mevcut çalışmada da  $3 \times 3 \times 3$  deseni gözlemlenmiştir. Ebat olarak, 300 mm değeri ise müteakip çalışmalarda, yapının deney düzeneği içerisine sığdırılabilirliği, ölçüm cihazları ile uyumluluğu ve deneysel tekrarlanabilirliği gibi pratik kriterler göz önünde bulundurularak

belirlenmiştir. Böylece hem deneysel hem de sayısal analizlerin standartlaştırılması ve farklı senaryoların karşılaştırılabilirliği sağlanabilecektir.

Çalışmada tasarlanan kiral kafes geometrisi Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu şekil aslında düzgün bir kübik birim hücrenin burkulma mod şekillerinden birine denktir. Hücre içerisindeki kirişler-payanda-dikmeler sinüzoidal formda bir eğriliğe sahiptir. Tüm yapı, üç katmandan meydana gelmektedir. Her bir katmanda, yatay yönde üç hücre ve dikey yönde üç hücre yer almaktadır. Başlangıçta, kiriş kesiti 5 mm yarıçapında, dairesel bir şekle sahiptir. Bu hâliyle, tüm yapı başlangıçta  $3,2043 \times 10^6 \text{ mm}^3$  hacme ve 3,42 kg kütleyle sahiptir.



Şekil 1. İncelenen kiral kafes yapı, ön ve sol yan görünüm (The investigated chiral lattice structure, front and left side views)

## 2.2 Sonlu Elemanlar Modeli ve Simülasyon Yöntemi (Finite Element Model and Simulation Method)

Bu çalışmada, yapısal tasarım, yapısal simülasyon ve optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bunun için ANSYS© yazılımından faydalanılmıştır. SEA yöntemi gereği, yapıda eleman ağı oluşturmak amacıyla ayrıklaştırma işlemi uygulanmıştır. Ancak, gereğinden fazla eleman kullanımı hesaplama süresinde aşırı derecede uzamaya neden olabilirken, yetersiz eleman sayısı ise sonuç doğruluğunu azaltabilmektedir. Bu tür olası hataların önüne geçebilmek için uygun eleman sayısının daha baştan tespit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Çizelge 1'de gösterildiği gibi bir ağdan bağımsızlık analizi gerçekleştirilmiştir.

Sonuçta minimum eleman sayısı ile maksimum hesaplama hassasiyetinin elde edildiği en uygun eleman sayısı 8992 olarak belirlenmiştir. "Eleman" yapının konumsal ayrıklaştırılması ile elde edilen birim parçasına verilen ad olup, "düğüm noktası" ise her elemanı diğerine bağlamaya yarayan köşe noktalarını ifade etmektedir. Ağın kalite değerlendirmesi için çarpıklık (skewness) değeri analiz edilmiştir. En fazla çarpıklık sıfır iken en düşük ortogonal kalite ise 1 olmuştur. Korkmaz ve Kacar (2022) kalite metriklerini detaylıca açıklamıştır [8].

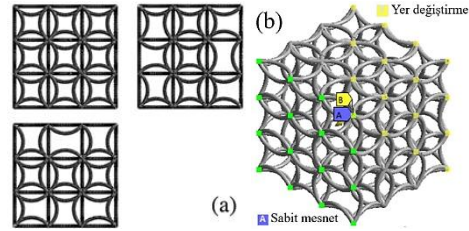
En uygun eleman ağı uygulanmış kafes yapı ve eleman bölüntüsü Şekil 2-a'da görülmektedir. Eleman formülü, full integrasyon olup eleman şekil fonksiyonu doğrusaldır. Şekil 2-b'de bu kafes yapıya uygulanan yük ve sınır şartları gösterilmektedir. Yük olarak, yer değiştirme uygulanmıştır. Yer değiştirme, 0'dan istenen değere kadar rampa biçiminde uygulanmaktadır. Sınır şartı olarak ankastre mesnet kullanılmaktadır. Şekil 2-c'de ise kullanılan programda oluşturulan proje şeması da

verilmiştir. Şekil 2-d'de yazılım içerisinde yük değerinin girildiği bölüm gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda, yapının Poisson oranı, yapıda meydana gelen şekil değiştirme, gerilme, biriken enerji hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Ağdan bağımsızlık analizi (Mesh independence analysis)

Elemanın boyu (mm)	Eleman sayıları	Gerilme (MPa)	APE (*) (%)
10	4768	4.03647	
9	4928	4.03652	0.001313
8	6176	4.1915	3.697455
7	6336	4.21048	0.450748
6	7040	4.23307	0.533719
5	<b>8992</b>	<b>4.64125</b>	<b>8.79449</b>
4	11104	4.64195	0.015058
3	14080	4.64199	0.001042
2	20960	4.64199	0.000021
1	41376	4.642	6.97E-05

(\*) APE, bağlı yüzde hatanın mutlak değeri olup  $\frac{|mevcut - önceki|}{önceki} * 100$  ile hesaplanmaktadır. Burada *mevcut*, incelenen ögenin mevcut değeri, *önceki* ise bir önceki iterasyondaki değeridir.



Şekil 2. Kafesin (a) SEA modeli (b) sınır ve yük türleri (c) takip edilen şema (d) deplasman türünde yük uygulama ((a) FEA model of the truss (b) boundary and load types (c) scheme followed (d) displacement application)

Malzeme olarak polietilen kullanılmış olup oda sıcaklığında mekanik, termal ve fiziksel karakteristikler Çizelge 2 içerisinde sunulmuştur.

Çizelge 2. Malzemenin karakteristikleri (Characteristics of the material)

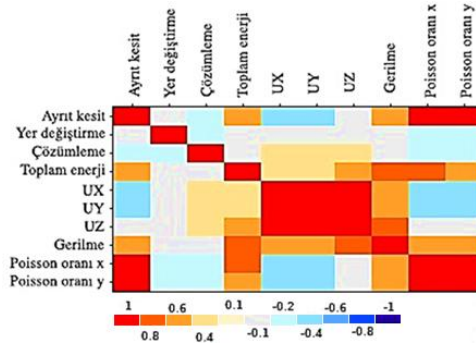
Özellik	Polietilen
Yoğunluk (kg/mm <sup>3</sup> )	$9,5 \times 10^{-7}$
Termal genişleme katsayısı (1/°C)	$2,3 \times 10^{-4}$
Özgül ısı (mJ/kg°C)	$2,3 \times 10^6$
Termal iletkenlik (W/mm°C)	$2,8 \times 10^{-4}$
Direnç (ohm mm)	$10,16 \times 10^{10}$
Basmadaki maksimum dayanım (MPa)	25,00
Akma dayanımı, basmada, (MPa)	22,00
Akma dayanımı, çekmede, (MPa)	22,00

**Çizelge 2. (Devam)** Malzemenin karakteristikleri (Characteristics of the material)

Özellik	Polietilen
Çekmedeki maksimum dayanım (MPa)	33,00
Young's modülü (MPa)	1100,00
Poisson oranı	0,42
Hacim modülü (MPa)	2291,7
Kayma modülü (MPa)	378,32

### 2.3. Tasarım parametreleri (Design parameters)

Aralarında yüksek ilişki mevcut olan parametreler üzerine odaklanmak çok daha verimli bir süreç oluşturacaktır. Literatürden görülmüş olduğu üzere kiral kafes tasarımlarında temel parametreler hücre tipi, hücre boyutu, payanda çapı, yapı yoğunluğu ve doluluk oranıdır. Doluluk oranını etkileyen temel parametre payanda çapıdır. Ayrıt kesitin yarıçapı  $r$ ,  $x$ -ekseni doğrultusundaki Poisson oranı  $\nu_x$ ,  $y$ -ekseni doğrultusundaki Poisson oranı  $\nu_y$ , gerilme  $\sigma$ , olup  $UX$ ,  $UY$ ,  $UZ$  sembolleri ise sırasıyla  $x$ ,  $y$ ,  $z$ -eksenleri doğrultularındaki yer değiştirmelerdir. Parametrelerin birbirleri ile ne derecede ilişkili olduklarını tespit edebilmek için kullanışlı bir araç Spearman'ın korelasyon matrisi olup Şekil 3'te verilmiştir.



**Şekil 3.** Ayrıt kesit, yer değiştirme, çözümlene, toplam enerji,  $UX$ ,  $UY$ ,  $UZ$ , gerilme ve Poisson oranları arasındaki ilişkileri veren Spearman'ın korelasyon matrisi, birimsizdir (Spearman's correlation matrix, unitless, giving the relationships between the edge section, displacement, resolution, total energy,  $UX$ ,  $UY$ ,  $UZ$ , stress and Poisson's ratios)

Şekilde "çözümlene" olarak ifade edilen değişken, hesaplama süresidir. Aşağıdaki ilişkiler tespit edilmiştir.

- Poisson oranının etkisi: Matris, Poisson oranının (hem  $x$  hem  $y$  doğrultusunda) ayrıt kesit ile çok yüksek lineer korelasyona sahip olduğunu, toplam enerji ve gerilme ile yüksek lineer korelasyona sahip olduğunu göstermektedir.
- Yer değiştirme Poisson oranı ile ilişkilidir.
- Gerilmenin bütün parametreler ile pozitif lineer ilişkisi vardır.
- Yanal yer değiştirmelerle toplam yer değiştirme arasında anlamlı ilişkiler olduğu gözlemlenmiştir.
- Ayrıt kesit ile yer değiştirme ve gerilme arasında negatif ilişki görülmüştür.

### 2.4 Optimizasyon Süreci (Optimisation Process)

Optimizasyon işlemlerinde *girdi(ler)* ve *çıkıtı(lar)* olmak üzere iki nevi değişken mevcuttur. Herhangi bir değişken parametrik hâle getirildikten sonra, kullanıcı tarafından doğrudan müdahale edilememekte, ancak tayin olunan alt ve üst sınırlar içerisinde yazılım marifetiyle çeşitli kombinasyonlar (örneklem yahut tasarım noktası) oluşturulmakta ve işlenmektedir.

Bu sınırlar belirlenirken, tetkik edilmek istenilen aralık nazar-ı itibare alınmıştır. Parametrik tanımlamanın icrası maksadıyla, yazılım ortamında giriş ve çıkış değişkenleri işaretlenmiş bulunmaktadır. Giriş değişkenlerine ait başlangıç kıymetleri ile alt ve üst sınırlar, Çizelge 3'te beyan olduğu şekilde ihtiyar edilmiştir. Çizelgede alt sınırı oluşturan tasarım noktasında, yarıçap değeri sıfır olduğundan dolayı hesaplama yapılamamaktadır. Bu nedenle karşılık gelen çıkış değişkenleri sütunu boş bırakılmıştır.

**Çizelge 3.** Giriş değişkenlerinin başlangıç değerleri ve sınırları (Initial values and range of input variables)

Girdiler	Başlangıç	Alt sınır	Üst sınır
Yarıçap, $r$ (mm)	5	0	10
Eksenel yer değiştirme,	-1	-6	6
Çıktılar			
$\sigma$ (MPa)	6,1	--	49,37
$UX$ (mm)	0,47415	--	2,07
$UY$ (mm)	0,38256	--	1,707
$\nu_x$	-0,3867	--	-0,3
$\nu_y$	-0,3139	--	-0,25
Enerji (mJ)	611,55	--	224213

Başlangıçta yapıya yer değiştirme türünde 0 - -6 mm arasında bir basma tatbik edilmiştir.  $\pm 6$  mm yer değiştirmeden daha fazlası uygulandığında, elastik sınırın aşıldığı, hasar meydana geldiği müşahade edilmiştir. Bu nedenle  $\pm 6$  mm sınırlarının dışına çıkılmamıştır. Yarıçap için 0 ve 6 mm aralığı ile ilgilendirilmiştir.

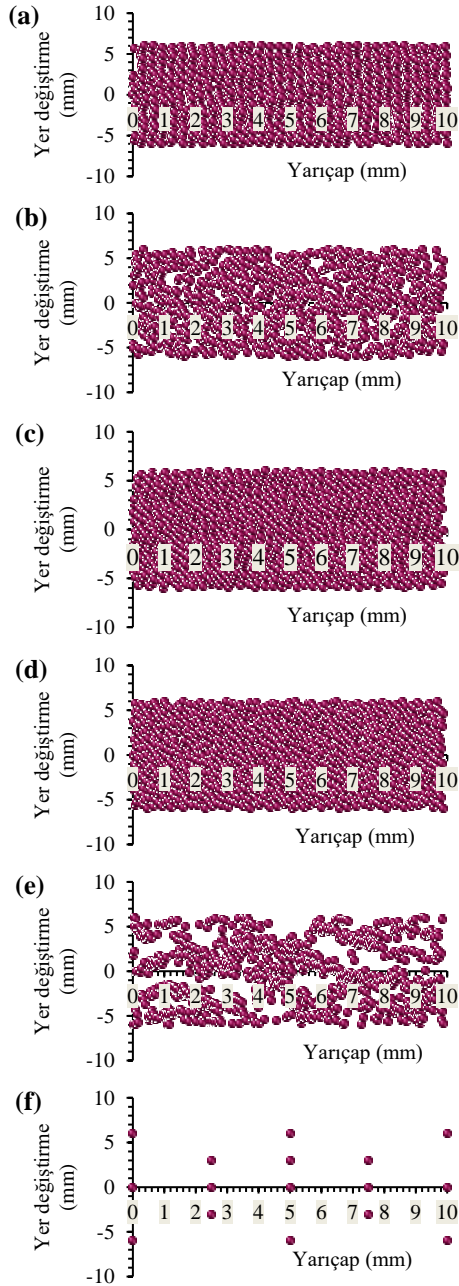
Amaç fonksiyonları olarak "minimum kesit alanı" ve "maksimum dayanım" olmak üzere iki kriter amaçlanmıştır.

### 2.5. Tasarım noktaları kümesi (Set of design points)

Değişkenlerin, belirlenen aralık içerisinde, dağılım algoritmaları kullanılarak kombinasyonları, tasarım noktaları (DP) oluşturulmaktadır. Şekil 4'te yarıçap ve yer değiştirme çiftlerinden oluşan DP noktalarının, farklı dağılım algoritmaları sayesinde üretilmeleri halinde oluşan dağılımlar kıyaslanmıştır.

Görüleceği üzere  $a-e$  dağılımlarında yüksek çözünürlükte nokta kümesi oluşabilmektedir. Latin hiperküp örnekleme, girdi değişkenleri arasında adil bir dağılım oluşturmak üzere tasarlanmış, çok boyutlu bir dağılımdan, parametre değerlerinin yarı-rastgele üretilen istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemde, girdi parametrelerinin olasılık dağılımının uygun bir

tabakalaşması sağlanmaktadır. Bu tabakalaşma, bölgeyi, olasılık ölçeğinin aralığı olan 0 ile 1,0 arasında özdeş bölümlere ayırmaktadır. Bu örnekleme yönteminde, değişkenler arasında bağımsızlığı korumak diğer önemli anahtardır. Bu bağımsızlık, dağıtımda girdi parametreleri rastgele seçilmekte ve kullanılan bir parametre tekrar kullanılmamaktadır. Bu yöntem, parametreler arasında istenmeyen korelasyonların oluşmasını önlemektedir.



**Şekil 4.** Çeşitli dağılım algoritmalarının oluşturduğu DP noktaları kümesi (a) kullanıcı girişi (b) Latin hiperküp (c) Optimal alan doldurma (max-min mesafe) (d) Optimal alan doldurma (merkezi L2) (e) Optimal alan doldurma (maksimum entropi) (f) Merkezi kompozit tasarımı (döndürülebilir yöntemi) (Set of DP points generated by various distribution algorithms (a) user input (b) Latin hypercube (c) Optimal area filling (max-min distance) (d) Optimal area filling (center L2) (e) Optimal area filling (max entropy) (f) Central composite design (rotatable method))

Çizelge 4'te bu yöntemlerin özellikleri verilmiştir. Farklı DP örnekleme yöntemlerinin farklı özelliklere sahip olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.** Örnekleme yöntemleri ve özellikleri (Sampling methods and characteristics)

Örnekleme yöntemi	Açıklama	DP sayısı (adet)	Uygulanabilirlik
El ile kullanıcı girişi	İstenen: 1000	1000	Tüm bölgeyi temsil kabiliyeti yüksek, hesaplama 3 dakika sürmüştür
Latin hiperküp	İstenen: 1000	1000	Tüm bölgeyi temsil kabiliyeti yüksek, 3 dakika
Optimal alan doldurma	Max-min Merkezi L2	1000	Tüm bölgeyi temsil kabiliyeti yüksek, 4 dakika
	Maksimum entropi	1000	Tüm bölgeyi temsil kabiliyeti yüksek ancak 3 saat sürdü.
Merkezi kompozit tasarımı	Döndürülebilir yöntemi	16	Tüm bölgeyi temsil kabiliyeti düşük

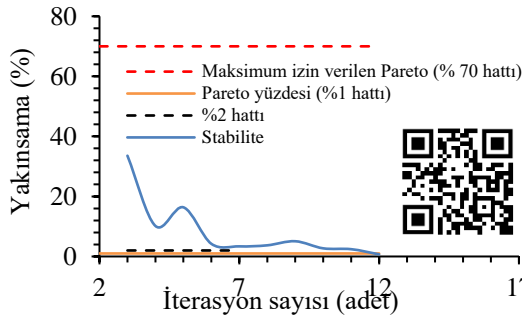
Esasen, hem tüm bölge içerisinde homojen dağılıma hem de DP sayısının yeterince fazla olması istenir. Merkezi kompozit yöntemi bu iki şartı sağlayamamaktadır. Çünkü sadece 16 adet nokta üretebilmiş olup bu noktalar da homojen dağılıma sahip değildir. Bununla birlikte optimal alan doldurma tekniğinin maksimum entropi yöntemiyle örnekleme 3 saat sürmüştür. Bu çalışmada, bütün bu hususlar bir arada değerlendirildiğinde, kullanıcı tanımlı yöntem ve Latin hiperküp yöntemi hem bölge temsiliyeti hem de hesaplama hızı açısından öne çıkan iki yöntem olmuştur.

Bu çalışmada Latin hiperküp yönteminin dağılım algoritması kullanılmıştır. Sonuçta 1000 adet DP oluşturulmuştur. Hesaplamalar tamamlandığında tüm noktalarda hesaplama yapılabildiği görülmüştür. Ne var ki, mevcut literatürde beyan olduğu üzere, her zaman tüm DP'ler hesaplanamayabilmektedir [9, 10]. Bu durumun müsebbibi olarak, her ne kadar belirlenen aralık dâhilindeki tüm kombinasyonlar matematiksel olarak tatbik edilebilir görünse de, bazı DP'lerin yapısal bakımdan kabil-i tatbik olmayan geometrik şekillere sebebiyet verebildiği, bu nevi hâllerde, ilgili DP'nin hesaplanmadığı bildirilmiştir.

## 2.6. Cevap yüzeyi (Response surface)

Hesaplama sonunda, değişkenler arasındaki ilişkiler "yanıt yüzeyi" olarak adlandırılan bir fonksiyon aracılığıyla tespit edilmiştir. Cevap fonksiyonunun oluşturulmasında Kriging tekniği tercih edilmiştir. Optimizer olarak MOGA (çok amaçlı ve çok kısıtlı bir genetik algoritma) kullanılmıştır. Bu yöntem, elitizm ilkesine dayalı geliştirilen ve NSGA-II'nin (Baskın Olmayan Sıralanmış Genetik Algoritma-II) bir varyantı olarak bilinen bir yaklaşımdır. MOGA kapsamında başlangıçta 100 örnek oluşturulmuş ve her iterasyonda

100 örnek incelenmiştir. Maksimum 20 iterasyon limiti uygulanmasına rağmen, 12 iterasyon sonunda yakınsama sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu süreçte toplam 900 genetik değerlendirme gerçekleştirilmiş olup, sonuç olarak optimum olabilecek 3 aday çözüm elde edilmiştir. Yakınsama grafiği, Şekil 5'te sunulmaktadır. Tüm bu işlemlerin anlatıldığı eğitim videosuna <https://youtu.be/vAz18uPfn5c> adresinden veya şekil üzerinde verilen kare kod taranarak da ulaşabilmek mümkündür.



Şekil 5. Optimizasyonun yakınsama grafiği (Convergence graph of optimization)

MOGA, parametreleri Çizelge 5'te verilmiştir. MOGA ilk nüfusunu optimum alan doldurma yöntemini kullanarak yanıt yüzeyinden elde etmektedir. Daha sonra, çaprazlama ve mutasyon teknikleri uygulanarak bir sonraki nüfus oluşturulmaktadır. Çaprazlama olasılığı ve mutasyon olasılığı sırasıyla % 98 ve % 1 olarak seçilmiştir. Yüksek çaprazlama oranı, erken yakınsama problemini en aza indirmeye yardımcı olacaktır. Optimizasyonun yerel maksimumlara veya minimumlara takılı kalmasını önlemek için mutasyon oranı ise düşük bir değer seçilmiştir. Çaprazlama, bir sonraki nesil için yeni kromozomlar oluşturmak üzere iki kromozomu birleştirirken mutasyon işlemi gen değerlerini değiştirmektedir. Mutasyona uğramış bir kromozom, genetik algoritmayı daha iyi bir çözüme doğru yönlendirme potansiyeline sahiptir. Bu nüfus değiştirme süreci, izin verilen maksimum Pareto yüzdesine ulaşılan kadar devam etmektedir. Pareto yüzdesi, istenen Pareto noktalarının sayısının, iterasyon başına örnek sayısına oranıdır. Bu çalışmada, izin verilen maksimum Pareto yüzdesi % 70 olarak belirlenmiştir. Bu yüzdeye ulaşıldığında optimizasyonun yakınsadığı kabul edilmektedir. Bu değer, çoğu optimizasyon problemi için genellikle % 55 ile % 75 arasında seçilmektedir.

Çizelge 5. MOGA'nın parametreleri ve durumu (Parameters and status of MOGA)

Parametreler	Değer
Tahmini değerlendirme sayısı (adet)	900
Başlangıç örneklerinin sayısı (adet)	100
İterasyon başına örnek sayısı (adet)	100
Çaprazlama olasılığı (%)	98
Mutasyon olasılığı (%)	1
İzin verilen maksimum Pareto yüzdesi (%)	70
Yakınsama kriteri (%)	2
Maksimum iterasyon sayısı (adet)	20

Çizelge 5. (Devam) MOGA'nın parametreleri ve durumu (Parameters and status of MOGA)

Durum	Değer
Pareto yüzdesi (%)	1
Kararlılık yüzdesi (%)	1,874
İterasyon sayısı (adet)	12
Değerlendirme sayısı (adet)	10785
Başarısızlık sayısı (adet)	0
Oluşturulan örnek kümesinin boyutu (adet)	100
Aday sayısı (adet)	3

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Hesaplama işlemi, yanıt yüzeyi, performans metrikleri ve optimim değerler bu bölümde verilmiştir.

#### 3.1. Hesaplama (Calculation)

Hesaplamalar 32 GB RAM ve 2,30 GHz hızında çalışan ve çekirdek sayısı 16 adet olan bir bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalara dair istatistiki malûmatlar, Çizelge 6'da tafsilatlı bir surette sunulmuştur.

Çizelge 6. Çözüm esnasında harcanan bilgisayar kaynakları (Computer resources consumed during the solution)

Özellik	Değer
MAPDL tarafından harcanan zaman (s)	64
MAPDL tarafından kullanılan bellek (MB)	618
Sonuç dosyasının boyutu (MB)	21
1000 DP için toplam hesaplama süresi (saat)	17,01

#### 3.2. Poisson oranı (Poisson ratio)

Kafesin z-ekseni doğrultusunda, başlangıçta -6 mm değerinde deplasman (yer değiştirme) uygulanmıştır. Bu durumda aksel deformasyon  $UZ = -7.187$  mm, yanal deformasyonlar ise  $UX = -2.7795$  mm ve  $UY = -2.2566$  mm olmuştur. Yapının yanal ve aksel ilk boyları  $L_x = L_y = L_z = 300$  mm değerindedir. Bu durumda yanal şekil değiştirme  $\epsilon_x = \frac{-2.7795 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}$  ve  $\epsilon_y = \frac{-2.2566 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}$  olmaktadır. Aksel şekil değiştirme ise  $\epsilon_{eksenel} = \frac{-7.187 \text{ mm}}{300 \text{ mm}}$  olmaktadır. Sonuçta Poisson oranı  $\nu_x = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_{eksenel}} = 0.3867$  ve  $\nu_y = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_{eksenel}} = -0.31397$  olmaktadır. Poisson oranı birimsizdir. Her iki yanal doğrultuda da negatif işaretli sonuçların oluşması, yapının ökzetik davrandığını göstermektedir.

Negatif Poisson oranı, ökzetik malzemelerin karakteristik bir özelliğidir. Bu davranış, kiral kafes yapının geometrik konfigürasyonundan kaynaklanmaktadır. Geleneksel malzemelerde aksel çekme yükü altında yanal genişleme gözlenirken (pozitif Poisson oranı), ökzetik yapılarda hücrelerin burkulma modları ve bağlantıların açılma simetrisi, aksel yük altında yanal daralmaya yol açmaktadır. Bu durum, Poisson oranının negatif değer almasına neden olmaktadır. Özellikle, kübik kafesin onuncu burkulma moduna karşılık gelen sinüzoidal bağlantılar, yük transferi sırasında hücre duvarlarının içe doğru bükülmesine izin vererek yanal deformasyonu ters yönde tetiklemektedir. Bu mekanizma, literatürde 'içe bükük' hücre geometrileriyle ilişkilendirilen ökzetik davranışla

uyumludur [19]. Negatif Poisson oranı, enerji sönmüleme ve darbe emilimi gibi uygulamalarda avantaj sağlamakta, yapının yük altında homojen gerilme dağılımı sergilemesine katkıda bulunmaktadır.

### 3.3. Kullanıcı tanımlı hesaplama prosedürü (User defined calculation procedure)

Kiriş elemanlar kullanıldığı için, gerilme sonuçları alabilmek amacıyla yazılım içerisinde "BEAM tool" kullanılmıştır. İşaretine bakmaksızın maksimum gerilmeyi tespit edebilmek için aşağıdaki UDR (kullanıcı tanımlı sonuç) yazılmıştır:

- $\max(\text{abs}(\text{BEAMMIN\_TOTAL\_COMBINED}))$
- $\text{abs}(\text{BEAMMAX\_TOTAL\_COMBINED})$

"Kombine gerilme" ifadesi hem eksenel hem de eğilme nedeni ile yapıda oluşan normal gerilmelerin birleşik hâlini ifade etmektedir. Böylece giriş elemanlarda toplam eksenel yük tespit edilebilmiş olacaktır. "Deformasyon" ifadesi uzunluk biriminde olup "yer değiştirme" veya "deplasman" olarak adlandırıldığı da olmaktadır.

Poisson oranı hesaplanırken, yanal deformasyonun ölçüldüğü nokta ile eksenel deformasyonun ölçüldüğü noktalar doğal olarak farklı noktalar olacaktır. Bu nedenle noktaların yanal veya eksenel deformasyonu gösterebilme-temsil edebilme kabiliyeti olmalıdır. Poisson oranını hesaplamak için aşağıdaki UDR yazılmalıdır:

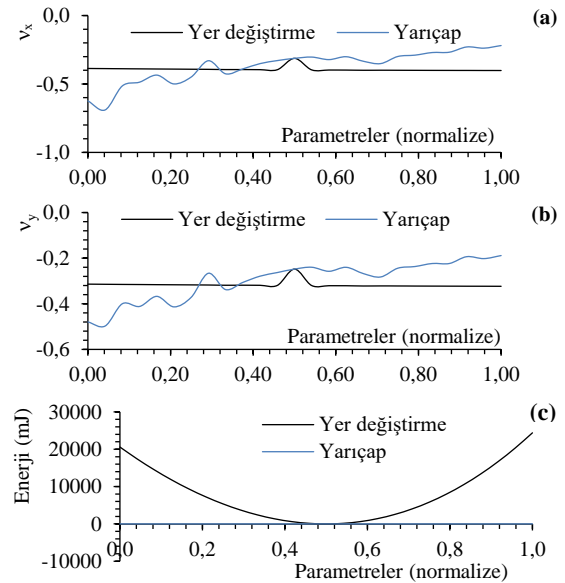
- $\text{Expression} = -1 \times \text{yanalstrain} / \text{eksenelstrain}$

UDR parametrelerinin birbirleri içerisinde kullanılmak üzere global değişken hâline getirilmesi mümkündür. Bunun için UDR'nin "identfier" kutusuna, o değişken için ad yazılması yeterlidir. Örneğin "Expression =  $-1 \times UX/300$ " ifadesi, "identfier=yanalstrain" olarak değişken hâline getirilebilmektedir. Ancak bu durumda sonuçların değeri, ölçülen (scoped) noktadan noktaya değişecektir. Bu durumun önüne geçmek için ölçülen nokta uygun bir yer seçilmelidir. Bu çalışmada yanal deformasyon bir noktadan değil tüm yapı üzerinden okunmuştur. Değerlerin maksimum olanları hesaplamada kullanılmıştır. Bu amaçla PARAMETER hücreleri içerisinde PO\_nu ifadesi şu biçimde tanımlanmıştır:  $PO\_nu = -1 \times P8/P7$ . Burada P8 terimi yanal şekil değiştirme olup " $UX$  maksimum/ $L_x$ " ve P7 ise eksenel şekil değiştirme olup " $UZ$  maksimum/ $L_z$ " ile hesaplanmaktadır. Bölme ifadesinde, eksenel doğrultudaki yer değiştirmeler birbirini götürdüğü için şekil değiştirme hesaplanmaya gerek kalmamıştır.

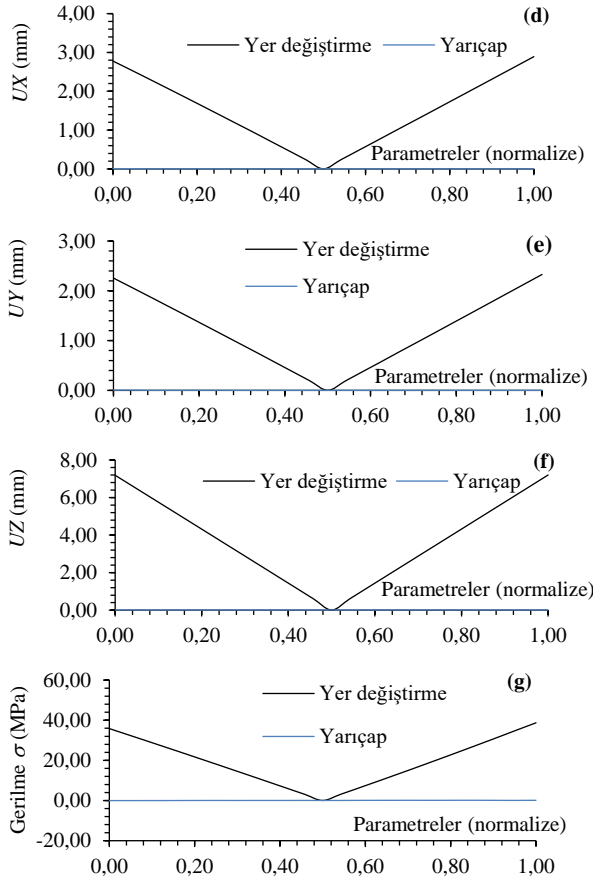
### 3.4. Parametreler arasındaki ilişkiler (Relationships between parameters)

Girdi-çıkı değişkenleri arasındaki ilişkileri ortaya koyan yerel hassasiyet eğrileri, yanıt yüzeyi fonksiyonu aracılığıyla elde edilmiş ve Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6-a ve b'de normalize edilmiş parametrelerin, Poisson oranı üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Yer değiştirme

ve ayrıt kesit arttıkça Poisson oranının kademeli bir azalış gösterdiği gözlenmiştir. Özellikle yer değiştirme arttıkça Poisson oranının daha negatif değerlere ulaştığı dikkat çekmektedir. Bu sonuç, yapının özetik bir davranış sergilediğini ve negatif Poisson oranının geometrik değişikliklere duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 6-c enerji birikiminin yarıçap ve yer değiştirme ile olan ilişkisini normalize edilmiş formda sunmaktadır. Yarıçap ve yer değiştirme parametrelerinin artışıyla enerji, doğrusal olmayan bir artış göstermektedir. Yer değiştirme, enerji birikimi üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir. Bu durum, sistemin deformasyon kapasitesinin enerji depolamaya etkisini vurgular niteliktedir. Şekil 6-d ve e'de, sırasıyla  $x$  ve  $y$  doğrultularındaki yanal deformasyonun normalize parametrelerle değişimi incelenmiştir. Yarıçap arttıkça yanal deformasyonun azaldığı, yer değiştirme arttıkça doğrusal bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, sistemin geometrik özelliklerinin deformasyon üzerinde etkili olduğunu ve deformasyonun eksenel bir doğrultuda yer değiştirmeye duyarlı olduğunu göstermektedir. Şekil 6-f'de ise  $z$  doğrultusundaki eksenel deformasyonun normalize parametrelerle değişimi incelenmiştir.  $UX$  ve  $UY$  etkileri ile aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 6-g ise gerilme değerlerinin normalize edilmiş parametrelerle (ayrıt kesit ve yer değiştirme) olan değişimini göstermektedir. Grafik, gerilmenin parametreler arttıkça başlangıçta hafif bir artış sergilediğini, daha sonra yer değiştirme ile lineer bir şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle yer değiştirme arttıkça, gerilmenin daha belirgin bir eğilimle yükseldiği gözlenmiştir. Bu durum, yapıdaki elastik deformasyonun yer değiştirme ile orantılı olarak artmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıt kesit ile yer değiştirme ve gerilme arasında negatif ilişki görülmüştür, bu da kesitin artmasının sistem deformasyonlarını veya gerilmesini azalttığını göstermiştir.

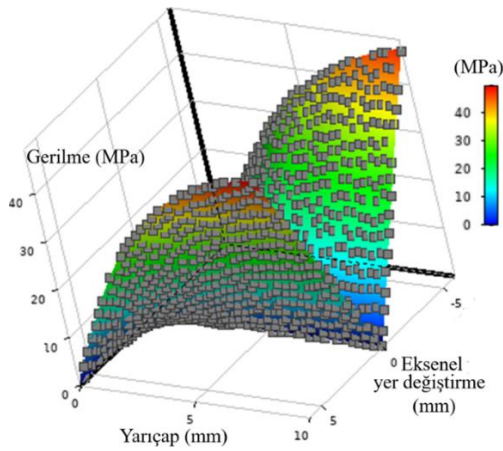


Şekil 6. Parametreler arası ilişkiler, yarıçap  $r$  ve eksenel yer değiştirmenin (a)  $v_x$  (b)  $v_y$  (c) enerji



**Şekil 6. (Devam).** Parametreler arası ilişkiler, yarıçap  $r$  ve aksenal yer değiştirmenin (d)  $UX$ , (e)  $UY$ , (f)  $UZ$  (g)  $\sigma$  üzerine olan etkileri (Relationships between parameters, effects of radius  $r$  and axial displacement on (a)  $v_x$  (b)  $v_y$ , (c) energy (d)  $UX$ , (e)  $UY$ , (f)  $UZ$  (g)  $\sigma$ )

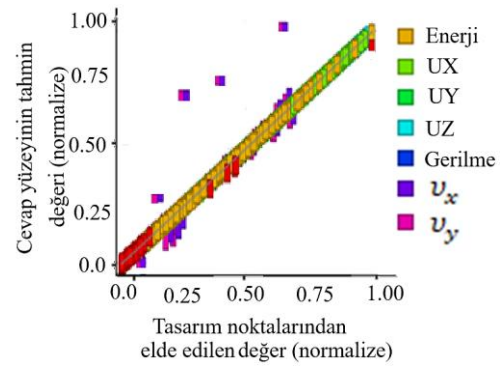
Yarıçap ve aksenal deformasyonun gerilme üzerine olan etkisi Şekil 7'de 3B bir cevap yüzeyi üzerinde ayrıca gösterilmiştir. Hesaplanmış olan 1000 adet DP noktası ve bunlar kullanılarak üretilmiş olan cevap fonksiyon yüzeyleri açıkça görülmektedir.



**Şekil 7.** Yarıçap ve aksenal deformasyonun gerilme üzerine olan etkisini gösteren bir cevap yüzeyi (A response surface showing the effect of radial and axial deformation on stress)

Yer değiştirme 0 noktasından +6 ve -6 mm değerine doğru artarken ve ayrıt kesit de 0'dan 10 mm değerine doğru artarken yapı içerisinde oluşan gerilmenin arttığı görülmektedir. Bu artış parabolik biçimdedir. Yer değiştirme eksenindeki 0 noktasının sağ ve solunda gerilme simetrik bir biçimdedir. Bu da deformasyon gerilme arasındaki beklendiği gibi ilişkiden kaynaklanmaktadır. Zira negatif işaret, mekanikte *basma* gerilmesi anlamına gelmektedir. Ancak hâlâ şiddet bakımından mutlak değerce simetrik bölgedeki çiftine eşdeğerdir. Bu da grafiğin simetrik olarak görünmesine yol açmıştır.

Oluşan cevap fonksiyonunun iyilik miktarını yani doğruluğunu-performansını, ölçmek için "hata metrikleri" ve "regresyon analizi" sıklıkla kullanılan iki yöntemdir. Regresyon analizi sayesinde "fonksiyonun yaptığı tahmin" ile "hesaplanan DP" arasındaki korelasyon tespit edilmektedir. Şekil 8'de regresyon analizine ilişkin grafik verilmiştir.



**Şekil 8.** Regresyon analizi (Regression analysis)

Regresyon analizinde, tüm (hedef, çıkış) veri noktaları üzerine uygulanan birinci dereceden regresyon sonucunda elde edilen "eğri uydurma" fonksiyonu, veriler arasındaki doğrusal ilişkinin modellenmesinde kullanılmaktadır. Regresyon analizi sonunda, korelasyon katsayısı  $R$  ve determinant katsayısı  $R^2$  elde edilmektedir. Her ikisi de birimsiz olup, ilişki gücünü nicelendirmektedir. Eğer  $R$  katsayısı 0,01 ile 0,29 aralığı içerisinde bir değer almışsa *zayıf* korelasyon mevcuttur. 0,3 ile 0,7 aralığında ise *orta* seviyede korelasyonu ve 0,71 ile 0,99 arasında olması ise *güçlü* bir korelasyonu göstermektedir. Sıfır değeri, ilişkinin bulunmadığını, negatif değerler ise ters yönde bir doğrusal ilişkiyi ifade etmektedir. Yani,  $R$ 'nin mutlak değerindeki artış, ilişkinin daha belirgin hale geldiğine işaret etmektedir.  $R^2$ , bağımlı değişkendeki varyansın ne kadarının modeldeki bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını göstermektedir. Grafikte, yatay ekseninde DP değerleri (hedef) yer alırken, dikey ekseninde yanıt fonksiyonundan elde edilen tahminler bulunmaktadır. İdeal durumda, tahminlerin hedef değerlerle birebir örtüşmesi beklenmekte, bu durumda  $R=1$  değeri oluşmakta ve tüm noktalar 45° eğrisi üzerinde sıralanmaktadır. Şekil 8 incelendiğinde, verilerin büyük bir çoğunluğunun 45° doğrusuna yakın konumlandığı gözlemlenmektedir.

**Çizelge 7.** Yanıt fonksiyonunun iyilik metrikleri (metrics of the response function)

Parametreler	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE
UX (m)	0,99996	0,0001839	0,011623
UY (m)	0,99996	0,0001339	0,000320
UZ (m)	0,99994	0,0004600	0,000059
Enerji (mJ)	0,99993	2,1009000	0,0071302
Gerilme (MPa)	0,99999	0,0040000	0,0172870

Buna ek olarak, Çizelge 7'de parametrelerin R<sup>2</sup> değerleri verilmiş olup, son derece yüksek değerler, modeldeki bağımsız değişkenlerin, daha başka değişken gerektirmeksizin bu hali ile iyi bir biçimde modeli temsil etmekte olduğuna işaretler.

Bir diğer iyilik değerlendirme unsuru ise "hata metrikleri" olup en sık kullanılan metrikler RMSE, MAE değerleri verilmiştir. Hata metriklerinin sıfır veya sıfıra yakın olması arzu edilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere hem RMSE hem de MAE değerleri sıfıra yakındır. Bu da cevap yüzey fonksiyonunun iyiliğinin yüksek olduğunu göstermektedir.

### 3.5. Optimum değerler (Optimum values)

Optimizasyon modülü, Çizelge 8'de gösterildiği gibi üç optimum değeri, aday nokta olarak önermiştir. Burada bir numaralı nokta seçilmiştir.

**Çizelge 8.** Önerilen aday noktalar (AN'lar) (Proposed candidate points (ANs))

Giriş değişkenleri	AN 1	AN 2	AN 3
Yarıçap, <i>r</i> (mm)	0,51627	0,52263	0,52263
Eksenel yer değiştirme (mm)	5,833	5,865	5,7082
Cıkış değişkenleri			
$\sigma$ (MPa)	5,8476	5,9095	5,7389
UX (mm)	3,6136	3,6333	3,5328
UY (mm)	3,6136	2,8982	2,8175
$\nu_x$	-0,49645	-0,4965	-0,49602
$\nu_y$	-0,39598	-0,3960	-0,39559
Enerji (mJ)	4,1531	4,2859	4,0429

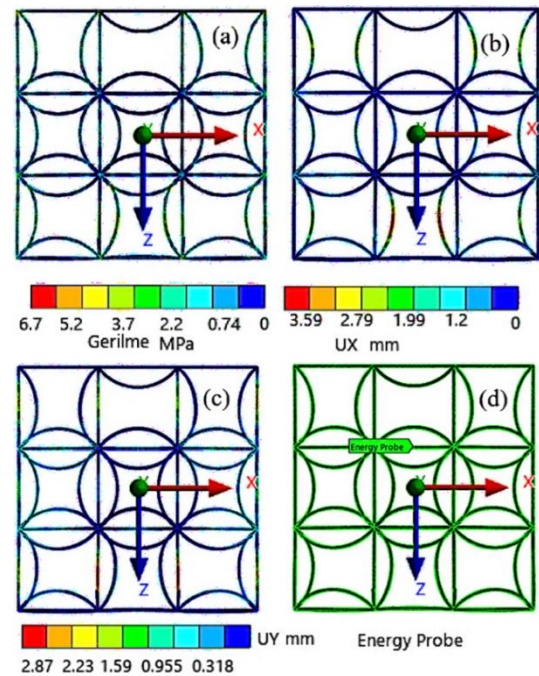
### 3.6. Üretilirlik ve Sonuçların Doğrulması (Manufacturability and Verification of Results)

Optimizasyon sonunda elde edilen aday noktalar, yanıt yüzeyi fonksiyonları aracılığıyla hesaplanan değerlerden oluşmaktadır. Bu değerler, doğrulama amacıyla, ayrıca simülasyona verilip yeniden hesaplanmıştır. Ancak optimizasyon sonucunda belirlenen geometrik boyutlarda, örneğin 0,51627 mm gibi mevcut geleneksel imalat makinelerinin tolerans aralığını aşan çok sayıda kusur yer almaktadır. Bu denli hassas toleransı gerçekleştirebilecek herhangi bir üretim yöntemi henüz mevcut değildir. Bu nedenle, üretilebilir değerlere ulaşmak amacıyla, boyutlardaki ondalık basamak sayısını azaltılmış ve değerler yukarı yuvarlanmıştır. Üretilir boyutlar, Çizelge 9'da sunulmuştur.

**Çizelge 9.** AN 1'in doğrulanmış, üretilebilir hâli (yuvarlanmış optimum tasarım) (Verified, manufacturable version of AN 1 (rounded optimum design))

Giriş değişkenleri	Değer
Yarıçap, <i>r</i> (mm)	0,6
Eksenel yer değiştirme (mm)	5,833
Cıkış değişkenleri	
$\sigma$ (MPa)	6,66140
UX (mm)	3,58940
UY (mm)	2,86600
$\nu_x$	-0,49377
$\nu_y$	-0,39426
Enerji (mJ)	7,251900

Çizelge 9'da verilen parametrelerle elde edilen optimum gerilme dağılımı ise Şekil 9'da sunulmuştur. Oluşan maksimum gerilme değeri 6,6614 MPa olup malzemenin akma sınırı olan 25 MPa'nın çok altında kalması, tasarımın emniyetli olduğunu göstermektedir.

**Şekil 9.** Optimum DP'nin oluşturduğu (a) gerilme, (b) UX, (c) UY, (d) Enerji (Optimum DP generated (a) stress, (b) UX, (c) UY, (d) energy)

### 3.7 Tartışma (Discussion)

Bu çalışma, bir kiral kafes yapının tasarım ve optimizasyonuna odaklanmıştır. Optimizasyon sonrası elde edilen maksimum gerilme değeri, tasarımın verimliliğini ve dayanıklılığını için bir kriterdir. Bir diğer kriter ise hafifliktir. Kiral kafes yapıların yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması istenmektedir.

Ancak, tasarımda kullanılan parametrelerin optimize edilmiş değeri yarıçap 0,6 mm ve eksenel deformasyon 5,833 mm olup hem tasarım hem de üretim açısından bağlayıcıdır.

Negatif Poisson oranı, hücrelerin yapısına bağlı olarak malzemelerin veya yapıların tek eksenli basma (veya çekme) altında büzülmesi (veya genişlemesi) şeklindeki

sezgisel olguyu ifade etmektedir. Ökzetik davranışın bir sonucu olarak negatif Poisson oranı, yapının darbe anında enerjii absorbe etme kapasitesini artırmakta ve ani kırılma riskini azaltmaktadır. Bu özellik otomotiv ve havacılık endüstrilerinde darbe emici bileşenlerin tasarımı için kritik önem taşımaktadır [20].

Çalışmada hesaplanan Poisson oranı  $\nu_x = -0,49377$  ve  $\nu_y = -0,39426$  olup literatürdeki benzer kiral kafes yapılar ile tutarlılık göstermektedir. Örneğin, Gibson ve Ashby (1997), içe bükük hücreli polimerik ökzetik yapılarda Poisson oranı için  $\nu = -0,45$  ile  $-0,55$  aralığında değerler bildirmiştir [21]. Benzer olarak Wang vd. (2020), 3B baskı ile üretilen Ti-6Al-4V kiral kafeslerde  $\nu = -0,38$  ile  $-0,42$  aralığında sonuçlar elde etmiştir [22]. Bu çalışmada polietilen kullanılmasına rağmen, negatif Poisson oranının literatürdeki metal ve kompozit tabanlı yapılara yakın çıkması, geometrik biçimin, bu davranış üzerinde, malzemenin bağımsız bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Zhang vd. (2018)'in lazer toz yatağı füzyon yöntemiyle ürettiği ökzetik kafeslerde  $\nu = -0,25$  gibi daha düşük bir değer raporlanmış olması [23], bağlantı geometrisinin ve hücre boyutunun Poisson oranını önemli ölçüde etkilediğini desteklemektedir.

Bu çalışmada belirlenen optimum geometrinin (kesit çapı  $\phi 1,2$  mm-yarıçap 0,6 mm) gerçek üretim süreçlerine uygunluğu, eklemeli imalat teknolojileri kapsamında değerlendirilmelidir. Wang vd. (2020), 3B baskı yöntemiyle 0,5 mm altında kesit kalınlığına sahip kiral kafeslerin titanyum alaşımlarıyla üretilebildiğini raporlamıştır [22]. Polietilen gibi termoplastik malzemeler için de, seçici lazer sinterleme (SLS) veya füzyon biriktirme modelleme (FDM) gibi yöntemlerle benzer detayların elde edilebileceği literatürde gösterilmiştir [21, 23]. Ancak, 1,2 mm çapa sahip ince kesitlerin üretimi sırasında malzemenin termal büzülmesi veya tabakalı birikim nedeniyle mikro çatlak riski bulunmaktadır. Bu durum, simülasyondaki idealize edilmiş modelin aksine, üretim sonrası mekanik dayanımda % 5-10 düşüşe yol açabilmektedir [21].

Öte yandan, optimizasyon sürecinde belirlenen maksimum gerilme değerinin (6,66 MPa), malzemenin akma dayanımının (25 MPa) çok altında kalması, tasarımın üretim toleranslarına karşı esnek olduğunu göstermektedir. Malzemenin akma sınırına yaklaşmayan maksimum gerilme değeri, tasarımın önemli bir emniyet katsayısına sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, yük altında ani kopma riskini azalmaktadır. Ayrıca, Latin hiperküp örneklemeyle elde edilen parametre aralıklarının, endüstriyel 3B yazıcıların tipik çözünürlük sınırları ( $\pm 0,1$  mm) içinde kalması [22], prototip üretiminin teknik olarak mümkün olduğunu desteklemektedir. Nitekim Gibson ve Ashby (1997), benzer hücreli yapıların polimerik malzemelerle üretiminin, teorik modellerle uyumlu sonuçlar verdiğini deneysel olarak doğrulamıştır [21].

Sınırlılık olarak üretimlerinden bahsedilmelidir. Özellikle mikro boyutlu yapıların üretimi karmaşık ve

maliyetli olabilmektedir. Yanal deformasyonun belirgin bir şekilde görülmesi, yüksek deformasyonlu uygulamalarda tasarımın dikkatle değerlendirilmesini gerektirmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Kiral kafes yapımı üzerine gerçekleştirilen bu çalışma, hem teorik hem de pratik yönleriyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Çalışmada kullanılan tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve doğrulanması, kiral kafes yapılarının mühendislik uygulamaları için uygunluğunu göstermektedir. Çıkan sonuçlar, tasarım sürecinin etkin bir şekilde optimize edildiğini ve elde edilen değerlerin malzemenin akma sınırının oldukça altında olduğunu kanıtlamaktadır.

Kiral kafes yapıları, yüksek dayanıklılık ve düşük malzeme kullanımıyla sürdürülebilir mühendislik çözümleri sunmaktadır. Tasarım parametrelerinin optimize edilmesi, hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de yapıların mekanik performansını artırmaktadır. Literatürdeki kiral kafes yapılarının büyük çoğunluğu, optimizasyon süreçlerinde sınırlı sayıda parametreyi ele almıştır. Bu çalışmada ise tasarım parametrelerinin kapsamlı bir analizi yapılmış ve etkili parametreler değerlendirmeye alınmıştır.

Kiral kafesler, mühendislik alanında yapısal parça tasarımlarında potansiyel bir kullanıma sahiptir. Gelecek çalışmalarda, bu optimum tasarımın SLS veya FDM yöntemleriyle prototip üretimi yapılarak, simülasyon sonuçlarıyla deneysel verilerin karşılaştırılması önerilmektedir. Bu adım, modelin pratik geçerliliğini doğrulamanın yanı sıra, üretim kısıtlarının optimizasyon sürecine dâhil edilebilmesini de sağlayacaktır. Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazarlar, çeviriye yardımcı olmak için önceden eğitilmiş üretken bir dönüştürücü kullanmıştır. Bu aracı/hizmeti kullandıktan sonra, yazarlar içeriği gerektiği gibi gözden geçirip düzenlemiş ve yayınlanan makalenin içeriğinin tüm sorumluluğunu üstlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın inceleme ve değerlendirme aşamasında yapmış oldukları değerli katkılardan dolayı editör, hakem ve emeği geçenlere içten teşekkür ederim.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Yazarlar eşit katkı sağlamışlardır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Gülcan, O. "Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri". *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 19(1), 17-34, (2021).
- [2] Gülcan, O., Şimşek, U., Özdemir, M., Günaydın, K., Tekoğlu, E. "Üretim parametrelerinin, lazer toz yatağı füzyon yöntemi ile üretilen kafes yapıların çarpılma, boyutsal değişim ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1), 101-112, (2024).
- [3] Erdoğan, İ., Toktaş, İ. "geometri iç kalınlığının yeni tasarlanan ökzetik yapı üzerine etkisinin araştırılması". *Politeknik Dergisi*, 26(2), 901-912, (2023).
- [4] Şahin, İ., Top, N., Gökçe, H. "Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ökzetik kafes yapıların tasarımı, 3b baskısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi". Gazi Üniversitesi Araştırma Projesi, (2023).
- [5] Baran, E. "Hafif çelik binalarda kullanılan kafes kirişli döşeme sisteminin incelenmesi". Orta Doğu Teknik Üniversitesi, (2016).
- [6] Zhang, X. Z., Leary, M., Tang, H. P., Song, T., Qian, M. "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges". *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 22(3), 75-99, (2018).
- [7] Rosa, F., Manzoni, S., & Casati, R. "Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting", *Materials & Design*, 160(15), 1010-1018, (2018).
- [8] Korkmaz C, Kacar İ. "Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları için optimum eleman ağ yapısının belirlenmesi", 7 January 2022, Editör: Deniz Yılmaz; Osman Gökdoğan; Önder Uysal; Mehmet Emin Gökdoğan; Ahmet Süslü, *Tarım Mekanizasyonu ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar*. ISBN: 978-625-8037-52-4, (2022).
- [9] Yılmaz, C., Kacar, İ. "Farklı en/boy oranına sahip dörtgen kesitli bir kiral ökzetik hücresel yapının tasarım ve optimizasyonu". *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(23), 265-282. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1440934> (2024).
- [10] Bostancıoğlu, Y., Kacar, İ. "Bir kiral kafes yapının tasarım ve optimizasyonu". *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8(2), 202-213, (2024).
- [11] Söke, A. Bingül, Z. "Genetik algoritmaların farklı çaprazlama teknikleriyle iki boyutlu kesme problemlerine uygulanışı". *Politeknik Dergisi*, 7(1), 1-11, (2004).
- [12] Ergene, B. Yalçın, B. "Çatlağın re-entrant ve balpeteği yapıların mekanik davranışlarına etkisinin sonlu eleman analizi". *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1015-1025, (2020).
- [13] Yumuşak, S. Layazalı, S. Öztoprak, K. Hassanpour, R. "Hiperküp tabanlı konu dağıtım ağlarında yeni bir katman tasarımı algoritması". *Politeknik Dergisi*, 25(4), 1535-1552, (2022).
- [14] Taşkesiği, S. Güray, E. "Düzlemsel kafes tipi köprülerin gradyan düşüş yöntemiyle şekil ve boyut optimizasyonu". *Politeknik Dergisi*, 26(1), 293-301, (2023).
- [15] Balta, S. Özbaşaran, H. "Kafes sistemlerin imalat kısıtları altında bilgisayar ile otomatik tasarımı". *Politeknik Dergisi*, 27(5), 1697-1707, (2024).
- [16] Erdoğan, H. "Negatif Poisson oranındaki stent tasarımının üç katmanlı arter ve asimmetrik plak yapısına göre statik analiz". *Politeknik Dergisi*, 27(5), 1673-1680, (2024).
- [17] Demir, H. Kaya, N. "Bir hava aracının çok amaçlı kanat giriş kesit optimizasyonu". *Politeknik Dergisi*, Erken Görünüm, (2024).
- [18] Keleşoğlu, Ö. Ülker, M. "Çok amaçlı bulanık optimizasyon tekniği ile düzlem kafes sistemlerin boyutlandırılması". *Politeknik Dergisi*, 6(2), 505-511, (2003).
- [19] Park K-M, Min K-S, Roh Y-S. "Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements". *Materials*, 15(1), 97-102, (2022).
- [20] Fernandes RR, Tamijani AY. "Design optimization of lattice structures with stress constraints". *Materials and Design*. 210(110026), (2021).
- [21] Gibson, L. J., Ashby, M. F. "Cellular solids: Structure and properties" (2nd ed.). Cambridge University Press, (1997).
- [22] Wang, C., Zhang, X., Zhang, Y. "Additive manufacturing of cellular Materials: Design, simulation, and experimentation". *Materials & Design*, 192(108675), (2020).
- [23] Zhang, X. Z., Leary, M., Tang, H. P., Song, T., & Qian, M. "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 22(3), 75-99, (2018).