



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

BİR KİRAL KAFES YAPININ TASARIM VE OPTİMİZASYONU

DESIGN AND OPTIMISATION OF A CHIRAL LATTICE STRUCTURE

Yazarlar (Authors): Yusuf Bostancıoğlu , İlyas Kacar 

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bostancıoğlu Y., Kacar İ., "Bir Kiral Kafes Yapının Tasarım ve Optimizasyonu" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(2): 202-213, (2024).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1452986

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

BİR KİRAL KAFES YAPININ TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Yusuf Bostancıoğlu^a, İlyas Kacar^a

^aNiğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE

*Sorumlu Yazar: ikacar@gmail.com

(Geliş/Received: 14.03.2024; Düzeltme/Revised: 06.07.2024; Kabul/Accepted: 17.07.2024)

ÖZ

Kiral kafes yapıları zikzak şeklinde kübik hücrelerin üst üste ve yan yana çoğaltılmasıyla oluşturulan ökzetik davranışa sahip yapılardır. Bu çalışmada bir kiral kafes yapının tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Malzeme Ti-6Al-4V titanyum alaşımıdır. Kafes yapının ayırıt kesiti daireseldir. Yapısal analiz için sonlu eleman esaslı simülasyon yapılmıştır. Simülasyonda yapı bir ucundan ankastre bağlantı ile mesnetlenmiştir. Yük olarak da yapının serbest ucuna eksenel yer değiştirme uygulanmıştır. Simülasyon sonunda gerilme, deformasyon, enerji, Poisson oranı elde edilmiştir. Bu parametreler ve kafesin boyutları, uygulanan yük değerleri genetik algoritma esaslı optimizasyona tabii tutulmuştur. Optimizasyonda minimum boyut ile maksimum dayanımın elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak optimum değerler elde edilmiş ve parametrelerin birbirleri ile ilişkilerini veren cevap yüzey fonksiyonları sunulmuştur. Buna göre ayırıt kesitin yarıçapı 1 mm olduğunda yapı 0,12 mm yer değiştirmeye dayanmaktadır. Bu durumda yapı içerisinde 266,05 MPa değerinde çekme ve 233,34 MPa değerinde basma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu değerler yapının akma dayanımının altındadır. Bu hâli ile yapının kütlesi 0,4549 g değerindedir.

Anahtar Kelimeler: Sonlu Elaman Simülasyonu, Kompozit Panel, 3D Kiral Ökzetik Çekirdek, Optimizasyon, Yapısal Analiz

DESIGN AND OPTIMISATION OF A CHIRAL LATTICE STRUCTURE

ABSTRACT

Chiral lattice structures have euxetic behaviour, which are manufactured by replicating zigzag-shaped cubic cells on top of each other and side by side. In this study, a chiral lattice structure is designed and optimised. The material is Ti-6Al-4V titanium alloy. The cross-section of the lattice structure is circular. Finite element based simulation is used for structural analysis. In the simulation, the structure is fix-supported at one end. As load, axial displacement is applied to the free end. Stress, deformation, energy, and Poisson's ratio are obtained at the end of the simulation. These parameters, lattice dimensions, and the applied load are subjected to genetic algorithm-based optimisation. In the optimisation, it is aimed to obtain maximum strength with minimum size. As a result, optimum values are obtained and response surfaces giving the relationship between the parameters are presented. When the cross-section radius is 1 mm, the structure withstands a displacement of 0.12 mm. In this case, tensile stresses of 266.05 MPa and compressive stresses of 233.34 MPa occur in the structure. These values are below the yield strength of the structure. In this state, the mass of the structure is 0.4549 g.

Keywords: Finite Element Simulation, Composite Panel, 3D Chiral Euxetic Core, Optimization, Structural Analysis

1. GİRİŞ

Tasarım konusunda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, yüksek verimli ve düşük maliyetli titreşim sönümlenme sistemleri geliştirmektir. Mevcut malzemelerin sönümleyebileceği frekans aralığı geniş değil ayrıca yüksek sönümlenme performansı da gösterememektedir.

Bu probleme bir çözüm olarak, yapı içerisine iyi titreşim dayanımı özelliğine sahip katkı malzemeleri eklenmektedir. Kiral kafes yapılar sadece moleküler kimyada karşılaşılan bir konu olmayıp mekanik tasarım esnasında da kullanılan yapılardır. Meriam sözlüğüne göre "ayna görüntüsü üzerine bindirilemeyen bir moleküle ait veya onunla ilgili" olarak tarif edilmiştir [1]. Kiralite türüne göre çeşitli zikzak yapılar mevcuttur [2]. Dolayısıyla yukarıda bahsedilen problemi ortadan kaldırılmak için kirale kafes yapılardan yararlanmak bir çözümdür [3]. Ökzetik kelimesi ise negatif Poisson oranı anlamına gelmektedir. Kirale kafes yapılar ökzetik davranabilmektedir. Bu özellikleri sayesinde Kirale yapılar, istenen deformasyon özelliklerine sahip olacak biçimde tasarlanabilmektedir.

Kirale yapıların deneme yanılma yolu ile seçimleri zahmetli, maliyetli ve zaman alıcı bir işlemdir. Artan rekabetçi piyasada üretim sektörü için optimum faydayı yakalamak önemlidir. Bu nedenle tasarım alanında optimizasyon kullanılması, optimizasyonların sonlu eleman simülasyonları ile birlikte yapılması bir yaygın mühendislik pratiğidir. Optimizasyon, tasarımcı tarafından belirlenen amaç ve ceza fonksiyonlarını sağlayan değişkenleri tespit etme sürecidir [4]. Bu bağlamda sıklıkla sonlu eleman yöntemi esaslı yapısal simülasyonlar kullanılmaktadır. Statik analiz, cisimlerin statik yük altındaki davranışlarını, oluşan gerilmeleri ve deformasyonları incelemektedir. Statik, fizik biliminin dengede duran mekanik sistemlerle ilgilenen dalıdır [5]. Statik analiz, mühendislerin veya tasarımcıların, bir ekipmanın veya yapının, dayanması beklenen yükler altında güvenli olduğundan emin olmalarını sağlamaktadır [6]. Simülasyon, Latince kökenli bir kelime olup "taklit, benzer" anlamına gelmektedir [7]. Statik yapısal simülasyon sayesinde, herhangi bir yapının üzerine binmiş yükün sonucunda yapının durumu elde edilebilmektedir [8].

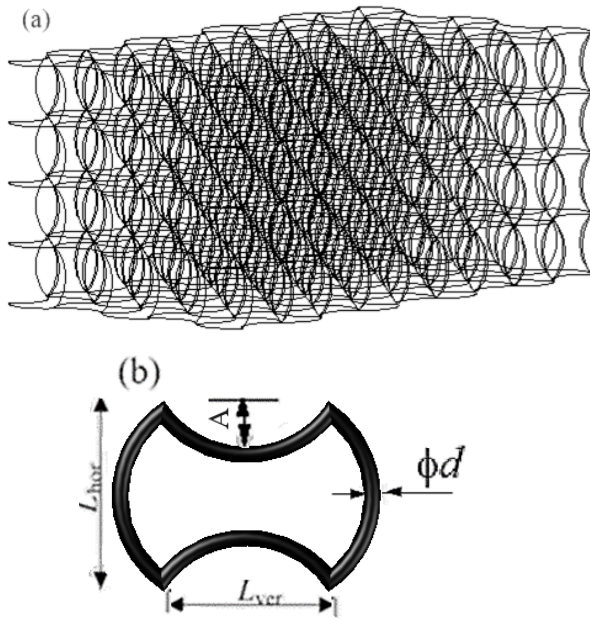
Ha ve ark. (2016) kirale üç boyutlu kübik kafesleri, rijit kübik modüller halinde oluşturmuş ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmişlerdir. Kafesler, geometriye bağlı olarak negatif değerler alabilen Poisson oranına sahiptirler. Poisson oranı, küpler birbirinden uzaklaştıkça sifıra doğru yaklaşmaktadır. Kafeslerde aksel gerilme neticesinde eğilme deformasyonu oluşmaktadır. Bu tür bir durum klasik sürekli ortam mekaniğinde meydana gelememekte ancak kirale bir Cosserat katısında meydana gelebilmektedir [9]. Barad ve ark. (2023) havacılık uygulamaları için mekanik yapıların tasarımında dayanım-ağırlık oranını en üst düzeye çıkarmayı ve yapının titreşim cevabını mümkün olduğunca azaltmayı, böylece gerilmelerin dayanıklılık sınırının çok altında olmasını amaçlamışlardır. Kirale kafes yapılarındaki önceden ayarlanabilen deformasyon şekilleri sayesinde yapıdaki sönümlenme artırılabilmiştir. Bu sayede söz konusu yapılar, yararlandıkları sahada yapının genel titreşim tepkisini azaltmak için bir titreşim emici olarak kullanılmıştır. İçerisinde kirale bir kafes bulunan basit bir konsol giriş ele alınarak titreşim tepki karakteristiğini anlamak amacıyla geometrik tasarım, parametrik hale getirilmiştir. Optimizasyon sayesinde uygun boyutlar tespit edilmiştir [10].

Yukarıda verilen literatür taramasından anlaşılacağı üzere, sağladıkları yararlar nedeniyle kirale kafes sistemleri yapısal tasarım alanında kullanılmaktadır. Optimizasyon ise tasarımcıların vazgeçilmez araçlarından biridir. Ancak kirale yapıların optimizasyonu ile ilgili çalışmaların sayısının az olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın amacı, bir burkulma moduna karşılık gelen şekle sahip kübik birim hücrelerden oluşan bir kirale kafes yapının optimum boyutlarının, sonlu eleman analizi esaslı yapısal simülasyon ve genetik algoritma esaslı optimizasyon ile belirlenmesidir. Cevap yüzey fonksiyonu, parametrelerin birbiri ile olan ilişkilerini veren fonksiyon olup bu çalışmada tek gizli katmanlı, üç hücreli yapay sinir ağı yöntemi ile tespit edilmiştir. Cevap yüzey fonksiyonu sayesinde de parametreler arası lokal ilişkiler tespit edilmiştir. Tasarım noktalar kümesi Latin hiperküp ve cevap yüzey fonksiyonu ise Kriging yöntemleri ile oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın literatüre katkısı şöyledir: Kiral kafes yapının optimum boyutları tespit edilmiş ve parametrelerin birbirleri ile olan ilişkilerini veren cevap yüzey fonksiyonları sunulmuştur. Çalışmanın özgün yönü, bir yapısal kiral kafes yapı tasarımıdır. Bu konu ile ilgili olarak açık Türkçe literatürde çok az makale mevcuttur. Bu makale ile Türkçe literatüre kiral yapı tasarımına ilişkin yöntemler sunulmaktadır.

2. MATERYAL ve METOD

Şekil 1 (a)'da bu çalışmada kullanılan kiral kafes geometrisi gösterilmiştir. Bu tür kiral kafes biçimlerine, kübik kafes yapı denmektedir. Kiral hüresel yapıya sahip özketik bu yapının birim hüresinin şekli, Körner ve Liebold-Ribeiro (2015) tarafından ilk olarak tanıtılan ve Warmuth ve Körner (2015), Wormser vd. (2017), ve Warmuth vd. (2017) tarafından daha ayrıntılı olarak incelenen bir düzenli kübik birim hücrenin 10. burkulma moduna karşılık gelmektedir [11-14]. Eleman, yapının ayrıklaştırılması sonucunda oluşan birim parçaya verilen addır. Düğüm noktası ise oluşan her elementin köşe noktalarıdır. Birim hücre geometrisi Şekil 1 (b)'de tanımlanmıştır.



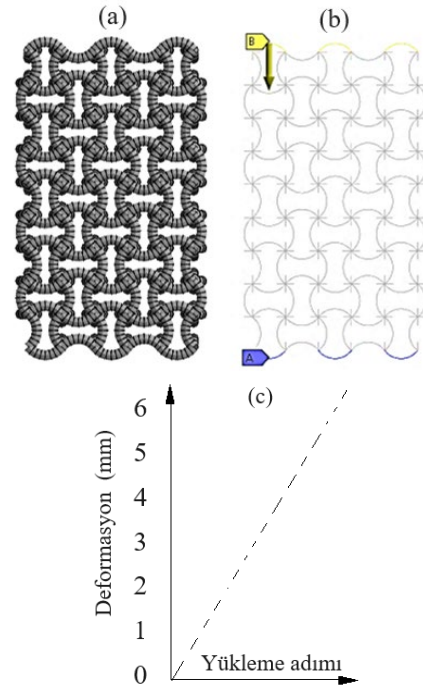
Şekil 1. Çalışmada kullanılan (a) kiral kafes yapı ve (b) birim hücre boyutları.

Kafesteki eğrisel çubuklar, düğüm noktalarında birleşen sinüs dalgası biçimindedir. Birim hücre geometrik parametreleri şu şekildedir: Dikey (L_{ver}) ve yatay (L_{hor}) yönlerde ardışık iki düğüm arası mesafe, eğri biçimli çubuğun genliği (A) ve kesit çapı (d) olmak üzere tüm yapı $9 \times 4 \times 5$

adet birim hücreli olup $L_{ver} = L_{hor} = 2$ mm, $A = 0,5$ mm değerindedir. Katmanlar arası mesafe 2 mm değerindedir. Başlangıçta $d = 0,6$ mm olup bu hali ile tüm yapı $886,14$ mm³ hacme ve 4,094 g kütleyle sahiptir. Malzeme olarak Ti-6Al-4V alaşımı kullanılmıştır. Malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri.

Özellikler	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	4620
Termal genleşme katsayısı (1/°C)	9,4e-006
Özgül ısı (J/kg°C)	522
Termal iletkenlik (W/m°C)	21,9
Direnç (ohm.m)	1,7
Basmadaki maksimum dayanım (MPa)	1070
Basmadaki akma dayanımı (MPa)	930
Çekmedeki akma dayanımı (MPa)	930
Çekmedeki maksimum dayanım (MPa)	1070
Elastisite modülü (GPa)	96
Poisson oranı	0,36
Bulk modülü (GPa)	11,429
Kayma modülü (GPa)	35,294



Şekil 2. Yapının (a) FE modeli ve (b) uygulanan yük ve sınır şartları (c) 0-6mm arasında rampa şeklinde yer değiştirme.

Simülasyonlar ANSYS© programı kullanılarak yapılmıştır [15]. Oluşturulan geometriye uygulanan yük, sınır şartları ve cismin sonlu eleman modeli, eleman ağı sonunda kiral yapının dairesel kesitli hâli Şekil 2'de görülmektedir. Yük olarak deplasman ve sınır şartı olarak ankastre mesnet uygulanmıştır. Son

olarak da eleman ağı oluşturmak üzere ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıklaştırma için lineer şekil fonksiyonuna sahip tam integrasyon formüllü giriş elemanlar kullanılmıştır. En uygun bölüntüleme sayısını (minimum eleman ile maksimum hassasiyetin elde edildiği kritik sayıyı) belirlemek üzere ağdan bağımsızlık analizi yapılmıştır. Buna göre 10816 adet eleman sayısı optimum olarak tespit edilmiştir. Bu eleman sayısında yapıda 20580 adet düğüm noktası oluşmaktadır.

Ağın kalite ölçütlerinden biri çarpıklık olup maksimum ve ortalama değerleri sıfır olmuştur. Ortogonal kalite ise 1'dir. Korkmaz ve Kacar (2022) kalite ölçütlerini şu biçimde tariflemiştir [16]: "Çarpıklık (skewness) değeri [0,1] arasında değişir. Max skewness<0,90...0,94 olması gerekir. Bu değer ne kadar küçük olursa veya sıfıra ne kadar yakın ise ağ kalitesi açısından o kadar iyidir. Kalite aralığı ideal ağ elemanı geometrisinden sapma ölçüsü olarak değerlendirilir. Ortogonal kalite, ağ elemanı yüzeylerinin orta noktasının merkezine olan uzaklığının, komşu mesh eleman yüzeylerinin orta noktalarında birbirine olan uzaklığa oranıdır. En küçük değerine bakılarak değerlendirme yapılır. En küçük değer > 0,1...0,15 olması istenir. En/boy oranı ise ağ elemanı uzun kenar uzunluğunun kısa kenar uzunluğuna oranıdır. İdeal bir ağ elemanında bu oran 1 dir. Bu orandan uzaklaştıkça ağ kalitesi düşer. En büyük en/boy oranına göre kalite değerlendirmesi yapılır. Bu değer 20' den büyük olması istenmez."

Optimizasyon için ise sırasıyla şu adımlar takip edilmiştir. Öncelikle değişkenler parametrik hâle getirilmek üzere program içerisinde seçilmiştir. Giriş ve çıkış değişkenleri olmak üzere iki farklı değişken türü mevcuttur. Değişkenler parametrik hâle getirildikten sonra kullanıcı tarafından değiştirilememekte, ancak parametrelerin alt üst sınırları belirtilerek bu aralık içerisinde istenen adette tasarım noktası (DP) oluşturulabilmektedir. Giriş değişkenlerinin başlangıçtaki alt ve üst sınır değerleri ile çıkış değişkenleri Çizelge 2 'de verilmiştir. Çizelgede, çıkış değişkenlerinin sadece hangileri olduğu belirtilmiştir. Ancak bunlar, giriş değişkenlerinin değerlerine göre hesaplanacak olan değerlerdir. Giriş değişkenleri ise tek değer olmayıp, her biri, birer aralıkta değiştiği için, karşılık gelen çıkış değişkenleri de farklı farklı olacaktır. Çıkışların

neler olacağı, hangi aralıkta olacağı, henüz optimizasyon yapılmadan bilinmemektedir. Optimizasyon sonunda elde edilecek bilgilerden biridir. Bu nedenle Çizelge 2 içerisinde verilememiştir. Çıkış değişkenlerinin değerleri (aralığı) Şekil 6'daki cevap yüzey fonksiyonunda verilmiştir.

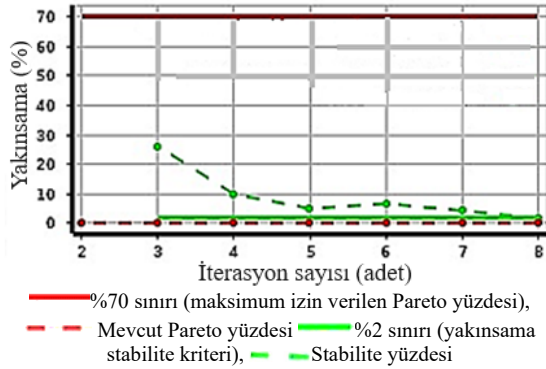
Çizelge 2. Parametrelerin alt ve üst sınırları.

Giriş değişkenleri	Başlangıç	Alt sınır	Üst sınır
Çap (mm)	0,6	0,1	1,0
Yer değiştirme (mm)	6,0	-6,0	6,0
Çıkış değişkenleri			
Gerilme (MPa)	--	--	--
Poisson oranı	--	--	--
Yanal daralma (mm)	--	--	--

DP noktaları oluşturulması için Latin hiperküp örnekleme yöntemi kullanılmış ve 200 adet DP oluşturulması sağlanmıştır. Bütün DP noktalarının çözülebildiği görülmüştür. Cevap yüzey fonksiyonu tek gizli katmanlı, üç hücreli yapay sinir ağı sayesinde tespit edilmiştir. Cevap yüzeyi fonksiyonu eğri uydurma esaslı fonksiyonlar olup değişkenlerin birbiri ile ilişkilerini vermektedir. Amaç fonksiyonu olarak minimum ayırıt kesit ve maksimum dayanım şartları girilmiştir. Optimizasyon için çok amaçlı çok kısıtlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılmıştır. MOGA yöntemi kontrollü elitizm kavramlarına dayanan popüler NSGA-II'nin (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) bir çeşididir. Çoklu hedefleri, kısıtlamaları desteklemekte ve global optimumun bulunmasını amaçlamaktadır. Her iterasyonda 400 örnek olmak üzere 2000 örnek üretilmiş ve maksimum 8 iterasyon sonunda 3 aday bulunmuştur. 4039 değerlendirmeden sonra yakınsama gerçekleşmiştir. Yakınsama grafiği Şekil 3'te verilmiştir.

Optimizasyonda temel amaç(lar), hafif ve dayanıklı bir yapı elde etmektir. Bu çalışma içerisinde yer yer "minimum boyut", "minimum yarıçap" ve "minimum kafes boyutu" ifadeleri kullanılmıştır. Bunların hepsi "hafif bir yapı" amacına götüren tek bir parametreye işaret etmektedir. O da çap değeridir. Zira bu çalışmada kafes boyutlarından sadece "çap" değeri parametrik hâle getirilmiştir.

Benzer olarak, "dayanım sınırını aşmadan deformasyonu artırmak", "maksimum dayanım" ve "gerilmenin akma sınırının altında kalması" ifadelerinin tamamı da "dayanıklı bir yapı" amacına hizmet eden tek bir parametredir, o da "yer değiştirme" parametresidir. Zira bu çalışmada "dayanım-gerilme-yük" ile ilişkili tek parametrik değişken "yer değiştirme" değeridir. Yer değiştirme arttıkça yapıda gerilme artmaya başlar ve bir sınır değerinde hasar başlar. Hasar başlamadan önce, gerilmenin çıkabileceği en yüksek değere ulaşmak için uygulanacak en fazla yer değiştirme elde edilirse, o zaman "dayanıklı bir yapı" amacına ulaşılmış olacaktır.



Şekil 3. Optimizasyon esnasında genetik algoritmanın yakınsama grafiği.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Gerilme Deformasyon sonuçları

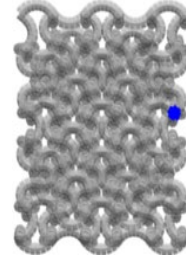
Başlangıçta kiral yapının bir ucu ankastre mesnetlenirken diğer ucundan Z eksenini doğrultusunda 6 mm değerinde basma türünde yer değiştirme (deplasman) uygulanmıştır. Yer değiştirme rampa şeklinde 0-6 mm arasında uygulanmaktadır. Her bir analiz 20 GB RAM ve 1,3 GHz 8 çekirdekli bir bilgisayar ile 14 sn sürmüştür. Hesaplamaya dair istatistiksel bilgiler Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Çözüme dair hesaplama bilgileri.

Özellikler	Değer
Hesaplama süresi (s)	14
Kullanılan bellek (MB)	623
Sonuç dosyası boyutu (MB)	23,875

Henüz optimizasyon yapılmadan önce başlangıç değerleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucunda aksel doğrultuda 6 mm basma yer değiştirmesi uygulanmıştır. Başlangıç değerleri ile yapılan analiz sonucunda aksel doğrultuda 6,0185 mm toplam deformasyon oluşmuştur. Yanal deformasyon ise -0,62728 mm olarak elde edilmiştir. Yanal daralmanın ölçüldüğü nokta

ve daralmış geometri Şekil 4'te verilmiştir. Aksel doğrultuda basma uygulandığında, yanal doğrultuda şişme beklenirken daralma olması, ökzetik davranış nedeniyledir.



Şekil 4. Poisson oranı nedeni ile oluşan yanar deformasyonun ölçüm noktası.

Poisson oranı Denklem (1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\nu = -\frac{\epsilon_{yanal}}{\epsilon_{eksenel}} \quad (1)$$

Burada ν Poisson oranı olup birimsizdir. ϵ_{yanal} ve $\epsilon_{eksenel}$ ise sırasıyla yanar ve aksel doğrultulardaki şekil değiştirmelerdir. Denklem (2) ile hesaplanmaktadır. Birimsizdir.

$$\epsilon_{yanal} = \frac{L_{son} - L_{ilk}}{L_{ilk}} \quad (2-a)$$

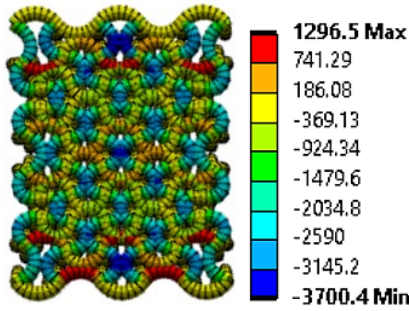
$$\epsilon_{eksenel} = \frac{H_{son} - H_{ilk}}{H_{ilk}} \quad (2-b)$$

Burada L_{ilk} ilk genişlik, L_{son} genişlik, H_{ilk} tüm yapının ilk boy ve H_{son} ise son boydur. Uzunluk birimindedir.

Kafes yapıda ölçüm yapılan noktadaki yanar ilk genişlik 10,198 mm olup tüm yapının aksel genişliği ise 19,002 mm'dir. Bu durumda yanar şekil değiştirme $\epsilon_{yanal} = \frac{-0,62728 \text{ mm}}{10,198 \text{ mm}} = -0,0615101$ olmaktadır. Aksel şekil değiştirme ise $\epsilon_{eksenel} = \frac{-6 \text{ mm}}{19,002 \text{ mm}} = -0,31576$ olmaktadır. Sonuçta Poisson oranı $\nu = -\frac{\epsilon_{yanal}}{\epsilon_{eksenel}} = -\frac{-0,0615101}{-0,31576} = -0,1948$ olmaktadır. Poisson oranının negatif çıkması, yapının ökzetik davranışını göstermektedir.

Şekil 5'ten görüldüğü gibi yapıda -3700,4 MPa basma gerilmesi ve 1296,5 MPa çekme gerilmesi oluştuğu görülmektedir. Basma gerilmelerinin dikey çubuklarda çokça oluştuğu, yatay çubuklarda ise çekme gerilmelerinin oluştuğu görülmektedir. Yapıya aksel basma yer değiştirmesi uygulanmasına rağmen yer yer basma veya çekme gerilmesinin

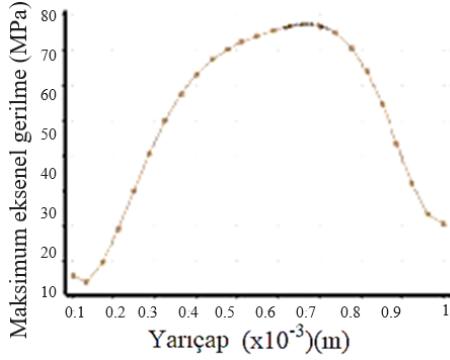
oluşması kiral yapıdan beklenen bir durumdur. Kullanılmış olan malzeme titanyum alaşımı olup basmadaki akma gerilmesi 930 MPa, çekmedeki akma gerilmesi 930 MPa ve maksimum akma gerilmesi 1070 MPa değerlerine sahiptir. Analizde malzeme davranışı lineerdir. Bu nedenle gerilmenin maksimum değeri, akma sınırını geçmiştir. Akma sınırının altında kalacak en büyük gerilme değerinin tespiti amacıyla optimizasyon yapılmıştır.



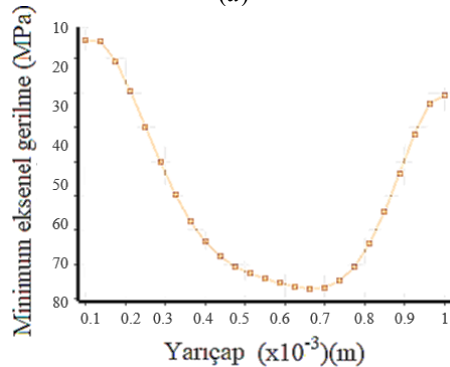
Şekil 5. Aksel gerilme değerleri (MPa).

3.2. Parametreler arasındaki ilişkiler

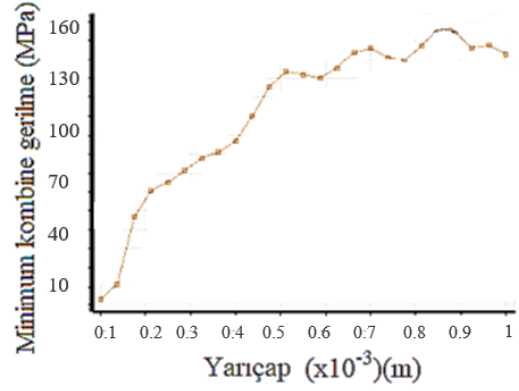
Kiral kafes yapıların tasarımında parametrelerin birbirleriyle ilişkileri önemlidir. Yapılan tasarımda bu ilişkiler cevap yüzey fonksiyonu ile elde edilmiş ve Şekil 6'da her bir giriş parametresinin, çıkış değişkenleri üzerindeki etkisi verilmiştir.



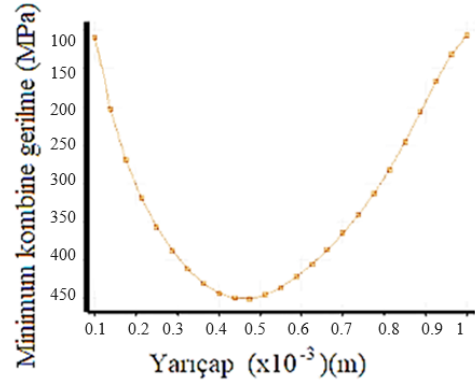
(a)



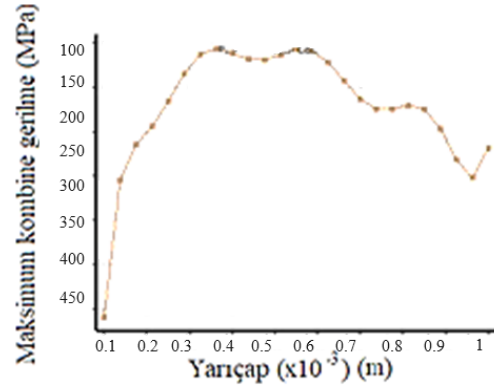
(b)



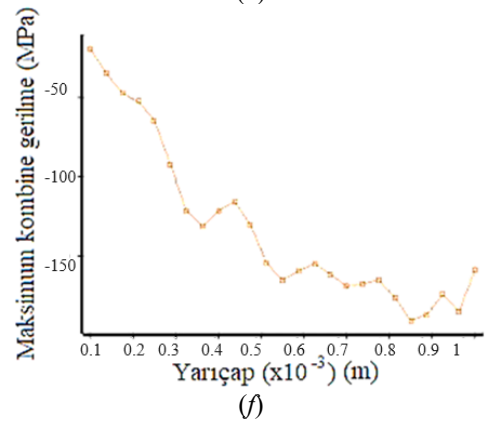
(c)



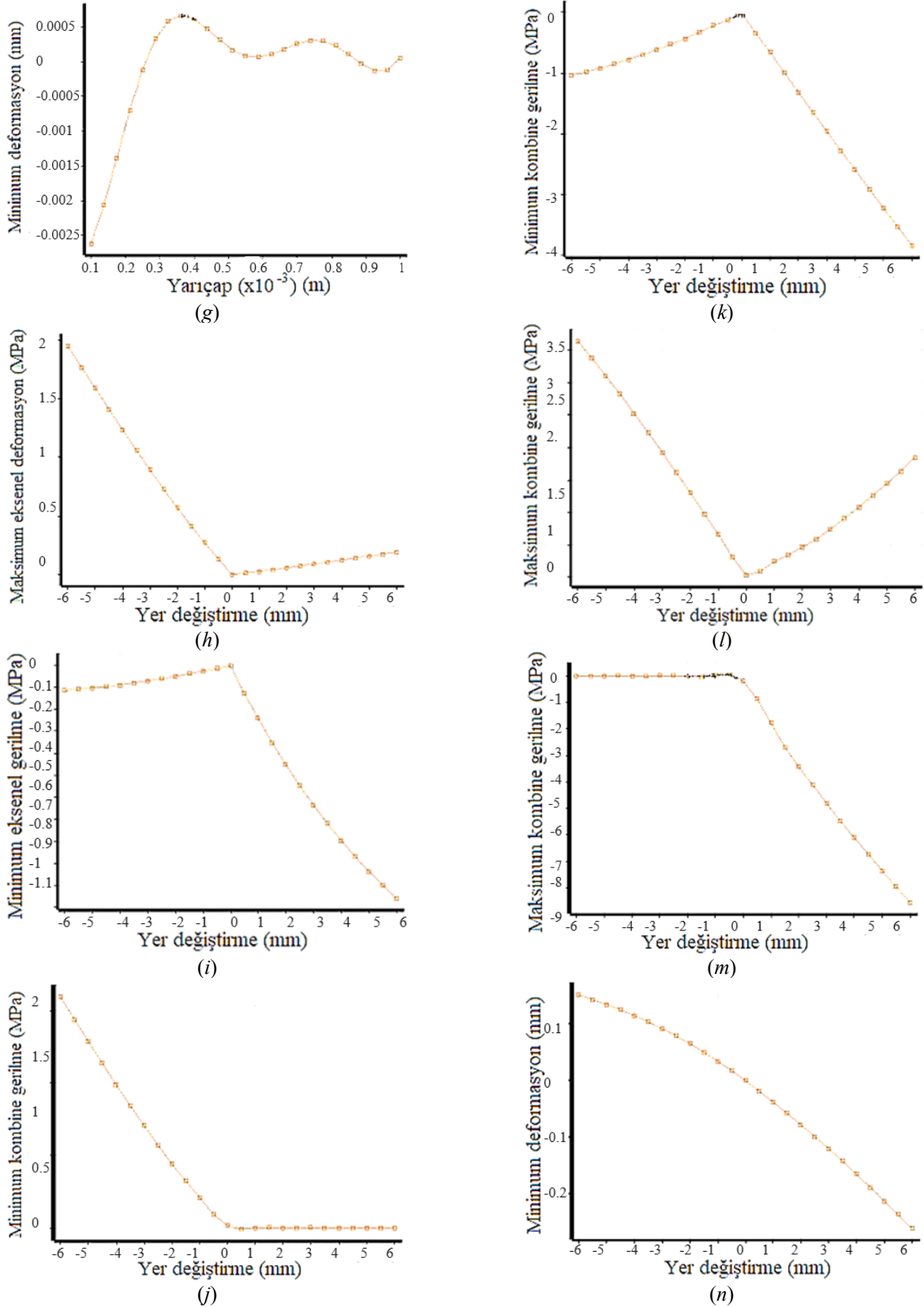
(d)



(e)



(f)



Şekil 6. Cevap yüzey fonksiyonundan elde edilen parametrik ilişkiler.

Şekil 6a ve 6b'de görüldüğü üzere yarıçap değeri 0,65 mm olduğunda gerilme değeri 80 MPa değerine ulaşmakta 0-0,65 mm aralığında yükselişte, 0,65-1 mm aralığında azalıştır. Şekil 6c'de minimum kombine gerilmenin maksimum değeri görülmektedir. Yarıçap [0,1-1] mm arasında 160 MPa değerine ulaşmaktadır. Genel olarak arttığı görülmektedir. Şekil 6d'de minimum kombine gerilmenin minimum değerine ait eğri görülmektedir. Yarıçap değeri [0,1-0,45] mm arasında -100 MPa ile -450 MPa gerilme değişimine yol açmaktadır. [0,45-1] mm değerleri arasında yükseliş görülmektedir. Şekil 6e'de maksimum kombine gerilmenin maksimum değerine ilişkin grafik görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 700 MPa olup başlangıçta artış izleyen bu değer 0,6 mm yarıçap değerinden sonra düşüşe başlamaktadır. Şekil 6f'de maksimum kombine gerilmenin minimum değerine ait grafik görülmektedir. Minimum gerilme değerinin -200 MPa değerine yaklaşmış olduğu görülmektedir. Şekil 6g'de minimum deformasyon değerinin 0,35 mm yarıçap değerine kadar bir artış izlediği daha sonra yavaş yavaş bir denge noktasına doğru dalgalanma yaptığı görülmektedir. Şekil 6h maksimum eksenel gerilme-yer değiştirme grafiğidir. Yer değiştirme -6 ile 6 mm arasında değişkenlik gösterirken, gerilme değeri -6 mm ile 0 mm arasında 2 MPa ile 0 MPa arasında düşüş göstermektedir. 0 mm ile 6 mm arasında gerilme yaklaşık olarak 0,25 MPa değerine kadar ulaşmaktadır. Şekil 6i'de minimum eksenel gerilme-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Bir önceki grafiğin benzeridir. Şekil 6j'de minimum kombine gerilme-yer değiştirme grafiği ve Şekil 6m'de maksimum kombine gerilme-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Minimum kombine gerilme grafiğinde -6 mm ile 0 mm arasında bir düşüş yaşanırken 0 mm ile 6 mm arasında gerilme değeri 0 MPa olarak sabit kaldığı görülmektedir. Maksimum kombine gerilme grafiği ise -6 mm ile 0 mm arasında sabit 0 MPa olarak sabit kalırken 0 mm ile 6 mm arasında -8 MPa değerine kadar düşüş olduğu görülmektedir. Şekil 6k'da minimum kombine gerilme-yer değiştirme ve Şekil 6l'de maksimum kombine gerilme-yer değiştirme grafikleri görülmektedir. Minimum kombine gerilme -6 mm ile 0 mm arasında -1 MPa ile 0 MPa arasında yükselmekte olup 0 mm ile 6 mm arasında -4 MPa değerine kadar düşüş

görülmektedir. Maksimum kombine gerilme -6 mm ile 0 mm arasında 3,5 MPa ile 0 MPa arasında düşüş izlerken 0 mm ile 6 mm arasında 2 MPa değerine kadar yükseldiği görülmektedir. Şekil 6n'de minimum deformasyon-yer değiştirme grafiği görülmektedir. Eksenel deformasyon -6 mm ile 6 mm arasında iken yanal deformasyon 0,2 mm ile -0,2 mm arasındadır. Gerilmelerdeki (-) işareti basma ve (+) ise çekme gerilmelerini ifade etmektedir.

Cevap yüzey fonksiyonunun iyilik derecesini ifade etmek için hata ölçütleri ve korelasyon katsayısı, determinant katsayısı kullanılmaktadır [17, 18]. Ek sık kullanılan hata ölçütleri şunlardır: MSE hataların karelerinin ortalaması, RMSE değeri MSE'nin karekökü, MAE mutlak hatanın ortalaması ve MAPE ise mutlak hatanın ortalamasının yüzdesidir. MSE (birim²), RMSE (birim), MAE (birim) ve MAPE (birim) değerlerinin sıfıra yakın olması hata değerlerinin azlığını göstermektedir. Ayrıca regresyon analizleri de modellerin iyiliklerini belirleme araçlarından biridir. R^2 ise determinat katsayısı olup [1,-1] arasında değerler alabilmektedir, birimi yoktur. R (veya R^2) değerlerinin pozitif 1'e yakın olması, fonksiyon kestirimi ile ham veri arasında yüksek doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Negatif 1'e yakın değerler yüksek doğrusal ters bir ilişki olduğunu göstermektedir. Sıfıra yakın değerler ise herhangi bir ilişki olmadığı anlamına gelmektedir. İyilik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere oluşturulan cevap yüzey fonksiyonu, çok yüksek pozitif korelasyona sahiptir. Fonksiyon ile veri arasındaki hata ise oldukça ufaktır. Her iki durum da cevap yüzey fonksiyonunun tahminlerinin güvenilir olacağına işaret etmektedir [18].

Çizelge 4. Cevap yüzey fonksiyonunun iyiliği.

Parametreler	R^2	RMSE (birim)	MAE (birim)
Toplam deformasyon (mm)	0,9999	0,00239	8,5094e-5
Gerilme (MPa)	0,9999	70,097e-6	4,7587e-6

3.3. Optimum değerler

Optimizasyon modülü, Çizelge 5'te gösterildiği gibi üç optimumu, aday nokta olarak önermiştir.

Çizelge 5. Önerilen üç optimum aday nokta.

Değişkenler	Aday nokta 1	Aday nokta 2	Aday nokta 3
Yarıçap (mm)	0,99348	0,99331	0,99157
Eksenel yer değiştirme (mm)	-0,1068	-0,1142	-0,1195
Gerilme (MPa)	-282,23	-290,62	-299,92
Poisson oranı	-0,181	-0,181	-0,187
Yanal daralma (mm)	-0,0116	-0,0117	-0,012

Optimizasyon ile tespit edilen aday noktalar aslında cevap yüzeyindeki fonksiyon kullanılarak elde edilen değerlerdir. Ayrıca, simülasyonda yeniden analiz edilerek doğrulanmışlardır. Doğrulmaları Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Aday noktaların doğrulanması.

Değişkenler	Aday nokta 1	Aday nokta 2	Aday nokta 3
Yarıçap (mm)	0,99348	0,99331	0,99157
Eksenel yer değiştirme (mm)	0,10688	0,11421	0,11959
Gerilme (MPa)	-208,02	-222,17	-232,33
Poisson oranı	-0,184	-0,186	-0,187
Yanal daralma (mm)	-0,0118	-0,0119	-0,012

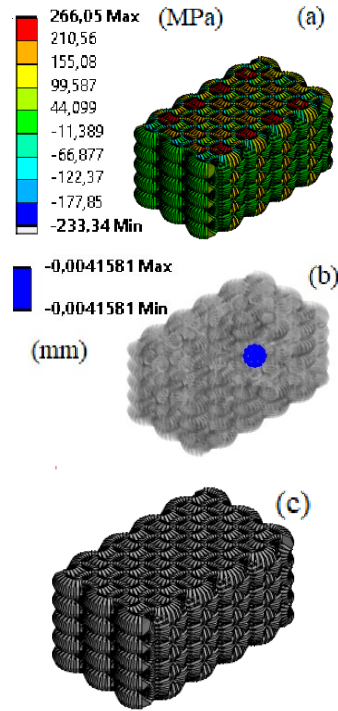
Optimizasyonla hesaplanan geometrik boyutlar, mevcut geleneksel imalat makinelerinin tolerans aralığının dışında kalan 0,99157 mm gibi pek çok kusur içerir. Bu nedenle bunların üretimi günümüz imalat yöntemleri ile mümkün değildir. Üretilebilir değerler, kusur azaltmak için boyutların üst değerlere yuvarlanmasıyla elde edilmektedir. Bu bağlamda 1 mm değerine sahip bir yarıçapın üretilmesi mümkündür. Doğrulanmış değerlerden üç numaralı aday seçilmiş ve bunların üretilebilir değerleri Çizelge 7'de verilmiştir. 3 numaralı aday ile 1 numaralı adayın hafiflik açısından bir farkı yoktur zira her ikisi de 1 mm yarıçapa sahiptir. Ancak 3 numaralı durumda -232.33 MPa değeri ile 1 numaradan daha fazla gerilme oluşmaktadır. Bu durumda 1 numaralı adayın seçilmesi beklenebilirdi. Bununla birlikte mutlak değerce daha büyük Poisson oranına sahip olan aday, 3 numaralı olandır. Daha büyük Poisson oranı,

birbirine eşit şartlar altında, yapının daha fazla yanal daralma yapabileceğinin göstergesidir.

Çizelge 7. Doğrulanmış değerlerin üretilebilir değerleri.

Değişkenler	Aday nokta 3
Yarıçap (mm)	1
Eksenel yer değiştirme (mm)	0,11959
Gerilme (MPa)	-232,33
Poisson oranı	-0,187
Yanal daralma (mm)	-0,012

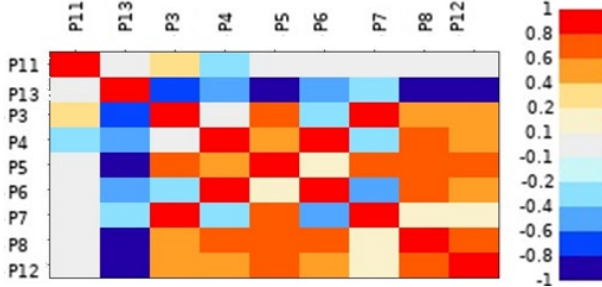
Bu değerle sahip kafes yapının eksenel yer değiştirmesi 0,11959 mm olduğunda yanal daralma değeri de 0,0041581 mm olmaktadır. Şekil 7 seçilen noktanın yeniden analiz edilmesiyle elde edilen deformasyon, gerilme sonuçlarını göstermektedir. Beklendiği gibi, ankastre mesnetlenen bölgede herhangi bir deformasyon yoktur. Ancak, yapının kenar kısımları maksimum deformasyona sahiptir. Maksimum gerilme 266,05 MPa olup 930 MPa olan akma dayanımının oldukça altındadır.



Şekil 7. (a) Seçilen noktalar için gerilme, (b) yanal deformasyon ve (c) ağ görüntüsü.

Şekil 8'de Spearman'ın korelasyon matrisi verilmiş olup parametreler arasındaki ilişkilerin tespiti için kullanılan bir araçtır. P5 (minimum kombine gerilmenin maksimumu), P8 (maksimum kombine gerilmenin minimumu) ve P12 (yanal daralma) kalınlıkları P13 (eksenel

yer değiştirme) ile ters orantılıdır. P5, P6, P7, P8, P12 ve P13 P11 ile aralarında bir orantı olmadığı görülmektedir. P3 (maksimum gerilme) ile P7 (maksimum kombine gerilmenin maksimumu) ve P4 (minimum gerilme) ile P6 (minimum kombine gerilmenin minimumu) arasında doğru orantı olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Spearman'ın korelasyon matrisi, P3- maksimum gerilme, P11-yarıçap, P4- minimum gerilme, P12- yanal daralma, P5-minimum kombine gerilmenin maksimumu, P13-eksenel yer değiştirme, P6- minimum kombine gerilmenin minimumu, P7- maksimum kombine gerilmenin maksimumu, P8- maksimum kombine gerilmenin minimumu.

3.4. Tartışma

Bu çalışmada, eksenel yük uygulaması sonunda yapıda eğilme oluştuğu belirtilmiş ve eğilme nedeniyle oluşan çekme ve basma gerilmeleri hesaplanmıştır. Eksenel yük neticesinde yapıda eğilme oluşması hâli, Vigliotti ve Pasini (2013) tarafından da ifade edilmiştir [19]. Mikro boşlukların, kesitin atalet momentinde belirgin bir azaltma yapmadığı, ancak makro ölçekte malzemenin akma mukavemetini azaltan gerilme yığılmaları ürettiğini raporlamışlardır. Gülcan vd. (2021) kiral kafes yapı tasarımında topoloji optimizasyon yöntemlerinin verimli bir şekilde kullanıldığına dikkat çekmektedir [20]. $3 \times 3 \times 3$ (20 mm \times 20 mm \times 20 mm) dizi desenine sahip basit kübik, oktahedron, kesik küp ve kesik oktahedron tabanlı kafes yapıların en iyi eksenel basınç dayanımı özelliklerini gösterdiği ifade edilmiştir [21-22]. Bu bağlamda mevcut çalışmada sunulan $9 \times 4 \times 5$ kafes yapısı optimum şekle sahip değildir. Ancak ultra hafiflik açısından dikkate değer hafifliğe sahiptir. $3 \times 3 \times 3$ dizilimdeki titanyum alaşımından yapılan kafes yapıdan (Ti-6Al-4V) 1125.0 MPa akma dayanımı, 1200.0 MPa çekme dayanımı ve 0.34 Poisson oranı elde edilmiştir [21].

Uçaklardaki geleneksel taban-kanat tasarımına kıyasla kafes dolgulu tasarımlarda önemli bir ağırlık azalması rapor edilmiştir. Geleneksel kanada kıyasla tüm kafes yapılar arasında en yüksek ağırlık tasarrufu %9,5 ile Kelvin yapısı

sağlamıştır [23]. Mevcut çalışmada ise 4,094 g başlangıç kütlesi 0,4549 g kütleyle inerek %900 ağırlık azaltımı sağlamıştır. Kiral kafesler ultra hafiflik avantajlarıyla dikkat çekmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kübik birim hücreye sahip bir kiral kafes yapının tasarımı ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçta ulaşılan temel çıkarımlar aşağıdaki gibidir:

- Kafes boyutları, genetik algoritma yöntemi kullanılarak deformasyonu artırmak ve dayanım sınırını aşmamak için optimize edilmiştir. Optimum değerler ile yapılan analiz sonunda, yapının ayırıt kesitinin yarıçapı 1 mm olduğunda yapı 0,12 mm yer değiştirmeye dayanmaktadır. Bu durumda yapı içerisinde 266,05 MPa değerinde çekme ve 233,34 MPa değerinde basma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu değerler yapının akma dayanımının altındadır.
- Başlangıçta 4,094 g olan kütle, optimizasyon neticesinde 0,45489 g değerine düşmektedir. Daha küçük ve daha hafif yapı, daha düşük enerji tüketimi açısından tercih edilmektedir. Oldukça hafif ve dayanıklı bir yapı elde edilmiştir. Kullanılacak olan malzemenin hacmi az olduğundan maliyet açısından bu yapı geleneksel malzemelere iyi bir alternatiftir.
- Cevap yüzey fonksiyonu sayesinde tasarımda kullanılan değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkileri tespit edilmiştir.
- Müteakip çalışma olarak yapının titreşim cevabının elde edilmesine yönelik serbest ve zorlanmış titreşim analizlerinin yapılması mümkündür.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

TEŞEKKÜR

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

YAZARLARIN KATKILARI

Y. B.: Kavramsallaştırma, yöntem, yazılım, doğrulama, formel analiz, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

İ.K.: Yöntem, yazılım, doğrulama, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - gözden geçirme ve düzenleme.

REKABETÇİ MENFAAT BEYANI

Yazarlar rakip bir finansal çıkar beyan etmemektedir.

FİNANSMAN KAYNAKLARI

Bu araştırma, kamu, ticari veya kâr amacı gütmeyen sektörlerdeki finansman kuruluşlarından herhangi bir özel hibe almamıştır.

KAYNAKLAR

1. Merriam Webster, "chiral", in Merriam Webster America, Encyclopaedia Britannica, 2024.
2. Darroudi, M., Nazari, S. E., Kesharwani, P., Rezayi, M., Khazaei, M., and Sahebkar, A., "Background of carbon nanotubes for drug delivery systems", in Emerging Applications of Carbon Nanotubes in Drug and Gene Delivery, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Pages 1-35, Woodhead Publishing, Sawston, Cambridge, 2023.
3. Abdeljaber, O., Avcı, O., Inman, D. J., "Optimization of chiral lattice based metastructures for broadband vibration suppression using genetic algorithms", Journal of Sound and Vibration, Vol. 369, Issue 50, Pages 13-44, 2016.
4. Bakır, D., and Savaş, S., "Çarpma yükü etkisinde sandviç plakların şekil optimizasyonu", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 10, Sayı 1, Sayfa 113-127, 2021.
5. Toğan, V., Daloğlu, A., "Genetik algoritma ile üç boyutlu kafes sistemlerin şekil ve boyut optimizasyonu", Teknik Dergi, Cilt 17, Sayı 82, Sayfa 3809-3824, 2006.
6. Doğanalp, S., Turgut, B., "Statik ve kinematik modelde deformasyon analizi", Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi, Cilt 24, Sayı 2, Sayfa 31-49, 2009.
7. Küçükönder, M., Uçar, M., "Üretim etkinliğinde simülasyon", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, Cilt 5, Sayı 1, Sayı 117-129, 2015.
8. Erdem, M., Gök, K., Tümsek, M., Gök, A., "Bir bisiklet gövdesinin sonlu elemanlar yöntemiyle

statik analizi", Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 6, Sayı 2, Sayı 605-632, 2019.

9. Ha, C. S., Plesha, M. E., Lakes, R. S., "Chiral three-dimensional lattices with tunable Poisson's ratio", Smart Materials and Structures, Vol 25, Issue 5, Pages 054005-050076, 2016.
10. Barad, R. S., Nagesh, B. K., Barad, S., Suresh, T. N., "Influence of chiral lattice on modal characteristics of structures", in Gullapalli Sivaramakrishna, S. Kishore Kumar and B. N. Raghunandan Singapore, editors, Proceedings of the National Aerospace Propulsion Conference, Springer Nature Pages 209-230, Singapore, 2023.
11. Körner, C., Liebold-Ribeiro, Y., "A systematic approach to identify cellular auxetic materials", Smart Materials and Structures, Vol. 24, Issue 1, 2015.
12. Warmuth, F., Körner, C., "Phononic band gaps in 2D quadratic and 3D cubic cellular structures", Materials (Basel), Vol. 8, Issue 12, Pages 8327-8353, 2015.
13. Wormser, M., Warmuth, F., Körner, C., "Evolution of full phononic band gaps in periodic cellular structures", Applied Physics A, Vol. 123, Issue 10, Pages 661-689, 2017.
14. Warmuth, F., Osmanlıc, F., Adler, L., Lodes, M. A., Körner, C., "Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting", Smart Materials and Structures, Vol. 26, Issue 2, Pages 025013-025056, 2017.
15. Ansys, "Theory Manual Version 9.0", Canonsburg, PA, USA., ANSYS Inc., 2004.
16. Korkmaz, C., Kacar, İ., "Hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları için optimum ağ elemanı yapısının belirlenmesi", In Osman Gökdoğan Deniz Yılmaz, Önder Uysal, Mehmet Emin Gökdoğan, Ahmet Süslü editörler, Tarımsal mekanizasyon ve enerji üzerine güncel araştırmalar, Sayfa 109-125, Akademisyen Yayınevi, Ankara, 2021.
17. Kacar, İ., Korkmaz, C., "Determination of drying kinetics of a N25P5K5 type new generation plant food by regression and machine learning methods", Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, Vol. 37, Issue 4, Pages 989-1024, 2022.
18. Kacar, İ., Korkmaz, C., "Prediction of agricultural drying using multi-layer perceptron network, long short-term memory network and regression methods", Gümüşhane University Journal

of Science and Technology Institute, Vol 12, Issue 4, Pages 1188-1205, 2022.

19. Vigliotti, A., Pasini, D., "Mechanical properties of hierarchical lattices", *Mechanics of Materials*, Vol. 62, Pages 32-43, 2013.

20. Gülcan, O., Simsek, U., Kavas, B., "Eklemeli İmalatla üretilen işlevsel olarak derecelendirilmiş metal yapılar", *Mühendis ve Makina*, Cilt. 62, Sayı 702, Sayfa 1-12, 2021.

21. 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*, Vol. 15, Issue 1, Pages 97-102, 2022.

22. Fernandes, R. R., Tamijani, A. Y., "Design optimization of lattice structures with stress constraints", *Materials and Design*, Vol. 210, Issue 110026, 2021.

23. Khan, N., Acanfora, V., "Non-Conventional wing structure design with lattice infilled through design for additive manufacturing", Vol. 17, Issue 7, Pages 1470-1478, 2024.