

FARKLI EN/BOY ORANINA SAHİP DÖRTGENSEL KESİTLİ BİR KİRAL ÖKZETİK HÜCRESEL YAPININ TASARIM VE OPTİMİZASYONU

Cem YILMAZ¹, İlyas KACAR^{2*}

^{1,2} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Niğde, 51240, Türkiye
Geliş Tarihi/Received Date: 22.02.2024 Kabul Tarihi/Accepted Date: 09.08.2024 DOI: 10.54365/adyumbd.1440934

ÖZET

Bu çalışmada kübik formda bir kiral kafes yapısı tasarlanmıştır. Kesit dörtgenseldir. Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve reçine polyamid/Naylon-66 kullanılmıştır. Yapının bir ucu ankastre mesnet ile sabitlenmişken serbest ucu ise aksel yer değiştirmeye maruz bırakılmıştır. Yapısal analiz için sonlu eleman esaslı simülasyon kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda gerilme, deformasyon, Poisson oranı değerleri elde edilmiştir. Bu parametreler genetik algoritma esaslı optimizasyona tabi tutulmuştur. Optimizasyonun amacı, minimum boyuta sahip yapıda, maksimum dayanım elde edebilmektir. Zira hafif yapılar hem inşa hem de malzeme maliyetleri açısından tercih edilmektedir. Amaca uyan en iyi boyutlar tespit edilmiştir. Ayrıca parametreler arasındaki ilişkiyi gösteren bir cevap fonksiyonu elde edilmiştir. Optimum kesit 0,5x0,2 mm olup bu durumda yapı -0,9 mm'lik bir yer değiştirmeye dayanabilmiştir. Yapıda en fazla 23,636 MPa çekme ve -1,3266 MPa basma gerilmesi oluşmuştur. Bu değer malzemenin akma dayanımının altındadır. Bu hâli ile yapı kütlesi 0,298 gramdır.

Anahtar Kelimeler: Sonlu elaman simülasyonu, Kompozit panel, 3B kiral ökzetik kafes, optimizasyon

DESIGN AND OPTIMISATION OF A CHIRAL EUXETIC LATTICE STRUCTURE WITH RECTANGULAR CROSS-SECTION HAVING VARIOUS ASPECT RATIO

ABSTRACT

In this study, a chiral lattice is designed in a cubic form. The cross-section is rectangular. Polyethylene, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 stainless steel, polyamide-6, polypropylene, and resin polyamide/Nylon-66 were used as materials. One end of the structure is fixed with an anchored support while the free end is subjected to axial displacement. Finite element based simulations were used for structural analysis. As a result of the simulation, stress, deformation and Poisson's ratio values were obtained. These parameters were subjected to genetic algorithm based optimisation. The aim of the optimisation is to obtain maximum strength in the structure with minimum size. Because lightweight structures are preferred in terms of both construction and material costs. As a result, the best-fit-for-purpose dimensions were determined. In addition, a response function showing the relationship between the parameters was obtained. The optimum cross section is 0.5x0.2 mm and in this case the structure could withstand a displacement of -0.9 mm. A stress of 23.636 MPa occurred on the structure. This value is far below the yield strength of the material. In this case, the mass of the structure is 0.298 grams.

Keywords: Finite element simulations, Composite panel, 3D chiral auxetic lattice, optimization

e-posta¹ : cemyilmz11@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-7439-9904>

* e-posta² : ikacar@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5887-8807> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Kiral kafes yapılar, ilk olarak kimyasal moleküllerin sınıflandırılmalarında kullanılmışsa da, günümüzde artık mekanik yapısal eleman olarak da kullanılmaktadır. Yüksek deformasyonlara, titreşimlere dayanabilmektedir. Kiral yapısal elemanlar, ayna görüntüsünün üzerine bindirilemeyen (enantiyomorf), birbirine bağlı kolon veya kirişlerin üç boyutlu dizilimleri ile oluşmaktadır. Bu yapılar, benzersiz mekanik, termal ve optik özellikleri nedeniyle malzeme bilimi, inşaat, makine ve mimari gibi çeşitli alanlarda ilgi çekmektedir. Kiral kafes yapılar asimetric şekle sahiptirler. Bu hâlleri ile meta-malzeme ve gelişmiş üretim için idealdirler. İşçi barınma, depolama, ekipman koruma ve diğer geçici alanların inşası için bu yapılar kullanılmaktadır. Hızlı kurulum, taşınabilirlik ve düşük maliyet gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, bu yapılar genellikle standart modüler parçalardan oluştuğu için farklı boyutlarda ve şekillerde kolayca monte edilebilmektedir. Malzeme olarak genellikle çelik veya alüminyum gibi dayanıklı malzemelerden yapılmaktadırlar. Bu nedenle sert hava koşullarına dayanıklıdırlar.

Kiral kafes yapılar, mekanik alanda sıklıkla karşılaşılan titreşim problemlerine bir çözüm olanağı sunmaktadır. Ha ve ark. (2016) kübik hücelere sahip, aralarında deforme olabilen kiriş elemanların bulunduğu, üç boyutlu, izotropik kiral kafesler geliştirmiş ve sonlu eleman (SE) yöntemi esaslı analiz etmişlerdir. Bu kafes yapılar negatif Poisson oranına sahip (özetik) olup bu oran ayarlanabilmektedir. Hücre sayısı arttıkça pozitif değerlerden negatif değerlere doğru geçmektedir. İzotropi ise en-boy oranının ayarlanmasıyla elde edilmiştir [1].

Novac ve ark. (2019) Ti6Al4V alaşımından seçici elektron ışını eritme yöntemi kullanılarak kiral özetik hücresel yapılar üretmişlerdir. Daha sonra yarı statik ve dinamik sıkıştırma yüklemeye koşulları altında deneysel olarak test etmişlerdir. Analiz edilen kiral özetik yapının geometrisinin, Poisson oranı üzerindeki etkisi modellenmiştir. Özetik çekirdekli sandviç kompozit panellerin patlama yüklemesi altındaki tepkisi belirlenmiştir. Kompozit yapıların patlamaya karşı tepkisini iyileştirmek için özetik hücresel çekirdeklere sahip sandviç yapıların büyük potansiyele sahip olduğu raporlanmıştır [2].

Vasiliev ve Pavlov (2020) kiral mikro yapıya sahip Cosserat kafes modelinin oluşturulması için yapısal bir yaklaşım geliştirmiştir. Kafesin parçacıklarını bağlayan elemanlar için yay benzetimi yapılmıştır. Sonuçta bağlantı elemanlarının parametreleri elde edilmiş ve buna bağlı olarak Poisson oranı hesaplanmıştır. Metot olarak yayların potansiyel enerjisinin, bağıl uzamanın karesi ile orantılı olması prensibi kullanılmıştır. Ayrık bir model ve uzun dalga boylu bir sürekli kiral model geliştirilmiştir. Makro-parametrelerin mikroyapı parametrelerine bağımlılığı, karmaşık bağlantılara sahip sonlu boyutlu parçacıklardan ve kompozit kiriş elemanlardan oluşan kiral altıgen kafesler için elde edilmiştir [3].

Bacigalupo ve Gambarotta (2016), kiralitenin ve yerel rezonatörlerin dinamik özelliklerinin akustik davranış üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması için yerel rezonatörler içeren periyodik kiral kiriş-kafeslerin basitleştirilmiş bir modelini oluşturmuşlardır. Kiriş-kafes modelleri, her biri diğerlerine elastik ince kütleli bağlarla bağlanan ve yumuşak elastik bir halka içinde rijit bir diskten yapılmış bir iç rezonatör içeren periyodik bir rijit diskler dizisinden oluşmaktadır. Bant yapısı ve düşük frekanslı bant boşluklarının oluşumu ayrık bir Lagrangian modeli aracılığıyla analiz edilmiştir. Hem altıgen hem de dörtgen kiral kafes için iki akustik mod ve dört optik mod tanımlanmış ve rezonatörün dinamik özelliklerinin bu dallar üzerindeki etkisi bant yapısının bazı özellikleriyle birlikte analiz edilmiştir. Ayrık Lagrangian modelinin halka yer değiştirmelerinin bir süreklilik alanı olarak yaklaştırılması ve genelleştirilmiş makro homojenlik koşulunun uygulanması yoluyla, genelleştirilmiş bir mikropolar eşdeğer süreklilik, genel hareket denklemi ve kapalı formda bir denklem ile birlikte türetilmiştir. Mikropolar model tarafından sağlanan dağılım fonksiyonlarının geçerlilik sınırları, ayrık model tarafından elde edilenlerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir [4].

Ruan ve ark. (2021) dairesel plakalardan oluşan yenilikçi bir 2B kompozit kiral kafes hiyerarşik yapı önermiştir. Dairesel plakalar, bir uçtaki dairesel plaka kenarını ve diğer uçtaki kiral birim hücrenin

halkasının iç kenarını birbirine bağlayan dört bağ eklenerek kiral birim hücreye dâhil edilmiştir. Kiral kafes yapıların şok dalgası yayılma davranışları, sonlu elemanlar yöntemi ve Bloch teoremine dayalı olarak kendi geliştirdikleri bir programla hesaplanmıştır. Kiral birim hücre yapısının bağ sayısının, mesnet türünün, bağlantı çubuğundaki dönme açısının ve dairesel plaka boyutunun; bant boşluklarının dağılımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Dalga yayılımını analiz etmek için izo-frekans konturları, grup hızları ve faz hızları hesaplanmıştır. Bant aralığının varlığını doğrulamak için düşük genlikli elastik dalga iletim testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saat yönünün tersine teğetsel bağlantı modunun kompozit kiral kafes yapıların, plak yarıçapı 32 mm olduğunda en geniş ilk bant aralığına sahip olduğunu göstermektedir. Dairesel plaka eklenmesi, bant boşluğu işgal eden bölgeleri genişletmiş, ancak bant boşluklarının sayısını artırmamıştır [5].

Spadoni ve ark. (2009) kiral bir hücresel yapının fononik (farklı akustik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemeden meydana gelen akustik meta malzemeler) özellikleri üzerine yapılan araştırmaların sonuçlarını sunmuşlardır. Ele alınan geometri, düzlem içi altıgen simetriye sahip olup dairesel düğümler, bu düğümlere teğet olan altı adet bağ ile birbirine bağlanmıştır. Düzlem içi dalga yayılımı, iki boyutlu dağılım ilişkilerini tahmin etmek ve dikkate alınan kiral konfigürasyona özgü dağılım özelliklerini göstermek için kullanılan Bloch teoreminin uygulanması yoluyla analiz edilmiştir. Birim hücre geometrisinin dağılım, bant boşluğu oluşumu ve dalga yönlülüğü üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar küresel kafeslerin, akustik dalga kılavuzlara uygulamalarında kullanılabilir meta malzemelerin tasarımı için potansiyel taşıdığını göstermektedir [6].

Liu ve ark. (2011) süreklilik mekaniğinde, sentrosimetrik (merkez noktaya göre simetrik olan) olmayan mikropolar elastisite teorisini (mikro ve nano boyuttaki yapıların modellenmesinde ve analizinde kullanılan, yerel olmayan elastisite teorisi) kullanarak malzemelerin doğasında bulunan kiraliteyi analiz etmiştir. Kiral bir yapı, 2B izotropik bir probleme indirildiğinde, ortaya çıkan model artık kiralitesi olmayan bir hâle gelmiştir. Bu nedenle, kiralite, 2B kiral katılar için mevcut teoriler tarafından düzgün bir şekilde karakterize edilememektedir. Bu zorluğu aşmak için, 2B durumda izotropik tensörlerin yeniden yorumlanmasına dayanarak, 2B izotropik kiral katılar için kiral etkiyi modellemek üzere bir süreklilik teorisi önermişlerdir. Kiralite ile ilgili tek bir malzeme parametresi, 2B kiral katıların temel bir özelliği olan kütle deformasyonu ve iç rotasyon arasındaki bağlantıyı karakterize etmek için tanıtılmıştır. Önerilen süreklilik teorisi, kafesin etkin malzeme sabitlerinin analitik olarak belirlendiği üçgen kiral kafesler için tutarlı bir biçimde uygulanmıştır. Kiral örgüdeki benzersiz davranış, bir statik gerilme problemi ve bir düzlem dalga yayılımı probleminin analizleri yoluyla ifade edilmiştir. Kiral olmayan model tarafından tahmin edilemeyen sonuçlar, ayrık modelin kesin çözümü ile doğrulanmıştır [7].

Goerlitzer ve ark. (2020) metalik nanoparçacıkların periyodik dizilerinin, lokal yüzey plazmon rezonanslarının toplu olarak uyarılması yöntemini kullanmışlardır. Burada, yüzey kafes rezonanslarının yeni bir serbestlik derecesi, kiral yapıların rezonans frekanslarının değişmesine yol açmaktadır. Parçacıklar arası mesafenin bir fonksiyonu olarak yüzey kafes rezonanslarının uyarılması ve diziler içindeki düzen derecesi tespit edilmiştir. Bireysel 3B yapıların kiralitesi, kiral kafes modlarının oluşumuna yol açmıştır [8].

Gellman (2010) kiral yüzeyler ve kiralite derecesini atomik ve moleküler düzeydeki yapılarla belirlemiştir. Neticede doğal, modifiye (kiral moleküllerin adsorpsiyonu ile) ve modifiyelerin birleştirilmesi ile elde edilen üç tür kiral yapı sunmuşlardır [9].

Fecher (2022), kiralitenin belirli simetrilere bağlı olduğunu vurgulamıştır. Bu tür yapılarda ayna düzlemleri ve ters çevirme merkezleri bulunmamaktadır. Simetri elemanları olarak sadece rotasyonlara izin verilmektedir. Bununla birlikte simetri elemanı olarak izin verilen dönüşler üzerinde de ilave kısıtlamalar mevcuttur. Çünkü bunlar her zaman enantiyomorf çiftler hâlinde görünmektedirler. Bu çalışma kiral yapıları ve uzay gruplarını sınıflandırmıştır. Sınıflandırma için Hausdorff mesafeleri ve sürekli kiralite ölçüleri kullanılmıştır. Bant yapısının ve kiralite ile aynı kristal parametrelerden etkilendiği bulunmuştur. Bununla birlikte, eğrilikten bağımsızdır. Berry eğriliği, elektronik yapının topolojik bir ölçüsü olmakla birlikte bir yapının tersine çevrilmesine yanıt verdiği için kiralitenin kanıtı

değildir. Moleküller için, optik dairesel dikroizm değerinin kiralite için en önemli ölçütlerden biri olduğu sunulmuştur. Bu nedenle yüksek simetri konfigürasyonlarında fotoelektronların açılma dağılımındaki dairesel dikroizmin, kiral katıların ve yüzeylerinin yönlülüğünü ayırt etmek için kullanılabilirliği önerilmektedir [10].

Erdoğan ve Toktas (2023-a) yeni tasarlanmış ökzetik kafes yapıların Poisson oranı üzerinde geometri iç kalınlığının etkisini incelemeye odaklanmıştır. Araştırma, çeşitli yeni tasarlanmış yapıları incelemek için CAD modelleme ve sonlu elemanlar analizi kullanmıştır. Bulgular, yeni tasarlanmış ökzetik yapının, benzer şekillerle karşılaştırıldığında daha düşük negatif Poisson oranına sahip olduğunu göstermiştir. 4,9 mm iç kalınlık ve 4x2 kafes yapı en düşük -0,55 Poisson oranını göstermiştir [11].

Nergis ve ark. (2023) örme spor giyimde kişisel koruma için sarmal yardımcı ipliklerin geliştirilmesi ve değerlendirilmesine odaklanmıştır. Araştırma, farklı iplik bileşenlerinin ve sayılarının, ipliğin ve elde edilen kumaşların özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Amaç, spor uygulamalarında konfor, performans ve güvenliği artırmak için tekstillerin ökzetik davranışını geliştirmektir. Helisel ökzetik ipliklerin örme kumaşlardaki yapısını ve performansını araştıran çalışma, spor koruyucu ekipmanlar için yenilikçi malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır [12].

Kaya ve ark. (2023-a) ökzetik bir kafes geometrisi, kabuk kalınlığı ve çekirdek kalınlığı gibi parametrelerin etkisini araştırarak silindirik sandviçlerin enerji emme performansını optimize etmeyi amaçlamıştır. Bu parametrelerin optimum kombinasyonunu belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmış, ANOVA yöntemiyle enerji emilimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Araştırma, çarpışma performansını artırmak ve silindirik yapılarda gelişmiş enerji emme yetenekleri için malzeme tasarımına rehberlik etmek amacıyla yapılmıştır [13].

Erdoğan ve Toktas (2023-b) sonlu elemanlar analizi kullanılarak yeni tasarlanan ve farklı iç kalınlıklara sahip bir ökzetik kafes yapının Poisson oranını incelemiştir. Amaç, yapının mekanik özelliklerini analiz etmek ve bunları literatürdeki mevcut ökzetik yapılarla karşılaştırmaktır. Araştırma, alana yeni bir birim hücre tasarımı ile katkıda bulunmayı ve üstün mekanik özelliklere sahip bir yapı oluşturmayı amaçlamıştır. İç kafes kalınlığının Poisson oranı, kütle, hacim ve yüzey alanı üzerindeki etkilerini inceleyerek, çalışma ökzetik yapıların anlaşılmasını ve hafif endüstrilerdeki potansiyel uygulamalarını geliştirmeyi amaçlamıştır [14].

Kaya ve ark. (2023-b) negatif Poisson oranına sahip yeni tasarlanmış bir kafes yapının ökzetik davranışını araştırmaya odaklanmıştır. Araştırmacılar, sonlu elemanlar analizini kullanarak, geometrik iç kalınlık ve Poisson oranı arasındaki ilişkiyi anlamak için 24 kafes yapıyı incelemiştir. Amaç, ökzetik yapılarla ilgili mevcut literatüre benzersiz bir tasarımla katkıda bulunmaktır. Bulgular, geometrik iç kalınlık arttıkça, kafes yapının özellikle 4x4 matris yapısında gelişmiş ökzetik özellikler sergilediğini ortaya koymuş ve yapısal davranışı optimize etmede geometrik parametrelerin önemini vurgulamıştır [15].

Çetin ve Seyitoğlu (2024) Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık'ın önde gelen tedarikçiler olduğunu vurgulayarak ökzetik yapıların evrimi ve eğilimlerini sunmuşlardır [16].

Kaboğlu (2022) otomotiv tampon uygulamaları için ökzetik çekirdekli sandviç kompozitlerin mekanik davranışını araştırmaya odaklanmıştır. Poliamid-12 ve cam elyaf takviyeli polipropilen yüzeylerden oluşan ökzetik çekirdek, üç noktalı bükme testlerinde üstün esneme özellikleri sergilemiştir. Ökzetik yapılar arasındaki mesafenin mukavemet ve darbe emilimi için kritik bir parametre olduğu bulunmuştur. Araştırma, optimum mekanik performans için malzeme seçimi ve geometrik hususları vurgulamış ve geleneksel çekirdeklere kıyasla gelişmiş enerji emme kabiliyetleri göstermiştir [17].

Becergen ve ark. (2022), topoloji optimizasyonu ve kafes yapılar gibi yöntemler kullanarak dişlilerin iç gövdelerinin tasarım optimizasyonuna odaklanmaktadır. Malzeme türlerini optimize etmek için eklemeli tasarım tekniklerini ve kafes yapılarını karşılaştırmaktadır. Sonuçlar, alan odaklı tasarım

ve topoloji optimizasyonu yoluyla önemli ağırlık tasarrufu ve gelişmiş mekanik özellikler göstermektedir [18].

Akgün ve ark. (2022) örgü ipliklerle dokunan kumaşların ökzetik performansı ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Örgü atkı ipliği ile dokunan kumaşlar, çekme durumunda, negatif poisson oranı (NPR) ile ökzetik bir davranış göstermiştir. NPR, örgü ipliğinin kalınlığından ve kumaş sıklığından etkilenmiştir. Örgü iplik kullanımı, çekme mukavemeti, termal direnç ve aşınma direnci gibi fiziksel özellikleri geliştirilmiştir [19].

Özkan ve Khosravi (2023) 3B metal yazıcı kullanılarak oluşturulan modifiye metal ökzetik yapıların mekanik davranışını incelemiştir. Bu yapılar, NPR nedeniyle artan kesme mukavemeti ve enerji emilebilirliği gibi benzersiz özellikler sergilemektedir. AlSi10Mg alaşımından yapılan ökzetik panellerin mekanik özelliklerini araştırmak için deneysel testler ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Sonuçlar, sonlu elemanlar modelinin yapıların çekme davranışını maksimum %3'ten daha az bir hata ile doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Ayrıca, yüksek çekme performansı için en uygun geometriyi belirlemek üzere parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma, çeşitli uygulamalar için bu benzersiz yapıların mekanik özelliklerinin anlaşılması ve iyileştirilmesinde eklemeli üretim yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır [20].

Kaya ve ark. (2022) birim hücre yüksekliğinin AlSi10Mg alaşımından yapılmış hacim merkezli kafes yapıların balistik performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırma birim hücre yüksekliğinin optimize edilmesinin kafes yapıların balistik performansını artırabileceğini ortaya koymaktadır. Birim hücrenin en-boy oranının 0,75'ten 1,5'e çıkarılmasıyla penetrasyona karşı direnç artmış, daha yüksek en-boy oranlarında ise performans düşmüştür. Çalışma, kafes geometrilerinin mekanik performansının belirlenmesinde birim hücre boyutlarının önemini vurgulamaktadır [21].

Üzün ve Kayacan (2023) kafes yapılar, ağ yapılar ve periyodik yapılar içeren ökzetik havasız lastiklerin performans analizine odaklanmıştır. Sonlu eleman analizi yoluyla, mukavemet ve dinamik davranışlarını değerlendirmek için üç farklı lastik tasarımı incelenmiştir. Sonuçlar, yeniden girintili kafes yapılara sahip orijinal tasarımın ticari lastiklere kıyasla daha üstün mekanik özellikler sergilediğini göstermiştir. Gelişmiş mukavemet ve darbe emici enerji performansı gösteren yeni bir spline astarlı yapı geliştirilmiştir. Orijinal tasarım, incelenen diğer otomobil lastiklerine kıyasla en az %66 daha yüksek darbe emme enerjisi performansı göstererek havasız lastik tasarımının ilerlemesine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur [22].

Akbulut ve ark. (2023) kafes hücre tasarım yaklaşımına, özellikle de eklemeli imalat için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarına odaklanmaktadır. Sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak incelenen küpöktahedron, oktahedron ve eşkenar dodekahedron kafes yapıları incelenmiş olup, sonuçlar küpöktahedron kafesin diğer kafes yapılarına kıyasla daha yüksek mukavemet sağladığını göstermektedir. Bulgular, ağırlığı azaltırken parça performansını artırmak için havacılık ve uzay uygulamalarında kafes yapıların kullanılma potansiyelini göstermektedir [23].

Öykünç ve Yıldızdağ (2023) gemi yapımında kullanılan yeni kompozit malzemelerin dayanıklılığını incelemiştir. Çalışmanın bulguları, bu malzemelerin bakım maliyetlerini azaltırken deniz araçlarının operasyonel ömrünü önemli ölçüde uzatabileceğini göstermiştir [24].

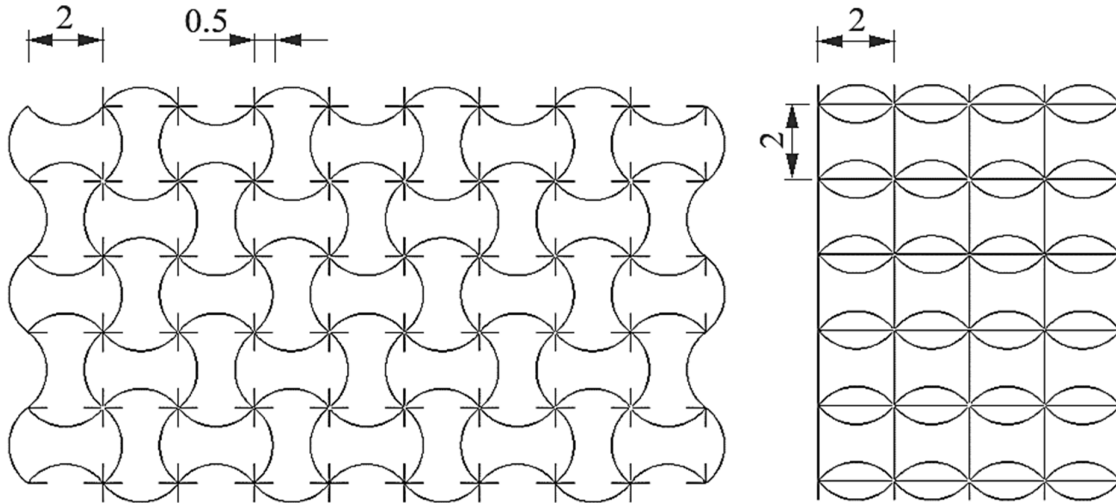
Çelebi ve İmanç (2023) 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen polimer malzemelerin mekanik özelliklerini incelemektedir. Araştırma, malzeme tasarımı, üretimi ve test süreçlerini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca, malzeme seçimi, test yöntemleri ve sonuçların analizi gibi konular da ele alınmaktadır. Araştırma, malzeme mühendisliği ve 3B baskı teknolojisi alanında önemli bir katkı sağlamaktadır [25].

Yukarıda sunulan literatür taramasından da görülebileceği gibi, yapısal tasarım alanında kiral kafes tasarımları kullanılmaktadır. Optimizasyon ise tasarımcılar için en önemli araçlardan biridir. Açık literatürde kiral yapıların optimizasyonuna yönelik araştırmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kübik kiral kafes yapısının optimal boyutları yapısal simülasyon ve genetik algoritma optimizasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Parametreler arasındaki korelasyon değerleri,

cevap yüzey fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Tasarım noktalarının elde edilmesinde Latin hiperküp yöntemi ve cevap fonksiyonunun elde edilmesinde Kriging tekniği kullanılmıştır. Optimum değerler ile parametreler arasındaki ilişkiler sunulmuştur. İkinci bölümde optimizasyon ve yapısal analiz yöntemleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde araştırmanın sonuçları ve değerlendirilmesi yer almaktadır. Son bölümde ise çalışmanın neticesinde ulaşılan temel çıkarımlar sunulmaktadır. Bu çalışma negatif Poisson oranı elde edilmesi ve bu oranın ayarlanabilir olması nedeni ile dikkat çekicidir. Kiralite ve negatif Poisson oranının benzersiz kombinasyonu ile karakterize edilen kiral ökzetik kafes yapıları alanı, mekanik davranışlarını ve potansiyel uygulamalarını anlamada önemli bir araştırma boşluğu sunmaktadır. Çok sayıda çalışma bireysel kiral veya ökzetik malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmış olsa da her iki özelliğin tek bir kafes yapısı içinde entegrasyonu büyük ölçüde keşfedilmemiştir. Bu boşluk, özellikle kiral geometrinin Poisson oranı, kesme modülü ve enerji emme kapasitesi üzerindeki etkisi de dâhil olmak üzere, kiral geometrinin ökzetik davranış üzerindeki etkisine ilişkin kapsamlı araştırmaların eksikliğinde belirgindir. Ayrıca, özel mekanik davranışa sahip kiral ökzetik kafesler oluşturmak için etkili tasarım metodolojilerinin geliştirilmesi henüz emekleme aşamasındadır. Bu araştırma boşluğunun ele alınması, enerji emilimi, şok azaltma ve biyomimikri gibi alanlarda potansiyel uygulamalar sunan üstün mekanik performansa sahip yeni malzemelerin tasarımını ve uygulanmasını ilerletmek için çok önemlidir.

2. Materyal ve Metod

Kafes yapısı seçilmesinin temel nedeni, hem hafif hem de sağlam bir yapı sunmasıdır. Kafes yapısı, birbirine bağlanmış çubukların bir ağı oluşturmasını ve bu da kuvveti eşit olarak dağıtarak ağırlık azaltımı sağlamaktadır. Bu daha fazla yük taşımaya sağlamaktadır. Şekil 1 (a)'da bu çalışmada kullanılan kiral kafes geometrisi gösterilmiştir. Bu tür kiral kafes biçimlerine, kübik kafes yapı denmektedir. Bu şekil literatürde sıklıkla rastlanan geometri olup [26]'da sunulan ve [27-29]'da daha ayrıntılı olarak incelenen bir kafes türüdür. Aslında düzgün bir kübik birim hücrenin, 10. burkulma moduna karşılık gelmektedir. Çubuklar sinüzoidal formda bir eğrilige sahiptirler. Düğüm noktalarında birbirleri ile birleşmektedirler. Tüm yapı 4 katmandan oluşmaktadır. Her katmanda yatay olarak 4 hücre ve dikey olarak 5 hücre bulunmaktadır. Her hücre 2 mm yatay ve 2 mm dikey boyuta sahiptir. Sinüzoidal eğriliklerin genliği ise 0,5 mm değerindedir. Başlangıçta kiris kesiti 0,5x0,5 mm olan kare kesittir. Bu hâli ile tüm yapı başlangıçta 783,56 mm³ hacme ve 0,744 g kütleyle sahiptir.



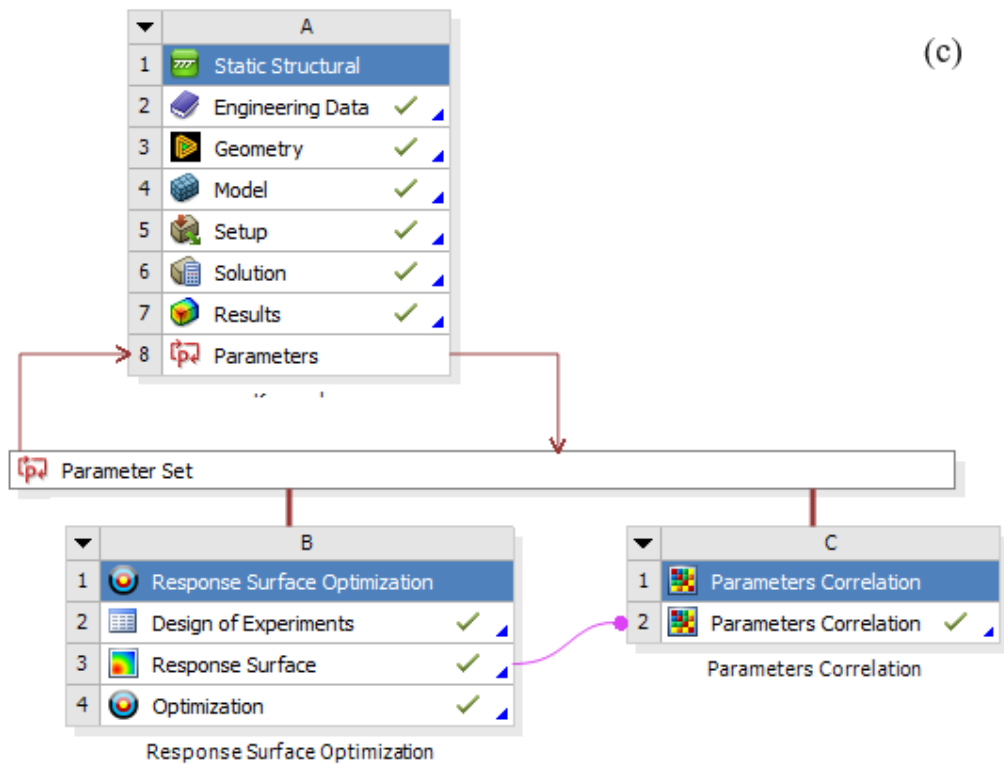
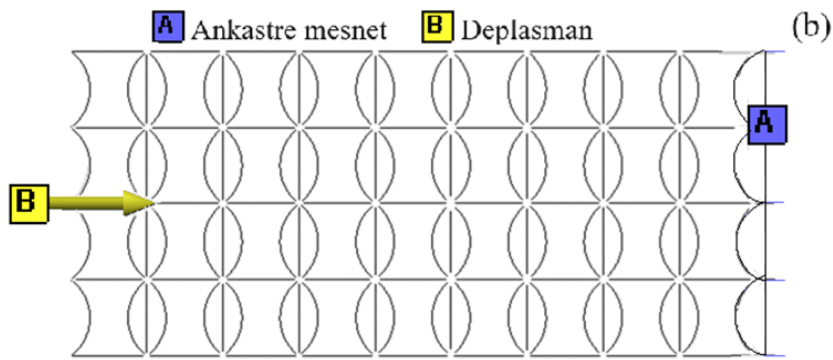
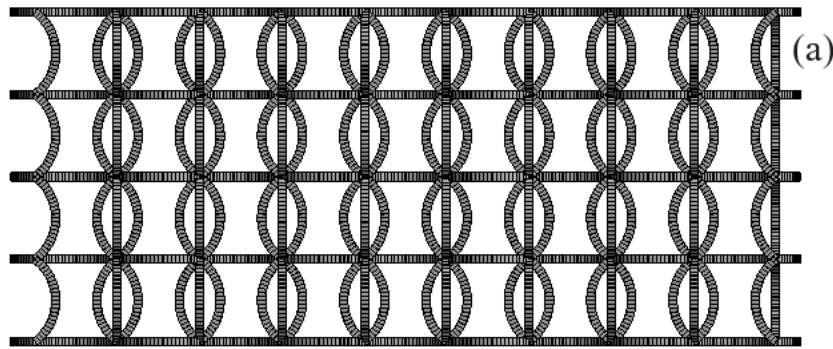
Şekil 1. Çalışmada kullanılan kiral kafes yapı, boyutları (mm)

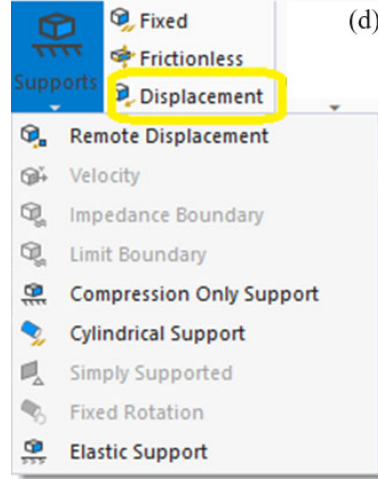
Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve kompozit (reçine polyamid/Naylon-66) kullanılmıştır. Malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Oda sıcaklığında, mekanik, termal ve fiziksel özellikler

Özellik	Polietilen	Ti6Al4V	AlSi10Mg	316	PA6	PP	Kompozit
Yoğunluk (kg/mm ³)	9,5e-007	4,62e-06	2,7e-6	8,0e-6	1,14e-06	9,034e-07	1,14e-06
Termal genleşme katsayısı (1/°C)	2,3e-004	9,4e-06	3,3e-5	2,0e-5	0,0001467	9,909e-05	0,00013
Özgül ısı (mJ/kg°C)	2,3e+006	5,22e+05	1,3e6	7,7e5	1,5e+06	1,6e+06	1,52e+06
Termal iletkenlik (W/mm°C)	2,8e-004	0,0219	1,2e-1	3,2e-2	0,0002428	0,000209	0,000243
Direnç (ohm mm)	10,16e10	0,0017	0,00035	7,4e-5	1,834e+15	1e+19	1,00e+9
Basmadaki maksimum dayanım (MPa)	22	970	460	290	71,89	37,62	94,176
Basmadaki akma dayanımı (MPa)	25	950	210	580	43,13	34,6	94,176
Çekmedeki akma dayanımı (MPa)	33	880	210	580	43,13	34,6	94,176
Çekmedeki maksimum dayanım (MPa)	22	950	460	290	71,89	37,62	94,176
Young's modülü (MPa)	1100	96000	76600	1,95e+5	1111	1461	1620
Poisson oranı	0,42	0,36	0,33	0,25	0,3499	0,4087	0,41
Bulk modülü (MPa)	2291,7	1,1429e+05	75098	1,3e+5	1233,6	2667	3000
Kayma modülü (MPa)	378,32	35294	28797	78000	411,51	518,56	574,47

Metot olarak, yapısal simülasyon ve optimizasyon kullanılmıştır. Bu amaçla Ansys© yazılımı çalıştırılmıştır [30]. Yapısal simülasyonda Şekil 2'de gösterilen yük ve sınır şartları uygulanmıştır. Şekilde ayrıca kullanılan programda oluşturulan proje şeması da gösterilmiştir. Yük olarak, yer değiştirme uygulanmıştır. Sınır şartı olarak ankastre mesnet kullanılmıştır. SE yönteminin bir gereği olarak yapıda, eleman ağı oluşturmak üzere ayrıklaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıklaştırma için lineer şekil fonksiyonu ve tam integrasyon formülüne sahip kiriş elemanlar kullanılmıştır. Ağdan bağımsızlık analizi neticesinde minimum eleman ile maksimum hassasiyetin elde edildiği en uygun bölüntüleme sayısı olarak 63844 adet düğüm noktası ve 32448 adet eleman tespit edilmiştir. Eleman, yapının konumsal ayrıklaştırılması sonucunda oluşan birim parçaya verilen addır. Düğüm noktası ise oluşan her elementin köşe noktalarıdır. Ağın kalite ölçütü olarak çarpıklık değerine bakılmış olup minimum, maximum ve ortalama değerler sıfır olmaktadır. Ortogonal kalite ise 1'dir. Kalite metrikleri ile ilgili detaylı bilgi Korkmaz ve Kacar (2022) tarafından verilmiştir [31]. Simülasyon sonunda gerilme, deformasyon, enerji ve Poisson oranı değerleri elde edilmiştir.





Şekil 2. Kafes yapının (a) FE modeli ve (b) uygulanan yük ve sınır şartları (c) yazılımda oluşturulan proje şeması (d) yük olarak deplasman tanımlanması

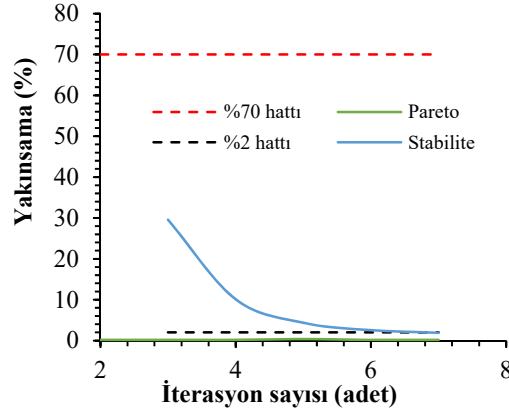
Optimizasyon için şu adımları takip edilmiştir. Parametrik hâle getirmek için öncelikle simülasyon yazılımında giriş ve çıkış değişkenleri seçilmiştir. Giriş değişkenlerinin başlangıç değerleri, alt ve üst sınırları Çizelge 2'deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 2. Parametrelerin alt ve üst sınırları

Giriş değişkenleri			Başlangıç	Alt sınır	Üst sınır
En (mm)			0,5	0,1	1
Boy (mm)			0,5	0,1	1
Uygulanan eksenel yer değiştirme (mm)			-6	-6	6
Çıkış değişkenleri					
Gerilme (MPa)			--	--	--
Yanal deformasyon (mm)			--	--	--
Poisson oranı			--	--	--

Optimizasyon için iki tür değişken vardır: Giriş değişkenleri ve çıkış değişkenleri. Bir değişken parametrik hâle getirildikten sonra kullanıcı onu değiştirememektedir. Ancak parametrenin alt ve üst limitleri girilmektedir. Limitler belirlenirken, araştırılmak istenen aralık göz önüne alınmıştır. Bu aralıklar içerisinde Latin hiperküp yönteminin dağılım algoritması sayesinde tasarım noktaları (DP) oluşturulmaktadır. Toplam 100 adet DP oluşturulmuş ancak sadece 40 adetinin hesaplanabildiği görülmüştür. Bunun nedeni, karesel kesitli çubuk için her ne kadar aralık içerisindeki her türlü kombinasyon değeri matematiksel olarak uygulanabilir olsa da yapısal olarak hatalı şekillere yol açabilmesidir. Bu durumda o DP hesaplanamamaktadır. Hesaplama sonrasında ayrıca değişkenler arasındaki ilişkiler "yanıt yüzeyi" adı verilen bir fonksiyon ile belirlenebilmektedir. "Minimum kesit alanı" ile "maksimum dayanım" koşulları amaç fonksiyonları olarak uygulanmıştır. Optimizasyon için çok amaçlı, çok kısıtlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılmıştır. MOGA yöntemi, örgütsel elitizm ilkesine dayanan ünlü NSGA-II'nin (Baskın Olmayan Sıralanmış Genetik Algoritma-II'nin) bir çeşididir. Birden fazla hedefi ve kısıdı desteklemektedir. En iyisini bulmayı amaçlamaktadır. MOGA için başlangıçta 3000 örnek üretilmiş, her iterasyonda 600 adet örnek incelenmiştir. En fazla 20 adet iterasyon limiti konulmasına rağmen 7 adet iterasyon sonunda yakınsamanın gerçekleştiği görülmüştür.

Bu esnada 6111 adet genetik değerlendirme yapıldığı görülmüştür. Sonuçta optimum olabilecek 3 adet aday hesaplanmıştır. Yakınsama grafiği Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Optimizasyon esnasında genetik algoritmanın yakınsama grafiği

3. Bulgular ve Tartışma

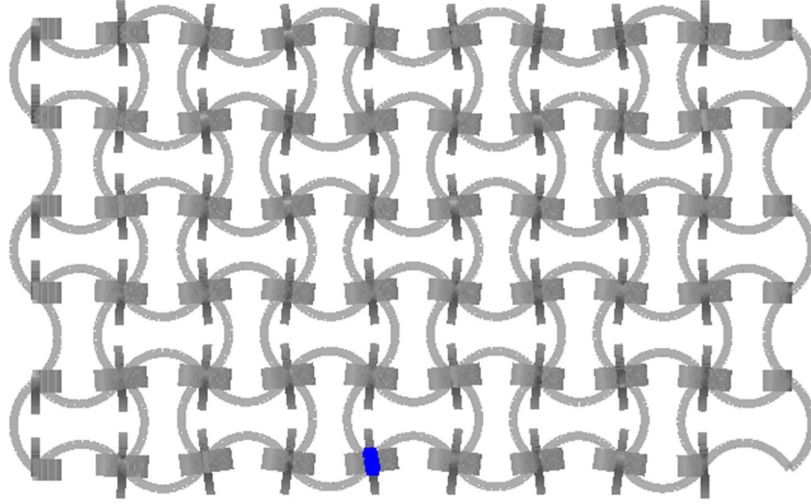
3.1. Gerilme ve Deformasyon Sonuçları

Başlangıçta kiral yapının bir ucu ankastre mesnetlenirken diğer ucundan ana eksen (Z eksen) doğrultusunda -6 mm değerinde (basma türünde) yer değiştirme (deplasman) uygulanmıştır. Yer değiştirme 0'dan -6 mm'ye rampa şeklinde uygulanmaktadır. Her bir analiz 32 GB RAM ve 2,30 GHz 16 çekirdekli bir bilgisayar ile 231 saniye sürmüştür. Hesaplamaya dair istatistiki bilgiler Çizelge 3'te verilmiştir. 100 adet nokta ayrı ayrı hesaplanmış ve hesaplanamayan her bir nokta 3 kez hesaplanma girişiminde bulunulmuştur. Hesaplama 7 farklı malzeme için tekrarlanmıştır.

Çizelge 3. Çözüme dair hesaplama bilgileri

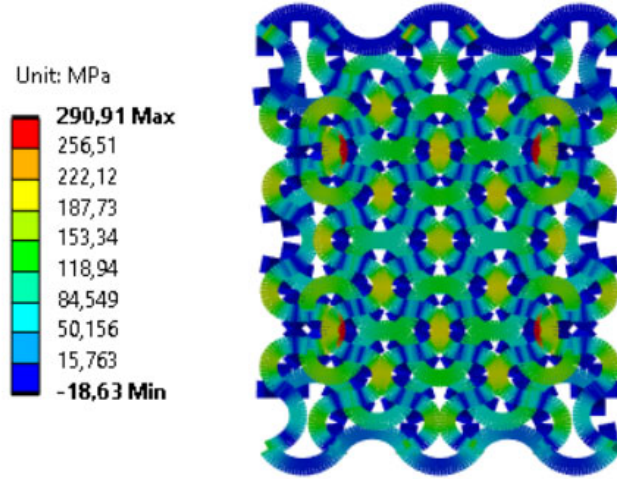
Özellik	Değer
MAPDL geçen süre (s)	231 sn
Kullanılan MAPDL bellek (MB)	813
MAPDL sonuç dosyası boyutu (MB)	51,8
Toplam hesaplama süresi (saat)	98,82

Henüz optimizasyon yapılmadan önce başlangıç değerleri kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucunda aksel doğrultuda 6 mm basma yer değiştirmesi uygulanmıştır. Daha fazla yer değiştirme olduğunda hasar meydana geldiği görülmüştür. Böylece yapıya uygulanacak yer değiştirmenin üst sınır olarak -6 mm değeri uygulanmıştır. Böylece yapıya 0 ile -6 mm arasında yer değiştirme uygulanabilmiştir. Yer değiştirme -6 mm iken kiral yapıdaki yanal daralma -0,6459 mm olarak hesaplanmıştır. Yapının hesaplanan yanal ilk boyu 10,198 mm olup bu durumda yanal şekil değiştirme $\varepsilon_{yanal} = \frac{-0,6459 \text{ mm}}{10,198 \text{ mm}} = -0,063336$ olmaktadır. Aksel şekil değiştirme ise $\varepsilon_{eksenel} = \frac{-6 \text{ mm}}{19,002 \text{ mm}} = -0,31576$ olmaktadır. Sonuçta Poisson oranı $\nu = -\frac{-\varepsilon_{yanal}}{-\varepsilon_{eksenel}} = -0,20059$ olmaktadır. Bu durum yapının özketik davrandığını göstermektedir. Yanal daralmanın ölçüldüğü nokta ve daralmış geometri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar -6 mm yerdeğiştirme ve sebep olduğu kesit şekli nedeniyleledir.



Şekil 4. Basmaya maruz yapının, negatif Poisson oranı nedeni yanal daralması ve ölçüm yapılan kafes noktası

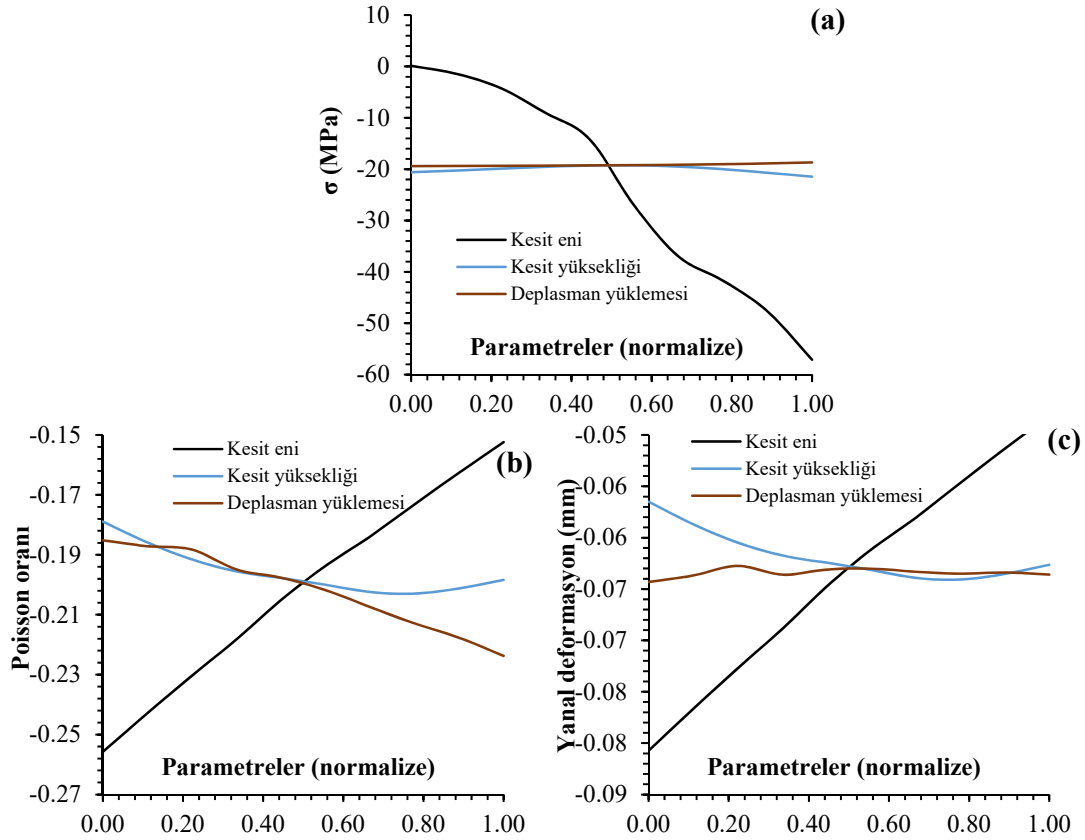
Bu durumda Şekil 5'te görüldüğü gibi yapıda $-18,629$ MPa basma gerilmesi ve $290,908$ MPa değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Kullanılan malzeme polietilendir, basmadaki akma dayanımı 25 MPa, çekmedeki akma dayanımı 33 MPa olup bu değerler akma sınırını aşmaktadır! Analizde malzemenin davranışı doğrusaldır. Bu nedenle maksimum gerilme değeri akma dayanımını aşmıştır. Şekil 5 incelendiğinde, genellikle dikey çubuklarda basma gerilmesinin, yatay çubuklarda ise çekme gerilmesinin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5. Kafes elemanlarındaki gerilme değerleri

3.2. Parametreler arasındaki ilişkiler

Kiral kafes yapının tasarımında önemli olan parametrelerin birbirleriyle olan ilişkileri cevap yüzey fonksiyonu sayesinde elde edilmiş olup Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Cevap fonksiyonundan elde edilen parametrik ilişkiler, kesit eninin, kesit yüksekliğinin ve deplasman yüklemesinin (a) gerilme, (b) Poisson oranı ve (c) yanıl deformasyon üzerine etkileri

RMSE, MSE, MAPE ve MAE değerleri 0'a yaklaştıkça modelin iyiliği artmaktadır [32]. Uydurulan fonksiyonun iyilik değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Cevap yüzeyinin iyilik ölçütleri

Parametreler	R^2	RMSE	MAE
Yanal deformasyon (mm)	0,984	1,4112E-10	0,0325
Poisson oranı	0,998	3,87558E-5	0,0125
Gerilme (MPa)	0,945	5,1385E-07	0,0684

3.3. Optimum değerler

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

Çizelge 5. Önerilen üç optimum aday nokta

Parametreler	Aday nokta 1	Aday nokta 2	Aday nokta 3
En (mm)	0,3535	0,388	0,457

	Boy (mm)	0,1018	0,104	0,1018
	Uygulanan aksel yer değişirme (mm)	-0,5435	-0,5539	-0,65945
Çıkış	Gerilme (MPa)	-0,9346	-0,8460	-0,90724
	Poisson oranı	-0,278	-0,274	-0,369
	Yanal deformasyon (mm)	-0,0795	-0,0799	-0,0994

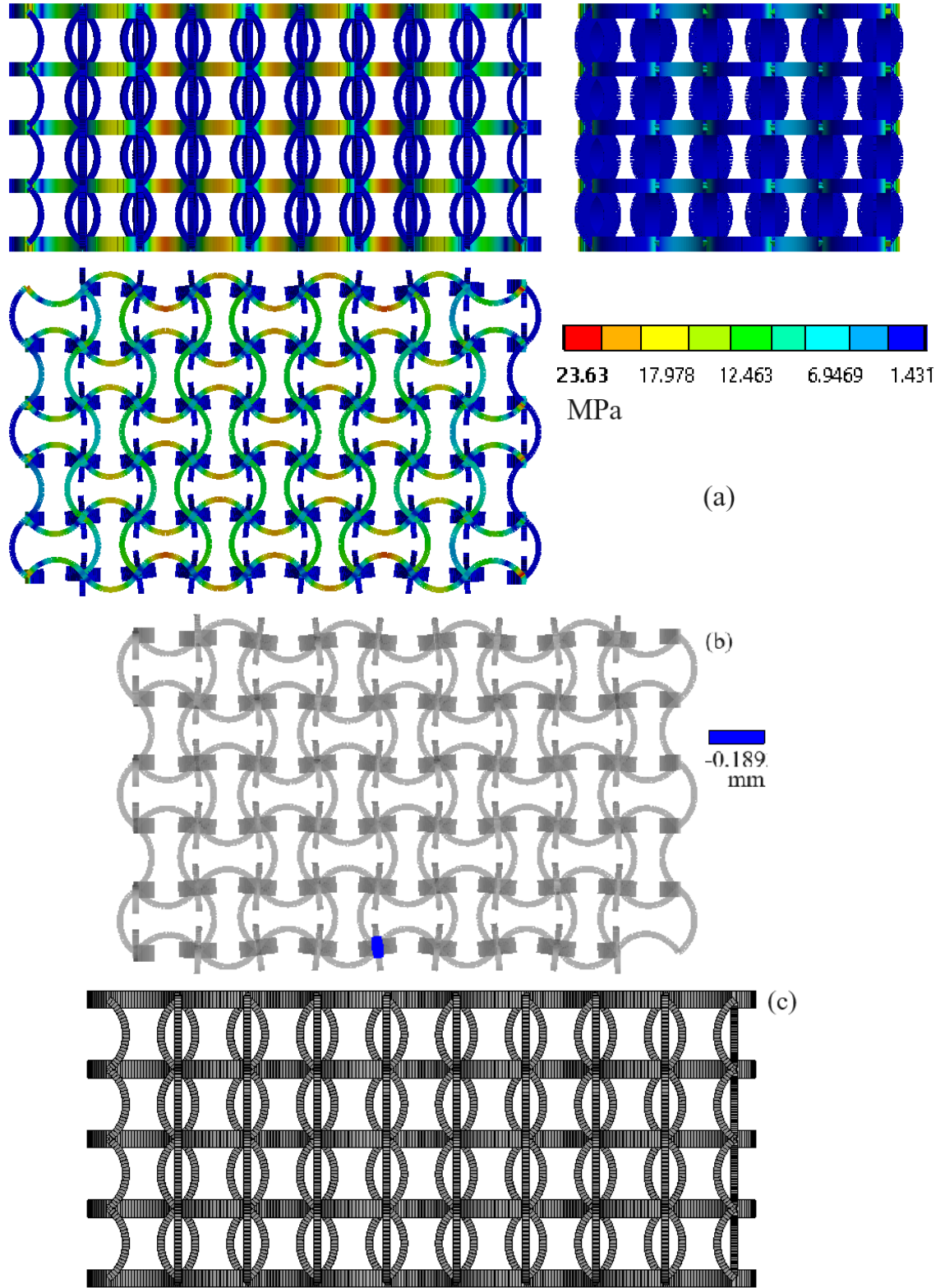
Çizelge 5. Devamı

Optimizasyon ile tespit edilen aday noktalar aslında cevap yüzeyi fonksiyonları kullanılarak elde edilen değerlerdir. Ayrıca, simülasyonda yeniden analiz edilerek doğrulanmışlardır. Optimizasyonla hesaplanan geometrik boyutlar, mevcut geleneksel imalat makinelerinin tolerans aralığının dışında kalan 0,457 mm gibi pek çok kusurat içermektedir. Bu nedenle bunların, bu hâli ile üretimi mümkün değildir. Üretilebilir değerler, kusuratları azaltmak için boyutların üste yuvarlanmasıyla elde edilmektedir. Üretilebilir değerler Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Doğrulanmış değerlerin üretilebilir değerleri

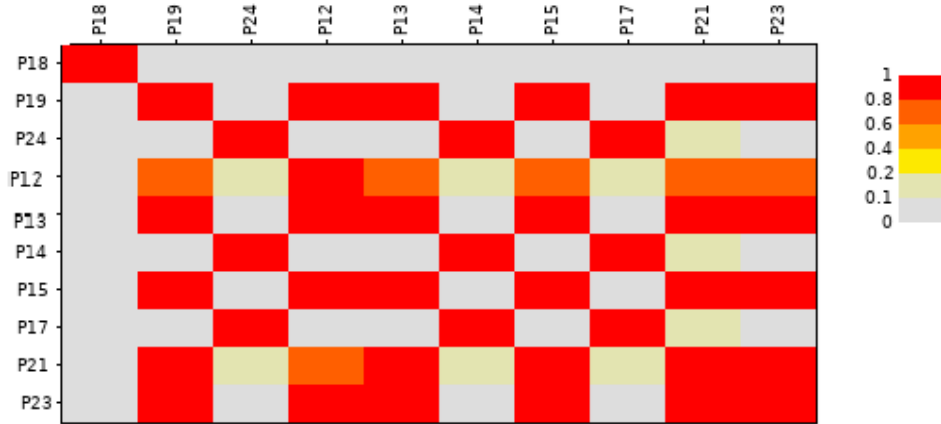
	Parametreler	Üretilebilir değerler
Giriş	En (mm)	0,5
	Boy (mm)	0,2
	Uygulanan aksel yer değişirme (mm)	-0,9
Çıkış	Gerilme (MPa)	-1,327
	Poisson oranı	-0,4128
	Yanal deformasyon (mm)	-0,1894

Optimum en 0,5 mm ve boy 0,2 mm olarak tespit edilmiştir. Çünkü bu değerlerde yapıda -1,327 MPa basma gerilmesi ve 23,636 MPa değerinde çekme gerilmesi oluşmaktadır. Bu durumda kafes yapının aksel yer değişirmesi 0,9 mm, yanal daralma değeri de -0,18935 mm olmaktadır. Şekil 7, seçilen noktanın yeniden analiz edilmesiyle elde edilen deformasyon, gerilme sonuçlarını göstermektedir. Beklendiği gibi, sabit olarak mesnetlenen bölgede herhangi bir deformasyon yoktur. Ancak, yapının iç kısımları maksimum deformasyona sahiptir. Maksimum çekme gerilmesi 23,636 MPa değerindedir. Polietilenin basmadaki akma gerilmesi 25 MPa, çekmedeki akma gerilmesi 33 MPa olup, yapı içerisindeki -1,327 MPa basma gerilmesi ve 23,636 MPa çekme gerilmesi, akma sınırlarının altındadır. Bu nedenle de hasar oluşmamaktadır. Görülmektedir ki aksel yükün etkisiyle yapıda eğilme meydana gelmektedir. Eğilmeye bağlı çekme ve basma gerilmeleri oluşmaktadır. Aksel yükün etkisi altında yapısal bükülme olgusu Vigliotti ve Pasini (2013) tarafından da gösterilmiştir [33]. Mikroboşlukların kesitin atalet momentini önemli ölçüde azaltmadığını ancak makroskobik ölçekte malzemenin akma mukavemetini azaltan gerilim konsantrasyonları oluşturduğunu bildirmişlerdir. Gülcan ve ark. (2021), kiral ağ yapılarının tasarımında topoloji optimizasyon yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanıldığını vurgulamıştır [34]. Küplere, oktahedralara, kesik küpoidlere ve 3×3×3 (20 mm × 20 mm × 20 mm) kafes desenine sahip kesik oktahedraya dayalı basit kafes yapılarının en iyi aksel basınç dayanımı özelliklerini sergilediği ileri sürülmüştür [35, 36]. Bu bağlamda bu çalışmada sunulan 9×4×5 kafes yapısı optimal bir şekle sahip değildir. Ancak süper hafiflik açısından son derece hafiftir. 3×3×3 düzende titanyum alaşımı (Ti6Al4V) kafes yapısından 1125,0 MPa akma dayanımı, 1200,0 MPa çekme dayanımı ve 0,34 Poisson oranı elde edilmiştir [35]. Kafesli tasarımlarda, uçtaki geleneksel kanat tabanlı tasarımlarla karşılaştırıldığında önemli ağırlık azalmaları rapor edilmiştir. Geleneksel kanat yapısıyla karşılaştırıldığında Kelvin yapısı, tüm kafes yapılar arasında %9,5 ile en yüksek ağırlık tasarrufunu sağlamaktadır [37]. İşbu çalışmada 0,774 g olan başlangıç kütlesi 0,298 g'a düşerek ciddi ağırlık kaybı sağlanmıştır. Simetrik kafesler ultra hafif olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir.



Şekil 7. Optimum DP'nin sağladığı (a) gerilme, (b) yanıl deformasyon ve (c) mesh görüntüsü (yan)

Şekil 8'den Spearman'ın korelasyon matrisi verilmiş olup, parametrelerin birbirleri ile ne denli ilişkili olduklarının tespitinde önemli bir araçtır. Korelasyon R için 0,01-0,29 arasındaki değerler, düşük düzeyde ilişki, 0,3-0,7 arası orta düzeyde ilişki, 0,71-0,99 arası ise yüksek düzeyde ilişki anlamına gelmektedir. Sıfır değeri, ilişki olmadığını gösterirken, negatif değerler, ters bir ilişki anlamına gelmektedir. Mutlak değerce R 'nin artması, ilişkinin daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 8. Spearman'ın korelasyon matrisi, $P18$ en, $P19$ boy, $P24$ uygulanan aksenal yer değiştirme, $P12$ maksimum kombine gerilmenin en fazla değeri, $P13$ maksimum kombine gerilmenin en az değeri, $P14$ aksenal deformasyon, $P15$ aksenal deformasyon, $P17$ yanal deformasyon, $P23$ yanal gerilme, $P21$ Poisson oranı

Görülebileceği üzere $P12$, $P15$, $P19$, $P21$ ve $P23$, $P13$ ile ters orantılıdır. $P12$, $P13$, $P14$, $P15$, $P17$, $P19$, $P21$, $P23$ ve $P24$ $P18$ ile aralarında bir orantı olmadığı görülmektedir. $P19$ ile $P12$, $P15$, $P21$, $P23$ doğru orantılıdır. $P24$ ile $P17$ ve $P14$ doğru orantılıdır.

3.4. Malzemelerin etkisi

Eklemeli imalatla sıklıkla kullanılan malzemelerin etkisi de değerlendirilmiştir. Malzeme olarak polietilen, Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316 paslanmaz çelik, polyamid-6, polipropilen ve kompozit (reçine polyamid/Naylon-66) kullanılmıştır. En, boy ve uygulanan aksenal yer değiştirme aynı kalmak üzere sonuçlar Çizelge 7'deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 7. Malzemenin sonuçlar üzerine etkisi

Parametreler	Polietilen	Ti6Al4V	AlSi10Mg	316	PA6	PP	Kompozit
Gerilme (MPa)	23,636	2304,6	1650,9	4211,5	23,93	31,41	34,82
Poisson oranı	-0,4128	-0,4139	-0,4138	-0,4147	-0,4136	-0,4129	-0,41291
Yanal deformasyon (mm)	-0,18935	-0,18989	-0,18985	-0,19031	-0,1974	-0,1894	-0,1894

Bu tabloda dikkat çekici sonuçlar bulunmaktadır. Malzeme değişse bile, yanal deformasyon ve Poisson oranının neredeyse hiç değişmediği ancak gerilmenin büyük oranda değiştiği görülmüştür.

Malzeme özellikleri, yük ve geometri değişmedikçe gerilmenin de değişmemesi gerekmektedir. Farklı malzemeler kullanıldığında, her ne kadar kafes geometrisi değişmemişse de, malzemenin elastiklik modülü farklı olduğundan dolayı yapının rijitliği değişmektedir. Bu durumda da aynı yüke verdiği tepki de farklı olmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada kübik birim hücrelerin kullanıldığı bir kiral kafes yapı tasarlanmıştır. Hafif ancak dayanıklı olması amacıyla tasarımın optimum boyutları tespit edilmiştir. Bu çalışmanın sonunda ulaşılan temel çıkarımlar şunlardır:

- Kiral yapı tasarımlarında daha küçük ve daha hafif yapılar daha az enerji ve daha az maliyet amaçları ile tasarlanmaktadır. Kafes boyutları, genetik algoritma yöntemi kullanılarak deformasyonu artırmak ve dayanım sınırını aşmamak için optimize edilmiştir. Optimum değerler ile yapılan analiz sonunda, yapının ayırıt kesitinin ebadı 0,5x0,2 mm olup, bu durumda yapı -0,9 mm'lik bir yer değiştirmeye dayanabilmiştir. Yapı üzerinde en fazla 23,636 MPa değerinde çekme gerilmesi ve -1,327 MPa değerinde basma gerilmesi oluşmuştur. Her ikisi de malzemenin akma dayanımının altındadır.
- Başlangıçta 0,744 g olan kütle, optimizasyon neticesinde 0,298 g değerine düşmüştür. 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.
- Kafes yapıların üretimi genellikle eklemeli imalat ile yapıldığından dolayı uygun malzeme alternatifleri kısıtlıdır. Farklı malzemeler farklı elastiklik modülüne sahip olduğu için yapının rijitliğini değiştirmektedir.
- Cevap yüzey fonksiyonu sayesinde tasarımda kullanılan değişkenlerin birbirleri ile olan ilişkileri tespit edilmiştir.
- Optimum boyutları bu çalışma sonunda tespit edilmiş olan bu kiral yapının serbest ve zorlanmış titreşim analizleri yapılarak titreşim cevabının tespit edilmesi, müteakip çalışma olma potansiyeline sahiptir. Sadece kesit değil, kesit ile birlikte kafes boyutlarının, düğüm noktalarının çapının, ara dikmelerin, sıfır kuvvet elemanlarının, farklı kafes türlerinin (küpoktahedron, oktahedron ve eşkenar dodekahedron) incelenmesi, Poisson oranının ayarlanması ve Cosserat mekaniği ile karşılaştırma yapılması konuları gelecek çalışma potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

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

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Ha CS, Plesha M, Lakes R. Chiral three-dimensional isotropic lattices with negative Poisson's ratio: Chiral 3D isotropic lattices with negative Poisson's ratio. *physica status solidi (b)*. 2016; 253. 10.1002/pssb.201600055.
- [2] Novak N, Mauko A, Ulbin M, Krstulović-Opara L, Ren Z, Vesenjajk M. Development and characterisation of novel three-dimensional axisymmetric chiral auxetic structures. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 17. 10.1016/j.jmrt.2022.02.025.

- [3] Vasiliev A, Pavlov I. Models and parameters of Cosserat hexagonal lattices with chiral microstructure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1008. 012017. 10.1088/1757-899X/1008/1/012017.
- [4] Andrea B, Luigi G. Simplified modelling of chiral lattice materials with local resonators. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 83, April 2016, 126-141.
- [5] Haifeng R, Jiahong H, Dong L. Wave propagation characterization of 2D composite chiral lattice structures with circular plate inclusions. *Engineering Structures*. 2022; Volume 264, 1 August 2022, 114466.
- [6] Alessandro S., Massimo R., Stefano G., Fabrizio S. Phononic properties of hexagonal chiral lattices. *Wave Motion*. Volume 46, Issue 7, November 2009, 435-450.
- [7] Liu XN, Huang GL, Hu GK. Chiral effect in plane isotropic micropolar elasticity and its application to chiral lattices. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011; Volume 60, Issue 11, November 2012, 1907-1921.
- [8] Eric SA, Goerlitzer, RM, Sergey N, Kirsten V, Marcel R, Peter B, Matthias K, Nicolas V. Chiral Surface Lattice Resonances. *Advanced Materials*, 21 April 2020.
- [9] Andrew JG. Chiral Surfaces: Accomplishments and Challenges. January 26, 2010. *ACS Nano* 2010, 4, 1, 5–10.
- [10] Gerhard HF., Kübler J, Felser C. Chirality in the Solid State: Chiral Crystal Structures in Chiral and Achiral Space Groups. *Materials (Basel)* 2022 Aug 23;15(17):5812. doi: 10.3390/ma15175812.
- [11] Erdoğan İ, Toktas İ. Investigation of The Effect of Geometry Inner Thickness on New Designed Auxetic Structure. *Politeknik Dergisi*, 2023-a; 26(2), 901-912. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1094739>
- [12] Nergis FB, Candan C, Duru SC. A novel yarn for personel protection in knitted sportswear. *Tekstil Ve Mühendis*. 2023; 30(131), 249-252. <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1365889>
- [13] Kaya O, Bademlioğlu AH, Kaboğlu C. Performance Optimization of Auxetic Structures on Energy Absorption of Cylindrical Sandwich Using Taguchi and ANOVA Methods, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2023-a; vol. 12, no. 2, pp. 445–454, doi: 10.17798/bitlisfen.1237388.
- [14] Erdoğan İ, Toktas İ. Investigation of the Auxetic of a novel geometric structure and improvement of Poisson's ratio at different inner thicknesses. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*. 2023-b; 11(4), 893-902. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1346281>
- [15] Kaya N, Eldem C, Toktas I. Investigation of the auxetic behavior of an original lattice structure design. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*. 2023-b; 11(4), 1081 - 1091. 10.29109/gujsc.1367616
- [16] Cetin E, Seyitoglu SS. A bibliometric overview of research on auxetic structures: Trends and patterns. *International Journal of Automotive Science And Technology*. 2024; 8(1), 65-77. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1374313>
- [17] Kaboğlu C. Statik yüklem altında oksetik iç yapılı sandviç kompozitlerin incelenmesi, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2022; c. 9, sy. 1, ss. 350–359, doi: 10.31202/ecjse.978310.
- [18] Becergen B, Çakmak M, Maral MF, Dayanç A, vd. Design Approaches on Inner Bodies of Gears with Methods Topology Optimization and Lattice Structures. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*. 2022; (39), 85-90. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1144818>
- [19] Akgün M, Süvari F, Eren R, Yurdakul T. Investigation of Auxetic Performance and Various Physical Properties of Fabrics Woven with Braid Yarns. *Textile and Apparel*. 2022; 32(3), 220-231. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.1033681>
- [20] Özkan E, Khosravi F. Experimental and numerical investigation of the mechanical behavior of the modified metal auxetic structure. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2023; 9(1), 48-62. <https://doi.org/10.34186/klujes.1222192>
- [21] Kaya O, Hafizoğlu H, Babacan N. Effect of Unit Cell Height on the Ballistic Performance of the Body-Centered Lattice Structures. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 2022; 6(1), 30-34. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1054219>

- [22] Üzün A., Kayacan MY. Investigation of over obstacle performance analysis of auxetic airless tyres. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2023; 7(3), 415-427. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1336826>
- [23] Akbulut A, Top N, Gökçe H. Eİ için tasarlanan kafes yapıların yapısal davranışlarının incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*. 2023; 4(2), 92-100. <https://doi.org/10.52795/mateca.1332895>
- [24] Öykünç D, Yıldızdag ME. Venüs'ün Çiçek Sepeti Süngerinden Esinlenerek Tasarlanmış Bir Kafes Sistemin Yapısal Davranışının İncelenmesi. *Gemi Ve Deniz Teknolojisi*. 2023; (222), 64-75. <https://doi.org/10.54926/gdt.1156139>
- [25] Çelebi A, İmanç, MM. Evaluation of Mechanical Properties of PLA Auxetic Structures Produced by Additive Manufacturing. *Journal of Materials and Mechatronics: A*. 2023; 4(2), 384-396. <https://doi.org/10.55546/jmm.1309858>
- [26] Körner C, Liebold-Ribeiro Y. A systematic approach to identify cellular auxetic materials. *Smart Mater Struct*. 2014; 24:025013 <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/2/025013>.
- [27] Warmuth F, Körner C. Phononic band gaps in 2D quadratic and 3D cubic cellular structures. *Materials (Basel)*. 2014; 8:8327–37. <https://doi.org/10.3390/ma8125463>.
- [28] Wormser M, Warmuth F, Körner C. Evolution of full phononic band gaps in periodic cellular structures. *Appl Phys A*. 2017;123.
- [29] Warmuth F, Osmanlic F, Adler L. Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting. *Smart Mater Struct*. 2017; 26:8.
- [30] Ansys, Theory Manual Version 9.0, Canonsburg, PA, USA., ANSYS Inc., 2004.
- [31] Korkmaz C, Kacar İ. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonları İçin Optimum Eleman Ağ Yapısının Belirlenmesi, 7 January 2022, Editör: Deniz Yılmaz; Osman Gökdoğan; Önder Uysal; Mehmet Emin Gökdoğan; Ahmet Süslü, Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Üzerine Güncel Araştırmalar. 2022; ISBN: 978-625-8037-52-4
- [32] Büyüköztürk Ş, Çokluk-Bökeoğlu Ö, Köklü N. *Statistics for Social Sciences*, 27th ed. Pegem Press, Ankara, Turkey, 2011.
- [33] Vigliotti A, Pasini D. Mechanical properties of hierarchical lattices, *Mechanics of Materials*. 2013; Vol. 62, Pages 32-43.
- [34] Gülcan O, Simsek U, Kavas B. Eklemeli İmalatla üretilen işlevsel olarak derecelendirilmiş metal yapılar, *Mühendis ve Makine*. 2021; Cilt. 62, Sayı 702, Sayfa 1-12.
- [35] Park K-M, Min K-S, Roh Y-S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. 2022; *Materials*, Vol. 15, Issue 1, Pages 97-102.
- [36] Fernandes RR, Tamijani AY. Design optimization of lattice structures with stress constraints, *Materials and Design*. 2021; Vol. 210, Issue 110026.
- [37] Khan N, Acanfora V. Non-Conventional wing structure design with lattice infilled through design for additive manufacturing. 2024; Vol. 17, Issue 7, Pages 1470-1478.