

Eİ İçin Tasarlanan Kafes Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi

Aysu Akbulut¹ , Neslihan Top¹ , Harun Gökçe^{1,*} 

¹Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.07.2023

Kabul: 22.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Ekleme imalat

Kafes yapılar

3B baskı

3B Modelleme

ÖZET

Endüstriyel gelişmelerin ışığında, üretilen parçaların hafif, dayanıklı, fonksiyonel ve ergonomik gibi özelliklerindeki artan istekler, üretim teknolojilerinde ve tasarım yaklaşımlarında farklılaşma zorunluluğu oluşturmuştur. Ekleme imalat teknolojisi ve ekleme imalata uygun tasarım yaklaşımları, bu farklılığın önemli çıktıları olarak görülmektedir. Ekleme imalat teknolojileri bu gereklilikleri karşılamak için ideal bir seçenek olarak karşımızdadır. Bu çalışmada, ekleme imalata uygun tasarım yaklaşımlarından biri olan kafes hücre tasarım yaklaşımı ele alınmıştır. Cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron kafes yapıları yapısal dayanım ve gözeneklilik özellikleri için sonlu elemanlar analiz metodu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, cuboctahedron kafes yapısının diğer kafes yapılarına göre daha yüksek dayanım sağladığını göstermiştir.

Investigation of The Structural Behaviors of Lattices Designed for AM

ARTICLE INFORMATION

Received: 26.07.2023

Accepted: 22.08.2023

Keywords:

Additive manufacturing

Lattice structure

3D printing

3D modelling

ABSTRACT

In the light of industrial developments, the increasing demands for the light, durable, functional and ergonomic features of the produced parts have created a necessity for differentiation in manufacturing technologies and design methods. Additive manufacturing technology and design approaches suitable for additive manufacturing are seen as important outputs of this difference. Additive manufacturing technologies are an ideal option to meet these requirements. In this study, the cage cell design approach, which is one of the design approaches suitable for additive manufacturing, is discussed. Cuboctahedron, octahedron and rhombic dodecahedron lattice structures were investigated for structural strength and porosity properties using finite element analysis method. The results obtained showed that the cuboctahedron lattice structure provided higher strength than the others.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ekleme imalat (Eİ) yöntemi, son yıllarda ürün geliştirme süreçlerinde büyük bir ilgi görmüş ve önemli gelişmeler kaydetmiştir. Bu yöntem, birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Otomotiv, havacılık, sağlık, mimarlık, moda ve oyuncak gibi birçok sektörde Eİ yönteminden faydalanılmaktadır. Özellikle, mevcut üretim süreçleri ile yüksek maliyet oluşturan müşteri talepleri, bu yöntem ile daha kolay ve düşük maliyetler ile üretilebilmektedir. Ürünlerin hafif, yüksek dayanımlı, hızlı üretilebilir, fonksiyonel, ergonomik olması gibi artan gereksinimleri Eİ için ideal bir koşul olarak ortaya çıkmıştır. Bununla beraber, Eİ; hızlı prototipleme, seri üretim, özelleştirilmiş üretim ve sürdürülebilir üretim gibi alanlarda da büyük bir potansiyele sunmaktadır ve gelecekte üretim teknolojileri alanında daha da önemli bir rol oynayacağı tahmin edilmektedir. Bu kabiliyetleri ile geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajlıdır. Bugün özellikle, bilgisayar ortamında yapılan tasarımların hızlı bir şekilde fiziksel ürünlere dönüşmesini sağlaması ve karmaşık tasarımların üretimini kolaylaştırması ile öne çıkmaktadır [1-2].

*Sorumlu yazar, e-posta: harungokce@yahoo.ca

To cite this article: A. Akbulut, N. Top, H. Gökçe, Eİ İçin Tasarlanan Kafes Yapıların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 92-100, 2023. <https://doi.org/10.52795/mateca.1332895>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

Geleneksel imalat yöntemlerinde parçaların üretimi genellikle karmaşık bir süreçtir. Bir parçanın üretimi genellikle malzemenin kesilmesi, delinmesi, şekillendirilmesi ve bir araya getirilmesi gibi bir dizi işlemi içerir. Bu yöntemlerle üretim süreci genellikle zaman alıcıdır ve tasarımın uygulanması için daha fazla işçilik gerekir. Ayrıca, tasarımda yapılan değişikliklerin uygulanması da zaman alıcı olabilir. Eİ yöntemi, bu süreci büyük ölçüde basitleştirir. Tasarım, dijital bir model olarak bilgisayar ortamında oluşturulur ve ardından 3B yazıcı gibi bir cihaza gönderilerek fiziksel bir nesneye dönüştürülür. Bu sayede tasarımın prototip üretimine veya seri üretime dönüştürülmesi çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir [3]. Üretim yöntemlerinden kaynaklı sınırlandırılmış ve yüksek maliyetli olabilecek karmaşık geometriler, organik şekiller ve iç içe geçmiş yapılar, Eİ süreçleriyle daha düşük maliyetler ile üretilebilir olacaktır.

Ürün geliştirme sürecinde tasarım iterasyon sayılarının artması, bu süreçlerde yaşanan iyileştirme faaliyetleri, nihai tasarımın elde edilmesine kadar devam eder. Tekrarlanan tasarım yaklaşımı, tasarımda daha iyi sonuçlar elde etmeyi ve ürünün performansını optimize etmeyi mümkün kılar. Savunma ve havacılık endüstrisinde eklemeli imalat yöntemi kullanılması bu avantajları ispatlar niteliktedir. Bu yöntemle üretilen gözenekli iç yapılar ve optimize edilmiş geometriler, yüksek faydalı yük hedefleyen platformların ağırlığını azaltmakta, yakıt verimliliği artırmaktadır. Son yıllarda, avantajlarından dolayı en yaygın çalışılan konuların başında Eİ İçin Tasarım (DFAM) gelmektedir. Neslihan ve ark. DFAM kabiliyetlerini yapay kemik iskelesi inşasında kullanmışlardır. Çalışmada scutoid, düzgün yirmi yüzlü ve biyomimetik olmak üzere üç farklı hücresel birim tasarlanmıştır. Bu birimler, CT verileri ile elde edilen L4 kemiğinin tekrar tasarlanmasında kullanılmış ve kemik üzerine gelen yüklere göre dayanımları incelenmiştir [4]. Yavuz, kafes tasarımları üzerine yaptığı çalışmada, kemik gelişimine en uygun geometrinin yüzey tabanlı geometrilerden olan gyroid olduğunu ifade etmiştir. Humerus kemiğine uygulanacak sabitleme implantının gyroid kafes yapılı olarak tasarımını gerçekleştirmiş, Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile yük altında implantın ve kemiğin üzerine gelen gerilmeler elde edilmiştir. Bu sayede kafes yapının güvenilirliği analiz edilmiştir [5].

Kafes yapıların farklı disiplinlerde kullanımı konusunda geniş bir literatür mevcuttur. Araçların ön tekerlerinde kullanılan salıncak kollarının ağırlığını hafifletilmesi için yapılan çalışmada üç farklı kafes yapısı kullanılmıştır. Aslan'ın yaptığı çalışma, kafes yapıların statik yük koşulları referans alınarak gerçekleştirilmiştir. SEA yöntemleri ile kafes yapıların birbirlerine göre farkları ortaya konmuştur [6]. Wang ve ark., derecelendirilmiş kafes yapıların optimize edilmesi için yeni bir yapısal tasarım metodu önermiştir. Çalışma kapsamında hedeflenen stratejinin, homojen denklemlerin çözüm için hesaplama süresini önemli ölçüde azalttığı ve tasarım verimliliğini arttırdığı ifade edilmiştir [7]. Şükrü hazırladığı tez çalışmasında, Eİ ile üretilen katı ve gözenekli polimer köpük yapıların yapısal davranışlarını mekanik test yoluyla karşılaştırmıştır. Mikro gözenekli polimerik yapıların basılmasını sağlayan termoplastik poliüretan filamentlerin, darbe emici davranış elde etmede başarılı olduğunu göstermiştir [8]. Egan ve ark. sekiz farklı topolojiye sahip kafes yapının, kemik doku mühendisliği uygulamalarıyla ilgili özelliklerini değerlendirmek için bir hesaplama yaklaşımı geliştirmiştir. Özellikler arasında gözeneklilik, gözenek boyutu, yüzey-hacim oranı, elastik modül, kayma modülü ve geçirgenlik bulunmaktadır. Kafes topolojileri, kiriş tabanlı birim hücrelerin desenlenmesiyle oluşturulmuş ve kiriş çapı ve birim hücre uzunluğu için tasarım parametreleri belirlenmiştir. Her bir topoloji için SEA yapılmış ve elastik modül ve kayma modülünün gözeneklilikle nasıl değiştiğini, geçirgenliğin gözeneklilik üssü yüzey-hacim oranının karesiyle nasıl değiştiğini nicel olarak belirlemişlerdir [9]. Yeşiloğlu yaptığı çalışmada, PLA malzemedan üretilen farklı dolgu geometrisi ve yoğunluğa sahip parçaların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması amaçlamıştır. Octet, gyroid ve cross kafes yapısına sahip birim geometriler 5x5x5 mm boyutlarında modellenmiştir. % 50, % 30 ve % 20 izafi yoğunluk değerinde deney numunelerini üretilmiştir. Bu parçaların mekanik davranışlarını araştırmak amacıyla çekme, basma ve darbe deneyleri yapılmış ve karşılaştırılan mekanik özellikler açısından en uygun birim hücre yapısı belirlenmiştir [10].

Bu çalışmada, octahedron ocret, rhombic dodecahedron ve cuboc tahedron kafes yapılarının dayanımlarının nümerik olarak belirlenmesi ve 3B yazıcı ile yazdırılması amaçlanmıştır. Yapılan

literatür taramasında, seçilen kafes modellerinin yapısal davranışlarının belirlenmesine dair yeterli düzeyde bilgi bulunamamıştır. Bu nedenle bu tasarımlar seçilmiş ve belirli bir yük altındaki yapısal dayanımları SEA yöntemi ile belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak, cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron kafes yapıları birim hücre olarak modellenmiş ve hedeflenen boyutlarda doğrusal çoğaltılarak kübik yapısı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında, SEA metodu ile yapısal dayanımları belirlenmiştir. Son aşamada ise, FDM metodu ile bu üç geometriden 3B baskı alınmış ve üretim uygunluğu belirlenmiştir.

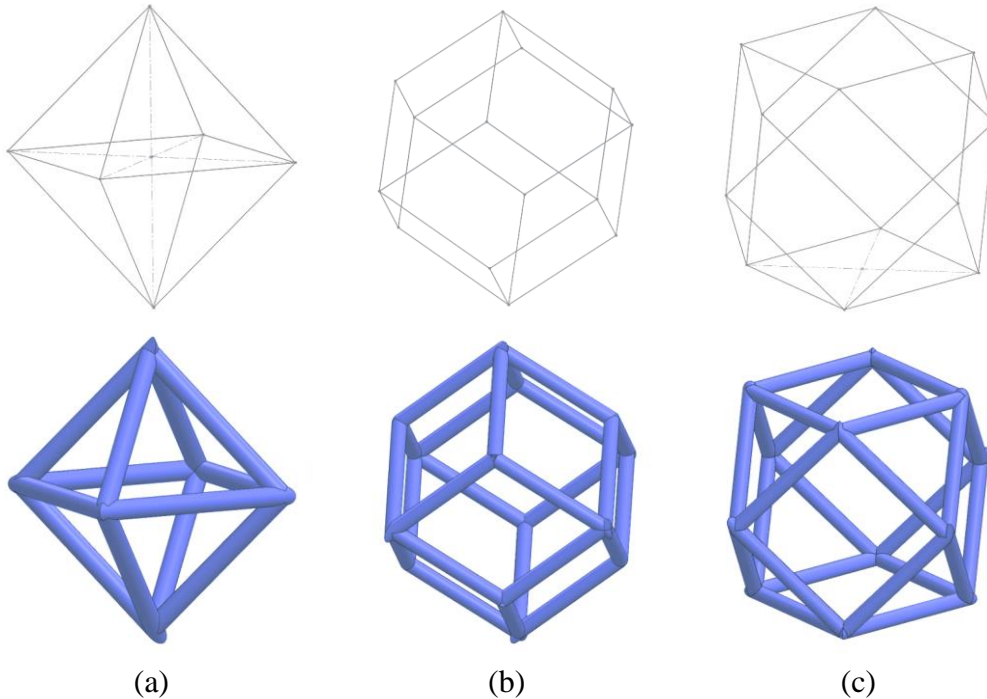
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmanın ilk aşamasında, kafes yapı olarak belirlenen cuboctahedron, octahedron ve rhombic dodecahedron modellerinin 3B kübik tasarımları CAD ortamında hazırlanmıştır. Ardından, kafes tasarımlarına statik yük altında yapısal dayanımları SEA metotları ile elde edilmiştir. Son olarak Eİ ile üretim süreçleri gerçekleştirilmiştir. İşlem süreçleri aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır.

2.1. Kafes Geometri Tasarımı (Lattice Geometry Design)

Kafes geometri çalışması için tel kafes ve katı modelleme metotları kullanılmıştır. Özellikle strut tipli kafes yapıların tel kafes olarak modellenmesi süreci hızlandırmaktadır. Yüzey tipli kafes yapılar yüzey modelleri ile modellenirken, eş kesitli yapılar (strut) tel kafes geometriler ile inşa edilir ve ardından birim hücrenin katı modeli elde edilir. Aşağıda üç kafes yapının tasarım süreci verilmiştir.

Octahedron, sekiz yüzlü olan çokyüzlüdür. En yaygın olarak dördü her tepe noktasında buluşan sekiz eşkenar üçgenden oluşan bir katıdır. Rhombic dodecahedron, 12 adet uyumlu eşkenar dörtgen yüzü olan dışbükey çok yüzlüdür. 24 kenarı ve 2 tip 14 köşesi vardır. Cuboctahedron, 8 üçgen ve 6 kare yüzü olan birçok yüzlüdür. Her bir bileşen 2 üçgen ve 2 kare ile 12 özdeş köşeye ve her biri bir üçgeni bir kareden ayıran 24 özdeş kenara sahiptir.

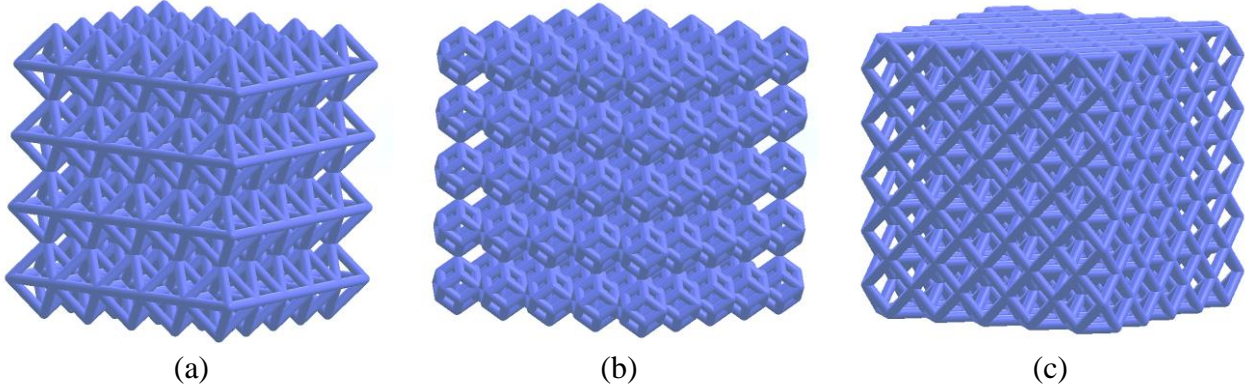


Şekil 1. a) Octahedron, b) rhombic dodecahedron ve c) cuboctahedron modellerinin 3B birim tasarımları (octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D cell model)

Birim hücrelerin inşasında, elemanlar Şekil 1’de gösterildiği gibi tel kafes olarak modellenmiştir. Strut çapı olarak 3B yazıcıda kullanılan nozul çapı referans alınarak 0.4 mm dairesel kesit tel kafes yapı üzerinde süpürülmüştür. Bu sayede 3B birim katı geometriler elde edilmiştir. Birim

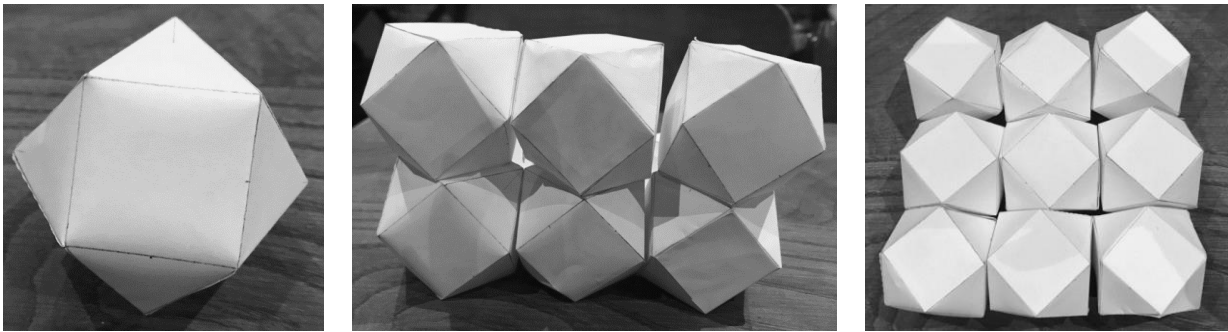
elemanların 10x10x10 mm küp oluşturması için aynı oranda çoğaltılması gerekmektedir. Şekil 2’de küp yapısı içerisinde çoğaltılmış geometriler verilmiştir. Kafes yapıların farklı geometrilerde olması küp olarak çoğaltılma yöntemlerinde farklılık olmasına neden olmaktadır.

Octahedron hücre modeli için düz kenarlardan birbirlerine temas edecek şekilde X ve Z eksenleri doğrultusunda 5 adet hücre birimi olacak şekilde, Y eksenine doğrultusunda ise 4 hücre birim yüksekliğinde olacak şekilde çoğaltılmıştır. Rhombic dodecahedron hücre modeli 4 adet eşkenar dörtgenin birleştiği köşe noktasından birbirlerine temas edecek şekilde X, Y ve Z eksenleri doğrultularında 5’er birim olacak şekilde çoğaltılmıştır. Son hücre modeli olan Cuboctahedron kare yüzeyleri birbirlerine temas edecek şekilde X, Y ve Z doğrultuları boyunca 5’er birim çoğaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. a) Octahedron, b) Rhombic dodecahedron ve c) Cuboctahedron modellerinin 3B kafes tasarımları (Octahedron, Rhombic dodecahedron and Cuboctahedron 3D lattice model)

Hücre modellerinin en ideal çoğaltım metodunun belirlenmesi için maket modellerden yararlanılmıştır. Karmaşık ve simetrik olmayan çokyüzlü kafes yapıların çoğaltılmasında zorluklar yaşanabilmektedir. Bu nedenle ideal çoğaltma yaklaşımlarının değerlendirilmesi uygun olacaktır. Bu çalışma kapsamında hücreler kâğıt maketlerden hazırlanmış ve çoğaltma tipleri belirlenmiştir. Aşağıda üç farklı kafes model için hazırlanan maketler verilmiştir (Şekil 3).

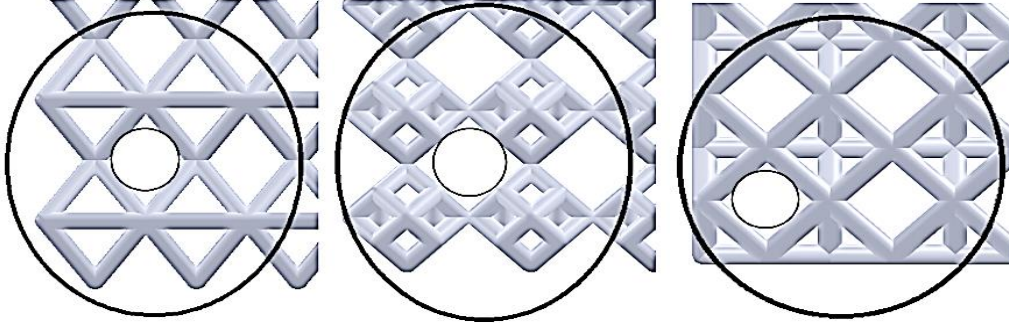


Şekil 3. Octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerinin 3B maket modelleri (Octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D mock-up)

2.2. Kafes Geometrilerin Gözenek Boyutları (Lattice Geometry Porosity Size)

Seçilmiş kafes yapılar bir araya getirilirken iç yapılarında bulunan boşlukların, yani gözeneklerin boyutları farklılıklar göstermektedir. Şekil 4’te octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron hücre modellerinin gözenek boyutları verilmiştir. Octahedron kafes modelinin gözenek boyutu katı model üzerinden 6.14 mm olarak ölçülmüştür. Rhombic dodecahedron hücre modelinin gözenek boyutu 5.07 mm olarak ölçülmüştür. Cuboctahedron hücre modelinin gözenek boyutu ise 5.08 mm olarak elde edilmiştir.

Yapılan gözenek boyutu ölçümlerinde, katı modeller CATIA programında açılarak gözeneklere dik bakılacak şekilde düzlemler elde edilmiştir. Açılmış olan düzlemlerde en büyük gözeneklerin köşegenleri referans çizgileri ile birleştirilmiş ve orta noktasına daire çizilerek ölçüsü alınmıştır. Bu şekilde kullanılan üç farklı model için bu işlem tekrar edilerek bütün hücre modellerinin gözenek ölçümü yapılmıştır.



Şekil 4. Octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerin gözenek boyutları (octahedron, rhombic dodecahedron and cuboctahedron 3D model porosity size)

3. KAFES MODEL YAPISAL ANALİZLERİ (LATTICE MODEL STRUCTURE ANALYSIS)

Tasarımı yapılan octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerinin analizleri için Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. İlk olarak çoğaltılan hücre modellerinin taban ve tavanına 2 mm kalınlığında rijit plakalar yerleştirilmiştir. SEA, geometriyi sonlu sayıda elemanlara bölerek, sonsuz sayıdaki denklemler yerine sonlu sayıda denklemler çözerek geometri hakkında bilgi edinmemizi sağlayan bir yaklaşımdır. Tablo 1’de kullanılan analizde kullanılan 3B modelin çözüm ağına ait eleman ve düğüm sayısı hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 1. Kafes geometri eleman sayısı ve düğüm sayısı (Lattice geometry number of mesh and number of nodes)

Geometri (10x10x10)	Düğüm Sayısı	Çözüm Ağı Sayısı
Octahedron ocret	600	1041
Rhombic dodecahedron	1625	3250
Cuboctahedron	1500	1800

Geometrilerin FEA için seçilen malzeme Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) plastik olarak belirlenmiştir. ABS plastiği asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu gibi elektriksel yalıtımı da iyidir. ABS plastik malzemesi, polibütadien içerisinde stiren akrilonitrilin polimerizasyonu ile elde edilen bir polimerdir. İçerdiği madde oranları % 20 akrilonitril, % 20 bütadien, % 60 stiren şeklinde oluşarak malzemenin karakteristiklerini meydana getirmektedir. Stiren maddesi plastiğe parlaklık sağlar ve yüzey kalitesini iyileştirir. -20° ve 60° derece sıcaklık aralığında kullanılabilir. Çevreye zararlı olmaması ve dayanıklı gövdeler kullanılan ürünlerde yer alması en önemli özelliklerindedir. Tablo 2’de yapısal analizde kullanılan ABS’nin elastisite modülü ve poisson oranı verilmiştir.

Tablo 2. FEA’da kullanılan ABS’nin mekanik özellikleri (ABS mechanical properties for FEA studies) [11]

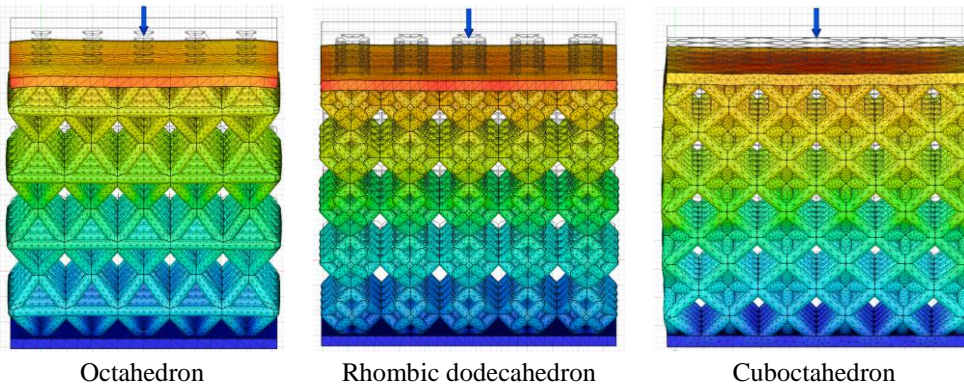
Malzeme	Young Modules (MPa)	Poisson Ratio (ν)
ABS Plastik	2240	0.38

Elastisite modülü, malzemenin lineer elastik davranışını ifade eder, yani gerilme miktarı doğru orantılı olarak arttıkça gerçekleşen deformasyon miktarı da artar. Farklı malzemeler farklı elastisite modüllerine sahiptir. Örneğin, çelik gibi sert malzemeler yüksek elastisite modülüne sahipken, kauçuk gibi esnek malzemelerin elastisitesi düşüktür. Poisson oranı ise, malzemenin elastik

davranışını tanımlayan bir malzeme özelliğidir. Poisson oranı, bir malzemenin uzunlamasına gerilirken enine yönde ne kadar sıkıştığını veya uzandığını gösterir. Poisson oranı negatif değerler arasında değişebilir. Negatif değerler, malzemenin uzunlamasına gerildiğinde enine yönde sıkışma eğilimi gösterdiğini ifade ederken, pozitif değerler ise malzemenin uzandığında enine yönde genişleme eğilimi gösterdiğini ifade eder. Örneğin, çoğu metal malzeme için Poisson oranı pozitif bir değere sahiptir, yani uzunlamasına gerilirken enine yönde genişler. Poisson oranı, malzeme mühendisliği ve yapısal analiz gibi alanlarda önemlidir. Malzemelerin elastik davranışının anlaşılması, tasarımların ve yapıların doğru şekilde analiz edilmesi için önemlidir. Poisson oranı, malzeme testleri veya malzeme özellik tabloları gibi kaynaklardan elde edilebilir. Çalışma kapsamında üç farklı geometri seçilerek hücresel birim tasarımları için tek bir malzeme ile yapısal analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

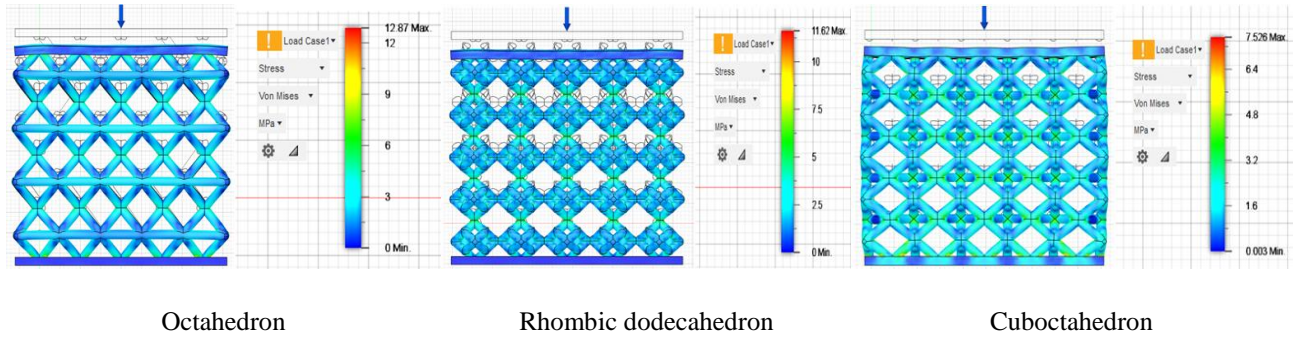
4. SONLU ELEMENLAR ANALİZ SONUÇLARI (FEA RESULTS)

Tasarımı yapılan octahedron, rhombic dodecahedron ve cuboctahedron modellerin SEA ile yapısal davranışları sonuçlarını elde etmek için Fusion 360 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada her üç model 2 mm rijit olarak tanımlanmış plaka arasında tutulmuş ve alt plaka her bölgeden serbestlik derecesi 0 olacak şekilde sabitlenmiştir. Plaka ve kafes arasındaki bağlantı tipi "bonded" olarak tanımlanmıştır. Üst plaka ve kafes geometri temas yüzeyleri için benzer bir tanımlama yapılmış ve 100N dağılımlı yük, üst plaka üzerine uygulanmıştır. Şekil 5'te SEA çalışmasında uygulanan sınır koşulları gösterilmiştir.



Şekil 5. SEA sınır koşulları genel görüntüsü (Overview of FEA boundary conditions)

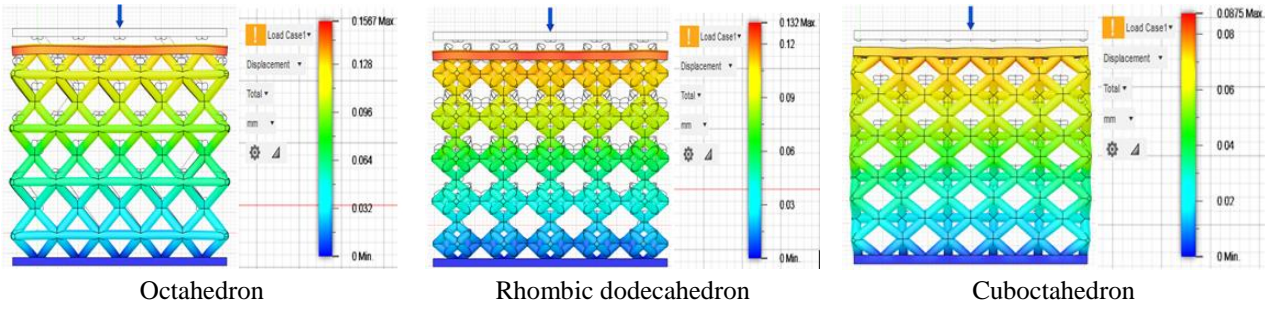
Oluşturulan çözüm ağında, eleman boyutu 0.2 mm ve geometrisi düzgün dörtyüzlü (tetrahedral) olarak belirlenmiştir. Tüm kafes modellerinde en küçük eleman boyutu % 50 oranında ayarlanmıştır. Bu oran analiz yapılan bilgisayarda daha kolay analiz alabilmek için yüksek tutulmamıştır. Yazılımın izin verdiği en kaba çözüm ağı ise % 10 olarak sınırlandırılmıştır.



Şekil 6. von Misses gerilme sonuçları (von Misses stress results)

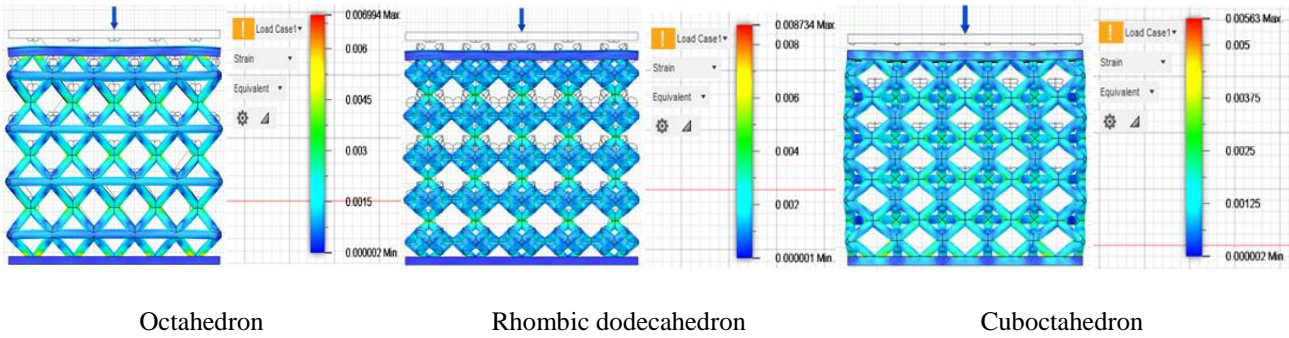
Von Misses gerilimi, gerilim limitine eşit olduğunda esnek malzemenin şekil değişikliğine uğrayıp uğramadığını belirlemek amacıyla yapılan bir yapısal analiz türüdür. Kullanılan octahedron,

rhombic dodecahedron ve cuboctahedron geometrilerinin von Mises gerilim analizi Şekil 6'da görülmektedir. Yer değiştirme değerleri ise, nesnenin bir referans sistemine göre hareket ettiğinde o nesnenin konumunda meydana gelen değişikliklerdir. Belirli bir kuvvet altında üç farklı geometrinin yer değiştirme dağılımları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Yer değiştirme sonuçları (Displacement results)

Kalıntı gerilmeler, yük altında bulunan bir malzemenin, yük uygulamadan önceki durumu ile kıyaslandığında ne oranda değişim gösterdiğini ifade eden bir yapısal analiz çeşididir. Gerilmeler, malzemenin yüzeyine uygulanan mekanik kuvvetlerin veya sıcaklık değişimlerinin etkisiyle oluşur ancak bu etkiler kaldırıldıktan sonra dahi malzeme üzerinde bir miktar gerilme kalır. Özellikle malzemenin plastik deformasyona uğraması, kaynak işlemleri, yüzey işlemleri, soğuma işlemleri gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Kalıntı gerilmeler; yorulma dayanımı, çatlak oluşumu, malzeme bozulması gibi mekanik performansları etkileyebilir. Bu nedenle, kalıntı gerilmelerin kontrolü ve ölçümü, parçanın üretiminde önemli rol oynar. Şekil 8'de üç farklı geometri için kalıntı gerilme sonuçları sunulmuştur.



Şekil 8. Kalıntı gerilme sonuçları (Residual stress results)

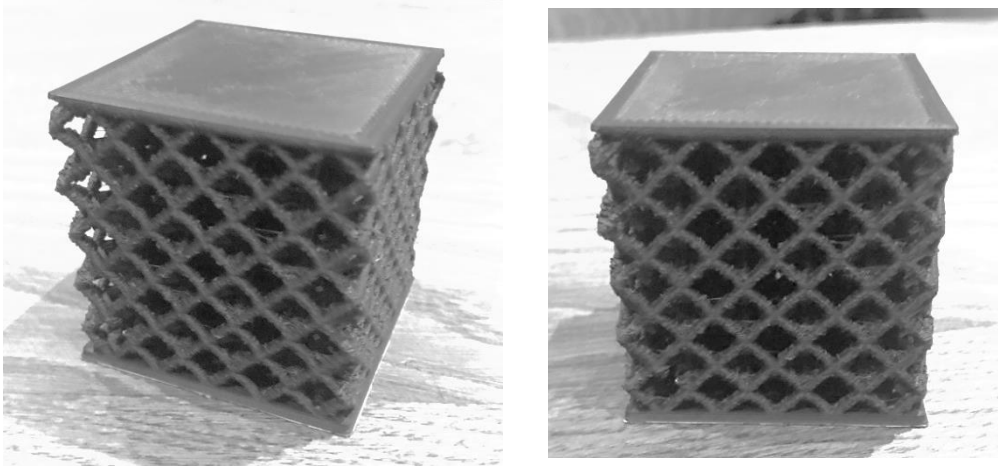
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Eİ yöntemleri ile tasarımı karmaşık olan ürünlerin üretimi daha kolay olmakla birlikte tasarımlarda yapılan yeniliklerle zaman kaybı olmadan imal edilebilmektedir. Bu çalışmada Eİ yöntemlerinden biri olan FDM kullanılarak eriyik maddenin katmanlı bir şekilde daha az malzeme kullanarak üretimi sağlanmıştır. Bu yöntemin sağladığı ayrıcalıklardan bazıları ucuz maliyet ve daha az malzeme kullanımı olduğundan dolayı parçaların ağırlıkları azalmış ve dolayısıyla daha hafif parçalar üretilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen kafes modellerinin kübik tasarımları gerçekleştirilmiş ve bu kafes tasarımlarına sonlu elemanlar tabanlı yapısal analizler uygulanmıştır. Analiz sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- ✓ Octahedron kafes modelinin tasarımı yapıldıktan sonra gerçekleştirilen analizlerde von Mises gerilim analizi sonucu kafes modeli için en yüksek 12.87 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modelinin en yüksek yer değiştirmesi 0.16 mm, kalıntı gerilme analizinde ise 0.0067 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Octahedron kafes modeli için yapılan gerilim analizi sonucunda gerilmelerin yoğun olduğu yerlerin düğüm noktalarında ve düğüm noktalarına yakın olan eğik kenarlarda fazla olduğu

görülmüştür. Ayrıca yapılan gerinim analizi sonucu streslerin biriktiği noktaların gerilim analizinde olduğu gibi düğüm noktalarında ve bu düğüm noktalarına yakın kenarlarda olduğu görülmüştür.

- ✓ Rhombic dodecahedron hücre modeli kafes tasarımına yapılan analizlerde von Misses gerilim analizi en yüksek 11.62 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modeli için en yüksek yer değiştirme 0.132 mm ve gerinim analizi 0.0087 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Rhombic dodecahedron hücre modeli için yapılan gerilim analizi sonucunda streslerin biriktiği yerlerin düğüm noktaları olduğu sonucuna varılmış ve bu noktalarda gerinmelerinde fazla olduğu görülmüştür.
- ✓ Cuboctahedron kafes modeli tasarımı için yapılan analizlerde sonuçlar von Misses gerilim analizi için en yüksek 7.53 MPa, yer değiştirme analizinde kafes modelinin en yüksek yer değiştirmesi 0.0857 mm ve gerinim analizinde 0.0056 $\mu\text{m}/\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Cuboctahedron kafes modeli için yapılan analizlerde streslerin yoğun olduğu yerlerin eğik kenarlar ve düğüm noktaları olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda gerinmelerin fazla olduğu yerlerde, streslerin yoğun olduğu yerlerdeki ile aynı olduğu görülmüştür. Fakat diğer modellerden farklı olarak yapılan analizlerdeki dağılımlar bu model için daha fazladır.



Şekil 9. 3B baskısı alınan parça görüntüsü (3D printed model view)

Elde edilen analiz sonuçlarına bakıldığında kafes tasarımı gerçekleştirilen hücre modelleri içerisinde cuboctahedronun diğer hücre modellerine göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Şekil 9’da baskı alınan cuboctahedronun modeli verilmiştir. Çalışması kapsamında tasarım ve analiz sonuçları göz önüne alınarak uzay ve havacılık sektöründe uçakların iniş takımında kullanılan ve farklı bir alaşım maddeden yapılmış parça üzerine montaj edilen destek parçası olan braketler kullanılmaktadır. Bu parçaların üretimi yapılırken, iç gözenek yapısında cuboctahedron hücre modeli kafes yapısı kullanılırsa hem üretimi yapılan parçanın ağırlığı hafifletilecek hem de dayanımı arttırılacaktır.

ACKNOWLEDGMENTS (TEŞEKKÜR)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği 2023 yılı Lisans Tamamlama Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. N. Top, İ. Şahin, H. Gökçe, Computer aided design and additive manufacturing of bone scaffolds for tissue engineering: state of the art, Journal of Materials Research, 26(19): 3725-3745, 2021.
2. M. Günay, İ. Yeşildağ, GMAW esaslı eklemeli imalat ile üretilen düşük karbonlu çeliğin mekanik özellikleri, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(3): 175-182, 2021.
3. M.İ. Sarı, İ. Şahin, H. Gökçe, Ç. Öksüz, Ring orthosis design and production by rapid prototyping approach, Journal of Hand Therapy, 33(2):170-173, 2020.

4. N. Top, H. Gökçe, İ. Şahin, Doku mühendisliğinde bilgisayar destekli yapay kemik iskelesi tasarımı, İKSAD Yayınevi, Kitap, 2020.
5. O. Yavuz, Eklemeli üretim ile üretilmiş gyroid humerus sabitleme plağının güvenilirlik analizi, Erzurum Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022.
6. B. Aslan, Yenilikçi tasarım yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
7. Y. Wang, L. Zhang, S. Daynes, H. Zhang, S. Feih, M. Wang, Design of graded lattice structure with optimized mesostructures for additive manufacturing, *Materials & Design*, 142: 114-123, 2018.
8. Ş. Kalaycıoğlu, Eklemeli imalat ile üretilen polimerik kafes yapıların mekanik davranışı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2022.
9. P.F. Egan, V.C. Gonella, M. Engensperger, S.J. Ferguson, K. Shea, Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing, *PloS one*, 12(8): 1-20, 2017.
10. R. Yeşiloğlu, Eklemeli imalat ile üretilen farklı dolgu geometrisi ve yoğunluğa sahip pla esaslı yapıların mekanik davranışlarının deneysel olarak araştırılması, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tez, 2022.
11. M.S. Kamer, Ş. Temiz, H. Yaykaşlı, A. Kaya, O. Akay, 3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3): 1197-1211, 2022.