



Mechanical properties of resin based additively manufactured polymer hybrid lattice structures under quasi-static compression conditions

Hüseyin Yaşar^{1,2*}, Kadir Ayas², Ali Durmuş³, Kadir Çavdar³

¹Harpax System Technologies INC., İhsan Doğramacı Bulvarı, 06800, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Institute of Science and Technology, Bursa Uludağ University, 16059, Bursa, Türkiye

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bursa Uludağ University, 16059, Bursa, Türkiye

Highlights:

- Hybrid lattice structures design
- Mechanical behavior of lattice structures
- Energy absorption capabilities of polymer lattice structures

Keywords:

- Hybrid lattice structures
- Additive manufacturing
- Quasi static compression test
- Energy absorption

Article Info:

Research Article

Received: 20.01.2024

Accepted: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1623376

Acknowledgement:

We would like to thank "Dokuz Kimya Arge" company and its employees for 3D printing of lattice structures for this study

Correspondence:

Author: Hüseyin Yaşar

e-mail:

huseyinnyasar@outlook.com

phone: +90 536 316 04 29

Graphical/Tabular Abstract

Lattice structures enable high energy absorption and lightweight design with their rapid development, adjustable mechanical properties and high strength to low weight ratios. With the widespread of additive manufacturing, the limits on the manufacturing of lattice structures are eliminated. Hybrid design is a rising trend on lattice structure design. In this paper, the RDIT hybrid lattice structure, single RD and IT structures given in Figure A were designed with the same relative density. Quasi-static compression tests were performed after manufacturing with LCD UV led light curing method. Effects of a novel hybrid unit cell on energy absorption capabilities and mechanical properties are evaluated. Unit cell number and size effects are also investigated. It is concluded that the hybrid lattice structure design improves the mechanical stability and energy absorption capabilities. In addition, increasing the cell size and decreasing the number of unit cells decreases the energy absorption capabilities and mechanical stability.

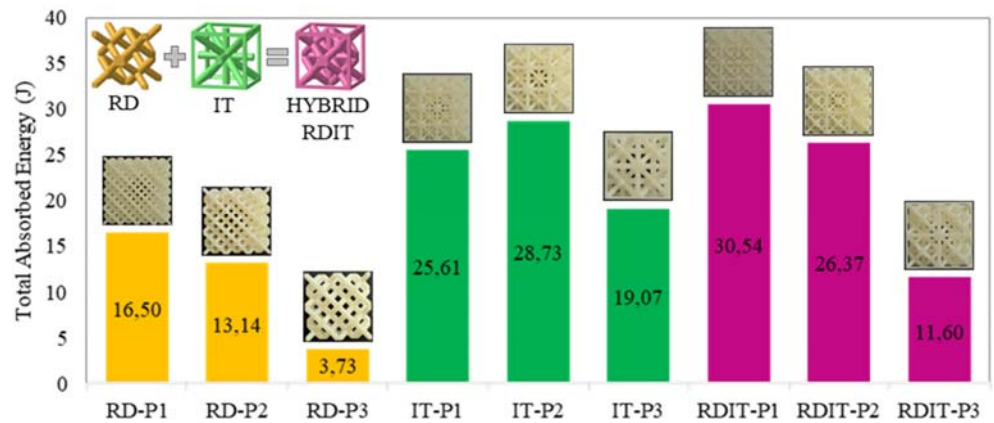


Figure A. Total absorbed energy of RD, IT and hybrid RDIT lattice structures

Purpose: This study investigates the effect of hybrid lattice structure design on mechanical properties and energy absorption.

Theory and Methods: In this study, a novel hybrid unit cell was designed from bending dominated rhombic dodecahedron (RD) and stretching dominated iso truss (IT) unit cells. 4x4x4, 3x3x3 and 2x2x2 lattice structures were designed with the same relative density as these three different unit cells. Lattice structures were additively manufactured using ABS-like resin by LCD UV led light curing method. Total absorbed energy, modulus of elasticity and maximum force values were calculated using force-displacement curves that were created by quasi-static compression test. The effects of hybrid design, different cell size and number were evaluated.

Results: Hybrid lattice structure design improves the mechanical stability of the lattice structure. The highest value of total energy absorption in the 4x4x4 configuration is in the hybrid lattice structure design, while in the 3x3x3 and 2x2x2 configurations it is in the IT lattice structure. This is thought to be due to the thicker truss diameters. All lattice structures, the increase in cell size and decrease in the number of cells negatively affect mechanical properties.

Conclusion: It is concluded that hybrid lattice structures are a useful alternative for improving energy absorption capability.



Reçineden eklemeli imalat yöntemiyle üretilen polimer hibrit kafes yapıların yarı statik basma koşullarında mekanik özellikleri

Hüseyin Yaşar^{1,2*}, Kadir Ayas², Ali Durmuş³, Kadir Çavdar³

¹Harpax Sistem Teknolojileri A.Ş., İhsan Doğramacı Bulvarı, 06800, Ankara, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği., 16059, Bursa, Türkiye

³Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Hibrit kafes yapı tasarımı
- Kafes yapıların mekanik davranışları
- Polimer kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.01.2025

Kabul: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1623376

Anahtar Kelimeler:

Hibrit kafes yapılar,
eklemeli imalat,
yarı statik basma testi,
enerji soğurma

ÖZ

Kafes yapılar, yüksek dayanım ve düşük ağırlık özellikleri sayesinde hafif ve dayanıklı tasarımlara olanak sağlar. Bu yapılar, kontrol edilebilir mekanik özellikleri ile havacılık, savunma, otomotiv, sağlık ve spor ekipmanı sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)”, “iso truss (IT)” ve RDIT hibrit birim kafes hücre tasarlanmıştır. Hibrit ve birim kafes hücreler ile eşit bağıl yoğunlukta ve farklı konfigürasyonlarda kenar uzunluğu 30 mm olan kübik kafes yapılar oluşturulmuştur. Kafes yapılar endüstriyel ABS benzeri reçineden UV led ışıkla kürleme (LCD) eklemeli imalat (Eİ) yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kafes yapıların yarı statik basma testi ile kuvvet-basma eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden %60 basma durumunda hesaplanan toplam soğurulan enerji (TSE) değerleri kullanılarak birim ve hibrit hücreli kafes yapı tasarımlarının mekanik performanslarının karşılaştırması yapılmıştır. Aynı hacim ve eşit bağıl yoğunlukta olan kafes yapıları, birim hücre boyutu ve sayısının etkisi incelenmiştir. Hibrit kafes yapı tasarımlarının mekanik kararlılığının daha iyi olduğu ve enerji soğurma kabiliyetlerini geliştirdiği anlaşılmıştır. Eİ yöntemlerinin yaygınlaşması ile bu kafes yapıların, konstrüksiyonları hafifletme ve enerji soğurma amacıyla yaygın bir kullanım alanına sahip olacağı düşünülmektedir.

Mechanical properties of resin based additively manufactured polymer hybrid lattice structures under quasi-static compression conditions

HIGHLIGHTS

- Hybrid lattice structures design
- Mechanical behaviour of lattice structures
- Energy absorption capabilities of polymer lattice structures

Article Info

Research Article

Received: 20.01.2024

Accepted: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1623376

Keywords:

Hybrid lattice structures,
additive manufacturing,
quasi static compression test,
energy absorption

ABSTRACT

Lattice structures with high strength to low weight ratios allow lightweight and durable structure design. These structures are used at aviation, defence, automotive, medical device and sport equipment industries with adjustable mechanical properties. In this study, RDIT hybrid lattice cell designed using “rhombic dodecahedron (RD)” and “iso truss (IT)” unit lattice cells. Hybrid and single topology unit cells were used to design cubic lattice structures that’s edge length is 30 mm with the same relative density and different configurations. Lattice structures were manufactured with industrial ABS like resin by UV led light curing (LCD) additive manufacturing (AM) method. Quasi static tests were applied on printed lattice structures and the related force-displacement curves were obtained. The total absorbed energy (TSE) of %60 compression values calculated from these curves were used to compare the mechanical performances of unit and hybrid cell lattice structure designs. The effect of unit cell size and number of cells on mechanical properties of lattice structures with the same volume and relative density were investigated. It was found that hybrid lattice structure designs with same relative density have better mechanical stability and enhanced energy absorption capabilities. Lattice structures can be widely used in lightweight designs and energy absorption applications with the widespread usage of AM methods.

*Sorumlu Yazar / Yazarlar / *Corresponding Author / Authors: *huseyinnyasar@outlook.com, kadirayas@uludag.edu.tr, adurmus@uludag.edu.tr, cavdar@uludag.edu.tr / Tel: +90 536 316 04 29

1. Giriş (Introduction)

Kafes yapılar; havacılık, uzay, savunma, otomotiv ve biyomedikal gibi sektörlerde hızlı geliştirme ve ayarlanabilir özellikleri sayesinde hafif yapı tasarımları, insan vücuduna uyumlu implantlar, çarpışma enerjisi soğurma, paketlenme, ısı yönetimi, titreşim sönümleme, filtreleme ve ses yalıtımı gibi pek çok uygulamada kullanılmaktadır [1]. Kafes yapılar hücre malzemelerin bir türüdür. Hücre malzemelerin ilk gözlemi 1665 yılında Robert Hooke tarafından ölü mantar dokusu üzerinde yapılmıştır [2]. Hücre malzeme yapılar gözenekli yapılar olarak adlandırılır; köpükler, petek yapılar ve kafes yapılardan oluşur [3, 4]. Doğada, bal peteği, bitki gövdesi, kemik dokusu ve sünger gibi pek çok örnek yapı, hücre malzemelerin verimli bir şekilde kullanılmasıyla meydana gelmiştir [5]. Hücre malzemeler temelde, birim hücrelerin düzenine bağlı olarak rastlantısal (stokastik) ve periyodik yapılar olarak ikiye ayrılır. Periyodik yapılarda, yapının davranışını nümerik ve analitik yöntemlerle hesaplamak daha iyi sonuçlar verirken, rastlantısal yapılarda mekanik davranışı belirlemek için istatistik yaklaşımları kullanılmaktadır. Periyodik ve rastlantısal yapılar ise kendi içinde kapalı ve açık hücre malzeme yapılar olarak adlandırılır [6, 7].

Kafes yapılar, diğer hücre malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi mekanik özellikler gösterir [8]. Bu yapıların temel amacı mümkün olan en az malzeme ile en dayanıklı yapıyı oluşturabilmektir. Ek olarak kafes yapılar, ayarlanabilir mekanik özellikleri sayesinde mühendisler için esneklik sağlayarak ideale yakın yapıların oluşturulmasına olanak verir [9]. Düşük ağırlık özellikleri ve yüksek enerji soğurma kabiliyetleri, yüksek dayanımları ve rijitlikleri, ayarlanabilir mekanik özelliklerinin yanında karmaşık yapılarda üretilebildikleri için pek çok uygulamada iyi bir seçimdir [10]. Kafes yapılar ile ilgili çalışmalara bakıldığında, farklı tasarım yaklaşımları, çeşitli malzemelerin kafes yapılarda uygulaması, eklemeli imalat yöntemleri ve son işlemlerinin etkinliği, nümerik analiz yaklaşımları ve farklı yükleme koşulları altında davranışları incelenmektedir. Düşük kütlelerde üretilebilen kafes yapılar, yüksek enerji soğurma kabiliyetleri ve kullanılacağı bölge için uygulamaya yönelik kontrol edilebilir mekanik özellikleri sayesinde, çarpışma ve mekanik şok ortamlarında kullanılmaktadır. Kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, enerji soğurma özellikleri, dinamik ve statik yükler altında davranışları üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır [11-14].

Kiriş temelli kafes yapının temel ölçütleri, 5x5x5 hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapı ve bu yapıyı oluşturan birim hücre üzerinde Şekil 1 ile gösterilmektedir. Burada “a” birim kafes hücrenin dıştan dışa bir kenarının uzunluğu, “L” kafes yapının dıştan dışa bir kenarının uzunluğu ve “d” ise birim kafes hücreyi oluşturan kirişlerin çapıdır.

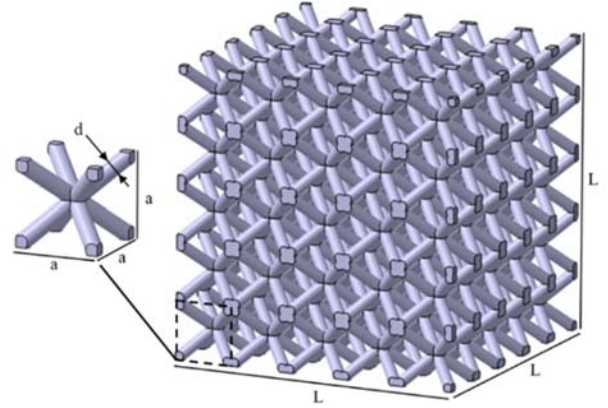
Kafes yapıların mekanik özellikleri tasarım ve ana malzemeye göre farklılık göstermektedir. Bu çalışmada belirtilen kafes yapılar, mühendislikte çok uzun zamandır bilinen ve büyük yapıların inşasında kullanılan kafes yapılardan farklı olarak küçük ölçekte olmaları sebebiyle doğrudan bir yapıdan ziyade kafes malzemeler

olarak da değerlendirilebilir. Ashby [9], bu yapılar üzerinde etkili üç değişkeni aşağıdaki gibi açıklamaktadır.

- Kafes yapının üretildiği malzeme ve özellikleri,
- Kafes yapıyı oluşturan yüzey ya da kiriş elemanların şekilleri (topolojileri) ve bu elemanların birbiriyle bağlantısı (düğüm noktaları)
- Kafes yapının bağıl yoğunluğu

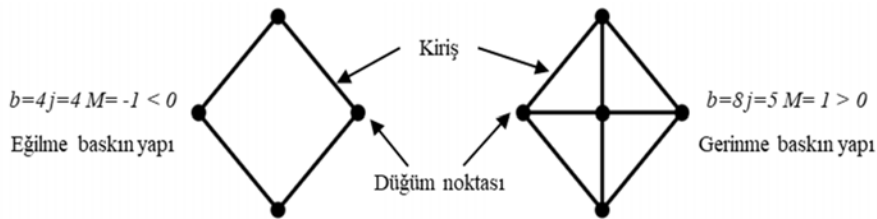
Bir kafes yapının bağıl yoğunluğu (ρ^*), kafes yapı yoğunluğunun (ρ) bu yapının üretildiği malzemenin yoğunluğuna (ρ_s) veya kirişlerin toplam hacminin (V_s) kafes yapı hacmine (V) oranı olarak tanımlanabilir [9]. Bağıl yoğunluk (ρ^*) Eş. 1’de verilmiştir.

$$\rho^* = \rho / \rho_s = V_s / V \quad (1)$$



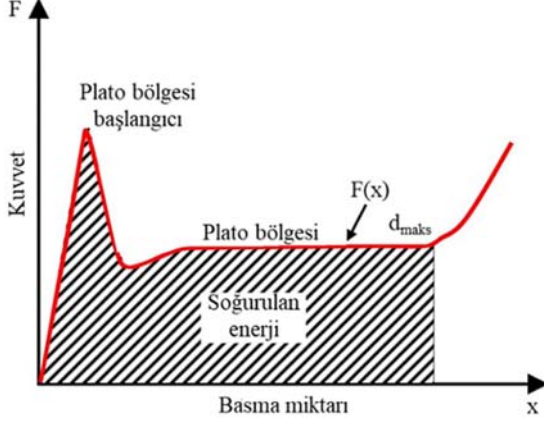
Şekil 1. 5x5x5 GMK kafes yapı tasarımı (5x5x5 BCC lattice structure design)

Kafes yapılar yükleme altında oluşan iç gerilmelere göre eğilme baskın (bending dominated) veya gerinme baskın (stretching dominated) yapılar olarak ikiye ayrılırlar. Bu sınıflandırma ile ezilme davranışları ve hata modları için tahmin yapılabilir. Kiriş temelli kafes yapıların bu sınıflandırılmasında Maxwell kararlılık kriteri kullanılır. Maxwell, kiriş temelli kafes yapılarda, kafesi oluşturan kirişler ve bunları birbirine bağlayan bağlantı noktalarını (düğüm noktaları) kullanarak bu yapıların yük altındaki davranış ve kararlılığının belirlenebileceği bir dizi matematiksel denklem önermiştir. Üç boyutlu yapılar için bu denklem $M = b - 3j + 6$ olarak belirtilmiştir [2]. Denklemden, “b” yapıda bulunan kirişlerin sayısını ifade ederken, “j” ise kirişleri birbirine bağlayan düğüm noktalarının sayısını göstermektedir. Burada “M” ile yapının bir mekanizma olup olmadığı yani birden fazla serbestlik derecesi olup olmadığına karar verilir [9, 15]. $M < 0$ olduğunda kafes yapı, en az bir serbestlik derecesine bağlı bir mekanizma gibi davranır ve eğilme baskın yapı olarak sınıflandırılır. $M \geq 0$ olduğunda ise dış yüklerin altında yapıyı oluşturan kirişlerde çekme ve basma kuvvetlerinin etkisiyle iç gerilmeler oluşur. Bu yapılar gerinme baskın yapılar olarak adlandırılır [2]. Örnek Maxwell kararlılık kriteri hesabı ve yapı örnekleri Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. Maxwell kararlılık kriteri (Maxwell stability criteria) [16]

Kafes yapıların basma yükleri altında enerji soğurma özellikleri, Şekil 3 ile verilen grafikten anlaşılabileceği üzere, yapıyı deforme eden kuvvet ve gerçekleşen ezilme miktarı ile oluşturulan kuvvet-basma grafiğinin altında kalan alanın hesaplanması ile belirlenebilir.



Şekil 3. Enerji soğuran yapılar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi (Force-displacement relationship of energy absorbers) [16]

Toplam soğurulan enerji (*TSE*) Eş. 2 ile hesaplanır. Burada *x* değeri basma miktarı olup, *F(x)* kafes yapıya basma yükü ettiği durumda ezilme miktarına karşılık gelen kuvvet değeridir. *d_{maks}* değeri ise katılma bölgesinin başladığı ezilme miktarıdır.

$$TSE = \int_0^{d_{maks}} F(x) dx \quad (2)$$

Kafes yapılar ile ilgili güncel çalışma konularından biri ise hibrit kafes yapı tasarımlarıdır. Hibrit kafes yapı ifadesi genel bir tanım olup, farklı şekillerde ele alınabilir. Bunlardan biri iki farklı malzemenin kullanıldığı kafes yapılarıdır [17, 18]. Bir diğer hibrit kafes yapı tanımı ise farklı iki veya daha fazla birim kafes hücrenin bir hacim içinde çeşitli konfigürasyonlarda dizilimidir [19, 20]. Farklı bir tanım olan ve bu çalışmada da yer alan hibrit kafes yapının diğer bir tanımı ise, iki farklı birim kafes hücrenin birleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan yeni birim kafes hücre ile oluşturulan kafes yapılar olarak tanımlanmaktadır [21, 22].

Bilinen birim kafes hücrelerin birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit kafes hücre örnekleri son yıllarda güncel bir araştırma konusu olarak ele alınabilir. Literatürde “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)” ve “sekizli kafes (octet)” hücrelerin birleşiminden oluşturulan hibrit kafes hücre tasarımı 316L paslanmaz çelik malzemeden seçici lazer ergitme (SLM) Eİ yöntemiyle üretilerek basma performansı incelenmiştir [23]. Bir diğer çalışmada “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)” ve “dikme ile güçlendirilmiş HMK (BCCZ)” birim kafes hücrelerden hibrit kafes elde tasarımı yapılarak eriyik yığılma (FFF) Eİ yöntemiyle tok PLA malzemeden üretilmiştir [24]. Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise, “G7” ve “basit kübik (SC)” birim kafes hücreler ile “sekiz yüzlü (octagonal)” birim kafes hücre ayrı ayrı birleştirilerek iki farklı özgün hibrit kafes yapı tasarlanmıştır. 316L paslanmaz çelikten seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri test ve nümerik yöntemlerle karşılaştırılmıştır [25]. Farklı bir özgün kafes yapı tasarımı olarak, “sekizli kafes (octet)” birim hücre ile “hacim merkezli kübik (BCC)” hücrenin birleştirilmesi elde edilen kafes yapıların mekanik özellikleri incelenmiştir [26]. Bilinen “Hacim merkezli kübik (BCC)”, “yüzey merkezli kübik (FCC)” ve “basit kübik (SC)” içi boş kiriş birim kafes hücreler ile plaka tabanlı “hacim merkezli kübik (BCC)” kafes hücrenin birleştirilmesi ile oluşturulan farklı hibrit kafes hücrelerin, 316L paslanmaz çelik malzemeden lazer toz yatağında füzyon (LPBF) Eİ yöntemiyle üretilen kafes yapıların basma testleri ile enerji soğurma ve mekanik özellikleri üzerine çalışma yapılmıştır [27].

Eklemlı imalat teknolojisi ise son yıllarda hızlı gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi zor yapıların eklemeli imalat usullerini kullanarak üretilmesi mümkündür. Ayrıca eklemeli imalat yöntemlerinin esnek tasarım avantajının yanında en büyük potansiyellerinden biri daha az malzeme kullanarak daha dayanıklı yapılar elde etme imkanıdır [28]. Bu potansiyelin kullanılması için eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen kafes yapılar ve malzeme özellikleri konularında pek çok çalışma yapılmaktadır [29, 30].

Bu çalışmada “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (RD)”, “iso truss (IT)” birim kafes hücreleri kullanılarak oluşturulan RDIT hibrit kafes yapı tasarımının mekanik özelliklere ve enerji soğurma kabiliyetine etkilerinin incelendiği bir çalışma olmaması araştırmanın çıkış noktası olmuştur. Ayrıca sıvı kristal ekran (LCD) eklemeli imalat yöntemiyle ABS benzeri reçineden üretilen kafes yapı çalışmaları sınırlıdır. Bir malzeme olarak ele alınan eşit hacimli (30 mm x 30 mm x 30 mm boyutlarında kübik tasarım) kafes yapıların aynı bağıl yoğunlukta ve yarı statik basma yükleri altındaki davranışları ve kararlılıklarına tasarımın etkisini incelenmektedir. Ayrıca birim hücre sayısı ve boyutlarının mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada deneysel metod bölümünde, kafes yapıların tasarım ve üretim süreçleri hakkında bilgiler verilmiş, sonrasında test çalışmaları açıklanmıştır. Sonuçlar ve tartışma bölümünde ise, yapıların deney öncesi incelemeleri ve yarı statik basma testi sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak sonuç bölümünde ise elde edilen bulgular verilmiş ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

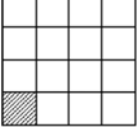
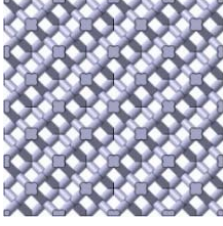
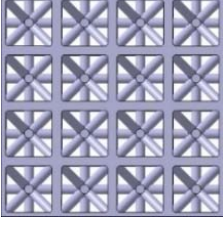
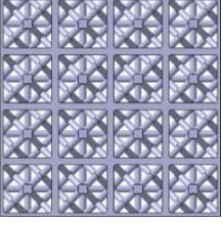
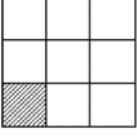
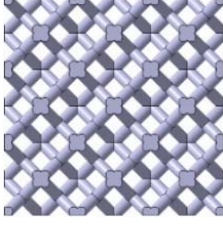
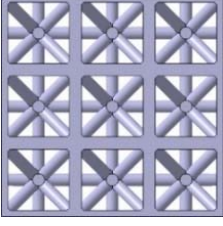
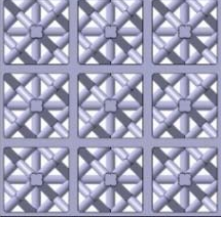
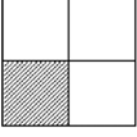
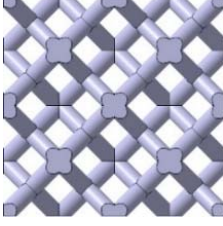
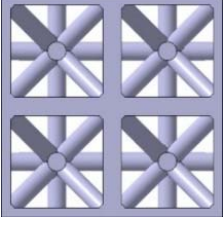
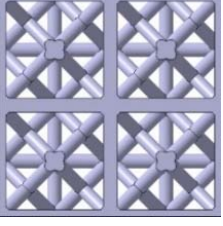
Hibrit ve birim kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri, mekanik özellikleri ve ezilme davranışlarının belirlenmesi için yapılan çalışmalar bu bölümde açıklanmaktadır. Kafes yapı tasarımları ve üretimleri ile ilgili bilgiler verildikten sonra yarı statik basma testlerine ait detaylar belirtilmiştir.

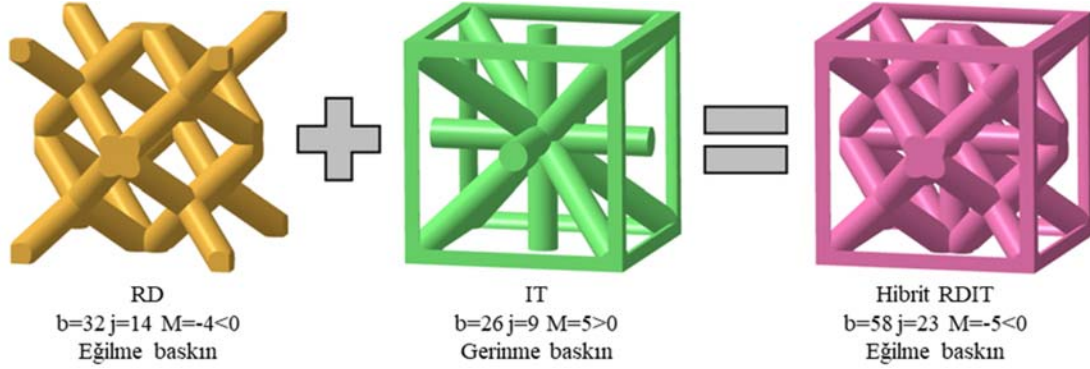
2.1. Hibrit Kafes Yapı Tasarımları (Hybrid Lattice Structures Design)

Hibrit kafes yapı tasarımı, iki farklı birim kafes hücrenin birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu çalışmada “eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron (RD))” ve “iso truss (IT)” birim kafes hücreler seçilmiştir. Eğilme baskın RD ve gerinme baskın IT birim kafes hücrelerinin birleştirilmesi ile eğilme baskın hibrit RDIT birim hücre tasarımı yapılmıştır (Şekil 4). Oluşturulan üç farklı birim hücreden farklı konfigürasyonlarda dokuz farklı kafes yapı tasarlanmıştır. Boyutları $a=7,5$ mm, $a=10$ mm ve $a=15$ mm olan kübik birim hücreler kullanılarak kenar uzunluğu 30 mm olan bir küp hacim içerisine yerleştirilecek şekilde 2x2x2, 3x3x3 ve 4x4x4 dizilimlerinde kafes yapılar oluşturulmuştur. Bu tasarımlarda bağıl yoğunlukların birbirine eşit olması amaçlanmış, yapıyı oluşturan dairesel kesitli kirişlerin çapları değiştirilerek bu şart sağlanmıştır. Bütün kafes yapıların bağıl yoğunlukları %22,4 ile %22,9 aralığında olacak şekilde tasarımlar tamamlanmıştır. Tasarım çalışmalarında Catia V5R19 (Dassault System) bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında tasarımı yapılan tüm kafes yapıların birim hücre boyutları (*a*), dizilimleri, kiriş çapları (*d*), bağıl yoğunlukları (ρ^*) ve görselleri Tablo 1’de verilmiştir. 4x4x4 konfigürasyonunda tasarlanan kafes yapılar için P1, 3x3x3 konfigürasyonu için P2 ve 2x2x2 konfigürasyonu için P3 kısaltması verilmiştir. Örneğin, P1 kısaltması ile verilen kafes yapıların birim hücresi, kenar uzunluğu $a=7,5$ mm olan bir kübik hacim içindeki kirişlerden oluşur ve 64 adet birim hücre bulunmaktadır. P2 kafes yapıları 27 adet, P3 kafes yapıları ise 8 adet birim hücreden oluşmaktadır ve bütün kafes yapıların hacimleri eşittir.

Tablo 1. Polimer kafes yapı tasarımları (Polymer lattice structure designs)

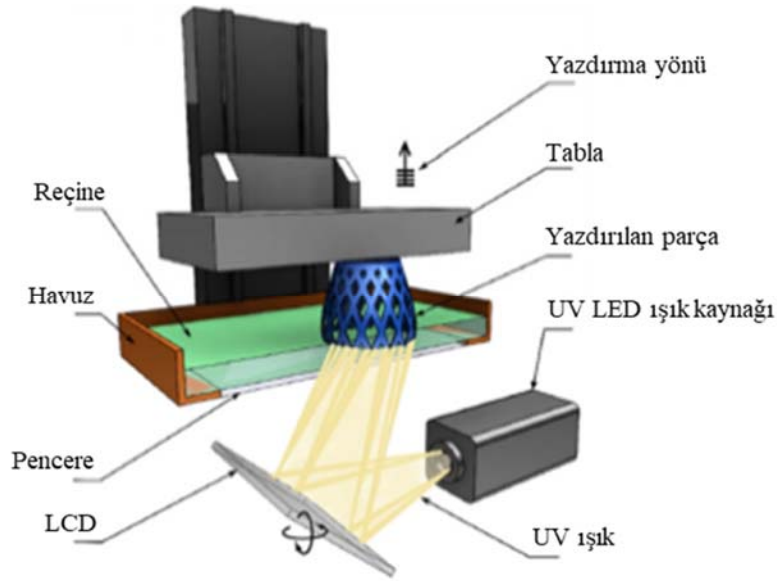
30x30x30 mm	RD	IT	Hibrit RDIT
P1 $a=7,5$ mm $4 \times 4 \times 4$ 	 $d=1,22 \rho^* = \%22,5$	 $d=1,25 \rho^* = \%22,5$	 $d=0,95 \rho^* = \%22,9$
P2 $a=10$ mm $3 \times 3 \times 3$ 	 $d=1,63 \rho^* = \%22,5$	 $d=1,67 \rho^* = \%22,5$	 $d=1,25 \rho^* = \%22,4$
P3 $a=15$ mm $2 \times 2 \times 2$ 	 $d=2,46 \rho^* = \%22,8$	 $d=2,52 \rho^* = \%22,8$	 $d=1,9 \rho^* = \%22,9$

**Şekil 4.** Hibrit birim hücre tasarımı (Hybrid unit cell design)

2.2. Kafes Yapıların Eklemeli İmalat ile Üretimi (Additive Manufacturing of Lattice Structures)

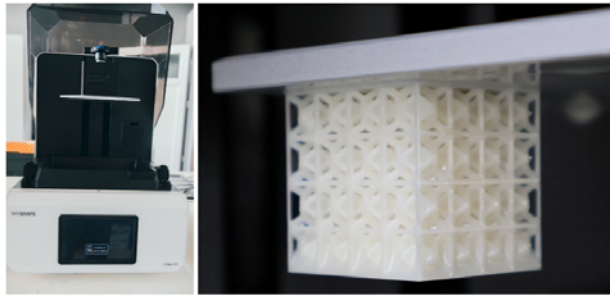
Tasarım çalışması tamamlanan kafes yapılar, ALIAS marka endüstriyel ABS benzeri reçine malzeme kullanılarak sıvı kristal ekran (LCD) eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Havuz foto polimerizasyonu temel Eİ yöntemlerinden biri olan LCD Eİ yönteminde kürleme işlemi için UV LED ışık kaynağı kullanılır (Şekil 5). Havuz foto polimerizasyonu, en eski eklemeli imalat yöntemi olup, temelde belirli bir dalga boyundaki ışıkla kürleşerek katı hale geçen sıvı polimer malzemeler kullanılır. Bu malzemeler genel olarak foto polimerler olarak adlandırılır [31, 32].

Katı modelleri oluşturulan tasarımlar, STL formatına dönüştürülmüş ve sonrasında Shapeware dilimleme yazılımı ile yazdırılabilir format haline getirilmiştir. Üretim çalışmalarında Şekil 6'da gösterilen Rayshape Edge1 üç boyutlu (3B) yazıcı kullanılmıştır. Kafes yapılar, 3B yazıcı ile üretim sonrasında kirişlerin üzerinde bulunan kürlenmemiş artık reçinelerin temizlenmesi amacıyla izopropil alkol havuzunda 6 dakika boyunca yıkanmıştır. Son aşama olarak ShapeCure kürleme cihazında 40 °C sıcaklıkta 15 dakika boyunca kürlenmiştir. Her bir kafes yapı tipi tablaya paralel ve aynı üretim tablasında olacak şekilde üretimler tamamlanmıştır. Polimer kafes yapıların bağıl yoğunlukları eşit olduğu için üretim süreleri ve



Şekil 5. LCD eklemeli imalat yöntemi (LCD additive manufacturing) [33]

kullanılan hammadde miktarı birbirine yakındır. Bu nedenle kafes yapıların birim maliyetleri benzerdir. Polimer kafes yapılara ait üretim parametreleri Tablo 2 ile verilmiştir.



Şekil 6. Rayshape Edge1 3B yazıcı (Rayshape Edge1 3D printer)

Tablo 2. Kafes yapıların üretim parametreleri
(Additive manufacturing parameters of lattice structures)

Parametre	Değer
Işık kaynağı ve dalga boyu	LED, 405 nm
Katman kalınlığı	50 μ m
Reçine viskozitesine göre bekleme süresi	1 s
Reçineye göre maruz kalma süresi	2 s
Yazdırma hızı	40 mm/sa
Ortam sıcaklığı	25 °C

2.3. Yarı Statik Basma Testleri (Quasi Static Compression Test)

Üretimi tamamlanan kafes yapılar, 100 kN kapasiteli yük hücresine sahip UVE marka MNR100 model universal çekme-basma test cihazı kullanılarak yarı statik basma koşullarında test edilmiştir. Test cihazının sabit plakasının üzerine yerleştirilen kafes yapılara, 20 N ön yük uygulanmış ve 5 mm/dk sabit hız verilen hareketli plakalar ile basma testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Testler, basma yönü ile kafes yapıların yazdırma doğrultusu aynı olacak şekilde yapılmıştır. Deplasman kontrolü ile sabit hızda ilerleyen hareketli plaka ile test numuneleri yüksekliğinin %60'ına kadar basılması sağlanmıştır. Her bir kafes yapıdan 3'er adet olmak üzere 27 basma testi gerçekleştirilmiştir. Test çalışmalarında hareketli plakanın düşey

doğrultuda ilerlediği mesafe ve yük hücresinden alınan kuvvet değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca her bir numunenin basma testi esnasında video kayıt cihazı ile görüntü toplanmıştır.



Şekil 7. Test cihazı ve kafes yapı yerleşimi
(Test device and location of lattice structure)

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde bilgisayar ortamında hatasız tasarlanan kafes yapılar ile üretilen kafes yapılar arasındaki kütle farkları incelenmiştir. Basma testi sonuçlarının değerlendirilmesi ve kafes yapıların mekanik özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Aynı bağül yoğunluğa sahip kafes yapıların kuvvet-basma verileri kullanılarak aşağıdaki araştırmalar yapılmıştır.

- Kafes yapıların kuvvet-basma ve gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturularak, toplam soğurduğu enerji (TSE) ve elastisite modülleri hesaplanmıştır. Test esnasında kaydedilen videolardan %20, %40 ve %60 basma sonucunda ezilme davranışları gösterilmiştir.
- Aynı bağül yoğunlukta ve eşit kütlede tasarlanması amaçlanan tekil ve hibrit kafes yapılarda, %60 basma durumunda TSE değerleri karşılaştırılarak hibrit tasarımın etkileri değerlendirilmiştir.
- Farklı hücre boyutu ve konfigürasyonuna sahip tekil ve hibrit kafes yapıların mekanik özelliklerine, birim hücre boyutu ve sayısının etkisi araştırılmıştır.

3.1. Kafes Yapıların Üretim Sonrası Değerlendirilmesi (Evaluation of Lattice Structures After Additive Manufacturing)

Üretimi gerçekleştirilen 9 farklı kafes yapıya ait görseller Şekil 8’de gösterilmektedir. Kafes yapıların katı modelleri ile malzeme yoğunluğu $1,25 \text{ g/cm}^3$ alınarak tasarım kütleleri hesaplanmıştır. Ardından hassas terazi kullanılarak üretim sonrası kütleleri ölçülmüştür (Şekil 9). Elde edilen değerler arasındaki farklar hesaplanmıştır. Tablo 3’te verilen değerler incelendiğinde, ölçümlerin tasarım kütlelerinden daha fazla olduğu görülmüştür. Yazıcı hassasiyetinin yanı sıra, üretim sonrası giriş yüzeylerinde kalan ve kürlenmeyen reçinelerin alkol ile yıkanmasına rağmen giriş yüzeylerinden uzaklaştırılamaması sebebiyle bu durumun oluştuğu söylenebilir. $4 \times 4 \times 4$ dizilimindeki kafes yapıyı oluşturan toplam giriş sayısı ve yüzey alanı, $3 \times 3 \times 3$ ve $2 \times 2 \times 2$ kafes yapılarda bulunan giriş sayısından daha fazla olduğu için, en büyük hata payı P1 kafes yapılarında görülmüştür.

Yarı statik basma testleri sonrasında oluşturulan kuvvet-basma grafikleri ile kafes yapıların %60 basma durumu için toplam soğurduğu enerji (TSE) hesaplanmış ve akma bölgesindeki en yüksek

kuvvet değerleri belirlenmiştir. $30 \times 30 \times 30 \text{ mm}$ hacminde tasarlanan kafes yapıların yüzey alanı 900 mm^2 alınarak gerilme değerleri hesaplanmış ve gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde elastik bölge eğiminin hesaplanması ile elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Şekil 10’da verilen grafiklerde, her bir kafes yapı topolojisi için tekrarlı gerçekleştirilen üç test verisinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ancak RD-P2 T1 ve T2 testleri; RD-P3 T2 ve T3 testleri ve IT-P3 T2 numaralı testlerde ezilme esnasında kırılan yapılardan dolayı süreksizlik oluşmuş ve kuvvet değerleri sıfıra indiği için test durdurulmuştur. Kafes yapıların üretildiği ana malzemenin yüksek kırılabilirliği sebebiyle bu durumların oluştuğu söylenebilir. Her kafes yapı için yapılan 3 testten, %60 basma durumu için TSE değeri en yüksek olanın test sonuçları (koyu olarak gösterilmiştir), diğer kafes yapılarla karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır (Tablo 4).

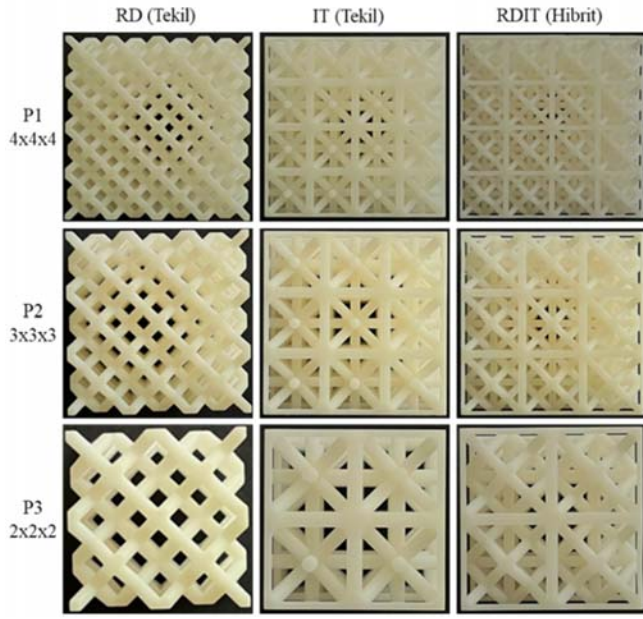
3.2. Yarı Statik Basma Testi Sonuçları (Quasi Static Compression Test Results)

Kafes yapılardan, $4 \times 4 \times 4$ hücre diziliminde olan birim RD-P1 ($d=1,22 \text{ mm}$), IT-P1 ($d=1,25$) ve hibrit RDIT-P1 ($d=0,95 \text{ mm}$) yapılarının

Tablo 3. Kütle ölçümü değerleri (Mass measurement values)

Kafes yapı	Tasarım kütlesi (g)	Tasarım yüzey alanı (mm^2)	Numune	Ölçülen kütle (g)	Hata (%)
RD-P1	7,58	$1,76 \times 10^4$	T1	7,74	(+) 2,1
			T2	7,79	(+) 2,7
			T3	7,81	(+) 3,0
			SS	0,03	-
IT-P1	7,58	$1,87 \times 10^4$	T1	7,81	(+) 3,0
			T2	7,76	(+) 2,3
			T3	7,86	(+) 3,7
			SS	0,04	-
RDIT-P1	7,41	$2,37 \times 10^4$	T1	7,95	(+) 3,0
			T2	8,02	(+) 3,9
			T3	8,06	(+) 4,4
			SS	0,05	-
RD-P2	7,61	$1,34 \times 10^4$	T1	7,61	0
			T2	7,71	(+) 1,3
			T3	7,75	(+) 1,8
			SS	0,06	-
IT-P2	7,61	$1,45 \times 10^4$	T1	7,69	(+) 1,1
			T2	7,72	(+) 1,5
			T3	7,72	(+) 1,5
			SS	0,01	-
RDIT-P2	7,75	$1,8 \times 10^4$	T1	7,74	(+) 2,6
			T2	7,78	(+) 3,1
			T3	7,73	(+) 2,4
			SS	0,02	-
RD-P3	7,69	$0,91 \times 10^4$	T1	7,65	(-) 0,5
			T2	7,70	(+) 0,1
			T3	7,74	(+) 0,6
			SS	0,04	-
IT-P3	7,69	$1,03 \times 10^4$	T1	7,79	(+) 1,3
			T2	7,71	(+) 0,3
			T3	7,83	(+) 1,8
			SS	0,05	-
RDIT-P3	7,42	$1,26 \times 10^4$	T1	7,88	(+) 2,1
			T2	7,95	(+) 3,0
			T3	7,92	(+) 2,6
			SS	0,03	-

Şekil 11 ve Şekil 14 ile verilen test sonuçları ve ezilme davranışlarına bakıldığında, 30,54 J ile en yüksek enerjiyi hibrit RDIT-P1 soğurmuştur. IT-P1 kafes yapısı 25,61 J ile hibrit yapının yaklaşık %84'ü, RD-P1 16,5 J ile hibrit yapının yaklaşık %54'ü kadar enerji soğurmuştur. Ezilme davranışlarına bakıldığında malzemenin gevrek yapısından dolayı tüm kafes yapılarında basma miktarı arttıkça kırılmalar gerçekleşmiştir. Ancak hibrit yapının akma sonrası plato bölgesinde diğer tekil kafes yapılara göre hem kuvvet-basma grafiği hem de ezilme davranışına bakarak daha kararlı olduğu söylenebilir. Akma bölgesinde 2,7 kN ile en yüksek kuvvet değeri IT-P1 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P1 numunesinde 1,96 kN ve RD-P1 yapısında 1,43 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı yine IT-P1 yapısı olup 103,15 MPa değerindedir. Bunun temel sebebi IT-P1 kafes yapısının gerinme baskın olması ve basma yönüne dik kirişlerin bulunması gösterilebilir. Bu durum kirişlerin burkulması sebebiyle kuvvetin hızlıca artıp sonrasında ani düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 8. Üretimi yapılan kafes yapılar
(Additively manufactured lattice structures)



Şekil 9. Hassas terazi ile kütle ölçümü
(Mass measurement with precision scale)

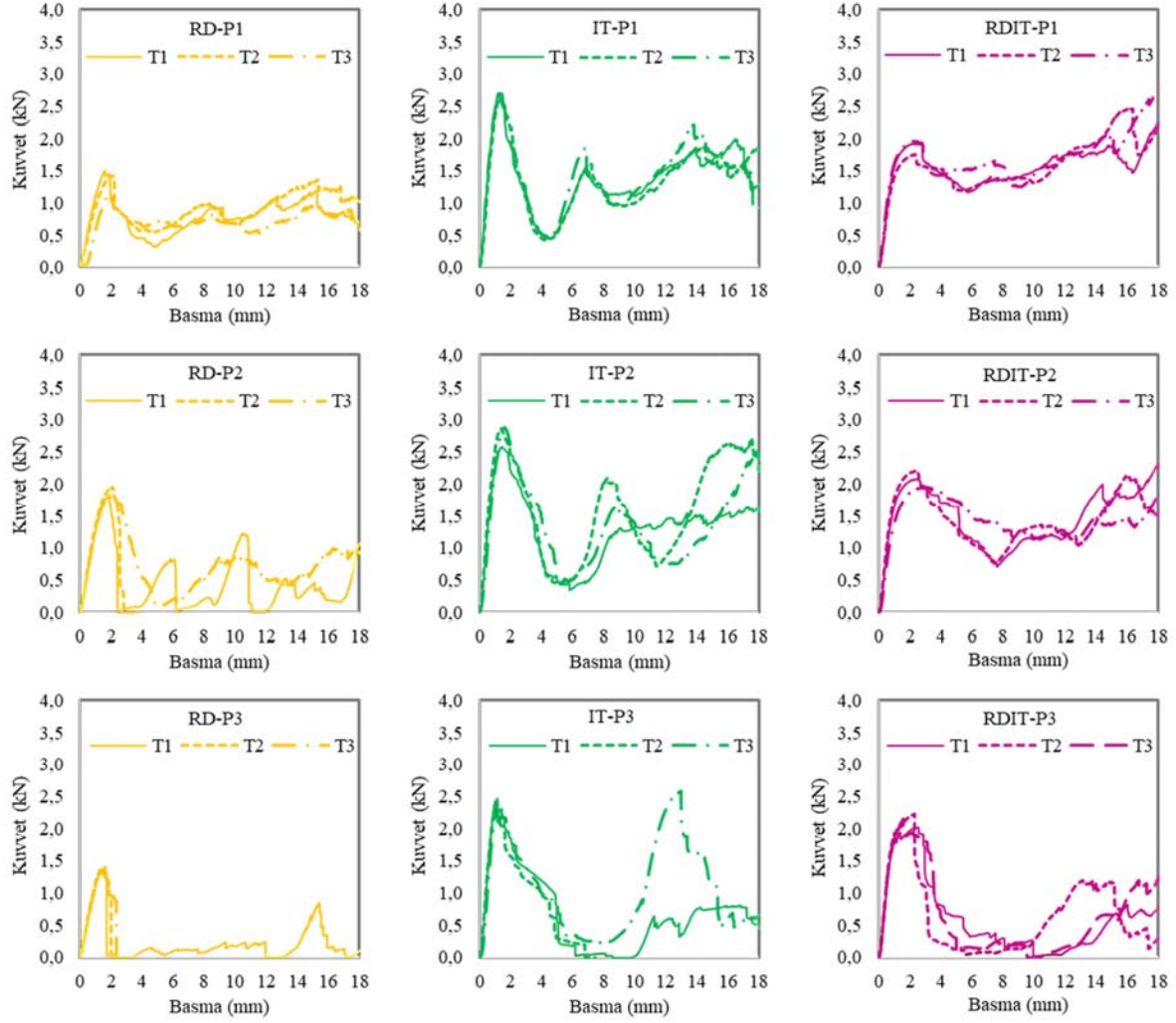
3x3x3 hücre diziliminde tasarlanan RD-P2 ($d=1,63$ mm), IT-P2 ($d=1,67$ mm) ve RDIT-P2 ($d=1,25$ mm) kafes yapılarında, en yüksek TSE değeri IT-P2 kafes yapısında 28,73 J olarak hesaplanmıştır (Şekil

12 ve Şekil 14). RD-P2 kafes yapısı 13,14 J ve RDIT-P2 yapısı 26,37 J ile IT-P2 yapısının sırasıyla yaklaşık %45 ve %92'si kadar enerji soğurmuştur. Yukarıda verilen 4x4x4 diziliminde olduğu gibi akma bölgesi sonrasında plato bölgesinde en kararlı hibrit kafes yapının olduğu görülmektedir. Ancak IT-P2 yapısının en yüksek enerjiyi soğurması birim hücre boyutlarının artması sebebiyle daha ince kirişleri olan RDIT-P2 yapısında basma yönüne dik kirişlerin daha erken burkulmalarından kaynaklı olduğu düşünülebilir. Akma bölgesinde 2,87 kN ile en yüksek kuvvet değeri IT-P2 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P2 numunesinde 2,31 kN ve RD-P2 yapısında 1,81 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı IT-P2 yapısı olup 106,06 MPa değerindedir.

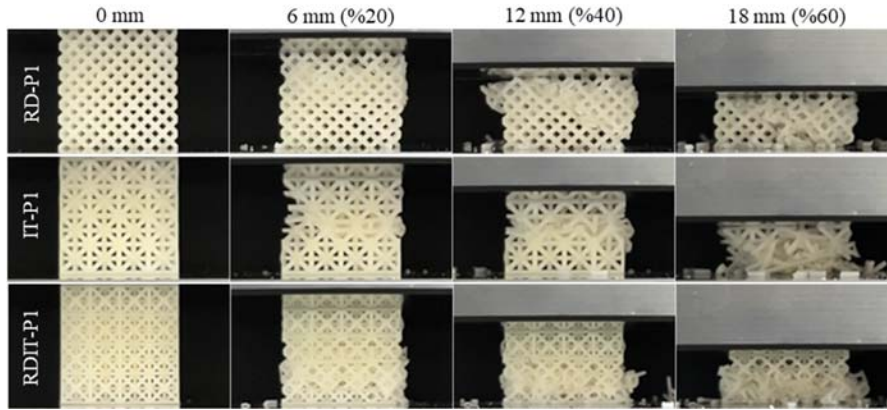
Hücre diziliminin 2x2x2 olduğu ve test sonuçları Şekil 13 ve Şekil 14'te verilen RD-P3 ($d=2,46$ mm), IT-P3 ($d=2,52$ mm) ve RDIT-P3 ($d=1,9$ mm) kafes yapılarında, en yüksek TSE değeri 19,07 değeri ile IT-P3 kafes yapısında gözlenmiştir. RD-P3 kafes yapısı 3,73 J ve RDIT-P3 yapısı 11,6 J ile IT-P3 yapısının sırasıyla yaklaşık %19 ve %60'ı kadar enerji soğurmuştur. IT-P3 ve RDIT-P3 kafes yapıları akma bölgesi sonrasında plato bölgesinde benzer davranışlar göstermiştir. RD-P3 yapısında ise akma bölgesi sonrası kuvvet değeri neredeyse sıfıra düşmüştür. Akma bölgesinde en yüksek kuvvet değeri 2,3 kN IT-P3 yapısında görülmüştür. Bu değer RDIT-P3 kafes yapısında 2,15 kN ve RD-P3 yapısında ise 1,34 kN olarak belirlenmiştir. Elastisite modülünün en yüksek olduğu kafes yapı IT-P2 yapısı olup 104,44 MPa değerindedir. En düşük elastisite modülü değeri RD-P3 yapısındadır. Bu değer RD-P3 yapısında en düşük olmasının sebebi olarak yapının eğilme baskın bir yapı olması gösterilebilir. RDIT-P3 yapısının kiriş çapları RD-P3 yapısından düşük olmasına rağmen daha yüksek rijitlikte çıkması hibrit yapının oluşturduğu bir avantaj olup basma yönüne dik kirişler ile diğer kirişlerin desteklenmesidir.

RD kafes yapılar aynı birim hücre tasarımının farklı hücre boyutlarıyla eşit hacim içine P1 tasarımında 64 adet, P2 tasarımında 27 adet ve P3 tasarımında 8 adet yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Burada basma koşulları altında birim hücre boyutu ve sayısının mekanik özelliklere etkisi incelenmektedir. 4x4x4 dizilimde olan RD-P1 kafes yapısı 16,5 J ile en yüksek TSE değerine sahiptir. En düşük TSE değeri ise RD-P3 kafes yapısına ait olup kuvvet değeri ana malzemenin gevrek yapısından dolayı akma sonrası hızlıca sıfıra yaklaşmış ve test bu şekilde devam etmiştir. RD-P1 yapısına bakıldığında, birim hücredeki kiriş uzunluklarının diğerlerine göre daha kısa olması sebebiyle bağlantı noktalarında oluşan gerilmeler düşük olduğu için daha kararlı bir yapı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte en düşük elastisite modülü değeri 36,41 MPa ile RD-P1 yapısına aittir. RD kafes yapı tipinde hücre boyutunun artması ve sayısının azalması daha rijit yapılara olanak verirken, enerji soğurma kabiliyetleri düşmektedir.

IT birim hücrelerin farklı boyut ve sayısı ile oluşturulan, aynı bağli yoğunluğa sahip üç farklı kafes yapının mekanik özelliklerine bu değişkenlerin etkisi incelenmiştir. 3x3x3 diziliminde ve 27 adet birim hücreden oluşan IT-P2 kafes yapısı 28,73 J değeri ile en yüksek TSE değerine sahiptir. En düşük TSE değeri ise 19,07 J ile IT-P3 kafes yapısına ait olup IT-P2 yapısı yaklaşık %50 daha fazla enerji soğurmuştur. Yukarıda verilen RD-P3 yapısında olduğu gibi kiriş boylarının artması ile bağlantı noktalarına etki eden momentlerin artması sonucunda kırılmalar gerçekleşir ve yapı daha kararsız bir davranış gösterir. IT kafes yapısı gerinme baskın bir yapı olduğu için kuvvet önce hızlıca artmış akma bölgesinden sonra hızlıca düşmüştür. Ana malzemenin gevrek yapısından kaynaklı tüm IT kafes yapılarında benzer ezilme davranışı görülmüştür. En yüksek kuvvet değeri IT-P2 numunesinde 2,87 kN olarak ölçülmüştür. Kuvvet değerleri ile TSE değerlerinin sıralaması aynıdır. IT kafes yapılar benzer rijitlik özellikleri taşımaktadır ve elastisite modülü değerleri birbirine yakındır. Hücre sayısının azalması ve boyutunun artması yapı kararlılığını azalttığı gözlenmiştir.



Şekil 10. RD, IT ve RDIT kafes yapıları kuvvet-basma grafikleri (Force-displacement curves of RD, IT and RDIT lattice structures)



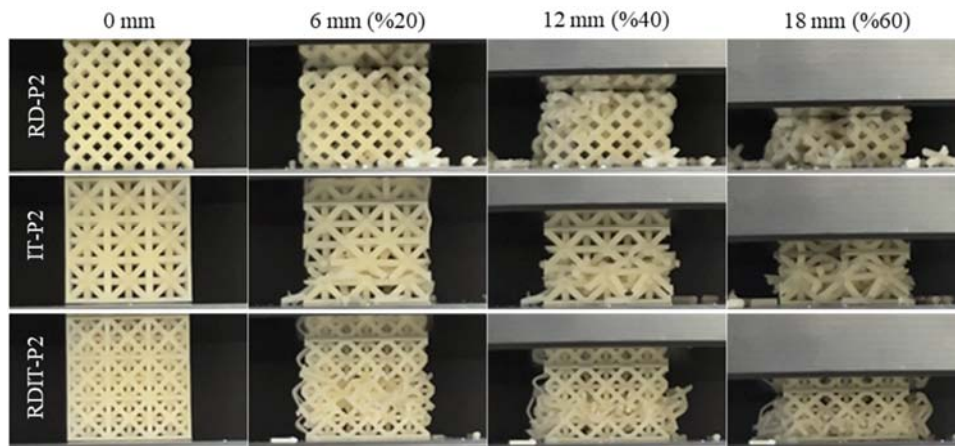
Şekil 11. RD, IT ve RDIT 4x4x4 polimer kafes yapı ezilme davranışları
(Crushing behaviors of 4x4x4 RD, IT ve RDIT polymer lattice structures)

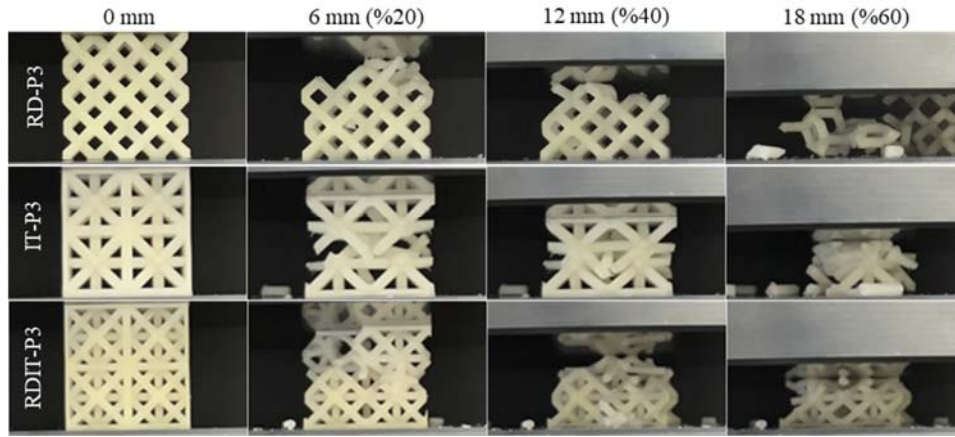
Hibrit RDIT kafes yapısında, birim hücre boyutunun artması ve sayısının azalması, RD ve IT kafes yapılarında olduğu gibi daha kararsız bir yapıya sebep olmaktadır. RDIT-P3 tasarımında, diğer P3 kodlu tasarımlarda olduğu gibi kiriş uzunluklarının artması sebebiyle basma durumunda kararsızlık ortaya çıkmaktadır. En yüksek TSE değeri 30,54 J ile RDIT-P1 kafes yapısında olup bu değeri sırasıyla 30,54 J

ile RDIT-P1, 26,37 J değeri ile RDIT-P2 takip etmektedir. Bu grup içinde en az enerji soğuran kafes yapı ise RDIT-P3 olmuştur. Basma yönüne dik ve kalın kiriş çapları ile en yüksek elastisite modülü değeri 81,91 MPa ile RDIT-P3 yapısındadır. Rijitliği yüksek bu tasarımda düşey kirişlerin kırılması sonucunda kuvvet değerinin hızlıca düştüğü görülmektedir.

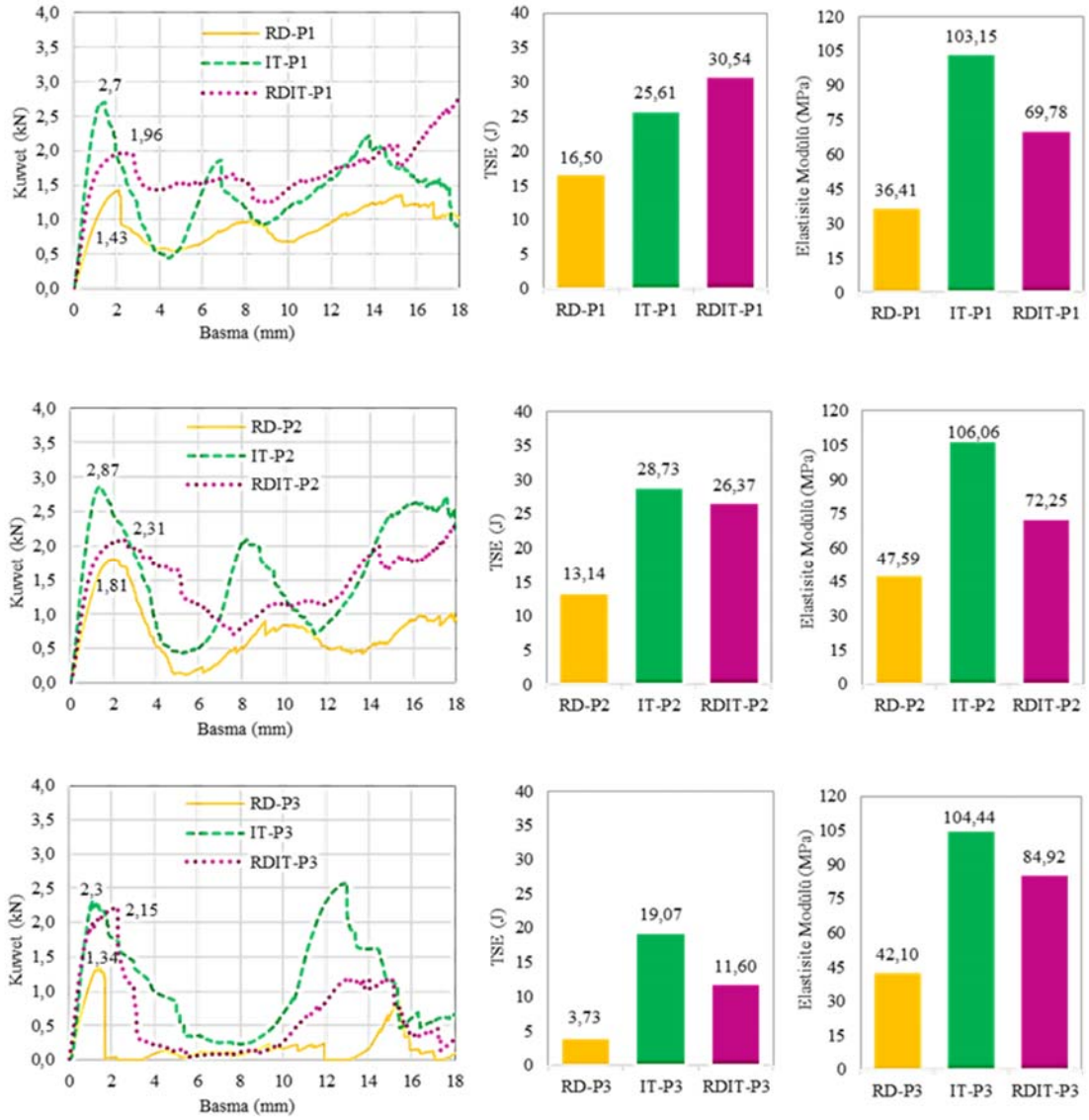
Tablo 4. RD, IT ve RDIT kafes yapıları test sonuçları (Test results of RD, IT and RDIT lattice structures)

Kafes Yapı	Numune	TSE (J)	Elastisite Modülü (MPa)
RD-P1	T1	14,31	41,87
	T2	16,50	36,41
	T3	12,99	36,44
	SS	1,45	2,57
IT-P1	T1	24,72	103,80
	T2	24,02	104,07
	T3	25,61	103,15
	SS	0,65	0,39
RDIT-P1	T1	28,13	71,16
	T2	28,78	62,49
	T3	30,54	69,78
	SS	1,02	3,80
RD-P2	T1	8,03	47,64
	T2	3,48	50,53
	T3	13,14	47,59
	SS	3,95	1,37
IT-P2	T1	23,12	100,03
	T2	28,73	106,06
	T3	24,57	95,92
	SS	2,38	4,16
RDIT-P2	T1	26,37	72,25
	T2	25,66	75,39
	T3	25,71	63,86
	SS	0,32	4,87
RD-P3	T1	3,73	42,10
	T2	1,84	42,14
	T3	2,11	40,19
	SS	0,83	0,91
IT-P3	T1	12,31	109,59
	T2	6,82	101,38
	T3	19,07	104,44
	SS	5,01	3,39
RDIT-P3	T1	11,07	84,88
	T2	11,60	84,92
	T3	11,60	81,91
	SS	0,25	1,41

**Şekil 12.** RD, IT ve RDIT 3x3x3 polimer kafes yapı ezilme davranışları
(Crushing behaviors of 3x3x3 RD, IT ve RDIT polymer lattice structures)



Şekil 13. RD, IT ve RDIT 2x2x2 polimer kafes yapı ezilme davranışları
(Crushing behaviors of 2x2x2 RD, IT ve RDIT polymer lattice structures)



Şekil 14. RD, IT ve RDIT kafes yapıları mekanik özellikleri (Mechanical properties of RD, IT ve RDIT lattice structures)

4. Simgeler (Symbols)

ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
dk	: dakika
IT	: Iso truss
J	: Joule
kN	: kilo Newton
LCD	: Sıvı kristal ekran
mm	: milimetre
RD	: Eşkenar dörtgensel on iki yüzlü (rhombic dodecahedron)
SS	: Standart sapma
TSE	: Toplam soğurulan enerji
UV	: Ultraviyole

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, birim hücreden ve hibrit birim hücreden oluşturulmuş 30x30x30 mm boyutlarında, eşit bağıl yoğunluğa sahip, farklı hücre sayısı ve dizimleri ile üretilmiş kafes yapıların 5 mm/dk hızla yarı statik basma testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ile kafes yapıların enerji soğurma kabiliyetleri ve mekanik davranışları incelenmiştir. RD ve IT birim kafes hücrelerden oluşturulan RDIT hibrit kafes yapının eşit hacim ve bağıl yoğunluklarda tasarlanması için birim hücreyi oluşturan giriş çapları değiştirilmiştir. RD, IT ve RDIT kafes yapılar, eşit hacim içerisine 4x4x4, 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında tasarımı yapılarak ABS benzeri reçineden LCD ile kütleme yöntemiyle üretilmiştir. Toplamda 9 farklı tasarım kullanılarak 27 adet kafes yapı üretilmiştir.

Yarı statik basma test çıktıları kullanılarak hibrit tasarımın, birim hücre boyutu ve sayısının mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Eşit bağıl yoğunlukta (eşit kütlede) tasarlanan kafes yapıların %60 basma durumunda TSE değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalar çerçevesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Üretimi yapılan kafes yapıların kütleleri incelendiğinde, reçineden üretilen yapılar tasarım kütlelerinden daha fazla ölçülmüştür. Bunun temel sebebi olarak, reçine bazlı üretimde alkolle yıkanmasına rağmen yüzeyde kalan kürlenmemiş reçineler olduğu düşünülmektedir.
- Hibrit kafes yapıların yarı statik basma testleri sonucunda oluşturulan kuvvet-basma grafikleri incelendiğinde hibrit kafes yapı tasarımları, tekil hücrelerden oluşturulan kafes yapılara göre tüm durumlarda daha kararlı bir mekanik davranış göstermiştir. RDIT kafes yapısı 4x4x4 konfigürasyonunda RD ve IT kafes yapılarına göre daha fazla enerji soğurmıştır. Hibrit kafes yapı 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında RD kafes yapısından daha fazla enerji soğurmasına rağmen IT kafes yapısının altında kalmıştır. IT kafes yapısının, RDIT kafes yapısı giriş çaplarına oranları 3x3x3 ve 2x2x2 konfigürasyonlarında 4x4x4'e göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. IT kafes yapısı Maxwell kararlılık kriterine göre gerinim baskın bir davranış gösterdiği için en yüksek kuvvet değerleri ve elastisite modülü değerlerine sahiptir. 3x3x3 konfigürasyonunda en kararsız mekanik davranışlar göstermiştir. Bunun sebebi olarak artan giriş boylarından kaynaklı, bağlantı noktalarında oluşan yüksek gerilmeler gösterilebilir. RDIT-P1 kafes yapısı 9 farklı test çalışması içinde 30,54 J ile en yüksek TSE değerine ulaşmıştır. En düşük mekanik özellikler RD kafes yapısında görülmektedir. Bunun sebebi olarak RD tasarımının köşelerinde ucu açık girişler gösterilebilir.
- Birim hücre boyutu ve sayısının mekanik davranışa etkisi için yapılan çalışmada, hücre boyutları artarken sayıları azalmaktadır. Hücre boyutunun artması ve sayının azalması sonucunda, reçineden üretilen hem birim kafes hem de hibrit kafes yapılarda kararlılık ve toplam soğurulan enerji değerleri azalmıştır. Elastisite modülü değerleri artış göstermiştir.

- ABS benzeri reçinenin gevrek yapısı sebebiyle farklı basma durumlarında tekrarlı testler için aynı ezilme davranışını görmek özellikle hücre boyutunun büyük olduğu durumlarda zordur. Ek olarak kuvvet-basma grafikleri incelendiğinde, birim hücre boyutunun küçük olduğu durumlarda testlerin tekrarlanabilir olduğu söylenebilir. Daha tok bir malzeme ile yapılacak testlerde hem ezilme hem de kuvvet değerlerinin birbirine yakın olması beklenir.

Yukarıda verilen bilgiler sonucunda, kafes yapıların yüksek mekanik dayanımlarının yanında düşük kütleleri ile enerji soğurma ve hafifletme çalışmalarında iyi bir alternatif olduğu düşünülmektedir. Hibrit kafes yapıların ise tekil kafes yapıların üstün özelliklerini bir araya getirmesinden kaynaklı önemli bir avantaj sağladığı düşünülmektedir. ABS benzeri reçineden üretilen kafes yapılarda malzemenin yüksek kırılabilirliği sebebiyle kırılmalar görülmüştür. Gelecek zamanda yapılabilecek araştırma konusu olarak daha sünek bir malzeme kullanılarak etkileri araştırılabilir. Bu çalışma kapsamında yarı statik koşullarda gerçekleştirilen testlerin daha yüksek hızlarda gerçekleştirilerek enerji soğurma ve çarpışma kabiliyetleri araştırılabilir. Bu kafes yapıların kullanıldığı sandviç yapıların farklı yük koşullarında mekanik davranışları araştırma konusu olarak seçilebilir. Çalışmada kütleler eşit olduğu için özgül soğurulan enerji (ÖSE) incelemesi yapılmamıştır, farklı bağıl yoğunluklarda tasarımlar yapılarak bu özellik de araştırılabilir. Deneysel çalışmaların yanında, nümerik analiz çalışmaları ile modellerin geliştirilmesi sonucunda maliyet etkin tasarım ve uygulamalara olanak vereceği düşünülecek bir diğer gelecek çalışma önerilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma için kafes yapıların reçineden kütleme yöntemiyle üretimi için, malzeme ve imalat desteğinde bulunan Dokuz Kimya Arge firmasına ve çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Miao, X., Hu, J., Xu, Y., Su, J., & Jing, Y., Review on mechanical properties of metal lattice structures, *Composite Structures*, 342, 2024.
2. Leary, M., Design for Additive Manufacturing, Elsevier, 1st Edition, 2020.
3. Pan, C., Han, Y., & Lu, J., Design and optimization of lattice structures: a review, *Applied Sciences*, 10 (18), 1-36, 2020.
4. Du Plessis, A., Razavi, N., Benedetti, M., Murchio, S., Leary, M., Watson, M., Bhate, D., & Berto, F., Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: a review, *Progress in Materials Science*, 125, 2022.
5. Zheng, X., Lee, H., Weisgraber, T. H., Shusteff, M., DeOtte, J., Duoss, E. B., Kuntz, J. D., Biener, M. M., Ge, Q., Jackson, J. A., Kucheyev, S. O., Fang, N. X., & Spadaccini, C. M., Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials., *Science*, 344 (6190), 1373-1377, 2014.
6. Borikar, G. P., Patil, A. R., & Kolekar, S. B., Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24 (11), 2133-2180, 2023.
7. Park, K. M., Min, K. S., & Roh, Y. S., Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements, *Materials*, 15 (97), 1-21, 2022.
8. Dong, G., Tang, Y., & Fiona Zhao, Y., A survey of modeling of lattice structures fabricated by additive manufacturing, *Journal of Mechanical Design*, 139 (10), 1-48, 2017.
9. Ashby, M. F., The properties of foams and lattices, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30, 2006.
10. Ali, M., Sajjad, U., Hussain, I., Abbas, N., Ali, H. M., Yan, W. M., & Wang, C. C., On the assessment of the mechanical properties of additively manufactured lattice structures, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 142, 93-116, 2022.

11. Maconachie, T., Leary, M., Zhang, J., Medvedev, A., Sarker, A., Ruan, D., Lu, G., Faruque, O., & Brandt, M., Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg, *Materials Science and Engineering: A*, 788, 2020.
12. Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Tridello, A., Experimental and numerical investigation of a lattice structure for energy absorption: application to the design of an automotive crash absorber, *Polymers*, 14 (6), 1116, 2022.
13. Tancogne-Dejean, T., Spierings, A. B., & Mohr, D., Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading, *Acta Materialia*, 116, 14-28, 2016.
14. Zhang, T., Huang, Z., Li, Y., Xu, Z., Zhou, Z., & Chen, Z., Compressive mechanical behaviors of PPR and NPR chiral compression-twist coupling lattice structures under quasi-static and dynamic loads, *Thin-Walled Structures*, 182, 2023.
15. Deshpande, V. S., Ashby, M. F., & Fleck, N. A., Foam topology bending versus stretching dominated architectures, *Acta Mater*, 49, 1035-1040, 2001.
16. Ha, N. S., & Lu, G., A review of recent research on bio-inspired structures and materials for energy absorption applications, *Composites Part B: Engineering*, 181, 2020.
17. Wu, W., Liu, P., Wang, Y., & Kang, Z., Design of dual-material lattice structures with compression-torsion bistability, *Materials and Design*, 230, 2023.
18. Zhang, J., Yang, X., Zuo, H., & Dong, Y., Study on mechanical response control of metal-ceramic dual phase hybrid lattice structure, *Materials Today Communications*, 41, 2024.
19. Li, C., Qi, J., Wang, P., Zhao, Z., Wang, Z., Lei, H., & Duan, S., A novel hybrid design method of lattice structure based on failure mode, *Science China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 65 (9), 2022.
20. Zhang, P., Biligetu, Qi, D. X., Xue, R., Liu, K., Huang, Z. X., Wu, W., & Li, Y., Mechanical design and energy absorption of 3D novel hybrid lattice metamaterials, *Science China Technological Sciences*, 64 (10), 2220-2228, 2021.
21. Akbay, Ö. C., & Bahçe, E., Investigation of mechanical performance of hybrid design porous structures manufactured from CoCr Alloy, *Progress in Additive Manufacturing*, 2024.
22. Kladovasilakis, N., Tsongas, K., & Tzetzis, D., Development of novel additive manufactured hybrid architected materials and investigation of their mechanical behavior, *Mechanics of Materials*, 176, 2023.
23. Xiao, L., Xu, X., Feng, G., Li, S., Song, W., & Jiang, Z., Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures, *International Journal of Mechanical Sciences*, 219, 2022.
24. Syrlybayev, D., Perveen, A., & Talamona, D., Experimental investigation of mechanical properties and energy absorption capabilities of hybrid lattice structures manufactured using fused filament fabrication, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125 (5-6), 2833-2850, 2023.
25. Li, L., Yang, F., Li, P., Wu, W., & Wang, L., A novel hybrid lattice design of nested cell topology with enhanced energy absorption capability, *Aerospace Science and Technology*, 128, 2022.
26. Ma, X., Zhang, N., & Tian, X., A novel hybrid lattice structure for improving compression mechanical properties, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 31 (23), 5805-5822, 2023.
27. Wu, J., Zhang, Y., Yang, F., Jiang, F., Xu, X., Tan, Y., & Su, L., A hybrid architectural metamaterial combining plate lattice and hollow-truss lattice with advanced mechanical performances, *Additive Manufacturing*, 76, 2023.
28. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196, 2018.
29. Seharang, A., Azman, A. H., & Abdullah, S., A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, *Advances in Mechanical Engineering*, 12 (6), 2020.
30. Gülcan O., Simsek U., Özdemir M., Günaydın K., Tekoğlu E., The effect of build parameters on distortion, dimensional deviation and surface roughness of laser powder bed fusion built lattice structures, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (1), 101-112, 2024.
31. Dave, H. K., Karumuri, R. T., Prajapati, A. R., & Rajpurohit, S. R., Specific energy absorption during compression testing of ABS and FPU parts fabricated using LCD-SLA based 3D printer, *Rapid Prototyping Journal*, 28 (8), 1530-1540, 2022.
32. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M., *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Third edition, 2021.
33. Wu, Y., Fang, J., Wu, C., Li, C., Sun, G., & Li, Q., Additively manufactured materials and structures: A state-of-the-art review on their mechanical characteristics and energy absorption, *International Journal of Mechanical Sciences*, 246, 2023.

