

# Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

*Eklemeli imalat konusunda son yıllarda meydana gelen gelişmeler neticesinde, kafes yapıların farklı alanlarda uygulanması üzerine yapılan araştırmaların sayısı ciddi şekilde artmıştır. Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerinin bilinmesi, bu yapıların özellikle havacılık ve uzay sanayii, otomotiv sanayii ve biomedikal sanayii gibi farklı alanlarda tasarlanacak parçalara uygun olarak seçilebilmesinde önem arz etmektedir. Kafes yapıların geometrik parametrelerinde yapılacak değişikliklerle, mekanik özellikleri istenilen şekilde değiştirilebilir ve eklemeli imalatın sağladığı üretim kolaylığı ile kolayca üretilebilir. Bu çalışmada, eklemeli imalat ile üretilen metal kafes yapıların mekanik özellikleri ve ileriki çalışmalar konusunda detaylı bilgiler verilmiştir.*

*Anahtar Kelimeler: Kafes yapılar, eklemeli imalat, gyroid, schwarz, elmas*

## Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 19-10-2020

Kabul: 09-02-2021

\*Sorumlu yazar: Orhan Gülcan  
E-mail: [ogulcan1981@gmail.com](mailto:ogulcan1981@gmail.com)

## GİRİŞ

Kafes yapılar, bir veya daha fazla tekrar eden birim hücreden oluşan, üç boyutlu yapılardır. Her bir hücre, içerisinde düğüm noktalarından birbirine bağlanan dikmelerden oluşur [1]. Kafes yapılar farklı üretim yöntemleri ile üretilebiliyor iken, özellikle son yıllarda büyük bir ivme kazanan eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve bu sayede, üretilecek parçaların mekanik, ısı, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilebilirliği denenmiştir [2]. Özellikle havacılık ve uzay sanayii, otomotiv sanayii ve biomedikal sanayii gibi farklı alanlarda kullanımı gittikçe artan kafes yapıların mekanik özelliklerinin bilinmesi, tasarlanacak parçalarda uygun kafes yapının seçilebilmesi için önem arz etmektedir. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri konusunda literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen deneysel bulgular verilmiştir. Polimer kafes yapılar konusunda da literatürde çalışmalar olmasına rağmen, bu makale metal kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

## KAFES YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Gibson-Ashby modeli, analitik yöntemler ve deneyler / testler kullanılmaktadır.

### Gibson-Ashby Modeli

Eklemeli imalatla üretilen kafes yapılarının mekanik özelliklerinin deneysel ve testsel çalışmalar yapılmadan, önceden belirlenmesinde en çok kullanılan yöntem, Gibson-Ashby modelidir (Tablo

1). Bu formüllerde  $E^*$ , kafes yapının elastik modülünü,  $E_s$  kafes yapının ana malzemesinin elastik modülünü,  $C$  deneylerden elde edilen bir sabiti,  $\sigma^*$  kafes yapının dayanımını,  $\sigma_{y,s}$  kafes yapının ana malzemesinin akma dayanımını,  $\rho^*$  kafes yapının yoğunluğunu,  $\rho_s$  ise kafes yapının ana malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir [3].

Tablo 1. Gibson-Ashby modeli [3]

Mekanik davranış türü	Mekanik Özellik	Formül
Büküm baskın davranış gösteren kafes yapılar	Modül (E)	$E^*/E_s = C(\rho^*/\rho_s)^2$
	Dayanım ( $\sigma$ )	$\sigma^*/\sigma_{y,s} = C(\rho^*/\rho_s)^{3/2}$
Uzama baskın davranış gösteren kafes yapılar	Modül (E)	$E^*/E_s = C(\rho^*/\rho_s)$
	Dayanım ( $\sigma$ )	$\sigma^*/\sigma_{y,s} = C(\rho^*/\rho_s)$

Yapılan deneysel çalışmalarda  $C$  değerinin modül hesaplamalarında 0,1-4,0, dayanım hesaplamalarında ise 0,1-1,0 arasında değiştiği belirtilmiştir [4].

Gibson-Ashby modelinden elde edilen dayanım ve modül değerleri literatürde deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. McKown ve ark. yaptıkları deneysel çalışmada ilave dikmeli hacim merkezli kübik (HMKD) kafesli yapılarda, modülün, göreceli yoğunluğun (kafes yapının yoğunluğunun ana malzemenin yoğunluğuna oranı) karesi oranında

arttığını ve elde edilen sonuçların Gibson-Ashby modeli ile uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, hacim merkezli kübik (HMK) kafesli yapılarda ise deneylerden elde edilen modül değerinin Gibson-Ashby modelinden elde edilen değerden düşük çıktığını, bunun sebebinin HMK kafesli yapılardaki eksene dikmelerin olmaması ve bu sebeple düşük basma gerilmelerinde bile deformasyona uğramaları olduğunu belirtmişlerdir [5]. Yan ve ark. kafesli yapılardaki modül ve dayanım değerlerinin göreceli yoğunluk ile arttığını ve bunun Gibson-Ashby modeli ile uyumlu olduğunu, yaptıkları deneysel çalışmada belirtmişlerdir [6].

Literatürde Gibson-Ashby modelinin deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı durumlardan da bahsedilmiştir. Bunun muhtemel sebepleri şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ Eklemeli imalat sonrası malzemede oluşan kalıntı gerilmeler, tahmin edilemeyen deformasyonlara sebep olabilmektedir [7].
- ✓ Eklemeli imalat sonrası malzeme yüzeyinde yapışmış olan ergimemiş tozlar, malzemenin hacmini artırırken, dayanımına etki etmemektedir. Bu da elde edilen yoğunluk değerlerinin gerçeği tam yansıtamamasına yol açmaktadır [8].
- ✓ Gibson-Ashby modelinde dikmelerin birleşim yerlerindeki ağırlıkları birden fazla kez sayıldığı için hatalı hesaplamalara yol açmaktadır [8].
- ✓ Kafes yapılar, yükleme durumunda hem doğrusal hem de doğrusal olmayan elastik davranış gösterdikleri için, gerçek modülü hesaplamak çok zordur [8].
- ✓ Eklemeli imalattaki üretim kısıtlarından dolayı kafes yapılardaki dikmeler düzgün çıkmamakta, çok fazla ergimemiş toz yüzeye yapışmaktadır. Gibson-Ashby modelinde ise bu dikmeler düzgün kabul edilmektedir [9, 10].

### Anolitik Çalışmalar

Kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi konusunda analitik çalışmalar da yapılmıştır. Tek yönde ve çift yönde uygulanan gerilmelerde mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için Ushijima ve ark. analitik modeller geliştirmişlerdir [11]. Ptochos ve Labeas'ın çalışmalarına göre ise birim hücrenin boyutları aynı olduğu durumda, kübik bir yapı için, elastik modül, Poisson oranı [12] ve kayma modülü [13] aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir;

$$E = \frac{4\sqrt{3E_0}}{\left[\frac{l^2}{\pi r^2} + \frac{l^4}{2\pi r^4}\right]} \quad (1)$$

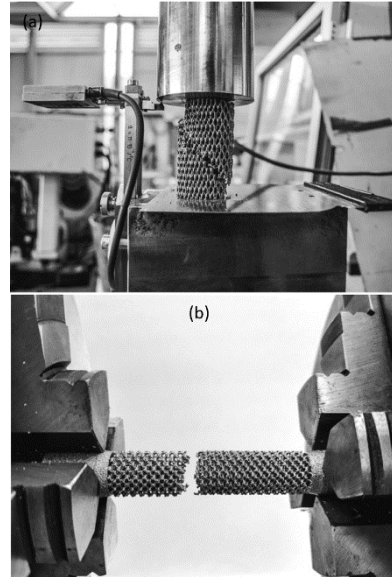
$$\nu = \frac{\frac{1}{\pi r^2} + \frac{l^2}{4\pi r^4}}{\frac{1}{\pi r^2} + \frac{l^2}{2\pi r^4}} \quad (2)$$

$$G = \frac{32\pi r^4 E_0 + 16\pi r^2 E_0 l^2}{12\sqrt{3}l^4} \quad (3)$$

Bu formüllerde l dikme boyunu, r dikme çapını,  $\nu$  Poisson oranını, E elastik modülünü, G kayma modülünü,  $E_0$  ise ana malzemenin elastik modülünü ifade etmektedir.

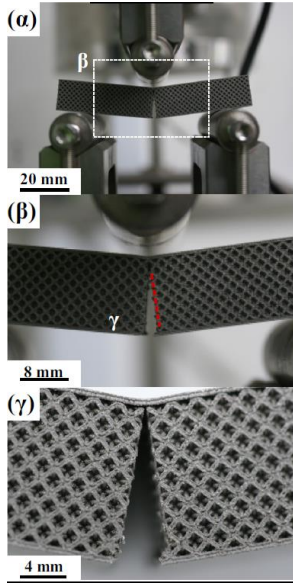
### Deneysel Çalışmalar

Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde farklı testler (Şekil 1-3) literatürde uygulanmış ve bu sayede basma, darbe direnci, yorulma ve yüzey pürüzlülüğü gibi özellikleri elde edilmiştir.

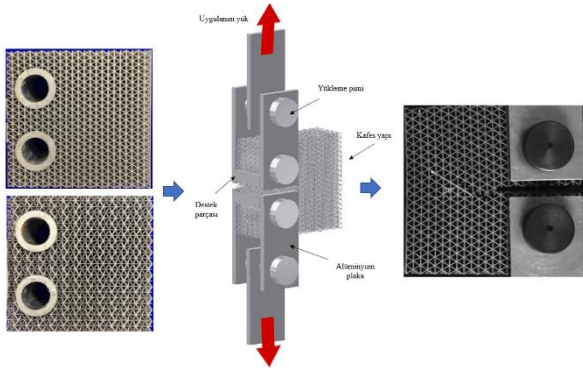


Şekil 1. Kafes yapılara uygulanan (a) basma ve (b) burma testleri [14].

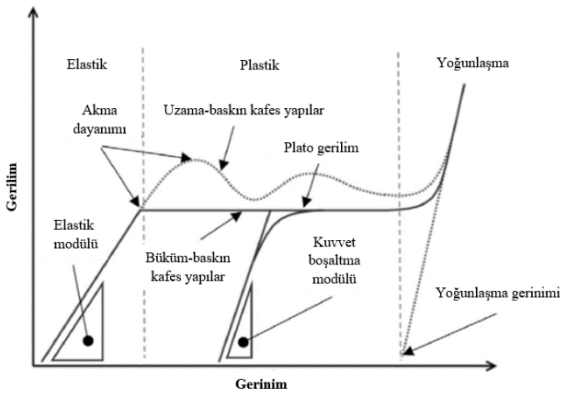
**Basma Özellikleri:** Kafes yapılar basma durumunda genel olarak elastik, plastik ve yoğunlaşma şeklinde üç aşamadan geçer. Elastik aşamada, kafes yapının davranışı elastiktir. Akma dayanımı aşıldığında malzeme plastik olarak deforme olur. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi büküm-baskın kafes yapılarda, plastik deformasyon aşamasında sabit gerilim altında (plato gerilimi, basma dayanımı) malzeme deforme olur. Uzama-baskın kafes yapılarda ise deformasyonun devam etmesi için gerekli olan gerilim salınım gösterir. Deformasyon devam edip, her bir hücre diğer hücrelerle temas ettiğinde yoğunlaşma aşamasına geçilmiş olur. Bu aşamada daha fazla deformasyon için gerekli olan gerilim miktarı ciddi artış gösterir [8].



Şekil 2. Kafes yapılarla uygulanan üç nokta büküm testi [15].



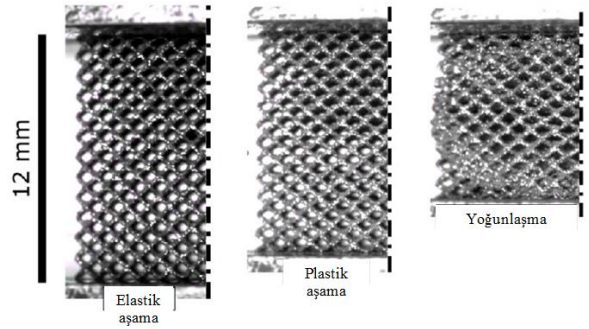
Şekil 3. Kafes yapıların kırılma dayanımlarının ölçülmesi için kullanılan test aparatı [16].



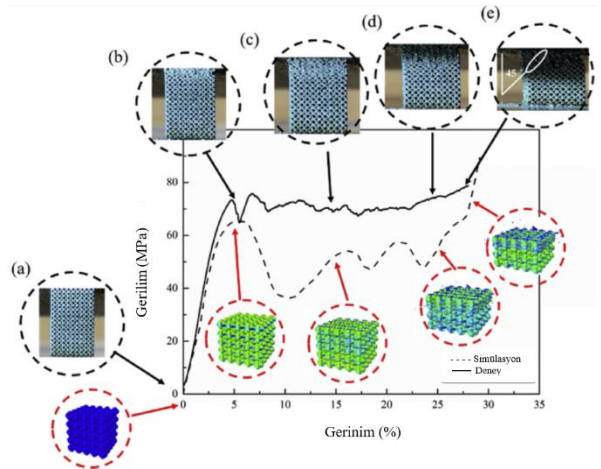
Şekil 4. Elastik, plastik ve yoğunlaşma aşamalarında uzama-baskın ve büküm-baskın kafes yapıların basma davranışları [8].

Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların basma durumunda gösterdiği davranış üzerinde, kafes yapının büküm-baskın ya da uzama-baskın davranış göstermesinin etkisi büyüktür. Şekilden de anlaşılacağı gibi, uzama-baskın yapılar daha dayanımlıdır ve basma durumunda ilk olarak dikmeler hasar uğrar, kırılma yapıdadırlar, büküm-baskın yapılar ise daha tutarlı bir şekilde deforme olur, daha fazla enerji absorbe eder, basma durumunda dikmeler bükülür ya da burulur, sünek yapıdadırlar [1, 3, 8]. Büküm-baskın kafes yapılarda, dayanım ve sertliğin düştüğü 1997 yılında Ashby tarafından keşfedilmiştir [3]. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ise uzama-baskın davranış gösteren kafes yapıların, büküm-baskın davranış gösteren kafes yapılara göre 5,4-7 kat daha fazla elastik modülüne, 9-10,4 kat daha fazla mekanik dayanıma sahip olduğu görülmüştür [17].

Basma deneylerinde kafes yapıların geçirdiği üç aşamalı deformasyon Şekil 5'te gösterilmiştir [18]. Ayrıca sekiz yüzlü kafes yapının basma durumundaki gerilim-gerinim grafiği ve her bir aşamada meydana gelen şekil değişimi ise Şekil 6'da gösterilmiştir [19].

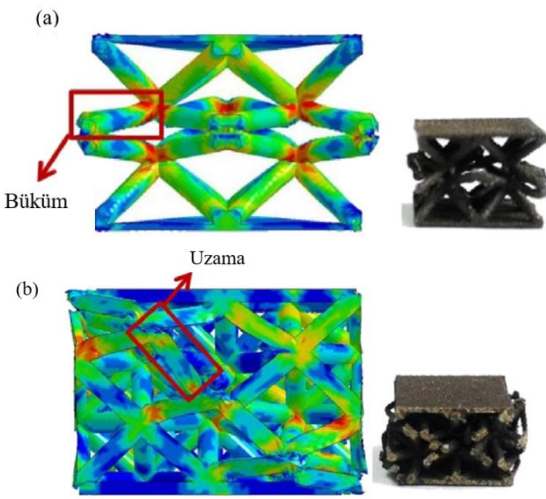


Şekil 5. Kafes yapıların geçirdiği üç aşamalı deformasyon [18].



Şekil 6. Sekiz yüzlü kafes yapının basma durumunda gerilim-gerinim grafiği [19].

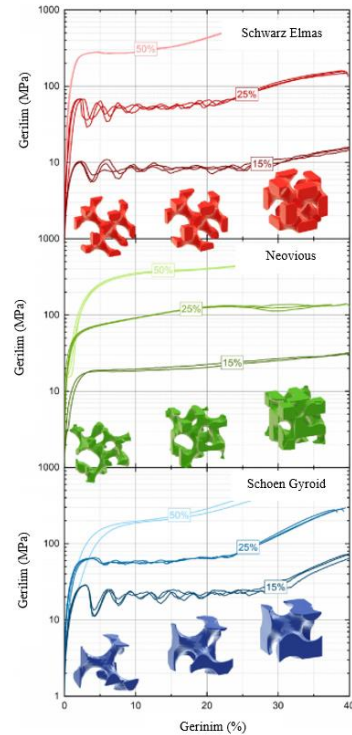
Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kafes yapıların deformasyon davranışlarının incelendiği bir çalışmada, basma durumunda, önce çapraz dikmelerin bükülmesi ve dikey dikmelerin burulması, ardından dikmelerin kırılması ve sonuçta da kafes hücrelerinin çökmesi olaylarının gözlemlendiği belirtilmiştir. Özellikle düşük Maxwell sabitine sahip ve yükleme yönünde herhangi bir dikmenin bulunmadığı kafes yapıların (örneğin HMK) basma durumunda ciddi oranda esneyebildiği (Şekil 7), yüksek yanıl sertliğe sahip kafes yapıların ise (örneğin dikey ve yatay yönde dikmelerin olduğu yüzey hacim merkezli kübik yapılar) basma durumunda yatay katman kırılmasına maruz kaldığı, bu yapıların, daha çok enerji absorbe etme özelliğinin istendiği tasarımlarda kullanılması gerektiği belirtilmiştir [20].



Şekil 7. Basma testi sonucuna göre büküm-baskın davranış gösteren HMK kafes yapısı (a) ve uzama-baskın davranış gösteren yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısı (b) [21].

Farklı kafes yapıların basma davranışları literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Örneğin, HMK ve YMK yapılar büküm-baskın davranışlar gösterir. Yani akma dayanımından sonra sabit gerilimde yapı deforme olmaya devam eder. Bu yapılara dikmeler eklenerek elde edilen HMKD ve ilave dikmeli yüzey merkezli kübik (YMKD) yapılar ise uzama-baskın davranış gösterir, yani akma dayanımından sonra daha fazla deformasyon için daha fazla gerilime ihtiyaç duyulur [8]. Sekiz yüzlü cismin kırılma karaktere sahip olduğu basma testleri sonucunda literatürde gösterilmiştir [22]. Carlton ve ark. SLE yöntemi ile üç farklı göreceli yoğunlukta (% 10, 20 ve 30) eşkenar dörtgen yüzeyli oniki yüzlü ve sekizli dikme kafes yapılar üretmişlerdir. Yazarlar basma durumunda sekizli dikme kafes yapıların burulma davranışı gösterdiğini, eşkenar dörtgen yüzeyli oniki yüzlü kafes yapının ise düzgün bir şekilde ezildiğini ve her iki kafes yapıda da

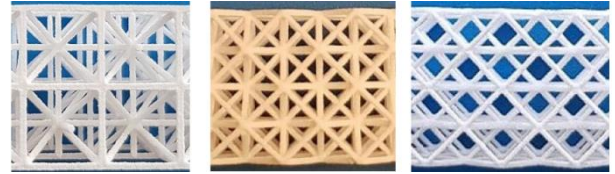
burulma seviyesinin dikme yönüne ve dikmelerdeki üretim hatalarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [23]. Kübik ve baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapıların uzama-baskın davranış, G7 kafes yapıların ise büküm-baskın davranış gösterdiği de yine literatürde belirtilmiştir [9, 24]. Elektron ışınıyla ergitme (EIE) yöntemi ve Ti6Al4V malzeme kullanılarak üretilen kafes yapılarda, basma durumunda kübik kafes yapıların burulma, G7 ve baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapıların ise bükümünden dolayı deforme olduğu ve her üç yapıda da kırılmanın düğüm noktaları ya da yakınlarında olduğu belirtilmiştir [9, 24]. Kadkhodapour ve ark. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kübik ve elmas kafes yapılarının deformasyon davranışlarını inceledikleri çalışmada, kübik kafes yapısı gibi uzama-baskın davranış gösteren kafes yapılarının katman-katman deformasyona uğradığını, elmas kafes yapısı gibi büküm-baskın davranış gösteren kafes yapılarının ise 45° hat boyunca deformasyona uğradığını belirtmişlerdir [25]. Vanderesse ve ark. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kübik, HMKD ve elmas kafes yapıları inceledikleri çalışmada, basma testleri sonucunda kübik ve elmas kafes yapıların tabaka-tabaka, HMKD kafes yapının ise 45° çapraz hat boyunca deformasyona uğradığını belirtmişlerdir [26]. Alabort ve ark. yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, Schwarz Elmas ve Neovious yüzeyli kafes yapıların büküm-baskın özellik gösterdiğini, Schoen Gyroid yapıların ise uzama-baskın özellik gösterdiğini belirtmişlerdir (Şekil 8) [18].



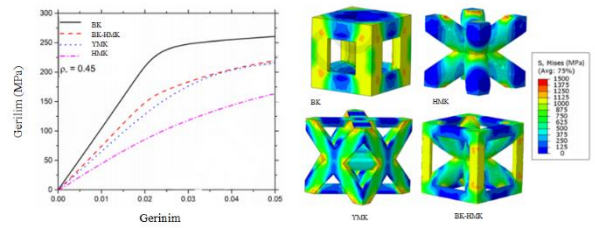
Şekil 8. Farklı üçlü periyodik minimum yüzeyli kafes yapıların geçirdiği deformasyon aşamaları [18].

Literatür detaylı incelendiğinde, farklı kafes yapıların basma durumunda mekanik davranışlarının karşılaştırıldığı da görülmektedir. Dikme tabanlı kafes yapıların karşılaştırıldığı çalışmalara örnek olarak; Rehme ve Emmenmann farklı kafes yapıları inceledikleri çalışmada, HMK ya da YMK yapıları dikmeler eklenerek elde edilen yapıların basma dayanımların daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [27]. McKown ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri HMKD ve HMK kafes yapılarını inceledikleri çalışmada, % 2,9-16,6 arasında değişen göreceli yoğunluk değerleri kullanmışlardır. Her iki durumda da büküm-baskın davranışın görüldüğünün belirtildiği çalışmada, hem düşük hem de yüksek göreceli yoğunluk değerlerinde, HMKD kafes yapının, HMK kafes yapıya göre 2,5-3,5 kat daha fazla akma dayanımı gösterdiği belirtilmiştir [5]. Shen ve ark. SLE yöntemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik HMK, HMKD ve üst ve alt yüzeyine karbon fiber takviyeli epoksi plakalar ilave edilmiş HMK kafes yapıları basma testine tabi tutmuşlardır. En yüksek basma direncinin HMKD yapıların gösterdiğini belirtildiği çalışmada, üst ve alt yüzeye plaka eklenmesinin basma dayanımını iki kat artırdığı gösterilmiştir [28]. Leary ve ark. da AISi12Mg malzeme ve SLE yöntemi kullanılarak üretilen HMK yapıya dikme ilave edildiğinde mekanik özelliklerin ve dayanımın arttığını belirtmişlerdir [29]. Benzer bir yorum Maskery ve ark. tarafından da yapılmıştır [30]. Xiao ve ark. SLE yöntemi kullanılarak ürettikleri 316L paslanmaz çelik YMK, tepe kübik (TK) ve kenar merkezli kübik (KMK) yapıların mekanik davranışlarını inceledikleri çalışmada, yoğunluğun azalması ile elastik modülünün arttığını, enerji absorbe edebilme özelliğinin ise azaldığını belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca YMK ve TP kafes yapıların KMK yapılara göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [31]. Lei ve ark. SLE yöntemi ve AISi10Mg malzeme kullanarak yaptıkları çalışmada iki farklı kafes yapısı (HMK ve HMKD) üretilip basma testine tabi tutmuşlardır. Yazarlar, HMKD yapıların HMK yapılara göre çok daha yüksek akma dayanımı ve elastik modülüne sahip olduğu, ayrıca her iki kafes yapısı için de, katman sayısı arttıkça, akma dayanımı ve elastik modülünün azaldığını belirtmişlerdir [32]. Blattmann ve ark. PA2200 malzeme ve EOS P396 SLS tekniği kullanarak ürettikleri üç farklı kafes yapısına (güçlendirilmiş hacim merkezli kübik (GHMK), sekizli kafes ve sekiz yüzlü) basma testi uygulamışlardır (Şekil 9). Yazarlar sekizli kafes yapının en yüksek elastik modülüne sahip olduğunu ve mekanik olarak en dayanıklı malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Regresyon analizlerine göre, elastik modülü ve azami basma direnci üzerinde en çok dikme boyutunun/çapının etkili olduğu (bir kenardaki hücre sayısı ve hücre şekli değişkenleri ile birlikte değerlendirildiğinde) belirtilmiştir [33]. Peng ve ark. dört farklı birim kafes yapısını (basit kübik (BK), basit

kübik-hacim merkezli kübik (BK-HMK), HMK, YMK) inceledikleri çalışmada BK yapının en yüksek, HMK yapının ise en düşük elastik modülüne sahip olduğunu belirtmişlerdir. Diğer kafes yapılar akma sınırını aşmış plastik deformasyona maruz kaldıklarında bile BK yapının daha elastik bölgede olduğunu belirttiği çalışmada, BK-HMK ve YMK yapıların elastik bölgede benzer davranışlar gösterdiği ama BK-HMK yapının plastik bölgede daha yüksek gerilime sahip olduğu belirtilmiştir (Şekil 10) [34].



Şekil 9. Sırasıyla GHMK, sekizli kafes ve sekiz yüzlü yapılar [33].

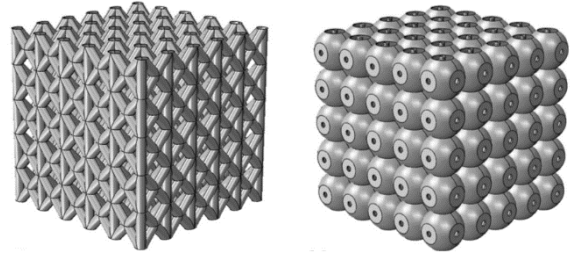


Şekil 10. Farklı hücre yapılarının gerilim-gerilim grafikleri [34].

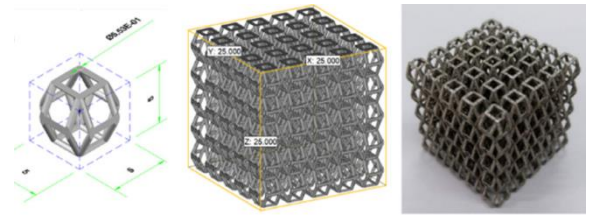
Guo ve ark. kare, dikdörtgen, dört yüzlü ve altıgen şekilli kafes yapıların mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, yük taşıma kapasitesi olarak altıgen kafes yapının en iyi sonucu, dört yüzlü kafes yapının ise en kötü sonucu verdiğini belirtmişlerdir [35]. Wang ve ark. yaptıkları deneysel çalışma sonucunda Kagome kafes yapıların dört yüzlü ve piramid kafes yapılara göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir [36]. Fan ve ark. sekiz yüzlü, dört yüzlü, sekizli kafes, elmas ve piramid kafes yapıları inceledikleri çalışmada, düşük sertlik, eksenel dayanım ve kayma dayanımından dolayı elmas kafes yapıların en düşük özellik gösterdiğini, piramid kafes yapılarda ise eksenel dayanıma göre daha fazla kayma dayanımının oluştuğu belirtilmiştir [37]. Hasib, EIE yöntemiyle ürettiği Ti6Al4V üç farklı kafes yapısının (altıgen, eşkenar dörtgen yüzeyli, oniki yüzlü şekil ve sekizgen) mekanik özelliklerini incelemiştir. Sekizgen kafes yapının en yüksek, altıgen yapının ise en düşük elastik modülüne ve basma dayanımına sahip olduğu, en yüksek göreceli yoğunluğa ise sekizgen kafes yapısının sahip olduğu belirtilmiştir [38]. Jamshidinia ve ark. EIE yöntemiyle 2 ve 3 mm birim hücre boyutlarında, çapraz, balpeteği ve sekiz yüzlü kafes yapısı üretmişlerdir. Üst ve alt yüzeyine 0,25 mm kalınlıkta plakaların konulduğu kafes yapılarda, birim

hücre boyutu arttıkça toplam elastik deformasyonun arttığı ve sekiz yüzlü kafes yapının basma testlerinde en iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [39]. Ahmadi ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kübik, elmas, kesik küp, kesik sekiz yüzlü küp, eşkenar dörtgen şeklinde oniki yüzlü, eşkenar dörtgen şeklinde sekiz yüzlü küp kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde çalışmışlardır. İncelenen farklı kafes yapılar yüksek sertlik gösteren kafes yapılar (küp, kesik küp, kesik sekiz yüzlü küp ve eşkenar dörtgen şeklinde sekiz yüzlü küp) ve düşük sertlik gösteren kafes yapılar (elmas ve eşkenar dörtgen şeklinde oniki yüzlü) olarak ikiye ayrılmış ve elmas kafes yapının en düşük basma dayanımı gösterdiği, kesik küpün ise en yüksek sertliği gösterdiği belirtilmiştir [40]. Mahshid ve ark. SLE yöntemi ile içi dolu, içi boş, içi YMKD kafes yapısı ile dolu, içi 30° döndürülmüş YMKD kafes yapısı ile dolu test numunelerini CL50WS ve MS1 malzemeden üretmişlerdir. Yazarlar CL50WS malzeme için, içi dolu yapının akma dayanımına göre (1693,3 MPa) içi boş yapının akma dayanımının % 45,2 daha az (927,6 MPa), içi YMKD kafes yapısı ile dolu numunenin akma dayanımının % 37,8 daha az (1053,2 MPa) ve içi 30° döndürülmüş YMKD kafes yapısı ile dolu numunenin akma dayanımının % 37,1 daha az (1064,4 MPa) çıktığını belirtmişlerdir. Aynı oranlarda olmasa da benzer bir azalmanın MS1 malzeme için de görüldüğü belirtilmiştir [41]. Rashid ve ark. AISi12 alaşım tozları ve SLE yöntemi kullanarak üç farklı kafes yapısı üretmiş (yuvarlak, üçgen ve altıgen) ve üç nokta büküm testine tabi tutmuşlardır. Yazarlar, üçgen kafes yapıların büküm dayanımı (175,762 MPa) ve büküm modülünün (5.03 GPa), üçgen kafes (151,36 MPa, 4,38 GPa) ve altıgen kafes (143,17 MPa, 4,34 GPa) yapılarından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [42]. Köhnen ve arkadaşları SLE yöntemiyle ürettikleri AISI 316L/1.4404 paslanmaz çelik, YMKD ve içi boş küresel kafes yapıların (Şekil 11) mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yazarlar YMKD kafes yapıların uzama-baskın, içi boş küresel kafes yapıların büküm-baskın davranış gösterdiğini belirtmişlerdir. En yüksek gerilimlerin düğüm noktalarında oluştuğunun belirtildiği çalışmada, YMKD kafes yapıların, içi boş küresel kafes yapılara göre daha fazla basma direnci, azami çekme direnci ve Young modülüne, ama daha az uzamaya sahip olduğu belirtilmiştir [43]. Li ve ark., EIE yöntemi ve Ti6Al4V malzeme kullanarak üç farklı şekilde kafes yapısı üretmişlerdir; kübik, G7 ve baklava dilimli oniki yüzlü. Yazarlar elastik modülünün yoğunlukla birlikte arttığını ve aynı yoğunlukta en yüksek Young modülüne kübik, en düşüğüne ise G7 kafes yapısının sahip olduğunu belirtmişlerdir [9, 24]. Zhong ve ark. 316L paslanmaz çelik malzeme ve SLE yöntemi kullanarak üç farklı şekilde kafes yapısı (Tetraikadekahedron (14 yüzlü cisim) (Şekil 12), elmas ve HMK) üretmişlerdir. Aynı yoğunluk ve birim kafes ölçülerinde, tetraikadekahedron yapının akma

dayanımı (9,67 MPa), elmas yapınınkinden (6,05 MPa) % 59,83 daha fazla, HMK yapınınkinden ise (1,66 MPa) % 482,53 daha fazla çıkmıştır. Benzer şekilde tetraikadekahedron yapının basma modülü (357,38 MPa), elmas yapınınkinden (135,68 MPa) % 163,40 daha fazla, HMK yapınınkinden ise (28,69 MPa) % 1145,66 daha fazla çıkmıştır. Bu da tetraikadekahedron yapının elmas ya da HMK yapıya göre çok daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir [44].



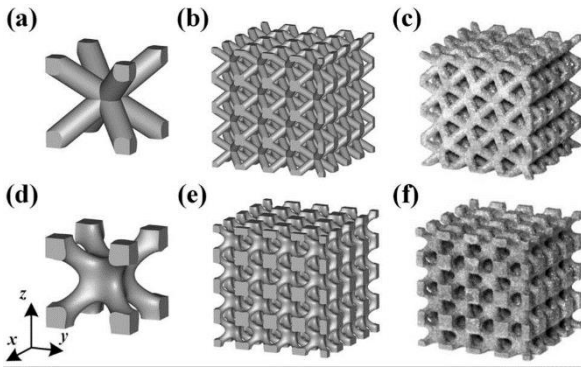
Şekil 11. YMKD ve içi boş küresel kafes yapıları [43].



Şekil 12. Tetraikadekahedron (14 yüzlü cisim) kafes yapısı [44]

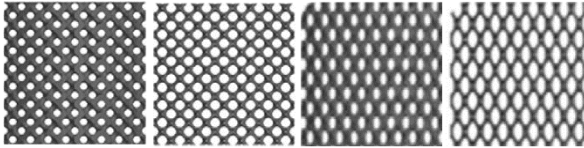
Üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapılarının (özellikle elmas kafes yapının), HMK kafes yapılardan daha yüksek dayanım, plato gerilimi ve enerji absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu literatürde belirtilmiştir [45, 46]. Restrepo ve ark. schwarz primitif, gyroid ve schwarz elmas kafes yapıları inceledikleri çalışmada, schwarz primitif yapının en yüksek, gyroid yapının ise en düşük elastik modülü ve basma dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir [47].

Zhao ve ark. CAD ortamında tasarlanan HMK yapıyı (CAD-HMK), üçlü periyodik minimum yüzey formülleri kullanılarak modellenen yapılar (ÜPMY-HMK) ile karşılaştırmışlardır (Şekil 13). Ti6Al4V malzeme ve seçmeli lazer ergitme yöntemi kullanılan çalışmada % 10-30 oranında değişen hacim oranları kullanılmıştır. Yazarlar, ÜPMY-HMK yapıdaki dikmelerin aksenal yüklerden daha fazla etkilendiği ve kırılma davranışı gösterdiği, CAD-HMK yapıların ise büküm-baskın davranış gösterdiğini, farklı hacim oranlarına göre değişmekle birlikte ÜPMY-HMK yapının elastik modülü, akma dayanımı ve basma dayanımının CAD-HMK yapıdan sırasıyla % 18,9-42,2, % 19,2-29,5 ve % 2-36,6 fazla çıktığını belirtmişlerdir [48].



Şekil 13. (a) CAD-HMK birim hücre, (b) CAD-HMK kafes yapı, (c) üretilmiş CAD-HMK kafes yapı, (d) ÜPMY-HMK birim hücre, (e) ÜPMY-HMK kafes yapı, (f) üretilmiş ÜPMY-HMK kafes yapı [48]

Yanez ve ark. % 75 ve % 90 gözenekliliğe sahip, normal (gözenekler küresel) ve deforme (gözenekler elips) gyroid kafes yapıları (Şekil 14) EIE yöntemi ile üretmişlerdir. Tablo 2'den de görülebileceği gibi, gyroid yapıların kullanılacağı tasarım sadece basma yüklerine maruz kalacak ise deforme gyroid yapılar daha yüksek dayanıma sahip olduğu için tercih edilmelidir. Eğer yüklemeler normal eksen boyunca olmuyor ve ilgili tasarım burulma yüklerine de maruz kalıyorsa o zaman normal gyroid yapılar tercih edilmelidir [14].



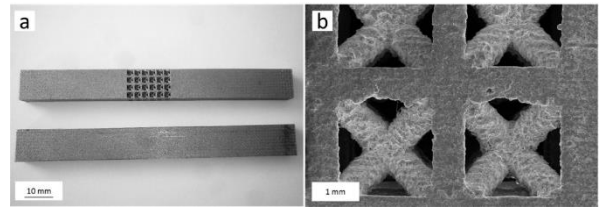
Şekil 14. Sırasıyla; % 75 gözenekli normal, % 90 gözenekli normal, % 75 gözenekli deforme, % 90 gözenekli deforme gyroid yapılar (x-y eksenindeki görünüş) [14].

**Darbe Direnci:** Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların üstün darbe direncine sahip olduğu literatürde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde belirtilmiştir. EIE yöntemiyle üretilen, Ti6Al4V kübik, elmas ve auxetic kafes yapıların düşük ve yüksek hızdaki darbe davranışlarının incelendiği bir çalışmada, kafes yapıların üzerlerine gelen darbeyi zamana bağlı olarak sönmülediği ve bu sayede çarpma anında meydana gelen azami basıncı azalttığı belirtilmiştir. Bundan dolayı kafes yapıların, enerji absorbe edebilme özelliğinin istendiği yapılarda kullanılabileceği belirtilmiştir [49]. Rosa ve ark. SLE yöntemi ve 4 mm kenar uzunluğu ve 1 mm çapında HMK kırıtlara sahip kafes yapı kullanarak, 8x16x150 mm uzunluğunda test çubukları üretmişler ve üç farklı frekansta (0,1, 1,0 ve 10,0 Hz) sönmüleme testine tabi tutmuşlardır. Kafesiz yapıdaki test çubukları ile yapılan karşılaştırmalı test sonuçlarına göre, kafesli

yapılar kafesiz yapılara göre daha fazla sönmüleme kapasitesine sahiptir. Yazarlar bunun muhtemel sebebinin kafes içerisindeki gerilim alanının homojen olmaması ve düşük gerilimlerin bile bazı bölgelerde yüksek deformasyonlara yol açması olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 15) [2].

Tablo 2. Farklı gözenekliliğe sahip normal ve deforme gyroid yapıların mekanik özellikleri [14]

	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	G (MPa)	$\tau_{max}$ (MPa)
% 75 gözenekli normal gyroid	47,45 ± 1,34	57,71 ± 1,15	1747,0 4 ± 162,00	47,72 ± 4,14
% 90 gözenekli normal gyroid	14,62 ± 0,34	17,01 ± 0,34	555,87 ± 13,92	14,18±0,4 1
% 75 gözenekli deforme gyroid	83,46 ± 1,56	86,59 ± 1,76	1566,4 2 ± 178,10	44,16 ± 2,20
% 90 gözenekli deforme gyroid	16,04 ± 0,78	16,41 ± 0,94	302,71 ± 23,91	7,48 ± 1,18

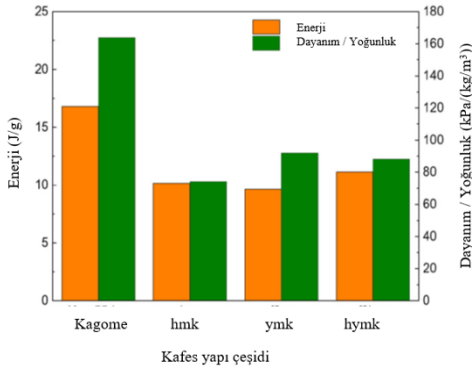


Şekil 15. HMK kafes yapı ile üretilmiş test numunesi [2]

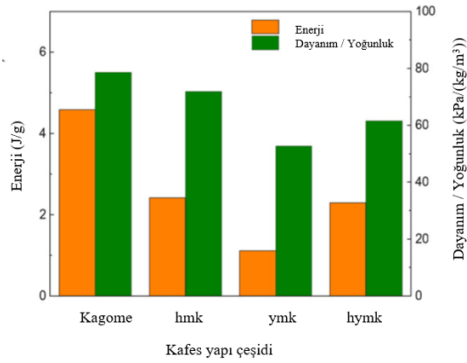
Kafes yapıların, bal peteği yapılarda kullanılması ile darbe direncini nasıl etkileyeceği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bal peteği yapılarında ara malzeme olarak 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşım malzemeden SLE yöntemiyle üretilen HMK ve HMKD kafes yapıların kullanılmasının, bal peteği yapısının delaminasyon direncini arttırdığını ve göreceli yoğunluk arttırıldıkça yapının darbe direncinin artacağı literatürde belirtilmiştir [50]. Harris ve ark. kare bir balpeteği yapısının hücre duvarlarını aynı göreceli yoğunluktaki kafes yapı ile değiştirmiş ve bu sayede daha yüksek enerji absorbe edebilme kapasitesi elde etmiştir [51].

Literatürde farklı kafes yapıların darbe davranışları ve enerji absorbe edebilme kabiliyetleri

karşılaştırılmıştır. Vrana ve ark. AlSi10Mg malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri % 17,9 göreceli yoğunluğa sahip beş farklı kafes yapısının (HMK, HMKD, hacim yüzey merkezli kübik (HYMK), ilave dikmeli hacim yüzey merkezli kübik (HYMKD) ve gyroid) darbe davranışlarını inceledikleri çalışmada, HYMK ve HYMKD yapıların en yüksek darbe direnci gösterdiği ve tem ergimemiş tozların dikmelerin alt yüzeyine yapışmasının darbe direncini etkilediğini belirtmişlerdir [52]. Ullah ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozlarını kullanarak Kagome, HMK, YMK, HYMK kafes yapıları üretmişlerdir. Yapılan basma ve kayma testleri sonucunda, kagome yapının hem enerji absorbe edebilme özelliğinin hem de dayanımının diğer kafes yapılara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 16) [53].



(a)



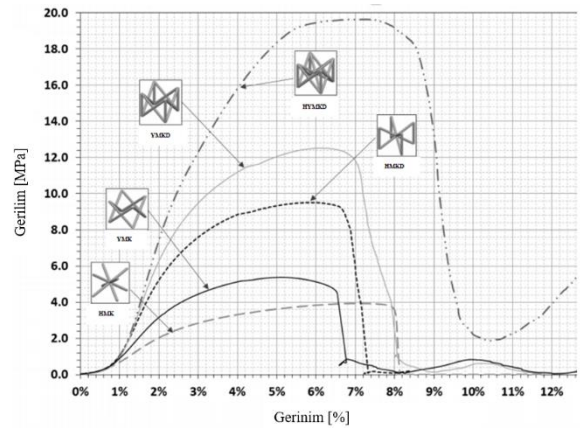
(b)

Şekil 16. Farklı kafes yapıların (a) basma ve (b) kayma yüklenmeleri durumunda enerji absorbe edebilme özellikleri ve dayanımları [53].

Leary ve ark. AlSi12Mg malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri beş farklı kafes yapısını (HMK, YMK, HMKD, YMKD, HYMKD) inceledikleri çalışmada, HMK yapının en düşük, HYMKD yapının ise en yüksek basma dayanımı, elastik modülü ve enerji absorbe edebilme özelliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 17) [29]. Leary ve ark. In625 malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri dört farklı kafes yapısını (HMK, YMK, HMKD, YMKD) inceledikleri çalışmada, dikme

uzunluğunun daha fazla olmasından dolayı, HMK yapının YMK yapıya göre daha fazla dayanım ve modül değerine sahip olduğunu, HMK ve YMK yapıların küçük birim hücre boyutları (2 mm) için büküm-baskın davranış gösterdiğini, ama hücre boyutu arttıkça davranışın uzama-baskın yapıya dönüştüğü belirtilmiştir. Yazarlar ayrıca, YMK yapının daha yüksek plato geriliminden dolayı HMK yapıya göre daha fazla enerji absorbe edebilme özelliği olduğunu belirtmişlerdir. Dikme eklenmesinin kafes yapının dayanımını ve enerji absorbe edebilme özelliğini arttırdığı da yine aynı çalışmada belirtilmiştir [54].

Jin ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V tozlarını kullanarak ürettikleri dört farklı kafes yapısının (HMK, YMK, elmas YMK, elmas altıgen) (Şekil 18) darbe davranışını inceledikleri çalışmada, deformasyonun, elmas YMK ve elmas altıgen yapılarda, dikmelerin birleşim yerlerinde, YMK ve HMK yapılarda ise dikmelerin yüzeylerle birleşme yerlerinde başladığını belirtmişlerdir. YMK kafes yapının uzama-baskın, HMK kafes yapının büküm-baskın, elmas YMK ve elmas altıgen kafes yapıların ise her iki şekilde davranış gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, uzama baskın davranış gösteren kafes yapılarının daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir [21].

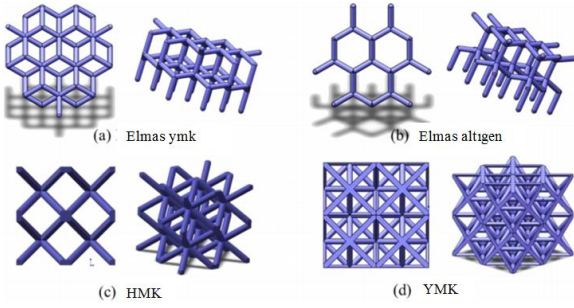


Şekil 17. Seçmeli lazer ergitme yöntemi ile üretilen AlSi12Mg farklı kafes yapıların gerilim-gerinim ilişkisi [29].

Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların darbe direncini ve enerji absorbe edebilme özelliklerini arttırmak için farklı tasarımlar literatürde denenmiştir. Choy ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kübik ve balpeteği kafes yapılarında, sabit dikmeler yerine yoğunluğun kademeli olarak arttığı yapılar (Şekil 19) kullanmışlardır. Bu yapılarda deformasyonun, yoğunluğun en az olduğu yerden başladığı ve en fazla olduğu yere doğru ilerlediği, ama sabit dikmeli yapılarda, kesme gerilmelerinden dolayı bütün parça boyunca ani kırılmalar meydana geldiği



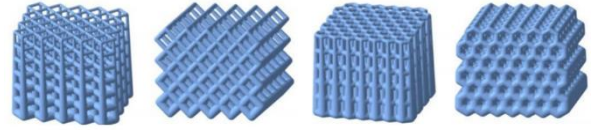
belirtilmiştir. Ayrıca yoğunluğun kademeli olarak arttığı yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin de daha yüksek olduğu belirtilmiştir [55]. Benzer bir yorum, yoğunluğun kademeli olarak arttığı, seçmeli lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg HMK yapılar için de yapılmıştır [56]. Al-Saedi ve ark. da üst yüzeyden alt yüzeye doğru yoğunluğun kademeli olarak arttığı, seçmeli lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş AlSi-12 YHMK yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin sabit yoğunluktaki kafes yapılardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [57].



Şekil 18. Farklı kafes yapılar; (a) elmas yüzey merkezli kübik, (b) elmas altıgen, (c) hacim merkezli kübik, (d) yüzey merkezli kübik [21].

Bai ve ark. Ti6Al4V alaşım malzemesi ve SLE yöntemiyle bütün yüzeylerde merkezli kafes yapı üretmişlerdir. Yazarlar, HMK ile karşılaştırıldığında, elastik modülün % 144, akma dayanımının ise % 122 arttığını, aynı deformasyon için 2,4 kat daha fazla enerji absorbe edebildiğini belirtmişlerdir [58].

Darbe direncini ve enerji absorbe edebilme özelliklerini arttırmak için kullanılacak en önemli kafes yapılardan birisi auxetic malzemeler olarak adlandırılan kafes yapılardır. Auxetic malzemeler ilk kez 1987 yılında Lakes tarafından önerilen negatif Poisson oranına sahip malzemelerdir. Bu malzemelere dikey yönde basma yükü uygulandığında malzeme yatay yönde genişleyeceği yerde daralır, dikey yönde ise yükleme yönünün tersi yönde genişler. Bu özelliğinden dolayı auxetic malzemeler enerji absorbe edebilme özellikleri yüksek malzemelerdir [59]. Malzemenin elastik davranışı üzerinde etkili olan Poisson oranının negatif olduğu auxetic kafes yapılar eklemeli imalat ile başarılı bir şekilde üretilebilmekte ve farklı mühendislik uygulamalarında kullanılabilir. Örnek olarak, ısıl genişlemeden kaynaklı düşük kuvvetlere maruz kalan yüksek sıcaklığa sahip sistemlerde negatif Poisson oranına sahip metal kafes yapılar kullanılabilir [60]. Ayrıca basınçlı kapları çevreleyen iskelet yapılarda da auxetic malzemeler kullanılmaktadır [61]. Yoğunluğun kademeli olarak değiştiği auxetic kafes yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin, sabit yoğunluktaki auxetic kafes yapılarından daha yüksek olduğu literatürde belirtilmiştir [62].



Şekil 19. Yoğunluğun kademeli olarak arttığı yapılar: sırasıyla dikey kübik yapı, yatay kübik yapı, dikey balpeteği yapı, yatay balpeteği yapı [55].

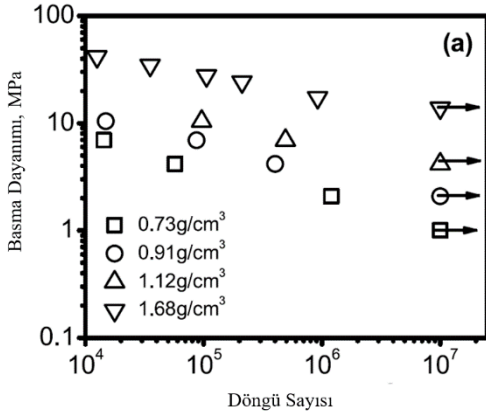
**Yorulma Özellikleri:** Dinamik yüklemeye maruz bırakılan kafes yapıların yorulma davranışları üç farklı aşamada değerlendirilebilir; birinci aşamada gerinim hızlı bir şekilde artar, ikinci aşamada yorulma çatlakları başlar ve toplam gerinim  $10^4$ - $10^6$  döngüde sabit kalır, son aşamada ise toplam gerinim logaritmik olarak artar ve sonuçta parça hasar görür. Bu üç aşamadan ilki çatlak başlangıç süresi ile, diğer iki aşama ise çatlak ilerleme süresi ile ilgilidir [63, 1].

Mrabe ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri farklı yoğunlukta Ti6Al4V elmas kafes yapıların akma dayanımına göre normalize edilmiş,  $10^6$  döngüdeki yorulma dayanımlarının 0,15-0,25 arasında değiştiğinin, bu değer aynı mikroyapıya sahip katı malzemeninkinden (0,4) daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [64]. Yavari ve ark. ise SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V on iki yüzlü kafes yapısının akma dayanımına göre normalize edilmiş yorulma direncini,  $10^6$  döngüde 0,12 olarak bulmuşlardır [65]. Yazarlar bunun sebebi olarak; dikme yüzeylerine yapılan tozlardan dolayı oluşan yüksek gerilim konsantrasyonu, dikmelerin yakınlarında oluşan kapalı gözeneklerden kaynaklanan yüksek gerilim konsantrasyonu ve kafes yapıda oluşan mikroyapının yüksek döngü yorulmaları için uygun olmaması sebeplerini göstermişlerdir [64, 65]. Ren ise yorulma dayanımındaki bu farklılığı yüzey pürüzlülüğünün fazla olması ve mikroyapının  $\alpha'$  kırılma faza sahip olmasına bağlamıştır [63].

Yorulma dayanımlarını arttırmak için, ısıl işlem, yüksek izostatik baskı ve kimyasal aşındırma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Fakat literatür detaylı incelendiğinde, bahsedilen bu yöntemlerin, kafes yapının yorulma direnci üzerindeki etkisinin her zaman aynı olmadığı görülmüştür. Örneğin, SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kübik kafes yapıların yorulma direnci üzerine yapılan bir çalışmada, Dallago ve ark., yüksek izostatik preslemenin her ne kadar gözenekliliği azaltsa da yorulma direnci üzerinde doğrusal bir etkisinin olmadığını çünkü yorulmanın daha çok yüzey pürüzlülüğünden etkilendiğini belirtmişlerdir [66]. Jamshidinia ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V sekiz yüzlü kafes yapıları 15 Hz yükleme frekansında ve 100 N, 200 N, 300 N ve 500 N yüklerinde, % 10 yükleme oranında, azami 5 milyon döngüde yorulma testine tabi tutmuşlardır. 100 N yüklemeye kafes yapı 5 milyon

döngüde herhangi bir hasara uğramazken, diğer yüklemelerde parça daha az döngülerde hasara uğramıştır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, düşük dikme kalınlığı ve düşük göreceli yoğunluğun parçanın yorulma dayanımının azalmasında en çok katkısı bulunduğu belirtilmiştir [67].

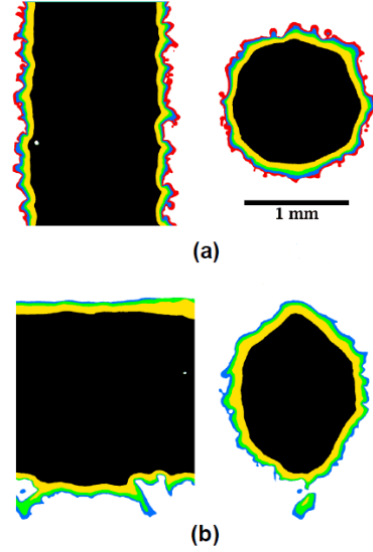
Ekleme ile imalat ile üretilen Ti6Al4V kafesli yapıların yoğunluğunun, yorulma dayanımı ile orantılı olduğu ve aynı gerilim değerinde, yoğunluk arttıkça parçanın yorulma dayanımının arttığı literatürde belirtilmiştir (Şekil 20) [68].



Şekil 20. EIE yöntemi ile üretilen farklı yoğunluklardaki Ti6Al4V kafes yapıların S-N grafikleri [68]

Literatürde kimyasal aşındırma sonucunda elde edilen düşük yüzey pürüzlülüğünün, kafes yapının yorulma direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Lhuissier ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V sekizli kafes yapının yüzey pürüzlülüğü üzerinde kimyasal aşındırmanın etkisini incelemiştir. Yazarlar, 60 dakika boyunca kimyasal aşındırmaya maruz kalan parçalarda yüzey pürüzlülüğünde ciddi azalış gördüklerini ve bu yöntemin eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların yorulma dayanımlarını arttırmak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Şekil 21) [69].

Hooreweder ve Kruth SLE yöntemiyle ürettikleri CoCr ve Ti6Al4V kafes yapıların yorulma davranışlarını inceledikleri çalışmada, kimyasal aşındırmanın CoCr'un yorulma davranışları üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığını bunun sebebinin ise CoCr'un yüksek sünekliği olduğunu belirtmişlerdir. Ti6Al4V kafes yapılarda ise yüksek izostatik presleme ve kimyasal aşındırmanın, özellikle yüksek döngü bölgelerinde yorulma performansını arttırdığı belirtilmiştir [70].



Şekil 21. (a) dikey ve (b) yatay yöndeki dikmeler üzerinde kimyasal aşındırmanın etkisi. Kırmızı renk üretilmiş parçayı, mavi renk 10 dakika, yeşil renk 20 dakika, sarı renk 30 dakika ve siyah renk 60 dakika kimyasal aşındırmaya maruz kalmış parçayı göstermektedir [69].

Kafes yapıların yorulma davranışlarını en çok etkileyen parametreler; ana malzemenin mekanik özellikleri, kafes yapının yoğunluğu, kafes şekli, dikme çeşitleri ve yerleşimidir [71]. Bu parametrelerin kafes yapının yorulma dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi hem çok maliyetli (yorulma testi için çok fazla test numunesine ihtiyaç duyulması ve kafes yapı test numunelerinin üretiminin çok maliyetli olmasından dolayı) hem de çok zaman alıcıdır. Bundan dolayı Zargarian ve ark. numerik ve deneysel yöntemler kullanarak, kafes yapıların yorulma dayanımlarını tahmin edebilmek için bir denklem geliştirmişlerdir;

$$S_{N_f}^* = C_A A_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{n_A} N_f^{*C_b b_s} \quad (4)$$

Bu denklemde  $S_{N_f}^*$  kafes yapının yorulma dayanımını (MPa),  $N_f^*$  döngü sayısını,  $C_b$  dikme düzensizliğine bağlı olan bir sabiti (çoğu yapı için 1 düşünülebilir),  $C_A$  ve  $n_A$  birim hücre şekline ve malzemesine bağlı olan sabitleri,  $A_s$  is dikmenin yorulma özelliklerini,  $\rho^*$  kafes yapının yoğunluğunu,  $\rho_s$  ana malzemenin yoğunluğunu ifade eder [72].

Literatürde farklı kafes yapılarının yorulma dayanımlarının karşılaştırılması üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V-ELI kübik, elmas ve kesilmiş sekiz yüzlü kübik kafes yapıların yorulma dirençleri Yavari ve ark.

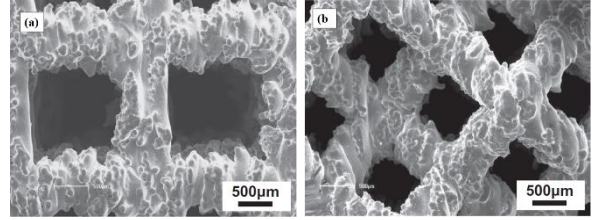
tarafından çalışılmış ve kübik kafes yapılarda,  $10^6$  döngüde ve akma dayanımının % 80'i kadar yüklemelerde bile herhangi bir bozulmanın meydana gelmediği, diğer iki kafes yapıda ise gözenekliliğin artması ile aynı gerilme değerlerinde yorulma dayanımlarının azaldığı belirtilmiştir [73]. Bobbert ve ark. SLE yöntemiyle dört farklı Ti6Al4V ÜPMY (primitive, IWP, gyroid ve elmas) kafes yapı üretmişlerdir. Yorulma testleri sonucunda, primitive kafes yapının  $3 \times 10^4$  döngüde bozulmasına rağmen, IWP, elmas ve gyroid kafes yapıların  $1 \times 10^5$  ve  $7 \times 10^5$  döngülere kadar dayandığı belirtilmiştir [74]. Zhao ve ark., EIE yöntemi ve Ti6Al4V malzeme kullanarak üç farklı şekilde kafes yapısı üretmişlerdir; kübik, G7 ve baklava dilimli oniki yüzlü. Yazarlar yorulma dayanımının, en yüksek değerinin G7 ( $\sigma_{\text{yorulma}} = 9,8$  MPa) kafes yapısına, en düşük değerinin ise kübik ( $\sigma_{\text{yorulma}} = 75$  MPa) kafes yapıda görüldüğünü belirtmişlerdir ( $\sigma_{\text{yorulma}} = 13,9$  Mpa, baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapı) [75]. Peng ve ark. dört farklı birim kafes yapısını (basit kübik (BK), BK-HMK, HMK, YMK) inceledikleri çalışmada, bk yapının en yüksek, HMK yapının ise en düşük yorulma direncine sahip olduğunu, incelenen bütün kafes yapılarda göreceli yoğunluğun artması ile yorulma direncinin arttığı belirtilmiştir [34].

**Yüzey pürüzlülüğü:** Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların yüzey pürüzlülüğü, yapının mekanik dayanımı üzerinde etkiye sahiptir. EIE yöntemiyle üretilen sekizli kafes yapılarda, kimyasal aşındırma uygulaması ile yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasının, kafes yapıların dayanımını arttırdığı literatürde belirtilmiştir [76].

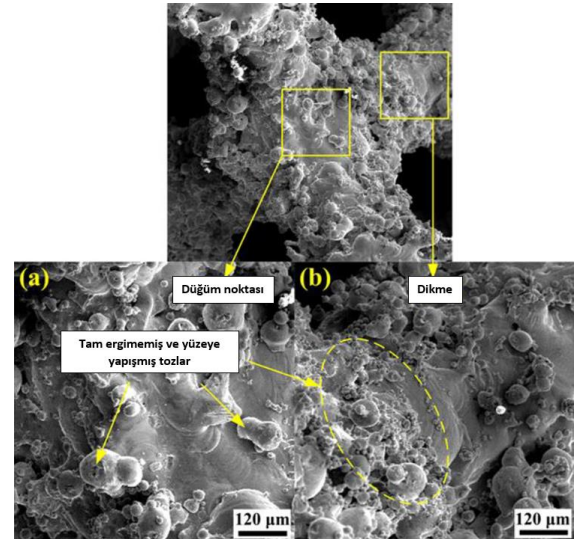
Eklemeli imalat sırasında özellikle eğimli yüzeylerde bir önceki ve bir sonraki katmanın basamak şeklinde dizilmesi ve tam ergimemiş tozların yüzeye yapışmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü yüksek çıkmaktadır (Şekil 22) [31]. Özellikle bakır gibi ısı iletkenliği yüksek olan malzemeler eklemeli imalatla kullanıldığında, yüzeyde daha derin ısıl etkilenmiş bölge oluşmakta, bu da daha fazla tozun tam ergimeden yüzeye yapışmasına ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğüne yol açmaktadır (Şekil 23) [10]. Fakat ısıl işlem ve kumlama gibi yöntemlerle yüzey pürüzlülüğü azaltılabilmektedir (Şekil 24). Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarda, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kimyasal aşındırma ve elektro kimyasal parlatma yöntemleri de uygulanabilmektedir. Şekil 25'ten de görülebileceği gibi bu işlemlerin uygulanması ile yüzey pürüzlülüğü ciddi oranda azalmaktadır [77].

Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarda dikmelerin üst yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü alt yüzeylerinkine göre daha azdır (Şekil 26) [77]. Mazur ve ark. SLE yöntemi ile ürettikleri AlSi12Mg HMK,

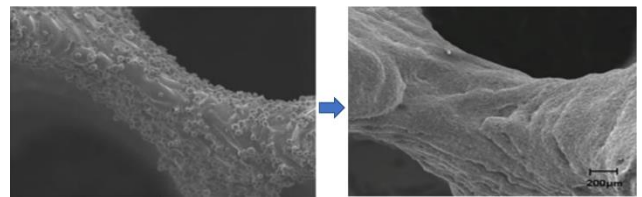
YMK, HMKD, YMKD ve HYMKD kafes yapıların yüzey pürüzlülüklerini inceledikleri çalışmalarında, inşa yönüne göre dikmelerin alt yüzeylerinin yan ve üst yüzeylere göre çok daha fazla  $R_a$  ve  $R_z$  değerine ulaştığını, bunun sebebinin ise dikmelerin alt yüzeyinde, toz yatağı ile katı malzeme arasındaki yetersiz ısı transferinden dolayı fazla miktarda ergimemiş tozların yapışması olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca dikmelerin alt yüzeyindeki bu yüksek yüzey pürüzlülüğünün, dikmelerin zemin plakasına göre olan açısı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir [79].



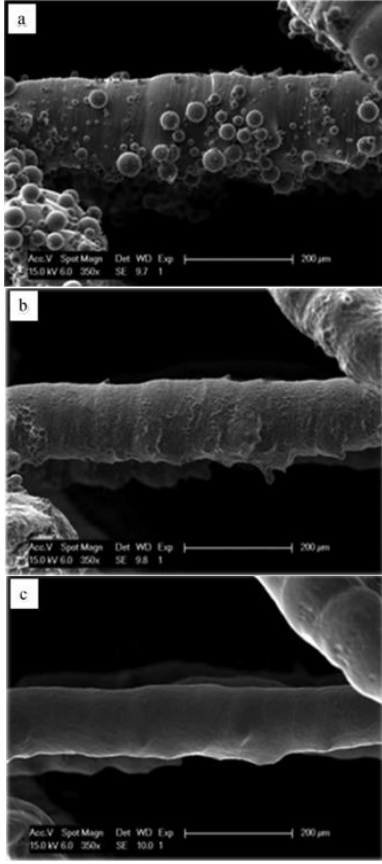
Şekil 22. EIE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V kübik (a) ve baklava dilimli oniki yüzlü (b) kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [9]



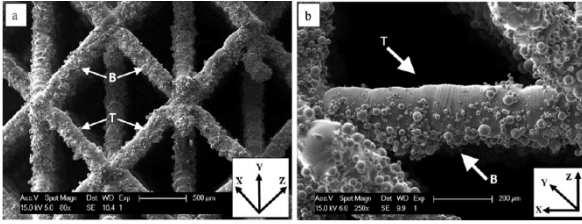
Şekil 23. SLE yöntemiyle üretilen Cu-Cr-Zr kafes yapısının taramalı elektron mikroskop görüntüsü [10].



Şekil 24. SLE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V gyroid yapıların üretim sonrası ve ısıl işlem/kumlama sonrası yüzey pürüzlülükleri [78]



Şekil 25. Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarda ortaya çıkan; üretimden sonraki (a), kimyasal aşındırmadan sonraki (b) ve kimyasal aşındırma + elektro kimyasal parlatma sonrası (c) yüzey pürüzlülüğü [77].

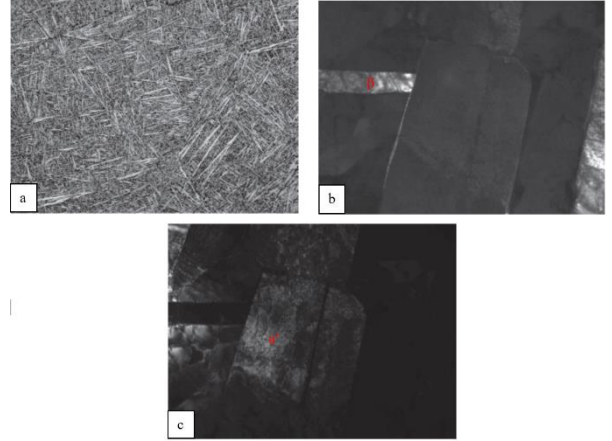


Şekil 26. Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarda ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü. T dikmelerin üst yüzeyini, B ise alt yüzeyini göstermektedir [77].

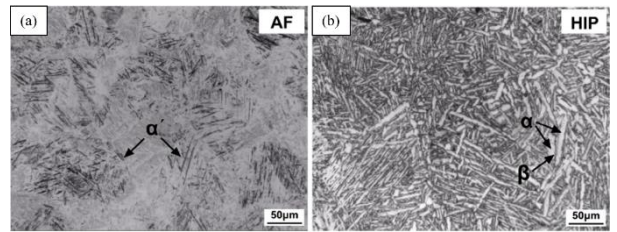
**Mikroyapı Özellikleri:** Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılardaki mikroyapı değişimleri, yapının mekanik özelliklerini değiştirmekte ve en çok termal gradyandan ve soğuma hızından etkilenmektedir [80].

Kafes yapıların EIE yöntemiyle üretilmesinde (Ti6Al4V malzeme), genel olarak dikmelerde inşa yönüne paralel  $\beta$  fazı ve bu fazın içinde de  $\alpha$  ya da  $\alpha'$  martenzit fazının oluştuğu, dikmelerin üst bölümlerinde  $\alpha + \beta$  sepet örgüsü (basket weave / Widmanstätten) fazının oluştuğu ve son olarak ta

üretim platformuna yakın bölgelerdeki hızlı soğumadan dolayı  $\alpha'$  martenzit fazının oluştuğu belirtilmiştir [1]. Li ve ark. da, EIE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V kafes yapılardaki dikmelerin çok hızlı soğuduğu için, mikroyapısının daha çok  $\alpha'$  martenzit ve bir miktar  $\beta$  fazı içerdiğini belirtmişlerdir (Şekil 27) [9]. Kafes yapıların SLE yöntemiyle üretilmesinde ise (Ti6Al4V malzeme), genel olarak üretilen parçalarda, lazer ergiyik havuzunun hızlı soğumasından dolayı,  $\alpha'$  martenzit yapının görüldüğü, eğer parçaya sıcak izostatik presleme uygulanırsa,  $\alpha'$  martenzit yapının  $\alpha + \beta$  yapıya dönüştüğü ama  $\alpha$  yapının daha baskın olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 28) [81]. EIE ya da SLE yöntemleriyle üretilen Ti6Al4V kafes yapılarda, mikroyapının daha çok sütun şeklinde  $\beta$  tanecikleri ve bu taneciklerin içerisinde  $\alpha'$  ince plakaları şeklinde olduğu, EIE yönteminde bu  $\alpha'$  ince plakalarının bir kısmının sünek  $\alpha/\beta$  yapısına dönüştüğü, dolayısıyla EIE yöntemiyle üretilen kafes yapıların kırılma tokluğunun, SLE yöntemiyle üretilen kafes yapılarınkinden daha yüksek olduğu literatürde belirtilmiştir [82].



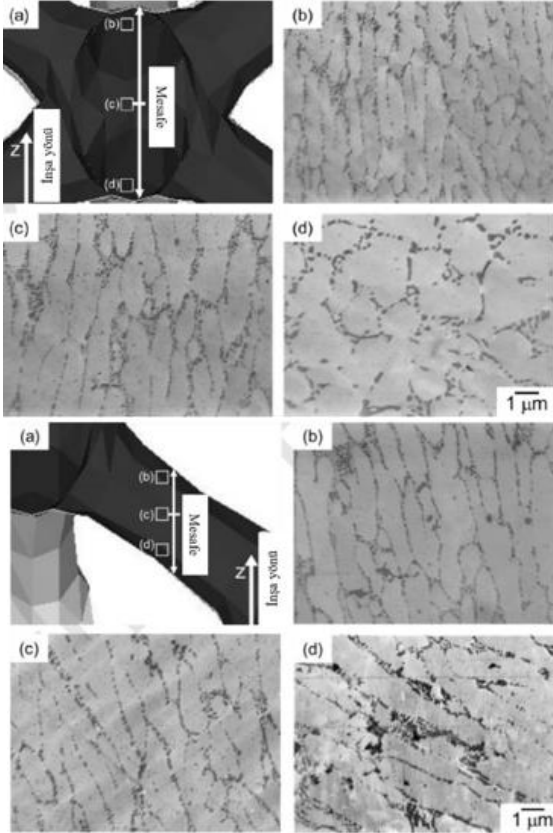
Şekil 27. EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kafes yapıların mikroyapı özellikleri; (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) ve (c) geçirimsiz elektron mikroskobu görüntüleri [83].



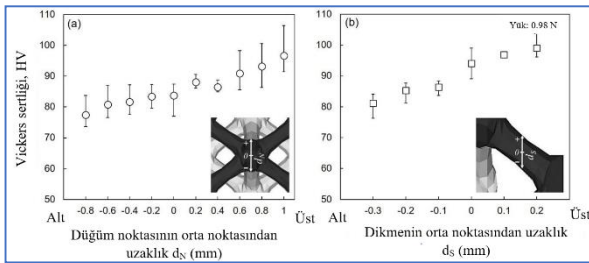
Şekil 28. SLE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V sekiz yüzlü kafes yapıların mikroyapı görüntüleri; (a) işlemeden sonra, (b) sıcak izostatik preslemeden sonra [81]

Ti6Al4V haricinde, literatürde, farklı malzemeden üretilen kafes yapıların mikroyapı özellikleri de incelenmiştir. Liu ve ark. SLE

yöntemiyle ürettikleri AlSi10Mg HMK kafes yapılarda, dikmelerde ve düğüm noktalarında etrafı Si taneciklerle çevrili  $\alpha$ -Al fazı oluştuğu, bu fazın inşa yönü boyunca uzama gösterdiği, dikmelerin ve düğüm noktalarının alt yüzeylerine doğru bu fazın daha kaba tanecik yapısı gösterdiği ve bütün bu mikroyapı değişimlerinden (Şekil 29) dolayı düğüm noktaları ve dikmelerde alt yüzeylerden üst yüzeylere çıktıkça sertliğin arttığını (Şekil 30) belirtmişlerdir [84].



Şekil 29. Mikroyapının düğüm noktası ve dikmedeki değişimi [84]



Şekil 30. Sertliğin düğüm noktası ve dikmedeki değişimi [84]

## SONUÇ

Bu çalışmada, eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan analitik yöntemler ve deneysel

çalışmalardan bahsedilmiş ve geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Kafes yapıların çok farklı alanlarda kullanıma uygun olması ve eklemeli imalat ile bu yapıların üretiminin kolay olması, son yıllarda bu yapılara olan ilgiyi arttırmıştır. Kafes yapılarda, yapılan deneysel çalışmalarla malzemelerin mekanik özellikleri elde edilebilmektedir. Fakat bu özelliklerin mühendislik uygulamalarında kullanılması için hata paylarının azaltılması ve dolayısıyla çok fazla test, deney yapılması gerekmektedir. Eklemeli imalat yönteminin pahalı ve üretim sürecinin yavaş olması, kafes yapıların mühendislik uygulamalarında kullanılmasının önündeki en büyük engellerden birisidir [85].

Literatürde yapılan çalışmaların kapsamlı taraması ile edilen bilgiler neticesinde aşağıda belirtilen konularda eksikler olduğu ve bu konularda yapılacak detaylı / ilave çalışmaların, eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların daha fazla mühendislik uygulamasında kullanılmasına yardımcı olacağı ve bilimsel yenilik katacağı düşünülmektedir;

- ✓ Dikme-tabanlı kafes yapılar ve üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapıların karşılaştırmalı mekanik, ısıl, fiziksel vs. davranışları detaylı araştırmayı beklemektedir.
- ✓ Kafes yapıların yorulma davranışları ile alakalı çalışmalar detaylandırılmayı beklemektedir.
- ✓ Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine yapılan deneysel çalışmalar literatürde olmasına rağmen, bu yapıların gerçek hayatta kullanımları (havacılık, biomedikal, otomotiv vs.) sırasındaki ısıl, mekanik, fiziksel vs. davranışları hakkında yapılan araştırmalar yetersizdir.
- ✓ Kafes yapıların mekanik özelliklerini içeren veri tabanı hazırlanması ve istenilen uygulamaya göre (havacılık, biomedikal vs.) uygun kafes yapının seçimi konusunda yapılacak bir çalışma eklemeli imalatla üretilen kafes yapılar konusunda çığır açacaktır [86].
- ✓ Literatürde yapılan deneysel çalışmaların hemen hemen tamamında, kafes yapıların basma yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. Bunun sebebi kafes yapılara uygulanacak çekme testlerinin zorluğudur. Kafes yapıların çekme yükleri altındaki davranışları araştırılmayı beklemektedir [8]

## TEŞEKKÜR

Bu makale, TÜBİTAK Teknoloji ve Yenilik Destek Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 5158001).

## MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Due to the recent advancements in additive manufacturing, the number of researches on different industrial implementation of lattice structures have increased significantly. Knowing the mechanical properties of additive manufacturing lattice structures is very important when selecting suitable lattice structures in designed parts for especially aviation and aerospace industry, automotive industry and biomedical industry. Mechanical properties of lattice structures can be changed as desired by changing their geometric parameters and they can be easily produced with the ease of production provided by additive manufacturing. In this study, detailed information about mechanical properties and future studies of additively manufactured metallic lattice structures were given.

**Keywords:** Lattice structures, additive manufacturing, Gyroid, Schwarz, diamond

### KAYNAKÇA

1. Zhang, X.Z., Leary, M., Tang, H.P., Song, T., Qian, M. 2018. "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges", *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 22 (3): 75-99.
2. Rosa, F., Manzoni, S., Casati, R. 2018. "Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting", *Materials and Design*, 160: 1010-1018.
3. Ashby, M.F. 2006. "The properties of foams and lattices", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364 (1838): 15-30.
4. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G. 2000. "Metal foams: a design guide", Elsevier.
5. McKown, S., Shen, Y., Brookes, W. K., Sutcliffe, C. J., Cantwell, W. J., Langdon, G. S., Nurick, G. N., Theobald, M. D. 2008. "The quasi-static and blast loading response of lattice structures", *International Journal of Impact Engineering*, 35 (8): 795-810.
6. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D. 2014. "Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Materials & Design*, 55: 533-541.
7. Van Bael, S., Kerckhofs, G., Moesen, M., Pyka, G., Schrooten, J., Kruth, J. P. 2011. "Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures", *Material Science and Engineering A*, 528 (24): 7423-7431.
8. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M. 2019. "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges", *Materials and Design*, 183: 108-137.
9. Li, S.J., Xu, Q.S., Wang, Z., Hou, W.T., Hao, Y.L., Yang, R., Murr, L.E. 2014. "Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method", *Acta Biomaterialia*, 10: 4537-4547.
10. Ma, Z., Zhang, D.Z., Liu, F., Jiang, J., Zhao, M., Zhang, T. 2018. "Lattice structures of Cu-Cr-Zr copper alloy by selective laser melting: Microstructures, mechanical properties and energy absorption", *Materials & Design*, 187: 108406.
11. Ushijima, K., Cantwell, W. J., Chen, D. H. 2013. "Prediction of the mechanical properties of micro-lattice structures subjected to multi-axial loading", *International Journal of Mechanical Sciences*, 68: 47-55.
12. Ptochos, E., Labeas, G. 2012. "Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods", *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 14(5): 597-626.
13. Ptochos, E., Labeas, G. 2012. "Shear modulus determination of cuboid metallic open-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods", *Strain*, 48(5): 415-429.
14. Yáñez, A., Cuadrado, A., Martel, O., Afonso, H., Monopoli, D. 2018. "Gyroid porous titanium structures: a versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction", *Materials and Design*, 140: 21-29.
15. Kang, D., Park, S., Son, Y., Yeon, S., Kim, S. H., Kim, I. 2019. "Multi-lattice inner structures for high-strength and light-weight in metal selective laser melting process", *Materials and Design*, 175: 107786.
16. Gu, H., Li, S., Pavier, M., Attallah, M. M., Paraskevoulakos, C., Shterenlikht, A. 2019. "Fracture of three-dimensional lattices manufactured by selective laser melting", *International Journal of Solids and Structures*, 180-181: 147-159.
17. H. Montazerian, Davoodi, E., Asadi-Eydivand, M., Kadkhodapour, J., Solati-Hashjin, M. 2017. "Porous scaffold internal architecture design based on minimal surfaces: a compromise between permeability and elastic properties", *Materials and Design*, 126: 98-114.

18. Alabort, E., Barba, D., Reed, R. C. 2019. "Design of metallic bone by additive manufacturing", *Scripta Materialia*, 164: 110-114.
19. Yan, X., Li, Q., Yin, S., Chen, Z., Jenkins, R., Chen, C., Wang, J., Ma, W., Bolot, R., Lupoi, R., Ren, Z., Liao, H., Liu, M. 2019. "Mechanical and in vitro study of an isotropic Ti6Al4V lattice structure fabricated using selective laser melting", *Journal of Alloys and Compounds*, 782: 209-223.
20. Mazur, M., Leary, M., Sun, S., Vcelka, M., Shidid, D., Brandt, M. 2016. "Deformation and failure behaviour of Ti-6Al-4V lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM)", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84 (5-8): 1391-1411.
21. Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., Zhang, H. 2019. "Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading", *Materials and Design*, 169: 107655.
22. Sun, J., Yang, Y., Wang, D. 2012. "Mechanical properties of Ti-6Al-4V octahedral porous material unit formed by selective laser melting", *Advances in Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.1155/2012/427386>.
23. Carlton, H. D., Lind, J., Messner, M. C., Volkoff-Shoemaker, N. A., Barnard, H. S., Barton, N. R., Kumar, M. 2017. "Mapping local deformation behavior in single cell metal lattice structures", *Acta Materialia*, 129: 239-250.
24. Zhao, S., Hou, W. T., Xu, Q.S., Li, S.J., Hao, Y.L., Yang, R. 2018. "Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by electron beam melting for biomedical applications", *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 277-301.
25. Kadkhodapour, J., Montazerian, H., Darabi, A. Ch., Anaraki, A. P., Ahmadi, S. M., Zadpoor, A. A., Schmauder, S. 2015. "Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 50: 180-191.
26. Vanderesse, N., Richter, A., Nuno, N., Bocher, P. 2018. "Measurement of deformation heterogeneities in additive manufactured lattice materials by digital image correlation: strain maps analysis and reliability assessment", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 86: 397-408.
27. Rehme, R., Emmelmann, C. 2006. "Rapid manufacturing of lattice structures with Selective Laser Melting", *Proceedings of SPIE*, Vol. 6107, San Jose, California, United States, 192-203.
28. Shen, Y., Mckown, S., Tsopanos, S., Sutcliffe, C. J., Mines, R.A.W., Cantwell, W.J. 2009. "The mechanical properties of sandwich structures based on metal lattice architectures", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 12 (2): 159-180.
29. Leary, M., Mazur, M., Mcmillan, M., Chirent, T., Sun, Y. Y., Qian, M., Easton, M. Brandt, M. 2016. "Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures", *Materials and Design*, 98: 344-357.
30. Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Hague, R. 2017. "An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures", *Journal of Cellular Plastics*, 53: 151-165.
31. Xiao, Z., Yang, Y., Xiao, R., Bai, Y., Song, C., Wang, D. 2018. "Evaluation of topology optimized lattice structures manufactured via selective laser melting", *Materials and Design*, 143: 27-37.
32. Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., Wang, P., Fang, D. 2019. "Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and  $\mu$ -CT-based finite element analysis", *Materials and Design*, 169: 107685.
33. Blattmann, C., Helou, M., Kara, S. 2019. "Characterisation of reinforced body centered cubic, octahedral-type and octet truss lattice structures", *Procedia CIRP*, 84: 38-42.
34. Peng, C., Tran, P., Nguyen-Xuan, H., Ferreira, A. J. M. 2020. "Mechanical performance and fatigue life prediction of lattice structures: Parametric computational approach", *Composite Structures*, 235: 111821.
35. Guo, R., Liu, R., Jiang, W., Chen, K., Zhang, J., Huang, F., Sun, X. 2011. "Numerical analysis on static mechanical properties of the periodic multilayer lattice material", *Engineering*, 3: 1149-1154.
36. Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K., Wadley, H. N. G. 2003. "On the performance of truss panels with Kagome cores", *International Journal of Solids and Structures*, 40 (25): 6981-6988.
37. Fan, H. L., Fang, D. N., Jing, F. N. 2008. "Yield surfaces and micro-failure mechanism of block lattice truss materials", *Materials & Design*, 29 (10): 2038-2042.

38. Hasib, H. B. 2011. "Mechanical behavior of non-stochastic Ti-6Al-4V cellular structures produced via electron beam melting (EBM), Master Thesis, North Carolina State University, USA.
39. Jamshidinia, M., Wang, L., Tong, W., Kovacevic, R., 2014. "The bio-compatible dental implant designed by using non-stochastic porosity produced by Electron Beam Melting® (EBM)", *Journal of Material Processing Technology*, 214 (8): 1728-1739.
40. Ahmadi, S. M., Yavari, S. A., Wauthle, R., Poursan, B., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. 2015. "Additively manufactured open-cell porous biomaterials made from six different space-filling unit cells: the mechanical and morphological properties", *Materials (Basel)*, 8(4): 1871-1896.
41. Mahshid, R., Hansen, H. N., Loft Højbjerg, K. 2016. "Strength analysis and modeling of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting for tooling applications", *Materials & Design*, 104: 276-283.
42. Rashid, R. A. R., Mallavarapu, J., Palanisamy, S., Masood, S. H. 2017. "A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures", *Materials Today: Proceedings*, 4: 8597-8604.
43. Köhnen, P., Haase, C., Bültmann, J., Ziegler, S., Schleifenbaum, J. H., Bleck, W. 2018. "Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured lattice structures of stainless steel", *Materials and Design*, 145: 205-217.
44. Zhong, T., He, K., Li, H., Yang, L. 2019. "Mechanical properties of lightweight 316L stainless steel lattice structures fabricated by selective laser melting", *Materials and Design*, 181: 108076.
45. Maskery, I., Aremu, A.O., Parry, L., Wildman, R.D., Tuck, C.J., Ashcroft, I.A. 2018. "Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading", *Materials and Design*, 155: 220-232.
46. Zhang, L., Feih, S., Daynes, S., Chang, S., Wang, M.Y., Wei, J., Lu, W.F. 2018. "Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading", *Additive Manufacturing*, 23: 505-515.
47. Restrepo, S., Ocampo, S., Ramirez, J. A., Paucar, C., Garcia, C. 2017. "Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing", *Journal of Physics: Conference Series*, 935:012036.
48. Zhao, M., Liu, F., Fu, G., Zhang, D. Z., Zhang, T., Zhou, H. 2018. "Improved mechanical properties and energy absorption of BCC lattice structures with triply periodic minimal surfaces fabricated by SLM", *Materials*, 11 (12): 2411.
49. Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J. A., Fay, S. D., Goodall, R., Todd, I., Askes, H. 2016. "Energy absorption in lattice structures in dynamics: experiments", *International Journal of Impact Engineering* 89: 49-61.
50. Shen, Y., Cantwell, W., Mines, R., Li, Y. 2013. "Low-velocity impact performance of lattice structure core based sandwich panels", *Journal of Composite Materials*, 48(25): 3153-3167.
51. Harris, J.A., Winter, R.E., McShane, G.J. 2017. "Impact response of additively manufactured metallic hybrid lattice materials", *International Journal of Impact Engineering*, 104: 177-191.
52. Vrana, R., Koutny, D., Palousek, D. 2016. "Impact resistance of different types of lattice structures manufactured by slm", *Modern Machinery (MM) Science Journal*, December: 1579-1585.
53. Ullah, I., Brandt, M., Feih, S., 2016. "Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures", *Materials and Design*, 92: 937-948.
54. Leary, M., Mazur, M., Williams, H., Yang, E., Alghamdi, A., Lozanovski, B., Zhang, X., Shidid, D., Farahbod-Sternahl, L., Witt, G., Kelbassa, I., Choong, P., Qian, M., Brandt, M. 2018. "Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes", *Materials & Design*, 157: 179-199.
55. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J. 2017. "Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials & Design*, 131: 112-120.
56. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., Hague, R. J. M. 2016. "A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science & EngineeringA*, 670: 264-274.
57. Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., Ponnusamy, P. 2018. "Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded



- F2BCC lattice fabricated”, *Materials & Design*, 144: 32-44.
58. Bai, L., Zhang, J., Chen, X., Yi, C., Chen, R., Zhang, Z. 2018. “Configuration optimization design of Ti6Al4V lattice structure formed by SLM”, *Materials*, 11 (10): 1856.
  59. Lakes, R. 1987. “Foam structures with a negative poisson’s ratio”, *Science*, 235 (4792): 1038-1040.
  60. Schwerdtfeger, J., Heinel, P., Singer, R. F., Körner, C. 2010. “Auxetic cellular structures through selective electron-beam melting”, *Physica Status Solidi B*, 247 (2): 269–272.
  61. Schwerdtfeger, J., Schury, F., Stingl, M., Wein, F., Singer, R. F., Körner, C. 2012. “Mechanical characterisation of a periodic auxetic structure produced by SEBM”, *Physica Status Solidi B*, 249 (7): 1347-1352.
  62. Hou, W., Yang, X., Zhang, W., Xia, Y. 2018. “Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material”, *International Journal of Crashworthiness*, 23(4): 366-376.
  63. Ren, D., Li, S., Wang, H., Hou, W., Hao, Y., Jin, W., Yang, R., Devesh, R., Misra, K., Murr, L. E. 2019. “Fatigue behavior of Ti-6Al-4V cellular structures fabricated by additive manufacturing technique”, *Journal of Materials Science & Technology*, 35: 285-294.
  64. Hrabe, N. W., Heinel, P., Flinn, B., Körner, C., Bordia, R. K. 2011. “Compression-compression fatigue of selective electron beam melted cellular titanium (Ti-6Al-4V)”, *Journal of Biomedical Materials Research, Part B, Applied Biomaterials*, 99 (2): 313–320.
  65. Yavari, S. A., Wauthle, R., Van Der Stok, J., Riemsdag, A. C., Janssen, M., Mulier, M., Kruth, J. P., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. 2013. “Fatigue behavior of porous biomaterials manufactured using selective laser melting”, *Materials Science and Engineering C*, 33: 4849-4858.
  66. Dallago, M., Fontanari, V., Torresani, E., Leoni, M., Pederzoli, C., Potrich, C., Benedetti, M., 2018. “Fatigue and biological properties of Ti-6Al-4V ELI cellular structures with variously arranged cubic cells made by selective laser melting”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 78: 381-394.
  67. Jamshidinia, M., Wang, L., Tong, W., Ajlouni, R., Kovacevic, R. 2015. “Fatigue properties of a dental implant produced by electron beam melting (EBM)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 226: 255-263.
  68. Li, S. J., Murr, L. E., Cheng, X. Y., Zhang, Z. B., Hao, Y. L., Yang, R., Medina, F., Wicker, R. B. 2012. “Compression fatigue behavior of Ti-6Al-4V mesh arrays fabricated by electron beam melting”, *Acta Materialia*, 60 (3): 793-802.
  69. Lhuissier, P., de Formanoir, C., Martin, G., Dendievel, R., Godet, S. 2016. “Geometrical control of lattice structures produced by EBM through chemical etching: Investigations at the scale of individual struts”, *Materials & Design*, 110: 485-493.
  70. Hooreweder, B. V., Kruth, J-P. 2017. “Advanced fatigue analysis of metal lattice structures produced by selective laser melting”, *CIRP Annals* 66 (1): 221–224.
  71. Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S. 2016. “Numerical simulation of the fatigue behavior of additive manufactured titanium porous lattice structures”, *Materials Science and Engineering C*, 60: 339-347.
  72. Zargarian, A., Esfahanian, M., Kadkhodapour, J., Ziaei-Rad, S., Zamani, D. 2019. “On the fatigue behavior of additive manufactured lattice structures”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 100: 225232.
  73. Yavari, S. A., Ahmadi, S. M., Wauthle, R., Pouran, B., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. 2015. “Relationship between unit cell type and porosity and the fatigue behavior of selective laser melted meta-biomaterials”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 43: 91-100.
  74. Bobbert, F. S. L., Lietaert, K., Eftekhari, A. A., Pouran, B., Ahmadi, S. M., Weinans, H., Zadpoor, A. A. 2017. “Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties”, *Acta Biomaterialia*, 53: 572-584.
  75. Zhao, S., Li, S. J., Hou, W. T., Hao, Y. L., Yang, R., Misra, R. D. K. 2016. “The influence of cell morphology on the compressive fatigue behavior of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 59: 251-264
  76. de Formanoir, C., Suard, M., Dendievel, R., Martin, G., Godet, S. 2016. “Improving the mechanical efficiency of electron beam melted titanium lattice structures by chemical etching”, *Additive Manufacturing*, 11: 71-76.
  77. Pyka, G., Burakowski, A., Kerckhofs, G., Moesen, M., Van Bael, S., Schrooten, J., Wevers, M. 2012. “Surface modification of

- Ti6Al4V open porous structures produced by additive manufacturing”, *Advanced Engineering Materials*, 14 (6): 363-370.
78. Yuan, L., Ding, S., Wen, C. 2019. “Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review”, *Bioactive Materials*, 4: 56-70.
  79. Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., Brandt, M. 2017. “Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM)”, *Laser Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies, and Applications*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 119-161.
  80. Niendorf, T., Brenne, F., Schaper, M. 2014. “Lattice structures manufactured by SLM: on the effect of geometrical dimensions on microstructure evolution during processing”, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45(4), 1181-1185.
  81. Yan, X., Lupoi, R., Wu, H., Ma, W., Liu, M., O’Donnell, G., Yin, S. 2019. “Effect of hot isostatic pressing (HIP) treatment on the compressive properties of Ti6Al4V lattice structure fabricated by selective laser melting”, *Materials Letters*, 255: 126537.
  82. Tan, X. P., Tan, Y. J., Chow, C. S. L., Tor, S. B., Yeong, W. Y. 2017. “Metallic powder-bed based 3D printing of cellular scaffolds for orthopaedic implants: a state-of-the-art review on manufacturing, topological design, mechanical properties and biocompatibility”, *Material Science and Engineering C*, 76: 1328-1343.
  83. Murr, L., Gaytan, S., Medina, F., Martinez, E., Martinez, J., Hernandez, D., Machado, B., Ramirez, D., Wicker, R. 2010. “Characterization of Ti-6Al-4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting”, *Material Science and Engineering A*, 527: 1861-1868.
  84. Liu, M., Takata, N., Suzuki, A., Kobashi, M. 2020. “Development of gradient microstructure in the lattice structure of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting”, *Journal of Materials Science & Technology*, 36: 106-117.
  85. Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y. F. 2017. “A survey of modeling of lattice structures fabricated by additive manufacturing”, *Journal of Mechanical Design*, 139(10): 100906.
  86. Mahmoud, D., Elbestawi, M. 2017. “Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1 (2): 13.