

Orhan Gülcan* General Electric Aviation
Gebze / Kocaeli**Makale Bilgisi:**

Derleme Makalesi

Gönderilme: 19-11-2020

Kabul: 26-04-2021

*Sorumlu yazar: Orhan Gülcan
E-mail: ogulcan1981@gmail.com

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapılar

Kafes yapılar, bir veya daha fazla tekrar eden birim hücreden oluşan, üç boyutlu yapılardır. Her bir hücre, içerisinde düğüm noktalarından birbirine bağlanan dikmelerden oluşur. Eklemeli imalat konusunda son yıllarda meydana gelen gelişmeler neticesinde, kafes yapılar üzerinde yapılan çalışmalar da artmış ve kafes yapıların havacılık, otomotiv, spor ve biyomedikal sanayi gibi farklı alanlarda uygulanması üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Bu çalışmada, eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların uygulama alanları, çeşitleri, seçim kriterleri ve tasarım ile üretim arasında çıkan farklardan bahsedilecek ve ileriki çalışmalar konusunda detaylı bilgiler verilecektir.

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

GİRİŞ

Kafes (lattice) yapılar, bir veya daha fazla tekrar eden birim hücreden oluşan, üç boyutlu yapılardır. Her bir hücre, içerisinde düğüm noktalarından birbirine bağlanan dikmelerden oluşur [1]. Bu yapılar literatürde, hücresel katı yapılar, hücresel metaller, hücresel köpük yapılar, kafes dizisi yapılar, gözenekli yapılar ya da iskele yapılar şeklinde isimlendirilebilmektedir [2]. Kafes yapılar, katı yekpare yapılara göre daha yüksek enerji absorbe edebilme, ses izolasyonu ve ısı yönetim kabiliyetlerinden dolayı mühendislik ve biyomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [3]. Havacılık, otomotiv, spor ve biyomedikal sanayide hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanılma zorunluluğu, araştırmacıları geometrik parametrelerinde yapacakları değişikliklerle mekanik özelliklerini istedikleri gibi değiştirebilecekleri kafes yapıları kullanmaya yöneltmiştir [4].

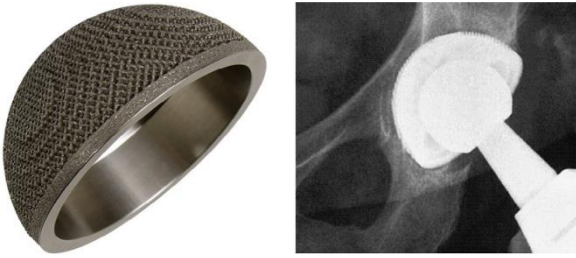
Kafes yapılar farklı üretim yöntemleri ile üretilebiliyor iken, özellikle son yıllarda büyük bir ivme kazanan eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve bu sayede, üretilecek parçaların mekanik, ısıl, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilebilirliği denenmiştir [5]. Eklemeli imalat konusunda yapılan çalışmaların ve farkındalığın son yıllarda artması ile birlikte, kafes yapılara olan ilgi de artmıştır. Bunun dört sebebi olduğu düşünülmektedir [6];

- ✓ Üretilecek parça için daha az malzeme kullanılacak olması
- ✓ Üretilecek parça için daha az üretim zamanı harcanacak olması
- ✓ Üretilecek parça için daha az enerji harcanacak olması
- ✓ İstenilen dayanım değerini sağlayacak en optimum ağırlık değerinin elde edilebilecek olması

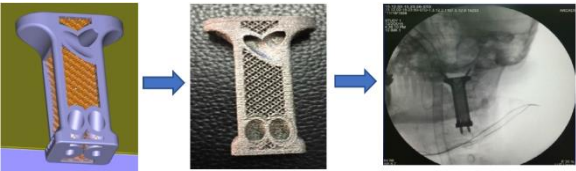
Havacılıkta kafes yapılar, yüksek dayanım/ağırlık oranından ve ısıl iletim özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [7]. Örneğin, literatürde, kanat hücum kenarlarında, buzlanma önleyici sistemin entegre edildiği kafes yapıların kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kuş çarpmaları en çok kanat hücum kenarlarında görüldüğü için [8, 9], bu bölgede kullanılan kafes yapılar sayesinde muhtemel bir kuş çarpması sırasında daha fazla enerji absorbe edileceğinden dolayı daha az hasarın oluşacağı belirtilmiştir [10]. Uzay araçlarındaki elektriksel cihazların sıcaklıklarını belirli bir seviyede tutmak için kullanılan faz değiştirici ısı kontrol ediciler, AISi10Mg toz malzeme ve seçici lazer eritme (SLE) (selective laser melting) yöntemi ile üretilmiş ve konvansiyonel yöntemlere göre % 60 hafiflik ve % 50 ısıl kapasite artışı elde edilmiştir [11]. Eşkenar dörtgen kafes yapıların ısı transfer performanslarının yüksek olduğu ve CPU (Central Process Unit – Merkezi İşlem Birimi) ve RAM'larda (Random Access Memory – Rasgele

Erişim Hafıza) kullanılabileceği literatürde belirtilmiştir [12].

Bunların haricinde kafes yapıların günümüzde en çok kullanım fırsatı bulduğu alan biyomedikal sanayidir. 2022 yılında cirosu 116 milyar dolar olması beklenen biyomedikal sanayide, kafes yapılar yüksek yüzey alanı/hacim oranlarından dolayı tercih edilmektedir [13]. Bu özellikleri sayesinde kemik entegrasyonuna uyumlu olacak şekilde rijitliğe ve içerisinde hücre büyümesi ve besin taşınmasına izin verecek şekilde gözenekli yapıya sahip yapay kemikler üretilebilmektedir [14, 15]. Özellikle yüksek özgül dayanım, oksidasyon direnci, yorulma dayanımı, düşük yoğunluk, düşük x-ray emme oranı ve yüksek biyolojik uyumluluk özelliklerinden dolayı Ti6Al4V kafes yapılar eklem protezlerinde tercih edilmektedir (Şekil 1) [16] (Şekil 2) [17].



Şekil 1. Kafes yapı ve elektron ışınıyla ergitme (EIE) (electron beam melting) yöntemi kullanılarak Ti6Al4V malzemeden üretilen trabeküler kemik ucu [18]



Şekil 2. Seçici elektron ışınıyla ergitme yöntemiyle (SEIE) üretilen, % 80 gözenekliliğe sahip Ti6Al4V boyun implantı. İmplant 2015 yılında Chinese PLA General Hospital'da hastaya başarılı bir şekilde uygulanmış ve sonrasında biyolojik olarak herhangi bir uyumsuzluk gözlemlenmemiştir [17].

Kemik ve metallerin mekanik özellikleri çok farklıdır. İnsan kemiğinin elastiklik modülü, farklı bölgelerinde farklılık göstermesi ile birlikte, 0.02-40 GPa arasındadır. Bu değer eklemeli imalatla kullanılan metal malzemelerin birçoğunun elastiklik modülünden çok düşüktür (Üretim yöntemine ve kullanılan parametrelere göre farklılık göstermesine rağmen genel olarak Ti6Al4V: 110-120 GPa, Co-Cr: 190-210 GPa, AISI 316L paslanmaz çelik: 210-250 GPa) [19]. Elastiklik modüldeki bu farklılık, metal malzeme ile üretilen implantların vücuda entegrasyonunu zorlaştırmaktadır. Kafes yapılar sayesinde elastiklik modülü kemiğin elastiklik modülüne yakın implantlar eklemeli imalat yardımıyla

üretilebilmektedir [19]. İmplantlarda, kemiklerdeki elastiklik modülüne yakın değerler elde edebilmek için, gözenekliliğin kademeli olarak değiştiği kafes yapılar üretilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [20]. Klinik uygulamaları için Li ve ark. EIE yöntemiyle, bal peteği kafes yapısında Ti6Al4V numuneler üretmişlerdir. Yapılan basma testleri sonucunda, % 66.3 göreceli yoğunlukta, parçaların akma dayanımı 73 ± 8 MPa, kopma dayanımı 116 ± 10 MPa ve elastiklik modülü 2.5 ± 0.5 GPa olarak çıkmıştır. Yazarlar, üretilen parçaların elastiklik modülünün insan kemiğinkine yakın olduğunu ve dayanımının yüksek olmasından dolayı implant uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir [21]. Dumas ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri farklı göreceli yoğunlukta (% 20, 42, 60) Ti6Al4V elmas kafes yapıların elastiklik modüllerinin sırasıyla 1.6, 7.6 ve 20.3 GPa olduğunu, akma dayanımlarının ise 23, 90 ve 181 MPa olduğunu ve % 42 göreceli yoğunluktan elde edilen değerlerin kemik yapısına en uygun olduğunu belirtmişlerdir [22].

Kafes yapılar, karmaşık geometrilere sahip yapılar olduğu için üç boyutlu modellenmesi zordur ve bu amaçla Mathmod, +CAD, Autodesk Within Medica (Autodesk, Inc., USA), Materialise Magics (Materialise NV), nTopology Element (nTopology, Inc., USA) ve Simpleware CAD (Simpleware, Exeter, UK) gibi programlar kullanılmaktadır [23, 6]. Ayrıca kafes yapıların kullanılacağı tasarımların / ürünlerin yüklenme durumlarına göre topoloji optimizasyonu yapılması ihtiyacı ortaya çıkabilir ve optimizasyon sonucunda tasarımların / ürünlerin farklı bölgelerinde farklı yoğunluğa sahip kafes yapılar kullanılmak istenebilir. Rhino (Rhinoceros 3D), 3-Matic (Materialise), Simpleware (Synopsis), Within (Autodesk) ve Optistruct (Altair) yazılımları kafes yapıların topoloji optimizasyonunda literatürde kullanılan yazılımlardır [24]. Kafes yapılarıdaki topoloji optimizasyonuna örnek olarak; Salonitis ve ark. genetik algoritma kullanarak kafes yapıların başarılı bir şekilde optimize edilebildiğini göstermişler ve % 13.5 ağırlık azalışı elde etmişlerdir [25].

Literatür incelendiğinde kafes yapıların eklemeli imalat yöntemlerinden daha çok SLE ve EIE yöntemleri ile üretildiği görülmüştür. Bunların haricinde bağlayıcı püskürtme yöntemiyle de literatürde kafes yapılar üretilmiş ama elde edilen elastiklik modül değerleri düşük çıkmıştır [26].

KAFES YAPI ÇEŞİTLERİ

Kafes yapılar, birim hücrenin düzenli ya da düzensiz tekrarına göre periyodik ya da stokastik kafes yapılar olarak isimlendirilebilmektedir [27]. Literatürde bu dizilimlerin kafes yapının mekanik özellikleri etkilediği belirtilmiş olmasına rağmen, elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir; örneğin

Luxner ve ark. [28] stokastik kafes yapıların mekanik özelliklerinin yüksek olduğunu söylerken, Rehme [29] stokastik kafes yapılarda, bazı köşe ve kenarlarda daha az birim hücre duvarı olduğu için, bu bölgelerdeki bağlantıların zayıflığından dolayı, periyodik kafes yapıların mekanik özelliklerinin daha iyi olduğunu belirtmiştir.

Kafes yapılar mekanik davranışlarına göre ise uzama-baskın (stretch dominated, daha çok eksenel yüklere maruz kalan) ve eğilme-baskın (bending nominated, daha çok eğilme yüklerine maruz kalan) kafes yapılar olarak ikiye ayrılır. Çoğu durumda, açık hücreli ya da stokastik kafes yapılar eğilme-baskın davranış gösterirken, kapalı hücreli ya da bazen açık hücreli kafes yapılar uzama-baskın davranış gösterir [27].

Kafes yapılar sahip oldukları şekillere göre ise üç farklı kategoride değerlendirilebilir; dikme-tabanlı kafes yapılar, üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapılar ve kabuk kafes yapılar [7].

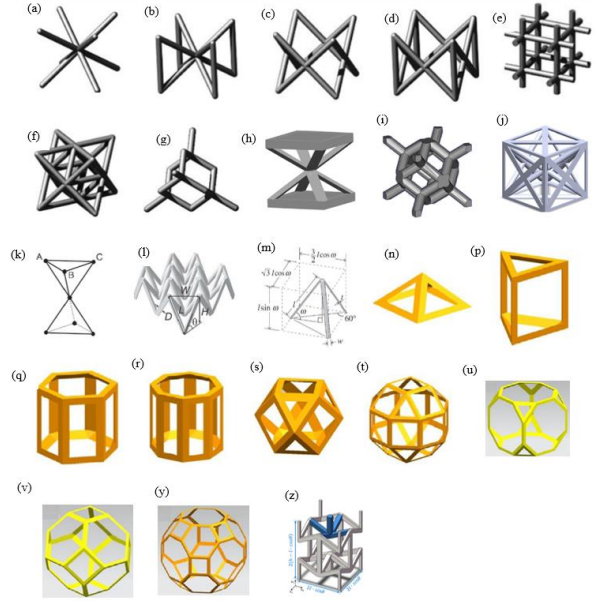
Dikme Tabanlı (Strut-Based) Kafes Yapılar

Şekil 3'te görüldüğü gibi farklı dikme-tabanlı kafes yapılar mevcuttur fakat bunların arasında en çok kullanılanları hacim merkezli kübik (hmk) ve yüzey merkezli kübik (ymk) ve bunlara ara dikmeler ilave edilerek oluşturulan dikme ilaveli hacim merkezli kübik (hmkd) ve dikme ilaveli yüzey merkezli kübik (ymkd) kafes yapılarıdır [7]. Literatür detaylı incelendiğinde farklı çalışmalarda, yaklaşık 40 civarında farklı kafes yapıların kullanıldığı ama bunların bir çoğunun diğerlerinden türetilen yapılar olduğu görülmektedir [6].

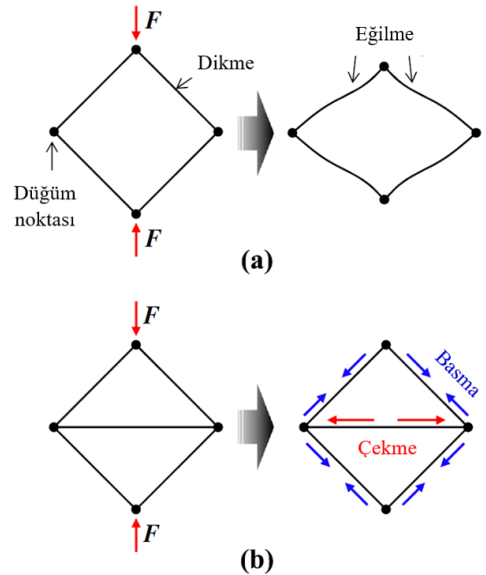
Dikme-tabanlı kafes yapılarda Maxwell sayısı çok önemlidir ve Denklem 1 yardımıyla bulunur;

$$M = s - 3n + 6 \quad (1)$$

Bu denklemde s , dikme sayısını, n ise düğüm sayısını göstermektedir. Eğer $M < 0$ olur ise, dış yükleri dengeleyecek miktarda dikme olmadığı için dikmelerde bükme gerilmeleri oluşur. Bu yapılar eğilme-baskın davranış gösterir. $M > 0$ olur ise, dikmeler, üzerlerinde oluşan basma ve çekme yükleri sayesinde dış yükleri dengeleyebildikleri için, düğüm noktalarında eğilme oluşmaz. Bu yapılar ise uzama-baskın davranış gösterir (Şekil 4) [30]. Kafes yapılara dikey yönde dikmeler eklendiği zaman dikey yönde dayanım ve sertlik artacağı için malzeme uzama-baskın davranış gösterir [31]. Farklı dikme-tabanlı kafes yapılar için elde edilen Maxwell sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir [32]. Bazı kafes yapılar ve ilgili deformasyon yapıları ise Tablo 2'de gösterilmiştir.






Şekil 3. Dikme-tabanlı kiriş yapıları; a) hmk [7], b) hmkd [7], c) ymk [7], d) ymkd [7], e) kübik [7], f) sekizli kafes yapı [7], g) elmas [7], h) G7 [33], (i) eşkenar dörtgen yüzeyli, oniki yüzlü şekil [33], (j) ymk-hmk [34], (k) 3 boyutlu Kagome [6], (l) piramid [6], (m) dört yüzlü yapı [6], (n) kare piramid [35], (p) üçgen prizma [35], (q) altıgen prizma [35], (r) sekizgen prizma [35], (s) sekiz yüzlü küp [35], (t) eşkenar dörtgen yüzeyli, sekiz yüzlü küp [35], (u) kesilmiş küp [35], (v) kesilmiş sekiz yüzlü [35], (y) kesilmiş sekiz yüzlü küp [35], (z) auxetic kafes yapı [36].



Şekil 4. Eğilme-baskın yapılar, $M < 0$ (a) ve uzama-baskın yapılar, $M > 0$ (b) [37]

Tablo 1. Farklı kafes yapıları için Maxwell sayıları. hmkd: Ekstra dikmeli hacim yüzey merkezli kübik, hmkxyz: X, Y ve Z yönlerinde ilave dikmeler olan hacim yüzey merkezli kübik [32].

Hücre Tipi	s	n	M	Dikmeler yük uygulama yönünde mi?
hmk 	8	9	-13	Hayır
ymkd 	20	12	-10	Evet
hymkd 	28	13	-5	Evet
hmkxyz 	44	15	5	Evet
hmkd 	12	9	-9	Evet
ymk 	16	12	-14	Hayır







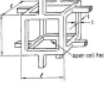

Üçlü Periyodik Minimum Yüzey (Triply Periodic Minimum Surface) (ÜPMY) Kafes Yapılar

Bu kafes yapılar, Tablo 3'te gösterilen matematiksel formüllerden elde edilen yüzeyler kullanılarak oluşturulan, kıvrımlı labirent şeklindeki kafes yapılarıdır. Bu yapılarıdaki yüzeylerin eğimli olması, eklemeli imalat sırasında bir önceki katmanın bir sonraki katmana destek olmasına yol açtığı için, çoğu zaman ilave desteğe ihtiyaç duyulmadan üretilmesine imkan verir [7].

ÜPMY ilk kez 1856 yılında Schwarz tarafından incelenmiştir. Ortaya çıkardığı yüzeyleri D-yüzey ve P-yüzey olarak ifade etmiştir. Schwarz'ın öğrencisi Neovius çalışmayı daha da ilerleterek C(P)-yüzey adını verdiği yüzeyi elde etmiştir. 1960'lı yıllarda Schoen, IWP, FRD, OCTO, C(D) ve G (Gyroid) adını verdiği yüzeyler elde etmiştir. 1987 yılında Fischer ve Koch yaptıkları uzun çalışmalarından sonra yeni ÜPMY yüzeyler elde etmişlerdir ve bunları S, C(Y), #Y,

C(#Y), C(P)/H, C(D)/H ve C(Y)/H kodları ile kodlamıştır. 1990 yılında ise bu sefer Gozdz ve Holyst iki yeni ÜPMY yüzey keşfetmişlerdir ve bunları BFY (Butterfly – Kelebek) ve CPD olarak adlandırmıştır (Şekil 5) [38].

Tablo 2. Bazı kafes yapılar ve deformasyon tipleri [39]

Kafes Şekli	Deformasyon Tipi	Şekil
Dört yüzlü cisim	Uzama-baskın	
Altı yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
Oniki yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
Eşkenar dörtgen yüzeyli, Oniki yüzlü şekil	Eğilme-baskın	
İkosahedron	Uzama-baskın	
Tetrakaidekah edron (14 yüzlü cisim)	Eğilme-baskın	
Basit köpük model	Eğilme-baskın	
Sekizli dikme yapı	Uzama-baskın	

ÜPMY'in enerji absorbe edebilme özellikleri literatürde incelenmiş ve mevcut durumda uzay araçlarında kullanılan bal peteği yapısının yerine kullanılabileceği yorumu yapılmıştır [40]. ÜPMY'ler arasında Primitif yapılar uzama baskın, elmas ve gyroid yapılar eğilme baskın davranış gösterir. Primitif yapıların elastiklik modülü ve basma dayanımı elmas ve gyroidten fazladır. Dolayısıyla yüksek dayanım gerektiren yapılarda, yüklenme yönünde primitif kafes yapılar tavsiye edilirken, parçanın deformasyondan önce yüksek gerinim

göstermesinin istendiği yapılarda, elmas veya gyroid kafes yapılar tavsiye edilmektedir [41].

ÜPMY kafes yapılarıdaki yüzeyler aynı zamanda dikme olarak da modellenip kullanılabilir. Bu kapsamda yapılan çalışmalara bir örnek olarak Al-Ketan ve ark.'nın yaptığı çalışma verilebilir. Yazarlar, yağlayıcı çelik malzemeden SLE yöntemiyle ürettikleri dikme tabanlı, yüzey ÜPMY ve iskelet ÜPMY kafes yapıları üzerine yaptıkları çalışmada, yüzey ÜPMY kafes yapılarının diğerlerine

Kabuk Kafes (Shell Lattice) Yapılar

Kabuk kafes yapıları (Şekil 6), birim hücrede dikmelerin yerine plakaların olduğu yapılardır. Bu yapıların elastiklik özellikleri aynı yoğunluğa sahip dikme tabanlı kafes yapılara göre daha iyidir ama eklemeli imalat sonrası tozların temizlenmesinde kabuk kafes yapılarda sıkıntı yaşanmaktadır [7].

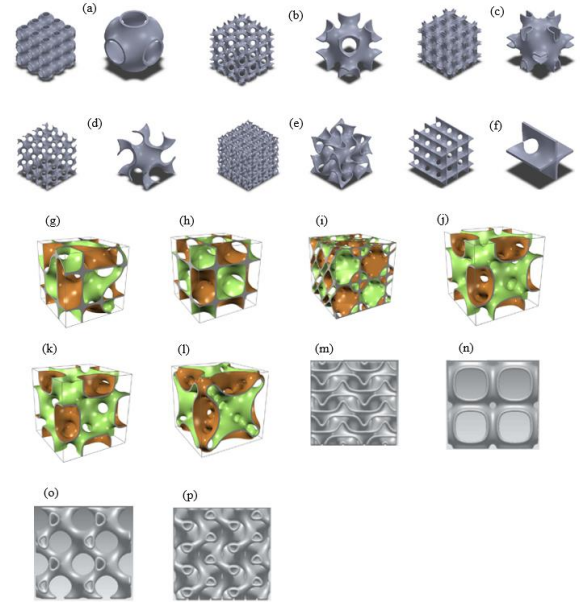
Tablo 3. Üçlü periyodik minimum yüzey formülleri [7, 40].

Şekil	Yüzey formülü
Schoen gyroid	$U = \cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) - t$
Schwarz elmas	$U = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) + \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) - t$
Schwarz primitif	$U = \cos(x) + \cos(y) + \cos(z)$
Neovius	$U = 3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4 \cos(x) \cos(y) \cos(z)$
D-prime	$U = 0.5(\sin(x) \sin(y) \sin(z) + \cos(x) \cos(y) \cos(z)) - 0.5(\cos(2x) \cos(2y) + \cos(2y) \cos(2z) + \cos(2z) \cos(2x)) - t$
$k_i = 2\pi n_i / L_i$	
k_i : x, y ve z yönündeki k değeri	
n_i : x, y ve z yönündeki, birim hücre tekrar sayısı	
L_i : x, y ve z yönündeki yapının boyutu	

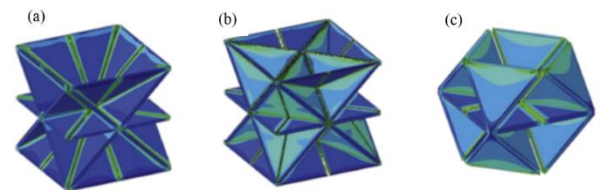
KAFES YAPI SEÇİMİ

Tasarlanacak parçalarda kullanılması düşünülen kafes yapılarının seçiminde 4 kriter göz önünde bulundurulmalıdır; morfoloji, metalurji, işleme ve ekonomi. Burada morfoloji ile kast edilen, tasarlanacak parça için istenilen gözenek yapısı, gözenek miktarı ve kafes yapının iç yüzey alanıdır. Örneğin, uçaklardaki yük taşıyan yapısal bir parça için gözenek miktarı çok az bir morfoloji istenirken (kapalı-hücre olarak adlandırılır), kemik implantları gibi elastiklik modülün düşük olmasının istendiği yerlerde ise gözenekli morfoloji (açık-hücre olarak adlandırılır) istenebilir. Metalurji ile kast edilen, tasarlanan ürünün kullanım alanlarına göre yapılan uygun malzeme seçimidir. Örneğin, yine uçaklardaki

yük taşıyan yapısal bir parça için alüminyum malzeme tercih edilebilir. Kafes yapının işlenmesi için kullanılacak teknoloji ve bu teknolojiye ait kısıtlar ile ortaya çıkan masrafın, geleneksel yöntemlerle yapılacak üretim masrafına göre farkı da kafes yapıların seçiminde dikkat edilmesi gereken diğer unsurlardır [27, 45]. Rehme, farklı uygulama alanlarına göre seçilebilecek kafes yapıları Şekil 7'deki gibi belirtmiştir [29].



Şekil 5. ÜPMY kafes yapıları; (a) Primitif [43], (b) IWP [43], (c) Neovius [43], (d) Gyroid [43], (e) Fischer-Koch S [43], (f) CLP [43], (g) C(Y) [44], (h) Elmas [44], (i) C(D) [44], (j) Batwing [44], (k) F-RD [44], (l) Manta 35 [44], (m) L-tipi [6], (n) Boru şeklinde P-tipi [6], (o) Boru şeklinde G-tipi [6], (p) I2-Y-tipi [6].

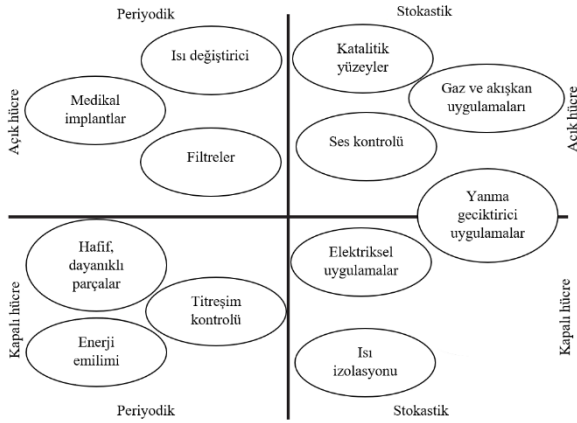


Şekil 6. Kabuk kafes yapıları; a) hmk, b) hmk-ymk, c) ymk [7].

TASARIM VE ÜRETİM ARASINDAKİ FARKLAR

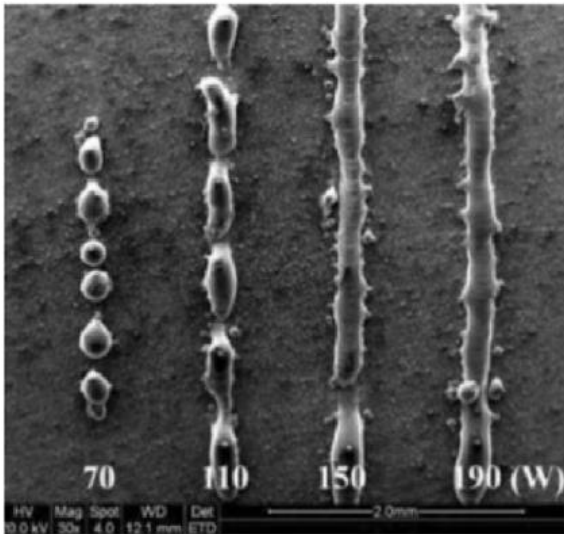
Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıları, CAD modeli ile bir miktar uyumsuz olabilmektedir. Bunun muhtemel sebepleri şunlardır; (1) uygun olmayan tarama aralığı, lazer nokta boyutunu karşılamazsa, SLE sırasında oluşan ergiyik havuzu istenilen kesit alanından farklı olmaktadır, (2) katman katman üretimden dolayı meydana gelen merdiven etkisi hem yüzey pürüzlülüğünü etkilemekte hem de istenilenden daha farklı üretilere sebep olmaktadır, (3) sarkan

yüzeylerde görülen ergiyik havuzunun genişlemesi ve sarkması sonucu etraftaki tozların yapışması yüzeyde dalgalanma ve boyutsal uyumsuzluklara sebep olmaktadır [46].



Şekil 7. Uygulama alanlarına göre kafes yapı seçimi [29].

Kafes yapıların eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesinde, tasarım ve üretim arasındaki farkın en önemli sebeplerinden birisi topaklanma (sıvı malzemenin, altında bulunan yapıyı, yüzey geriliminden dolayı yeteri kadar ıslatamaması ve bundan dolayı sıvı malzemenin yuvarlaklaşması) adı verilen olaydır (Şekil 8) [47]. SLE yönteminde, özellikle yüksek tarama hızlarında ya da düşük lazer gücünde, lazerin enerji yoğunluğu düşer ve daha az çalışma sıcaklığı ortaya çıkar, bunun sonucunda da ergimemiş toz metal tanecikleri istenmeyen şekilde X-Y düzlemi üzerinde gelişigüzel saçılır [48].



Şekil 8. SLE ile üretilen AISI 316L paslanmaz çelik malzemede, düşük lazer gücünde meydana gelen topaklanma etkisi [47]

Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılarda, üretilen parça ile CAD verisi arasında farkların oluştuğu literatürde yapılan farklı çalışmalarda belirtilmiştir. Dallago ve ark. kafes yapıların eklemeli imalat yöntemiyle üretilmesi sırasında üretilen parça ile tasarlanan parça arasında farklılıkların oluşabileceğini (dikme kalınlığındaki farklılıklar, dikmenin dalgalı şekilde çıkması, düğüm noktalarındaki kaçıklık, bazı dikmelerin üretilmemiş olması) ve bu farklılıkların üretilen parçanın elastiklik modülünü azaltacağını belirtmişlerdir [49]. Bartolomeu ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarda bu farklılığı, toz tanecik büyüklüğündeki farklılara ve ergiyik havuzundan çevredeki tozlara doğru oluşan ısı transferine bağlamışlardır [50, 51]. Ran ve ark. ise Ti6Al4V kafes yapılarda, tasarımda eklenen 500, 700 ve 900 µm çaplarındaki gözeneklerin, üretimden sonra 401, 607 ve 801 µm olarak çıktığını, bunun sebebinin ise toz ile katı parça arasındaki ısı transferinden dolayı tozların yüzeye yapışması olduğunu belirtmişlerdir [52]. Yan ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri farklı hacim oranlarında (% 6, 8, 10 ve 12) AISI 316L paslanmaz çelik gyroid kafes yapılarını inceledikleri çalışmada, üretilen kafes yapılardaki dikme boyutlarının, tasarlanandan yüksek çıktığını, dolayısıyla hacim oranının da tasarlanandan yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Sırasıyla % 6, 8, 10 ve 12 hacim oranları için, tasarlanan dikme boyutları 0.50, 0.70, 0.86 ve 1.01 mm iken, üretimden çıkan dikme boyutları 0.42, 0.61, 0.79 ve 0.92 mm olmuştur. Bunun sonucunda da tasarlanan % 6, 8, 10 ve 12 hacim oranları, sırasıyla % 6.51, %8.75, %10.66 ve %13.12 çıkmıştır. Yazarlar bunun sebebinin tam ergimemiş tozların dikmelere yapışarak dikme boyutunu arttırmalarına bağlamışlardır [53]. Choy ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kübik ve balpeteği kafes yapılarında, dikmelerin alt yüzeylerinde ergimemiş tozların yapışmasından dolayı tasarlanan dikme çaplarından daha yüksek çaplarla karşılaşıldığı, bu durumun yatak dikmelerin alt yüzeylerinde daha ciddi boyutlarda görüldüğü belirtilmiştir [54]. Benzer bir bulgu ve yorum SLE yöntemiyle üretilen AlSi12Mg beş farklı kafes yapısının (hmk, ymk, hmkd, ymkd, hymkd) incelendiği bir çalışmada da belirtilmiştir [55].

Lokal ergime ve yarı ergimemiş tozların yapışması ile, kafes yapılardaki dikmelerin tasarlanan ve üretilen halleri arasında farkların oluşabileceği ve bu farkların kafes yapının inşa yönünden etkilendiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. İnşa yönüne göre yatay olan dikmelerde bu farkların en çok, dikey olan dikmelerde ise en az olduğu belirtilmiştir [56].

Kafes yapılardaki üretim ve tasarım arasındaki farkların azaltılması için dikme boyutlarının değişimi literatürde incelenmiştir. Van Grunsven ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V elmas kafes yapılarda

dikme çaplarının artması ile tasarlanan ve üretilen dikmeler arasındaki farkın azalacağını, bunun sebebinin ise düşük çaplardaki dikmelerin üretiminde, lazer hızı ve lazer akımı gibi enerji parametrelerinin, parçanın gerçek şeklini oluşturmada CAD verisinden daha etkili olduğu ve bu parametrelerin ayarlanmasının zorluğu olduğunu belirtmişlerdir [57]. Hernández-Nava ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kübik kafes yapılarında, dikme çapları 0.6 mm ve daha küçük olduğunda, üretilen parçaların dikme çaplarının daha büyük geldiğini, dikme çapları 0.6'dan büyük olduğunda ise, üretilen parçaların dikme çaplarının daha küçük geldiğini, tasarım yaparken buna dikkat edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [58, 59]. Kafes yapılarında, üretim tezgahına göre paralel olan dikmeler daha fazla toz ergimesinden dolayı genelde üretimden sonra, tasarımdaki kalınlıklarından daha fazla gelmektedir, dikmelerin üretim tezgahına göre açısı arttıkça, toz ergimesi azalmakta ve dikmelerin çapları tasarıma göre daha az çıkmaktadır. Tasarım ve üretim arasındaki bu farkı azaltmak için Bagheri ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarında, dikme kalınlıklarını aşağıdaki formüle göre belli miktarda arttırmışlardır. Yazarlar, bu şekilde tasarım ve üretim arasındaki % 60'lık farkın % 3.1'e düşürüldüğünü belirtmişlerdir [60].

$$t_c(\theta) = (1 - E(\theta, t_d))t_d, \quad t_c > 60\mu m \quad (2)$$

$$t_c(\theta) = 60\mu m, \quad t_c \leq 60\mu m \quad (3)$$

$$E(\theta, t_d) = \frac{(t_d - t_m)}{t_d} \quad (4)$$

Bu formüllerde $E(\theta, t_d)$, üretilen dikmenin belli bir açıda (θ) ve tasarlanan dikme kalınlığında (t_d), tasarıma göre göreceli hatasıdır. t_c , belli bir açıda (θ) tasarımda uygulanması gereken dikme kalınlığı ve t_m ise üretilen kafes yapıdaki dikme kalınlığıdır [60].

Bahsedilen bu üretim ve tasarım farklılıkları hem tasarlanan parçanın istenilen fonksiyonu yapmasında eksikliklere yol açabilmekte hem de yapılan analizlerin doğrulanmasını gerektirmektedir. Literatürde bunun için, kafes yapılara özel farklı tasarım ve analiz çözümleri önerilmiştir;

- ✓ Kafes yapılarında dikmelerin yerleşim açısı 30°'den küçük olmamalı aksi halde distorsiyon meydana gelmektedir [53].
- ✓ Kafes yapılarıdaki et kalınlığı 300 μm 'den küçük olmamalıdır [61].
- ✓ Ergimemiş tozların, parça üzerinde açılan deliklerden tahliyesi için, kübik ya da sekiz dikmeli gibi sık kullanılan kafes yapılarında hacim oranı (kafes yapının hacminin toplam hacme oranı) 0.3'ü geçmemelidir [39].
- ✓ Eklemeli imalatla üretilen kafes yapılarında dikmeler çok ince olduğu için, çoğu zaman

tasarlanan CAD verisi ile üretilen parçadaki dikmeler birbirinden farklı çıkmaktadır. Bu da tasarlanan CAD verisi kullanılarak yapılan analizlerin yanlış sonuçlar vermesine yol açmaktadır. Lozanovski ve ark. bu amaçla, üretilen parçadaki dikmelerin farklı kesitlerinden bilgisayarlı tomografi ile görüntüler elde etmişler ve sonradan her bir kesitteki kesit çizgilerini birleştirerek yeni CAD verisi oluşturmuşlardır. Üretilen parçadan elde edilen CAD verisi ile yapılan analizlerin, test sonuçları ile daha uyumlu çıktığı belirtilmiştir [62].

SONUÇ

Bu çalışmada, eklemeli imalatla üretilen kafes yapılar ve çeşitleri, uygulama alanları ve bu yapıların seçiminde dikkat edilmesi gereken parametrelerden 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. Dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, makalede geçen kafes yapı özellikleri ve seçim kriterlerinin ilgili çalışmadaki prosese, kullanılan ekipmana, toz özelliklerine, malzemeye ve seçilen proses parametrelerine bağlı olduğudur.

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.
- ✓ Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların gerçek hayatta kullanımları (havacılık, biyomedikal, otomotiv vs.) sırasındaki ısıl, mekanik, fiziksel vs. davranışları hakkında yapılan araştırmalar yetersizdir.
- ✓ Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapıların bal peteği kafes yapıların yerine kullanılması literatürde araştırılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiş olmasına rağmen, proses hızının artırılması ve tüketilen enerjinin azaltılması, dolayısıyla işlemin daha yaygın kullanılabilmesi için detaylı çalışmalar yapılmalıdır [63].
- ✓ Kafes yapıların çeşitleri, üretim yöntemleri, boyutları, mikroyapıları ve mekanik özelliklerini içeren veri tabanı hazırlanması ve istenilen uygulamaya göre (havacılık,

biyomedikal vs.) uygun kafes yapının seçimi konusunda yapılacak bir çalışma, eklemeli imalatla üretilen kafes yapılar konusunda çıkarılacaktır [64].

- ✓ Kafes yapılarında yapılan simülasyonlarda, malzemenin anizotropik özelliklerinin kullanılmasını üzerine detaylı çalışmalar literatürde eksiktir [65].
- ✓ Toz yatağı füzyonu işleminde, kafes yapıların içerisinde kalan tozların tahliyesi konusunda hala sıkıntılar vardır ve bu konuda yapılan çalışmalar yetersizdir [66].

TEŞEKKÜR

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

ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Lattice structures are three-dimensional structures consisting of one or more repeating unit cells. Each cell consists of struts connected to each other from their nodal points. As a result of developments in additive manufacturing in recent years, studies on lattice structures have also increased and researches on the application of lattice structures in different industries such as aviation, automotive, sports and biomedical industries have gained speed. In this study, a detailed information about application areas, types, selection criteria and problems encountered in design and production and future studies of additively manufactured lattice structures will be 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. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V. 2015. "Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures", *Additive Manufacturing*, 5: 77-84.
3. Nakajima, H. 2007. "Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores", *Progress in Materials Science*, 52 (7): 1091-1173.
4. Dallago, M., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., Benedetti, M. 2019. "On the effect of geometrical imperfections and defects on the fatigue strength of cellular lattice structures additively manufactured via Selective Laser Melting", *International Journal of Fatigue*, 124: 348-360.
5. Rosa, F., Manzoni, S., Casati, R. 2018. "Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting", *Materials and Design*, 160: 1010-1018.
6. Helou, M., Kara, S. 2018. "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (3): 243-261.
7. 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.
8. Hedayati, R., Sadighi, M. 2015. "Bird strike, an experimental, theoretical and numerical investigation", Woodhead Publishing.
9. Gülcan, O. 2019. "Kuş çarpmaları ve uçaklara etkileri üzerine bir gözden geçirme çalışması", *Mühendis ve Makina*, 60 (696): 192-220.
10. Ferro, C. G., Varetto, S., Pasquale, G. D., Maggiore, P. 2018. "Lattice structured impact absorber with embedded anti-icing system for aircraft wings fabricated with additive SLM process", *Materials Today Communications*, 15: 185-189.
11. Zhou, H., Zhang, X., Zeng, H., Yang, H., Lei, H., Li, X., Wang, Y. 2019. "Lightweight structure of a phase-change thermal controller based on lattice cells manufactured by SLM", *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(7): 1727-1732.
12. Ho, J. Y., Leong, K. C., Wong, T. N. 2019. "Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer in porous lattice structures produced by selective laser melting", *International Journal of Thermal Sciences*, 137: 276-287.
13. Murr, L. E. 2017. "Additive manufacturing of biomedical devices: an overview", *Materials Technology: Advanced Performance Materials*, 33 (1): 57-70.
14. Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., Xie, Y. M. 2016. "Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review", *Biomaterials*, 83: 127-141.
15. Burton, H. E., Eisenstein, N. M., Lawless, B. M., Jamshidi, P., Segarra, M. A., Addison, O., Shepherd, D. E. T., Attallah, M. M., Grover, L. M., Cox, S. C. 2019. "The design of additively manufactured lattices to increase the functionality of medical implants", *Materials Science & Engineering C*, 94: 901-908.
16. Avila, J. D., Bose, S., Bandyopadhyay, A. 2018. "Additive manufacturing of titanium and titanium

- alloys for biomedical applications”, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 325-343.
17. Tang, H. P., Zhao, P., Xiang, C. S., Liu, N., Jia, L. 2018. “Ti-6Al-4V orthopedic implants made by selective electron beam melting”, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 239-249.
 18. Marin, E., Fusi, S., Pressacco, M., Paussa, L., Fedrizzi, L. 2010. “Characterization of cellular solids in Ti6Al4V for orthopaedic implant applications: Trabecular titanium”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3(5): 373-381.
 19. Alabort, E., Barba, D., Reed, R. C. 2019. “Design of metallic bone by additive manufacturing”, *Scripta Materialia*, 164: 110-114.
 20. Fousová, M., Vojtěch, D., Kubásek, J., Jablonská, E., Fojt, J. 2017. “Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 69: 368-376.
 21. Li, X., Wang, C., Zhang, W., Li, Y. 2009. “Fabrication and characterization of porous Ti-6Al-4V parts for biomedical applications using electron beam melting process”, *Materials Letters*, 63: 403-405.
 22. Dumas, M., Terriault, P., Brailovski, V. 2017. “Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials”, *Materials & Design*, 121: 383-392.
 23. 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.
 24. Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I. 2018. “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 19: 81-94.
 25. Salonitis, K., Chantzis, D., Kappatos, V. 2017. “A hybrid finite element analysis and evolutionary computation method for the design of lightweight lattice components with optimized strut diameter”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 2689-2701.
 26. Tang, Y., Zhou, Y., Hoff, T., Garon, M., Zhao, Y. F. 2016. “Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process”, *Materials Science and Technology*, 32 (7): 648-656.
 27. Hasan, R. 2013. “Progressive collapse of titanium alloy micro-lattice structures manufactured using selective laser melting”, PhD Thesis, University of Liverpool, United Kingdom.
 28. Luxner, M. H., Woesz, A., Stampfl, J., Fratzl, P., Pettermann, H. E. 2009. “A finite element study on the effects of disorder in cellular structures”, *Acta Biomaterialia*, 5 (1): 381-390.
 29. Rehme, O. 2010. “Cellular design for laser freeform fabrication”, Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany.
 30. Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Ashby, M.F. 2001. “Effective properties of the octet-truss lattice material”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49 (8): 1747-1769.
 31. Souza, J., Großmann, A., Mittelstedt, C. 2018. “Micromechanical analysis of the effective properties of lattice structures in additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 23: 53-69.
 32. 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.
 33. 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.
 34. Xu, S., Shen, J., Zhou, S., Huang, X., Xie, Y. M. 2016. “Design of lattice structures with controlled anisotropy”, *Materials and Design*, 93: 443-447.
 35. 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.
 36. Geng, L., Wu, W., Sun, L., Fang, D. 2019. “Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 157-158: 231-242.
 37. Deshpande, V.S., Ashby, M.F., Fleck, N.A. 2001. “Foam topology bending versus stretching dominated architectures”, *Acta Materialia*, 49 (6): 1035-1040.
 38. Lord, E. A., Mackay, A. L. 2003. “Periodic minimal surfaces of cubic symmetry”, *Current Science*, 85(3): 346-362.
 39. Suard, M. 2015. “Characterization and optimization of lattice structures made by electron beam melting”, PhD Thesis, Université de Grenoble Alpes, France.
 40. Sychoy, M. M., Lebedev, L. A., Dyachenko, S. V., Nefedova, L. A. 2018. “Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology”, *Acta Astronautica*, 150:81-84.

41. Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., Hague, R. J. M. 2018. "Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing", *Polymer*, 152: 62-71.
42. Al-Ketan, O., Rowshan, R., Al-Rub, R. K. A. 2018. "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials", *Additive Manufacturing*, 19: 167-183.
43. Abueidda, D. W., Al-Rub, R. K. A., Dalaq, A. S., Lee, D. -W., Khan, K. A., Jasiuk, I. 2016. "Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces", *Mechanics of Materials*, 95: 102-115.
44. Kapfer, S. C., Hyde, S. T., Mecke, K., Arns, C. H., Schroder-Turk, G. E. 2011. "Minimal surface scaffold designs for tissue engineering", *Biomaterials*, 32: 6875-6882.
45. Rashed, M. G., Ashraf, M., Mines, R. A. W., Hazell, P. J. 2016. "Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications", *Materials & Design*, 95:518-533.
46. Sing, S. L., Miao, Y., Wiria, F. E., Yeong, W. Y. 2016. "Manufacturability and mechanical testing considerations of metallic scaffolds fabricated using selective laser melting: a review", *Biomedical Science and Engineering*, 2(11): 18-24.
47. Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W. 2012 "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59: 1025-1035.
48. 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.
49. Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Pasini, D., Benedetti, M., 2018. "Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices", *Procedia Structural Integrity*, 13: 161-167.
50. Bartolomeu, F., Fonseca, J., Peixinho, N., Alves, N., Gasik, M., Silva, F. S., Miranda, G. 2019. "Predicting the output dimensions, porosity and elastic modulus of additive manufactured biomaterial structures targeting orthopedic implants", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 99: 104-117.
51. Bartolomeu, F., Dourado, N., Pereira, F., Alves, N., Miranda, G., Silva, F. S. 2020. "Additive manufactured porous biomaterials targeting orthopedic implants: A suitable combination of mechanical, physical and topological properties", *Materials Science & Engineering C*, 107: 110342.
52. Ran, Q., Yang, W., Hu, Y., Shen, X., Yu, Y., Xiang, Y., Cai, K. 2018. "Osteogenesis of 3D printed porous Ti6Al4V implants with different pore sizes", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 84: 1-11.
53. 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.
54. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J. 2017. "Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density", *Additive Manufacturing*, 16: 213-224.
55. 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.
56. Dallago, M., Raghavendra, S., Luchin, V., Zappini, G., Pasini, D., Benedetti, M. 2019. "Geometric assessment of lattice materials built via Selective Laser Melting", *Materials Today: Proceedings* 7: 353-361.
57. Van Grunsven, W., Hernandez-Nava, E., Reilly, G., Goodall, R. 2014. "Fabrication and mechanical characterisation of titanium lattices with graded porosity", *Metals* 4 (3): 401-409.
58. Hernández-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., Goodall, R. 2015. "The effect of density and feature size on mechanical properties of isostructural metallic foams produced by additive manufacturing", *Acta Materialia*, 85: 387-395.
59. Hernández-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., Goodall, R. 2016. "The effect of defects on the mechanical response of Ti-6Al-4V cubic lattice structures fabricated by electron beam melting", *Acta Materialia*, 108: 279–292.
60. Bagheri, Z. S., Melancon, D., Liu, L., Johnston, R. B., Pasini, D. 2017. "Compensation strategy to reduce geometry and mechanics mismatches in porous biomaterials built with Selective Laser Melting", *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70: 17–27.
61. Pattanayak, D. K., Fukuda, A., Matsushita, T., Takemoto, M., Fujibayashi, S., Sasaki, K., Nishida, N., Nakamura, T., Kokubo, T. 2011. "Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: Fabrication by selective laser melting and chemical treatments", *Acta Biomaterialia*, 7 (3): 1398-1406.
62. Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., Brandt, M. 2019. "Computational modelling of strut defects in

- SLM manufactured lattice structures”, *Materials and Design*, 171: 107671.
63. Mines, R.A.W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., McKown, S. T. 2013. “Drop weight impact behavior of sandwich panels with metallic micro lattice cores”, *International Journal of Impact Engineering*, 60: 120-132.
64. 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.
65. 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.
66. Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., Jeng, J-Y. 2019. “A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104 (9-12): 3489-3510.