

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 Yapıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etki Eden Faktörler

Eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri, ana malzemenin mekanik özellikleri, birim hücre ve dikme şekli ve boyutu, birim hücrenin kafes yapı içindeki dizilim şekli, dikme ve düğüm noktalarının birleşimi, dikmenin katı veya içi boş olması, ısı işlem, dikme / birim hücre oryantasyonu, inşaa yönü ve gözenek boyutu gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Havacılık ve uzay sanayii, otomotiv sanayii ve biomedikal sanayii gibi farklı alanlarda kullanımı hızla artan kafes yapıların, eklemeli imalatla üretilmesi neticesinde sahip olacağı mekanik özelliklere etki edecek faktörlerin bilinmesi, tasarım ve üretim aşamasında bu faktörlerin göz önüne alınmasını sağlayacağı için önem arz etmektedir. Bu çalışmada, eklemeli imalatla üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine etki eden parametreler ve ileriki çalışmalar konusunda detaylı bilgiler verilecektir.

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

1. 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]. 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 biomedikal uygulamalarda kullanılmaktadır [3]. Havacılık, otomotiv, spor ve biomedikal sanayide hafif ve dayanıklı malzemelerin kullanılma zorunluluğu, araştırmacıları geometrik parametrelerinde yapacakları değişikliklerle mekanik özelliklerini istedikleri gibi değiştirebilecekleri kafes yapıları kullanmaya yöneltmiştir [4].

Kafes yapıların karmaşık geometrilere sahip olması bu yapıların üretilebilirliğini zorlaştırmaktadır, ancak günümüzde eklemeli imalat (Eİ) teknolojisinde sağlanan gelişmeler, farklı kafes yapıların üretilmesine olanak sağlamıştır. Eİ, sanal ortamda üç boyutlu olarak modellenen bir tasarımın katmanlara ayrılması ve ilgili tasarımın Eİ tezgahlarında katman katman üretilmesi esasına dayanır [5]. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak Eİ, ham malzemeden talaş kaldırarak işlemeye değil, katman katman üretim esasına dayanır [6]. Eİ, tasarımcılara ve araştırmacılara, farklı kafes yapılar tasarımları ve

bunları farklı endüstriyel uygulamalarda kullanabilme olanağı sağlar [7].

Eİ ile üretime uygun parça tasarlarken, parçanın fonksiyonuna göre uygun parametrelerin seçilmesi önem arz etmektedir. Kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine etki eden faktörlerin bilinmesi, tasarımcılara, ilgili tasarımın başlangıç aşamasında, tasarımlarını bu amaçla detaylandırabilme olanağı sağlar.

2. KAFES YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

Kafes yapıların mekanik özellikleri, ana malzemenin mekanik özellikleri, birim hücre ve dikme şekli ve boyutu, birim hücrenin kafes yapı içindeki dizilim şekli, dikme ve düğüm noktalarının birleşimi, dikmenin katı veya içi boş olması, ısı işlem, dikme / birim hücre oryantasyonu, inşaa yönü ve gözenek boyutu gibi birçok parametreden etkilenmektedir [8].

2.1. Dikme Adedi ve Boyutunun Etkisi

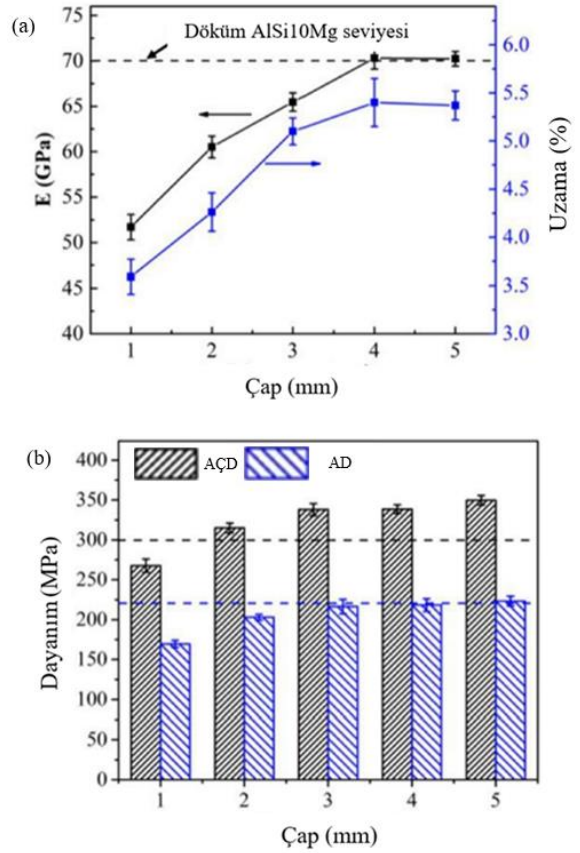
Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden birisi dikme boyutlarıdır. Kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde dikme uzunluğunun çapa oranı, dikme açısı ve birim hücre sayısının etkili olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda gösterilmiştir [9]. Hacim merkezli kübik (hmk) yapılar üzerine yapılan bir çalışmada, hmk yapıların yüksek yük taşıma kapasitesine ve enerji absorbe edebilme özelliğine sahip olduğu ve hmk yapılarda, dikme çapı, dikme

çapı-dikme uzunluğu oranı ve göreceli yoğunluk arttıkça mekanik özelliklerin arttığı, birim hücre boyutları arttıkça ise azaldığı belirtilmiştir [10].

Literatürde, dikme boyutu ve adedinin, kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi hem elektron ışınıyla ergitme (EIE) hem de seçici lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretilen kafes yapılarda araştırılmıştır. Parthasarathy ve ark. EIE yöntemi ve Ti6Al4V malzeme kullanarak ürettikleri kübik kafes yapılarda, dikme boyutları azaldığı zaman (800 μm -450 μm), üretilen ve tasarlanan kafes yapıların özellikleri arasındaki farkın arttığını, hemen hemen aynı gözenekliliğe sahip (% 49.75 ve % 50.75) kafes yapılarda ise dikme boyutlarındaki azalma ile basma sertliğinin 2.92 GPa'dan 0.57 GPa'a, basma dayanımının ise 163.02 MPa'dan 7.28 MPa'a düştüğü belirtilmiştir [11, 12]. Schwerdtfeger ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V auxetic kafes yapılarda, göreceli yoğunluğun, dolayısıyla dikme çaplarının artması ile malzemenin negatif Poisson özelliğinin azaldığını belirtmişlerdir [13]. Warmuth ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarında, dikme kalınlıklarının dolayısıyla göreceli yoğunluğun artması ile elastik modülünün arttığını, ama Poisson oranında ciddi bir değişim gözlemlenmediğini belirtmişlerdir [14]. Epasto ve ark. EIE yöntemi ve Ti6Al4V ELI (Grade 23) tozları kullanarak farklı dikme çapları ve boyutlarda kafes yapı üretmişlerdir. Kafes birim hücre şekli olarak eşkenar dörtgen yüzeyli 12 yüzlü şeklin seçildiği çalışmada, basma dayanımı ve elastik modülünün göreceli yoğunluk ile arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca aynı boyutlardaki birim hücrede, dikme çapının artması ile (yoğunluk artacağı için) darbe dayanımının da artacağı belirtilmiştir [15].

SLE yöntemiyle üretilen kafes yapılarda da benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır. Gümrük ve Mines 316L paslanmaz çelik malzeme ve SLE yöntemiyle ürettikleri farklı birim hücre boyutlarındaki (1.25, 1.379, 1.6, 2 ve 2.5 mm) hmk kafes yapılar üzerinde yaptıkları çalışmada, kafes boyutunun küçülmesi ile basma dayanımı ve elastik modülünün arttığını belirtmişlerdir [16]. Vrana ve ark. AlSi12Mg malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri farklı dikme çaplarına (0.4, 0.6, 0.8, 1.0) sahip hmk kafes yapılarının darbe davranışlarını inceledikleri çalışmada, genel olarak dikme çapı arttıkça darbe enerjisinin arttığını belirtmişlerdir (sırasıyla 47.4 J, 50.55 J, 53.05 J, 49.73 J) [17]. Wang ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V hmk kafes yapılarda, dikme çapının 0.4'ten 0.6 ve 0.9 mm'ye çıkması durumunda, elastik modülün sırasıyla 3.44, 4.84 ve 10.40 GPa'a, akma dayanımının ise sırasıyla 184.5, 333.0 ve 842.6 MPa çıktığını belirtmişlerdir [18]. Dikme kalınlıkları ve dolayısıyla hacim oranları arttıkça, SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg yüzey merkezli kübik (ymk) kafes yapıların elastik modülü,

akma dayanımı ve azami çekme dayanımının artacağı literatürde belirtilmiştir [19]. Dong ve ark. SLE yöntemi ile ürettikleri AlSi10Mg kafes yapılarda, dikme çapının (1, 2, 3, 4 ve 5 mm) mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, dikme çapı azaldıkça (5 mm'den 1 mm'ye) gözenekliliğin % 0.1'den % 1.87'ye çıktığını belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca, dikme çapının artması ile elastik modül, akma dayanımı, azami çekme dayanımı ve uzamanın arttığını belirtmişlerdir (Şekil 1) [20].



Şekil 1. Dikme çapının mekanik özellikler üzerindeki etkisi; (a) elastik modül (E) ve uzama, (b) akma dayanımı (AD) ve azami çekme dayanımı (AÇD) [20].

Yu ve ark. farklı birim hücre sayıları (8, 10), farklı dikme çapları (0.4, 0.5 mm) ve farklı kafes yapıları kullanarak, SLE yöntemiyle 24 adet AlSi10Mg kafes yapısı üretmişlerdir. Genel olarak birim hücre sayısı ve dikme çaplarının artmasıyla gerilimin arttığını belirttiği çalışmada, basma testlerinde dört farklı davranış gözlemlendiği belirtilmiştir; temas alanı ezilmesi, yüklemeye göre 45° eğimde ardı ardına birden fazla çatlaklar oluşması, lokal burkulmadan sonra plastik deformasyon ve yüklemeye göre 45° eğimde çapraz tek bir çatlak oluşumu [21]. Großmann ve ark. AlSi10Mg alaşım malzeme ve SLE yöntemini kullanarak ürettikleri ilave dikmeli hacim merkezli kübik (hmkd) kafes yapılarda, gözeneklerin, düğüm noktalarında daha çok görüldüğünü, bunun sebebinin

ise bu bölgedeki ani ısı yayılımı değişimleri olduğunu belirtmişlerdir. Dikme uzunluğunun dikme çapına oranı arttıkça (4, 6, 8, 10) gözenekliliğin düştüğü belirtilmiştir, fakat bu durumda daha ince ve daha uzun dikmelerden dolayı, dikme kırılmalarının daha çok görüldüğü belirtilmiştir [22]. Gangireddy ve ark. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V sekizli dikme kafes yapılarının mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, dikme yarıçapının değişimi ile (0.1-0.5 mm), göreceli yoğunluğun ve kafes yapının yük taşıma kapasitesinin artacağını belirtmişlerdir [23].

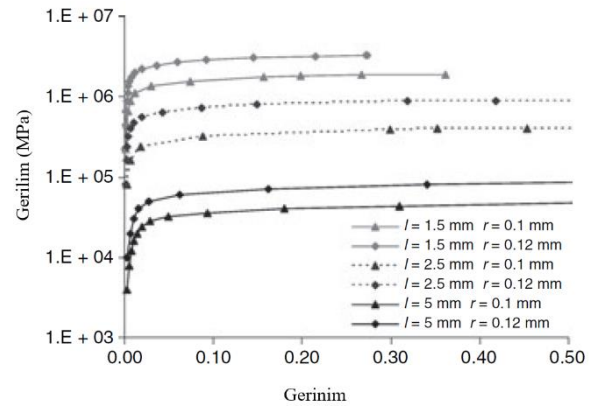
Literatürde Eİ ile üretilen kafes yapılarda, ilave dikme eklenmesinin de mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirtilmiştir. Smith ve ark. 316L paslanmaz çelik hmk ve hmkd kafes yapıların basma dayanımlarını incelemişler ve kafes yapılara yüklenme yönü boyunca dikme eklenmesinin mekanik özellikleri ciddi oranda arttırdığını belirtmişlerdir [24]. Contuzzi ve ark. SLE yöntemi ve 18Ni Marage 300 çelik malzemeyi kullanarak elde ettikleri kafes yapılarda, yüklenme yönü boyunca dikme eklenmesinin parçanın yük taşıma kapasitesini arttırdığını, örneğin 8 adet dikme eklenmesiyle, yük taşıma kapasitesinin iki katına çıktığı belirtilmiştir. Dikme eklenmesiyle elde edilen yük taşıma kapasitesindeki artışın, göreceli yoğunluk artışından daha fazla olduğu belirtilmiştir [25]. Kafes yapılarda, dikme yönü boyunca katman oluşturmanın, basma direncini % 63.4 oranında arttırdığı, proses süresini ise % 18.7 oranında azalttığı, Liu ve ark.'nın PolyJet ve FDM yöntemini kullanarak ürettikleri hmk kafes yapılarla yapılan testler sonucunda ortaya çıkmıştır [26]. Wally ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozlarını kullanarak ürettikleri elmas kafes yapılarda, kafes yapının merkezine yerleştirilen dikmelerin hem elastik modülünü hem de akma dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir [27].

2.2. Birim Hücre Adedi ve Boyutunun Etkisi

Kafes yapılarda birim hücre boyutları, basma dayanımı üzerinde çok etkilidir. Özellikle düşük gerinimlerde, lokal olarak meydana gelen kırılmalar ve çatlak ilerlemelerinden dolayı oluşan deformasyonlardan kaçınmak için, Eİ'nin kabiliyetlerine uygun en düşük birim hücre seçilmelidir [28]. Flores ve ark. kafesli yapıların Eİ ile üretilmesinde üretim maliyeti ve üretim zamanı üzerinde, kafes tipi, kafes boyutu, hacim oranı (kafes yapının hacminin toplam hacme oranı), üretim hacmi ve malzemenin etkisini inceledikleri çalışmada, en etkili parametrelerin kafes boyutu ve hacim oranı olduklarını, kafes tipi ve üretim hacminin etkisinin az olduğunu belirtmişlerdir [29]. Birim hücre boyutu arttığı zaman, kafes yapıdaki hücre sayısı azalmakta ve dikmeler daha güçlü ve uzun olmaktadır. Fakat dikmeler uzun olduğu zaman, yapıdaki çıkıntı miktarları fazla olmakta ve üretim sırasında parçanın

deformasyona uğramasına yol açmaktadır [30]. Bunun tam tersi olarak Horn ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzü kafes yapılar üzerinde yaptıkları bükme deneyleri sonucunda, birim hücre yapısı ile elastik modülü ya da azami dayanım arasında doğrusal bir bağlantı olmadığını belirtmişlerdir [31].

Literatürde birim hücre adedi ve boyutunun, kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi konusunda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Heinel ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V elmas kafes yapılarda, birim hücre boyutunun artması ile elastik modül ve akma dayanımının azaldığını belirtmişlerdir [32]. Labeas ve ark. SLE yöntemi ve 316L paslanmaz çelik malzeme kullanarak üç farklı kafes yapı ürettirmişlerdir (hmk, hmkd, ilave dikmeli yüzey merkezli kübik (ymkd)). Yazarlar, birim hücre boyutu arttıkça plato geriliminin düştüğünü, dikme çapı arttıkça ise arttığını belirtmişlerdir (Şekil 2) [33].



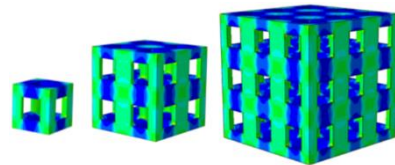
Şekil 2. Hmk kafes yapısı için birim hücre boyutu (l) ve dikme çapının (r) gerilim üzerindeki etkisi [33].

Yan ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri, farklı birim boyutlarda (2, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 8 mm) 316L paslanmaz çelik gyroid kafes yapılarını inceledikleri çalışmada, akma dayanımı ve elastik modülünün birim hücre boyutlarının azalması ile arttığını belirtmişlerdir. Örneğin 2 mm birim hücre boyutu için akma dayanımı 16.98 MPa, elastik modülü 305.72 MPa iken, 8 mm birim hücre boyutu için akma dayanımı 12.41 Mpa, elastik modülü 241.36 MPa'dır. Yazarlar, bunun sebebinin ise hücre boyutunun azalması ile dikmelerin daha sık yerleşmesi olarak açıklamışlardır [34]. Hussein ve ark. Ti6Al4V alaşım tozu ve SLE yöntemi kullanarak gyroid ve elmas yapıda, 3, 4 ve 5 mm birim hücre boyutlarında ve % 8, 10, 12 ve 15 hacim oranlarında destek kafes yapılar üretmişlerdir. Yazarlar düşük birim hücre boyutu ve hacim oranlarında parçaların üretilemediğini belirtmişlerdir (örneğin, 4 mm birim hücre boyutunda, % 10 hacim oranına sahip elmas kafes yapı). Gyroid yapılarıdaki dikmeler daha kalın ve dikmeler arasında daha çok boşluk olduğu için, düşük hacim oranlarında

bile gyroid kafes yapılar üretilebilirken, elmas kafes yapılar üretilememektedir. Gyroid yapılar elmas yapılara göre daha hızlı üretilmiştir [35]. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V elmas kafes yapılarda, x, y ve z yönlerinde birim hücre sayısının 5'ten 20'ye kadar artması ile malzemenin dayanımının daha da arttığı ama her yönde 15 birim hücre sayısına sahip olan kafes yapının mekanik özellikleri ile 14 birim hücre sayısına sahip olan kafes yapının arasında %1 fark olduğu, dolayısıyla daha fazla birim hücre sayısına sahip kafes yapıların mekanik özelliklerinin tahmin edilmesinde, 14 birim hücre sayısına sahip olan kafes yapının özelliklerinin yeterli olacağı belirtilmiştir [36]. Yan ve ark. SLE yöntemi ve AlSi10Mg alaşım tozu kullanarak farklı birim hücre boyutlarında (3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 ve 7 mm) ve hacim oranlarında (% 5, 7.5, 10, 12.5 ve 15) elmas kafes yapı üretmişlerdir. Yazarlar, basma direnci ve modülünün hacim oranının artması ile arttığını, birim hücre boyutunun artması ile azaldığını belirtmişlerdir. Hacim oranı % 10 iken, birim hücre boyutu 3 mm'den 7 mm'ye çıkartıldığı zaman, basma modülü 198.39 MPa'dan 177.89 MPa'a, basma dayanımı ise 10.56 MPa'dan 7.45 MPa'a düşmüştür [37]. Benzer bir yorum Yan ve ark. tarafından SLE yöntemi ve AlSi10Mg alaşım tozu kullanarak üretilen farklı birim hücre boyutlarında (3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 ve 7 mm) ve hacim oranlarında (% 5, 7.5, 10, 12.5, 15 ve 20) gyroid kafes yapıları üzerine yapılan testler sonucunda da belirtilmiştir. Yazarlar, hacim oranı sabit iken birim hücre boyutunun azalmasını basma modülü ve dayanımını arttırmasını iki faktöre bağlamışlardır. Birincisi, hacim oranı sabit iken birim hücre boyutu azaldığı zaman, dikmelerin kesit alanları azalmaktadır. Daha düşük kesit alanını taramak için, seçmeli lazer ergitme yönteminde daha kısa tarama vektör uzunlukları kullanılmaktadır. Dolayısıyla, bitişik taramalar, birbiri ardı sıra daha hızlı olmaktadır. Bunun sonucunda her bir tarama çizgisinin soğuması için verilen zaman azalmakta ve genel olarak düşük tarama alanında daha yüksek sıcaklığın oluşmasına yol açmaktadır. Bu yüksek sıcaklık tozların daha iyi ergimesine ve nihayetinde daha yüksek basma modülü ve dayanımına yol açacaktır. İkincisi ise, birim hücre boyutunun azalması ile oluşan ince dikmeler, çevrelerine göre daha hızlı soğumakta ve daha yüksek soğuma oranı göstermektedir. Bunun sonucunda daha ince mikroyapı ve daha yüksek mekanik özellikler elde edilmektedir [38]. Yang, EIE yöntemiyle her bir yönde farklı birim hücre sayısına sahip Ti6Al4V sekiz yüzlü kafes yapılar üretmiştir. Basma testleri sonucunda birim hücre sayısının malzemenin elastik modülü ve dayanımı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmış ama doğrusal bir oran elde edilememiştir [39]. EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V eşkenar örgen yüzeyli on iki yüzlü şekil kafes yapılarda, sıcaklığın ve birim hücre boyutunun artmasıyla elastik modülü ve plato gerilimi gibi mekanik özelliklerin azaldığı literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda belirtilmiştir

[40]. Du Plessis ve ark. SLE yöntemi ile 0.6, 0.8, 1.0 ve 1.2 mm birim hücre boyutlarında ve % 80 yoğunlukta, Ti6Al4V elmas kafes yapılar üretmişlerdir. Yapılan basma testleri sonucunda basma modülü ve basma dayanımının birim hücre boyutunun artması ile azalacağı belirtilmiştir [41]. Atae ve ark. SLE yöntemi ve ticari saf Ti tozu kullanarak ürettikleri 2 mm, 2.5 mm ve 3 mm birim hücre boyutlarında gyroid yapılarda, inşa yönünde birim hücre boyutu arttıkça elastik modülün azaldığını ama akma dayanımının doğrusal bir değişim göstermediğini belirtmişlerdir [42]. Atae ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri üç farklı birim hücre boyutunda (2, 2.5 ve 3 mm) Ti6Al4V gyroid kafes yapılarda, birim hücre boyutları arttıkça dikme sertliklerinin 3.73 GPa'dan sırasıyla 3.91 GPa ve 4.05 GPa'a çıktığını belirtmişlerdir. Farklı birim hücre boyutlarındaki yapıların elastik modüllerinin 637-1084 MPa, akma dayanımlarının ise 13.1-15.0 MPa'a çıktığının belirtildiği çalışmada, gyroid kafes yapıların basma durumunda hem sünek hem de kırılğan davranış gösterdiğini ve deformasyonun basma yönüne 45° eğimli hat boyunca olduğunu söylemişlerdir [43]. Ma ve ark. üçlü periyodik minimum yüzeyler kullanarak, elmas şeklinde, farklı göreceli yoğunlukta ve birim kafes ebatlarında 9 numuneyi SLE yöntemiyle üretmişler ve birim kafes boyutu azaldıkça ve gözeneklilik arttıkça, basma direnci ve elastik modülünün azaldığını belirtmişlerdir [44]. Osman ve ark. SLE yöntemi ve 316L paslanmaz çelik tozları kullanarak ürettikleri ymk kafes yapılarda, birim hücre boyutları 1x1x1'den 1x1x2 oranına çıkartıldığında (yani en ve boy sabit kalıp, yükseklik iki katına çıkartıldığında), kafes yapının enerji absorbe edebilme özelliğinin arttığını ve aynı göreceli yoğunlukta akma dayanımının yaklaşık % 80 oranında arttığını belirtmişlerdir [45].

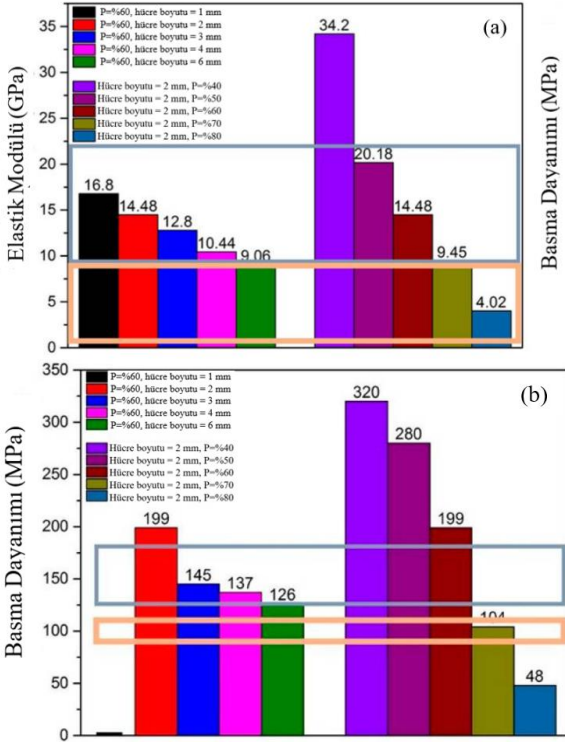
Peng ve ark. birim hücre sayısının kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu yaptıkları çalışmada göstermişlerdir. Yazarlar, 1, 8 ve 27 birim hücreden oluşan "basit kübik" (Şekil 3) kafes yapıların elastik modüllerini sırasıyla 24.8 GPa, 25.0 GPa ve 25.2 GPa, akma dayanımlarını ise sırasıyla 173.6 MPa, 175.3 MPa ve 175.5 MPa olarak bulmuşlardır [46].



Şekil 3. 1, 8 ve 27 birim hücreden oluşan kafes yapı [46].

2.3. Gözenek Boyutu ve Miktarının Etkisi

Kafes yapıların mekanik özellikleri gözenek oryantasyonundan, diziliminden, dağılımından, şekil ve boyutlarından etkilenir. Bundan dolayı kafes yapıların birçoğu anizotropik deformasyon davranışları gösterir [47]. Xu ve ark. Ti6Al4V alaşım malzemesi ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri hmk kafes yapılarda, gözenekliliğin (% 40-80) ve hücre boyutunun (2-8 mm) artması ile hem elastik modülünün hem de basma dayanımının arttığını belirtmişlerdir (Şekil 4) [48].



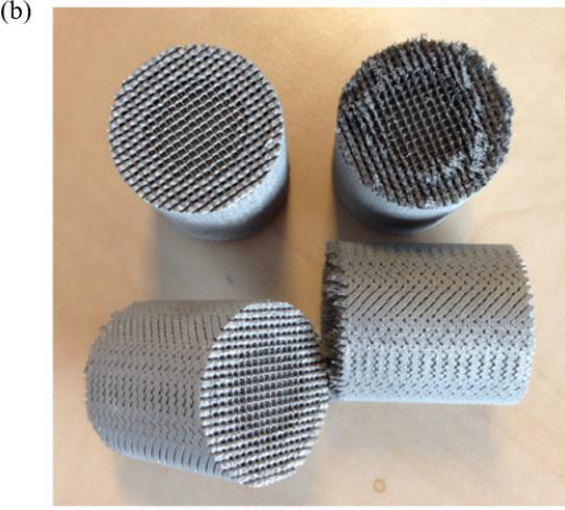
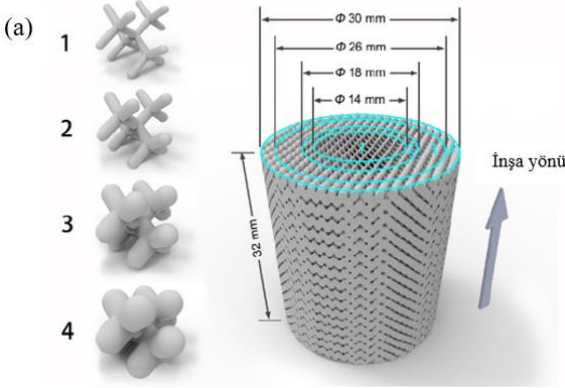
Şekil 4. Elastik modül ve basma dayanımının gözeneklilik (% P) ve hücre boyutu ile değişimi [48].

Xu ve ark. Ti kafes yapıların mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, elastik modülü ve akma dayanımının gözenek boyutu ve gözenek miktarının artması ile azalacağını ve gözeneklerin düzenli bir şekilde dizildiği kafes yapının, aşamalı (staggered) şekilde dizilen yapıdan daha yüksek elastik modülüne sahip olduğunu belirtmişlerdir [49]. Wei ve ark. Ti6Al4V metal tozları ve SLE yöntemini kullanarak, iki yüzeyinde metal levha olacak şekilde kagoma kafes yapısı üretmişlerdir. Yazarlar, göreceli yoğunluğun % 2.8'den 5.5 ve 9.1'e çıkması ile, basma dayanımının sırasıyla 2 Mpa'dan 8 ve 17.5 Mpa'a çıktığını belirtmişlerdir. Bükme test sonuçlarına göre kagome yapı, önce burulma ardından ani dikme kırılması davranışı göstermektedir [50]. Yan ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozlarını kullanarak %60 ve %70 gözeneklilik ve 500, 600 ve 700 mm

çaplarında gözenek çapına sahip sekiz yüzlü kafes yapılar üretmişlerdir. Basma testleri sonucunda gözeneklilik aynı kaldığı sürece gözenek çapı arttıkça yoğunluğun, akma ve azami basma dayanımın artacağı, gözenek çapı aynı kaldığı sürece gözeneklilik arttıkça, yoğunluğun, akma ve azami basma dayanımın azalacağı belirtilmiştir [51]. Xu ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozları kullanarak % 40, % 50, % 60, % 70 ve % 80 gözeneklilik ve 2, 3, 4 ve 6 mm birim hücre boyutlarına sahip hmk kafes yapılar üretmişlerdir. Basma testleri sonucunda yazarlar, aynı birim hücre boyutu için, elastik modül ve basma dayanımının gözenekliliğin artması ile azalacağı belirtilmiştir [52]. Wei ve ark. 304 paslanmaz çelik ve Co-Cr-Mo alaşım tozları ve SLE yöntemini kullanarak, iki yüzeyinde metal levha olacak şekilde kagoma kafes yapısı üretmişlerdir. Yazarlar, göreceli yoğunluğun % 4.2'den 9.3'e çıkması ile, basma dayanımının, 304 paslanmaz çelik için 6.8 MPa'dan 22.6 MPa'a, Co-Cr-Mo alaşımı için 8.5 MPa'dan 28.5 MPa'a çıktığını, yük kapasitesinin ise 304 paslanmaz çelik için 695.5 N'dan 1988.7 N'a, Co-Cr-Mo alaşımı için ise 658.8 N'dan 2200.4 N'a çıktığını belirtmişlerdir [53].

Gözenekliliğin kademeli olarak değiştiği kafes yapılar, özellikle mekanik özelliklerin üretilecek parçanın kullanım şartlarına bağlı olarak istenildiği gibi değiştirilmesinde çok avantaj sağlamaktadır. Örneğin, Zhang ve arkadaşları, SLE yöntemiyle radyal olarak kademelendirilmiş elmas kafes yapısına sahip Ti6Al4V parçalar üretmişlerdir (Şekil 5). Yoğunluğun hacme göre değişmediği gözenekli yapılara göre, üretilen parçaların daha düşük yoğunluğa (1.9 g/cm³), ortalama elastik modülüne (10.44 GPa), yüksek akma dayanımına (170.6 MPa), yüksek azami gerilime (201 MPa) ve kabul edilebilir sünekliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir [54].

Gözenekliliğin ve dolayısıyla yoğunluğun kademeli olarak değiştiği kafes yapılarda, gözenek boyutlarındaki değişimin ani olması ya da bir geçiş bölgesi boyunca gözenek boyutunun yavaş yavaş değişmesi mekanik özellikleri etkilemektedir. Ani değişimden ziyade geçiş bölgesi kullanılması durumunda elastik modülünün % 12, akma dayanımının % 19, azami gerilimin ise % 13 arttığı, EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kübik kafes yapılar üzerinde yapılan basma testleri sonucunda gösterilmiştir (Şekil 6). Aynı çalışmada, gözenekliliğin ani değiştiği parçalarda, deformasyonun ya da kırılmanın ani değişimin olduğu bölgede görülmesine rağmen (Şekil 46-a), gözenekliliğin bir geçiş bölgesi boyunca yavaş yavaş değiştiği parçalarda ise, deformasyonun, gözenekliliğin en çok olduğu yerde başladığı, geçiş bölgesinde başlamadığı görülmüştür (Şekil 7-b-c) [55].

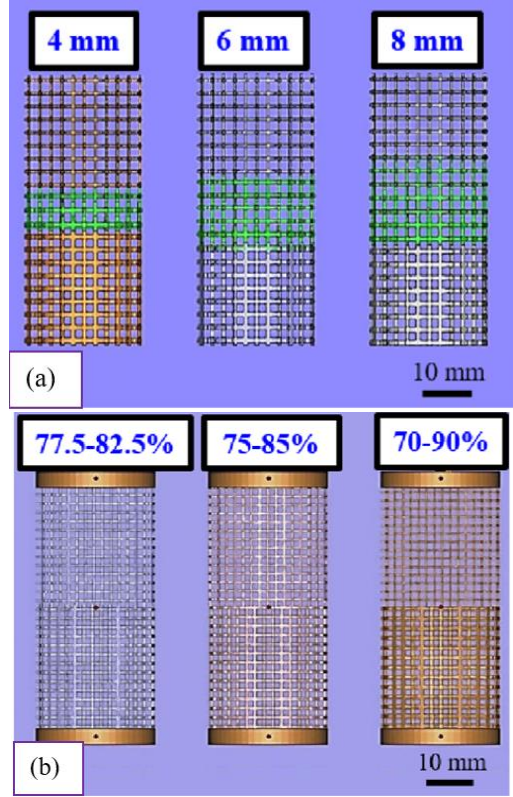


Şekil 5. (a) Radyal olarak kademelendirilmiş, farklı birim hücre boyutlarında elmas kafes yapısına sahip parçalar (1, 2, 3 ve 4, radyal olarak her bir tabakada kullanılan birim hücreyi göstermektedir) ve, (b) üretilen parça [54].

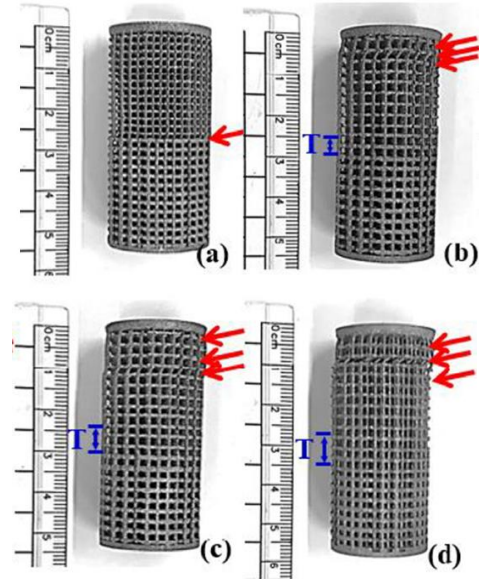
2.4. Dikme Tasarımının Etkisi

Sonlu eleman analizleri sonucu kafes yapılarıdaki dikmelerde görülen deformasyonlara göre, yeni dikme tasarımlarının yapılması ve bu sayede hem ağırlık azalışı hem de daha mukavim parçaların elde edilmesi literatürde farklı malzemeler için denenmiştir [56]. SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg hmk kafes yapılarında dairesel yerine elips keistli dikmeler kullanıldığında, yapılan sonlu elemanlar analizi ile deneylerin daha uyumlu olduğu literatürde çalışılmıştır [57]. Liu ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri farklı hacim oranlarında (% 1.28-% 18.6) elmas kafes yapıları üzerine yaptıkları çalışmada, en fazla gerilim yoğunlaşmasının kafes yapının düğüm noktalarında olduğunu, bu bölgelere radyus atılmasının mekanik özellikleri iyileştirdiğini belirtmişlerdir [58]. Cao ve ark. SLE yöntemi ve 316L paslanmaz çelik malzeme kullanarak, farklı dikme boyutlarında ve tasarımlarında (Şekil 8) baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapıları üretmişlerdir. Yapılan basma testleri sonucunda, göreceli yoğunluk arttıkça akma dayanımı ve elastik modülünün arttığını, bu

değerlerin orjinal tasarım değerlerine göre sırasıyla ~ % 55 ve ~ % 79 fazla olduğu belirtilmiştir [59].



Şekil 6. Gözenekliliğin; (a) bir geçiş bölgesi boyunca değiştiği ve (b) ani değiştiği kafes yapıları [55].

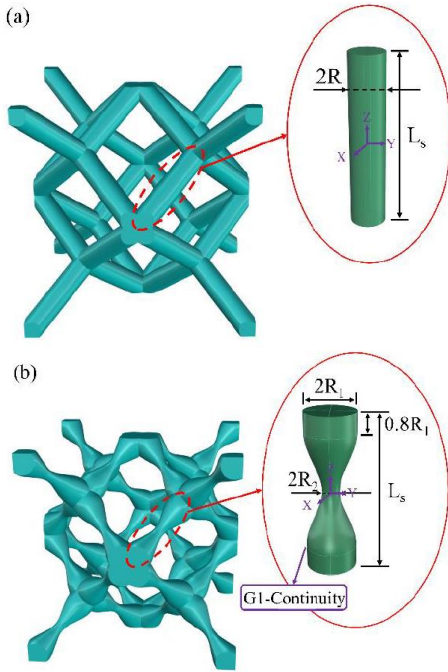


Şekil 7. Basma testleri sonucunda deformasyonun; (a) gözenekliliğin aniden değiştiği yerde başladığı, (b), (c) (d) gözenekliliğin en fazla olduğu yerde başladığı yapıları. T, gözenekliliğin yavaş yavaş değiştiği geçiş bölgesini ifade eder [55].

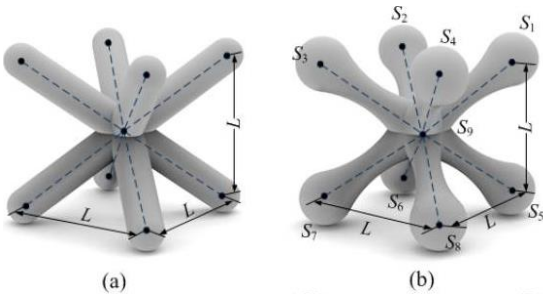
Hmk yapılarda, dayanımın artırılması için Şekil 9'daki gibi dikme tasarımlarının değiştirilmesi denenmiş ve bu şekilde hem sertliğin hem de dayanımın arttığı deneysel olarak gösterilmiştir [60].

2.5. Yükleme Yönü ve Kafes Şeklinin Etkisi

Kafes yapılarda kafesin şekli ve yükleme yönüne göre dizilimi, mekanik özellikler üzerinde çok etkilidir [61]. Yük uygulama yönünün elastik modülünü önemli ölçüde etkilediği, gyroid kafes yapılara uygulanan basma testleri sonucunda gösterilmiştir [62]. Kafes yapıların basma dayanımları üzerinde en çok göreceli yoğunluk ve kafes yapı çeşidinin etkili olduğu, Gümrük ve ark. tarafından SLE yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik kafes yapılar üzerine yapılan testler sonucunda belirtilmiştir [63].

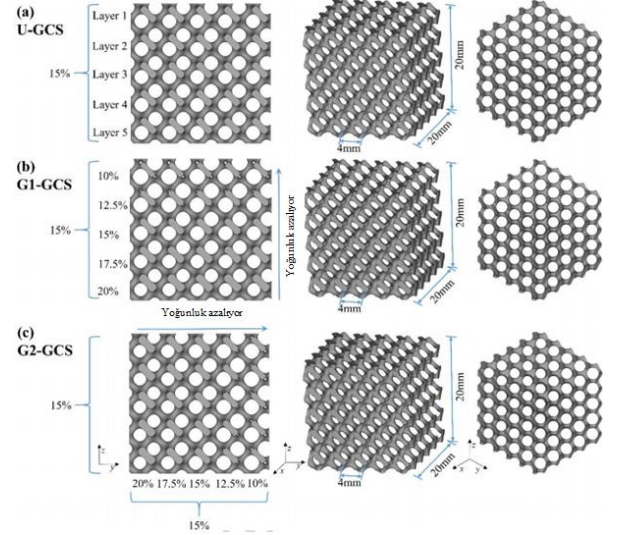


Şekil 8. Dikme tasarımlarının değiştirildiği baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapı [59].



Şekil 9. (a) hacim merkezli kübik yapı, (b) dikme tasarımları değiştirilmiş hacim merkezli kübik yapı [60].

Yang ve ark. 316L paslanmaz çelik malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri gyroid kafes yapılarda yükleme yönüne göre paralel (G1-GCS) ya da dik yönde (G2-GCS) hacim oranının dolayısıyla yoğunluğun değiştiği kafes yapılar üretmişlerdir (Şekil 10). Yazarlar, yoğunluğun değişmediği (U-GCS) kafes yapılara göre (elastik modülü: 1097.87 ± 20.85 MPa, plato gerilimi: 26.18 ± 0.33 MPa, yoğunlaşma başlangıcındaki gerinim: $\% 61.23 \pm 0.67$), G1-GCS yapıların elastik modülü (898.05 ± 13.12 MPa) ve plato geriliminin (15.82 ± 0.10 MPa) daha düşük, yoğunlaşma başlangıcındaki gerinimin ($\% 62.32 \pm 1.00$) daha yüksek çıktığını, G2-GCS yapıların ise elastik modülü (1165.49 ± 11.55 MPa) ve plato geriliminin (27.83 ± 0.01 MPa) daha yüksek, yoğunlaşma başlangıcındaki gerinimin ($\% 60.09 \pm 0.57$) daha düşük çıktığını belirtmişlerdir. Ayrıca hem G1-GCS yapıların (16.60 ± 0.48 MJ/m³) hem de G2-GCS yapıların (16.82 ± 0.18 MJ/m³) enerji absorbe edebilme değerlerinin U-GCS'ninkinden (16.21 ± 0.22 MJ/m³) yüksek olduğu belirtilmiştir [64].



Şekil 10. (a) Yoğunluğun sabit olduğu gyroid kafes yapı, (b) yoğunluğun yükleme yönünde azaldığı gyroid kafes yapı, (c) yoğunluğun yükleme yönüne dik yönde azaldığı gyroid kafes yapı [64].

2.6. Dikme / Birim Hücre Oryantasyonunun Etkisi

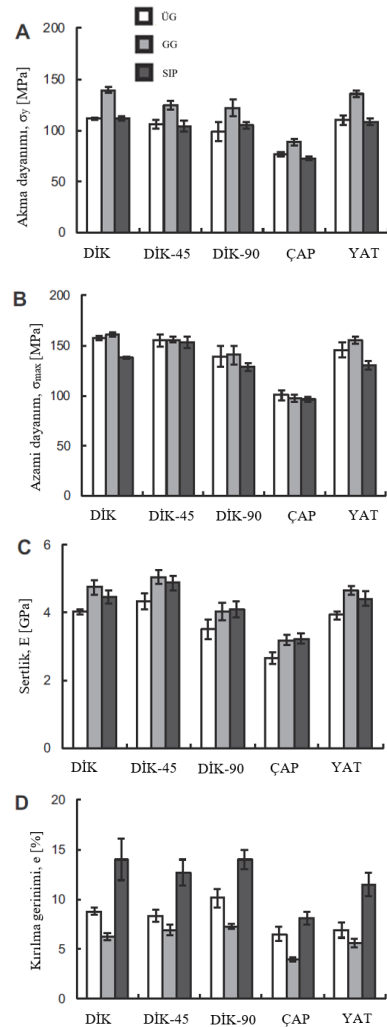
Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde dikme / birim hücre oryantasyonunun etkili olduğu yapılan bilimsel çalışmalarda gösterilmiştir. Genel olarak kafes yapılarda, dik olarak yerleştirilen dikmeler bükme ve basma açısından daha kritik, çapraz yerleştirilen dikmeler ise burulma açısından daha kritiktir [65].

Shen ve ark. üretim platformuna göre dikmelerin açısı arttıkça, kafes yapıların akma ve kopma dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca lazer gücü arttıkça daha çok toz ergiyeceği için dikme

çapları ve mekanik özellikler de artmaktadır [66]. Smith ve ark. SLE yöntemi ve 316L paslanmaz çelik malzeme kullanarak elde ettikleri hmk ve hmkd yapılar, dikmelerin yere göre yaptığı açıyı değiştirdiklerinde, kafes yapıların akma dayanımı ve enerji absorbe edebilme kabiliyetlerinin arttığını belirtmişlerdir [67]. Hussein, SLE yöntemi ve üç farklı malzeme (316L paslanmaz çelik, AlSi10Mg ve Ti6Al4V) kullanarak Gyroid, Schwartz, Neovius ve elmas kafes yapılar üretmiştir. Basma elastik modülü ve akma dayanımının göreceli yoğunluğunun artması ile arttığını belirtmişlerdir. Hücre oryantasyonunun basma özellikleri üzerinde ciddi etkisinin olduğunu belirtildiği çalışmada, 316L paslanmaz çelik Gyroid kafes yapı için en yüksek elastik modül birim hücrenin 40-60 derece döndürülmesi ile elde edilmiştir. 5.5 mm birim hücre boyutu ve % 15 hacim oranı için, Gyroid kafes yapının basma elastik modülü ve akma dayanımı 316L paslanmaz çelik malzeme için 251 MPa ve 14 MPa, AlSi10Mg için 231 MPa ve 16 MPa, Ti6Al4V için ise 810 MPa ve 50 MPa çıkmıştır [68]. Wauthle ve ark. SLE yöntemiyle 0.3 göreceli yoğunluğa sahip Ti6Al4V elmas birim hücreli kafes yapılar üretmişlerdir. Mekanik özellikler üzerinde kafes yapısı ve birim hücre oryantasyonu ile ısıl işlemin etkisinin incelendiği çalışmada, kafes yapısı dikey, yatay ve çapraz şekilde, birim hücre ise kafes yapısı dik durumda iken döndürülmemiş, 45° döndürülmüş, 90° döndürülmüş şekilde üretim gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, birim hücre oryantasyonunun mekanik özellikler (akma dayanımı, azami dayanım, sertlik ve kırılma anındaki gerinim) üzerinde kayda değer bir etki yaratmadığını ama kafes yapının oryantasyonu incelendiğinde, çapraz kafes yapısının yatay ve dikey kafes yapılarından yaklaşık %35 daha az dayanım ve sertliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Herhangi bir ilave işlem uygulanmadan elde edilen parçanın mekanik özelliklerine göre, gerilim giderme (GG), akma dayanımını %15-25 arttırmış ama sıcak izostatik presleme (SIP) herhangi bir değişime sebep olmamıştır. Azami dayanım, GG'den etkilenmemiş ama SIP ile %15 azalmıştır. Sertlik GG ile % 15-20, SIP ile %10-20 artmıştır. Kırılma anındaki gerinim ise GG ile %20-40 azalmış, SIP ile %25-70 artmıştır. Yazarlar ayrıca, birim hücredeki dikmelerin içinde oluşan gözenek miktarının, dikmenin açısının 90°ye yaklaştıkça azaldığını, 0°ye yaklaştıkça arttığını belirtmişlerdir (Şekil 11) [2].

Weißmann ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarda birim hücre oryantasyonunun basma gerinimi, basma dayanımı ve elastisite modülü üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir [69]. Yáñez ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarda, dikme açısının mekanik özellikler üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, dikme açısının azalması ile (68.5°den 19°ye) basma dayanımının ve elastik modülünün arttığını belirtmişlerdir [70]. Cansızoğlu ve ark. EIE

yöntemi ve Ti6Al4V tozlarını kullanarak, farklı dikme açılarında (20°den 80°ye kadar) kafes yapılar üretmişlerdir. Yazarlar, dikme açısı arttığında katmanların birbirleri ile olan bağlantılarının arttığını, bu sayede daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip daha kalın dikme ve kafes yapılarının elde edileceğini belirtmişlerdir [71].



Şekil 11. Seçmeli lazer ergitme yöntemiyle üretilen kafes yapılarda, oryantasyon ve ısıl işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi. ÜG: Herhangi bir ilave işlem yapılmamış, üretildiği gibi kullanılan, GG: Gerilim giderme uygulanmış, SIP: Sıcak izostatik presleme uygulanmış, DİK: Birim hücre döndürülmemiş, kafes yapısı dik olan numune, DİK-45: Birim hücre 45° döndürülmüş, kafes yapısı dik olan numune, DİK-90: Birim hücre 90° döndürülmüş, kafes yapısı dik olan numune, ÇAP: Kafes yapısı çapraz olan numune, YAT: Kafes yapısı yatay olan numune [2].

2.7. Platform Yerleşimi ve İnşa Yönünün Etkisi

Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde platform yerleşimi ve inşa yönünün etkisi de farklı çalışmalarda incelenmiştir. Brandl ve ark. SLE yöntemiyle farklı açılarda (0, 45 ve 90°) ürettikleri AlSi10Mg parçalarında, üretim platformunu 30 ve 300 °C'de ısıtmışlardır. Yazarlar numunelere uygulanan yüksek tekrar sayılarında yorulma testleri sonucunda, platform sıcaklığının 30 °C olması durumunda malzemelerin yorulma dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, üretim açısı arttıkça malzemelerin yorulma dayanımları azalmıştır [72]. Kafes yapıların Eİ ile üretilmesinde inşa yönünün mekanik özellikler üzerine etkisi, Alsalla ve ark. tarafından çalışılmıştır. 316L malzeme ve SLE yöntemi kullanarak üretilen gyroid kafes yapılarında, azami çekme dayanımı ve akma dayanımının dikey yönde, yatay yöne göre % 60 fazla, uzamanın ise % 40 fazla çıktığı belirtilmiştir [73]. Weißmann ve ark. Ti6Al4V malzeme ve iki farklı üretim yöntemi (EIE ve SLE) kullanarak kafes yapılarıdaki dikmeleri farklı oryantasyonlarda üretmişlerdir. Yazarlar, dik konumda, EIE ile üretilen parçaların CAD modelinden % 10-12 farklılık gösterdiğini, SLE ile üretilen parçaların ise % 4-5 farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. 45 derece oryantasyonda ise, EIE ile üretilen parçaların CAD modelinden % 9-14 farklılık gösterdiğini, SLE ile üretilen parçaların ise % 0-3 farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Sıcak izostatik preslemenin dikme boyutlarında ciddi bir değişime sebep olmadığı belirtilmiştir. Yazarlar 0 derecede üretilen SLE dikmelerinin, 45 derecede üretilenlere göre daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu, EIE'de ise bu durumun tamamen tersine olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar bu durumu toz yatağındaki enerji akışına bağlamışlardır. Bu enerji akışından dolayı, SLE dikmelerinde, tozlar eğimli dikmelerin alt yüzeyine yapışıp yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. EIE'deki durumun tam tersi olmasını ise yazarlar, tozların yüzeydeki düzensizlikleri doldurmasına bağlamışlardır. SLE yöntemiyle üretilen dikmelerin, EIE yöntemiyle üretilenlere göre daha düşük, 0 derecede üretilen SLE dikmelerinin, 45 derecede üretilenlere göre daha düşük sertliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. SLE yöntemiyle üretilen dikmelerin basma dayanımının EIE yöntemiyle üretilenlere göre daha yüksek olduğunu, dikme boyunun artması ile basma dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. SLE yöntemiyle üretilen dikmelere göre, EIE yöntemiyle üretilen dikmelerin sertliğinin fazla olmasına rağmen, basma dayanımının düşük olmasını yazarlar yüzey pürüzlülüğündeki farka bağlamışlardır [74]. Dong ve ark. AlSi10Mg metal tozları ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri ilave dikmeli hmk yapılarıdaki inşa yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, inşa açısının 35.5°'den 90°'ye çıkması ile elastik modülün 46.4 GPa'dan, 54.2 GPa'a, uzamanın % 2.64'ten % 2.92'ye, azami çekme

dayanımının 278.4 MPa'dan 360.7 MPa'a ve akma dayanımının ise 155.2 MPa'dan 176.3 MPa'a çıktığını belirtmişlerdir [75]. Tallon ve ark. SLE yöntemi ve MS1 maraging çeliği kullanarak eşkenar dörtgen şeklinde on iki yüzlü kafes yapısı üretmişlerdir. Yazarlar, dikey yönde üretilen yapıların kırılmadan önceki uzama miktarlarının (% 10-11.5), yatay yönde üretilenlere göre (% 13-14.5) daha düşük olduğunu, hemen hemen aynı akma dayanımına sahip olmalarına rağmen (1100 MPa-1150 MPa), yatay yönde üretilen numunelerin daha yüksek azami dayanıma sahip olduğunu (1290 MPa) belirtmişlerdir [76]. Bahsedilen bu çalışmalardan farklı olarak, Gu ve ark. A205 Al alaşım tozları ve SLE yöntemini kullanarak elde ettikleri kafes yapıların kırılma dayanımlarını inceledikleri çalışmada, farklı oryantasyonlarda yapılan üretimin kafes yapının kırılma direnci üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [77].

Eİ ile üretilen kafes yapılarında, inşa yönünün mekanik özellikleri etkilemesinin en önemli nedeni farklı inşa yönlerinde, üretim sonucunda ortaya çıkan gözenek miktarlarının farklı olmasıdır. Delroisse ve ark. AlSi10Mg kafes yapılarını SLE yöntemiyle ürettikleri çalışmalarında, dik olarak tasarlanan ve üretilen dikmelerde, eğik olanlara göre daha az gözenek görüldüğü, eğik olarak üretilen dikmelerde daha sert, daha az gözenekli, ince mikroyapıya sahip üst bölge ve sertliği daha az, daha çok gözenekli ve kaba mikroyapıya sahip alt bölge olmak üzere iki farklı bölgenin oluştuğunu belirtmişlerdir (Şekil 12). Isıl işlem uygulandığında sertlikte bir miktar düşüş gözlemlendiği ama gözeneklilikte azalma oluştuğu belirtilmiştir [78].

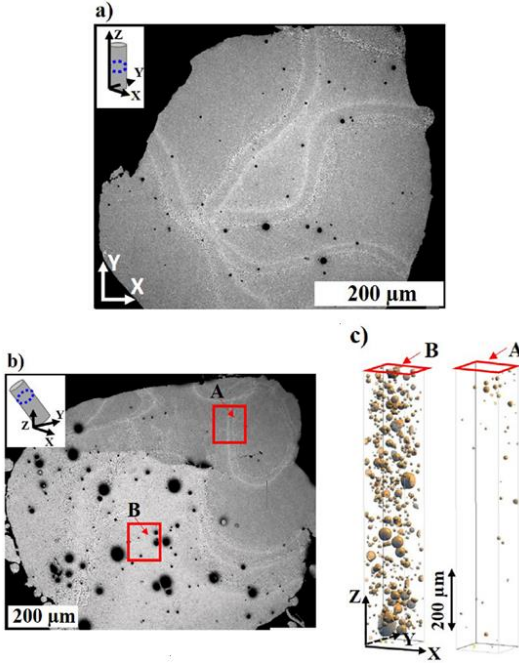
Eİ ile üretilen kafes yapılarında, üretilecek parçanın üretim platformu üzerindeki konumu da mekanik özellikleri etkilemektedir. SLE yönteminde, gazın uygulandığı yere yakın ya da toz serme mekanizmasının üretim platformuna ilk ve son temas ettiği noktalara yakın yerlerdeki parçaların mekanik özellikleri daha kötü çıkmaktadır. AlSi10Mg alaşım malzeme ve SLE yöntemi kullanılarak üretilen hmkd kafes yapılarında, parçanın üretim platformu üzerindeki konumunun göreceli basma dayanımı ve sertliği üzerindeki etkisi Şekil 13'te gösterilmiştir [21].

2.8. İşleme Parametrelerinin Etkisi

Literatür incelendiği lazer gücü, lazer hızı, katman kalınlığı, iki lazer taraması arasındaki mesafe gibi işleme parametrelerinin kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin detaylı araştırıldığı görülmüştür. Sing ve ark. SLE yöntemi ve Ti-Ta alaşım tozu kullanarak ürettikleri kafes yapılarında, regresyon analizi yaparak lazer gücü, katman kalınlığı ve tarama hızının dikme boyutları ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yazarlar, dikme boyutları, gözeneklilik ve elastik

sabitler üzerinde en etkili parametrenin lazer gücü olduğunu belirtmişlerdir [79].

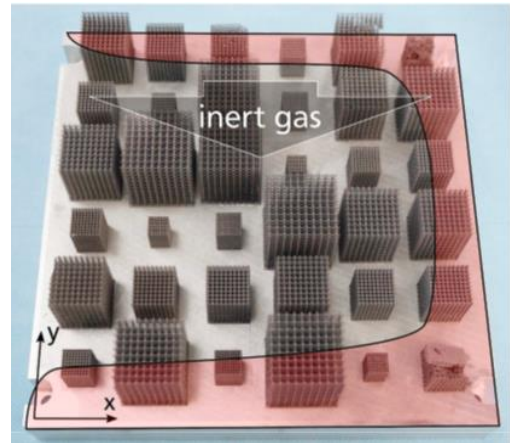
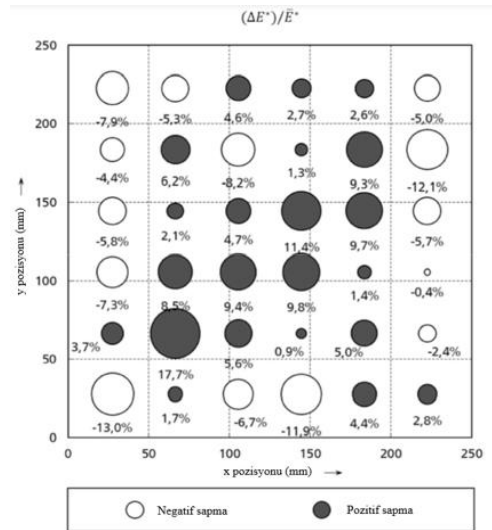
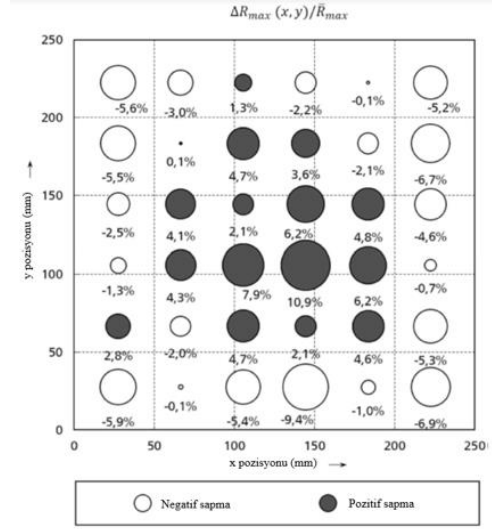
$$d = \sqrt{\frac{m_b}{\rho_s \pi N^3 L \sqrt{3}}} \quad (1)$$



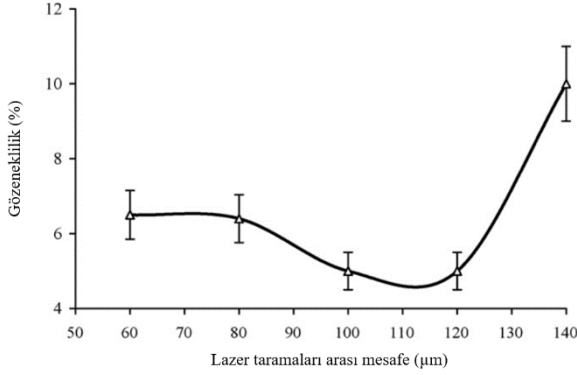
Şekil 12. Dik olarak (a) ve eğik olarak (b) üretilen dikmeler. Mavi çizgiler gözenekli yapıyı görmek için alınan kesit düzlemlerini ifade etmektedir. Eğik olarak üretilen dikmelerdeki A ve B bölgelerin üç boyutlu X-ray tomografi görüntüleri (c) [78].

Yadroitsev ve ark. iki lazer taraması arasındaki mesafenin gözeneklilik üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmada, Inconel 625 malzeme ve SLE yöntemi kullanmışlardır. Beş farklı mesafenin kullanıldığı çalışmada (60, 80, 100, 120, 140 µm), doğrusal bir oran elde edilememiştir (Şekil 14) [80].

Wang ve ark. farklı oranlarda Ti tozunu (% 30, 40, 50) TiH₂ tozu ile karıştırmış ve SLE yöntemiyle kafes yapı üretmişlerdir. Yazarlar, gözenekliliğin TiH₂ miktarının artması ile arttığını, tarama hızı 0.01 m/s'den 0.03 m/s'ye çıkartıldığında gözenekliliğin de arttığını ama 0.05 m/s'ye çıkartıldığında ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sebebinin ise lazer parametrelerinin etkisi ve toz kompozisyonu olduğunu belirtmişlerdir [81]. SLE yöntemiyle üretilen paslanmaz çelik mikro-kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde işleme parametrelerinin etkilerini incelediği çalışmada, Tsopanos ve ark. plato gerilimi ve elastik modül ile göreceli yoğunluk arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Lazer gücü ve uygulama süresinin dikme çapı ve malzeme özellikleri üzerinde etkisinin olduğunu belirttiği çalışmada, paslanmaz çelik hmk kafes yapılar için, dikme çapının Denklem 1 ile bulunabileceğini belirtmişlerdir. Burada d dikme çapını, m_b kafes yapının ağırlığını, ρ_s çeliğin yoğunluğunu, N kafes yapının bir kenarındaki hücre sayısını, L ise hücre uzunluğunu ifade etmektedir [82].



Şekil 13. Göreceli basma dayanımı (ΔR_{max}/R_{max}) ve sertliğin (ΔE*/E*), parçanın üretim platformundaki konuma göre değişimi. Taralı alan en kötü parça özelliklerinin çıktığı bölgeyi göstermektedir [21].

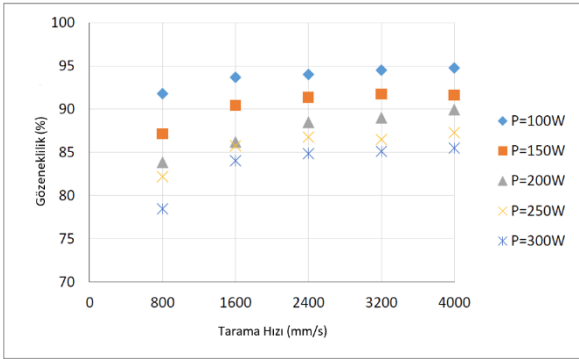


Şekil 14. Lazer taramaları arası mesafenin gözenekliliğe etkisi [80].

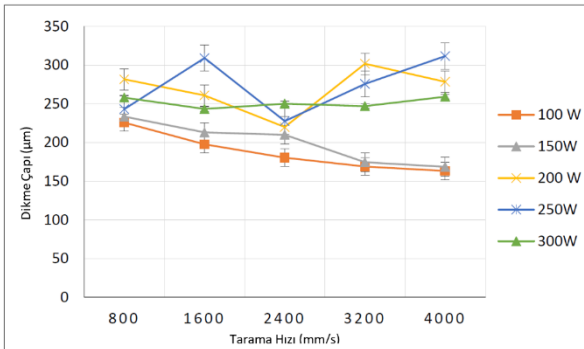
Zhang ve ark. Ti6Al4V malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri kafes yapılarında, tarama çizgisi aralığının mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Yazarlar tarama çizgisi aralığının artması ile basma dayanımı ve modülünün azalacağını belirtmişlerdir [83]. Campanelli ve ark. SLE yöntemi ile ürettikleri Ti6Al4V kafes yapılarında, lazer gücünün artması ile martenzitik alfa yapının oluştuğu, bundan dolayı da mikro sertliğin arttığını belirtmişlerdir. En yüksek azami dayanım ve birim kütlede absorbe edilen enerji miktarını elde edebilmek için yazarlar Taguchi yöntemini kullanmışlar ve bu değerlerin en düşük birim hücre boyutları, en yüksek dikme boyutları ve en fazla dikey dikmelerle elde edilebileceğini belirtmişlerdir [84]. List ve ark. EIE yöntemiyle ürettikleri Inconel 625 elmas kafes yapılarında, ışın hızının artması ya da ışın akımının azalması ile ağırlığın ve göreceli yoğunluğun (kafes yapının ağırlığının aynı boyutlardaki tamamen katı yapının ağırlığına oranı) azaldığını belirtmişlerdir [85]. Qiu ve ark. lazer tarama hızı ve lazer gücünün, AlSi10Mg (CL31 olarak ta isimlendirilir) metal tozları ve SLE yöntemi kullanılarak elde edilen elmas kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, dikme çaplarının ve dolayısıyla kafes yapının yükleme kapasitesinin lazer gücünün artması ile arttığını, tarama hızının artması ile tam doğrusal olmamakla birlikte genel olarak azaldığını belirtmişlerdir [86]. Sing ve ark. ticari saf titanyum malzeme ve SLE yöntemi kullanarak farklı dikme çapları, lazer gücü ve lazer tarama hızlarında kare piramit ve kesik küp & sekiz yüzlü kafes yapılar üretmişlerdir. Yazarlar, lazer tarama hızı ya da lazer gücünden birinin sabit olması durumunda, diğerinin artmasının daha fazla metal tozunun yüzeye yapışmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeye yapışan toz kalınlığının lazer gücü ve lazer tarama hızından etkilendiği ama birim hücre boyutu ya da dikme çapından ciddi oranda etkilenmediği ANOVA analizleri sonucunda gösterilmiştir. Kare piramit kafes yapıların sünek davranış, kesik küp & sekiz yüzlü kafes yapıların ise kırılma davranış gösterdiğinin

belirtildiği çalışmada, üretilen kafes yapının elastik sabitleri üzerinde lazer gücü ve lazer tarama hızının ciddi bir etkisinin olmadığı ama birim hücre boyutu ve dikme çapının etkili olduğu belirtilmiştir [87]. Eİ'de lazer gücünün lazer hızına oranı olan giriş enerjisi arttıkça, dikmelerin alt yüzeyinde ısı enerjisi birikmesinden dolayı yüksek yüzey pürüzlülüğü, yüksek gözeneklilik ve mikroyapı değişimi gözlemlendiği literatürde belirtilmiştir. Dolayısıyla, özellikle düşük yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik için düşük giriş enerjisi kullanılması gerekmektedir [88]. AlSi10Mg malzeme, döküm işlemi için uygun olması ve paslanma direncinin yüksek olmasından dolayı havacılık ve otomotiv sanayiinde tercih edilmektedir. Li ve ark. AlSi10Mg alaşımının bu özelliklerinden dolayı, SLE yöntemi kullanarak hmkd yapılar elde etmişlerdir. Farklı katman miktarının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, katman miktarı arttıkça (1, 3, 5, 7) basma modülünün (490.22 MPa, 378.32 MPa, 330.31 MPa, 317.07 MPa) ve azami dayanımın (4.36 MPa, 2.81 MPa, 2.07 MPa, 1.87 MPa) azaldığını belirtmişlerdir [89]. Kayacan ve ark. seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V KRZ kafes yapılarının mekanik özellikleri üzerinde tarama stratejisi, lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesinin etkilerini incelemişlerdir. Ada tarama ve ızgara tarama yöntemlerinin denendiği çalışmada, çekme, basma ve darbe testlerinde en yüksek değerlere ızgara tarama stratejisiyle ulaşıldığı belirtilmiştir. Ayrıca lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesinin ayrı ayrı etkilerinden ziyade bunların bir fonksiyonu olan enerji yoğunluğunun, mekanik özellikler üzerinde etkisinin daha önemli olduğu belirtilmiştir [90]. Kafes yapılarında lazer gücünün artması ile dikme çaplarının artacağı ama belli bir doyma noktasından sonra sabit kalacağı literatürde belirtilmiştir [91]. Her bir katmanda lazerin birden fazla geçmesinin SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V elmas kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Velasco-Castro ve ark. tarafından araştırılmıştır. Yazarlar, her bir katmanda lazer geçme sayısı arttıkça (1, 3, 5, 9), daha fazla metal tozu ergidiği için göreceli yoğunluğun arttığını (sırasıyla 0.102, 0.149, 0.184, 0.246) ama akma dayanımı (sırasıyla 12.1 MPa, 5.6 MPa, 3.2 MPa, 4.4 MPa) ve azami dayanımın (sırasıyla 12.6 MPa, 6.4 MPa, 5.5 MPa, 4.7 MPa) azaldığını belirtmişlerdir. Yazarlar bunun sebebinin, mikroyapı değişiminden ziyade lazer geçme sayısı arttıkça kafes yapının daha fazla oksijene maruz kalması olarak açıklamışlardır. Daha fazla oksijene maruz bırakılması, kafes yapıyı daha gevrek, kırılma hale getirmiştir [92]. Tan ve ark. SLE yöntemi ve Cu-10Sn alaşım malzemenin ürettikleri hmk kafes yapıları inceledikleri çalışmada, 0.09 tarama aralığında, kafes yapının yoğunluğunun, enerji yoğunluğu ile arttığını ($E=P/vht$) ve lazer gücünün enerji yoğunluğu üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir [93]. Salem ve ark. SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V hmk kafes yapılarında,

tasarlanan ve üretilen kafes yapı dikmelerinin çaplarında farklılıklar olduğunu, bunun sebebinin ise dikmelerin eğimli olmasından kaynaklanan basamak etkisi ve tam ergimemiş tozların dikme yüzeyine (özellikle alt yüzeyine) yapışarak kesit alanını arttırması olduğunu belirtmişlerdir. Yazarlar, lazer gücü sabit olduğunda, gözenekliliğin tarama hızı ile arttığını, tarama hızı sabit olduğunda ise lazer gücünün artması ile gözenekliliğin azaldığını, yüksek tarama hızlarında lazer gücünün daha etkili olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 15). Ayrıca düşük lazer güçlerinde (100 W ve 150 W), dikme çaplarının sabit lazer gücünde tarama hızının artması ile azalacağını, bunun sebebinin ergiyik havuzu boyutunun azalması olduğunu, 200 W ve üzeri lazer gücünde, dikme çapı ile tarama hızı veya lazer gücü arasında doğrusal bir değişim gözlemlenmediğini, bunun sebebinin ise yüksek lazer gücü ve tarama hızlarında ergiyik havuzundaki ve dikme yüzeyindeki düzensizlikler olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 16) [94].



Şekil 15. Gözenekliliğin tarama hızı ve lazer gücü ile değişimi [94].



Şekil 16. Dikme çapının tarama hızı ve lazer gücü ile değişimi [94].

2.9. Isıl İşlemin Etkisi

Eİ ile üretilen kafes yapılara ısıtma işlemi uygulanması, malzemenin mikroyapısını değiştirmekte ve bunun sonucunda yapının mekanik özellikleri değişmektedir. Yan ve ark. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V elmas ve gyroid kafes yapılarını

inceledikleri çalışmada, SLE yönteminin hızlı soğuma oranlarından dolayı (10^6 K/s), Ti6Al4V'de bulunan β fazının α yerine 100-300 nm genişliğinde ve 4.01 ± 0.34 GPa mikrosertliğe sahip α' martenzit fazına dönüşümünü belirtmişlerdir. Yapılar 680 °C'de, 4 saat ısıtma tabi tutulduğunda ise mikroyapı 500-800 nm genişliğinde α fazı ile az miktarda β fazına dönüşmüştür. Mikrosertliğin ise 3.71 ± 0.35 GPa'a düştüğü gözlemlenmiştir [95]. Yan ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V alaşım tozlarını kullanarak, %15 hacim oranında ve 5 mm birim hücre boyutlarında gyroid kafes yapılar üretmişlerdir. Yazarlar, ısıtma işleminin, kafes yapının elastik modülü üzerinde belirli bir etkisinin olmadığını, ama ısıtma işlemi uygulandığında kafes yapının basma dayanımının azaldığını bunun sebebinin ise üretilen parçadaki α' martenzit yapının iri taneceklilik mikroyapıya dönüşmesi olduğunu belirtmişlerdir [96]. Benzer bir çalışma olarak, Zhang ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V metal tozları kullanarak yoğunluğun kademeli olarak değiştiği hmk kafes yapılar üretmişlerdir. Mikroyapı analizleri sonucunda üretilen parçalarda, α' martenzit yapının, ısıtma işleminden sonra ise $\alpha+\beta$ yapının görüldüğü belirtilmiştir. α' martenzit yapıda basma testleri sonucunda kafes yapı kırılıp parçalara ayrılırken, $\alpha+\beta$ yapı basma yükü doğrultusunda sıkışmaktadır. Yani ısıtma işlemi malzemenin kırılma dayanımını sünek yapıya dönüştürmektedir [97]. Yan ve ark. Ti6Al4V tozları ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri sekiz yüzlü kafes yapıları inceledikleri çalışmada, dikme çaplarının CAD verisinden farklı çıktığını, bunun sebebinin ise SLE yönteminin hassasiyetinin yetersiz olması ve basamak etkisi olduğu yorumunu yapmışlardır. Kafes yapıda görülen gözeneklerin ise tam ergimemiş tozlardan ve işleme sırasında ergiyik havuzunda sıkışan gazlardan meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yazarlar sıcak izostatik presleme uygulanması ile basma dayanımının 560.1 MPa'dan 940.8 MPa'a, kırılma geriliminin ise 0.29'dan 0.41'e çıktığını belirtmişlerdir. Yazarlar bunun muhtemel sebebinin sıcak izostatik presleme ile gözenekliliğin % 5.9'dan % 0.5'e gerilemesi ve mikroyapının kırılma α' martenzit yapıdan, daha sünek $\alpha + \beta$ yapıya dönüşmesi olduğunu belirtmişlerdir [98].

Literatürde ısıtma işleminin, kafes yapının yorulma dayanımı üzerindeki etkisi konusunda ise farklı yorumlar yapılmıştır. Dallago ve ark. ısıtma işlemi uygulanmasının, kafes yapıların yorulma dayanımlarını etkilemediğini çünkü yorulma dayanımının yüzey pürüzlülüğü ve düğüm noktaları ile alakalı olduğunu, iç gözenekler ile alakalı olmadığını, ısıtma işleminin iç gözenek boyutlarını azalttığı ama yüzey pürüzlülüğüne bir etkisinin olmadığını belirtmiştir [99]. Fakat, ısıtma işleminin, SLE yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V hmk kafes yapıların mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, üretilen parçalara uygulanan tavlama işleminin parçanın

süneklik ve yorulma ömrünü arttırdığı, basma dayanımını ise azalttığı belirtilmiştir [100].

3. DEĞERLENDİRME

Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde farklı parametrelerin etkili olduğu, literatürde yapılan çok sayıda çalışmada gözler önüne serilmiştir. Genel olarak özetlenecek olursa, dikme çapları, adetleri ve birim hücre boyutlarının artması ya da gözenek boyutu ve miktarının azalması ile akma dayanımı ve elastiklik modülünün arttığı literatürde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür. Birim hücre adedi ile akma dayanımı ve elastiklik modülü arasında doğrusal bir oran elde edilememiştir. Farklı dikme tasarımlarının ve özellikle yüklemeye yönüne paralel dikmelerin yerleştirilmesinin mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu gösterilmiş ve farklı kafes yapı çeşitlerinin farklı mekanik davranışlar gösterdiği literatürde belirtilmiştir. Üretim platformuna göre dikme / birim hücre açıları arttıkça ya da inşa yönü paralelden dikeye yaklaştıkça akma dayanımı ve elastiklik modülünün arttığı belirtilmiştir. Lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi gibi işleme parametrelerinin ayrı ayrı etkilerinden ziyade bunların bir fonksiyonu olan enerji yoğunluğunun, mekanik özellikler üzerinde etkisinin daha önemli olduğu belirtilmiştir. Isıl işlemin ise malzemenin mikroyapısını değiştirdiği için mekanik özelliklerini değiştirdiği literatürde belirtilmiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özelliklerin üzerinde etkili olan parametrelerden bahsedilmiş ve geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Kafes yapıların çok farklı alanlarda kullanıma uygun olması ve Eİ ile bu yapıların üretiminin kolay olması, son yıllarda bu yapılara olan ilgiyi arttırmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların kapsamlı taraması ile edilen bilgiler neticesinde aşağıda belirtilen konularda eksikler olduğu ve bu konularda yapılacak detaylı / ilave çalışmaların, Eİ ile 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.
- ✓ Metal tozu boyutu ve dağılımının, kafes yapıların üretilebilirliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmayı beklemektedir [68].
- ✓ Eİ’de, destek olarak kullanılan kafes yapıların, destekledikleri bölgedeki yüzey

pürüzlülüğüne etkisi araştırılmayı beklemektedir [68].

- ✓ Kafes yapılarda yapılan simülasyonlarda, malzemenin anizotropik özelliklerinin kullanılması üzerine detaylı çalışmalar literatürde eksiktir [101].
- ✓ Kafes yapılarda hangi parametrelerin (dikme çapı, dikme açısı, inşa açısı vs.) birim hücre üzerinde en çok etkili olduğuna dair istatistiksel çalışmalar yetersizdir [102]
- ✓ Kafes yapıların hem birim hücre düzeyinde hem de kafes yapının tamamı düzeyinde optimizasyonu (dayanımı arttırmak, ağırlığı azaltmak, enerji absorbe edebilme kabiliyetini arttırmak vs.) konusunda yapılan çalışmalar yetersizdir [102].

TEŞEKKÜR

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

FACTORS AFFECTING MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Mechanical properties of lattice structures produced by additive manufacturing are affected from different parameters like mechanical properties of the main material, unit cell and strut shape and size, arrangement of unit cell in lattice structure, intersection of strut and node points, type of strut (solid or hollow), heat treatment, strut / unit cell orientation and pore size. It is very important to know the factors affecting the mechanical properties of the lattice structures produced by additive manufacturing, the implementation of which are rapidly increasing in different industrial areas such as aviation and aerospace industry, automotive industry and biomedical industry, as these factors will be taken into consideration during the design and production phases. In this study, detailed information about factors affecting mechanical properties 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., Jorissena, 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. 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.
 6. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. 2016. “Additive manufacturing of metals”, *Acta Materialia*, 117: 371-392.
 7. Flores, I., Kretschmar, N., Azman, A. H., Chekurov, S., Pedersen, D. B., Chaudhuri, A. 2020. “Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion”, *Additive Manufacturing*, 31: 100947.
 8. 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.
 9. Hammett, C. I., Rinaldi, R. G., Zok, F. W. 2013. “Pyramidal lattice structures for high strength and energy absorption”, *Journal of Applied Mechanics*, 80 (4): 041015.
 10. Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., Aykul, H. 2017. “Static behavior of lattice structures produced via direct metal laser sintering technology”, *Materials and Design*, 135: 246-256.
 11. Parthasarathy, J., Starly, B., Ramana, S., Christensen, A. 2010. “Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 3 (3): 249-259.
 12. Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S. 2011. “A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications”, *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2): 160-170.
 13. 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.
 14. Warmuth, F., Osmanlic, F., Adler, L., Lodes, M. A., Körner, C. 2016. “Fabrication and characterization of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting”, *Smart Mater. Struct.* 26 (2): 025013.
 15. Epasto, G., Palomba, G., D’Andrea, D., Guglielmino, E., Di Bella, S., Traina, F. 2019. “Ti-6Al-4V ELI microlattice structures manufactured by electron beam melting: Effect of unit cell dimensions and morphology on mechanical behaviour”, *Materials Science & Engineering A*, 753: 31-41.
 16. Gümrük, R., Mines, R. A. W. 2013. “Compressive behaviour of stainless steel microlattice structures”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 68: 125-139.
 17. 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.
 18. Wang, L., Kang, J., Sun, C., Li, D., Cao, Y., Jin, Z. 2017. “Mapping porous microstructures to yield desired mechanical properties for application in 3D printed bone scaffolds and orthopaedic implants”, *Materials & Design*, 133: 62-68.
 19. Amani, Y., Dancette, S., Delroisse, P., Simar, A., Maire, E. 2018. “Compression behavior of lattice structures produced by selective laser melting: X-ray tomography based experimental and finite element approaches”, *Acta Materialia*, 159: 395-407.
 20. Dong, Z., Zhang, X., Shi, W., Zhou, H., Lei, H., Liang, J. 2018. “Study of size effect on microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg samples made by selective laser melting”, *Materials*, 11 (12): 2463.
 21. Yu, T., Hyer, H., Sohn, Y., Bai, Y., Wu, D. 2019. “Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting”, *Materials and Design*, 182: 108062.
 22. Großmann, A., Gosmann, J., Mittelstedt, C. 2019. “Lightweight lattice structures in selective laser melting: Design, fabrication and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering: A*, 766: 138356.
 23. Gangireddy, S., Komarasamy, M., Faierson, E. J., Mishra, R. S. 2019. High strain rate mechanical behavior of Ti-6Al-4V octet lattice structures additively manufactured by selective laser melting (SLM)”, *Materials Science & Engineering A*, 745: 231-239.
 24. Smith, M., Cantwell, W. J., Guan, Z., Tsopanos, S., Theobald, M. D., Nurick, G. N., Langdon, G. S. 2011. “The quasi-static response of steel lattice structures”, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 13 (4): 479-501.

25. Contuzzi, N., Campanelli, S. L., Casavola, C., Lamberti, L. 2013. "Manufacturing and characterization of 18Ni Marage 300 lattice components by selective laser melting", *Materials*, 6 (8): 3451-3468.
26. Liu, W., Song, H., Wang, Z., Wang, J., Huang, C. 2019. "Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method", *Materials and Design*, 181: 108065.
27. Wally, Z. J., Haque, A. M., Feteira, A., Claeysens, F., Goodall, R., Reilly, G. C. 2019. "Selective laser melting processed Ti6Al4V lattices with graded porosities for dental applications", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 90: 20-29.
28. Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A. 2017. "Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices", *Additive Manufacturing*, 16: 24-29.
29. Flores, I., Kretschmar, N., Azman, A. H., Chekurov, S., Pedersen, D. B., Chaudhuri, A. 2020. "Implications of lattice structures on economics and productivity of metal powder bed fusion", *Additive Manufacturing*, 31: 100947.
30. Hao, L., Raymont, D., Yan, C., Hussein, A., Young, P. 2011. "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures", *The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping (VRAP)*, At Leiria, Portugal.
31. Horn, T. J., Harrysson, O. L. A., Marcellin-Little, D. J., West, H. A., Lascelles, B. D. X., Aman, R. 2014. "Flexural properties of Ti6Al4V rhombic dodecahedron open cellular structures fabricated with electron beam melting", *Additive Manufacturing*, 1-4: 2-11.
32. Heinel, P., Körner, C., Singer, R. F. 2008. "Selective electron beam melting of cellular titanium: mechanical properties", *Advanced Engineering Materials*, 10 (9): 882-888.
33. Labeas, G. N., Sunaric, M. M. 2010. "Investigation on the static response and failure process of metallic open lattice cellular structures", *Strain*, 46 (2): 195-204.
34. Yan, C.Z., Hao, L., Hussein, A., Raymont, D. 2012. "Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62: 32-38.
35. Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., Young, P. 2013. "Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing", *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1019-1026.
36. Ahmadi, S. M., Campoli, G., Yavari, S. A., Sajadi, B., Wauthle, R., Schrooten, J., Weinans, H., Zadpoor, A. A. 2014. "Mechanical behavior of regular open-cell porous biomaterials made of diamond lattice unit cells", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 34: 106-115.
37. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Bubb, S. L., Young, P., Raymont, D. 2014. "Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering", *Journal of Materials Processing Technology*, 214: 856-864.
38. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Huang, J., Zhu, W. 2015. "Microstructure and mechanical properties of aluminum alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering", *Materials Science & Engineering A*, 628: 238-246.
39. Yang, L. 2015 "Experimental-assisted design development for an octahedral cellular structure using additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, 21 (2): 168-176.
40. Xiao, L. J., Song, W. D., Wang, C., Liu, H. Y., Tang, H. P., Wang, J. Z. 2015. "Mechanical behavior of open-cell rhombic dodecahedron Ti-6Al-4V lattice structure", *Materials Science and Engineering A*, 640: 375-384.
41. Du Plessis, A., Kouprianoff, D. P., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I. 2018. "Mechanical properties and in situ deformation imaging of microlattices manufactured by laser based powder bed fusion", *Materials*, 11 (9): 1663.
42. Ataee, A., Li, Y., Brandt, M., Wen, C. 2018. "Ultrahigh-strength titanium gyroid scaffolds manufactured by selective laser melting (SLM) for bone implant applications", *Acta Materialia*, 158: 354-368.
43. Ataee, A., Li, Y., Fraser, D., Song, G., Wen, C. 2018. "Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications", *Materials & Design*, 137: 345-354.
44. 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.
45. Osman, M. M., Shazly, M., El-Danaf, E. A., Jamshidi, P., Attallah, M. M. 2020. "Compressive behavior of stretched and composite microlattice metamaterial for energy absorption applications", *Composites Part B: Engineering*, 184: 107715.
46. 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.
47. 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.
48. Xu, Y., Zhang, D., Zhou, Y., Wang, W., Cao, X. 2017. “Study on topology optimization design, manufacturability, and performance evaluation of Ti-6Al-4V porous structures fabricated by selective laser melting (SLM)”, *Materials*, 10 (9): 1048.
 49. Xu, G., Kou, H., Liu, X., Li, F., Li, J., Zhou, L. 2017. “Microstructure and mechanical properties of porous titanium based on controlling Young's modulus”, *Rare Metal Materials and Engineering*, 46(8): 2041-2048.
 50. Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Xie, H., Qu, Z., Fang, D. 2018. “Mechanical responses of titanium 3D kagome lattice structure manufactured by selective laser melting”, *Extreme Mechanics Letters*, 23: 41-48.
 51. 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.
 52. Xu, Y., Zhang, D., Hu, S., Chen, R., Gu, Y., Kong, X., Tao, J., Jiang, Y. 2019. “Mechanical properties tailoring of topology optimized and selective laser melting fabricated Ti6Al4V lattice structure”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 99: 225-239.
 53. Wei, K., Yang, Q., Yang, X., Tao, Y., Xie, H., Qu, Z., Fang, D. 2020. “Mechanical analysis and modeling of metallic lattice sandwich additively fabricated by selective laser melting”, *Thin Walled Structures*, 146: 106189.
 54. Zhang, X.-Y., Fang, G., Leeftang, S., Zadpoor, A. A., Zhou, J. 2018. “Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials”, *Acta Biomaterialia*, 84: 437-452.
 55. Wu, Y. C., Kuo, C. N., Shie, M. Y., Su, Y. L., Wei, L. J., Chen, S. Y., Huang, J. C. 2018. “Structural design and mechanical response of gradient porous Ti-6Al-4V fabricated by electron beam additive manufacturing”, *Materials and Design*, 158: 256-265.
 56. Ravari, M. K., Esfahani, S. N., Andani, M. T., Kadhodaie, M., Ghaei, A., Karaca, H., Elahinia, M. 2016. “On the effects of geometry, defects, and material asymmetry on the mechanical response of shape memory alloy cellular lattice structures”, *Smart Materials and Structures*, 25 (2): 025008.
 57. Vrána, R., Červinek, O., Maňas, P., Koutný, D., Paloušek, D. 2018. “Dynamic loading of lattice structure made by selective laser melting- numerical model with substitution of geometrical imperfections”, *Materials*, 11(11): 2129.
 58. Liu, F., Zhang, D. Z., Zhang, P., Zhao, M., Jafar, S. 2018. “Mechanical properties of optimized diamond lattice structure for bone scaffolds fabricated via selective laser melting”, *Materials*, 11 (3): 374.
 59. Cao, X., Duan, S., Liang, J., Wen, W., Fang, D. 2018. “Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 145: 53-63.
 60. Bai, L., Yi, C., Chen, X., Sun, Y., Zhang, J. 2019. “Effective design of the graded strut of BCC lattice structure for improving mechanical properties”, *Materials*, 12 (13): 2192.
 61. 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.
 62. Yang, L., Yan, C., Fan, H., Li, Z., Cai, C., Chen, P., Shi, Y., Yang, S. 2019. “Investigation on the orientation dependence of elastic response in Gyroid cellular structures”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 90: 73-85.
 63. Gümruk, R., Mines, R., Karadeniz, S. 2013. “Static mechanical behaviours of stainless-steel micro-lattice structures under different loading conditions”, *Materials Science and Engineering A*, 586: 392-406.
 64. Yang, L., Mertens, R., Ferrucci, M., Yan, C., Shi, Y., Yang, Y. 2019. “Continuous graded Gyroid cellular structures fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and mechanical properties”, *Materials & Design*, 162: 394-404.
 65. 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.
 66. Shen, Y., Cantwell, W. J., Mines, R. A. W., Ushijima, K. 2012. “The properties of lattice structures manufactured using selective laser melting”, *Advanced Materials Research*, 445: 386-391.
 67. Smith, M., Guan, Z., Cantwell, W. 2013. “Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 67: 28-41.
 68. Hussein, A. Y. 2013. “The development of lightweight cellular structures for metal additive manufacturing”, PhD Thesis, University of Exeter, UK.

69. Weißmann, V., Bader, R., Hansmann, H., Laufer, N. 2016. "Influence of the structural orientation on the mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V open porous scaffolds", *Materials and Design*, 95: 188-197.
70. Yánez, A., Herrera, A., Martel, O., Monopoli, D., Afonso, H. 2016. "Compressive behavior of gyroid lattice structures for human cancellous bone implant applications", *Materials Science and Engineering C*, 68: 445-448.
71. Cansizoglu, O., Harrysson, O., Cormier, D., West, H., Mahale, T. 2008. "Properties of Ti-6Al-4V non-stochastic lattice structures fabricated via electron beam melting", *Materials Science and Engineering: A*, 492(1-2):468-474.
72. Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., Buchbinder, D. 2012. "Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior", *Materials and Design*, 34: 159-169.
73. Alsalla, H., Hao, L., Smith, C. 2016. "Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique", *Material Science and Engineering A*, 669: 1-6.
74. Weißmann, V., Drescher, P., Bader, R., Seitz, H., Hansmann, H., Laufer, N. 2017. "Comparison of single Ti6Al4V struts made using selective laser melting and electron beam melting subject to part orientation", *Metals*, 7(3): 91.
75. Dong, Z., Liu, Y., Li, W., Liang, J. 2019. "Orientation dependency for microstructure, geometric accuracy and mechanical properties of selective laser melting AlSi10Mg lattices", *Journal of Alloys and Compounds*, 791: 490-500.
76. Tallon, J., Cyr, E., Lloyd, E., Mohammadi, M. 2020. "Crush performance of additively manufactured maraging steel microlattice reinforced plates", *Engineering Failure Analysis*, 108: 104231.
77. 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.
78. Delroisse, P., Jacques, P. J., Maire, E., Rigo, O., Simar, A. 2017. "Effect of strut orientation on the microstructure heterogeneities in AlSi10Mg lattices processed by selective laser melting", *Scripta Materialia*, 141: 32-35.
79. Sing, S. L., Wiria, F. E., Yeong, W. Y. 2018. "Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 49: 170-180.
80. Yadroitsev, I., Thivillon, L., Bertrand, Ph., Smurov, I. 2007. "Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic powder", *Applied Surface Science*, 254 (4): 980-983.
81. Wang, Y., Shen, Y., Wang, Z., Yang, J., Liu, N., Huang, W. 2010. "Development of highly porous titanium scaffolds by selective laser melting", *Material Letters*, 64: 674-676.
82. Tsopanos, S., Mines, R. A. W., McKown, S., Shen, Y., Cantwell, W. J., Brooks, W., Sutcliffe, C. J. 2010. "The influence of processing parameters on the mechanical properties of selectively laser melted stainless steel microlattice structures", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132 (4): 041011.
83. Zhang, S., Wei, Q., Cheng, L., Li, S., Shi, Y. S. 2014. "Effects of scan line spacing on pore characteristics and mechanical properties of porous Ti6Al4V implants fabricated by selective laser melting", *Materials and Design*, 63: 185-193.
84. Campanelli, S. L., Contuzzi, N., Ludovico, A. D., Caiazzo, F., Cardaropoli, F., Sergi, V. 2014. "Manufacturing and characterization of Ti6Al4V lattice components manufactured by selective laser melting", *Materials*, 7 (6): 4803-4822.
85. List, F. A., Dehoff, R. R., Lowe, L. E., Sames, W. J. 2014. "Properties of Inconel 625 mesh structures grown by electron beam additive manufacturing", *Materials Science and Engineering: A*, 615:191-197.
86. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J. E., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., Attallah, M. M. 2015. "Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting", *Materials Science & Engineering A*, 628: 188-197.
87. Sing, S. L., Yeong, W. Y., Wiria, F. E., Tay, B. Y. 2016. "Characterization of titanium lattice structures fabricated by selective laser melting using an adapted compressive test method", *Experimental Mechanics*, 56 (5): 735-748.
88. Vrána, R., Koutný, D., Paloušek, D., Pantělejev, L., Jaroš, J., Zikmund, T., Kaiser, J. 2018. "Selective laser melting strategy for fabrication of thin struts usable in lattice structures", *Materials*, 11 (9): 1763.
89. Li, C., Lei, H., Liu, Y., Zhang, X., Xiong, J., Zhou, H., Fang, D. 2018. "Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting", *International Journal of Mechanical Sciences*, 145: 389-399.
90. Kayacan, M. C., Delikanlı, Y. E., Duman, B., Özsoy, K. 2018. "Ti6Al4v toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Journal of the Faculty of*

- Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1): 127-143.
91. Onal, E., Medvedev, A. E., Leeftang, M. A., Molotnikov, A., Zadpoor, A.A. 2019. "Novel microstructural features of selective laser melted lattice struts fabricated with single point exposure scanning", *Additive Manufacturing*, 29: 100785.
 92. Velasco-Castro, M., Hernandez-Nava, E., Figueroa, I.A., Todd, I., Goodall, R. 2019. "The effect of oxygen pickup during selective laser melting on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V lattices", *Heliyon*, 5: e02813.
 93. Tan, Z., Zhang, X., Zhou, Z., Zhou, Z., Yang, Y., Guo, X., Wang, Z., Wu, X., Wang, G., He, D. 2019. "Thermal effect on the microstructure of the lattice structure Cu-10Sn alloy fabricated through selective laser melting", *Journal of Alloys and Compounds*, 787: 903-908.
 94. Salem, H., Carter, L.N., Attallah, M.M., Salem, H.G. 2019. "Influence of processing parameters on internal porosity and types of defects formed in Ti6Al4V lattice structure fabricated by selective laser melting", *Materials Science & Engineering A*, 767: 138387.
 95. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P. 2015. "Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 51: 61-73.
 96. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Wei, Q., Shi, Y. 2017. "Microstructural and surface modifications and hydroxyapatite coating of Ti-6Al-4V triply periodic minimal surface lattices fabricated by selective laser melting", *Materials Science and Engineering: C*, 75: 1515-1524.
 97. Zhang, M., Yang, Y., Wang, D., Xiao, Z., Song, C., Weng, C. 2018. "Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science and Engineering A*, 736: 288- 297.
 98. 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.
 99. Dallago, M., Fontanari, V., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., Benedetti, M. 2017. "Fatigue properties of Ti6Al4V cellular specimens fabricated via SLM: CAD vs real geometry", *Structural Integrity Procedia*, 7: 116-123.
 100. Brenne, F., Niendorf, T., Maier, H. J. 2013. "Additively manufactured cellular structures: Impact of microstructure and local strains on the monotonic and cyclic behavior under uniaxial and bending load", *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (9): 1558-1564.
 101. 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.
 102. Helou, M., Kara, S. 2018. "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (3): 243-261.