



Ekllemeli İmalatla Üretilen İşlevsel Olarak Derecelendirilmiş Metal Yapılar

Orhan Gülcan^{1*}, Uğur Şimşek², Barış Kavas³

ÖZ

İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar (İDY), konvansiyonel malzeme işleme yöntemleri ile elde edilemeyen, aynı parça içerisinde birden çok fiziksel özelliğin elde edilebilmesi için mikroyapı, gözeneklilik veya kimyasal kompozisyonun, malzemenin hacmi boyunca kademeli olarak değiştiği bir malzeme çeşididir. Metal İDY, farklı konvansiyonel üretim yöntemleri ile üretilebilmektedir fakat Ekllemeli İmalat (Eİ) konusunda son zamanlarda elde edilen gelişmeler, karmaşık şekillerin üretilebilme ihtimali, düşük prototipleme maliyetleri, asgari kalıp üretimi, yüksek hassasiyet ve işlemin yüksek tekrar edilebilme özelliklerinden dolayı, farklı türlerde İDY'lerin üretilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Eİ ile üretilen metal İDY'ler konusunda son yıllarda elde edilen gelişmelere odaklanılmıştır. Eİ ile üretilen metal İDY'lerin detaylı literatür taraması ve farklı endüstrilerde kullanımı bu çalışmada anlatılacaktır.

Anahtar Kelimeler: İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar, ekllemeli imalat, seçmeli lazer ergitme, enerji absorbe edebilme, topoloji optimizasyonu

Metal Additive Manufactured Functionally Graded Structures

ABSTRACT

Functionally graded structure (FGS) is a type of material where microstructure, porosity or chemical composition is gradually changing across the volume of the material so that multiple physical properties not possible within the same part made by conventional material processing techniques can be achieved. Metal FGSs can be produced with different conventional manufacturing processes but recent advances in Additive Manufacturing (AM) enable the production of different type of FGSs with the possibility of production of complex shapes, low cost for prototyping, minimum tooling, high accuracy and high repeatability. The present paper focuses on the recent advances in metal AM of FGSs. A detailed review of researches on metal AM of FGSs and their usage in different industries will be presented in this paper.

Keywords: Functionally graded structure, additive manufacturing, selective laser melting, energy absorption, topology optimization

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 29.01.2021

Kabul/Accepted : 04.02.2021

¹ Dr., General Electric Aviation, Gebze, ogulcan1981@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6688-2662

² General Electric Aviation, Gebze, ugur.simsek.16339@ozu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-4405-5420

³ General Electric Aviation, Gebze, baris.kavas@ge.com, ORCID: 0000-0002-7230-3129



EXTENDED ABSTRACT

Functionally graded structure (FGS) is a type of material where microstructure, porosity or chemical composition is gradually changing across the volume of the material. FGS was first proposed in 1984 in Japan where an engineering application required that there must be a temperature gradient of approximately 1000 K, between inside and outside of space plane. Since then, these types of materials have been used in aerospace, automobile, biomedical, defense, energy, electrical/electronics, marine, opto-electronics and sport industries so far to meet related requirements by changing tensile strength and Young modulus of the material.

FGSs can be used to access unique mechanical properties that are unachievable in traditional materials and also allow exhibition of multiple physical properties not possible within the same part made by conventional material processing techniques. By using suitable laser scanning strategy and laser source, FGSs can be produced with different crystallographic textures at different locations within a single component so that user-defined functional performance requirements can be met. Due to the non-homogenous structure of FGSs, macroscopic properties such as hardness, wear resistance, corrosion resistivity, thermal conductivity, specific heat and mass density can be altered by the gradual changes in volume fraction of the constituents.

Vapor deposition, plasma spraying, ion-beam assisted deposition, electrodeposition, powder metallurgy and centrifugal casting are some of the conventional manufacturing processes for FGSs. Today, AM provides novel solutions for production of different types of FGSs. AM or three-dimensional (3D) printing is a layer-by-layer manufacturing process in which a part can be built from a 3D computer-aided design (CAD) file sliced in a virtual environment, and then for each slice a machine-specific tool path is generated. Different from conventional, subtractive manufacturing methods, additive manufacturing (AM) is based on an incremental layer by layer manufacturing. AM gives engineers and researchers new design freedom to produce enhanced components or entire assemblies which were previously impossible or impractical to manufacture.

Possibility of production of complex shapes, low cost for prototyping, minimum tooling, high accuracy and high repeatability are some of the advantages of AM of FGSs. But it has also some disadvantages: requirement of post processing, very high specific energy consumption, huge equipment costs in case of metal products and lower productivity rates.

FGSs can be classified as stepwise graded FGSs or continuous graded FGSs in terms of type of grading. FGSs can also be classified as compositionally graded FGSs (the grading is created by the gradual variation) and structurally graded FGSs (the grading is created from graded spatial structure, such as graded porosity and lattice).

In aviation and biomedical industry, FGSs enable creating more functional parts by changing the porosity, and therefore density, across the bulk volume which will combine variation in mechanical properties and which reduces the stress concentration effects near the interface between different phases.

In biomedical industry, especially in orthopedic regenerative medicine, the approach is to implement bio-inspired metallic bone scaffolds and implants that shows similar biomechanical properties and natural structure with bones. For that purpose, metal FGSs are used in different areas of biomedical industry.

Mechanical performance of metal FGSs produced by AM have been investigated in different researches. In most of the researches, it was shown that metal FGSs are superior in terms of mechanical properties compared with their uniform counterparts. Some researches focused on the effect of processing parameters, type of FGSs, type of lattice structure, volume fraction or scanning strategy on mechanical performance of metal FGSs. Phase transformation and microstructure change in AM of FGSs also affect mechanical properties.

Designing of FGSs and representing the material distribution in a meaningful way are two main challenges researchers have faced with so far. For an effective design of FGSs, topology optimization (TO) approaches can be used. In AM, mainly three types of TO methods are used: Solid Isotropic Material Penalization (SIMP) which is a density based TO method in which material distribution is parametrized by the material density distribution [44], bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method which removes and adds material in different locations of the domain during TO and finally level set method which uses the modification of domain boundary approach.

This paper focuses on the metal FGSs produced by AM. It was stated in this paper that metal FGSs can be used in different industries because of their superior mechanical properties compared with their uniform counterparts. By tailoring processing parameters, type of FGSs, type of lattice structures, volume fraction or scanning strategy, mechanical performance of metal FGSs can be altered as desired. Also, using different TO strategies can enable effective design of FGSs.



1. GİRİŞ

İşlevsel olarak derecelendirilmiş yapılar (İDY), mikroyapı, gözeneklilik veya kimyasal kompozisyonun, malzemenin hacmi boyunca kademeli olarak değiştiği bir malzeme çeşididir. İDY ilk kez 1984 yılında Japonya’da bir mühendislik uygulamasında kullanılan plakanın iç ve dış kısımları arasında 1000 K sıcaklık farkı gereksinimi sonucunda önerilmiştir. Günümüze kadar, İDY, ihtiyaç duyulan malzemenin çekme dayanımı ve Young modül değerlerinin değiştirilmesi ile havacılık, otomobil, biomedikal, savunma, enerji, elektrik/elektronik, deniz sanayi, opto-elektronik ve spor endüstrilerinde kullanılmaktadır [1].

İDY, geleneksel yöntemlerle elde edilebilmesi mümkün olmayan mekanik özelliklerin elde edilmesinde [2] ve aynı malzeme içerisinde birden fazla fiziksel özelliğin elde edilmesinde [3] kullanılabilir. Uygun lazer tarama stratejisi ve lazer kaynağı kullanılarak, tek bir parçanın farklı yerlerinde farklı mikroyapılar elde edilerek, malzemeden istenilen fonksiyonel performans gereksinimlerinin karşılandığı İDY’ler üretilmektedir [4]. İDY’lerin homojen olmayan yapılarından dolayı, sertlik, aşınma direnci, paslanma direnci, ısı iletimi, yoğunluk gibi makroskobik özellikler, malzeme içerisindeki bileşenlerin hacim boyunca kademeli olarak değiştirilmesi ile değiştirilebilir [5].

2. METAL İDY’LERİN EKLEMELİ İMALAT (Eİ) İLE ÜRETİLMESİ

Geleneksel olarak İDY’lerin üretiminde buhar biriktirme, plazma püskürtme, iyon ışını destekli biriktirme, elektro biriktirme ve toz metalurjisi gibi yöntemler kullanılabilir [6]. Günümüzde, Eİ, farklı İDY türlerinin üretimi için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Eİ, bilgisayar ortamında oluşturulmuş bir tasarım dosyasının sanal olarak dilimlenmesi ve her bir dilimde / katmanda makineye özgü takım yolunun oluşturulması ile, parçanın katman katman üretilmesi prensibine dayanır [7]. Malzeme çıkarma esasına dayanan geleneksel yöntemlerden farklı olarak, Eİ malzeme biriktirme esasına dayanır [8]. Eİ, mühendislere ve araştırmacılara, daha önce üretilmesi pratik ya da mümkün olmayan karmaşık parçaları tasarlamalarına olanak sağlamaktadır [9].

Metal İDY’lerin Eİ ile üretilmesinde, toz yatağı füzyonu (seçmeli lazer ergitme (SLE), seçmeli lazer sinterleme (SLS), elektron ışınıyla ergitme (EIE)), metal ekstrüzyonu, tabaka laminasyonu, bağlayıcı jeli ile birleştirme ve direk enerji biriktirme (DEB) yöntemleri kullanılabilir [10]. Örneğin, dikey ve radyal yönde gözenekliliğin kademeli olarak değiştiği Ti6Al4V İDY, bağlayıcı jeli ile birleştirme yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiş ve elastisite modülünün gözenekliliğin homojen olduğu parçanınkinden daha yüksek çıktığı belirtilmiştir [11].

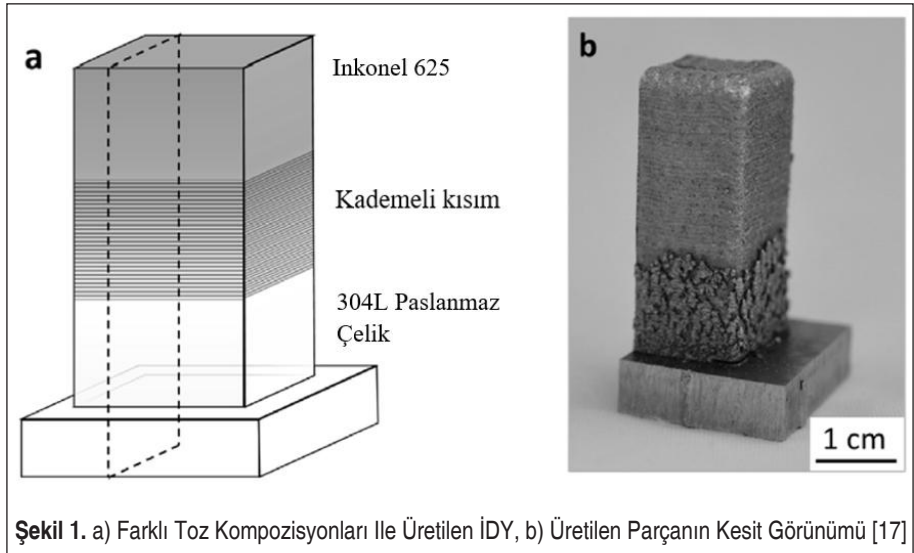
Karmaşık şekillerin üretilebilme ihtimali, düşük prototipleme maliyetleri, asgari kalıp üretimi, yüksek hassasiyet ve işlemin yüksek tekrar edilebilme özellikleri Eİ ile üretilen İDY'lerin bazı avantajlarıdır. Bunun yanında, üretimden sonra ilave bir işleme ihtiyaç duyması, yüksek enerji tüketimi, yüksek ekipman maliyeti ve düşük üretim oranları gibi bazı dezavantajları da vardır [12].

3. METAL İDY'LERİN SINIFLANDIRILMASI

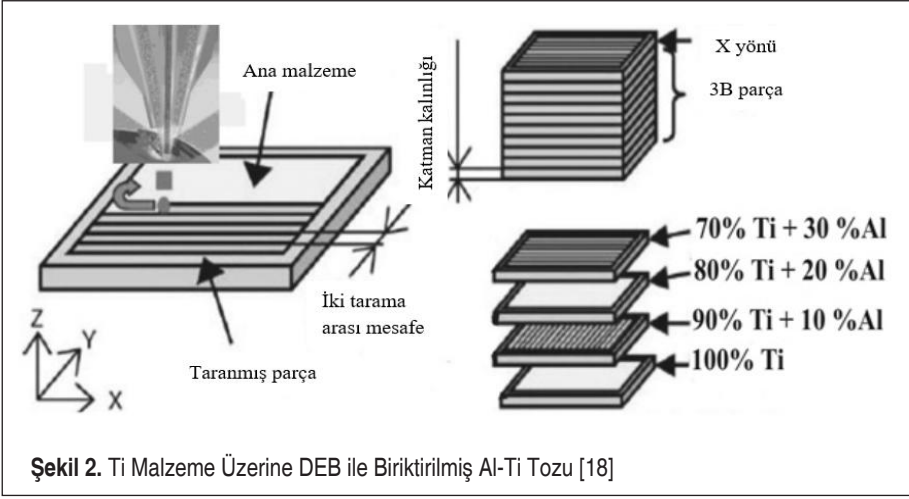
İDY'ler, derecelendirme tipine göre adım adım derecelendirilmiş İDY'ler ve sürekli derecelendirilmiş İDY'ler olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılabilir. İDY'ler aynı zamanda, derecelendirmenin kademeli olarak değiştiği kompozisyonel olarak derecelendirilmiş İDY'ler ve kademeli gözeneklilik ya da kademeli kafes yapılar gibi yapısal olarak derecelendirilmiş İDY'ler olarak ta sınıflandırılabilir [13].

İDY'ler tek bir malzemedan ya da birden fazla malzemedan oluşabilmektedir [14]. Birden fazla malzemedan oluşan İDY'lere örnek olarak, uçak motorlarının türbin kanatlarında ve türbin disklerinde kullanılan malzemelere alternatif olarak geliştirilen ve lazer ergitme biriktirme yöntemiyle üretilen Ti-47Al-2.5V-Cr / Ti-6Al-2Zr-Mo-V İDY'ler verilebilir [15]. Diğer bir örnek olarak, kumlama yapılmış bakır parçaya SLE yöntemi ile tungsten tozunun biriktirilmesi ile oluşan İDY verilebilir [16].

İDY'lerin üretiminde farklı toz türlerinin karışımının farklı kompozisyonları kullanılabilir. Bu tür bir İDY'ye Şekil 1'de gösterilen ve DEB yöntemi ile üretilmiş parça örnek verilebilir. Bu parçada kademeli kısım 24 tabakadan oluşmakta ve her



Şekil 1. a) Farklı Toz Kompozisyonları ile Üretilen İDY, b) Üretilen Parçanın Kesit Görünümü [17]



Şekil 2. Ti Malzeme Üzerine DEB ile Biriktirilmiş Al-Ti Tozu [18]

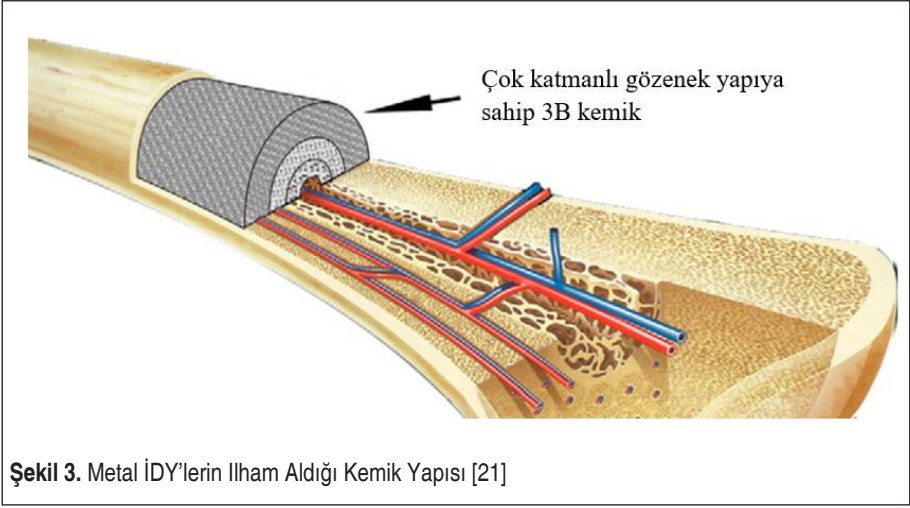
bir tabakada SS304L tozu % 4 azaltılmış ve IN625 tozu aynı miktarda arttırılmıştır [17]. Diğer bir örnek ise Şekil 2’de gösterilen ve yine DEB yöntemi ile üretilmiş, Ti malzeme üzerine farklı kompozisyonlarda Ti-Al tozlarının biriktirilmesi ile oluşan İDY’dir [18]. Genel olarak bu tür İDY’ler, alaşımların uyumluluğu, ara metal fazları oluşumu, çözünürlük sınırlılıkları ve ısıl özelliklerin uyumsuzluğu gibi problemlere sahiptir [19].

4. Eİ İLE ÜRETİLEN METAL İDY’LERİN ENDÜSTRİ UYGULAMALARI

İDY sayesinde, özellikle havacılık ve biomedikal sanayide, kullanılan malzemenin hacmi boyunca gözenekliliğin ve dolayısıyla yoğunluğun değişmesiyle mekanik özellikler değiştirilebilmekte ve bu sayede malzeme üzerinde gerilimin yoğunlaştığı bölgelerin daha az deformasyona uğraması sağlanabilmektedir [20].

Biomedikal sanayide, özellikle ortopedik rejeneratif tıpta, kemik yapısı ile benzer biomekanik ve yapısal özellikler gösteren metal kemik yapılarının ya da implantların kullanılması hedeflenmektedir (Şekil 3)[21]. Bu amaçla, İDY’ler biomedikal endüstrinin farklı kollarında kullanılmaktadır.

Ortopedide, implantların Young Modülünün insan kemiğinkine ile benzer olması gerekmektedir (3–20 GPa). Geleneksel yöntemlere göre üretilen implantların Young Modülünün çok yüksek olmasından dolayı (110–210 GPa), bu implantların Eİ ile üretilmesi ve bu sayede daha düşük Young Modülü değerlerinin elde edilme-



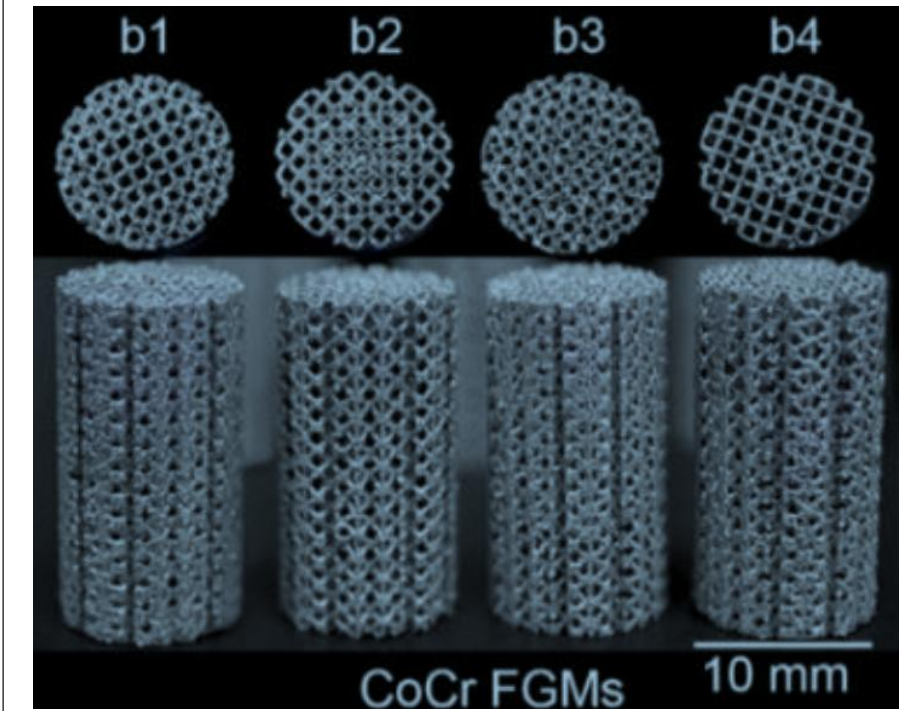
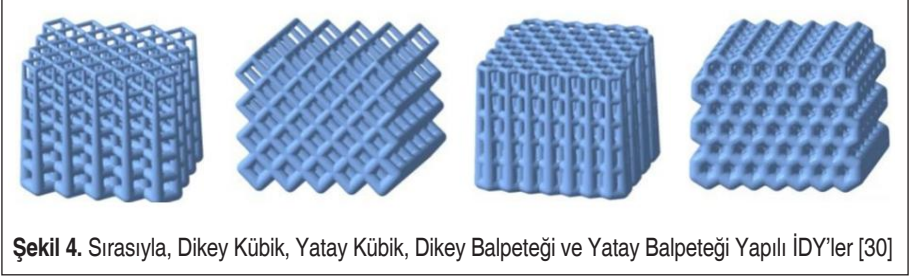
si önem arz etmektedir [22]. Fousová ve arkadaşları, %61 gözenekliliğe ve eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzlü şekilli kafes yapısına sahip Ti6Al4V İDY'yi SLE yöntemiyle üretmişler ve insan kemiğinin Young Modülüne yakın değerler elde etmişlerdir (30.5 ± 2.0 GPa) [23]. Ortopedide, mevcut kemiğin implant uygulanmış yapıya nüfuz etmesi için bazı gereksinimlere ihtiyaç vardır, örneğin, gözenek boyutu 50-800 μm aralığında olmalı ve gözeneklilik % 50'den fazla olmalıdır. Kemik yapısı, gözenekliliğin ve dolayısıyla yoğunluğun kademeli olarak değiştiği bir yapı olduğu için, İDY'ler implant uygulamaları için geleneksel yöntemlere göre daha uygun özellikte malzeme sağlayabilmektedir [25]. Sudarmadji ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre yoğunluğun kademeli olarak değiştiği İDY'lerin SLE yöntemiyle üretilmesi neticesinde elde edilen implantların gözeneklilik, basma ve akma dayanımları, süngerimsi yapıdaki kemiklerinkiyle uyum halindedir [25]. Benzer şekilde, yoğunluğun kademeli olarak değiştiği İDY kalça implantları, SLE yöntemiyle literatürde üretilmiş ve daha yüksek eğilme özellikleri ve daha az ağırlık değerleri elde edilmiştir [26]. İDY'ler, implantın kemiğe osseo-entegrasyonu için elastik özelliklerin ve yüzey pürüzlülüğünün çok önemli olduğu diş implantlarında da kullanılmaktadır [27].

Yapılan araştırmalar, İDY'lerin enerji harcayan yapılar için de çok uygun bir malzeme olduğunu göstermiştir. Hou ve arkadaşlarının bu kapsamda yaptığı bir çalışmaya göre negatif Poisson oranlı kafes yapısına sahip İDY'ler, kafes yapısının düzgün bir şekilde olduğu ve yoğunluğun kademeli olarak değişmediği yapılara göre daha düşük reaksiyon kuvveti göstermekte ve daha yüksek enerji absorbe edebilme özelliği göstermektedir [28].

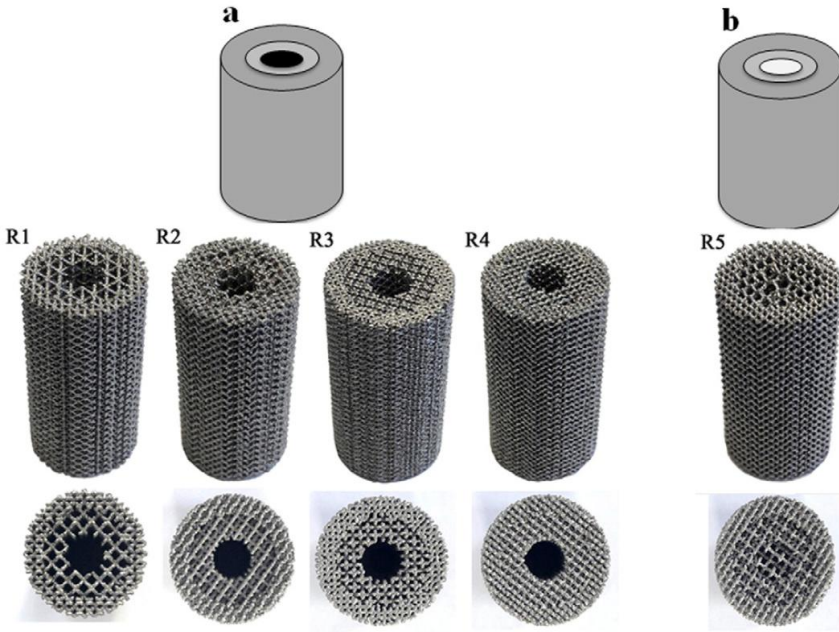
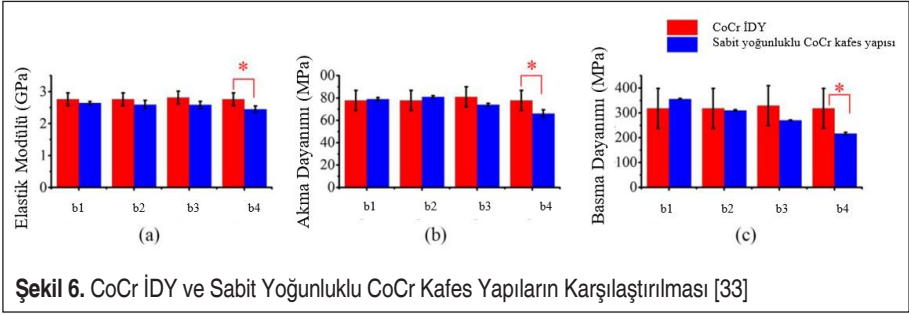


5. Eİ İLE ÜRETİLEN METAL İDY'LERİN MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Literatürde birçok farklı çalışmada Eİ ile üretilen İDY'lerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çoğu çalışmada, İDY'lerin yoğunluğun hacim boyunca sabit olduğu yapılaraya göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir. Xiao ve Song'un SLE yöntemiyle ürettikleri eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzlü kafes yapısına sahip



Şekil 5. CoCr İDY'ler (Merkezi Boş, Merkezi Dolu, Yoğunluğun Merkezden Dışarıya Doğru Arttığı ve Azaldığı, b1-b4) [33]



Ti6Al4V parçalar, statik ve dinamik yüklemeler sonucunda, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıya göre daha yüksek dayanım ve enerji absorbe edebilme özelliği (% 28 daha fazla) göstermiştir [29]. Choy ve arkadaşları da SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V İDY'lerin basma sırasında, en az yoğun olan yerden başlayarak deforme olduğunu ve plato stresi ve enerji absorbe edebilme özelliği açısından yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıya göre daha üstün olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 4) [30]. Benzer bir yorum SLE yöntemiyle üretilen hacim merkezli kübik kafes yapısına



sahip AlSi10Mg yapılar için de yapılmıştır [31]. Al-Saedi ve arkadaşları da SLE yöntemiyle üretilen yüzey merkezli kübik kafes yapısına sahip AlSi-12 yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [32]. Literatürde farklı sonuçlar elde edildiği durumlar da görülmüştür. Limmahakhun ve arkadaşları SLE yöntemiyle farklı kafes yapılarında (merkezi boş, merkezi dolu, yoğunluğun merkezden dışarıya doğru arttığı ve azaldığı) CoCr İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 5). Yazarlar, mekanik özellikler bağlamında, İDY'lerin, yoğunluğun hacme göre değişmediği kafes yapılara göre ciddi bir değişim göstermediği (Şekil 6) ama İDY'lerin daha dengeli mekanik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir [33].

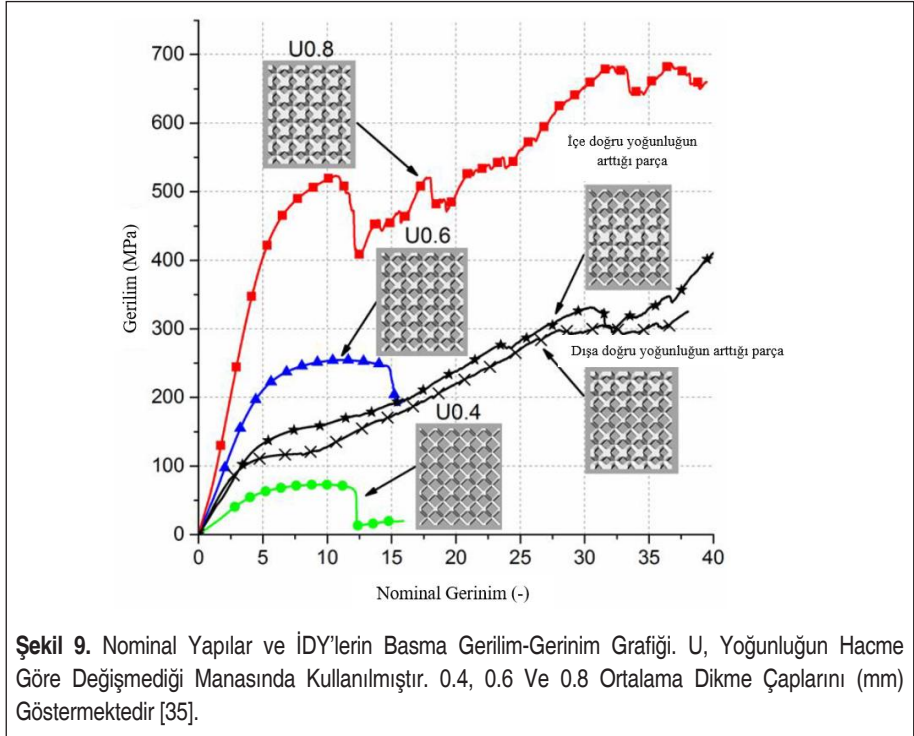
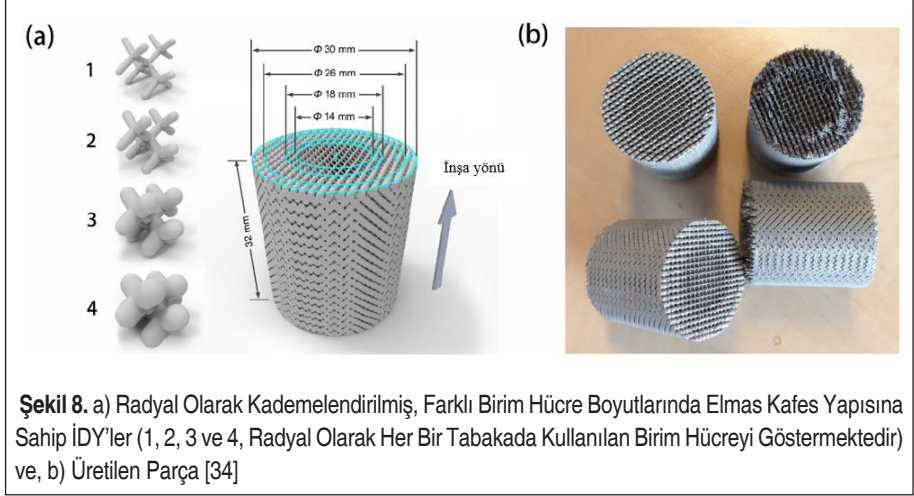
Surmeneva ve arkadaşları, EIE yöntemiyle iki ve üç aşamalı, Ti6Al4V kafes yapılı (hacim merkezli kübik ve elmas) İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 7). Yazarlar, basma testleri sonucunda (Tablo 1), İDY'lerin yoğun yapılara göre daha düşük Young Modülü değerleri gösterdiklerini belirtmişlerdir [21].

Zhang ve arkadaşları, SLE yöntemiyle radyal olarak kademelendirilmiş elmas kafes yapısına sahip Ti6Al4V İDY üretmişlerdir (Şekil 8). Yoğunluğun hacme göre değişmediği gözenekli yapılara göre, üretilen İDY'nin daha düşük yoğunluğa (1.9 g/cm^3), ortalama Young Modülüne (10.44 GPa), yüksek akma dayanımına (170.6 MPa), yüksek azami gerilime (201 MPa) ve kabul edilebilir sünekliliğe sahip olduğunu belirt-

Tablo 1. EIE Yöntemiyle Üretilen Beş Farklı İDY'nin Basma Test Sonuçları [21]

Parametre	Tasarım				
	R1	R2	R3	R4	R5
Ağırlık (g)	5.69 ± 0.06	5.53 ± 0.02	12.25 ± 0.39	12.44 ± 0.28	9.52 ± 0.41
Hacim (cm ³)	2.51	2.51	2.51	2.51	6.04
Yoğunluk, ρ (g/ cm ³)	1.61	1.57	3.48	3.53	1.59
Göreceli Yoğunluk, ρ/ρ_0 ($\rho_0 = 4.43 \text{ g/ cm}^3$)	0.36	0.35	0.78	0.79	0.35
Gözeneklilik (%)	64	65	22	21	65
Basma Dayanımı (MPa)	48 ± 1	31 ± 1	212 ± 1	162 ± 24	49 ± 19
Elastik Modülü (GPa)	1.25 ± 0.47	0.87 ± 0.08	2.26 ± 0.07	3.09 ± 0.55	1.28 ± 0.35
Akma Dayanımı (MPa)	37 ± 1	32 ± 1	-	130 ± 5	47 ± 4
Basma Gerinimi (%)	8	7	-	9	5

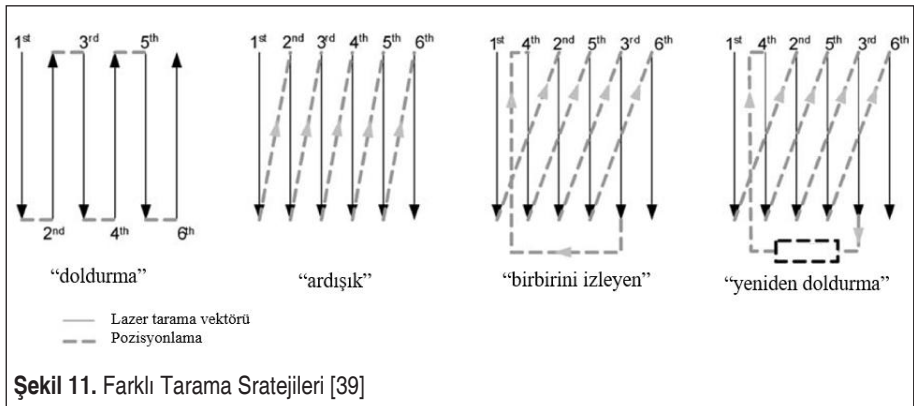
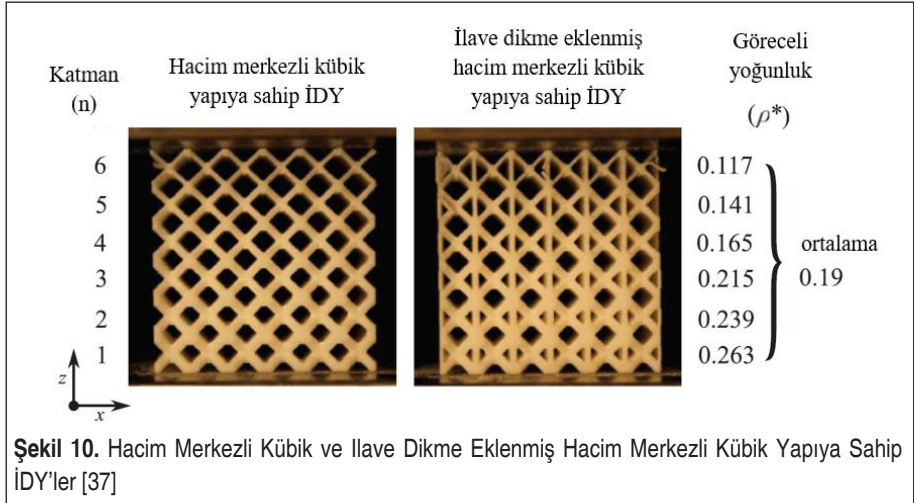
mişlerdir [34]. SLE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V İDY'lerin, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılarla basma durumunda aynı davranışı gösterdiği ama plastik bölgeye geçildikten sonra, yoğunluğun hacme göre değişmediği yapıların aniden deforme





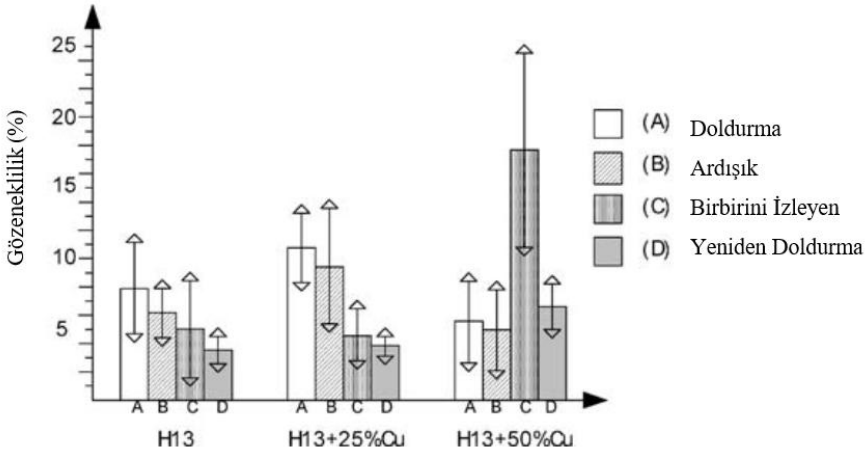
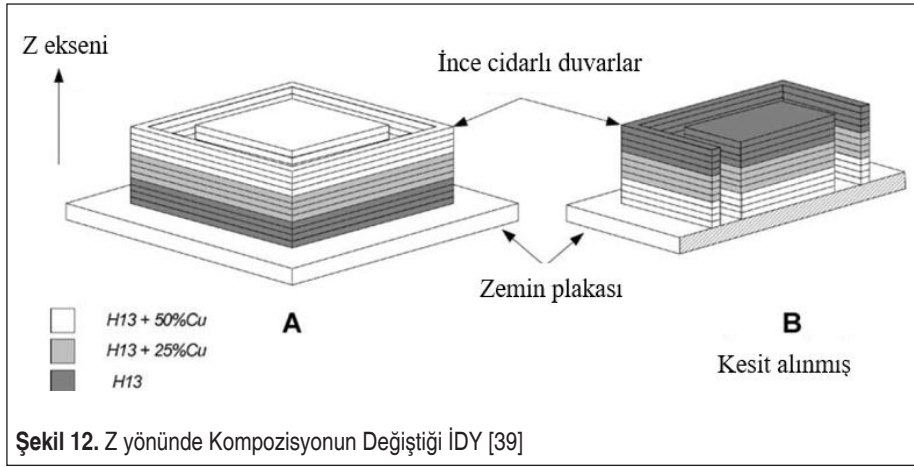
olmasına rağmen İDY'lerde bu sürenin uzadığı belirtilmiştir (Şekil 9) [35]. Zhao ve arkadaşları, EIE yöntemiyle farklı dikme açılarında eşkenar dörtgen yüzeyli on iki yüzü kafes yapısına sahip İDY'ler üretmişlerdir. Yoğunluğun hacme göre değişmediği yapılarla kıyaslandığında, üretilen İDY'lerin düşük yoğunluk ($0.5-2\text{g/cm}^3$), yüksek yorulma dayanımı ($\sim 70\text{ MPa}$) ve yüksek enerji absorbe edebilme özelliği ($\sim 50\text{ MJ/mg}$) gösterdiği belirtilmiştir [36].

Bazı yazarlar, İDY'lerin mekanik performansları üzerinde işleme parametrelerinin, İDY tipinin, kafes yapısı tipinin, hacim oranının ve tarama stratejisinin etkisini incelemişlerdir. Maskery ve arkadaşları, bu amaçla SLS yöntemiyle hacim merkezli kübik ve ortasında ilave dikme bulunan hacim merkezli kübik İDY'ler üretmişlerdir (Şekil 10). Yazarlar, hacim merkezli kübik İDY yapının izotropik olmasına rağmen, ilave dikme eklenmesinin yapıyı anizotropik hale getirdiğini ve hacim merkezli kübik

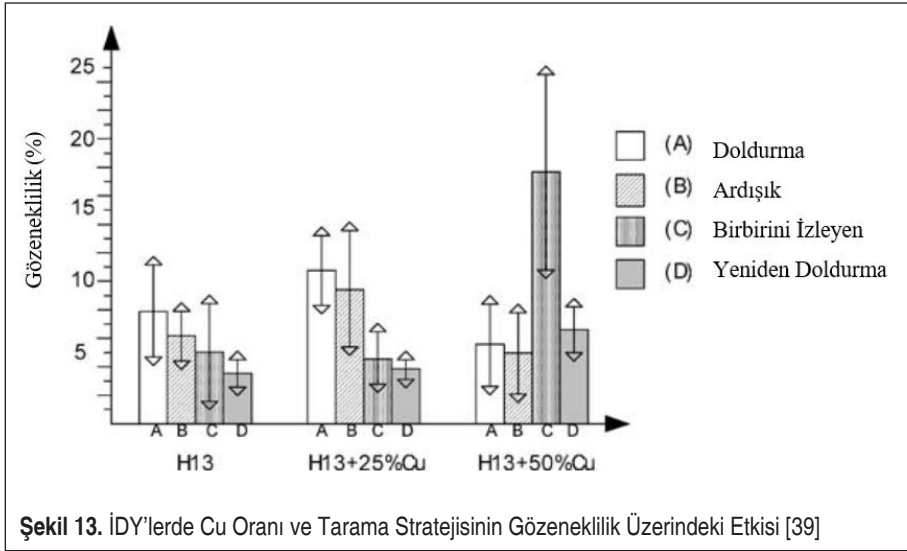


yapılara göre, ilave dikme eklenmesinin, ilave dikme boyunca yapılan yüklemelerde, Young Modülü ve plato dayanımını arttırdığını ama ilave dikmeye dik yönde yapılan yüklemelerde dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Yoğunluğun hacme göre artmadığı yapılar göre, ilave dikmeli hacim merkezli kübik İDY'ler, %114 daha fazla enerji absorbe edebilme özelliği göstermiştir [37].

Han ve arkadaşları ise, farklı hacim oranlarındaki Ti elmas İDY'leri SLE yöntemiyle üretmiş ve hacim oranının artması ve dolayısıyla toplam yoğunluğun azalması ile elastik modülü ve akma dayanımının arttığını belirtmişlerdir [38]. Daha yoğun İDY elde etmek için, Bael ve arkadaşları farklı tarama stratejileri denemişlerdir (Şekil 11). İDY'lerin üretiminde farklı kompozisyonlarda H13-Cu tozlarının kullanıldığı çalış-



Şekil 13. İDY'lerde Cu Oranı ve Tarama Stratejisinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi [39]



Şekil 13. İDY'lerde Cu Oranı ve Tarama Stratejisinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi [39]

mada (%100 H13, %75 H13 - %25 Cu, %50 H13 - %50 Cu) (Şekil 12), daha yoğun İDY'lerin elde edilebilmesi için en uygun tarama stratejisinin “yeniden doldurma” stratejisinin olduğu belirtilmiştir (Şekil 13). Yapılan istatistiksel analizler, gözeneklilik üzerinde en etkili faktörün Cu oranı, ikincisinin ise tarama stratejisi olduğunu göstermiştir [39].

Kafes yapıya sahip İDY'lerin mekanik özellikleri üzerinde dikme boyutlarının da ciddi etkisi vardır. Parthasarathy ve arkadaşlarının, EIE yöntemiyle ürettikleri kafes yapıya sahip İDY'lerde, dikme boyutlarının azalması ile tasarlanan ve üretilen İDY arasındaki mekanik özellik farklarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, hemen hemen aynı gözenekliliğe (%49.75 and %50.75) sahip kafes yapıya sahip İDY'lerde, dikme boyutlarındaki azalma ile basma dayanımının 2.92 GPa'dan 0.57 GPa'a, basma geriliminin ise 163.02 MPa'dan 7.28 MPa'a düştüğü belirtilmiştir [40].

Mekanik özellikler üzerinde farklı kafes yapı tiplerinin de etkisi vardır. Liu ve arkadaşlarının SLE yöntemiyle ürettikleri Ti6Al4V gyroid ve elmas kafes yapıları İDY'lerde, elmas kafes yapıları İDY'nin daha fazla yüzey alanına ve daha küçük gözeneklere sahip olduğu, gyroid kafes yapıları İDY'lerin ise daha fazla sünekliliğe ve azami dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir [41].

Faz değişimi ve mikroyapı değişiminin de Eİ ile üretilen metal İDY'lerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu literatürde belirtilmiştir. Zhang ve arkadaşları, SLE yöntemiyle hacim merkezli kübik yapıya sahip Ti6Al4V İDY'ler üretmişlerdir. Yazarlar, üretilen parçanın daha çok α' martenzit mikroyapıya sahip olduğu ama ısı işleminden sonra mikroyapının $\alpha+\beta$ yapısına dönüştüğü ve bu mikroyapı dönüşümün-



den dolayı, kırılğan olan üretilmiş parçanın ısıl işlemden sonra sünek hale geldiğini belirtmişlerdir [42]. Wei ve arkadaşları da SLE yöntemiyle farklı kompozisyonlarda 316L/Cu10Sn toz karışımını kullanarak (% 100 316L, %75 316L, %50 316L, %25 316L ve %100 Cu10Sn) İDY parçalar üretmişler ve üretim sırasında oluşan ikinci faz Cu₉NiSn₃'ün üretilen 316L/Cu10Sn parçanın sertliğini arttırdığını ve en yüksek değerine (213.24 HV) %50 316L kompozisyonunda ulaştığını belirtmişlerdir [43].

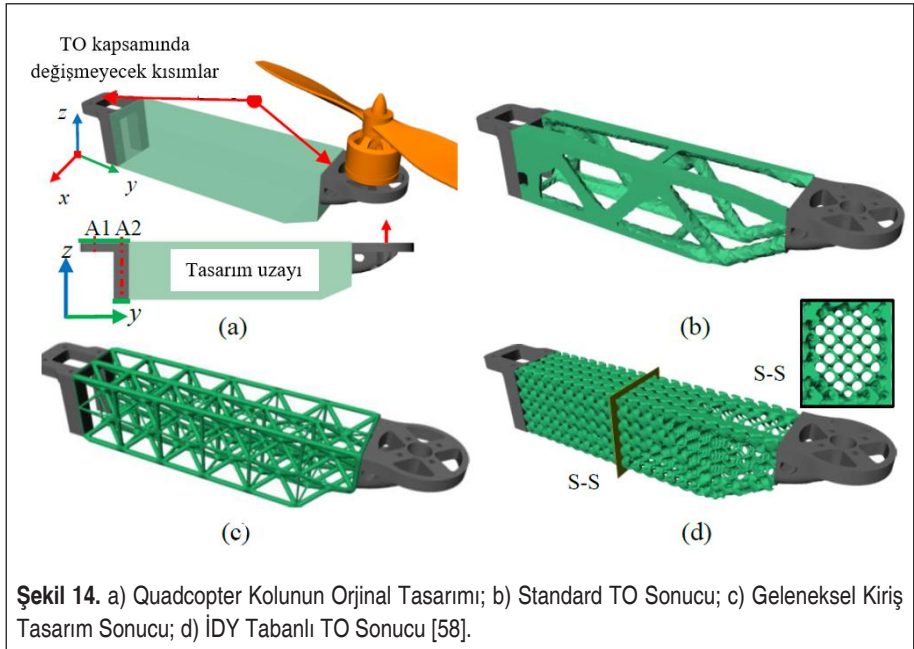
6. METAL İDY'LERİN TASARIMI İÇİN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU

İDY'lerin tasarlanması ve malzeme dağılımının parça üzerinde anlamlı bir şekilde gösterilmesi uzun süredir araştırmacıların karşılaştığı iki büyük problemdir [3]. İDY'lerin verimli bir şekilde tasarlanması için, topoloji optimizasyon (TO) yöntemleri kullanılabilir. Eİ'de, üç farklı TO yöntemi kullanılmaktadır: malzeme dağılımının, malzeme yoğunluk dağılımına göre parametrelendirildiği, yoğunluk tabanlı TO metodu olan Katı İzotropik Malzeme Penalizasyonu (KİMP) [44], parçanın farklı yerlerinde ve bölgelerinde malzeme ekleme veya çıkarma yöntemine dayanan iki yönlü evrimsel yapısal optimizasyonu yöntemi (İEYO) [45] ve son olarak alan sınırı değişimi yaklaşımını kullanan seviye ayarlama metodu [46].

İDY tasarımı için literatürde bu temel yöntemler farklı şekillerde kullanılmıştır. Bu kısımda çok farklı özellikler içeren ve karmaşık olan bu TO yöntemlerinin uygulanma biçimlerinden kısaca bahsedilecektir. Paulino ve arkadaşları, kademeli sonlu eleman kavramının kullanılarak malzeme özelliklerinin tasarım alanı içinde sürekli değiştiği KİMP tabanlı "sürekli topoloji optimizasyonu" formülasyonu kullanmışlardır [47]. Zhang ve arkadaşları, hücresel yapının önce mikroyapı karakterizasyon parametreleri ile temsil edildiği ve daha sonra sürekli karakterizasyon parametrelerinin tek tek hücrelere eşleştirilmesiyle açık bir hücresel yapının oluşturulduğu bir yöntem önermişlerdir [48]. Daynes ve arkadaşları, kafes hücrelerinin, yük taşıyan kafes giriş elemanlarını ana gerilmelerle hizalamak için boyut, en boy oranı ve yönelim açısından fonksiyonel olarak derecelendirildiği izostatik çizgi yöntemini kullanmışlardır. Optimizasyon için mevcut olan bu ek tasarım değişkenleri nedeniyle, sertlik ve mukavemete iyileşmenin sağlandığını belirtmişlerdir [49]. Cheng ve arkadaşları, kafes yapıların etkili mekanik özelliklerinin, mikroyapıları detaylı bir şekilde modellemeden anizotropik kurucu yasalarla tarif edildiği homojenizasyon tabanlı topoloji optimizasyonunu (HMTO) kullanmışlardır. Topolojik olarak optimize edilmiş bir parçanın sertliğinin ve mukavemetinin sırasıyla % 110 ve % 75'ten fazla arttığını bulmuşlardır [50]. Jin ve arkadaşları, etkili mekanik özelliklerin göreceli yoğunluğun fonksiyonları olarak kullanıldığı TO ile birleştirilmiş bir yoğunluk-değişken kafes yapı tasarım yöntemi önermişlerdir [51]. Liu ve arkadaşları, birim hücredeki bileşenlerin / boşlukların



geometrisini karakterize eden topoloji tasarım fonksiyonlarına göre bir dizi koordinat pertürbasyon fonksiyonunun (CPF) pertürbasyon katsayılarını optimize ederek açık topoloji optimizasyonunu kullanmışlardır. Her ne kadar yazarların önerdiği yöntem, karmaşık ve optimize edilmiş kademeli kafes/gözenekli yapılarla sonuçlansa da, özellik boyutu kısıtlamalarının problem formülasyonuna dahil edilmemesinden dolayı optimize edilmiş sonuçlarda hala bazı yetersiz bileşenlerin olduğu belirtilmiştir [52]. Panesar ve arkadaşları, farklı TO tasarım stratejileri (yani Kesişen/Kademeli/Ölçekli kafesler) kullanmışlar ve bu tasarım stratejilerinin, homojen kafeslere kıyasla sertlikte %40-50 artışa neden olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, kademeli kafes stratejisinin, yüklemeye değişkenlerine karşı yüksek dayanıklılığı nedeniyle mekanik performans açısından en sağlam strateji olduğunu belirtmişlerdir [53]. Gyroid ve elmas gibi üçlü periyodik minimum yüzey olarak adlandırılan kafes yapıları oluşturmak için Li ve arkadaşları, bir tasarım alanında ve verilen sınır koşulları altında kafes yapıların göreceli yoğunluğunun yeniden dağıtılmasının mekanik sertlik veya ısı iletim optimizasyonu ile sonuçlandığı üretken bir tasarım ve optimizasyon yaklaşımı kullanmışlardır [54]. Yi ve arkadaşları, KİMP yöntemindeki yoğunluk alanında, değişken yarıçaplı Helmholtz PDE-filtresi uygulamışlardır. Burkulma kısıtlamaları olarak, doğrusal burkulma analizinden elde ettikleri burkulma yük faktörlerini kullanmışlar ve bu yöntemin KİMP'tekilerle karşılaştırılabilir katı yapılar üretebileceği sonucuna varmışlardır [55]. Cheng ve arkadaşları, kafes malzemesinin elastik özelliklerini göreceli yoğun-





luk açısından hesaplamak için bir asimtotik homojenizasyon yöntemi kullanmışlar ve kafes yapısının plastik performansını tahmin etmek için hidrostatik yükleme dikkate alınarak modifiye edilmiş Hill akma kriteri uygulamışlardır. Gerilim temelli kafes tasarımının yapının hem elastik hem de plastik özelliklerini önemli ölçüde artırabileceği sonucuna varmışlardır [56]. Goel ve Anand, hacim merkezli kübik birim hücresi ile düzgün şekilde bağlanmış İDY'leri geliştirmek için B-spline yüzey tabanlı metodolojiyi kullanmışlardır. Yazarlar, Eİ'de İDY'leri üretebilmek için, bu yöntemin telafi değerleri uygulanmış dikme çapları, gözenek boyutu ve küçük açıklıklar gibi bazı tasarım parametrelerine ihtiyaç duyduğunu belirtmişlerdir [57].

İDY'lerin TO'suna örnek olarak, bir quadcopter kol tasarımı (Şekil 14) verilebilir. Optimize edilmiş İDY quadcopter kolunun yer değiştirmesinin, aynı sınır ve yükleme koşulları için geleneksel tasarımından %44.7 daha az olduğu gösterilmiştir [58].

7. SONUÇ VE İLERİKİ ÇALIŞMALAR

Bu makalede Eİ yöntemiyle üretilen metal İDY'lerden bahsedilmiştir. Metal İDY'lerin, üstün mekanik özelliklerinden dolayı, sabit yoğunluklu muadillerine göre farklı endüstrilerde kullanılabileceği belirtilmiştir. İşleme parametrelerini, İDY'lerin tipini, kafes yapılarının tipini, hacim oranını veya tarama stratejisini değiştirerek, metal İDY'lerin mekanik performansı istenildiği gibi değiştirilebilir. Ayrıca, farklı TO stratejilerinin kullanılması İDY'lerin etkili tasarımını mümkün kılabilir. Literatürün ayrıntılı araştırılması, Eİ yöntemiyle üretilen metal İDY'lerin gelecekteki çalışmalarda araştırılması ve çözülmesi gereken bazı zorlukları ve sorunları olduğunu göstermektedir. Araştırmacılara, gelecekteki çalışmalar için yön verebilecek bu zorluk ve sorunlardan bazıları şu şekilde belirtilebilir;

- Eİ ile üretilen metal İDY uygulamaları için “malzeme-ürün-üretim” ilkeleri, yöntemleri ve standartları halen araştırılmaktadır [14].
- Parametreler ve testler açısından uygun bir İDY veri tabanı mevcut değildir. Bu nedenle, araştırmalar gelişmiş test yöntemleri geliştirmeye odaklanabilir [59].
- İDY tasarımı, bilgisayar destekli tasarım yazılımının kullanımını içerir. Ancak, düşük yoğunluktan yüksek yoğunluklu alanlara geçiş bölgelerinin modellenmesi hala bazı geometrik problemlerle karşı karşıyadır ve çok fazla zaman gerektirir. Bu sürenin kısaltılması için yöntemler geliştirilmesi konusunda yapılan çalışmalar çok yetersizdir [60].
- Metal İDY üretiminin çoğu SLE, DEB veya EIE yöntemleriyle yapılmaktadır. Diğer Eİ yöntemleri, örneğin SLS, İDY'lerin üretiminde kullanılabilir.
- Bilgisayar destekli tasarım teknolojisi ve optimizasyon araçlarındaki ilerlemelerle, kademeli parça tasarımları için farklı kafes yapıları kullanılabilir. Literatürde kafes yapıları olan birkaç İDY vardır.



- Literatürde işleme parametrelerinin İDY'lerin mekanik performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır, ancak metal İDY'lerin yorulma davranışı ve işleme parametrelerinin bu yorulma davranışı üzerindeki etkisi hala ayrıntılı araştırmaya ihtiyaç duymaktadır [13].

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKÇA

1. **Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T.** 2017. *Functionally graded materials*, ISBN: 978-3-319-85236-2 Springer International Publishing, Switzerland.
2. **Sha, Y., Jiani, L., Haoyu, C., Ritchie, R. O., Jun, X.** 2018. "Design and strengthening mechanisms in hierarchical architected materials processed using additive manufacturing". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 149, p. 150-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.038>.
3. **Stoner, B., Bartolai, J., Kaweesa, D. V., Meisel, N. A., Simpson, T. W.** 2018. "Achieving functionally graded material composition through bicontinuous mesostructural geometry in material extrusion additive manufacturing", *JOM*, vol. 70, p. 413-418. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2669-z>.
4. **Popovich, V. A., Borisov, E. V., Popovich, A. A., Sufiarov, V. S., Masaylo, D. V., Alzina, L.** 2017. "Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties", *Materials & Design*, vol. 114, p. 441-449. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.075>.
5. **Naebe, M., Shirvanimoghaddam, K.** 2016. "Functionally graded materials: A review of fabrication and properties", *Applied Materials Today*, vol. 5, p. 223-245. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>.
6. **Popoola, P., Farotade, G., Fatoba, O., Popoola, O.** 2016. "Laser engineering net shaping method in the area of development of functionally graded materials (FGSs) for aero engine applications - a review", <https://www.intechopen.com/books/fiber-laser/laser-engineering-net-shaping-method-in-the-area-of-development-of-functionally-graded-materials-fgm>, son erişim tarihi: 21.08.2020.
7. **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, ISBN: 978-3-319-91713-9, Springer International Publishing, Switzerland.
8. **Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C.** 2016. "Additive manufacturing of metals", *Acta Materialia*, vol. 117, p. 371-392. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.
9. **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*, vol. 31, p. 100947. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100947>.
10. **Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H.** 2003. "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering A*, vol. 362, p. 81-105. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00578-1](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00578-1).
 11. **Barui, S., Chatterjee, S., Mandal, S., Kumar, A., Basu, B.** 2017. "Microstructure and compression properties of 3D powder printed Ti-6Al-4V scaffolds with designed porosity: Experimental and computational analysis", *Materials Science and Engineering: C*, vol. 70, p. 812-823. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.09.040>.
 12. **El-Galy, I. M., Saleh, B. I., Ahmed, M. H.** 2019. "Functionally graded materials classifications and development trends from industrial point of view", *SN Applied Sciences*, vol. 1, p. 1378. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1413-4>.
 13. **Chen, Y., Liou, F.** 2018. "Additive manufacturing of metal functionally graded materials: a review", *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
 14. **Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., Monzon, M. D.** 2018. "An overview of functionally graded additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 23, p. 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.023>.
 15. **Qu, H. P., Li, P., Zhang, S. Q., Li, A., Wang, H. M.** 2010. "Microstructure and mechanical property of laser melting deposition (LMD) Ti/TiAl structural gradient material", *Materials and Design*, vol. 31, p. 574-582. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.004>.
 16. **Tan, C., Zhou, K., Kuang, T.** 2019. "Selective laser melting of tungsten-copper functionally graded material", *Materials Letters*, vol. 237, p. 328-331. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.11.127>.
 17. **Carroll, B. E., Otis, R. A., Borgonia, J. P., Suh, J., Dillon, R. P., Shapiro, A. A., Hofmann, D. C., Liu, Z-K., Beese, A. M.** 2016. "Functionally graded material of 304L stainless steel and inconel 625 fabricated by directed energy deposition: Characterization and thermodynamic modeling", *Acta Materialia*, vol. 108, p. 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.019>.
 18. **Shishkovsky, I., Missemmer, F., Smurov, I.** 2012. "Direct metal deposition of functionally graded structures in Ti-Al system", *Physics Procedia*, vol. 39, p. 382-391. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.052>.
 19. **Reichardt, A., Shapiro, A. A., Otis, R., Dillon, R. P., Borgonia, J. P., McEnerney, B. W., Hosemann, P., Beese, A. M.** 2020. "Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials", *International Materials Reviews*. <https://doi.org/10.1080/09506608.2019.1709354>.
 20. **Mahmoud, D., Elbestawi, M. A.** 2017. "Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 1, no. 2, p. 13. <https://doi.org/10.3390/jmmp1020013>.

21. **Surmeneva, M. A., Surmenev, R. A., Chudinova, E. A., Koptioug, A., Tkachev, M. S., Gorodzha, S. N., Rännar, L-E.** 2017. "Fabrication of multiple-layered gradient cellular metal scaffold via electron beam melting for segmental bone reconstruction", *Materials & Design*, vol. 133, p. 195-204. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.059>.
22. **Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., Lin, Y., Liu, W., Chen, B., Shen, Q., Zhang, L., Lavernia, E. J.** 2019. "Additive manufacturing of functionally graded materials: A review", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 764, p. 138209. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138209>.
23. **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*, vol. 69, p. 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.01.043>.
24. **Mahbod, M., Asgari, M.** 2019. "Elastic and plastic characterization of a new developed additively manufactured functionally graded porous lattice structure: Analytical and numerical models", *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 155, p. 248-266. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.041>.
25. **Sudarmadji, N., Tan, J. Y., Leong, K. F., Chua, C. K., Loh, Y. T.** 2011. "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in selective laser-sintered polyhedrals for functionally graded scaffolds", *Acta Biomaterialia*, vol. 7, no. 2, p. 530-537. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2010.09.024>.
26. **Hazlehurst, K. B., Wang, C. J., Stanford, M.** 2014. "An investigation into the flexural characteristics of functionally graded cobalt-chrome femoral stems manufactured using selective-laser melting", *Materials and Design*, vol. 60, p. 177-183. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.068>.
27. **Trainia, T., Mangano, C., Sammons, R. L., Mangano, F., Macchib, A., Piattelli, A.** 2008. "Direct laser-metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for the manufacture of porous titanium dental implants", *Dental Materials*, vol. 24, no. 11, p. 1525-1533. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.029>.
28. **Hou, W., Yang, X., Zhang, W., Xia, Y.** 2018. "Design of energy-dissipating structure with functionally graded auxetic cellular material", *International Journal of Crashworthiness*, vol. 23, no. 4, p. 366-376. <https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1328764>.
29. **Xiao, L., Song, W.** 2018. "Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 111, p. 255-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018>.
30. **Choy, S. Y., Sun, C.-N., Leong, K. F., Wei, J.** 2017. "Compressive properties of functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials & Design*, vol. 131, p. 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.006>.
31. **Maskery, I., Aboulkhair, N., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Wildman, R. D., Hague, R. J. M.** 2016. "A mechanical property evaluation of graded density Al-Si10-Mg lattice structures manufactured by selective laser melting", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 670, p. 264-274. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.013>.



32. **Al-Saedi, D. S. J., Masood, S. H., Faizan-Ur-Rab, M., Alomarah, A., Ponnusamy, P.** 2018. "Mechanical properties and energy absorption capability of functionally graded F2BCC lattice fabricated by SLM", *Materials & Design*, vol. 144, p. 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.01.059>.
33. **Limmahakhun, S., Oloyede, A., Sitthiseripratip, K., Xiao, Y., Yan, C.** 2017. "Stiffness and strength tailoring of cobalt chromium graded cellular structures for stress-shielding reduction", *Materials & Design*, vol. 114, p. 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.090>.
34. **Zhang, X.-Y., Fang, G., Leeflang, S., Zadpoor, A. A., Zhou, J.** 2018. "Topological design, permeability and mechanical behavior of additively manufactured functionally graded porous metallic biomaterials", *Acta Biomaterialia*, vol. 84, p. 437-452. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.12.013>.
35. **Onal, E., Frith, J. E., Jurg, M., Wu, X., Molotnikov, A.** 2018. "Mechanical properties and in vitro behavior of additively manufactured and functionally graded Ti6Al4V porous scaffolds", *Metals*, vol. 8, p. 200. <https://doi.org/10.3390/met8040200>.
36. **Zhao, S., Li, S., Wang, S., Hou, W., Li, Y., Zhang, L., Hao, Y., Yang, R., Misra, R. D. K., Murr, L. E.** 2018. "Compressive and fatigue behavior of functionally graded Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting", *Acta Materialia*, vol. 150, p. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.02.060>.
37. **Maskery, I., Hussey, A., Panesar, A., Aremu, A., Tuck, C., Ashcroft, I., Hague, R.** 2016. "An investigation into reinforced and functionally graded lattice structures", *Journal of Cellular Plastics*, vol. 53, no. 2, p. 151-165. <https://doi.org/10.1177/0021955X16639035>.
38. **Han, C., Li, Y., Wang, Q., Wen, S., Wei, Q., Yan, C., Hao, L., Liu, J., Shi, Y.** 2018. "Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 80, p. 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.01.013>.
39. **Beal, V. E., Erasenthiran, P., Hopkinson, N., Dickens, P., Ahrens, C. H.** 2006. "The effect of scanning strategy on laser fusion of functionally graded H13/Cu materials", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, no. 9-10, p. 844-852. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0130-x>.
40. **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*, vol. 13, no. 2, p. 160-170. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.01.004>.
41. **Liu, F., Mao, Z., Zhang, P., Zhang, D. Z., Jiang, J., Ma, Z.** 2018. "Functionally graded porous scaffolds in multiple patterns: New design method, physical and mechanical properties", *Materials & Design*, vol. 160, p. 849-860. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.053>.
42. **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*, vol. 736, p. 288- 297. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.084>.



43. **Wei, C., Sun, Z., Chen, Q., Liu, Z., Li, L.** 2019. "Additive manufacturing of horizontal and 3d functionally graded 316L/Cu10Sn components via multiple material selective laser melting", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 141, no. 8, p. 081014. <https://doi.org/10.1115/1.4043983>.
44. **Bendsøe, M. P.** 1989. "Optimal shape design as a material distribution problem", *Structural Optimization*, vol. 1, p. 193-202. <https://doi.org/10.1007/BF01650949>.
45. **Tang, Y., Kurtz, A., Zhao, F. Y.** 2015. "Bidirectional Evolutionary Structural Optimization (BESO) based design method for lattice structure to be fabricated by additive manufacturing", *Computer-Aided Design*, vol. 69, p. 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.06.001>.
46. **Liu, J., Yu, H., To, A. C.** 2018. "Porous structure design through Blinn transformation-based level set method", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 57, p. 849-864. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1786-1>.
47. **Paulino, G. H., Silva, E. C. N.** 2005. "Design of functionally graded structures using topology optimization", *Materials Science Forum*, vol. 492-493, p. 435-440. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.492-493.435>.
48. **Zhang, P., Toman, J., Yu, Y., Biyikli, E., Kirca, M., Chmielus, M., To, A. C.** 2014. "Efficient design-optimization of variable-density hexagonal cellular structure by additive manufacturing: theory and validation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 137, no. 2, p. 021004. <https://doi.org/10.1115/1.4028724>.
49. **Daynes, S., Feih, S., Lu, W. F., Wei, J.** 2017. "Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines", *Materials & Design*, vol. 127, p. 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.082>.
50. **Cheng, L., Zhang, P., Biyikli, E., Jiayi, B., Robbins, J., Albert, T.** 2017. "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, no. 4, p. 660-677. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2016-0069>.
51. **Jin, X., Li, G.-X., Zhang, M.** 2017. "Design and optimization of nonuniform cellular structures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 232, no. 7, p. 1280-1293. <https://doi.org/10.1177/0954406217704677>.
52. **Liu, C., Du, Z., Zhang, W., Zhu, Y., Guo, X.** 2017. "Additive manufacturing-oriented design of graded lattice structures through explicit topology optimization", *Journal of Applied Mechanics*, vol. 84, no. 8, p. 081008. <https://doi.org/10.1115/1.4036941>.
53. **Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I.** 2018. "Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 19, p. 81-94. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.008>.
54. **Li, D., Dai, N., Tang, Y., Dong, G., Zhao, Y. F.** 2019. "Design and optimization of graded cellular structures with triply periodic level surface-based topological shapes", *Journal of Mechanical Design*, vol. 141, no. 7, p. 071402. <https://doi.org/10.1115/1.4042617>.



55. **Yi, B., Zhou, Y., Yoon, G. H., Saitou, K.** 2019. “Topology optimization of functionally-graded lattice structures with buckling constraints”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 354, p. 593-619. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.05.055>.
56. **Cheng, L., Bai, J., To, A. C.** 2019. “Functionally graded lattice structure topology optimization for the design of additive manufactured components with stress constraints”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 344, p. 334-359. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.10.010>.
57. **Goel, A., Anand, S.** 2019. “Design of functionally graded lattice structures using B-splines for additive manufacturing”, *Procedia Manufacturing*, vol. 34, p. 655-665. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.193>.
58. **Li, D., Liao, W., Dai, N., Dong, G., Tang, Y., Xie, Y. M.** 2018. “Optimal design and modeling of gyroid-based functionally graded cellular structures for additive manufacturing”, *Computer-Aided Design*, vol. 104, p. 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.003>.
59. **Bhavar, V., Kattire, P., Thakare, S., Patil, S., Singh, R. K. P.** 2017. “A review on functionally gradient materials (FGSs) and their applications, 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017), Phuket, Thailand.
60. **Dumas, M., Terriault, P., Brailovski, V.** 2017. “Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials”, *Materials & Design*, vol. 121, p. 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.021>.