

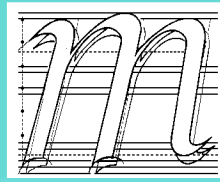
ISSN 2667-4297

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 19

Sayı: 2

Kasım 2021



m a t i m

**Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
ATILIM ÜNİVERSİTESİ - ANKARA**

Yayın Kurulu

Editör: Erhan İlhan Konukseven
Yardımcı Editör: Hakan Kalkan
Yardımcı Editör: Oğuzhan Yılmaz
Yardımcı Editör: Sezer Özerinç

ODTÜ
Atılım Üniversitesi
Gazi Üniversitesi
ODTÜ

Kurul Üyeleri

Metin Akkök
Can Çoğun
Mustafa Bakkal
Cemal Merih Şengönül
Erhan Budak
İsmail Durgun
Volkan Esat
Mehmet Fırat
Hüseyin Filiz
Necdet Geren
Mustafa İ. Gökler
Yiğit Karpat
İsmail Lazoğlu
İzzet Özdemir
Tuğrul Özel
Ferruh Öztürk
Evren Yasa
İ. Ethem Saklakoğlu
Halim Meço
Yusuf Kaynak
Ali Oral
Haydar Livatyalı

ODTÜ
Çankaya Üniversitesi
İTÜ
Atılım Üniversitesi
Sabancı Üniversitesi
ID ARGE Eğitim Danışmanlık
ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Sakarya Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
ODTÜ
Bilkent Üniversitesi
Koç Üniversitesi
İYTE
Rutgers Üniversitesi
Uludağ Üniversitesi
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
EGE Üniversitesi
FNSS
Marmara Üniversitesi
Balıkesir Üniversitesi
YTÜ

Danışma Kurulu

Tuna BALKAN
Melik DÖLEN
O. Selçuk YAŞI
Yiğit YAZICIOĞLU
Orhan YILDIRIM

ODTÜ
ODTÜ
ENVY A.Ş.
ODTÜ
ODTÜ

Yazışma Adresi, Telefon ve Faks

Makina Tasarım ve İmalat Derneği
Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi
ATILIM Üniversitesi
İncek, ANKARA
Tel : (312) 586 8860, 586 8368, Faks : (312) 586 8091
Web : <http://www.matim.org.tr>
e-mail : iletisim@matim.org.tr

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 19 Sayı: 2

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 19 No: 2

ISSN 2667-4297

TELİF HAKKI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde yayımlanan bütün yazıların telif hakkı MAKİNA TASARIM VE İMALAT Derneği'nindir. Yayımlanmış yazıların başka bir yerde tekrar yayımlanması, çoğaltılması ve dağıtılması, Yayın Kurulundan yazılı izin almak koşulu ile mümkündür. Makalelerdeki görüşlerden doğacak sorumluluk makale yazarına aittir.

DIZGİ

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

DERLEME MAKALELERİ

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapılar 53

Orhan Gülcan

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri Üzerine Etki Eden Faktörler 64

Orhan Gülcan

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Havacılık Endüstrisinde Kullanılmak Üzere Alüminyum Malzemelerin Korozyon Direncinin Arttırılması Amacıyla Yüzey Kaplaması Geliştirilmesi 82

**Çağlar Ceylan
Bahtiyar Duran
Osman Furkan Koçyiğit
Cem Koçer
Berkay Doğan
Tuğçe Hacaloğlu
Cemal Merih Şengönül
Bilgin Kaftanoğlu**

Teknoloji Tasarımcılarının Paradoksu: Özgünlük mü? Veriye Dayalı Tasarım mı? 88

Ahmet Raşit Petekci

Optimization of Process Parameters in Drilling Process of Forged Ecofriendly Low-Lead Brass Alloy 96

**Nima Zoghipour
Ferhat Çelik
Yusuf Kaynak**

Sayın Okurlarımız,

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi 1986 yılından bu yana özgün araştırmaları yayımlayan hakemli bir dergi olarak süreklilik kazanmıştır. 2001 yılında dergimize ISBN (ISBN1302-9487) numarası verilmiş, TÜBİTAK tarafından ulusal veri tabanına alınmış ve dergi basım adedi artırılarak Türkiye’de daha yaygın dağıtımı sağlanmıştır.

Yayın kurulumuz dergiye özgün çalışma ürünü, derleme veya bir bilgi ve tecrübe aktarımını sağlayacak makaleler bulmak konusunda katılımlarınızı beklemektedir. Ayrıca kitap tanıtımı, konu taraması ve sanayi kuruluşlarının etkinliklerini içeren yazılara da geçmişte olduğu gibi yer verilmektedir.

Dergimiz, 2017 yılından beri TÜBİTAK DERGİPARK ortamında yayınlanmaktadır. (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim>) 2019 yılından beri elektronik yayına dönmemiz nedeni ile dergi ISSN-No 2667-4297 olmuştur. Dergimizin eski sayılarına da bu ortamda (<http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim/archive>) ulaşılabilir. Ayrıca yeni web sayfamızda (<http://matim.org.tr/>) Dergimiz ve Derneđimiz ile ilgili bilgiler bulunmaktadır. Ayrıca, dergimiz 2020 yılında TR Dizin tarafından önceki yıllarda olduğu gibi tekrar incelemeye alınmıştır. (<https://app.trdizin.gov.tr>)

Dergimizi, endüstri ve akademik kuruluşlarımızın karşılıklı bilgi alışverişinde bulunduğu, teknik sorunları tartıştığı ortak bir forum haline getirmek için siz meslektaşlarımızın katkı ve önerilerini bekleriz.

Saygılarımızla,

Yayın Kurulu

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

Derleme Makalesi

Gönderilme: 19-11-2020

Kabul: 26-04-2021

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

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapılar

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

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

GİRİŞ

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

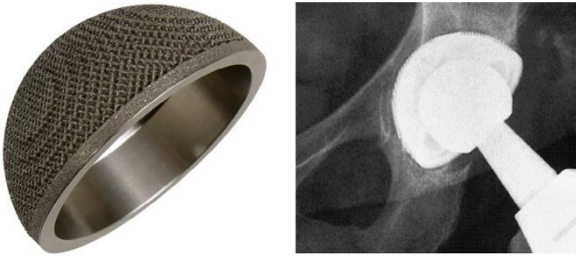
Kafes yapılar farklı üretim yöntemleri ile üretilebiliyor iken, özellikle son yıllarda büyük bir ivme kazanan eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmesi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmış ve bu sayede, üretilecek parçaların mekanik, ısıl, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerinin iyileştirilebilirliği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

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

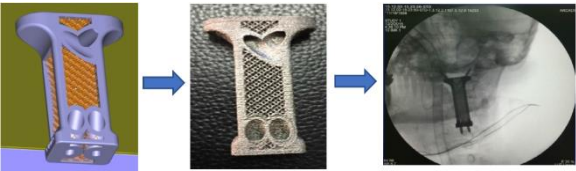
Havacılıkta kafes yapılar, yüksek dayanım/ağırlık oranından ve ısıl iletim özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [7]. Örneğin, literatürde, kanat hücum kenarlarında, buzlanma önleyici sistemin entegre edildiği kafes yapıların kullanılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kuş çarpmaları en çok kanat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

Erişim Hafıza) kullanılabileceği literatürde belirtilmiştir [12].

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



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



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

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

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

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

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

KAFES YAPI ÇEŞİTLERİ

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

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

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

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

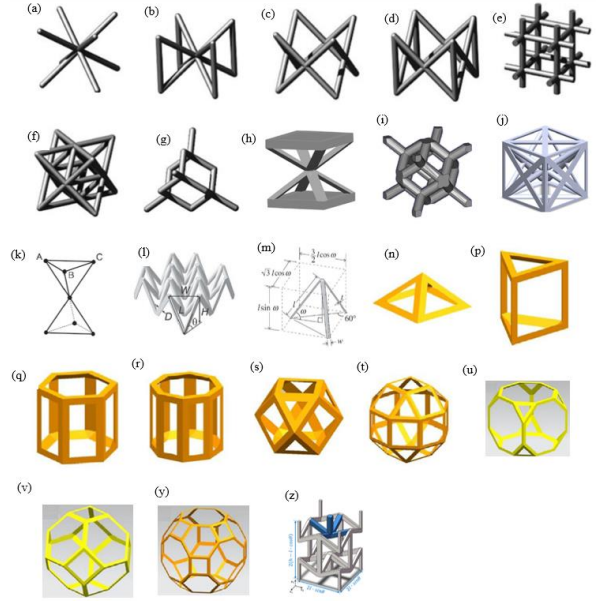
Dikme Tabanlı (Strut-Based) Kafes Yapılar

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

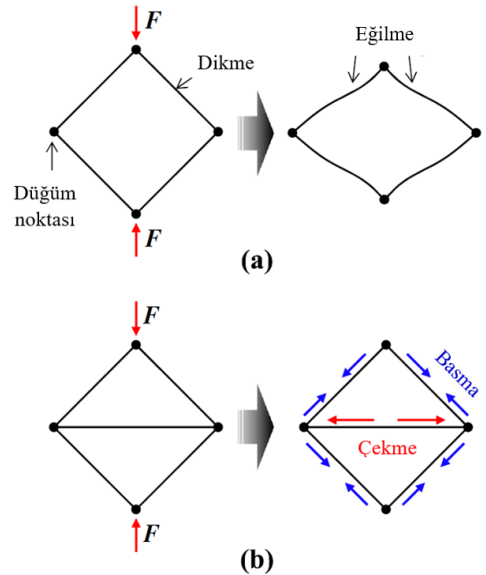
Dikme-tabanlı kafes yapılarda Maxwell sayısı çok önemlidir ve Denklem 1 yardımıyla bulunur;

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

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




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



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

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

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







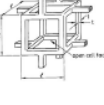

Üçlü Periyodik Minimum Yüzey (Triply Periodic Minimum Surface) (ÜPMY) Kafes Yapılar

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

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

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

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

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

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

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

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

Kabuk Kafes (Shell Lattice) Yapılar

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

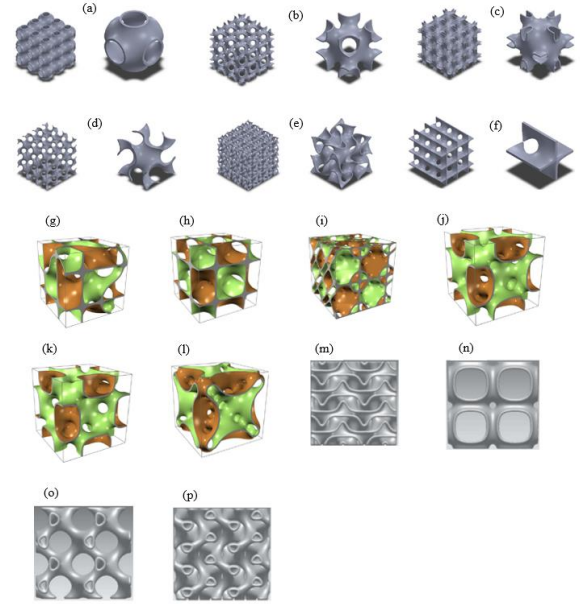
Tablo 3. Üçlü periyodik minimum yüzey formülleri [7, 40].

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

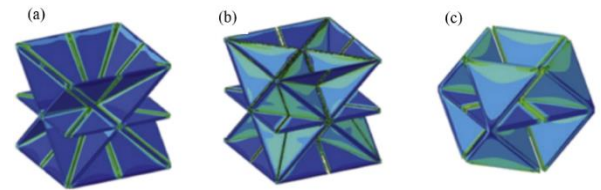
KAFES YAPI SEÇİMİ

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

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



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



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

TASARIM VE ÜRETİM ARASINDAKİ FARKLAR

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SONUÇ

Bu çalışmada, eklemeli imalatla üretilen kafes yapılar ve çeşitleri, uygulama alanları ve bu yapıların seçiminde dikkat edilmesi gereken parametrelerden bahsedilmiş ve geniş bir literatür taraması yapılmıştır. Kafes yapıların çok farklı alanlarda kullanıma uygun olması ve eklemeli imalat ile bu yapıların üretiminin kolay olması, son yıllarda bu yapılara olan ilgiyi arttırmıştır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, makalede geçen kafes yapı özellikleri ve seçim kriterlerinin ilgili çalışmadaki prosese, kullanılan ekipmana, toz özelliklerine, malzemeye ve seçilen proses parametrelerine bağlı olduğudur.

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

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

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

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

TEŞEKKÜR

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

ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

Lattice structures are three-dimensional structures consisting of one or more repeating unit cells. Each cell consists of struts connected to each other from their nodal points. As a result of developments in additive manufacturing in recent years, studies on lattice structures have also increased and researches on the application of lattice structures in different industries such as aviation, automotive, sports and biomedical industries have gained speed. In this study, a detailed information about application areas, types, selection criteria and problems encountered in design and production and future studies of additively manufactured lattice structures will be given.

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

KAYNAKÇA

1. Zhang, X.Z., Leary, M., Tang, H.P., Song, T., Qian, M. 2018. "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges", *Current Opinion in Solid State and Material Science*, 22 (3): 75-99.
2. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J. P., Humbeeck, J. V. 2015. "Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures", *Additive Manufacturing*, 5: 77-84.
3. Nakajima, H. 2007. "Fabrication, properties and application of porous metals with directional pores", *Progress in Materials Science*, 52 (7): 1091-1173.
4. Dallago, M., Winiarski, B., Zanini, F., Carmignato, S., Benedetti, M. 2019. "On the effect of geometrical imperfections and defects on the fatigue strength of cellular lattice structures additively manufactured via Selective Laser Melting", *International Journal of Fatigue*, 124: 348-360.
5. Rosa, F., Manzoni, S., Casati, R. 2018. "Damping behavior of 316L lattice structures produced by Selective Laser Melting", *Materials and Design*, 160: 1010-1018.
6. Helou, M., Kara, S. 2018. "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31 (3): 243-261.
7. Maconachie, T., Leary, M., Lozanovski, B., Zhang, X., Qian, M., Faruque, O., Brandt, M. 2019. "SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges", *Materials and Design*, 183: 108-137.
8. Hedayati, R., Sadighi, M. 2015. "Bird strike, an experimental, theoretical and numerical investigation", Woodhead Publishing.
9. Gülcan, O. 2019. "Kuş çarpmaları ve uçaklara etkileri üzerine bir gözden geçirme çalışması", *Mühendis ve Makina*, 60 (696): 192-220.
10. Ferro, C. G., Varetto, S., Pasquale, G. D., Maggiore, P. 2018. "Lattice structured impact absorber with embedded anti-icing system for aircraft wings fabricated with additive SLM process", *Materials Today Communications*, 15: 185-189.
11. Zhou, H., Zhang, X., Zeng, H., Yang, H., Lei, H., Li, X., Wang, Y. 2019. "Lightweight structure of a phase-change thermal controller based on lattice cells manufactured by SLM", *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(7): 1727-1732.
12. Ho, J. Y., Leong, K. C., Wong, T. N. 2019. "Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer in porous lattice structures produced by selective laser melting", *International Journal of Thermal Sciences*, 137: 276-287.
13. Murr, L. E. 2017. "Additive manufacturing of biomedical devices: an overview", *Materials Technology: Advanced Performance Materials*, 33 (1): 57-70.
14. Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., Xie, Y. M. 2016. "Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review", *Biomaterials*, 83: 127-141.
15. Burton, H. E., Eisenstein, N. M., Lawless, B. M., Jamshidi, P., Segarra, M. A., Addison, O., Shepherd, D. E. T., Attallah, M. M., Grover, L. M., Cox, S. C. 2019. "The design of additively manufactured lattices to increase the functionality of medical implants", *Materials Science & Engineering C*, 94: 901-908.
16. Avila, J. D., Bose, S., Bandyopadhyay, A. 2018. "Additive manufacturing of titanium and titanium

- alloys for biomedical applications”, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 325-343.
17. Tang, H. P., Zhao, P., Xiang, C. S., Liu, N., Jia, L. 2018. “Ti-6Al-4V orthopedic implants made by selective electron beam melting”, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 239-249.
 18. Marin, E., Fusi, S., Pressacco, M., Paussa, L., Fedrizzi, L. 2010. “Characterization of cellular solids in Ti6Al4V for orthopaedic implant applications: Trabecular titanium”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3(5): 373-381.
 19. Alabort, E., Barba, D., Reed, R. C. 2019. “Design of metallic bone by additive manufacturing”, *Scripta Materialia*, 164: 110-114.
 20. Fousová, M., Vojtěch, D., Kubásek, J., Jablonská, E., Fojt, J. 2017. “Promising characteristics of gradient porosity Ti-6Al-4V alloy prepared by SLM process”, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 69: 368-376.
 21. Li, X., Wang, C., Zhang, W., Li, Y. 2009. “Fabrication and characterization of porous Ti-6Al-4V parts for biomedical applications using electron beam melting process”, *Materials Letters*, 63: 403-405.
 22. Dumas, M., Terriault, P., Brailovski, V. 2017. “Modelling and characterization of a porosity graded lattice structure for additively manufactured biomaterials”, *Materials & Design*, 121: 383-392.
 23. Yuan, L., Ding, S., Wen, C. 2019. “Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures: A review”, *Bioactive Materials*, 4: 56-70.
 24. Panesar, A., Abdi, M., Hickman, D., Ashcroft, I. 2018. “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 19: 81-94.
 25. Salonitis, K., Chantzis, D., Kappatos, V. 2017. “A hybrid finite element analysis and evolutionary computation method for the design of lightweight lattice components with optimized strut diameter”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 2689-2701.
 26. Tang, Y., Zhou, Y., Hoff, T., Garon, M., Zhao, Y. F. 2016. “Elastic modulus of 316 stainless steel lattice structure fabricated via binder jetting process”, *Materials Science and Technology*, 32 (7): 648-656.
 27. Hasan, R. 2013. “Progressive collapse of titanium alloy micro-lattice structures manufactured using selective laser melting”, PhD Thesis, University of Liverpool, United Kingdom.
 28. Luxner, M. H., Woesz, A., Stampfl, J., Fratzl, P., Pettermann, H. E. 2009. “A finite element study on the effects of disorder in cellular structures”, *Acta Biomaterialia*, 5 (1): 381-390.
 29. Rehme, O. 2010. “Cellular design for laser freeform fabrication”, Cuvillier Verlag, Göttingen, Germany.
 30. Deshpande, V.S., Fleck, N.A., Ashby, M.F. 2001. “Effective properties of the octet-truss lattice material”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49 (8): 1747-1769.
 31. Souza, J., Großmann, A., Mittelstedt, C. 2018. “Micromechanical analysis of the effective properties of lattice structures in additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, 23: 53-69.
 32. Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., Brandt, M. 2017. “Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM)”, *Laser Additive Manufacturing, Materials, Design, Technologies, and Applications*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 119-161.
 33. Li, S.J., Xu, Q.S., Wang, Z., Hou, W.T., Hao, Y.L., Yang, R., Murr, L.E. 2014. “Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method”, *Acta Biomaterialia*, 10: 4537-4547.
 34. Xu, S., Shen, J., Zhou, S., Huang, X., Xie, Y. M. 2016. “Design of lattice structures with controlled anisotropy”, *Materials and Design*, 93: 443-447.
 35. Zhao, S., Hou, W. T., Xu, Q.S., Li, S.J., Hao, Y.L., Yang, R. 2018. “Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by electron beam melting for biomedical applications”, *Titanium in Medical and Dental Applications*, Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 277-301.
 36. Geng, L., Wu, W., Sun, L., Fang, D. 2019. “Damage characterizations and simulation of selective laser melting fabricated 3D re-entrant lattices based on in-situ CT testing and geometric reconstruction”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 157-158: 231-242.
 37. Deshpande, V.S., Ashby, M.F., Fleck, N.A. 2001. “Foam topology bending versus stretching dominated architectures”, *Acta Materialia*, 49 (6): 1035-1040.
 38. Lord, E. A., Mackay, A. L. 2003. “Periodic minimal surfaces of cubic symmetry”, *Current Science*, 85(3): 346-362.
 39. Suard, M. 2015. “Characterization and optimization of lattice structures made by electron beam melting”, PhD Thesis, Université de Grenoble Alpes, France.
 40. Sychoy, M. M., Lebedev, L. A., Dyachenko, S. V., Nefedova, L. A. 2018. “Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology”, *Acta Astronautica*, 150:81-84.

41. Maskery, I., Sturm, L., Aremu, A. O., Panesar, A., Williams, C. B., Tuck, C. J., Wildman, R. D., Ashcroft, I. A., Hague, R. J. M. 2018. "Insights into the mechanical properties of several triply periodic minimal surface lattice structures made by polymer additive manufacturing", *Polymer*, 152: 62-71.
42. Al-Ketan, O., Rowshan, R., Al-Rub, R. K. A. 2018. "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials", *Additive Manufacturing*, 19: 167-183.
43. Abueidda, D. W., Al-Rub, R. K. A., Dalaq, A. S., Lee, D. -W., Khan, K. A., Jasiuk, I. 2016. "Effective conductivities and elastic moduli of novel foams with triply periodic minimal surfaces", *Mechanics of Materials*, 95: 102-115.
44. Kapfer, S. C., Hyde, S. T., Mecke, K., Arns, C. H., Schroder-Turk, G. E. 2011. "Minimal surface scaffold designs for tissue engineering", *Biomaterials*, 32: 6875-6882.
45. Rashed, M. G., Ashraf, M., Mines, R. A. W., Hazell, P. J. 2016. "Metallic microlattice materials: A current state of the art on manufacturing, mechanical properties and applications", *Materials & Design*, 95:518-533.
46. Sing, S. L., Miao, Y., Wiria, F. E., Yeong, W. Y. 2016. "Manufacturability and mechanical testing considerations of metallic scaffolds fabricated using selective laser melting: a review", *Biomedical Science and Engineering*, 2(11): 18-24.
47. Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W. 2012 "Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59: 1025-1035.
48. Rashid, R. A. R., Mallavarapu, J., Palanisamy, S., Masood, S. H. 2017. "A comparative study of flexural properties of additively manufactured aluminium lattice structures", *Materials Today: Proceedings*, 4: 8597-8604.
49. Dallago, M., Zanini, F., Carmignato, S., Pasini, D., Benedetti, M., 2018. "Effect of the geometrical defectiveness on the mechanical properties of SLM biomedical Ti6Al4V lattices", *Procedia Structural Integrity*, 13: 161-167.
50. Bartolomeu, F., Fonseca, J., Peixinho, N., Alves, N., Gasik, M., Silva, F. S., Miranda, G. 2019. "Predicting the output dimensions, porosity and elastic modulus of additive manufactured biomaterial structures targeting orthopedic implants", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 99: 104-117.
51. Bartolomeu, F., Dourado, N., Pereira, F., Alves, N., Miranda, G., Silva, F. S. 2020. "Additive manufactured porous biomaterials targeting orthopedic implants: A suitable combination of mechanical, physical and topological properties", *Materials Science & Engineering C*, 107: 110342.
52. Ran, Q., Yang, W., Hu, Y., Shen, X., Yu, Y., Xiang, Y., Cai, K. 2018. "Osteogenesis of 3D printed porous Ti6Al4V implants with different pore sizes", *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 84: 1-11.
53. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D. 2014. "Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting", *Materials & Design*, 55: 533-541.
54. Choy, S. Y., Sun, C. N., Leong, K. F., Wei, J. 2017. "Compressive properties of Ti-6Al-4V lattice structures fabricated by selective laser melting: Design, orientation and density", *Additive Manufacturing*, 16: 213-224.
55. Leary, M., Mazur, M., Mcmillan, M., Chirent, T., Sun, Y. Y., Qian, M., Easton, M. Brandt, M. 2016. "Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures", *Materials and Design*, 98: 344–357.
56. Dallago, M., Raghavendra, S., Luchin, V., Zappini, G., Pasini, D., Benedetti, M. 2019. "Geometric assessment of lattice materials built via Selective Laser Melting", *Materials Today: Proceedings* 7: 353-361.
57. Van Grunsven, W., Hernandez-Nava, E., Reilly, G., Goodall, R. 2014. "Fabrication and mechanical characterisation of titanium lattices with graded porosity", *Metals* 4 (3): 401-409.
58. Hernández-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., Goodall, R. 2015. "The effect of density and feature size on mechanical properties of isostructural metallic foams produced by additive manufacturing", *Acta Materialia*, 85: 387-395.
59. Hernández-Nava, E., Smith, C. J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Leonard, F., Withers, P. J., Todd, I., Goodall, R. 2016. "The effect of defects on the mechanical response of Ti-6Al-4V cubic lattice structures fabricated by electron beam melting", *Acta Materialia*, 108: 279–292.
60. Bagheri, Z. S., Melancon, D., Liu, L., Johnston, R. B., Pasini, D. 2017. "Compensation strategy to reduce geometry and mechanics mismatches in porous biomaterials built with Selective Laser Melting", *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 70: 17–27.
61. Pattanayak, D. K., Fukuda, A., Matsushita, T., Takemoto, M., Fujibayashi, S., Sasaki, K., Nishida, N., Nakamura, T., Kokubo, T. 2011. "Bioactive Ti metal analogous to human cancellous bone: Fabrication by selective laser melting and chemical treatments", *Acta Biomaterialia*, 7 (3): 1398-1406.
62. Lozanovski, B., Leary, M., Tran, P., Shidid, D., Qian, M., Choong, P., Brandt, M. 2019. "Computational modelling of strut defects in

- SLM manufactured lattice structures”, *Materials and Design*, 171: 107671.
63. Mines, R.A.W., Tsopanos, S., Shen, Y., Hasan, R., McKown, S. T. 2013. “Drop weight impact behavior of sandwich panels with metallic micro lattice cores”, *International Journal of Impact Engineering*, 60: 120-132.
64. Mahmoud, D., Elbestawi, M. 2017. “Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review”, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 1 (2): 13.
65. Dong, G., Tang, Y., Zhao, Y. F. 2017. “A survey of modeling of lattice structures fabricated by additive manufacturing”, *Journal of Mechanical Design*, 139(10): 100906.
66. Nazir, A., Abate, K. M., Kumar, A., Jeng, J-Y. 2019. “A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104 (9-12): 3489-3510.

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

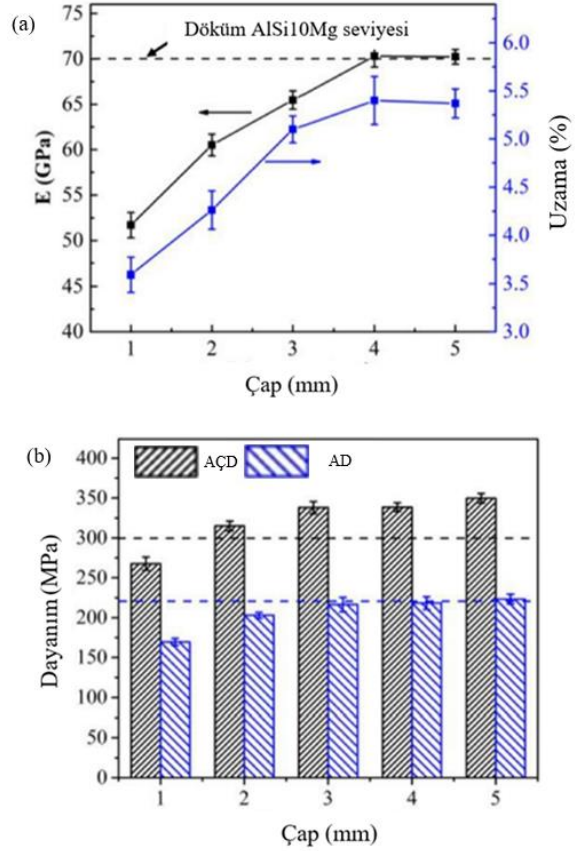
Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden birisi dikme boyutlarıdır. Kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde dikme uzunluğunun çapa oranı, dikme açısı ve birim hücre sayısının etkili olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda gösterilmiştir [9]. Hacim 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 ürettirmişlerdir. 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 karşılaşmıştır. 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 yönüne göre 45° eğimde ardı ardına birden fazla çatlaklar oluşması, lokal burkulmadan sonra plastik deformasyon ve yüklemeye yönüne 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].

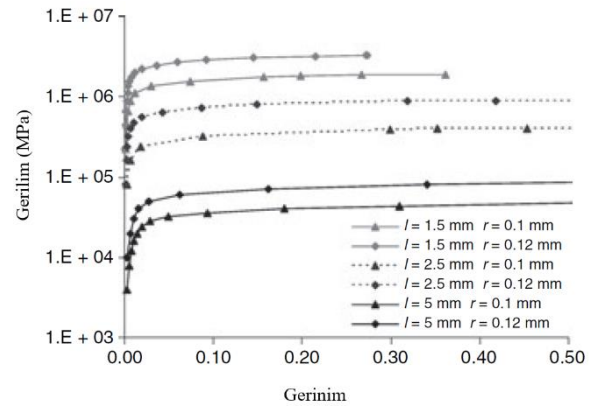
Literatürde Eİ ile üretilen kafes yapılarda, ilave dikme eklenmesinin de mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirtilmiştir. Smith ve ark. 316L paslanmaz çelik hmk ve hmkd kafes yapıların basma dayanımlarını incelemişler ve kafes yapılara yüklenme yönü boyunca dikme eklenmesinin mekanik 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. Heinl 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 üretmişlerdir (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].



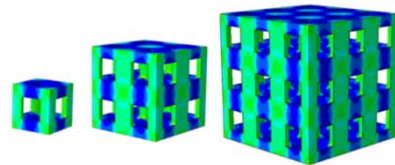
Şekil 2. Hmk kafes yapısı için birim hücre boyutu (l) ve dikme çapının (r) gerilim üzerindeki etkisi [33].

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 yerleştilmesi 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].

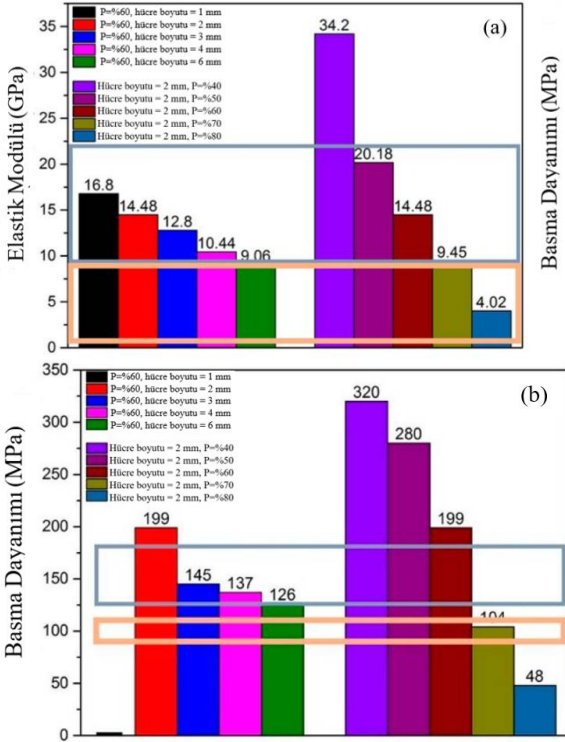
Peng ve ark. birim hücre sayısının kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu yaptıkları çalışmada göstermişlerdir. Yazarlar, 1, 8 ve 27 birim hücreden oluşan "basit kübik" (Şekil 3) kafes yapıların elastik modüllerini sırasıyla 24.8 GPa, 25.0 GPa ve 25.2 GPa, akma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



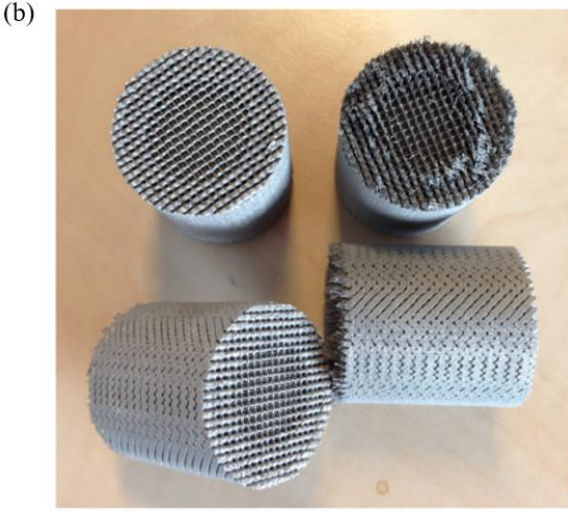
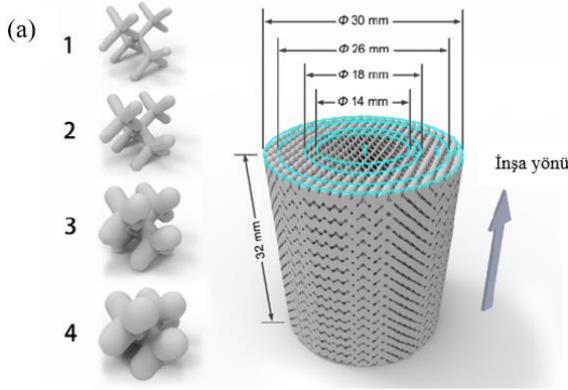
Şekil 4. Elastik modül ve basma dayanımının gözeneklilik (% P) ve hücre boyutu ile değişimi [48].

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].

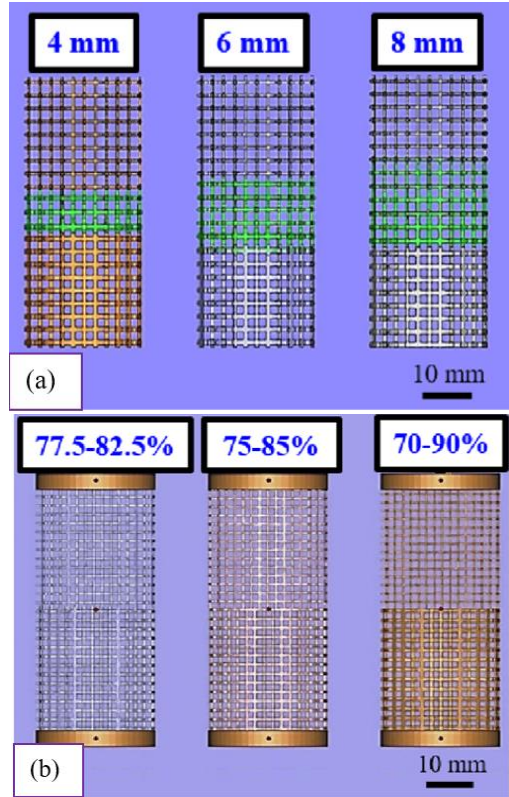


Şekil 5. (a) Radyal olarak kademelendirilmiş, farklı birim hücre boyutlarında elmas kafes yapısına sahip parçalar (1, 2, 3 ve 4, radyal olarak her bir tabakada kullanılan birim hücreyi göstermektedir) ve, (b) üretilen parça [54].

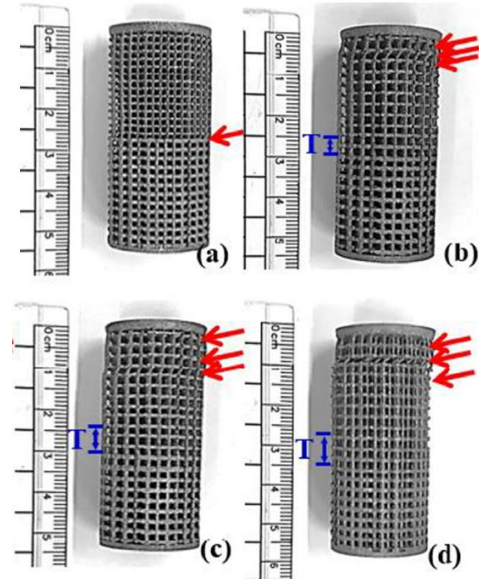
2.4. Dikme Tasarımının Etkisi

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].

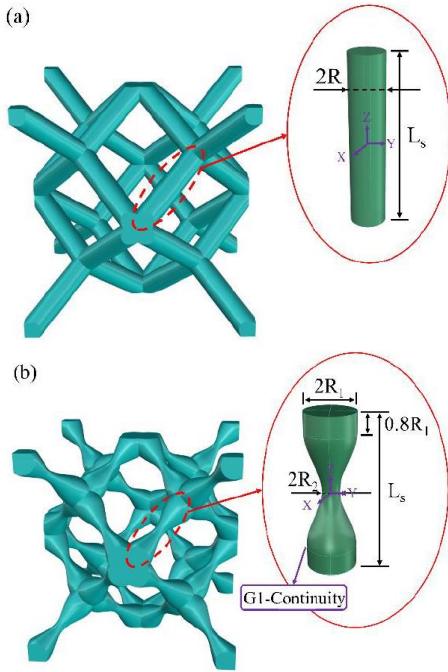


Şekil 7. Basma testleri sonucunda deformasyonun; (a) gözenekliliğin aniden değiştiği yerde başladığı, (b), (c) (d) gözenekliliğin en fazla olduğu yerde başladığı yapılar. T, gözenekliliğin yavaş yavaş değiştiği geçiş bölgesini ifade eder [55].

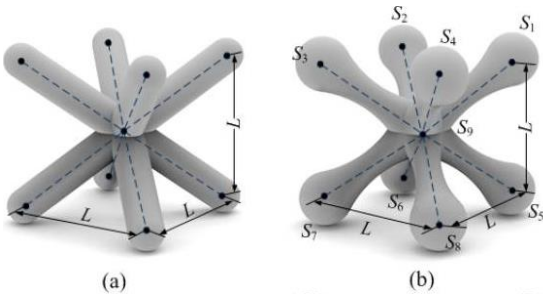
Hmk yapılarda, dayanımın artırılması için Şekil 9'daki gibi dikme tasarımlarının değiştirilmesi denenmiş ve bu şekilde hem sertliğin hem de dayanımın arttığı deneysel olarak gösterilmiştir [60].

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].

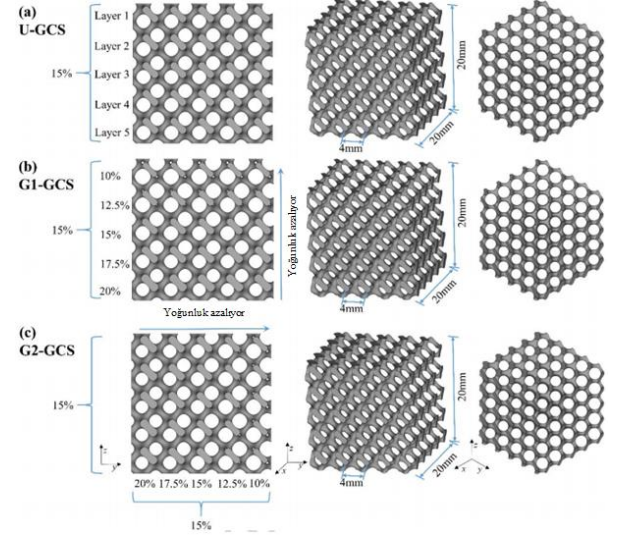


Şekil 8. Dikme tasarımlarının değiştirildiği baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapı [59].



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

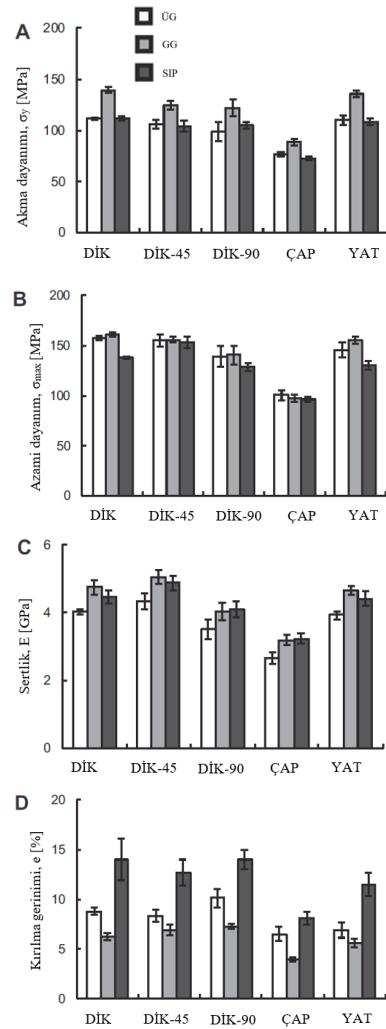
Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerinde dikme / birim hücre oryantasyonunun etkili olduğu yapılan bilimsel çalışmalarda gösterilmiştir. Genel olarak kafes yapılarda, dik olarak yerleştirilen dikmeler bükme ve basma açısından daha kritik, çapraz yerleştirilen dikmeler ise burulma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

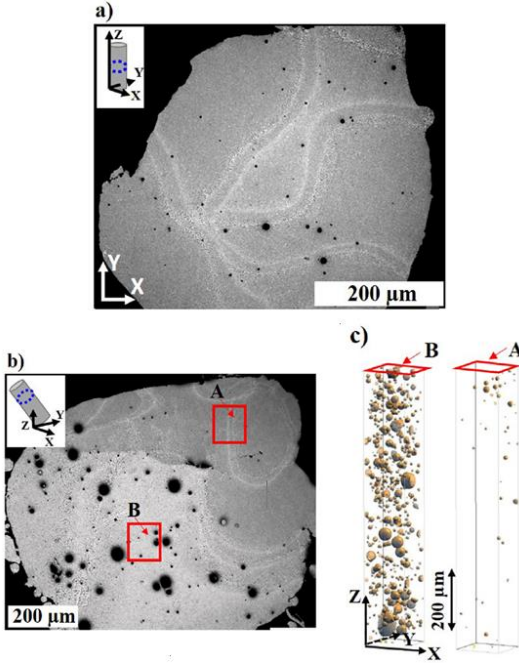
Eİ ile üretilen kafes yapılarında, üretilecek parçanın üretim platformu üzerindeki konumu da mekanik özellikleri etkilemektedir. SLE yönteminde, gazın uygulandığı yere yakın ya da toz serme mekanizmasının üretim platformuna ilk ve son temas ettiği noktalara yakın yerlerdeki parçaların mekanik özellikleri 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].

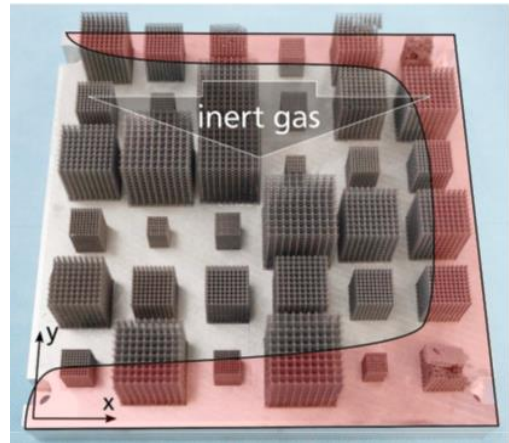
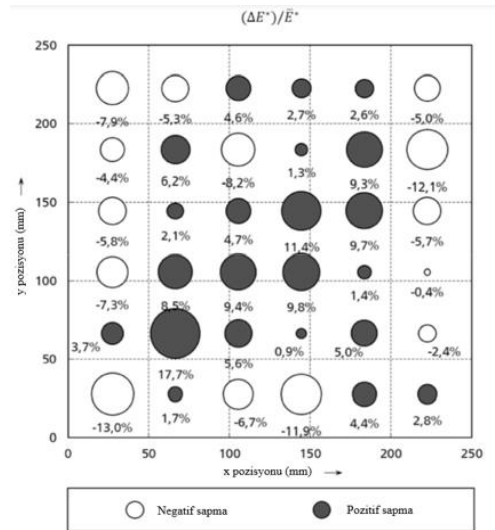
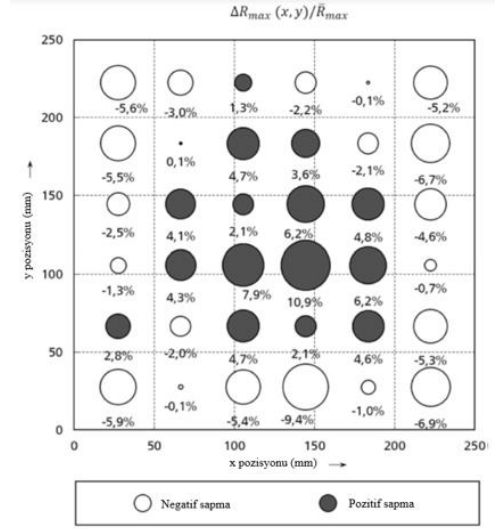
$$d = \sqrt{\frac{m_b}{\rho_s \pi N^3 L \sqrt{3}}} \quad (1)$$



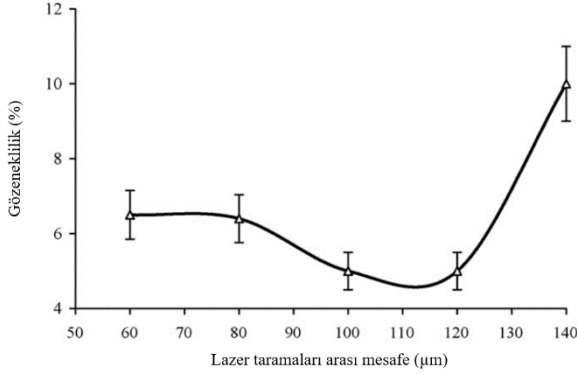
Şekil 12. Dik olarak (a) ve eğik olarak (b) üretilen dikmeler. Mavi çizgiler gözenekli yapıyı görmek için alınan kesit düzlemlerini ifade etmektedir. Eğik olarak üretilen dikmelerdeki A ve B bölgelerin üç boyutlu X-ray tomografi görüntüleri (c) [78].

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 ($\Delta R_{max}/R_{max}$) ve sertliğin ($\Delta E^+/E^+$), parçanın üretim platformundaki konuma göre değişimi. Taralı alan en kötü parça özelliklerinin çıktığı bölgeyi göstermektedir [21].

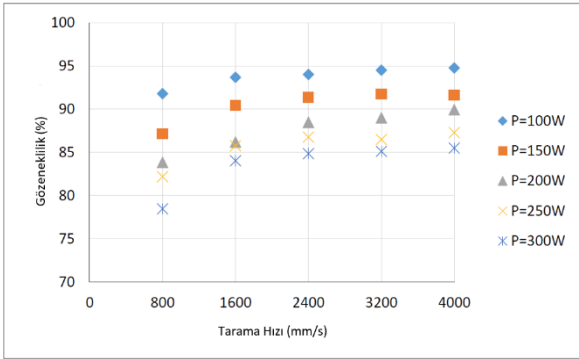


Şekil 14. Lazer taramaları arası mesafenin gözenekliliğe etkisi [80].

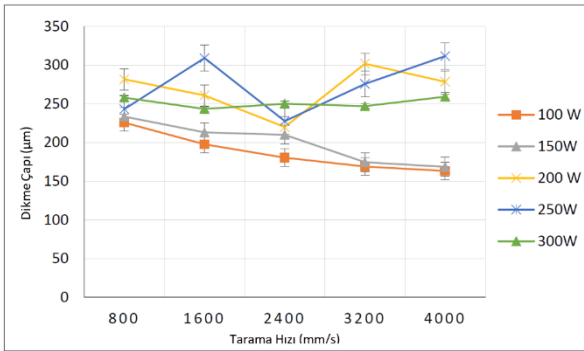
Zhang ve ark. Ti6Al4V malzeme ve SLE yöntemi kullanarak ürettikleri kafes yapılarında, tarama çizgisi aralığının mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Yazarlar tarama çizgisi aralığının artması ile basma dayanımı ve modülünün azalacağını belirtmişlerdir [83]. Campanelli ve ark. SLE yöntemi 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 edileceğini 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 malzemeden 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 dönüştüğünü belirtmişlerdir. Yapılar 680 °C'de, 4 saat ısıtma tabii tutulduğunda ise mikroyapı 500-800 nm genişliğinde α fazı ile az miktarda β fazına dönüştürmüştür. 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 yükleme 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. Heintl, 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., Kadkhodaei, 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.

Çağlar Ceylan* Bahtiyar Duran Osman Furkan Koçyiğit Cem Koçer Berkay Doğan Tuğçe Hacaloğlu Cemal Merih Şengönül Bilgin Kaftanoğlu ATILIM Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü Ankara**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 22-11-2020

Kabul: 26-04-2021

*Sorumlu Yazar: Çağlar Ceylan

Email: caglarceylan19@gmail.com

Havacılık Endüstrisinde Kullanılmak Üzere Alüminyum Malzemelerin Korozyon Direncinin Arttırılması Amacıyla Yüzey Kaplaması Geliştirilmesi

Havacılık endüstrisinde yüksek oranda kullanılan alüminyum alaşımlarını korozyona karşı korumak üzere genellikle kromat (krom VI bazlı) dönüşümlü kaplama (CCC) yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak altı değerlikli kromun doğada oluşturduğu zararlı etkilerden dolayı, AB'nin REACH düzenlemeleri ile kullanımı kısıtlanmıştır. Bu çalışma ile krom +6 dönüşümlü kaplamalara alternatif olarak PVD, anodizasyon gibi yöntemlerin de olduğu kaplama çeşitleri araştırılmış ve kaplamaların korozyon dayanımıyla mekanik performansları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Korozyon; Alüminyum, Havacılık, Anodizasyon, PVD, Yüzey Kaplama, Yüzey Karakterizasyonu

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarına, altı değerlikli krom içermeyen kaplama yöntemleri ile korozyon direnci sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla gerekli literatür taramaları yapılmış ve çalışmaya yön verebilecek uygun araştırmalar baz alınarak deney planları hazırlanmıştır. Bu araştırmalardan bazı örnekler şöyledir:

Batuhan Özakin'ın yaptığı çalışmada üç farklı alüminyum alaşımının (AA 2024, AA 6061, AA 7075), üç farklı korozif ortamda gerilmeli korozyon dirençleri belirlenmiştir. Alaşımlara klor iyonları içeren asidik, bazik ve nötr ortamlarda gerilmeli korozyon deneyleri uygulanmış ve hava ortamındaki

değerlerle karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen araştırma bulgularına göre en iyi gerilmeli korozyon direnci bazik ortamda iken en düşük gerilmeli korozyon direnci asidik ortamdadır [1]. Serap Çatal tarafından yapılan çalışmadan elde edilen bilgilere göre, yapılan kaplamalarda ölçülen Na_2SO_4 ve NaCl 'nin EIS diyagramları ve akım-potansiyel eğrileri incelendiğinde, 0,2 M Na_2SO_4 içinde 4 saat boyunca tutulan kaplamaların korunmasının, %3,5 NaCl 'de 2 saat tutulan numunelerin korunmasından üstün olduğu belirlenmiştir [2]. Bu çalışmada yer alan deneysel çalışmalar, havacılık sektörü prosedürlerine ve uluslararası standartlara uygun olarak planlanmıştır. Kaplanan malzemeler ve test programı TUSAŞ'ın ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmiştir. Deneysel

çalışmalardan elde edilen veriler değerlendirilmiş ve Cr VI'nın yerini alabilecek en uygun kaplama yöntemi önerilmiştir.

2. YÖNTEMLER

Bu çalışmada, aşağıda belirtilen farklı kaplama teknikleri kullanılmıştır. Kaplanacak malzemeler TUSAŞ ile birlikte belirlenmiştir. Seçilen malzemeye aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır.

a) Bor Nitrür (BN) Kaplama

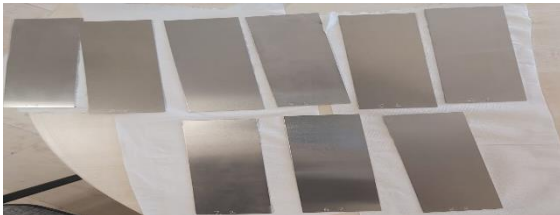
Korozyona karşı koruma sağlamak için sac alüminyum malzemeye bor nitrür kaplama uygulanmıştır. Bor Nitrür'ün 7 farklı allotropu bulunmaktadır. Hekzagonal bor nitrür ve kübik bor nitrür en yaygın fazlardır. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) düşük sürtünme katsayısı, yalıtım, termal iletkenlik ve yağlama özelliklerine sahip bir malzemedir. Öte yandan, kübik bor nitrür (c-BN), üstün mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisindeki alüminyum parçaların Cr VI kaplama uygulamaları yerine uygun bir kaplama malzemesi olarak kullanılabilir [3].

b) Fiziksel Buharlaştırma Yöntemi

Kaplama yöntemleri arasında, saçırma tekniği – bir Fiziksel Buharlaştırma Yöntemiyle Büyütme (FBYB) işlemi – düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, çok ince kaplamalar elde edebilme imkânı, keskin köşelerde ve karmaşık geometriler üzerinde büyütme yapılabildiği için daha çok tercih edilmektedir [3]. Teknolojisi, tasarımı ve imalatı yerli olarak yapılan bu kaplama sistemi ile sanayi kuruluşlarından gelen kesici takımlar, kalıplar ve makine parçaları bu teknik ile kaplanmıştır [3].

TUSAŞ tarafından hazırlanan 2, 6 ve 7 serisi Alüminyum plakaların 3 adet farklı BN kaplama ile kaplanarak, karakterizasyon incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, karakterizasyon yöntemleri açıklanarak anlatılmıştır. 2, 6 ve 7 serisinden 3'er adet plaka bulunmaktadır.

Her seriden 1 adet plaka vakum kazanına yerleştirilmiştir. Kaplama öncesi her seriden üçer adet numune 3 farklı deney için numaralandırılmıştır ve Şekil 1'de gösterilmiştir. Alüminyum plakaların nitelikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Numaralandırılmış Al Numuneleri

Daha sonra Bor Nitrür (BN) kaplama için plakalar vakum kazanına yüklenmiştir. Kaplama öncesi görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: BN Kaplama Makinasına Al numunelerin Yerleştirilmesi

c) Akımsız Nikel Kaplama

Akımsız nikel kaplama, herhangi bir elektrik kaynağı uygulanmadan bir alt tabaka üzerine nikel bor veya fosfor alaşımı tabakasının biriktirildiği oto katalitik reaksiyon işlemidir. Sulu bir çözelti içinde birkaç eşzamanlı reaksiyon içerir ve harici bir elektrik kaynağı gerektirmez. Metal iyonlarını serbest bırakmak için çözeltiye indirgeme ajanı eklenir ve son olarak çökelme oksidasyonla değiştirilir. Bu işlem yüzey özelliklerini geliştirdiği için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kabul görmektedir [4].

d) Kalay Kaplama

Kalay kaplama aslında eloksal kaplama yöntemi ile yapılır. Yeni metal parçaların yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kalınlığını arttırmak için kullanılan elektrolitik bir pasivasyon işlemidir. İyi iletkenlik ve korozyon direncine sahiptir. Ayrıca sağlığa zararlı değildir.

Kalay kaplamadan önce, alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasını temizlemek ve kaplamanın yapışmasını arttırmak için çinkolama işlemi gerçekleştirilir. Çinkolama işleminden sonra alüminyum kısım, sülfürik asit ve kalay içeren banyoya daldırılır ve kaplama uygulanır. Kaplama hızı ve kalınlığı verilen akışa göre değişir. Yaklaşık 2 adet kalay plaka 1A / s elektrik akımı ile kaplanır [5].

e) Nikel Kaplama

Nikel elektro kaplama, ince bir nikel tabakasını metal bir nesneye elektro kaplama tekniğidir. Korozyon direnci, kaplamanın kalınlığına ve kaplamadan önceki yüzeyin durumu dâhil olmak üzere diğer faktörlere bağlıdır. Minimum kalınlık gereksinimleri, nikelin altın veya diğer kaplamalardan önce alt kaplama olarak kullanıldığı 5 µm'den, uzun süreli koruma veya şiddetli korozif koşulları içeren uygulamalar için 125 µm veya daha fazlasına kadar değişebilir. [6].

3. KARAKTERİZASYON SONUÇLARI

1. BN KAPLAMALARIN KALINLIK ÖLÇÜMÜ SONUCU

Kalınlık ölçümleri tamamen optik ölçüm yapan, Filmetrics F20 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir numune üzerinden 10 ölçüm alınmış olup, ortalamaları Tablo 1'de verilmiştir. Cihazın ölçüm hassasiyeti 15nm-70µm'dir.

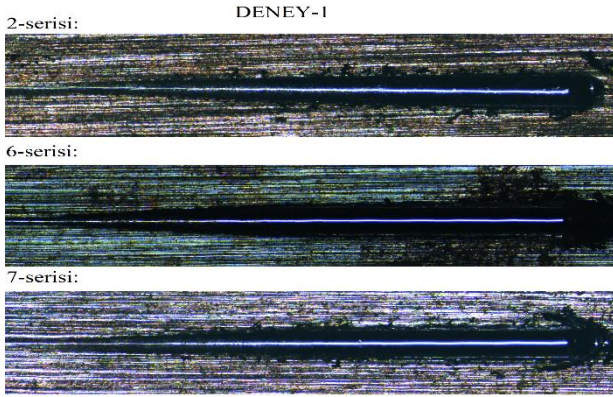
Tablo 1: Optik Kalınlık Ölçüm Sonuçları

	AISI D2	2024-serisi	6061-serisi	7075-serisi
DENEY-1	149,4nm	1496nm	1405,3nm	841,1nm
DENEY-2	861nm	1667,7nm	1445,5nm	1038,7nm
DENEY-3	699,9nm	1165,4nm	1310,9nm	853,5nm

2. YAPIŞKANLIK TESTİ SONUCU

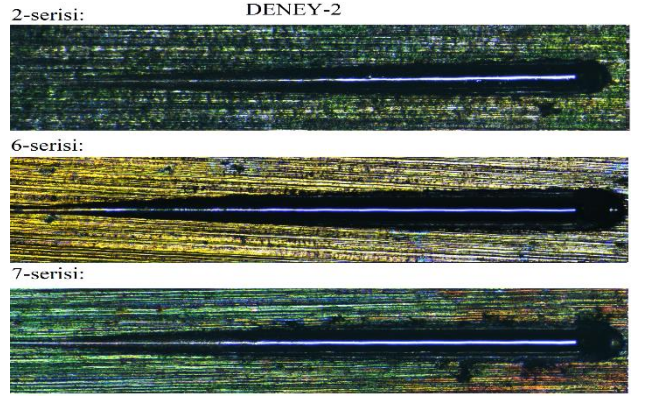
2.1. BN Kaplamaların Yapışkanlık Testi Sonuçları

Yapışkanlık testleri CSM Macro Scratch Device (CSM Çizik Testi) ile yapılmıştır. Çizik testi boyunca uygulanan yük 0,5N'dan başlayıp 150N'a kadar çıkmaktadır. Çizik testi için 200 µm yarıçapında, Rockwell elmas uç kullanılmaktadır. Numune üzerinde oluşan çizik 3mm olup, elmas uç 6mm/dk. hızla ilerlemektedir. BN kaplamalı alüminyum örnekler için 0,5N'dan başlayarak 30N'a kadar yük uygulanmıştır. Her deney için yapılan çizik testi görüntüleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir [7].

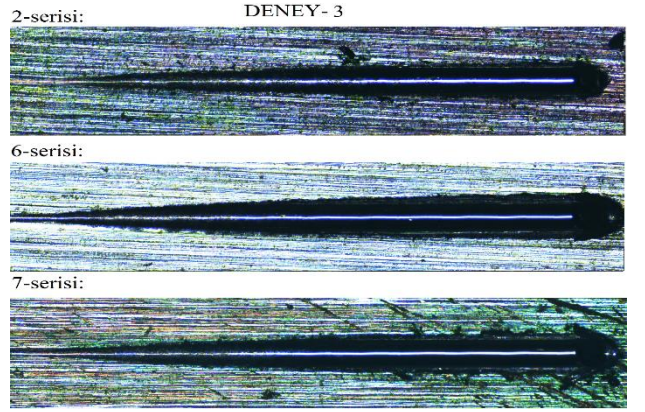


Şekil 3: 1.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

Çizik testi sonucunda Deney-1'de 6 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Deney-2'de daha temiz bir çizik testi sonucu elde edilmiş olup, 7 serisinde biraz çatlama olmuştur. Deney-3'te ise, 2 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir.



Şekil 4: 2.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

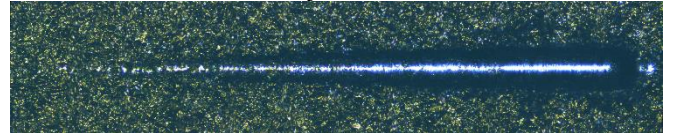


Şekil 5: 3.Parametre BN kaplamaların çizik test görüntüsü

2.2. Diğer Metalik Kaplamaların Yapışkanlık Testi Sonuçları

2,4, ve 6 serisi Alüminyum üzerine çeşitli metalik kaplamalar yapılmıştır. Bunlar; Akımsız nikel, Kalay, Nikel ve Titanyum Nitrür (TiN)'dir.

2024-Akımsız Nikel+Kalay:



Şekil 6: Al 2024 Akımsız Nikel+Kalay Çizik Testi Görüntüsü

Bu katmanlı kaplama örneğinde çizik testi altışı geç çizmiştir. Kaplamada yük arttıkça çatlaklar gözlemlenmiştir.

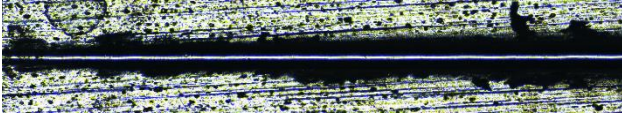
Nikel kaplama yapışkanlık testi sonucu hadde yönünde olması sebebiyle daha düzgündür.

2024-Nikel



Şekil 7: Al 2024 Nikel Çizik Testi Görüntüsü

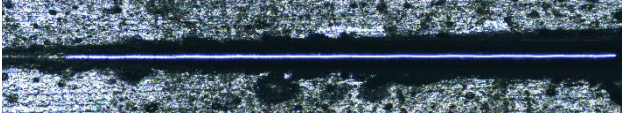
2024-Kalay



Şekil 8: Al 2024 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

2024 kalay. Kaplamalı örnekte kaplama yapışkanlığı son derece düşüktür. Çizik testinin başlaması ile birlikte çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

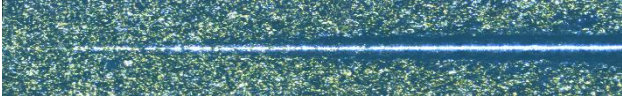
6061-Kalay



Şekil 9: Al 6061 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

6061 Kalay örneğinde yapılan yapışkanlık testi sonucunda çok fazla çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir.

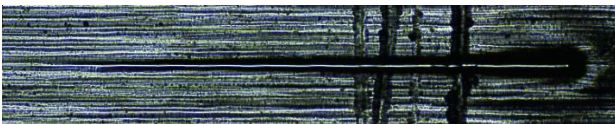
7075-Alaşsız Nikel Kalay



Şekil 10: Al 7075 Akımsız Nikel+Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Akımsız nikel + Kalay kaplama iyi tutunma kalitesine sahiptir.

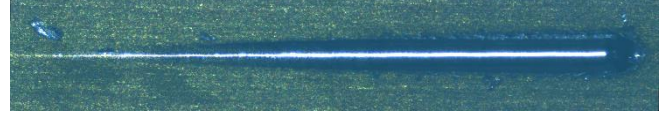
7075-Nikel



Şekil 11: Al 7075 Nikel Çizik Testi Görüntüsü

7075 nikel kaplamada, kaplama yapışkanlığı iyi olup altta oluşmuş yüzey bozukluğu çizik testine denk gelmiştir.

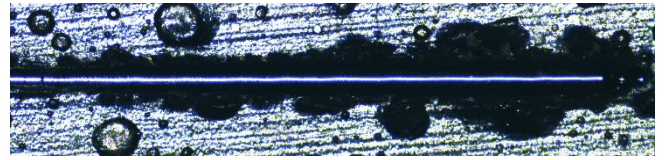
7075-Kalay



Şekil 12: Al 7075 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Kalay kaplama da yapılan çizik testi sonucunda kaplamada çatlaklar meydana gelmiştir. İyi bir yapıştırıcı kalitesine sahiptir. Uygulanan kuvvet yükseldiğinde, çatlaklar 2024 Kalay kaplamadaki gibi büyümmez.

7075-Kalay



Şekil 13: Al 7075 Kalay Çizik Testi Görüntüsü

7075 Kalay kaplamada çok sayıda çatlak meydana gelmiştir.

4. KOROZYON TESTİ SONUÇLARI

4.1. BN Kaplamalı Örneklerin Korozyon Testi Sonuçları

Boyutları 320x120 mm olan numunelere, tuz püskürtme ünitesinde sabit durması için 2,5mm çapında delikler açılmıştır. Hazırlanan test numuneleri ASTM B117'ye göre Korozyon Testine tabi tutulmuştur [8]. Bu test ile numuneler 4 saat, 16 saat ve 24 saat tuzlu çözeltiye maruz bırakılarak korozyon direncine verdiği tepkiler incelenmiştir.

BN kaplamaların 4, 16 ve 24 saatlik korozyon test sonucunda numunelerde çok sayıda çukur ve korozyon çatlakları meydana gelmiştir. Testler, 35° 6.5'lik pH aralığında %5'lik NaCl çözeltisi ortamında gerçekleştirilmiştir [8]. Testten sonra numuneler çeşme suyu ile durulanmıştır.

Tablo 2: BN kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
7075-T6	Bor Nitrür-1.parametre	7-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Bor Nitrür-2.parametre	7-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Bor Nitrür-3.parametre	7-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-1.parametre	6-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-2.parametre	6-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Bor Nitrür-3.parametre	6-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-1.parametre	2-1B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-2.parametre	2-2B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Bor Nitrür-3.parametre	2-3B	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

Örneğin: Malzeme: 7075-T6, Kod adı: 7-1B

Tablo 3: Metalik kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
6061-T6	Titanyum Nitrür(PVD)	6-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Akımsız Nikel+ Titanyum Nitrür (PVD)	7 AN+ TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Akımsız Nikel+ Titanyum Nitrür (PVD)	2- AN+TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Akımsız Nikel	7-AN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Titanyum Nitrür	2-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

Tablo 4: Metalik kaplamaların korozyon test sonuçları

Malzeme	Kaplama Türü	Kod	4 saat	16 saat	24 saat
7075-T6	Titanyum Nitrür(PVD)	7-TiN	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Nikel Kaplama	2-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
6061-T6	Nikel Kaplama	6-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Nikel Kaplama	7-N	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
2024-T3	Kalay Kaplama	2-Tin	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi
7075-T6	Kalay Kaplama	7-Tin	Çukur gözlenmedi	Çok sayıda çukur gözlemlendi	Çok sayıda çukur gözlemlendi

5. SONUÇ

Havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılan alüminyum alaşımlarında görülen korozyon türleri araştırılmış ve kullanılan kaplamalar çerçevesinde korozyonu önlemek için alınan önlemler değerlendirilmiştir. Yapılan çizik testlerine göre; BN kapamalar için Yapışkanlık testi sonucunda Deney-1'de 6 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 3'te verilmiştir. Deney-2'de daha temiz bir çizik testi sonucu elde edilmiş olup, 7 serisinde hafif çatlama olmuştur. Şekil 4'te verilmiştir. Deney-3'te ise, 2 ve 7 serisinde çatlak gözlemlenmiştir. Şekil 5'te verilmiştir. Metalik kaplamalar için 2 Serisi Alüminyum üzerine yapılan kaplamaların yapışkanlığı çizik testi ile ölçülmüştür. 7 serisi Alüminyum üzerine yapılan kaplamaların çizik testleri sonucunda en kötü yapışkanlığa sahip kaplama Kalay iken, Nikel ve Kalay kaplamaların çizik testleri hemen başlamasına rağmen mikroskop görüntülerinde çizimin çok dar ve temiz bir şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Çizik görüntüleri Şekil 11, 12, 13 'te verilmiştir. TUSAŞ ile birlikte Korozyon Testleri deneyleri yapılmış ve uygun olan kaplama çeşitleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar; havacılık endüstrisi yöntemlerine ve uluslararası standartlara uygun olarak BN kaplamaların korozyon testine dayanıklı olmadığını göstermiştir. Diğer metalik kaplamaların 4 saatlik korozyon testinden sonra 16 saatlik bir test sonucunda üzerlerinde korozyon çatlakları meydana geldiğini, Al 7075 üzeri Kalay Kaplama 16 saatlik deney sonucunda korozyon direnci göstermiş fakat 24 saatlik test sonucunda üzerinde korozyon çatlakları ve çukurları

meydana geldiğini göstermiştir. Kalay kaplama numuneye tutunma konusunda başarılı değildir ancak korozyon direncinde 16 saatlik bir başarı elde etmiştir.

SURFACE COATING DEVELOPMENT FOR INCREASING THE CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM MATERIALS FOR AVIATION INDUSTRY

Aluminum alloys are one of the highly used materials in aviation industry and their treatment against corrosion generally includes a chromate (Cr VI-based) conversion coatings (CCC). However due to their negative effect on environment, hexavalent chromium use is limited by REACH regulations of EU. In this study, we explore alternative coating methods like PVD, anodization and others which do not contain Cr VI. In this study as an alternative to Cr IV coatings we explored different coating methods like PVD and anodization techniques to protect the aluminum alloys against corrosion and various tests are conducted to evaluate the performance of coatings and their resistance against corrosion.

Keywords: Corosion; Aluminum; Aviation; Anodization; PVD; Coating Surface, Surface Characterization.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., ATILIM Üniversitesi BOREN Bor Kaplamaları Yetkinlik Merkezi'ne ve Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'ne, deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve öğretim görevlisi Dr. Şakir BAYTAROĞLU'na sağladığı destek için teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Özakın, B. Alüminyum Alaşımlarının Farklı Ortamlarda Gerilme Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Makina Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014), 36-53.
2. Çatal, S. Fosforik Asit Eloksal Yöntemi İle Alüminyum Yüzeyinde Oksit Tabakasının Geliştirilmesi, Kimya Bölümü, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007), 66-68
3. Şengönül M, Durgun İ, Dökmetaş N, Kalkan H, Kaftanoğlu B. Bor Nitrür Kaplamanın Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışına Etkisi, Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, 2018, 25-30.
4. A. McL. Aitken, Electroless Nickel Plating Processes, Paper 4 — Symposium on Nickel Deposition in the Engineering Industries, London, (1963).
5. A. F. Carreira, A. M. Alternative corrosion protection pretreatments for aluminum alloys, *CrosMark*, 2017.
6. Rose I., Whittington C., *Nickel Plating Handbook*, Nickel Institute, Brussels, 2014
7. Metal Forming Center of Excellence-Atılım University, Ankara, TURKEY.
8. ASTM B117-19, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019,

Teknoloji Tasarımcılarının Paradoksu: Özgünlük mü? Veriye Dayalı Tasarım mı?

Ahmet Raşit Petekci 

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 20-11-2020

Kabul: 23-05-2021

Sorumlu Yazar: Ahmet Raşit Petekci

Email: arpetekci@gmail.com

Bu çalışmada, "Teknoloji tasarımında; hangi koşullarda özgünlük, hangi koşullarda veriye dayalı tasarım tercih edilmelidir?" sorusuna cevap aranmıştır. Çalışma konusu, insan bilgisayar etkileşimi alanı, kullanılabilirlik dalı ile ilgilidir. Problemin çözümü için nitel araştırma teknikleri kullanılmış olup, literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması için "data-driven design", "human computer interaction", "usability" anahtar kelimeleri ile 2012-2020 arasında yayınlanmış İngilizce makaleler incelenmiştir. İncelenen 122 araştırmanın 50'si (41%) "usability", 44'ü (36%) "human computer interaction", 28'i (23%) "data-driven design" anahtar kelimeleri ile ilgilidir. Anahtar kelimelerden "data-driven design" kelimesi ile ilgili en çok çalışma ABD'de, en çok çalışma alanı mühendislik konularında; "human computer interaction" kelimesi ile ilgili en çok çalışma Almanya'da, en çok çalışma alanı tıp ve diş hekimliği konularında; "usability" kelimesi ile ilgili en çok çalışma Çin'de, en çok çalışma alanı bilgisayar bilimleri konularında olmuştur. Araştırma sonucunda tasarımcıların; seçenekler arasında karar verme, kullanıcı davranışlarını öngörememe ve dijital ürün tasarımlarında veriye dayalı tasarım metodunu tercih etmeleri; marka, güven, itibar yaratmak ve üründe uzun süren hedef oluşturmak için özgünlük metodunu kullanmaları gerektiği ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsan bilgisayar etkileşimi, kullanılabilirlik, teknoloji tasarım, veriye dayalı tasarım, özgünlük.

1. GİRİŞ

İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, teknolojiyi insan davranışlarına ve kullanışlarına uygun hale getirmek için oluşturulmuş bir disiplinler arası çalışma alanıdır. Alan, başlangıçta sadece bilgisayar teknolojisi ile ilgilenirken zamanla tüm bilgi teknolojilerini içine alacak şekilde genişlemiştir [1]. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanının amacı, insanlar için işlevsel, güvenli ve kullanıcı dostu sistemler oluşturmaktır [2]. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, bilgisayarların ve makinelerin insanlığa nasıl daha iyi hizmet verebileceğinin incelemesini yapar [3]. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanı başlangıcından bu yana muazzam bir şekilde büyümüş olsa da, hem kullanıcılar hem de bilgisayarlar hakkında daha fazla şey keşfedildikçe gelişmeye devam edecektir. Bunun nedeni İnsan-Bilgisayar Etkileşiminin, ancak kendimizi anladığımız kadar iyi olabileceğidir [4]. İnsan-Bilgisayar Etkileşimi, insan ve bilgisayar arasındaki arayüzlere ve kullanıcıyı tatmin eden etkileşimli bilgisayar sistemlerinin nasıl tasarlanacağına, değerlendirileceğine ve uygulanacağına odaklanır [5]. İnsanlar bilgisayarlarla

birçok farklı şekilde etkileşime girer, bu da etkileşimi kolaylaştıran iyi bir arayüze sahip olmanın günlük faaliyetlerimiz için çok önemli olduğu anlamına gelir [6]. İyi olarak ifade edilen kullanıcı arayüzleri, hem bireyin bir şeyleri başarma yeteneğinin desteklenmesine hem de toplumlar üzerinde önemli bir etkiye sebep olabilir. Başarılı kabul edilen kullanıcı arayüzleri yüz milyonlarca bilgisayar işlemini hesaplayarak; belge oluşturma, fotoğraf paylaşma, bağlantı kurma ve veri bulma gibi faaliyetlerin yapılmasını sağlar. Kötü tasarlanmış arayüzler ise yazılım hatalarından, anlaşılmayan bağlantılardan, çalışmayan butonlardan vb. elemanlardan oluşur. Başarısız, kötü arayüzler; uçak kazalarından, nükleer felakete kadar tahmin edilemeyen fakat yıkıcı birçok olaya sebep olabilir [7].

Kullanılabilirlik ise İnsan-Bilgisayar Etkileşimi alanının çalışma yaptığı dallardan bir tanesidir. Kullanılabilirlik, belirli bir bağlamdaki belirli bir kullanıcının, tanımlanmış bir hedefe etkili, verimli ve tatmin edici bir şekilde ulaşmak için bir ürünü/tasarımı ne kadar iyi kullanabileceğinin bir

ölçüsüdür. İyi bir tasarım şu beş kullanılabilirlik kriterlerine göre ölçülür: Etkililik, verimlilik, katılım, hata toleransı ve öğrenme kolaylığı [8]. Kullanılabilirlik, kullanıcı arayüzlerinin ne kadar kolay kullanılacağını değerlendiren bir kalite özelliğidir. Kullanılabilirlik sözcüğü aynı zamanda tasarım süreci sırasında kullanım kolaylığını iyileştirmeye yönelik yöntemleri ifade eder [9]. Kullanılabilirliğin ölçülmesi çeşitli testlerin uygulanması ve bu uygulamaların sonucunda elde edilen verilerin işlenmesi ile gerçekleşir [10].

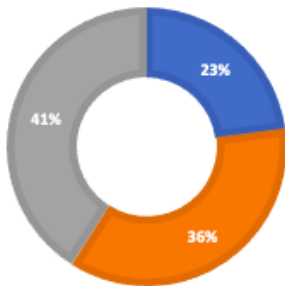
İnsan Bilgisayar Etkileşimi ve kullanılabilirlik kavramları teknoloji tasarım konusunun merkezinde yer alır ve tasarımcılara rehberlik eder. Bu rehberlik eşliğinde tasarımcıların ve araştırmacıların düşünce dünyasında iki ana soru meydana gelir: Acaba teknoloji tasarımcıları daima veriye dayalı tasarım mı yapmalıdır? Teknoloji tasarımı konusunda hangi koşullarda özgünlük, hangi koşullarda veriye dayalı tasarım tercih edilmelidir? Bu sorulara cevap arama isteği ile araştırmanın amacı ortaya çıkmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Literatür taraması için "data-driven design", "human computer interaction", "usability" anahtar kelimeleri ile 2012-2020 arasında yayınlanmış İngilizce yayınlar incelenmiştir.

3. BULGULAR

2012-2020 yılları arasında incelenen 122 araştırmadan 50'si (41%) "usability", 44'ü (36%) "human computer interaction", 28'i (23%) "data-driven design" anahtar kelimeleri ile ilgilidir (Şekil 1).



Şekil 1. İncelenen makalelerin anahtar kelime durumlarına göre yüzdeleri oranları

"data-driven design" anahtar kelimesi ile ilgili yıllara göre makale sayısı Tablo 1'de gösterilmiştir.

"human computer interaction" anahtar kelimesi ile ilgili yıllara göre makale sayısı Tablo 2'de gösterilmiştir.

"usability" anahtar kelimesi ile ilgili yıllara göre makale sayısı Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Yıllara göre makale sayıları ("data-driven design")

Yıl	Makale sayısı
2020	5
2019	5
2018	4
2017	4
2016	3
2015	3
2014	1
2013	2
2012	1

Tablo 2. Yıllara göre makale sayıları ("human computer interaction")

Yıl	Makale sayısı
2020	5
2019	6
2018	6
2017	7
2016	6
2015	4
2014	3
2013	2
2012	5

Tablo 3. Yıllara göre makale sayıları ("usability")

Yıl	Makale sayısı
2020	4
2019	6
2018	7
2017	8
2016	7
2015	7
2014	5
2013	3
2012	3

Anahtar kelimelerin yoğunlukla hangi ülkelerde çalışıldığına dair bilgiler Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Anahtar kelimeler ve ülkeler

“data-driven design”	ABD
“human-computer interaction”	Almanya
“usability”	Çin

Anahtar kelimeler ve yoğunlukla inceleme yapıldığı konu alanları Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Anahtar kelimeler ve konu alanları

“data-driven design”	Mühendislik
“human-computer interaction”	Tıp ve Dış Hekimliği
“usability”	Bilgisayar Bilimleri

3. 1. Veriye Dayalı Tasarım

Kullanıcı dostu bir ürün oluşturma süreci, neyin işe yarayıp neyin yaramadığına ilişkin verilerle yönlendirilmelidir. Kağıt üzerinde iyi görünen özellikler, pratikte kafa karıştırıcı hale gelerek, kullanıcıların üründen istenen performansı elde etmesini engelleyebilir. İşte veriye dayalı tasarım burada devreye girmektedir [11]. Veriye dayalı tasarım, verilerle desteklenen ve tasarımcının hedef kitleyi anlamasına yardımcı olan bir disiplin olarak tanımlanabilir. Verilerle çalışmak, çalışmanın doğru yolda olduğunu kanıtlar, yeni trendleri ortaya çıkarırken kullanıcıların sıkıntılarını, fırsatlarını ortaya çıkarır ve bakış açısına nesnellik katarak tasarımları iyileştirir [12].

Verileri dikkate almamak veya verileri etkisiz bir şekilde kullanmak bir projenin başarısızlığı için ciddi sonuçlar doğurabilir. Veriye dayalı herhangi bir araştırma yapmadan, yalnızca içgüdüye dayanarak veya piyasadaki en iyi uygulamalar baz alınarak oluşturulan ürünler, etkisiz ve maliyetli olabilir [13]. MIT'nin Dijital İş Merkezi tarafından yapılan bir araştırmada; işlerinde veriye dayalı karar veren şirketlerin rakiplerinden ortalama olarak %5 daha üretken ve %6 daha kârlı olduğu görülmüştür [14]. Veriye dayalı kullanıcı deneyimi tekniklerinin yatırım getirisinde somut bir gelişme sağladığı birçok örnek vardır. Örneğin, 2014 yılında, Virgin America Hava yolu Şirketi, yeni ve duyarlı bir şekilde web sitesini yeniden tasarlamak için A/B testini kullandı. Sonuç olarak kullanıcı geri dönüş oranlarında %14

artış, %20 daha az destek çağrısı, farklı cihazlar arasında neredeyse iki kat daha hızlı rezervasyon yapan müşteriler oluştuğu ortaya çıktı [15]. Music & Arts şirketi, kullanılabilirliğin temel ölçüm araçlarından olan sezgisel değerlendirmeye dayanarak tasarladığı e-ticaret web sitesi çevrimiçi satışlarını yıldan yıla yaklaşık %30 arttı [16].

Veriye dayalı tasarım odaklı düşünme, yalnızca çok veri toplamaktan ibaret değildir. İdeal olan, kullanıcı deneyiminize ve iş ihtiyaçlarınıza göre veri toplamak için bir plan geliştirmektir. Bunun için öncelikli olarak gerçekçi hedefler oluşturmak gereklidir. Veriler, kullanıcı deneyimi tasarım sürecinin önemli bir parçası olsa da, karar vermedeki tek faktör bu değildir. Toplanan bilgiler uygulanırken fizibilite, maliyet, zamanlama ve diğer faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Örneğin, bir ürünün çoktan piyasaya sürüldüğü buna rağmen hala bazı iyileştirmelerin gerekli olduğunu düşünüldüğünde; bu durum için veri toplama süreci, sıfırdan yeni bir ürün oluşturma sürecinden çok daha farklı olacaktır. Ürünün veya iş konseptinin tamamının elden geçirilmesi her zaman gerçekçi veya uygun maliyetli olmayabilir [17].

Tasarımlar geliştirilirken nicel sonuçları; saygınlık, markalaşma ve etik ile beraber dikkate almak önemlidir. Örneğin, bir web sitesinde gizli ücretler veya yanıltıcı bağlantılar kullanılması, test aşamasında iyi performans göstermesine neden olabilir. Ancak, bu tür taktikler kullanılarak, hedef kitleyi yabancılaştırma ve markanın güvenilirliğine zarar verme riskiyle karşı karşıya kalınabilir. Bu sebeple uzun vadede yatırım getirisinin azalmasına yol açar. [18].

Veriye dayalı tasarım üç ana temel üzere kurulmuştur. Bunlar; “data driven”, “data informed” ve “data aware” yaklaşımlarıdır. “Data driven”, yalnızca nicel verilere dayalı tasarım kararlarını almayı ifade eder. Bu aşamada veriler birincil önem sahiptir. Projenin ana hedefi performans optimizasyonu olduğunda, tamamen veriye dayalı bir yaklaşım uygun olabilir. “Data informed” yaklaşımda, nicel verilerin yanı sıra nitel bilgi, içgüdü ve deneyim gibi ek faktörlere öncelik verilebilir. “Data aware” yaklaşımda ise veriye duyarlı bir tasarım ekibi, nicel verileri diğer karar verme faktörleriyle eşit bir zemine yerleştirir. Bu tür bir ekip, kullanıcı deneyimi testinden elde edilen verileri birçok potansiyel değerli bilgi kaynağından yalnızca biri olarak görür [19].

Müşteriler, işletmeler ve şirketler tasarım ile ilgili kararlar verirken büyük ölçüde verilere dayanırlar. Veriye dayalı tasarım hedef kitle için işe yarayan şeylerin bilinmesi demektir. İş tasarım kısmına gelince tasarımcılar için veriler karmaşık gelebilir. Tasarımcılar bir kullanıcı arayüzü veya

görsel malzeme tasarlarken sayılardan ve karmaşık elektronik tablolarından uzak durmak isteyebilirler. Fakat en karmaşık veri kümesi dahi artık görselleştirilebilir ve basitleştirilebilir. Derin öğrenme, büyük veri ve yapay zeka destekli analiz yoluyla hedef kitle hakkında daha fazla bilgi edinebilir ve öğrenebilir [20]. Doğru uygulandığında, veriye dayalı bir tasarım yaklaşımı her tasarımcının yardımcısıdır. Tasarımcının çalışmasını destekleyen güçlü bir veri seti ve deneyimli bilgisayar bilimi ekibi ile ürünlerde üst düzey tasarımlar oluşturulabilir. Veriler ile tasarım yapmak, ürün üzerindeki kontrolü artırır, ürünün doğru ve revizyonsuz bir şekilde çalışmasını sağlar [21].

Tasarım sanatı, veri biliminden etkilenmelidir. Veri toplama ve analiz etme, daha iyi tasarımlar ve daha iyi kullanıcı deneyimleri yaratmanın anahtarıdır [22]. Veriler, tasarımcılara, ürünlerini kullanan kişiler için mümkün olan en iyi tasarımları oluşturabilmeleri için iç görü sağlar. Bu veriler, birincil ve ikincil kaynaklardan birden çok biçimde gelebilir. Tasarımcılar için önemli olan, hangi veri setlerinin kullanılmaya değer olduğunu ve hangilerinin göz ardı edileceğini belirlemektir. Veriye dayalı kullanıcı arabirim tasarımı, optimum kullanıcı deneyimi oluşturmanın en iyi yolunu belirlemek için farklı türde veriler gerektirebilir. Bu veriler, bir ürünün güncellenmesine ilişkin web sitesi uygulama analitiği, kullanıcı görüşleri, A/B testi, davranış akışları ve diğer kullanıcı deneyimi araştırma türlerini içerebilir [23]. Verilerle çalışmanın iyi taraflarından biri de daha fazla veri toplamanın her zaman mümkün olmasıdır. Veriye dayalı tasarım karar süreci döngüselidir. Bu döngü şunları içerir: tasarımcılar verileri toplamalı, analiz etmeli, verilere dayalı kararlar vermeli ve ardından daha fazla veri toplayıp analiz ederek bu kararları test etmelidir [24].

3. 2. Özgünlük, His, İçgüdü

Muazzam tasarım yeteneklerine sahip günümüzün teknolojileri ile, akla gelebilecek neredeyse her fikir bir ürüne dönüşebilmektedir [25]. Radikal, şaşırtıcı ve çağrıştırmacı nesnelere eski zamanlara göre daha kısa sürede ve daha ayrıntılı oluşturulabilmektedir [26]. Yeni yüzyılda tasarımın sorunu teknolojinin sınırları değil, hayal gücünün sınırlarıdır [27]. Birçok teknoloji şirketi için tasarım artık özne bir durum değildir. Bunun yerine, teknoloji üreticilerinin tasarladığı her şey verilerle ilgilidir [28]. En küçük tasarım kararlarının bile etkinliğini ölçen analizler bulunmaktadır [29]. Bu sürekli veri akışı, ürünlerin biçimlerinde ve satın almalarının belirlenmesinde artan bir rol oynamaktadır [30].

Tasarım ve teknolojinin geleceği söz konusu olduğunda, karşılaşılan rahatsız edici soru şudur: "İnsan tasarım içgüdüleri teknoloji üretmede artık

önemli mi?". Tasarım dünyasında her zaman veri ve içgüdü arasında bir ikilik vardır. Tasarım departmanları, geçmiş yıllarda, bazı insanların doğuştan gelen bir tasarım anlayışına sahip olduğunu düşünürdü. Devam etmekte olan tasarımların etkililiğini ölçmek son derece zor olduğu için içgüdü yüceltilirdi. Ancak günümüzün dijital devleri bunun yerine verileri yüceltiyorlar. Mükemmel sonuç bulunana kadar her bir tasarım ögesinin yüzlerce varyasyondan geçmesi artık olağan bir şeydir. Fakat bu durum tasarımcılar için yorucu ve zorlayıcı olabilir [31]. Yirminci yüzyılın başlarından itibaren ortaya çıkan mühendislik ürünleri kendilerini daha estetik yapıya bırakmaktadır. Mühendislik ile estetik tasarım yakınlaştıkça bazı sorunlar ortaya çıkmıştır. Buradaki en büyük zorluk, ürün ile ilgili tasarım kararı verilirken veriler ile içgüdü arasında denge kuramamaktır [32]. Hiçbir tasarımcı, müşterilerinin tam olarak ne isteyeceğini veya yeni bir tasarımla karşılaştıklarında insanların nasıl davranacağını bilerek doğmaz. İçgüdüler, kişinin çevresiyle etkileşimini artırdığı ölçüde derinleşir. İnsan beyni, yeni bir tasarıma dair verilerle karşılaştığında, içgüdüleri geliştiren ve güçlendiren inanılmaz bir kalıp eşleştirme makinesidir [33]. Tasarım çoğunlukla sanat ve sezgi ile ilgilidir. Çoğu tasarımcı, yaratıcılıklarının ve sezgilerinin yerini verilere ve gerçeklere bırakma korkusuyla veriye dayalı tasarım fikrini sevmemektedir.

Maalesef tasarım öznellikten çıkmıştır ve veriler artık dünyamızı yönetmektedir. Tüm tasarım kararlarının kullanıcı geri bildirimleri veya iş başarı ölçütleriyle doğrulanması gerektiği söylenmektedir. Bir prototipin, A/B testi veya çeşitli testlerde düzgün çalıştığı kanıtlanamazsa ne yazık ki üretime değerli görülmemektedir. Veri odaklı tasarımın bu acımasız dünyasında, bir zamanlar değer verilen bir şey gözden kaçırılmaktadır: Tasarımcının İçgüdü. Tasarım kararlarını yönlendirmek için verilere aşırı güvenmek, onu görmezden gelmek kadar zararlı olabilir. Veriler yalnızca bir tür hikaye anlatır. Tasarım içgüdü, doğuştan gelen yaratıcı yetenek ve kültürel tahminlerden çok daha fazlasıdır. İçgüdüler ve özgünlük kavramı deneyim ile zenginleşir. Tasarım içgüdü, anlamlı verilerin yokluğunda istenen tasarım kararlarını vermek için ihtiyaç olan tüm araçların toplamıdır. Tasarımcının ölçütü ürün ile ilgili sayısal veriler olamaz. Çünkü değerli olan her şey, sayı ile ifade edilemez. Veriler, ölçülmesi kolay şeyleri ölçmede iyidir. Bazı hedefler daha az somuttur, ancak bu onları daha az önemli yapmaz [34].

Türü ve çeşidi ne olursa olsun her ürün bir tasarım ve her tasarım bir sanattır. Her tasarım da tasarlayanından derin izler taşır. Bir resim tablosu tasarımdır ve zamanına göre teknolojiktir, dolayısıyla teknoloji tasarımıdır. Acaba kaç ressam bir resmi yaparken ait olduğu toplumdaki veri toplaması

gerçekleştirmiştir? Salvador Dali çok büyük bir ressam olarak kabul edilir. Onu büyük bir ressam, büyük bir tasarımcı yapan şey herkesin onun resimlerinde kendinden bir bilgi bulması mıdır yoksa benzersiz, özgün içerikler ortaya çıkarması mıdır [35]?

Veriler olmadan hayatı sürdürmek, geliştirmek olanaksızdır. Bu genel geçer bir kabuldür. Ama veriler her zaman geçerli midir [36] Piyasadaki teknoloji ürünlerinde çeşitlilik olması, yarış olması her zaman veriye dayalı tasarım gerekliliğini ortaya çıkarmaz. Çok meşhur bir Amerikan telefon markası var. Yıllardır aynı özelliklere, aynı tasarıma benzer akıllı telefonlar üretmektedir. Bir de bu firmanın rakibi Güney Koreli başka bir akıllı telefon firması var. O da değişiklik üzerine değişiklik katmaktadır. Ama marka ve itibar üzerine bir anket yapıldığında bu Amerikan firması açık ara önde çıkıyor. Bu teknoloji tasarımcılara bir şeyler göstermektedir: Bir kişi veya firma zamansal ve kalite odaklı bir tasarım istiyorsa; içgüdülerine, hislerine, özgünlüğüne dayanmalıdır[37].

4. TARTIŞMA ve SONUÇ

Veriye dayalı teknoloji tasarımı hem sanat hem de bilimdir [38]. Hem yeni başlayanlar hem de uzman tasarımcılar için verilerin nasıl toplanıp analiz edileceğini ve buna dayalı tasarımların nasıl uygulanacağını anlamak önemli bir beceridir [39]. Ne zaman verilerin veya ne zaman özgünlüğün kullanılacağı kesin olarak bilinemez ama tasarımcılar için her zaman bazı ipuçları vardır [40]. İki veya daha fazla seçenek arasında karar verme aşamasında verilerin kullanılması önerilir. Örneğin iki ürünün potansiyel çözümlerini karşılaştırmak veya bir ürünün önceki ve sonraki modellerinden hangisinin gerçekten daha iyi performans gösterdiğini görmek için A/B testleri çok belirleyicidir [41]. Kullanıcı davranışından emin olunmadığı durumlarda veriler kullanılır [42]. Firmaların, ürünlerin; marka, güven ve itibar çalışmalarında devreye özgünlük girer [43]. Veriler; soyut değerleri, duyguları, istekleri ; ödeme, talep etme vb. somut değerler gibi kolayca ölçemez [44]. Uzun vadeli ürün itibarı oluşturulurken, bazen kısa vadeli veri trendleriyle uyum sağlanabilir, teknoloji tasarımcılarının özgünlüğü burada ön plana çıkar [45]. Dijital ürünler söz konusu olduğunda, web ve mobil veri analizi bize müşterilerin tam olarak ne yaptığını söyler [46]. Detay ve kalite çalışmalarında tasarımın içgüdüleri verilerin önüne geçer [47].

Veri ve içgüdülerin tasarım kararlarında karşı güçler olduğunu düşünmek yaygın olmakla birlikte ikisi arasında birbirinden tamamen ayrılmayan bulanık bir çizgi vardır. İçgüdüler etrafımızdaki dünyayı gözlemleyerek inşa edilir ve bu gözlemler aslında

sadece başka bir veri akışıdır. İstatistikler, toplanılan zor verilerin özetlenmesine ve anlamlandırılmasına yardımcı olur. İşte bu yüzden en iyi ürünler (insanların kullanmak istediği, kullanmayı sevdiği ürünler) her ikisinden de bir tat verirler.

Anahtar kelimelerin tümünde 2012 yılından 2020 yılına doğru gelirken makale sayısında artış görülmüştür. Bunun nedeni anahtar kelimelerin içerdiği teknolojilerin insan hayatı içinde kendilerine daha çok yer bulmasıdır [48]. ABD’de son yıllarda yapılan istatistik çalışmaları artması veri bilimine olan önemi artırmıştır [49]. Veri bilimine olan önemin artması da “data-driven design” anahtar kelimesi ile ilgili araştırmaları pozitif yönde etkilemiştir. İstatistik bilimi sunduğu verilerle tasarımcıların seçenekler arasında karar vermesine yardımcı olur [50]. Mühendislik tasarım problemleri, genel olarak, karar verme çerçevesinde, yani mühendislik tasarım kararları altında tartışılır [51]. Araştırma bulgularında yer alan “data-driven design” anahtar kelimesinin en çok mühendislik alanı ile ilgili konularda yer alması araştırma sonuçlarından seçenekler arasında karar verme ile mühendislik alanında kesiştiği görülmüştür.

Endüstri 4.0’ın Almanya üzerinden yayılımı bazı teknolojik konuların bu ülkede daha yoğun çalışılmasını sağladı [52]. İnsan Bilgisayar Etkileşimi de bu çalışma alanlarından biridir. Bu alanda yaşanan teknolojik gelişmelerin etkilediği iki ana alan vardır. Bunlar askeri teçhizatlar ve tıp donanımlarıdır [53]. Araştırmanın anahtar kelimelerinden “human computer interaction” kelimesinin Almanya ve tıp özelinde bir sonuç doğurması bu sebeplerle ilişkilendirilebilir.

Büyük teknoloji firmalarının üretim merkezlerini Çin’e taşımaları ve Çin’in kendi teknoloji firmalarını kurması 2015 yılından itibaren bu firmaların ticari sahadaki ekonomik değerini artırmıştır [54]. Teknolojinin özellikle mobil ve bilgisayar çevre bileşenleri piyasasına doğru evrilmesi ile Çin’in ilgili alana yaptığı yatırımlar artırmıştır [55]. Yapılan yatırımların seyri incelendiğinde kullanılabilirlik alanına 2016 yılından itibaren artan bir eğilim görülmüştür [56]. Tüm bu veriler ışığında araştırma anahtar kelimelerinden “usability” kelimesi ile Çin ve bilgisayar bilimleri arasındaki ilişki ortaya çıkmaktadır.

Araştırma sonucunda tasarımcıların; seçenekler arasında karar verme, kullanıcı davranışlarını öngörememe ve dijital ürün tasarımlarında veriye dayalı tasarım metodunu tercih etmeleri; marka, güven, itibar yaratmak ve üründe uzun süren hedef oluşturmak için özgünlük metodunu kullanmaları gerektiği ortaya çıkmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. Durumlar ve Tercihler

Seçenekler arasında karar verme	Veriye dayalı tasarım
Kullanıcı davranışlarını öngörememe	Veriye dayalı tasarım
Dijital ürün tasarımı	Veriye dayalı tasarım
Marka yaratımı	Özgünlük
Güven oluşturma	Özgünlük
İtibar sergileme	Özgünlük
Uzun süreli hedefler	Özgünlük

THE PARADOX OF TECHNOLOGY DESIGNERS: ORIGINAL? DATA-BASED DESIGN?

In this research, the answer of the question was searched about "In technology design; in what conditions originality, in what conditions should data-based design be preferred?" The subject of the study is related to the field of human computer interaction, the usability branch. Qualitative research techniques have been used to solve the problem, and a literature review has been made. "data-driven design", "human computer interaction", "usability" keywords and English articles published between 2012-2020 were examined for literature review. Of the 122 studies examined, 50 (41%) were related to "usability", 44 (36%) to "human computer interaction", 28 (23%) to "data-driven design" keywords. Most of the studies on the word "data-driven design" from the keywords are in the USA, mostly in engineering subjects; The most studies on the word "human computer interaction" are in Germany, the most work areas are in medicine and dentistry; The most work on the word "usability" has been in China, the most widely in computer science. As a result of the research it has emerged that designers need to use the method of originality to create brand, trust, reputation and long-lasting goals in the product about making decisions between options, not being able to predict user behaviour and preferring the data-based design method in digital product designs.

Keywords: Human computer interaction, usability, technology design, data-driven design, originality.

KAYNAKÇA

- Preece, J., Sharp, H., & Rogers, Y. (2015). Interaction design: beyond human-computer interaction. John Wiley & Sons.
- Kim, G. (2015). Human-computer interaction. Auerbach Publications.
- Qi, J., Jiang, G., Li, G., Sun, Y., & Tao, B. (2019). Intelligent human-computer interaction based on surface EMG gesture recognition. *IEEE Access*, 7, 61378-61387.
- Bachmann, D., Weichert, F., & Rinkenauer, G. (2018). Review of three-dimensional human-computer interaction with focus on the leap motion controller. *Sensors*, 18(7), 2194.
- Quitadamo, L. R., Cavrini, F., Sbernini, L., Riillo, F., Bianchi, L., Seri, S., & Saggio, G. (2017). Support vector machines to detect physiological patterns for EEG and EMG-based human-computer interaction: a review. *Journal of neural engineering*, 14(1), 011001.
- Poole, E. S. (2013). HCI and mobile health interventions: how human-computer interaction can contribute to successful mobile health interventions. *Translational behavioral medicine*, 3(4), 402-405.
- Klemmer, S. (2020, Eylül 26). Scott Klemmer. <https://d.ucsd.edu/srk/>
- Kortum, P. T., & Bangor, A. (2013). Usability ratings for everyday products measured with the System Usability Scale. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(2), 67-76.
- Baharuddin, R., Singh, D., & Razali, R. (2013). Usability dimensions for mobile applications-a review. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol*, 5(6), 2225-2231.
- Tuch, A. N., Roth, S. P., Hornbæk, K., Opwis, K., & Bargas-Avila, J. A. (2012). Is beautiful really usable? Toward understanding the relation between usability, aesthetics, and affect in HCI. *Computers in Human Behavior*, 28(5), 1596-1607.
- Ding, S. X. (2014). Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant control systems. Springer London.
- Zhang, R. Z., Gucci, F., Zhu, H., Chen, K., & Reece, M. J. (2018). Data-driven design of ecofriendly thermoelectric high-entropy sulfides.

- Inorganic chemistry, 57(20), 13027-13033.
13. Chi, R., Hou, Z., Huang, B., & Jin, S. (2015). A unified data-driven design framework of optimality-based generalized iterative learning control. *Computers & Chemical Engineering*, 77, 10-23.
 14. MIT Technology Review. (2020, Ağustos 25). How Analytics and Machine Learning Help Organizations Reap Competitive Advantage. Amazonaws. <https://s3.amazonaws.com/files.technologyreview.com/whitepapers/Google-Analytics-Machine-Learning.pdf>
 15. Philips, M. (2020, Temmuz 3). The True ROI of UX: B2B Redesign Case Studies. Designers. <https://www.toptal.com/designers/ux/roi-of-ux-redesign-case-studies>
 16. Stelzner, M. (2020, Haziran 15). 2018 Social Media Marketing Industry Report. Social Media Examiner. <https://www.socialmediaexaminer.com/social-media-marketing-industry-report-2018/>
 17. Ding, S. X. (2012). Data-driven design of model-based fault diagnosis systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(15), 840-847.
 18. Agrawal, R., Golshan, B., & Papalexakis, E. (2016). Toward Data-Driven Design of Educational Courses: A Feasibility Study. *Journal of Educational Data Mining*, 8(1), 1-21.
 19. Zhang, Y., Yang, Y., Ding, S. X., & Li, L. (2014). Data-driven design and optimization of feedback control systems for industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6409-6417.
 20. Sari, A. H. A. (2014). Data-driven design of fault diagnosis systems: Nonlinear multimode processes. Springer Science & Business.
 21. Du, X., & Zhu, F. (2018). A new data-driven design methodology for mechanical systems with high dimensional design variables. *Advances in Engineering Software*, 117, 18-28.
 22. Bier, H., & Knight, T. (2014). Data-driven design to production and operation. *Footprint*, 1-8.
 23. Kim, H., Liu, Y., Wang, Y., & Wang, C. (2016). Data-Driven Design (D3). *Journal of Mechanical Design*, 138(12).
 24. Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 157-169.
 25. Grossberg, K. A. (2016). The new marketing solutions that will drive strategy implementation. *Strategy & Leadership*.
 26. Schümmer, T., Haake, J. M., & Stark, W. (2014, July). Beyond rational design patterns. In *Proceedings of the 19th European Conference on Pattern Languages of Programs* (pp. 1-13).
 27. Muniz Jr, J., de Carvalho, C. P., & Ribeiro, V. B. (2018, December). Worker and Manager Judgements About Factors that Facilitate Knowledge Sharing: Insights from the Brazilian Glass Segment. In *International Conference on Production and Operations Management Society* (pp. 809-817). Springer, Cham.
 28. Hoshi, K., & Waterworth, J. (2020). Why Primitive Interaction Design?. In *Primitive Interaction Design* (pp. 3-25). Springer, Cham.
 29. Manoela, P., & Cecilia, C. L. (2013). Considerations Regarding The Size Of Innovative Organization In The Knowledge Economy. *Romanian Economic and Business Review*, 402.
 30. Sekliuckiene, J. (2017). Factors leading to early internationalization in emerging Central and Eastern European economies. *European Business Review*.
 31. Heller, S., & D'Onofrio, G. (2017). *The Moderns: Midcentury American Graphic Design*. Abrams.
 32. Hughes, H., Wolf, R., & Foth, M. (2017). Informed digital learning through social living labs as participatory methodology. *Information and Learning Science*.
 33. Britton, C. (2015). *Designing the Requirements: Building Applications that the User Wants and Needs*. Addison-Wesley Professional.
 34. Schultz, T. (2019). *Decolonising Design: Mapping Futures*.
 35. Dalí, S. (2013). *The secret life of Salvador Dali*. Courier Corporation.
 36. Mackey, A., Wakkary, R., Wensveen, S., & Tomico, O. (2017). "Can I Wear This?" Blending Clothing and Digital Expression by Wearing Dynamic Fabric. *International Journal of Design*, 11(3), 51-65.
 37. Sideris, D., Paraskeva, F., Alexiou, A., & Chatziiliou, A. (2014, October). Create a 'Wonderful' Virtual World: The Case of Arigatou in Second Life. In *European Conference on Games Based Learning* (Vol. 2, p. 775). Academic Conferences International Limited.
 38. Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), 3563-3576.
 39. Sierla, S., Kyrki, V., Aarnio, P., & Vyatkin, V. (2018). Automatic assembly planning based on digital product descriptions. *Computers in Industry*, 97, 34-46.
 40. Lyytinen, K., Yoo, Y., & Boland Jr, R. J. (2016). Digital product innovation within four classes of innovation networks. *Information Systems Journal*, 26(1), 47-75.
 41. Banfield, R., Lombardo, C. T., & Wax, T. (2015). *Design sprint: A practical guidebook for*

- building great digital products. " O'Reilly Media, Inc."
42. Hoffman, M. T., & Phillips, C. J. (2013). U.S. Patent Application No. 13/668,168.
 43. Nylén, D., & Holmström, J. (2015). Digital innovation strategy: A framework for diagnosing and improving digital product and service innovation. *Business Horizons*, 58(1), 57-67.
 44. Stef, I. D., Draghici, G., & Draghici, A. (2013). Product design process model in the digital factory context. *Procedia technology*, 9(1), 451-462.
 45. Ashby, M. F., & Johnson, K. (2013). *Materials and design: the art and science of material selection in product design*. Butterworth-Heinemann.
 46. Paritala, P. K., Manchikatla, S., & Yarlagadda, P. K. (2017). Digital manufacturing-applications past, current, and future trends. *Procedia engineering*, 174, 982-991.
 47. Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., & Schaefer, D. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59, 1-14.
 48. Carayon, P., & Hoonakker, P. (2019). Human factors and usability for health information technology: old and new challenges. *Yearbook of medical informatics*, 28(1), 71.
 49. Ghafur, S., Van Dael, J., Leis, M., Darzi, A., & Sheikh, A. (2020). Public perceptions on data sharing: key insights from the UK and the USA. *The Lancet Digital Health*, 2(9), e444-e446.
 50. Cannings, T. I., & Bradley, J. R. (2021). Data-driven design of targeted gene panels for estimating immunotherapy biomarkers. *arXiv preprint arXiv:2102.04296*.
 51. Liu, C., & Chen, X. (2017). Data-driven design paradigm in engineering problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 231(8), 1522-1534.
 52. Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 11(5).
 53. Schaefer, K. E., Baker, A. L., Brewer, R. W., Patton, D., Canady, J., & Metcalfe, J. S. (2019, May). Assessing multi-agent human-autonomy teams: US Army Robotic Wingman gunnery operations. In *Micro-and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications XI (Vol. 10982, p. 109822B)*. International Society for Optics and Photonics.
 54. Liu, Y., Li, Y., He, F., & Wang, H. (2017). Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some Western Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 701-716.
 55. Xiao, B., Tang, Z., & Zeng, Z. (2018). Talking about 5G Mobile Communication Technology. *Journal of Networking and Telecommunications (TRANSFERRED)*, 1(1).
 56. Bilal, M., Yu, Z., Song, S., & Wang, C. (2019, May). Evaluate accessibility and usability issues of particular China and Pakistan government websites. In *2019 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD) (pp. 316-322)*. IEEE.

Nima Zoghipour* 

Ferhat Çelik 

Torun Bakır Alaşımları
Metal San. Ve Tic. A.Ş.
Kocaeli/Türkiye

Yusuf Kaynak 

Marmara Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul/Türkiye

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 04-02-2020

Kabul: 26-04-2021

*Sorumlu Yazar: Nima Zoghipour
Email: nima.zoghipour@gmail.com

Optimization of Process Parameters in Drilling Process of Forged Ecofriendly Low-Lead Brass Alloy

This research presents an experimental investigation of the drilling operation on surface integrity characteristics of forged eco-friendly low-lead brass alloy using flat bottom drill cutting tool and application of techniques for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and Grey relational analysis methods in parametric optimization for solving multiple criteria (objective) process. Experimental data on dimensional accuracy, machining time, cutting forces, and the surface quality of the holes are analyzed to evaluate surface integrity of machined specimens. Analysis of variance (ANOVA) was performed to dispose the significance of the parameters at a %95 confidence interval. Both optimization tools resulted in the same cutting parameters. The analysis of the obtained chip forms verifies the optimization results.

Keywords: TOPSIS, Grey relation analysis, optimization.

INTRODUCTION

Brass is an alloy of copper and zinc, in extents which can be differed to accomplish shifting mechanical, metallurgical and electrical properties [1]. This alloy is perceived for its high strength, high ductility, wear resistance, high electrical and thermal conductivity, recyclability, antibacterial and hygienic, corrosion resistance, and good machinability. Most of all the conveyed brass metal is ought to be machined into its net shape and size. Such tasks generally consolidate cutting operations for different sorts including drilling, turning, milling, grinding, etc. [2]. Lead is regularly added around %2 into brass composition in order to increase the machinability of brass. Lead has a low solubility, and it can migrate towards the grain boundaries in the form of globules as it cools from casting and segregate in the entire microstructure and grain boundaries. Moreover, low melting temperature, $T_m=327.5^\circ\text{C}$ leads to behave as a lubricant during machining [2]. In addition, cutting operations can smear the lead globules over the surface. These effects can lead to significant lead leaching from brasses of comparatively low lead content [3]. From an absolutely manufacturing monetary outlook, replacement of lead-containing

metal with a low-lead or lead-free elective does not have all the earmarks of being a financially feasible alternative, yet it is in fact conceivable, fulfilling the prerequisites of the authorized enactment. However, as an increasing amount of low-lead and lead-free brasses are becoming commercially available and future legislative actions could be expected, even further limiting the use of lead as an alloying element, there is a renewed interest in evaluating the machinability of these new low-lead and lead-free materials [4].

Rahman et al. [5] carried out a study on optimum drilling parameter for HSS drilling tool in micro-drilling processes considering the effect of drilling parameter such as spindle speed, feed rate and drilling tool size on material removal rate (MRR), surface roughness, dimensional accuracy and burr in order to find the best drilling parameter for brass as a workpiece material. Timata et al. [6] carried out an experimental study in drilling forging brass using a special tungsten carbide drilling tool. They studied the exit burr height and workpiece diameter at different spindle speeds and feed rates and used ANOVA in their study. Their ANOVA results demonstrated that

spindle speed and feed rate on exit burr height and workpiece diameter were statistically at significant of level. Kato et al. [7] investigated the effects of web thinning, the helix angle, and the nick geometry on chip evacuation by drilling small holes in lead-free brass with a micro drill. Their results showed that drills with a helix angle of 15° have the longest tool life. Youssef et al. [8] conducted a design of experiment approach to examine the effect of feed rate, rotational speed, drill diameter, and thickness of work material as process variables on the burr formation. The effect of the burr formation on the hardness of the exit surface of the drilled workpiece was investigated by them. Hua et al. [9] studied the impacts of cutting-edge geometry, and workpiece hardness, cutting conditions such as feed rate and cutting speed. They indicated that sharpened edge in addition to chamfer cutting edge and higher feed rate help to increment both compressive residual stress, hardness and penetration depth in hard turning operations. Mogaji et al. [10] determined the optimum parameters required for drilling brass using Response Surface Methodology (RSM) based on L9-A 34-2 fractional factorial design. Their results revealed that the process parameters have a high basic effect in influencing the response variable at %5 critical level beside tool on a zero assortment and that perfect method parameters can be cultivated at a widely appealing level during drilling.

Responses such as surface roughness, dimensional accuracy, cutting force, machining time, material removal rate (MMR), chip size, tool wear are typic emblematical parameters that may be used for a machining process optimization. For this reason, optimization tools have been applied to investigate the optimal process parameters and corresponding responses. Understanding the material behavior in low-lead brass alloys concerning chip fracture and formation mechanisms is vital in order to design candidate alloys for the substitution of conventional leaded brasses without compromising the reliability and performance of manufactured components [11]. Tripathy et al. [12] evaluated the effectiveness of optimizing multiple performance characteristics for PMEDM of H-11 die steel using copper electrode using Taguchi method in combination with Technique for order of preference by similarity to ideal solution and Grey Relational Analysis. They studied the effect of process variables such as powder concentration, peak current, pulse on time, duty cycle and gap voltage on response parameters such as material removal rate, tool wear rate, electrode wear ratio and surface roughness have been investigated using chromium powder mixed to the dielectric fluid.

Flat bottom drills are ideal for particular drilling operations or for flat bottom hole making without auxiliary finishing passes. These tools are favorable in thin plate, cross hole, irregular/rounded

surface, angled and half hole drilling operations. Figure 1 illustrates the various utilization of flat bottom drills.

In this study, an experimental investigation of the drilling operation on surface integrity characteristics of forged eco-friendly low-lead brass alloy using flat bottom drill cutting tool and application of techniques for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) and Grey relational analysis methods in parametric optimization for solving multiple criteria (objective) process is carried out. Experimental data on dimensional accuracy, machining time, cutting forces, and the surface quality of the holes are analyzed to evaluate surface integrity of machined specimens. Analysis of variance (ANOVA) was performed to dispose the significance of the parameters at a 95% confidence interval. The forms of the obtained chips were studied in order to verify the optimization results.

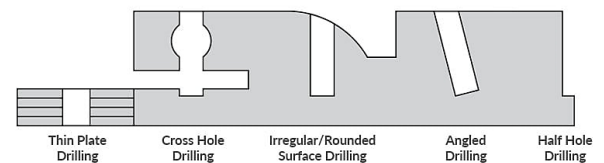


Figure 1. Schematic of the applications of bottom drill [13]

METHODOLOGY

EXPERIMENTAL PROCEDURE

In this study, the work material was CuZn38As (CW511L) low-lead brass alloy cylinders with 50 mm diameter and 200 mm length. The work materials were hot forged at $750 \pm 10^\circ \text{C}$ by 175-ton press with 9.1 m/s stroke velocity. Then forged specimens were considered for the machining experiments. Hence, first during rod extrusion and afterward during forging, the metal is worked twice under high stresses. The double working under tension compacts the metal and forms a dense and refined grain structure. Within that the tensile and shear strengths of the specimens are in this manner expanded. Despite wide range of the applications of these components, just a few studies have been focused on the machining of hot forged brass alloys. The chemical composition and mechanical properties of the test material is given in Table 1. The machining tests were carried out on Fanuc Robodrill α -D21MiB5. A two teeth carbide bottom drill with a diameter of 12 mm, axial rake angle of -5° , primary radial rake angle of 8° , secondary radial rake angle of 25° , 8° of relief angle and 40° of helix angle was used as a cutting tool as shown in Figure 2. During the investigation feed rate, $V_f=150, 300, 450, 600 \text{ mm/min}$, and cutting speed,

and $V_c=75, 115, 150, 190$ m/min was used with coolant flood. The dimensional accuracy of the machined parts has been evaluated by CMM from four points at a depth of 5 mm. The surface roughness of the drilled holes has been measured by Mitutoyo Surftest SJ-400 device and the average of five measurements are reported. The cutting forces have been measured using Kistler dynamometer type 9129AA at a sampling rate of 100 Hz for 10 seconds and the average thrust cutting forces during measurement have been reported in this study.

Table 1 Chemical composition of the studied brass alloy [14]

Composition	Cu	Zn	Pb	Fe	Ni	Al	As	Sn
CuZn38As (CW511L)	61.5	Rem	0.2	0.1	0.3	0.05	0.05	0.1
Technical specifications	Structure		Elasticity Modulus (GPa)		Density (g/cm ³)		Machinability	
	α, β		100		8.41		% 40	

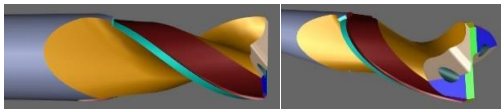


Figure 2. The utilized flat bottom drill

DETERMINATION OF OPTIMAL PROCESS PARAMETERS USING TOPSIS

Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method is an optimization approach introduced by Hwang and Yoon. The basic concept of this method is the shortest and longest distance for the selected alternative (appropriate alternative) from the positive and negative ideal solution is a prerequisite for the answer, respectively. Positive ideal solution is a result that maximizes the benefit criteria and minimizes cost/unrewarding criteria. However, the negative ideal solution maximizes the benefit criteria and minimizes the cost/unrewarding criteria. A TOPSIS analysis is composed of below asserted steps:

Step 1: Development of a decision matrix having ‘ m ’ rows representing the alternatives and ‘ n ’ columns representing the attributes. The decision matrix can be expressed as in Equation (1) [15]:

$$DM = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

where A_i ($i=1,2,\dots,m$) represents the possible alternatives; a_j ($j=1,2,\dots,n$) represents the attributes relating to alternative performance. In other words, a_{mn} is the performance of m^{th} alternative in relation to the n^{th} attribute.

Step 2: Calculation of the normalized matrix, which is demonstrated in Equation (2).

$$NM_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (2)$$

where NM_{ij} stands for the normalized performance of A_i with respect to attribute a_j .

Step 3: Calculation of the weighted normalized decision matrix $\phi=[\varphi_{ij}]$. The weight of each attribute was assumed to be w_j ($j=1,2,\dots,n$).

$$\phi = w_j \cdot NM_{ij} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (4)$$

Step 4: Determination of the positive ideal (best) and negative ideal (worst) solutions by the following expressions:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{(\max(\varphi_{ij})|j \in J), (\min(\varphi_{ij})|j \in J')|i \\ &= 1,2,\dots,m\} \\ &= \{\varphi_1^+, \varphi_2^+, \dots, \varphi_n^+\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A^- &= \{(\min(\varphi_{ij})|j \in J), (\max(\varphi_{ij})|j \in J')|i \\ &= 1,2,\dots,m\} \\ &= \{\varphi_1^-, \varphi_2^-, \dots, \varphi_n^-\} \end{aligned}$$

$$J, J' = \{j = 1,2,\dots,n|j\} \quad (6)$$

where J and J' are the associated with beneficial and unrewarding attributes.

Step 5: Determination of the distances for the solutions. The separation of each alternative from the ideal solution is given by n -dimensional Euclidean distance from the following Equation (8) and (9):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\varphi_{ij} - \varphi_j^+)^2}; i = 1,2,\dots,m \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\varphi_{ij} - \varphi_j^-)^2}; i = 1,2,\dots,m \quad (9)$$

Step 6: Calculation of the relative closeness to the ideal solution by Equation (10):

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}; i = 1,2,\dots,m; 0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad (10)$$

Step 7: Determination of the solution according to the ranking preference order including the most preferred and the least preferred solutions. The alternative with the largest relative closeness is the best choice.

DETERMINATION OF OPTIMAL PROCESS PARAMETERS USING GREY RELATION METHOD

This approach offers strategies for analysis and modelling of the system responses with constrained, incomplete information and characterized by means of random uncertainty. In this method, the whole considered performance objectives are incorporated into a single value that can be used as the single characteristic in optimization problems by data preprocessing.

Step 1: Grey relational generation

In this study, grey relational generating process, a linear normalization of the experimental results (S/N ratios), for responses were performed in the range of 0 and unity. y_{ij} is normalized as Z_{ij} ($0 \leq Z_{ij} \leq 1$) by the following formula. A linear data pre-processing method for the S/N ratio can be calculated by Equation (11):

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})}; i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

Step 2: Calculation of the Grey relational coefficient. The relationship between the ideal (best) and actual normalized experimental results are calculated by Equation (12):

$$\gamma((k), y_i(k)) = \frac{\Delta \min + \xi \Delta \max}{\Delta_{0j}(k) + \xi \Delta \max} \quad (12)$$

where Z_{ij} is the sequence after the data processing, $j=1, 2, \dots, n$; n is the number of experimental data items and $k=1, 2, \dots, m$; m is the number of responses. ξ is the identification coefficient, defined in the range $0 \leq \xi \leq 1$. In this study, ξ is taken as equal to 0.5 in order to demonstrate equal parameter weighting.

Step 3: Calculation of difference values by the following Equation (13), (14) and (15).

$$\Delta_{0j} = ||y_0(k) - y_j(k)|| \quad (13)$$

$$\Delta \min = \min_i \min_k ||y_0(k) - y_j(k)|| \quad (14)$$

$$\Delta \max = \max_i \max_k ||y_0(k) - y_j(k)|| \quad (15)$$

where Δ_{0j} is the absolute value of the difference between $y_0(k)$ and $y_j(k)$, $\Delta \min$ is the smallest value of $y_j(k)$, $\Delta \max$ is the largest value of $y_j(k)$, and $y_0(k)$ is the reference sequence ($y_0(k)=1, k=1, 2, \dots, m$); $y_j(k)$ is the specific comparison sequence.

Step 4: Calculation of the grey relation grade and ordering. The grey relational grade is determined by averaging the grey relational coefficient corresponding to each performance characteristic.

The overall performance characteristic of the multiple response process depends on the calculated grey relational grade. The grey relational grade can be expressed as,

$$\bar{\gamma}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \quad (16)$$

where $\bar{\gamma}_j$ is the grey relational grade for the j^{th} experiment and k is the number of performance characteristics. This approach reduces a multiple response process optimization problem into a single response optimization situation with the objective function of an overall grey relational grade. The higher grey relational grade implies to the closer optimal corresponding result.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The microstructure of the machined workpiece is demonstrated in Figure 3. The yellow and brown colors represent the α and β phases, with %72.14 and %27.86 of content, respectively. The presence of the β phase in the material microstructure simplifies the machining process.

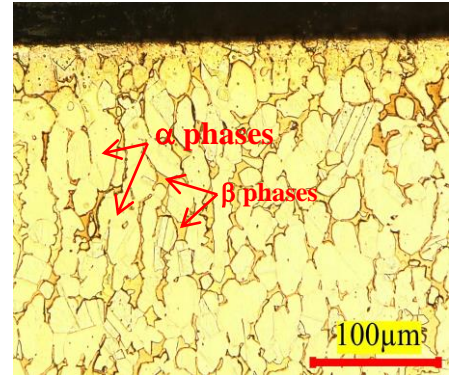


Figure 3. The microstructure of the machined workpiece

The maximum thrust force has been measured at 75 m/min and 600 mm/min of feed rate. However, the minimum value is measured at 190 m/min and 150 mm/min of cutting conditions. Increasing the cutting speed has led to the decrease in the cutting forces which can be attributed to the material softening at elevated temperatures. In contrary, increasing the feed rate has resulted in rising of the thrust force which is due to the increase of contact area during the cutting process. At higher cutting speeds with lower feed rates some vibrations and chatter marks besides to undesired cutting noises has been observed which can be attributed to the lower chip breakage capability and material removal evacuation. The amplitude of the vibrations of the related sound and chatter marks has been declined with the increase of feed rate. Figure 4 demonstrates

the measured cutting forces (thrust forces) in constant 150, 190 m/min of cutting speed and varying feed rate of 150, 300,450, 600 mm/min. Drilling responses related to different parameters has been taken as criteria attributes with 16 alternatives as demonstrated in Figure 5.

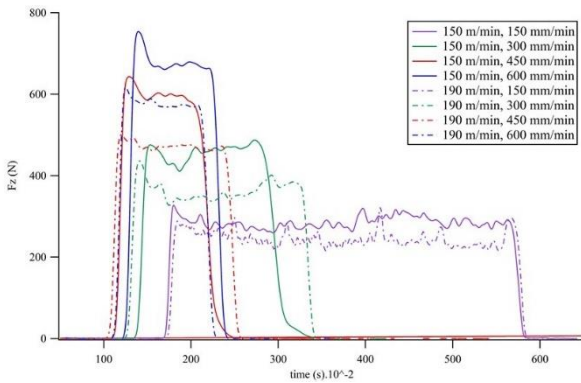
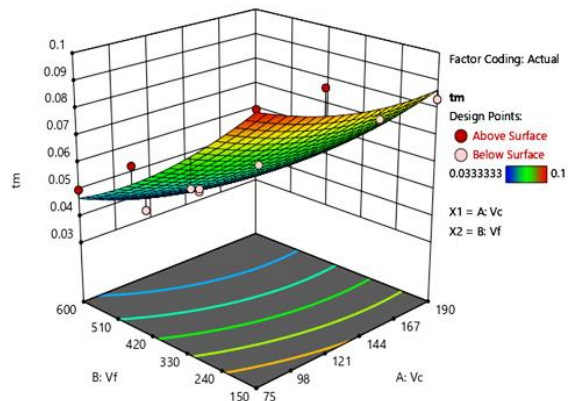
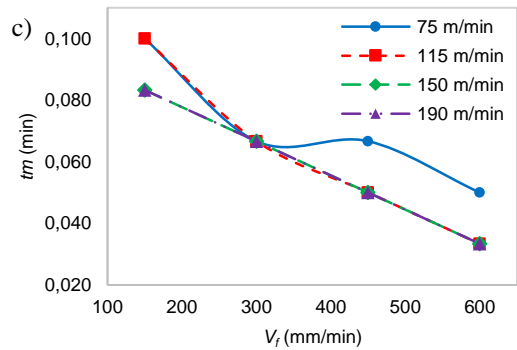
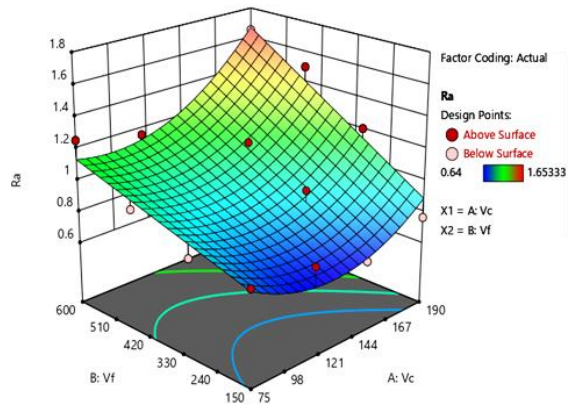
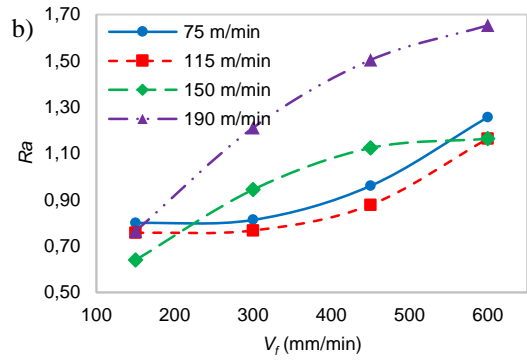
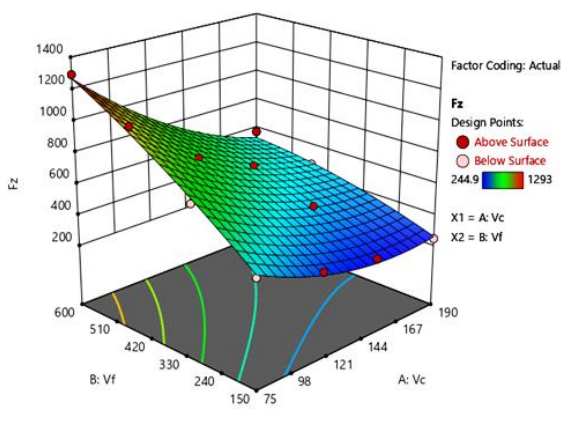
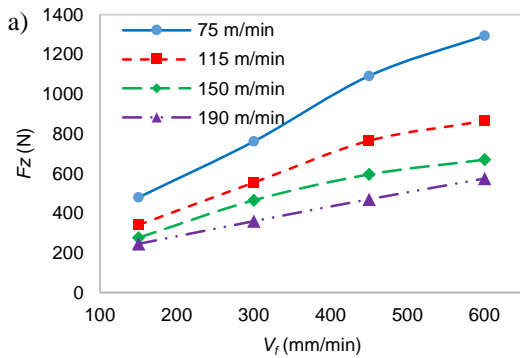


Figure 4. The measured cutting forces during drilling operation



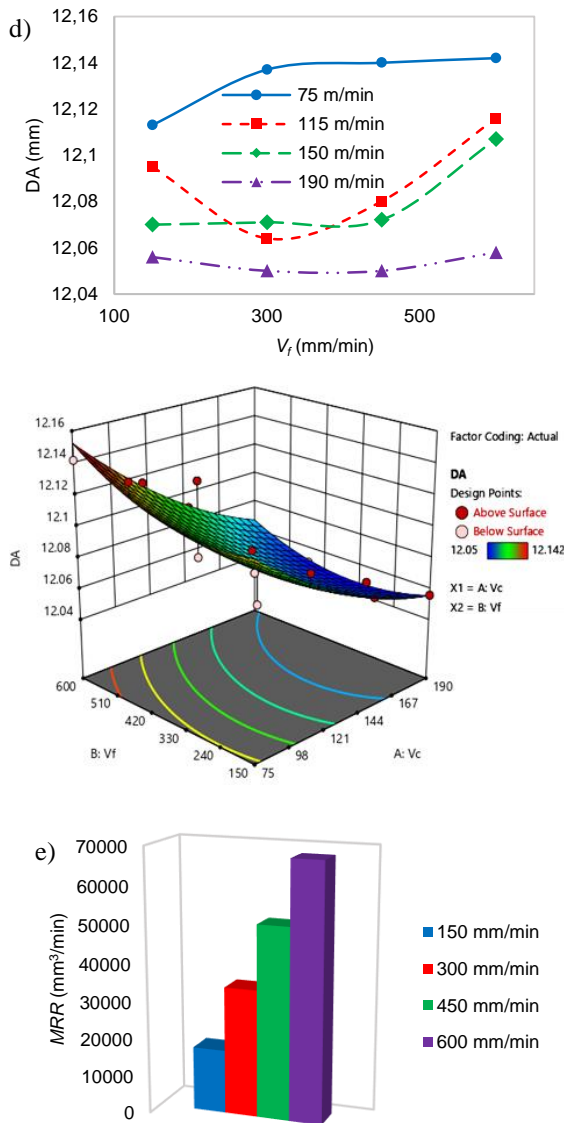


Figure 5. The measured cutting responses; a) thrust forces, b) surface roughness, c) machining time, d) hole diameter, e) material removal rate

As it seen from Figure 5a, maximum and minimum values of thrust force, 1293 N and 244.9 N, has been observed in 75 m/min, 190 m/min of cutting speed and 600 mm/min, 150 mm/min of feed rate, respectively. The thrust force has been boosted with the increase of feed rate and decrease in the cutting speed which can be attributed to the increase of the cutting contact area risen from them feed rate and softening of the metal in higher cutting speeds. Figure 5b demonstrates the measured average surface roughness of the holes. The maximum and minimum values of the surface roughness, 1.36 μm and 0.55 μm , has been observed in 150 mm/min, 75 m/min and 150 mm/min, 115 m/min, respectively. The feed marks have become evident and the surface roughness has been deteriorated with the increase of

feed rate. The increase of cutting speed from 75 m/min to 115 m/min has resulted in improvement of surface roughness which can be related to the softening of the metal and convenient cutting operation. In contrary, in 150 and 190 m/min of cutting speeds the surface roughness values have exhibited recrudescence which can be attributed to the chip breakage and chip removal of the cutting tool through flutes. Moreover, increasing the cutting speed has resulted into vibration and chatter marks. As it is seen from Figure 5c maximum and minimum values of machining time, 0.10 min and 0.033 min, has been observed in 75 m/min, 115 m/min of cutting speed and 600 mm/min, 600 mm/min of feed rate, respectively. Increasing the feed rate and cutting speed have led to the decrease in machining time which is verified with theoretical machining formulations. Figure 5d illustrates the dimensional deviation of the drilled holes. The maximum and minimum values have been measured as 12.145 and 12.05 mm, in 75 m/min, 600 mm/min, 190 m/min and 300 mm/min of cutting parameters, respectively. In general, increasing the feed rate has resulted in the increase of the dimensional accuracy error excluding 115 m/min of cutting speed and 150 mm/min of feed rate which can be attributed to the low chip breakage speed due to the low level of feed rate and leading to smearing of the chip to the hole surface. It is noteworthy to mention that the allowed tolerances of the desired hole dimensions are 12 ± 0.20 mm, and all the dimensions of the drilled holes are in the allowed tolerance range. Figure 5e shows the material removal rate of the experiments during drilling.

ANALYSIS OF VARIANCES

The statistical technique, analysis of variance (ANOVA), has been utilized in order to observe the influence of the experiment parameters on the machining results. Statistical significance of the fitted model and terms was evaluated by the P-values of ANOVA results. The analysis results are given in Tables 2 to 5 for machining time, diameter, surface roughness of the drilled hole and thrust force, respectively.

For the machining time, the predicted R^2 of 0.8946 is in reasonable agreement with the Adjusted R^2 of 0.9215. The Model F-value of 89.04 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise. P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case V_c , V_f are significant model terms. Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.

For the hole diameter, the predicted R^2 of 0.7665 is in reasonable agreement with the Adjusted R^2 of 0.8025. The Model F-value of 31.48 implies the

model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise. P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case V_c , V_f are significant model terms.

For the surface roughness of the drilled hole, the predicted R^2 of 0.5980 is in reasonable agreement with the Adjusted R^2 of 0.7154. The Model F-value of 19.85 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise. P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case V_c , V_f are significant model terms.

Last but not least, for the average thrust force, the predicted R^2 of 0.8212 is in reasonable agreement with the Adjusted R^2 of 0.8819; i.e. the difference is less than 0.2. The Model F-value of 56.99 implies the model is significant. There is only a 0.01% chance that an F-value this large could occur due to noise. P-values less than 0.0500 indicate model terms are significant. In this case V_c , V_f are significant model terms.

Table 2. ANOVA results of machining time (t_m)

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	0.0065	2	0.0032	89.04	< 0.0001
V_c	0.0003	1	0.0003	9.55	0.0086
V_f	0.0061	1	0.0061	168.53	< 0.0001
Residual	0.0005	13	0.0000		
Cor Total	0.0069	15			

Table 3. ANOVA results of dimensional accuracy error (DAE)

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	0.0134	2	0.0067	31.48	< 0.0001
V_c	0.0124	1	0.0124	58.12	< 0.0001
V_f	0.0010	1	0.0010	4.84	0.0464
Residual	0.0028	13	0.0002		
Cor Total	0.0162	15			

Table 4. ANOVA results of surface roughness (R_a)

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	0.9365	2	0.4683	19.85	0.0001
V_c	0.2221	1	0.2221	9.41	0.0090
V_f	0.7144	1	0.7144	30.28	0.0001
Residual	0.3067	13	0.0236		
Cor Total	1.24	15			

Table 5. ANOVA results of thrust force (F_z)

Source	SS	df	MS	F-value	p-value
Model	1.127E6	2	5.635E5	56.99	< 0.0001
V_c	5.200E5	1	5.200E5	52.59	< 0.0001
V_f	6.071E5	1	6.071E5	61.39	< 0.0001
Residual	1.285E5	13	9888.1		
Cor Total	1.256E6	15			

OPTIMIZATION USING TOPSIS AND GREY RELATION METHODS

The minimum of the machining time, dimensional accuracy error, surface roughness and plunging forces is desired considering the responses of drilling operation. Table 6 demonstrates the obtained experimental results and normalized machining responses. The weight of the machining time, dimensional accuracy error, surface roughness and cutting force have been taken as 0.3, 0.3, 0.25 and 0.15, respectively. The weight normalized and ideal solutions, their distance from optimum value and the ranks are given in Table 7.

The relative closeness to the optimum performance as for the ideal execution measure accomplishes the most extreme inclination preference and rank and is consequently considered as the best run. It is seen that run #4 is the best multiple performance characteristics having the highest preference order, hence it is the optimal setting followed by run #3 and #8.

Table 8 demonstrates the obtained experimental results and grey relation values. The weight of the machining time, dimensional accuracy error, surface roughness and cutting force have been taken equally as explained in section 2.3. The grey relational coefficients and relational grades and ranks are illustrated in Table 9. It is seen that run #4 is the best multiple performance characteristics having the highest rank is the optimal setting followed by run #3 and #2.

CHIP MORPHOLOGY

The experimental results of chip morphologies are shown in Figure 6. The chips of experiment 2, 3, 4, 5, 10, 11, 14, 15 and 16 are discrete. However, the chip forms of the rest experiments are curly. Considering the chips in terms of their form and breakability, the smallest discrete chips belong to run #4 which can remove the heat generated during machining are a robust verification to the obtained optimization results in both methods.

Table 6. Normalized TOPSIS

Run	Experimental results				Normalized results			
	t_m	DAE	Ra	F_z	t_m	DAE	Ra	F_z
1	0.100	0.113	0.80	478.7	0.379	0.299	0.188	0.178
2	0.067	0.137	0.81	760.9	0.253	0.363	0.191	0.282
3	0.067	0.14	0.96	1091	0.253	0.371	0.226	0.405
4	0.050	0.142	1.26	1293	0.190	0.376	0.296	0.480
5	0.100	0.095	0.76	340.8	0.379	0.252	0.178	0.126
6	0.067	0.064	0.77	554.3	0.253	0.170	0.181	0.206
7	0.050	0.08	0.88	764.9	0.190	0.212	0.206	0.284
8	0.033	0.116	1.16	864.7	0.126	0.307	0.274	0.321
9	0.083	0.07	0.64	275.6	0.316	0.186	0.151	0.102
10	0.067	0.071	0.94	465	0.253	0.188	0.222	0.173
11	0.050	0.072	1.12	595.2	0.190	0.191	0.264	0.221
12	0.033	0.107	1.16	669.8	0.126	0.284	0.274	0.249
13	0.083	0.056	0.76	244.9	0.316	0.148	0.180	0.091
14	0.067	0.05	1.21	359.5	0.253	0.133	0.285	0.133
15	0.050	0.05	1.50	470.3	0.190	0.133	0.354	0.175
16	0.033	0.058	1.65	574.9	0.126	0.154	0.389	0.213

Table 7. Weight normalized and ideal solutions (Best/ Worst) distance

Run	Weight Normalized TOPSIS				Ideal Solution Distance			Rank
	t_m	DAE	Ra	F_z	Si+	Si-	Ci+	
1	0.114	0.090	0.047	0.044	0.121	0.099	0.451	10
2	0.076	0.109	0.048	0.071	0.080	0.108	0.575	13
3	0.076	0.111	0.057	0.101	0.059	0.111	0.654	15
4	0.057	0.113	0.074	0.120	0.030	0.125	0.806	16
5	0.114	0.076	0.045	0.032	0.133	0.103	0.436	8
6	0.076	0.051	0.045	0.051	0.113	0.083	0.425	6
7	0.057	0.064	0.052	0.071	0.085	0.079	0.482	11
8	0.038	0.092	0.068	0.080	0.053	0.098	0.648	14
9	0.095	0.056	0.038	0.026	0.138	0.107	0.437	9
10	0.076	0.056	0.056	0.043	0.111	0.082	0.424	5
11	0.057	0.057	0.066	0.055	0.093	0.071	0.434	7
12	0.038	0.085	0.068	0.062	0.070	0.089	0.558	12
13	0.095	0.045	0.045	0.023	0.142	0.103	0.422	4
14	0.076	0.040	0.071	0.033	0.122	0.076	0.384	3
15	0.057	0.040	0.088	0.044	0.108	0.060	0.359	1
16	0.038	0.046	0.097	0.053	0.094	0.054	0.363	2

Table 8. Grey relational generation values

Run	Experimental results				Grey relational generation values			
	t_m	DAE	Ra	F_z	t_m	DAE	Ra	F_z
1	0.100	0.113	0.80	478.7	0.000	0.315	0.842	0.777
2	0.067	0.137	0.81	760.9	0.500	0.054	0.829	0.508
3	0.067	0.14	0.96	1091	0.500	0.022	0.684	0.193
4	0.050	0.142	1.26	1293	0.750	0.000	0.391	0.000
5	0.100	0.095	0.76	340.8	0.000	0.511	0.885	0.909
6	0.067	0.064	0.77	554.3	0.500	0.848	0.875	0.705
7	0.050	0.08	0.88	764.9	0.750	0.674	0.766	0.504
8	0.033	0.116	1.16	864.7	1.000	0.283	0.484	0.409
9	0.083	0.07	0.64	275.6	0.250	0.783	1.000	0.971
10	0.067	0.071	0.94	465	0.500	0.772	0.701	0.790
11	0.050	0.072	1.12	595.2	0.750	0.761	0.523	0.666
12	0.033	0.107	1.16	669.8	1.000	0.380	0.484	0.595
13	0.083	0.056	0.76	244.9	0.250	0.935	0.878	1.000
14	0.067	0.05	1.21	359.5	0.500	1.000	0.438	0.891
15	0.050	0.05	1.50	470.3	0.750	1.000	0.148	0.785
16	0.033	0.058	1.65	574.9	1.000	0.913	0.000	0.685

Table 9. Grey relational coefficient and grey relational grade values

Run	Doi				Grey Relation Coefficient				GRG	Rank
	t_m	DAE	Ra	F_z	t_m	DAE	Ra	F_z		
1	1.000	0.685	0.158	0.223	0.333	0.422	0.760	0.691	0.552	13
2	0.500	0.946	0.171	0.492	0.500	0.346	0.745	0.504	0.524	14
3	0.500	0.978	0.316	0.807	0.500	0.338	0.613	0.382	0.458	15
4	0.250	1.000	0.609	1.000	0.667	0.333	0.451	0.333	0.446	16
5	1.000	0.489	0.115	0.091	0.333	0.505	0.813	0.845	0.624	8
6	0.500	0.152	0.125	0.295	0.500	0.767	0.800	0.629	0.674	6
7	0.250	0.326	0.234	0.496	0.667	0.605	0.682	0.502	0.614	10
8	0.000	0.717	0.516	0.591	1.000	0.411	0.492	0.458	0.590	12
9	0.750	0.217	0.000	0.029	0.400	0.697	1.000	0.945	0.760	2
10	0.500	0.228	0.299	0.210	0.500	0.687	0.626	0.704	0.629	7
11	0.250	0.239	0.477	0.334	0.667	0.676	0.512	0.599	0.614	11
12	0.000	0.620	0.516	0.405	1.000	0.447	0.492	0.552	0.623	9
13	0.750	0.065	0.122	0.000	0.400	0.885	0.804	1.000	0.772	1
14	0.500	0.000	0.563	0.109	0.500	1.000	0.471	0.821	0.698	4
15	0.250	0.000	0.852	0.215	0.667	1.000	0.370	0.699	0.684	5
16	0.000	0.087	1.000	0.315	1.000	0.852	0.333	0.614	0.700	3

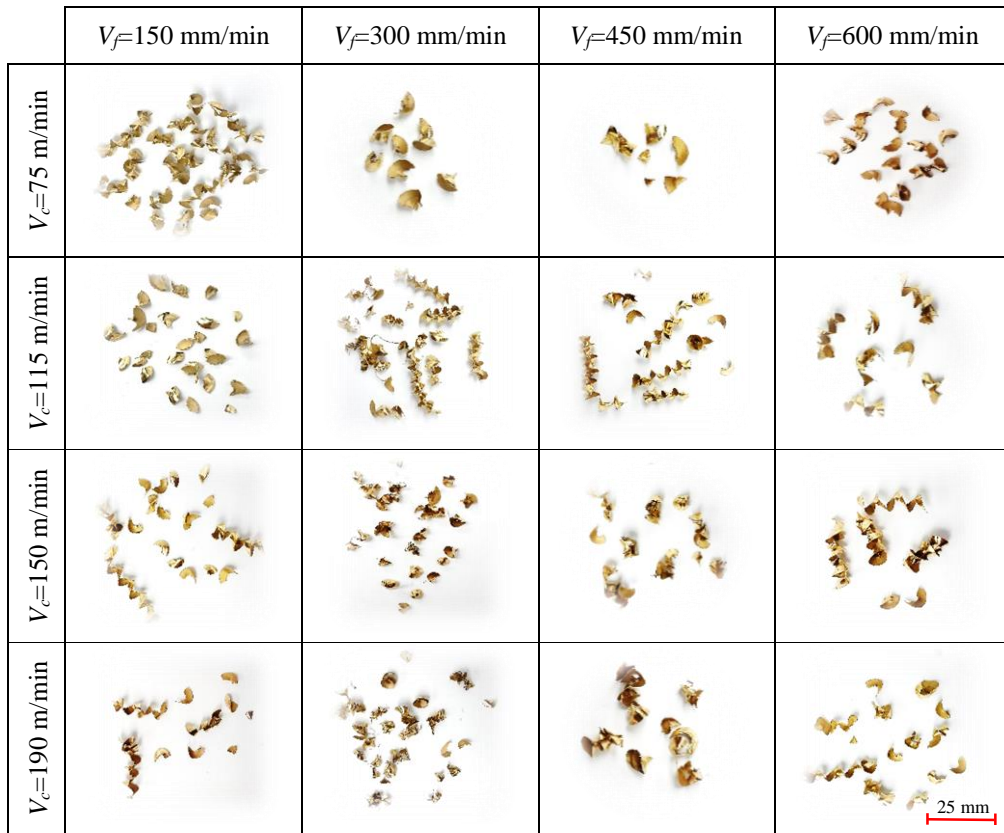


Figure 6. The chip morphology of the drilling experiments

CONCLUSION

In this paper, an experimental data has been produced and used in order to evaluate the machining performance and optimize the cutting conditions in drilling of forged ecofriendly low-lead brass alloy

with a special form bottom drill cutting tool. Through the results obtained above, the following conclusions are illustrated in below:

The ANOVA analysis revealed that the feed rate is the most significant factor affecting machining

time, surface roughness and cutting force. However, cutting speed played the major role in drilled hole dimensional accuracy.

The machining performance have been evaluated using TOPSIS and Grey relation analysis. Optimization of the drilling operation has yielded to minimum production time, cutting force, dimensional error, and surface roughness.

Both TOPSIS and Grey relational approaches have been used for optimization, they concluded with the same solution for drilling operation. The analysis in this paper reveals that TOPSIS and Grey relational concepts can be efficiently integrated towards a flexible compatible multi-response optimization methodology. The macro analysis of the obtained chips verified the optimization results considering due to the formation of small chip sizes during machining.

Acknowledgements

The authors thank TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey) for partially supporting this work under project number 118C069.

ÖZET

Bu araştırma, düz matkap takımı kullanılarak dövülmüş çevre dostu az kurşunlu pirinç alaşımının yüzey bütünlüğü özellikleri üzerindeki delme işleminin deneysel incelemesini ve ideal çözüme (TOPSIS) benzerlik ile sıra tercihi ve Grey orantı analiz tekniklerinin uygulanmasını ile çoklu çözüm için parametrik optimizasyon sunmaktadır. Boyutsal doğruluk, işleme süresi, kesme kuvvetleri ve deliklerin yüzey kalitesi hakkındaki deneysel veriler, işlenmiş numunelerin yüzey bütünlüğünü değerlendirmek için analiz edilmiştir. Parametrelerin önemini % 95 güven aralığında elden çıkarmak için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Her iki optimizasyon aracı da aynı kesme parametreleriyle sonuçlanmıştır. Elde edilen talaş formlarının analizi optimizasyon sonuçlarını doğrulamıştır.

Anahtar Kelimeler: TOPSIS, Grey ilişki analizi, optimizasyon.

REFERENCES

1. Engineering Designer 30(3): 6–9, May–July 2004
2. N. Zoghipour, E. Tascioglu, G. Atay, Y. Kaynak, Machining-induced surface integrity of holes drilled in lead-free brass alloy, *Procedia CIRP*, 87; 2020, p. 148-152.
3. Stagnation Time, Composition, pH, and Orthophosphate Effects on Metal Leaching from Brass. Washington DC: United States

- Environmental Protection Agency, 1996, p. 7. EPA/600/R-96/103.
4. F. Schultheiss, D. Johansson, V. Bushlya, J. Zhou, K. Nilsson, J. Ståhla, Comparative Study on the Machinability of Lead-Free Brass, *Journal of Cleaner Production*, 149; 2017, p. 366-377
5. A. A. Rahman, A. Mamat, A. Wagiman, Effect of Machining Parameters on Hole Quality of Micro Drilling for Brass, *Modern applied sciences*, 3(5), 2009.
6. M. Timata, C. Saikaew. Influences of spindle speed and feed rate on exit burr height and workpiece diameter in drilling forging brass, *Solid state phenomena*, 279; 2018, p. 67-71.
7. H. Kato, S. Nakata, N. Ikenaga, H. Improvement of chip evacuation in drilling of lead-free brass using micro drill, *International journal of automation technology*, 8; 2014.
8. H. A. Youssef, M. Y. Al-Makky, R. A. Al-Kadeem, I. S. Shyha, Burr formation in drilling of miniature holes in brass, 8th International Conference on Production Engineering Design and Control, PEDAC, 2004.
9. J. Hua, R. Shivpuri, X. Cheng, V. Bedekar, Y. Matsumoto, F. Hashimoto, T. R. Watkins. Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry, *Materials Science and Engineering A*, 394; 2005, p. 238–248.
10. P. B. Mogaji, I. A. Famurewa. Investigating optimum parameters required for drilling brass using response surface methodology, *Journal of emerging trends in engineering and applied sciences*, 8(1); 2017, p. 37 – 42.
11. Toulfatzis, A.; Pantazopoulos, G.; Paipetis, A. Fracture behavior and characterization of lead-free brass alloys for machining applications. *J. Mater. Eng. Perform*, 23; 2014, p. 3193–3206.
12. S. Tripathy a, D.K. Tripathy, Multi-attribute optimization of machining process parameters in powder mixed electro - discharge machining using TOPSIS and grey relational analysis, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 ; 2016, p. 62–70.
13. <https://www.harveyperformance.com/>
14. <https://www.sarbak.com.tr/>
15. V. S. Gadakh, Parametric optimization of wire electrical discharge machining using topsis method, *Advances in Production Engineering & Management* 7(3); 2012, p. 157-164.

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmaları duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayımlanan çalışmalar üzerinde teknik tartışma ortamı yaratmak.
4. Üniversite – endüstri arasındaki yakınlaşma ve işbirliğinin geliştirilmesine katkıda bulunmak.
5. Türkçe teknik bilgi birikimini arttırmak.

Kapsam

- (a) Dergi amaçları doğrultusunda aşağıda belirtilen konularda veya bunlara yakın konulardaki yazıları yayımlar;
Makina Tasarımı, Mekanik Sistemlerin Tasarımı ve Analizi, Makina Teorisi ve Mekanizma Tekniği, Makina Elemanları, İmalat Yöntemleri, Bilgisayar Yardımı ile tasarım ve İmalat, Robotik ve Esnek İmalat Yöntemleri, Akışkanlar Mekaniği, Malzeme Seçimi ve Malzeme Sorunları, Kalite Kontrolü, Fabrika Organizasyonu ve Üretim Planlaması, Bakım ve Onarım, Derginin amacına uygun diğer konular.
- (b) Dergide yayımlanacak makaleler, bir yeniliği, ilerlemeyi, gelişmeyi, araştırma ya da uygulama sonuçlarını içermek üzere araştırma makaleleri, uygulama makaleleri, derleme makaleleri, çeviri makaleleri ve kısa makaleler olabilir.
- (c) Dergide üyelerimize faydalı olabilecek imalat ve teknoloji ile ilgili araştırma ve çalışmaların sunulduğu veya firma ve kuruluşların tanıtıldığı yazılar yayımlanabilir

- (d) Derginin kapsamına giren konularda düzenlenen yurtiçi ve yurtdışı konferans, seminer, vb. etkinliklere ve ayrıca bu konulardaki kitap, dergi vb. yayınlara ait duyurular yer alır.

Makalelerin Değerlendirilmesi

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi, yayın kalitesi olarak belirli bir düzeyin üstünde kalmayı amaçlamıştır. Türkiye koşullarını da gözönüne alarak, bu kalite düzeyinin sürdürülmesi için gerekli tüm çaba ve titizlik gösterilecektir. Dergi'ye gelen her makale kesinlikle incelemeden geçirilecek ve bu amaçla mümkün olduğu kadar Türkiye çapında ya da yurtdışında konunun uzmanı hakemler tarafından değerlendirilmesine özen gösterilecektir. İnceleme ve değerlendirme sonuçları hakkında makale yazarlarına bilgi verilecektir.

YAYIN HAKKI

Dergide yayımlanan makalelerin her türlü yayın hakkı Makina Tasarım ve İmalat Derneği'ne aittir. Dergideki yazılar, yazılı izin almadan başka yerde yayımlanamaz ve çoğaltılamaz.

ÇALIŞMA İLKELERİ

Derginin yasal sahibi, MAKİNA TASARIM VE İMALAT (MATİM) DERNEĞİ'dir.

"Dergi Yayın Kurulu" dergi yönetimi ile ilgili organdır. Dergi Yayın Kurulu, MATİM Derneği Yönetim Kurulu tarafından bir yıl süre ile seçilir. Yayın Kurulu derginin yayın ilkelerine uygun yayımı ile yükümlüdür. Yayın Kurulu faaliyetleri konusunda MATİM Derneği Yönetim Kuruluna bilgi verir ve onayını alır.

Journal of
MECHANICAL
DESIGN
AND
PRODUCTION

Journal of Mechanical Design and Production is a periodical, published by the Turkish Mechanical Design and Production Society, Ankara, Turkey. It is one of the society's aims, to publish qualified research and review papers in Turkish. The published papers are strictly refereed to maintain a high scientific and engineering level at international standard.

MAKALE GÖNDERME KOŞULLARI

Makina Tasarım ve İmalat Dergisi'ne yurt içinden ya da yurt dışından isteyen herkes yayımlanmak üzere makale gönderebilir. Gönderilen makalelerin dergi temel amaçlarına uygun ve dergi kapsamı içinde olması ve aşağıdaki makale kabul ilkelerini sağlaması gerekmektedir. Dergi Yayın Kuruluna gelen her makale en az iki hakem tarafından değerlendirilir ve sonuç olumlu ya da olumsuz olsa da, yazısına bildirilir.

Makina Tasarım ve İmalat Dergisinde aşağıdaki makaleler yayımlanabilir.

- Araştırma Makaleleri.
- Uygulama Makaleleri.
- Derleme Makaleleri: Belirli bir konu üzerinde bilimsel ve teknolojik son gelişmeleri zengin bir kaynakçaya dayanarak aktaran ve bunların değerlendirmesini yapacak nitelikte olmalıdır.
- Çeviri Makaleler: Yerli teknoloji ve bilgi birikimine önemli bir katkıda bulunacak nitelikte olmalıdır.
- Kısa Makaleler: Yapılan bir çalışmayı zaman geçirmeden duyuran veya bu dergide yayımlanan bir makaleyi tartışan yazılardır.
- Diğer: Yukarıda tanımlanan içerikte olmayan, ancak üyelerimize faydalı olabilecek, imalat ve teknoloji ile ilgili çalışma ve araştırmaların sunulduğu, firma ve kuruluşların teknik özelliklerinin tanıtıldığı yazılardır.

Örnek makale <http://www.matim.org.tr> sitesinde verilmiştir. Yazarlar, makalelerini TÜBİTAK ULAKBİM tarafından yürütülen <http://dergipark.org.tr/tr/pub/matim> sitesine yüklemelidirler. Bir sorun ile karşılaşılırsa İlhan Konukseven (konuk@metu.edu.tr) veya Bilgin Kaftanoğlu (bilgin.kaftanoğlu@atilim.edu.tr) ile iletişim kurabilirler. Yazarlar, yayımlanma kabulünü takiben makalenin en son halini elektronik olarak aynı şekilde yüklemelilerdir.. Kelime-işlemci olarak Windows işletim sisteminde çalışan MS Word program paketi kullanılmalıdır.

MAKALE KABUL İLKELERİ

Makaleler içerik ve şekil olarak aşağıda belirtilen biçimde hazırlanmalıdır.

Yazım Dili

Kullanılan dilin olabildiğince basit, anlaşılır ve kesin olmasına özen gösterilmelidir. İleri düzeyde teknik ya da alışılmamış kavramlar kullanılmak gerektiğinde, bunlar uygun bir şekilde tanımlanmalı ve yeterince açıklanmalıdır.

Makalenin Yapısı

Makaleler, aşağıda verilen yapıda olacak şekilde hazırlanmalıdır.

- Makalenin adı
- Yazar(lar) ad(lar)ı, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve kuruluşun bulunduğu il.
- Özet ve anahtar kelimeler
- Makalenin ana kısmı
- Teşekkür (gerekli ise)
- İngilizce başlık, özet ve anahtar kelimeler
- Kaynakça
- Ek(ler) varsa

Makalenin adı, olabildiğince kısa, gereksiz ayrıntıdan arınmış olmalı, ancak gerekli anahtar sözcükleri içermelidir.

Yazarların ad ve soyadları, ünvanları, bağlı olduğu kuruluş ve bulunduğu il verilmelidir. Ayrıntılı görev ve adres ise ayrı bir kağıtta ve yazarların kısa özgeçmişleri ile birlikte belirtilmelidir.

Özette sadece sonuçlar değil makalenin tümü çok kısa ve öz şekilde açıklanmalıdır. Özet, makalenin konusu, kapsamı ve sonuçları hakkında fikir verebilmeli, ilgili anahtar sözcük ve deyimleri içermelidir. 100 kelimeyi geçmeyen Türkçe özetin ve anahtar sözcüklerin İngilizcesi de konulmalı ve makale başlığının İngilizcesi de mutlaka yazılmalıdır. Bu konuda istenirse dergi Yayın Kurulu yardımcı olabilir.

Makalenin ana kısmında makalenin amacından söz edildikten sonra bir mantık zinciri içinde sorun tanıtılması, çözüm yolları ve diğer bilgiler verilerek sonuçlar ve bunların değerlendirilmesi sunulmalıdır.

Teşekkür kısmında gerekiyorsa kişi, kuruluş ya da firmalara teşekkür edilebilir. Özellikle firma adlarının bu bölümünün dışında başka bir yerde verilmemesine özen gösterilmelidir.

Başlıklar

Gerek makalenin yapısını belirlemek, gerekse uzun bölümlerde düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak için üç tür başlık kullanılabilir:

- Ana Başlıklar,
- Ara Başlıklar,

- Alt Başlıklar.

Ana Başlıklar: Bunlar, sıra ile, özet, makalenin ana kısmının bölümleri, teşekkür (varsa), kaynakça, ekler (varsa)'den oluşmaktadır. Ana başlıklar büyük harflerle yazılmalıdır.

Ara Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harfle yazılmalıdır.

Alt Başlıklar: Yalnız birinci harfleri büyük harflerle yazılmalı ve hemen başlık sonunda iki nokta üstüste konularak yazıya aynı satırdan devam edilmelidir.

Matematiksel Bağıntılar

Matematiksel bağıntılar, bilgisayar ile anlaşılır şekilde açık ve seçik olarak yazılmalı, Türkçe alfabenin dışındaki karakterleri sayfanın sol tarafındaki boşlukta ayrıca ne oldukları yazı ile belirtilmelidir. Üst ve alt harf veya rakamlar belirgin bir şekilde yazılmalıdır. Özellikle bilgisayar kullanımında "I" (le) harfi ile "1" (bir) sayısının, "O" harfi ile "0" (sıfır) sayısının karıştırılmamasına özen gösterilmelidir. Metin içindeki bağıntılar 1 (bir)'den başlayarak sıra ile numaralandırılmalı ve bu numaralar eşitliğinin bulunduğu satırın sağ kenarına parantez "()" içinde verilmelidir.

Şekiller, Çizelgeler ve Resimler

Şekiller, küçültme ve basımda sorun yaratmamak için bilgisayar ile, düzgün ve yeterli çizgi kalınlığında çizilmelidir. Şekiller 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her şeklin altına alt yazılarıyla birlikte yazılmalıdır. Çizelgeler de şekiller gibi, 1 (bir)'den başlayarak ayrıca numaralandırılmalı ve her çizelgenin üstüne başlığıyla birlikte yazılmalıdır.

Resimler yeterli çözünürlükte sağlanmalıdır. Ayrıca şekiller için verilen kurallara uyulmalıdır. Derginin elektronik ortamda renkli olarak yayınlanacağı dikkate alınmalıdır.

Çizelge başlıklarının sadece ilk kelimesinin baş harfi büyük harfle, diğer harfleri ve kelimeler küçük harfle yazılmalıdır. Çizelge başlıkları, ayrıca bir sayfada da sıra ile verilmelidir.

Dip Notu

Dip notu gereken yerlerde bu bir üs numarası 1 ile belirtilmelidir. Buna karşılık gelen dip notu aynı sayfanın altında ara metinle bir çizgi ile ayrılmış olarak verilmelidir.

Kaynakça

Makale içinde gönderme yapılan (atıfta bulunulan) her türlü basılı yayın makalede söz edildiği sırada ve köşeli parantez [] içinde verilmelidir. Dergilerde yayımlanan makaleler, kitaplar, raporlar, tezler, kongre ve sempozyumlarda sunulan makaleler aşağıdaki örneklerde verilen şekilde yazılmalıdır.

- Dergi Makalesi
1. Richie, G.S., Nonlinear Dynamic Characteristics of Finite Journal Bearings, *ASME, J. of Lub. Technology*, 105 (1983) 3, 375-376. Kitap
 2. Shigley, J.E. ve Mitchell, L.P., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1983. Rapor
 3. Arslan, A.V. ve Novoseletsky, L.A., *Mathematical Model to Predict the Dynamic Vertical Wheel/Rail Forces Associated with Low Rail Joint*, AAR Technical Center, Technical Report, No.R-462, October 1980. Kongre Makalesi
 4. Adalı, E. ve Tunalı, F., Bilgisayar Denetimli Tezgaha Geçiş, *1. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiri Kitabı*, 287-293, ODTÜ, 1984.

Makalenin Uzunluğu ve Yazımı

Dergide yayımlanacak makaleler 13 makale sayfasını geçmemelidir. Makaleler bilgisayar ile A4 formatında, iki aralıklı olarak yazılmalı ve sayfa kenarlarında yeteri kadar boşluk bırakılmalıdır.

Kabul edilen makaleler dergi için yapılan dizgi ve şekilsel düzenlemelerden sonra kontrol için basımdan önce yazarına gönderilir.

Yayımlansın veya yayımlanmasın gönderilen makaleler yazarına geri gönderilmez. Yazılardaki fikir ve görüşler yazarına, çevirden doğacak sorumluluk ise çevirene aittir.

YAZIŞMALAR

Belirtilmemesi durumunda konuyla ilgili yazışmalar birinci yazarın adresine gönderilir.