

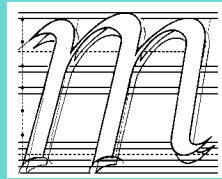
ISSN 2667-4297

MAKİNA TASARIM VE İMALAT DERGİSİ

Cilt: 19

Sayı: 1

Mayıs 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
TOFAŞ
ODTÜ Kuzey Kıbrıs
Sakarya Üniversitesi
Gaziantep Üniversitesi
Çukurova Üniversitesi
ODTÜ
Bilkent Üniversitesi
Koç Üniversitesi
İYTE
Rutgers Üniversitesi
Uludağ Üniversitesi
Eskişehir
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: 1

JOURNAL OF
MECHANICAL DESIGN
AND PRODUCTION

Vol: 19 No: 1

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.

DIZGI

Hülya SEVER

BASKI

DERGİPARK-Elektronik Yayın

Yılda 2 sayı Mayıs ve Kasım aylarında yayımlanır.

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA, GELİŞTİRME VE UYGULAMA MAKALELERİ

Elektron Işınıyla Ergitme Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri Üzerinde İnşa Yönünün Etkisi 1

Orhan Gülcan
Selen Temel Yiğitbaşı
Erhan İlhan Konukseven

Sac Metal Şekillendirmede Katı-Kabuk Elemanı ile Buruşmanın Tahmini 10

Ahmet Zafer Şenalp

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri 17

Orhan Gülcan

Hibrit Sismik Sönümleyicinin Enerji Emilimi Üzerindeki Etkilerin 35

Yağmur Ersan
Aysen Suheyly Bağbaşı
Bahman Paygozar
Shahram A. Dizaji

Eklemeli İmalat ile Üretilen Latis Yapılardaki Geometrik Değişimlerin Konuma Bağlı İstatistiksel Modellenmesi 41

Recep M. Görgülüarslan
O. Utku Güngör

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 / KocaeliSelen Temel Yiğitbaşı Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
AnkaraErhan İlhan Konukseven Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 05-09-2020

Kabul: 26-09-2020

*Sorumlu Yazar: Orhan Gülcan
Email: ogulcan1981@gmail.com

Elektron Işınıyla Ergitme Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Parçalarının Mekanik Özellikleri Üzerinde İnşa Yönünün Etkisi

Bu çalışmanın amacı Ti6Al4V alaşım tozları kullanarak elektron ışınıyla ergitme yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde inşa yönünün etkisini araştırmaktır. Üç ekseninde (x, y ve z) numuneler üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görebilmek için her bir yöndeki bir numune tormalanmıştır. ASTM E8 standardına göre her bir yönde yapılan çekme testi sonuçlarına göre, z yönünde üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımları, x ve y yönlerinde üretilenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Her bir yönde üretilen numunelerin akma ve çekme dayanımları, dövme ya da döküm Ti6Al4V parçaların aynı özelliklerinden yüksek çıkmıştır. Numuneler sünek-kırılğan karışımı bir yapı göstermiş, mikroyapı genel olarak Widmanstätten / sepet örgüsü şeklinde çıkmış ve β taneciklerinin içerisinde α ince tanecikli mikroyapı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektron ışınıyla ergitme, inşa yönü, titanyum, eklemeli imalat

GİRİŞ

Düşük yoğunluk, iyi mukavemet ve mükemmel korozyon direnci gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı Titanyum (Ti) ve alaşımları, özellikle Ti6Al4V, havacılıktan diş implantlarına kadar farklı endüstrilerde kullanılmaktadır [1]. Ancak, geleneksel işlemedeki yüksek işleme maliyetleri ve uzun teslimat süreleri nedeniyle, Ti ve Ti alaşımlı parçaların eklemeli imalat (Eİ) ile üretimi üzerine araştırmalar son yıllarda hız kazanmıştır.

Eİ'de parçalar, her bir katmanda besleme stoğunun (toz, tel vb.), lazer ya da elektron ışınıyla ergitilmesi ve sonraki katmanlarda soğutulularak yoğunlaştırılması esasına dayanır [2]. Kalıp kullanmadan net şekilli parçaların üretilebilmesi, düşük ham madde-nihai parça ağırlığı oranı ve geleneksel talaşlı imalatla üretilemeyen çok karmaşık parçaların üretilebilmesine imkan vermesi nedeniyle, Eİ biyomedikal, havacılık, otomotiv ve hızlı prototipleme / kalıplama gibi farklı sektörlerde kullanım alanı bulmaktadır [3].

Elektron ışınıyla ergitme (EIE), metal tozlarını katman katman ergitmek için enerji kaynağı olarak

elektron ışınının kullanıldığı bir Eİ türüdür. Tasarlanan üç boyutlu (3B) model öncelikle CAD ortamında ayrı ayrı katmanlara bölünür ve EIE bu verileri okur. Bir toz katmanı, 3B CAD modeli tarafından tanımlanan tam geometriye ergitildiğinde, inşa platformu alçılır ve başka bir toz katmanı ergiyik katman üzerine serilir. Aynı prosedürü tekrarlayarak, 3B modelin tüm kesitleri, nihai modele kadar katman katman inşa edilebilir [4].

Eİ ile üretilen parçaların mekanik özellikleri birçok işleme parametresine bağlıdır. Parçaların Eİ tezgahında inşa yönü bu parametrelerden birisidir. Thomas ve ark. yatay olarak üretilen parçaların mekanik özelliklerinin dikey olarak üretilen parçalardan farklı olduğunu belirtmiştir [5]. Çekme numunelerinin uzunluğu boyunca üretilen numuneler genel olarak uzunluklarına dik olarak üretilen numunelere göre daha yüksek çekme dayanımı sergilerler [6].

Literatürde, inşa yönünün Eİ yöntemiyle üretilen parçaların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili deneysel çalışmaların sonuçları oldukça farklılık göstermektedir. Guan ve ark. seçmeli lazer ergitme yöntemiyle üretilen 304 paslanmaz çelik parçalarda, yatay yönde üretilen numunelerin, dikey yönde üretilenlere göre daha fazla

dayanım özellikleri ama daha düşük uzama miktarı (kopma sırasında) gösterdiğini belirtmişlerdir [7]. Dikey yönde üretilen numunelerin optimum mukavemet ve süneklik kombinasyonu gösterdiğini belirtmişlerdir. Casati ve ark. seçmeli lazer ergitme yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik parçalarda, yatay yönde inşa edilen parçaların azami çekme dayanımları (σ_u) (684,7 MPa) ve sünekliğinin (% 36,3), dikey yönde üretilenlerin özelliklerine göre (580,7 MPa, % 25,7) daha yüksek çıktığını belirtmiştir. [8]. İnşa yönünün EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı Hrabe ve Quinn tarafından yapılan başka bir çalışma, σ_u ve akma dayanımı (σ_y) değerlerinin, inşa yönünden etkilenmediğini (x-y yönündeki numuneler için σ_u : 1017-1030 MPa, z yönündeki numuneler için 1009-1033 MPa, x-y yönündeki numuneler için σ_y : 967-983 MPa, z yönündeki numuneler için 961-984 MPa) ama uzamanın x-y yönünde z yönüne göre %30 fazla olduğunu göstermiştir (x-y yönünde % 12,2, z yönünde % 7.0-9.0) [9].

Kobryn ve Semiatin, inşa yönünün ve ısıtılmanın Eİ ile üretilen Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Isıtılma işlemi görmüş parçaların σ_y , σ_u ve kırılma anındaki uzama değerlerinin, x ve y yönünde üretilmiş numunelerde, z yönünde üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. y ve z yönlerinde üretilen ısıtılma işlemi görmüş numuneler, x yönünde üretilen ısıtılma işlemi görmüş numunelere göre daha yüksek kırılma tokluğu sergilemiştir. Katmanların dizilimlerine göre çatlak ilerleme yolunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılmıştır. Örneğin, y ve z yönlerinde, çatlak ilerleme yolu, katmanlara diktir, ama x yönünde çatlak ilerleme yolu katmanlara paraleldir, dolayısıyla katmanlar arasındaki zayıf bağın, çatlak ilerlemesini arttırabileceği yorumu yapılmıştır [10].

İNŞA yönünün Eİ ile üretilen kafes yapıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi Wauthle ve ark. tarafından incelenmiştir. 45° yönünde üretilen numunenin σ_u , σ_y ve sertliğinin, yatay yönde üretilen numune ile hemen hemen aynı özelliklere sahip olan dikey yönde üretilen numuneye kıyasla ortalama % 35 daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır [11]. Öte yandan, Wycisk ve ark.'nın çalışmasında, inşa plakasına göre 45° ve 90°'de üretilen numunelerin yorulma performanslarında anlamlı bir fark olmadığı belirtilmiştir [12].

Yapılan çalışmaların çoğunda Eİ ile üretilen parçaların daha yüksek σ_y ve σ_u değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Ancak Edwards ve ark. ARCAM A1 EIE makinesi ile üretilen Ti6Al4V parçaların dayanım ve uzama özelliklerinin, dövme Ti6Al4V'den daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, 5 yatay ve 5 dikey yönlü numune kullanmışlar ve EIE'den sonra hiçbir ısıtılma uygulamamışlardır [13].

Eİ ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisi, Formanoir ve ark. tarafından çalışılmıştır. Yazarlar, herhangi bir ilave görmemiş parçaların 832 ± 24 MPa σ_y ve % 3.64 ± 1.2 oranında gerinim gösterdiklerini belirtmişlerdir. Parlatılan parçalar 1055 ± 11.5 MPa σ_y ve % 4.58 ± 0.78 gerinim göstermişlerdir. Parlatılmış numunelerin gözeneklilik nedeniyle daha yüksek gerinim gösterdiği sonucuna varmışlardır. Çalışmalarında, Eİ sonrası ısıtılma işlemi de incelenmiş ve ısıtılma işleminin mekanik özellikler üzerinde çok büyük bir etkisinin olmadığı gösterilmiştir [14].

İNŞA yönüne göre mekanik özelliklerin değişmesi birkaç nedene bağlanabilir. Farklı yönler için farklı soğuma hızları bu nedenlerden biridir. Yatay ve dikey yönde üretilen parçalarda, birbirini izleyen her katman arasında, lazer ya da elektron ışınının geçme süresinin farklı olması farklı soğuma hızları ve dolayısıyla farklı mikro yapıların oluşmasına sebep olur [15].

Bu çalışmada, inşa yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görmek için, ASTM E8 standardına göre EIE yöntemiyle üç farklı yönde (x, y ve z) üçer numune üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini görmek için bir her yöndeki numunelerden bir tanesi torna tezgahı ile işlenmiştir. Numunelerin σ_y , σ_u , ortalama ve azami yüzey pürüzlülükleri (R_a ve R_z), kırılma anındaki uzama miktarları ve mikroyapıları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır.

MALZEME VE METOD

Deneylerde 45-100 μ m tanecik boyutlarına sahip Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozlar kullanılmıştır. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir.

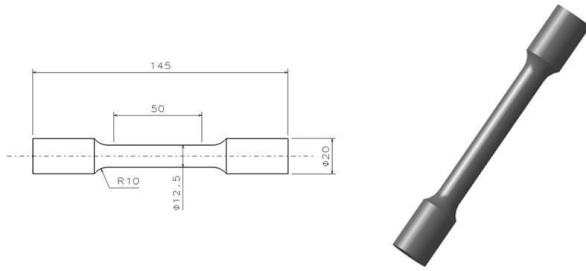
Tablo 1. Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozunun kimyasal kompozisyonu

Malzeme	%
Alüminyum, Al	6
Vanadyum, V	4
Karbon, C	0,03
Demir, Fe	0,1
Oksijen, O	0,15
Nitrojen, N	0,01
Hidrojen, H	0,003
Titanyum, Ti	Denge

Tablo 2. Arcam Ti6Al4V (Grade 5) tozunun mekanik özellikleri

Özellik	Değer
Akma dayanımı	950 MPa
Azami çekme dayanımı	1020 MPa
Uzama	14 %
Alan daralması	40 %
Elastisite modülü	120 GPa

Titanyum alaşım tozlarının İE yöntemiyle üretilmesinde Arcam Q20plus EIE makinası kullanılmıştır. ASTM E8 standardına uygun numuneler (Şekil 1), x, y ve z yönlerinde üretilmiştir (Şekil 2 ve 3). Her numune aynı işleme parametreleri ile aynı anda üretilmiştir. Her bir yönde üçer olmak üzere, toplamda 9 numune üretilmiş ve testlerden sonra ortalama test sonuçları kullanılmıştır.



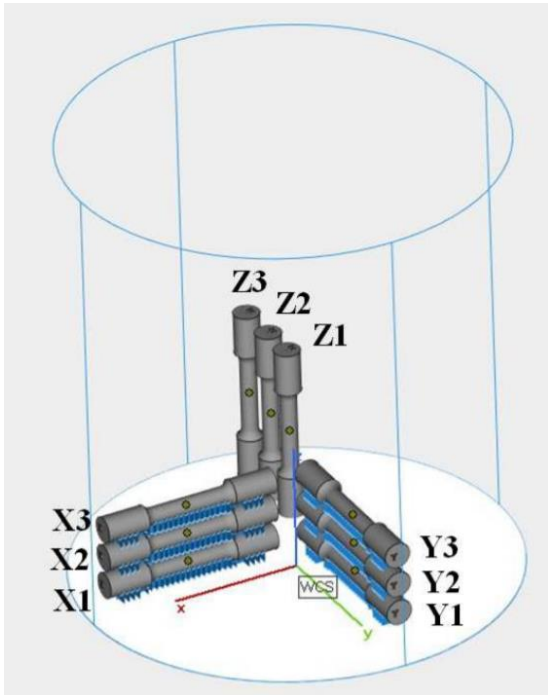
Şekil 1. ASTM E8 standardına uygun çekme test numunesi (ölçüler mm'dir).

için, Instron statik eksenel klipsli ekstensometre (model numarası: 2630-106 & 2630-107) kullanılmıştır (Şekil 4). Numunelerin σ_y , σ_u ve kırılma anındaki uzama miktarları ölçülmüştür.

Kırılma yüzeylerinin fotoğrafları Nikon SMZ-U mikroskobu ve ZEISS Sigma 300 Taramalı Elektron Mikroskobu ile çekilmiştir.



Şekil 3. EIE yöntemiyle üretilen numuneler



Şekil 2. EIE makinasının işleme odasında numunelerin dizilimi.

Çekme testleri Instron 8803 servo hidrolik test sisteminde yapılmıştır. Daha kesin sonuçlar elde etmek



Şekil 4. Ekstensometreli Instron 8803 test cihazı
Mikroyapı analizleri için numuneler dairesel kesitleri boyunca kesilmiştir. Sonra, Metkon Ecopress 50

Mounting Press cihazında siyah fenolik tozları kullanılarak bakalite gömülmüşlerdir. Tozların 3 dakikada 190 °C'de ergitilmesi ile 40 mm çapında numuneler elde edilmiştir. Bakalite gömülmüş numuneler, Buehler Beta Grinder-Polisher cihazında Silikon Karbür (SiC) kullanılarak taşlanmış, ardından Alüminyum Oksit (Al₂O₃) solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır. Son olarak, Kroll's Reagent solüsyonu kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikroyapıları Leica DM2700 M Optik Mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

TEST SONUÇLARI VE TARTIŞMA

σ_y , σ_u ve Kırılma Anındaki Uzama Miktarları

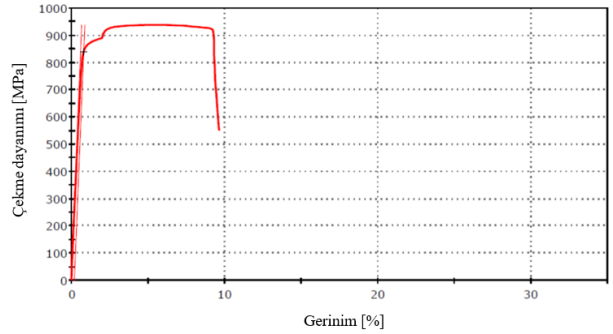
Her bir numune için birer tane gerilim-gerinim grafiği ve yük-uzama grafiği Şekil 5-10 arasında gösterilmiştir. Bütün test sonuçları tablo halinde Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Numunelerin çekme test sonuçları

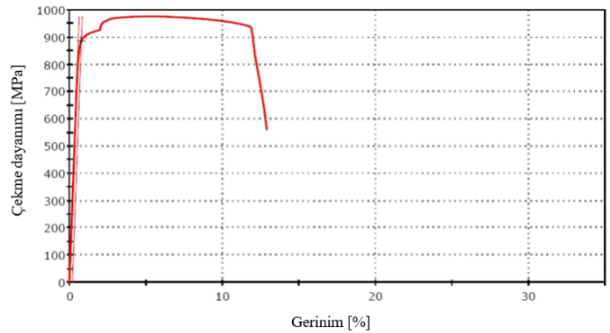
Numune adı	σ_u [MPa]	σ_y (% 0.2 ofsetli) [MPa]	E [GPa]	Kırılma anındaki uzama [%]
X1 (tornalanmış)	996,6	868,1	156,9	24
X2	938,0	839,5	138,2	14
X3	976,6	836,7	172,3	15
Y1 (tornalanmış)	992,4	881,7	122,0	19
Y2	975,3	884,6	153,8	15
Y3	1000,5	909,2	118,9	12
Z1 (tornalanmış)	1023,7	942,1	152,7	12
Z2	1003,4	917,0	136,6	12
Z3	1044,2	963,3	180,0	9

Tablo 3'te gösterildiği gibi, çekme özellikleri inşaa yönünden etkilenmektedir. Sonuçlar, yüzey pürüzlülüğünün, mekanik özellikler üzerinde doğrudan önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Edwards ve ark.'nın da belirttiği gibi, yüzey pürüzlülüğü, çekme özelliklerinden çok yorulma özellikleri için kritiktir [13]. Dikey yönde (z yönünde) üretilmiş numuneler (Z3), en yüksek σ_u (1044,2 MPa) ve σ_y (963,3 MPa) ve en düşük uzama miktarı (% 9) göstermiştir. Deneysel sonuçlar Al-Bermani ve ark.'nın sonuçlarıyla uyumludur. Al-Bermani ve ark. EIE

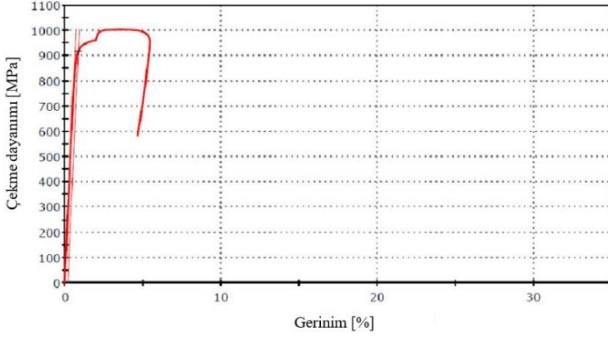
yöntemiyle Ti6Al4V parçalar üretmiş ve 993,9-1031,9 MPa σ_u , 883,7-938,5 MPa σ_y ve % 11,6-13 uzama değerleri elde etmişlerdir [16]. Zhai ve ark. EIE yöndeminde inşaa yönünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiş ve inşaa yönünün x veya y'den z yönüne, yani yataydan dikeye, değişmesi durumunda, çekme yönünün de değiştiğini ve σ_u ve σ_y 'nin arttığını belirtmişlerdir [17]. Hrabec ve Quinn'in çalışmasından elde edilen test sonuçları, x ve y yönlerindeki uzamanın z yönüne göre daha yüksek olduğu sonucunu desteklemektedir [9]. Farklı inşaa yönlerindeki farklı dayanım özellikleri, parçaların anizotropisine bağlanabilir. Guan ve ark.'nın da belirttiği gibi, Eİ ile farklı yönlerde üretilen parçaların çekme özellikleri birbirini takip eden iki katman arasındaki metalurjik bağa bağlıdır. Çekme yüküne paralel ya da dikey olarak dizilen katmanlar, mikroyapıdaki taneciklerin uzamasını etkiler, bu da mekanik özelliklerin değişimine sebep olur [7]. Farklı inşaa yönlerinde, parça içerisindeki gözenekler, yüklemeye yönüne yatay ya da dikey olarak konumlanabilir. Bu, parçada meydana gelebilecek muhtemel bir çatlağın ilerlemesini hızlandırabileceği gibi yavaşlatabilir de, dolayısıyla çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca farklı inşaa yönlerinde farklı sıcaklık değişimleri de farklı gözeneklilik miktarlarına ve kalıntı gerilmelere sebep olabilir [6].



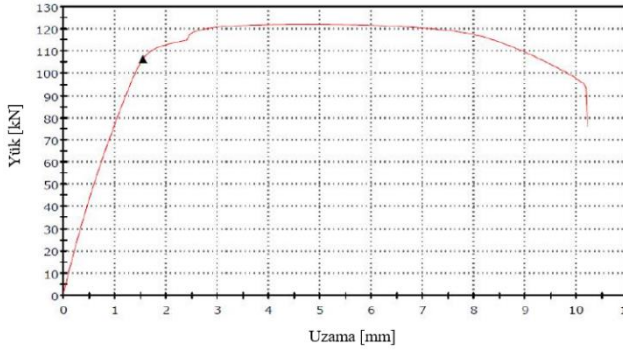
Şekil 5. X2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



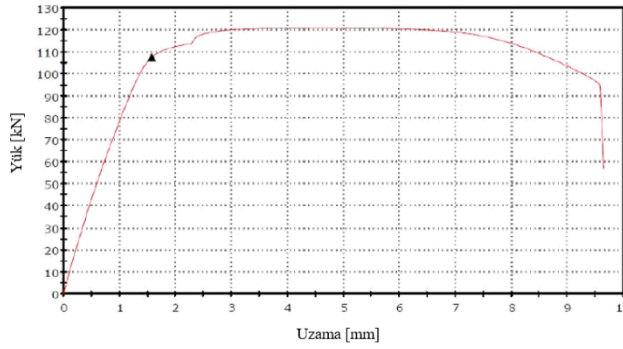
Şekil 6. Y2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



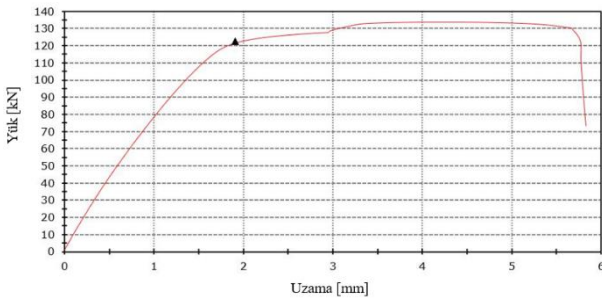
Şekil 7. Z2 numunesi için gerinim-çekme dayanımı grafiği



Şekil 8. X1 numunesi için uzama-yük grafiği



Şekil 9. Y1 numunesi için uzama-yük grafiği



Şekil 10. Z1 numunesi için uzama-yük grafiği

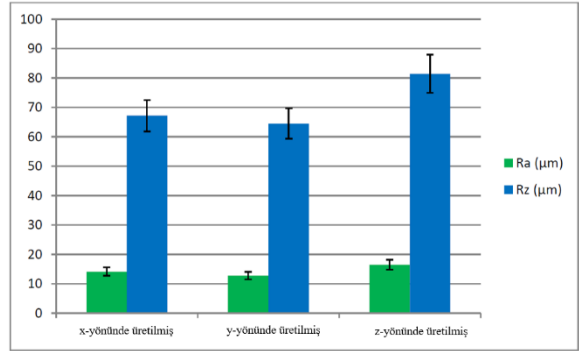
Tablo 3, genel olarak, EIE yöntemiyle üretilmiş numunelerin, döküm parçadan ($\sigma_u = 860$ MPa, $\sigma_y = 758$ MPa, $E = 114$ GPa, uzama \Rightarrow % 8) veya dövme parçadan ($\sigma_u = 930$ MPa, $\sigma_y = 860$ MPa, $E = 114$ GPa, uzama \Rightarrow %

10)) daha yüksek σ_u , σ_y , E ve uzama gösterdiğini göstermektedir.

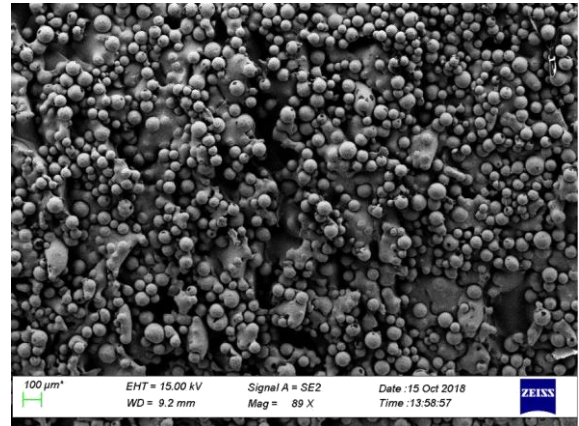
R_a ve R_z Sonuçları

Şekil 11 R_a ve R_z sonuçlarını, Şekil 12 ise numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu görüntülerini göstermektedir. Her bir katmandaki tozları ergitmek için kullanılan ışının farklılığından dolayı, "plaka yığını" şeklinde [18] dizilimler yüksek yüzey pürüzlülüğünün bir sebebidir. Diğer sebebi ise, bazı tozların tam ergimeden parça yüzeyine yapışmasıdır (Şekil 12).

Yüzey pürüzlülükleri ve mekanik özellikler karşılaştırıldığında, Tablo 3 ve Şekil 11'den de anlaşılacağı gibi uzamanın yüzey pürüzlülüğü ile ilintili olduğu görülmektedir. En düşük uzama miktarı, yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu z yönünde üretilmiş numunelerde görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, uzamanın azaldığı görülmüştür. Karlsson ve ark. uzama miktarlarındaki farkları, fraktografi analizleri sonucunda, numune içerisinde farklı yerlerde görülen gözeneklere bağlamıştır. Düşük uzama miktarına sahip numunelerde, gözenekler hem yüzeyde hem de numune içerisinde görülmüşken, yüksek uzama miktarına sahip numunelerde, gözenekler daha çok numune içerisinde gözlemlenmiştir [19].



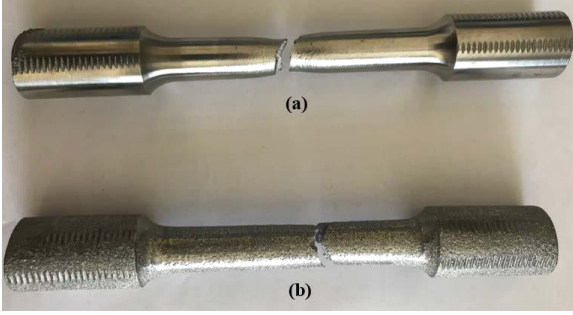
Şekil 11. R_a ve R_z sonuçları



Şekil 12. Z2 numunesinin yanal yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Kırılmış Yüzey Analizi

Şekil 13'te EİE ile üretilmiş ve herhangi bir ilave işlem görmemiş ve tornalanmış numunelerin fotoğrafları ve Şekil 14'te ise her üç yönde üretilen numunelerin kırık yüzeylerinin mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 13'ten görülebileceği gibi tornalanmış parçalarda boyun bölgesi oluşmuşken, herhangi bir ilave işlem görmemiş parçalar kayma kırılması özelliği göstermiştir. Şekil 14'ten görülebileceği gibi kırık yüzeyler tipik olarak tepe-çukur görüntüsüne sahiptir [20]. Şekil 13'ten anlaşıldığı gibi, kırık yüzeyler yükleme yönüne göre 45° açı yapmaktadır.

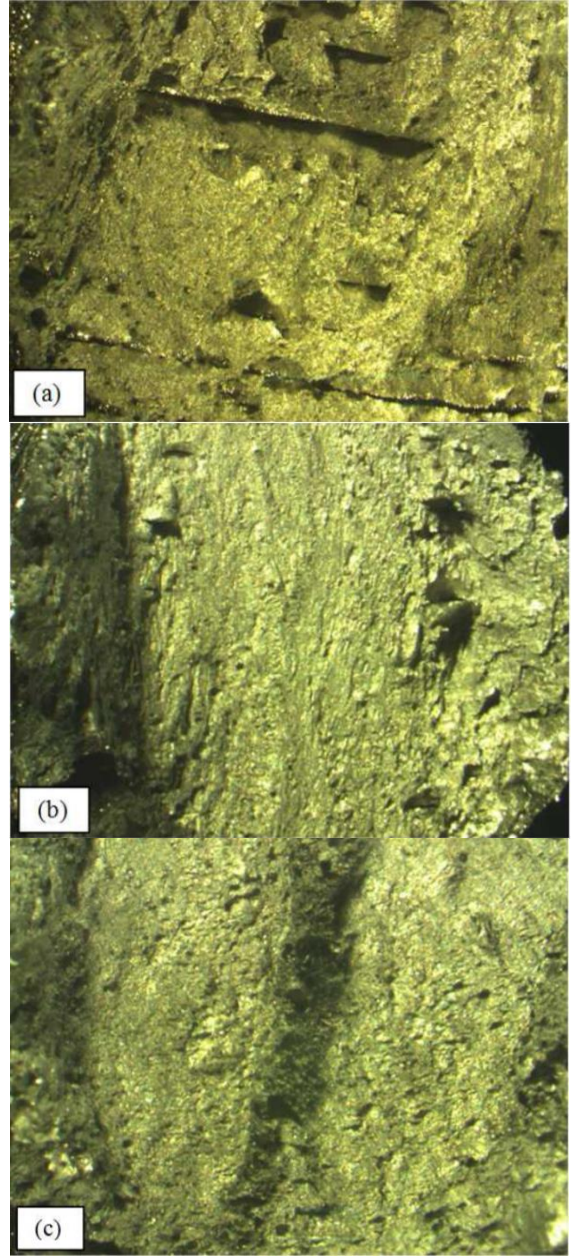


Şekil 13. (a) tornalanmış numunenin ve (b) herhangi bir ilave işlem görmemiş numunenin çekme testi sonucu görselleri

Shunmugavela ve ark. yaptıkları çalışmada Eİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaları ile dövme parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu kullanarak, kırılmış yüzeyleri incelemişler ve Eİ ile üretilen parçalarda, gevrek karakteristiğinin göstergesi olan küçük boyutlu çukurların görüldüğünü, dövme parçalarda ise sünek karakteristiğinin göstergesi olan derin çukurların görüldüğünü belirtmişlerdir [21]. Quénard ve ark. Eİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçaların çekme testi sonucunda oluşan kırık yüzeylerini incelemişler ve kırılma mekanizmasının daha çok sünek olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda, mikro çatlaklarla beraber gevrek yüzeylerin görüldüğünün belirtildiği çalışmada, bu gevrek yüzeyleri, iki sünek yüzeyi birleştiren katmanlardaki bölünmeye bağlamışlar ve her ne kadar kırık yüzeyde hem sünek hem de gevrek mekanizmalar görülmüşse de sünek mekanizmanın daha yoğun olduğunu belirtmişlerdir [22].

Bu çalışmada numuneler, Şekil 15'ten görülebileceği gibi hem sünek hem de gevrek karakteristik göstermişlerdir. Daha çok derin çukurlar görünmesine rağmen bu çukurların arasında kırık yüzeyler de görünmektedir. Z yönünde üretilmiş parçalarda, diğer yönlerde üretilmiş numunelere göre daha fazla gevrek yüzey görülmüştür. En yüksek uzama miktarına sahip x yönünde üretilmiş ve tornalanmış numunenin kırık yüzeyi incelendiğinde, sünek yüzeylerle karşılaştırıldığında gevrek yüzeylerin çok az olduğu

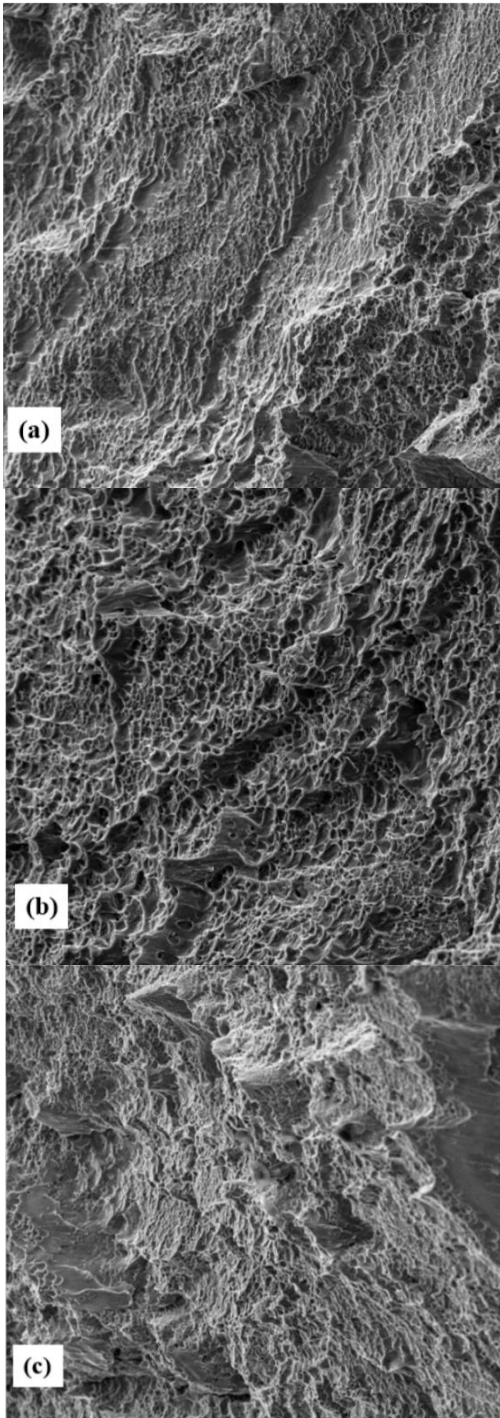
görülmüştür (Şekil 16). Dolayısıyla taramalı elektron mikroskop görüntülerinin, numunelerin çekme testi sonuçları ve uzama miktarları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Gevrek yüzey miktarının parçanın sünekliğini etkilediği ve uzama miktarları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 14. (a) X2 (b) Y2 ve (c) Z2 numunelerinin kırık yüzeylerinin mikroskop görüntüleri

Mikroyapı Analizi

Ti6Al4V, altıgen kapalı paketlenmiş kristal yapıya sahip α fazı ve hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip β fazından oluşur. Bu alışımda, Al, α fazını daha yüksek sıcaklıklarda dengelemek için kullanılırken, V daha düşük sıcaklıklarda β fazını dengelemek için kullanılır [23].



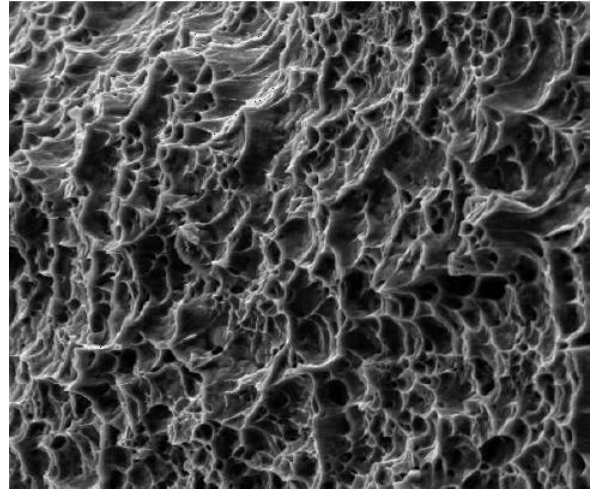
Şekil 15. (a) X2 (b) Y2 ve (c) Z2 numunelerinin kırık yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop görüntüleri

Şekil 17-19, numunelerin dairesel kesitinin optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. X numunesinin kesiti YZ düzlemini gösterirken Y numunesinin kesiti makinenin XZ düzlemini gösterir. Bu düzlemlerle temsil edilen yapılar, inşa yönüne (yani z eksenine) paraleldir ve β sütun yapıları resimlerden görülebilmektedir. Z yönünde üretilmiş numunenin resminde, XY düzlemi ve

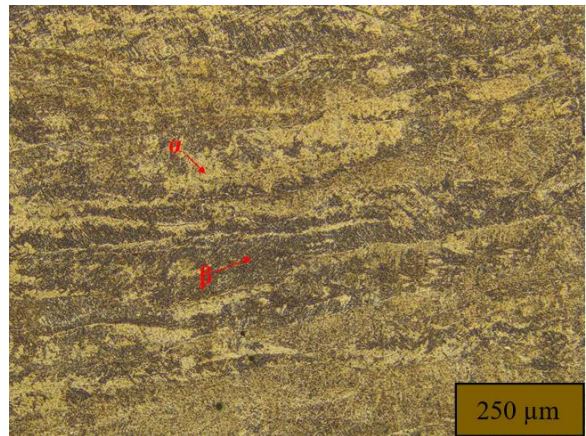
inşa yönüne dik yapı temsil edilmiş ve sütun şeklindeki taneciklerin dik kesitleri görülebilmektedir.

Karanlık alan β fazını temsil ederken, α fazı resimlerde aydınlık alan ile temsil edilir. Numunelerin mikroyapıları homojen değildir. Z yönünde üretilmiş numunelerde sepet örgüsü / Widmanstatten ve $\alpha + \beta$ ince tabakalı yapı görülmüştür ve tane boyutunun farklı noktalarda değiştiği gözlenmiştir. X ve Y yönlerinde üretilen numunelerin kesitlerinde, mikroyapı esas olarak sepet örgüsü / Widmanstatten'dır ve önceki β taneciklerinin içinde $\alpha + \beta$ ince tabakalı mikroyapı gözlemlenirken, α ve β tabakalarının boyutları farklı yerlerde değişiklik göstermiştir [13, 17, 24, 25].

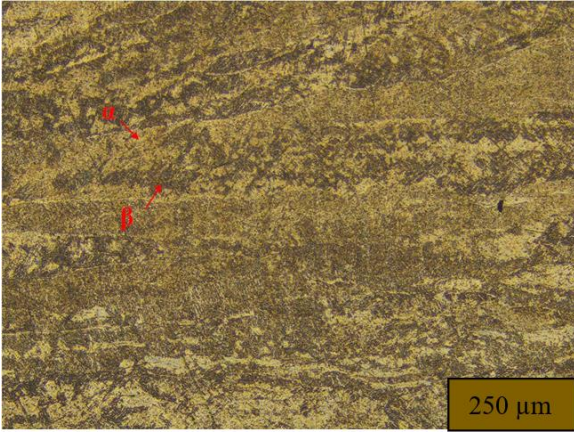
Çalışmamızda z numuneleri için daha düşük uzama oranları gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, çekme testi ile uygulanan yüke paralel olan sütun şeklindeki tanecik yapılar olabilir. Z numunelerinin daha yüksek çekme dayanımları ile tanecik yönü arasında benzer bir ilişki de kurulabilir [26].



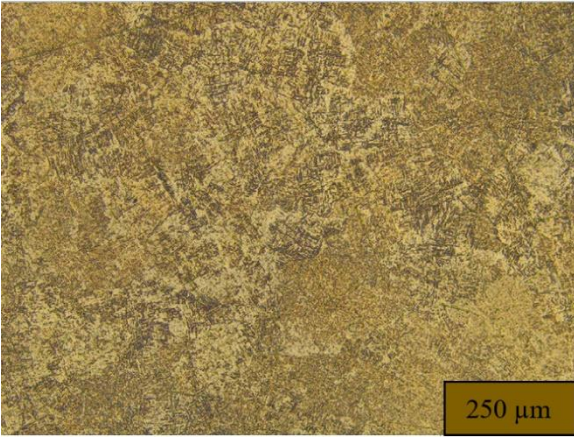
Şekil 16. Tormalanmış x yönünde üretilmiş numunenin kırık yüzeyinin taramalı elektron mikroskop görüntüsü



Şekil 17. X2 numunesinin mikroyapısı



Şekil 18. Y2 numunesinin mikroyapısı



Şekil 19. Z2 numunesinin mikroyapısı

SONUÇ

Bu çalışmada EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri üzerinde inşa yönünün etkisi incelenmiştir. Çalışmada aşağıdaki genel çıkarımlar yapılmıştır;

- Eİ'nin doğası gereği, dövme ya da döküm parçalara göre daha yüksek yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- Numunelerin torna ile işlenerek yüzey pürüzlülüklerinin azaltılmasının mekanik özellikler üzerinde direkt bir etkisinin olmadığı görülmüştür ama yüzey pürüzlülüğü azaldıkça uzama miktarları artmıştır.
- Dövme ya da döküm parçalarla karşılaştırıldığında, EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V parçalar daha yüksek çekme özellikleri (σ_u , σ_y , E ve uzama) göstermiştir.
- Z yönünde üretilmiş numuneler en yüksek σ_u , σ_y ve en düşük uzama miktarı göstermiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü arttıkça, uzama miktarı azalmıştır.

- Numuneler hem sünek hem de gevrek karakteristik göstermesine rağmen, sünek karakteristiğinin baskın olduğu görülmüştür.
- Mikroyapı daha çok sepet örgüsü / Widmanstatten'dır ve önceki β taneciklerinin içinde $\alpha + \beta$ ince tabakalı mikroyapı gözlemlenmiştir.

EFFECT OF BUILDING DIRECTION ON MECHANICAL PROPERTIES OF Ti6Al4V PARTS PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

The aim of this study is to investigate the effect of building direction on mechanical properties of the parts fabricated using Ti6Al4V alloy powders by electron beam melting method. Three specimens in three different directions (X, Y and Z) were produced and to see the effect of surface roughness on mechanical properties, one of the samples in each direction were machined by lathe. The results of tension tests on samples produced in three directions according to ASTM E8 standard revealed that yield and tensile strength of the samples built in Z direction are higher than the related properties of the samples built in X and Y directions. Yield and tensile strength of the samples built in each of the direction comes out to be higher than the same properties of the wrought or cast Ti6Al4V parts. Specimens displayed a mixed ductile-brittle fracture characteristic and the microstructure is mainly Widmanstatten / basket weave and α lamellar microstructure was observed inside the prior β grains.

Keywords: Electron Beam, Titanium, Building Direction, Additive Manufacturing

KAYNAKÇA

1. Banerjee, D., Williams, J. C., "Perspectives on Titanium Science and Technology", Acta Materialia, 61, 2013, 844-879.
2. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C., "Additive Manufacturing of Metals", Acta Materialia, 117, 2016, 371-392.
3. Yamanaka, K., Saito, W., Mori, M., Matsumoto, H., Chiba, A., "Preparation of Weak-Textured Commercially Pure Titanium by Electron Beam Melting", Additive Manufacturing, 8, 2015, 105-109.
4. Murr, L. E., Esquivel, E. V., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Martinez, E. Y., Medina, F., Hernandez, D. H., Martinez, E., Martinez, J. L., Stafford, S. W., Brown, D. K., Hoppe, T., Meyers, W., Lindhe, U., Wicker, R. B., "Microstructures and Mechanical Properties of Electron Beam-Rapid Manufactured Ti-6Al-4V Biomedical Prototypes Compared to Wrought Ti-6Al-4V", Materials Characterization, 60, 2009, 96-105.

5. Thomas, M., Malot, T., Aubry, P., Colin, C., Vilaro, T., Bertrand, P., "The Prospects for Additive Manufacturing of Bulk TiAl Alloy", *Materials At High Temperatures*, 33, 2016, 571-577.
6. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M., "An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part II: Mechanical Behavior, Process Parameter Optimization and Control", *Additive Manufacturing*, 8, 2015, 12-35.
7. Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., Zeng, X., "Effects of Processing Parameters on Tensile Properties of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel", *Material Design*, 50, 2013, 581-586.
8. Casati, R., Lemke, J., Vedani, M., "Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting", *Journal of Material Science and Technology*, 32, 2016, 738-744.
9. Hrabe, N., Quinn, T., "Effects of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) Fabricated Using Electron Beam Melting (EBM), Part 2: Energy Input, Orientation, and Location", *Material Science and Engineering A*, 573, 2013, 271-277.
10. Kobryn, P., Semiatin, S., "Microstructure and Texture Evolution During Solidification Processing of Ti-6Al-4V", *Journal of Material Processing Technology*, 135, 2013, 330-339.
11. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J., Humbeeck, J. V., "Effects of Build Orientation and Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V Lattice Structures", *Additive Manufacturing*, 5, 2015, 77-84.
12. Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., Walther, F., "High Cycle Fatigue (HCF) Performance of Ti-6Al-4V Alloy Processed by Selective Laser Melting", *Advanced Materials Research*, 816, 2013, 134-139.
13. Edwards, P., O'Conner, A., Ramulu, M., "Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 2013, 1-7.
14. Formanoir, C., Michotte, S., Rigo, O., Germain, L., Godet, S., "Electron Beam Melted Ti-6Al-4V: Microstructure, Texture and Mechanical Behavior of the As-Built and Heat-Treated Material", *Material Science and Engineering A*, 652, 2016, 105-119.
15. Blackwell, P. L., "The Mechanical and Microstructural Characteristics of Laser-Deposited In718", *Journal of Material Processing Technology*, 170, 2015, 240-246.
16. Al-Bermani, S. S., Blackmore, M. L., Zhang, W., Todd, I., "The Origin of Microstructural Diversity, Texture and Mechanical Properties In Electron Beam Melted Ti-6Al-4V", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41, 2010, 3422-3434.
17. Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D. A., "Microstructure Evolution, Tensile Properties, and Fatigue Damage Mechanisms in Ti-6Al-4V Alloys Fabricated by Two Additive Manufacturing Techniques", *Procedia Engineering*, 114, 2015, 658-666.
18. Suard, M., "Characterization and Optimization of Lattice Structures Made by Electron Beam Melting, PhD. Thesis, Universite De Grenoble, France, 2006.
19. Karlsson, J., Sjogren, T., Snis, A., Engqvist, H., Lausmaa, J., "Digital Image Correlation Analysis of Local Strain Fields on Ti6Al4V Manufactured by Electron Beam Melting", *Material Science and Engineering A*, 618, 2014, 456-461.
20. Schulze, C., Weinmann, M., Schweigel, C., Keßler, O., Bader, R., "Mechanical Properties of a Newly Additive Manufactured Implant Material Based on Ti-42Nb", *Materials*, 11, 2018, 1-20.
21. Shunmugavela, M., Polishettya, A., Littlefair, G., "Microstructure and Mechanical Properties of Wrought and Additive Manufactured Ti-6Al-4V Cylindrical Bars", *Procedia Technology*, 20, 2015, 231-236.
22. Quénard, O., Dorival, O., Guy, P. H., Votié, A., Brethome, K., "Measurement of Fracture Toughness of Metallic Materials Produced by Additive Manufacturing", *Ceas Space Journal*, 10, 2018, 343-353.
23. Mills, K., "Metallography and Microstructures", *ASM Handbook 9*, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1985.
24. Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., Nandwana, P., "Effects of the Microstructure and Porosity on Properties of Ti-6Al-4V ELI Alloy Fabricated by Electron Beam Melting (EBM)", *Additive Manufacturing*, 10, 2016, 47-57.
25. Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., Stucker, B. E., "Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, 2013, 3872-3883.
26. Bass, B. S., "Validating the Arcam EBM Process as an Alternative Fabrication Method for Titanium-6Al-4V Alloys", Ms. Thesis, N. C. State University, USA, 2008.

Sac Metal Şekillendirmede Katı-Kabuk Elemanı ile Buruşmanın Tahmini

Ahmet Zafer Şenalp 

DOĞUŞ Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
İstanbul

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 30-01-2021

Kabul: 21-02-2021

Sorumlu Yazar: Ahmet Zafer Şenalp
Email: azsenalp@dogus.edu.tr

Sac şekillendirme işlemlerinde buruşma kusurlarının tahmininde sonlu elemanlar yöntemi ve kabuk elemanları kullanılmaktadır. Bu yöntem, yüzey modeli oluşturmada zaman kaybına ve yanlış modellemelerden kaynaklanan olası temas hatalarına eğilimlidir. Bu çalışma Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında sac parçalar için metal şekillendirme işlemlerinde katı-kabuk elemanların kullanımını incelemektedir. Buruşmaya eğilimli standart bir test parçası için katı-kabuk ağlar oluşturulmuştur. Sac için DP600 malzemesi kullanılmıştır. Şekillendirme araçları arasındaki sürtünme davranışı dikkate alınmıştır. Çeşitli sınır koşulları test edilmiştir. Analiz sonuçları, kabuk analizi sonuçları ve daha önce elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, katı-kabuk eleman kullanımının, kabuk ve katı elemanlara göre buruşma davranışı açısından daha doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Buruşma, Katı-kabuk, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Metal Şekillendirme

GİRİŞ

Metal şekillendirme, hızı ve malzeme kalitesi nedeniyle üretim süreçleri arasında vazgeçilmez işlemlerden biridir. Bununla birlikte, araçlar ve süreç kurulumu, istenmeyen kusurları önlemek için en uygun şekilde tasarlanmalıdır. Buruşma bu kusurlardan biridir ve yüksek kaliteli bir ürün elde etmek için kaçınılmalıdır. Bu amaca ulaşmak için optimum kalıp seti ve proses parametrelerini elde etmek için tasarım ve analiz çalışmaları yapılmalıdır. Sonlu eleman yöntemi, sac malzeme şekillendirme işlemlerinin istenmeyen etkilerinin çözümünde ve tahmin edilmesinde en yaygın kullanılan sayısal araçtır. Bu yöntemle, karşılaşılan bu kararsızlık kusurlarını tahmin etme doğruluğu geliştirilebilir. Proses parametrelerinin belirlenmesi ve kalıp seti geometrisinin tasarımı konunun en önemli kısmıdır. Tasarımı doğrulamak için, sac metal şekillendirme analizin doğruluğunu iyileştirmek amacıyla iyi bir sonlu eleman modeli hazırlanmalıdır. Son 20 yılda bu konuda oldukça yüksek miktarda çalışma yapılmıştır.

Sac metal şekillendirme işlemleri ve geri esneme, buruşma, bükülme hataları için iyi sonuçlar elde etmek için yapılmış birçok çalışma vardır [1-3]. Yamamura vd. [4], sac levha kalınlığı boyunca artırılmış sayıda entegrasyon noktasına sahip seçici bir azaltılmış entegrasyon sonlu elemanı üzerinde çalışmıştır. Bu eleman için statik bir açık kod ve dengelenmemiş kuvvetleri azaltmak için bir algoritma kullanılmıştır.

Bu yaklaşım, şekillendirilmiş parçanın ve kalıp setinin şeklinin geliştirilmiş bir hesaplamasını mümkün kılmıştır. Ancak, kalınlık üzerinden çok sayıda eleman kullanmanın uygun maliyetli olmadığı belirtilmelidir.

NUMISHEET konferansları, geri yaylanma analizi için özel kıyaslama önerileri nedeniyle önemlidir. Bunun için çekme bükme testi [5] kullanılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçları karşılaştırmak için S-ray testi [6] yapılmıştır. Dijital Kalıp Tasarım Sistemi (3DS) araştırma programı, karmaşık ve güvenilir kriterleri ile önem taşımaktadır. Sac metal şekillendirmede [7, 8] oluşan çeşitli kusur türlerinin varlığı özel parça şekilleri ile tahmin edilmiştir.

Banu ve arkadaşları [9] anizotropiyi dikkate alan yeni tip sonlu elemanlar ve şekillendirme analizi için yeni zaman entegrasyon prosedürleri önermişlerdir. Çalışmaları, malzeme modelinin yeni bir uygulamasıyla geri esneme hesaplama şemasına da sahiptir. Çalışmalarının önemi, yeni bir STAMP3D sonlu eleman yazılımı formunu, 3DS kıyaslamasının bir ray parçası ve 1 mm kalınlığında bir çelik boşluğu test etmeleridir. Ayrıca analizlerini doğrulamak için deneyler yapmışlardır. Kullandıkları kod, dengesiz kırışıklık davranışını tahmin edebiliyordu.

Lee ve Youn [10], buruşuk zarların büyük deformasyonları üzerinde çalıştılar ve ortotropik zarların kırışmasını doğru ve basit bir şekilde tahmin

ettirler. Gerilme şekil değiştirme enerjisini tanımladılar. Bu gerilme gerinim enerjisini maksimize etmek için yapılan işe göre kırışıklıklar oluşmuştur.

Liu ve Wang'ın [11] çalışması kırışıklıkların ve kırılmaların oluşumunu araştırdı. Viskoz basınç oluşturma ve viskoz ortam ile sac metalin birleşik deformasyonunun sayısal çözümü için önerilen kesitsel sonlu elemanlar yöntemini kullandılar. Programlarına bir kırışıklık kriteri ve sünek kırılma kriteri getirdiler. Örnek olarak, bir alüminyum alaşımlı parçanın şekillendirilmesi incelenmiştir. Ayrıca sac tutucu basıncının ve kırılmanın kırışıklık başlangıcı üzerindeki etkisini de araştırdılar.

Gerilmiş dikdörtgen tabakalarda burkulma sonrası analizi ve kırışıklık modellerinin gelişme periyodu teorik olarak ve sayısal bir prosedür kullanılarak Wang ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. [12]. Çalışmaları, sonlu membran gerinimi ve ikinci potansiyel enerji varyasyonu kullanılarak hiperelastik plaka modeli için bir stabilite analizine dayanıyordu. Ayrıca yukarıda bahsedilen teori ile izolasyon merkezindeki çatallanma noktalarını da çıkardılar. Stabilite bölgelerine ilişkin 3B faz diyagramı sunmaları önemlidir.

Sac levha işlemlerinin çoğu kabuk elemanlar tarafından yapılmasına rağmen, katı kabuk elemanların kullanıldığı ciddi istisnalar vardır. Parente vd. [13], sac şekillendirme işlemlerinin çözümü için katı kabuk sonlu eleman kullandı. Gelişmiş varsayılan gerinim (EAS) yöntemini kullandılar. Katı kabuk formülasyonu, literatürde sunulan tam entegre altı yüzlü katı kabuk elemanlara kıyasla iyi çözümler sağlayan minimum iyileştirme değişkenlerine sahipti. Benimsenen EAS yöntemi, enine kesmenin etkilerini dahil etmek ve hacimsel kilitlenmeyi önlemek için kullanıldı. Örnek olarak bir S-ray problemini çözdüler. Abaqus sonuçlarıyla karşılaştırma da sunuldu.

Li vd. [14], Hu-Washizu'nun açık sonlu eleman tabanlı varyasyonel prensibi ile bağlantılı olarak bir tam entegre katı-kabuk elemanı geliştirdi. Schwarze vd. [15], yeni bir indirgenmiş entegrasyonlu katı kabuk sonlu eleman tekniği ile sac metal şekillendirmede geri esnemeyi inceledi.

Malzeme modelleri ve parametreleri de çok önemlidir. Sena'nın artımlı Şekillendirme İşlemlerini [16] analiz etmek için gelişmiş sayısal temelde yaptığı doktora çalışması, metal şekillendirme işlemlerinde kullanılan malzeme özellikleri hakkında değerli bilgiler içerir.

Özellikle otomotiv parçaları için yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı, sac şekillendirme işlemlerinde geri esneme ve buruşma açısından doğru analiz ve boyutsal doğruluğun kontrolünü

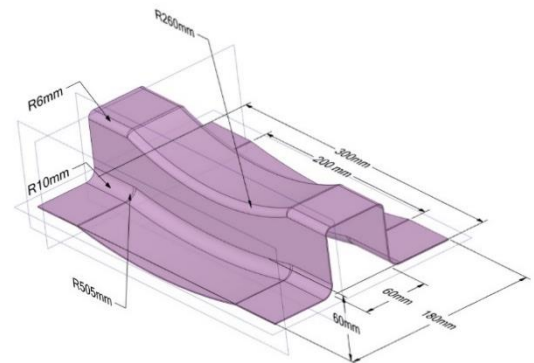
gerektirmeye başlamıştır. Xue vd. [17], malzeme modelinin etkileri üzerinde çalıştı ve sac delmede bükülme ve buruşma, geri yaylanma sonuçlarını elde etti. Neto ve arkadaşları [18], sınır koşullarının kırışıklık tahmini üzerindeki etkilerini inceledi. Yaklaşımları, sac metal şekillendirme işlemlerinde buruşma davranışını etkileyen nedenlere yeni bir bakış açısı sağladı. Hem kırışmayı hem de geri esnemeyi gözlemek için bir ray bileşeni kullanılmıştır. Hem deneysel hem de sayısal çalışmalar yaptılar. Boş malzemenin buruşma davranışı üzerindeki etkisini hesaba katmak için, DC06 çeliği ve DP600 çeliği malzemeleriyle iki ayrı çelik levha düşünülmüştür. Geliştirilen sayısal modelleri bir dizi deneysel sonuç aracılığıyla doğruladılar.

Bu çalışmanın amacı, Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında metal şekillendirme işlemleri için kabuk eleman yerine katı-kabuk eleman kullanımını önermektir. Katı-kabuk elemanının buruşma tahmin kabiliyeti, kabuk ve katı elemanların davranışları ile karşılaştırılmıştır. Katı kabuklu elemanlar aynı zamanda katı geometrileri kullanma ve yüzey çıkarma için yapılan çabaları ortadan kaldırma avantajına da sahiptir. Önerilen yöntem aynı zamanda olası temas hatalarını da önler. Bir test problemi olarak, daha önce literatürde kullanılan bir kıyaslama, DP600 malzemesi ile kabul edilir. Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında çözüm için Johnson ve Cook malzeme modeli benimsenmiştir.

SONLU ELEMANLAR MODELİ

Nihai Sac Geometri

Katı-kabuk elemanın analizleri için, daha önce Banu ve arkadaşları tarafından araştırılan ve Neto ve ark. [18] tarafından da kullanılan aynı geometri. [9] kullanılmıştır. Geometrinin detayları Şekil 1 de verilmiştir.



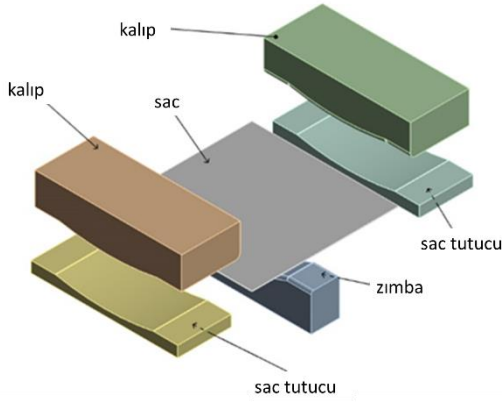
Şekil 1. Rayın son geometrisi (mm)

Bu, bir otomotiv ray parçasına ait olan ve uluslararası proje 3DS - Dijital Kalıp Tasarım Sistemi [7] kapsamında bir kıyaslama olarak tanımlanan standart bir test problemidir. Bu kıyaslamamın amacı,

sonlu eleman programlarının şekillendirme kusurlarını tahmin etme yeteneğini test etmektir. Geliştirilen sayısal modellerin doğrulanması, Banu ve arkadaşları [9] ve Neto ve ark. [18] tarafından deneysel olarak elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Tüm geometri işlemleri Ansys Spaceclaim ortamında gerçekleştirilmiştir.

Kalıp, Zimba, Sac ve Sac Tutucu Seti Geometrisi

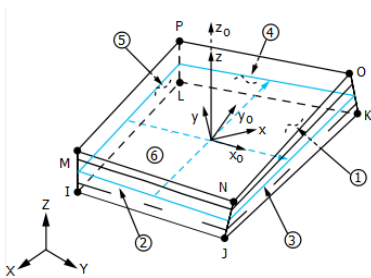
Sac boyutları 300x300 mm'dir. Sac et kalınlığı 1 mm'dir. Şekil 2, tüm set için katı modeli patlatılmış bir şekilde göstermektedir. Kabuk analizi için, yüzeyler katı modelden çıkarılmıştır. Katı-kabuk ve katı analizler için 1 mm kalınlığındaki katılar modellenmiştir. Zimba, kalıp ve sac tutucunun tamamı rijit gövdeler olduğundan, 1 mm kalınlık yeterlidir. Tüm parçalar birbirine en yakın yüzeylerle birbirine temas etmektedir.



Şekil 2. Kurulumun son geometrisi

Sonlu Elemanlar Tipleri

Sonlu eleman analizleri için Ansys Workbench Ls-Dyna 2020R2 sürümü kullanılmıştır [19]. 3 tip analiz yapılmıştır. Buruşma davranışı nedeniyle karşılaştırma için kabuk, katı-kabuk ve katı elemanlar kullanılmıştır. Kabuk ağları için parçaların yüzeyleri, katı-kabuk ve katı ağlar için katı geometriler kullanılmıştır.



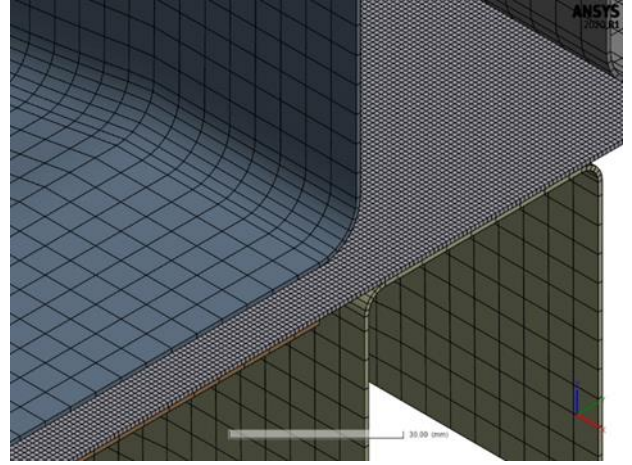
Şekil 3. Ls-Dyna'da kullanılan katı-kabuk eleman

Katı-kabuk ağ SOLSH190 katı kabuk elemanı (Şekil 3) ile hem sac, kalıplar, zimba hem de sac tutucuları modellemek için kullanılmıştır. Elemanın

kabuk seçeneğine sahip olduğunu belirtmek önemlidir. SOLSH190 elemanı ince ve orta kalınlıkta yapılar için kullanılabilir. Mindlin-Reissner kabuk teorisini destekler. Eleman büyük deformasyon, büyük gerinim ve plastisite yeteneklerine sahiptir. Eleman formülasyonu için logaritmik gerinim ve gerçek gerilme ölçüleri kullanılmıştır.

Sonlu Eleman Ağı

Sac geometrinin ağ boyutu 1 mm'dir. Rijit kalıp, zimba ve sac tutucu seti köşe bölgeleri ince ağlara sahiptir ve geri kalanı daha geniş ağlara sahiptir. Oluşturulan ağlarla ilgili tüm istatistikler tablo 1'de sunulmuştur. Tüm eleman türleri için ağ görünümü, Şekil 4'te verilenle aynı formdadır.



Şekil 4. Ağ yapısı

Tablo 1. Tüm parçalar için düğüm sayısı

	Kabuk	Katı-kabuk	Katı
Sac	90601	181202	181202
Zimba	2346	3192	3192
Kalıp	1750	1782	1782
Sac tutucu	950	832	832
Toplam	98347	189622	189622

Malzeme Özellikleri

Neto vd. [18] aynı geometri ve DP600 malzeme için Swift malzeme modelini kullanmıştır. Bu çalışmada Johnson Cook yasası [20], orta derecede gerinim hızı hassasiyetine sahip DP600 çelik sacın plastik davranışını modellemek için tercih edilmiştir. Bu şekilde malzeme üzerindeki gerinim hızı etkileri de dikkate alınabilir. DP600'ün mekanik davranışı elastoplastiktir. Esnek davranış Hooke yasası ile Young modülü değeri 210 GPa ve Poisson oranı değeri 0.30 ile tanımlanmıştır. Ayrıca, DP600 çeliğinin izotropik bir malzeme olduğu varsayılmaktadır.

Johnson Cook denklemi:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T_H^m) \quad (1)$$

Burada:

ε_p : Eşdeğer plastik gerinim

$\dot{\varepsilon}_p^*$: Normalize edilmiş etkili plastik gerinim hızı

A: İlk akma gerilmesi

B: Sertleşme sabiti

n: Sertleşme üsteli

C: Gerinim hızı sabiti

m: Isıl yumuşama üsteli

T_H : Homolog sıcaklık

$T_{erimeli}$: Erime sıcaklığı

$$T_H = (T - T_{oda}) / (T_{erime} - T_{oda}) \quad (2)$$

İşlem oda sıcaklığında gerçekleştiği için, sıcaklık etkisi yok olur ve denklem 1 şu forma dönüşür:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) \quad (3)$$

Johnson Cook parametreleri [16] tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. DP600 için Johnson Cook parametreleri [16]

A(MPa)	B(MPa)	n	C
323	650	0.33	0.015

Sınır Koşulları

Geometri çeyrek simetriye sahip olmasına rağmen, kırışıklık nedeniyle kararsızlık, pertürbasyon etkileri gibi etkilerin simetriyi bozmaya eğilimli olduğundan tüm model çözülmüştür. Zimba, kalıp ve sac tutucu, analiz başlangıcında dokunmaya ayarlanmış pozisyonundadır. Analiz prosedürü şu şekilde özetlenebilir:

- Sac tutucular sabittir ve kalıplar hareket eder, bu nedenle ilk adım olarak kalıplara belirli bir yer değiştirme uygulanır, böylece dokunma konumuna ayarlandığında kalıplar ve boş tutucular arasında 1 mm kalınlığında boş malzeme sıkıştırılır.

- Nihai ürün: rayın derinliği 60 mm'dir. İkinci aşama olarak 1 mm sac malzeme kalınlığı dikkate alınarak 59 mm zimba yer değiştirmesi uygulanır.

- Kalıplar ve zimba, Workbench Ls-Dyna’ da tam bir yeniden başlatma işlemiyle ürünü serbest bir konumda bırakmak için geri kaydırılır. Tam yeniden başlatma işlemi, şekillendirme işlemi sırasında meydana gelen

esnek boş parça üzerindeki atalet etkilerini ortadan kaldırır.

Sürtünme Modeli

Tüm temaslar için Coulomb sürtünmesi dikkate alınmıştır. Temas eden tüm parçalar için etkileşimler tanımlanmıştır. Statik sürtünme katsayısı olarak 0.25 ve dinamik sürtünme katsayısı için 0.15 [18] kullanılmıştır.

Açık Zamana Bağlı Geçici Dinamik Analiz

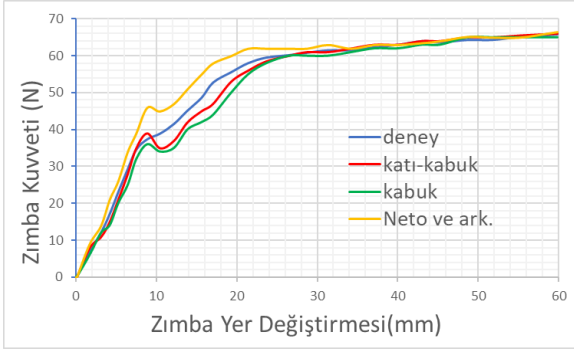
Bir yapının zamanla değişen yükler altında dinamik tepkisini belirlemek veya büyük şekil değiştirme ve deformasyonlara sahip problemleri çözmek için geçici dinamik analiz yöntemi kullanılmaktadır. Bu analiz için yapının atalet türü veya sönümlenme etkileri önemlidir. Bu tür analizler genellikle aşamalı veya darbeli yükleme koşulları altındadır. Örnek, zamanın bir bölümünde keskin bir yük değişikliği olabilir. Bu tür analizler zamana bağlı yer değiştirmeleri, gerilmeleri, gerilmeleri ve kuvvetleri belirlemek için kullanılabilir. Geçici dinamik analiz örtük (implicit) ve açık (explicit) olarak ikiye ayrılabilir. Örtük analizler, geri esneme problemlerinin modellenmesinde daha başarılıdır. Bu çalışmanın ana endişesi kırışıklık istikrarsızlığı olduğu için açık çözücü dikkate alınmış ve Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında açık geçici dinamik analizler yapılmıştır.

Metal şekillendirme simülasyonu genellikle açık dinamik kullanılarak daha verimli bir şekilde çözülür. Açık dinamiklerde istikrar ve doğrusal olmayan yakınsama, yakınsama kriterlerini karşılamak ve bir global matrisin güncellenmesi için denge denklemleri gerçekleştirmeye gerek kalmadan sağlanır. Açık dinamiklerle yüksek sayıda zaman adımı gerçekleştirilir, ancak bunların her birinin çözümü çok az CPU gerektirir çünkü matris oluşturulmaz / güncellenmez.

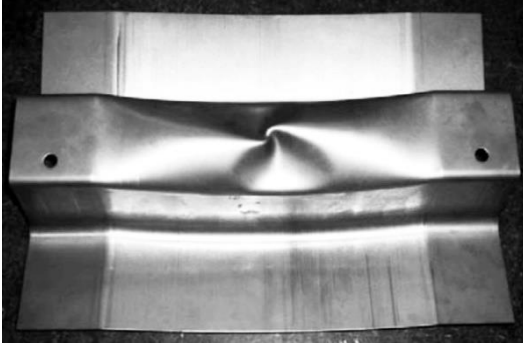
ANALİZ SONUÇLARI

Bu bölümde sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması sunulmuştur. İlk adım olarak, zimba kuvveti ile zimba yer değiştirmesi şekil 5'de verilmiştir. Katı-kabuk eleman sonuçlarının, kabuk eleman, katı eleman ve Neto ve arkadaşlarının [18] sonuçlarına kıyasla en iyi yakınsamayı sağladığı sonucu çıkarılabilir.

Şekil 6, daha önce Banu ve arkadaşları [9] ve Neto ve ark. [18] tarafından verilen deneysel olarak elde edilen geometriyi göstermektedir.

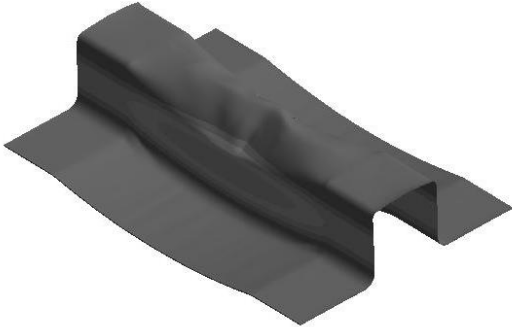


Şekil 5. Zimba kuvveti ile zimba yer değıştirmesi ilişkisi

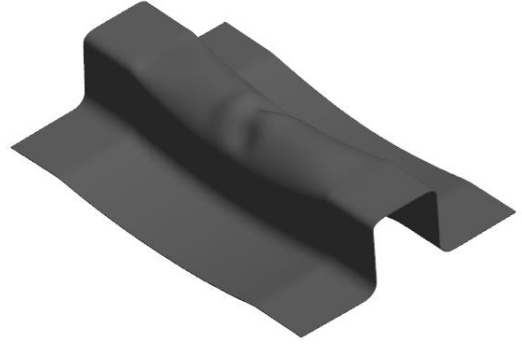


Şekil 6. Rayın deneysel geometrisi [9,18]

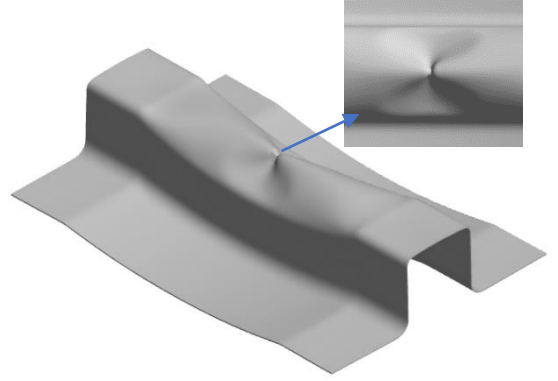
Bu çalışmada, Ansys Workbench Ls-Dyna tarafından elde edilen sonuçlar (açık analizler) kabuk eleman, katı eleman ve katı-kabuk eleman için şekil 7 ila 9'da sunulmuştur. Katı-kabuk elemanın, deneysel olarak elde edilen geometriye en yakın geometriyi verdiği şekillerden açıkça görülmektedir.



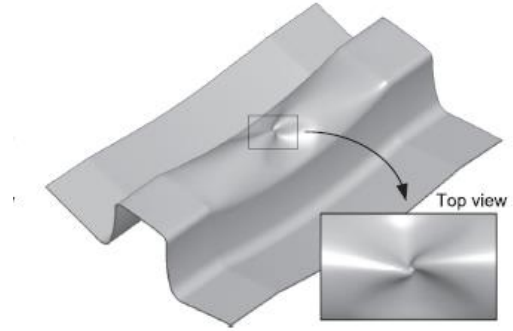
Şekil 7. Ls-Dyna'daki kabuk elemanın sonucunu



Şekil 8. Ls-Dyna'daki katı elemanın sonucunu



Şekil 9. Ls-Dyna'daki katı-kabuk elemanın sonucunu

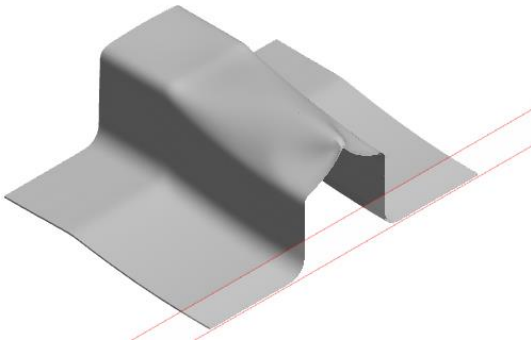


Şekil 10. Neto ve ark'nın sayısal sonucunu. [18]

Şekil 11'de, katı-kabuk eleman sonucunun için kesit görünümü sunulmuştur. Tablo 3, tüm analizler için çözüm sürelerini göstermektedir.

Tablo 3. Bütün analizler için çözüm süreleri (dakika)

	Katı	Katı-kabuk	Katı
Çözüm süresi	885	609	512



Şekil 11. Katı-kabuk elemanın sonucunun kesit görünümü

SONUÇ

Şekil 7'den 9'a kadar, katı-kabuk elemanın deneysel olarak elde edilen geometriye en yakın geometriyi verdiği açıktır. Kabuk elemanı (şekil 7) ve katı eleman (şekil 8) analiz sonucu olarak geometrideki buruşma modunu doğru tahmin edemediği görülmektedir. Neto ve ark. (Şekil 10) ve katı kabuk elemanın sonucu (şekil 9) iyi bir uyum içindedir. Her 2 sonucunda gerçek deney sonucu elde edilen geometriyi bire bir tam olarak tahmin edemediği de görülmektedir.

Geometri karşılaştırmalarının yanı sıra, her bir analiz için hesaplama süresi tablo 3'te sunulmuştur. Tabloda görüldüğü gibi, katı-kabuk eleman, kabuk ve elemana kıyasla hesaplama açısından uygun maliyetlidir. Kabuk elemanının çözüm süresi, kararsızlığın başlamasıyla büyük ölçüde artar. Katı eleman için çözüm süresi katı kabuk elemandan daha az olmasına rağmen, sadece katı-kabuk eleman kararsızlık davranışını tahmin edebildiğinden önemli değildir.

Bu çalışmada, standart bir ray parçası [9, 18] üretmek için bir şekillendirme işleminin açık analizleri, Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında katı-kabuk, kabuk ve katı elemanlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar deneysel olarak elde edilen kısma tam olarak uymasa da buruşma açısından katı kabuk elemanının en iyi sonucu verdiği gösterilmiştir. Katı kabuk element ile elde edilen çözüm, Neto ve arkadaşları [18] tarafından elde edilen sonuçla iyi uyum içindedir. Ansys Workbench Ls-Dyna ortamında kabuk ve katı elemanlar, katı kabuk elemanların yaptığı gibi kararsızlık buruşma davranışını tahmin edinememektedir. Ayrıca, katı kabuk elemanının, kabuk elemanına göre hesaplama açısından daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

Açık dinamik analizlerin geri esnemeyi doğru tahmin edememesinden dolayı geri esneme sonuçları bu çalışmada sunulmamıştır.

PREDICTION OF WRINKLING BY SOLID-SHELL ELEMENT IN SHEET METAL FORMING

In this study, the explicit analyses of a forming operation to produce a standard rail part [9, 18] are performed by solid-shell, shell, and solid elements within Ansys Workbench Ls-Dyna environment. Although the results do not exactly fit with the experimentally obtained part, it is shown that the solid-shell element yields the best result in terms of wrinkling. The solution obtained by solid-shell element is in good accordance with the result obtained by Neto et al.[18]. The shell and solid elements cannot predict the instability wrinkling behavior as solid-shell element does. Also, it can be deduced that solid-shell element is more computationally effective than shell element.

Keywords: Wrinkling, Solid-shell, Finite element, Metal forming

TEŞEKKÜR

Yazar, DOĞUŞ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne, analizlerin gerçekleştirilmesi için sağladığı bilgisayar ve yazılım desteği için teşekkür eder.

KAYNAKÇA

1. Makinouchi, A., Teodosiu, C. 2001, Numerical methods for prediction of geometrical defects in sheet metal forming, in: Proceedings of the First M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, M.I.T., Cambridge, Ma, USA, pp. 21–25.
2. Kawka, M., Olejnik L., Rosochowski A., Sunaga H., Makinouchi A., 2001, J. Mater. Process. Technol. 109, 283–289.
3. Wagoner, R.H., 2002, Fundamental aspects of springback in sheet metal forming, in: Proceedings of the NUMISHEET, vol. I, Korea, pp. 13–24.
4. Yamamura, N., Kuwabara T., Makinouchi A., Banu, M., Teodosiu C., 2000, Springback simulation for hat-bending by the static explicit FEM code, using a new algorithm for cancelling the non-equilibrated forces, in: Proceedings of the 2001 Japanese Spring Conference for the Technology of Plasticity, Tokyo, pp. 101–104.
5. Makinouchi, A., Nakamachi E., Onate, E., Wagoner R.H.(Eds.), 1993, Numisheet'93,

The Institute of Physics and Chemical Research, Japan.

6. Lee, K.J., Kinzel, G.L., Wagoner R.H. (Eds.), 1996, Numisheet'96, Michigan.
7. Results of the experimental benchmark tests, 2002, "Growth Programme, Research Project 3DS, Digital Die Design System, Contract G1RDCT-2000-00104, IMS199900005".
8. Col, A., 2002, Presentation of the "3DS" programme: digital die design system, in: Proceedings of the Numisheet, Jeju Island, Korea, 2002, pp. 643–647.
9. Banu M, Takamura M, Hama T, Naidim O, Teodosiu C, Makinouchi A. 2006, Simulation of springback and wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part. *J Mater Process Technol*;173:178–84. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.023>
10. Lee ES, Youn SK, 2006, Finite element analysis of wrinkling membrane structures with large deformations, *Finite Elements in Analysis and Design* 42 780 – 791, doi:10.1016/j.finel.2006.01.004
11. Liu J, Wang Z, 2010, Prediction of wrinkling and fracturing in viscous pressure forming (VPF) by using the coupled deformation sectional finite element method *Jianguang, Computational Materials Science* 48, 381–389. doi:10.1016/j.commatsci.2010.01.029.
12. Wang T, Xu F, Huo Y, Potier-Ferry M, 2019, On the wrinkling and restabilization of highly stretched sheets, *International Journal of Engineering Science* 136, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.12.002>.
13. Parentea MPL, Valente F, Jorge RMN, Cardoso RPR, Sousa JRA, 2006, Sheet metal forming simulation using EAS solid-shell finite elements, *Finite Elements in Analysis and Design* 42, 1137 – 1149. doi:10.1016/j.finel.2006.04.005
14. Li LM, Peng YH, Li DY, 2011, A stabilized under integrated enhanced assumed strain solid-shell element for geometrically nonlinear plate/shell analysis, *Finite Elements in Analysis and Design* 47, 511–518. doi:10.1016/j.finel.2011.01.001.
15. Schwarze M, Ivaylo N, Reese S, 2011, Sheet metal forming and springback simulation by means of a new reduced integration solid-shell finite element technology, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 200, 454–476. doi:10.1016/j.cma.2010.07.020.
16. Sena JIV, 2015, Advanced numerical framework to simulate Incremental Forming Processes, PhD Thesis, Universidade de Aveiro.
17. Xue X, Liao J, Vincze G, Sousa J, Barlat F, Gracio J, 2016, Modelling and sensitivity analysis of twist springback in deep drawing of dual-phase steel, *Materials and Design, Materials and Design* 90, 204–217, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.127>
18. Neto DM, Oliveira MC, Santos AD, Alves JL, Menezes LF, Influence of boundary conditions on the prediction of springback and wrinkling in sheet metal forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 122, March 2017, Pages 244-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.01.037>
19. ANSYS Workbench version 2020R2 manuals; 2020.
20. Cheng J, 2015, Investigation of the Formability Enhancement of DP600 Steel Sheets in Electrohydraulic Die Forming, Ms Thesis, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canada.

Eklemeli İmalatla Üretilen Kafes Yapıların Mekanik Özellikleri

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

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

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 19-10-2020

Kabul: 09-02-2021

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

GİRİŞ

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

KAFES YAPILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

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

Gibson-Ashby Modeli

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

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

Tablo 1. Gibson-Ashby modeli [3]

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

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

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

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

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

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

Anolitik Çalışmalar

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

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

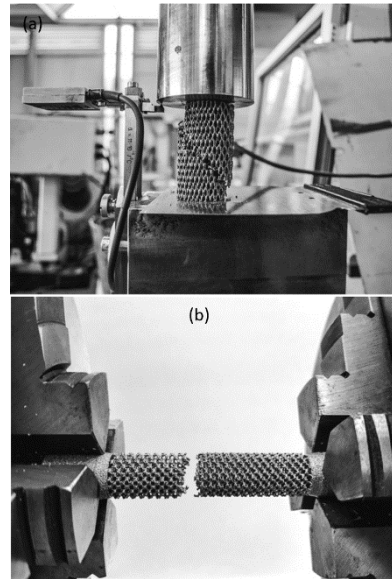
$$\nu = \frac{\frac{1}{\pi r^2} + \frac{l^2}{4\pi r^4}}{\frac{1}{\pi r^2} + \frac{l^2}{2\pi r^4}} \quad (2)$$

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

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

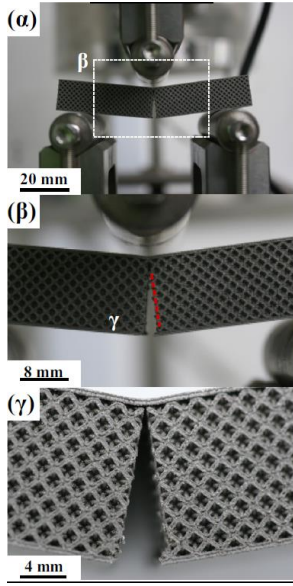
Deneysel Çalışmalar

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

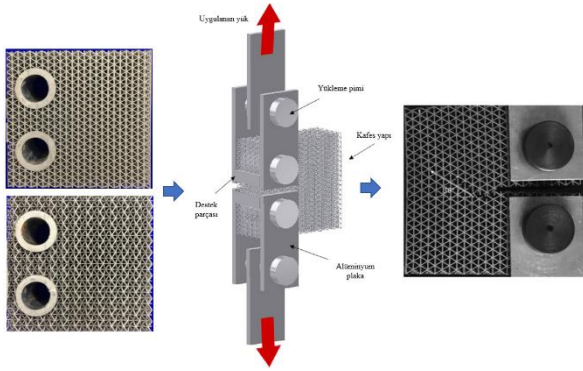


Şekil 1. Kafes yapılara uygulanan (a) basma ve (b) burma testleri [14].

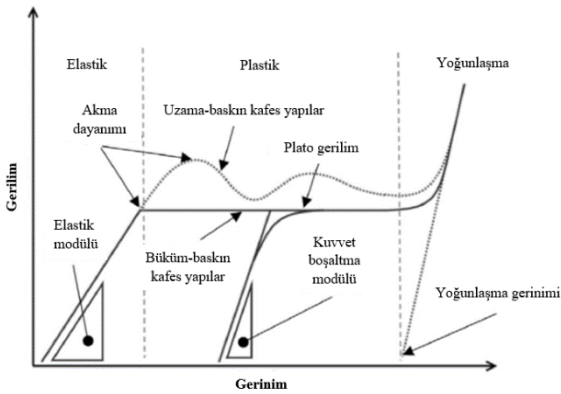
Basma Özellikleri: Kafes yapılar basma durumunda genel olarak elastik, plastik ve yoğunlaşma şeklinde üç aşamadan geçer. Elastik aşamada, kafes yapının davranışı elastiktir. Akma dayanımı aşıldığında malzeme plastik olarak deforme olur. Şekil 4'ten de görülebileceği gibi büküm-baskın kafes yapılarda,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



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



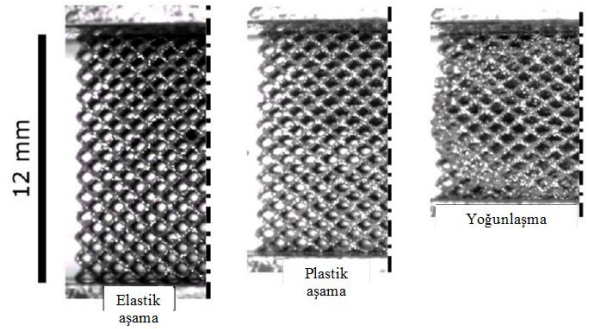
Şekil 3. Kafes yapıların kırılma dayanımlarının ölçülmesi için kullanılan test aparatı [16].



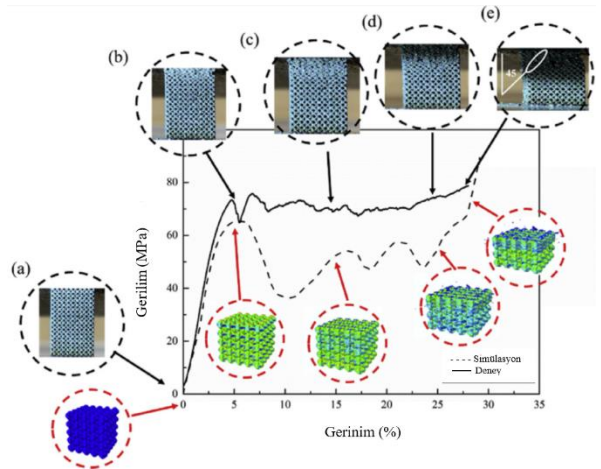
Şekil 4. Elastik, plastik ve yoğunlaşma aşamalarında uzama-baskın ve büküm-baskın kafes yapıların basma davranışları [8].

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

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

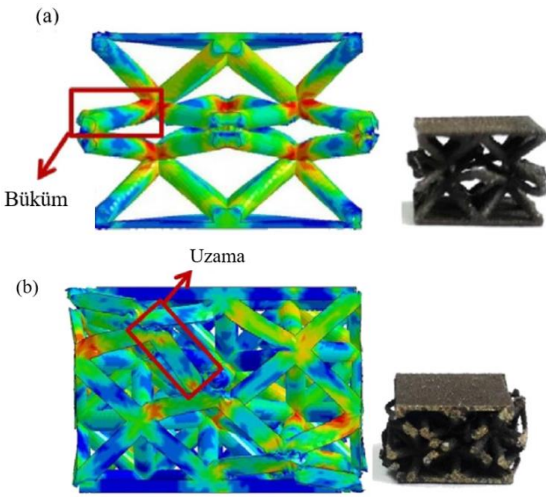


Şekil 5. Kafes yapıların geçirdiği üç aşamalı deformasyon [18].



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

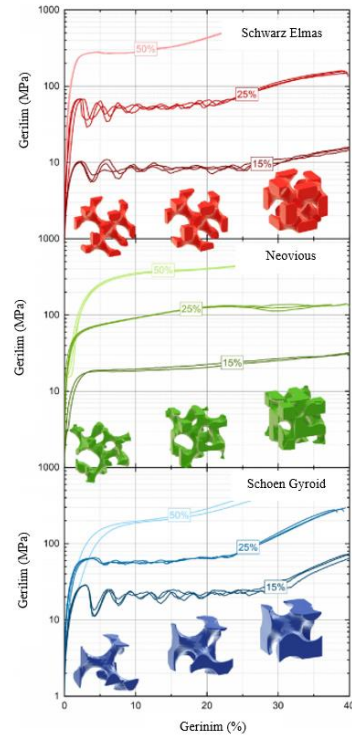
Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kafes yapıların deformasyon davranışlarının incelendiği bir çalışmada, basma durumunda, önce çapraz dikmelerin bükülmesi ve dikey dikmelerin burulması, ardından dikmelerin kırılması ve sonuçta da kafes hücrelerinin çökmesi olaylarının gözlemlendiği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



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

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

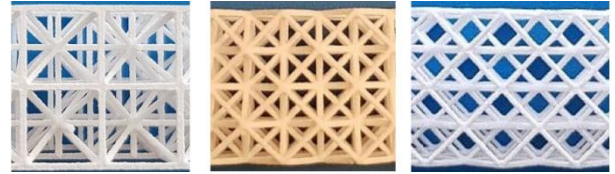
burulma seviyesinin dikme yönüne ve dikmelerdeki üretim hatalarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir [23]. Kübik ve baklava dilimli oniki yüzlü kafes yapıların uzama-baskın davranış, G7 kafes yapıların ise büküm-baskın davranış gösterdiği de yine literatürde belirtilmiştir [9, 24]. Elektron ışınıyla ergitme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



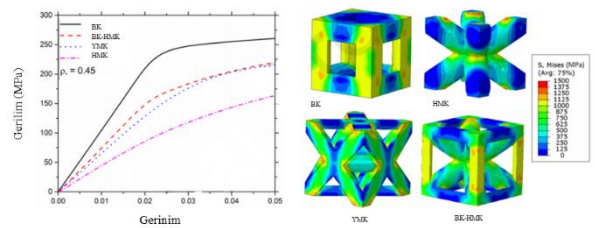
Şekil 8. Farklı üçlü periyodik minimum yüzeyli kafes yapıların geçirdiği deformasyon aşamaları [18].

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

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



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

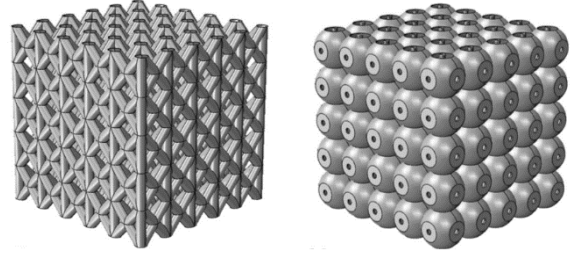


Şekil 10. Farklı hücre yapılarının gerilim-gerinim grafikleri [34].

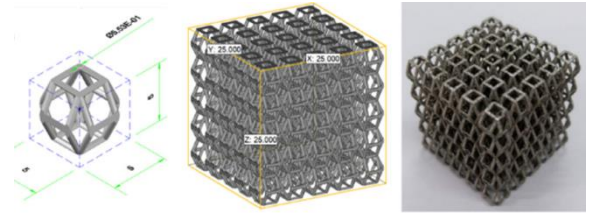
Guo ve ark. kare, dikdörtgen, dört yüzlü ve altıgen şekilli kafes yapıların mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, yük taşıma kapasitesi olarak altıgen kafes yapının en iyi sonucu, dört yüzlü kafes yapının ise en kötü sonucu verdiğini belirtmişlerdir [35]. Wang ve ark. yaptıkları deneysel çalışma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

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

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



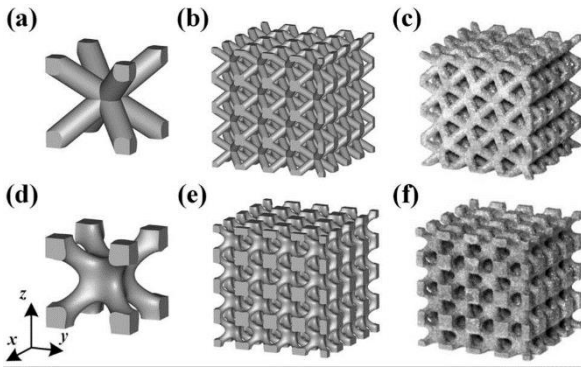
Şekil 11. YMKD ve içi boş küresel kafes yapıları [43].



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

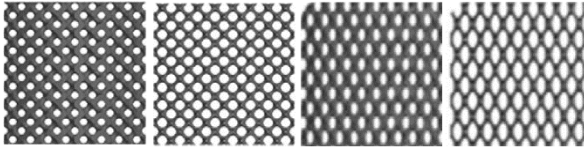
Üçlü periyodik minimum yüzey kafes yapılarının (özellikle elmas kafes yapının), HMK kafes yapılardan daha yüksek dayanım, plato gerilimi ve enerji absorbe etme kabiliyetine sahip olduğu literatürde belirtilmiştir [45, 46]. Restrepo ve ark. schwarz primitif, gyroid ve schwarz elmas kafes yapıları inceledikleri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

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



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

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



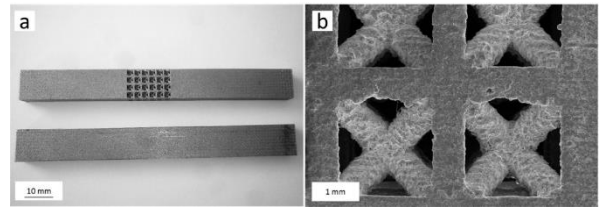
Şekil 14. Sırasıyla; % 75 gözenekli normal, % 90 gözenekli normal, % 75 gözenekli deforme, % 90 gözenekli deforme gyroid yapılar (x-y eksenindeki görünüş) [14].

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

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

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

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

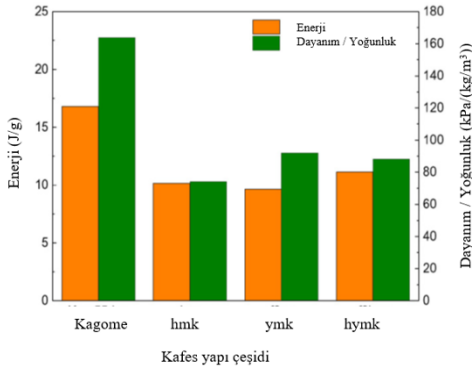


Şekil 15. HMK kafes yapısı ile üretilmiş test numunesi [2]

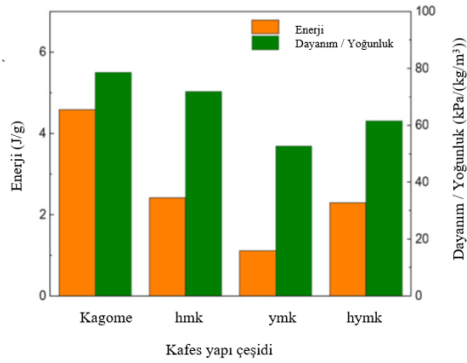
Kafes yapıların, bal peteği yapılarda kullanılması ile darbe direncini nasıl etkileyeceği üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bal peteği yapılarında ara malzeme olarak 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşım malzemeden SLE yöntemiyle üretilen HMK ve HMKD kafes yapıların kullanılmasının, bal peteği yapısının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

Literatürde farklı kafes yapıların darbe davranışları ve enerji absorbe edebilme kabiliyetleri

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



(a)



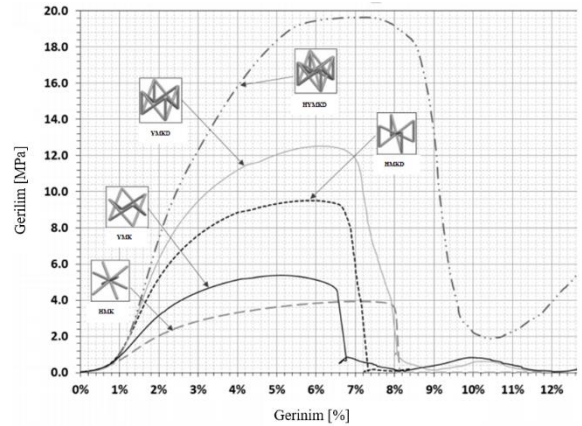
(b)

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

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

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

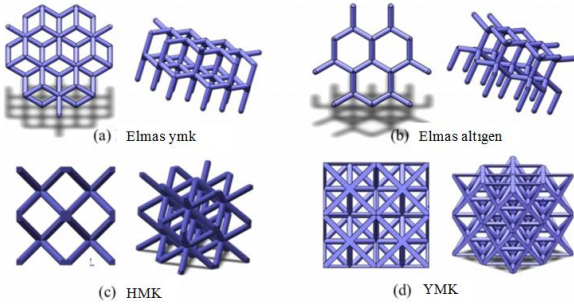
Jin ve ark. SLE yöntemi ve Ti6Al4V tozlarını kullanarak ürettikleri dört farklı kafes yapısının (HMK, YMK, elmas YMK, elmas altıgen) (Şekil 18) darbe davranışını inceledikleri çalışmada, deformasyonun, elmas YMK ve elmas altıgen yapılarda, dikmelerin birleşim yerlerinde, YMK ve HMK yapılarda ise dikmelerin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



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

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

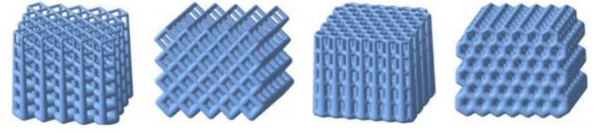
belirtilmiştir. Ayrıca yoğunluğun kademeli olarak arttığı yapıların enerji absorbe edebilme özelliklerinin de daha yüksek olduğu belirtilmiştir [55]. Benzer bir yorum, yoğunluğun kademeli olarak arttığı, seçmeli lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg HMK yapılar için de yapılmıştır [56]. Al-Saedi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



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

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

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



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

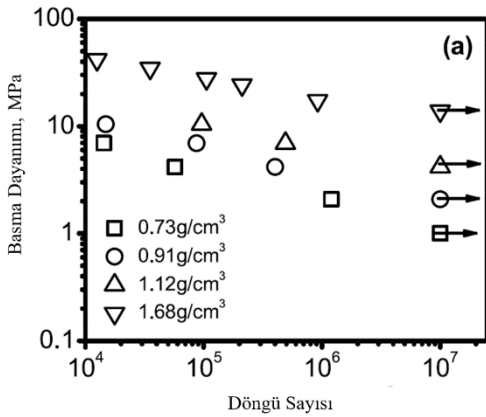
Yorulma Özellikleri: Dinamik yüklemeye maruz bırakılan kafes yapıların yorulma davranışları üç farklı aşamada değerlendirilebilir; birinci aşamada gerinim hızlı bir şekilde artar, ikinci aşamada yorulma çatlakları başlar ve toplam gerinim 10^4 - 10^6 döngüde sabit kalır, son aşamada ise toplam gerinim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

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

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

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

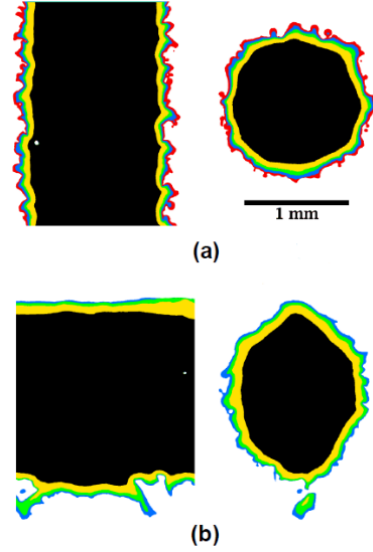
Ekleme ile imalat ile üretilen Ti6Al4V kafesli yapıların yoğunluğunun, yorulma dayanımı ile orantılı olduğu ve aynı gerilim değerinde, yoğunluk arttıkça parçanın yorulma dayanımının arttığı literatürde belirtilmiştir (Şekil 20) [68].



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

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

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



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

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

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

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

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

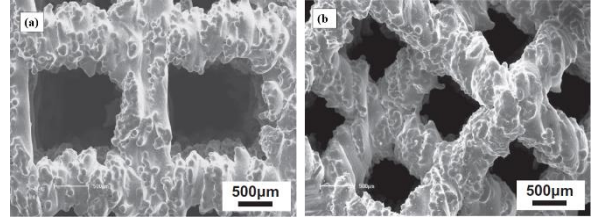
tarafından çalışılmış ve kübik kafes yapılarda, 10^6 döngüde ve akma dayanımının % 80'i kadar yüklemelerde bile herhangi bir bozulmanın meydana gelmediği, diğer iki kafes yapıda ise gözenekliliğin artması ile aynı gerilme değerlerinde yorulma dayanımlarının azaldığı belirtilmiştir [73]. Bobbert ve ark.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

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

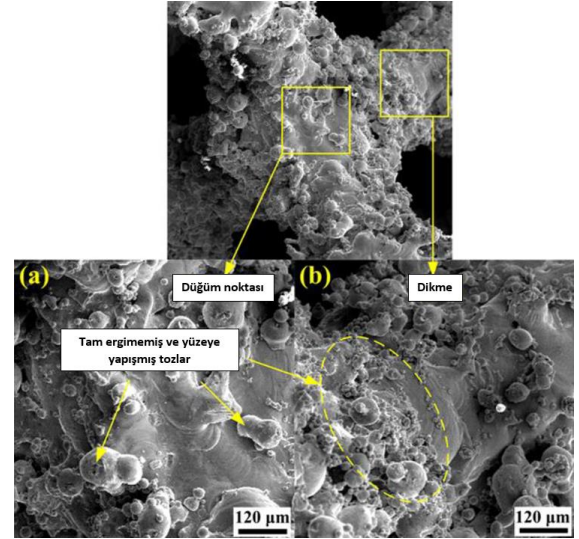
Eklemeli imalat sırasında özellikle eğimli yüzeylerde bir önceki ve bir sonraki katmanın basamak şeklinde dizilmesi ve tam ergimemiş tozların yüzeye yapışmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü yüksek çıkmaktadır (Şekil 22) [31]. Özellikle bakır gibi ısı iletkenliği yüksek olan malzemeler eklemeli imalatla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

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

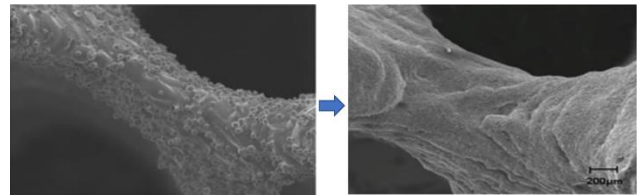
YMK, HMKD, YMKD ve HYMKD kafes yapıların yüzey pürüzlülüklerini inceledikleri çalışmalarında, inşa yönüne göre dikmelerin alt yüzeylerinin yan ve üst yüzeylere göre çok daha fazla R_a ve R_z değerine ulaştığını, bunun sebebinin ise dikmelerin alt yüzeyinde, toz yatağı ile katı malzeme arasındaki yetersiz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



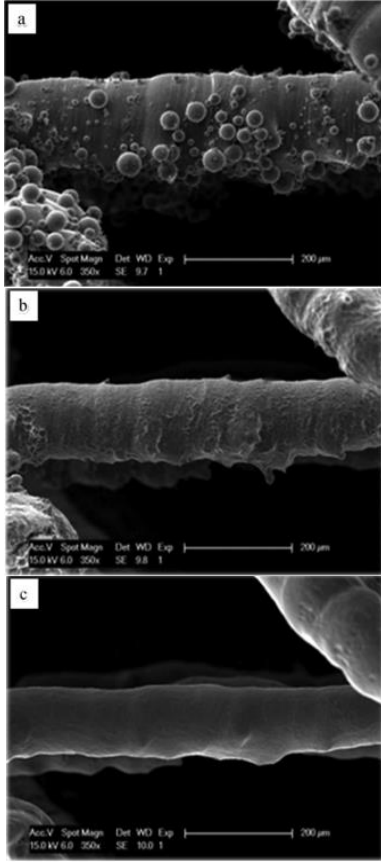
Şekil 22. EIE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V kübik (a) ve baklava dilimli oniki yüzlü (b) kafes yapıların taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [9]



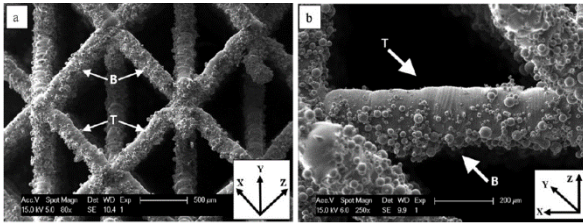
Şekil 23. SLE yöntemiyle üretilen Cu-Cr-Zr kafes yapısının taramalı elektron mikroskop görüntüsü [10].



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



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

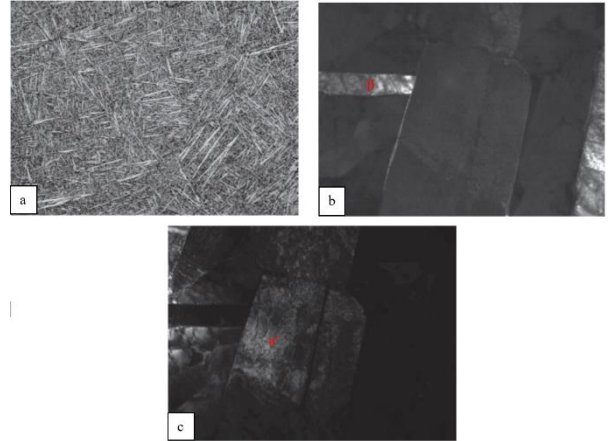


Şekil 26. Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılar da ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü. T dikmelerin üst yüzeyini, B ise alt yüzeyini göstermektedir [77].

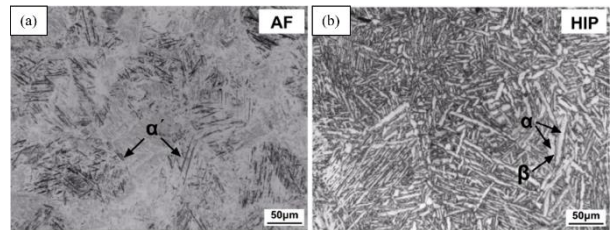
Mikroyapı Özellikleri: Eklemeli imalat ile üretilen kafes yapılar da mikroyapı değişimleri, yapının mekanik özelliklerini değiştirmekte ve en çok termal gradyandan ve soğuma hızından etkilenmektedir [80].

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

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



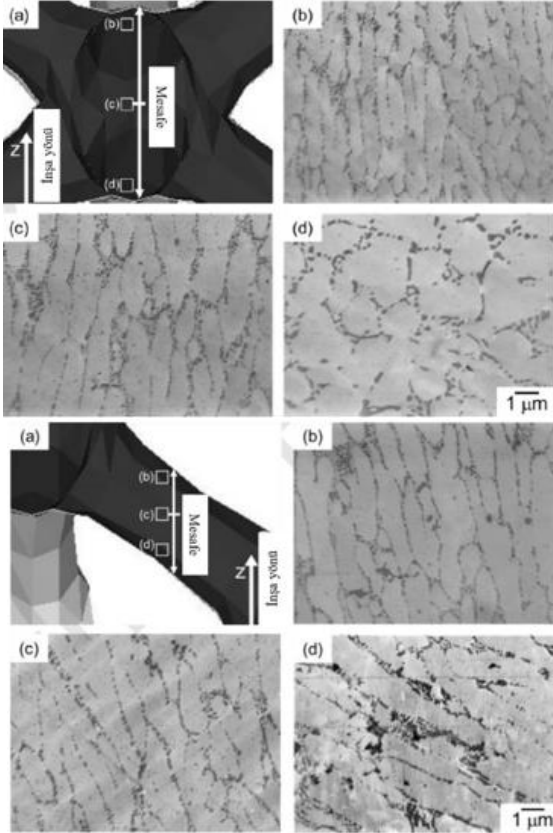
Şekil 27. EIE yöntemiyle üretilen Ti6Al4V kafes yapıların mikroyapı özellikleri; (a) optik mikroskop görüntüsü, (b) ve (c) geçirimsiz elektron mikroskobu görüntüleri [83].



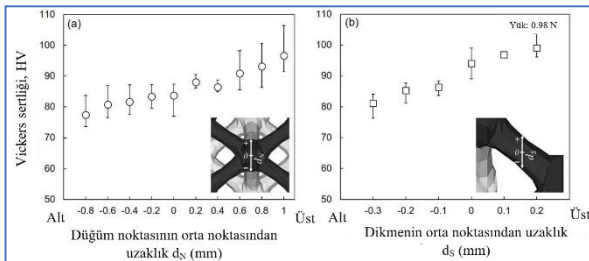
Şekil 28. SLE yöntemi ile üretilen Ti6Al4V sekiz yüzlü kafes yapıların mikroyapı görüntüleri; (a) işlemeden sonra, (b) sıcak izostatik preslemeden sonra [81]

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

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



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



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

SONUÇ

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

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

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

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

TEŞEKKÜR

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

MECHANICAL PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

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

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

KAYNAKÇA

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

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

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

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

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

Yağmur Ersan 

Graduate School of Mechatronics
Engineering, Ted University, Ankara,
Turkey

Aysen Suheyly Bagbası 

Graduate School of Mechatronics
Engineering, Ted University, Ankara,
Turkey

Bahman Paygozar 

Department of Mechanical Engineering,
Ted University, Ankara, Turkey

Shahram A. Dizaji* 

Department of Mechanical Engineering,
Ted University, Ankara, Turkey

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 27-10-2020

Kabul: 11-01-2021

*Sorumlu Yazar: S.A. Dizaji

Email: Seham.dizaji@tedu.edu.tr

Hibrit Sismik Sönümleyicinin Enerji Emilimi Üzerindeki Etkilerin İncelenmesi

Bu makalede, hibrit sismik sönümleyici tanıtılarak iki enerji soğurma sistemi, (iç sistem ve dış sistem) arasındaki boşluğun boyutuna göre verimliliği incelenmiştir. Birbirlerine bir kol yardımı ile bağlı olan bu sistemler tercih edilen çap ve kalınlıktadır. Aynı zamanda kolun işlevi yüksek deplasman olan durumlarda iç sistemi harekete dahil etmektedir. Bu çalışmanın temel amacı, yapıların destek sistemi içinde aynı alanı kaplarken, iç sistem adı verilen ikincil bir mekanizma kullanarak halkaları genişletmek ve içindeki alanı arttırmaktır. Bu amaçla, ticari bir sonlu eleman paketi olan ABAQUS / Explicit'te sayısal simülasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmada incelenen modeller, kolun boşluk boyutu dışında damperin tüm kısımlarında aynı büyüklüktedir. Bu parametrenin yük-deplasman eğrileri ve ardından emilen enerji miktarı üzerindeki etkilerini araştırmak için modellerde 0, 5, 10 ve 15 mm dahil olmak üzere dört farklı boşluk boyutu dikkate alınmıştır. Bu parametrenin, boşluk boyutunun iç sistemin devreye girme süresini kontrol ettiği ve ardından iç tüpün de enerjiyi dağıtmaya başladığı gerekçesiyle enerjinin emilmesinde gerçekten etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu, tasarım prosedüründe kilit bir faktör olarak önerilen sistemlerin kontrol edilebilirliğini artırabilir. Boşluk boyutunu 15 mm'den 0 mm'ye düşürerek tam devreye giren sistem ile emilen enerji miktarının %34 arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem, enerji soğurma, hibrit yapı, boyutsal inceleme.

1. GİRİŞ

Günümüz toplumunda çok katlı binaların sayısının artması, deprem gerçeğini akıllara getirmektedir. Bu bakımdan depremlerin getirdiği dinamik enerjinin sönümlemesinin dikkate alınması son derece önemli bir yere sahiptir. Bu yüksek katlı yapıların enerji soğurma kapasitesini geliştirmek için sismik damperler gibi ek cihazlar geliştirilmiştir (Balendra, 1991). Dinamik enerji dağıtımını amacıyla literatürde halihazırda incelenen metalik malzemenin plastik deformasyonuna dayanan yeni damper teknolojileri yer almaktadır. Bu tür damperlerin ana çalışma prensibi, bir malzeme yükleme ve boşaltma döngülerine maruz kaldığında, histerez etkisi olarak bilinen malzeme tarafından bir miktar enerjinin dağılmasıdır. Rezai (1999) sistemin kullanılabilirliğini artırmak için yükleme sırasında çizilen histerezis döngülerinin genişletilmesi üzerinde çalışmıştır. Daha sonra, Maleki ve Mahjoubi (2013) ve Boostani (2018) emilen enerji miktarını arttırmak amacıyla hibrit sönümleyici sistemi üzerine çalışmıştır. Çalışmalarının arkasındaki fikir, destek sistemi

indeki boruların bükme kabiliyetini kullanmaktır. Sonuç olarak, çalışmalarında süneklik ve enerji dağıtım kapasitesinde önemli gelişmeler sağlanmışlardır. Ayrıca Maleki ve Mahjoubi (2014), sönümleme sistemi için optimize edilmiş parametrelerle farklı metallerle doldurulmuş iki iç içe tüp önermiştir. Çalışmalarına göre, hem plastik deformasyon hem de iç ve dış borular arasındaki sürtünme dinamik enerjiyi absorbe etmiştir. Hashemi ve Moaddab'a (2017) göre depremlerin şiddeti, kullanılan damperin sertliğini etkilemektedir, bu da bu uygulamaların daha pratik çözümlere ihtiyaç duyduğu anlamına gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, hibrit sismik sönümleme sisteminin boyutsal değişikliklerden nasıl etkilendiğini araştırarak pratik bir mekanizma geliştirmektir. Bu çalışma Paygozar ve Dizaji (2019) tarafından daha önceden boyutsal değişimlerin emilen enerji miktarına etkilerinin yapay sinir ağıları metodu ile araştırıldığı çalışmanın devamı niteliğindedir.

Bu hibrit sismik sönümleyicinin enerji soğurması için ana mekanizması, tüplerin plastik

deformasyonlarıdır. SAC97 gibi yükleme modeline göre sismik yüklemenin döngüsel doğası, sistemi yükleme-boşaltma durumunda olmaya zorlayarak histerezis döngüleri yaratmaktadır. Bu döngüler, mekanik sismik damperlerin araştırılmasında ana fikir olan histerezis etkisi kavramını ortaya çıkarır. Bu nedenle, plastik deformasyonlar yoluyla emilen enerji miktarıyla ilgili olan bu döngülerin genişlemesi gerçekten uygulanabilir bir çözüm ve birçok araştırmanın ana fikri olabilecek niteliktedir.

2. DENEY YAPISI

Damperli yapıların çaprazlama sisteminin montajında kullanılabilen birleştirme yöntemi cıvata veya ark kaynağı olabilir. Bu bağlamda, sistemde parçaları birbirine bağlamak için ark kaynağı kullanılmıştır. Ayrıca, sistemi test edilebilmek ve fikstürlere bağlamak için ise cıvatalama yöntemi kullanılmıştır.

Bu araştırmanın tasarımının ana yapısı özetlenecek olursa sistem 1.5 çap oranına sahip farklı çapta iki tüpten ve bu iki tüpü birbirine bağlayan bir tutamaçtan oluşmaktadır (Şekil 1). Tüplerin sistem devreye girdikten sonra veya deplasmanın tüpler arasındaki boşluk boyutundan daha büyük bir değere yükseltilmesinden sonra iki tüpün birlikte çalışması tasarlanmıştır. Yapıya kademeli olarak yükselen deplasman uygulanırken iç tüpte burulma meydana gelecektir. Bunun nedeni, modelin deprem durumunda düşük şiddetli ve yüksek şiddetli olmak üzere iki farklı fazı sönmüleyecek şekilde tasarlanmış olmasıdır. Düşük şiddetli depremler meydana gelirken, enerjiyi sadece dış tüp emecektir. Öte yandan, yüksek şiddetli depremlerde hem iç hem de dış tüp devreye girecektir. Bu sönmüleyici mekanizmanın kullanılması sayesinde düşük şiddetli depremler meydana geldikten sonra imalat ve onarım maliyetleri azalmaktadır. Ayrıca tasarlanan bu sistemin enerji yutma kapasitesi, aynı amaç ve aynı büyüklükte tasarlanmış diğer sistemlere göre daha yüksektir. Boşluk boyutu etkisi incelenerek simülasyonlar tamamlanmıştır ve bu çalışma

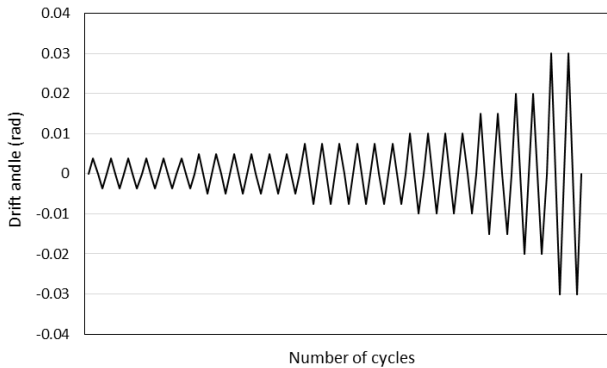
sonucunda farklı boşluk boyutlarının plastik deformasyon ile gerçekleştirilen enerji emilim miktarına etkisi araştırılmıştır.

Şekil 1'de gösterilen kurulum, araştırmanın sayısal araştırmalarını doğrulamak için kullanılmıştır. Bu amaçla, yapının her bir bileşeni, SolidWorks'te modellenmiştir ve bu çizimler Şekil 1'de gösterildiği gibi parçaları üretmek ve nihai yapıyı birleştirmek için kullanılmıştır. Tüm sabit parçalar birbirine kaynak teknikleri ile bağlanmıştır. Ayrıca, yapıyı test makinesinin fikstürüne birleştirmek için, sisteme iki harici fikstür tasarlanmıştır. Bu tasarım diğer tasarımlar gibi kolaylıkla yapılmaktadır ve kullanıcı yönünden hemen hemen aynı şartlara sahiptir.



Şekil 1 Doğrulama amacıyla üretilmiş tasarım.

Şekil 2, yüklemenin her adımına karşılık gelen yükleme modelini ve yer değiştirme değerlerini göstermektedir. Yer değiştirmenin artmasıyla, boşluk uzunluğu dikkate alınarak bazı yükleme aşamalarından sonra iç tüp devreye girecektir. Bağlantıdan sonra her iki sistem aynı anda çalışır ve böylece emilen enerji miktarı artar.



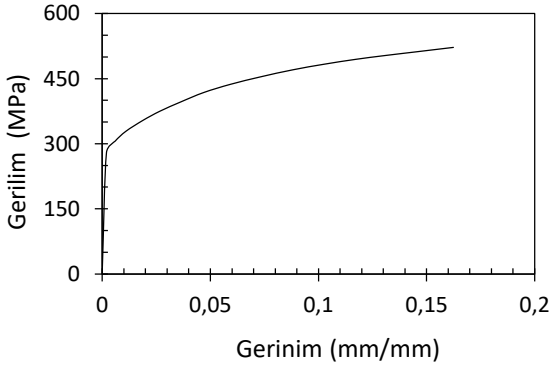
Yükleme Adımları	Sürüklenme Açısı (rad)	Çevrim Sayısı	Uygulanan Deplasman* (mm)
1	0.00375	6	3.75
2	0.005	6	5
3	0.0075	6	7.5
4	0.01	4	10
5	0.015	2	15
6	0.02	2	20
7	0.03	2	30

* Uygulanan deplasman miktarı sistem boyutuna göre hesaplanır.

Şekil 2 SAC ile uyumlu standart döngüsel yükleme modeli, (FEMA-355D, 2000).

3. SAYISAL SİMÜLASYONLAR

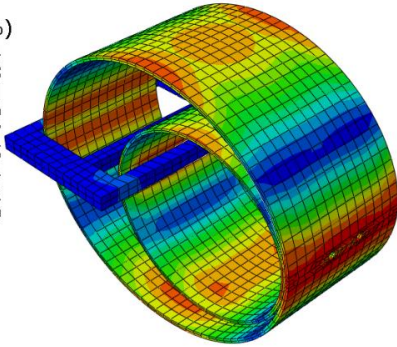
Önerilen sönümleyicinin analizinden önce, hibrit sönümleyici için gerçek bir durum çalışması tasarlanmış ve ardından SolidWorks yazılımında modellenmiştir. Tasarıma göre üretilen düzeneğe daha sonra, SAC 97 yüklemeye modeline göre yer değiştirme değerlerinde iyileştirmelerle çekme-basma deplasman kontrollü tek eksenli yüklemeye altında bir yorulma test makinesinde test edilmiştir. Sayısal kısmın doğrulanmasının tamamlanması için deneyin yüklemeye-deplasman cevabı kullanılmıştır. Modelin sonlu eleman analizleri, deneysel olarak doğrulanmış örneklem yoluyla genişletilmiştir. Ayrıca, sayısal incelemeleri doğrulamak için; borular arasında bağlantı sağlayan saplı iki çelik borudan imal edilmiş bir numune, aynı yüklemeye koşulları altında test edilmiştir. Bu test düzeneği birkaç farklı parça içerir. Bunlar, Ø 406 mm çapında ve 10 mm kalınlığında dış tüp, Ø 265 mm çapında ve 6 mm kalınlığında iç tüp ve farklı boşluk boyutlarına (0, 5, 10, 15 mm) sahip bir koldur. Bu çalışmada kullanılan malzeme Çelik 44'tür. Bu malzemenin Young modülü ve Poisson oranı sırasıyla 210 GPa ve 0.3'tür. Çekme testi ile elde edilen malzemenin gerilim-gerinim eğrisi Şekil 3'te gösterilmektedir.



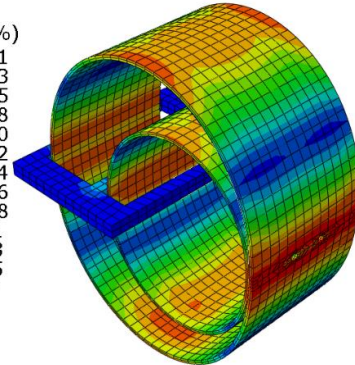
Şekil 3 Çelik 44 Malzemesinin Gerilim-Gerinim Eğrisi

Tüm sonlu eleman analizleri, ticari bir sonlu eleman paketi olan ABAQUS / Explicit içinde

S, Mises
(Avg: 75%)
378.4
347.3
316.1
284.9
253.7
222.5
191.4
160.2
129.0
97.8
66.6
35.5
4.3



S, Mises
(Avg: 75%)
383.1
351.3
319.5
287.8
256.0
224.2
192.4
160.6
128.8
97.1
65.3
33.5
1.7



Şekil 4. Döngüsel Çekme-Basma yüklemesinin 29. çevriminde deforme tüpte gerilme dağılımı; a) çekme altında ve b) basma altında

gerçekleştirilmiştir. Malzemenin plastik davranışı, yüklemeye-boşaltma koşullarını simüle etmek için yarım döngü kombine sertleştirme ile izotropik J_2 akış teoremi yardımıyla simüle edilmiştir (Smith, 2009). Ayrıca katsayı 0.1 olarak alınarak Coulomb sürtünme modeli ve problem şartlarına uygun bir temas algoritması kullanılmıştır. Modelin meshlenmesi, hassas bölgeler için $5 \times 5 \times 5$ mm boyutlarında, C3D8R tipi, 8 düğümlü tuğla elemanı ile yapılmıştır. Sınır koşulları olarak modelin bir tarafı sabitlenmiş ve diğer tarafından yüklemeye işlemi yapılmıştır, sadece tek yönde hareket serbest bırakılmıştır.

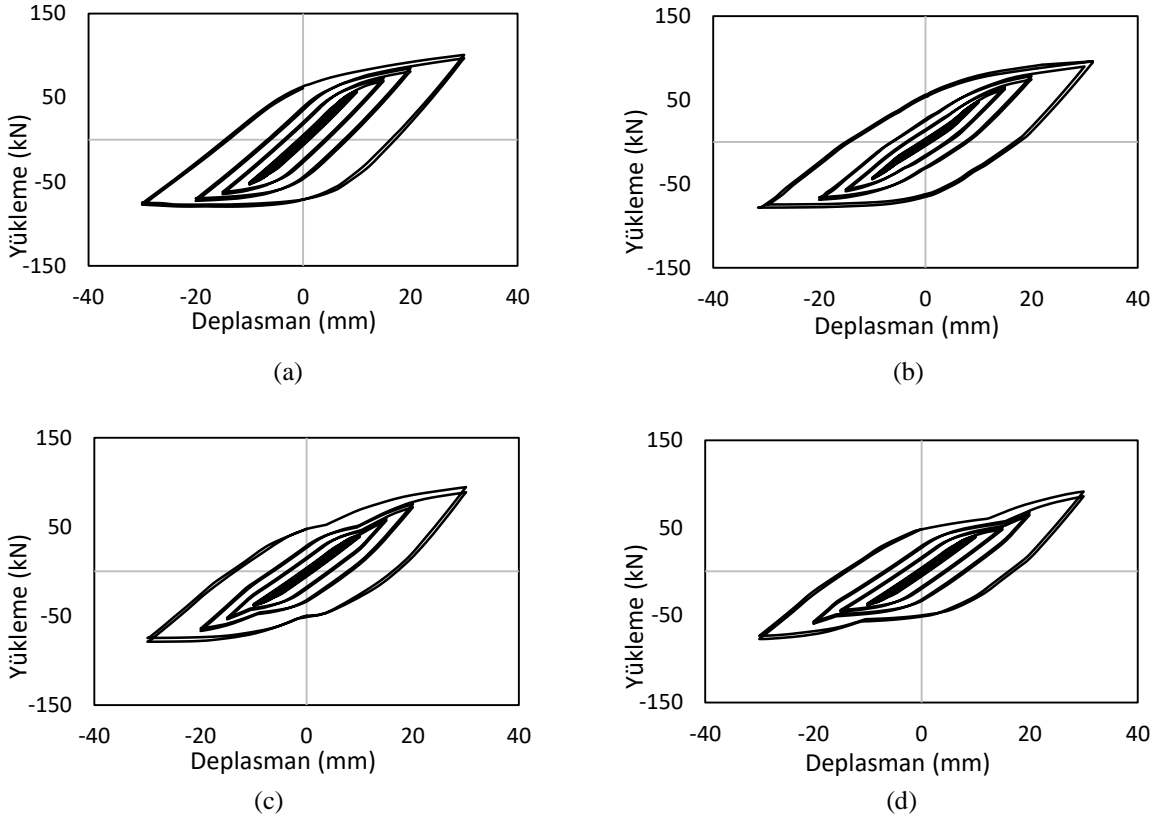
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1 Gerilim dağılımı

Çalışmanın en önemli kısmı gerilim analizidir. Bunun sebebi ise maksimum ve minimum gerilmelerdeki gerilim dağılımının yanı sıra kritik bölümlerdeki gerilme miktarlarının da güvenliğini garanti altına almak gerekmektedir. Bu amaçla, 15 mm boşluğa sahip yapının gerilme konturları Şekil 4'te gösterilmiştir. Herhangi bir bölümdeki gerilme miktarının malzemenin nihai mukavemetini geçmediği, civataların çevresi veya bağlantıların yakınındaki alanlar gibi özel konumlarda gerilme seviyelerinin yapıyı tehdit etmediği de gözlemlenmektedir.

4.2 Yüklemeye-Deplasman Cevabı

Kinetik enerjiyi absorbe etmekten sorumlu olan deplasman kontrollü yüklemeye modeli ile başlatılan Histerezis etkisi, yapıların yüklemeye-deplasman cevabı ile incelenebilir. Bu amaçla, dört modelin yüklemeye-deplasman tepkileri çıkarılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekillerde gösterildiği gibi, diyagramlar, boşluk boyutu küçültülerek dikey olarak genişletilmiştir, böylece emilen enerji miktarı artırılmıştır. Bunun nedeni, emilen enerji miktarının eğriler veya Histerezis döngüleri içindeki alana eşit olmasıdır.



Şekil 5. Farklı boşluk boyutlarına sahip yapıların Yüklemeye-Deplasman eğrileri; a) 0 , b) 5, c) 10 and d) 15 mm.

4.3 Plastik Olarak Emilen Enerji

Çalışmanın en önemli kısmı; emilen toplam yayılma enerjinin miktarı, boşluk büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak değişmesidir. Bu bağlamda, dört sayısal model incelenmiştir ve ardından bu sayısal modelleri karşılaştırmak amacıyla plastik yayılan enerjinin eğrisi ABAQUS'ten elde edilmiştir. Şekil 6, emilen enerji miktarlarındaki tutarsızlığı ortaya koymaktadır. Boşluk boyutunun küçültülmesi ile emilen enerji miktarının ölçülebilir şekilde iyileştiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, boşluk boyutunun küçültülmesi sistemlerin birbirine geçmesinin daha erken gerçekleşmesine ve böylece enerjinin hem iç hem de dış tüp tarafından emilmesine sebep olur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, boşluk büyüklüğünün sismik sönümleyicinin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak için aynı boyutta ancak dört farklı boşluk boyutuna sahip dört yapının sonlu eleman simülasyonları deneysel olarak doğrulanmış, sayısal analizlerle incelenmiştir. Boşluk boyutunun, tüplerin plastik deformasyonları ile emilen enerji miktarı üzerinde ölçülebilir bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Genel olarak, boşluk büyüklüğündeki

artış eğilimi, emilen enerji iyileştirme eğiliminin tersidir - başka bir deyişle, boşluk boyutu azaldığında, emilen enerji miktarı ölçülebilir şekilde artar.

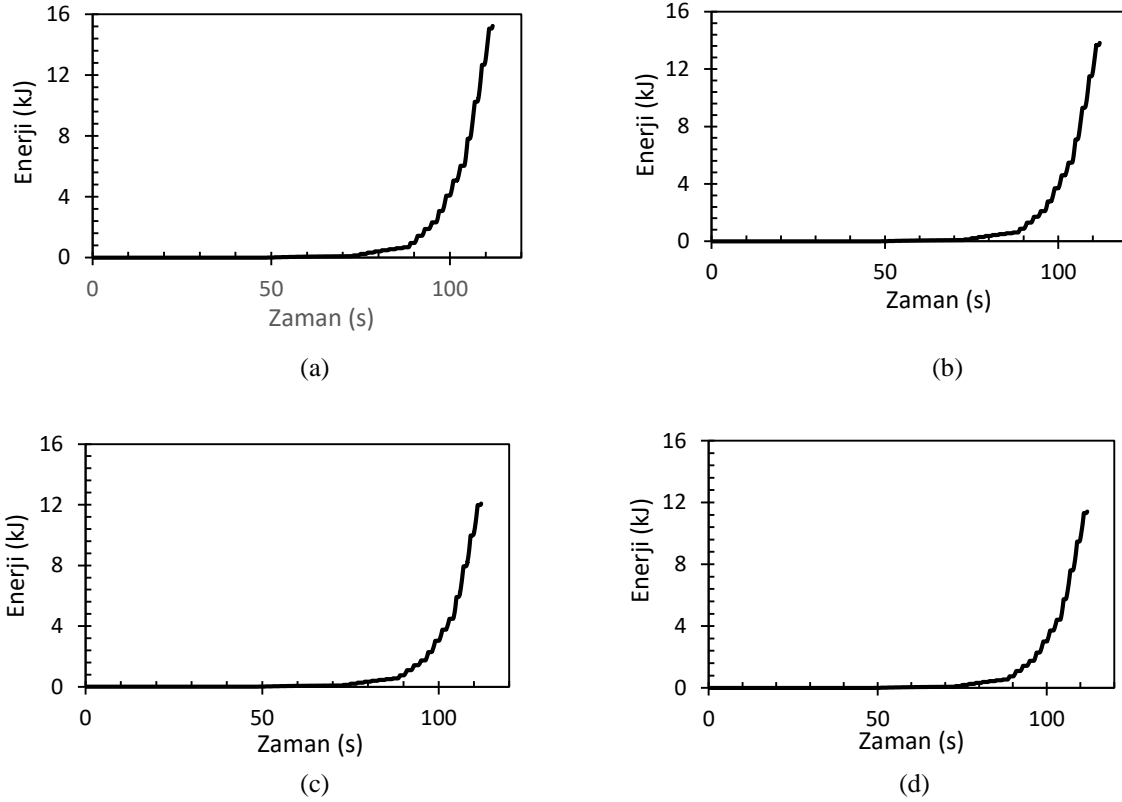
EFFECTS of HYBRID SEISMIC DAMPER ON ENERGY ABSORPTION CAPACITY

In this article, the hybrid seismic damper is introduced, and its efficiency is investigated according to the size of the gap between two energy absorption systems (internal system and external system). These systems, which are connected to each other with the aid of an arm, have different diameter and thicknesses. At the same time, the function of the arm is to involve the internal system for the situations with high displacement. The main purpose of this study is to deform the rings and increase the energy absorption capacity by using a secondary mechanism called the internal system, while covering the same area within the support system of the structures. For this purpose, numerical simulation was performed in ABAQUS / Explicit, a commercial finite element package. The models examined in the study have the same size in all parts of the damper, except for the gap size of the arm. To investigate the effects of this parameter on the load-displacement curves and then the amount of energy absorbed, four different gap sizes were considered in

the models, including 0, 5, 10 and 15 mm. It has been observed that this parameter is really effective in absorbing energy because the cavity size controls the activation time of the internal system and then the inner tube also starts to dissipate energy. This can increase the controllability of the proposed systems as a key factor in the design procedure. By reducing the

gap size from 15 mm to 0 mm, it was observed that the amount of energy absorbed increased by 34% with the fully activated system.

Keywords: Earthquake, energy absorption, hybrid structure, dimensional investigation.



Şekil 6. Farklı boşluk boyutlu yapılarda plastik olarak emilen enerji; a) 0 , b) 5, c) 10 and d) 15 mm.

KAYNAKÇA

1. A. Cheraghi, S.M. Zahrai, Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*, **127**, 120-135 (2016)
2. B. Hosseini Hashemi, E. Moaddab, Experimental study of a hybrid structural damper for multiseismic levels, (2017)
3. B. Paygozar, S.A. Dizaji, Investigating Energy Absorption Accessible by Plastic Deformation of a Seismic Damper Using Artificial Neural Network, *Procedia Structural Integrity*, **21**, 138–145 (2019)
4. B. Paygozar, M.A. Saeimi Sadigh, Improved Energy Absorption Mechanism: Expansion of Circular Tubes by Rigid Tubes During the Axial Crushing, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **18**(1), 174-182 (2018)
5. C.-H. Lee, J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, Y.K. Ju, Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection, *Engineering Structures*, **114**, 75-92 (2016)
6. J.P. Judd, I. Marinovic, M.R. Eatherton, C. Hyder, A.R. Phillips, A. Tola Tola, F.A. Charney, Cyclic tests of all-steel web-restrained buckling-restrained brace subassemblages, *Journal of Constructional Steel Research*, **125**, 164-172 (2016)
7. J. Yan, S. Yao, P. Xu, Y. Peng, H. Shao, S. Zhao, Theoretical prediction and numerical studies of expanding circular tubes as energy absorbers, *International Journal of Mechanical Sciences*, **105**, 206-214 (2016)

8. M. Boostani, O. Rezaifar, M. Gholhaki, Introduction and seismic performance investigation of the proposed lateral bracing system called "OGrid", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **18**(4), 1024-1041 (2018)
9. M.D. Symans, F.A. Charney, A.S. Whittaker, M.C. Constantinou, C.A. Kircher, M.W. Johnson, R.J. McNamara, Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments, *Journal of Structural Engineering*, **134**(1), 3-21 (2008)
10. M.J. Haji Rajabi, M.S. Karimi, M.A. Kafi, A new model for beam rigid connection to double I shaped column's web, *Journal of Constructional Steel Research*, **127**, 204-220 (2016)
11. M. Rezai, H.G.L. Prion, P. Timler, Pilot Testing of Fuse Details for HSS Bracing Members, *Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada*, (1999)
12. S. Maleki, S. Mahjoubi, Dual-pipe damper, *Journal of Constructional Steel Research*, **85**, 81-91 (2013)
13. T. Balendra, M.T. Sam, C.Y. Liaw, Design of earthquake-resistant steel frames with knee bracing, *Journal of Constructional Steel Research*, **18**(3), 193-208 (1991)
14. T.T. Soong, B.F. Spencer Jr, Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the practice, *Engineering Structure* **24**, 243-259 (2002)

Eklemeli İmalat ile Üretilen Latis Yapılardaki Geometrik Değişimlerin Konuma Bağlı İstatistiksel Modellenmesi

Recep M. Görgülürslan* 

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

O. Utku Güngör 

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 04-01-2021

Kabul: 21-02-2021

*Sorumlu Yazar: Recep M. Görgülürslan
Email: rgorguluarslan@etu.edu.tr

Bu çalışmanın temel içeriği, latis yapıların temel bileşenleri olan çubuk elemanların üzerinde, bir eklemeli imalat tekniği olan malzeme ekstrüzyonu yöntemi kullanılarak üretimi sürecinde meydana gelen geometrik değişimlerin, gelişmiş istatistiksel yöntemler kullanarak konuma bağlı olarak modellenmesi ve simülasyon modellerine dahil edilebilirliğinin incelenmesidir. Bu amaçla, çubuk eleman numuneleri farklı çap değerlerinde malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numuneler dijital kameralı ışık mikroskobu altında incelenmiş ve üretim sonrasında gözlemlenen çapta oluşan değişimlerin ölçümleri yapılarak deneysel veriler elde edilmiştir. Söz konusu değişimler, belirli bir uzay içerisinde konuma bağlı değişimlerin modellenmesinde sıkça kullanılan rassal alan (random field) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Rassal alan yöntemiyle modellenen değişimler, voksel elemanlar kullanılarak sonlu elemanlar modellerine dahil edilmiştir. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çubuk elemanların tek eksenli çekme testleri yapılarak, değişimleri içeren, üretilene benzer sonlu elemanlar modellerinin analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu incelenmiştir. Geliştirilen bu yöntem farklı eklemeli imalat yöntemlerine genişletilebilir, üretim sürecinde geometri özellikleri ve malzeme özelliklerinde gözlemlenen değişimler karakterize edilebilir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli İmalat, Malzeme Ekstrüzyonu, Latis Yapı, Sonlu Elemanlar Analizi, Rassal Alan

GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, farklı birçok alanla beraber imalat yöntemlerine de önemli yenilikler getirmiştir. Bu yenilikler, özgün ileri imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasına imkân sağlamıştır. Söz konusu yöntemlerin bir grubu eklemeli imalat olarak tanımlanmıştır. Bu gelişmelerle birlikte, geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilmesi güç veya mümkün olmayan karmaşık hiyerarşiye sahip geometrilerin üretilebilirliği mümkün kılınmıştır. Nispeten olgunlaşma sürecinde olan eklemeli imalat yöntemleri, sağladığı özgün avantajlar nedeniyle gerek akademik çalışmalar gerekse endüstriyel uygulamalarda çarpıcı bir gelişme elde etmiştir.

Latis yapılar, birbirine bağlı karmaşık çubuk, plaka veya matematiksel yüzey ağı içeren milimetre veya daha küçük seviyelerdeki kafes yapılar olarak bilinmektedir. Atomların diziliminden ilham alınarak oluşturulan bu yapılar hafif ve dayanımı yüksek yapılar olarak da bilinmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerindeki gelişmelerle birlikte üretimleri mümkün kılınan bu yapılar, ağırlık kısıtının önem arz

ettiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Latis yapıların sağladığı avantajlara rağmen, eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak bu yapıların üretimi sırasında oluşan kusurlar, geometri ve malzeme özelliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Mikro ve milimetre seviyelerinde oluşan bu değişimler, makro seviyede tüm latis yapının mekanik özelliklerini ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, latis yapıları oluşturan elemanların üretim sürecinde yüzey ve kesit alanlarında oluşan değişimlerin tasarım ve analiz süreçlerine dahil edilmesi gerekmektedir [1].

Bir metal eklemeli imalat tekniği olan seçmeli lazer ergitme (SLM) yöntemiyle üretilen latis yapılardaki malzeme özelliklerindeki değişimlerin sonlu elemanlar analizine (SEA) dahil edilmesinin, simülasyon sonuçlarının hassasiyetini artırdığı gösterilmiştir [2]. Çubuk elemanların bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri için belirlenen çap değerlerinin, eklemeli imalat sürecinde farklı üretim parametrelerinin kullanılmasına bağlı olarak iki katına kadar çıkabileceği gösterilmiştir [3]. Polimer

malzemelerin üretimi için yaygın olarak kullanılan bir eklemeli imalat tekniği olan malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis hücreler için üretim sürecinde oluşan geometrik değişimler de incelenmiştir [4]. Bu değişimler, kafes yapılarıdaki farklı açılara sahip çubuk elemanlar üzerinden elde edilen deneysel verinin olasılık dağılım fonksiyonları kullanılarak modellenmesi ile rassal değişkenler (random variable) yöntemi kullanılarak SEA'ya dahil edilebilmiştir [5]. Bir başka modelleme tekniğinde, SLM yöntemiyle üretilen latis yapının, mikro bilgisayarlı tomografi (micro-computed tomography - μ CT) cihazı ile elde edilen resimleri kullanılarak, üretimde meydana gelen kusurları içeren simülasyon modeli oluşturulmuş ve mekanik özellikler hassas bir şekilde karakterize edilebilmiştir [6]. Benzer diğer bir çalışmada [7], SLM yöntemiyle üretilen iki farklı latis hücre tipinin μ CT ile oluşturulan modelleri kullanılarak, çubuk elemanlarda gözlemlenen çap değişimleri ve kesit alanının olasılık dağılım fonksiyonları modellenmiştir. Üretilen latis yapıların basma sınır koşulları altında testleri gerçekleştirilmiş, sonuçlar olasılık dağılım fonksiyonları oluşturularak karakterize edilen bu değişimlerle ilişkilendirilmiştir.

Yazarların son çalışmasında ise [8], malzeme ekstrüzyonu ile üretilen çubuk elemanlardaki geometrik çap değişimlerinin konuma bağlı modellenmesi rassal alan kullanılarak gerçekleştirilmiş ve önceki çalışmalarda rassal değişken kullanılarak yapılan modellemelere göre, üretilen geometriye daha yakın sonuçların rassal alan modellemesi ile elde edildiği gösterilmiştir. Fakat bu çalışmada modellenen çubuk elemanların SEA sonuçları ve deneylerle doğrulanması irdelenmemiştir.

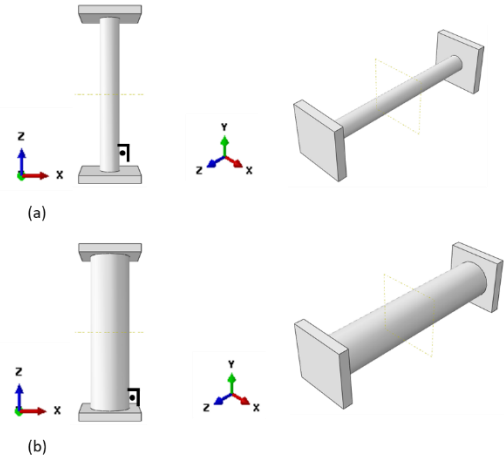
Bu çalışmanın amacı, rassal alan ile modellenen değişimlerin dahil edildiği SEA sonuçlarının elde edilmesi, çubuk elemanların çekme testlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak incelenmesidir. Bu amaçla, farklı latis hücre tiplerini oluşturabilecek dikey (90°) çubuk elemanlar, iki farklı çap değerinde malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen çubuk eleman modelleri dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenerek çap değişimleri ve çubuk elemanın kesit alanında görülecek değişimler (merkez sapmaları, boşluklar), mikroskop görüntüleri üzerinden alınan ölçümlerle elde edilmiştir. Ölçüm işlemi Matlab™ yazılımında geliştirilen görüntü işleme algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler, rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, kesit üzerinde dört noktadaki yarıçaplar için rassal alan modellemesi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu değişimler voksel elemanlar kullanılarak çubuk elemanların SEA modellerine dahil edilmiştir. Çubuk elemanların çekme testi numuneleri üretilerek tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar, çubuk

elemanların üzerindeki değişimlerin dahil edildiği SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Üretim ve Ölçümler

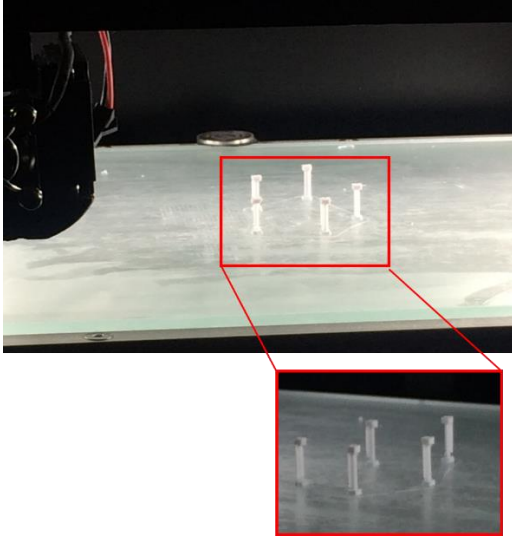
Latis yapıların en küçük bileşenleri olan çubuk elemanlar, 2 farklı model çapı olan $D_m = 1$ mm ve $D_m = 2$ mm değerleri kullanılarak, çubuk boyları 10 mm olacak şekilde modellenmiştir. Ayrıca, üretimden sonra numunelerin mikroskop tablasına yerleşimini sağlayacak ve farklı kesit noktalarından ölçüm alınmasını sağlayacak alt ve üst karesel çerçeveler de Şekil 1'de gösterildiği gibi eklenmiştir. Çubuk eleman numuneleri, malzeme ekstrüzyonu tekniği ile çalışan ArtıBoyut™ A1 Pro makinesi kullanılarak Esun marka PLA malzeme ile üretilmiştir. Çubuk elemanların üretiminde kullanılan üretim parametreleri Tablo 1'Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de verilmiştir. Çubuk elemanların üretim sürecine ait görüntüler ise Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çubuk elemanların bilgisayar modelleri (a) 90° , $D_m=1$ mm (b) 90° , $D_m=2$ mm

Tablo 1. Üretim parametreleri

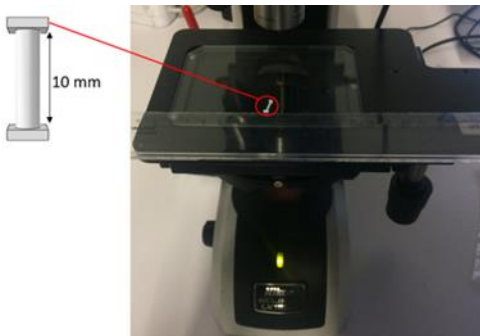
Parametre	
Katman kalınlığı (mm)	0,2
Doluluk oranı (%)	100
Üretim sıcaklığı (C°)	215
Alt tabla sıcaklığı (C°)	60
Baskı hızı (mm/s)	50
Filament kalınlığı (mm)	1,75
Destek yapı kullanımı	Yok



Şekil 2. Üretimi tamamlanan 90° açılı numune örnekleri

Bu çalışmada, 10 mm uzunluğundaki her bir çubuk eleman için 0,2 mm katman kalınlığı aralıklarında olmak üzere yaklaşık 50 katman üzerinden ölçümler alınmıştır. Bu işlem, 3 adet üretilen her bir çubuk eleman için gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir çubuk eleman modeli için yaklaşık 150 ölçüm gerçekleştirilmiştir. Merkezi sınır teoremine (Central limit theorem) [9] göre bir veri kümesinin istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için veri sayısının en az 30 olması gerekmektedir. Dolayısıyla, çalışmada kullanılan veri sayısı gerekli şartı sağlamaktadır.

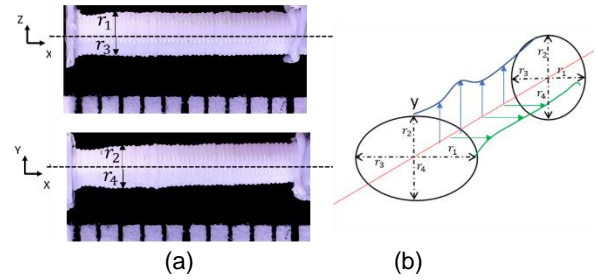
Malzeme ekstrüzyonu üretim sürecinde oluşan çap değişimleri, kesit alanlarındaki değişimler ve boşlukların gözlemlenebilmesi için çubuk eleman numuneleri Nikon Eclipse LV150N dijital kameralı ışık mikroskobu altında görüntülenmiştir. Kesit alanlarında gerçekleşen değişimlerin eleman boyunca hassas bir şekilde ölçülebilmesi için, üretilen çubuk elemanlar mikroskop tablasında yatay bir şekilde Şekil 3'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Çubuk eleman numunelerinin dijital kameralı ışık mikroskobu altında incelenmesi

Numunenin alt ve üstündeki kare çerçeveler sayesinde, numune, uzunluk ekseninde 90°'lik açıyla döndürülerek, kesit çapı etrafında

Şekil 4(a)'da görüldüğü gibi mikroskop görüntüleri alınmıştır. Çubuk numunelerin bilgisayar modelleri dairesel kesite sahip olmasına rağmen, üretimdeki belirsizliklerden dolayı, üretilen numunelerin kesitleri Şekil 4(b)'de gösterildiği gibi her katmanda farklı elips şeklinde kesitlere sahip olabilmektedir. Bu çalışmada, elips şeklindeki kesit r_1, r_2, r_3, r_4 ile gösterilen 4 farklı yarıçaptan oluşacağı düşünülmüştür. Bu yüzden, Şekil 4(a)'daki gibi, mikroskop görüntüleri üzerinden, elips kesiti oluşturacak 4 farklı yarıçap için ölçümler alınmıştır.

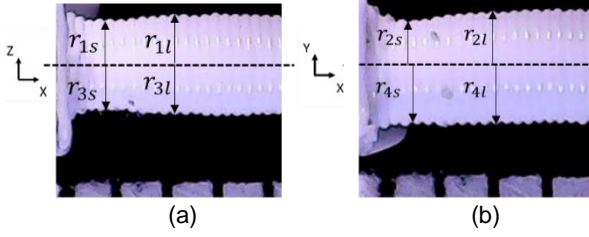


Şekil 4. Mikroskop görüntüleri üzerinden alınan yarıçap ölçümleri (a) r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçaplarının xz - xy eksenleri üzerinde karşılıkları (b) Yarıçap değerlerinin çubuk eleman boyunca değişimine ait şematik

Ayrıca, Şekil 5'te daha net görüleceği gibi, malzeme ekstrüzyonu yönteminde, üretilen her bir katmanın alt ve üst noktalarındaki yarıçaplar, katmanın orta noktasındakilere göre daha kısa olmaktadır. Bu yüzden, üretilen geometriyi hassas bir şekilde temsil edebilecek modellerin oluşturulabilmesi için, Şekil 4(a)'da gösterilen r_1, r_2, r_3, r_4 yarıçap değerleri katmanların orta noktalarından ölçülen uzun yarıçaplar ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}$) ve katmanların alt ve üst noktalarından ölçülen kısa yarıçaplar ($r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) için alınmıştır. Dolayısıyla, her bir çubuk eleman için ölçülen 8 yarıçap değişkenleri sırasıyla (Şekil 5)

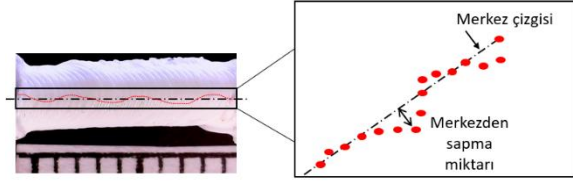
- i) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{1l} ve r_{3l} .
- ii) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde uzun yarıçaplar, r_{2l} ve r_{4l} .
- iii) xz düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{1s} ve r_{3s} .
- iv) xy düzleminde her katmanın orta noktalarındaki yukarı ve aşağı yönde kısa yarıçaplar, r_{2s} ve r_{4s} .

şeklinde.



Şekil 5. 8 farklı yarıçap değişkeninin çubuk eleman kesitleri üzerinde karşılıkları (a) xz düzlemi görüntüsü, (b) xy düzlemi görüntüsü.

Katmanlı imalat yöntemi her bir katmanın birbiri üzerine yığılması stratejisine dayanmaktadır. Bu nedenle, üretilen çubuk elemanların merkez noktalarında eleman boyunca değişimler meydana gelmektedir. Söz konusu değişimler Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu çalışmada, merkez sabit kabul edilerek elde edilen 8 farklı yarıçap ölçümü (r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l} , r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s}) sayesinde bu merkezlerdeki sapmalar yarıçaplardaki değişimler olarak modellere dahil edilebilmiştir.



Şekil 6. Katmanlı imalat ile üretilen çubuk elemanların kesitlerinde görülen merkez ekseninden sapmalar

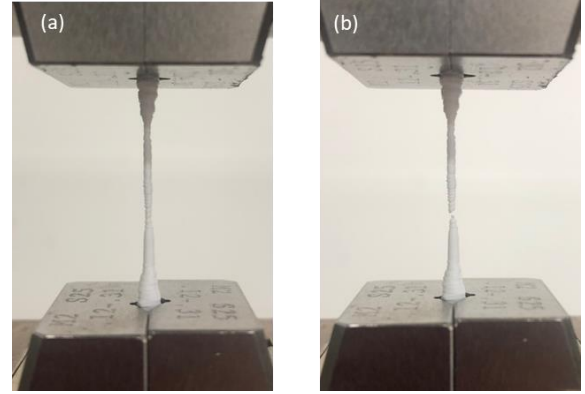
Çekme Testleri

90° açı ile üretilen 1 ve 2 mm çap boyutlarındaki çekme testi numuneleri ayrı olarak hazırlanmıştır; çünkü çekme testi için çubukların üst ve alt taraflarında, Şekil 7'de gösterildiği gibi, daha büyük çaplardaki kesitler ile köpek kemiği şeklindeki numunelerin oluşturulması gereklidir. Üretilen çekme testi numunelerinin boyutları literatürde gerçekleştirilen benzer bir çalışmadan alınmıştır [10,11]. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilen çekme testi numunelerinin tek eksenli çekme testleri Instron 400LX çekme testi cihazı ile 1 mm/dk gerinim oranıyla (strain rate) gerçekleştirilmiştir.

RASSAL DEĞİŞKEN MODELLEMESİ

Mühendislik uygulamalarında yükler, geometri, malzeme özellikleri, üretim süreçleri ve operasyon ortamlarındaki değişkenlikler, sistemin yanıtı üzerinde belirsizlikler oluşturur. Belirsizlik altındaki sistemlerin olasılık özelliklerini belirlemede farklı yöntemler kullanılmaktadır. Rassal değişken yöntemi, belirsizliklerin konum ve zamandan bağımsız olduğu varsayımı ile basit bir şekilde belirsizlikleri modelleyebildiğinden sık kullanılan bir yöntemdir. Rassal değişkenler, ilgili problemin olasılık

dağılımlarının altında yatan özellikler incelenerek analiz edilir [12]. Diğer bir deyişle, bir rassal değişken, ilgili olasılık uzayındaki ölçülebilir değerlerdir. Rassal değişken X , olasılık dağılım aralığı içerisinde farklı x_1 , x_2 , x_3 ... x_n değerleri alabilir.

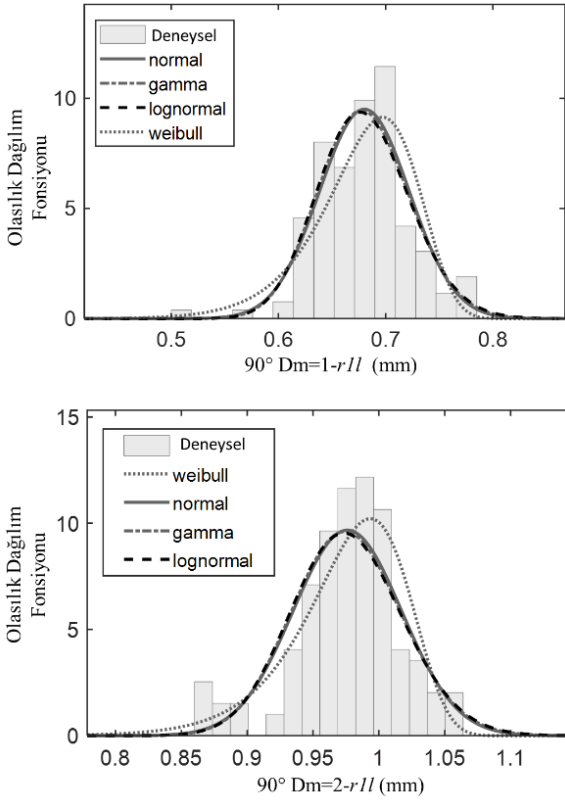


Şekil 7. 90°- $D_m = 1$ mm çap değerinde üretilen çekme testi numunesi (a) test öncesi (b) test sonrası

Bu çalışmada gerçekleştirilen rassal değişkenlerle değişimlerin modellenmesi için ilk adım olarak, elde edilen deneysel verilerin histogram ve olasılık dağılım fonksiyonları belirlenir. Deneysel verinin dağılımını temsil edebilecek en iyi olasılık dağılım fonksiyonu eğri uydurma yöntemiyle belirlenmiştir. Deneysel verinin histogram eğilimi üzerine uydurulan farklı olasılık dağılım fonksiyonlarından (normal, gamma, weibull) hata metriği en küçük değere sahip olanlar, veri kümesinin olasılık dağılımını en iyi şekilde temsil edecektir. Örnek olarak, 90° açılı $D_m = 1$ ve 2 mm çaplı üretilen çubuk eleman numunelerinden r_{1l} yarıçap değişkeni için alınan ölçümlerin histogramı ve uyarlanan olasılık dağılımları Şekil 8'de gösterilmiştir. Her bir 8 yarıçap değişkeni için aynı işlemler tekrarlanarak, deneysel ölçümlerden elde edilen çap değişimlerine en uygun dağılım fonksiyonları elde edilmiş, rassal değişkenler X , elde edilen olasılık dağılım aralığında oluşturulmuştur.

RASSAL ALAN MODELLEMESİ

Rassal değişken modellemesi, konuma ve zamana bağlı belirsizlik değişimini ihmal ettiğinden hassas çözüm sunmayabilir. Uzay içerisinde konuma ve zamana bağlı olarak değişen verilerin belirsizlik tahmini ve temsili, farklı matematiksel modeller kullanılarak rassal alan yöntemiyle temsil edilebilir. Rassal alan yönteminde, problemin çözüleceği uzay içerisinde noktalar kümesi oluşturularak, farklı konumlar korelasyon parametreleriyle ilişkilendirilir ve uzay içerisindeki konuma bağlı değişimler temsil edilebilir [12].



Şekil 8. 90° açılı, 1 ve 2 mm çaplı çubukların $r_{//}$ değişkeni için histogram eğilimi ve olasılık dağılım fonksiyonları

Rassal alan içerisindeki değişimlerin seri açılımı cinsinden temsil edilmesi literatürde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Böylece, uzay içerisindeki farklı konumlara bağlı veya zamana bağlı değişkenler temsil edilebilir. Örneğin, eklemeli imalat alanında, Inconel 718 malzemesi ile doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile üretilen malzemelerin üzerindeki yüzey pürüzlülüğü Fourier seri açılımı kullanarak temsil edilmiştir [13]. Bir diğer çalışmada ise [14], Stereolitografi (SLA) yöntemi ile, sıvı polimer kullanılarak, 60°, 75° ve 90° açılar ile üretilen çubuk numunelerin yan kenar profilleri Gaussian rassal alan yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

Rassal alanın temsil edilmesinde, Spektral gösterim, Karhunen-Loeve (KL) açılımı, Polynomial Chaos açılımı ve Wavelets gösterimi gibi farklı yöntemler kullanılabilir [12]. Bu yöntemler arasında, KL seri açılımı kullanılarak kovaryans fonksiyonunun açılımı en verimli yöntemdir [15]. O yüzden, bu çalışmada, malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretimde oluşan çap belirsizlikleri, durağan (stationary) ve Gaussian rassal alan varsayımlarıyla, Karhunen-Loeve seri açılımı kullanılarak modellenmiştir.

Rassal alan modellemesi için ilk aşama, ilgilenilecek rassal alanın belirlenmesidir. Bu çalışmada ilgilenilen problem için rassal alan,

deneysel çubuk eleman numuneleri için belirlenen uzunluk değeri olan $L=10$ mm'dir. İkinci aşamada, çubuk eleman numuneleri üzerinden alınan deneysel ölçümlerin belirlenen rassal alan içerisindeki değişimleri elde edilir. Bu aşamada, alan boyunca değişimler bir sinyal verisine benzetilerek, zamana bağlı değişimler otokorelasyon fonksiyonu kullanılarak elde edilir. N adet veri noktasına sahip veri kümesi için otokorelasyon fonksiyonu

$$R_{xx}(\tau_j) = \frac{\gamma_{xx}(\tau_j)}{\sigma_x^2} = \frac{1}{n\sigma_x^2} \left(\sum_{i=1}^{n-j} (x_i - \mu_x)(x_{i+j} - \mu_x) \right) j = 0, 1, \dots, n-1$$

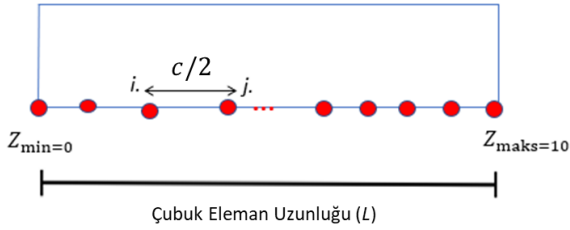
ile elde edilir. Bu eşitlikte, τ iki veri noktası arasındaki (lag) gecikme miktarını, n veri sayısını, μ_x ve σ_x değişkenleri n adet veriye ait ortalama ve standart sapmayı ve γ_{xx} otokovaryans fonksiyonunu temsil etmektedir [16].

Çubuk eleman boyunca sabit mesafe aralıklarıyla (katman kalınlığı) ölçümü gerçekleştirilen 8 yarıçap değişkeni rassal alan modellemesi sürecinde sinyal verisi veya zaman serisine benzetilerek incelenir. Burada veri kümesinin sahip olduğu eğilime bakılarak, söz konusu veri kümesi durağan (stationary) veya durağan olmayan (non-stationary) olarak sınıflandırılır. Genellikle fiziksel olayların gerçekleşmeleri durağan olmayan eğilimdedir. Buna rağmen durağan olmayan sınıfta incelenen verilerin istatistiksel modellenmesi zorlu ve karmaşıktır, nümerik işlem yükü gerektirir. Bu nedenle, ilgilenilen probleme durağan varsayımıyla yaklaşımları literatürde sıkça rastlanan bir yöntemdir. Bu çalışmada da deneysel veriler durağan (stationary) sınıfta incelenmiştir. Durağan, sabit ortalama ve standart sapmaya sahip bir rassal alan için gecikme (lag) miktarı (τ), doğrudan iki veri noktası arasındaki mesafeye ($\tau = \tau_1 - \tau_2$) eşit olmaktadır [17]. Eş. (1)'de elde edilen deneysel otokorelasyon fonksiyonlarının eğilimleri üzerine, farklı otokorelasyon modelleri eğri uydurma yöntemi kullanılarak eşleştirilir. Bu çalışmada kullanılan otokorelasyon fonksiyonları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Otokorelasyon fonksiyonları ($R(\tau)$) [18]

Model No	Eşitlik	Model İsmi
I	$R(\tau) = \exp\left(-\frac{ \tau }{c}\right)$	Ekspansiyel
II	$R(\tau) = \exp\left(-\left(\frac{ \tau }{c}\right)^2\right)$	Gauss
III	$R(\tau) = \left(1 - \frac{ \tau }{c}\right)$	Küresel (1.derece)
IV	$R(\tau) = \left(1 - \frac{3 \tau }{2c} + \frac{1}{2}\left(\frac{ \tau }{c}\right)^3\right)$	Küresel (3.derece)

Burada, τ ve c bileşenleri; iki veri arasındaki mesafeyi ve korelasyon mesafesini temsil etmektedir. Yukarıda adımları sıralanan deneysel otokorelasyon eğrisinin elde edilmesi ve otokorelasyon modellerinin bu eğriyle eşleştirilmesi sonucunda her bir çubuk eleman numunesi için korelasyon mesafesi (c) elde edilmiş olur. Rassal alan modellemesinin sonraki aşamasında, elde edilen korelasyon mesafesi (c) kullanılarak, rassal alanın ayrıklaştırılması işlemi gerçekleştirilir. Boyutları belirlenen rassal alan, iki nokta arasında ($c/2$) mesafesi olacak şekilde ayrıklaştırılır. Burada rassal alanın ayrıklaştırılmasında kullanılacak çözüm ağı boyutu ($c/2$) literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalardan elde edilmiştir [19,20]. Ayrıklaştırma işlemine ait şematik Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Rassal alanın ayrıklaştırılması şematiği

Ayrıklaştırılan rassal alan noktaları arasındaki mesafeler, $\tau = \tau_1 - \tau_2$ ve korelasyon mesafesi (c) değerlerinin hesaplanmasıyla birlikte, Tablo 2'de gösterilen otokorelasyon fonksiyonlarının bileşenleri elde edilmiştir. Bu sayede rassal alan noktaları arasındaki korelasyon ilişkisi elde edilebilir. Yapılan işlemlerdeki amaç, çubuk eleman boyunca üretim sürecinde meydana gelen değişimleri konuma bağlı olarak modellemektir. Bu işlem, farklı konumdaki noktalar arasındaki korelasyon ilişkisi elde edilerek mümkün olmaktadır.

Rassal alan modellemesi için kullanılan KL seri açılımı yöntemi, kovaryans matrisinin bir seri açılımı cinsinden temsil edilmesine dayanmaktadır. Bu nedenle, rassal alan sürecinin diğer aşaması her bir çubuk eleman modeli için kovaryans matrislerinin elde edilmesidir. Gaussian varsayımı, rassal alanın ortalama değerinin sıfır, varyans değerinin ise 1 olduğu ($\mu = 0, \sigma^2 = 1$) varsayımına dayanmaktadır. Diğer bir taraftan, korelasyon ve kovaryans arasında

$$\gamma_{xx} = \sigma_{xx}^2 R_{xx} \quad (2)$$

ilişkisi bulunmaktadır. Bu eşitlikte, x , rassal alan içerisinde gerçekleşen olasılık sürecini, γ_{xx} , otokovaryans matrisini, R_{xx} , otokorelasyon matrisini temsil etmektedir. Eş. (2)'de gösterilen ilişkinin bulunması, KL açılımı için gerekli kovaryans matrislerinin elde edilmesinde kolaylık sağlar. Tablo 2'de verilen korelasyon fonksiyonları, ayrıklaştırılan rassal alan noktaları arasındaki mesafeler ($\tau = \tau_1 -$

τ_2) ve korelasyon mesafesi (c) kullanılarak Eşitlik 2'de verilen korelasyon matrisi elde edilir. Gaussian rassal alan için $\sigma_{xx}^2 = 1$ değeri kullanılarak elde edilen korelasyon matrisleri ile kovaryans matrisleri hesaplanabilir. Böylece KL açılımının bileşenleri belirlenmiş olur.

Rassal alanın son aşamasında, KL seri açılımı kullanılarak rassal alan modellemesi tamamlanır. KL açılımı

$$g(x, \theta) = \bar{g}(x) + \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} g_i(x) \xi_i(\theta) \quad (3)$$

ile tanımlanır. Bu eşitlikte, $\bar{g}(x)$, rassal alanın ortalamasını, λ_i ve $g_i(x)$ sırasıyla öz değer ve öz fonksiyonları, $\xi_i(\theta)$ rassal değişkenleri göstermektedir. Standart normal dağılımlı rassal değişkenler $\xi_i(\theta)$, rassal alanın ortalama değeri $\bar{g}(x)$, elde edilen öz değer ve fonksiyonlar λ_i ve $g_i(x)$, Eş. (3)'te uygulanarak KL açılımı ve rassal alan modellemesi tamamlanmıştır. Bu aşamayla birlikte, 8 farklı yarıçap değişkeni ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}, r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) KL açılımı kullanılarak modellenmiştir. Diğer bir deyişle, matematiksel modeller kullanılarak deneysel verilerin değişimlerini konuma bağlı olarak ilişkilendirerek, üretim sürecinde meydana gelen değişimler istatistiksel olarak modellenmiştir.

BELİRSİZLİKLERİ İÇEREN DETAY MODELLERİN OLUŞTURULMASI

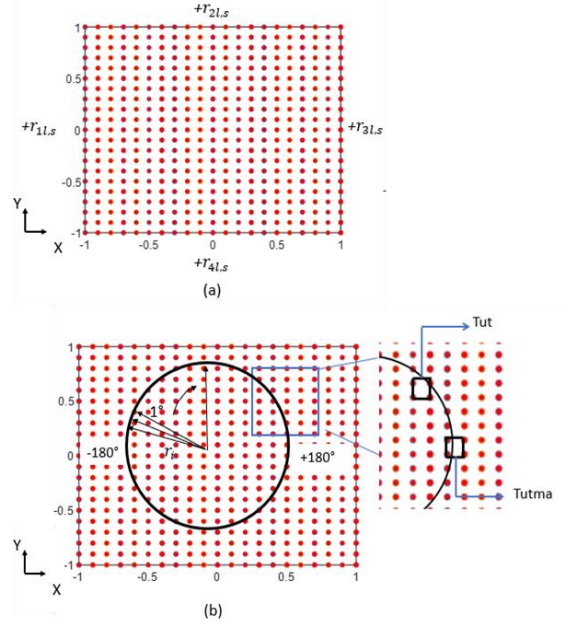
Rassal alan yöntemiyle modellenen latis yapıda üretimden kaynaklanan değişimlerin SEA modellerine dahil edilmesi, yapının farklı sınır ve yüklemeye koşulları altında davranışlarının incelenmesinde avantaj sağlamaktadır. Literatürde, değişim ve belirsizliklerin dahil edildiği özgün SEA modellerinin oluşturulmasında voksel elemanlar yaygın şekilde kullanılmaktadır [21, 22]. Voksel elemanlar basitçe hacimsel piksel (volumetric pixel) elemanlardır. Bu elemanlar kullanılarak tüm parça geometrisi modellenebilir ve değişimler (çap değişimleri, kesit alanında gözlemlenen farklılıklar, boşluklar) mevcut geometrilere dahil edilebilirler. Bu çalışmada, voksel elemanlar kullanılarak detay modellerin oluşturulmasında izlenen aşamalar şu şekildedir:

- Modellenecek numune üzerinden ölçülen ve rassal alan yöntemiyle modellenen yarıçap değerleri ($r_{1l}, r_{2l}, r_{3l}, r_{4l}, r_{1s}, r_{2s}, r_{3s}, r_{4s}$) sınır oluşturacak şekilde kare bir alanda noktalar kümesi oluşturulur. Bu aşama Şekil 10(a)'da gösterilmiştir.
- Çubuk eleman kesiti 4 farklı yarıçap değişkeninden oluştuğu için, bir önceki adımda oluşturulan nokta kümesi içerisinde kesitin oluşturulabilmesi için $\pm 180^\circ$ aralığında 4 bölge oluşturularak her 1° 'ye karşılık gelen yarıçap değerleri hesaplanır. Bu aşama Şekil 10(b)'de gösterilmiştir.

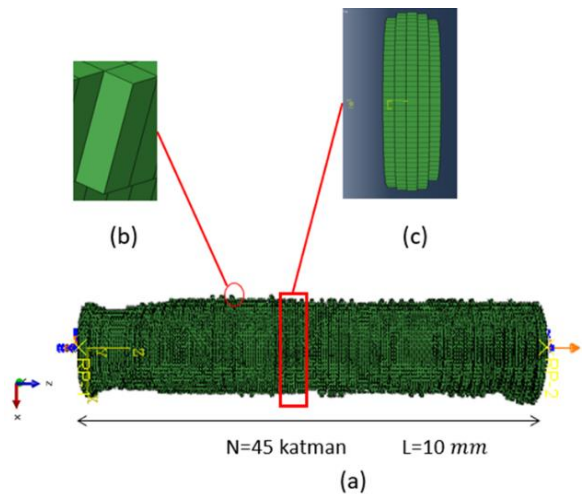
- iii. Şekil 10(a)'da gösterilen her bir nokta x ve y koordinatlarına sahiptir. O yüzden, x ve y ekseninde her bir nokta sırasıyla seçilerek farklı kombinasyonlarda nokta ikilisi oluşturulur. Noktaların birbirine olan uzaklıkları norm işlemiyle, aralarındaki açı basit geometrik ilişkilerle hesaplanır.
- iv. Bir önceki adımda oluşturulan noktalar kümesi içerisinde belirlenen iki nokta arasındaki mesafe uzaklığı L_1 , ii. adımda rassal alan yöntemiyle modellenen ve deneysel çap değerlerinin 1° açılara karşılık gelen mesafesi ise L_2 olarak tanımlanmıştır. L_1 uzaklığının L_2 uzaklığından küçük ve eşit olduğu durumlar, noktalar kümesi içerisinde seçilen herhangi bir noktanın, rassal alan ile modellenen yarıçap değerlerinin oluşturduğu çap kesiti içerisinde olduğunu gösterir. Bu nokta oluşturulması istenilen çap sınırının içerisinde yer almaktadır ve istenilen koşulu sağlamaktadır.
- v. Şekil 10(a)'da verilen noktalar kümesine ait her bir nokta kombinasyonu denendikten sonra, adım iv'te elde edilen ve istenilen koşulu sağlayan noktaların oluşturduğu matris üzerinden 4'lü noktalar seçilir. Burada bir koşul kontrolü daha yapılır. Matris içerisinde seçilen birbirine komşu 4'noktanın en az 2'si sınır içerisindeyse bu 4'lü nokta voksel elemanın XY ekseninde sınırını oluşturur. Bu işlem Şekil 10(b)-sağ üst kısımda gösterilmiştir.
- vi. Bir önceki adımın tamamlanmasıyla voksel kare elemanların x ve y eksenlerinde, 2 boyut (2B) üzerinde sınırları belirlenmiş olur. Seçilen 4 nokta yükseklik (z) ekseninde katman kalınlığı kadar ötelenerek 8 nokta küp voksel eleman oluşturulur. Oluşturulan voksel elemanlar katmanlı imalat yöntemine benzer olarak üretim yönünde (Z eksen) üst üste N adet yığılarak çubuk elemanların voksel modelleri oluşturulur (Şekil 11).

Voksel modellerin oluşturulmasında diğer bir aşama kenar profillerinin üretilene benzer elde edilmesidir. Mikroskop altında incelenen çubuk elemanlarının kenar bölgelerinin eliptik formda olduğu gözlemlenmiştir, bu durum Şekil 12(a)'da gösterilmiştir. Gözlemlenen kenar formun çubuk eleman modeline aktarılabilmesi için, tek bir katman Şekil 12(b)'de gösterildiği birden fazla voksel elemana bölünmüştür. Bu amaçla, Şekil 12(c)'de, rassal alan modellemesinden elde edilen, katmanın merkezinde konumlanan ve kırmızı ile gösterilen uzun yarıçap değerleri (r_{1l} , r_{2l} , r_{3l} , r_{4l}) ve katmanın alt ve üst taraflarındaki siyah ile gösterilen kısa yarıçap değerleri (r_{1s} , r_{2s} , r_{3s} , r_{4s}) arasına, elips formunu verecek ve mavi ile gösterilen iki ek uzunluk eklenmiştir. Bu ek uzunlukları hesaplamak için, uzun

ve kısa yarıçap arasında analitik elips formülü uygulanmıştır. Söz konusu voksel elemanlar, belirlenen kesit sınırları içerisinde yerleştirilerek katman kenarlarının formu deneysel çubuk eleman numunelerini temsil edebilecek şekilde elde edilmiştir.



Şekil 10. Sınırları yarıçap değişkenleriyle belirlenen voksel elemanları oluşturacak noktalar kümesi (a) Modellenen yarıçap değişkenleri kullanılarak oluşturulan noktalar kümesi (b) Çubuk eleman kesiti içerisinde kalan voksel elemanların oluşturulmasına şematik



Şekil 11. Voksel elemanlar ile oluşturulan çubuk modeli (a) Çubuk eleman modeli (b) Tek bir voksel eleman (c) Çubuk eleman içerisinde belirlenen N'inci katmanın XZ ekseninde görünümü

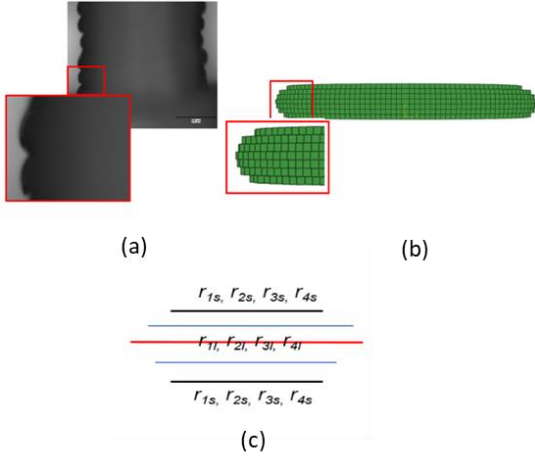
SONUÇLAR

Bu bölümde, rassal alan modellemesi yönteminin sonuçları ve bir önceki başlık altında aşamaları verilerek elde edilen değişimleri içeren sonlu eleman modelleri gösterilmiş ve SEA sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Şekil 14'te 90° açı ve 2 mm çap değerine sahip çubuk elemanın r_{11} , r_{21} , r_{31} , r_{41} yarıçapları için rassal alan modellemesinden elde edilen sonuçlar incelenmiştir. 3 tekrar olarak üretilen çubuk eleman ölçümlerinden elde edilen çap ölçümleri, ortalama ve standart sapma aralıklarıyla birlikte verilmiştir. Ayrıca, rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleriyle modellenen çap değişimleri de benzer şekilde 3 örneklem olarak elde edilerek ortalaması alınmış, deneysel veri üzerinde ortalama eğrileri gösterilmiştir.

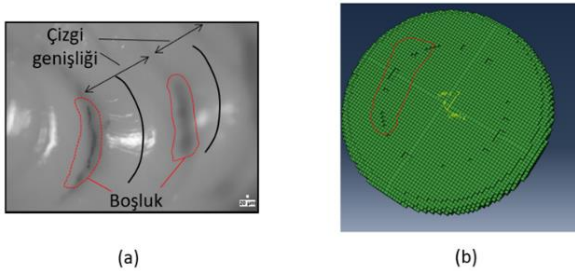
Şekil 14'te görüldüğü üzere, rassal alan modellemesiyle elde edilen çap değerleri deneysel verilerin ortalama \pm standart sapma aralığındadır. Rassal alan modelinin deneysel verinin eğilimini ve değişim noktalarını yakalayabildiği de gözlemlenmiştir. Deneysel verinin değişkenliği, hesaplanan korelasyon mesafesi (c) ve otokorelasyon modeli rassal alan içerisindeki davranışta rol belirleyicidir. Diğer bir taraftan, rassal alan yöntemleriyle modellenen çap değerlerinin, çubuk eleman boyunca yüksek değişkenlikte olduğu ve konuma bağlı değişimlerin karakterize edilmesinde yetersiz kalabileceği görülmektedir. Ayrıca, 1 mm ve 2 mm çaplı çubuklar için voksel modelleme yöntemi ile oluşturulan SEA modelleri sırasıyla Şekil 15 ve 16'da üretilen numuneler ile karşılaştırmalı gösterilmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis yapılar da üretimden kaynaklanan değişim ve belirsizliklerin çubuk eleman seviyesinde karakterize edilebildiği gösterilmiştir.

Bunlara ek olarak, 90° açıda $D_m = 1$ mm ve 2 mm çap değerinde her birinden 3 adet çubuk çekme testi numuneleri üretilmiş ve tek eksenli çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testlerinden elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilmiştir.

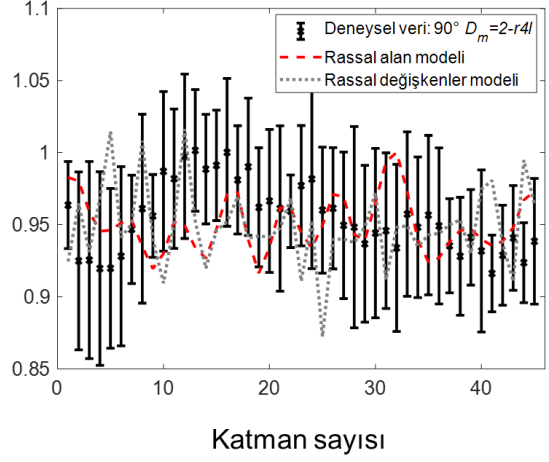
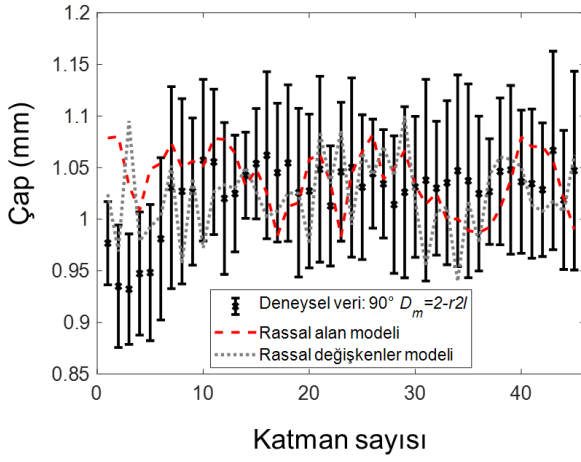
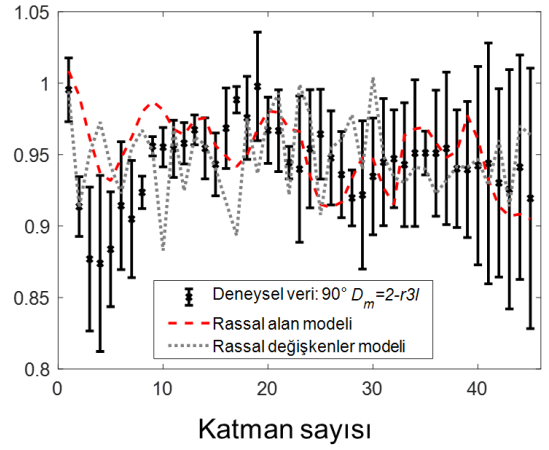
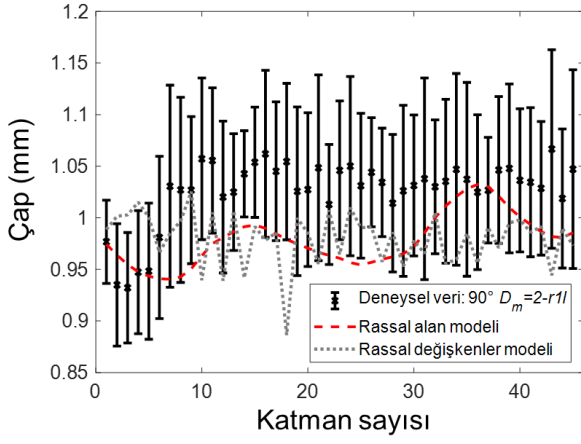


Şekil 12. Elips formunda katman kenarlarının voksel elemanlar kullanılarak detay çubuk modellerine dahil edilmesi (a) Katman kenarının mikroskop altında görüntüsü (b) Elips formunda kenarların voksel elemanlar kullanılarak oluşturulması (c) Süreçte kullanılan yönteme ait şematik

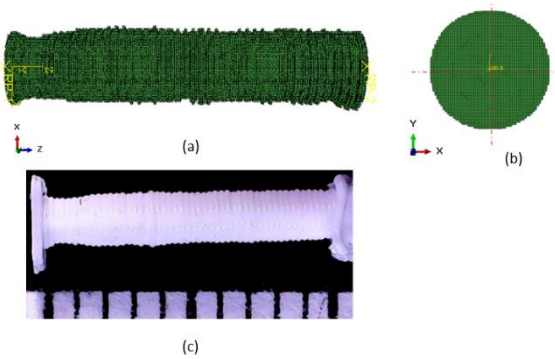
Detay voksel modelin geliştirilmesine yönelik diğer bir aşama malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretim sırasında oluşan boşlukların çubuk modellerine dahil edilmesidir. Üretilen çubuk eleman kesitleri incelendiğinde iki filament arasında mikro boşlukların olduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 13'te gösterilmiştir. Burada, söz konusu mikro boşlukların bölge-bölge olduğu ve çubuk eleman kesitinin yaklaşık %0,1'lik kısmına karşılık geldiği görülmüştür. Boşlukların voksel elemanlara dahil edilmesi işleminde, kesit üzerinde iki filamentin birleşim noktalarına karşılık gelen bölgelerde ölçülen boşluk miktarı kadar bir hat oluşturulur, hat içerisinde kalan voksel elemanlar silinir. Boşlukların dahil edilmesiyle elde edilen voksel model kesiti Şekil 13(b)'de gösterilmiştir.



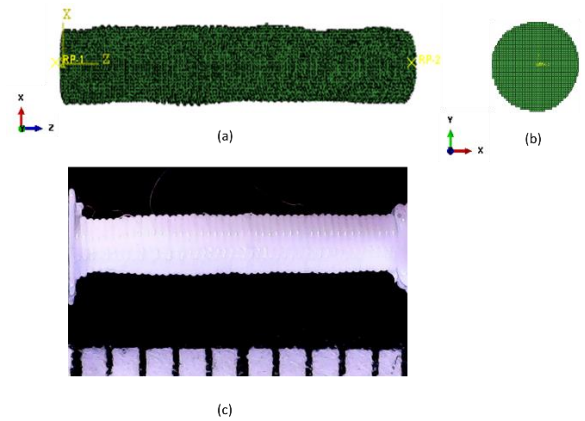
Şekil 13. Katmanlı imalat sırasında oluşan mikro seviyede boşlukların detay voksel modellerine dahil edilmesi (a) Üretilen çubuk eleman kesitlerinin mikroskop altında incelenmesi (b) Kesit üzerinde gözlemlenen çizgisel boşluklarının voksel modellere dahil edilmesi



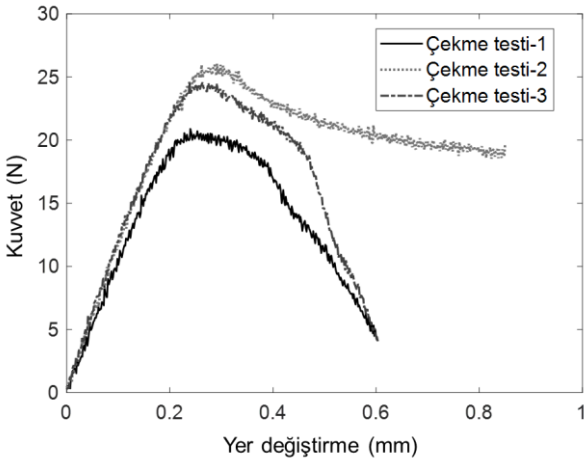
Şekil 14. 90° açı ve 2 mm çubuk elemanın çap değişimlerinin rassal değişkenler ve rassal alan modelleri sırasıyla; (a) r_{1l} , (b) r_{2l} , (c) r_{3l} , (d) r_{4l} değişkenleri



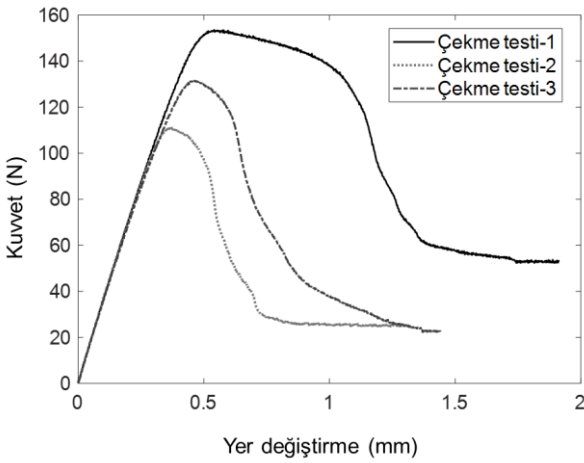
Şekil 15. 90° açı ve 1 mm çap için (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) üretilen numunenin mikroskop görüntüsü



Şekil 16. 90° açı ve 2 mm çap için (a) Voksel çubuk model XZ görünüşü (b) Voksel çubuk model XY görünüşü (c) üretilen numunenin mikroskop görüntüsü



Şekil 17. 90° açı ve $D_m = 1$ mm çaplı numuneler için Kuvvet(N) – Yer değiştirme (mm) eğrileri

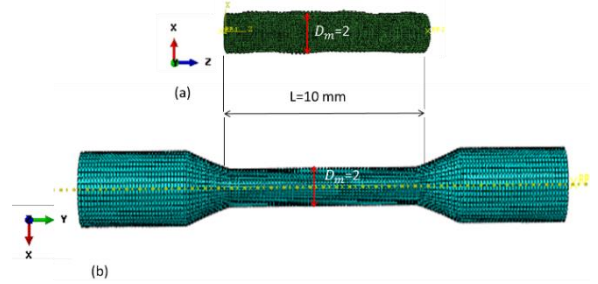


Şekil 18. 90° açı ve $D_m = 2$ mm çaplı numuneler için Kuvvet (N) – Yer değiştirme (mm) eğrileri

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, $D_m = 1$ mm çap değerinde üretilen çubuk elemanlar üzerinde oluşan reaksiyon kuvvetlerinin, beklenildiği üzere daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, üretilen çubuk elemanlarda çap değerinin azalmasıyla birlikte boyut hassasiyetinin düşmesi ve kenar profillerinde görülen değişkenliğin artması, $D_m = 1$ mm çubuk elemanın eğrilerinde dalgalanma ve süreksizliklere neden olmuştur (Şekil 17). Çap değerinin $D_m = 2$ mm değerine artırılmasıyla birlikte doğrusal elastik bölge üzerinde sürekli ve net bir eğilim elde edilmiştir (Şekil 18). Bunun nedeni artan üretim çapıyla birlikte üretim sürecinde oluşabilecek değişim ve kusurların azalması, numunenin yüzey ve boyut hassasiyetinin ise artmasıdır.

Çekme testi sonuçlarıyla karşılaştırmak üzere 3 farklı SEA modeli bulunmaktadır. Bunlardan ilk ikisi, Şekil 19(a)'da gösterilen vokseller yöntemi ile oluşturulan, materyal ve yöntem başlığı altında verilen adımlardan elde edilen deneysel ölçümlerle elde

edilen rassal değişken ve rassal alan yöntemleri kullanılarak oluşturulan modellerdir. Diğer model ise, Şekil 19(b)'de gösterilen ve üretimden kaynaklanan değişimleri içermeyen, çubuk eleman çekme testi numunesinin CAD modelinden oluşturulmuş SEA modelidir. Karşılaştırma yapılacağı için, çekme testi simülasyon modelinin deney parçası boyunun (gauge length), tek çubuk rassal değişken ve rassal alan modellerinin uzunluğuna ($L=10$ mm) eşit alınmıştır.



Şekil 19. 90° açı ve 2 mm çap değerinde üretilen çubuk elemana ait simülasyon modelleri (a) Değişimleri içeren detay tek çubuk modeli (b) tek çubuk çekme testi numune modeli

ABAQUS yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyonlarda, sınır koşulları, alt ve üst referans noktaları aracılığıyla çoklu nokta kısıtlaması (multiple point constraint) ile tanımlanmıştır. Modeller, alt referans noktası sabitlenerek, üst referans noktası üzerinden tek eksenli yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan elastik modül değerleri, deneysel testlerden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri üzerine %0,2 öteleme (%0.2 offset line) eğrisi yöntemi uygulanarak elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen akma gerilmesi değerine karşılık gelen nokta kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerine yansıtılarak sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak kuvvet ve yer değiştirme belirlenmiştir. Diğer bir deyişle, deneysel çekme testi sınır koşulları simülasyon modellerine uygulanmıştır. Elde edilen SEA sonuçları Tablo 3 ve 4'te listelenmiştir.

Her iki numune için de deneysel ve simülasyon sonuçları irdelendiğinde, değişimlerin dahil edilmediği, çekme testi numunesinin standart bilgisayar modeli kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçların, test sonuçlarına oranla yaklaşık 2-2,3 kat daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, üretim sırasında gerçekleşen geometrik değişimlerin rassal değişkenler ve rassal alan yöntemleriyle karakterize edilerek, çubuk eleman modellerine dahil edildiği detay simülasyon modellerinin deneysel çekme testi sonuçlarına daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle rassal alan yöntemiyle elde edilen sonuçların deneysel çekme testi sonuçlarına daha yakın eğilimde olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 3. $D_m = 1$ mm için tepki kuvveti sonuçları (N)

Test/SEA no	1	2	3
Çekme testi (DeneySEL)	13,789	16,607	17,464
Çekme testi (Simülasyon)	6,282	7,844	8,371
Rassal değişken modeli	11,310	14,120	15,060
Rassal alan modeli	12,630	15,760	16,810

Tablo 4. $D_m = 2$ mm için tepki kuvveti sonuçları (N)

Test/SEA no	1	2	3
Çekme testi (DeneySEL)	126,358	82,036	106,901
Çekme testi (Simülasyon)	55,320	35,990	46,850
Rassal değişken modeli	87,870	57,900	74,780
Rassal alan modeli	91,260	60,190	77,700

DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, malzeme ekstrüzyonu yöntemiyle üretilen latis yapılar, üretimden kaynaklanan değişimler (çap değişimleri, boşluklar) konuma bağlı olarak rassal alan yöntemi kullanılarak modellenmiş ve elde edilen SEA sonuçları çekme deneyi sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Rassal alan yöntemiyle modellenen çap değişimleri voksel elemanlar kullanılarak oluşturulan SEA modellerine dahil edilmiştir. Ayrıca, üretilen çubuk eleman numunelerinin mikroskop altında incelenmesiyle gözlemlenen mikro boşluklar da voksel elemanlar kullanılarak çubuk eleman modellerine dahil edilmiştir. Böylece, üretim sürecinde oluşan belirsizlikler ile çubuk elemanların üretilene benzer SEA modelleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, rassal alan kullanılarak elde edilen SEA sonuçlarının, değişimlerin hiç dahil olmadığı SEA sonuçlarına ve belirsizliklerin rassal değişkenler ile dahil edildiği SEA sonuçlarına göre, çekme deneyi sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Böylece, üretimde oluşan farklılıklar karakterize edilerek sonlu elemanlar simülasyonlarından elde edilecek sonuçların doğruluğu artırılmıştır. Çalışma kapsamında yakın gelecekte farklı açı (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75°) değerlerine sahip çubuk numuneler için de testler ve simülasyonlar gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece, farklı açılarda çubuk

elemanlara sahip latis hücrelerin simülasyonlarında üretimden kaynaklı değişimlerin dahil edilmesi ile yüksek doğrulukta sonuçlar alınabilecektir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın tamamlanmasında 118M715 numaralı proje kapsamında sağlanan finansal destek için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Teknoloji Merkezine deneylerin yapılması için sağlanan olanaklar ve yüksek lisans öğrencisi Deniz Baran'a sağladığı destek için teşekkür ederler.

SPATIALLY DEPENDENT STATISTICAL MODELING OF GEOMETRIC VARIATIONS IN ADDITIVELY MANUFACTURED LATTICE STRUCTURES

The content of this study is the modeling of the geometric variations introduced by the material extrusion method on the strut members of lattice structures using advanced statistical methods based on the spatial dependency and investigating their inclusion to the simulation models. For this purpose, strut member specimens with different diameter values are fabricated using the material extrusion technique. The specimens are examined by a digital light microscope and the measurements are done for the fabricated diameter variations. These variations are characterized using the random field method which is commonly used for modeling the spatially dependent variations. These variations modeled by the random field method are integrated into the finite element models by using voxel elements. The results of the finite element analysis that includes the fabricated specimen models with spatial variations are compared with the tensile test results obtained for the fabricated strut specimens. The developed model can be extended to different additive manufacturing techniques and the variations observed in the fabricated geometry and material properties can be characterized.

Keywords: Additive Manufacturing, Material Extrusion, Lattice Structure, Finite Element Method, Random Field.

KAYNAKÇA

1. Cahill, S., Lohfeld, S., and McHugh, P. E., 2009, "Finite Element Predictions Compared to Experimental Results for the Effective Modulus of Bone Tissue Engineering Scaffolds Fabricated by Selective Laser Sintering," J. Mater. Sci. Mater. Med., **20**(6), pp. 1255–1262.
2. Gümrük, R., and Mines, R. A. W., 2013, "Compressive Behaviour of Stainless Steel

- Micro-Lattice Structures,” *Int. J. Mech. Sci.*, **68**, pp. 125–139.
3. Qiu, C., Yue, S., Adkins, N. J. E., Ward, M., Hassanin, H., Lee, P. D., Withers, P. J., and Attallah, M. M., 2015, “Influence of Processing Conditions on Strut Structure and Compressive Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting,” *Mater. Sci. Eng. A*, **628**, pp. 188–197.
 4. Karamooz Ravari, M. R., Kadkhodaei, M., Badrossamay, M., and Rezaei, R., 2014, “Numerical Investigation on Mechanical Properties of Cellular Lattice Structures Fabricated by Fused Deposition Modeling,” *Int. J. Mech. Sci.*, **88**, pp. 154–161.
 5. Gorguluarslan, R. M., Choi, S. K., and Saldana, C. J., 2017, “Uncertainty Quantification and Validation of 3D Lattice Scaffolds for Computer-Aided Biomedical Applications,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **71**, pp. 428–440.
 6. Melancon, D., Bagheri, Z. S., Johnston, R. B., Liu, L., Tanzer, M., and Pasini, D., 2017, “Mechanical Characterization of Structurally Porous Biomaterials Built via Additive Manufacturing: Experiments, Predictive Models, and Design Maps for Load-Bearing Bone Replacement Implants,” *Acta Biomater.*, **63**, pp. 350–368.
 7. Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., Wang, P., and Fang, D., 2019, “Evaluation of Compressive Properties of SLM-Fabricated Multi-Layer Lattice Structures by Experimental Test and μ -CT-Based Finite Element Analysis,” *Mater. Des.*, **169**.
 8. Gungor, O. U., and Gorguluarslan, R. M., 2020, “Experimental Characterization of Spatial Variability for Random Field Modeling on Struts of Additively Manufactured Lattice Structures,” *Addit. Manuf.*, **36**.
 9. Devore, J. L., 1991, “Probability and Statistics for Engineering and the Sciences,” *Biometrics*, **47**(4), p. 1638.
 10. [10] Wang, Y., Li, S., Yu, Y., Xin, Y., Zhang, X., Zhang, Q., and Wang, S., 2020, “Lattice Structure Design Optimization Coupling Anisotropy and Constraints of Additive Manufacturing,” *Mater. Des.*, **196**, p. 109089.
 11. Persenot, T., Burr, A., Martin, G., ... J. B.-I. J. of, and 2019, undefined, “Effect of Build Orientation on the Fatigue Properties of As-Built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V Alloy,” Elsevier.
 12. Choi, S. K., Canfield, R. A., and Grandhi, R. V., 2007, *Reliability-Based Structural Design*.
 13. Jiang, P., Rifat, M., and Basu, S., 2020, “Impact of Surface Roughness and Porosity on Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing- A Computational Study,” *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., pp. 781–789.
 14. Kim, N., Yang, C., Lee, H., and Aluru, N. R., 2019, “Spatial Uncertainty Modeling for Surface Roughness of Additively Manufactured Microstructures via Image Segmentation,” *Appl. Sci.*, **9**(6), p. 1093.
 15. Ghanem, R. G., and Spanos, P. D., 1991, *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*.
 16. Sriramula, S., and Chryssanthopoulos, M. K., 2013, “An Experimental Characterisation of Spatial Variability in GFRP Composite Panels,” *Struct. Saf.*, **42**, pp. 1–11.
 17. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., and Reinsel, G. C., 2013, *Time Series Analysis: Forecasting and Control: Fourth Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, NJ.
 18. Gungor, O. U., and Gorguluarslan, R. M., 2020, “Experimental Characterization of Spatial Variability for Random Field Modeling on Struts of Additively Manufactured Lattice Structures,” *Addit. Manuf.*, **36**, p. 101471.
 19. Ghanem, R. G., and Spanos, P. D., 1991, “Spectral Stochastic Finite-Element Formulation for Reliability Analysis,” *J. Eng. Mech.*, **117**(10), pp. 2351–2372.
 20. Sudret, B., California, A. D. K.-U. of, Berkeley, U., and 2000, U., “Stochastic Finite Elements and Reliability: A State-of-the-Art Report.”
 21. Gorguluarslan, R. M., Park, S.-I., Rosen, D. W., and Choi, S.-K., 2015, “A Multilevel Upscaling Method for Material Characterization of Additively Manufactured Part under Uncertainties,” *J. Mech. Des.*, **11**, p. 111408.
 22. Park, S. in, Watanabe, N., and Rosen, D. W., 2018, “Estimating Failure of Material Extrusion Truss Structures Based on Deposition Modeling and a Cohesive Zone Model,” *Mater. Des.*, **147**, pp. 122–133.

YAYIN İLKELERİ

Amaç

1. Makina tasarım ve imalatı alanında yerli teknoloji üretimine yönelik kuramsal ve uygulamalı çalışmalarını duyurmak.
2. Bu alanda çalışan kişi ve kuruluşlar arasında bilgi alışverişini sağlamak.
3. Yayınlanan 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 karşılaşırlarsa 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 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 "l" (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 eşitliğin 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 düzenlemeden 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.