

Açık hücreli metal köpüklerde hücre sayısının ve anizotropinin enerji absorbe etme verimliliği üzerine etkisi

Effects of the cell number and anisotropy in the open cell metal foams on the energy absorption efficiency

Ali Can KAYA^{1*} 

¹Mekatronik Sistemler Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Türk-Alman Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
alican.kaya@tau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.03.2019, Kabul Tarihi/Accepted: 21.06.2019

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.53810

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Açık hücreli metal köpükler hücresel yapısı sayesinde hem hafif malzeme olarak kullanılabilir hem de darbe enerjisini etkin bir şekilde sönmüleyebilir. Bu çalışmada 30 ve 45 ppi (inç başına gözenek sayısı) metal köpük içerisinde bulunan hücre sayısının ve anizotropinin enerji sönmüleme verimi üzerine etkisi kuazi-statik basma deneyleriyle araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre aynı boyuttaki köpüklerde hücre sayısının azalmasıyla mukavemet düşmektedir. Fakat enerji sönmüleme verimliliği hücre sayısının azalmasıyla yükselmektedir. Bunun sebebi hücre boşlukları hücre büyüklüğünün artmasıyla artar böylece hücreler daha az sertleşmeyle deforme olmaktadır. Metal köpüğün yüklenme doğrultusunun enerji sönmüleme verimliliği üzerine etkisi bulunamamıştır. Küboid köpük parçaların küp şeklindeki parçalara nazaran daha yüksek mukavemet gösterdiği bulunmuştur bu da deformasyon konsantrasyonu ile açıklanabilir.

Anahtar kelimeler: Metal köpükler, Basma deneyi, Verimlilik, Sertleştirme

Abstract

By means of cellular structure, open cell metal foams can be used as a light-weight material, and they can absorb impact energy effectively. In this study, effects of cell number and anisotropy in 30 and 45 ppi (pores per inch) foams on the energy absorption efficiency are investigated by quasi-static compression tests. According to current study, strength of foams decreases with lowering the number of cells for the same foam dimensions. However, energy absorption efficiency increases with decreasing number of cells. The reason for this is the enlarging of cell voids with increasing cell size; therefore, cells deform with less hardening. Effects of loading direction of metal foams on the energy absorption efficiency could not be found. It was observed that the cuboid foam samples exhibited larger strength as compared to the cubic foam samples, and this could be expressed by deformation concentrations.

Keywords: Metal foams, Compression testing, Efficiency, Hardening

1 Giriş

Açık hücreli köpükler küçük boyuttaki kırıların birbirleriyle bağlanmasıyla oluşan bir ağıdır [1]. Bu yapısı sayesinde her türlü metal köpük suyun yoğunluğundan daha düşük bir yoğunluğa sahip olabilir. Birçok metalden üretilebilen bu yapılar, üretim yöntemine göre farklılıklar gösterebilir. Açık hücreli metal köpükler hem hafiftir; hem de sabit gerilmeye oluşan hücre deformasyonları sayesinde (plato rejimi) çarpma enerjisini yüksek verimle absorbe etme özelliğine sahiptir [2], [3]. Gözenekli yapısı sayesinde mekanik özellikleri kütle malzemelerden farklı olarak birçok parametreye bağlıdır. Bunlar; yoğunluk, hücre büyüklüğü, katı malzemenin mekanik özellikleri, kırış boyu ve malzemede bulunan üretim hatalarıdır [1].

Metal köpüklerde mekanik özellikler ve metal duvar arasındaki korelasyon Gibson-Ashby kuralı ile açıklanır. Buna göre Gibson-Ashby kuralı [1]:

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_y} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2} \quad (1)$$

Burada, σ_{pl} , köpük mukavemeti, σ_y , metalin akma mukavemeti, ρ_s , metal in yoğunluğu, ρ , köpük yoğunluğu ve C_1 , köpüğün geometrik fonksiyonudur. Mangipudi ve diğ. [4]'e göre Gibson-Ashby kuralındaki köpük geometri fonksiyonu hücre şekline, anizotropiye ve hücrelerin büyüklük dağılımlarına bağlıdır. Andrews ve diğ. [5] hücrelerin büyüklük dağılımlarının metal

köpüğün her uzunluğunda bulunan hücre sayısı ile ilişkili olduğunu belirtmiştir ve hücre sayısının etkisi olarak tanımlamıştır. Genel olarak, uzunluğun hücre büyüklüğüne oranı eğer 8'den küçükse mekanik özelliklerde ciddi bir azalma görülmüştür. Onck ve diğ. [6] hücre sayısının etkisine iki neden göstermiştir; birincisi genişliğin azalması ile kenarlarda yük taşımayan hücrelerin alan fraksiyonlarının artmasıdır. Örneğin bu durumda parça kenarında bulunan iki yarım hücrenin büyüklüğünün uzunluğa oranı parçanın uzunluğunun azalmasıyla büyük olacaktır. Sonuç olarak köpük daha az yük taşıyabilecek ve mukavemeti düşecektir. İkinci bir husus ise, kırıların serbest yüzeydeki rotasyonları dikey bükülmeleri arttırmaktadır. Böylece köpüğün relatif modülü azalacaktır. Mangipudi ve diğ. [4] nanogözenek Au için hücre sayısının etkisinin hücre morfolojisinden daha çok hücre topolojisine bağlı olduğunu göstermiştir. Bunun yanında metal köpüklerin makroskopik mukavemetlerinin bu ölçeklendirilmiş tür yoğunluğu ile lineer şekilde değişmekte olduğu bulunmuştur. Fakat literatürde sertleştirilme oranı çok yüksek olan çelik köpüklerde hücre sayısının etkisi ve oyuk kırışlardan oluşan hücrenin morfolojisinin etkisi incelenmemiştir.

Anizotropi ise köpüklerin yüklenme doğrultusuna bağımlı olmasından kaynaklanmaktadır [7]. Buna göre, poliüretan köpüklerde hücre uzama doğrultusuna dik yapılan yüklemelerde köpük mukavemetinde ve eğrilmezliğinde büyük bir artış görülmüştür. Gibson ve Ashby [1] hücrede kısa olan kırıların eğilme esnasında daha fazla yük taşıyabileceğini kübik model yardımıyla göstermişlerdir. Bunun yanında, hücre

uzama doğrultusunda yapılan yüklemde kirişler eğilmeyle deforme olurken, hücre uzama doğrultusuna dik şekilde yapılan yüklemelerde kirişler aksel deformasyona uğramıştır [7]. Fakat yüklem doğrultusunun enerji absorbe etme verimliliği üzerine etkisi bilinmemektedir.

Metal köpüklerin enerji absorbe etme özellikleri darbe sönümlenme uygulamaları için önemli bir ölçüm parametresidir. Enerji absorbe kapasitesi gerinim ε 'ye kadar hacim başına (U_v) veya kütle başına (U_m) yapılan iş kadardır. Hacim başına yapılan iş gerilme-gerinim eğrisi altında kalan alandır [8]:

$$U_v(\varepsilon_d) = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

Burada, ε_d , sıkılaştırma gerinimi, $\sigma(\varepsilon)$, ε gerinimdeki gerilme miktarıdır. Kütle başına yapılan iş ise:

$$U_m(\varepsilon_d) = \frac{U_v(\varepsilon_d)}{\rho} \quad (3)$$

Burada, ρ , köpük yoğunluğu ve $U_v(\varepsilon_d)$, ise hacim başına yapılan iştir. Bu iki bağıntı metal köpüklerin enerji absorbe etme kapasitesini tanımlamaktadır.

Enerji absorbe etme verimliliği, η , ise:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\sigma_{max(\varepsilon)} \varepsilon} \quad (4)$$

Burada, paydaki terim, $\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$, ε gerinimine kadar absorbe edilmiş gerçek enerji miktarını tanımlarken, paydadaki terim, $\sigma_{max(\varepsilon)} \varepsilon$, ideal emicilerin absorbe edilebileceği maksimum enerji miktarını tanımlar. İdeal emicilerde plato gerilmesi sabit ve verimliliği %100 olarak kabul edilir [1]. İdeal emicilerin absorbe edebileceği enerji miktarı bu sabit plato gerilme eğrisi altında kalan alan kadardır. $\sigma_{max(\varepsilon)}$ ise ε gerinimine kadar oluşan maksimum gerilmeyi belirtir. Enerji absorbe etme verimliliği gerilme-gerinim eğrisinin şekline bağlıdır. Bunun yanında, Fischer [9] saf Al köpüklerde plato rejimindeki eğimin köpük yoğunluğu ile lineer şekilde değiştiğini öne sürmüştür ve bunun da enerji absorbe etme verimliliğini etkilediğini belirtmiştir. Bir önceki çalışmada [8], 316L ve 310 östenitik çelik köpüklerin enerji absorbe etme verimlilikleri karşılaştırılmış ve 310 çelik köpüklerin verimlilik-gerinim eğrilerinde artış görülürken, 316L çelik köpüklerde azalma görülmüştür. Bu sonuç 310 çelik köpüklerde kırılma fazlarının bulunması ve mikrogözenek miktarının ve boyutunun daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü 310 çelik köpüklerde plato rejimindeki sertleştirilmenin daha az olduğu görülmüştür. Bir başka çalışmada 316L köpük kirişlerinin mikroyapısının ve geometrisinin deformasyona olan etkisi, köpük içerisinden çıkartılmış mikrometre boyutundaki kirişlerin μ CT (mikro hesaplamalı tomografi) ile bütünleştirilerek çekme testinin yapılması sayesinde, 3 boyutlu olarak karakterize edilmiştir [10]. Ayrıca, tomografi verilerinin sonlu elemanlar yazılımına aktarılmasıyla gerçeğe yakın bir geometri ve mikroyapı modellenmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak sayısal çözüm doğrulanmıştır. Buna göre oyuk kirişler mikroyapı içerisinde bulunan mikrogözenek üzerinde kırılmış ve oluşan çatlağın ilerlemesi yine mikroyapı içerisinde bulunan sinterlenmemiş toz taneciği tarafından durdurularak yönü değiştirilmiştir. Diğer bir çalışmada [11] 316L çeliklerde hücre deformasyonları 30 ve 45 ppi köpüklerde araştırılmış ve kirişlerde ve hücre pencerelerinde bulunan hataların deformasyona olan etkileri incelenmiştir. Buna göre hücre

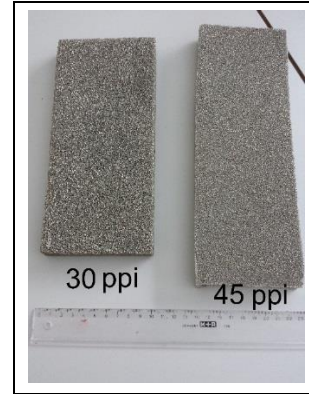
pencerelerinin üretim hatasından dolayı kapanması hücrenin yüzünün germeyle deforme olmasına sebep olmuştur ve bu mukavemeti arttırmaktadır. Diğer bir taraftan kirişlerin eğilme yoluyla deforme olduğu gösterilmiştir. Fakat 316L açık hücreli köpüklerde hücre sayısının etkisinin ve anizotropinin mekanik özelliklere olan etkisi henüz çalışılmamıştır.

Genel olarak, literatürde açık hücreli alüminyum dökme köpüklerin hücre sayısının etkisi ve anizotropisi kabaca incelenmiştir. Hücre sayısının etkisinin ve anizotropinin darbe sönümlenme verimliliği üzerine etkisi incelenmiş ve 316L gibi sertleştirme miktarı oldukça fazla olan östenitik çelik köpüklerde hücre sayısının etkisi ve anizotropinin mekanik özelliklere olan etkisi bilinmemektedir.

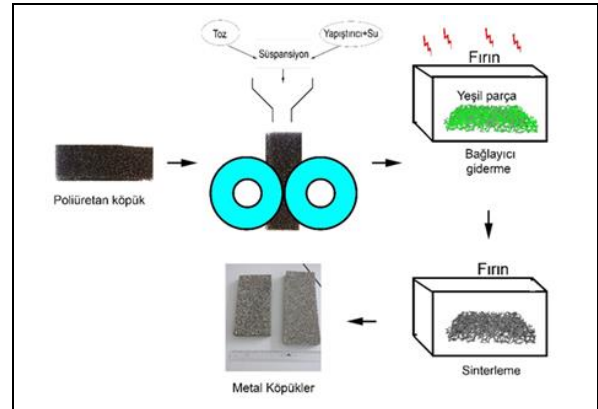
Bu çalışmada toz metalurjisi ile üretilmiş 316L açık hücreli çelik köpüklerin hücre sayısının etkisinin ve anizotropinin mekanik özelliklere ve gerinim-gerilme eğrisi üzerine olan etkisi araştırılmış ve enerji absorbe etme verimliliği değerlendirilmiştir.

2 Malzeme ve metot

30 ve 45 ppi'lik (inç başına gözenek sayısı) açık hücreli 316L çelik köpükler Hollomet (Dresden, Almanya) firmasından satın alınmıştır (Şekil 1). Üretimi kabaca şu şekildedir (Şekil 2) [11]. İlk önce su, organik yapıştırıcı ve metal tozlarıyla bir karışım hazırlanmıştır. Bu poliüretan şablonu hazırlanan karışım ile silindirler yardımıyla kaplanmıştır. Karışımla kaplanmış poliüretan şablon kompoziti kurutulduktan sonra 723 K derecede nitrojen gazı altında bir saat süreyle ısıtılmış ve poliüretan ve organik yapıştırıcı kompozitten uzaklaştırılarak yalnız çelik bırakılmıştır. Ve son olarak hidrojen gazı altında 1523 K derecede 1 sa. süreyle sinterleme gerçekleştirilerek fırında soğumaya bırakılmıştır.



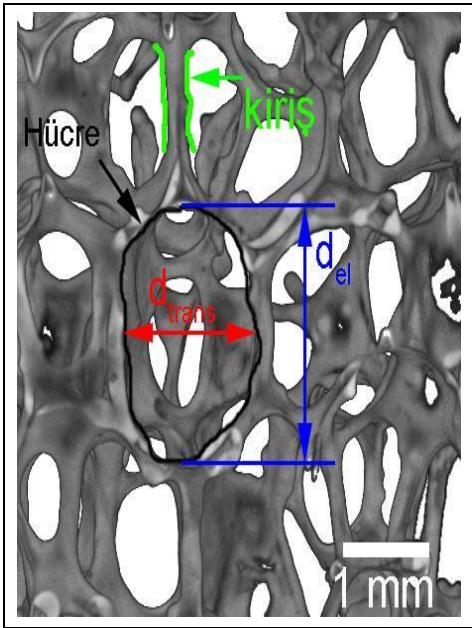
Şekil 1: 30 ve 45 ppi açık hücreli çelik köpükler.



Şekil 2: Açık hücreli çelik köpüklerin üretim aşamaları.

2.1 Makroskopik analiz

Metal köpüklerin yoğunlukları; parçaların boyutları kumpas, kütleleri de terazi yardımıyla ölçülerek hesaplanmıştır. Köpüklerin makroskopik yapıları tarama mikroskobu (SEM; CamScan REM Serie 2, Obducat, Lund, Sweden) ikincil elektron modunda 20 kV'lık hızlandırma voltajında ve μ CT (6.22 μ m çözünürlüğünde, 100 keV) (Xtek XT H 320LC, Metris, Leuven, Belgium) kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3'te hücre, kiriş ve hücrenin boyutları gösterilmiştir. Hücrenin anizotropik olmasından dolayı hücre uzama eksenini (d_{el}), enine boyutu (d_{trans}) CT verilerinden ölçülmüştür ve ortalama hücre boyutu (d_{avg}) iki boyutun ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca iki boyut kullanılarak anizotropik faktör ($\lambda=d_{el}/d_{trans}$) bulunmuştur.



Şekil 3: Köpüğün makroskopik yapısı, hücre ve hücreyi oluşturan kirişler resimde oklarla gösterilmiştir. (Hücre uzama ekseninin büyüklüğü (d_{el}) ve enine boyutu (d_{trans}) şekilde belirtilmiştir).

2.2 Basma deneyi

Basma deneyleri Kamrath und Weiss (Kamrath & Weiss, Düsseldorf, Germany) mikro çekme basma deney düzeneği yardımıyla, 5 μ m/sec basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. 10 kN'luk yük hücresi 1 N'luk çözünürlükle kullanılmıştır. Uzama ölçüm çözünürlüğü yaklaşık olarak 1.2 μ m'dir. Parça boyutları ve test edilen parça sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir. Deneylerde yükleme Tablo 1'de belirtildiği gibi hücre uzama eksenine dik veya paralel olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her parça sürtünmeyi önlemek için önceden cilalanmış iki silindir arasına yerleştirilmiştir. Köpüklerin in-situ testleri dijital mikroskop (DM; Keyence-100 vhx, Neu-Isenburg, Germany) altında gerçekleştirilmiştir. Basma deneyi sırasında parçaların yüzeyleri dijital mikroskopla görüntülenmiş ve her 15 sn. resimler alınmıştır.

2.3 Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Matz ve diğ. [12] çalışmalarında metal köpüklerin elastik özelliklerinin ölçümünde ilk yükleme esnasında oluşan plastik deformasyonlardan dolayı tam elastik bir değer ölçülememektedir. Bundan dolayı ilk yükleme eğrisine kuazi elastik eğri denilir. Köpüklerin mukavemeti farklı metotlar ile

belirlenebilir. Bu çalışmada %2 gerinimde kuazi elastik rejime paralel çizilerek gerilme-gerinim eğrisi ile kesiştiği nokta Kaya ve Fleck'in [11] çalışmasında olduğu gibi köpük mukavemeti (σ_{pl}) olarak ölçülmüştür. Sıkılaştırma gerinimi ise %20-30 gerinimde bir paralel çizgi çizilerek, sıkılaştırma eğrisine paralel olan bir başka eğriyle kesişme noktası olarak alınmıştır [11]. Enerji absorbe etme verimliliği (4) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

Tablo 1: Deneylerde kullanılan numunelerin fiziksel özellikleri.

Gözenek yoğunluğu	Boyutu (mmxmmxmm)	Sayısı (n)	Şekil	Yükleme doğrultusu (hücre uzama eksenine)
30 ppi	12x12x20 (⊥)	3	kuboid	dik
45 ppi	10x10x10 (⊥)	4	küp	dik
	12x12x20 (⊥)	3	kuboid	dik
	20x20x20 (⊥)	3	küp	dik
	20x20x20 (//)	3	küp	paralel

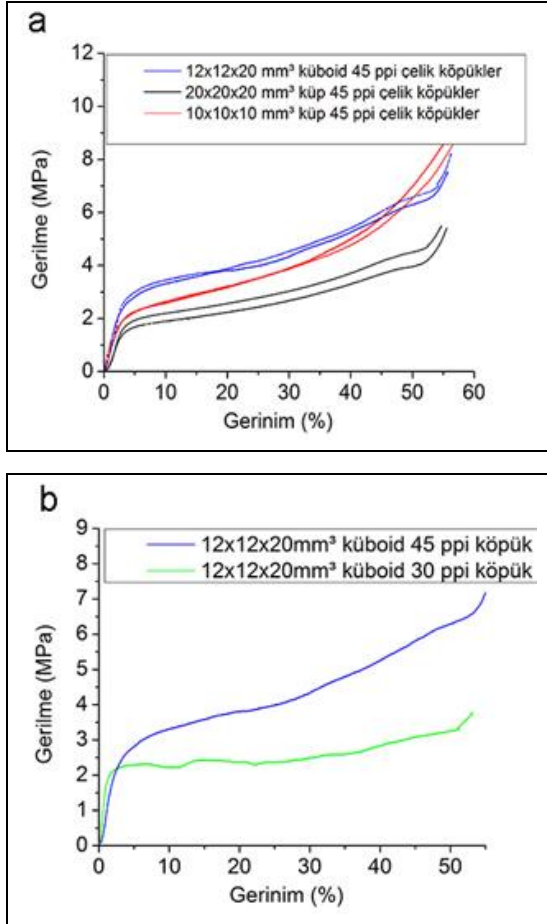
3 Sonuçlar ve tartışmalar

Açık hücreli metal köpükler poliüretan şablonun şeklini aldığından, hücrelerin geometrileri poliüretan köpüklerdeki gibi düzenli olmayan çokyüzlü geometriye sahip 14 poligon hücre penceresinden veya fasetten oluşmaktadır [13]. Hücrelerin boyutları ve anizotropik faktör Tablo 2'de sunulmaktadır. Anizotropik faktör hücre boyutu ile doğru orantılıdır ve hücre büyüklüğünün azalmasıyla anizotropik faktör de azalmaktadır (Tablo 2 ve [11],[13]). Bu da hücrenin boyutunun küçülmesi ile birlikte köpüklerin anizotropik etkisinin azalacağı anlamına gelmektedir. CT verilerinden ölçülmüş değerler 2 boyutlu resimlerden ölçülmüş değerlerle büyük oranda örtüşmektedir [11]. Dökme alüminyum açık hücreli köpüklerin (1.18-1.27) değerlerine [14] nazaran açık hücreli çelik köpüklerde anizotropik değerler daha fazladır. Bunun sebebi ise üretim yönteminin farklılığından kaynaklanabilir [11]. Toz metalürjisi üretiminde, poliüretan şablonun üzeri kaplanırken, dökümde poliüretan şablonun kalıp içerisinde oluşturmuş olduğu boşluklar metal eriyik tarafından doldurulur. Böylece oluşan kirişler arasında boyut ve geometri farklılıkları oluşabilir. Kirişlerin geometrileri ve boyutları açık hücreli metal köpüklerin mekanik özelliklerine büyük etki göstermektedir [10]. Açık hücreli metal köpüklerin deformasyonu kirişlerin eğilmesiyle oluştuğu için, kirişlerin kesitlerinin eğilme direncine etkisi büyüktür. Çünkü kesit geometrilerinin değişmesiyle kirişlerin atalet momentleri değişmektedir. Bir diğer önemli faktör ise kirişlerin boyutlarıdır. Uzunluk ve kalınlıklarının küçülmesiyle birlikte kirişlerde oluşacak gerilme gradyanı nötr merkezinden kenara ani bir şekilde artacaktır ve bu da mukavemeti arttıracaktır [15]. Literatürlerde farklı üretim yöntemleriyle üretilen köpüklerin mekanik özelliklerindeki farklılıklar genellikle bağlı yoğunluğa ($\frac{\rho}{\rho_s}$) veya üretim hatalarına ve kusurlara dayandırılmaktadır [16],[17]. Metal köpüklerin tipik gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Kuazi elastik ilk yükleme eğrisinden sonra sertleştirilme platosu yaklaşık olarak %5-50 gerinim boyunca devam etmektedir. Bu plato rejiminden sonra ise sıkılaştırma denilen hücrelerin tamamen çökmesi sonucu ani gerilme artışı oluşur. Farklı boyutlardaki 45 ppi'lik açık hücreli metal köpüklerin eğrilerinde görüldüğü gibi şekil açısından farklılık yoktur (Şekil 4a). Fakat aynı boyuttaki ama farklı gözenek yoğunluğundaki gerinim-gerilme eğrilerinde büyük bir değişme görülmüştür (Şekil 4b).

Tablo 2: Köpüklerin makroskopik özellikleri.

Gözenek yoğunluğu	Ortalama köpük yoğunluğu (g/cm ³)	Hücre uzama eksen büyüklüğü (d _{el}) (mm)	Hücresinin enine büyüklüğü (d _{trans}) (mm)	Hücresinin ortalama büyüklüğü (d _{avg}) (mm)	Anizotropik faktör, λ
30 ppi	0.58±0.03	2.11±0.12	1.54±0.13	1.83±0.08	1.37±0.14
45 ppi	0.68±0.06	0.88±0.07	0.72±0.12	0.80±0.05	1.23±0.12

±: Standart sapmayı belirtir.

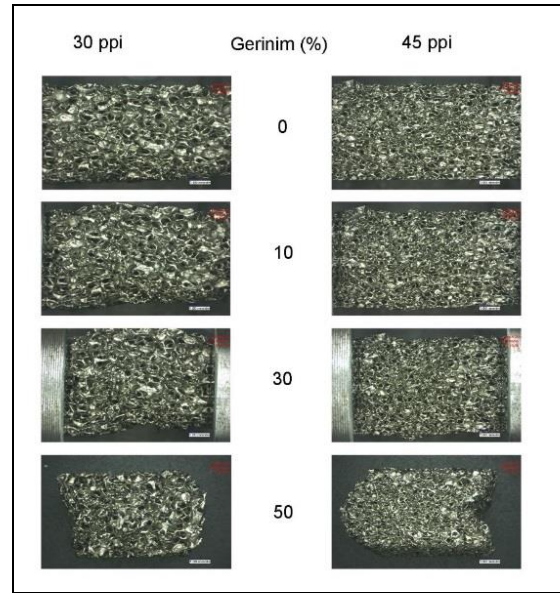


Şekil 4: (a): Farklı boyuttaki 45 ppi metal köpüklerin gerilme-gerinim eğrileri. (b): 12x12x20 mm³'lük 30 ve 45 ppi'lik parçanın gerilme-gerinim eğrileri.

45 ppi'lik çelik köpükte plato rejimde büyük oranda sertleştirilme görülürken, 30 ppi'lik köpükte ise plato rejimde daha az sertleştirilme görülmüştür ve gerilme yaklaşık olarak sabit sürmektedir. Bunun nedeni iki farklı numunedeki hücre sayılarındaki farklılıktır. 45 ppi'lik köpükte hücre sayısı daha fazladır ve deformasyon esnasında hücrelerde daha fazla katı olması veya daha az boşluk olması sebebiyle metalin plastik deformasyon sonucu daha fazla sertleştirilme görülmektedir (Şekil 5).

30 ppi'lik köpüklerde ise hücre boşluklarının daha fazla olması nedeniyle plastik deformasyon sonucu sıkışan ve sertleşen metal oranı daha azdır ve bu yüzden plato rejimi daha sabit bir gerilmede gerçekleşmiştir. Literatürlerde genellikle açık hücreli çeliklerde sertleştirilme oranı metal köpüğün yoğunluğu ve mikroyapı ile ilişkilendirilmiştir [18]-[20]. 316 çelik köpüklerde yoğunluğun artmasıyla plastik deformasyonun arttığı ve bunun da martensitik faz dönüşümüne sebep olduğu ve sertleştirilme oranını arttırdığı belirtilmiştir. İnce taneli F55 süper dubleks paslanmaz çelikler

316L çelik köpüklere nazaran daha fazla sertleştirilme oranı göstermiştir [20]. Frömert ve diğ. [20] martensitik faz dönüşümünün sertleşmeye katkısının sanılan kadar fazla olmadığını ve mikroyapının daha fazla önem taşıdığını belirtmiştir. Bunun yanında açık hücreli dökme demir köpüklerde açık bir plato bölgesi oluşmamıştır [21].



Şekil 5: 12x12x20 mm³'lük 30 ve 45 ppi çelik köpüklerin % 0, 10, 30 ve 50 gerinimde basma deformasyonu.

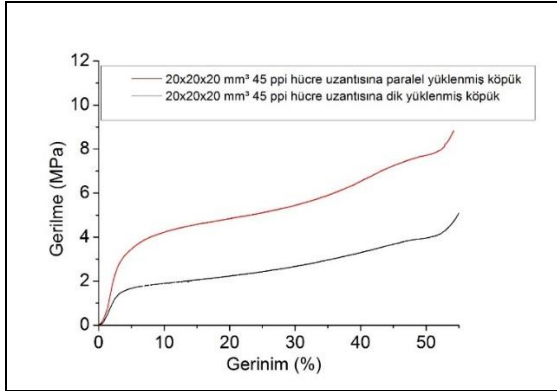
Ölçülen mekanik özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Hücre sayısının azalmasıyla mukavemette de azalma görülmüştür. Brezny ve Green [22] benzer bir ilişkiyi hücre sayısı ile basma mukavemeti arasında polimer köpükler için bulmuştur. Fakat polimer köpüklerde sertleştirilme oluşmadığı için hücre sayısının sertleştirilme üzerine etkisi incelenmemiştir. Tablo 3'te yaklaşık olarak aynı yoğunluğa sahip olmasına rağmen kuboid şeklindeki parçaların (12x12x20 mm³ boyutundaki parçalar) mukavemeti küp şeklindeki parçalara (10x10x10 ve 20x20x20 mm³ boyutundaki parçalar) göre daha yüksek ölçülmüştür. Kuboid şeklindeki parçalarda kuvvet dağılımları küp şeklindeki parçalara nazaran daha heterojen şekilde olabilir bu da mukavemet artışına sebep olabilmektedir. Literatürde daha iyi köpük performansı için prizmatik veya silindirik parçaların test edilmesi önerilmiştir [1], fakat parça şekillerinin mukavemete olan etkisi belirtilmemiştir. Seeber ve diğ. [23] alümina köpükleri farklı şekillerde test etmiş ve sonuç olarak deformasyonlarında farklılıklar bulmuştur. Buradaki çıkarıma uygun düşmektedir.

Parçaların hücre uzama eksenine paralel olarak basılmasıyla mukavemette ve enerji absorbe etme verimliliğinde, parçaların uzama eksenine dik olarak yüklenmesiyle karşılaştırıldığında, herhangi bir değişim görülmemiştir. Çünkü anizotropi gerilme-gerinim eğrisinin şeklini değiştirmemiştir (Şekil 6) ve sonuç olarak platodaki sertleştirilmede de büyük bir değişim olmamıştır.

Tablo 3: Köpüklerin mekanik özellikleri.

Parça boyutu (mmxmmxmm)	Gözenek yoğunluğu	Hücre sayısı (txmxh)	Ortalama köpük mukavemeti (σ_{pl}), MPa	Ortalama sıkılaştırma gerinimi (%), ϵ_d	Enerji absorbe etme verimliliği (%5-50 gerinim aralığında), η
10x10x10 (\perp)	45 ppi	12x12x12	1.87±0.36	46±1.9	-
12x12x20 (\perp)	30 ppi	6x6x10	2.45±0.18	50.1±1.6	0.83±0.05
12x12x20 (\perp)	45 ppi	15x15x25	2.86±0.14	53.1±0.4	0.74±0.01
20x20x20 (\perp)	45 ppi	25x25x25	1.92±0.48	51.7±0.7	0.70±0.02
20x20x20 (//)	45 ppi	25x25x25	3.17±1.51	51.3±1.7	0.70±0.02

±: Standart sapmayı belirtir, yükleme hücre uzama eksenine (//) paralel ve (\perp) diktir.



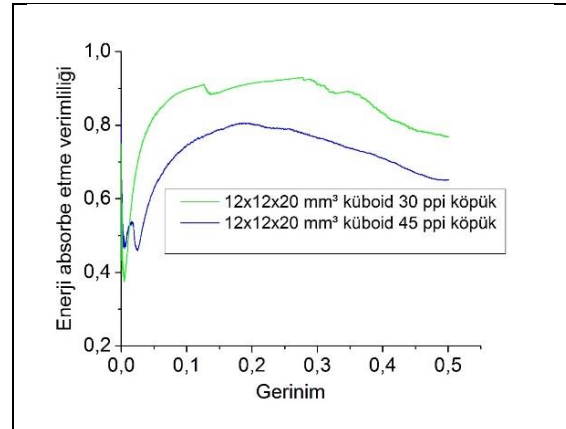
Şekil 6: 20x20x20 mm³'lük çelik köpüklerin hücre uzantısına paralel ve dik olarak yüklenmesi sonucu oluşan gerilme-gerinim eğrileri.

Literatürde anizotropinin enerji absorbe etme verimliliğine etkisi bilinmemektedir. Mukavemette oldukça yüksek bir dağılıma görülmüştür. Benzer şekilde küp şeklindeki diğer parçalarda da mekanik özelliklerdeki dağılım oldukça fazladır. Mekanik özelliklerdeki dağılımın sebebi genellikle parça içerisindeki kusurlardır [10]. Ortalama sıkılaştırma gerinimi her bir şekil ve gözenek yoğunluğu için yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Bunun nedeni aynı alaşım ve yaklaşık olarak aynı yoğunluğa sahip olmalarıdır.

Enerji absorbe etme verimliliği metal köpüklerin en dikkat edilmesi gereken özelliğidir. Çünkü bu faktör metal köpüğün darbe enerjisinin ne kadarını absorbe ettiği ve insana veya yolcuya iletilmediğinin göstergesidir [24]. Enerji absorbe etme kapasitesi metalin sertleştirilmesi ve köpüğün yoğunluğu ile direkt ilişkilidir. Enerji absorbe etme kapasitesi gerilme-gerinim eğrisi altındaki alanın ölçülmesiyle bulunur ve mukavemetin ve sertleştirilmenin artması ile absorbe kapasitesi artar [25],[26]. Fakat enerji absorbe etme verimliliği ise gerilme-gerinim eğrisinin şekline bağlıdır [24]. Fischer [9] köpük yoğunluğu ile metal köpüğün sertleştirilmesi arasında doğrudan ilişkiler kurmuştur, fakat Mangipudi ve diğ. [27]'e göre köpüklerdeki sertleştirilme ve sonuç olarak şekil değişikliği birçok parametreye bağlıdır. Bunlar metalin akma mukavemeti, köpük yoğunluğu, metalin sertleştirilme katsayısı ve köpüğün geometrik sertleştirilmesidir. Fakat literatürde hücre sayısının enerji absorbe etme verimliliğine etkisinden bahsedilmemiştir.

Bu çalışmada sertleştirilme oranı hücre sayısı daha az olan 30 ppi'lik köpük numunelerinde 45 ppi'lik parçalara göre daha fazladır. Şekil 7'te görüldüğü gibi 45 ppi'lik köpüğün verimi %10 gerinime kadar artarken %10 gerinimden sonra hızlı bir şekilde devamlı düşmüştür. Böylece platomdaki sertleştirilmeden dolayı verim azalmıştır. 30 ppi'de ise %10'a

kadar verim artışı olmuş ve bunu %10'dan %30'a kadar verimde hafif dalgalanmalar takip etmiştir.



Şekil 7: 12x12x20 mm³'lük çelik köpüğün enerji absorbe verimliliği-gerinim eğrileri.

Verim %30 gerinimden sonra hafif bir şekilde düşmeye başlamıştır. Farklı mikroyapıdaki köpüklerde enerji absorbe etme verimliliği sertleştirilmenin artmasıyla azalmıştır fakat ortalama enerji absorbe etme verimliliği değişmemiştir [9]. Bu çalışmada ise ortalama enerji absorbe etme verimliliğinde hücre sayısının etkisi nedeniyle değişim görülmüştür. Bu özellikle uygulamalar açısından önem taşımaktadır.

20x20x20 mm³'lük parçalarda verimlilik yaklaşık olarak 0.70 ölçülmüştür ve 12x12x20'lik küboid parçaların verimleriyle yaklaşık olarak aynıdır (Tablo 3). Bundan dolayı numune şeklinin enerji absorbe etme verimliliğine etkisi bulunamamıştır.

Sonuç olarak, metal köpüklerde hücre sayısı sadece mukavemete değil aynı zamanda gerilme-gerinim eğrisi şekline ve verimliliğine büyük bir etki göstermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada farklı şekilde ve hücre sayısı 316L açık hücreli çelik köpüklerin basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve metal köpüklerde hücre sayısı, köpük şekli ve anizotropik etkilerin enerji absorbe etme verimliliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak:

- Metal köpüğün enerji absorbe etme verimliliği hücre sayısının azalmasıyla artmıştır,
- Metal köpüklerin şekillerinin değişmesi mukavemetlerinde büyük oranda bir etkiye sebep olmuştur ve bu büyük ölçüde deformasyonun konsantrasyonundan kaynaklanmaktadır,

- Metal köpüklerin verimlilikleri gerilme-gerinim eğrisinin şekline bağlıdır. Sertleştirilmenin artmasıyla enerji absorbe etme verimliliği düşer. Numunenin şeklinin verimlilik üzerine bir etkisi yoktur,
- Metal köpüklerin sertleştirilmesi metal köpüğün şekline değil fakat hücre sayısının etkisine bağlıdır,
- Metal köpüğün yüklenme doğrultusunun enerji absorbe etme verimliliğine ve mukavemete büyük bir etkisi bulunmamıştır.

5 Kaynaklar

- [1] Gibson LJ, Ashby M. *Cellular Solids: Structure and Properties*. 2nd ed. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 1997.
- [2] Jung A, Wocker M, Chen Z, Seibert H. "Microtensile testing of open-cell metal foams-experimental setup, micromechanical properties". *Materials & Design* 88, 1021-1030, 2015.
- [3] Jung A, Lach E, Diebels S. "New hybrid foam materials for impact protection". *International Journal of Impact Engineering*, 64, 30-38, 2014.
- [4] Mangipudi KR, Epler E, Volkert CA. "Topology-dependent scaling laws for the stiffness and strength of nanoporous gold". *Acta Materialia*, 119, 115-122, 2016.
- [5] Andrews EW, Gioux G, Onck P, Gibson LJ. "Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results". *International Journal of Mechanical Science*, 43(3), 701-713, 2001.
- [6] Onck PR, Andrews EW, Gibson LJ. "Size effects in ductile cellular solids. Part I: modeling". *International Journal of Mechanical Science*, 43(3), 681-699, 2001.
- [7] Marvi-Mashhadia M, Lopesa CS, Lorca JL. "Effect of anisotropy on the mechanical properties of polyurethane foams: An experimental and numerical study". *Mechanical Materials*, 124, 143-154, 2018.
- [8] Kaya AC, Zaslansky P, Ipekoglu M, Fleck C. "Strain hardening reduces energy absorption efficiency of austenitic stainless steel foams while porosity does not". *Materials & Design*, 143, 297-308, 2018.
- [9] Fischer SF. "Energy absorption efficiency of open-cell pure aluminum foams". *Materials Letters*, 184, 208-210, 2016.
- [10] Kaya AC, Zaslansky P, Nikolaus A, Fleck C. "Tensile failure observations in sintered steel foam struts revealed by sub-micron contrast-enhanced microtomography". *Materials & Design*, 105, 190-200, 2016.
- [11] Kaya AC, Fleck C. "Deformation behavior of open-cell stainless steel foams". *Materials Science and Engineering A*, 615, 447-456, 2014.
- [12] Matz AM, Matz BS, Jost N, Eggeler G. "On the accumulation of irreversible plastic strain during compression loading of open-pores metallic foams". *Materials Science and Engineering A*, 728, 40-44, 2018.
- [13] Jang WY, Kyriakides S, Kraynik AM. "On the compressive strength of open-cell metal foams with Kelvin and random cell structures". *International Journal of Solids Structures*, 47 2872-2883, 2010.
- [14] Jang WY, Kyriakides S. "On the crushing of open-cell foams: Part I. Experiments". *International Journal of Solids Structures*, 46, 617-634, 2009.
- [15] Fleck N. A., Muller GM, Ashby MF, Hutchinson JW. "Strain gradient plasticity: Theory and experiment". *Acta Metallurgica et Materialia*, 42, 475-487, 1994.
- [16] Olurin OB, Fleck NA, Ashby MF. "Deformation and fracture of aluminium foams". *Materials Science and Engineering A*, 291, 136-146, 2000.
- [17] Andrews E, Sanders W, Gibson LJ. "Compressive and tensile behaviour of aluminum foams". *Materials Science and Engineering A*, 270, 113-124, 1999.
- [18] Mondal DP, Jain H, Das S, Jha AK. "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH₄HCO₃ as space holder". *Materials & Design*, 88, 430-437, 2015.
- [19] Jain H, Gupta G, Kumar R, Mondal DP. "Microstructure and compressive deformation behavior of ss foam made through evaporation of urea as space holder". *Materials Chemistry and Physics*, 223, 737-744, 2019.
- [20] Frömert J, Lott TG, Matz AM, Jost N. "Investment casting and mechanical properties of open-cell steel foams". *Advanced Engineering Materials*, 21, 1900396, 2019.
- [21] Kaya AC, Zaslansky P, Rack A, Fischer SF, Fleck C. "Foams of gray cast iron as efficient energy absorption structures: a feasibility study". *Advanced Engineering Materials*, 21, 1900080, 2019.
- [22] Brezny R, Green DJ. "The effect of cell size on the mechanical behavior of cellular materials". *Acta Metallurgica et Materialia*, 38, 2517-2526, 1990.
- [23] Seeber BSM, Gonzenbach UT, Gauckler LJ. "Mechanical properties of highly porous alumina foams". *Journal of Materials Research*, 28, 2281-2287, 2013.
- [24] Thornton PH, Magee CL. "Deformation of aluminum foams". *Metallurgical Transactions*, 6, 1253-1263, 1975.
- [25] Mondal DP, Jain H, Das S, Jha AK. "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH₄HCO₃ as space holder". *Materials & Design*, 88, 430-437, 2015.
- [26] Bekoz N, Oktay E. "The role of pore wall microstructure and micropores on the mechanical properties of Cu-Ni-Mo based steel foams". *Materials Science and Engineering A*, 612, 387-397, 2014.
- [27] Taherishargh M, Sulong MA, Belove IV, Murch GE, Fiedler T. "On the particle size effect in expanded perlite aluminum syntactic foam". *Materials and Design*, 66, 294-303, 2015.