



## GENLEŞTİRİLMİŞ CAM TAKVİYELİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Büşra ŞAHİN , <sup>2</sup>Ali GÖKŞENLİ 

<sup>1,2</sup>*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE*

<sup>1</sup>[busra.sahin@renault.com](mailto:busra.sahin@renault.com), <sup>2</sup>[goksenli@itu.edu.tr](mailto:goksenli@itu.edu.tr)

(Geliş/Received: 05.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.07.2020)

**ÖZ:** Bu çalışmada köpük metallerin geliştirilmiş bir şekli olan Sintaktik Köpük Metal (SKM) üretilmiş ve analiz edilmiştir. SKM’de yapı içindeki gözeneklilik, içi boş seramik küreler yardımıyla oluşturulmaktadır. SKM kapalı hücre yapısına sahiptir. SKM’lerin avantajları; hafiflik, yüksek basma dayanımı, titreşim sönümlenme ve enerji absorbe etme kabiliyetidir. Kompozit bir malzeme olan SKM’in üretiminde matris malzemesi olarak 7075 alüminyum, takviye malzemesi olarak da içi gözenekli yapıya sahip geliştirilmiş cam küre kullanılmıştır. Çalışmamızda SKM sıvı infiltrasyon yöntemi ile üretilmiştir. Bu üretim yönteminde kalıp ve küreler, 800 °C sıcaklıktaki fırında bekletildikten sonra fırından çıkarılmış ve kalıp boşluğuna cam küre ve ergimiş alüminyumun yerleştirilmesinden sonra 6,3 kPa’lık döküm basıncı uygulanmıştır. Üretilmiş olan SKM’lerin içyapısı analiz edilmiş, cam kürelerin yapı içinde homojen bir şekilde dağıldığı ve kürelerin kırılmadığı tespit edilmiştir. 25 mm çapında ve 30-33 mm yüksekliğe sahip silindirik SKM numunelerin yoğunluk değerleri Arşimed prensibi kullanılarak 1,33-1,68 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Gözeneklilik değerleri ise %53,3-57,2 olarak hesaplanmıştır. Mekanik testler için basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve SKM’lerde görülen tipik plato eğrileri tespit edilmiştir. Plato dayanım değerleri 22-42 MPa, darbe sönümlenme enerji değerlerinin ise 12-22 MJ/m<sup>3</sup> arasında olduğu görülmüştür. Bu değerler literatürde karşılaşılan verilerle uyumlu olduğu ve plato dayanım değeri ile enerji absorbe etme değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Sintaktik Köpük Metal, Genleştirilmiş cam küre, Alüminyum, İçyapı, Mekanik özellikler*

### Manufacturing of Expanded Glass Reinforced Syntactic Foam Metal and Investigation of Microstructure and Mechanical Properties

**ABSTRACT:** In this study Syntactic Foam Metals (SFM), which are a developed structure of foam metals, is manufactured and analyzed. SFM are materials with porous structure formed by using hollow ceramic spheres. SFM have a closed cell structure and is a kind of composite. As matrix metal 7075 aluminum and as reinforced material expanded glass is used. Advantages of SFM is lightness, high compression strength, vibration and shock absorbing characteristics. In this study as manufacturing method, liquid infiltration is used. By this method, the mold and spheres are heated in a furnace up to 800 °C. Later glass spheres and mold are taken out from the furnace, glass spheres and molten aluminum are placed inside the mold cavity and a casting pressure of 6,3 kPa is applied. Afterwards inner structure was analyzed and concluded that glass spheres were not broken and were homogenous dispersed inside the specimen. Archimed principle was used to determine the density of 25 mm diameter and 33 mm height cylindrical specimens. The density was 1,33-1,68 g/cm<sup>3</sup>. Porosity is calculated between 53,3-57,2%. Compression tests were performed to analyze mechanical performance and a typical plateau stress was observed as seen by different SFM’s. The plateau stress value was 22-42 MPa and shock absorbing energy 12-22 MJ/m<sup>3</sup>. These values are

accommodating with the values in the literature. Also linear relation was correlated between the plateau stress value and shock absorbing energy.

**Key Words:** *Syntactic Foam Metal, Expanded glass sphere, Aluminum, Microstructure, Mechanical properties*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hücreli Köpük metaller içi gözenekli yapıya sahip metelsel malzemelerdir ve içerdiği gözenekli yapının geometrisi ve şekli göz önüne alınarak farklı tanımlamalarda bulunmaktadır. Sünger veya gözenekli metallerde gözenekler düzensiz ve farklı geometrilere sahiptir. Hücreli ve köpük metallerde gözenekler benzer geometriye sahiptir [Banhart, 2000; Ozan ve diğ., 2011]. Metalik köpüklerle ilk çalışmalar 1948 yılında Sosnik tarafından ergimiş alüminyumun içinde cıvanın buharlaştırılması ile üretilmiştir [Yavuz, 2010]. Köpük metallerin avantajları; düşük yoğunluğa [Kenesei ve diğ., 2004; Zhu ve diğ., 2002], yüksek darbe [Kiratisaevve ve diğ., 2005; Yu ve diğ., 2008] ve titreşim sönümleme [Ramamurty ve diğ., 2004] karakterlerine, yüksek özgül rijitliğe, [Beigi ve diğ., 2013], düşük ısı ve elektrik iletim özelliklerine sahip olmasıdır. Günümüzde köpük metallerin kullanım alanları, sahip oldukları avantajlardan dolayı genişlemektedir [Bahnhard, 2001, Neikov, 2019, Fiedler ve diğ., 2020].

Köpük metaller iyapılarına göre açık ve kapalı hücre yapıları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Açık hücreli yapılar yapı içindeki gözenekler birbirleriyle bağlantılıdır, yani bir gözenekten diğerine geçiş mümkündür. Çok farklı gözenek boyutlarında ve yoğunluklarında üretilebilen açık hücreli köpük metallerde gözenek boyutları 2-10 mm arasında değişirken, yoğunluğu kullanılan metalin yoğunluğunun %5-30 arasında değişmektedir ki bu da oldukça hafif yapıların elde edilmesini sağlamaktadır [Sobczak, 2003]. Kapalı hücre yapılarında ise gözenekler birbirinden hücre duvarları ile ayrılmakta, bir gözenekten diğerine geçiş olmamaktadır [Degischer, 2002]. Gözenek boyutları çoğunlukla 1-8 mm arasında değişmektedir. Köpük metalin karakteri ve özellikleri bu iyapı morfolojisinden oldukça etkilenmektedir. Kapalı hücreli yapılar yüksek özgül rijitlik ve darbe emme özelliği öne çıkarken, açık hücreli yapılar ise multifonksiyonel olarak filtreleme, ayırma, ses yalıtımı ve ısı transferi özellikleri önem kazanmaktadır [Hai ve diğ., 2007].

Sahip olduğu bu özelliklerden dolayı köpük metaller farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Köpük metal seçiminde iyapı morfolojisi, metaurjik özellikler, üretim maliyetleri, yapısal veya fonksiyonel özellikler göz önüne alınmaktadır. Kapalı hücre yapısında yapısal uygulamalar, fonksiyonel uygulamalarda açık hücreli yapılar tercih edilmektedir [Hintz ve diğ., 2000]. Yapısal uygulamalarda kapalı hücre yapısına sahip köpük metaller otomotiv endüstrisinde, taşıtlarda kapı traversleri, tamponlarda, yan girişlerde hafifliği, [Srivastava ve diğ., 2007], yüksek darbe enerjisi [Claar ve diğ., 2000], titreşim [Strano ve diğ., 2015] ve ses sönümleme [Losito ve diğ., 2010] gibi özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır [Banhart ve diğ., 2002]. Yüksek rijitlik/yoğunluk değerlerinin arandığı Uçak-Uzay [Nie ve diğ., 2018], Gemi İnşaat [Banhhart ve diğ., 1999] ve Demiryolu [Su, 2019] sektörlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Biyomedikal endüstrisinde ise protez [Zhang ve diğ., 2009], dental [Salerno ve diğ., 2014] ve implantlarda vücuda uygunlu sebebiyle matris malzemesi titanyum veya kobalt-titanyum olan köpük metaller şeklinde kullanılmaktadır [Manakarı ve diğ., 2019]. Fonksiyonellik özelliklerin ön planda olduğu yerlerde açık hücreli köpük metallerin kullanılmaktadır. Filtrasyon işlemlerinde [Gauckler ve diğ., 1985], yüksek ısı iletim özelliklerinden dolayı alüminyum ve bakır matrisli köpük metaller ısı değiştiricilerinde [Banhart, 2003], yangına karşı dayanıklı ve tutuşmama özelliğinden dolayı inşaat sektöründe ve binalardaki acil çıkış bölgelerinde [Hipke ve diğ., 2014], Spor Ekipmanlarında (Zhu and Windle, 2002; Hai-jun *et al.*, 2007) kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek ses izolasyon özelliğinden dolayı yapılar [Deniz ve diğ., 2010] susturucular, otoban ve viyadüklerde de kullanılmaya başlanmıştır [Degischer, 2002].

Köpük metallerin üretimi için değişik yöntemler mevcuttur. Açık veya kapalı hücre yapıları köpük metal elde edilmesine göre üretim yöntemi de değişmektedir. Üretim yöntemleri arasında Eriyiğe gaz enjekte edilmesi [Rajak ve diğ., 2017], gaz yapıcı maddeler ile üretim (Alporas) [Singh ve diğ., 2018], katı-

gaz ötektik katılma yöntem (Gasar) [Srivastava ve diğ., 2007], toz metallerin içerisine köpürtücü madde ilave edilmesi (Fominal) [Singh ve diğ., 2018], yarı ergiyik döküm ile üretilmesi [Banhart, 2001], gaz tutma/hapsetme yönteminin kullanılması [Shingh ve diğ., 2018] veya hassas (replika) döküm yöntemi bulunmaktadır [Yamada ve diğ., 2000]. İkame malzeme kullanılarak elde edilen köpük metallerde ikame malzeme olarak tuz [Vinay ve diğ., 2012; Jinnapat ve diğ. 2012], şeker [Jakubowicz ve diğ., 2013, Asavavisithchai ve diğ., 2010], karbonat [Yavuz ve diğ., 2011; Zhao ve diğ., 2005] gibi granüllerin veya içi boş kürelerin etrafını sararak katılması sağlanmaktadır. Granüller uygun çözücüler veya asitler içerisinde çözündürülerek veya eritilerek numuneden uzaklaştırılmakta, gözenekli ve açık hücreli bir yapı elde edilmektedir. Eğer döküm sonrası granül veya içi boş küre metalin içinde kalıyorsa, bu durumda elde edilen köpük metale "*Sintaktik Köpük Metal*" denmektedir [Banhart ,ve diğ., 1999; Su ve diğ., 2020, Al-Sahlani ve diğ., 2019].

Sintaktik Köpük Metallerin (SKM) avantajları; iç gözenek yapısının ve boyutlarının kolay kontrol edilebilmesi, homojen bir iç yapının elde edilebilmesi, yüksek darbe emme karakteristiği gösterebilmesi, farklı içi boş küre çaplarının veya malzemelerinin kullanılmasıyla mekanik özelliklerinin kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi, düşük yoğunluk değerlerine sahip olmasıdır.

SKM, farklı iki malzemenin bir araya getirilerek üretilmesinden dolayı bir kompozit malzeme olarak da tanımlanmaktadır. Matris malzemesi olarak alüminyum [Orbulov, 2012], çinko [Pan ve diğ., 2018], magnezyum [Daoud ve diğ., 2007], çinko [Pan, 2018], titanyum [Mondal ve diğ., 2012], çelik [Rabiei ve diğ., 2007] gibi metaller kullanılmaktadır. İçi boş veya gözenekli takviye malzemesi olarak seramikler, senosferler [Mondal ve diğ., 2009] veya metaller [Rabiei ve diğ., 2006] tercih edilmektedir. Ancak takviye malzemesi olarak metal kullanmanın mahsuru, metalik matris malzeme ile reaksiyona girme eğiliminin yüksek olmasıdır. Seramik takviye malzemesi olarak  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $SiC$ ,  $B_4C$  ... kullanılmaktadır [Tao ve diğ., 2009; Balch ve diğ., 2006]. Küre çapları 0,01-10 mm arasında değişebilmektedir.

Sintaktik Köpük Metal (SKM), takviye malzemesi olan içi boş veya gözenekli kürelerin etrafının erimiş metal ile kaplanıp katılması şeklinde üretilmektedir. SKM'nin farklı üretim teknikleri geliştirilmiştir. Karıştırarak döküm (stir casting) yönteminde ergimiş metalin içine kürelerin atılıp karıştırılmaktadır [Singh ve diğ., 2017]. Bu yöntemin dezavantajları; mekanik veya titreşimli karıştırma işlemi esnasında kürelerin kırılabilmesi ve yoğunluk farkından dolayı kürelerin yüzmesi ve homojen olmayan yapının elde edilmesidir [Altenaiji ve diğ., 2012]. Toz metalürjisi ile üretim yönteminde toz metal mikro küreler homojen bir yapı olana kadar ile karıştırılmakta, kalıp içinde sıkıştırılmakta ve sinterleme ile ürün elde edilmektedir [Sun ve diğ., 2003, Lehmus ve diğ., 2014]. Bu yöntemin dezavantajı ise sıkıştırma işlemi esnasında kürelerin kırılma tehlikesi bulunmasıdır. Yaygın olarak kullanılan diğer yöntem ise infiltrasyon yöntemidir. İnfiltrasyon yönteminde ergimiş metal basınç altında küreler arasına sevk edilmektedir. Basınç oluşturmak için değişik yöntemler kullanılmaktadır; yer çekimi yardımıyla [Castro ve diğ., 2012; Huo ve diğ., 2011], vakum altında [Dorian ve diğ., 2005, Santa Maria ve diğ., 2012] veya mekanik yöntemler kullanılarak [Zhang ve diğ., 2007, Lin ve diğ., 2016] basınç oluşturma şeklindedir. Mekanik yöntem ile infiltrasyon metodunda kalıp üzerine yerleştirilen ağırlık veya piston yardımıyla döküm basıncı oluşturulmaktadır.

Çalışmamızda Sintaktik Köpük metal, mekanik infiltrasyon yöntemi ile imal edilecektir. Mekanik infiltrasyon yönteminin en büyük avantajı uygulanan basınç değerinin diğer infiltrasyon yöntemlerinden daha yüksek olmasından dolayı karmaşık yapıdaki ve ince cidarlı ürünlerin de üretilmesidir [Rohatgi ve diğ., 2011]. Mekanik infiltrasyon üretim yöntemindeki en büyük problem, optimum basınç değerinin tespit edilmesidir. Gereğinden düşük basınç değeri uygulandığında içyapı gözenekli ve boşluklu olma olasılığı bulunmaktadır. Gereğinden yüksek basınç değerleri uygulandığında ise kürelerin kırılma tehlikesi bulunmaktadır [İmre, 2011]. Çalışmamızda matris malzemesi olarak alüminyum, takviye malzemesi olarak da geliştirilmiş cam kullanılmıştır. Geliştirilmiş camın diğer içi boş seramik küre malzemelere göre avantajı, içinin gözenekli (petekimsi) bir yapıya sahip olmasından dolayı daha yüksek enerji absorbe edebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Ayrıca geliştirilmiş camın üretim yönteminin maliyeti diğer seramik kürelere göre daha düşük olmasından dolayı üretilen Sintaktik Köpük Metalin maliyetini de düşürecektir.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL METHODS)

### Sintaktik Köpük Metal Malzemelerin ve Kalıbın Tanıtılması (Introduction of Syntactic Foam Metal Materials and Mold)

Sintaktik köpük metal üretiminde takviye malzemesi olarak "Genleştirilmiş cam" kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş, camın içine köpürücü malzeme ilave edip karıştırdıktan sonra yüksek sıcaklıkta döküm işleminin yapılması ile genleştirilmiş cam elde edilmektedir (şekil 1). Farklı çaplarda üretilen camlardan çalışmamızda 2-4 mm çapa sahip küreler kullanılmıştır. Genleştirilmiş cam küreler hafifliği ve gözenekli içyapı özelliklerinden dolayı makine, tarım, yağ ve gaz biofiltrasyonu gibi farklı sektörlerde kullanılabilmesinin yanı sıra en çok inşaat sektöründe ısı yalıtımında kullanılmaktadır ve basma dayanımı 1,4 MPa'dır.



**Şekil 1.** İçi gözenekli bir yapıya sahip genleştirilmiş cam

*Figure 1. Porous structure of expanded glass*

Sintaktik köpük metal üretiminde matris malzemesi olarak 7075 alüminyum kullanılmıştır. Bu metalin seçilme nedeni düşük yoğunluğa ( $2,81 \text{ g/cm}^3$ ) ve yüksek sünekliğe sahip olmasıdır. Yüksek süneklik karakteri özellikle darbe emme vazifesinin matris tarafından karşılandığı durumlarda önem kazanmaktadır.

Çalışmamızda sintaktik köpük metal (SKM), mekanik infiltrasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Mekanik infiltrasyon yönteminde cam küreler kalıp içine yerleştirildikten sonra ergimiş alüminyum kalıp içine dökülmektedir. Kalıp içine dökülen alüminyumun küreler arasındaki boşluğu doldurabilmesi için gerekli basınç, kalıp üzerine yerleştirilen bir pim-tabla mekanizması ve onun üzerine yerleştirilen ağırlık yardımıyla oluşturulmaktadır (şekil 2). Yerleştirilen ağırlık ile kalıp içinde 6,38 kPa'lık döküm basıncı elde edilmiştir.

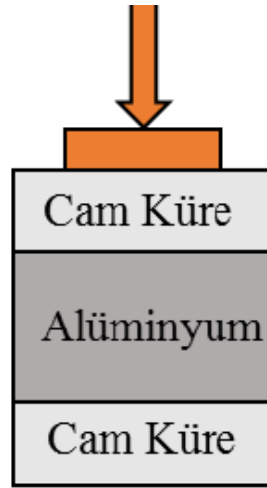
Çalışmamızda kullanılan kalıp boşluğu 25 mm çapında ve 40 mm yüksekliğe sahip silindirik bir yapıdır. Kalıp iki parçalı olup, döküm sonrası kalıp açılarak numune çıkarılmaktadır. Kalıp fırın içine yerleştirileceğinden yüksek sıcaklığa dayanıklı olup takım çeliğinden imal edilmiştir.



**Şekil 2.** Sintaktik Köpük Metal üretiminde kullanılan kalıp  
*Figure 2. Mold used in manufacturing of Syntactic Foam Metal*

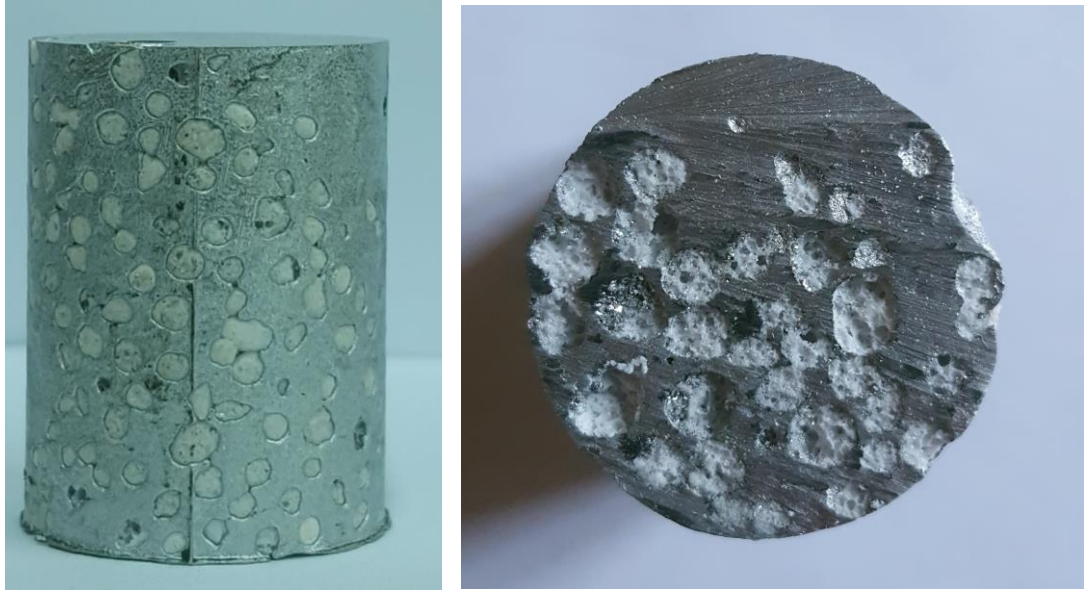
### Sintaktik Köpük Metalin Üretimi (Manufacturing of Syntactic Foam Metal)

Çalışmamızda sintaktik köpük metal üretimin ilk aşamasında alüminyum pota içine konarak ergitilmek üzere 800 °C sıcaklıktaki kamara fırınına yerleştirilmiştir. Bir saat sonra içinde genişletilmiş cam küreler bulunan pota ve kalıp da aynı kamara fırınına yerleştirilmiş ve 20 dakika fırın içinde tutulmuşlardır. Cam kürelerinin ve kalıbın fırın içinde bekletmenin amacı, kalıp ve cam kürelerin ısıtarak daha sonra yapılacak döküm esnasında sıvı alüminyumun erken soğumadan cam küreler arasındaki boşlukları doldurabilmesidir. Daha sonra kalıp fırından çıkarılmış, ergitilmiş alüminyum ve cam küreler farklı sıralamalarla kalıp içine dökülmüştür. Döküm sonrası kalıbın üstü pim ile kapatılmış ve pimin üstünde bulunan tablaya ağırlık konarak döküm basıncı oluşturulmuştur. Deneysel çalışmamızda farklı sıralamalarla cam küre ve alüminyumun kalıp içine yerleştirilmesindeki amaç, hangi yerleştirilme düzeni sonucunda daha homojen yapının oluşturacağını tespit edilmesidir. Bu amaçla kalıp içine farklı cam küre-ergimiş alüminyum yerleştirme düzenekleri oluşturulmuştur. İlk denemelerde kalıbın içine önce ergimiş alüminyum dökülmüş ve hemen üzerine cam küreler yerleştirilip kalıp üstü pim-tabla düzeneği ile kapatılmış ve tablanın üzerine ağırlık yerleştirilerek döküm basıncı elde edilmiştir. Ancak bu şekilde üretilen numunelerin homojen bir içyapıya sahip olmadıkları tespit edilmiştir. Döküm sonrası numunenin boylamasına kesiti alındıktan sonra cam kürelerin, alüminyumdan daha hafif olmalarından dolayı, tam olarak numune içinde homojen dağılmadığı ve cam kürelerin numunenin üst kısmında biriktiği gözlemlenmiştir. Daha sonra cam küreler ve ergitilmiş alüminyum sandwich tipi şeklinde kalıba yerleştirilmiştir. Bu yöntemde kalıbın içine önce 3 gram cam küre yerleştirilmiş, üzerine kalıbın dörtte üçünü dolduracak şekilde ergimiş alüminyum dökülmüş ve geriye kalan kısmına da 2 gram cam küre yerleştirilmiştir (Şekil 3). Bu yerleştirme şeklinde elde edilen numunelerin boyuna kesiti alınarak incelenmiş ve cam kürelerin köpük metal içinde dengeli ve homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4).



**Şekil 3.** Sintaktik Köpük Metal üretiminde kalıp boşluğunun içindeki malzemelerin yerleşimi

*Figure 3. Layout of the materials inside the mold cavity by manufacturing of Syntactic Foam Metal*

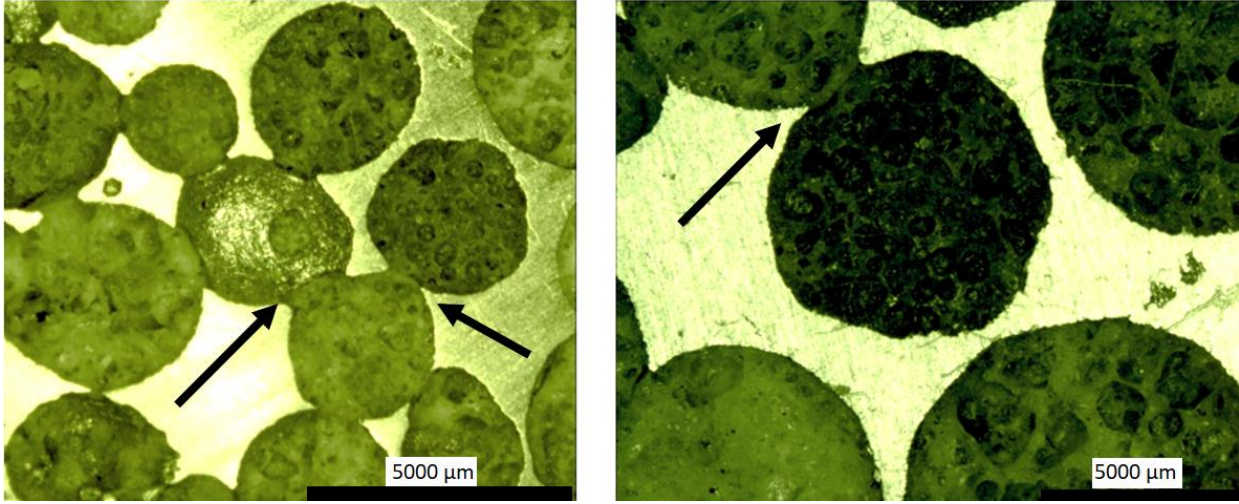


**Şekil 4.** Sintaktik Köpük Metal numunesi

*Figure 4. Syntactic Foam Metal specimen*

#### **İçyapı Analizleri (Microstructure Analysis)**

Sintaktik Köpük Metalin (SKM) üretiminden sonra içyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde amaç, oluşabilecek muhtemel içyapı kusurlarının olup olmadığının tespit edilmesidir. İçyapı kusurları eksik döküm, yetersiz nüfusiyet, cam kürelerin basınç altında kırılması, küreler arasında boşlukların olması veya kürelerin birbirine kaynaması şeklinde olabilmektedir. İçyapı analizleri için deney numuneleri enlemesine kesilmiş ve sırasıyla 180, 300, 600 ve 1000 ile zımparalanmıştır. Yüzeylerin parlatılmasından sonra numunelerin içyapısı optik mikroskop (Nikon SMZ 800 OM) ile incelenmiştir (şekil 5).



Şekil 5. Sintaktik Köpük Metalin içyapısı

Figure 5. Microstructure of Syntactic Foam Metal

İnceleme sonucu alüminyumun küreler arasındaki boşlukları kusursuz bir şekilde doldurduğu ve küreler arasında boşlukların olmadığı, kürelerde herhangi bir çatlama ve kırılmanın olmadığı ve sıvı alüminyum ile dolmadığı tespit edilmiştir. Buna karşın bazı kürelerin, şekil 5 de oklarla gösterilen bölgelerde birbiriyle kaydığı tespit edilmiştir. Bu birleşme ya cam kürelerin fırın içinde bekletilirken sinterlenmesi sonucu veya döküm esnasında yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle oluşmuş olabileceği düşünülmektedir.

#### Yoğunluk ve Gözeneklilik Analizleri (Density Analysis)

Yoğunluk hesaplamaları için Arşimed prensibi kullanılmıştır. 25 mm çapında ve 30-33 mm arasında yüksekliği değişen silindirik numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri sonrası numunelerin yoğunluk değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Gözeneklilik yüzdesinin ( $G_{KM}$ ) hesaplanmasında Taherishargh [Taherishargh ve diğ., 2014] tarafından önerilen matematiksel denklemler (1) ve (2) esas alınmıştır. Denklemlerde  $V_{KM}$  köpük metalin hacmini,  $m_{KM}$  köpük metalin kütesini,  $m_{Al}$  alüminyumun kütesini,  $m_{Küre}$  cam kürelerin kütesini  $\rho_{Al}$  alüminyumun yoğunluğunu,  $\rho_{Küre}$  cam kürelerin yoğunluğunu,  $\rho_{KM}$  köpük metalin yoğunluğunu temsil etmektedir. (1) ve (2) no.lu denklemlerin kullanılmasıyla elde edilen numunelerin gözeneklilik yüzdeleri çizelge 1 de görülmektedir.

$$\rho_{Küre} = \frac{m_{Küre}}{V_{KM} - \left( \frac{m_{KM} - m_{Küre}}{\rho_{Al}} \right)} \quad (1)$$

$$G_{KM} = \left( 1 - \frac{\rho_{Küre}}{\rho_{KM}} \right) \cdot \left( \frac{V_{KM} - \left( \frac{m_{KM} - m_{Al}}{\rho_{Al}} \right)}{V_{KM}} \right) \quad (2)$$

**Çizelge 1.** Sintaktik Köpük Metal numuneleri, boyutları ve yoğunlukları*Table 1. Syntactic Foam Metal specimens, dimensions and densities*

Numune	Yükseklik [mm]	Çap [mm]	Ağırlık [g]	Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]	Gözeneklilik [%]
1	30	25	23	1,53	53,3
2	33	25	27	1,68	57,2
3	32	25	23	1,44	55,5
4	32	25	25	1,56	55,5
5	33	25	21	1,33	57,1

Yoğunluk analizi sonucu yoğunluk değerlerinin 1,33-1,68 g/cm<sup>3</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yoğunluk değerinin ortalama 1,5 g/cm<sup>3</sup> olması, hedeflenen hafifletme kriterinin sağlandığı tespit edilmiştir. 7075 alüminyumun yoğunluk değerinin (2,81 g/cm<sup>3</sup>) göz önüne alınmasıyla ağırlığın yaklaşık %48 azaltıldığı tespit edilmiştir. Gözeneklilik analizleri sonucunda üretilen köpük metal numunelerin gözeneklilik değerlerinin % 53,3-57,2 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

### Mekanik Deneyler (Mechanical Tests)

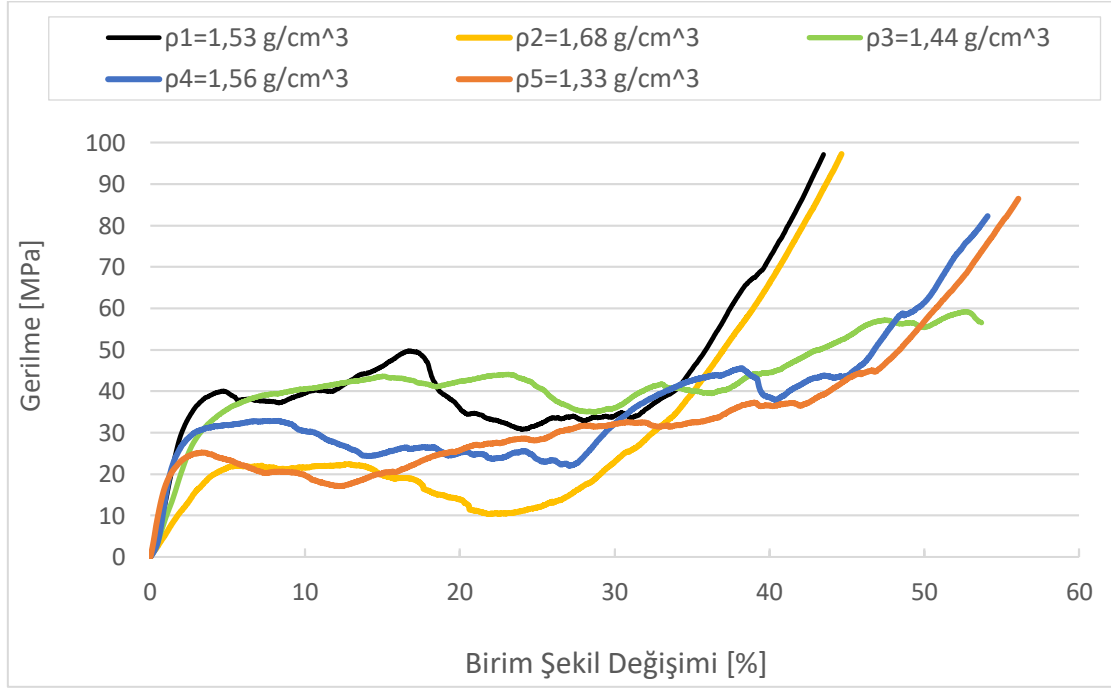
Sintaktik Köpük Metal'in mekanik özelliklerini tespit etmek için basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 50 kN kapasitesli Shimadzu AG-IS çekme basma test makinasında yapılmıştır (Şekil 6). Basma testi ISO 13314 standardına uygun olarak yapılmıştır ve çene ilerleme hızı 0,0016 – 0,0022 1/s olarak tespit edilmiştir.

**Şekil 6. Basma deneyi***Figure 6. Compression test*

Basma testleri sonrası oluşan gerilme-birim şekil değişim grafikleri analiz edilmiştir. Şekil 7 de farklı yoğunluklara sahip numunelerin basma deneyleri sonucu oluşan gerilme-birim şekil değişim grafikleri görülmektedir. İnceleme sonrası köpük metallerde görülen tipik bir plato eğrisinin numunelerimizde de tespit edilmiştir. Yaklaşık %5 birim şekil değişim değerlerinde başlayan plato bölgesi %40 deformasyon değerine kadar devam etmiştir. Plato bölgesinde, uygulanan basma gerilmeleri altında yapı içindeki cam küreler kırılmakta ve matris alüminyum malzemenin sünek karakteri yardımıyla Sintaktik Köpük Metal bir yay elemanı gibi davranarak enerji absorbe etme karakteri göstermektedir.

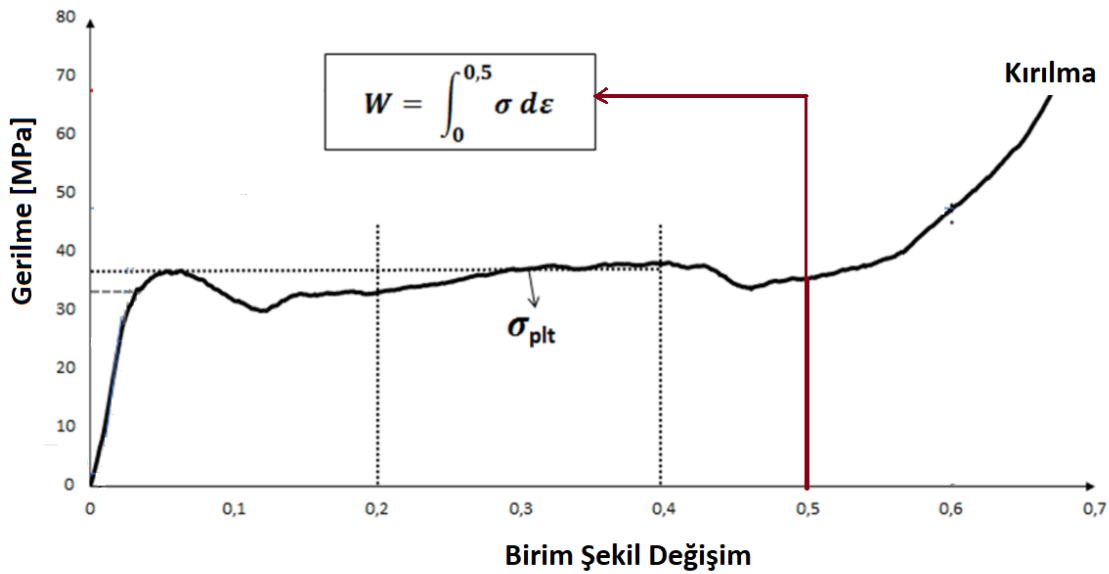


Köpük metallerin basma deney sonrası plato dayanım ve darbe sönümleme enerji değerlerini tespit etmek için ISO 13314 standardı esas alınmıştır. Plato gerilme değeri %20 ile %40 plastik deformasyon esnasında meydana gelen gerilme değerlerin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanmaktadır. Absorbe edilen enerji (W) ise, %50 plastik deformasyona kadar meydana gelen gerilme – birim şekil değişim eğrisinin altındaki alanın hesaplanması ile tespit edilmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. Farklı yoğunluklara sahip numunelerin gerilme – birim şekil değişim grafikleri

Figure 7. Stress – strain curves of specimens with different densities



Şekil 8. ISO 13314 standardına göre plato gerilme ( $\sigma_{plt}$ ) ve absorbe edilen enerji (W) değerlerinin tespit edilmesi

Figure 8. Determining plateau stress ( $\sigma_{plt}$ ) and energy absorption (W) values according to ISO 13314

Yukardaki açıklamalar doğrultusunda gerçekleştirilen basma testleri sonucu ISO 13314 standardına göre plato dayanım ve absorbe edilen enerji ( $W$ ) değerleri çizelge 2 de görülmektedir.

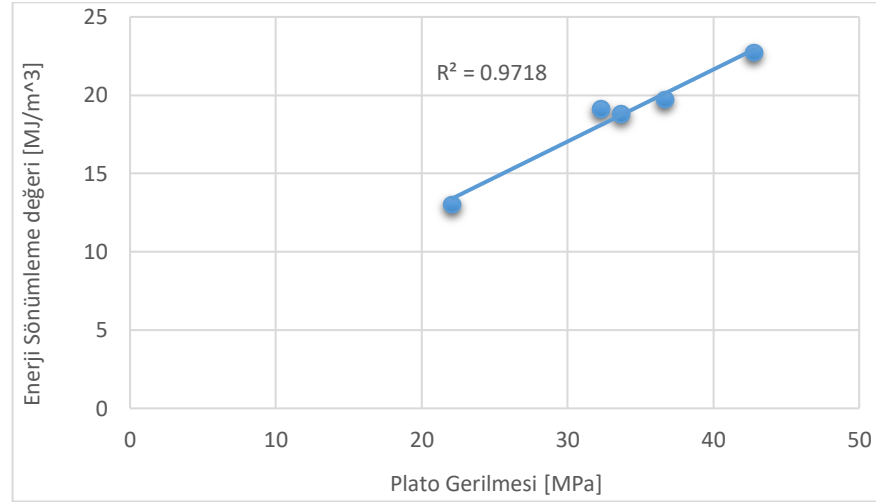
Çizelge 2 de de görüldüğü gibi plato gerilmesinin 22-42 MPa ve enerji sönümlenme değerinin ise 13-22 MJ/m<sup>3</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerler literatürdeki verilerle uyumludur [Taherishargh ve diğ., 2014, Szlancsik ve diğ., 2015, Duarte ve diğ., 2016].

**Çizelge 2.** Sintaktik Köpük Metal numunelerinin plato gerilme ve enerji sönümlenme değerleri

*Table 2. Syntactic Foam Metal specimens plateau stress and energy absorbing values*

Numune	Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]	Plato Gerilmesi [MPa]	Enerji Sönümlenme değeri [MJ/m <sup>3</sup> ]
1	1,53	33,7	18,8
2	1,68	22,1	13,0
3	1,44	42,8	22,7
4	1,56	36,7	19,7
5	1,33	32,3	19,1

Basma deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde plato gerilmesi ile enerji absorbe etme değeri arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir (şekil 9). Bu ilişkide  $R^2=0,9718$  dir. Şekil 8 deki  $W$ 'nin hesaplanmasında kullanılan denklemde de görüldüğü gibi absorbe edilen enerji ( $W$ ) ile plato gerilmesi arasında da bir ilişki mevcuttur ve  $W$  değerinin tespit edilmesinde basma eğrisinin altındaki alanın büyüklüğü, plato gerilmesinin artmasıyla artmaktadır.



**Şekil 9.** Enerji sönümlenme değeri ile plato gerilmesi arasındaki ilişki

*Figure 9. Relation between energy absorbing value and plateau stress*

## SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada alüminyum matrisine sahip, genleştirilmiş cam takviyeli Sintaktik Köpük Metal (SKM) üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak mekanik infiltrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin seçilme nedeni, karmaşık ve ince cidarlı yapıların üretimine uygun olmasıdır. Döküm kalıbı içine cam küre ve ergimiş alüminyumun farklı yerleştirme kombinasyonları oluşturularak numuneler üretilmiş ve Sandwich tipi yerleştirme yönteminin en uygun yöntem olduğu kanaatine varılmıştır. Mekanik infiltrasyon yönteminde 6,3 kPa'lık döküm basıncı uygulanmıştır. Döküm sonrası gerçekleştirilen içyapı analizlerinde cam küreler arasındaki boşluğun ergimiş alüminyum ile dolduğu, gözeneksiz bir içyapının oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bazı numunelerde cam kürelerin birbiriyle kısmen kaynadığı gözlemlenmiştir. Bunun muhtemel nedeninin fırın içinde ön ısıtmaya maruz bırakılan cam kürelerin kısmen sinterlendiği kanaatine varılmıştır. SKM'lerin gözeneklilik değerlerinin %53,3-57,2 arasında

değiştirdiği, yoğunluk değerlerinin ise ortalama  $1,5 \text{ g/cm}^3$  olduğu hesaplanmıştır ki bu da hedeflenen hafif yapı ürünlerin elde edilmesi amacıyla ulaşıldığını göstermektedir. Basma deneyleri sonucu literatürdeki araştırmalarda SKM'lerde görülen tipik plato eğrisinin ürettiğimiz numunelerde de oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu eğrinin varlığı, sabit gerilme altında numunenin sürekli plastik deformasyona uğramasını ve bu esnada SKM içindeki cam kürelerin kırılarak SKM'nin enerji absorbe etme özelliğini göstermektedir. Plato gerilmesinin 22-42 MPa ve enerji sönümlenme değerinin  $13\text{-}22 \text{ MJ/m}^3$  arasında değiştiği tespit edilmiştir. Plato gerilmesi ile enerji absorbe etme değerleri arasında doğrusal ve güçlü bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, MYL-2018-41050 no.lu Bilimsel Araştırma Proje (BAP) ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Altenajji, M., Schleyer G.K., Zhao, Y.Y., 2012, "Characterization of Aluminum Matrix Syntactic Foams Under Static and Dynamic Loading, Composites and Their Properties", *IntechOpen*, DOI: 10.5772/48560.
- Al-Sahlanı, K., Kisi, E., Fiedler, T., 2019, "Impact of Particle Strength and Matrix Ductility on the Deformation Mechanism of Metallic Syntactic Foam", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 786, pp. 292-299.
- Asavavisithchai, S., Nisaratanaporn, E., 2010, "Fabrication of Open-Cell Silver Foams Using Disaccharide as Space Holders", *Journal of Science*,; Vol.37(2), pp. 222-230.
- Balch, D. K., Dunand, D. C., 2006, "Load partitioning in aluminum syntactic foams containing ceramic microspheres", *Acta Materialia*, Vol. 54(6), pp. 1501-1511.
- Banhart, J., 2000, "Manufacturing routes for metallic foams", *Journal of Metals*, Vol. 52(12), pp. 22-27.
- Banhart, J., 2001, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol.46, pp. 559-632.
- Banhart, J., 2003, "Aluminum Foams for Lighter Vehicles", *International Journal of Vehicle Design*, pp. 1-19.
- Banhart, J., Ashby, M. F., Fleck, N., 1999, "Metal foams and porous metal structures ", *Metal Innovation Technologie*, Vol. 83, pp. 255-262.
- Banhart, J., Weaire, D., 2002, "On the road again: metal foams find favor", *Physics Today*, Vol. 55, pp.37-42.
- Castro, G., Nutt, S.R., 2012, "Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 535, pp. 274- 280.
- Claar, T. D., 2000, "Ultra-lightweight aluminum foam materials for automotive applications." *SAE transactions*, pp. 98-106.
- Daoud, A., El-Khair, M. A., Abdel-Aziz, M., Rohatgi, P., 2007, "Fabrication, microstructure and compressive behavior of ZC63 Mg-microballoon foam composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 67(9), pp. 1842-1853.
- Degischer, H.P., Kriszt, B., 2002, "Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications", Wiley-VCH, ISBN 3-527-29320-5.
- Dorian, K., Balcha, J., O'Dwyer, G., Davisc, R., Cadyd, C.M., Gray, G.T., Dunanda, D.C., 2005, "Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 391, pp. 408-417.
- Duarte, I., Ferreira M.F., 2016, "Composite and Nanocomposite Metal Foams", *Materials*, Vol. 9 (79), 1-34.
- Fiedler, T., Nima Movahedi, York, L., Broxtermann, S., 2020, "Functionally-Graded Metallic Syntactic Foams Produced via Particle Pre-Compaction, *Metals*, Vol. 10, pp. 312-324.

- Gauckler, L.J., Waeber, M.M., Conti, C., Duliere, J. M., 1985, "Ceramic Foam for Molten Metal Filtration", *Journal of Metals*, September.
- Hai-jun, Y., Guang-chun, Y., Xiao-lin, W., 2007, "Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material", *Transactions of nonferrous metals society*, Vol. 17, pp. 93–98.
- Hintz, C., 2000, „Mechanische und tribologische Eigenschaften präzisionsgegossener Schwämme und Werkstoffverbunde", *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, Vol. 31(6), pp.574-581.
- Hipke, T., Hohlfeld, J., Rybandt, S., 2014, "Functionally aluminum foam composites for building industry", *Procedia Materials Science*, Vol.4, pp. 133-138.
- Huo, D., Yang, J., Zhou, X., Wang, H., Zhang, T., 2012, "Preparation of open-celled aluminum foams by counter-gravity infiltration casting", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 85-89.
- Jakubowicz, J., Adamek, G., Dewidar, M., 2013, "Titanium foam made with saccharose as a space holder", *Journal of Porous Materials*, Vol. 20, pp. 1137–1141.
- Jinnapat, A., Kennedy, A.R., 2010, "The manufacture of spherical salt beads and their use as dissolvable templates for the production of cellular solids via a powder metallurgy route", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 499, pp. 43-47.
- Kenesei, P., Kadar, C., Rajkovits, Z., Lendvai, J., 2004, "The influence of cell size distribution on the plastic deformation in metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 295–300.
- Kheradmand, B., Otraj, S., Soleimanpour, Z., Beigyfar, M., 2013, "Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam", *Life Science Journal*, Vol. 10.
- Kiratisaevae, H., Cantwell, W., 2005, "Low-velocity Impact Response of High-performance Aluminum Foam Sandwich Structures", *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol. 24(10), pp. 1057-1072.
- Lehmhusa, D., Weisb, J., Baumeisterb, J., Peronic, L., Scapinc, M., Ficherac, C., Avallec, M., Bussea, M., 2014, "Quasi-static and dynamic mechanical performance of glass microsphere- and cenosphere-based 316L syntactic foams", *Procedia Materials Science*, Vol. 4, pp. 383 – 387.
- Lin, Y., Zhang, Q., Ma, X., Wu, G., 2016, "Mechanical behavior of pure Al and Al–Mg syntactic foam composites containing glass cenospheres", *Composites: Part A*, Vol. 87, pp. 194–202.
- Manakari, V., 2019, "Evaluation of wear resistance of magnesium/glass microballoon syntactic foams for engineering/biomedical applications." *Ceramics International*, Vol.11.
- Mondal, D. P., 2012, "Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route", *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 82-89.
- Mondal, D. P., Das, S., Ramakrishnan, N., Bhasker, K. U., 2009, "Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40(3), pp. 279-288.
- Neikov, O., 2019, "Handbook of Non-Ferrous Metal Powders – Technologies and Applications", 2<sup>nd</sup> Edition, Elsevier.
- Nie, Z., Lin, Y., Tong, Q., 2018, "Numerical simulations of two-phase flow in open-cell metal foams with application to aero-engine separators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127 pp. 917-932.
- Onofrio, L., Barletta, D., Dimiccoli, V., 2010, "A wide-frequency model of metal foam for shielding applications", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52(1), pp. 75-81.
- Orbulov, I. N., 2012, "Compressive properties of aluminum matrix syntactic foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 555, pp. 52-56.
- Orbulov, I.N., 2011, "Syntactic foams produced by pressure infiltration – the effect of pressure and time on infiltration length", *Mechanical Engineering*, Vol. 55(1), pp. 21–27.
- Ozan, S., Katı, N., 2011, 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Pan, L., 2018, "Zn-Matrix Syntactic Foams: Effect of Heat Treatment on Microstructure and Compressive Properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.7.

- Pan, L., Yang, Y., Ahsan, M. U., Luong, D. D., Gupta, N., Kumar, A., Rohatgi, P. K., 2018, "Zn-matrix syntactic foams: Effect of heat treatment on microstructure and compressive properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 731, pp. 413-422.
- Polat, D., Keleş, Ö., Taptık, Y., 2010, "Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri" *Metal Dünyası*, Vol. 54.
- Rabiei, A., Neville, B., Reese, N., Vendra, L., 2007, "New Composite Metal Foams Under Compressive Cyclic Loadings", *Materials Science Forum*, Vols. 539-543, pp. 1868-1873.
- Rabiei, A., Vendra, L., Reese, N., Young, N., Neville, P., Processing and Characterization of a New Composite Metal Foam, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 9 (2006) pp. 2148 to 2153.
- Rajak, D.K., Kumaraswamidhas, L.A., Das, S., 2017, "Technical Overview of Aluminum Alloy Foam", *Review Advanced Materials Science*, Vol. 48, pp. 68-86.
- Ramamurty, U., Paul, A., 2004, "Variability in mechanical properties of a metal foam", *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 869-876.
- Rohatgi, P., 2011, "The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams", *Journal of Materials*, Vol. 63(2), pp. 36-42.
- Salerno, A., Netti, P. A., 2014, "Introduction to biomedical foams." *Biomedical Foams for Tissue Engineering Applications*, pp. 3-39.
- Santa Maria, J.A., Schultz, B.F., Ferguson, J.B., Rohatgi, P.K., 2013, "Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams – Part I: Effect of matrix strength and hollow spherize on the quasi-static properties of Al-A206/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> syntactic foams", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 582, pp. 415-422.
- Singh, S., Bhatnagar, N., "A Survey of Fabrication and Application of Metallic Foams (1925-2107)", *Journal of Porous Materials*, Vol. 25, pp. 537-554.
- Sobczak, J., 2003, "High Porosity Media for Transportation – Selected Aspects", *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, Vol. 10, pp. 34-42.
- Srivastava, V.C., Sahoo, K.L., 2007, Processing, Stabilization and Applications of Metallic Foams. *Art of Science*, *Materials Science-Poland*, 25, 733-753.
- Su, L., 2019, "Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 119, pp. 331-345.
- Su, M., Wang, H., Hao, H., Fiedler, T., 2019, "Compressive Properties of Expanded Glass and Alumina Hollow Spheres Hybrid Reinforced Aluminum Matrix Syntactic Foams", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 821, pp. 1-11.
- Sun, D.X., Zhao, Y.Y., 2003, "Static and Dynamic Energy Absorption of Al Foams Produced by the Sintering and Dissolution Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 34(1), pp 69-74.
- Szlancsik, A., Katona, B., Bobor, K., Májlínger, K., Orbulov, I. N., 2015, "Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres", *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 230-237.
- Taherishargh, M., Sulong, M. A., Belova, I. V., Murch, G. E., Fiedler, T., 2015, "On the particle size effect in expanded perlite aluminum syntactic foam", *Materials & Design*, Vol. 66, pp. 294-303.
- Tao, X. F., Zhang, L. P., Zhao, Y. Y., 2009, "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres", *Materials & Design*, Vol. 30(7), pp. 2732-2736.
- Vinay, B.U., Sreenivas Rao, K.V., 2012, "Development of Aluminum Foams by Different Methods and Evaluation of its Density by Archimedes Principle", *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Vol. 2(4), 541-549.
- Yamada, Y., Shimojima, K., Sakaguchi, Y., Mabuchi, M., Nakamura, M., Asahina, T., Mukai, T., Kanahashi, H., Higashi, K., 2000, "Effects of heat treatment on compressive properties of AZ91 Mg and SG91A Al foams with open-cell structure", *Advanced Engineering Materials*, 2000; Vol. 2, pp. 184-191.
- Yavuz, İ., 2010, "Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Vol. 1, pp. 49-58.

- Yu, J., Wang, E., Li, J., Zheng, Z., 2008, "Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams closed-cell aluminum-foam core in three-point bending", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 5, pp. 885–894.
- Zhang, L. P, Tao, X.F., Zhao Y.Y., 2009, "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2732–2736.
- Zhang, L.P., Zhao, Y.Y., 2007, "Mechanical Response of Al Matrix Syntactic Foams Produced by Pressure Infiltration Casting", *Journal of Composite Materials*, Vol. 41.
- Zhao, Y.Y., Fung, T., Zhang, L.P., Zhang, F.L., 2005, "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 295–298.
- Zhu, H. X., Windle, A. H., 2002, "Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 1041–1052.