

Metalik Köpük Malzemelerin Üretim Yöntemleri, Uygulama Alanları Ve Malzeme Özellikleri

Çağrı Vakkas YILDIRIM¹

¹ Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 38039, Kayseri, TÜRKİYE
cvyildirim@erciyes.edu.tr

Özet- Sanayideki gelişmelerle birlikte artan yeni tür malzeme ihtiyacı yadsınamaz bir gerçek olarak karşımızda durmaktadır. Buna paralel olarak mühendislik malzemelerinde aranan özellikler sürekli değişmektedir. Özellikle son dönemde malzemelerin, hafif ve yüksek dayanıma sahip olması aranan özelliklerin başında gelmektedir. Köpüren metaller ya da metalik köpükler diye adlandırılan yeni nesil bu malzemeler, hafif ve yüksek dayanım özelliklerinin yanı sıra çok iyi derecede mekanik, akustik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı, hem fonksiyonel hem de endüstriyel alanda ihtiyaçları karşılamak için çok ciddi şekilde talep görmektedir. Bu çalışmada, dünyada ve Türkiye’de metalik köpüklerle ilgili yapılan araştırmalar incelenerek metalik köpük malzemelerin üretim yöntemleri, uygulama alanları ve malzeme özelliklerine ait bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Çelik, metal köpükler, çelik köpükler, mekanik özellikler

Metallic Foam Materials Manufacturing Processes, Materials And Applications

Abstract- With developments in industry, the growing demand on new types of materials is confront us as an undeniable fact. Properties of the materials used in industrial field change continuously in parallel with current developments. In particular, the property of lightness and high durableness of the materials is one of the desired properties in the recent period. Foaming metals or metallic foams are highly demanded to meet the needs both functional and industrial field due to their excellent mechanical, acoustic, thermal, electrical and chemical properties besides being light and highly durable. In this study, information about production methods, fields of application and material properties of metallic foams are given by examining researches related to metallic foams in Turkey and the world.

Key Words- Steel, metal foams, steel foams, mechanical properties.

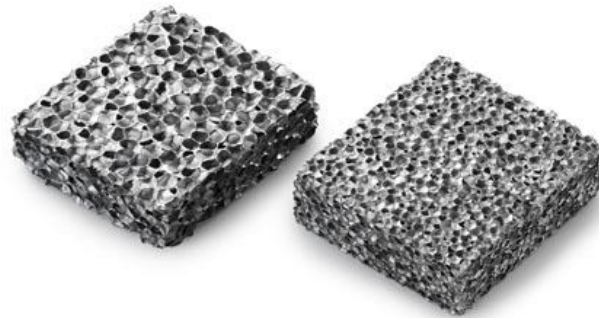
1. GİRİŞ

Günümüz mühendislik malzemeleri, teknik, çevresel, ekonomik ve estetiksel yönden bazı konularda yetersiz kalmakta ve bu yetersizlik araştırmacıların yeni nesil malzemeler üzerine yoğunlaşmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, stratejik fayda sağlayan entegre malzemeler, içinde bulunduğumuz zaman periyodunda önemi giderek artan bir araştırma ve üretim alanıdır [1]. Tablo 1’de gösterilen mühendislik malzemelerinin “dünyasında” temel olarak mühendislik malzemeleri seramik ve camlar, köpükler, metaller, polimerler, kompozitler ve doğal malzemeler şeklinde sınıflandırılırlar [2].

Tablo 1. Mühendislik malzemelerinin sınıflandırılması

SERAMİK VE CAMLAR	KÖPÜKLER	METALLER	POLİMERLER	KOMPOZİTLER	DOĞAL MALZEMELER
Alümina	Polimer	Demir Esaslı	PP, PE, PC	Metal Esaslı Komp.	Ahşap
SiC	Metal	Dökme Demirler	PA (Naylon)	Seramik Esaslı Komp.	Deri
Soda-Cam	Seramik	Demir Dışı	PMMA	Polimer Esaslı Komp.	Kenevir
Pirex	Cam	Al Alaşımları	Butil Kauçuk	Doğal Komp.	Pamuk
TiN		Ni Alaşımları	Neopren	Odun Esaslı Komp.	
Fe ₂ B		Ti Alaşımları	Slikon		

Köpük malzemeler genellikle yüksek ısı yalıtımı, enerji absorbe edebilme özelliği ve hafifliği nedeniyle özellikle ambalaj sektöründe sıklıkla tercih edilmektedirler. Buna benzer bir örnek de seramik köpüklerin filtre olarak kullanılması olarak gösterilebilir [3]. Bu yeni nesil malzemeler, mekanik, termal, elektriksel ve akustik özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Hafif olmasına karşın oldukça sert olan metal köpükler, mükemmel yanma dirençleri, iyi derecede ısı ve ses yalıtım potansiyelleri neticesinde polimer malzemelere ciddi alternatif olmaktadır [4,5]. Son zamanlarda metalik köpüklerle ilgili çok sayıda yayın literatürde kendine yer bulmaktadır. Bu da metalik köpüklerin ne kadar ön plana çıkmaya başladığını göstermektedir [6]. Şekil 1’de orta karbonlu sentetik metal köpüklere ait örnekler verilmiştir.

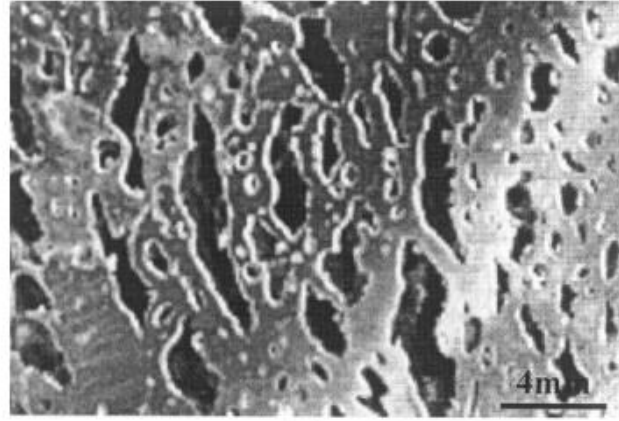


Şekil 1. Orta karbonlu sentetik metal köpük

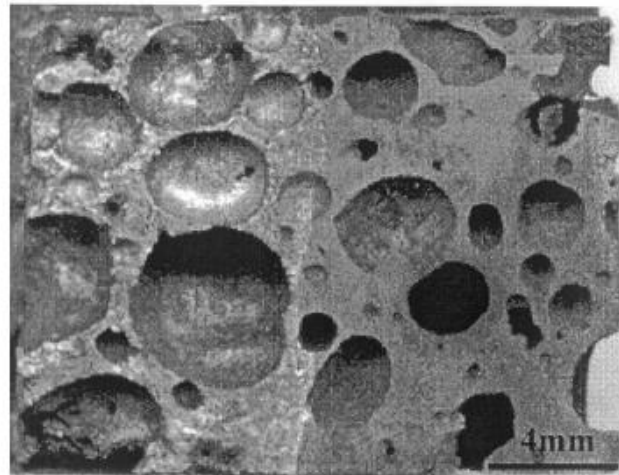
Metalik köpük malzemeler, yapısında %75 - %90 oranında gözenek bulunduran, saf metal ya da alaşımlarından oluşmaktadır. Isıl davranışları, enerji absorbe etme yetenekleri, düşük yoğunlukları, yüksek kesme ve kırılma mukavemetleri ve hafifliklerinden dolayı tercih edilen bir malzeme grubudur [7].

Metalik köpük malzemelerin yapısal kullanım alanları arasında otomotiv, demiryolu ve inşaat endüstrileri, uzay araçları, gemi, spor malzemeleri yapımı ve biyomedikal uygulamalar, işlevsel kullanım alanları arasında ise filtreleme ve ayırma, ısı dönüştürücü, soğutma sistemleri, elektrokimyasal uygulamalar, su arıtma, sıvı muhafaza ve iletimi gibi uygulamalar sayılabilir [8].

Görüldüğü üzere çok geniş bir kullanım alanına sahip olan metalik köpük malzemeler, süngere benzeyen gözenekli bir yapıda üretilirler. Gözenekli yapı üretim şekline göre karıştırma, presleme, sinterleme vb. şekilde olabilir. Doğal köpükle herhangi bir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı bu şekilde adlandırılırlar [9]. Şekil 2’de (a) çelik köpük malzemelerin köpüğün genişlemesi sırasında elipsoidal hücreler için yoğun mikro yapısının resmi ve (b) küresel hücrelerin yoğun mikro yapısının resmi gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. (a) Elipsoidal şekil hücreleri gösteren çelik köpük hücre yapıları ve (b) küresel hücreler [10]

Köpük malzemelerin kullanımı esnasında hangi tür köpük malzeme tercih edileceği iyi analiz edilmelidir. Çünkü metal köpük yapılarla diğer malzemelerin köpük yapıları arasında mekanik özellikler açısından bir takım farklar bulunmaktadır. Örneğin, polimer malzemeler yeterli seviyede rijit değıllerdir. Bunun aksine seramik malzemeler de çok kırılğan bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle, yeterli rijitlik ve tokluğun aynı anda gerekli olduğu yerlerde metalik köpük yapıları kullanmak doğru bir seçim olarak görölmektedir [11,12].

Yüksek dayanım, düşük yoğunluk, titreşim, ses ve enerji sönümleme gibi özelliklerinden dolayı özellikle otomotiv, demir yolu taşımacılığı, gemi yapımı, hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi gibi alanlarda metal köpüğün kullanımına ilişkin yoğun çalışmalar artarak devam etmektedir [13].

2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Mevcut metal köpük üretim yöntemleri, açık hücreli ve kapalı hücreli olarak düzenli değışen, izotropi ve yoğunluklu köpükler yaratabilir [14]. Burada beş temel üretim metodu incelenmiştir. Bunlar, yapısal çelik köpük prototiplerini başarılı bir şekilde yaptığı için toz metalürjisi yöntemi ile köpük üretimi, ticari üretimde aktif olarak kullanıldığı için içi boş küreler yöntemiyle köpük üretimi, düşük maliyetli çelik köpük üretiminde gerekli olan sürekli döküm işlemleri için yüksek potansiyele sahip olduğundan lotus tipi üretim yöntemi, yoğunlukla kullanılan üretim tekniklerinden olduğu için eriyik metal içerisine gaz enjekte etmek suretiyle metal köpük üretimi ve eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi ile metal köpük üretim yöntemleridir [15,16].

2.1.Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi

Başlangıçta alüminyum köpükler için geliştirilen bu yöntem, çelik köpükler için uygulanan ilk yöntemlerden biri olmasına rağmen hala en popüler iki yöntemden birisidir. Bu yöntem temel olarak kapalı hücreli köpükler üreten ve yüksek ölçüde anizotropik hücre morfolojileri geliştirme yeteneğine sahiptir. Bu yöntem 0.65 ile nispi yoğunluklu metal köpüğün yapısal uygulamaları arasında en yüksek etkide olan yöntemlerden biridir [15]. Toz metalurjisi metodu, bir köpürme ile metal tozlarının karışımını içerir. Daha sonra elde edilen karışım sıkıştırılır ve yaklaşık olarak 900-1000MPa basınç altında sinterlenir[17,18]. Metal erime noktasına geldiğinde köpürme maddesi ve elde edilen hücre morfolojisi belirli bir süre-ki bu genelde 15 dakikadır- orada tutulur [17]. Sonuçta ortaya çıkan ürün, ısı ile birlikte ana malzemenin kristal yapısını optimize etmek için kullanılabilir. Toz tutucu yöntemi olarak bilinen bir varyasyon, daha çok köpürtücü madde ve daha basit bir dolgu maddesinin kullanılması ile malzemenin üzerinde kademeli gözeneklilik sağlar [19].

2.2.İçi Boş Küreler Yöntemi ile Metal Köpük Üretimi

Oldukça öngörülebilir mekanik özellikler vermesinin yanı sıra minimum ısı işlemi gerektiren bu metot, metal köpük üretimi için en yaygın iki teknikten ikincisidir [20]. Küre geometrisine bağlı kapalı hücre ya da karışık açık ve kapalı hücre morfolojisi,

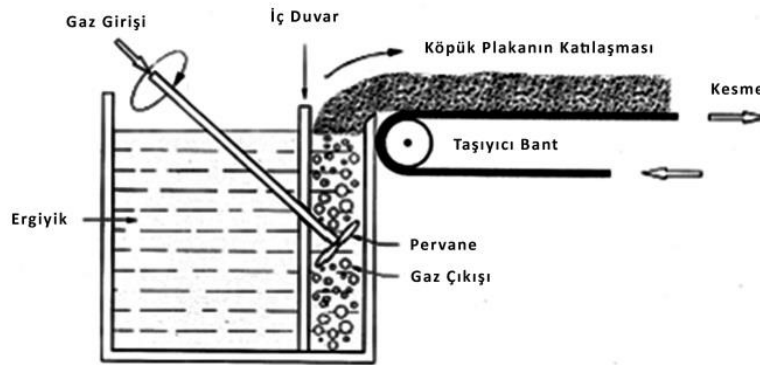
yaklaşık %4 ile %20 arası yoğunlukta yapılması mümkündür. Hücre boyutu kontrollü olan bu yöntem, yüksek miktarda önceden öngörülebilir malzeme özellikleri üretir [21]. Bu işlem sürecinde, önceden üretilmiş içi boş küreler alınır ve yapışkan bir matris ile sağlamlaştırıldıktan sonra başka bir metal matrise dökülerek [22] toz metalurjisi tekniği [23] ile üretimi kapsar. Buna küre sinterleme işlemi de dâhildir [21]. Bu işlem için özel olarak tasarlanmış bir üfleme maddesi ile imal edilir ve daha sonra küreler genişletilerek metal köpüğün son halini ortaya çıkarır [24].

2.3. Lotus Tipi Metal Köpük Üretim Yöntemi

Gasar yöntemi olarak da bilinen lotus tipi üretim yöntemi, yaklaşık olarak % 35'den yüksek anizotropik, kapalı hücre morfolojisi ile % 100 yoğunluğa kadar, yüksek yoğunluklu köpüklerin üretimini yapar. Bu metot hali hazırda, sürekli bir döküm işlemi için yapılmıştır ve büyük bir avantaj sağlar [25]. Ayrıca metal köpükler bu yöntem kullanılarak yüksek çekme mukavemeti ve süneklik kazanırlar. Lotus tipi çelik köpüklerin başka bir avantajı ise, katı ya da sıvı halde olsalar bile çözünürlüğü birçok gazdan fazla olmasıdır. Çelik durumunda, hidrojen, hidrojen-helyum karışımı ya da erimiş çelik içine yayılırlar [26].

2.4. Eriyik Metal İçerisine Gaz Enjektisi ile Metalik Köpük Üretimi

Eriyiğin viskozitesini arttırmak amacıyla silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit parçacıkları kullanılan metal köpük üretim yöntemidir. İlk adım olarak metal matrisli bir kompozit yapılarak bu maddelerden birini içeren bir eriyik oluşturulur. Bu adımda parçacıkların homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için gelişmiş karıştırma teknikleri kullanılır. İkinci adımda ise bu amaç için tasarlanmış olan dönen çarklar veya titreşimli nozulların içerisine enjekte edilen hava, azot, argon gibi gazlar ile eriyik köpürtülür. Bu şekilde eriyik içerisinde çok ince gaz kabarcıkları oluşturularak düzenli bir şekilde dağılması sağlanır. Sonuç olarak, kabarcıklı viskoz karışımı ve metal eriyik oldukça kuru bir metal köpüğe dönüşen sıvının yüzeyine çıkar. Seramik parçacıklar eriyik içerisinde kaldığından köpük nispeten kararlıdır ve bantlı konveyör ile sıvı yüzeyine çıkartılır. Daha sonra soğumasına ve katılaşmasına izin verilerek metal köpük elde edilir [16]. Şekil 3'te eriyik içerisine gaz enjektisi ile metalik köpük üretimine ait düzenek gösterilmiştir.



Şekil 3. Eriyik içerisine gaz enjektisi ile metalik köpük üretimi

2.5. Eriyik Metal İçerisine Köpürtücü Madde Ekleyerek Metal Köpük Üretimi

Metal köpük elde etmenin bir başka yolu ise metal eriyik içerisine doğrudan köpürtücü bir madde ilavesi ile olabilir. Kullanılan köpürtücü maddeler ısı yoluyla ayrıştırılır ve bu şekilde gaz açığa çıkararak metal köpük üretimine yardımcı olur. İlk olarak 680 °C'deki metal eriyiğe %1,5 oranında kalsiyum ilave edilir. Eriyik birkaç dakika karıştırıldıktan sonra kalsiyum tarafından oluşturulan CaO_2 , $CaAl_2O_4$, Al_2Ca çıktıları viskozitenin sürekli olarak kararlı olmasına neden olur ve viskoziteyi artırır. Viskozite istenilen değere ulaştığı zaman sıcak viskozlu sıvıda hidrojen gazı açığa çıkaran köpürtücü madde olarak %1,6 oranında titanyum hidrür (TiH_2) ilave edilir. Eriyik genleşmeye başlayarak köpürme kabını doldurur. Sabit basınç altında gerçekleştirilen bu işlemde sonra kap erime noktasının altına kadar soğutulur ve sıvı köpük katı metal köpüğe dönüşür [16].

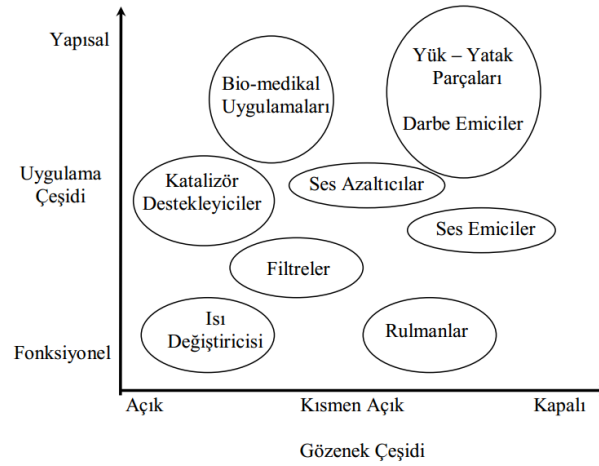
2.6. Diğer Metotlar

Yukarıda sayılan yaygın yöntemlerin dışında bazı yöntemler de bulunmaktadır. Örneğin, seramik ya da polimer ön boşluk doldurmak için kullanılabilir [27-29]. Demir bazlı özel bir metot olan kayma reaksiyonlu köpük sinterleme de orta yoğunluklu metal köpüklerin üretiminde başarılı bir şekilde kullanılabilir [30]. Enjeksiyon bimaterial çubuklar ve kafes çekirdekler dâhil lifli köpükler ve sinterlenmiş lifler olmak üzere birçok değişik çelik köpük imalatı, bilim adamlarının araştırmalarına konu olmuştur [31,32]. Fiber sinterleme lifleri dışarı atıp bunları birlikte sinterlerken, kafes çekirdekleri çeşitli şekillerde orta ölçek kafes içine ince lif büküm veya kaynak içerir [33,34]. Bu lifli köpükler düşük güce sahip olmasına rağmen sandviç panellerde içerik malzemesi olarak kullanılabilirler [14].

3. UYGULAMA ALANLARI

Metalik köpüklerin kullanıldığı sektörler için inşaat ve otomotiv gibi yeni teknolojiye açık olan temel sektörlerin yanı sıra havacılık, biyomalzeme ve gemicilik gibi yeni gelişen sektörleri de sayabiliriz [35].

Köpük metallerin hücre yapısına göre açık veya kapalı olması uygulama alanını belirleyen temel özelliklerden biridir. Şekil 4'de köpük metallerin uygulama alanları hücre çeşidi, yapısal ve fonksiyonel olarak sınıflandırmıştır [36].

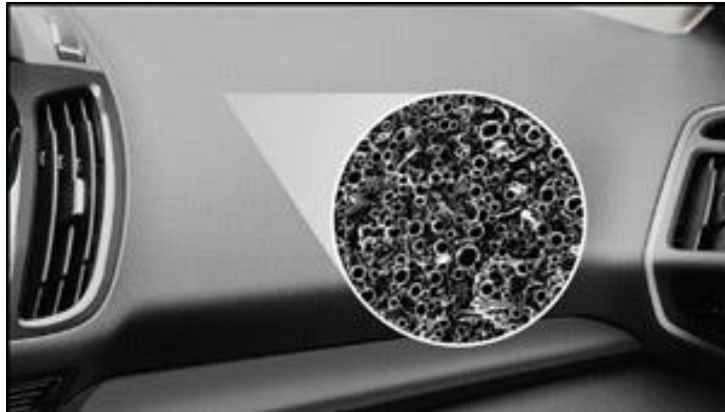


Şekil 4. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları [36]

3.1. Metal Köpüklerin Yapısal Uygulamaları

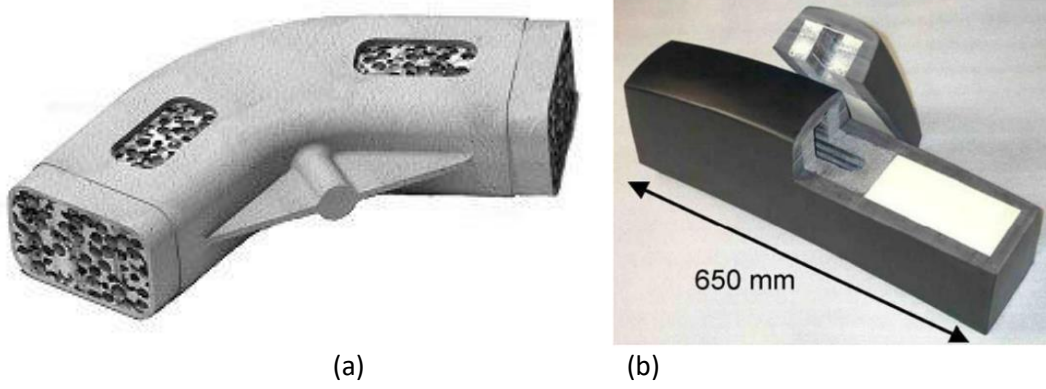
3.1.1. Otomotiv Endüstrisi

Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan metal köpükler, hafifliği, darbe emici özelliği ve sönüm yalıtımı olmak üzere üç ana başlıkta toplanmıştır [37]. Hafif yapılara örnek olarak gösterilebilecek olan alüminyum panel yapılar hafifliği ve sağlamlığıyla araçların ağırlıklarını azaltmak için oldukça faydalı bir malzeme türüdür [38]. Üç boyutlu olarak tabir edebileceğimiz sandviç paneller araçlarda kullanılan çelik panellerle kıyaslandığında yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup %25 daha hafiftir [39]. Şekil 5'te metal köpük malzemelerin otomotiv endüstrisindeki kullanımını gösteren bir örnek verilmiştir.



Şekil 5. Metal köpükler için örnek kullanım alanı

Enerji emilimi olarak bakıldığında ise otomotiv üreticilerinin öncelikli hedefi, olası bir çarpışma durumunda müşterilerini korumaktır. Bunun yanında herhangi bir kaza durumunda aracın çarpışması ile ortaya çıkacak olan yüksek tamir masrafını azaltmak için kullanılan çarpışma kutuları da net bir örnek olarak gösterilebilir. Yine enerji emici olarak ray temelli sistemlerde de kullanılır [40]. Şekil 6'da metal köpüklerin darbe emici olarak kullanım örnekleri (a) araçlar için darbe emici, (b) tramvaylar için darbe emici resimleri gösterilmektedir.

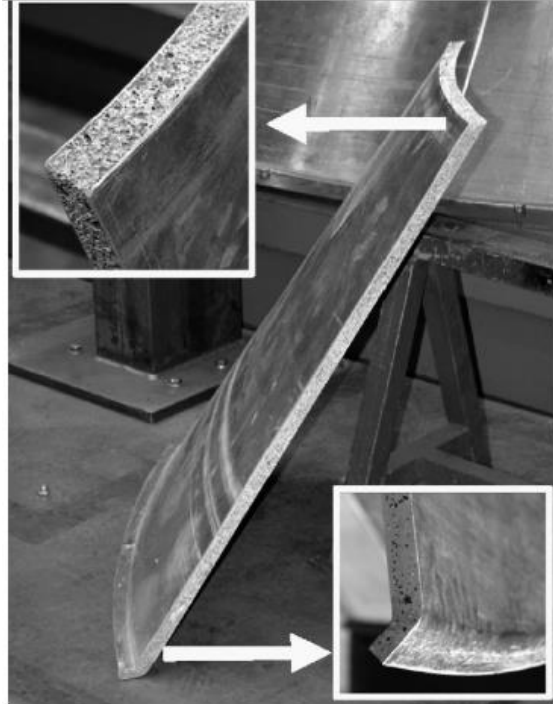


Şekil 6. Metal köpüklerin darbe emici olarak kullanım örnekleri (a) araçlar için darbe emici, (b) tramvaylar için darbe emici

Kinetik enerji dağıtımı, metal köpüklerin ana güçlerinden biridir. Köpük verimi ile sınırlı destekli yük transferi daha kontrollü bir yavaşlama ile dinamik etkileri azaltır ve sürücünün güvenliğini artırır [41,42].

3.1.1. Hava ve Uzay Endüstrisi

Köpük metallerin hava ve uzay endüstrisindeki kullanımı otomotiv endüstrisine benzer özellikler sergilemektedir [43]. Uzay endüstrisinde kullanılan petek şekilli yapıların maliyeti metal köpük yapılarla karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir [36].



Şekil 7. Flanş ve üst kenar ayrıntılarıyla kalibre koni segmenti [44]

3.1.2. Gemi Endüstrisi

Metal köpükler gemi inşasında çok önemli bir yer tutmaktadır. Günümüz yolcu gemileri neredeyse tamamen metal köpük yapılardan oluşmaktadır. Metalik köpüklerin gemi endüstrisindeki uygulamalarına bakıldığında, ambar platformları, gemi bölmeleri, fişek ambarları gibi etkin uygulamalar karşımıza çıkmaktadır [37].

3.1.3. İnşaat Endüstrisi

Metal köpükler mükemmel sertlik-ağırlık oranı sergilerler [4]. Bu nedenle çok hızlı asansörlerde hafiflik çok büyük önem arz etmektedir. Diğer yandan bu inşa tekniği güvenlik kurallarına da uygun olmalıdır. Yangın çıkışları, düşük termal iletkenliği ve yangına gösterdiği direnç nedeniyle metalik köpük malzemelerden tercih edilirler [38].

3.1.4. Demiryolu Endüstrisi

Metal köpük malzemeler, arzu edilen şekilde ayarlanabilen titreşim özellikleri nedeniyle yüksek hızlı demiryollarında ve yine titreşime karşı vermiş olduğu olumlu tepki nedeniyle zemin kaplama malzemesi olarak demiryolu endüstrisinde çok önemli bir yere sahiptir [45].

3.1.5. Makine Gövde İmalatı

İmalat sanayinde kullanılan makinelerin hızlı ve hafif olmaları imalat kolaylığı ve uygulanabilirliği açısından son derece önemlidir. Bununla birlikte, makineler çalışma süresince yoğun bir titreşim ve buna benzer dinamik yükler altında kalırlar. Bu sorunları ortadan kaldırmak için metal köpüklerin enerjiyi absorbe etme özelliklerinden ciddi oranda faydalanılmaktadır [46]. Şekil 8’de metal köpüklerin makine gövdesi olarak kullanımına ait yakın çekim bir görünüm verilmiştir.



Şekil 8. Metal köpüklerin makine gövdesi olarak kullanımı

3.2. Metal Köpüklerin Fonksiyonel Uygulamaları

3.2.1. Susturucular

Özellikle kompresör gibi cihazlarda gaz çıkışı sırasında yüksek derecede gürültü oluşmaktadır. Bu tarz durumlarda gaz çıkış bölgesine alüminyum köpükten üretilmiş susturucular takılarak bu gürültü önlenmeye çalışılır [36].

3.2.2. Filtreler

Büyük depo hacmi nedeniyle alüminyum köpük metaller, katı parçacıkları gaz ya da sıvı maddelerden veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için kullanılabilir [36].

3.2.3. Diğer Uygulamalar

Metalik köpükler fonksiyonel anlamda susturucu ve filtre olarak kullanılmasının haricinde basınç azaltıcı, yağlama yatağı, püskürtücü, alev perdesi, soğutucu ve ısı değiştirici olarak da kullanılabilir [36,47].

4. MALZEME ÖZELLİKLERİ

4.1. Yapısal Özellikler

Metal köpüklerin malzeme özellikleri deneysel yöntemlerle ölçülebilir. Literatüre bakıldığında metal köpük malzemelerin özellikleri olduğu malzeme temeli ve bağlı yoğunlukla yüksek derecede ilişkilidir [4]. Bununla birlikte malzeme özellikleri üretim metodu, hücre boyutu, morfoloji ve test numunesinin büyüklüğüne bağlı olarak da değişiklik gösterebilir [48-50]. Örneğin lotus tipi metal köpükler çekme ve sıkıştırılma direnciyle sonuçlanan anizotropik boşluklara sahiptir [12,51]. En sık ölçülen mekanik özellik, basınç akma dayanımı veya plato gücü olarak tanımlanabilir. Plato gücü genellikle ölçülen akma mukavemetinden %5 daha yüksektir [4]. Çelik köpüğün sıkıştırılma akma dayanımı yoğunluğu yüksek numuneler için yaklaşık olarak 1 MPa ile 300 MPa arasında değişebilir.

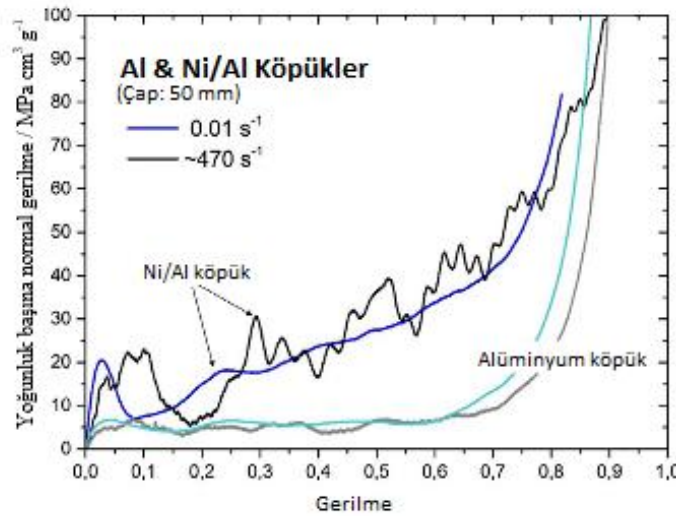
Diğer mekanik özellikler olarak ise, elastikiyet modülü, Poisson oranı, nihai çekme mukavemeti, yoğunlaştırma gerginliği ve enerji emme özelliği daha nadir incelenmektedir. Ölçülen elastikiyet modülü değerleri 200 ile 12.000 MPa arasında değişiklik gösterir ancak yüksek bir modüle sahip olması beklenen lotus tipi ve diğer köpükler için ölçülen herhangi bir değer mevcut değildir [14]. Metal köpükler için Poisson oranı genel olarak 0.3 elastik baz metal değeri olduğu kabul edilir ancak içi boş küre tipi köpükler için deneyler imalat metodu ve yoğunluğuna bağlı olarak 0.4 ile 0.9 arasında değişiklik gösterir [52,53]. Yoğunlaştırma ve enerji absorbe etme yeteneği birçok deneyde incelenir ancak bunlardan sadece birkaçı yayınlanır. Gerçekleştirilen bir kaç gerilme deneyinde gerilme kuvvetleri düşük yoğunluklu sinterlenmiş içi boş küreler için 1 MPa, gözenek yönüne paralel anizotropik lotus tipi köpükler için 300MPa ve yukarı şeklinde belirlenmiştir [18,21].

4.2. Yapısal Olmayan Özellikler

Yapısal olmayan testler, bağıl yoğunluk dışındaki diğer parametrelerle doğrudan ilgilidir. Bunlar, geçirgenlik için hücre morfolojisi [54], akustik absorpsiyon için hücre boyutu [55] ve ısı iletkenliği için hücre duvarı kalınlığıdır [56]. Bununla birlikte, birincil prediktif parametrenin hala göreceli yoğunluk olduğu varsayılır [14].

5. İŞLENEBİLİRLİK YÖNÜNDEN BAZI METAL KÖPÜK UYGULAMALARI

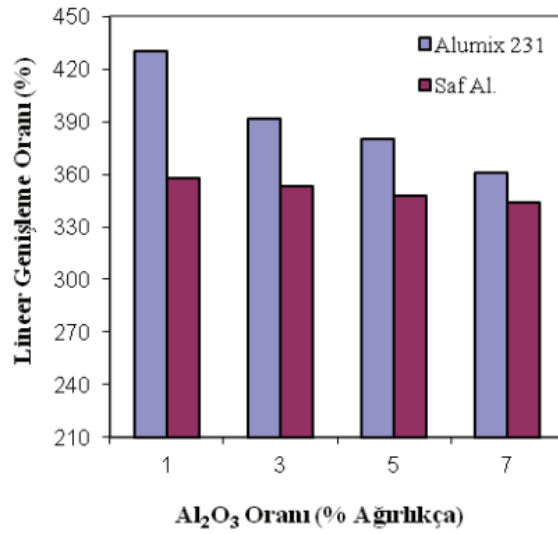
Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kompozit metal köpüklerin termal davranışları ve alev geciktirici özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçları 304L paslanmaz çeliğin özellikleri ile karşılaştırılmış ve kompozit metal köpüklerin mükemmel ısı yalıtımı, alev geciktiriciliği, hafifliği ve enerji absorbe edebilme özellikleri sayesinde nükleer atık tüketim tankı yapımında önemli bir alternatif olacağı tespit edilmiştir [57]. Jung ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmada, yarı statik basınç testleri yapılarak açık hücreli alüminyum köpükler ile yeni nesil Ni/Al kompozit köpükler arasındaki gerilim hızı etkileri incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, alüminyum köpükler plastik çöküşe duyarlı tek gerilme oranına sahip iken Ni/Al köpüklerin genel bir gerilme hızı gösterdikleri ortaya çıkmaktadır. Yani, birim ağırlıktaki Ni/Al köpükler ile alüminyum köpükler gerilim açısından karşılaştırıldığında Ni/Al köpüklerin daha üstün olduğu görülmüştür [58].



Şekil 9. Yarı statik yükler altında Alüminyum köpük ve Ni/Al köpüklerin karşılaştırılmasındaki gerilme-deformasyon diyagramı (açık mavi: alüminyum köpük, koyu mavi: Ni/Al köpük). Yaklaşık 470 s^{-1} gerilme hızında (gri: alüminyum köpük, siyah: Ni/Al köpük) [58].

Alvandi-Tabrizi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kompozit metal köpüklerin yüksek basınç altında davranışları incelenmiştir. Araştırmacılar deneyler esnasında kullanılacak numuneleri toz metalürjisi ve döküm yöntemleri ile elde etmişlerdir. Basınç miktarının etkisi incelenirken numune geometrisi, basınç yükleme hızı, küre şekli ve enerji emme kapasitesi gibi parametreleri sabit tutarak çelik-çelik ve alüminyum-çelik

temelli kompozit köpük malzemeler üzerinde uygulamışlardır. Deneyler sonucu elde edilen verilere göre, özellikle %30'un altındaki gerilme seviyelerinde, kompozit metal köpüklerin gücünde artış gözlenmiştir [59]. Gökmen ve Türker yaptıkları çalışmada, toz metalurjisi yöntemi ile saf alüminyum ve ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Cu %2,5-Mg %0,5-Si %14) esaslı Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozit köpükler üreterek Al_2O_3 takviyesinin lineer genişleme, parça yoğunluğu ve gözenek boyutuna etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda araştırmacılar, saf alüminyumun lineer genişlemeyi etkilemediğini, Alumix 231 takviyesinin ise lineer genişlemeyi azalttığını görmüşlerdir. Ayrıca, ön alaşımlı Alumix 231 matrisli köpük metallere elde edilen gözenek yapılarının, saf Al matrisli köpük metallere elde edilen gözenek yapılarına göre daha düzenli ve homojen bir dağılım sergilediğini gözlemlemişlerdir [60].



Şekil 10. Al ve Alumix 231 esaslı malzemeler içerisindeki Al_2O_3 oranına bağlı olarak lineer genişlemedeki değişim [60].

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Metal köpüklerin mevcut mühendislik uygulamalarında çok yönlü olarak kullanılabilmesi gözükmektedir. Bütün çalışmalar bize metal köpüklerin en etkin özelliklerinin minimum ağırlıkla beraber enerji absorbe etme özelliği ve yüksek dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır.

Metal köpük üretimi artık ticari yönden ciddi bir ivme kazanmıştır. Toz metalurjisi, içi boş küreler, lotus tipi, köpük sinterleme, eriyik metal içerisine gaz enjekte etme ve eriyik metal içerisine köpürtücü madde ilavesi gibi üretim yöntemlerinden faydalanılarak malzemeye benzersiz özellikler kazandıran bu malzeme üretme alanına ilgi artarak devam etmektedir. Hem açık hem de kapalı hücreli köpükler anizotropik bazlı veya başka şekillerde tek hücre morfolojisi ile elde edilmektedir.

Metal köpüklerin malzeme özellikleri arasında köpüğün belirli türlerinde yüksek enerji absorbe etme özelliği, geniş elastik modül aralığı, hafiflik ve yüksek süneklikten bahsedilebilir. Bu yapısal özellikler, bu tür malzemeler için yeni uygulamalar

geliştirilmesi açısından köpüğün ısı iletkenliği, yüksek titreşim emme özelliği gibi yapısal avantaja sahip olmayan malzemeler ile birleştirilebilir.

Metal köpüklerin mevcut mühendislik uygulamalarında çok yönlü olarak kullanılabilereği birçok araştırma ile göz önüne serilmiştir. Bütün çalışmalar bize metal köpüklerin en etkin özelliklerinin minimum ağırlıkla beraber enerji absorbe etme özelliği ve yüksek dayanım olduğunu ortaya koymaktadır. Çelik köpükler, imalat alanında hala çözüm bekleyen birçok soruna potansiyel çözüm olarak bize eşsiz bir fırsat sunmaktadır. Metal köpüklere ait daha kapsayıcı malzeme testleri, daha fazla üretim yöntemi araştırmaları ile oluşturulacak olan metal köpükler aracılığıyla birçok sektöre ait malzeme boşluğunu doldurmada çok fazla yol kat edilebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1]. Jerz, J., 2010, "Selection of Engineering Materials and Advanced Technologies For Specific Industrial Applications", Journal: Materials Science and Technology, ISSN: 1335-9053, 1-12, Slovakia.
- [2]. Jerz, J., (2009), "Research, Development and Technology Transfer (R & D & TT) in the Field of Engineering Materials and Related Technologies", Advances in Technology, Education and Development, Wim Kouwenhoven (Ed.), ISBN: 978-953-307-011-7, INTECH.
- [3]. Gibson, L.J., and Ashby, M.F., (1997), "Cellular Solids – Structure and Properties", 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge.
- [4]. Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L.J., Hutchinson, J. W. and Wadley, H. N. G., (2000) "Metal Foams – A Design Guide", Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [5]. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S. and Kitahara, A., (2000), Adv. Eng. Materials 2, pp. 179-183.
- [6]. Kádár, Cs., Kenesei, P., Lendvai, J. and Rajkovits, Zs., (2005), "Energy Absorption Properties Of Metal Foams", VI. évfolyam 1.szám 2005. Január Volume 6 - N^o 1 – January.
- [7]. Ozan, S., ve Katı, N., (2011), 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey
- [8]. Başpınar, M, S., Yurtcu, Ş., (2011), "Metalik Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Matematiksel Modeller" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, (8) 69-78.
- [9]. Yavuz, İ., Başpınar, S., M., Bayrakçeken, H., (2009), "Metalik Köpük Malzemelerin Taşıtlarda Kullanımı" Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (3) 43-51.
- [10]. Park, C., Nutt, S.R., (2001), "Anisotropy and strain localization in steel foam", Materials Science and Engineering A299 68 – 74.

- [11]. Avarisli, O., Uğuz, A., (2003), “Metalik Köpük Malzemelerin Otomotiv Endüstrisinde Kullanılması” VIII.Otomotiv ve Yan Sanayii Sempozyumu.-5.
- [12]. Yi, Fi., Haiwu Z., Zhengang Z., Fangqiou Z., (2002), "The Microstructure and Electrical Conductivity of Aluminum Alloy Foams", *Material Chemistry and Physics*, 78, 196–201.
- [13]. Türker, M., (2009), “Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), Karabük Üniversitesi, Karabük, 1-6.
- [14]. Smith B.H., Szyniszewski S., Hajjar J.F., Schafer B.W., Arwade S.R., (2012), “Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties”, *Journal of Constructional Steel Research* 71, 1–10.
- [15]. Kremer, K., Liszkiewicz, A., and Adkins, J., (2004), Development of steel foam materials and structures. US DOE and AISI final report DE-FC36-97ID13554 performed by Fraunhofer USA — Delaware Center for Manufacturing and Advanced Materials, Newark, DE.
- [16]. Banhart, J., (2000), “Manufacturing Routes for Metallic Foams, *JOM*, 23-25.
- [17]. Muriel, J., Sanchez, R. A., Barona, M. W., and Sanchez, S. H., (2009), “Steel and gray iron foam by powder metallurgical synthesis”, *Supl Rev Latinoam Metal Mater*, S1 (4):1435–40.
- [18]. Park, C., and Nutt, SR., (2000), “PM synthesis and properties of steel foams”, *Mater Sci Eng A*, A288:111–8.
- [19]. Nishiyabu, K., Matsuzaki, S., and Tanaka, S., (2005), “Effectiveness of micro porous metal components with functionally graded structures”, *MetFoam 2005: 4th International Conference on Porous Metals and Metal Foaming Technology*. Japan Institute of Metals (JIMIC-4), 21–23 September 2005. p. 325–8. Kyoto, Japan.
- [20]. Rabiei, A., and Vendra, L.J., (2009) “A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams”, *Mater Lett* ,63:533–6.
- [21]. Friedl, O., Motz, C., Peterlik, H., Puchegger, S., Reger, N., and Pippan, R., (2007), “Experimental investigation of mechanical properties of metallic hollow sphere structures”, *Metall Mater Trans B*, 39(1):135–46.
- [22]. Brown, J.A., Vendra, L.J., and Rabiei, A., (2010), “Bending properties of Al–steel and steel–steel composite metal foams”, *Metall Mater Trans A*.
- [23]. Neville, B., P., and Rabiei, A., (2008), “Composite metal foams processed through powder metallurgy”, *Mater Des*, 29:388–96.
- [24]. Daxner, T., Tomas, R.,W., and Bitsche, R., D. (2007), “Mechanics of semi-expanded hollow sphere foams”, *MetFoam 2007: Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*. 5–7 September 2007, Montreal, Canada;. p. 169–72.

- [25]. Hyun, S., K. Park, J., S. Tane, M., and Nakajima, H.,(2005), “Fabrication of lotus-type porous metals by continuous zone melting and continuous casting techniques”, MetFoam 2005: 4th International Conference on Porous Metals and Metal Foaming Technology. Japan Institute of Metals (JIMIC-4), Kyoto, Japan.
- [26]. Ikeda, T., Aoki, T., and Nakajima, H.,(2007), “Fabrication of lotus-type porous stainless steel by continuous zone melting technique and mechanical property”, Metall Mater Trans A, 36A:77–86.
- [27]. Verdooren, A., Chan, H. M., Grenestedt, J. L., Harmer, M. P., and Caram, H. S.,(2005), “Fabrication of low density ferrous metallic foams by reduction of ceramic foam precursors”, J Mater Sci, 40:4333–9.
- [28]. Verdooren, A, Chan, H. M., Grenestedt, J. L., Harmer, M. P., Caram, H. S.,(2005), “Fabrication of low density ferrous metallic foams by reduction of chemically bonded ceramic foams”, J Am Ceram Soc, 89(10):3101–6.
- [29]. Adler, J., Standke, G., and Stephani, G.,(2004), “Sintered open-celled metal foams made by replica-tion method - manufacturing and properties on example of 316L stainless steel foams” Proceedings of the Symposium on Cellular Metals and Polymers (CMAp). Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Fürth, Germany, p. 89–92.
- [30]. Angel, S., Bleck, W., and Scholz, P. F., (2004), “Slip Reaction Foam Sintering (SRFS) — Process: Production Parameters Characterisation”, Proceedings of the Symposium on Cellular Metals and Polymers (CMAp). Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Fürth, Germany.
- [31]. Weise, J., Beltrame, D. S. G., and Salk, N.,(2010), “Production and properties of syntactic steel and iron foams with micro glass bubbles”., (unknown).
- [32]. Tuchinsky, L.,(2005), “Novel fabrication technology for metal foams”, J Adv Mater ,37 (3):60–5.
- [33]. Lee, B. K., Jeon, I., Kang, K. J.,(2007), “Compressive characteristics of WBK truss cores. Met-Foam”, Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, Montreal, Canada, p. 177–80.
- [34]. Kostornov, A. G., Kirichenko, O. V., Brodnikovskii, N. P., Guslienکو, Y.A., and Klimenko, V. N.,(2008), “High-porous materials made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties”, Powder Metall Metal Ceram, 47(5–6):295–8.
- [35]. Güven, Ş., Y., (2011), “Toz Metalurjisi ve Köpükler”, SDU Journal of Technical Sciences, (2), 22-28.
- [36]. Banhart, J., (2001), “Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams”, Progress in Materials Science, 46, 559 -632.
- [37]. Banhart, J., (2003), “Aluminium Foams for Lighter Vehicles”, International Journal of Vehicle Design, 1-19.
- [38]. Yavuz, İ., (2010), “Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları”, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED), Cilt:2, No:1, 49-58.

- [39]. Yu, C. J., Eifert, H., Banhart, J., ve Baumeister, J., (1998), “Metal Foams”, *Advanced Materials&Processes*, 45-47.
- [40]. Sertkaya, A.A.2008. “The Production of Aluminium Foam As Heat Exchanger & Heat Transfer Modelling,” Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Selçuk University, Konya.
- [41]. Lefebvre, L., Banhart, J., Dunand, D., (2008), “Porous metals and metallic foams: current status and recent developments”, *Adv Eng Mater*, 10:775–87.
- [42]. Cardoso, E., Oliveira, B., (2010), “Study of the use of metallic foam in a vehicle for an energy economy racing circuit”, *Materialwiss Werkstofftech*, 41:257–64.
- [43]. Uzun, A., Islak, S., (2009), “Metalik Köpüklerin Uygulama Alanları”, *Paslanmaz Demir Çelik ve Sac İşleme Teknolojileri Dergisi*, 58-61.
- [44]. Schwingel, H. D.,- Seeliger, W., Vecchionacci, C., Alwes, D., Dittrich, J., (2007), “Aluminium foam sandwich structures for space applications”, *Acta Astronautica* 61, 326 – 330.
- [45]. Neugebauer, R., Hipke, T., Hohlfeld, J., and Thümmel R., (2004), “Metal foam as a combination of lightweight engineering and damping”, In: Singer RF, Koerner C, Alstaedt V, Muenstedt H, editors. *Cellular metals and polymers*, 2005. p. 13–8.
- [46]. Neugebauer, R., Lies, C., Hohlfeld, J., and Hipke, T., (2007), “Adhesion in sandwiches with aluminum foam core”, *Prod. Eng. Res. Devel.*, 1:271-278.
- [47]. Sertkaya, A. A. (2013), “Metal Köpük Isı Değiştiriciler,” *Mühendis ve Makina*, cilt 54, sayı 646, s. 22-26.
- [48]. Fathy, A., Ahmed, A., and Morgan, H.,(2007), “Characterization and optimization of steel foam produced by slip casting process”, *MetFoam 2007: Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, Montreal, Canada; 2007. p. 161–4.
- [49]. Fazekas, A., Dendievel, R., Salvo, L., and Brechet, Y.,(2002), “Effect of microstructural topology upon the stiffness and strength of 2D cellular structures”, *Int J Mech Sci*, 44: 2047–66.
- [50]. Andrews, E. W., Gioux, G., Onck, P., and Gibson, L. J.,(2001), “Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results”, *Int J Mech Sci*, 43:701–13.
- [51]. Kujime, T., Hyun, S. K, and Nakajima, H., (2005), “Mechanical properties of lotus-type porous carbon steel by continuous zone melting”, *MetFoam 2005: 4th International Conference on Porous Metals and Metal Foaming Technology*. Japan Institute of Metals (JIMIC-4), Kyoto, Japan, p. 525–8.
- [52]. Kostornov, A. G., Kirichenko, O. V., Brodnikovskii, N. P., Gusliencko, Y.A., and Klimenko, V. N.,(2008), “High-porous materials made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties”, *Powder Metall Metal Ceram*, 47(5–6):295–8.

- [53]. Lim, T. J., Smith, B., and McDowell, D. L., (2002), “Behavior of a random hollow sphere metal foam”, *Acta Mater*, 50:2867–79.
- [54]. Khayargoli, P., Loya, V., Lefebvre, L. P., and Medraj, M.,(2004), “The impact of microstructure on the permeability of metal foams”, *CSME 2004 Forum*, p. 220–8.
- [55]. Tang, H. P., Zhu, J. L., Wang, J. Y., Ge, Y., and Li, C., (2007), “Sound absorption characters of metal fibrous porous material”, *MetFoam 2007: Proceedings of the 5th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, Montreal, Canada, p. 181–4.
- [56]. Zhao, C. Y., Lu, T. J., Hodson, H. P., and Jackson, J. D., (2004), “The temperature dependence of effective thermal conductivity of open-celled steel alloy foams”, *Mater Sci Eng A*, 267:123–31.
- [57]. Chen, S., Marx, J., and Rabiei, A., (2016), “Experimental and computational studies on the thermal behavior and fire retardant properties of composite metal foams”, *International Journal of Thermal Sciences* 106, 70-79.
- [58]. Jung, A., Pullen, A., Ad., and Proud, W., G., (2016), “Strain-rate effects in Ni/Al composite metal foams from quasi-static to low-velocity impact behaviour”, *Composites: Part A* (85), 1-11.
- [59]. Alvandi-Tabrizi, Y., Whisler, D., A., Kim, H., and Rabiei A., (2015), “High strain rate behavior of composite metal foams”, *Materials Science & Engineering A*, 631, 248-257
- [60]. Gökmen, U., ve Türker, M., (2012), “Al₂O₃ İlavesinin Alüminyum Ve Alumix 231 Esaslı Metalik Köpüğün Köpürme Özelliklerine Etkisi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol 27, No 3, 651-658.