



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Toz metal Al köpükler: Üretimi, çeşitleri ve kullanım alanları

## *Powder metal Al foams: Production, types and usage areas*

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet TÜRKER<sup>1</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7028-0587

**To cite to this article:** Türker, M., “Toz Metal Al Köpükler: Üretimi, Çeşitleri ve Kullanım Alanları”, *Journal of Polytechnic*, 27(6): 2335-2356, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Türker, M., “Toz Metal Al Köpükler: Üretimi, Çeşitleri ve Kullanım Alanları”, *Politeknik Dergisi*, 27(6): 2335-2356, (2024).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1463820

# Toz Metal Al Köpükler: Üretimi, Çeşitleri ve Kullanım Alanları

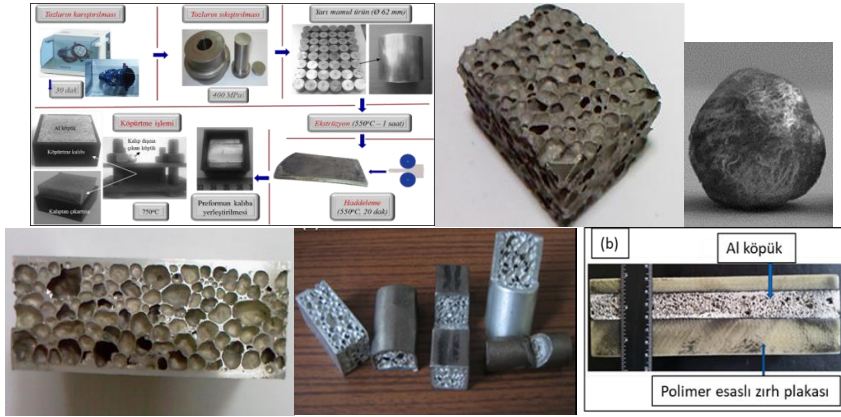
## Powder Metal Al Foams: Production, Types and Usage Areas

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Bu makalede toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al esaslı köpükler genel olarak ele alınmıştır. / In this article, Al-based foams produced by powder metallurgy are discussed in general.
- ❖ Toz metalürji üretim yöntemleri genel olarak ele alınmış ve klasik köpük üretimi, sandviç köpük üretimi ve küresel köpük üretim yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. / Powder metallurgy production methods are discussed in general and information about classical foam production, sandwich foam production and spherical foam production methods are given
- ❖ Genel olarak köpürtücü madde ve takviye elamanı miktarlarının köpürebilirliğe etkileri belirlenmiştir. / In general, the effects of foaming agent and reinforcement amounts on foamability were determined.
- ❖ Metalik köpüklerin otomobiller başta olmak üzere kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir. Information about the usage areas of metallic foams, especially in automobiles, is given.
- ❖ Takviyeli Al köpüklerin zırh malzemesi olarak kullanımı ve balistik özellikleri ele alınmıştır. / The use of reinforced Al foams as armor material and their ballistic properties are discussed..

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu makalede TM yöntemi ile Al esaslı köpük üretimi, özellikleri ve kullanım alanları review şeklinde verilmiştir. Üretim yöntemini gösteren grafik ve üretilen köpük malzemelerin şekilleri aşağıda verilmiştir. / In this article, the production of Al based foam by TM method, its properties and usage areas are given in the form of review. The graph showing the production method and the shapes of the foam materials produced are given below.



**Şekil - Toz metalürji yöntemi ile köpük üretim aşamaları ve farklı yöntemlerle üretilen köpük görüntüleri / Figure - Stages of foam production by powder metallurgy method and images of foam produced by different methods.**

### Amaç (Aim)

Bu makalede toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al esaslı köpüklerin üretimi ve kullanım alanları gerek yazarın kendi çalışmalarından, gerekse geniş bir literatür taraması şeklinde verilmiştir. Ülkemizde bu alanda çalışan bir çok genç araştırmacı olmasına rağmen bu denli geniş bir çalışmayı kapsayan bilgi mevcut olmadığından faydalı olacağı düşüncesi ile böyle bir makale yazılmıştır. / In this article, the production and usage areas of Al-based foams produced by powder metallurgy method are given both from the author's own studies and a wide literature review. Although there are many young researchers working in this field in our country, there is no information covering such a wide range of studies, so this article has been written with the idea that it will be useful.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Al esaslı köpüklerin TM yöntemi ile üretiminde takviyeli ve takviyesiz klasik köpük üretimi, sandviç köpük üretim, küresel köpük üretimi gibi yöntemler ele alınmıştır. Bunlar ilave olarak geniş bir literatür taraması ile çalışmalar desteklenmiştir. / In the production of Al-based foams by TM method, methods such as classical foam production with and without reinforcement, sandwich foam production, spherical foam production are discussed. In addition to these, the studies have been supported by an extensive literature review.

### Özgünlük (Originality)

Literatürde Türkçe olarak hem deneysel çalışmalar, hem de 167 makaleyi kapsayan geniş bir literatür bilgisini içeren böyle geniş kapsamlı bir makale yoktur. / There is no such a comprehensive article in the literature in Turkish that includes both empirical studies and a large body of literature information covering 167 articles.

### Bulgular (Findings)

TM yöntemi ile Al esaslı köpük üretiminde ideal köpürtücü madde miktarı, köpürtücü madde-sıcaklık ilişkisi, ideal takviye elamanı miktarı ve değişik yöntemlerle köpük üretim parametreleri verilmiştir. / The ideal amount of foaming agent, foaming agent-temperature relationship, ideal amount of reinforcing agent and foam production parameters with different methods in Al-based foam production by TM method are given.

### Sonuç (Conclusion)

Al köpüklerin değişik üretim yöntemleri, kullanım alanları anlatılmış olup, bu malzemelerin mükemmel darbe emme özellikleri, yüksek enerji soğurma kapasiteleri ve hafif yapıları sayesinde otomotiv, uçak yapımı, inşaat ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde avantajlar sunduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca malzemenin köpürtme parametreleri ve üretim teknikleri üzerine yapılan araştırmalar, köpüklerin yapısını ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen önemli faktörler olarak belirlenmiştir. / Different production methods and application areas of Al foams are described and it is concluded that these materials offer advantages in various industries such as automotive, aircraft construction, construction and defense due to their excellent impact absorption properties, high energy absorption capacity and lightweight structure. In addition, research on the foaming parameters and production techniques of the material have been identified as important factors affecting the structure of the foams and thus their mechanical and physical properties.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar) çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler./The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Toz Metal Al Köpükler: Üretimi, Çeşitleri ve Kullanım Alanları

*Derleme Makalesi / Review Article*

**Mehmet TÜRKER**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 02.04.2024 ; Kabul/Accepted : 31.05.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 06.08.2024 )

## ÖZ

Son zamanlarda üzerinde yoğun çalışmalar yapılan metalik köpükler %40 ila %90 arasında gözenekli yapıya sahip, gaz ve katı halde bulunan maddelerin bileşimidir. Düşük yoğunluk ve yüksek enerji sönümlenme özelliklerinden dolayı başta otomotiv sektörü olmak üzere uzay ve savunma sanayinde ön plana çıkmaktadır. Bzensiz özelliklere sahip olan metalik köpükler yüksek gözeneklilik oranına rağmen, yüksek mukavemet, düşük ısı iletkenlik ve yüksek enerji emme kapasitesine sahip malzemelerdir. Köpük malzemeler hafif olmalarının yanı sıra enerji sönümlenme özelliğinden dolayı, araç tasarımcıları için cazip hale gelmiş ve çarpışma sırasında araçta meydana gelebilecek hasarın minimuma indirmesi amaçlanmıştır. Ayrıca enerji ve çevre konusunun önemli olduğu günümüzde araç ağırlığının azaltılması, yakıt tüketimini azaltmasına ve aynı zamanda verimliliğin arttırmasına sebep olurken çevreye verilen zararı da en aza indirecektir. Bu makalede toz metalurjisi yöntemi ile üretilen kapalı gözenekli Al esaslı metalik köpük malzemeler hakkında genel bilgi verildikten sonra, özel üretim yöntemlerinden takviyeli ve takviyesiz köpük üretimi, sandviç köpük üretimi, küresel köpük üretimi ve metalik köpük dolu profil üretimi hakkında geniş bilgi verilmiştir. Ayrıca yeni bir uygulama olan, integral zırh malzemesi yapımı ve diğer uygulamalar hakkında genel bilgi verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toz metal Al Köpükler, Üretim Yöntemleri, İntegral zırh malzemesi, Kullanım alanları.

# Powder Metal Al Foams: Production, Types and Usage Areas

## ABSTRACT

Metallic foams, which have been extensively studied recently, are combinations of substances in gas and solid state with a porous structure of between 40% and 90%. Due to its low density and high energy absorption properties, it comes to the fore in the automotive industry, as well as in the space and defense industry. Metallic foams, which have unique properties, are materials with high strength, low thermal conductivity and high energy absorption capacity, despite their high porosity rate. Foam materials have become attractive to vehicle designers due to their lightness and energy absorbing properties, and they aim to minimize the damage that may occur in the vehicle during a collision. In addition, in today's world where energy and environment issues are important, reducing vehicle weight will reduce fuel consumption and increase efficiency while minimizing the damage to the environment. In this article, after giving general information about closed-pore Al-based metallic foam materials produced by the powder metallurgy method, detailed information is given about reinforced and unreinforced foam production, sandwich foam production, spherical foam production and metallic foam-filled profile production, which are special production methods. Additionally, general information is given about the construction of integral armor material, which is a new application, and other general applications.

**Keywords:** Powder metal Al foam, production methods, integral armor material, usage areas.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek gözenekli ve hafif olan metalik köpük malzemeler yeni mühendislik malzemelerinden olup, başlıca uzay ve savunma sanayileri ile otomotiv endüstrisi için geliştirilmiştir. İlk defa 1925 yılında De Meller tarafından rapor edilmiş olan bu ultra hafif malzemeler, düşük yoğunluğu ve tokluğunun yanı sıra yüksek basma dayanımı, rijitlik, yüksek ses ve ısı yalıtım özellikleri, titreşim sönümlenme, yüksek darbe enerji absorpsiyon özelliklerinden dolayı kendine has mekanik özellikler sergiler [1-13]. Bu sebeple üzerinde çok farklı araştırmalar yapılmış ve çok değişik alanlarda kullanım imkanı bulmuştur. Metalik köpükler açık ve kapalı gözenekli olarak üretilmektedirler [1, 14-19]. Şekil 1'de açık ve kapalı gözenekli metalik köpükler, Şekil 2'de de kapalı gözenekli düşük yoğunluklu köpük malzeme

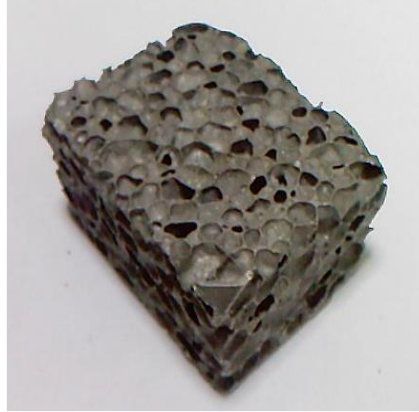
verilmiştir. Bu çalışmada ağırlıklı olarak toz metalurjisi (TM) yöntemi ile üretilen kapalı gözenekli metalik köpükler ele alınmıştır.

Köpük malzemelerde mekanik özellikler başta olmak üzere birçok özelliğinin kontrolü, gözenek boyutu ve şeklinin kontrol edilmesi ile mümkündür [20-23]. Üretim sırasında bunların kontrollü şekilde oluşturulması ile ilgili oldukça detaylı çalışmalar yapılmaktadır [24-28]. Metalik köpüklerin normal ortam şartlarının yanı sıra, yüksek sıcaklık dayanımları ve o sıcaklıklarda yapı ve özelliklerini muhafaza etmeleri önemlidir. Metalik köpükler arasında en popüler olan Al köpüklerle ilgili çalışmalar hem bilimsel, hem de endüstriyel anlamda uzun bir süredir devam etmektedir [3, 5, 29, 30]. Farklı üretim yöntemleri olmasına rağmen TM yöntemi ile son şekle yakın üretilen büyük avantaj sağlamaktadır.

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : mturker@gazi.edu.tr

Bunlara ilave olarak bu malzemelerin kaynak edilebilme, delme ve işlenebilme avantajından dolayı çok farklı mühendislik uygulamalarında kullanım alanı

bulmuşlardır [31-37]. Bu alanlar arasında özellikle düşük yoğunluğun önemli olduğu otomotiv ve uzay sanayi başta gelmektedir [7, 17, 38-40].



**Şekil 1.** Açık ve kapalı gözenekli yapıya sahip Al köpük malzemelerin gözenek yapıları (Pore structures of Al foam materials with open and closed pore structure)

**Şekil 2.** Düşük yoğunluklu kapalı gözenekli Al köpük (Low density closed pore Al foam)

Köpük malzemelerde mekanik özellikler başta olmak üzere birçok özelliğinin kontrolü, gözenek boyutu ve şeklinin kontrol edilmesi ile mümkündür [20-23]. Üretim sırasında bunların kontrollü şekilde oluşturulması ile ilgili oldukça detaylı çalışmalar yapılmaktadır [24-28]. Metalik köpüklerin normal ortam şartlarının yanı sıra, yüksek sıcaklık dayanımları ve o sıcaklıklarda yapı ve özelliklerini muhafaza etmeleri önemlidir. Metalik köpükler arasında en popüler olan Al köpüklerle ilgili çalışmalar hem bilimsel, hem de endüstriyel anlamda uzun bir süredir devam etmektedir [3, 5, 29, 30]. Farklı üretim yöntemleri olmasına rağmen TM yöntemi ile son şekle yakın üretilebilme büyük avantaj sağlamaktadır. Bunlara ilave olarak bu malzemelerin kaynak edilebilme, delme ve işlenebilme avantajından dolayı çok farklı mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulmuşlardır [31-37]. Bu alanlar arasında özellikle düşük yoğunluğun önemli olduğu otomotiv ve uzay sanayi başta gelmektedir [7, 17, 38-40].

Metalik köpükler arasında Al köpük birçok üstün özelliklerinden dolayı yaygın üretim ve kullanım alanı bulmasına rağmen [5, 41-43], endüstriyel tecrübeler hemen hemen her metalin köpük metale dönüştürülebileceğini göstermektedir. Mg, Zn, Pb, Fr, Ni, Ti, Cu, pirinç ve alaşımlarının tamamı [44-51] ile Al<sub>3</sub>Ni, Al-Cu, MMC, metalik cam gibi malzemeler de köpük metal haline getirilebilmektedir [52].

Metalik köpüklerden özellikle takviyeli olanların mekanik özellikleri, polimerik köpükler ve diğer takviyesiz köpük malzemelerle mukayese edildiğinde çok daha üstün özellikler sergilemektedirler [43]. Yüksek sıcaklık dayanımı ve bu sıcaklıklarda yapısını koruması önemli farklılıklarındandır [53].

Birçok malzeme ağırlığın azaltılmasıyla iyi mekanik özellikler ile kombine edilebilmektedir [3- 5]. Bu nedenle yüksek dayanım gerektiren yerlerde çeşitli takviye elemanları ile güçlendirilmiş kompozit köpükler tercih

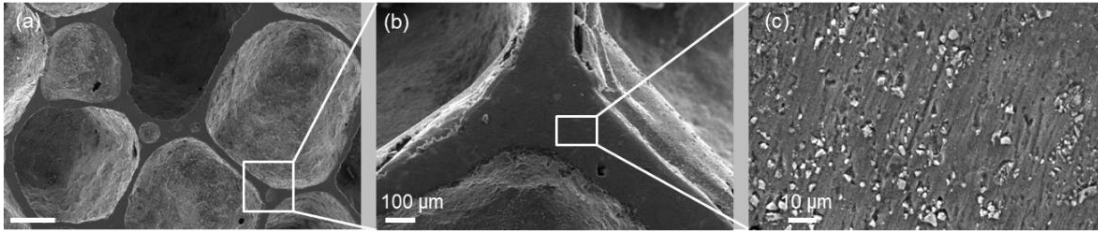
edilmektedir. TM ile köpük üretim aşamasında kararlılığın sağlanabilmesi için takviye elemanı olarak seramik tozlar ilave edilir. Yaygın olarak kullanılan takviye malzemelerine örnek olarak SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub> veya B<sub>4</sub>C verilebilir [54-62]. Bu seramik partikülleri, ergiyiğin viskozitesini artırarak akışı zorlaştırır ve gözenek büyümesi ile sıvının aşağı doğru drenajını azaltmak suretiyle daha homojen gözenek yapısı oluşmasına sebep olur [63, 64]. Homojen gözenek yapısı da mekanik özellikler başta olmak üzere metalik köpüklere has birçok özelliğin malzemenin her tarafında homojen olarak sergilenmesine neden olur. Takviye elemanı olarak ilave edilen partiküller, köpürme işlemi sırasında gaz-sıvı ara yüzeyine yapışır ve köpük duvarlarının eğimini modifiye ederek plato sınırı ile gözenek duvarlarındaki basınç farklarını düşürür [65, 66]. Şekil 3'te SiC takviyeli Al köpükte köpük yapısı ve gözenek duvarında partikül dağılımının SEM görünümü, Şekil 4'te ise farklı oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilmiş Al köpük yapısının kesit görünümü verilmiştir. Matris malzeme ile uyumu ve iyi ıslatması nedeni ile SiC, Al köpüklerde en yaygın kullanılan takviye elemanı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Açık ve kapalı gözenekli metalik köpüklerle ilgili yoğun çalışmalar yapıyor olmasına rağmen kapalı gözenekli metalik köpükler daha yüksek mekanik özellikler sergilemektedir [57, 67-74]. Köpükleştirme teknolojisinin gelişimi, köpük kararlılığının daha bilimsel anlaşılması gereğini ortaya koymuştur ve birçok üniversite ve araştırma enstitüsünde detaylı çalışmalar yapılmıştır [75, 76]. Yapılan çalışmalarda gözenek morfolojisinin yanında, yapı içerisine ilave edilen takviye elemanlarının miktarı, boyutu ve saflığının köpük malzemenin kararlılığı ve mekanik özelliklerinde etkili olduğunu göstermektedir [59, 65, 77-80]. Bu sebeple dayanımın önemli olduğu durumlarda küçük gözenek boyutlu köpüklerin yanısıra takviye edilmiş kompozit köpüklerin kullanımı tavsiye edilmiştir [75].

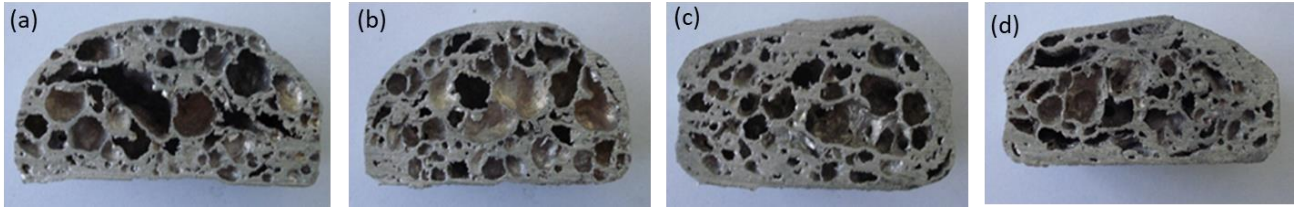


Kapalı gözenekli köpük üretiminde farklı üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan ergitme, döküm ve TM yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Bazı yöntemler üretim şekli ile alakalı olarak isimlendirilirken bazıları imalatçı ticari adlarla veya üretim şekilleri ile adlandırılmaktadır. TM yöntemi ile üretilenlerden yaygın olanları; IFAM [81-83] Alu-Foam, Schunk ve Alulight Mepura yöntemleri olarak sayılabilir [39, 61, 81, 84-87]. Yapılan çalışmalarda köpük malzemenin birçok özelliğinin gözenek yapısı, şekli, boyutu ve köpük yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [2, 20, 25, 88]. Köpük malzeme yoğunluğu ve gözenek boyutunun da köpürtücü madde miktarı, cinsi,

büyüklüğü, köpürtme sıcaklığı ve süresine bağlı olduğunu göstermektedir [22, 89]. Çalışmalar, kullanılan matris ve takviye elemanı toz boyutu ile köpürtücü madde boyutunun da oluşan gözenek yapısı ve gözenek boyutu üzerine etkili olduğunu göstermiştir. Kullanılan köpürtücü madde ile matris malzeme özelliklerinin uyumu önemlidir. Bu özelliklerden en önemlisi maddenin ayrışma sıcaklığıdır. Al köpük üretiminde TiH<sub>2</sub> en yaygın kullanılan köpürtücü madde olmakla birlikte ZrH<sub>2</sub> ve CaCO<sub>3</sub> de kullanılmaktadır. CaH<sub>2</sub>, MgCo<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub>, FeSO<sub>4</sub>, PbCO<sub>3</sub>, PbO, Na<sub>3</sub>N gibi köpürtücü maddeler de çok yoğun olmasa da bazı sıcaklık ve basınç altında kullanılmaktadır [82, 89-91].



**Şekil 3.** SiC takviyeli Al esaslı köpük malzemede (a) homojen kalınlığa sahip gözenek duvarının SEM görünümü, (b) gözenek duvarının birleşme bölgesi, (c) gözenek duvarında takviye elemanı dağılımı (SEM view of (a) homogeneously thick pore wall of SiC reinforced Al based foam material, (b) junction region of the pore wall, (c) reinforcing element distribution in the pore wall) [27, 92].



**Şekil 4.** Farklı oranlarda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Al köpük malzemelerin kesit görünümü. Numuneler sırası ile (a) %1, (b) %3, (c) %5 ve (d) %7 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ihtiva etmektedir (Cross-sectional view of Al foam containing different amounts of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The samples contain (a) 1%, (b) 3%, (c) 5% and (d) 7% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, respectively) [93].

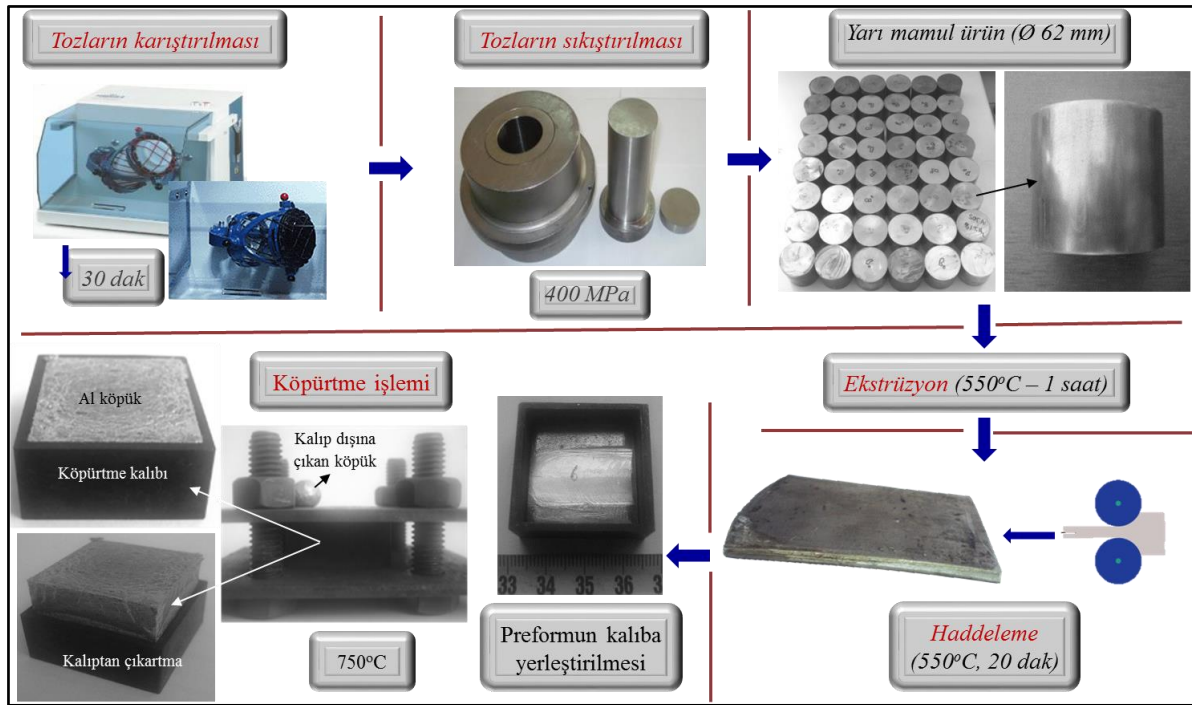
## 2. ÜRETİM YÖNTEMİ (PRODUCTION METHOD)

Çeşitli ticari isimlerle anılan TM köpük üretim yöntemleri birbirlerinden ufak farklılıklar göstermesine rağmen ana üretim yöntemi; metal tozlarına ilave edilen köpürtücü madde veya yer tutucuların karıştırılarak oda sıcaklığında veya sıcak kalıp içerisinde kompakt hale gelinceye kadar preslenmesi ve köpükleştirilmesi şeklindedir [23, 58, 83, 84, 94-99].

### 2.1. Köpürtücü Madde Kullanımı (Use of Foaming Agents)

Al köpük üretiminde süreç Şekil 5'te gösterildiği gibi öncelikli olarak başlangıç tozlarının (köpürtücü madde, Al tozu ve/veya takviye elemanı) karıştırılması ile başlar. Karışım tozlara soğuk presleme işlemiyle ham dayanım kazandırılır [100]. Henüz ham yoğunlukta olan toz bloğu daha sonra sıcak ekstrüze edilir veya üretilen malzemenin boyutları da göz önünde bulundurularak sıcak olarak haddelenir [30, 73, 86, 101, 102]. Böylece yapı kompakt hale gelerek köpürebilir preform

numuneler üretilir [103]. Ancak haddelenme işlemi sonrasında preform malzemelerin kenarlarda çatlaklar oluşur. Daha sonraki köpürtme işlemi sırasında kenar ve kenara yakın bölgelerde oluşan çatlak ve gözeneklerden gazların dışarı kaçmasını önlemek için üretim öncesi bu bölgeler tesviye edilir. Literatür kaynaklarının çoğu, Al alaşımlarının TiH<sub>2</sub> ile köpürtülmesi üzerine odaklanmıştır [104]. Al ve alaşımları için köpürtücü madde olarak kullanılan ve yapıda homojen olarak dağılmış bulunan TiH<sub>2</sub>'ün ergime derecesi civarında ısıtılması neticesinde titanyum ile hidrojenin ayrışması ile ortaya çıkan gaz salınımı ile (hidrojen gaz çıkışı olur) malzemede genleşme görülür ve kapalı gözenekli köpük meydana gelir [73, 101, 105-107]. TiH<sub>2</sub>'deki hidrojen salınımı yaklaşık 450oC başlar ve daha yüksek sıcaklıklarda devam eder [20, 108]. Bu sıcaklık ticari Al alaşımlarının ergime derecesinin çok altındadır. Köpürtme sıcaklığında malzemenin uzun süre bekletilmesi köpük yapının tekrar çökmesine ve ana yapının deforme olmasına sebep olur [43, 107].

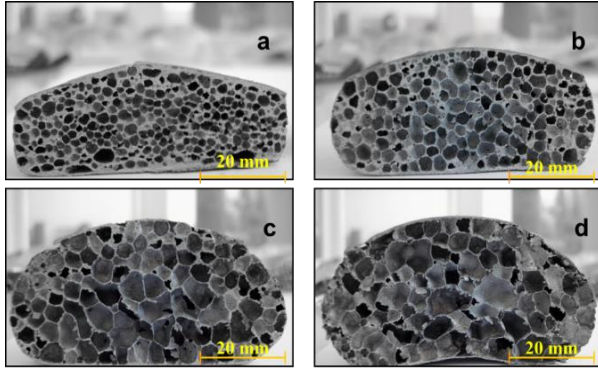


Şekil 5. TM yöntemi ile klasik metalik köpük üretim aşamaları (Stages of classical metallic foam production by PM method) [109]

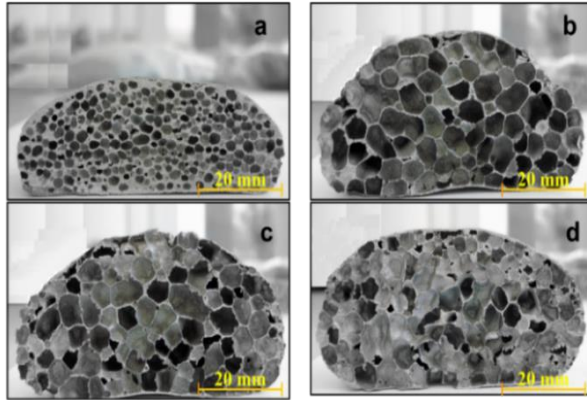
Köpürme aşamasında birçok parametre etkili olmakta ise de Al köpükler %80 gözeneklilik ve preform kalınlığının yaklaşık %400 genişlemesiyle elde edilir [1]. Köpük üretimi sırasında yüksek gözeneklilik oranı ve yüksek lineer genişleme ince cidarlı ve düşük mekanik özelliklere sahip köpük oluşumuna neden olurken, daha düşük gözeneklilik ve düşük lineer genişleme oranları daha kalın gözenek duvarlarına sahip ve daha yüksek mekanik özellikler veren köpük oluşumuna sebep olmaktadır. İnce gözenek yapılı ve daha yüksek mekanik özelliklere sahip köpük üretimi için kısa süreli köpürme işlemi gerçekleştirilirken, uzun süreli köpürme işlemlerinde daha büyük gözenekli ve daha ince gözenek duvarlarına sahip ve dolayısı ile düşük mekanik özellikler gösteren yapı elde edilir. Ancak her zaman yüksek mekanik özellikler istenmeyeceği için ses ve ısı izolasyonu gibi birçok yalıtım işlerinde daha ince köpük duvarlarına sahip ve düşük yoğunluklu metalik köpük tercih edilir.

Köpük yapısını etkileyen bir başka parametre ise köpürtücü madde miktarıdır. Düşük oranlarda köpürtücü madde kullanımı durumunda yüksek yoğunluklu ve ince gözenek yapılı köpük malzeme elde edilirken, yüksek oranlarda köpürtücü madde kullanımı durumunda düşük yoğunluklu, daha iri gözenekli ve ince gözenek duvarlarına sahip köpük yapısı elde edilir [110, 111]. Şekil 6-Şekil 8'de farklı oranlarda köpürtücü madde kullanılarak, farklı sürelerde ve farklı sıcaklıklarda üretilen %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilmiş bir seri malzemenin köpük yapıları verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi düşük oranlarda köpürtücü madde kullanımında veya düşük köpürme sıcaklığında daha ince ve homojen köpük yapısı elde edilirken, köpürtücü madde miktarındaki veya köpürme sıcaklığındaki artışla

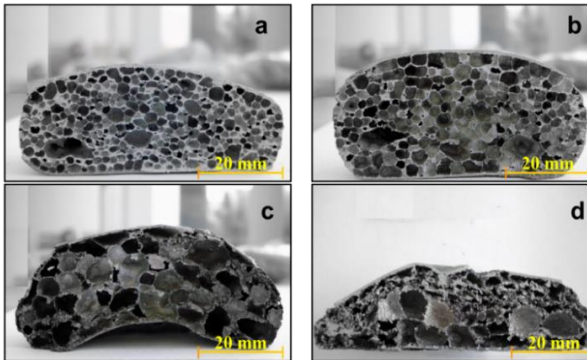
birlikte daha iri gözenek yapılı ve ince gözenek duvarlarına sahip köpükler elde edilmiştir [95, 97]. Bunlara ilave olarak köpürme süresinin gereğinden fazla uzun tutulması da önce köpük yapısının irileşmesine ve daha sonra da Şekil 8.c-d'de görüldüğü gibi köpüklerin çökmesine ve yapının bozulmasına sebep olmaktadır. Şekil 9 ve Şekil 10'da farklı sıcaklık ve farklı oranlarda köpürtücü madde (TiH<sub>2</sub>) miktarının %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Al köpükte lineer genişleme ve yoğunluğa etkisi gösterilmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Alumix 231 (Al-%2,5 Cu, 0,5 Mg, 14 Si) tozlarından üretilen numunelerde %0,5 TiH<sub>2</sub> ilavesinde 650, 690 ve 710oC sıcaklıklarda birbirlerine benzer olarak %250 civarında bir genişleme görülürken %1 köpürtücü madde ilavesinde en fazla genişleme %460 gibi bir oranla 690oC de görülmüştür. En düşük genişleme ise %300 oranı ile 650oC sıcaklıkta elde edilmiştir. 710oC sıcaklıkta ise kısmen çöküşün başlaması nedeniyle %370 gibi bir genişleme görülmüştür. %1,5 ve %2 köpürtücü madde kullanılması durumunda 650 ve 690oC de fazla bir değişiklik olmadığı ve %1 oranında elde edilen değere yakın olarak % 460 gibi oldukça fazla bir genişleme görülmüştür. Bu da bu sıcaklıklarda %1 den daha fazla köpürtücü madde miktarının köpürmeye ilave bir katkısının olmadığını göstermektedir. 710oC' de ise %1,5 ve %2 oranında köpürtücü madde ilavesinin köpüğün belli bir boyuta ulaştığını ve daha sonra çökme başladığını göstermektedir. Bu durum yoğunluğun düşmesine sebep olmaktadır.



**Şekil 6.** %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Alumix 231 tozlarından 650°C'de üretilen numunelerde TiH<sub>2</sub> miktarına bağlı olarak gözenek yapıları. a) %0,5 TiH<sub>2</sub>, b) %1 TiH<sub>2</sub>, c) %1,5 TiH<sub>2</sub> ve d) %2 TiH<sub>2</sub> (Pore structures depending on the amount of TiH<sub>2</sub> in the samples produced at 690°C from Alumix 231 powders containing 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. a) 0.5 TiH<sub>2</sub>, b) 1% TiH<sub>2</sub>, c) 1.5 TiH<sub>2</sub> d) 2% TiH<sub>2</sub>) [110, 111]



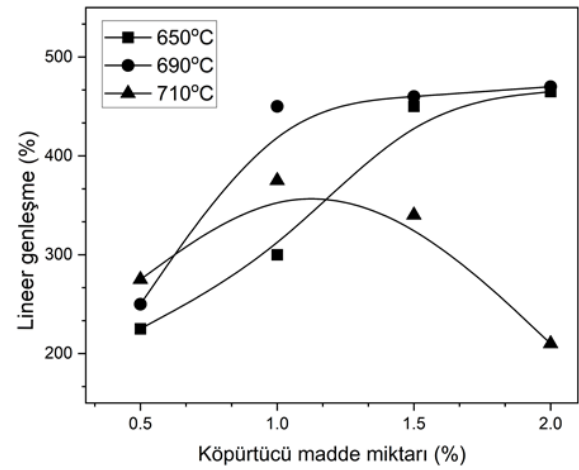
**Şekil 7.** %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Alumix 231 tozlarından 690°C'de üretilen numunelerde TiH<sub>2</sub> miktarına bağlı olarak gözenek yapıları. a) %0,5 TiH<sub>2</sub>, b) %1 TiH<sub>2</sub>, c) %1,5 TiH<sub>2</sub>, d) %2 TiH<sub>2</sub> (Pore structures depending on the amount of TiH<sub>2</sub> in the samples produced at 690°C from Alumix 231 powders containing 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. a) 0.5 TiH<sub>2</sub>, b) 1% TiH<sub>2</sub>, c) 1.5 TiH<sub>2</sub> d) 2% TiH<sub>2</sub>) [110, 111].



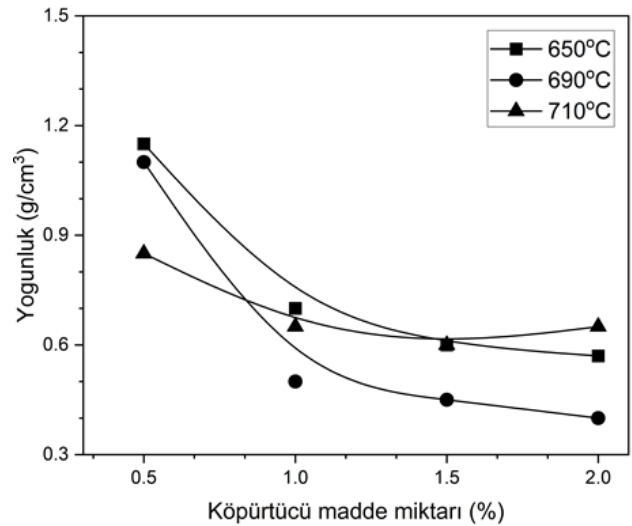
**Şekil 8.** %5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren Alumix 231 tozlarından 710°C'de üretilen numunelerde TiH<sub>2</sub> miktarına bağlı olarak gözenek yapıları. (a) %0,5 TiH<sub>2</sub>, b) %1 TiH<sub>2</sub>, c) %1,5 TiH<sub>2</sub>, d) %2 TiH<sub>2</sub> (Pore structures depending on the amount of TiH<sub>2</sub> in the samples produced at 690°C from Alumix 231 powders containing 5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. a) 0.5 TiH<sub>2</sub>, b) 1% TiH<sub>2</sub>, c) 1.5 TiH<sub>2</sub> d) 2% TiH<sub>2</sub>) [110, 111].

Şekil 10'da 650, 690 ve 710°C'de farklı köpürtücü madde kullanılarak üretilen köpüklere malzemelere ait

yoğunluk grafiği verilmiştir. %0,5 TiH<sub>2</sub> kullanılarak üretilen köpüklerde 1-1,1 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk elde edilirken köpürtücü madde miktarı %1'e çıkarıldığında daha düşük yoğunlukta (0,5-0,7 g/cm<sup>3</sup>) köpük malzemeler üretilmiştir. Daha fazla köpürtücü madde ilavesinde (%1,5 ve %2) önemli bir değişiklik görülmemesine rağmen özellikle %2 TiH<sub>2</sub> ilavesi, gözeneklerde çökmeye sebep olduğu için bu çalışma için ideal köpürtücü miktarını %1 TiH<sub>2</sub> olarak rapor edilmiştir [110, 111]. Şekil 11'de klasik TM yöntemi ile farklı kalıplar kullanılarak Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nde üretilen Al esaslı köpük malzemeler ve kalıp içerisinde köpürtülmüş karmaşık şekilli Al köpük ve kesit görünümü verilmiştir.



**Şekil 9.** Farklı sıcaklık ve köpürtücü madde (TiH<sub>2</sub>) miktarının Al köpükte lineer genişlemeye etkisi [110, 111]. (Effect of different temperature and amount of foaming agent (TiH<sub>2</sub>) on linear expansion of Al foam).



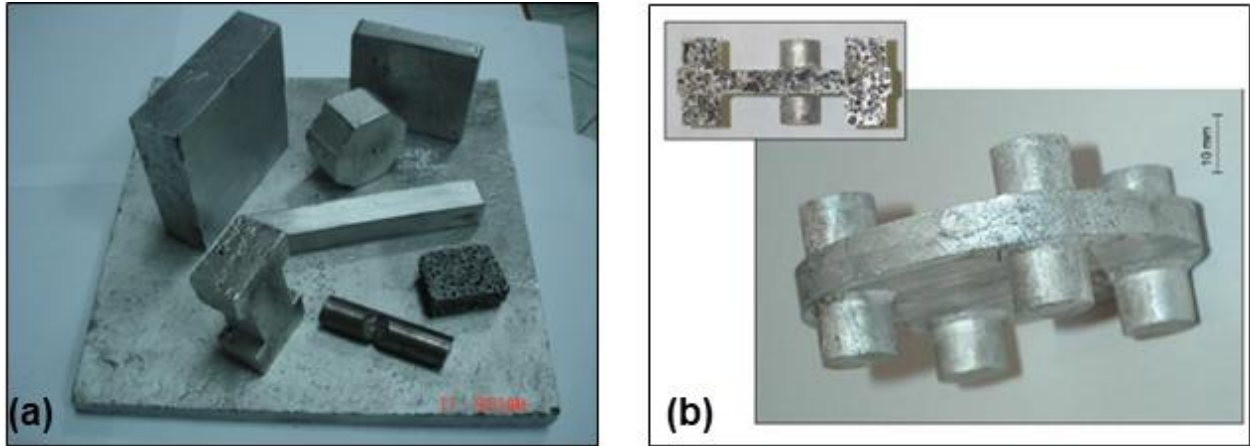
**Şekil 10.** Farklı sıcaklık ve köpürtücü madde (TiH<sub>2</sub>) miktarının Al köpükte yoğunluğa etkisi. (Effect of different temperature and amount of foaming agent (TiH<sub>2</sub>) on density of Al foam) [110, 111].



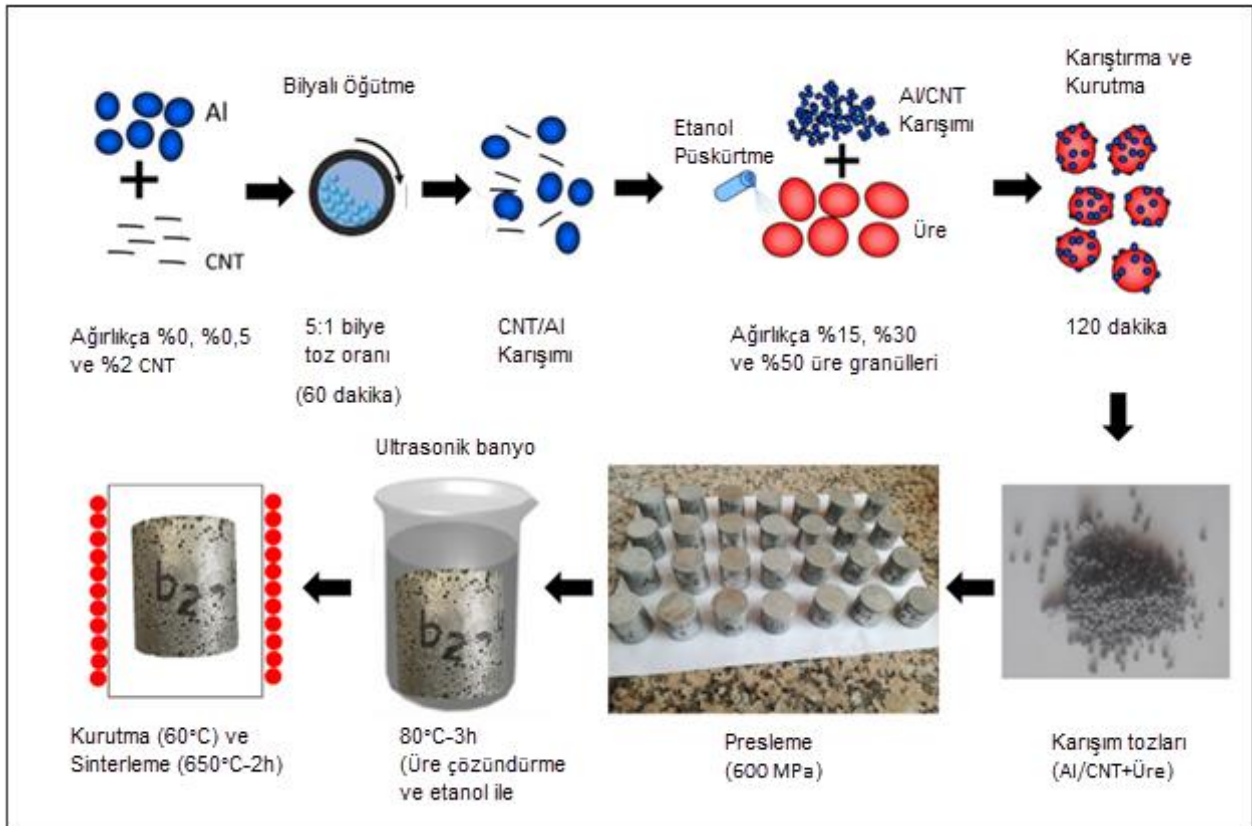
## 2.2. Yer Tutucu Tekniği (Space Holder Technique)

Yer tutucu tekniği, kontrollü gözenek morfolojisine sahip metal köpüklerin üretilmesini sağlar. Şekil 12’de Al köpüklerin yer tutucu tekniği ile üretimi şematik olarak gösterilmektedir [113]. Yer tutucular öncelikle metal tozları ile karıştırılır. Bu yer tutucular, NaCl parçacıkları [114], karbamid parçacıkları [113, 115] veya karbonhidrat parçacıkları [116] gibi malzemeler veya tuzlar olabilir.

İşlem Al tozları ile yer tutucuların karışımı ile başlar. Sonrasında karışım sıkıştırılır veya enjeksiyonla kalıplanır, bu aşamadan sonra ise ısıtma sonucu yer tutucuların çıkarıldığı sinterleme veya sinterleme sonrasında bir çözünme işlemi uygulanır. Nihayetinde, ham yoğunluğa sahip olan numune, yapısal gücünü artırmak amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulur. Al köpüklerin geliştirilmesi için genel olarak basit bir yöntem olan yer tutucu yöntemi, nispeten kolay bir süreçtir [113].



Şekil 11. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi’nde üretilen çeşitli şekillerdeki Al köpükler (a) [27] ve bir kalıpta köpürtülen karmaşık şekilli Al malzeme ve kesit görünümü (b). (Al foams of various shapes produced at Gazi University Faculty of Technology (a) [27] and complex-shaped Al material foamed in a mold and cross-sectional view (b).) [112].



Şekil 12. Yer tutucu tekniği ile Al köpük üretim aşamaları (Stages of Al foam production with space holder technique) [113]



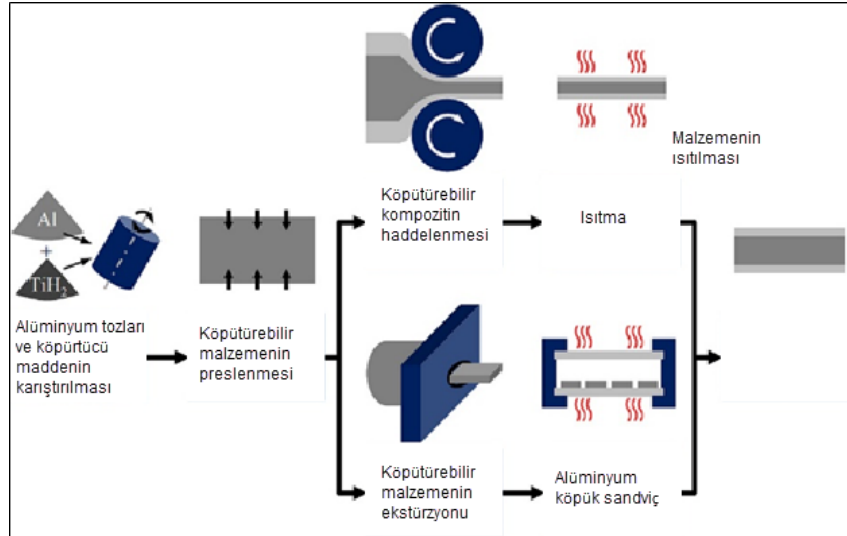
### 3. TOZ METAL ALÜMİNYUM KÖPÜK ÇEŞİTLERİ (POWDER METAL AL FOAM TYPES)

#### 3.1. Al Köpük Sandviç (Al Foam Sandwich)

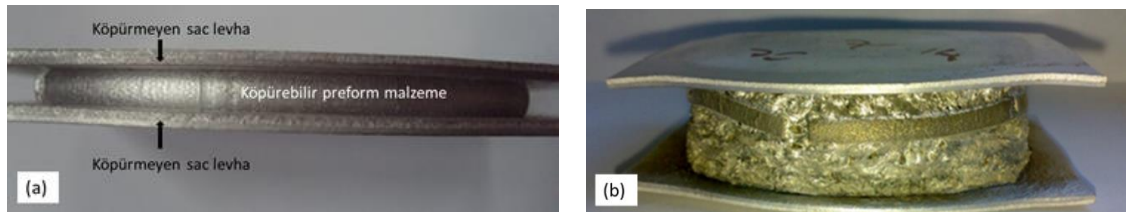
Klasik köpük malzeme üretim yönteminin yanı sıra TM yöntemi ile sandviç köpükler de üretilebilmektedir. Sandviç köpük üretiminde köpük malzemenin iki yüzeyi değişik yöntemler kullanılarak köpürmeyen sac levha ile bağlanmaktadır. Bu işlem köpüğün türü ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Sandviç köpük üretimi, bağlanma mekanizmaları yönünden temel olarak doğal bağlanma (in-situ bonding) ve yapay bağlanma (ex-situ bonding) olarak iki şekilde yapılmaktadır [117-120].

Doğal bağlama yöntemi ile sandviç köpük üretiminde köpük oluşurken aynı zamanda sandviç yapı da oluşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde köpürebilen preform malzemenin iki yüzeyine yerleştirilen köpürmeyen sac levhayla beraber ısıtılır. Bu esnada iç kısımdaki köpürebilen malzemenin hacimsel genişmesi ile metalik köpük oluşurken, aynı zamanda her iki dış yüzeyde köpürmeyen sac levha başka bir katman olarak ve köpüren malzemeye yapışmış olarak elde edilir. Yöntemin en önemli dezavantajı alaşım kombinasyonunun sınırlı olmasıdır. Bu yöntemde yüzey plakaları ergimeden köpüğün tam manası ile genişlemesi için adeta zaman ile yarışılmaktadır

[118]. Doğal bağlama yöntemi ile üretimde en önemli husus, yüzey sac levhalarının köpüren iç kısımdaki malzemenin ergime derecesinden daha yüksek ergime derecesine sahip olmasıdır. Bunun için Al köpük yüzeylerine paslanmaz çelik ve Ti gibi malzemeler kullanılacağı gibi ergime derecesi düşük %12 Si içeren köpürebilir Al malzeme yüzeylerine saf Al sac levhalar da kullanılabilir. Şekil 13'te Al köpük sandviç plakaların imalatı için esnek bir TM köpüklendirme prosesi sunulmuştur [121]. 1992 yılında Fraunhofer enstitüsünde geliştirilmiş [122] olan bu yöntemin uygulanabilirliği diğer yöntemlere göre oldukça kolaydır. Diğer taraftan haddeleme, presleme gibi yöntemler uygulanarak köpürmeye hazır preform malzemenin yüzeyi plakalar ile kaplanmaktadır [116]. Bu işlem sonrasında köpürebilir preform (metal alaşımı) iç kısımda ana tabakayı oluştururken iki yüzeye konulan levha ile (genellikle Al, Ti veya paslanmaz çelik) üçlü bir katman oluşturur (Şekil 14.a). İhtiyaç duyulması halinde yüzeyi kaplanan numune köpürtme öncesi ön şekillendirmeye tabi tutulur. Son işlem olarak numune, sıcaklık ve zaman göz önünde bulundurularak köpürtülür (Şekil 14.b). Sonuçta Al alaşımlı köpük ile plaka arasında metalik bir bağ oluşur. Oluşan bu yoğun bağlanma tipi kompozit bileşenleri arasında maksimum kuvvet iletimini sağlar [120, 123, 124].



Şekil 13. Al köpük sandviç plakaların imalatı için esnek TM yöntemi ile köpük oluşturma işleminin şematik diyagramı (Schematic diagram of the flexible TM method foaming process for the manufacture of Al foam sandwich plates). [121].



Şekil 14. İki yüzeyi köpürmeyen sac levha ile desteklenmiş, orta kısmında köpürebilir preform malzeme bulunan sandviç numunenin köpürme öncesi (a) ve köpürme sonrası görünümü (b). Köpürme sonrası iç kısımda köpük oluşmuş ve dıştaki sac levhalara difüzyon yolu ile bağlanmıştır. (Pre-foaming (a) and post-foaming view (b) of a sandwich specimen with a foamable preform material in the center, supported by non-foaming sheet metal on two sides. After foaming, foam was formed in the inner part and connected to the outer sheet plates by diffusion.)

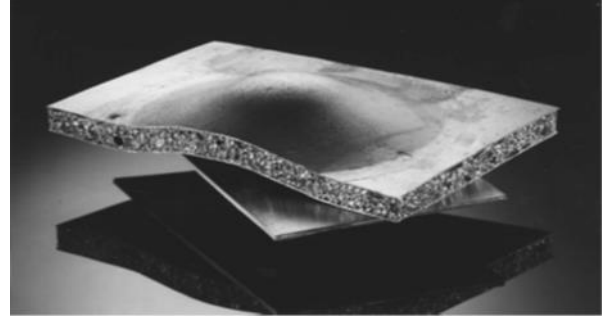
Şekil 15'te Al sandviç köpüğün kesit görünümü verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi iç kısımlarda gözenekli Al köpük malzeme ve her iki yüzeyinde köpürmeyen Al esaslı malzeme görülmektedir. Köpürtme süresinin uzun tutulması dış kısımdaki metalin de ergimesine sebep olduğundan bu tür doğal bağlama yolu ile köpük üretiminde köpürtme süresi çok dikkatli seçilmelidir [125].

Sandviç köpük üretiminin bir başka yolu da önceden üretilmiş olan köpük malzeme yüzeyinde oluşturulmak istenen sac malzemenin çeşitli yollarla bağlanmasını sağlamaktır. Yapay bağlanma olarak da bilinen bu yöntemde yüzey levhaların çeşitli yöntemler ile köpüğe bağlanması köpürme işlemi sonrası gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemin yapay bağlanma olarak adlandırılmasının sebebi; yüzey levhalarının çeşitli yöntemler ile köpüğe bağlanmasının köpürme işlemi sonrası gerçekleştirilmesinden dolayıdır. Çeşitli yapıştırıcılar kullanılarak bağlama veya sert lehimleme ile bağlama, bu yöntemde sıkça kullanılan birleştirme tekniklerinden bazılarıdır. Hem üretim kolaylığı hem de çeşitliliğinden dolayı çok karşılaşılan bir yöntemdir [117, 118, 126]. Şekil 16'daki gibi bir şekilde sandviç köpüğün yapay bağlanma ile üretimi oldukça zordur. Hatta daha karmaşık şekilli numunelerin yapay olarak üretimi imkansızdır. Fakat doğal bağlanma yöntemi ile numuneye köpürme öncesi veya sonrası gerekli şekillendirme yapılarak, istenilen şekillerde ürünler elde etmek mümkündür. Al sandviç paneller yüzey tabaklarındaki yüksek sertlikleri ve ağırlıkta önemli azaltma sağladıkları için otomotiv gövde yapısına en uygun olan köpük yöntemidir [1]. Özellikle yüksek dış yüzey dayanımı gerektiren ortamlarda tercih edilen paslanmaz çelik-Al-paslanmaz çelik olarak da bilinen SAS (stainless steel- aluminum- stainless steel) sandviç yapı yapılar yüksek darbe dayanımının gerektiren yerlerde ve bağlama elemanlarının kullanımı gereken durumlarda avantaj sağlamaktadır [28, 37, 127].

Yapıda her iki yüzeyde ergime derecesi köpük malzemenin ergime derecesinden daha yüksek malzemenin üretim sırasında köpüğe difüzyon yolu ile mükemmel şekilde bağlandığı görülürken, iç kısımlarda esas köpük yapı bulunmaktadır.



Şekil 15. Al sandviç köpüğün kesit görünümü. (Cross-sectional view of Al sandwich foam).



Şekil 16. Frounhofer IFAM'da üretilen ve köpürtülmeden önce deforme edilen paslanmaz çelik dış plakalı Al köpük sandviç yapının kesit görünümü (Cross-sectional view of Al foam sandwich structure with stainless steel outer plate produced at Frounhofer IFAM and deformed before foaming) [32, 98]

### 3.2. Al Küresel Köpük Üretimi (Al Spherical Foam Production)

Küresel köpükler Frounhofer IFAM'da geliştirilen APM (Advance Pore Morphology) olarak da adlandırılan yeni bir köpük üretim yöntemidir. Seri üretim için oldukça uygun olan bu yöntemde çok sayıda küreselleşebilen preform malzeme (genelde kare halinde kesilmiş küçük sac levha) hareketli konveyör fırınlarda sıcaklığa maruz bırakılır ve bu esnada köpürme meydana gelir. Laboratuvar şartlarında üretimde ise deforme edilmiş kare şeklinde kesilmiş köpürebilen sac levhalar köpürme sıcaklığına maruz bırakılır ve malzeme, yüzey gerilmesinden dolayı küresel şekil alır [16, 107, 128-131]. Daha sonra köpüren malzemeler yapışkan bir polimerik malzeme ile kaplanır ve kalıba yerleştirilir [132]. Genelde orta sıcaklıkta (100-200°C) aktive edilir, sertleştirilir ve oda sıcaklığında kalıptan alınarak kullanılır. Şekil 17'de imalatı tamamlanmış küresel köpük malzeme, kesit görünümü ve profil içesine yerleştirilmiş durumu görülmektedir. Küresel şekilli köpükler, köpükleştirme işlemi sırasında sıvı drenajından dolayı tipik olarak daha büyük Al köpüklerde karşılaşılan, tekdüze olmayan gözenek yapıları gibi kusurlara daha az eğilimlidir [133].



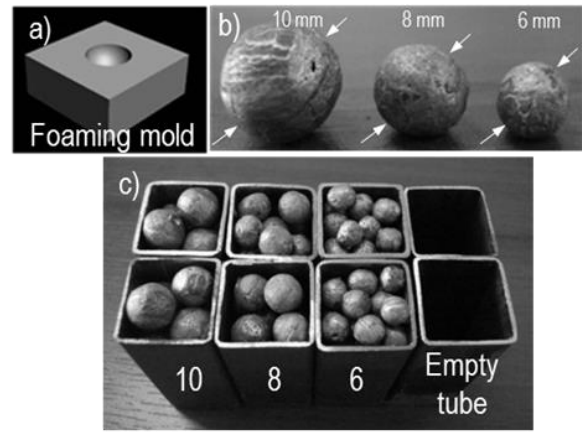
Şekil 17. Frounhofer IFAM'da üretilen küresel köpük malzemeler (Spherical foams produced at Frounhofer IFAM) [131,134,135].

Küresel köpükler genelde 6-15 mm çapında üretilerek profil ve boru içerisine yerleştirildiği gibi iki veya daha fazla sac levha arasına yerleştirilerek ve uygun bir yapıştırıcı ile yapıştırılarak kompozit yapı oluşturulmakta ve basma gerilmesine karşı yüksek dayanım göstermektedir [130, 136, 137]. Bunların

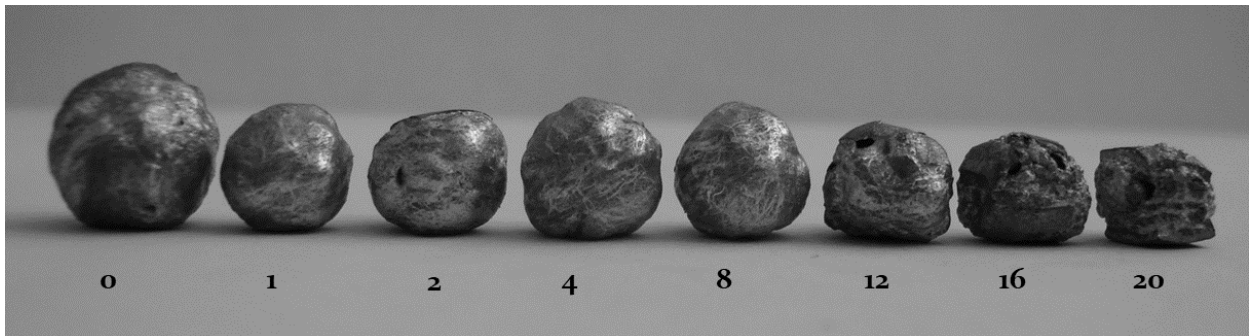
üretiminde herhangi bir kalıp kullanılmayışı avantaj sağlasa da, büyük boyutta küresel köpük üretiminde tamamen küresel olarak elde edilemeyişi problem teşkil etmektedir. Her ne kadar küçük boyutlu küresel köpüklerde üretim sırasında bir problem oluşmazken büyük boyutlu küresel köpük üretiminde köpüğün zeminle temas eden bölgesinde kendi ağırlığından dolayı düzleşmeler ve küresellikten sapmalar görülmektedir. Bunu önlemek için üretimi yapılmak istenen küresel köpük çapına uygun metal kalıplar hazırlanarak mükemmel küresellik sağlanabilmektedir. Şekil 18'de 6, 8 ve 10 mm çaplarında üretilmiş köpük malzemeler ile mükemmel küresellik sağlamak için hazırlanan kalıp ile çeşitli çaplarla doldurulmuş profil yapılar görülmektedir. Bu tür küresel metal köpükler araçların özellikle ön taraflarındaki profillerin içerisine yerleştirilerek çarpışma anında enerji sönmüleme amacıyla veya basmaya maruz ortamlarda kullanılmaktadır [24, 42, 57, 131, 138-142]. Kompozit malzeme katmanları, termal iletkenliği artıran bileşenler, darbe enerjisi emilimi, gelişmiş gözenek morfolojileri, titreşim sönmüleme ve karmaşık iç boşlukları doldurma yetenekleri sayesinde küresel köpükler, içi boş yapı parçalarını güçlendirmek için çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu malzemeler, özellikle yerel duvar bükülmesine karşı direnç kazandırarak geniş bir endüstri yelpazesinde etkili çözümler sunabilmektedir [143, 144].

Küresel köpük malzemeler diğer klasik üretim yöntemlerinde olduğu gibi çeşitli seramik malzemelerle takviye edilebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada SiC takviyeli küresel köpük üretiminde %8'e kadar takviye elemanının köpürebilirliğe olumsuz etkisi olmadığı daha fazla takviye elemanı ilavesinin yüksek miktarda (%2 gibi) köpürtücü madde kullanımında dahi köpürmeyi engellediği görülmüştür [110]. Şekil 19'da %20'ye kadar çeşitli oranlarda SiC ile takviye edilmiş Al köpükte, takviye elemanı miktarına bağlı olarak köpürebilirliği gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi %8 SiC'den fazla takviye elemanı bulunması durumunda yeterli köpürme sağlanamamakta ve küresellikten uzak

numuneler elde edilmektedir. Şekil 20'deki grafikte saf Al tozuna ilave edilen SiC parçacıklarının yoğunluk ve lineer genlemeye etkisi gösterilmektedir. Grafiklerden ve makro yapı resimlerinden de görüldüğü gibi Al' ye ilave edilen SiC partikülleri %8'in üzerinde olduğunda hem köpürmeyi hem de yoğunluğu ve buna bağlı olarak lineer genişlemeyi olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle araştırmacılarca %8'in altında bir oranda takviye elemanı katkısını tavsiye edilmektedir. Yapılan bu deneysel çalışmada en uygun sonucun %4 SiC katkılı numunelerde elde edildiğini rapor edilmiştir [43]. Partikül ilavesinin köpürme ve malzeme özellikleri üzerine etkisi ile ilgili yapılan diğer çalışmada ise yukardaki sonuçların aksine %8 ve %10'a kadar takviye elemanının basma dayanımını artırdığı yönünde de bulgular mevcuttur [58, 70, 78].

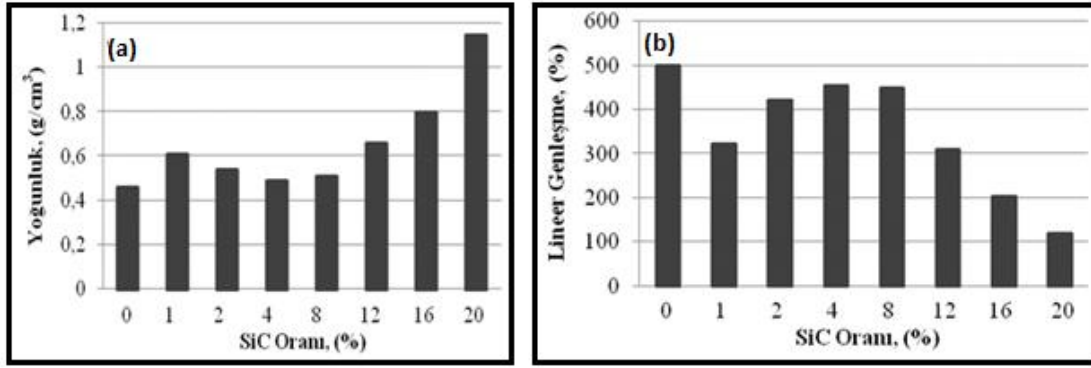


Şekil 18. Küresel köpük üretiminde küreselliğin sağlanması için kullanılan kalıp (a) ve farklı çaplarda üretilen köpük malzemeler (b) ile küresel köpüklerle doldurulmuş ve boş profil yapılar (c). (Mold used to achieve sphericity in the production of spherical foam (a), foam materials produced in different diameters (b), and profile structures filled and unfilled with spherical foam (c).)



Şekil 19. Saf Al tozlarına %20'ye kadar ilave edilen SiC partiküllerinin küresel köpük oluşumuna etkisi. En fazla lineer genişleme takviye edilmemiş numunede görülürken, %8'den fazla SiC katılan numunelerde takviye elemanı oranı arttıkça küresellikten sapmadaki artış ve köpürmedeki zorluk dikkat çekmektedir (Effect of SiC particles added up to 20% to pure Al powders on spherical foam formation. The highest linear expansion is observed in the unreinforced sample, while the increase in sphericity deviation and difficulty in foaming with increasing reinforcing element in samples with more than 8% SiC content is noteworthy.) [43].



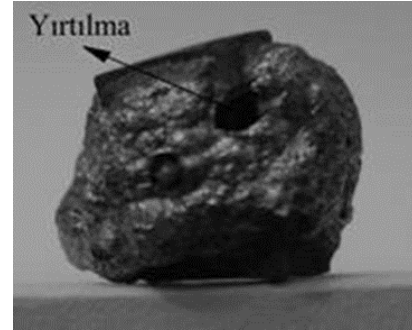


**Şekil 20.** Saf Al tozuna ilave edilen SiC parçacıklarının (a) yoğunluğa ve (b) lineer genişlemeye etkisi (Effect of SiC particles added to pure Al powder on (a) density and (b) linear expansion rate) [43, 110]

Gerek AFM, gerekse klasik TM yöntemi ile köpük üretiminde düşük yoğunluk elde edilememesi veya yeterli lineer genişleme sağlanamaması problem teşkil etmektedir. Bunun nedeni, malzemeye köpürme öncesi uygulanan deformasyonun yetersizliği veya deforme olmuş preform numunelerde sıkışan gazın köpürme işlemi sırasında gözeneklerden veya çatlaklardan uzaklaşmasına engel olunamamasıdır. Köpük üretiminde karşılaşılan başka bir problem de ergimiş metal içerisinde sıkışan gazın yapıda uzun süre beklemesi ve akabinde yapıyı terk etmesinden kaynaklanan köpük malzemenin çökmesidir (Şekil 21). Çökme, köpürtme sıcaklığının yüksek, köpürtme süresinin uzun veya köpürtücü madde miktarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Her üç durum da gözenek yapısının değişmesine, bozulmasına ve köpüren malzemede çökmenin başlaması ile yoğunluğun artmasına sebep olmaktadır.

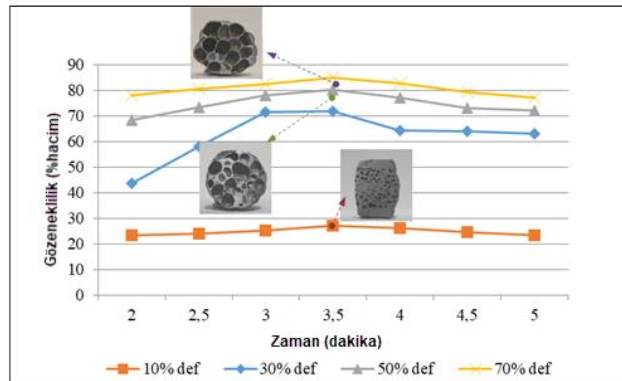
Şekil 22'de farklı oranlarda deforme edilmiş ve 690oC'de değişik sürelerde köpürtme işlemine tabi tutulmuş numunelerde gözeneklilik oranı görülmektedir. Optimum köpürtme süresi 3,5 dakika olarak belirtilen bu çalışmada %50 ve %70 deforme edilen numunelerde yüksek köpürme oranları ve homojen gözenek yapısı (%70-80 gözeneklilik) elde edilirken %10 deforme edilen malzemede çok daha düşük (%30 gibi) gözenek oranı ve homojen olmayan gözenek dağılımı tespit edilmiştir. Çalışmada hemen hemen bütün numunelerde

3,5 dakikadan fazla sürelerde köpüklerde çökme ve gözenek yapısında bozulmalar tespit edilmiştir.

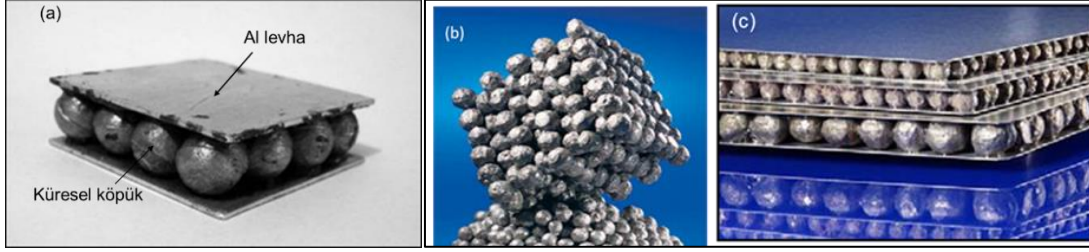


**Şekil 21.** Küresel şekilli Al köpüğün oluşumu esnasında meydana gelen yırtılma (Tearing during the formation of spherical Al foam) [145]

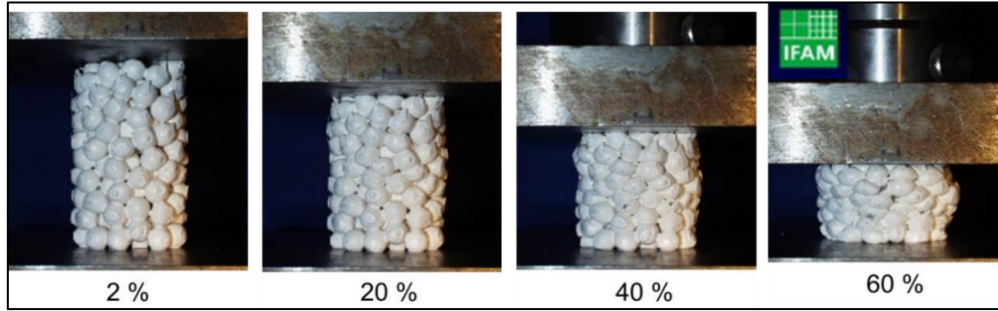
Şekil 23'te küresel olarak üretilen ve daha sonra farklı şekillerde birbirlerine yapııştırılarak kullanımı düşünülen AFM köpük ve sandviç yapılar görülmektedir. Uygun bağlayıcı kullanımı durumunda yüksek deformasyon oranlarında dahi küresel köpüklerde ayrışma görülmemektedir. Şekil 24'te polyamid 12 ile yapıştırılmış küresel köpük malzemenin %60'a kadar farklı oranlarda uygulanan basma testine karşı gösterdiği mukavemet görülmektedir.



**Şekil 22.** 690oC farklı sürelerde köpürme işlemine tabi tutulan numunelerde % gözenek oranı ve optimum köpük yapısının elde edildiği 3,5 dakika sonunda oluşan küresel köpüklerin kesit görüntüleri (Cross-sectional views of the spherical foams formed at the end of 3.5 minutes, where % pore ratio and optimum foam structure were obtained in the samples subjected to 690oC foaming process at different times) [128].



**Şekil 23.** Küresel köpüklerin farklı kullanım alanları. (a) iki sac levha arasında yerleştirilen sandviç küresel Al köpük [128], (b) üretildikten sonra bir kalıp içerisinde istenilen şekilde yapıştırılmış olan küresel köpük numuneler [131], (c) IFAM'da 3 katman halinde sandviç yapı haline getirilmiş küresel köpükler [131]. (Different uses of spherical foams. (a) sandwich spherical Al foam sandwiched between two sheet metal plates, (b) spherical foam specimens which, after manufacture, are placed in a mold in the desired shape, (c) Spherical foams sandwiched in 3 layers at IFAM ).

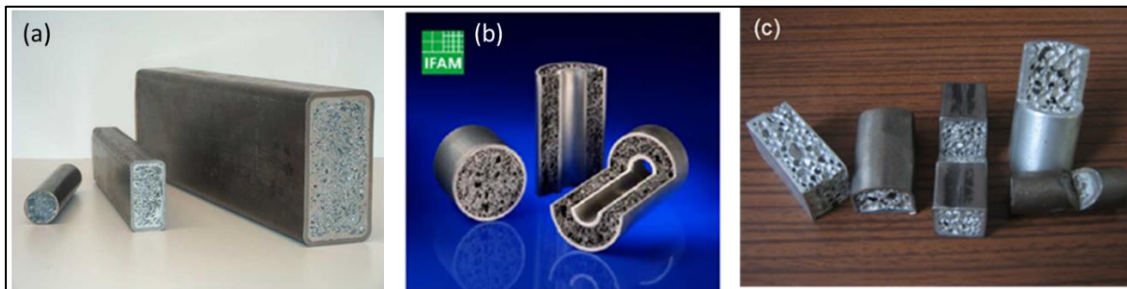


**Şekil 24.** Polyamid 12 ile yapıştırılmış küresel köpükler %2-%60 oranında tek eksenli basma gerilmesine tabi tutulduğunda deformasyona köpük elamanı hacmi ve yoğunluğunun etkisi olmazken, esas deformasyonun bağlayıcı yapışkandan kaynaklandığı görülmüştür (When spherical foams bonded with Polyamide 12 were subjected to uniaxial compressive stresses of 2%-60%, the volume and density of the foam element had no effect on the deformation, while the main deformation was caused by the bonding adhesive.) [134].

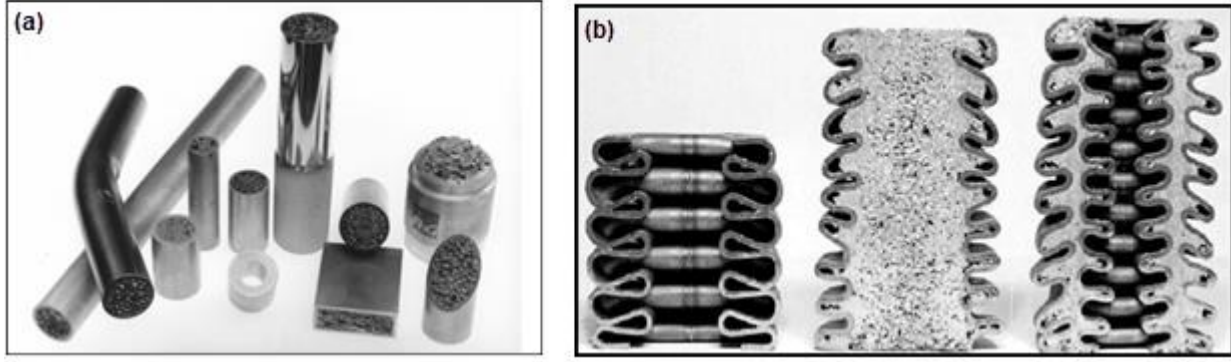
### 3.3. Al Köpük Dolgulu Profil Üretimi (Al Foam Filled Profile Production)

Araçlarda kaza anında sürücü ve yolcuların daha az zarar görmesi ve güvenliği bakımından enerji sönümleme amaçlı tasarlanmış olmalarına rağmen çok farklı uygulama alanı bulmuş malzemelerdir. İçi boş boru ve profillerin içerisine metalik köpük çeşitli yöntemlerle takviye edilerek ağırlığında fazla bir artış olmadan darbe sönümleme özelliğinde önemli avantajlar sağlanabilmektedir [5, 146]. Köpük dolu profil üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemde, köpürmeye hazır preform malzeme içi boş kalıp veya profil içerisine yerleştirilip ısıtıldığında genişerek, içerisine konulduğu kalıbın şeklini almaktadır. Bu işlem sonunda mamul parçalar, dışardan bakıldığında kapalı dış yüzeyli profil veya boru şeklinde gözükürken,

oldukça gözenekli bir iç yapıya sahip olurlar [105, 147]. Dayanımları da oldukça yüksektir [6, 148]. Metalik köpükle doldurulmuş boru ve profiller, burkulma süresince ilginç şekil ve deformasyon özelliği gösterirler. Boru veya profil içerisine dolgu malzemesi olarak kullanıldıklarında emilen enerjinin toplamından daha fazladır. Yapılan çalışmalar [6, 149-151] köpükle doldurulmuş profillerin boş profillere oranla %25-32 arasında daha yüksek mukavemet verdiğini göstermektedir [150] Şekil 25'de çeşitli profiller içerisine köpürtülmüş Al esaslı köpük malzemeler görülmektedir [82]. Şekil 26'da içi köpük doldurulmuş boru malzemeler ile, çeşitli formlarda profiller köpük doldurulmuş malzemelere uygulanan basma testi sonunda oluşan deformasyon şekillerini gösterir kesit görünümü verilmiştir.



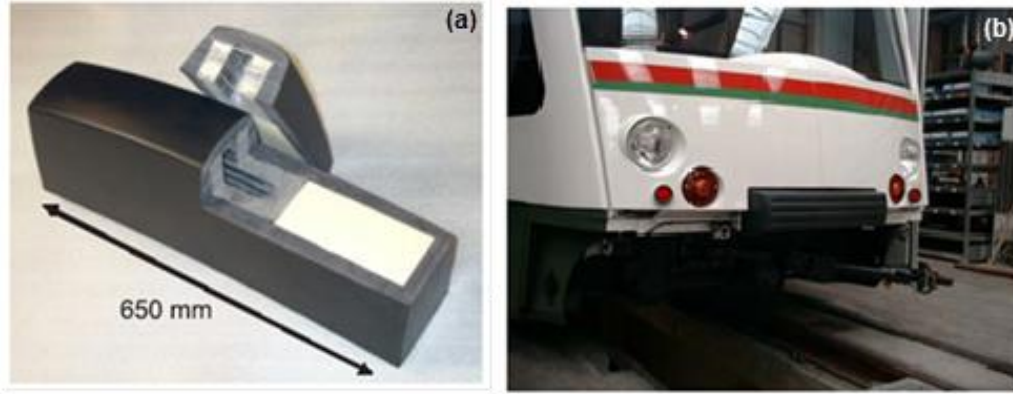
**Şekil 25.** Çeşitli profil ve boru malzeme içerisine köpürtülmüş Al köpükler [6, 112] (a), IFAM'da üretilen çeşitli formlarda köpük doldurulmuş borular (b) [123], Gazi Üniversitesinde üretilen çeşitli metalik köpük dolu profiller (c). (Al foams foamed in various profile and tube materials (a), foam filled tubes of various forms produced at IFAM (b), various metallic foam filled profiles produced at Gazi University (c).)



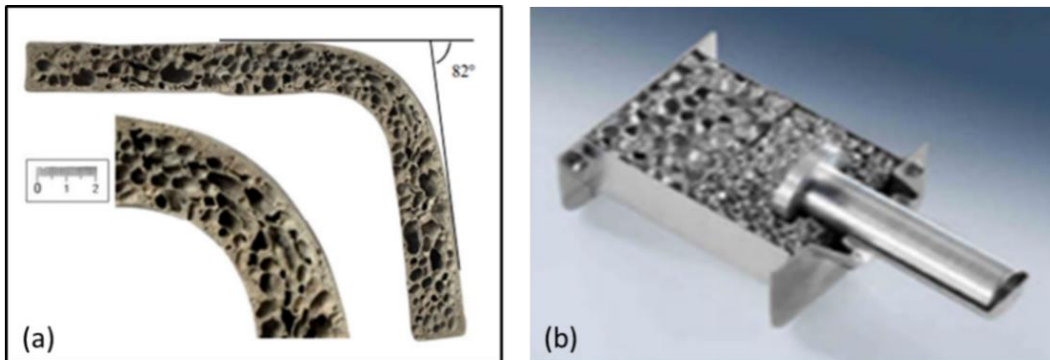
**Şekil 26.** İçi metalik köpükle doldurulmuş boru malzemeler (a) [81] ve içi boş ve içi köpükle doldurulmuş farklı kesitteki profillere uygulanan basma testi sonunda oluşan deformasyon şekilleri (b) (Tube materials filled with metallic foam (a) and deformation shapes after compression test applied to hollow and foam-filled profiles of different cross-sections (b) [151]).

Metalik köpük dolu profil malzemeler raylı taşıma araçlarında da uygulama alanı bulmaktadır. Üç Alman şirketi; tramvay üreticisi Siemens, darbe absorbe edici malzeme üreticisi Hübner ve metal köpük üreticisi Schunk Sintermetalltechnik birlikte çalışarak Şekil 27'de

görülen darbe emme sistemini Combino® modüler tramvay konsepti için geliştirmişlerdir. Şekil 28'de deforme edilmiş köpük malzemede gözenek yapısını gösterir kesit görünümü ve iki farklı yoğunlukta köpük ile takviye edilmiş tasarım örneği görülmektedir [68, 69].



**Şekil 27.** (a) Combino araç sistemi için geliştirilen darbe enerji emicisi köpük içeren profil [149], (b) Al köpüklerin banliyöler için enerji absorbe edici olarak kullanımı. Bu malzemeler gerçek hayattaki kullanımlarının ilk örnekleri olması bakımından önemlidir ((a) Profile with impact energy absorbing foam developed for the Combino vehicle system, (b) use of Al foams as energy absorbers for suburbs. These materials are important as they are the first examples of their real-life use) [123].



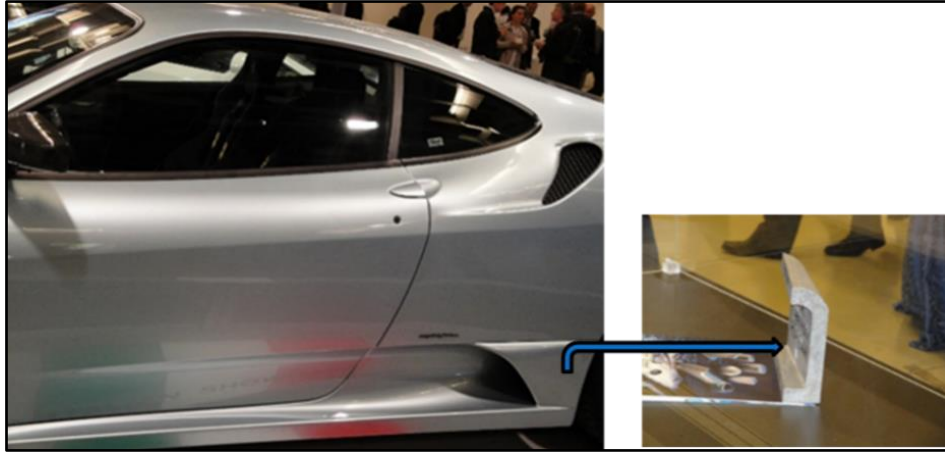
**Şekil 28.** 656 °C'de serbest olarak deforme edilen Al (AlMg1Si0.6TiH20.8) köpük malzeme [68, 69] (a) ve iki farklı yoğunlukta üretilmiş Metcomb Al köpük ile doldurulmuş sönümleyici (b) (Al (AlMg1Si0.6TiH20.8) foam material [68, 69] freely deformed at 656 °C (a) and absorber filled with Metcomb Al foam produced in two different densities (b)) [149]



#### 4. KULLANIM ALANLARI (AREAS OF USAGE)

Günümüzde yüksek dayanımlı aynı zamanda hafif malzemelere duyulan ihtiyacın artması nedeni ile metalik köpüklerin yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak kullanımına ilgi artmıştır. Titreşim, ses ve enerji sönmüleme gibi özelliklerinden dolayı [32] otomotiv sektörü başta olmak üzere, raylı taşıma sistemleri, gemi yapımı, hafif konstrüksiyonlar, uçak ve uzay sanayi, biyomedikal endüstrisi, motor yapım endüstrisi gibi özel gereksinimlere uygun olması dolayısı ile bu ve benzeri alanlarda kullanımına ilişkin yoğun çalışmalar devam etmektedir [5, 7, 112, 140, 152, 153]. Metalik köpüklerin uygulaması yalnızca havacılık, otomobil endüstrisi ile sınırlı olmayıp enerji santralleri, elektrik endüstrisi ve kimya endüstrisi, mimarlık ve tasarım alanında, elektromanyetik koruma, yapısal sönmüleme, alev direnci ve dekoratif yüzey yapısının gerekli olduğu büyük köprü, çatı ve diğer yüksek potansiyel uygulamalar için de uygundur [1, 87]. Bunlara ilave olarak büyük makinalarda ses ve titreşim sönmüleme kapasitesi sayesinde kullanım alanı bulmuştur.

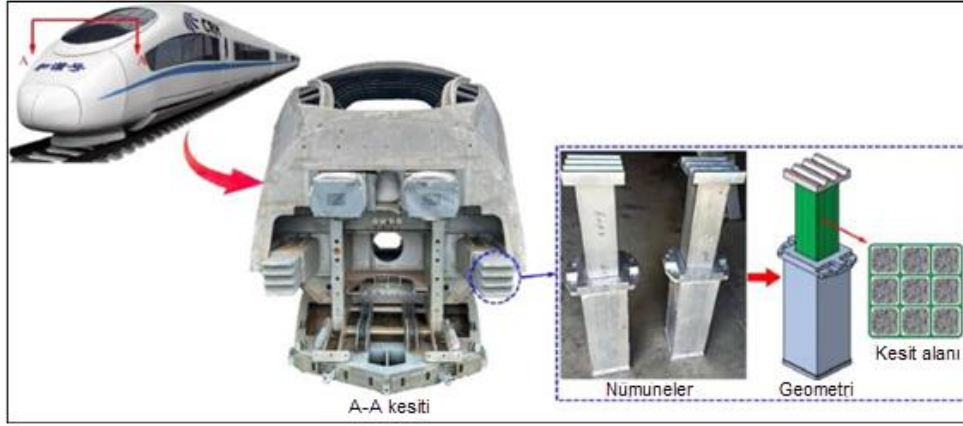
Metalik köpüklerin en yaygın kullanıldığı alan olan otomobil endüstrisinde çok farklı parçalarda köpük malzeme kullanımı artarak devam etmektedir. Sac gövde yapımı, yapısal parçalar, bagaj kapağı, motor kaputu, sürgülü tavan, susturucu ve tampon gibi parçalarda ağırlığı azalttığı için çelik parçanın yerine tercih edilmektedir (Şekil 29) [17, 40, 87, 150, 153-155]. Ayrıca otomobillerin taban sac malzemesi olarak sandviç Al ve Mg malzemeler üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Elektrikli araçlarda batarya yuvalarında da ağırlığı azaltma ve verimi yükseltme amaçlı kullanıldığı gibi çeşitli batarya malzemesi olarak da çalışmalar yapılmaktadır [156] [157]. Köpük malzemeler ısı iletkenliği düşük olduğu için diğer kullanılan malzemelerle mukayese edildiğinde daha uzun ömürlü olabilmektedir. Motor kısmında metalik köpük malzeme kullanılması durumda gözeneklilik nedeniyle yüksek taşınım ile ısı transferi gerçekleşeceğinden daha az problem oluşturmaktadır [158].



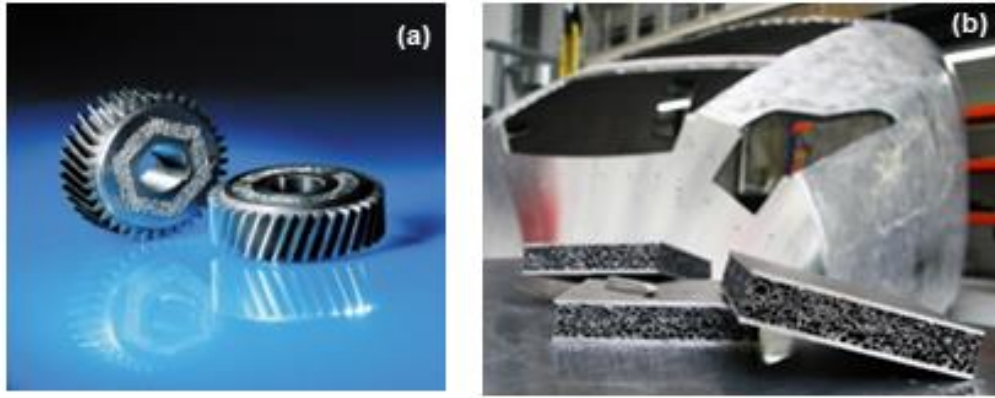
Şekil 29. Ferrari'nin yan destek malzemesi olarak Al esaslı köpük kullanımı. (Al-based foam used in Ferrari as side support material) [26].

Metalik köpükler teleskop kaldırma kolu, kaldırma ve iletme sistemleri [159, 160], bisiklet krank kolu [117], kask yapımı [161, 162], golf takım taşıyıcısı [123], tencere üretimi [117] ve roket parçaları [7] yapımında da kullanılmaktadır. Bunlardan başka, ısı eşanjörü, katalizör destekleri, filtreler, biyo medical implantlar, susturucular, yataklar ses ve ısı bariyeri ve dahili zırh destek plakası gibi çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [32]. Al köpüklü sandviç paneller, hafifliğin önemli olduğu birçok ürünün imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ariane 5 Rocketinde iki koni biçimli

yapı halinde kullanılmaktadır [7, 11]. Bu koni şekilli petek yapı, maliyeti yüksek ve kolay elde edilemeyen malzemelerin yerini Al köpük sandviç panellere bırakmıştır. Böylece hem ağırlığı düşürmekte hem de kullanımı daha kolay hale getirmektedir [159]. Enerji tasarrufunun önemli olduğu günümüzde yukarıda sayılan alanlara ilave birçok farklı alanda kullanılmaya başlanılan metalik köpük malzemenin kullanım alanları ile ilgili bazı resimler aşağıda Şekil 30 – Şekil 37'de verilmiştir.



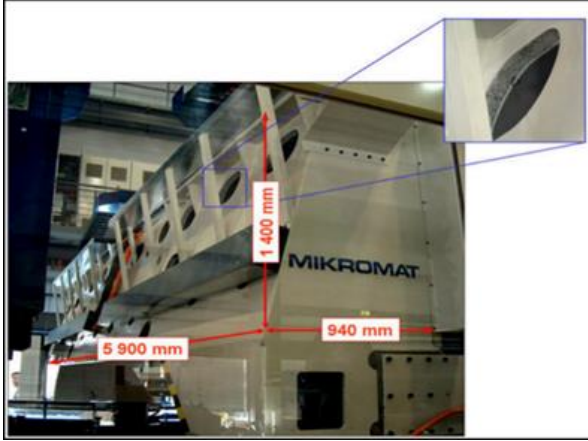
**Şekil 30.** Demiryolu taşıtlarında enerji sönümlenmesi için kullanılan MMC yapıda Al köpük ve bal peteği yapısı. Al köpükler profil içerisine enerji sönümlenmesi için yerleştirilmiştir (Al foam and honeycomb structure in MMC structure used for energy damping in railway vehicles. Al foams are placed inside the profile for energy damping) [153, 163].



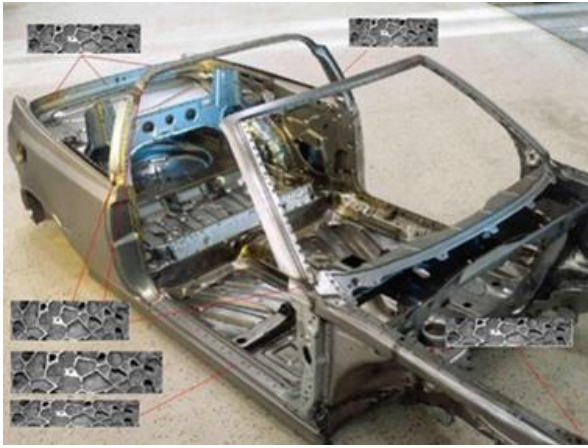
**Şekil 31-** Enerji sönümlenmesi için dişli parçalarının gövdelerine yerleştirilmiş olan Al köpük (a) [135] ve araç gövde yapımında kullanılmak üzere tasarlanmış metalik sandviç köpük (b) (Al foam inserted into the bodies of gear parts for energy damping(a) and metallic sandwich foam designed for use in vehicle body construction (b)) [164].



**Şekil 32.** Alulight tarafından Ferrari 360 ve 430 Spider için geliştirilen Al-köpük sönümlenme parçası (a) ve Audi Q7 için geliştirilen küçük çarpışma sönümlenme elemanı (b) (Al-foam damping element developed by Alulight for Ferrari 360 and 430 Spider (a) and small crash damping element developed for Audi Q7 (b)) [165].



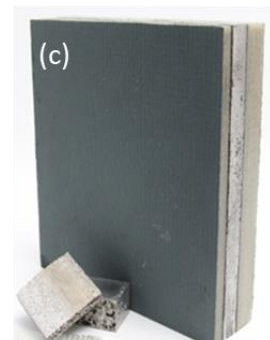
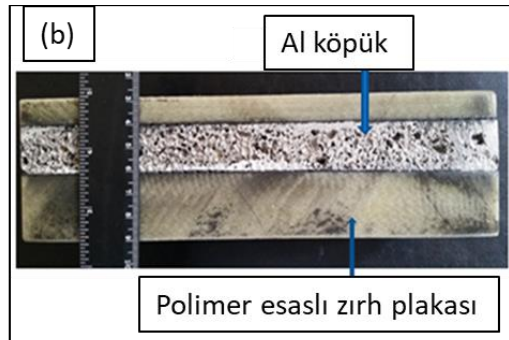
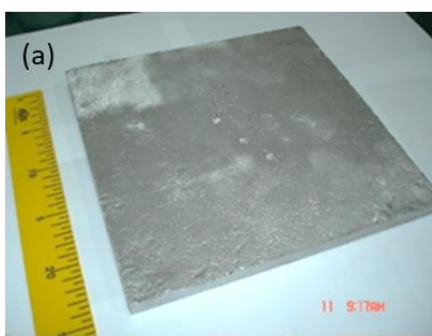
Şekil 33. 6 m uzunluğundaki bir makinada ses ve titreşim sönümlenmesi amaçlı kullanılan köpük takviyeli sandviç yapı (foam reinforced sandwich structure used for sound and vibration damping in a 6 m long machine) [166].



Şekil 34. Otomobillerin çarpmaya maruz kalan muhtemel bölgelerinde metalik köpük kullanımı (Use of metallic foam in crash-prone areas of automobiles) [167].

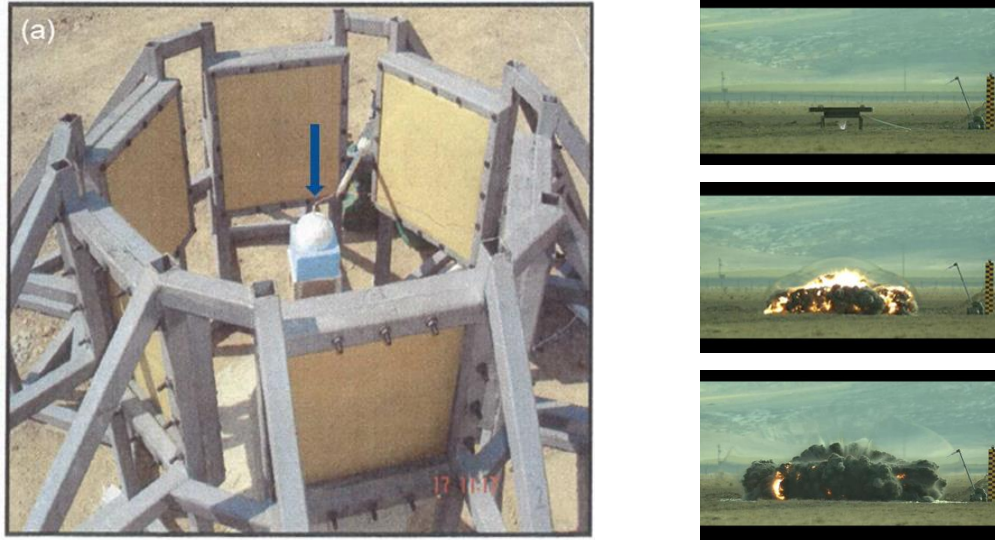
#### 4.1. İntegral Zırh Malzemesi (Integral Armor Material)

Metalik köpüklerin enerji sönümlenme özelliklerinden faydalanarak zırhlı araçların maruz kaldığı patlama etkisine karşı zırh plakaları ile kaplanmaktadır. Araçlarda yeterli zırhlama yapıp korunuyor olmasına rağmen patlama anında oluşan şok etkisinden personelin en az hasar alması amaçlanmaktadır. Bu nedenle hali hazırda kullanılmakta olan polimer esaslı kompozit zırh plakalar içerisinde Şekil 35.a'da görüldüğü gibi takviyeli (B4C) Al köpük yerleştirilerek zırh malzemesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Burada esas amaç patlama esnasında oluşan sok etkisinin minimuma indirilmesidir. Bu nedenle hem yüksek dayanımlı hem de yeterli derecede enerji sönümlenme özelliklerine sahip takviyeli köpük kullanımı planlanmış ve B4C parçacıkları ile güçlendirilmiş Al esaslı metalik köpük plakalar kullanılmıştır. Bu özelliklerde üretilen 25x25x1,5 cm ebatlarında köpük plakalar birleştirilerek 100 x150 cm ebatlarında levha oluşturularak patlama esnasında şok etkisini alması için polimer esaslı kompozit zırh malzemesinin içerisinde sandviç yapı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 35.b-c). Nato Stanag standardına göre hazırlanan deney düzeneğinde (Şekil 36) 6, 8 ve 10 kg TNT kullanılarak patlatma işlemi gerçekleştirilerek zırhın performansı değerlendirilmiş ve patlama neticesinde zırh içerisinde B4C takviyeli Al köpük bulunduran numuneler istenilen seviyede koruma sağladığı görülmüştür. Şekil 37'de patlama öncesi ve sonrası zırh plakasının durumu görülmektedir.

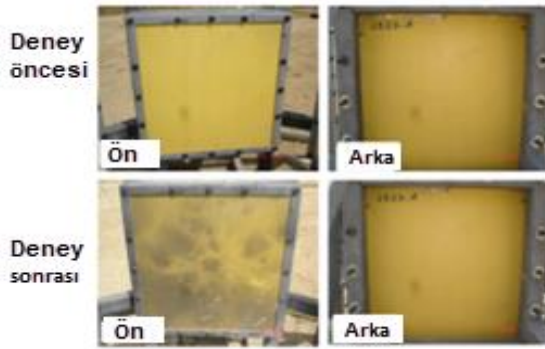


Şekil 35. Polimer esaslı kompozit zırh plakaları arasında enerji sönümlenme amaçlı yerleştirilen 25x25x1,5 cm ebatlarında B4C takviyeli Al köpük plaka (a), patlama etkisine karşı zırhlı araçlar için geliştirilen Al köpük destekli zırh plakasının kesit görünümü (b), zırhın genel görünümü (c) (B4C reinforced Al foam plate with dimensions of 25x25x1.5 cm placed between polymer-based composite armor plates for energy absorption (a), cross-sectional view of Al foam supported armor plate developed for armored vehicles against blast effect (b), general view of armor (c)) [26].





Şekil-36. Nato Stanag standardına göre hazırlanmış olan patlama deney düzeneği (a), (TNT okla gösterilmiştir) ve patlamanın belirli sürelerden görüntüleri (Explosion test set-up (a), prepared according to the NATO Stanag standard (TNT is indicated by the arrow) and images from certain times of the explosion) [26] [92].



Şekil 37. Blast test öncesi ve sonrası zırh plakasının durumu. Patlama sonrası zırh plakasında önemli bir hasar oluşmamıştır. (Appearance of the armor plate before and after the blast test. No significant damage to the armor plate after the blast test.) [27]

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada TM yöntemleriyle Al köpüklerin değişik üretim yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve bu malzemelerin hangi alanlarda kullanılabileceği konuları üzerine yoğunlaşmıştır. Al köpüklerin mükemmel darbe emme özellikleri, yüksek enerji soğurma kapasiteleri ve hafif yapıları sayesinde otomotiv, uçak yapımı, inşaat ve savunma gibi çeşitli endüstrilerde avantajlar sunduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca malzemenin köpürtme parametreleri ve üretim teknikleri üzerine yapılan araştırmalar, köpüklerin yapısını ve dolayısıyla mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen önemli faktörler olarak belirlenmiştir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu derleme çalışması aşağıda belirtilen üç proje kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar ve genel literatür bilgisi kapsamında hazırlanmıştır:

- ❖ “Patlama Etkisine Karşı Koruyucu Zırh Geliştirilmesi, TÜBİTAK 1007 Projesi (MSB tarafından destekli), 107A014 (Alt Proje No: 107A015 ve 107A016),
- ❖ TM yöntemiyle Al esaslı bor karbür ve seramik parçacık takviyeli metalik köpük üretimi ve integral zırh malzemesi olarak performansının değerlendirilmesi, 106M513, TÜBİTAK Projesi 2009
- ❖ TM Yöntemi İle Al Bazlı B<sub>4</sub>C Takviyeli Sandwich Metalik Köpük Üretimi, Balistik Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması; G.Ü BAP Projesi.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sharma, S.S., S. Yadav, A. Joshi, A. Goyal and R. Khatri, "Application of metallic foam in vehicle structure: A review". *Materials Today: Proceedings*, 347-353, (2022).
- [2] Koza, E., M. Leonowicz, S. Wojciechowski and F. Simancik, "Compressive strength of aluminium foams". *Materials letters*, 132-135, (2004).
- [3] Madgule, M., C. Sreenivasa and A.V. Borgaonkar, "Aluminium metal foam production methods, properties and applications-a review". *Materials Today: Proceedings*, 673-679, (2023).

- [4] Atwater, M.A., L.N. Guevara, K.A. Darling and M.A. Tschopp, "Solid state porous metal production: A review of the capabilities, characteristics, and challenges". *Advanced Engineering Materials*, 1700766, (2018).
- [5] Gibson, L.J., "Mechanical behavior of metallic foams". *Annual Review of Materials Science*, 191-227, (2000).
- [6] Hanssen, A.G., M. Langseth and O.S. Hopperstad, "Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler". *International journal of impact engineering*, 475-507, (2000).
- [7] Schwingel, D.D., D.H.-W. Seeliger, M.C. Vecchionacci, M.D. Alwes and M.J. Dittrich, "Aluminium foam sandwich structures for space applications", *57th International Astronautical Congress*, C2. 4.10, (2007).
- [8] YU, H.-j., et al., "Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material". *Transactions of nonferrous metals society of China*, 93-98, (2007).
- [9] Peroni, L., M. Avalle and M. Peroni, "The mechanical behaviour of aluminium foam structures in different loading conditions". *International journal of impact engineering*, 644-658, (2008).
- [10] Sha, J. and T. Yip, "In situ surface displacement analysis on sandwich and multilayer beams composed of aluminum foam core and metallic face sheets under bending loading". *Materials Science and Engineering: A*, 91-103, (2004).
- [11] Schwingela, D., H.-W. Seeliger, C. Vecchionacci, D. Alwes and J. Dittrich, "Aluminium foam sandwich structures for space applications". *Acta Astronautica*: 326-330, (2007).
- [12] Michailidis, N., F. Stergioudi and A. Tsouknidas, "Deformation and energy absorption properties of powder-metallurgy produced Al foams". *Materials Science and Engineering: A*, 7222-7227, (2011).
- [13] Hangai, Y., et al., "Drop weight impact behavior of functionally graded aluminum foam consisting of A1050 and A6061 aluminum alloys". *Materials Science and Engineering: A*, 597-603, (2015).
- [14] Ghazi, A., P. Berke, C. Tiago and T. Massart, "Computed tomography based modelling of the behaviour of closed cell metallic foams using a shell approximation". *Materials & Design*, vol 194, 108866, (2020).
- [15] Naeem, M.A., A. Gábora and T. Mankovits, "Influence of the manufacturing parameters on the compressive properties of closed cell aluminum foams". *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 172-178, (2020).
- [16] Vesenjak, M. and Z. Ren, "Geometrical and mechanical analysis of various types of cellular metals". *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 9-13, (2016).
- [17] Singh, S. and N. Bhatnagar, "A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017)". *Journal of Porous Materials*, 537-554, (2018).
- [18] Gauthier, M., L.-P. Lefebvre, Y. Thomas and M.N. Bureau, "Production of metallic foams having open porosity using a powder metallurgy approach". *Materials and manufacturing processes*, 793-811, (2004).
- [19] Yalçın, N. and A. Ercil, "Döküm yöntemi ile açık gözenekli parça üretiminde gözenek boyutunun mekanik özelliklere etkisi", *2nd International Turkish World Engineering and Science Congress*, Antalya, Türkiye 740-744, (2019).
- [20] Uzun, A. and M. Turker, "The investigation of mechanical properties of B4C-reinforced AlSi7 foams". *International Journal of Materials Research*, 970-977, (2015).
- [21] Kırmızı, G., H. Arık and H. Çinici, "Experimental study on mechanical and ballistic behaviours of silicon carbide reinforced functionally graded aluminum foam composites". *Composites Part B: Engineering*, 345-357, (2019).
- [22] Zare, J. and H.D. Manesh, "A novel method for producing of steel tubes with Al foam core". *Materials & Design*, 1325-1330, (2011).
- [23] Miyoshi, T., M. Itoh, S. Akiyama and A. Kitahara, "ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications". *Advanced engineering materials*, 179-183, (2000).
- [24] Yousefi, M.K., A. Kianirad and M. Vaseghi, "Simulation and investigation to the behavior of metallic foam as a bumper in automobile under impact loadings", *The First International Conference on Mechanics of Advanced Materials and Equipment*, (2018).
- [25] Uzun, A., U. Gökmen, H. Cinici, H. Koruk and M. Turker, "Investigation of modal properties of AlSi7 foam produced by powder metallurgy technique". *Materials Testing*: 598-601, (2013).
- [26] Türker, M., "Production of closed cell aluminum foam as armor support material", *International Congress on Engineering Sciences and Multidisciplinary Approaches*, İstanbul, Türkiye, (2021).
- [27] Türker, M., "Aluminum based metallic foams produced via powder metallurgy process", *International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, Çeşme, İzmir- Türkiye*, 12-16, (2015).
- [28] Han, M.S. and J.U. Cho, "Impact damage behavior of sandwich composite with aluminum foam core". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 42-46, (2014).
- [29] Weise, J., D. Lehmus and J. Baumeister, "Lightweight Structures Based on Aluminium Foam Granules". *Lightweight Design worldwide*, 6-11, (2017).
- [30] Babcsán, N., J. Banhart and D. Leitmeyer, "Metal foams—manufacture and physics of foaming", *Proceedings of the International Conference Advanced Metallic Materials*, 5-15, (2003).
- [31] Uzun, A., U. Gökmen, H. Cinici and M. Turker, "Effect of cutting parameters on the drilling of AlSi metallic foams". *Material in Tehnologie/Materials and Technology*, 19-24, (2017).
- [32] Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams". *Progress in materials science*, 559-632, (2001).
- [33] Gülenç, İ.T., "Patlama kaynağı ile kaynaklanmış sandviç yapıların köpürebilirliğinin araştırılması" Y.Lisans tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).

- [34] Uzun, A. and M. Turker, "Friction stir welding of foamable AlSi7 reinforced by B4C". *International Journal of Materials Research*, 558-565, (2016).
- [35] Bernard, T., J. Burzer and H. Bergmann, "Mechanical properties of structures of semifinished products joined to aluminium foams". *Journal of Materials Processing Technology*, 20-24, (2001).
- [36] [36] Cambroner, L., I. Canadas, J. Ruiz-Román, M. Cisneros and F.C. Iglesias, "Weld structure of joined aluminium foams with concentrated solar energy". *Journal of Materials Processing Technology*, 2637-2643, (2014).
- [37] Pelit, Y., A. Ayata, A. Kurt and M. Türker, "Toz metal Al malzemelerin köpürtme öncesi saplama kaynağı ile birleştirilmesi", *6th Int. Advanced Technologies Symposium (IATS11), Elazığ, Türkiye*, 132-135, (2011).
- [38] Changdar, A. and S.S. Chakraborty, "Laser processing of metal foam-A review". *Journal of Manufacturing Processes*, 208-225, (2021).
- [39] Cambroner, L., J. Ruiz-Roman, F. Corpas and J.R. Prieto, "Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent". *Journal of materials processing technology*, 1803-1809, (2009).
- [40] Orłowicz, A., M. Mróz, M. Tupaj and A. Trytek, "Materials used in the automotive industry". *Archives of foundry engineering*, (2015).
- [41] Onck, P., R. Van Merkerk, J.T.M. De Hosson and I. Schmidt, "Fracture of Metal Foams: In-situ Testing and Numerical Modeling". *Advanced Engineering Materials*,: 429-431, (2004).
- [42] Lehmhus, D., M. Vesenjak, S. De Schampheleire and T. Fiedler, "From stochastic foam to designed structure: Balancing cost and performance of cellular metals", *Materials*, (2017).
- [43] Turker, M., "Production of Ceramics Reinforced Al Foams by Powder Metallurgy Techniques", *Materials Science Forum*, 39-46, (2011).
- [44] Güden, M., S. Elbir and S. Yılmaz, "Kompozit alüminyum köpüklerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi". *II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu*, (2015).
- [45] Wang, Z., et al., "Effect of copper metal foam proportion on heat transfer enhancement in the melting process of phase change materials". *Applied Thermal Engineering*, 117778, (2022).
- [46] Gao, H., C. Wang, Z. Yang and Y. Zhang, "3D porous nickel metal foam/polyaniline heterostructure with excellent electromagnetic interference shielding capability and superior absorption based on pre-constructed macroscopic conductive framework". *Composites Science and Technology*, 108896, (2021).
- [47] Sreenivasa, C. and K. Shivakumar, "A review on production of aluminium metal foams", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012081, (2018).
- [48] Aida, S., H. Zuhailawati and A. Anasyida, "The effect of space holder content and sintering temperature of magnesium foam on microstructural and properties prepared by sintering dissolution process (SDP) using carbamide space holder". *Procedia Engineering*, 290-297, (2017).
- [49] Kovacic, J. and F. Simancik, "Comparison of zinc and aluminium foam behaviour". *Metallic Materials*, Vol 42, Issue 42, 79-90, (2004).
- [50] Tianjian, L., "Ultralight porous metals: from fundamentals to applications". *Acta Mechanica Sinica*, 457-479, (2002).
- [51] Liu, J., et al., "The compressive properties of closed-cell Zn-22Al foams". *Materials Letters*, 683-685, (2008).
- [52] Banhart, J., "Light-metal foams-history of innovation and technological challenges". *Advanced Engineering Materials*, 82-111, (2013).
- [53] Liu, P. and K. Liang, "Review Functional materials of porous metals made by P/M, electroplating and some other techniques". *Journal of materials science*, 2001: 5059-5072, (2001).
- [54] Türker, M., H. Çinici, U. Gökmen, A. Uzun and S. Sarıtaş, "Effects of foaming agent and boron carbide additions on the foamability behaviour of al based metallic foam produced by powder metallurgy", *Powder Metallurgy World Congress*, Washington, Kiribati, 8-12 Haziran 2008, 271-277. (2008).
- [55] Türker, M., H. Çinici, S. Günebakmaz and H. Gülen, "TM ile üretilen al esaslı metalik köpükte bor oksit ilavesinin köpürmeye etkisinin araştırılması", *13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye, (2006).
- [56] Uzun, A., "Production of aluminium foams reinforced with silicon carbide and carbon nanotubes prepared by powder metallurgy method". *Composites Part B: Engineering*, 206-217, (2019).
- [57] Çinici, H., et al., "Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AlSi7 köpüklerin düşük hızlı darbe enerjileri altında penetrasyon davranışının incelenmesi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 395-400, (2014).
- [58] Esmaelzadeh, S., A. Simchi and D. Lehmhus, "Effect of ceramic particle addition on the foaming behavior, cell structure and mechanical properties of P/M AlSi7 foam". *Materials Science and Engineering: A*, 290-299, (2006).
- [59] Kennedy, A. and S. Asavavisitchai, "Effects of TiB2 particle addition on the expansion, structure and mechanical properties of PM Al foams". *Scripta Materialia*, 115-119, (2004).
- [60] Kováčik, J., F. Šimančík, J. Jerz and P. Tobolka, "Reinforced aluminium foams", *International Conference in Advanced Metallic Materials*, Smolenice, Slovakia (2003).
- [61] Gergely, V. and B. Clyne, "The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors". *Advanced Engineering Materials*, 175-178, (2000).
- [62] Gergely, V., H. Degischer and T. Clyne, "Recycling of MMCs and production of metallic foams". *Comprehensive composite materials*, 797-820, (2000).
- [63] Gökmen, U. and M. Türker, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilavesinin alüminyum ve alumix 231 esaslı metalik köpüğün köpürme özelliklerine etkisi". *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol 12, (2012).



- [64] Gergely, V. and T. Clyne, "Drainage in standing liquid metal foams: modelling and experimental observations". *Acta Materialia*, 3047-3058, (2004).
- [65] Deqing, W. and S. Ziyuan, "Effect of ceramic particles on cell size and wall thickness of aluminum foam". *Materials Science and Engineering: A*, 45-49, (2003).
- [66] Brunke, O., A. Hamann, S. Cox and S. Odenbach, "Experimental and numerical analysis of the drainage of aluminium foams". *Journal of Physics: Condensed Matter*, 6353, (2005).
- [67] Temiz, A., A.Z. Alshemary, N. Akar and M. Yaşar, "Rapid casting of biodegradable porous magnesium scaffolds and electrophoretic deposition of 45S5 bioactive glass nanoparticles coatings on porous scaffolds: characterization and in vitro bioactivity analysis". *International Journal of Metalcasting*, 1871-1882, (2023).
- [68] Ersoy, E. and Y. Özçatalbaş, "Deformation of metallic foams with closed cell at high temperatures". *Int J. Mater Metall Eng*, 789-792, (2015).
- [69] Ersoy, E., Y. Özçatalbaş and E. Bahçeci, "An experimental study on hot formability of closed cell metallic foams", *International Porous and Powder Materials Symposium*, İzmir, Türkiye, 1-5, (2013).
- [70] Arif, U., "Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilmiş Al Köpüğün Gözenek Yapısı ve Köpürme Davranışı Üzerine MgO İlavesinin Etkisi", *International Multidisciplinary Congress of Eurasia, IMCOFE 16*, Odessa, July 11-13 pp 613-623, (2016).
- [71] Steen, W.M. and J. Mazumder, "Laser material processing", *Springer science & business media*, (2010).
- [72] Ozan, S., M. Taskin, S. Kolukisa and M.S. Ozerdem, "Application of ANN in the prediction of the pore concentration of aluminum metal foams manufactured by powder metallurgy methods". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 251-256, (2008).
- [73] Yu, C.-J., H.H. Eifert, J. Banhart and J. Baumeister, "Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications". *Materials Research Innovations*, 181-188, (1998).
- [74] Onck, P., R. Van Merkerk, A. Raaijmakers and J.T.M. De Hosson, "Fracture of open-and closed-cell metal foams". *Journal of materials science*, 5821-5828, (2005).
- [75] Ali, H., A. Gábora, M.A. Naeem, G. Kalácska and T. Mankovits, "Effect of the manufacturing parameters on the pore size and porosity of closed-cell hybrid aluminum foams". *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 230-237, (2021).
- [76] Banhart, J., "Manufacturing routes for metallic foams". *Jom*, 22-27, (2000).
- [77] Kennedy, A. and S. Asavavisithchai, "Effect of Ceramic Particle Additions on Foam Expansion and Stability in Compacted Al-TiH<sub>2</sub> Powder Precursors". *Advanced Engineering Materials*, 400-402, (2004).
- [78] Elbir, S., S. Yilmaz, A.K. Toksoy, M. Guden and I.W. Hall, "SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: Foaming and compression behavior". *Journal of materials science*, 4745-4755, (2003).
- [79] Asavavisithchai, S. and A. Kennedy, "Effect of powder oxide content on the expansion and stability of PM-route Al foams". *Journal of Colloid and Interface Science*, 715-723, (2006).
- [80] Styles, M., P. Compston and S. Kalyanasundaram, "The effect of core thickness on the flexural behaviour of aluminium foam sandwich structures". *Composite Structures*, 2007: 532-538, (2007).
- [81] Banhart, J. and J. Baumeister, "Deformation characteristics of metal foams". *Journal of materials science*, 1431-1440, (1998).
- [82] Ashby, M.F., et al., "*Metal foams: a design guide*", Elsevier, (2000).
- [83] Guden, M. and S. Yüksel, "SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: foaming and compression behavior". *Journal of Materials Science*, 4075-4084, (2006).
- [84] Wadley, H.N., "Cellular metals manufacturing". *Advanced engineering materials*, 726-733, (2002).
- [85] Montanini, R., "Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation". *International Journal of Mechanical Sciences*, 26-42, (2005).
- [86] Körner, C. and R.F. Singer, "Processing of metal foams-challenges and opportunities". *Advanced Engineering Materials*, 159-165, (2000).
- [87] Banhart, J. and D. Weaire, "On the road again: metal foams find favor". *Physics Today*, 37-42, (2002).
- [88] Pelit, Y. and M. Türker, "Mekanik Alaşımlanmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli AlSi7Mg0,6 Esaslı Tozlardan Metalik Köpük Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi," *6th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition, Ankara*, 776-780, (2011).
- [89] Proa-Flores, P., G. Mendoza-Suarez and R. Drew, "Effect of TiH<sub>2</sub> particle size distribution on aluminum foaming using the powder metallurgy method". *Journal of Materials Science*, 455-464, (2012).
- [90] Kriszt, B. and H. Degischer, "Handbook of cellular metals: Production, processing, applications". *Weinheim: Wiley-VCH*, (2002).
- [91] Yu, S., Y. Luo and J. Liu, "Effects of strain rate and SiC particle on the compressive property of SiCp/AlSi9Mg composite foams". *Materials Science and Engineering: A*, 394-399, (2008).
- [92] Türker, M., "Al Foams Reinforced With B<sub>4</sub>C And SiC Particles: Production Process, Characterization, Properties and Applications", *International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Devices Applications; Exhibition (ICMATSE 2020)*, Gazi University, Ankara, Türkiye, (2020).
- [93] Gökmen, U., H. Çinici, Y. Özçatalbaş and M. Türker, "Investigation of the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition on the foamability behaviour of aluminum based metallic foam produced by PM technique", *5th International Powder Metallurgy Conference*, Sakarya, Türkiye, (2008).
- [94] Bahçeci, E., Y. Özçatalbaş and M. Türker, "TM yöntemiyle AlSiMg alaşımı metalik köpük üretimi için geliştirilen preform malzeme üretim sürecinin karakterizasyonu", *6th International Powder*

- Metallurgy Conference Exhibition*, Ankara, Türkiye, 797-801, (2011).
- [95] Matijasevic, B. and J. Banhart, "Improvement of aluminium foam technology by tailoring of blowing agent". *Scripta Materialia*, 503-508, (2006).
- [96] Kim, A., K. Tunvir, S.-H. Nahm and S.-S. Cho, "Time-temperature superposition for foaming kinetics of Al-alloy foams". *Journal of Materials Processing Technology*, 450-456, (2008).
- [97] Turker, M., Y. Ozcatlbas, H. Cinici, U. Gokmen and A. Uzun, "Effect of Foaming Agent on The Structure and Morphology of Al and Alumix 231 Foams Produced by Powder Metallurgy", *Materials Science Forum*, 297-302, (2011).
- [98] Banhart, J., "Manufacturing routes for metallic foams". *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, (2012).
- [99] Baumgärtner, F., I. Duarte and J. Banhart, "Industrialization of powder compact foaming process". *Advanced Engineering Materials*, 168-174, (2000).
- [100] Mudge, A. and K. Morsi, "Fabrication of Uniform and Rounded Closed-Cell Aluminum Foams Using Novel Foamable Precursor Particles (FPPs)". *Metals*, 120, (2024).
- [101] Banhart, J., "Metallic foams: challenges and opportunities". *Eurofoam*, 13-20, (2000).
- [102] Shiomi, M., S. Imagama, K. Osakada and R. Matsumoto, "Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming". *Journal of Materials Processing Technology*, 1203-1208, (2010).
- [103] Uzun, A., E. Asikuzun, U. Gokmen and H. Cinici, "Vickers Microhardness Studies on B 4 C Reinforced/Unreinforced Foamable Aluminium Composites". *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 327-337, (2018).
- [104] Pen, S.I., A. Karakterizacija, D.I. Penilnega and T.H. Kot, "Synthesis and characterization of Al foams produced by powder metallurgy route using dolomite and titanium hydride as a foaming agents". *Materiali in Tehnologije*, 943-947, (2014).
- [105] Schaeffler, P., W. Rajner, D. Claar, T. Trendelenburg and H. Nishimura, "Production, properties, and applications of Alulight® closed-cell aluminum foams", *Proceedings of the Fifth International Workshop on Advanced Manufacturing Technologies*, 151-156, (2005).
- [106] Stanzick, H., et al., "Process Control in Aluminum Foam Production Using Real-Time X-ray Radioscopy". *Advanced Engineering Materials*, 814-823, (2002).
- [107] Babcsán, N., F.G. Moreno and J. Banhart, "Metal foams-high temperature colloids: part II: in situ analysis of metal foams". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 254-263, (2007).
- [108] Yang, D., et al., "Effect of decomposition kinetics of titanium hydride on the Al alloy melt foaming process". *Journal of Materials Science & Technology*, 361-368, (2015).
- [109] Abo sbia, A.E.S. and A. Uzun, "Production of MWCNT-Reinforced Aluminum Foams Via Powder Space-Holder Technique and Investigation of their Mechanical Properties". *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2241-2253, (2022).
- [110] Türker M., "Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Alüminyum Esaslı Metalik Köpükte Si İlavesinin Köpürmeye Etkisi ", *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 1-6, 13-15 Mayıs (2009).
- [111] Gökmen, U., Y. Özçatalbaş and M. Türker, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Metalik Köpüğe Köpürme Sıcaklığı ve Köpürtücü Madde Miktarının Etkisinin Araştırılması", *5. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, Türkiye, (2008).
- [112] Davies, G. and S. Zhen, "Metallic foams: their production, properties and applications". *Journal of Materials science*, 1899-1911, (1983).
- [113] Chai, G., et al., "Strengthening mechanism of porous aluminum foam by micro-arc discharge". *Tribology International*, 109169, (2024).
- [114] Shao, W., X. Yang, C. Hu and Y. Zheng, "Compression, Energy Absorption, and Electromagnetic Shielding Properties of Carbon Nanotubes/Al Composite Foams". *Advanced Engineering Materials*, 2201240, (2023).
- [115] Michailidis, N., F. Stergioudi, A. Tsouknidas and E. Pavlidou, "Compressive response of Al-foams produced via a powder sintering process based on a leachable space-holder material". *Materials Science and Engineering: A*, 1662-1667, (2011).
- [116] Liu, S., et al., "Fatigue of an Aluminum Foam Sandwich Formed by Powder Metallurgy". *Materials*, 1226, (2023).
- [117] Banhart, J. and H.W. Seeliger, "Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications". *Advanced Engineering Materials*, 793-802, (2008).
- [118] Banhart, J., H. Stanzick, L. Helfen, T. Baumbach and K. Nijhof, "Real-time x-ray investigation of aluminium foam sandwich production ". *Advanced Engineering Materials*, 1-10, (2001).
- [119] Magnucka-Blandzi, E. and K. Magnucki, "Effective design of a sandwich beam with a metal foam core". *Thin-Walled Structures*, 432-438, (2007).
- [120] Contorno, D., L. Filice, L. Fratini and F. Micari, "Forming of aluminum foam sandwich panels: Numerical simulations and experimental tests". *Journal of Materials Processing Technology*, 364-367, (2006).
- [121] Hommel, P., D. Roth and H. Binz, "Deficits in the application of aluminum foam sandwich: An industrial perspective", *Proceedings of the design society: Design conference*, 927-936, (2020).
- [122] Simancik, F., "Metallic foams-ultra light materials for structural applications". *Inżynieria Materiałowa*, 823-828, (2001).
- [123] Stöbener, K., J. Baumeister, D. Lehmhus, H. Stanzick and V. Zöllmer, "Composites based on metallic foams: phenomenology; production; properties and principles", Proc (Nov. 2003), *International Conference "Advanced Metallic Materials"*, (2003).
- [124] Mohan, K., Y.T. Hon, S. Idapalapati and H.P. Seow, "Failure of sandwich beams consisting of alumina face

- sheet and aluminum foam core in bending". *Materials Science and Engineering: A*, 292-301, (2005).
- [125] Çinici, H. and M. Türker, "Effect of Foaming Duration and Temperature on the Foamability Behaviour of AlSi7Mg0.6 Sandwich", *PM2010 World Congress-Foams Porous Materials*, Italy, (2010).
- [126] Bucher, T., S. Cardenas, R. Verma, W. Li and Y. Lawrence Yao, "Laser forming of sandwich panels with metal foam cores". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 111015, (2018).
- [127] Hanssen, A., Y. Girard, L. Olovsson, T. Berstad and M. Langseth, "A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels". *International journal of impact engineering*, 1127-1144, (2006).
- [128] Uzun, A. and M. Turker, "The effect of production parameters on the foaming behavior of spherical-shaped aluminum foam". *Materials Research*, 311-315, (2014).
- [129] Vesenjak, M., M. Borovinšek, T. Fiedler, Y. Higa and Z. Ren, "Structural characterisation of advanced pore morphology (APM) foam elements". *Materials letters*, 201-203, (2013).
- [130] Ulbin, M., et al., "Internal structure characterization of AlSi7 and AlSi10 advanced pore morphology (APM) foam elements". *Materials Letters*, 416-419, (2014).
- [131] Stöbener, K., J. Baumeister, G. Rausch and M. Rausch, "Forming metal foams by simpler methods for cheaper solutions". *Metal Powder Report*, 12-16, (2005).
- [132] Kovačić, A. and Z. Ren, "On the porosity of advanced pore morphology structures". *Composite Structures*, 235-244, (2016).
- [133] Wang, F., Y. Bian, L. Wang and W. Huang, "Foaming Behavior of Microsized Aluminum Foam Using Hot Rolling Precursor". *Metals*, 928, (2023).
- [134] Stöbener, K., D. Lehmuhs, M. Avalle, L. Peroni and M. Busse, "Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing". *International Journal of Solids and Structures*, 5627-5641, (2008).
- [135] Stöbener, K. and G. Rausch, "Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics". *Journal of Materials Science*, 1506-1511, (2009).
- [136] Kovačić, A., N. Novak, M. Vesenjak, P.D. Dubrovski and Z. Ren, "Geometrical and mechanical properties of polyamide PA 12 bonds in composite advanced pore morphology (APM) foam structures". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 1198-1206, (2018).
- [137] Sulong, M., M. Vesenjak, I. Belova, G. Murch and T. Fiedler, "Compressive properties of Advanced Pore Morphology (APM) foam elements". *Materials Science and Engineering: A*, 498-504, (2014).
- [138] Rausch, G., K. Stöbener and D. Bassan, "Improving structural crashworthiness using metallic and organic foams". *International Conference on Porous Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam)*, (2005).
- [139] Arif, U., "Investigation of Crushing Behavior of Polystyrene Coated Spherical Shaped Aluminum Foams". *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1273-1281, (2020).
- [140] Wang, E., R. Yao, Q. Li, X. Hu and G. Sun, "Lightweight metallic cellular materials: a systematic review on mechanical characteristics and engineering applications". *International Journal of Mechanical Sciences*, 108795, (2023).
- [141] Sánchez de la Muela, A., L. Cambronero and I. Ruiz-Bustanza, "Quasi-static and dynamic analysis of single-layer sandwich structures of APM foam spheroid elements in-situ foamed with marble". *Rev. Metal*, 2020: 159, (2020).
- [142] Weise, J., A.F. Queiroz Barbosa, O. Yezerska, D. Lehmuhs and J. Baumeister, "Mechanical Behavior of Particulate Aluminium-Epoxy Hybrid Foams Based on Cold-Setting Polymers". *Advanced Engineering Materials*, 1700090, (2017).
- [143] Borovinsek, M., et al., "Analysis of advanced pore morphology (APM) foam elements using compressive testing and time-lapse computed microtomography". *Materials*, 5897, (2021).
- [144] Vopalensky, M., et al., "Fast 4D On-the-Fly Tomography for Observation of Advanced Pore Morphology (APM) Foam Elements Subjected to Compressive Loading". *Materials*, 7256, (2021).
- [145] Uzun, A. and M. Türker, "Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alüminyum esaslı küresel şekilli metalik köpükte SiC ilavesinin köpürmeye etkisi", *5th International Powder Metallurgy Conference*, Ankara, Türkiye, (2008).
- [146] Salehi, M., S. Mirbagheri and A.J. Ramiani, "Efficient energy absorption of functionally-graded metallic foam-filled tubes under impact loading". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 92-110, (2021).
- [147] Uzun, A., H. Karakoc, U. Gokmen, H. Cinici and M. Turker, "Investigation of mechanical properties of tubular aluminum foams". *International Journal of Materials Research*, 996-1004, (2016).
- [148] Crupi, V. and R. Montanini, "Aluminium foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending". *International Journal of Impact Engineering*, 509-521, (2007).
- [149] Banhart, J., "Metal foams-from fundamental research to applications". *Frontiers in the Design of Materials*, (2007).
- [150] Lefebvre, L.P., J. Banhart and D.C. Dunand, "Porous metals and metallic foams: current status and recent developments". *Advanced engineering materials*, 775-787, (2008).
- [151] Seitzberger, M., et al., "Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam". *International Journal of Solids and Structures*, 4125-4147, (2000).
- [152] Olurin, O., N.A. Fleck and M.F. Ashby, "Deformation and fracture of aluminium foams". *Materials Science and Engineering: A*, 136-146, (2000).
- [153] Yao, R., et al., "On the crashworthiness of thin-walled multi-cell structures and materials: State of the art and prospects". *Thin-Walled Structures*, 110734, (2023).
- [154] Claar, T.D., et al., "Ultra-lightweight aluminum foam materials for automotive applications". *SAE transactions*, 98-106, (2000).



- [155] Wang, D., S. Zhang, C. Wang and C. Zhang, "Structure-material-performance integration lightweight optimisation design for frontal bumper system". *International journal of crashworthiness*, 311-327, (2018).
- [156] Baumeister, J., J. Weise, E. Hirtz, K. Höhne and J. Hohe, "Applications of aluminium hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles: Anwendung von Aluminium-Hybridschaum-Sandwichen in Batteriegehäusen von Elektrofahrzeugen". *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 1099-1107, (2014).
- [157] Heyhat, M.M., S. Mousavi and M. Siavashi, "Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle". *Journal of Energy Storage*, 101235, (2020).
- [158] Banhart, J., "Industrialisation of aluminium foam technology", *Proceedings of the ninth International Conference on aluminium alloys*, 764-770, (2004).
- [159] Banhart, J. and H. Seeliger, "Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, Manufacture and Applications, Porous Metals and Metallic Foams", *Proceedings of the Fifth International Conference on Porous Metals and Metallic Foams*, 3-6, (2007).
- [160] Seeliger, H.W., "Aluminium foam sandwich (AFS) ready for market introduction". *Advanced Engineering Materials*, 448-451, (2004).
- [161] Pinnoji, P.K., N. Bourdet, P. Mahajan and R. Willinger, "New motorcycle helmets with metal foam shell", *IRCOBI Conference Proceedings, Bern, Switzerland*, (2008).
- [162] Pinnoji, P.K., P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck and R.m. Willinger, "Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling". *International Journal of Impact Engineering*, 274-284, (2010).
- [163] Carruthers, J., et al., "The design and prototyping of a lightweight crashworthy rail vehicle driver's cab", *9th World Congress on Railway Research*, (2011).
- [164] Kornei, K., "New Aluminum 'Foam' Makes Trains Stronger, Lighter, and Safer". *Wired. com*. <https://www.wired.com/2014/12/aluminum-foam-trains>, (2014).
- [165] García-Moreno, F., "Commercial applications of metal foams: Their properties and production". *Materials*, 85, (2016).
- [166] Neugebauer, R. and T. Hipke, "Machine tools with metal foams". *Advanced Engineering Materials*, 858-863, (2006).
- [167] Gökmen, U., "Toz metalurjisi yöntemi ile Al esaslı parçacık takviyeli metalik köpük üretimi", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2009).