



# ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜK MALZEMELERDE TAKVİYE ORANINA BAĞLI OLARAK DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Metecan ÖZEN<sup>1\*</sup>, Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Trakya Üniversitesi, Edirne, TÜRKİYE

## Makale Künye Bilgisi:

Özen, M., Taşkın, N. Ü. (2021). Alüminyum Kompozit Köpük Malzemelerde Takviye Oranına Bağlı Olarak Darbe Davranışının İncelenmesi, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(2), 87-95.

## Öne Çıkanlar

- Yarı-katı köpürtme ile üretilmiş farklı Silisyum Karbür (SiC) takviye oranlarına sahip alüminyum köpük numunelerin, darbe test standardına uygun hazırlanması
- Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum köpüklerin yoğunluklarının belirlenmesi
- Farklı SiC takviye oranlarına sahip alüminyum köpük numunelerin darbe davranışlarının belirlenmesi

Makale Bilgileri	Öz
<b>Makale Tarihiçesi :</b> Geliş: 25 Aralık 2021 Kabul: 31 Aralık 2021	Alüminyum köpükler sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek enerji absorbe etme potansiyeli, ses ve alev sönmleme özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilerek daha ekonomik yöntemlerle üretilebilmesi ve daha fazla alanda kullanılabilir hale gelmesi için yapılan çalışmalarda artış görülmektedir. Otomotiv, uçak ve uzay sanayii gibi teknolojik alanlarda alüminyum köpük malzemelerin hem yapısal hem de fonksiyonel olarak geleneksel malzemelerin yerini alması, bu malzemelerin mekanik davranışlarının tam olarak anlaşılması ve kontrol edilmesine bağlıdır. Seramik parçacık takviyesi ile gözenek yapısının ve dağılımının iyileştirildiği, üretime yönelik çalışmalar literatürde mevcut olmasına rağmen alüminyum kompozit köpüklerin darbe davranışlarını inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu çalışmada farklı oranlarda SiC parçacıkları ile takviye edilmiş kompozit alüminyum köpük malzemeler çentik darbe testine tabi tutularak bu tür bir darbe karşısında enerji absorbe etme kabiliyetleri gözlemlenmiştir.
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Alüminyum Köpük; Silisyum Karbür; Darbe Davranışı; Charpy Testi.	

## INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOR OF ALUMINUM COMPOSITE FOAM MATERIALS DEPENDENT ON REINFORCEMENT RATIO

Article Info	Abstract
<b>Article History:</b> Received: December 25, 2021 Accepted: December 31, 2021	Aluminum foams have begun to be used in many industrial areas due to their low density, high energy absorptive potential, sound and flame damping features. Increased work has been done to improve the mechanical and physical properties of these materials, to produce them with more economical methods and to make them more usable in the field. The technological areas such as automotive, aircraft and space industry depend on the fact that aluminum foam materials, both structurally and functionally, replace traditional materials, and that the mechanical behavior of these materials is fully understood and controlled. The number of studies examining impact behaviors of aluminum composite foams are very low, although studies on production, which are improved with pore structure and distribution by ceramic particle reinforcement, are present in the literature. In this study, SiC reinforced aluminum foam materials were subjected to direct notch impact test at different ratios to observe the ability to absorb energy in the face of such impact.
<b>Keywords:</b> Aluminum Foam; Silicon Carbide; Impact Behavior; Charpy Test.	

## 1. Giriş

Metal köpük malzemeler, yüksek özgül dayanım, yüksek gaz geçirgenliği ve yüksek termal iletkenliğin bir arada olabildiği ileri teknoloji malzemeleridir. Yüksek oranda gözenekliliğe sahip metal köpük malzemeler bu özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamaları için yeni bir malzeme sınıfı olmuştur. Gözenekli metal yapılar için pek çok mevcut uygulamanın yanı sıra kimyasal süreçler için ısı değiştirgeci veya filtre olarak kullanılmaları ya da otomotiv uygulamalarında darbe enerji sönmüleyicisi olarak kullanılmaları gibi yeni uygulama alanları da oluşmaktadır. Ashby vs. (2000), metal köpükleri bu derece değerli kılan en önemli özelliklerinin hafif yapıları, nispeten yüksek dayanımları ve kendine özgü lineer olmayan deformasyon davranışları olduğunu ortaya koymuştur. Metal köpük malzemeler sahip oldukları bu özelliklere göre ses ve ısı yalıtımında, hafif yapılarda veya enerji sönmüleme gibi diğer alanlarda da kullanılabilirlerdir. Yu ve Banhart (1997), metal köpük malzemelerin, polimer köpük ve ağaçların kullanılmadığı özel ortam ve sıcaklıklar gerektiren mühendislik uygulamaları için olağanüstü avantajlar sunduğunu belirtmiştir.

Song ve Nutt (2007), 1948 yılında Benjamin Sosnick ergittiği alüminyum, civa ile köpürtmeye çalışmıştır. İlk olarak kapalı bir kaba koyduğu alüminyum ve civayı yüksek basınç değerlerinde eriterek karıştırmış, sonra basıncı ortadan kaldırarak civanın buharlaşması ile birlikte köpük üretimi gerçekleştirmiştir. 1950'li yıllarda yapılan çalışmalarda alüminyum ergiyiğinin içine bazı takviye malzemeleri ekleyerek sıvı fazdaki alüminyum metalinin mekanik özelliklerinde değişimler olduğu ve ayrıca daha kolay bir şekilde gözenek oluştuğu gözlemlenmiştir. O'Neill (2004), bu yıllarda William Elliott yaptığı çalışmalar ile alüminyum metalini köpürtme yöntemi geliştirmiştir. O zamanlarda kullanılan gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi ve bir karıştırıcı yardımıyla ergiyiğe gaz salarak köpük üretme yöntemleri günümüzde de hala

kullanılmaktadır. Özer (2005), 1960'lı yıllarda mekanik özellikleri anlamında yüksek kaliteye sahip metal köpük malzemeler üretilmiştir. O dönemdeki enerji kaynakları, günümüzde olduğu kadar önemsenmeyip, sınırsız gözüyle bakıldığından bu tarz bir malzemeye olan ilgi azalmaya başlamış ve 1970'li yıllardan sonra metal köpük üretimi ile ilgili yapılan çalışmalar git gide azalmıştır. Banhart ve Weaire (2002), 1980-1990 yıllarında tekrardan metal köpük ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1950'lerde geliştirilen toz metalurjisi ile köpük üretme yöntemi bu yıllarda yeniden gündeme gelmiş ve yöntem üzerinde çeşitli geliştirmeler yapılmıştır. Günümüzde ise tüm bu yöntemler ile birlikte farklı köpük üretim yöntemleri de geliştirilmeye devam etmektedir.

Günümüzde artık alüminyum köpük üreten firma sayısı ile birlikte kompozit metal köpüklerin kullanım alanlarında da artış olmaktadır. Ayrıca metal köpüklerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve köpüğün üretim sürecini daha güvenilir hale getirmek için yapılan çalışmalar hızla artmaktadır.

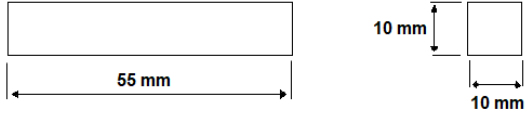
Kompozit alüminyum köpükler, alüminyum köpüklere nazaran çok daha homojen hücre dağılımına ve dayanımı yüksek hücre duvarlarına sahip olup, artan takviye oranlarıyla mekanik dayanım özellikleri değişmektedir. Bu çalışmada alüminyum köpük malzemelerin darbe davranışlarının araştırılması amacıyla üç farklı alaşımdan üretilen ve farklı oranlarda SiC takviyesi ile farklı yoğunluğa sahip kompozit alüminyum köpük malzemeler darbe testine maruz bırakılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

## 2. Analiz

Bu bölüm üç kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda numunelerin hazırlanmıştır, ikinci kısımda bu numunelere ait yoğunluk ölçümleri yapılmıştır, üçüncü kısımda numunelere çentik darbe deneyi uygulanmıştır.

## 2.1. Numunelerin Hazırlanması

Yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilmiş olan, takviyesiz ve %0 ile %20 arasında değişen silisyum karbür takviye oranlarına sahip Al 5083, Al 5754 ve Al 7075 alaşımlı köpük numuneler alüminyum malzemeler için belirlenmiş olan ASTM E23 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. ASTM E23 standardı

Her bir numuneden üçer adet olmak üzere numunelerin kesim işlemleri Metkon marka Microcut 200 model numune kesim cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Metkon Microcut 200 kesim cihazı

Kesim işlemi sırasında diskin dönüş hızının kesilen numunenin cinsine göre ayarlanması gerekir. Alüminyum kompozit köpükler için, disk dönüş hızı malzemenin içerdiği takviye oranının artışı ile ters orantılı olacak şekilde düşmektedir. SiC katılmamış (takviyesiz) bir numunenin kesimi 120 rpm hız ile (dakikada 120 dönüş) gerçekleştirilirken, içinde %20 SiC olan bir numuneyi kesmek için dönüş ayarını 40 hatta 30, 20 rpm'lere kadar düşürmek gerekmektedir.

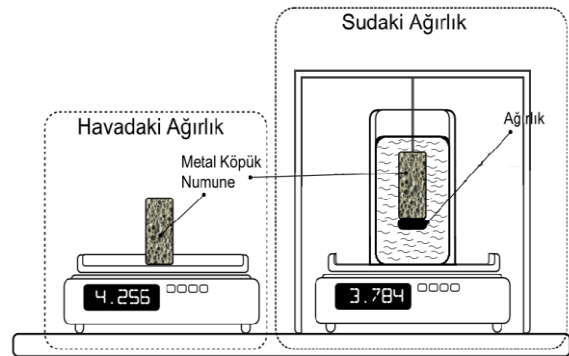
ASTM E23 standardına uygun olarak kesim işlemi yapılan numuneler Şekil 3'te gösterilmiştir



Şekil 3. Ölçülere uygun kesilmiş numuneler

## 2.2. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluklarını hesaplamak için Arşimet Prensibinden yararlanılmıştır. Numunelerin havadaki ve sudaki ağırlıkları bir düzenek yardımıyla hesaplanmıştır (Şekil 4). Numunelerin yoğunluğu sudan hafif olduğu için ölçümler sırasında numunelerin suya batmasına yardımcı olacak bir ağırlık belirlenip, bu cismin sudaki ağırlığı hesaplanmıştır. Ardından numuneler bu cisim ile birlikte suya batırılmış ve böylelikle numunelerin sudaki ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 4. Arşimet prensibi ile yoğunluk ölçümü

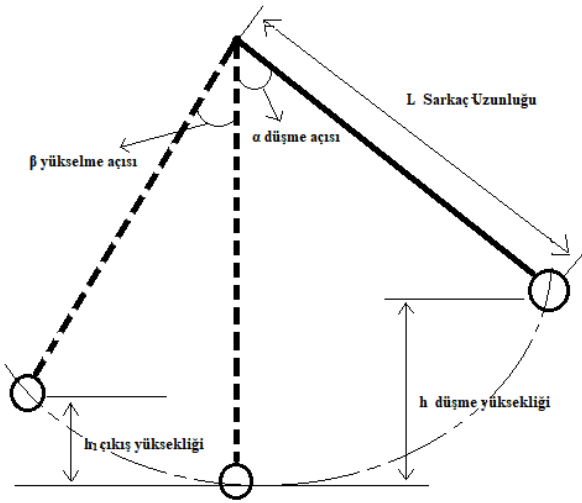
## 2.3. Çentik Darbe Deneyi

Gevrek malzemelerin çentik darbe deneyi için hazırlanan test numunelerine çentik açılmamaktadır.

Aynı durum metal köpük malzemeler için de geçerlidir. Sahip olduğu gözenekli yapı, malzeme üzerinde çentik etkisi göstermektedir. Bu sebeple köpük numunelerin darbe testlerinde çentik açılmamaktadır.

Numunelerin testleri Tubitak Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'da bulunan Zwick marka masaüstü çentik darbe test cihazında, 7,5 Joule'lük çekiç ile yapılmıştır. Test sonuçlarına doğrudan etki edebilecek boyutta bir hava sürtünmesi olduğundan ilk olarak boş salınım gerçekleştirilerek hava sürtünme katsayısı 0,25 Joule olarak tespit edilmiştir.

Belirli bir  $h_0$  yüksekliğinde bulunan çekiç bu konumda  $G h_0$  enerjisine sahiptir. Serbest bırakılan sarkaç numuneye çarparak kırar ve  $h$  yüksekliğine çıkar. Bu konumda  $G h_1$  enerjisine sahip olur. Bu iki enerji arasındaki fark numunenin kırılması için gereken enerjiyi, başka bir deyişle darbe direncini gösterir (Şekil 5).



Şekil 5. Çentik darbe testinin şematik gösterimi

Köpüklerin darbe mukavemetlerini hesaplayabilmek için charpy darbe testi sırasındaki kırılma yüzey alanları hesaplanmıştır. Gözenekli bir yapıya sahip bu köpüklerin kesit alanlarını hesaplarırken alüminyum alaşımlarının yoğunluğu  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olarak alınmış ve köpük malzemelerin kendi yoğunlukları ile alüminyum alaşımlarının yoğunluğu karşılaştırılarak

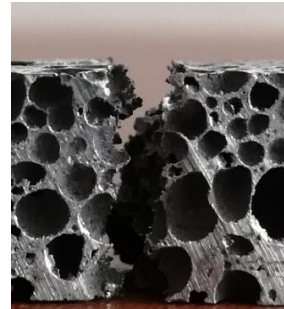
kesit alanındaki gözenek boşluklarının yüzdesi yaklaşık bir değerle hesaplanmıştır.

Örneğin;  $2,7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip alüminyum alaşımının kesit alanı %100'dür.  $0,703 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip 1 no'lu takviyesiz Al 5083 alaşımli köpüğün kesit alanı ise yaklaşık %26'lık bir doluluğa sahip olup %74'ünü gözenek boşlukları oluşturmaktadır. Sonuç olarak kenar ölçülerinin çarpımının %26'sı 1 no'lu numunenin kesit alanı vermektedir.

### 3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde farklı oranlarda SiC takviyesine sahip üç farklı alüminyum alaşımı için yapılan darbe testi sonuçları incelenmiştir. Al 5754 alaşımına ait verilerde, darbe enerjilerinin diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda Al 5754 alaşımı ile yapılmış olan SiC takviyeli köpükler, diğer alaşımlar ile yapılan köpüklere göre daha fazla enerji absorbe özelliğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Al 7075 alaşımlarına ait numunelerin test sonuçlarına bakıldığında, Al 5083 ve 5754 alaşımlarına ait numunelerin darbe enerjilerinin, Al 7075 alaşımına ait numunelerinkinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Al 5083 alaşımli köpüklere ait özellikler ve test sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir. Çentik darbe testinin uygulanmış bir alüminyum köpük malzemede kırılma kesitinin fotoğrafı Şekil 6 da verilmiştir



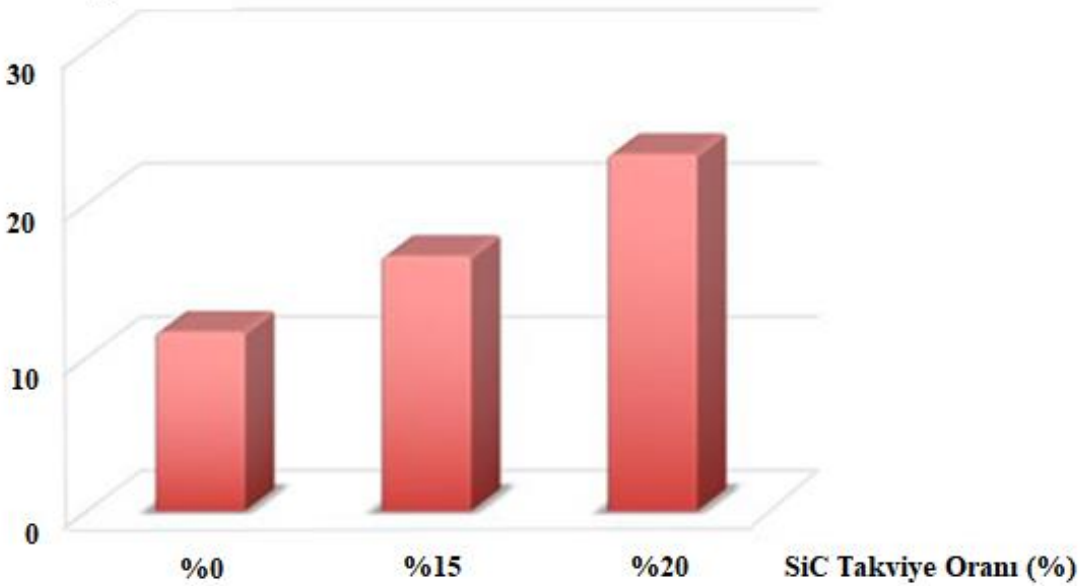
Şekil 6. Çentik darbe testinin uygulanmış bir alüminyum köpük malzemede kırılma kesiti

**Tablo 1.** Al 5083 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
1	0	0.703	34.1642	0.45	13.1717
2	0	0.559	22.6832	0.25	11.0214
3	0	0.593	23.1217	0.25	10.8124
4	15	0.731	28.6949	0.55	19.1672
5	15	0.784	29.8941	0.50	16.7257
6	15	0.778	28.7807	0.40	13.8982
7	20	0.440	14.9053	0.35	23.4816
8	20	0.544	24.9170	0.60	24.0799
9	20	0.633	27.1139	0.60	22.1289

Takviyesiz ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımı köpükler ve absorbe ettikleri enerji miktarları incelendiğinde, genel olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. %15 SiC takviyeli köpüklerde ise böyle bir sonuca varılamamıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olduğu durumlarda köpük malzeme yoğunluğu fazla olsa bile o numunenin daha az enerji absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.

%15 ve %20 SiC takviyeli Al 5083 alaşımlı köpükler ile takviyesiz Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,25-0,6 J değer aralığında değiştiği, darbe tokluklarının ise 10-25 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasında olduğu yapılan çalışmada ortaya konmuştur. Al 5083 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları Şekil 7'deki grafikte gösterilmiştir.

**Darbe Tokluğu kJ/m<sup>2</sup>****Şekil 7.** Farklı takviye oranlarına sahip Al 5083 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği

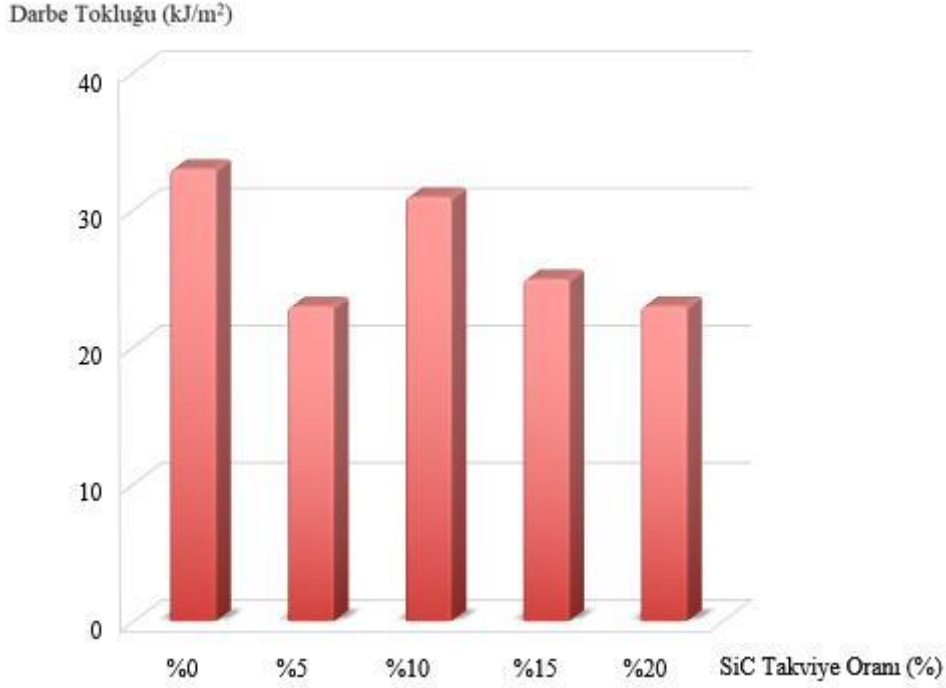
Al 5754 alaşımlı farklı takviye oranlarına sahip köpüklerin özellikleri ve test sonuçları Tablo 2’de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Al 5754 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
10	0	0.886	38.8153	1.15	29.6275
11	0	0.958	47.1358	1.80	38.1875
12	0	0.811	33.8673	1.05	31.0034
13	5	0.662	25.8673	0.55	21.2624
14	5	0.891	35.4508	1.00	28.2081
15	5	0.664	31.0973	0.60	19.2943
16	10	0.642	24.5286	0.60	24.4612
17	10	0.573	23.1014	0.90	38.9587
18	10	0.495	17.0878	0.50	29.2606
19	15	0.735	30.1766	0.9	29.8244
20	15	0.643	22.5695	0.65	28.7999
21	15	0.625	21.7401	0.35	16.0993
22	20	0.633	25.1329	0.70	27.8519
23	20	0.721	29.2279	0.60	20.5283
24	20	0.612	24.4543	0.50	20.4463

Al 5754 alaşımı köpükler incelendiğinde benzer olarak yoğunluk arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. Yoğunluk olarak aynı numunenin hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından dolayı kırılma olayı gözenek yoğunluğunun fazla olduğu kesitlerde gerçekleşmiştir. Örneğin; 16 nolu %10 SiC takviyeli numunenin yoğunluğu, 17 nolu numuneden daha fazla olmasına rağmen daha az enerji absorbe ederek kırılmıştır. Bunun sebebi 16 nolu numunenin kırılma kesitinde büyük gözenek boşluğu bulunmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir.

%20’ye kadar SiC takviye oranlarına sahip Al 5754 alaşımlı köpük numunelerin darbe enerjileri 0,35-1,80 Joule arasında olduğu söylenebilmektedir. Darbe toklukları ise 16-38 kJ/m<sup>2</sup> aralığında değişkenlik gösterdiği sonucuna varılmaktadır. Al 5754 alaşımlı köpüklerin darbe tokluklarındaki dalgalanma Şekil 8’deki grafikte görülmektedir.



**Şekil 8.** Farklı takviye oranlarına sahip Al 5754 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği

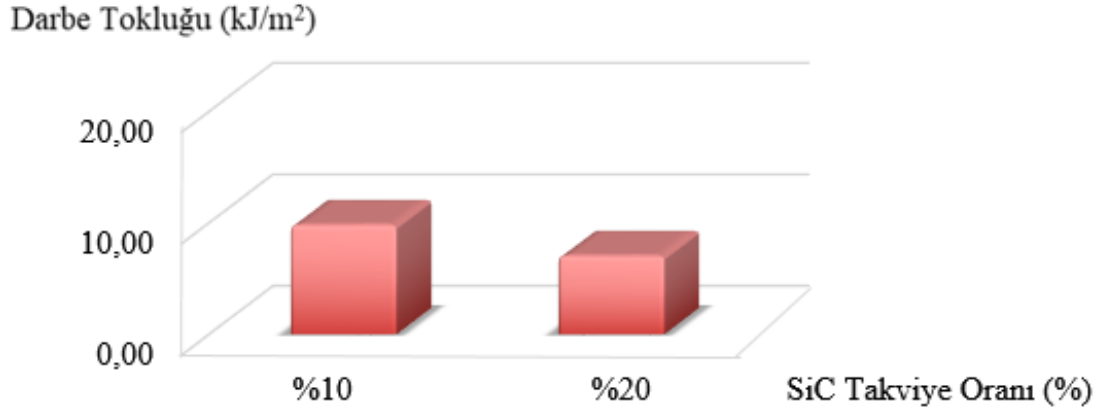
Al 7075 alaşımlı %10 ve %20 SiC takviye oranına sahip köpük numunelerin özellikleri ve test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir

**Tablo 3.** Al 7075 alaşımlı numunelerin özellikleri ve deney sonuçları

Numune No.	SiC Takviye Oranı (%)	Yoğunluk, (g/cm <sup>3</sup> )	Kesit Alanı, (mm <sup>2</sup> )	Darbe Enerjisi, (Joule)	Darbe Tokluğu, (kJ/m <sup>2</sup> )
25	10	0.448	16.8237	0.20	11.8880
26	10	0.340	14.0935	0.10	7.0955
27	10	0.429	14.3197	0.15	10.4751
28	20	0.585	23.4522	0.15	6.3960
29	20	0.716	24.6861	0.20	8.1017
30	20	0.619	22.5377	0.15	6.6555

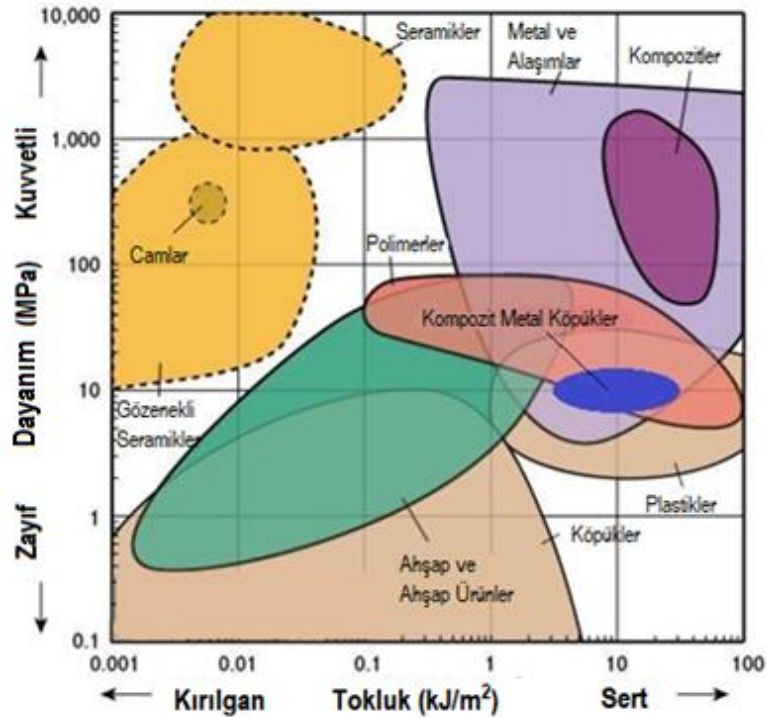
Al 7075 alaşımı köpükler incelendiğinde diğer alaşımlı köpüklerde olduğu gibi numune yoğunluğu arttıkça absorbe edilen enerji miktarının da arttığı görülmüştür.

%10 ve %20 oranlarında SiC takviyesine sahip Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe enerjileri 0,15-0,2 J'lük değer aralığında olup darbe toklukları ise 6-12 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. Şekil 9'deki grafikte Al 7075 alaşımlı köpüklerin darbe toklukları gösterilmiştir.



Şekil 9. Farklı takviye oranlarına sahip Al 7075 alaşımlı köpüğün darbe tokluğu grafiği

Bu çalışmadaki %20'ye kadar silisyum karbür takviye oranına sahip alüminyum köpüklerin darbe toklukları 6 – 39 kJ/m<sup>2</sup> değerleri arasındadır. Bu çalışmada kullanılan SiC takviyeli alüminyum köpüklerin basma dayanımları 8-20 MPa aralığındadır. Bu sonuçlar ile birlikte irdelendiğinde SiC takviyeli alüminyum kompozit köpük malzemelerin, farklı malzemeler arasındaki yeri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Kompozit metal köpüklerin dayanım-tokluk diyagramındaki yeri

#### 4. Sonuçlar

Al 5083, Al 5754 ve Al 7075 olmak üzere üç farklı alüminyum alaşımından doğrudan yarı-katı köpürtme yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarındaki

kompozit köpüklerden hazırlanmış numunelere charpy darbe testi uygulanarak absorbe ettikleri darbe enerjileri ölçülmüştür. Test sonucunda elde edilen bulgular aşağıdaki gibidir:



1. Farklı alüminyum alaşımından elde edilen tüm kompozit numunelere charpy darbe testi uygulanmış ve numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetlerinin alaşımın karakteristiğine uygun olarak değiştiği görülmüştür. Metal alaşımının kimyasal yapısına bağlı olarak sünek veya gevrek olması, o alaşımdan üretilen köpük malzemelerin de kırılma esnasında aynı karakterde davranmasına neden olmaktadır.
2. Tüm alüminyum çeşitlerinde köpük yoğunluğunun artması ile kırılma için gereken darbe enerjisi artmıştır.
3. Yoğunluk olarak aynı olan numunelerde, numunenin hacmi içerisinde homojen gözenek boyut ve dağılımı çok hassas olarak sağlanamadığından, kırılma kesitindeki boşluk oranının fazla olmasından dolayı numunenin yoğunluğu fazla olsa bile daha az enerji absorbe ederek kırıldığı gözlemlenmiştir.
4. Darbe enerjisi, numunenin kırılma yüzeyindeki gözeneklilik oranına, takviye oranına ve alaşımın kimyasal bileşimine göre değişim göstermektedir. Al 5754 alaşımından üretilen köpükler 5083 ve 7075 alaşımından üretilen köpüklere göre daha fazla enerji absorbe ederek kırılmışlardır.
5. Çentik darbe numunelerinde takviye oranı arttıkça yapı içindeki gözeneklerin hemen hemen aynı boyuta geldiği ve homojen dağıldığı görülmüştür. Gözenek büyüklüklerinin hemen hemen eşit olduğu, aynı yoğunluğa sahip numunelerde silisyum karbür takviye oranı arttıkça darbe enerjisini arttığı da gözlemlenmiştir.
6. Deney sırasında kırılma kesitleri incelendiğinde kırılmanın büyük gözeneklerin olduğu kesitlerde gerçekleştiği, numune içindeki gözenek boyutlarının kırılma enerjisinin belirlenmesinde önemli ölçüde etkisi olduğu görülmüştür.

Alüminyum kompozit köpük malzemelerde takviye oranının artışı ile darbe enerjisinin değişiminin incelenmesinde numune içindeki

gözeneklerin yerleşimi de dahil olmak üzere çok fazla sayıda parametrenin etkili olduğu görülmüştür.

#### **Kaynaklar**

- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J. Hutchinson, J.W., Wadley H.N.G., Metal Foams: a design guide, *Materials and Design*, 23 (1), 119-251, 2000.
- Yu, C.J., Banhart, J., Mechanical properties of metallic foams, *Fraunhofer USA Metal Foam Symposium*, Delaware-USA, 37-48, 07-08 Ekim 1997.
- Song, Z., Nutt. S.R., Rheology of foaming aluminum melts, *Materials Science and Engineering*, 458 (2), 2007
- O'Neill, A.T., Development of closed cell metallic foam using casting techniques, Yüksek Lisans Tezi, North Carolina State University, North Carolina, 2004.
- Özer. G., Alüminyum esaslı köpük metal üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 2005.
- Banhart, J., Weaire, D., On the road again: metal foams find favor, *Phys. Today*, 55 (1), 37-42, 2002.