T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜRE KULLANILARAK ÜRETİLEN CNT TAKVİYELİ ALÜMİNYUM KÖPÜĞÜN KARAKTERİZASYONU

Abdullatif Emar S. ABO SBIA

Danışman	**Doç. Dr. Arif UZUN**
Jüri Üyesi	**Prof. Dr. Melik ÇETİN**
Jüri Üyesi	**Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KASTAMONU – 2019

TEZ ONAYI

Abdullatif Emar S. ABO SBIA tarafından hazırlanan **"Üre Kullanılarak Üretilen CNT Takviyeli Alüminyum Köpüğün Karakterizasyonu"** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde savunulmuş ve **oy birliği** ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Doç. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Melik ÇETİN Karabük Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Kastamonu Üniversitesi	.....

30../10./2019

Enstitü Müdürü	Doç. Dr. Nur BELKAYALI	.....

TAAHHÜTNAME

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildirir ve taahhüt ederim.

Abdullatif Emar S. ABO SBIA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÜRE KULLANILARAK ÜRETİLEN CNT TAKVİYELİ ALÜMİNYUM KÖPÜĞÜN KARAKTERİZASYONU

Abdullatif Emar S. ABO SBIA
Kastamonu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Arif UZUN

Bu çalışmada başlangıç malzemeleri olarak % 99,5 saflıkta Al (<44 µm), > % 95 saflıkta (ortalama dış çapı > 50 nm, uzunluk 10–20 µm) çok-duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT) ve ortalama çapı 1,5 mm olan küresel şekilli üre (CH_4N_2O) granülleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar öncelikli olarak alüminyum ve CNT parçacıklarının karıştırılması ile başlamıştır. Bunun için ağırlıkça oranları değişen (% 0, 0.5, 1 ve 2) CNT parçacıkları alüminyum tozlarına ilave edilerek paslanmaz çelik bir kap içerisinde bilyeli bir karıştırıcıda 60 dakika karıştırılmıştır. Karışımda kullanılan bilye/toz oranı 5:1'dir. Karıştırma esnasında süreç kontrolü için %1 oranında stearik asit kullanılmıştır. Boşluk tutucu olarak ağırlıkça %15, %30 ve %50 oranında üre seçilmiştir. Karışım öncesi üre granülleri üzerine Al/CNT karışım tozlarının yapışması için yapışkan bir yüzey elde etmek üzere etanol (2 hacim%) püskürtülmüştür. Böylece karışım tozların üre üzerine eşit dağılımı sağlanmıştır. Daha sonra karışım 600 MPa basınç altında tek eksenli olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılmış kompaktlardaki ürelerin çözünümü için numuneler 80°C'de 3 saat su banyosunda bekletilmiştir. Daha sonra numuneler etanol ile yıkandıktan sonra kurutulmuştur. Çözelti aşamasından sonra numuneler 650 °C'de 2 saat boyunca sinterleme işlemine tabii tutularak köpük numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin karakterizasyon işlemlerinde makro-mikro yapısal analizler, yoğunluk ölçümleri, sertlik ölçümleri ve basma testleri kullanılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre üre miktarındaki artış ile birlikte gözeneklilik miktarında artış, yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Maksimum gözeneklilik ve yoğunluk %50 üre ile üretilen numunelerde sırasıyla % 69 ve 0.84 g.cm-3 olarak elde edilmiştir. Ayrıca CNT parçacıklarının gözeneklilik üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı ancak sertlik değişimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. %15 üre ile üretilen %2 CNT içeren köpük numunelerde maksimum sertlik (65 HV) elde edilmiştir. Numunelerin sıkıştırma özellikleri köpüklerin bağıl yoğunluklarındaki azalma ile birlikte düşmüştür. Minimum plastik çökme dayanımı (3.4 MPa) %50 üre ile üretilen %1 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al köpük, üre, ezilme davranışı, CNT.

2019, 61 Sayfa
Bilim Kodu:91

ABSTRACT

MSc. Thesis

CHARACTERIZATION OF CNT REINFORCED ALUMINUM FOAM PRODUCED BY USING UREA

Abdullatif Emar S. ABO SBIA
Kastamonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Materials Science and Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arif UZUN

Abstract: In this study, 99.5% purity Al (<44 μm),> 95% purity (average outer diameter> 50 nm, length 10–20 μm) multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and average diameter 1.5 mm spherical shaped urea (CH_4N_2O) granules were used as starting materials. Experimental studies started primarily by mixing aluminum and CNT particles. For this purpose, CNT particles with varying weight ratios (0, 0.5, 1 and 2%) were added to the aluminum powders and mixed in a stainless steel vessel on a ball mixer for 60 minutes. The powder/ball ratio used in the mixture is 5/1. 1% stearic acid was added to the mixture for process control during mixing. The urea (15%, 30% and 50% by weight) was chosen as the space-holder. Ethanol (2 vol%) was sprayed onto the urea granules prior to mixing to obtain an adhesive surface for adhering the Al / CNT mixture powders. Thus, an even distribution of the mixture powders over urea was achieved. The mixture was then uniaxially compressed under a pressure of 600 MPa. For the dissolution of urea in the compacted compacts, the samples were incubated at 80 ° C for 3 hours in a water bath. The samples were then washed with ethanol and then dried. After the solution step, the samples were sintered at 650°C for 2 hours to produce foam samples. Macro-micro structural analyzes, density measurements, hardness measurements and compression tests were used for characterization of the samples. According to the experimental results; the amount of porosity increased with increase in the amount of urea. Density values were also decreased. The maximum porosity and density of the samples produced with 50% urea were obtained as 69% and 0.84 g.cm-3, respectively. In addition, it was determined that CNT particles had no significant effect on porosity but had a significant effect on hardness change. Maximum hardness (65 HV) was obtained in foam samples containing 2% CNT produced with 15% urea. The crushing properties of the samples decreased with the decrease in the relative density of the foams. Minimum plastic collapse strength (3.4 MPa) was obtained in samples containing 1% CNT produced with 50% urea.

Key Words: Al foam, urea, crushing behavior, CNT.

2019, 61 Pages
Science Code:91

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında, değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım Sayın Hocam Doç. Dr. Arif UZUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak her zaman yanımda olan ve benden desteğini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Kastamonu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetimi Koordinatörlüğü tarafından KÜ-HIZDES/2018-31 nolu proje iledesteklenmiştir.

Abdullatif Emar S. ABO SBIA
Kastamonu, Ekim, 2019

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİLMESİ	3
2.1. Köpüklerin Tanımı ve Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması	3
2.2. Metalik Sıvıların Doğrudan Köpürtülmesi	5
2.2.1. Gaz Enjeksiyonu ile Köpürtme İşlemi	5
2.2.1.1. *Tekniğin genel özellikleri*	5
2.2.1.2. *Standart işlem parametreleri*	6
2.2.1.3. *Gaz enjeksiyonu*	6
2.2.2. Köpürtücü Maddelerin Dekompozisyonu ile Köpürtme İşlemi	6
2.2.2.1. *Tekniğin genel özellikleri*	6
2.2.2.2. *Alüminyum köpük stabilizasyonu*	7
2.2.2.3. *Köpürtme işlemi*	8
2.3. Katı Öncüllerinin Köpürtülmesi	10
2.3.1. Toz Sıkıştırma ile Elde Edilen Öncüller	10
2.3.1.1. *Tekniğin genel özellikleri*	10
2.3.1.2. *Sıkıştırma yöntemleri*	10
2.3.1.3. *Alaşım seçimi*	11
2.3.1.4. *Metalik olmayan katkı maddeleri*	12
2.3.1.5. *Köpürtücü maddenin seçilmesi ve uygun hale getirilmesi*	12
3. KOMPOZİT METAL KÖPÜKLER	16
3.1. Seramik Parçacıklar ile Takviyelendirilen Metal Köpükler	16
3.2. Nano Parçacık Takviyeli Metal Köpükler	16
3.2.1. Seramik Nano Parçacık Takviyeli Metal Köpükler	16
3.2.2. Karbon Nano Tüp (CNT) Takviyeli Metal Köpükler	18
3.3. Alüminyum Köpüğün Sıkışma Deformasyon Davranışı	18
3.4. Alüminyum Köpüğün Uygulama Alanları	21
3.4.1. Yapısal Uygulamalar	23
3.4.2. Fonksiyonel Uygulamalar	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
4.1. Malzemeler	27
4.2. Kompozit Köpüklerin Üretimi	28
4.2.1. Tozların Karıştırılması	28
4.2.2. Presleme İşlemi	28
4.2.3. Köpürtme İşlemi	29
4.3. Karakterizasyon İşlemleri	30
4.3.1. Makro ve Mikro yapısal Analizler	30

4.3.2. Yoğunluk Ölçümü 30
4.3.3. Basma Deneyi 31
4.3.4. Mikrosertlik Ölçümü 32
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA 33
5.1. Makro ve Mikro Yapısal Analiz 33
5.2. Gözeneklilik ve Yoğunluk Değişimi 36
5.3. Ezilme Davranışı 42
5.4. Mikrosertlik Değişimi 50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 52
KAYNAKLAR 54
ÖZGEÇMİŞ 61

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

ρ_s	Sinterlenmiş köpük numunenin yoğunluğu
ρ_T	Köpük numunenin teorik yoğunluğu
E*	İdeal açık ve kapalı hücre köpüklerinin elastik modülü
E_s	Hücre duvarı malzemesinin elastite modülü
ρ^*	Köpük numunenin bağıl yoğunluğu
σ_{pl}	Plato gerilmesi
σ_{ys}	Hücre duvarı malzemesinin akma dayanımıdır

Kısaltmalar

AMC	Alüminyum matrisli kompozit
CNT	Karbon nano tüp
EDS	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Metal köpük üretim yöntemleri	4
Şekil 2.2.	CYMAT ve HYDRO prosesinin şematik bir gösterimi	5
Şekil 2.3.	Köpürtücü madde kullanılarak ergiyik metallin doğrudan köpürtülmesi işleminin şematik gösterimi. İşlem aşamaları: 1. Ergiyik metalin viskozitesinin arttırılması, 2. Ergiyik metalin köpürtülmesi, 3. Soğutma (katılaştırma), 4. Köpürtülmüş blok, 5. Köpük dilimleme	9
Şekil 2.4.	Üretilen köpüğün kesit alanı	9
Şekil 2.5.	Köpürtücü madde kullanılmadan üretilen AlMg15Cu10 köpük. (a) genleşmiş sıvı köpüğün X-ışını radyografisi, (b) katı köpüğün X-ışını tomografisi, (c) katı köpük üzerinden alınan ara kesit resmi	15
Şekil 3.1.	Basma deneyi soncu Al köpüğün gerilme gerinim eğrisinin şematik görünümü	19
Şekil 3.2.	Basma yükü altında hücre duvarında meydana gelen bükülme	20
Şekil 3.3.	Basma yükü altında hücre duvarı v e hücre duvarı köşelerdeki çökmeler	21
Şekil 3.4.	"Açıklık" derecesine ve uygulamanın fonksiyonel veya yapısal olup olmamasına göre gruplandırılan hücresel metallerin uygulama alanları	22
Şekil 3.5.	Otomobil kapısı ve zemin kaplamaları için köpük panel (a), ses azaltmak amacıyla üretilmiş Al köpük panel kapmalası (b)	23
Şekil 3.6.	Ses kontrolü için Alusion köpük ile kaplı (a) seyirci salonu, (b) restoran (Cymat)	24
Şekil 3.7.	LED lambaların pasif termal soğutması: (a) M-gözenekli Al açık hücre köpük (M-gözenekli) ve (b) Berlin Teknik Üniversitesinden alüminyum köpük sandviç (AKS) kesiti	25
Şekil 3.8.	Osseo integrasyonu gelişimi için Ti-esaslı gözenekli diş implantının Tomograifisi (a) ve gözenekli yüzeyin ve iç yapısının ayrıntısı (b)	26
Şekil 4.1.	Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü	27
Şekil 4.2.	Küresel şekilli üre	27
Şekil 4.3.	Sıkıştırma işleminde kullanılan hidrolik pres	29
Şekil 4.4.	Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler	29
Şekil 4.5.	Taramalı elektron mikroskobu	30
Şekil 4.6.	Basma testlerinde kullanılan üniversal test cihazı	32
Şekil 4.7.	Sertlik ölçüm cihazı	32
Şekil 5.1.	CNT takviyeli ve takviyesiz alüminyum köpüklere ait makro-yapı şekilleri	34
Şekil 5.2.	CNT/Al köpüklerin hücre duvarları üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS sonucu	35
Şekil 5.3.	%15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları	36

Şekil 5.4. %30 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları 37
Şekil 5.5. %50 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları 37
Şekil 5.6. Farklı oranlarda üre içeren Al köpüklerin CNT miktarından bağımsız gözeneklilik grafikleri 38
Şekil 5.7. Sinterleme sonrası elde edilen numuneler 39
Şekil 5.8. %15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi 39
Şekil 5.9. %30 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi 40
Şekil 5.10. %50 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi 41
Şekil 5.11. Farklı oranlarda üre içeren Al köpüklerin CNT miktarından bağımsız ortalama yoğunluk değerleri..... 41
Şekil 5.12. CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gerilim-gerinim eğrileri.. 43
Şekil 5.13. Çeşitli bağıl yoğunluğa sahip CNT/Al köpüklerin plastik çökme dayanımlarındaki değişim..... 44
Şekil 5.14. Numunelerin bağıl yoğunluk değerlerine bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi..... 44
Şekil 5.15. CNT oranına bağlı olarak numunelerin plastik çökme dayanımlarındaki değişim..... 46
Şekil 5.16. Numunelerin CNT oranına bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi 47
Şekil 5.17. %15 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları..... 48
Şekil 5.18. %30 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları..... 49
Şekil 5.19. %50 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları..... 50
Şekil 5.20. CNT oranına bağlı olarak numunelerin hücre duvarlarındaki mikro sertlik değişimi..... 51

1. GİRİŞ

Metalik köpükler, fiziksel ve mekanik özelliklerin mükemmel kombinasyonu sayesinde çok fonksiyonlu uygulamalar için potansiyel malzemeler haline gelmiştir (Gibson ve Ashby, 1997). Tabiatta var olan çoğu doğal malzeme yoğun yapıya sahip oldukları gibi bazıları da gaz boşlukları içerebilmektedir. Hücresel veya gözenekli malzemelerde gaz fazının hacim oranı katı fazın hacim oranından fazla olabilir. Bu sayede bazı eşsiz özelliklere sahip olan hücresel malzemeler gün geçtikçe ilgi çekici hale gelmektedir. Köpürtme işlemi esnasında stabilizasyona duyulan ihtiyaçtan dolayı her zaman katı parçacık içermeleri metal köpükleri özel kılmaktadır. Metal matris içerisinde yer alan parçacıkların, Young modülünü, dayanımı, termal iletkenliği veya aşınma özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir. Parçacıkların ana fonksiyonu metalik bir eriyiğin özelliklerini geliştirmektir. Ayrıca bir metal köpüğün içerisinde kullanım imkânı sağlamasından dolayı, metal/parçacık kompozit malzemeler arasında metalik köpükler çok özel bir kullanım alanına sahiptirler. Bu bakımdan, metal köpükler iki düzeyde bir kombinasyona sahiptirler. Köpüğün tamamı bir hava/metal bileşimi iken katı matris ikincil bir katı türü ile bir metal (veya alaşım) bileşimine sahiptir (Banhart, 2018). Alev almayan, geri dönüştürülebilen ve hafif olan açık hücreli ve kapalı hücreli metalik köpükler, fonksiyonel ve yapısal mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır (Ashby ve Gibson, 1997; Banhart, 2001).

Açık hücreli metalik köpükler sahip oldukları yüksek özgül yüzey alanları, yüksek termal ve elektrik iletkenlikleri sayesinde ısı değiştiricileri, filtreler, elektrotlar ve darbe sönümleyiciler olarak kapsamlı şekilde kullanılmaktadırlar (Gibson ve Ashby, 1997; Gibson ve Ashby, 1999).

Kapalı hücreli metal köpükler ise özellikle alüminyum alaşımı (Al-alaşımı) başta olmak üzere yüksek dayanım-ağırlık oranı, yüksek darbe enerjisi emme kapasitesi, iyi ses ve titreşim sönümleme özelliği gerektiren yapısal mühendislik uygulamalarında (otomotiv, hava-uzay, endüstriyel donanım ve yapısal konstrüksiyon) tercih edilmektedir. Bu kompozit yapılar da, ince metal levhalar ve ince duvarlı yapılar (örn.

boş tüpler) yüksek mekanik dayanım sağlarken; köpük katman veya dolgu malzemesi çoğunlukla yüksek çarpışma dayanımına katkıda bulunmaktadır (Banhart, 2013).

Hem açık hücreli hem de kapalı hücreli alüminyum köpükler için bazı ısıl işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri bazı araştırmacılar tarafından incelemiştir (Banhart, 2013; Gibson ve Ashby, 1997). Malzemelere uygulanan ısıl işlemler, katı çözeltiden çökeltilerin oluşumunu (çökelti sertleşmesi veya yaşlanma sertleşmesi) veya katı bir çözelti ile matris içerisinde alaşım elementinin difüzyonunu sağlamaktadır. Mekanik özelliklerin geliştirilmesine yönelik uygulanan bu işlemlere ilave olarak sünek metalin performansını arttırmak için katı metal matris içerisine mikro ve nano boyutlu takviye elemanları da ilave edilmektedir. Örneğin alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), seramik elyaflar, seramik nano parçacıklar en cazip takviye malzemelerinden bazılarıdır. Çok yakın geçmişte, metal alaşımlar için takviye elemanı olarak karbonlu malzemelerin kullanımına yönelik ilgi giderek artmıştır. Bu da, hem bilimsel hem de endüstriyel uygulamalar açısından ilgi çekici bir araştırma alanı oluşturmuştur. Özellikle metal matrisli nano kompozitlerin geliştirilmesine yönelik önemli sayıda araştırma faaliyeti başlatılmıştır. Şimdiye kadar, araştırma denemeleri çoğunlukla karbon nano tüpler ile takviyelendirilmiş Al-alaşımlar üzerine yoğunlaşmıştır (Agarwal, Bakshi ve Lahiri, 2016). Karbon nano tüplerin (CNT) çok değişken en-boy oranına sahip (örn. uzunluk ile çap veya uzunluk ile kalınlık oranı) oldukları bilinmektedir. Bununla birlikte, CNT'ler mükemmel elektrik ve ısıl iletkenliklerinin yanı sıra harika yüksek elastik modülü ve mekanik dayanım sergilemektedirler (Gibson ve Ashby, 1997; Harris, 2004). Bu bakımdan, yapısal ve fonksiyonel mühendislik uygulamaları açısından kompozit malzemelerin üretilmesi için CNT'ler çok etkili takviye elemanları olarak görülmektedir.

2. METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİLMESİ

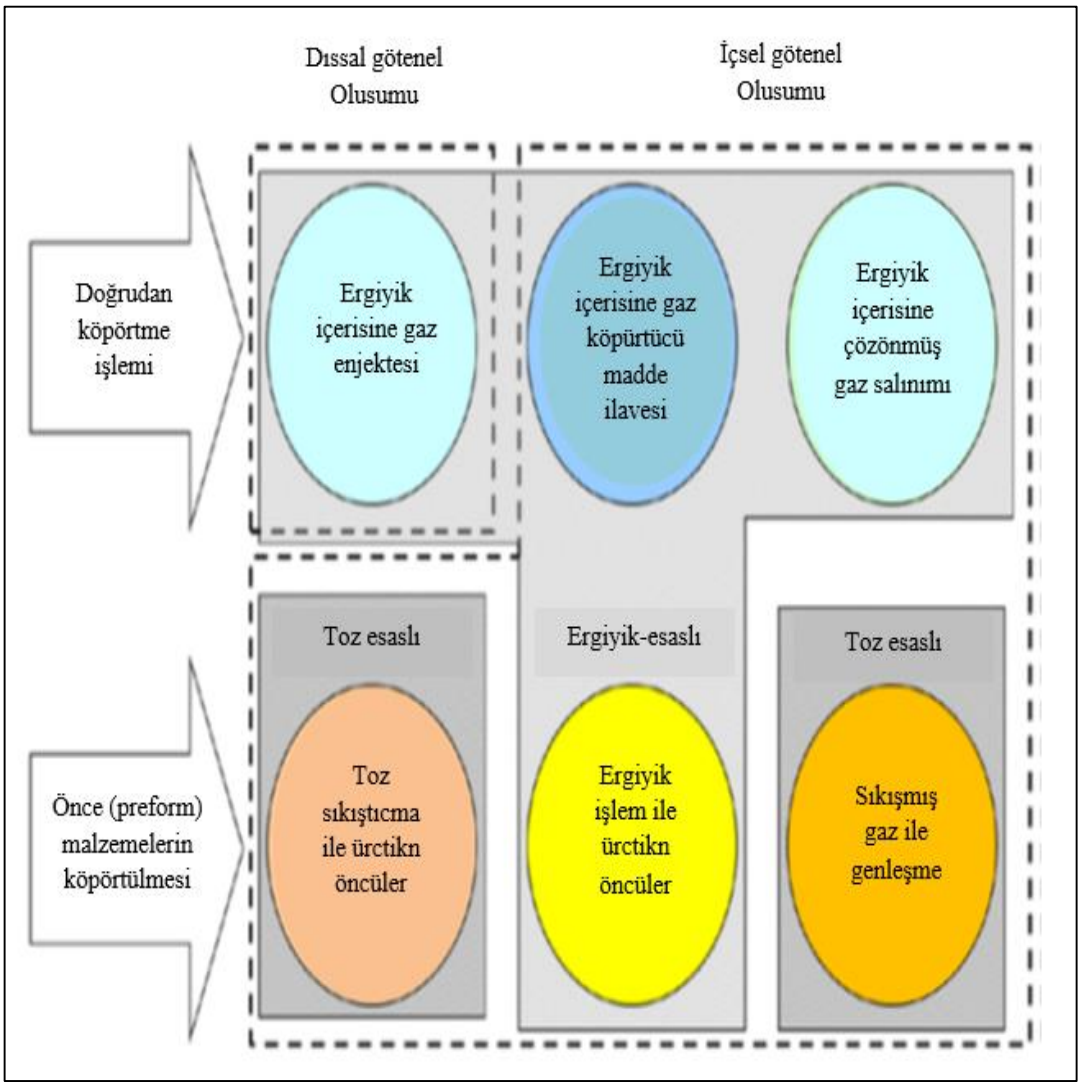
2.1. Köpüklerin Tanımı ve Üretim Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Köpük, gaz dolu baloncukların sıvı içerisindeki dağılımı ile meydana gelmektedir. Genel olarak, yüzey gerilimi ile belirlenen Plato kurallarına uygun şekilde gaz baloncuklarının içsel lokasyonlarının düzenleri değişir. Bu kurallar baloncukları ayıran ince filmlerin yalnızca üçünün bir çizgi hattı üzerinde birleşmesini (Plato sınırı olarak isimlendirilir) ve bu hatların yalnızca dört tanesinin bir noktada buluşabilmesini gerektirir. Filmler ve hatlar eşit açılarda simetrik olarak birleşebilir. Bu kurallar tam olarak sadece sıfır sıvı yüzdesinde etkili olduğu ve gerçek köpüklerdeki sıvılar (özellikle metalik olanlar) için ideal olmadığından sapmalar meydana geldiği bilinmektedir. Su bazlı sıvılar, sıvı polimerler veya metalik ergiyikler dâhil pek çok sıvıdan köpük oluşturulabilir. Katı bir köpük, katılaşma ile bir sıvıdan elde edilmektedir (Banhart, 2018).

Metalik köpük, mevcut durumda boşluk içeren nerdeyse her metalik malzeme için kullanılan çok popüler bir ifade haline gelmiştir. Bu sebeple, metalik köpüklerin kapsayıcı bir tanımını bulmak zordur. Bu malzeme türleri bazen hücresel metal, gözenekli metal, metalik köpük veya metal sünger olarak ifade edilebilir (Banhart, 2000). Metalik köpüklerden bahsedilirken, genellikle katı köpükler ifade edilir. Sıvı metalik köpük sadece malzemenin üretimi esnasında meydana gelen bir aşamadır (Banhart, 1999).

Metallerin, seramiklerin, camların ve polimerlerin köpürtülmesi için var olan tekniklerin bazıları, sinterleme aktivitesi veya elektriksel olarak depolanabilecekleri olgusu gibi metallerin karakteristik özelliklerinden yararlanmak için özel olarak tasarlanmıştır. Bazı yöntemler ile açık hücreli köpükler üretilirken, diğerleri ile hücrelerin büyük çoğunluğunun kapalı olduğu köpükler üretilmektedir (Ashby vd., 2002). Metalin işlem esnasındaki durumuna göre üretim yöntemleri dört farklı grupta sınıflandırılabilir. Bunlar; sıvı metal, toz halindeki katı metal, metal iyon çözeltisi, metal buhar veya gazlı metalik bileşimler gibi işlemleri ifade eder (Banhart, 2001). Metalik köpükler öncelikli olarak gözeneksiz bir sıvı (ergimiş) metal içerisine

boşluklar oluşturarak veya birleşimin oldukça gözenekli olacağı bir şekilde alt bölümlere ayrılmış malzemelerin bir araya getirilmesi ile üretilmektedir (Mostafid, 2007). Metalik köpük üretim yöntemlerine ait sınıflandırma Şekil 2.1'de verilmiştir.



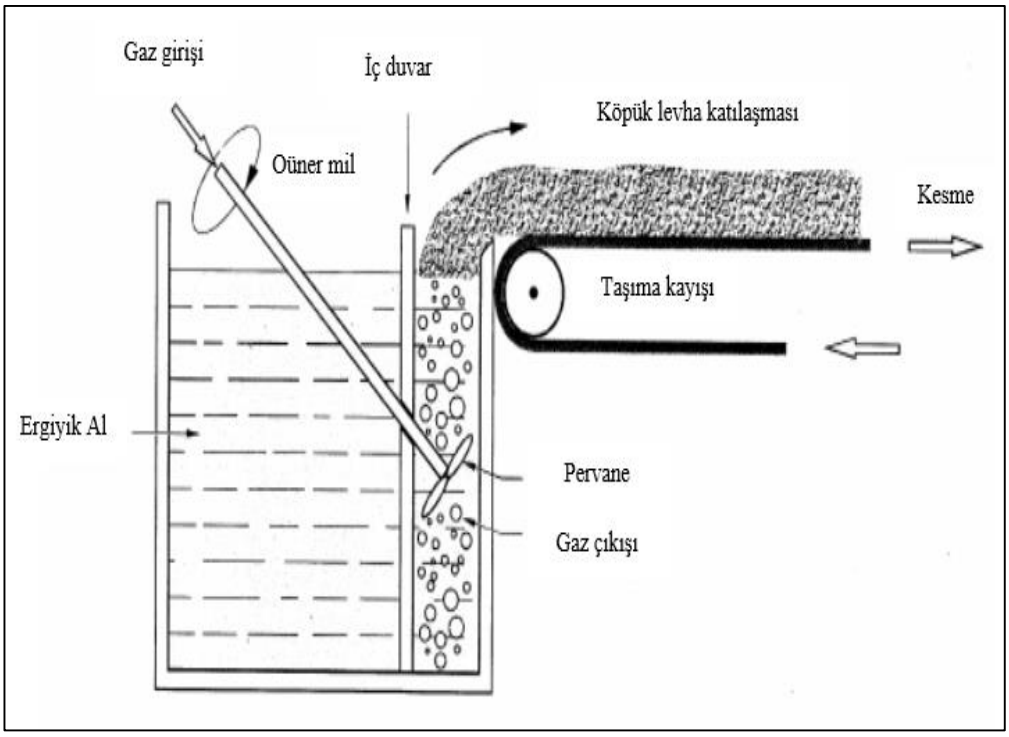
Şekil 2.1. Metal köpük üretim yöntemleri

2.2. Metalik Sıvıların Doğrudan Köpürtülmesi

2.2.1. Gaz Enjeksiyonu ile Köpürtme İşlemi

2.2.1.1. Tekniğin genel özellikleri

Gaz enjeksiyonu endüstriyel boyutta metalik köpük üretimi için önemli bir yöntemdir. Gaz baloncuklarının, Al ve SiC eriyiği içerisine enjekte edildiği CYMAT ve HYDRO prosesleri buna iyi bir örnektir. Bu yöntemde gaz, bir ucunda pervane bulunan bir mil üzerinden ergiyik metal içerisine enjekte edilmektedir. Yöntemde kullanılan şaft üzerinde aynı zamanda gazın üflenmesini sağlayan bir de gaz enjektörü bulunmaktadır. Yöntemde kullanılan pervanenin boyutu, enjekte edilen gaz baloncuklarının oranı ve boyutu üretilen köpüklerin gözenekliliğine ve yoğunluğuna etki etmektedir. Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilen bu yöntem de silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit parçacıkları ergiyik viskozitesini geliştirmek için kullanılmaktadır (Azzi, 2004).



Şekil 2.2. CYMAT ve HYDRO prosesinin şematik bir gösterimi

2.2.1.2. Standart işlem parametreleri

Standart işlem parametreleri, parçacık türü (genellikle SiC veya Al_20_3 kullanılır), parçacık boyutu (genellikle 15 μm), üflenen gazın kompozisyonu (normalde hava), uygun alaşımlar (sıklıkla A356=AlSi7Mg alaşımı), ergime sıcaklığı (genel olarak sıcaklık ilk önce 710 °C daha sonra 650 °C'ye kadar düşer), gaz enjeksiyon noktası ve yüzey arasındaki mesafedir (50 mm'den 300 mm'ye kadar değişen) (Jin, Kenny vd., 1990; Banhart, 2001).

2.2.1.3. Gaz enjeksiyonu

Gaz enjeksiyonu, bir dizi çıkış nozuluna bağlı olan döner bir hava enjeksiyon milinden gazın sıvı içerisine gönderilmesi ile gerçekleştirilir. Daha öncede belirtildiği gibi köpüğün hücre boyutu gaz akış oranı ve diğer parametreler ile kontrol edilebilebilir. Şekil 2.2'de gösterilen basit bir gaz enjeksiyon miline kıyasla çok daha değişik formlarda pervane kanatları bulunduran döner millerin kullanılması önerilmektedir. Bu sayede sıvı içerisine gazın verilmesi ile ilave baloncuklar oluşturmak için güçlü bir girdap oluşumu sağlanır (Jin, Kenny ve Sang, 1992).

2.2.2. Köpürtücü Maddelerin Dekompozisyonu ile Köpürtme İşlemi

2.2.2.1. Tekniğin genel özellikleri

Bu yöntemde erğiyik bir metal içerisine gaz enjektesi yerine gaz salıcı bir madde eklenmektedir. Ergimiş metalin tutulduğu sıcaklıkta gaz salınımına olanak sağlayan bileşim metal eriyiğinde dağılır ve burada gazın salınımına izin verir. Böylece gaz, baloncukları ergiyik içerisinde genleşerek orijinal metal eriyiğinden çok daha yüksek hacime sahip baloncuk kümeleri meydana getirir. Bu yöntemle Al köpükleri üretmek için ilk olarak Bjorksten Araştırma Laboratuvarlarında girişimlerde bulunulmuştur. Yapılan çalışmalarda köpürtücü maddeler olarak TiH_2 veya ZrH_2 kullanılmış ve temel olarak bir dizi Al-Mg alaşımları köpürtülmüştür (Elliott, 1956).

2.2.2.2. Alüminyum köpük stabilizasyonu

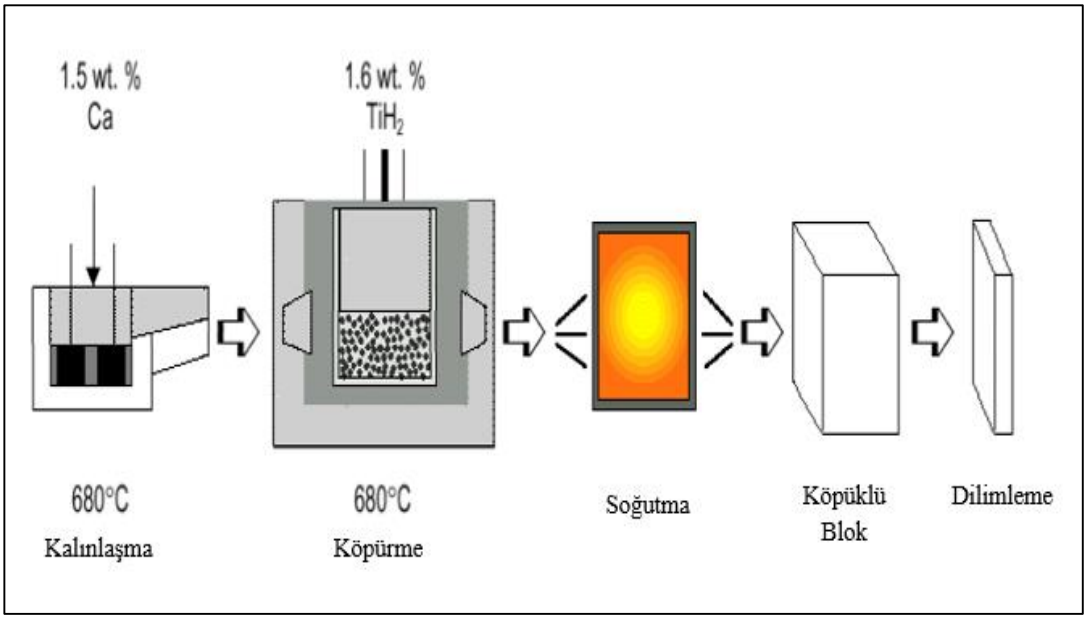
Köpükler kararsız sistemlerdir. Çünkü geniş yüzey alanları enerjinin minimum bir değerden uzak olmasına neden olur. Bundan dolayı köpükler sürekli belirli bir oranda en fazla yarı kararlı olabilirler. Su bazlı ve su bazsız köpükler bir köpük zarı üzerinde yoğun bir tek katman meydana getiren yüzey etkin maddeleri tarafından stabilize edilirler. Bu gibi katmanlar yüzey gerilimini azaltır, yüzey viskozitesini arttırır ve köpük zarının çökmesini engellemek için elektrostatik kuvvetler (ayırma kuvvetleri) meydana getirir. Metallerde görülen elektrostatik kuvvetler ve yüzey aktif maddeleri olmadığından metalik köpükler farklı yöntemler ile stabilize edilir. Saf metalik ergiyikler çoğunlukla katkı maddeleri ile birlikte köpürtülürler. Ancak ilave katkı maddesi ergiyik için stabilizör görevi görmesi gerekir. Bu sebeple, eğer gaz salınımı ile katılaşmanın tamamlanması arasındaki zaman aralığında önemli bir farklılık olmaz ise köpüğün (kinetik olarak) kararlı olduğu söylenebilir. Köpük üzerine etki eden dört kuvvet mevcuttur. Bunlar; (1) yer çekimi kuvveti, (2) harici atmosferik ve dâhili gaz basıncı, (3) mekanik kuvvetler ve (4) metalik fazı dâhilinden kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerdeki herhangi bir dengesizlik köpüğün hareketine neden olacaktır. Köpük morfolojisindeki değişimler Şekil 2.2'de verilen terimlere göre sınıflandırılabilir. Bu morfoloji köpüklerin fiziği olarak daha ayrıntılı şekilde açıklanabilir. Gözenek oluşumu köpüklerin başlangıcı ve drenajın da sonları olarak değerlendirilmesi durumunda köpüklerin fiziği başlangıçları, ömürleri ve sonları ile ilgili pek çok olgudan oluşmaktadır. Genleşme, birbirleriyle ilişkili olarak dış kuvvetler tarafından veya köpürtme işlemi esnasında dahili gaz basıncındaki değişimler ile baloncukların hareket etmesi olarak tanımlanabilir. Drenaj, ergimiş metal köpüklerinin zamana bağlı dengesizliğini tetikleyen itici kuvvetlerden biridir. Sıradan su bazlı köpükler için, bu olgu hem deneysel hem de teorik yönden iyi incelenmiş ve anlaşılmıştır. Durum metalik köpükler için farklıdır. Mat yapılarından dolayı drenaj sadece ya katılaştırılmış örneklerin yoğunluk dağılımının ölçülmesi ile ya da X-ışını veya nötron radyoskopisi ile gözlemlenmiştir. Kapalı hücreli köpüğün oluşumu esnasında kararlı sıvı köpüğü sıvı-gaz ara yüzdeki yüzey gerilimini ve hücreler içerisindeki hava basıncı ile sıvı hücre duvarlarının ağırlığını dengelemektedir. Basit bir kuvvet dengesi hava basıncındaki bir artışın hücre boyutunu artırdığını ifade etmektedir. Hücre duvarlarının bir araya getirdiği kenarlarda yüzey gerilim kuvvetleri sıvı-gaz ara yüzeyinde Plato

sınırı olarak ifade edilen bir kavis içerisinde eğilmesine yol açar. Bu da, hücre duvarlarından hücre kenarlarına doğru sıvıyı çekerek hücre kenarındaki sıvı basıncının hücre duvarındakinden daha düşük olmasına neden olur. Daha sonra yerçekimi kuvvetleri hücre kenarları boyunca sıvının drenajına neden olur. Drenaj esnasında Plato sınırları boyut olarak azalır ve sıvı köpüğün hücre duvarları daha ince bir hale gelir. İmpurite içermeyen saf bir sıvıda yüzey gerilimi genel olarak dengelenemeyecek kadar güçlüdür ve hücre duvarı çabucak patlar. Sıvı köpüğün stabil bir hale gelmesi için her hücredeki sıvı gaz ara yüzeyinin yüzey geriliminin etkisini azaltmak için değişmesi gerekir. Sıvı bir köpük, ya sıvı-gaz ara yüzeyinin yüzey enerjisini düşüren bir yüzey aktif maddesi kullanarak ya da yüzey katmanının viskozitesini arttırarak stabil hale getirilebilir. Kararlı hale getirilmiş sıvı köpük içindeki bir hücre duvarı kritik bir kalınlığa ulaşıncaya kadar bir miktar drene olabilir ve devamında bu durum sonlanır. Kuru köpük olarak isimlendirilen drene olmuş sıvı köpük bu sebeple neredeyse üniform kalınlıktaki hücre duvarlarına ve küçük Plato sınırlarına sahip olur. (Banhart, 2013, 2018; Elliott, 1956).

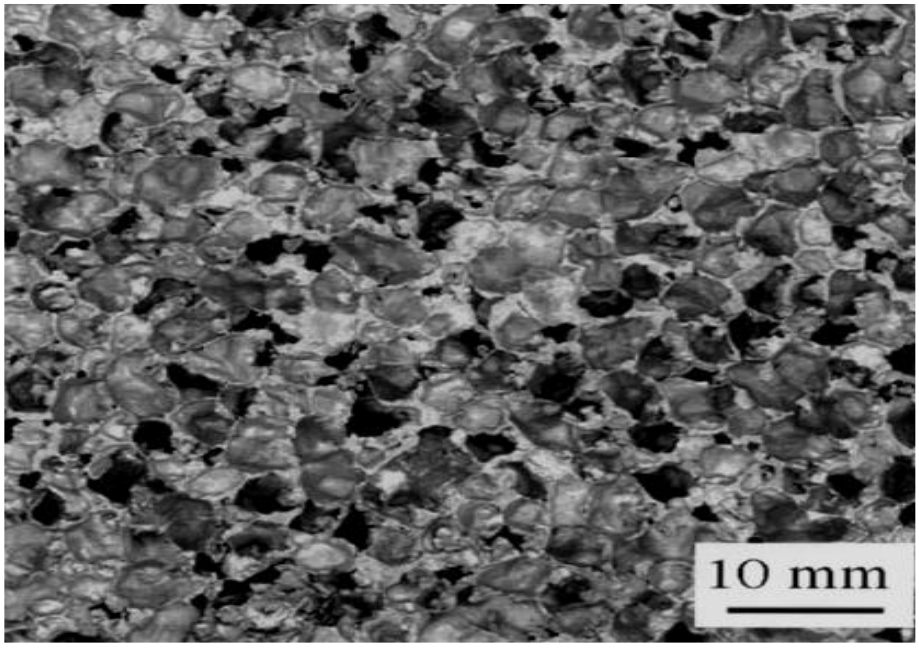
2.2.2.3. Köpürtme işlemi

Ergiyik metallerin köpürtülmesi için bu yöntemde gaz yerine köpürtücü madde ilave edilmektedir. Köpürtücü madde ısı etkisi ile çözünür ve köpürtme işlemini ileri seviyelere götüren gazı serbest bırakır. Şekil 2.3'de bu yöntem boyunca köpüğün üretim aşamaları gösterilmektedir. Bu teknikte genellikle alüminyum gibi ergiyik metale viskoziteyi dengelemek için kalsiyum ilavesi yapılır. Muhtemel birkaç dakikalık karıştırma esnasında sıvı metali kalınlaştıran Kalsiyum oksit (CaO), kalsiyum alüminyum oksit ($CaAl_2O_4$) veya Al-Ca ara metalik oluşumundan dolayı ergiyik metalin viskozitesi beş kata kadar artar (Simone ve Gibson, 1998; Miyoshi, Itoh, Akiyama ve Kitahara, 1998). Viskozite istenilen değere ulaştıktan sonra sıcak viskoz sıvı içerisine hidrojen gazı salınımı sağlayan köpürtücü madde titanyum hidrür (TiH_2) eklenir. Eriyik metal kısa bir süre içerisinde yavaş bir şekilde genleşmeye başlar ve köpürtme kalıbı aşamalı olarak dolar. Köpürme işlemi sabit bir basınçta gerçekleşir. Daha sonra kalıp alaşımın ergime derecesinin altında soğutulur ve sıvı köpük sonuç olarak katı alüminyum köpük haline dönüşür (Banhart, 2001). Bütün köpürme

prosedürü standart bir dizi üretim için 15 dakika sürebilir (Miyoshi vd., 1998). Bu yöntem ile üretilmiş örnek bir köpüğün morfolojisi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Köpürtücü madde kullanılarak ergiyik metallin doğrudan köpürtülmesi işleminin şematik gösterimi. İşlem aşamaları: 1. Ergiyik metalin viskozitesinin arttırılması, 2. Ergiyik metalin köpürtülmesi, 3. Soğutma (katılaştırma), 4. Köpürtülmüş blok, 5. Köpük dilimleme. (Mostafid, 2007)



Şekil 2.4. Üretilen köpüğün kesit alanı

Literatürde, alüminyum köpüklerin üretilmesi için zirkonyum hidrür de (ZrH_2) köpürtücü madde olarak tavsiye edilmektedir. Ergiyik içerisine volfram tozu gibi bir stabilizör ve köpürtücü madde karışımı enjekte edilerek alüminyum ve diğer düşük ergime sıcaklığına sahip alaşımlara benzer şekilde demir esaslı alaşımların bile köpürtülebileceği ileri sürülmüştür (Andrews, Huang ve Gibson, 1999).

2.3. Katı Öncüllerinin Köpürtülmesi

Metalik köpük hazırlamanın diğer bir yolu da katı metalik öncülerin (preform malzemeler) hazırlanmasıdır. Bu malzemeler ısıl işlem gibi ikincil bir işlem uygulanarak köpük haline dönüştürülmektedir. Preform malzemeler metal ve köpürtücü madde tozlarının karıştırılması ile hazırlanmaktadır. Bu yaklaşıma literatürde zaman zaman "toz metalurjisi", "toz kompakt köpürtme" veya sadece "toz" yöntemi denilmektedir (Banhart, 2018).

2.3.1. Toz Sıkıştırma ile Elde Edilen Öncüller

2.3.1.1. Tekniğin genel özellikleri

Bu yöntem metal tozu (örn. alüminyum) ile köpürtücü bir maddenin (TiH_2, ZrH_2 veya $CaCO_3$) karıştırılmasını, isteğe bağlı olarak soğuk bir ön sıkıştırma aşamasından sonra karışımın kalıptan geçirilmesini ve metalin veya alaşımın ergime noktasına yakın bir sıcaklığa kadar kontrollü ısıtma yoluyla preformun köpürtülmesi işlemlerini kapsamaktadır (Baumeister ve Schrader, 1992).

2.3.1.2. Sıkıştırma yöntemleri

Bu teknikte tozların sıkıştırılması için soğuk presleme, sıcak presleme, ekstrüzyon ve haddeleme gibi sıkıştırma teknikleri kullanılabilmektedir. Kullanılan teknikler köpüğün kalitesine etki etmektedir (Uzun ve Türker, 2015). Örneğin ekstrüzyon işlemi ile tozlar tek eksenli sıcak preslemeye kıyasla daha yüksek miktarlarda sıkıştırılabilir ve yoğunlaştırılabilir. Ekstrüzyon yöntemi ile şıkıştırma işleminde öncelikli olarak alüminyum tozu, alaşım elementi ve köpürtücü madde (TiH_2) karışımı ince duvarlı bir alüminyum silindir içerisine doldurulur. Daha sonra 400°C sıcaklıkta ön ısıtmadan

geçirildikten sonra yatay bir ekstrüzyon kalıbı içerisine yerleştirilerek ekstrüzyon işlemine tabi tutulur. Böylece yasası plaka veya çubuk şeklinde ürünler üretilir. Fazla miktarda küçük kesitli preform malzeme üretimi için zaman zaman "Uyumlu ekstrüzyon" olarakta isimlendirilen sürekli ekstrüzyon yöntemi de kullanılabilmektedir. Bu yöntemde kalıp boşluğuna karışım toz döner bir çark (300 – 600 mm çap) yardımı ile sürekli olarak beslenmektedir. Kalıp boşluğuna doğru akış esnasında toz sürtünme ile ısınır, yoğunlaştırılır ve şekillendirilir (örn. 20 m/dk oranında 9.5 mm çapında bir tel gibi). Köpürebilir preform malzeme üretim yöntemlerinden bir diğeride toz haddeleme yöntemidir (Banhart, 2013, 2018; Worz ve Degischer, 1995). Bu yöntemde karışım tozlar yassı konteynırlara doldurulur ve daha sonra sıcak olarak haddelenir. Bu işlem birkaç pasoda tekrarlanarak yoğunlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Böylece kabul edilebilir nitelikte köpürtülebilir preform malzemeler elde edilir (Banhart, 2018).

2.3.1.3. Alaşım seçimi

Alüminyum alaşımların köpürtülmesi çoğu araştırmacının odak noktasıdır. Saf alüminyum dışında, Al-Cu, Al-Si, Al-Mg, Al-Si-Cu, Al-Mg-Si, Al-Mg-Zn ve Al-Sn gibi alaşımlar köpük üretimi için tercih edilmektedir. Bununla birlikte araştırmacılar Al haricindeki metalleri de ele almıştır. Alüminyum köpürtme teknolojisinin pirinç, bronz ve çinko gibi alaşımlara aktarılması için sıkıştırma işlemi, köpürtme sıcaklığı ve hidrür içeriği gibi parametrelerde birkaç küçük düzenlemelere ihtiyaç duymaktadır. Örneğin altının köpürtülmesi için %2 civarında silisyum ilavesi ile ergime sıcaklığının düşürülmesine ve köpürtücü madde olarak TiH_2'ün kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Magnezyum alaşımlarının köpürtülmesinde ilk başlarda muhtemel toz parçacıkları üzerindeki oksit katmanlar sıkıştırma prosesini güçlü kılmaktayken bugün bu sınırlamaların çoğu aşılmış durumadır. Bununla birlikte yakın zamanda Mg köpüklerinin üretilebildiği proses koşulları nispeten açığa kavuşturulmuştur. Örneğin köpürtücü madde olarak $CaCO_3$ kullanımı başarılı sonuçlar göstermiştir. Ayrıca % 20 Al ilavesi soğuk ön sıkıştırma ile karışım tozlarının preslenmesi, orta düzeyde sinterleme ve nihai sıcak presleme işlemleri bu başarıya katkı sağlamıştır (Banhart, 2018). Kurşun ve kurşun-kalay alaşımlı metalik köpük üretiminde köpürtücü madde olarak kurşun karbonatlar tercih edilmektedir. Köpükteki metalik impuriteler yok

edildiği zaman köpürtülecek metalin bir tuzunun kullanılması – (örn. Pb köpürtme işlemi için $PbCO_3$ kullanımı) avantaj sağlamaktadır. Bu alaşımların yanı sıra demir ve çelik köpüklerin üretilmesi içinde oldukça fazla çaba sarf edilmiştir. Çeliklerin yüksek ergime aralığından dolayı köpürtücü madde olarak yüksek bozunum sıcaklığına sahip karbonatlara ihtiyaç duyulmaktadır.

2.3.1.4. Metalik olmayan katkı maddeleri

Sıkıştırılmış toz karışımlarının genleşmesi ile elde edilen metalik köpükler kararlılıklarını sıkıştırma öncesi bireysel toz parçacıklarının yüzeylerinde meydana gelmiş oksitlerin varlığına borçludur. Genellikle bu oksitler sıvı köpüğü stabilize etmek için yeterlidir. Yine de, bir takım çalışmada takviye tozlar iki amaç için metal-köpürtücü madde karışımına eklenmiştir. Bunlar (1) köpüğün kararlılığını daha fazla arttırmak ve (2) köpüğün metalik matrisini güçlendirmek içindir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, takviye elemanı olarak SiC, TiB_2, alümina ve AIN kullanılmaktadır (Duarte ve Ferreira, 2016). Bununla birlikte çok duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT) metalik köpükler için özel bir duruma sahiptir ve mekanik özellikleri geliştirmesi beklenmektedir (Banhart, 2018; Duarte, Ventura, Olhero, ve Ferreira, 2015).

2.3.1.5. Köpürtücü maddenin seçilmesi ve uygun hale getirilmesi

Farklı türden metallerin köpürtülmesi için farklı türden hidrürler (Ti, Zr, Hf, Ca, Sr, Ba, Mg, La ve Li), karbonatlar (Mg, Ca, Sr, Ba, Li, Pb, Zn, Co) ve nitrürler (Mn ve Cr) dâhil olmak üzere pek çok gaz yayan köpürtücü maddenin uygunluğu araştırılmıştır (Baumeister ve Schrader, 1992). Alüminyum alaşımlarının köpürtülmesi için titanyum hidrür yine de en çok kullanılan ve muhtemel en uygun köpürtücü maddedir. Buna rağmen çoğu Al alaşımının ergime aralığı ile TiH_2'ün bozunum aralığı arasındaki uyumsuzluk, beraberinde birtakım problemleri neden olmaktadır. Bunun nedeni TiH_2'ün ergime başlamadan önce ısınma esnasında preform içerisinde bir gaz basıncı oluşturmasıdır. Bu da küresel olmayan ve düzensiz biçimde şekillenmiş gözeneklerin oluşumuna neden olmaktadır (Rack vd., 2009). Bu problemin giderilmesi için köpürtücü maddenin ayrışma aralığına yakın veya daha düşük ergime sıcaklığına

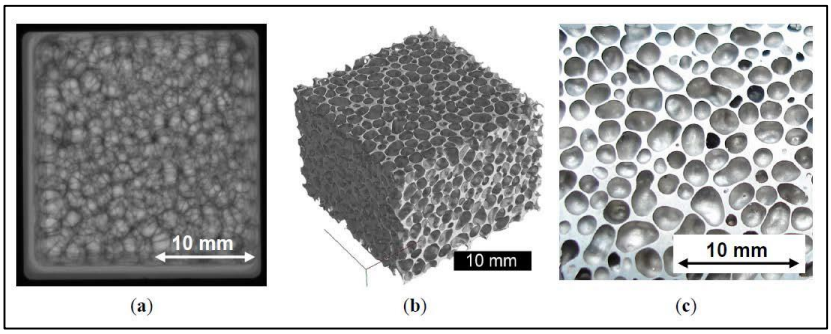
sahip alaşımların kullanılması alternatif bir çözüm yoludur (Helwig, Garcia-Moreno, ve Banhart, 2011; Lehmhus ve Busse, 2004). Hidrojen salınım aralığını daha yüksek sıcaklıklara kaydırmak diğer bir olasılıktır. Hidrojen salınım aralığını yükseltmek için TiH_2 tozlarının oksitlenmesini sağlamak önemli bir tekniktir (Yu, Liu, Zhu, Luo ve Wei, 2007). Hidrojen salınımının gecikmesi oldukça karmaşık bir mekanizmaya sahiptir. Bu mekanizma hidrojen ayrışması esnasında hidrürdeki faz dönüşümlerine bağlıdır. Oksitlenme yolu yerine TiH_2'den hidrojen salınımını geciktirmenin diğer yolları: TiH_2 parçacıklarının ince bir nikel katmanı ile kaplanması veya preformun erken ergimesi esnasında TiH_2 parçacıklarını sarmalayan ve daha uyumlu bir hidrojen salınımına yol açan Sn gibi düşük ergime sıcaklığına sahip bir alaşım elementinin kullanılmasıdır (Aguirre-Perales, Jung ve Drew, 2012). Toz kompaktların köpürme davranışı üzerine TiH_2 ön işlemlerinin etkisi başka yazarlar tarafından da incelenmiştir (Helwig vd., 2011). Hidrojen salınımı ve köpürme davranışı üzerinde köpürtücü madde boyutunun dikkate değer bir etkisi mevcuttur. TiH_2 dışında farklı hidrürler de araştırılmıştır. Bunlar arasında ZrH_2 önemli bir seçenektir fakat en azından Al alaşımları için TiH_2 üzerinde bir avantaja sahip olmadıkları görülmektedir. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada belirtilen köpürtücü maddeler dışında MBH_4 ve $MAlH_4$ bileşiklerinin (M= (Li, Na, K)) Al köpükler için olası etkin bir köpürtücü madde olduğu gösterilmiştir (Banhart, 2018).

Metal hidrürlere ilave olarak daha düşük maliyetlere sahip karbonatlar da köpürtücü madde olarak önerilmektedir. Karbonatlar, ısınma ile CO_2 gazı yaymakta ve ayrışma sonrasında bir oksit bırakmaktadır. Hidrürlerden farklı olarak burada matris içerisinde bir alaşım oluşmaktadır. Buna ek olarak, sıvı alüminyum alaşımı ile yayılan gaz (CO ve CO_2) arasındaki reaksiyonlar karbonat ve hidrür kullanılarak yapılan köpürtme işlemlerinde köpürtme karakteristikleri açısından belirgin farklılıklar ortaya koymaktadır (Gergely, Curran ve Clyne, 2003).

Arnold vd., (2003) yapmış oldukları çalışmada ağırlıkça % 0.5 TiH_2'e ek olarak % 1 $CaCO_3$'ün daha yüksek genleşmeye ve çok küçük hücrelerin oluşumuna neden olduğu kararına varmışlardır. Bunu özel bir mekanizma belirtmeden artan eriyik metal viskozitesi gibi şiddetli bir biçimde azalan eriyik metal hareketliliği ile açıklamışlardır. Cambronero vd., (2009) alüminyum alaşımlarını köpükleştirmek için doğal karbonat

tozu (beyaz mermer) ve kimyasal kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) kullanmışlardır. 6061 alaşımının köpürtülmesinde bu iki köpürtücü madde TiH_2 ile karşılaştırıldığında daha küçük gözenekler oluşturduğu ve 0.53 g/cm^3'e kadar yoğunlukların değiştiği belirtmiştir. Ayrıca tek eksenli basma özelliklerinin mermer tozu kullanılarak üretilen numunelerde biraz daha iyi performans sergilediği vurgulanmıştır (Cambronero vd., 2009). TiH_2 ve $CaCO_3$ arasındaki bu fark diğer araştırmacılar tarafından da doğrulanmıştır. Haesche vd., (2010) yarı katı döküm yöntemi ile $CaCO_3$ kullanarak AlMg4.5Mn testere talaşları ve AlSi9Cu3 kesme talaşlarından köpürtülebilir bir preform malzeme üretmişlerdir. Benzer şekilde, Kevorkijan vd. $CaCO_3$ ile saf Al alaşımını köpürtmüş ve makul bir köpük elde etmişlerdir (Kevorkijan 2010; Kevorkijan vd., 2010). Koizumi vd., (2011a) Al-Si-Cu alaşımının köpürtülmesi için karbonat, hidroksit ve hidrür grubundan farklı türde köpürtücü maddeler kullanarak karşılaştırma yapmışlardır. Araştırmacılar sadece $CaCO_3$ kullanıldığında köpüklenme sırasında oluşabilecek büzülme etkilerini en aza indirmek için dolomit ve magnezyum karbonattan (MgCO3) oluşan uygun bir karışım bulunmuştur (Koizumi vd., 2011b). Dolomitin verimliliğinin mekanokimyasal aktivasyon ile ayrıca geliştirilebileceği Gnyloskurenko vd., (2011) tarafından belirtilmiştir.

Herhangi bir kimyasal köpürtücü madde kullanmadan metallerin köpürtülmesi son zamanlardaki yeni gelişmelerdendir. Başlangıç noktası toz yüzeyleri üzerindeki reaksiyon ürünlerinin (hidroksit gibi) dekompozisyonu ile metal tozların gaz salınımıdır. Herhangi bir köpürtücü madde içermeyen sıkıştırılmış alüminyum tozunun bu gazların serbest bırakılmasından dolayı eridiği zaman % 15'e kadar genleştiği bulunmuştur (Banhart vd., 1995). Bu da normal basınçtaki bir köpük için istenen düzeyin çok altındadır. Fakat Al50Mg50 tozunun, saf alüminyumdan daha fazla gaz depolama ve salma potansiyeline sahip olduğu bulunmuştur. Bu tür toz saf Al tozu, Al50Mg50 tozu ve opsiyonel olarak diğer element tozlarının karışımından elde edilen Al-Mg esaslı alaşımları köpürtmek için kullanılır (Mukherjee vd., 2010). Şekil 2.5'de gösterilen köpükler gibi çok üniform ve iyi genleşmiş malzemeler üretilebilir.



Şekil 2.5. Köpürtücü madde kullanılmadan üretilen AlMg15Cu10 köpük. (a) genleşmiş sıvı köpüğün X-ışını radyografisi, (b) katı köpüğün X-ışını tomografisi, (c) katı köpük üzerinden alınan ara kesit resmi (Banhart, 2013)

3. KOMPOZİT METAL KÖPÜKLER

3.1. Seramik Parçacıklar ile Takviyelendirilen Metal Köpükler

Mikro boyutlu seramik parçacıklar ilk olarak metalik köpüklerde sıvı köpük kararlılığını arttırmak ve düzensiz gözenek boyutlarının oluşumunu engellemek için kullanılmıştır. Seramik parçacıklar tercihen sıvı/gaz ara yüzeyine yerleşmekte ve ergiyik metalin viskozitesini arttırarak gözenekleri dengede tutmaktadır (Jin vd., 1991). Bu anlamda, metal köpüklerdeki seramik parçacıklar, pek çok diğer köpük sistemlerdeki (emülsiyonlar, su bazlı sıvı köpükler gibi) yüzey aktif maddelerine benzer şekilde stabilizör bir rol oynamaktadır. Sıvı/gaz ara yüzeyinde bulunan seramik parçacıklar gaz baloncuklarının patlamalarını ve birleşmelerini engelleyerek karşı tarafta bulunan sıvı/gaz ara yüzey arasında köprülerin oluşmasına katkıda bulunur (García-Moreno, 2016).

3.2. Nano Parçacık Takviyeli Metal Köpükler

Mikro boyutlu takviye elemanları yerine nano boyutlu takviye elemanlarının kullanılması (örn. parçacıklar, lifler, nano tüpler) geleneksel köpüklerin mekanik özelliklerini geliştirmeye yönelik yeni bir stratejidir. Nano boyutlu takviye elemanları ile desteklenen köpüklere nano kompozit metal köpükler denir. Nano ölçekli takviye elemanları, yüksek ara yüzey – hacim oranlarından dolayı mikro ölçekli olanlara kıyasla istenilen özelliklerin geliştirilmesinde daha fazla etkilidir. Nano ölçekli takviye elemanlarının kullanılmasının avantajlarından bir tanesi çok daha küçük hacim oranlarının gerekliliğidir (Duarte ve Ferreira, 2016).

3.2.1. Seramik Nano Parçacık Takviyeli Metal Köpükler

Nano boyutlu seramik (örn. alümin ve SiC) parçacıkların ilave edilmesi, yapısal kusurlara neden olmadan hücresel yapının homojenliğini ve kararlılığını arttırdığı ortaya koyulmuştur. Ultrasonik yöntemler kullanılarak toz karışımdaki nano parçacıkları düzenli bir biçimde dağıtmak için farklı (ex-situ ve in-situ) stratejiler geliştirilmiştir. İlk araştırma sonuçlarından sonra, hem doğrudan hem de dolaylı

köpürtme yöntemleri kullanılarak üretilen nano kompozit köpüklerin mekanik performansı üzerine nano parçacıkların etkilerini incelemek için birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, SiC nano parçacık takviyeli Al-köpükler (nano-SiC_P/Al bileşimli köpükler) yüksek enerjili bilyeli öğütme tekniği kullanılarak alüminyum tozları içerisinde nano parçacıkların karıştırılması ile hazırlanmıştır. Daha sonra, kalsiyum karbonat (köpürtücü madde olarak) mekanik bir karıştırıcı kullanılarak ilk karışıma eklenmiştir. Tüm ürünleri içeren karışım sıcak presleme ile yoğun bir köpürebilir malzeme haline getirilmiş ve kompozit köpük elde etmek için ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta ısıtılmıştır. Sonuçlara göre, nano boyutlu seramik parçacıklar mikro boyutlu olanlara kıyasla köpüklerin kırılganlığını azaltmıştır. Dahası, nano parçacıklı küçük katkı maddeleri geleneksel alüminyum köpüklere kıyasla akma gerilimini (%194.5), plato gerilimini ve enerji emilimini belirgin bir şekilde artırarak (%69.4) köpük yapısını geliştirmiş, gözenek boyutu ve gözenek dağılımının homojenliğini iyileştirmiştir (Du vd., 2015). Nano kompozitli köpüklerin gözenekleri, milimetre ile mikrometre aralığında değişen saf Al köpüklerinin gözeneklerinden çok daha incedir. Aslında, nano parçacıklar stabilizör ve takviye maddeleri işlevi görmektedir.

Nano ölçekli takviye elemanları nano kompozit köpükler elde etmek için birkaç tip matris içerisine katılırlar. Fakat mevcut literatür raporlarının sayısı azdır (Du vd., 2015; Casati ve Vedani, 2014; Casati vd., 2015; Casati vd., 2016). Küçük bir nano parçacık takviyesi (genellikle ağırlıkça %2'den daha az) istenen seviyede mekanik özellikler sağlamak ve boyutsal kararlılık elde etmek için gerekli olan yüksek miktarda mikro ölçekli takviye elemanı içeren Al-köpüklerin sorunlarını çözerek kompozitlerin metal matrisini anlamlı derecede güçlendirir (Duarte ve Ferreira, 2016). Nano kompozitlerin üretilmesinde üstesinden gelinecek temel zorluklar yüksek yüzey hacim oranı ve genel olarak alüminyum tarafından seramik parçacıklarının az ıslatılabilir olmasıdır. Daha küçük parçacıklar, dislokasyon hareketini engellemede etkinliğini yitirerek topaklanma ve mikrometrik kümelenmeye yönelik bir eğilim içerisindedir. Bu nedenle basit geleneksel üretim prosesleri ile hazırlanamazlar. Bu yöntemlerin modifiye edilmesi çok önemlidir (Duarte ve Ferreira, 2016) (Casati, Fabrizi, Tuissi, Xia ve Vedani, 2015).

3.2.2. Karbon Nano Tüp (CNT) Takviyeli Metal Köpükler

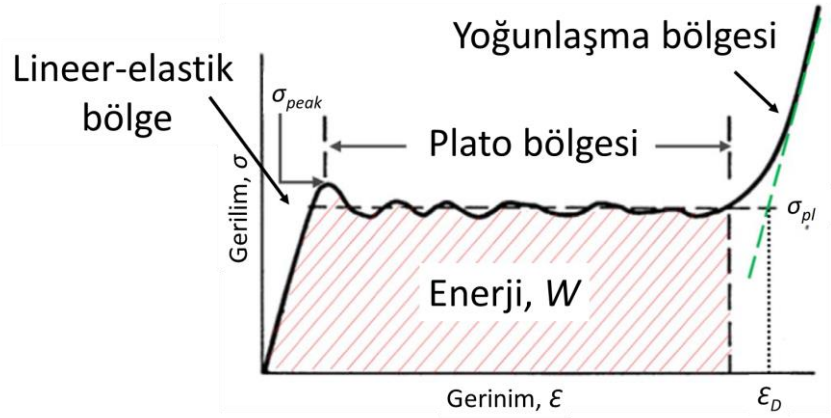
Karbon nano tüpler (CNT) düşük yoğunlukları, yüksek en-boy oranı, mekanik dayanımları, elektrik ve termal iletkenlikleri sebebiyle düşük ağırlığa sahip yüksek dayanımlı metal-matrisli kompozit malzemeleri üretmek için potansiyel olarak ideal takviye elemanlarıdır. Yüksek kümelenme eğilimi, düşük dağılım yeteneği ve ergimiş metal tarafından karbonun zayıf ıslatılabilirlik özelliklerine rağmen CNT'lerin metal matris içerisine ilave edilmesi önemlidir. Ergimiş metal içerisinde ara yüzey reaksiyon ürünlerinin oluşumu takviye elemanı olarak kullanımını sınırlayan diğer bir özelliktir. Bu sorunların üstesinden gelmek için sınırlı bir başarı yakalasa da çeşitli yöntem stratejileri (Toz metalurjisi, moleküler seviyede karıştırma, plazma püskürtme ve döküm) uygulanmıştır (Tjong, 2013). Metal-matriste düzenli CNT dağılımının sağlanması, güçlü ara yüzey bağının oluşması ve CNT'lerin yapısal bütünlüğünün korunması endüstriyel uygulamalar için başarılı şekilde metal-matrisli nano kompozitlerin geliştirilmesi için üstesinden gelinmesi gereken temel zorluklardır. Bunlar, CNT'lerin homojen dağılım gücünü arttırmak ve etkili bir yük transferi sağlamak için temel gerekliliklerdir (García-Moreno, 2016).

3.3. Alüminyum Köpüğün Sıkışma Deformasyon Davranışı

Alüminyum köpükler yüksek oranda deformasyona tabi olabilirler. Bu bileşenler tasarlanırken geniş bir gerilme oranı aralığı altındaki mekanik özelliklerinin tam olarak nitelendirilmesi gerekir. Basma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve elastik modülü gibi alüminyum alaşımı köpüklerinin yarı statik mekanik özellikleri kapsamlı olarak araştırılmıştır (Linul vd., 2019; Ulbin vd., 2019;). Alüminyum köpükler sahip oldukları gözenek yapısına göre farklı mekaniksel özellikleri yansıtırlar. Daha önce bahsedildiği gibi hücrelerin bir birleri ile izoleli olması yani hücre duvarları ile ayrılmış olması durumında köpükler, kapalı gözenekli olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan hücre duvarları yalnızca köprü vazifesi ile hücreleri birbirine bağlıyor ise bu köpükler için de açık gözenekli olarak ifade edilmektedir. Kapalı gözenekli köpükler açık gözenekli köpüklere kıyasla daha fazla dayanım sergilemektedirler. Sıkıştırma esnasında hücre içerisinde bulunan gaz

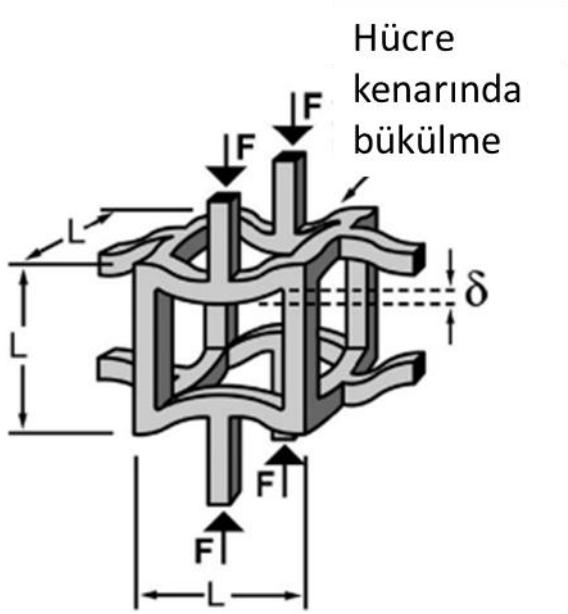
sıkıştırlamadığında hücre duvarlarını harekete geçirmekte ve basıncı artırmaktadır (Queheillalt vd., 2004).

Gerek yarı statik gerekse dinamik sıkışmada Al alaşımı köpüklerinin basma gerilme-gerilim eğrisi üç farklı deformasyon bölgesinden oluşur. Bu bölgeler başlangıçta doğrusal-elastik bölgeden, plato bölgesinden ve yoğunlaşma bölgesinden oluşmaktadır. Doğrusal elastik bölgede hızlı bir gerilim artışı meydana gelirken, plato bölgesinde bazen yüksek bazen de düşük pik noktalarının gözlemlendiği neredeyse sabit bir gerilim akışı gözlemlenmektedir. Son olarak yoğunlaşmış bölgede sıkışmış kütledeki hücrelerin çöküşü temsil edilmektedir (Şekil 3.1) (Gibson, 2000). Al alaşımı köpüklerinin bu deformasyon özellikleri diğer metal köpüklerin deformasyon özelliklerine benzerdir. Metalik köpükler aynı zamanda çarpışma ve patlamalara karşı dayanım uygulamalarında da fayda sağlamıştır (Gibson ve Ashby 1997).



Şekil 3.1. Basma deneyi soncu Al köpüğün gerilme gerinim eğrisinin şematik görünümü (Gibson, 2000)

Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sıkıştırma yükü ($F \approx \sigma L^2$) altında kalan birim hücrenin kenarında oluşan gerilim (σ) etkisiyle δ kadar çökme meydana gelmektedir. Başka bir ifade ile L uzunluğundaki hücre kenarının tam ortasına F kuvvetinin etkisi ile δ kadar yer değişikliği oluşmaktadır (Gibson ve Ashby 1997).



Şekil 3.2. Basma yükü altında hücre duvarında meydana gelen bükülme (Gibson ve Ashby 1997).

İdeal açık ve kapalı hücre köpüklerinin elastik modülü (E*) hücre kenarı bükülme eğilmesinden ve düzlemsel hücre yüzlerinin gerilmesinden hesaplanmaktadır ve sırayla eşitlikler (Eşitlik 3.1. ve Eşitlik 3.2.) aşağıda verilmektedir (Gibson ve Ashby 1997).

$$\frac{E^*}{E_s} = c_1\rho^2 \tag{3.1}$$

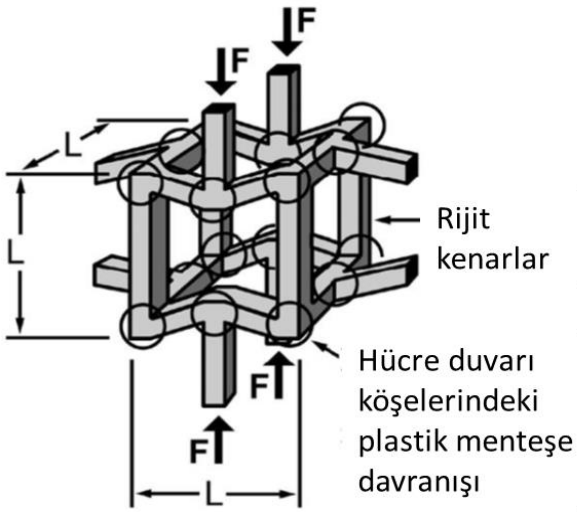
$$\frac{E^*}{E_s} = c_2\rho^2 + c_3\rho \approx c_4\rho \tag{3.2}$$

Burada, E_s hücre duvarı malzemesinin elastite modülü, c_1, c_2, c_3 ve c_4 sabitler ve ρ* bağıl yoğunluğu ifade etmektedir. Buna göre ρ*, Eşitlik 3.3'te verilen formül kullanarak hesaplanmaktadır.

$$\rho * = {}^{\rho_s}/_{\rho_T} \tag{3.3}$$

Burada, ρ_s köpüğün yoğunluğunu ve ρ_T hücre duvarı malzemesinin yoğunluğunu ifade etmektedir. Tetrakaidecahedral köpükler için c_1~1, $c_2 = c_3$~ 0.32 ve düşük yoğunluklu köpükler için c_4 ~ 0.32 olarak belirtilmiştir (Deshpande ve Fleck, 2000).

Plato stresi, çökme bölgesindeki enerji emiliminin miktarını ve verimliliğini belirlemektedir. İdeal açık ve kapalı hücre köpükleri için plastik çökme hücre duvarlarının sıkıştırma eksenine dik yönde gerilmesi ve hücre kenarlarının plastik menteşe davranışı ile gerçekleşir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Basma yükü altında hücre duvarı ve hücre duvarı köşelerdeki çökmeler (Gibson ve Ashby 1997).

İdeal açık hücreli ve tetrakaidecahedral kapalı hücreli köpüklerin plato stresleri için sırası ile Eşitlik 3.4 ve Eşitlik 3.5'te verilen denklemlerden faydalanılmaktadır.

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = 0.3\rho^{3/2} \tag{3.4}$$

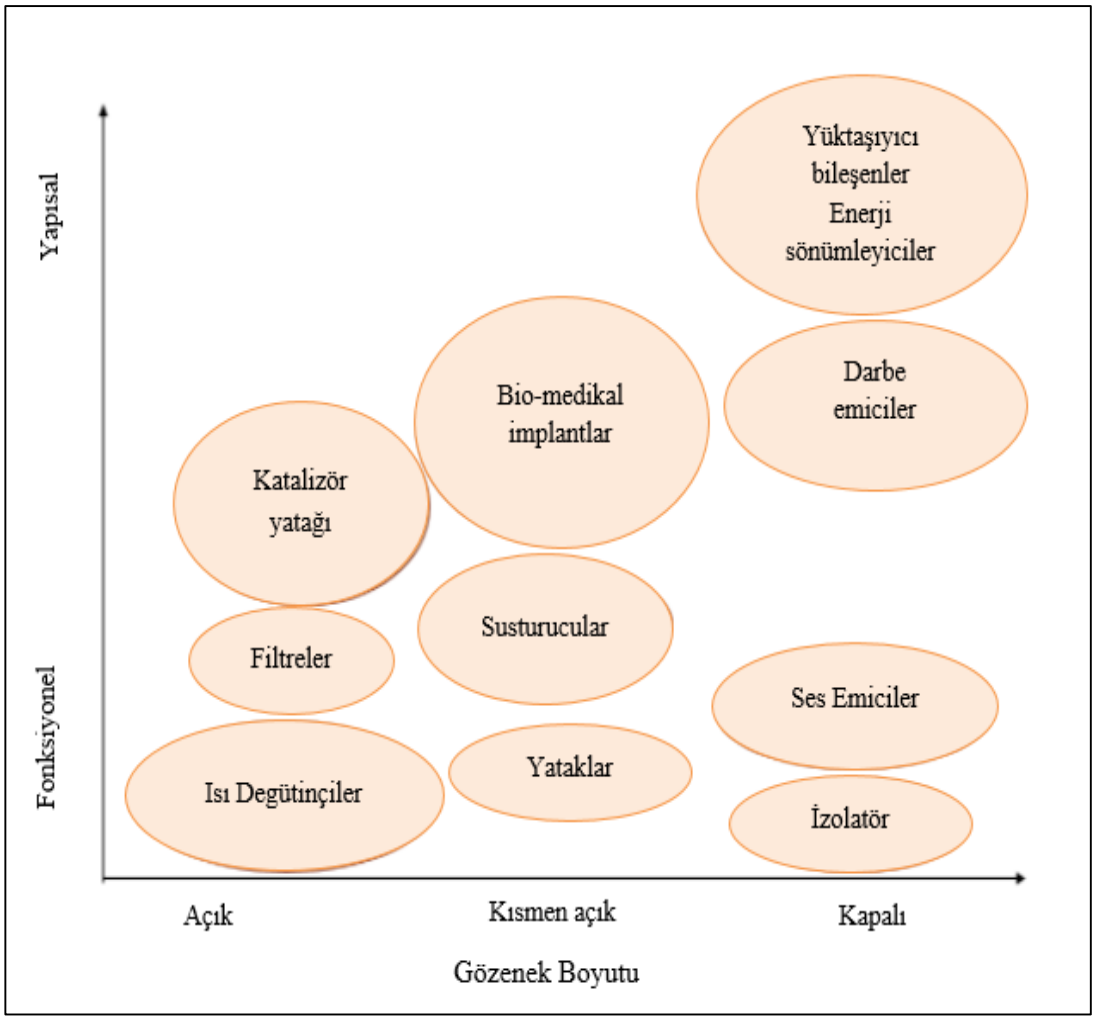
$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = 0.3\rho^{2} + 0.44\rho \tag{3.5}$$

Burada, σ_{pl} plato stresi ve σ_{ys}, hücre duvarı malzemesinin akma dayanımıdır. Eşitlik 3.4 kullanılarak açık ve kapalı hücreli köpüklerin deneysel nispi basma dayanım değerleri ile öngörülen basma dayanımı değerleri arasında nispeten iyi bir korelasyon kurulabilir (Hall vd., 2000).

3.4. Alüminyum Köpüğün Uygulama Alanları

Metalik köpükler, diğer malzemelerin sahip olmadığı eşsiz fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin kombinasyonlarına sahiptirler. Darbelere ve patlamalara karşı

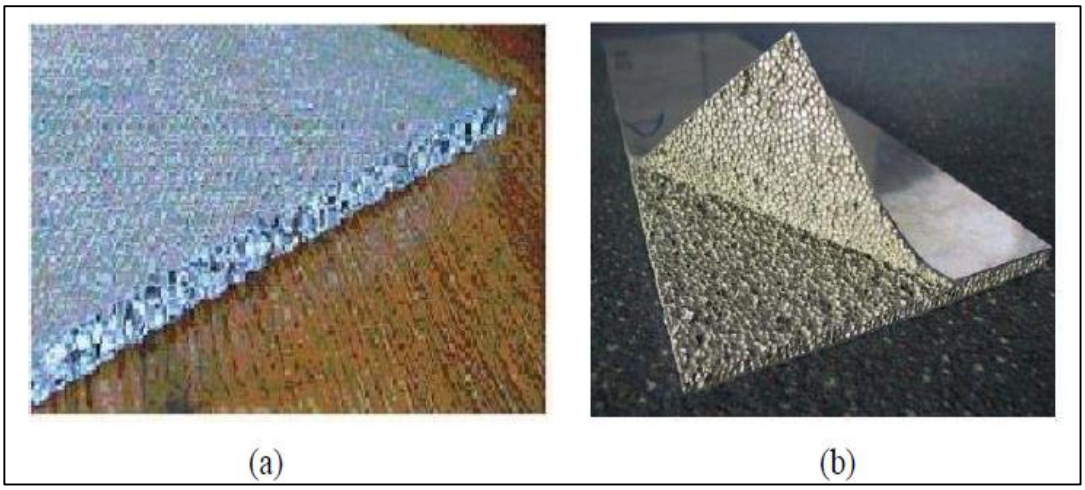
enerji emilimi sağlayan yapısal uygulamalar gibi pek çok alanda bu malzemeler potansiyel olarak kullanılabilir. Yapısal sandviç panellerinin çekirdeği olarak kullanıldığında yüksek ses sönümleme kapasitesi ve düşük termal iletkenliği ile birlikte yüksek tokluk sergilemektedir. Bunlar aynı zamanda titreşim sönümleyiciler ve ısı değiştiriciler olarakta kullanılabilirler. Bu nedenle, metalik köpükler çok fonksiyonelli malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Geri dönüştürülebilir olmaları onları daha çekici malzemeler haline getirmektedir. Şekil 3.4'de açık, kısmen açık ve kapalı hücreli metalik köpüklerin bazı potansiyel uygulamaları gösterilmiştir. Açık hücreli köpükler çoğunlukla fonksiyonel uygulamalar için tercih edilirken, kapalı hücreli köpükler yapısal uygulamalar için uygundur (Akseli, 2005).



Şekil 3.4. "Açıklık" derecesine ve uygulamanın fonksiyonel veya yapısal olup olmamasına göre gruplandırılan hücresel metallerin uygulama alanları

3.4.1. Yapısal Uygulamalar

Araba gövdeleri, kapılar ve alt paneller gibi ağırlığın yakından ilgilendiği yapısal uygulamalarda alüminyum köpüklerin kullanım potansiyeli oldukça yüksektir. Diğer potansiyel uygulama alanları gemiler, binalar, uzay-hava endüstrisi ve inşaat mühendisliği gibi alanları kapsamaktadır. Otomobillerde ve gemilerde kullanılmak üzere üretilen örnek köpük paneller Şekil 3.5'de gösterilmiştir (Akseli, 2005).



Şekil 3.5. Otomobil kapısı ve zemin kaplamaları için köpük panel (a), ses azaltmak amacıyla üretilmiş Al köpük panel kapmalası (b)

Alüminyum köpükler kendi ana malzemelerine kıyasla yapılarında iki önemli özelliği bir arada bulundurmaktadırlar. Bunlar nispeten yüksek dayanım ve düşük yoğunluktur. Eğer doğrudan dayanım ele alınırsa köpüklerin aynı ağırlıktaki katı maddelere kıyasla benzer veya daha kötü bir performansa sahip olduğuna dikkat etmek önemlidir. Köpüklerin avantajı eğilme gerilimleri bir ağırlık fonksiyonu olarak ele alındığında belirgin hale gelmektedir (Banhart ve Baumeister, 1998). Hafif yapılarda Al köpükler, mühendislik bileşenlerinin ağırlık/spesifik eğilme dayanımını iyileştirmek için kullanılabilir. Belirli bir ağırlık, genişlik ve uzunluktaki düz Al köpük panellerin eğilme direnci neredeyse kalınlıkları ile orantılıdır ve dolayısıyla yoğunluk ile ters ilişkilidir. Hücresel yapıların kütle dağılımı bulk metalin uygun ağırlığından çok yüksek bir spesifik eğilme direnci ve dayanım sağlayarak malzemenin toplam atalet momentini arttırmaktadır. Katı metal bileşenlere kıyasla köpük katman kullanılarak üretilen yapılar bilhassa artan yapısal rijitlik sağlarken belirgin bir biçimde de hafiflik sergilemiştir (Akseli, 2005).

3.4.2. Fonksiyonel Uygulamalar

Piyasada metalik köpükleri esas alan geniş bir fonksiyonel uygulama yelpazesi bulunabilir. Oditoryumlar veya geniş odalardaki tavanlar çoğu zaman ses kontrolü için delikli metal plakalı tahtalardan yapılmaktadır. Bu geleneksel yapı malzemesine bir alternatif olarak hâlihazırda piyasada ses emilimi için farklı şirketler tarafından sunulan metalik köpük panel uygulamaları mevcuttur. Açık köpük yüzeyinde ses dalgaları yönlendirilmekte ve çeşitli yansımaların ardından yakalanan ve durdurulan ses dalgaları köpük içine doğru yeniden yönlendirilmektedir (Şekil 3.6). Gözenek boyutu dağılımı ve farklı oryantasyonlar geniş bir frekans spektrumu üzerinden çok etkili bir sönümleme sağlamaktadır. Bu uygulamalar mimari olarak da ele alınabilir fakat burada ana fonksiyonları ses emilimi olduğu için bu uygulamalara dâhil edilmiştir. Bunlar açık hücreden veya sadece kesilmiş kapalı hücre köpüklerinden meydana gelen büyük metalik köpük panellerin hafiflik ve kendi kendine yetme kapasitesini bir tasarım bileşeni ile birleştirmektedir. (Das, 2016).

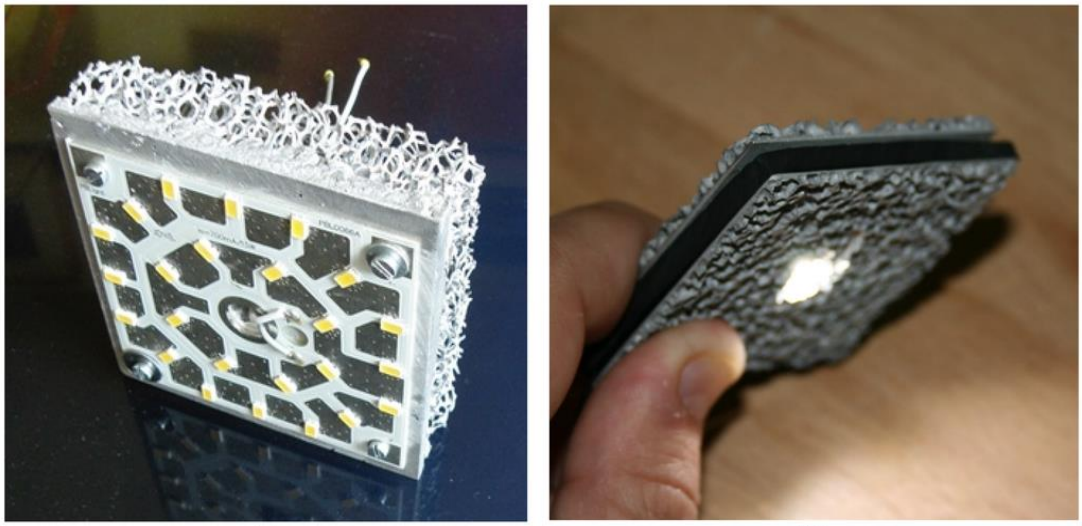


Şekil 3.6. Ses kontrolü için Alusion köpük ile kaplı (a) seyirci salonu, (b) restoran (Cymat) (Das, 2016)

ERG firması aynı zamanda Duocel'den ısı değiştirici üretmektedir (Al ve Cu esaslı açık hücre köpükler). Bunlar, elektron tarama mikroskoplarının lenslerini termal olarak sabitlemek için küçük bir ısı değiştiricisi veya medikal lazer uygulamaları için termal enerji emicileri gibi farklı cihazlar geliştirmektedirler. Dahası Lockhead Martin F-22 savaş uçağında hızlı yükseklik değişimleri esnasındaki basınç yayılması, elektromanyetik perdeleme koruması ve nem filitreme için kullanılan havalandırma tapası Duocel 11'den yapılmıştır. Al-köpükten yapılmış bir ERG ısı değiştiricisi, uzay

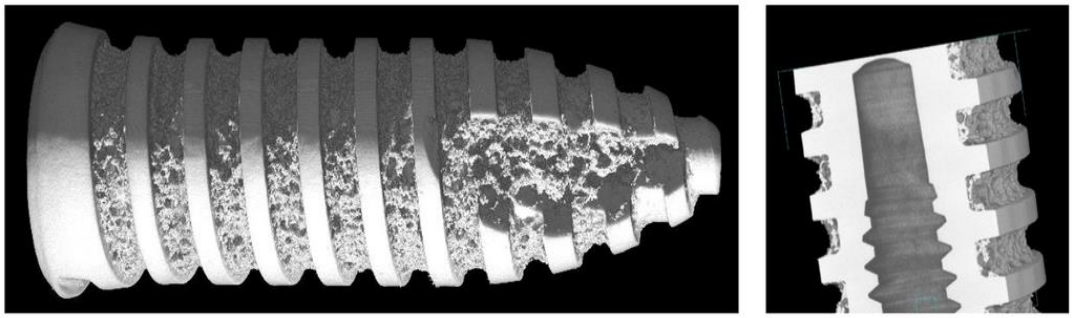
aracında karbondioksit ve nemin giderilmesi için amin esaslı filtre tabakalarının çoklu katmanlarından oluşan granüle edilmiş kimyasalların destek matrisi ve ısı değiştirme aracı olarak kullanılmıştır. Şimdi de Uluslararası uzay istasyonunda kullanılmaktadır (García-Moreno, 2016).

Bilgisayar ve mobil elektronik cihazlarının hızla gelişen performansı yüzünden çok etkili ısı gidericilere ihtiyacın her geçen gün arttığı bir alanda pasif termal soğutma özel bir ısı değiştirici uygulamasıdır. Bugünlerde, standart ampuller modern, güçlü LED lambalar ile değiştirilmiştir (Şekil 3.7). Bu gücün LED etkinliğini sağlamak ve elektroniği korumak için soğutulması gerekir. Burada, "gürültülü" bir fanın kurulamadığı durumlarda köpüklü pasif soğutma cihazları avantaj sağlar. Bu uygulamalar yenilikçi bir tasarım ile işlevselliklerini birleştirebilir (García-Moreno, 2016).



Şekil 3.7. LED lambaların pasif termal soğutması: (a) M-gözenekli Al açık hücre köpük (M-gözenekli) ve (b) Berlin Teknik Üniversitesinden alüminyum köpük sandviç (AKS) kesiti (García-Moreno, 2016)

Biyokimyasal uygulamalar bir diğer uygulama alanıdır. Burada Ti-köpüklere dayalı yüksek kaliteli ürünler mükemmel biyo uyumluluk özellikleri sağlamaktadır. Güncel konu Osseo integrasyonu geliştirmek için gözenekli yapıların yönünü incelemektedir. Şekil 3.8'de Ti esaslı diş implantının gözenekli yapısının tomgorafisi gösterilmektedir. Ti'nin köpürtülmesi oldukça zor olduğu halde köpük benzeri yapılar farklı üretim yöntemleri ile oluşturulabilir. (Das, 2016).



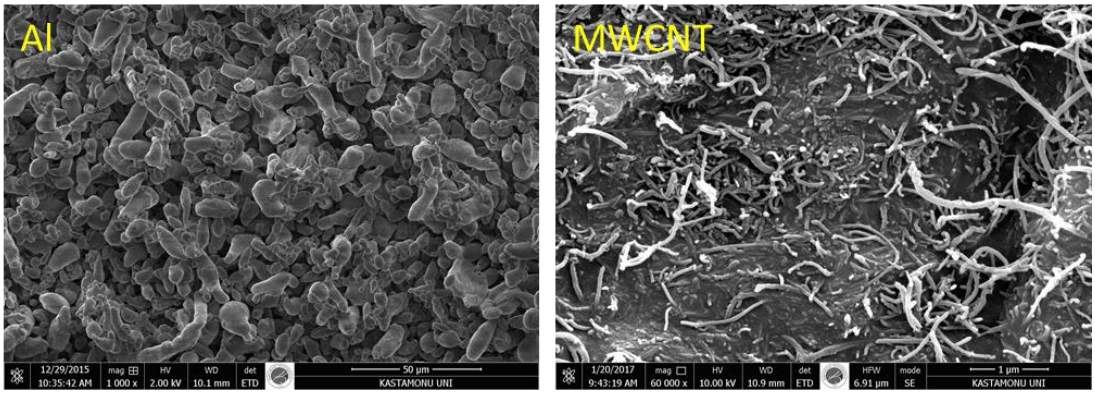
(a) (b)

Şekil 3.8. Osseo integrasyonu gelişimi için Ti-esaslı gözenekli diş implantının Tomograifisi (a) ve gözenekli yüzeyin ve iç yapısının ayrıntısı (b) (Das, 2016)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzemeler

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak Ecka granül firmasından Al tozu (% 99,5 saflıkta - <44 µm boyutunda) ve takviye elemanı olarak Cheap Tubes firmasından çok-duvarlı karbon nano tüpler (MWCNT -ortalama dış çapı > 50 nm, uzunluk 10–20 µm) temin edilmiştir. Kullanılan tozlara ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bununla birlikte yapı içerisinde gözenek oluşturmak için ortalama çapı 1.5 mm olan küresel şekilli üre (CH_4N_2O) kullanılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların SEM görüntüsü



Şekil 4.2. Küresel şekilli üre

4.2. Kompozit Köpüklerin Üretimi

4.2.1. Tozların Karıştırılması

Karıştırma işlemleri öncelikli olarak başlangıç tozları ile başlanmıştır. Bu işlem için ağırlık olarak %0, 0.5, 1 ve 2 CNT parçacıkları ayrı ayrı alüminyum tozlarına ilave edilerek paslanmaz bir çelik kap içerisinde bilyeli karıştırıcı ile 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ağırlıkça bilye/toz oranı 5:1 olması için 8 mm çapında paslanmaz çelik bilyeler karışım toz içerisine ilave edilmiştir. CNT'lerin etkili dağılımını sağlamak, tozların kap duvarları ve bilyelere yapışmasını engellemek ve toz parçacıkların soğuk kaynak etkisini minimize etmek için % 1 oranında stearik asit karışıma ilave edilmiştir. Al/CNT karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra ikinci karıştırma işlemine geçilmiştir. Bu işlemde ağırlıkça %15, %30 ve %50 üre granülleri Al/CNT karışımına ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi öncesinde Al/CNT karışım tozlarının adezyonu ile yapışkan yüzey elde etmek için üre granüllerine etanol püskürtülmüştür. Böylece tozların üre granülleri üzerine homojen dağılması sağlanmıştır. Hazırlanan metalik toz/üre karışımı döner bir karıştırıcıda iki saat karıştırılarak sıkıştırma işlemi için hazır hale getirilmiştir.

4.2.2 Presleme İşlemi

Karışım tozlar 120 ton basma kapasitesine sahip hidrolik pres yardımıyla (Şekil 4.3) 600 MPa basınç altında çelik bir kalıp içerisinde tek yönlü olarak sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma sonrası 27 mm çapında silindirik numuneler üretilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.3. Sıkıştırma işleminde kullanılan hidrolik pres



Şekil 4.4. Sıkıştırma sonrası üretilen numuneler

4.2.3. Köpürtme İşlemi

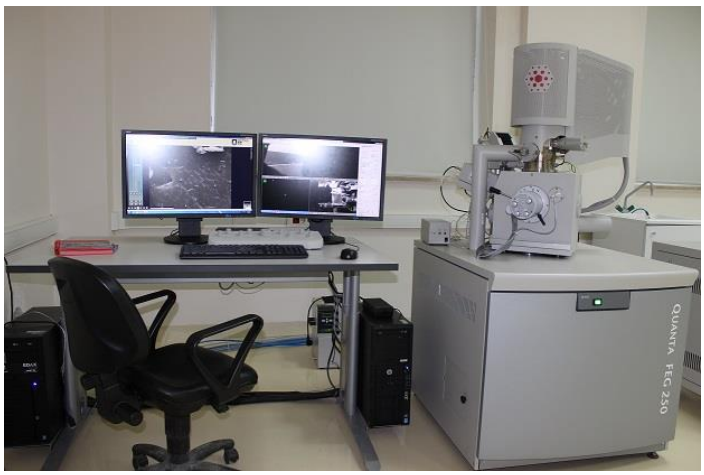
Sıkıştırma sonrası kompakt numunelerdeki üreyi çözündürmek ve yapıdan uzaklaştırmak için numuneler 80°C sıcaklıkta 3 saat su banyosunda bekletilmiştir. Daha sonra numuneler ethanol ile yıkandıktan sonra 60°C sıcaklıkta kurutulmuştur

(Hassani vd., 2012). Elde edilen ham köpükler 650°C sıcaklıkta 2 saat boyunca sinterleme işlemine tabii tutulmuştur.

4.3. Karakterizasyon İşlemleri

4.3.1. Makro ve Mikro yapısal Analizler

Üretilen kompozit köpükler mikro ve makro yapısal analizler için tel kesme makinesi ile ortadan kesilmiştir. Akabinde standart metalografik prosedüre göre numuneler sırasıyla 120, 280, 320, 600, 800, 1200, 1500 ve 2000 mesh SiC zımparalar ile zımparalanmış ve elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Böylece numuneler makro gözeneklik ve mikro yapısal analizler için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde Kastamonu Üniversitesi, Merkezi araştırma Laboratuvarında bulunan enerji dağılımlı spektrometri (EDS) içeren FEI marka Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Taramalı elektron mikroskobu

4.3.2. Yoğunluk Ölçümü

Üretilen numunelerin yoğunlukları (ρ_S) boyutsal büyüklükten dolayı Eşitlik. 4.1'de verilen formül kullanılarak numunelerin havadaki ağırlıklarının (m_h), hacmine (v) oranı ile hesaplanmıştır.

$$\rho_s = \frac{m_h}{v} \tag{4.1}$$

Kompozit köpüklerin teorik yoğunlukları (ρ_T) karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Buna göre numuneyi oluşturan her bir bileşenin ağırlıkça yüzde oranları ile yoğunlukları çarpılmış ve elde edilen değerler toplanarak teorik yoğunluk hesaplanmıştır (Eşitlik 4.2).

$$\rho_T = [(\%W_1) \times \rho_1] + [(\%W_2) \times \rho_{12}] + \cdots \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots + [(\%W_n) \times \rho_s] \quad (4.2)$$

Bağıl yoğunluk (ρ^*) değerleri ise gerçek yoğunluğun teorik yoğunluğa oranlanması ile elde edilmektedir (Eşitlik 4.3).

$$\rho * = {}^{\rho_s}/_{\rho_T} \quad (4.3)$$

Elde edilen kmpük numunelerin gözeneklilik oranları (P) Eşitlik 4.4'te verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$P = (1 - \left({}^{\rho_s}/_{\rho_T}\right)X100 \quad (4.4)$$

4.3.3. Basma Deneyi

Üretilen kompozit köpüklerin ezilme davranışlarının belirlenmesi için 1 mm/dak deformasyon hızında basma testleri uygulanmıştır. Bu testler için Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Shımadzu marka Autograph AGS-X model üniversal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Basma testlerinde kullanılan üniversal test cihazı

4.3.4. Mikrosertlik Ölçümü

Sertlik ölçümleri Kastamonu Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Schimadzu (HMV-G) marka mikro sertlik cihazında yapılmıştır (Şekil 4.7). Üretilen kompozit köpüklerin sertlik ölçümleri hazırlanan hücre duvarı kesit yüzeylerinden 100 g yük uygulanarak yapılmıştır. Mikro sertlik değerleri her numune için en az beş ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

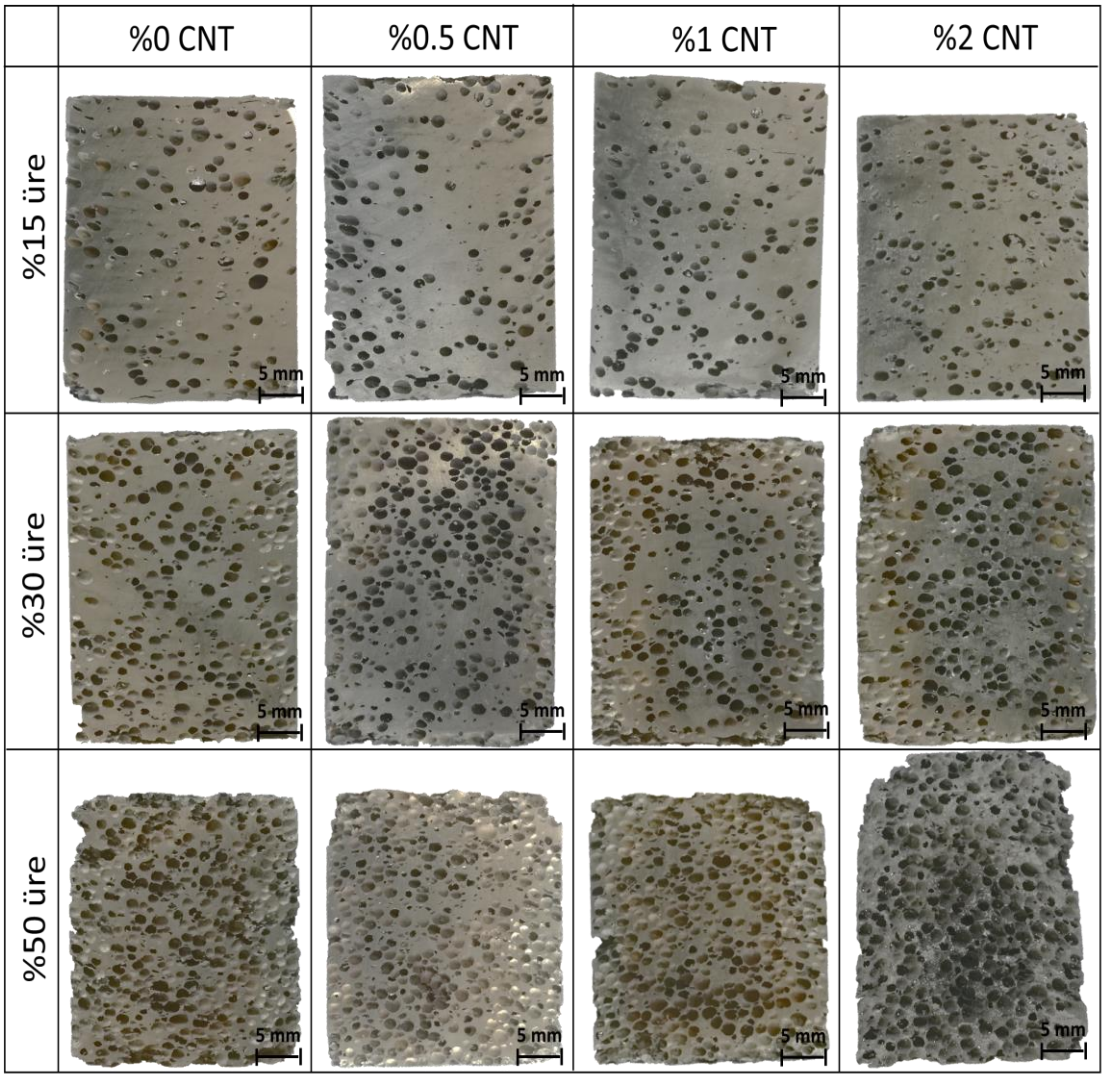


Şekil 4.7. Sertlik ölçüm cihazı

5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

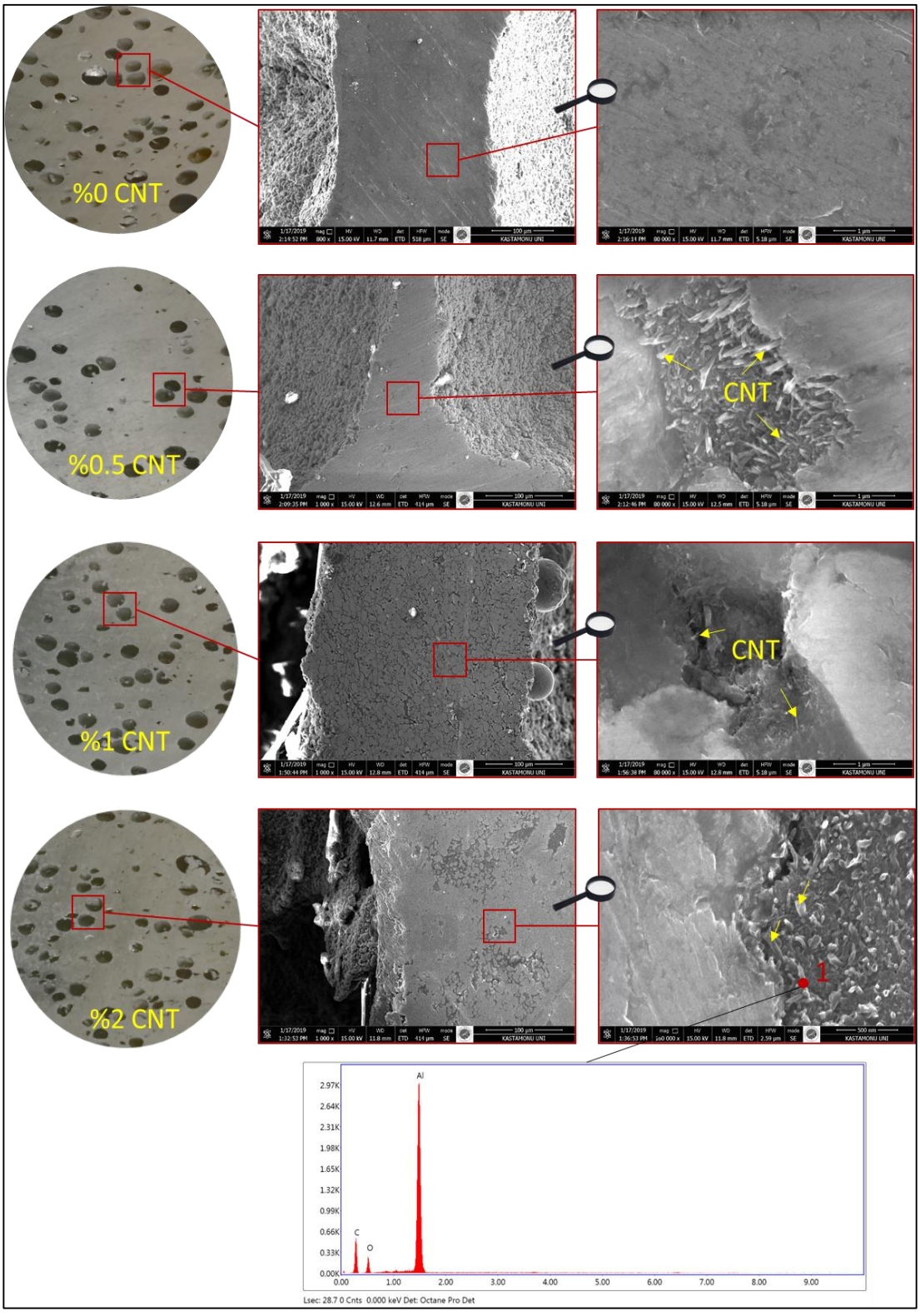
5.1. Makro ve Mikro Yapısal Analiz

Şekil 5.1'te CNT takviyeli ve takviyesiz alüminyum köpüklere ait makro yapı şekilleri verilmiştir. Şekillere bakıldığında üre miktarındaki artış ile birlikte gözeneklilik miktarında da artışların meydana geldiği görülmektedir. Gözeneklerin yapı içerisindeki dağılımı nispeten homojendir. Bu homojenlik üre miktarındaki artış ile birlikte gelişmiştir. Gözenekler orijinal ürenin küresel şekli ile uyumludur. İlave edilen CNT parçacıklarının makro ölçekte gözenek yapısına etkisi çok fazla söz konusu değildir. Esasında, üretilen köpükler NaCl gibi diğer boşluk tutucu malzemelerle karşılaştırıldığında daha az köşeli gözeneklere sahiptirler (Zhao vd., 2006). Bu durum deformasyon anında bölgesel gerilme konsantrasyonlarını azaltmaya ve CNT/Al köpüklerin mukavemet değerlerini artırmaya yardımcı olabilir. Çalışmada kullanılan üre ile üretilen kompozit köpüklerin gözenek boyutu ve gözeneklilik oranı gibi yapısal özellikleri rahatlıkla kontrol edilebilir (Wang vd., 2015; Jiang vd., 2005). Ayrıca ürenin küresel şekilli olması tozların sıkıştırılması esnasında parçacıkların rahat hareket etmelerini ve yeniden düzenlemelerini sağlamıştır. Bu durumun da gözenek dağılımındaki homojenliğe katkı sağladığı düşünülmektedir.



Şekil 5.1. CNT takviyeli ve takviyesiz alüminyum köpüklere ait makro-yapı şekilleri

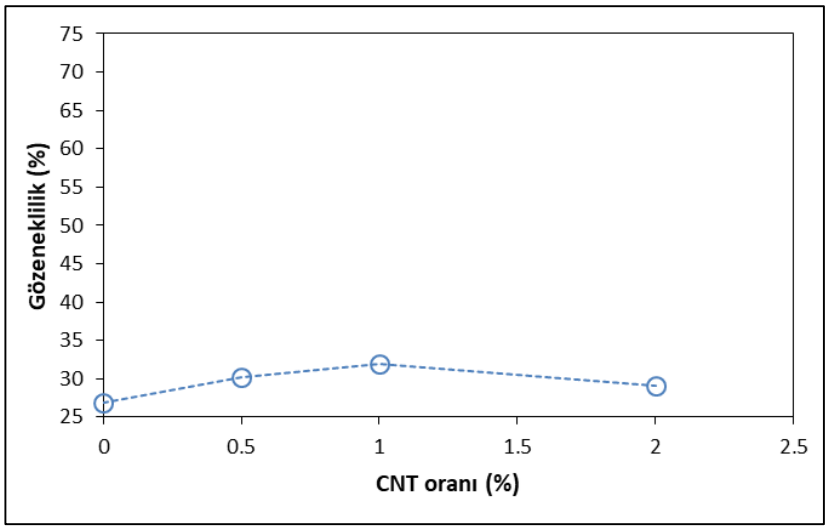
Şekil 5.2'te CNT/Al köpüklerin hücre duvarları üzerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Hücre duvarı içerisinde CNT'lerin bir ucu hücre duvarı içerisine gömülü iken diğer ucunun nispeten serbest olduğu görülmektedir. Zang vd.,. (2015) yapmış olduğu çalışmada ise % 0.5 CNT içeren köpük yapıda CNT parçacıklarının üç formda hücre duvarında bulunduğu belirtilmiştir. Bu formlar tamamen hücre duvarı içerisine gömülü, her iki ucu tamamen gömülü ve nispeten hücre duvarı yüzeyinde yer alan ve tamamen hücre duvarı yüzeyinde yer alan şeklinde tanımlanmıştır. Üretim köpük numunelerin içerisinde enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile tanımlanan CNT'ler boru biçiminde ve yer yer topaklanmış halde bulunmaktadır. Bu durum karıştırma işlemi esnasında alüminyum tozları üzerinde bulunan aglomere olmuş CNT'lerin yeterince dağıtılamamasıyla açıklanabilir.



Şekil 5.2. CNT/Al köpüklerin hücre duvarları üzerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS sonucu

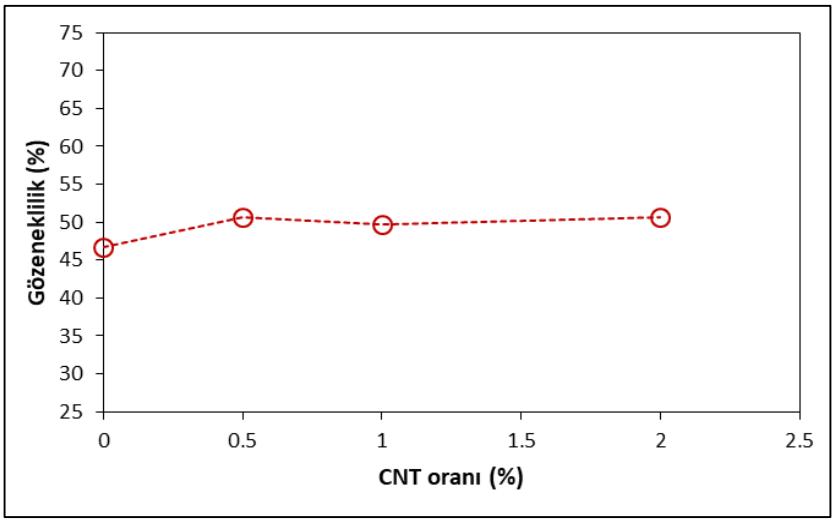
5.2. Gözeneklilik ve Yoğunluk Değişimi

Şekil 5.3'teki grafikte %15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları verilmiştir. Buna göre en düşük gözeneklilik %27 ile CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Maksimum gözeneklilik oranı ise %1 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir. Bu oran %31.7 seviyelerindedir. Her iki numune karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %4 fark elde edilmiştir.



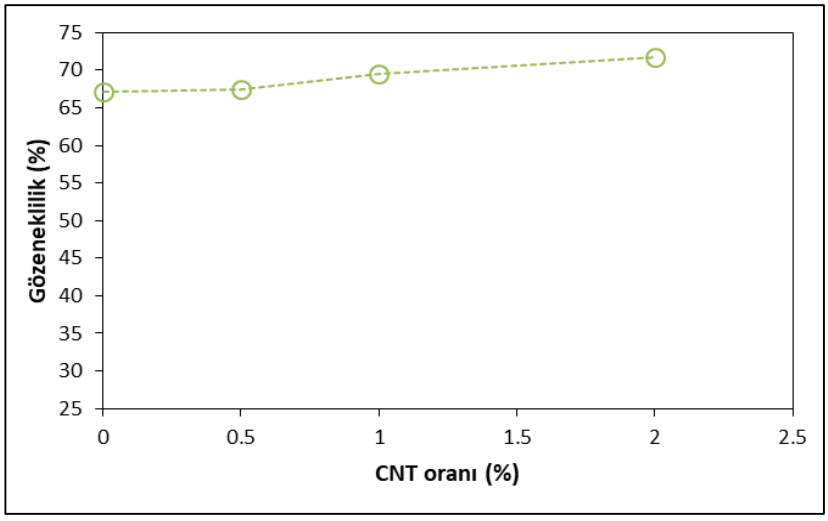
Şekil 5.3. %15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları

Benzer durum %30 üre içeren numuneler içinde geçerlidir (Şekil 5.4). Bu numunelerde minimum gözeneklilik oranı %46.8 ile CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Maksimum gözeneklilik oranı ise %50.5 ile %0.5 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir. Her iki numune arasındaki oransal fark (%4) %15 üre içeren numuneler ile karşılaştırıldığında neredeyse aynıdır. Alüminyum köpükler için bu oransal farkın önemli olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca CNT miktarının köpüklerin gözeneklilik oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadıkları görülmektedir.



Şekil 5.4. %30 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları

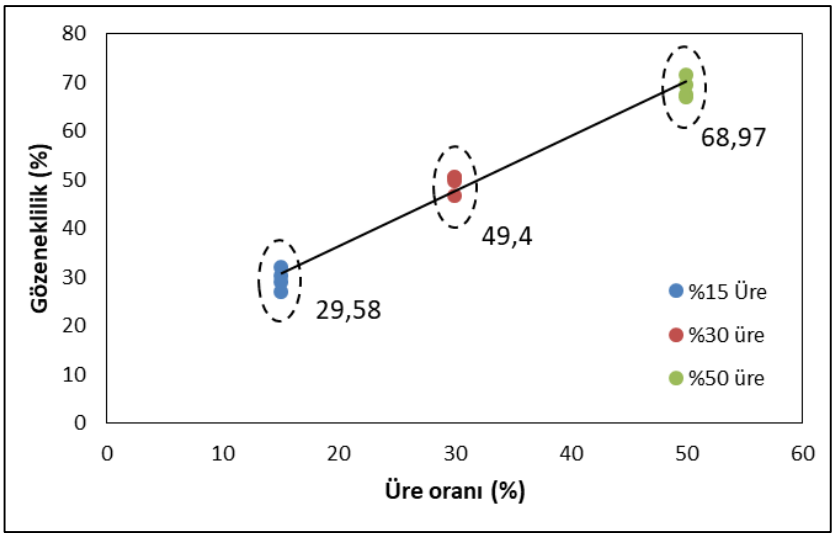
Üre miktarı %50'ye ulaştığında %67.2 ile %71.4 arasında gözeneklilik oranları elde edilmiştir (Şekil 5.5). Bu değerler sırasıyla CNT içermeyen numuneye ve %2 CNT içeren numuneye aittir. Her üç numune türünde (%15, %30 ve %50 üre içeren) minimum gözeneklilik oranı CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Alüminyum matris içerisinde CNT parçacıklarının varlığı gözeneklilik miktarını artmış olsa da bu artış elde edilen verilere göre doğrusal değildir.



Şekil 5.5. %50 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gözeneklik oranları

Gözenekli bir yapıdaki toplam gözeneklilik ve gözenek büyüklüğü dağılımının kontrol edilmesi, spesifik uygulamalar için uyarlanmış malzemeler için anahtar rolündedir (Bakan, 2006). Şekil 5.6'te farklı oranlarda üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT

miktarından bağımsız olarak elde edilen gözeneklilik grafikleri verilmiştir. Üre miktarına bağlı olarak CNT içeriğinden bağımsız olarak elde edilen değerlerde doğrusal bir artış gözlenmiştir. Elde edilen değerler kullanılan üre miktarının oransal değerinden nispeten fazladır. Buna göre ağırlıkça %15, %30 ve %50 üre içeren CNT/Al köpüklerde sırasıyla ortalama gözeneklilik oranı %29.58, %49.40 ve %68.97 olarak elde edilmiştir. CNT/Al köpüğün gözenekliliği beklendiği gibi kullanılan ürenin hacimsel oranına neredeyse eşittir. Ağırlıkça hesaplanan %15, %30 ve %50 üre değerleri hacimsel olarak hesaplandığında yaklaşık olarak %26, %47 ve %67 değerlerindedir. Bu fark esas olarak sıkıştırılmış alüminyum parçacıklar arasındaki mikro gözenekliliklerin varlığı ile ilgilidir.



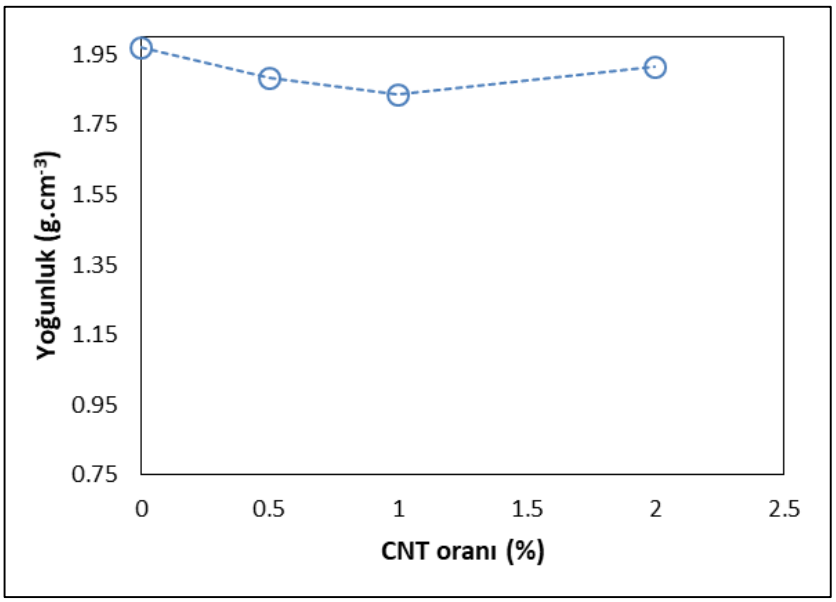
Şekil 5.6. Farklı oranlarda üre içeren Al köpüklerin CNT miktarından bağımsız gözeneklilik grafikleri

Daha önce belirtildiği gibi sinterleme öncesi kompakt hale getirilmiş numunelerden üre su banyosunda çözündürme işlemi ile giderilmektedir. Ürenin çözündürülme işlemi boyunca numunelerde herhangi bir çöktürme veya deformasyona yol açmadan gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 5.1). Ayrıca Şekil 5.7'de sinterleme sonrası elde edilen numunelerin makro resimleri gösterilmektedir. Bafti ve Habibolahzadeh tarafından yapılan çalışmada köpürtücü ajan olarak kullanmış oldukları karbamitin su içerisinde çözünürlüğünün yaklaşık olarak 120 dakikadan sonra yavaşladığı belirtilmiştir (Bafti ve Habibolahzadeh, 2010). Buna göre yapmış olduğumuz bu çalışmada 180 dakika çözündürme süresi tercih edilmiştir.



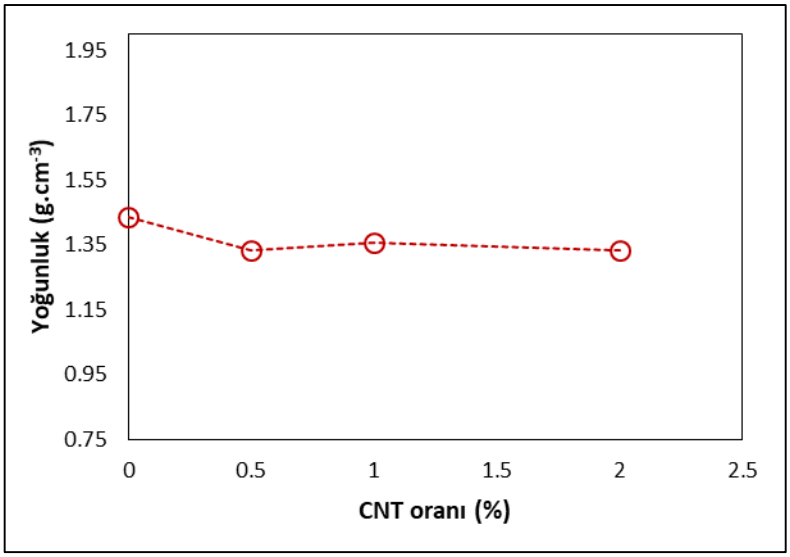
Şekil 5.7. Sinterleme sonrası elde edilen numuneler

Şekil 5.8'teki grafikte %15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi verilmiştir. Bilindiği üzere metalik köpüklerde yoğunluk değişimi doğrudan gözeneklilik oranı ile ilişkilidir. Yapı içerisindeki gözenek miktarı arttıkça yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Buna göre en fazla yoğunluk 1.97 $g.cm^{-3}$ ile CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Minimum yoğunluk ise %1 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir. Bu değer 1.84 $g.cm^{-3}$ seviyelerindedir. Her iki numunenin yoğunluk değerleri karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %7 fark elde edilmiştir. Yani CNT ilavesi ile yoğunluk değerinde maksimum belirtilen oranda azalma meydana gelmiştir.



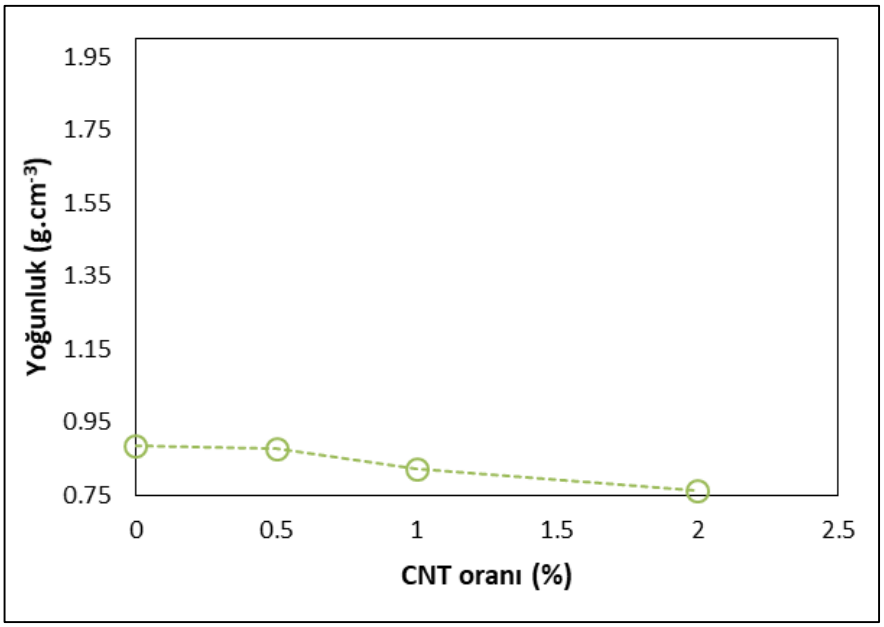
Şekil 5.8. %15 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi

Yukarıda ifade edildiği gibi benzer durum %30 üre içeren numuneler içinde geçerlidir (Şekil 5.9). Bu numunelerde maksimum yoğunluk 1.44 $g.cm^{-3}$ ile CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Minimum yoğunluk ise 1.33 $g.cm^{-3}$ ile %0.5 ve %2 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir. Her iki numune arasındaki oransal fark (%8) %15 üre içeren numuneler ile karşılaştırıldığında yaklaşık aynıdır. CNT miktarının köpüklerin yoğunluk değişimi üzerine etkisinin gözeneklilik oranı üzerine etkisinden nispeten daha fazla olduğu görülmektedir. CNT oranındaki değişimle yaklaşık %4 oranında gözeneklilikte (Şekil 5.4) farklılık elde edilirken yoğunluk değişimindeki fark yaklaşık %8 seviyesindedir.



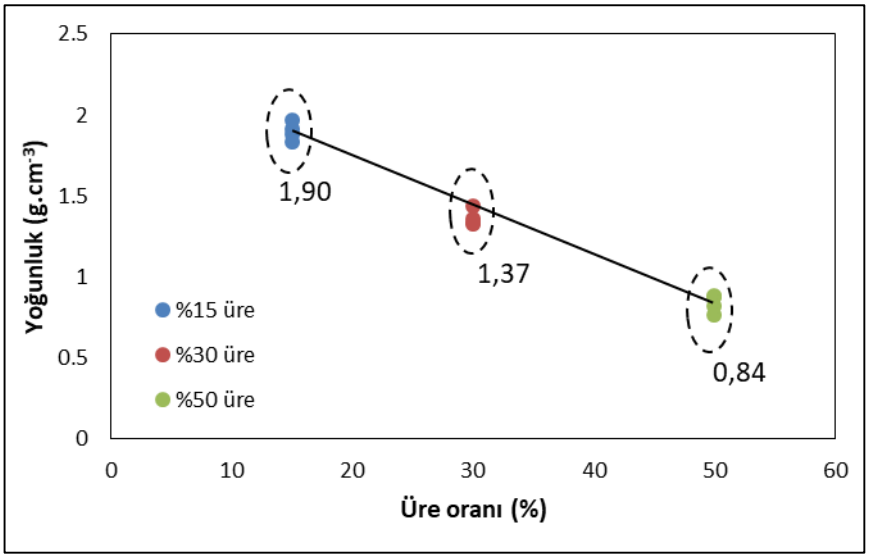
Şekil 5.9. %30 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi

Üre miktarı %50'ye ulaştığında numunelerin yoğunluğu 1 $g.cm^{-3}$'ün altına düşmüştür (Şekil 5.10). Diğer numunelerde olduğu gibi maksimum yoğunluk 0.89 $g.cm^{-3}$ ile CNT içermeyen numunelerde elde edilmiştir. Minimum yoğunluk değeri ise 0.77 $g.cm^{-3}$ ile %2 CNT içeren numunede elde edilmiştir. Bu değer bütün numuneler arasındaki minimum değeri göstermektedir.



Şekil 5.10. %50 üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı yoğunluk değişimi

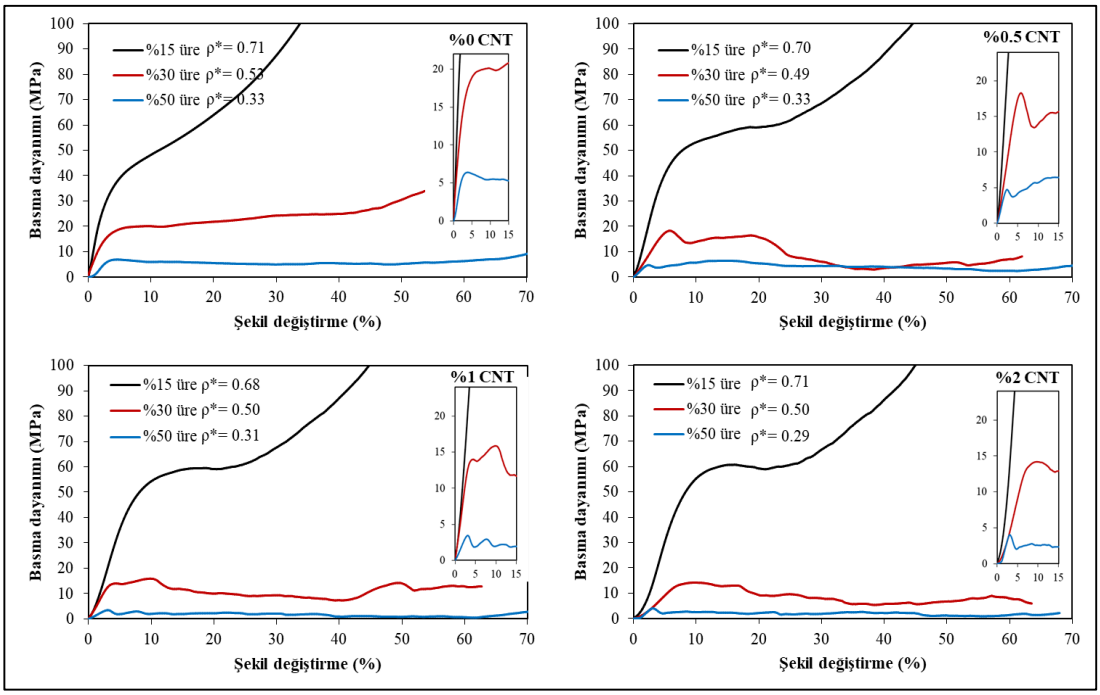
Şekil 5.11'te farklı oranlarda üre içeren CNT/Al köpüklerin CNT miktarından bağımsız olarak elde edilen değerleri verilmiştir. Grafiğe bakıldığında yoğunluk değerlerinde doğrusal bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Ağırlıkça %15, %30 ve %50 üre içeren CNT/Al köpüklerde sırasıyla ortalama yoğunluk değerleri 1.90 $g.cm^{-3}$, 1.37 $g.cm^{-3}$ ve 0.84 $g.cm^{-3}$'tür. Bu sonuçlara göre maksimum ve minimumri arasında yaklaşık olarak %44 oransal fark meydana gelmiştir. Bu fark %35 oranında üre miktarındaki değişimle sağlanmıştır.



Şekil 5.11. Farklı oranlarda üre içeren Al köpüklerin CNT miktarından bağımsız ortalama yoğunluk değerleri

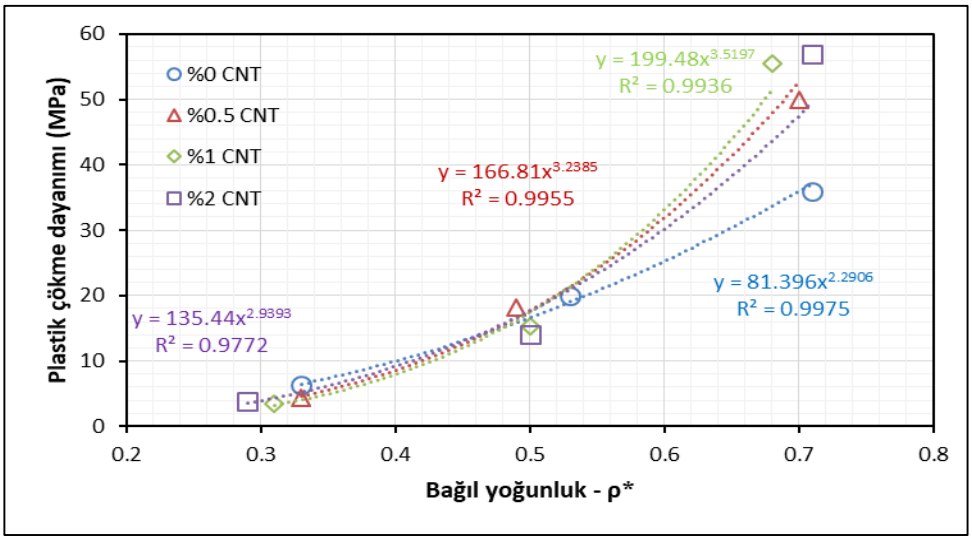
5.3. Ezilme Davranışı

Şekil 5.12'te numunelere ait gerilme - gerinim eğrileri verilmektedir. Grafik üzerinde ayrıca numunelere ait ortalama bağıl yoğunluk değerleri de verilmiştir. Basma deneyleri sonrası elde edilen eğrilerin köpük malzemelerin tipik gerilme-gerinim eğrileri ile benzer olduğu görülmektedir. Özellikle %50 üre ile üretilen köpük numunelerin eğrileri (i) lineer elastik bölge, (ii) plato bölgesi ve (iii) yoğunlaştırma bölgesini içermektedir. 3 bölgenin (lineer bölge, plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi) genişliği (büyüklüğü) numunelerin bağıl yoğunluk değerlerine ve hücre yapılarına (ortalama hücre boyutu, hücrelerin en boy oranı hücre duvarı en boy oranı, hücre kusurları, mikroyapı vb.) bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Birinci bölge (lineer elastik) küçük bir gerinim artışında (hücre duvarlarının elastik sapması) doğrusal şekilde gerilim artışı ile karakterize edilmektedir. Lineer bölgenin sonundaki tepe gerilimi hücre duvarı hasarının başlangıcına işaret etmekte ve devamında plato bölgesinde oluşan gerilim gevşemesi meydana gelmektedir. Artan gerinim ile birlikte başlangıçta en zayıf bölgelerdeki hücre duvarında çatlamalar ve çökmeler oluşmaktadır. Daha sonra bu çatlama ve çökme olayları neredeyse sabit gerilimde köpüklerin diğer zayıf kısımlarına doğru ilerlemektedir (Uzun, 2019; Markaki ve Clyne, 2001; Gui vd., 2000). Bu bölge plato bölgesi olarak ifade edilmekte ve ortalama gerilim plato gerilimi olarak kabul edilmektedir. Basma deneyleri sonucu elde edilen eğrilerde meydana gelen dalgalılık, hücrelerin kollektif çökmesi veya hücre duvarlarının kollektif kırılması/ayrılmasından kaynaklanmaktadır (Uzun, 2019; Song vd., 2008). Sapmalar ise muhtemelen lokalize hücre veya bireysel hücre varlığı yetersizliğinden veya köpük numunesindeki hücre duvarı gevrek kırılmasından dolayıdır (Uzun, 2019; Elbir vd., 2003; Luo vd., 2008; Raj ve Daniel 2007). Dahası, %15 ve %30 üre ile üretilen köpük numunelerin bağıl yoğunlukları oldukça yüksektir (Şekil 5.12). Bu nedenle, güçlü bir gerinim sertleşmesi mevcuttur.



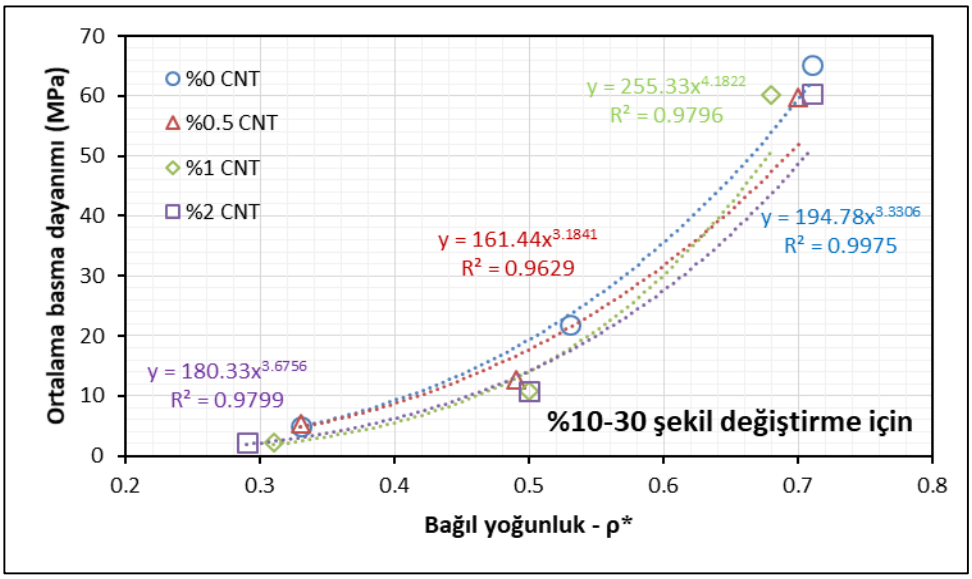
Şekil 5.12. CNT/Al köpüklerin CNT miktarına bağlı gerilim-gerinim eğrileri

Şekil 5.13'teki grafikte numunelerin bağıl yoğunluk değerlerine bağlı olarak plastik çökme dayanımlarındaki değişim gösterilmektedir. Sıkıştırma özellikleri diğer araştırmalarda olduğu gibi köpüğün bağıl yoğunluğu ile azalmıştır (Ashby vd., 2000; Banhart, 2001; Gibson, 2000; Jiang vd., 2007). Maksimum plastik çökme dayanımı 57 MPa ile 0.71 bağıl yoğunluğa sahip %15 üre ile üretilen %2 CNT katkılı alüminyum köpükte elde edilmiştir. Buna karşın minimum plastik çökme dayanımı 3.4 MPa ile 0.29 bağıl yoğunluğa sahip %50 üre ile üretilen %1 CNT katkılı alüminyum köpükte elde edilmiştir. Her iki numunenin gözeneklilik oranları %28.5 (%15 üre ile üretilen %2 CNT katkılı alüminyum köpük) ve %69.4 (%50 üre ile üretilen %1 CNT katkılı alüminyum köpük) olarak hesaplanmıştır. %15 üre ile üretilen numunelerde katı faz hacimsel olarak daha fazladır. Bu durumda hücre duvarı, statik sıkıştırma testi sırasında bükülmeye ve burulmaya maruz kaldığında hücre duvarı kalınlığının direncine bağlı olarak köpüğün dayanımı daha yüksek çıkmaktadır. %50 üre ile üretilen numunelerde bağıl yoğunluk değerlerindeki azalma hücre duvarlarında incelmeye neden olmuştur. Bu durumda hücre duvarlarının eğilme dayanımını ve gerekli atalet mometleri azalarak plastik çökme dayanımı ve ortalama gerilim (Şekil 5.13) gibi basma özellikleri zayıflamıştır (Bafti ve Habibolahzadeh, 2013).



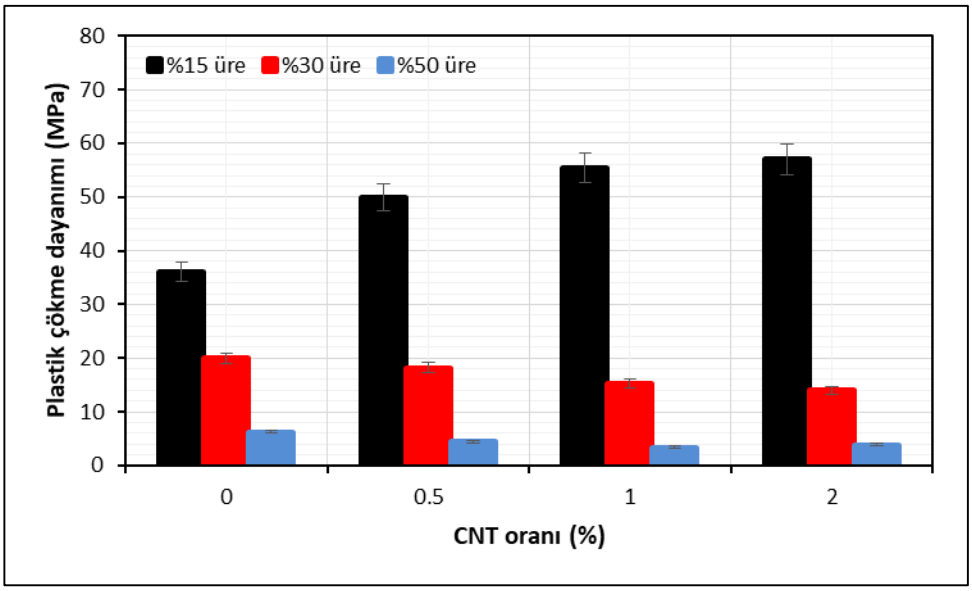
Şekil 5.13. Çeşitli bağıl yoğunluğa sahip CNT/Al köpüklerin plastik çökme dayanımlarındaki değişim

Şekil 5.14'teki grafikte numunelerin bağıl yoğunluk değerlerine bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi gösterilmektedir. Elde edilen verilere göre bağıl yoğunluk değerlerindeki artış ortalama basma dayanımı değerlerinde artış sağlamıştır. Maksimum ortalama basma dayanımı 65 MPa ile 0.71 bağıl yoğunluğa sahip %15 üre ile üretilen ve CNT içermeyen alüminyum köpükte elde edilmiştir. Buna karşın minimum ortalama basma dayanımı 2.2 MPa ile 0.29 ve 0.31 bağıl yoğunluklara sahip %50 üre ile üretilen %1 ve %2 CNT katkılı alüminyum köpüklerde elde edilmiştir.



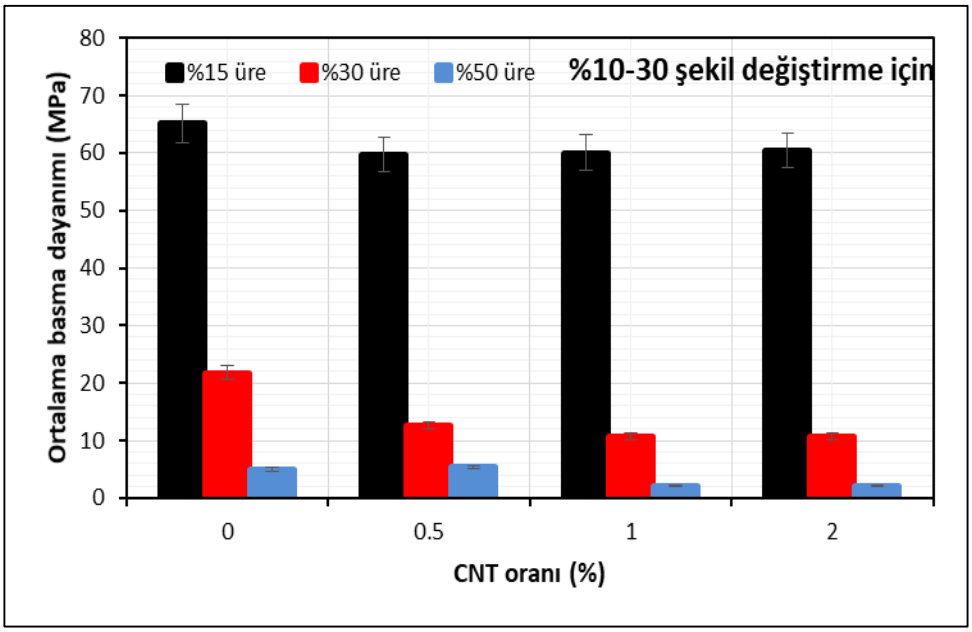
Şekil 5.14. Numunelerin bağıl yoğunluk değerlerine bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi

Şekil 5.15'teki grafik CNT oranına bağlı olarak numunelerin plastik çökme dayanımlarındaki değişimi gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında %15 üre ile üretilen köpük numunelerde CNT oranındaki artış ile birlikte plastik çökme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Bu numuneler için minimum çökme dayanımı CNT içermeyen numunelerde 36 MPa iken maksimum çökme dayanımı %2 CNT içeren numunelerde 60.43 MPa elde edilmiştir. Bu sonuca göre %2 CNT oranındaki değişim ile plastik çökme dayanımda %67.8 artış sağlanmıştır. Bu durum CNT ile güçlendirilmiş Al matrisli kompozitlerde olduğu gibi fiber güçlendirmenin nispeten baskın olduğu mekanizma ile açıklanabilir (Chen vd., 2015; Boesl vd., 2014; Yang vd., 2016). Uygulanan kuvvete karşılık meydana gelen kayma gerilmeleri matristen CNT'lere etkili bir şekilde iletilebilir (Yang vd., 2017). %30 ve %50 üre ile üretilen köpük numunelerde ise CNT oranındak artış ile birlikte çökme dayanımında nispeten azalma meydana gelmiştir. %30 üre ile üretilen köpük numunede minimum çökme dayanımı 14 MPa ile %2 CNT içeren numunede elde edilmiştir. Maksimum çökme dayanımı ise 20 MPa ile CNT içermeyen köpük numunede elde edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre plastik çökme dayanımında %30 azalma meydana gelmiştir. Ancak meydana gelen bu azalmanın yalnızca CNT miktarı ile ilişkili olmamakla beraber numunelerin bağıl yoğunlukları ile de ilişkilidir. %50 üre ile üretilen köpük numunelerde de benzer eğilim sözkonusudur. Minimum çökme dayanımı 3.4 MPa ile %1 CNT içeren numunelerde elde edilmişken, maksimum çökme dayanımı ise 6.3 MPa ile CNTiçermeyen numunelerde elde edilmiştir. Köpük numunelerde artan gözeneklilik ile birlikte hücre duvarlarındaki azalma ezilme kuvvetleri karşısında numunelerin zayıf bir reaksiyon göstermesine neden olmuştur. Ayrıca hücre duvarları matrisi içerisinde bulunan CNT'ler dağılma güçlendirme etkisi yeterince oluşturamamışlardır.



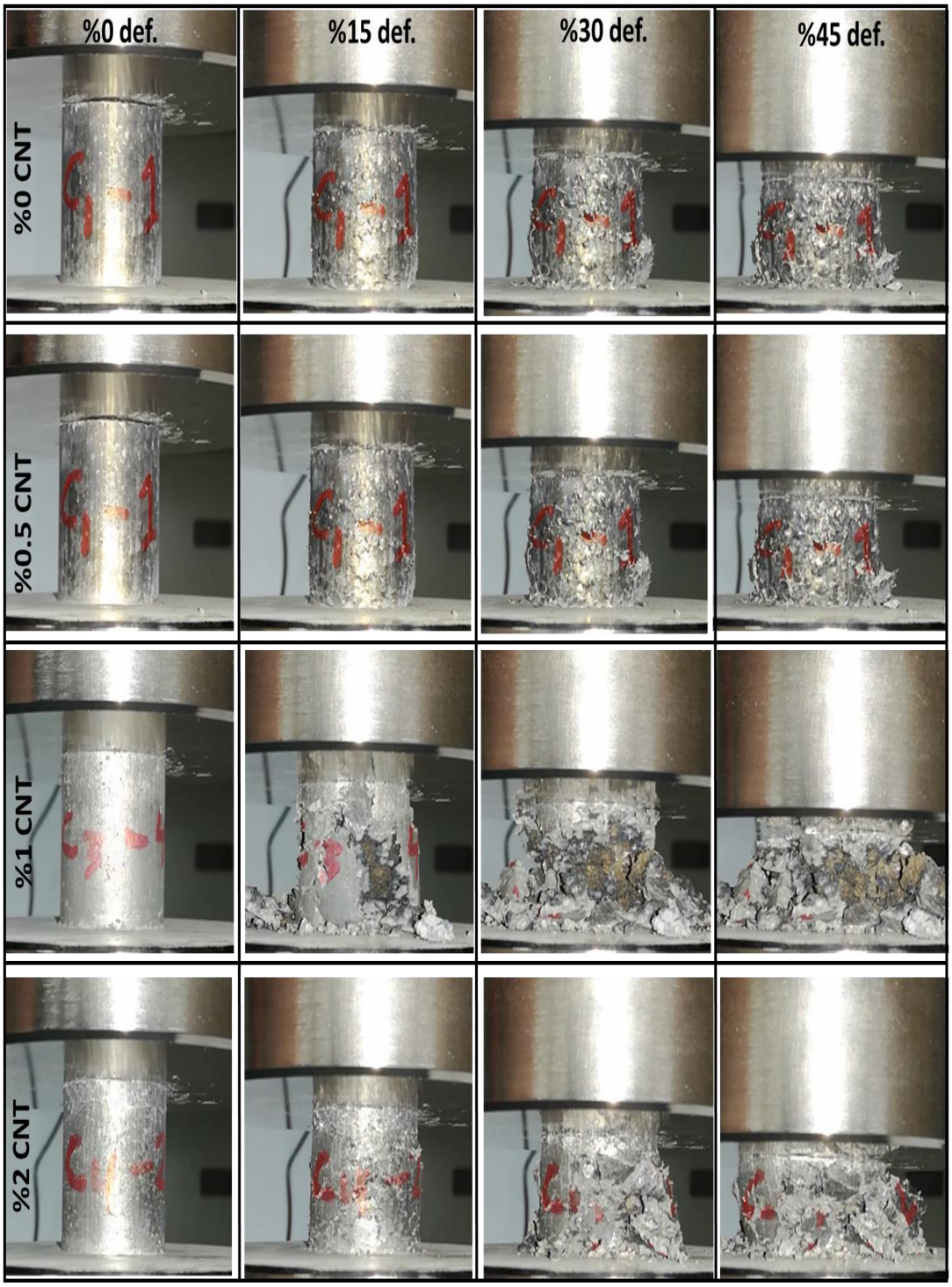
Şekil 5.15. CNT oranına bağlı olarak numunelerin plastik çökme dayanımlarındaki değişim

Şekil 5.16'daki grafikte CNT oranına bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi gösterilmektedir. Grafiğe bakıldığında %15 üre ile üretilen köpük numunelerde CNT oranındaki artış ile birlikte ortalama basma dayanımında önemsenmeyecek ölçüde azalma gözlemlenmiştir. Bu numuneler için minimum ortalama basma dayanımı %1 CNT içeren numunelerde 60,1 MPa iken maksimum ortalama basma dayanımı CNT içermeyen numunelerde 65.2 MPa elde edilmiştir. Bu sonuca göre CNT oranındaki değişime bağlı olarak ortalama dayanımında yaklaşık %8 azalma görülmüştür. Benzer eğilim %30 ve %50 üre ile üretilen köpük numuneler içinde geçerlidir. %30 üre ile üretilen köpük numunede minimum ortalama basma dayanımı 10.7 MPa ile %1 CNT içeren numunede elde edilmiştir. Maksimum ortalama basma dayanımı ise 21.8 MPa ile CNT içermeyen köpük numunede elde edilmiştir. Elde edilen bu verilere göre ortalama basma dayanımında yaklaşık %51 azalma meydana gelmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi meydana gelen bu azalma yalnızca CNT miktarı ile ilişkili değildir. Çünkü üretilen numunelerin bağıl yoğunluk değerlerinde farklılıklar mevcuttur. %50 üre ile üretilen köpük numunelerde de benzer eğilim sözkonusudur. Minimum ortalama basma dayanımı 2.1 MPa ile %1 ve %2 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir. Buna karşın, CNTiçermeyen numunelerde 5 MPa ile maksimum ortalama basma dayanımı sağlanmıştır.

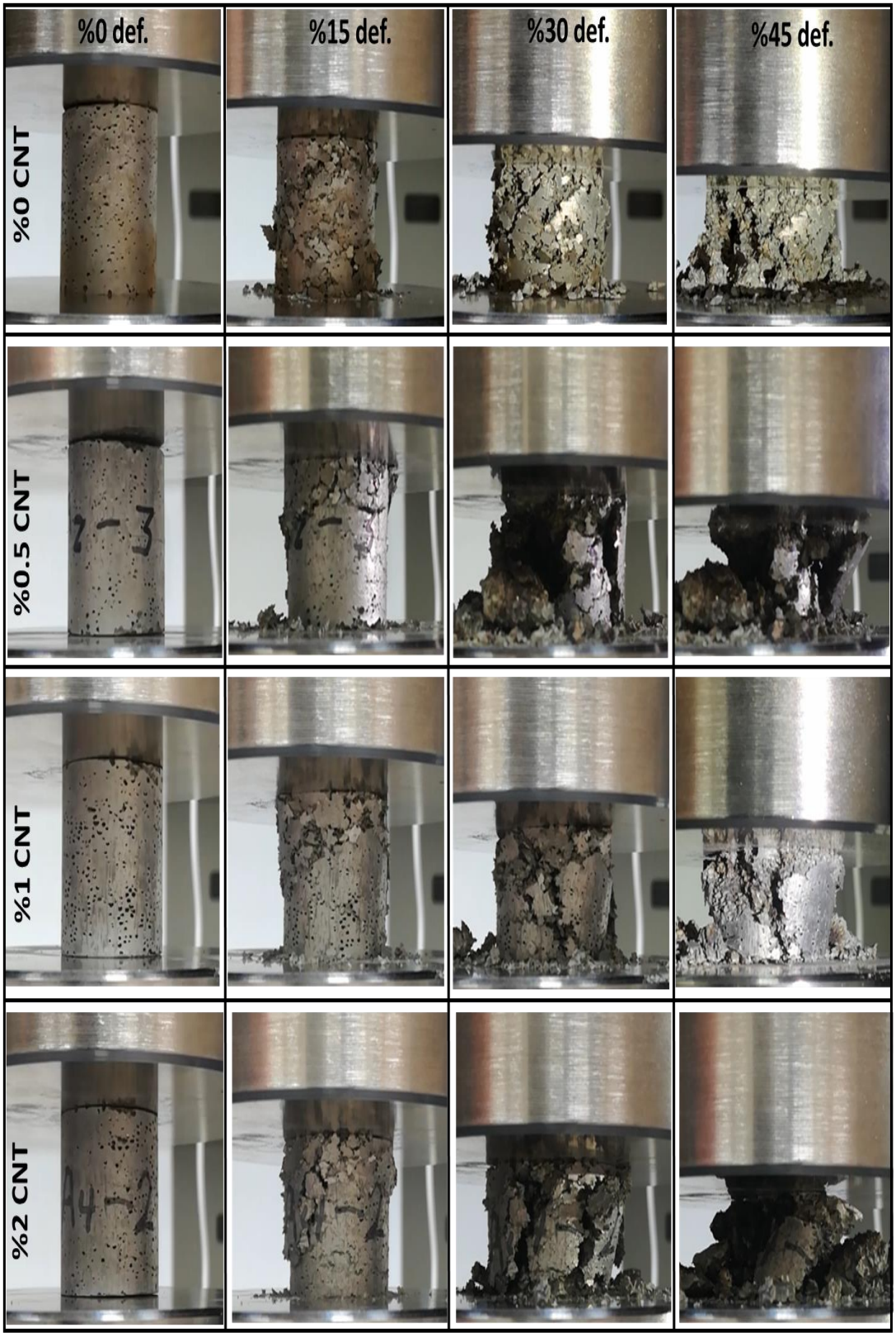


Şekil 5.16. Numunelerin CNT oranına bağlı olarak %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı değişimi

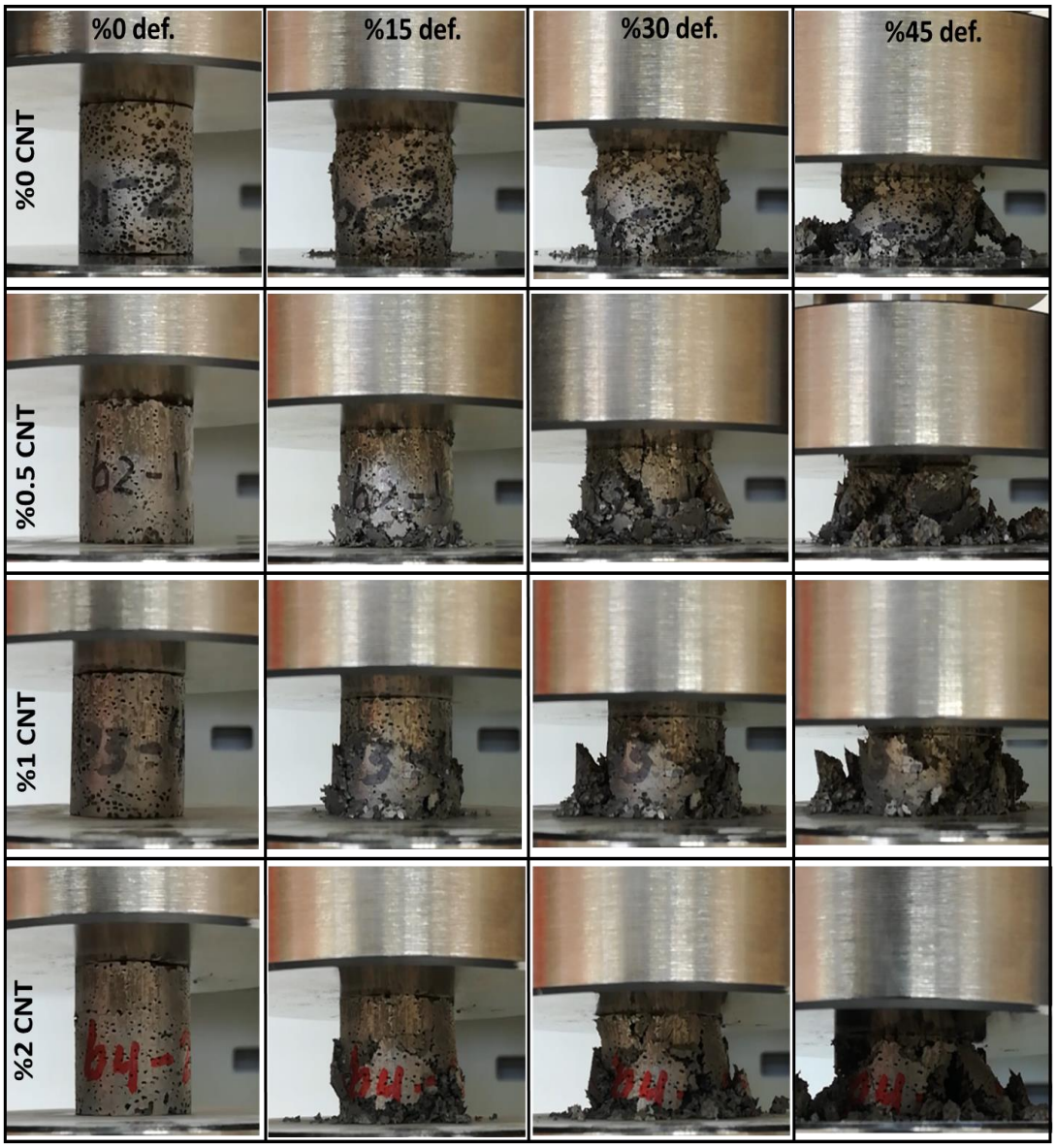
Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları kademeli olarak gösterilmektedir. Resimlere bakıldığında %15, %30 ve %50 üre ile üretilen numunelerin tamamı sıkıştırma kuvvetleri altında benzer deformasyon davranışı sergilemişlerdir. Ancak daha önce belirdildiği gibi plastik çökme dayanımı ve ortalama basma dayanımı gibi ezilme parametreleri birbirlerinden farklıdır. Bununla birlikte genel eğilim CNT miktarındaki artış ile birlikte numune dış yüzeylerinde ve hücre duvarlarında kırılma ve kompmaların artışıdır (Yang vd., 2018) . Bu durum CNT parçacıklarının gerinim sertleşmesine yol açması ile açıklanabilir.



Şekil 5.17. %15 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları



Şekil 5.18. %30 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları

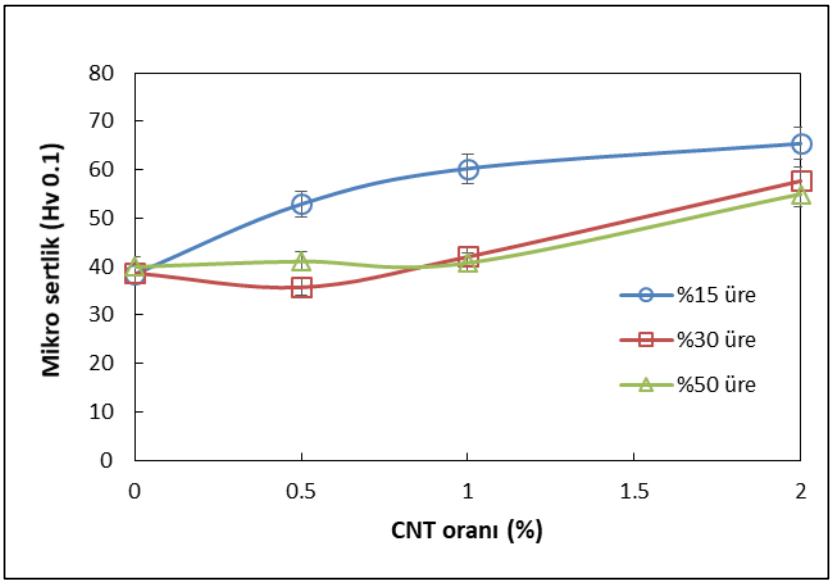


Şekil 5.19. %50 üre ile üretilen köpük numunelerin bastama testi esnasındaki defarmasyon davranışları

5.4. Mikrosertlik Değişimi

Şekil 5.20'de CNT takviyeli ve takviyesiz Al köpüklerin hücre duvarlarından ölçülen Vickers sertlik değerleri verilmiştir. Her üç numune türünde CNT oranındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinde artış meydana gelimiştir. Maksimum sertlik değeri 65 HV ile %15 üre ile üretilen %2 CNT takviyeli köpük numunelerde elde edilmiştir. %15 üre ile üretilen CNT içermeyen köpük numunelerde ise sertlik değeri 39 HV'dir. CNT ilavesi ile köpük numunelerin hücre duvarlarında yaklaşık olarak %66 sertlik artışı meydana gelmiştir. %30 ve %50 üre ile üretilen numunelerde de maksimum sertlik

değerleri %2 CNT ilavesi ile elde edilmiştir. Her iki numune için elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 58 HV ve 55 HV'dir. Elde edilen bu değerlere göre kullanılan üre miktarındaki artış, sertlik değerlerinin nispeten azalmasına neden olmuştur. Bu durum hücre duvarlarının kalınlığındaki azalmadan kaynaklanmaktadır. Duarte vd., (2015d) tarafından yapılan çalışmada, CNT'leri dağıtmak için geleneksel toz metalurjisi yöntemine gelişmiş bir koloidal işlem basamağı ilave ederek modifiye edilmiş yeni bir yaklaşım uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlar, CNT/Al kompozit köpüklerin Vickers mikro sertliğinin arttırıldığını göstermiştir (Duarte ve Ferreira, 2016).



Şekil 5.20. CNT oranına bağlı olarak numunelerin hücre duvarlarındaki mikro sertlik değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile CNT (%0, 0.5, 1 ve 2) takviyeli Al köpükler üretilmiştir. Çalışmada numuneler içerisinde gözenek oluşturmak için küresel şekilli üre granülleri kullanılmıştır. Farklı miktarlarda gözeneklilik elde etmek için üre oranı ağırlıkça %15, %30 ve %50 olarak belirlenmiştir. Belirlenen oranlarda sağlanan karışımlar (Al/CNT+Üre) sıkıştırma ve sinterleme işlemlerine tabii tutularak kompozit köpüklerin üretimi sağlanmıştır. Üretilen numunelerin mekaniksel ve fiziksel özellikleri üzerine yapılan testler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Üre miktarındaki artış ile birlikte gözeneklilik miktarında artış meydana gelmiştir. Maksimum gözeneklilik %50 üre ile üretilen numunelerde ortalama %69 olarak elde edilmiştir.
- ✓ CNT parçacıklarının gözeneklilik üzerine önemli bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir.
- ✓ Üretilen numunelerdeki gözenek yapısı kullanılan üre granülleri ile uyumlu olarak küresel şekillidir.
- ✓ CNT parçacıklarının hücre duvarı içerisinde boru formunda ve yer yer topaklanmış halde olduğu tespit edlmiştir.
- ✓ Üre miktarındaki artış ile birlikte gözeneklilik değerlerindeki artıştan dolayı yoğunluk değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Minimum yoğunluk değeri %50 üre ile üretilen numunelerde ortalama 0.84 $g.cm^{-3}$ olarak elde edilmiştir.
- ✓ Numunelerin sıkıştırma özellikleri köpüklerin bağıl yoğunluklarındaki azalma ile birlikte düşmüştür. Minimum plastik çökme dayanımı (3.4 MPa) %50 üre ile üretilen %1 CNT içeren numunelerde elde edilmiştir.
- ✓ Numunelerin bağıl yoğunluk değerlerindeki artış ile birlikte %10 ila %30 şekil değişimi arasındaki ortalama basma dayanımı artmıştır.
- ✓ Maksimum ortalama basma dayanımı %15 üre ile üretilen CNT içermeyen alüminyum köpükte 65 MPa olarak elde edilmiştir.

- ✓ Gözenek yapıcı madde olarak kullanılan ürenin takviye elemanı olarak kullanılan CNT parçacıklarına kıyasla ezilme davranışı üzerine daha fazla etkisi tespit edilmiştir.
- ✓ Köpük numunelerin hücre duvarlarında sertlik değerleri CNT oranındaki artış ile birlikte artmıştır. En yüksek sertlik 65 HV ile %15 üre ile üretilen %2 CNT içeren köpük numunelerde tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Agarwal, A., Bakshi, S. R., & Lahiri, D. (2016). *Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites*. CRC press.

Aguirre-Perales, L. Y., Jung, I.-H., & Drew, R. A. (2012). Effect of Sn on the Dehydrogenation Process of TiH 2 in Al Foams. *Metallurgical and Materials Transactions A, 43*(1), 1-5.

Akseli, I. (2005). *The application of aliminum foam for the heat and noise reduction in automobiles* (Master's thesis, İzmir Institute of Technology).

Andrews, E., Huang, J.-S., & Gibson, L. (1999a). Creep behavior of a closed-cell aluminum foam. *Acta materialia, 47*(10), 2927-2935.

Andrews, E., Sanders, W., & Gibson, L. J. (1999b). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams. Materials Science and Engineering: A, 270(2), 113-124.

Arnold, M., Korner, C., & Singer, R. F. (2003). PM aluminium foams: stabilizing mechanism and optimisation. Cellular Metals: Manufacture, Properties, Application, 71-76.

Ashby, M. F., & Gibson, L. J. (1997). Cellular solids: structure and properties. Cambridge, UK: Press Syndicate of the University of Cambridge, 183-231.

Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. (2002). Metal foams: a design guide: Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, ISBN 0-7506-7219-6, Published 2000, Hardback, 251 pp.

Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J., Wadley, H., & Gibson, L. (2000). Metal foams: a design guide: Elsevier.

Azzi, W. E. (2004). A systematic study on the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications.

Bafti, H., & Habibolahzadeh, A. (2010). Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters. *Materials & Design*, *31*(9), 4122-4129.

Bafti, H., & Habibolahzadeh, A. (2013). Compressive properties of aluminum foam produced by powder-Carbamide spacer route. Materials & Design (1980-2015), 52, 404-411.

Bakan, H. I. (2006). A novel water leaching and sintering process for manufacturing highly porous stainless steel. *Scripta Materialia, 55*(2), 203-206.

Banhart, J. (1999a). Foam metal: the recipe. Europhysics news, 30(1), 17-20.

Banhart, J. (1999b). Applications in transportation, Functional applications. *Hahn-Meitner-Institut Berlin-Germany, International Journal of Vehicle Design*, 1-13.

Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams. Jom, 52(12), 22-27.

Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. Progress in materials Science, 46(6), 559-632.

Banhart, J. (2006). Metal foams: production and stability. Advanced Engineering Materials, 8(9), 781-794.

Banhart, J. (2013). Light- Metal Foams—History of Innovation and Technological Challenges. Advanced Engineering Materials, 15(3), 82-111.

Banhart, J. (2018). 16 Production of Metal Foams.

Banhart, J., & Baumeister, J. (1998). Production methods for metallic foams. MRS Online Proceedings Library Archive, 521.

Banhart, J., Baumeister, J., & Weber, M. (1995). Powder metallurgical technology for the production of metallic foams. Euro Powder Metallurgy, 95, 201-208.

Banhart, J., Bellmann, D., & Clemens, H. (2001). Investigation of metal foam formation by microscopy and ultra small-angle neutron scattering. Acta Materialia, 49(17), 3409-3420.

Baumeister, J., & Schrader, H. (1992). U.S. Patent No. 5,151,246. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Boesl, B., Lahiri, D., Behdad, S., & Agarwal, A. (2014). Direct observation of carbon nanotube induced strengthening in aluminum composite via in situ tensile tests. Carbon, 69, 79-85.

Cambronero, L. E. G., Ruiz-Roman, J. M., Corpas, F. A., & Prieto, J. R. (2009). Manufacturing of Al–Mg–Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. Journal of materials processing technology, 209(4), 1803-1809.

Casati, R., & Vedani, M. (2014). Metal matrix composites reinforced by nano-particles—a review. Metals, 4(1), 65-83.

Casati, R., Fabrizi, A., Timelli, G., Tuissi, A., & Vedani, M. (2016). Microstructural and Mechanical Properties of Al- Based Composites Reinforced with In-Situ and Ex- Situ Al2O3 Nanoparticles. Advanced Engineering Materials, 18(4), 550-558.

Casati, R., Fabrizi, A., Tuissi, A., Xia, K., & Vedani, M. (2015). ECAP consolidation of Al matrix composites reinforced with in-situ γ-Al2O3 nanoparticles. Materials Science and Engineering: A, 648, 113-122.

Chen, B., Li, S., Imai, H., Jia, L., Umeda, J., Takahashi, M., & Kondoh, K. (2015). Load transfer strengthening in carbon nanotubes reinforced metal matrix composites via in-situ tensile tests. Composites Science and Technology, 113, 1-8.

Das, S. (2016). Graphene-sic particle reinforced aluminum alloy composite foam: response to high strain rate deformation(Doctoral dissertation, University of Missouri--Columbia).

Deshpande, V. S., & Fleck, N. A., 2000, High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams. *International Journal of Impact Engineering*. 24(3), 277-298.

Duarte, I., & Ferreira, J. M. (2016). Composite and nanocomposite metal foams. Materials, 9(2), 79.

Duarte, I., Ventura, E., Olhero, S., & Ferreira, J. M. (2015c). A novel approach to prepare aluminium-alloy foams reinforced by carbon-nanotubes. Materials Letters, 160, 162-166.

Duarte, I., Vesenjak, M., Krstulović-Opara, L., & Ren, Z. (2015b). Static and dynamic axial crush performance of in-situ foam-filled tubes. Composite structures, 124, 128-139.

Duarte, I., Vesenjak, M., Krstulović-Opara, L., Anžel, I., & Ferreira, J. M. (2015a). Manufacturing and bending behaviour of in situ foam-filled aluminium alloy tubes. Materials & Design, 66, 532-544.

Duarte, I., Ventura, E., Olhero, S., & Ferreira, J. M. (2015d). An effective approach to reinforced closed-cell Al-alloy foams with multiwalled carbon nanotubes. *Carbon*, *95*, 589-600.

Elbir, S., Yilmaz, S., Toksoy, A. K., Guden, M., & Hall, I. W. (2003). SiC-particulate aluminum composite foams produced by powder compacts: Foaming and compression behavior. Journal of materials science, 38(23), 4745-4755.

Elliott, J. C. (1956). U.S. Patent No. 2,751,289. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

García-Moreno, F. (2016). Commercial applications of metal foams: Their properties and production. Materials, 9(2), 85.

Gergely, V., Curran, D., & Clyne, T. (2003). The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. Composites Science and Technology, 63(16), 2301-2310.

Gibson, L. J. (2000). Mechanical behavior of metallic foams. *Annual review of materials science*, *30*(1), 191-227.

Gibson, L.J., Asbhy, M.F. (1997). Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Gnyloskurenko, S., Koizumi, T., Kita, K., & Nakamura, T. (2011). Development of dolomite foaming agent for Albased precursors. In 7th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (p. 121).

Gui, M. C., Wang, D. B., Wu, J. J., Yuan, G. J., & Li, C. G. (2000). Deformation and damping behaviors of foamed Al–Si–SiCp composite. Materials Science and Engineering: A, 286(2), 282-288.

Haesche, M., Lehmhus, D., Weise, J., Wichmann, M., & Mocellin, I. C. M. (2010). Carbonates as foaming agent in chip-based aluminium foam precursor. Journal of Materials Science & Technology, 26(9), 845-850.

Hall, I. W., Guden, M. & Yu, C. J., (2000). Crushing of aluminum closed cell foams: density and strain rate effects. *Scripta Materialia*. 43(6), 515-521.

Harris, P. J. (2004). Carbon nanotube composites. International Materials Reviews, 49(1), 31-43.

Hassani, A., Habibolahzadeh, A., & Bafti, H. (2012). Production of graded aluminum foams via powder space holder technique. Materials & Design, 40, 510-515.

Helwig, H.-M., Garcia-Moreno, F., & Banhart, J. (2011). A study of Mg and Cu additions on the foaming behaviour of Al–Si alloys. Journal of Materials Science, 46(15), 5227.

Jiang, B., Wang, Z., & Zhao, N. (2007). Effect of pore size and relative density on the mechanical properties of open cell aluminum foams. *Scripta materialia*, *56*(2), 169-172.

Jiang, B., Zhao, N. Q., Shi, C. S., & Li, J. J. (2005). Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology. Scripta Materialia, 53(6), 781-785.

Jiménez, C., Garcia-Moreno, F., Pfretzschner, B., Klaus, M., Wollgarten, M., Zizak, I., ... & Banhart, J. (2011). Decomposition of TiH2 studied in situ by synchrotron X-ray and neutron diffraction. Acta Materialia, 59(16), 6318-6330.

Jiménez, C., Garcia-Moreno, F., Rack, A., Tucoulou, R., Klaus, M., Pfretzschner, B., Banhart, J. et. al. (2012). Partial decomposition of TiH_2 studied in situ by energy-dispersive diffraction and ex situ by diffraction microtomography of hard X-ray synchrotron radiation. *Scripta Materialia*, *66*(10), 757-760.

Jin, I., Kenny, L. D., & Sang, H. (1990). "Method of producing lightweight foamed metal." U.S. Patent No. 4,973,358. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Jin, I., Kenny, L. D., & Sang, H. (1992). U.S. Patent No. 5,112,697. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Kevorkijan, V. (2010). Advances in recycling of wrought aluminium alloys for added value maximisation. Metalurgija, 16(2), 103-114.

Koizumi, T., Kido, K., Kita, K., Mikado, K., Gnyloskurenko, S., & Nakamura, T. (2011a). Foaming agents for powder metallurgy production of aluminum foam. Materials transactions, 52(4), 728-733.

Koizumi, T., Kido, K., Kita, K., Mikado, K., Gnyloskurenko, S., & Nakamura, T. (2011b). Method of preventing shrinkage of aluminum foam using carbonates. Metals, 2(1), 1-9.

Lehmhus, D. I. R. K., Banhart, J. O. H. N., & Rodriguez-Perez, M. A. (2002). Adaptation of aluminium foam properties by means of precipitation hardening. Materials Science and Technology, 18(5), 474-479.

Lehmhus, D., & Banhart, J. (2003). Properties of heat-treated aluminium foams. Materials Science and Engineering: A, 349(1-2), 98-110.

Lehmhus, D., & Busse, M. (2004). Potential new matrix alloys for production of PM aluminium foams. Advanced Engineering Materials, 6(6), 391-396.

Lehmhus, D., Wichmann, M., & Busse, M. (2008). Kinetic analysis of foaming agent variants as a means towards optimised temperature cycles and foaming agent/matrix alloy combinations. Porous Metals and Metallic Foams (Metfoam 2007). L. P. Lefebvre, J. Banhart and D. Dunand. Montréal, DEStech Publ.: 51-54.

Linul, E., Marşavina, L., Linul, P. A., & Kovacik, J. (2019). Cryogenic and high temperature compressive properties of Metal Foam Matrix Composites. *Composite Structures*, *209*, 490-498.

Luo, Y., Yu, S., Li, W., Liu, J., & Wei, M. (2008). Compressive behavior of SiCp/AlSi9Mg composite foams. Journal of Alloys and Compounds, 460(1-2), 294-298.

Markaki, A. E., & Clyne, T. W. (2001). The effect of cell wall microstructure on the deformation and fracture of aluminium-based foams. Acta Materialia, 49(9), 1677-1686.

Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., & Kitahara, A. (1998). Aluminum foam,"ALPORAS": the production process, properties and applications. MRS Online Proceedings Library Archive, 521.

Mostafid, A. M. (2007). Entrance and exit effects on flow through metallic foams (Doctoral dissertation, Concordia University).

Mukherjee, M., Garcia- Moreno, F., Jiménez, C., & Banhart, J. (2010). Al and Zn foams blown by an intrinsic gas source. Advanced Engineering Materials, 12(6), 472-477.

Rack, A., Helwig, H. M., Bütow, A., Rueda, A., Matijašević-Lux, B., Helfen, L., Banhart, J. et. al. (2009). Early pore formation in aluminium foams studied by synchrotron-based microtomography and 3-D image analysis. Acta Materialia, 57(16), 4809-4821.

Raj, R. E., & Daniel, B. S. S. (2007). Aluminum melt foam processing for light-weight structures. Materials and Manufacturing Processes, 22(4), 525-530.

Queheillalt, D. T., Katsumura, Y., & Wadley, H. N. (2004). Synthesis of stochastic open cell Ni-based foams. *Scripta Materialia*, *50*(3), 313-317.

Simone, A., & Gibson, L. J. (1998). Aluminum foams produced by liquid-state processes. Acta materialia, 46(9), 3109-3123.

Song, H. W., He, Q. J., Xie, J. J., & Tobota, A. (2008). Fracture mechanisms and size effects of brittle metallic foams: In situ compression tests inside SEM. Composites Science and Technology, 68(12), 2441-2450.

Tjong, S. C. (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets. Materials Science and Engineering: R: Reports, 74(10), 281-350.

Ulbin, M., Glodež, S., Vesenjak, M., Duarte, I., Podgornik, B., Ren, Z., & Kramberger, J. (2019). Low cycle fatigue behaviour of closed-cell aluminium foam. *Mechanics of Materials*, *133*, 165-173.

Uzun, A. (2019). Production of aluminium foams reinforced with silicon carbide and carbon nanotubes prepared by powder metallurgy method. Composites Part B: Engineering, 172, 206-217.

Uzun, A., & Turker, M. (2015). The investigation of mechanical properties of B4C-reinforced AlSi7 foams. International Journal of Materials Research, 106(9), 970-977.

Wang, J., Yang, X., Zhang, M., Li, J., Shi, C., Zhao, N., & Zou, T. (2015). A novel approach to obtain in-situ growth carbon nanotube reinforced aluminum foams with enhanced properties. Materials Letters, 161, 763-766.

Worz, H., & Degischer, H. P. (1995). U.S. Patent No. 5,393,485. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Yang, D., Hu, Z., Chen, W., Lu, J., Chen, J., Wang, H., Ma, A. et. al. (2016). Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties. Journal of Manufacturing Processes, 22, 290-296.

Yang, K., Yang, X., Liu, E., Shi, C., Ma, L., He, C., Li, Q., Li, j., & Zhao, N. (2017). Elevated temperature compressive properties and energy absorption response of in-situ grown CNT-reinforced Al composite foams. Materials Science and Engineering: A, 690, 294-302.

Yang, K., Yang, X., Liu, E., Shi, C., Ma, L., He, C., Zhao, N. et. al. (2018). High strain rate dynamic compressive properties and deformation behavior of Al matrix composite foams reinforced by in-situ grown carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A, 729*, 487-495.

Yu, S., Liu, J., Zhu, X., Luo, Y., & Wei, M. (2007). Effects of heat treatment on compressive behavior and energy absorption characteristic of ZA22 foams. Advanced Engineering Materials, 9(8), 679-683.

Zhao, N. Q., Jiang, B., Du, X. W., Li, J. J., Shi, C. S., & Zhao, W. X. (2006). Effect of Y2O3 on the mechanical properties of open cell aluminum foams. Materials Letters, 60(13-14), 1665-1668.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Abdullatif Emar S ABO SBIA
Doğum Yeri ve Yılı : 27.09.1976 Zawia-Libya
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : abosbaıa@yahoo.com

Eğitim Durumu

Lise : Al-Taher Al-Zawi.
Lisans : High Institute for Refrigeration and Air-conditioning-Sokna.

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Yüksek Kapsamlı Meslekler Enstitüsü / Al-Zawia.