

**TAŞITLARDA KULLANILAN
METAL KÖPÜKLERİN YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ
DOKTORA TEZİ**

İbrahim YAVUZ

DANIŞMAN

Doç. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ

Mayıs 2012

Bu tez çalışması 09.TEF.06 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTARA TEZİ

TAŞITLARDA KULLANILAN METAL KÖPÜKLERİN YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

İbrahim YAVUZ

DANIŞMAN

Doç Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Yrd. Doç Dr. M. Serhat BAŞPINAR

METAL EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2012

TEZ ONAY SAYFASI

İbrahim YAVUZ tarafından hazırlanan “Taşıtlarda Kullanılan Metal Köpüklerin Yapısal Özelliklerinin İyileştirilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 31/05/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metal Eğitimi Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

İkinci Danışman : Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Başkan	: Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN . Afyon Kocatepe Üniv., Mühendislik Fakültesi	İmza
Üye	:Doç. Dr. Yılmaz YALÇIN .Afyon Kocatepe Üniv., Teknoloji Fakültesi	İmza
Üye	:Doç. Dr. İbrahim MUTLU .Afyon Kocatepe Üniv., Teknoloji Fakültesi	İmza
Üye	:Yrd. Doç Dr. Mehmet ÇAKMAKKAYA . Afyon Kocatepe Üniv., Teknoloji Fakültesi	İmza
Üye	: Yrd. Doç Dr. Recai KUŞ .Selçuk Üniv. Teknoloji Fakültesi	İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.
.....
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Mevlüt DOĞAN

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28/06/2012

İmza

İbrahim YAVUZ

ÖZET
Doktora Tezi

TAŞITLARDA KULLANILAN METAL KÖPÜKLERİN YAPISAL
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

İbrahim YAVUZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Yrd. Doç Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Bu çalışmada, metalik köpüklerin üretim parametreleri araştırılmıştır. Araştırma kapsamında açık ve kapalı hücre metalik köpük imalatı yapılmış olup üretim esnasında farklı malzemeler ve üç farklı metotlar kullanılmıştır. Birinci yöntemde boşluk tutucu malzeme olarak suda çözünebilen formdaki malzemeler (NaCl, Na₂CO₃) ve toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. İkinci yöntemde köpürtücü ajan tekniği kullanılarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiş olup köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanılmıştır. Üçüncü yöntemde ise kaybolmayan tip boşluk tutucu malzeme (genleşmiş silika jel) ve vakum döküm yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen numunelerin, üretim parametrelerine bağlı olarak yoğunlukları hesaplanmış, basma deneyi ile plastik yıkım gerilimleri ölçülmüş ve içyapı değişimleri SEM ile incelenmiştir.

Sonuçta, toz metalürjisi ile üretilen numunelerin özelliklerinin üretim parametrelerine çok duyarlı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, boşluk tutucu ve çözünme hızının, köpük üretimini yakından etkilediği gözlenmiştir. Köpürtücü ajan tekniğinde ise homojen bir gözenek yapısı elde edilememiştir. Vakum döküm yöntemi ve kaybolmayan boşluk tutucu malzeme yöntemi ile daha başarılı ve özellikleri kontrol edilebilir alüminyum esaslı köpükler üretilmiştir.

2012, xv +159 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metal Köpük, Alüminyum Köpük Malzemeler, Otomotiv Endüstrisi, Toz metalürjisi, Vakum döküm, Boşluk tutucu malzeme,

ABSTRACT

PhD Thesis

IMPROVING PHYSICAL PROPERTIES OF METAL FOAMS USED IN VEHICLE

İbrahim YAVUZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metal Education

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN

Yrd. Doç Dr. M. Serhat BAŞPINAR

In this study, the effectiveness of the manufacturing parameters of metallic foams were investigated. Open and closed-cell metallic foams were produced and different materials and methods were used during the production. In the first method water-soluble materials used as a space holder material (NaCl , Na_2CO_3) and powder metallurgy method was used. In the second method, metallic foam produced by using the technique of foaming agent and marble powder was used as foaming agent. However in the third method, the fade-type space holder material (expanded silica gel) and vacuum casting method is used. The density of the samples, depending on the production parameters, were calculated. Strains were measured by compression testing, and microstructure of samples was examined by SEM.

As a result, characteristics of the samples produced by powder metallurgy were very sensitive to production parameters. At the same time retaining space, the type and rate of dissolution of the water-soluble, closely affects the production of foam. Also foaming agent type and the dissolution rate affects the foam production closely. Uniform pore structure couldn't be obtained at foaming agent technique. Foam samples were produced more effectively by using vacuum casting method and space holder method. With these methods, foam properties can be controlled more effectively.

2012, xvii +159 pages

Key Words: Metal Foams, Aluminum Foam Materials, Powder Metallurgy, Automotive Industry, Vacuum Casting, Space Holder Material

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç Dr. Hüseyin BAYRAKÇEKEN ve Sayın Yrd. Doç Dr. M. Serhat BAŞPINAR Hocalarıma, teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışma aşamasında yardımları bulunan değerli hocalarım Arş. Gör. Dr. Rıza KARA ve Arş. Gör. Dr. Fatih ÇOLAK'a, Metalografi sorumlusu değerli Birol EROL'a ve Metal Eğitimi sorumlusu Ersin DURAK' a çok teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

İbrahim YAVUZ

AFYONKARAHİSAR, 2012

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Otomotiv Endüstrisi ve Metalik Köpükler	2
1.2 Amaç ve Kapsam	6
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	8
3. METALİK KÖPÜKLER.....	16
3.1. Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi	16
3.2. Metalik Köpük Tanımı	18
3.3. Metalik Köpük Çeşitleri	19
3.3.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler	19
3.3.2. Kapalı Hücre Metalik Köpükler	21
3.4. Metalik Köpüklerin Özellikleri.....	22
3.4.1. Elastik Modül	26
3.4.2. Basma Davranışı	31
3.4.3. Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı	34
3.4.4. Gerinim Davranışı.....	38
3.4.5. Burulma Davranışı	39
3.4.6. Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış	40
3.5. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri.....	43
3.5.1. Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi.....	45
3.5.1.1. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme	45
3.5.1.2. Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Köpük Üretimi.....	48
3.5.1.3. Gaz-Ötektik Reaksiyonunu Kullanarak Köpük Üretimi.....	54
3.5.1.4. Dökme, Süzme ve Çoğaltma Tekniği ile Köpük Üretimi	55
3.5.1.5. Boşluk Tutucu Teknik İle Metalik Köpük Üretimi (Sentaktik Köpük)...	57
3.5.2. Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi	60
3.5.2.1. Öncü Malzemeler Karıştırılmış Tozun Pişirilmesi ile Gözeneklendirme	60

3.5.2.2. Düşük Yoğunluklu Çekirdeğin Gaz Kaynaklı Büyümesi ile Gözeneklendirme	62
3.5.2.3. Toz ve Fiber Sinterleyerek Köpük Üretimi.....	63
3.5.2.4. İçi Boş Kürelerin Sinterlenmesiyle Gözeneklendirme	65
3.5.2.5. Sinterleme ve Çözme Tekniği (SDP) İle Metalik Köpük Üretimi	66
4. MATERYAL ve METOT	70
4.1 Toz Metalürjisi Yöntemi İle Metalik Köpük Üretimi.....	70
4.1.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler.....	70
4.1.2 Metalik Köpük Üretiminde Kullanılan Cihazlar	71
4.1.3 Toz Metalürjisi Yöntemi ve Çözünen Preform Tekniği İle Metalik Köpük Üretimi	72
4.2. Köpürtücü Ajan İlavesi İle Metalik Köpük Üretimi.....	73
4.2.1. Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler.....	73
4.2.2. Metalik Köpük Üretimi İçin Kullanılan Cihazlar	75
4.2.3. Köpürtücü Ajan Yöntemi ile Metalik Köpük Üretim Prosesi.....	75
4.3. Vakum Döküm Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi	77
4.3.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler.....	77
4.3.2. Metalik Köpük Üretimde Kullanılan Cihazlar	82
4.3.3. Vakum Döküm Yöntemi İle Numune Üretim Prosesi.....	85
4.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Yapılan Deneyleri.....	87
4.4.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	87
4.4.2.Toz Metalürjisi ile Yapılan Metalik Köpük Deneyleri	88
4.4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi.....	88
4.4.2.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	88
4.4.2.3 Basma Dayanımı Deneyleri	88
4.4.3 Köpürtücü Ajan Tekniği ile Üretilen Metalik Köpük Deneyleri.....	88
4.4.3.1 Proses İçin Yapılan Deneyler	88
4.4.3.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	89
4.4.3.3. Basma Dayanımı Deneyleri	89
4.4.3.4 Hücre ve Yüzey İncelemesi.....	89
4.4.4 Vakum Döküm Yöntemi ile Üretilen Metalik Köpük Deneyleri	89
4.4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi.....	90
4.4.4.2 Numune Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	90
4.4.4.3 Basma Dayanımı Deneyleri	90
4.4.4.4 Çentik Darbe Direnci Dayanımı Deneyleri.....	90
4.4.4.5 Hücre Duvarı Analizleri.....	91

4.4.4.6 Elastik-Plastik Deformasyon ve Enerji Absorbe Özellikleri	91
5. BULGULAR.....	92
5.1. Toz metalürjisi ile üretilen numuneler	92
5.1.1 SEM Analizleri	94
5.1.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	95
5.1.3 Basma Dayanımı.....	95
5.2 Köpürtücü Ajan Tekniği ile Üretilen Numuneler.....	95
5.2.1 Köpürtücü Ajan Miktarı Tespiti.....	95
5.2.2 Katkı Maddesi Miktarı Tespiti	96
5.2.3 Karıştırma Devrinin Köpürmeye Etkileri.....	99
5.2.4. Karıştırma Süresinin Köpürmeye Etkileri.....	100
5.2.5. Fırın Sıcaklığının ve Fırında Bekleme Süresini Köpürmeye Etkisi	102
5.2.6. Köpürtücü Ajan Tane Boyutunun Köpürmeye Etkisi.....	107
5.2.7 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	108
5.2.8 Basma Dayanımı.....	108
5.2.9. Stereo Mikroskop İncelemesi.....	110
5.3. Vakum Döküm Yöntemi ile Üretilen Numuneler	110
5.3.1. Numunelerin Kesitleri ve Yoğunluk Ölçümü.....	113
5.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi.....	115
5.3.3 Basma Dayanımı.....	116
5.3.3.1 Silika jel Çaplarının Dayanıma Etkisi	118
5.3.3.1.1 Al esaslı malzemeler için silika jel çaplarının dayanıma etkisi	118
5.3.3.1.2 Al-12Si alaşımlı malzemeler için silika jel çaplarının dayanıma etkisi	121
5.3.3.2 Silika Jel Yoğunluklarının Basma Dayanımına Etkisi	124
5.3.3.2.1 Al esaslı malzemeler için silika jel yoğunluklarının basma dayanımına etkisi	124
5.3.3.2.2 Al-12Si alaşımlı malzemeler için silika jel yoğunluklarının basma dayanımına etkisi	126
5.3.3.3 Alaşımın malzeme dayanımına etkisi	128
5.3.4 Çentik Darbe Dayanımı.....	130
5.3.4.1 Yoğunluğun Çentik Darbe Dayanımına Etkisi.....	130
5.3.4.1 Silika Jel Çapının Çentik Darbe Direnci Dayanımına Etkisi	133
5.3.5 Hücre Duvarı Analizleri.....	134
5.3.6 Elastik ve Plastik Deformasyon Özellikler	135
5.3.7 Enerji Sönümleme Özelliği	137

6. SONUÇLAR.....	140
7.TARTIŞMA.....	146
8. KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ.....	158

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}$	Derece
E	Elastiklik modülü
G	Kayma modülü
K	Kütle modülü
V	Poisson oranı
ρ^*	Hücre malzemelerin yoğunluğu
ρ_s	Duvarlardan meydana gelen hücre malzemenin yoğunluğu
p_r	Göreceli köpük yoğunluğu
S	Hücre duvarları ve hücre kenarlarından yapılmış olan katının özellikleri
Φ	Kapalı hücreli köpükler için hücre kenarları içeren katının miktarı
E_v	Hacim başına düşen emilmiş enerji miktarı
γ_t	Kayma dayanımı
C_v	Birim hacme düşen öz ısı
A	Isıl genleşme katsayısı
λ	Termal iletkenlik

Kısaltmalar

P/M	Toz metalürjisi
TG	Termal Gravimetri
DTG	Dekompoze Termal Gravimetri
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	Energy Dispersive
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi

Şekil 1.1. Enerji absorblama için kullanılan alüminyum köpük malzemesi.....	3
Şekil 1.2. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler	4
Şekil 1.3. Çeşitli darbe absorpsiyon elemanları	5
Şekil 1.4. Daimler Chrysler tarafından, alüminyum köpük malzemedan yapılmış birkaç prototip	5
Şekil 1.5. Alüminyum köpük malzemedan yapılmış darbe emici parça	5
Şekil 1.6. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerlerden bazıları.....	6
Şekil 3.1 Metalik köpüklerin tarihsel gelişimi	18
Şekil 3.2 Temsili bir açık hücre ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM migrografi	20
Şekil 3.3 Temsili bir kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-Ray tomografisi	21
Şekil 3.4 Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği	24
Şekil 3.5 Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği	25
Şekil 3.6 Elastik-kırılgan köpüklerin tipik gerilme-gerinim grafiği	25
Şekil 3.7. Sonlu elemanlar metodu sonunda Φ nin değişimi	29
Şekil 3.8 Açık hücreli ve kapalı hücreli alüminyum köpüklerin farklı tipleri için göreceli köpük yoğunluğu üzerine elastiklik modülünün etkisi	30
Şekil 3.9 Kapalı hücreli bir alüminyum köpük için ölçülmüş yük kaldırma modülü ile gerilim-gerinim ilişkisi.....	31
Şekil 3.10 Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada gerilim-gerinim eğrisi	32
Şekil 3.11 Gibson ve Ashby modeline göre kapalı hücreli yapı.	33
Şekil 3.12 Bir Al-12Si köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi	34
Şekil 3.13 İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi	35
Şekil 3.14 İki farklı alüminyum tipinin plastik dayanıma bağlı olarak değişen gerilim-gerinim eğrisi.....	36
Şekil 3.15 AlMgSi alaşımından hazırlanmış, çeşitli yoğunluklu alüminyum köpükler için basma yük-deformasyon eğrileri, ($W_2 > W_3 > W_1$).....	37

Şekil 3.16 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi	39
Şekil 3.17 Bükmede eksenel çekme gerilimi ve eksenel olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi	40
Şekil 3.18 Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı	43
Şekil 3.19 Tipik bir ses emici yapı	43
Şekil 3.20 İnce panellerin üretimi için Alcan tarafından geliştirilmiş sürekli olan köpük işleminin şematik gösterimi.....	45
Şekil 3.21 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi yardımıyla üretilen köpüğün optimizasyonu için önerilen seramik parçacık boyutu ve hacim oranları	46
Şekil 3.22 Köpürtücü ajanlar ile eriyiğin direkt köpükleştirilmesi	48
Şekil 3.23 Kalsiyum metalinin ilave edilip karıştırılmasından sonra bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzerine karıştırmanın etkisi	49
Şekil 3.24 FORMGRIP işleminin ilk adımı	51
Şekil 3.25 FORMGRIP işleminin şematik olarak gösterimi.....	51
Şekil 3.26 GASAR üretimi için gaz-metal ötektik katılaşması.....	55
Şekil 3.28 Mikrobalon şematik gösterimi	59
Şekil 3.29 Sentaktik köpüklerde iki veya üç fazlı olması durumunun şematik gösterimi	60
Şekil 3.30 Yarı-katı içindeki gaz salan parçacıklar ile üretilen metal köpükler için kullanılmış toz metalürji adımlarının sırası.....	61
Şekil 3.31 Açık ve kapalı hücreli gözeneklilik ile bir köpük oluşturmak ve içi boş küreler oluşturmak için Georgia Tech yöntemi	66
Şekil 3.32 SDP tekniği ile metalik köpük üretimi	68
Şekil 4.1. Toz metalürjisi yönteminde izlenen işlem sırası.....	72
Şekil 4.2. Sentetik kalsiyum karbonat ve mermer tozunun termogravimetrik eğrileri... 74	74
Şekil 4.3 Ergitme yönteminde izlenecek yolun şematik gösterimi	76
Şekil 4.4 Silika jellerin genişletilmesinde kullanılan ısıtma ve soğutma rejimi	78
Şekil 4.5 Silika jellerin TG ve DSC analizi	79
Şekil 4.6 Ham ve 1200 °C de genişletilmiş silika jelin XRD sonucu	80
Şekil 4.7 Al-Si denge diyagramı	85

Şekil 4.8 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması.....	86
Resim 5.1. U serisindeki numunelerin görüntüleri ve katmanlaşmalar.....	93
Resim 5.3 O serisindeki numunelerin görüntüleri.....	93
Şekil 5.1 Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için basma deney grafiği	109
Şekil 5.2 Basma deney grafiği.....	117
Şekil 5.3 Alüminyum esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1000°C de genişletilmiş silika jeller).....	119
Şekil 5.4 Alüminyum esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1100°C de genişletilmiş silika jeller).....	120
Şekil 5.5 Al-12Si esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1000°C de genişletilmiş silika jeller).....	122
Şekil 5.6 Al12Si esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1100°C de genişletilmiş silika jeller).....	123
Şekil 5.7 Al esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deney grafiği.....	125
Şekil 5.7 (Devam) Al esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deney grafiği.....	126
Şekil 5.8 Al-12Si esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi	127
Şekil 5.8 (Devam) Al12Si esaslı malzemelerin farklı silikajel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi.....	128
Şekil 5.9 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin aynı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi.....	129
Şekil 5.10 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin farklı yoğunluktaki numunelerin çentik darbe deneyi.....	131
Şekil 5.11 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin silika jel çapı ile enerji absorblama değişimi	133
Şekil 5.12 Alüminyum malzemeler için şekil değişimi - enerji çözümleme	138
Şekil 5.13 Al12Si malzemeler için şekil değişimi-enerji absorbesi	139

Çizelge 3.1. Bazı hücrese malzemelerin göreceli yoğunlukları.....	27
Çizelge 3.2. Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücrese alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği	41
Çizelge 3.3. Temel malzeme özellikleri ile birlikte verilen metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim tekniklerinin listesi	44
Çizelge 3.4. Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları.....	48
Çizelge 3.5. Alporas yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	50
Çizelge 4.1 Etial-7 külçelerin spektral analizleri	74
Çizelge 4.2 Etial-7 ve Al-12Si külçelerin spektral analizleri.....	77
Çizelge 4.3 Farklı genleşme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları.	81
Çizelge 4.4 Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları	85
Çizelge 4.5 Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri	87
Çizelge 5.1 Çözünen preform tekniği ile üretilen numunelerin değişimi.....	92
Çizelge 5.2 Üretilen numunelerin boyutları.....	100
Çizelge 5.3 Karıştırma süresinin köpük oluşumuna etkisi.....	101
Çizelge 5.4 Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresini köpürmeye etkisi	103
Çizelge 5.5 Köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi	107
Çizelge 5.6 Malzeme üretiminde kullanılan basınç ve sıcaklık değerleri	112
Çizelge 5.7 Vakum döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları.....	115
Çizelge 5.8. Al 1000 serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri	119
Çizelge 5.9 Al 1100 serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri	120
Çizelge 5.10 AS (Al-12Si) serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri.....	123
Çizelge 5.11 AS serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri	124
Çizelge 5.12 Al esaslı numunelerde silika jel yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması.....	126

Çizelge 5.13 Al ₁₂ Si esaslı numunelerde silika jel yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması.....	127
Çizelge 5.14 Çentik darbe deney sonuçları.....	132
Çizelge 5.15 Ashby-Gibson teoremine göre elastik modül	135
Çizelge 5.16 Ashby-Gibson teoremine göre plastik yıkım gerilimi.....	136
Çizelge 5.17 Şekil değişimi ile enerji çözümleme miktarı	137

Resim 3.1 Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması	39
Resim 3.2 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi ile üretilmiş bir köpüğün bir bölümünün optik mikrografı	47
Resim 3.3 TiH ₂ eklenmesi ile köpükleştirilmiş 80*80 mm ² boyutundaki alüminyum köpüğün gözenek yapısı	50
Resim 3.4 Silisyum karbürlü alüminyum köpükler	52
Resim 3.6 (a) : “Duocell” in görünüşü. (b) : Hassas dökümle üretilen	56
Resim 3.7 Alulight işlemi kullanılarak bir toz yöntemi öncüden pişirilmiş köpükleşmiş alüminyum alaşımdan bir bölümün optik mikrografı	62
Resim 3.8 Gazın genişlemesi ile basınçlandırılması tarafından köpükleştirilmiş bir çekirdek ile Ti-6Al-4V alaşımının LDC sandviç levhası boyunca bir bölümün optik mikrografı	63
Resim 3.9 Yaklaşık 100µm çapındaki parçacıklardan yapılmış sinterlenmiş bronzun ..	64
Resim 4.1. SEM’de çekilmiş tane morfolojileri A: Na ₂ CO ₃ , B: NaCl.	71
Resim 4.2. Çözündürme düzeneği	73
Resim 4.3 Toz içeriklerin hazırlanması	76
Resim 4.4 Köpürtme işlemi öncesindeki ergimiş alüminyum	77
Resim 4.5 Silikajel görüntüsü	78
Resim 4.6 Silika jel yüzeyi (a); genleştirme işlemi öncesi silika jel kırık yüzeyi, (b); genleşme sonrası gözenekli silika jel küre yapısı	80
Resim 4.7 Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları (a:1000°C, b: 1100 °C, c: 1200 °C)	81
Resim 4.8 Pota sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihaz	82
Resim 4.9 Vakum döküm tertibatı	83
Resim 4.10 Vakum hattında kullanılan filtreler a: Alüminyum Filtre, b: Çelik Filtre ...	84
Resim 4.11 Kalıbın genel görünüşü kalıbın kesit görünüşü	84
Resim 5.1. U serisindeki numunelerin görüntüleri ve katmanlaşmalar	93
Resim 5.2 S serisindeki numunelerin görüntüleri	93
Resim 5.3 O serisindeki numunelerin görüntüleri	93
Resim 5.3. Numunelerde oluşan farklı gözenek yapıları	94

Resim 5.4 Gözenek içinde yeniden kristalleşen NaCl.....	94
Resim 5.5 Alüminyum ve mermer tozu karışımından oluşan metalik köpüklerin mermer tozu ilavesine göre değişimi	96
Resim 5.6 Alüminyum, SiC ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler	97
Resim 5.7 Alüminyum, Al ₂ O ₃ ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler	98
Resim 5.8 Alüminyum, Al ₂ O ₃ , SiC ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler	99
Resim 5.9 Karıştırma devrinin köpürmeye etkisi.....	100
Resim 5.10 Karıştırma süresinin köpürmeye etkisi.....	101
Resim 5.11 Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresinin köpürmeye etkisi.....	104
Resim 5.11 (Devam) Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresinin köpürmeye etkisi	105
Resim 5.12. Köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi	108
Resim 5.13 Köpürtücü ajan tekniği kullanarak üretilen metalik köpük hücre görüntüleri	110
Resim 5.14 Düşük vakum değerlerinde dökülen deneme numuneleri	111
Resim 5.15 Kalıptan ilk çıkan numunenin şekli ve deneye hazır hale getirilmiş numune	114
Resim 5.16 Boyuna kesilen alüminyum köpük numune	114
Resim 5.17 Alüminyum köpük numunenin, farklı büyütmelelere sahip SEM görüntüleri	116
Resim 5.18 Basma testi sırasında ve sonrasındaki Al esaslı numune	121
Resim 5.19 Basma testi sırasında ve sonrasındaki Al-12Si içerikli numune.....	122
Resim 5.20 Al ₁₂ Si ve Al parçalarının darbe testi sonucundaki görüntüleri	132
Resim 5.21 Çentik darbe testi numuneleri (A: Al-12Si Numuneler, B: Al Numuneler)	133
Resim 5.22 Hücre duvar fotoğrafları.....	134

1. GİRİŞ

Metalik köpükler, hücreli yapıya sahip fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi olması, düşük yoğunlukları, enerji absorbe edebilmeleri gibi özelliklerinden dolayı günümüzde ilgi çeken malzemelerdendir. Metalik köpüklerin üstün özellikleri arasında, enerji absorbe kabiliyetinin yüksek olması, düşük yoğunluk, ısı izolasyonu, titreşim sönümlenme ve filtrasyon amaçlı kullanıma gibi özellikler sayılabilir (Seitber *et al.* 1997). Özellikle alüminyum esaslı metalik köpükler, çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanım alanı bulabilen malzemeler olarak son yıllarda oldukça ilgi çekmektedir. Alüminyum köpükler, darbe enerjisini plastik enerjiye dönüştürebilirler ve birçok metalden daha fazla enerji absorbe edebilirler. Metal tüpler içerisine dolgu malzemesi olarak konulduklarında emilen toplam enerji köpük ve tüpün ayrı ayrı emdiği enerjinin toplamından daha büyüktür (Hanssen *et al.* 2000, Elbir *et al.* 1999). Kullanım alanları arasında, hafifliğin ve mukavemetin bir arada bulunması gereken başta otomotiv sektörü olmak üzere, uzay sanayi, demiryolu taşımacılığı ve asansör gibi alanlar bulunmaktadır (Davies *et al.* 1983).

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpük ile hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı "metalik köpük" diye adlandırılırlar.

Gözenekli yapılar yalıtım, kaplama veya filtreleme işlemleri için kullanışlı malzemelerdir. Fakat yapısal uygulamalarda çok yararlı ve verimli olabileceğine inanılmamaktadır. Yük taşıyan yapılarda (kirişler, metalik parçalar) bulunan poroziteyi azaltmak için birçok bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Buna ek olarak döküm, toz metalürjisi, kaynak ve kaplama işlemleri sonucunda üretilmiş parçalar üzerinde poroziteyi azaltma çalışmaları büyük bir hızla devam etmektedir.

Gözenekli ve köpük yapılar taşıyacakları yük dikkate alınarak seçilmelidir. Metal köpük yapılarla diğer malzemelerin köpük yapıları arasında mekanik özellikler açısından farklar vardır. Polimer malzemeler yeterli derecede rijit değildir ve seramik

malzemeler de çok kırılğan bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle metalik köpük yapıları kullanmak doğru bir seçim olarak görölmektedir (Avarisli ve Uguz 2003, Feng *et al.* 2002).

İçyapının köpük şeklinde olması darbe yönünü dikkate almadan yüksek darbe enerjisini sönümlemesini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Ayrıca metalik köpük malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri, polimerik köpük malzemelere kıyasla çok üstündür. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması buna örnek olarak verilebilir.

Düşük yoğunlukları ve düşük yüklerde nispeten yüksek deformasyon enerjisi emme özellikleri nedeniyle kapalı hücreli alüminyum köpüklere ilgi son yıllarda artmaktadır. Potansiyel uygulama alanları arasında otomobillerde çarpışma esnasında oluşan darbe enerjisini emen yapılarda; kapı, tampon ve benzeri kısımlarda dolgu maddesi olarak kullanımı bulunmaktadır.

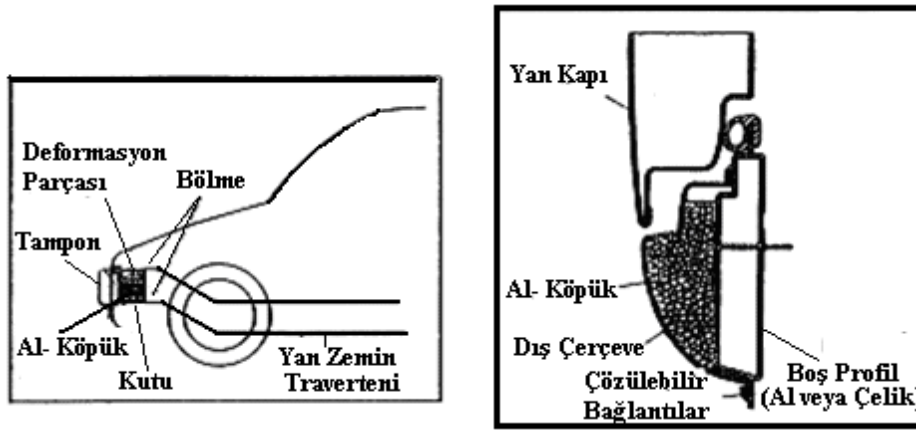
1.1 Otomotiv Endüstrisi ve Metalik Köpükler

Alüminyum, magnezyum, titanyum gibi hafif konstrüksiyon metalleri, otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu için gerekli hafif malzeme seçiminde önemli potansiyel kullanım alanına sahiptirler. Otomotiv üreticileri bir yandan ekolojik dengenin korunmasını düşünürken, diğer yandan, bu amaçla ürettikleri malzemelerin ekonomik olmaları gereklidir. Otomotiv endüstrisinde güvenlikten ödün vermeden, konfordan vazgeçmeden, büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif fakat mukavemeti yüksek malzemelerin geliştirilmesi, otomobil üreticilerinin önemli problemi olmuştur (Zeytin 2000).

Son zamanlarda otomobillerin güvenilirliği ön plana çıkmıştır. Bazı durumlarda taşıtların ağırlığı önem taşımaktadır. Taşıt ağırlığının düşürülmesi ile yakıt tüketimi azalacaktır. Ayrıca özellikle Avrupa ve Japonya'da küçük otomobiller tercih edilmektedir. Bu küçülme yolcu bölmesindeki alanın daraltılmasını gerektirmeyecek şekilde tasarılanmaktadır. Otomobil parçaları veya diğer yapıların küçültülmesi yolu

ile yolcu rahatlığının korunması ve güvenilirliğin artırılması yoluna gidilmektedir.

Düşük yoğunlukları, düşük yüklerde nispeten yüksek deformasyon enerjisi emme özellikleri, taşıtlar için ağırlığın azaltılması ve dayanımın artırılması nedeniyle kapalı hücreli Alüminyum köpüklere ilgi son yıllarda artmaktadır. Potansiyel uygulama alanları arasında otomobillerde çarpışma esnasında oluşan darbe enerjisini emen yapılarda ve kapı, tampon ve benzeri kısımlarda dolgu maddesi olarak kullanımı bulunmaktadır. Şekil 1.1' de araç üzerinde darbe absorblama için kullanım yerleri görülmektedir.

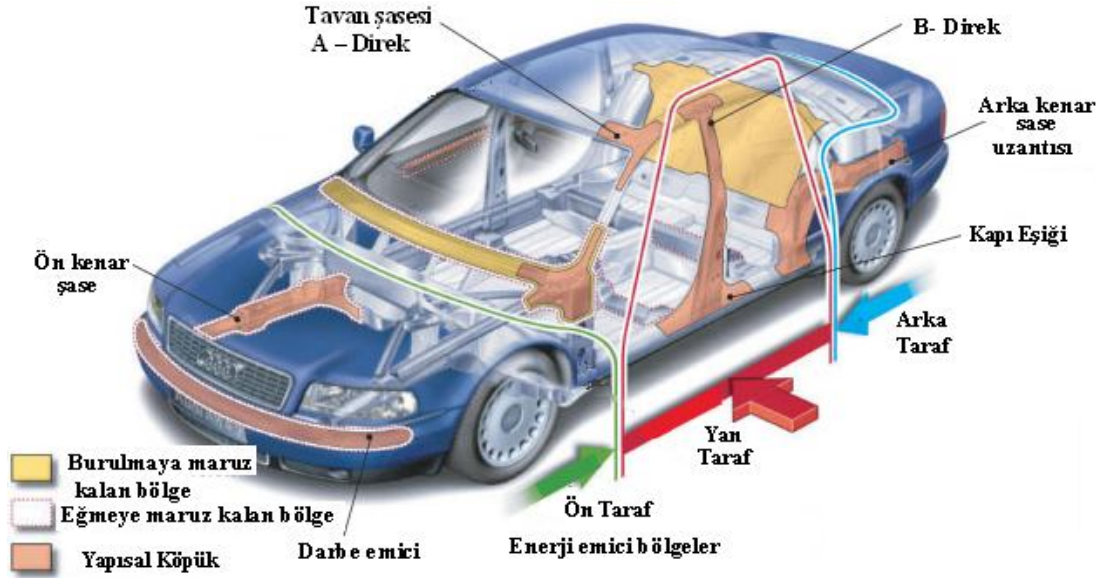


Şekil 1.1. Enerji absorblama için kullanılan alüminyum köpük malzemesi a) ön yüzeyde, b) yan çarpmalara karşı (Zeytin 2000).

Enerji absorbe özelliği ele alındığında, otomobil ve trenlerde çarpışmaya maruz kalabilecek bölgelerdeki maksimum çarpma enerjisi dağıtılarak deformasyonu kontrol etmek mümkün olabilir. Uygulamanın olabilirliği ile çarpışma sırasında ön ve kenar bölgeleri koruma amaçlanır. Şekil 1.2'de metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerleri göstermektedir (Çinici 2004).

Metalik köpükler yalnızca taşıtlarda aşınmaya meyilli olan bölgelerde ya da alüminyum gövdelerin içyapılarında kullanılmaktadır. Yüksek ısıl gerilmelere maruz kalan elemanlarda kompleks metalik köpük malzemeler kullanılırsa, ısıl kalkan görevi gören parçalar gibi, minimum kalınlık 8 mm 'in üzerinde olması gerekir. Bu nedenle (ağırlık sorunu sebebiyle) uygun yapılar değildirler. Akustik etkisine baktığımızda, etkileyici bir miktarda düşük maliyetlere sahip çeşitli organik yalıtım

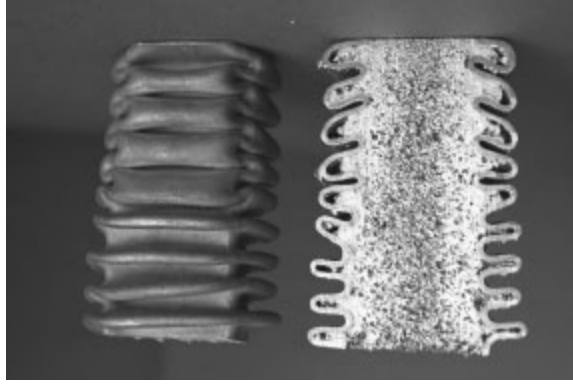
malzemelerle yarışacak durumdadır. Duruma farklı bir açıdan baktığımızda, plastik tabanlı metalik köpük yapılar, otomobil üretiminde sayısız uygulamalarda kullanılabilir. Audi A8 gövdesinde gösterildiği gibi (Şekil 1.2) karoseri üzerinde birçok noktada yapısal köpük parçalar bulunmaktadır (Degischer and Kriszt 2002).



Şekil 1.2. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler (Degischer and Kriszt 2002)

Kendine mahsus özelliklerinden dolayı metalik köpük malzemeler darbe enerjisini absorbe edici elemanlar olarak düşünülebilir. Köpük tipine (STKT ya da eriyik-tabanlı köpükler), alaşıma ve yoğunluğa bağlı olarak enerji absorbe etme davranışı belirli bir aralıkta değiştirilebilir. Bu özellik, metalik köpük yapıları arabalarda, kamyonlarda, trenlerde ve tramvaylarda çarpışma elemanı olarak kullanabileceğimiz bir aday malzeme yapar (Yi et al. 2002, Miller 2003).

Bu özelliklerinden dolayı araba üreticileri yaptıkları testlerle metalik köpük yapıları denemektedirler. Avusturyalı bir araba üreticisi, Steyr Daimler Puch, yaptığı bir testte A-kolonunda kullandığı orijinal absorbe elemanı yerine Şekil 1.3'de görülen Al köpük absorbe elemanı kullanmış ve üst darbe testine tabi tutmuştur (Degischer and Kriszt 2002).

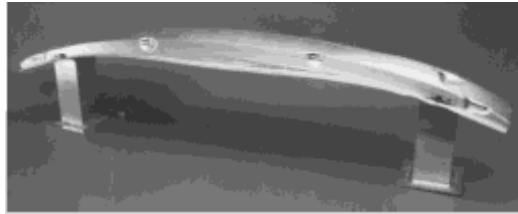


Şekil 1.3. Çeşitli darbe absorbsiyon elemanları (Degischer and Kriszt 2002)

Metalik köpüklerin taşıt üzerindeki bir başka uygulaması ise orta veya ön panellerdir. 1995 yılında Daimler Chrysler tarafından metalik köpük kullanılarak yapılan birkaç prototip orta panel, Şekil 1.4 'de görülmektedir (Degischer and Kriszt 2002).



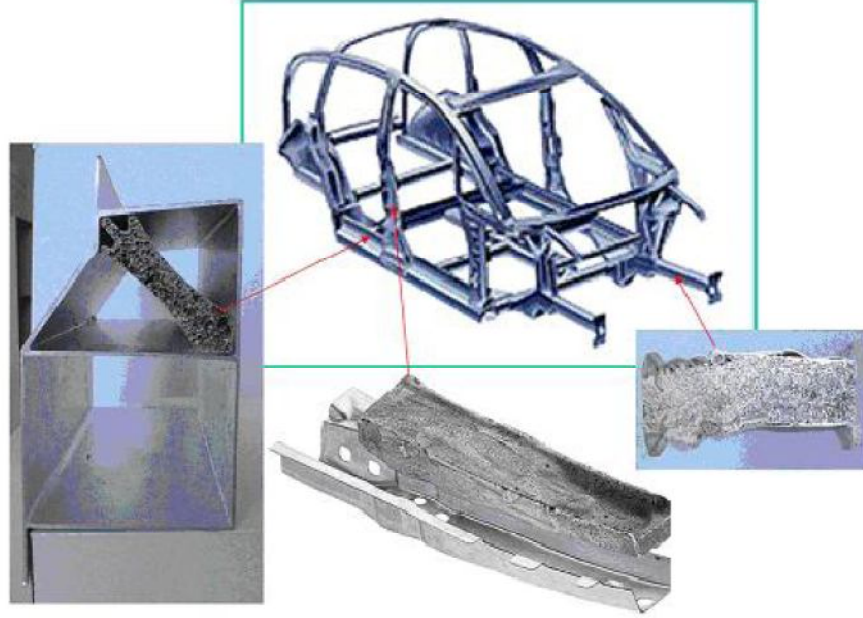
Şekil 1.4. Daimler Chrysler tarafından, alüminyum köpük malzemeden yapılmış birkaç prototip (Degischer and Kriszt 2002)



Şekil 1.5. Alüminyum köpük malzemeden yapılmış darbe emici parça (Degischer and Kriszt 2002)

Metalik köpük malzemelerin yakın gelecekte güncel hayatımıza gireceği hatta çok daha geliştirilerek savunma sanayiinde kullanılacağı kesindir. Yapılan araştırmalar ve

bunların sonucunda elde edilen sonuçlar geleceğe ışık tutmaktadır (Fuganti et al.2000).



Şekil 1.6. Metal köpüklerin otomobillerde kullanıldığı yerlerden bazıları (Çinici 2004)

Metal köpükle doldurulmuş boru profiller burkulma süresince ilginç şekil ve deformasyon özellikleri gösterirler. Ses absorbesi ve ısı yalıtımı otomotiv endüstrisinde önemli özelliklerdir. Bu nedenle metal köpükler ses absorbe ve ısı yalıtımı özelliklerinden dolayı da otomotiv endüstrisinde tercih edilebilirler.

1.2 Amaç ve Kapsam

Teknolojinin gelişmesi diğer sektörlerde olduğu gibi otomotiv sektörünün de hızla ilerlemesini sağlamaktadır. Zaman içinde estetikliğin, ekonominin yanında güvenlik faktörü de taşıt tasarımında önem kazanmıştır. Günümüzde taşıt sayısının artmasından dolayı trafik yoğunlaşmakta ve kazalarının artmasına sebep olmaktadır. Bu kazalar nedeniyle binlerce insan hayatını kaybetmektedir. Taşıtlarda güvenlik sistemleri iki ana gruba ayrılır.

Bunlardan birincisi aktif güvenlik sistemleri diğeri ise pasif güvenlik sistemleridir. Aktif güvenlik sistemleri kazayı önlemeye yönelik olan sistemlerdir. Pasif güvenlik sistemleri

ise kaza meydana gelmesi kaçınılmaz olduğu durumlarda insan hayatını kurtarmak için yapılmış olan güvenlik sistemleridir. Pasif güvenlik sistemleri, bir kaza ile karşılaşılmaması durumunda, kazanın olumsuz sonuçlarını olabildiğince azaltmak amacıyla yapılan bütün yapısal ve tasarım özelliklerini kapsamaktadır. Diğer bir deyişle pasif güvenlik sistemlerinin kaza anında ortaya çıkan darbeleri absorbe ederek sürücü ve yolcuların kazadan en az bir şekilde etkilenmesini sağlamaktır. Otomotiv sektöründe malzeme bilimi önemli bir yer tutmaktadır. Üreticiler, daha hafif ancak daha mukavemetli konstrüksiyonlar elde etmek için maliyeti çok yüksek araştırmalar yapmaktadırlar. İçyapının köpük şeklinde olması darbe yönünü dikkate almadan yüksek darbe enerjisini sönümlemesini ve aynı zamanda hafifliği sağlamaktadır. Ayrıca metalik köpük malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri polimerik köpük malzemelere kıyasla çok üstündür. Yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sıcaklarda yapısını koruması buna örnek olarak verilebilir. Metalik köpük üretiminde genellikle düşük yoğunluklu metaller kullanılmaktadır. Bu metallerin başında alüminyum ve magnezyum bulunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de alüminyumun oldukça fazla yeri vardır.

Tez çalışmasında ilk olarak, köpük malzeme üretiminde kullanılacak olan sarf malzemeler ve cihazlar temin edilmiş ve üç farklı metalik köpük üretimi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin üretim parametreleri incelenerek en uygun metalik köpük üretimi yapılmaya çalışılmıştır. Üretimler sonunda deney numuneleri hazırlanarak mekanik deneyler (basma, darbe) yapılmıştır. Ayrıca numuneler üzerinden makro ve mikro fotoğraflar alınarak yapı üzerinde incelemelerde bulunulmuştur. Deney ve analizler sonunda en uygun üretim metod ve üstün özellikli metalik köpük tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Teknoloji gelişmesine paralel olarak malzeme önemi, otomotiv sektöründe giderek artmaktadır. Üreticiler, daha hafif ve yüksek dayanımlı yapılar elde etmek için maliyeti çok yüksek araştırmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmaların sonucunda metalik köpük (hücreli) malzemeler ön plana çıkmaktadır.

Metalik köpükler düşük yoğunluk, mükemmel mekanik, ısı, elektriksel ve akustik özelliklerine sahip yeni bir malzeme grubudur. Köpük metaller birçok iyi özelliğinden dolayı başta otomotiv endüstrisi olmak üzere uçak, uzay sanayi, demir yolu taşımacılığı gibi birçok alanda kullanılmakta ve daha yaygın kullanılabilmesi için yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır;

Baumeister ve arkadaşları alüminyum köpüklerin taşımacılık sektöründe kullanımı ile ilgili yapmış oldukları çalışmalarında; Alüminyum köpüklerin %90 gözenekli yapıya kadar oluşturulabildiğini, kapalı gözenekli yapıların yoğunluğu $0,4-1\text{g/cm}^3$ olarak kullanıldığını belirlemişlerdir. Alüminyum köpüklerin taşımacılık sektöründe enerji absorbe edici olarak kullanıldığını belirtmektedir (Baumeister *et al.* 1997).

Banhart, Baumeister'e benzer şekilde hafif taşıtlar için alüminyum köpükler isimli bir çalışmada metalik köpüklerin endüstriyel uygulamaları üzerinde araştırma yapmıştır. Köpük üretiminde çeşitli metotların olduğunu belirterek bazı metotlar için viskozitenin özel olarak ayarlanması gerektiğinden bahsetmiştir (Banhart 2005).

Rajendran ve arkadaşları ise köpüklerin darbe emici özellikleri üzerine deneyler yapmışlardır. Deneylerinde AISI 304L çeliğinden imal etmiş oldukları tüplerin içine alüminyum köpük metalleri yerleştirmişlerdir. Daha sonra bu tüplerin darbe enerjisi absorpsiyonunu araştırmışlardır. Köpük metal olarak kapalı hücre tipi metalik köpük kullanmışlardır. Analizlerinde ivme, ezilme miktarı gibi özellikleri incelemişlerdir. Analizleri sonunda çelik tüplerin içersine yerleştirilmiş olan köpük malzemeli numunelerin absorbe ettiği enerji miktarlarının boş numunelere göre oldukça arttığını gözlemlemişlerdir (Rajendran *et al.* 2009).

Güden ve Kavi, Rajendran ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmaya benzer bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında altıgen ve kare şeklinde numune üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin bir kısmının içersine alüminyum köpük içeren birçok tüp yerleştirmişler ve numuneleri statik eksenel yüke tabi tutmuşlardır. Boş ve köpük dolu malzemelerin spesifik enerji absorbe etme özelliklerini araştırmışlar ve analizler sonucunda içersinde köpük olan tüpler boş olanlara göre daha fazla enerji absorbe ettiğini tespit etmişlerdir (Güden and Kavi 2006).

Güden ve arkadaşları yapmış oldukları başka bir çalışmada alüminyumdan imal edilmiş kapalı hücre köpük metali ile E-camından kumaş dokuma şeklinde imal edilmiş polyester ile kompozit tüpler imal etmişlerdir. Daha sonra ürettikleri numuneleri statik basma testine tabi tutmuşlardır. Basma sonunda alüminyum köpük içeren numuneler daha fazla basma yük değeri elde etmişlerdir (Güden vd. 2007).

Metalik köpüklerin darbe emici özellikleri ile bilgisayar destekli analizleri de yapılmaktadır. Zhu ve arkadaşları kare metalik sandviç paneller üzerine darbe (impact) analizleri üzerine nümerik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Nümerik analizlerinde LS-DYNA yazılım kullanmışlardır. Sonuçlar iki aşamada incelemiş olup, bunlardan birincisi deformasyon-hasar modelleri üzerine ikincisi panel üzerinde meydana gelen desenler üzerinedir. Deneyler sonucunda nümerik ve deneysel çalışmalarda benzer sonuçlara varmışlardır (Zhu *et al.* 2009).

Kanahashi ve arkadaşları ise metalik köpük üretiminde farklı bir metal olarak magnezyum alaşımlarından AZ 91 kullanarak metalik köpük üretimi yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarında çarpışmalarda darbe emici olarak kullanılmak üzere AZ 91 magnezyumdan metalik köpük imal etmişler ve mikro yapısını incelemişlerdir. Çalışmalarında açık hücreli, $0.03\text{--}0.06\text{ g/cm}^3$ yoğunluğunda metalik köpük imal etmişler. Analizler sonucunda köpük malzemelerin enerji absorbe etme özelliklerinin metalik köpüklerin mikro yapısının modifikasyonu sayesinde kontrol edilebileceğinin mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Kanahashi *et al.* 2001).

Onck ve arkadaşları açık ve kapalı hücre alüminyum köpüklerin kırılma davranışlarını incelemişlerdir. Hasar sürecinde açık hücreli köpük metalin daha sünek olduğu, kapalı hücre köpük metalin ise daha kırılğan olduğunu gözlemlemişlerdir. Hasar sürecindeki enerji harcanımının baskın gelmesinin sebebi nikel krom alaşıımının saflığı ile ilgilidir. Kapalı hücre köpüklerindeki kırılğanlıklar plastik deformasyon miktarının limitinin aşılması nedeniyle hücre duvarlarındaki mikro yapıların çökmesi sonucunda meydana geldiğini tespit etmişlerdir (Onck *et al.* 2005)

Metalik köpüklerin üretimi ile de birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında Surace ve arkadaşları gaz enjeksiyonu ile alüminyum köpük üretiminin morfolojik araştırması isimli çalışmalarında gözenekli yapıların çok geniş uygulama alanlarının olduğundan bahsetmişlerdir. Günümüzde köpük teknolojisinin ilerlediği köpük üretiminde katı sıvı veya gaz metotlarının kullanıldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında gaz enjeksiyon yöntemi ile metalik köpük üretiminin daha esnek hale getirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında yaklaşık 200mm boyunda farklı şekillerde otomotiv endüstrisi için iyi kalitedeki özelliklerde parçalar üretmişlerdir. (Surace *et al.* 2009).

Özer yapmış olduğu tez çalışmasında Surace ve arkadaşları gaz üfleme yöntemiyle metalik köpük üretim deney düzeneği tasarlamış ve SiC takviyeli kapalı hücreli alüminyum köpük metal üretmiştir. Gaz olarak argon gazı kullanmıştır. Ortalama gözenek çapı 2,592 mm olarak tespit etmişlerdir. Saf alüminyum ve alüminyum alaşımları düşük oranda katkı parçacıkları (SiC, Al₂O₃) içerdiğinde köpük oluşumu elde edilememiştir. Artan sıcaklıkla köpük kararlılığının azaldığını tespit etmişler, daha düşük sıcaklıklarda yapılan deneyler daha başarılı olmuştur. Ayrıca mukayese amacıyla açık hücreli bir köpük metal üretimi de yapılmıştır. Açık hücrenin elde edilmesindeki sıvı katı dönüşümünün denge koşulları mekanik, kinetik ve termodinamik olarak daha kolay kontrol edilirken, kapalı hücrede elde edilmesinin daha fazla değişkenin kontrol edilmesini gerektiği için üretim zorluklarının aşılması gereken önemli sorunlar içerdiği sonucuna varmışlardır (Özer 2005).

Metalik köpük üretim tekniklerinden Fraunhofer Center – Delaware ile metalik köpük üretimi yapmışlardır. Köpük malzemesi olarak 6062 alüminyum alaşımı ve köpürtücü

ajan olarak ta TiH_2 kullanılmıştır. 50x100mm ölçülerinde dikdörtgen kapalı hücre köpük imal etmişlerdir. Hücre büyüklüğü 4–5 mm ve orta bölümler ise 2-3 mm civarındadır. İmal ettikleri köpük metalleri gerilme analizi yapmışlardır analizler sonucunda; Düşük basma gerilmesi uygulandığında bağıl yoğunluğun işlevi düşük veya gerilme duyarlılığı kaybolmuştur. Enerji absorpsiyonunda da benzer sonuçlar görülmektedir. Köpük malzemesinin sıkıştırılması süresindeki deformasyonun metalografik gözlemi süresince genel süreç kademeli bir şekilde hücre sınırları ezilmeler, bükülümeler meydana gelmektedir (Hall *et al.* 2000).

Çinici yapmış olduğu tez çalışmasında toz metalürjisi tekniği ile alüminyum esaslı köpük metal üretmeye çalışmıştır. Çalışmasında köpürtme sıcaklığı, köpürtme süresi, köpürtücü madde miktarının alüminyum köpük üzerine etkilerini incelemişlerdir. Köpürtme süresi ve sıcaklığının artması ile gözenek ebatlarının ve lineer genişlemenin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Gözenek ebatlarının ve lineer genişleme oranının köpürtücü madde miktarına bağlı olarak arttığını gözlemlemişlerdir (Çinici 2004).

Fernandes ve arkadaşları köpürtücü ajan olarak TiH_2 'den farklı bir malzeme olan Kalsiyum karbonat kullanarak metalik köpük üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında köpürtücü ajan olarak ticari dolomit, kalsit ve tortu kullanmışlardır. Karbonat miktarı ve çeşitlerinin; sinterleme sıcaklığının yoğunluğa etkisi, basma dayanımı, mikro yapı ve kristalleşme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonunda %1-%2 karbonat katılan numunelerin, 850 °C sinterleme sıcaklığı homojen ve geniş bir gözenekli yapı elde etmişlerdir. Numunelerin yoğunlukları 0,36-0,41 ve basma dayanımlarını ise 2,40–2,80 MPa olarak ölçmüşlerdir. (Fernandes *et al.* 2009).

Açık gözenekli metalik köpük üretimi üzerine de çok fazla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan olan Marchi ve Mortensen yapmış oldukları çalışmalarında yüksek saflıktaki replika yöntemiyle ürettikleri alüminyum köpüklerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Köpükler hücre oluşturmada 500 µm büyüklüğünde tuz kullanmışlardır. Üretmiş oldukları metalik köpüklerin deformasyon davranışlarının düzenli bir şekilde meydana geldiği görmüşlerdir (Marchi and Mortensen 2001).

Marchi ve Mortensen' in yapmış oldukları çalışmaya ek olarak Sun ve Zhao yapmış oldukları çalışmalarında Al/NaCl tozu içersine Mg tozu katarak SDP metoduyla metalik köpük üretmişlerdir. Çalışmalarındaki termogravimerik analiz ve elektron mikroskobu ile ısıtma ve sinterleme sürecindeki Al/Mg/NaCl değişimleri incelemeyi amaçlamışlardır. Sonuçta sulu alümina içersinde, ısının yükselmesi sürecinde Al parçacıklarının üzerindeki Alüminyum hidratların kademeli olarak çözündüklerini tespit etmişlerdir. Mg oksijenin bir kısmını üzerine alarak alüminyum oksidin azalmasına sebep olmuş ve yapı $MgAl_2O_4$ olarak dönüşmüştür. Bu yöntemle sinterleme sürecinde Alüminyumun daha az oksitlendiği sonucuna varmışlardır (Sun and Zhao 2005).

Ozan ve Çay toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alüminyum metal köpüğünün gözenek konsantrasyonunda üretim parametrelerinin etkileri incelemişlerdir. Köpük üretimi için 60 µm boyutunda alüminyum tozlar ile % 10, 20, 30 ve 40'lık ağırlık oranlarındaki NaCl tozları karıştırılıp 200, 250, 300 MPa basınçlar altında preslenmesiyle üretmişlerdir. Üretimler esnasında tüm numuneler argon gazı ortamında 630°C'de 2,5 saat süreyle sinterlemişlerdir. Bu numunelerde gözenek oluşumunu sağlamak için numuneler 70°C sıcaklıkta su içerisinde bekletilmiş, işlem sonunda NaCl oranı, NaCl boyutu ve basınç gibi üretim parametrelerinin etkileri ile farklı gözenek konsantrasyonları tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, gözenek profilleri değişmeksizin farklı konsantrasyonlarda üretim parametrelerinin etkileri incelemişlerdir (Ozan ve Çay 2006).

Despois ve arkadaşları replika yöntemiyle, gözenek yapısı için 400 µm NaCl tozlarını infiltrasyon yöntemiyle 15% ve 25% arasında değişen yoğunlukta alüminyum köpük üretmişlerdir. İnfiltrasyon basıncının artırıldığında köpük yüzeyinde akışkanın akıcılığından dolayı sızmalar meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Basıncın artması köpüklerin mekanik özellikleri, yani köpük metalin yoğunluğu ile Elastik modülü ve akma gerilmesi artırdığını belirtmişlerdir. (Despois *et al.* 2007)

Jiang ve arkadaşları tuz yerine karbomit (üre) kullanarak toz metalürjisi yöntemi ile açık hücreli metalik köpükleri için yeni metot isimli çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında %50-80 arasında gözenek yapısı elde etmişlerdir. Küresel şekilli gözenekler elde

etmişler, bu gözeneklerin karbaminin çapı ve üretim basıncına bağlı olduğunu belirlemişlerdir (Jiang *et al.* 2005a).

Nakamura ve arkadaşları metalik köpük üretiminde köpürtücü ajan olarak CaCO_3 ve TiH_2 kullanmışlar, gözenek oluşumu ve yoğunluklarını karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda TiH_2 kullanarak üretmiş oldukları numunelerin yoğunlukları yaklaşık $1,8 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$ olarak ölçmüşlerdir. CaCO_3 kullanılan numunede yoğunluğu yaklaşık $1,1 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$ tespit etmişlerdir. Ayrıca ergiyik yöntem ile köpük üretimi için CaCO_3 kullanımını uygun olduğu sonucuna varmışlardır (Nakamura *et al.* 2002).

Nakamura ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmaya benzer bir çalışma yapmış olan Kevorkian çalışmada; köpürtücü ajan tekniği kullanarak metalik köpük üretmeye çalışmış üretimde köpürtücü ajan olarak CaCO_3 kullanmıştır. Üretimlerde köpürtme sıcaklığı olarak 750°C ve fırında bekleme süresi olarak ise 10 dk olarak belirlemiştir. Üretmiş oldukları numunelerin yoğunluk ve basma testlerini yapmışlardır. Deneyler sonunda numunelerin yoğunluk değişimi $0,42-0,55 \text{ g/cm}^3$ arasında olup plastik yıkım gerilimleri ise $5-12 \text{ MPa}$ arasında değişmektedir (Kevorkian 2010).

Bryant ve arkadaşları köpürtücü ajan olarak kullanılan CaCO_3 tozlarının alüminyum içersinde temas halinde olduğunu belirmiş olup köpük oluşumunun stabilitesi için (ergimiş alüminyum içersindeki karbonat tozları sayesinde hücreler düzenli oluşmaktadır) önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Bryan *et al.* 2007).

Haesche ve arkadaşları köpürtücü ajan olarak üç farklı toz kullanmışlardır. Bunlar TiH_2 , CaCO_3 ve $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomite) tir. Ana metal olarak $\text{AlMg}_{4,5}$ ve AlSi_9Cu_3 kullanmışlardır. Üretimlerde 750°C , 800°C , 825°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta köpürtme gerçekleştirmişlerdir. Köpürtme sonunda gözenek oluşumunun en iyi sıcaklık değeri 750°C olarak tespit etmişlerdir (Haesche 2010).

Abdullatef ve Jaber ergitme yöntemi ile metalik köpük üretmişlerdir. Üretimlerde metal olarak Al-12Si alaşımı, köpürtücü ajan kullanarak ise CaCO_3 kullanmışlardır. Köpürtme sıcaklığı olarak 700°C , 750°C ve 800°C sıcaklık değerleri kullanılmış olup fırında

bekleme süresi olarak ise 5-10 ve 15 dk. süre seçmişlerdir. Gözenek oluşumunda optimum sıcaklık değeri olarak 750 °C ve fırında bekleme süresi ise 10 dk. olarak tespit etmişlerdir (Abdullatef ve Jaber 2008).

Tao ve Zhao alüminyum matrisli sentaktik köpük imalatı yapmışlar ve basma testine tabi tutmuşlardır. Köpük üretimini infiltrasyon yöntemi ile gerçekleştirmişler ve köpüğün sünekliğinin önemli ölçüde arttığını, basma dayanımının ise %30 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Enerji absorbe miktarının ise 50 KJ/kg olarak ölçmüşlerdir (Tao and Zhao 2009).

Orbulov ve Ginsztler metal matrisli sentaktik köpüklerin basma davranışları üzerine bir araştırma yapmışlardır. Araştırmalarında sekiz farklı metal matris kullanmışlardır. Basma testini etkileyen üretim faktörleri olarak; metal matrisin kimyasal kompozisyonu, mikro hücrelerin büyüklüğü, ısıli işlem ve sıkıştırma basıncı gibi konular olduğunu bahsetmişlerdir. İnce duvar küçük mikro hücrelerin daha kusursuz olması nedeniyle yüksek basma dayanımı ve daha iyi mekanik stabilite sağlanmışır (Orbulov ve Ginsztler 2012) .

Mondal ve arkadaşları boşluk tutucu olarak cenosphere kullanmışlar ve karıştırma döküm tekniği ile alüminyum sentaktik köpük üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretimde cenosphere %30-50 oranında katmışlardır. Üretim sonundaki numunelerin yoğunluklarını 1,5-1,9 g/cm³ olarak ölçmüşlerdir. Ürettikleri numuneler üzerinde mikroselik gerilim-deformasyon eğrileri için basma testleri yapmışlardır. Testler sonucunda numunelerin yüksek mukavemetli alüminyum köpükler gibi davranış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Numune yoğunluğunun ise kullanılan boşluk tutucu malzemenin miktarı ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmışlardır (Mondal et al 2009).

Benzer bir çalışmayı ise Dou ve arkadaşları yapmışlardır. Boşluk tutucu malzeme olarak cenosphere, metal malzeme olarak ise saf alüminyum kullanmışlardır. Ürettikleri numunelerin deformasyon gerilim eğrilerini çıkartmışlar ve enerji absorbe kapasitelerini araştırmışlardır. Deneyler sonunda 65–120 MPa arasında plastik deformasyon gerilim

değeri tespit etmişlerdir. Enerji absorbe kapasitesinin ise %50–70 oranında arttığı sonucuna varmışlardır (Dou *et al* 2007).

Palmer ve arkadaşları 45-270 mikron boyutlarında içi boş seramik kürecikler kullanarak alüminyum matrisli sentaktik köpüklerin üretimi için basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanmışlardır (Palmer *et al.* 2007).

Zhang ve Zhao 20-500 mikron boyutunda alümina silikat seramik kürecikler ile basınçlı infiltrasyon yöntemi kullanarak alüminyum matrisli sentaktik köpüklerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir (Zhang and Zhao 2008).

Alüminyum köpüklerin farklı özelliklerinden ses absorbe edebilmesi üzerine Csilla ve arkadaşları bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının temel amacı olarak metalik köpüklerin gerilim altında akustik emisyonu isimli çalışmalarında replika yöntemiyle alüminyum köpük üretmişlerdir. Üretmiş oldukları numuneler üzerinde farklı gözenek boyutları, farklı hücre duvarlarının gerilimi esnasında akustik emisyon tepkisi deformasyon süreçlerini değerlendirmişlerdir. 1.5 mm civarı gözenek boyutundaki köpükler için hücre duvar malzemenin etkisi önemliyken 3.5 mm civarı gözenek boyutlu köpükler için hücre duvarı malzemesi önemli olmadığı sonucuna varmışlardır. Çünkü 3,5 mm civarı gözenek boyutlu köpüklerin deformasyonunun yapı tarafından kontrol edilebildiğini ifade etmişlerdir (Csilla *et al.* 2007).

3. METALİK KÖPÜKLER

3.1. Metalik Köpüklerin Tarihsel Gelişimi

Köpükler ve diğer yüksek gözenekliliğe sahip hücreli malzemeler yüksek mekanik enerji emebilme kapasitesi, yüksek rijitlik ve çok düşük özgül ağırlık gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimine sahip oldukları için doğa tarafından da yapısal ve işlevsel amaçlarla sıkça kullanılmaktadır (ör. kemik ve ağaç yapıları). İnsanoğlu da yüzyıllardır doğal gözenekli malzemeleri yapısal amaçlarla kullanmaktadır. Mısır piramitleri en az 5000 yıllık ahşap malzeme içermektedir. Doğal mantarlar Roma devrinden beri (M.Ö. 27) şarap şişelerinde tıpa olarak kullanılmaktadır (Gibson and Ashby 1997, Banhart 2001).

Metalik köpüklerle ilgili çalışmayı ilk defa Sosnick, 1948 yılında alüminyum içerisinde cıva buharlaştırarak yapmış daha sonra Elliot aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir. Benjamin Sosnick ilk olarak, bir Al ve Hg karışımını yüksek basınç altında kapalı bir kap içerisinde ergitmiştir. Basıncın kaldırılmasıyla, Al'un ergitme sıcaklığı Hg'nin buharlaşmasına yol açmış ve bir köpük biçimi meydana gelmiştir (Yang and Nakae 2000, Banhart and Weaire 2002)

Açık hücreli metalik köpük üretimleri 1950'li yıllarda başlamıştır. Sıkıştırılmış olan kaya tuzları içersine eritilmiş alüminyum dökülmüş ve daha sonra bu tuzlar çözündürme işleminden geçirilerek açık hücreli gözenekler oluşturulmuştur.

1959'da tamamen farklı bir yöntem keşfedilmiştir. United Aircraft Corporation tarafından patent alınan yöntemde, toz haldeki metal yine toz halde bulunan gaz yapıcı madde ile karıştırılarak elde edilen karışım, metalin ergime sıcaklığına ısıtılarak gaz salıcı madde ayrılarak çözündürülmüş ve büyük miktarda gaz salarak köpük yapıyı oluşturmuştur. Bu toz karışımı, soğuk olarak sıkıştırılmış ve ekstürüzyon işleminden geçirilmiştir. Daha sonra bu katı yapı metalin ergime sıcaklığına ısıtılmış ve gaz yapıcı madde çözünerek sıvı metale gaz salarak metal köpük yapıyı oluşturmuştur (Özer 2005).

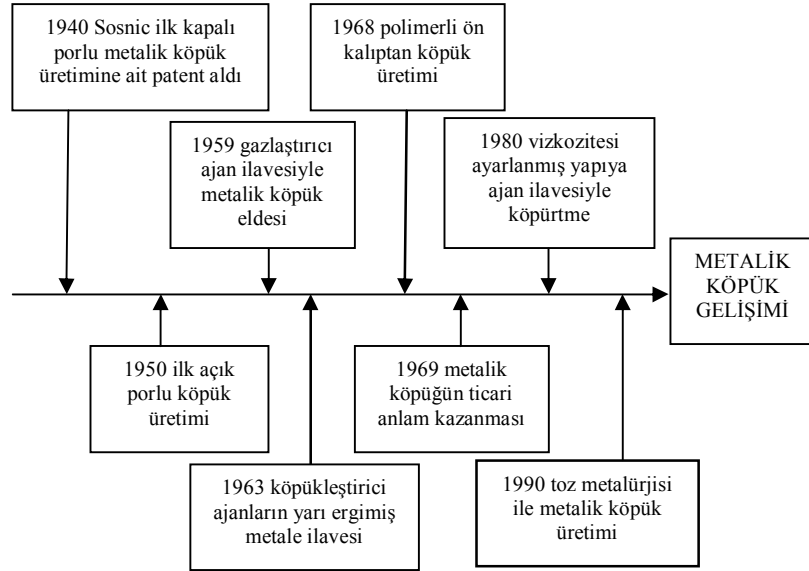
1960'ların ortalarında Hardy ve Peisker'in patentledikleri yöntemde köpürtücü ajanları direkt olarak yarı eriyik haldeki metale eklemişlerdir. Bu yöntem toz temelli üretime göre daha ucuz bir maliyete sahiptir. Yeni bir gelişme olarak, viskoziteyi arttırmak ve yapıdaki dağılan gazı yakalamak için eriyik alüminyuma silisli bir malzeme (vermikülit) ilave edilmiştir. Yine yeni bir fikir olarak köpürtücü ajan olarak metal hidritler kullanmak yerine hidrat killeri kullanılmıştır (Özer 2005).

Patentlerin büyük bir bölümü 1950'ler ile 1970'lerin sonlarına kadar verilmiş ve köpürtme işlemlerinin çeşitli türevleri önerilmiştir. 1980'lerin sonlarında başlayan bilimsel faaliyetlerdeki ikinci bir dalgalanma eski tekniklerin bazılarının yeniden kurulmasına ve daha yüksek araştırma faaliyetlerine yol açmıştır (Uçak 2003).

1980 ve 1990 yıllarında sıvı ve katı hal işlem metotlarının büyük bir bölümü, hafif yapılar, ses emilimi, yapı içindeki darbe enerji absorpsiyonu ve taşıma endüstrisi gibi ticari uygulamalarda kullanılan Al köpüklerin üretilmesi geliştirilmiştir (Davies and Zhen 1983, Gibson and Ashby 1997, Baumgartner *et al.* 2000).

1948 yılında ilk patenti alınan köpük malzeme üretim zorluğu, pahalı olması ve en önemlisi tekrar edilebilirlik özelliğinin zayıf olması nedeniyle 1990'lı yılların başına dek unutulmuş ya da ihmal edilmiştir. Bu nedenle metalik köpükler önemli bir ivme kazandığında, üretimi ve performansı üzerine yapılan araştırmalar 1990'lara kadar düşük bir seviyede kalmıştır. Şekil 3.1'de metalik köpüklerin tarihsel gelişimiyle ilgili bir diyagram verilmiştir (Degischer and Kristz 2002, İnt.Kyn.1).

Alüminyum köpük üretiminde 60-70 yıl önceleri başlanmış olup köpük üretimi ile ilgili birçok metot denenmiştir. Ancak günümüze kadar yoğunluk, homojenlik, hücre boyutu gibi konularda kontrolün zor olması sebebiyle alüminyum köpükler uygulama sahasına pek girememişlerdi. Bugün birçok firma alüminyum köpük kullanımıyla ilgili çalışma yapmakta ve gün geçtikçe köpüklerin kullanım alanları giderek artmaktadır.



Şekil 3.1 Metalik köpüklerin tarihsel gelişimi (İnt.Kyn.2)

Ancak halen çözülmesi gereken önemli bir unsur olan maliyet, alüminyum köpüğün yaygın kullanımını engellemektedir. Alüminyum köpük üretim maliyetinin endüstriyel ölçekteki seri-üretim metotlarıyla düşeceği beklenmektedir (İnt.Kyn.3).

3.2. Metalik Köpük Tanımı

Metalik köpükler, süngerler gibi gözenekli bir yapıya sahiptir. Doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpükle hiçbir ilgisi olmamasına rağmen görünüm ve bazı özelliklerinden dolayı “metalik köpük” olarak adlandırılırlar ve köpükler, tamamen çözülmeyen bir gaz ile bir sıvının dağılımını kapsayan, farklı işlemler ile oluşturulmuş iki faz karışımının sonucudur. Bu işlem emülsiyon işlemine çok benzemektedir. Fakat köpük içerisinde gaz fazının bulunmasından dolayı farklılık gösterir (Çinici 2004, Hernández 2005).

“Metal köpük” veya “metalik köpük” kavramları günümüzde boşluk içeren bütün metal yapılar için kullanılan bir terim haline gelmiştir. Metalik köpük teriminin yanı sıra hücreli metal (cellular metal), gözenekli metal (porous metal), metal sünger (metallic sponge) terimleri köpük tanımlamalarında sıkça kullanılmaktadır. Bu terimler arasındaki temel ayrım gözeneklerin morfolojilerinden oluşmaktadır. Ayırt edilebilen ve kendi içinde düzenli gözeneklere sahip yapılar köpük veya hücreli metal olarak

sınıflandırılırken, diğerleri gözenekli veya sünger olarak nitelendirilebilir. Bu nedenle, tam anlamıyla metalik köpüklerin ne olduğunu anlayabilmemiz için değişik ifadeleri ayırt etmek yararlı olacaktır (İnt. Kyn. 2):

- **Hücreli Metaller:** En genel kullanılan terimdir. Çeşitli gazların metalik gövde içerisinde dağılarak boşluk oluşturduğu yapıyı kapsamaktadır. Metalik faz, gaz fazı içeren kapalı hücrelerden oluşur ve hücreli metaller genellikle %70'den daha fazla boşluk içerir.
- **Gözenekli Metaller:** Metal yapı çok sayıda gözenek tarafından oluşmuştur. Gözenekler genellikle küreseldir ve birbirlerinden yalıtılmış halde bulunurlar. Gözeneklilik yaklaşık %20'den daha düşüktür.
- **(Katı) Köpük Metaller:** Hücreli metallerin özel bir sınıfıdır. Hücreler kapalı, küresel veya çokyüzlü (polihedral) ve her biri birbirinden ince bir filmle ayrılmıştır.
- **Metalik Süngerler:** Hücreli metallerin yapıbilimidir. Genellikle birbirine bağlı gözenekten oluşur.

Bu terimler birbirinden bağımsız değildir. Örneğin köpük metal, gözenekli ve hücreli bir yapıya sahip olmakla beraber sünger metal hücrelere sahip olmak zorunda değildir. Bazen malzemeleri ayırt etmek o kadar kolay değildir (Banhart 2000a, b, Babcsan *et al.* 2003, Banhart 2003, İnt. Kyn. 2).

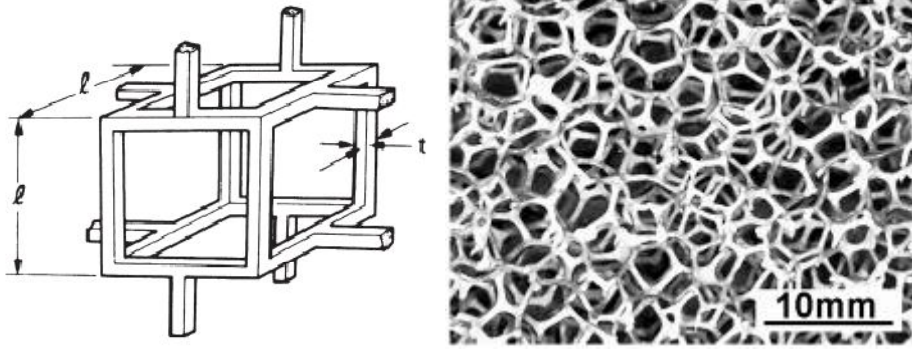
3.3. Metalik Köpük Çeşitleri

Genel olarak köpükler hücre yapılarına göre açık ve kapalı hücreli köpükler olarak sınıflandırılırlar. Her iki yapı biçimi de %(80–95) oranına varan boşluk ve %(5–20) oranında malzemeden oluşurlar (Sertkaya 2008, İnt. Kayn. 3).

3.3.1. Açık Hücreli Metalik Köpükler

Açık hücreli metalik köpüklerde, hücrenin yalnızca kenarları bulunur ve hücre duvarları tamamen kapatmazlar yani yapıdaki boşluklar birbirleri ile bağlantılıdır. Şekil 3.2'de

temsili bir açık hücreli metalik köpüğün hücresi ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM mikrografi görülmektedir (Dumais 2009, İnt. Kyn.2).

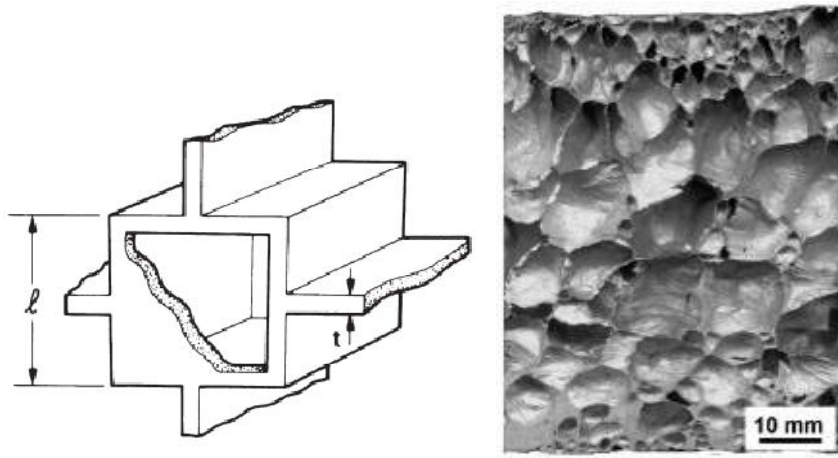


Şekil 3.2 Temsili bir açık hücre ve DOUCCEL yöntemiyle üretilmiş açık hücreli bir alüminyum köpüğün SEM mikrografi (Ashby and Jones 1998, Amjad 2001)

Filtreler, katalizör destekler, ısı değıştirciler, akışkan sönümlleme kanalları (şok dalga yayılım cihazlarının farklı tipleri dâhil), biyomedikal protezler, içten soğutmalı şekil hafızalı aktüatörler, hava pilleri ve koruyucu geçirgen zar süzgeçleri ve kılıflarını kapsayan güncel uygulamalar ve önerilenler açık hücreli metalik köpüklerle üretilmesi uygundur. Bu tarz fonksiyonel bileşenler yalnızca yapısal uygulamalardan daha yüksek değerleri birleştirme eğilimindedir ki bu, açık hücreli metal üretimi genel olarak daha yüksek maliyetler açısından uygundur. Hücre yapısının ölçüsü, çoğunlukla fonksiyonel karakteristikler için önemlidir. Bu elbette, filtreler ve sıvı akışını sınırlama cihazları için temel bir özellik olacaktır. Fakat, protez implantlar içinde kemiğin gelişimi nispeten kaba gözenekler gerektirebilir. Bu yüzden ince bir hücre boyutu, sıklıkla ısı değıştirciler vb. (gözeneklerin tıkanması tehlikesi ile sınırlamalar getirilmesi doğaldır) için tercih edilebilir. Ancak, bu özellikler sıklıkla minimum bir dayanım ve süneklik gerektirmesi ile birlikte ihtiyaç duyulacaktır. Böylece nispeten ince, üniform hücre yapısı ve hatasız hücre mikro yapılar, bu açıdan daha faydalı olabilir. Çeşitli alaşım sistemleri, işlem optimizasyon konularının daha iyi anlaşılması için daha gerekli hale getirdiğinden dolayı metaller, açık hücreli metallerin uygulamaları için geniş bir yelpazede araştırılmaktadır (Degischer and Kristz 2002).

3.3.2. Kapalı Hücre Metalik Köpükler

Kapalı hücreli metalik köpüklerde, hücre duvarları mevcuttur ve boşluklar köpük duvarları ile tamamen kapatılmış olup malzeme içinde baloncuklar şeklinde yer alırlar. Kapalı hücreli metalik köpükler yaklaşık olarak 1990'dan beri geliştirilmektedir. Hücre boyutu veya gözeneklerin boyutu genellikle 1–8 mm arasındadır. Şekil 3.3'te temsili bir kapalı hücreli metalik köpüğün hücresi ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-RAY tomografisi görülmektedir (Ergönenç 2008, Dumais 2009, İnt. Kyn. 2).



Şekil 3.3 Temsili bir kapalı hücre ve kapalı hücreli bir alüminyum köpüğün X-Ray tomografisi (Ashby 1998, Amjad 2001)

Kapalı hücreli köpüklerin üretilme eğiliminde, döküm malzemelerin ucuz üretildiği için (genellikle alüminyum), birçok yapısal uygulamada bunlar üzerine yoğunlaşmıştır. Farklı bileşenler kullanılarak üretilmiş olan kapalı hücreli köpükler, düşük yükler (sıkıştırma) altında enerjiyi kademeli olarak absorbe etmek için tasarlanmıştır. Prensipite, katı metal ile karşılaştırıldığında, büyük plastik gerinimler, enerjinin önemli derecede emilimi ile akordiyona benzer deformasyon yoluyla gerçekleşmektedir. Ancak bu gibi bileşenlerin performansı, örneğin eğme anında eğer, herhangi bir kopma meydana gelirse bileşenler kolayca kırılma eğilimi gösterir. Bu kötü çekme, süneklik göstermiş ve kesme bantları içinde meydana gelen erken hasar ile şimdiye kadar genellikle hayal kırıklığı yaratmıştır. Günümüzde hücre boyutu, alt mm seviyelerine tercihen üniform ve ince tutulabildiğinde problemler önemli derecede azalmış olduğu belirlenmiş ve böylece, ürün hacmi içindeki malzeme gibi toplu olarak bu tür malzeme

retme yeteneğine sahip işlem tekniklerinin geliştirilmesini güçlü bir şekilde teşvik etmiştir. Ayrıca, bu köpüklerde hücre duvarları içersinde, büyük seramik parçacıklar ve ince oksit filmler gibi ağır gevrekleştirici bileşenler içerdiği görülmektedir. Bu tür bileşenler ergitme yönteminde viskoziteyi arttırmak amacıyla işlem esnasında bilerek katılmakta ve böylece hücrenin bozulmasını engellenmektedir. Son zamanlardaki çalışmalar, bu tür bileşenlerin köpüğün mekaniksel özellikleri üzerinde son derece zararlı etkiye sahip olduklarını ve bunun için mekanizmaların sorumlu olduğu özetlenerek doğrulanmıştır. Hem işlem yöntemlerinin geliştirilmesinde ve hem de bu etkilerin daha detaylı anlaşılmasında bu bileşenlerin ortadan kaldırılması veya uygun bir şekilde değiştirilmesi için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. Kapalı hücreli köpükler aynı zamanda uygulamanın diğer türleri için örneğin termal bariyerler gibi önemli bir yere sahiptir. Bunun için sıklıkla seramik malzemeler tercih edilecektir (Degischer 2002).

3.4. Metalik Köpüklerin zellikleri

Düşük yoğunluklu köpüksü metaller iki yönden mühendislik uygulamaları için önemlidir: Birinci olarak göreceli olarak yüksek elastiklik modülü ve akma dayanımları sayesinde, dış yüzeyleri hacimli metalle kaplanmış oldukça hafif yapılar retilabilmektedir. Diğer uygulamaları ise sabit basma gerilimi altında gösterdikleri yüksek yığılma özelliklerinden dolayı var olan yüksek enerji emme kapasiteleri, çarpışma ve darbelerde güvenilirlikle kullanımlarına olanak sağlamaktadır (Bor et al. 2010).

Metalik köpük yapılar, polimer esaslı olanlarına kıyasla daha katı bir yapıya sahip; yüksek sıcaklıklarda i yapısını daha iyi koruyabilen (stabil), ısılı mukavemeti yüksek olan ve toksin etkili gaz oluşturmayan yapılardır. Bunlar tamamen geri çevrilebilen malzemelerdir ve çevreye herhangi bir zarar vermezler. En önemli avantajları ise ağırlıklarının düşük olmasıdır. Bunun yanı sıra darbe ve titreşim snmleyebilmeleri, elektromanyetik kalkan özelliği göstermeleri olumlu özellikleridir. nemli termal özellikleri; sırasıyla ergime noktaları, özgül ısıları, ısılı genleşme katsayıları, ısılı iletimi ve yüzey geçirgenliği, ateş ve ısılı şok dayanımlarıdır (Avarisli ve Uguz.2003).

Ergime noktaları aşağı yukarı üretimde kullanılan metal alaşım ile aynıdır. Bununla birlikte malzeme yüzeyi çoğunlukla bir oksit tabakasıyla kaplıdır. Bu tabaka sayesinde ergime noktası oldukça yüksektir. Bu tabaka yüzeydeki gözenek boyutlarını (çaplarını) düşürmesine rağmen gözenek sayısının artmasına sebep olur. Tabakanın kalınlaşması gözenekli yapıyı destekler ve ergime sıcaklığını üst değerlere çeker. Eğer malzeme yeterli bir zaman süresince havada ya da bir oksit banyosu içerisinde ısıtılırsa, tabaka daha fazla kalınlaşır ve daha stabil bir hal alır (Avarisli ve Uguz.2003).

Özgül ısıları önemli ölçüde düşüktür. Bu özellikleri, düşük ısıl kapasitenin istendiği uygulamalarda en önemli malzeme olmalarını sağlar. Isıtma ve soğutma sistemleri buna iyi birer örnektirler. Isıl şok dayanımları normal bir içyapıya sahip malzemeye kıyasla yüksek, ısı iletimi ise ondan daha azdır (Avarisli ve Uguz.2003).

Metal köpüklerin mekanik özellikleri hücre çeşidine, şekline, boyutuna, homojenliğe, yüzey alanı ve nispi yoğunluğa ve bilhassa orantılı olarak yoğunluğa bağlıdır. Yoğunluk ile mekanik ve fiziksel özellikler arasında oldukça yakın bir ilişki vardır. Bu bağımlılık aşağıdaki güç yasası (power-law) fonksiyonuna uyar (Simarcık *et al.* 1995).

$$K = K_o (p / p_e)^m \quad (3.1)$$

Burada (K); köpük metalin özelliği, (p) ise yoğunluğudur. (K_o) ve (p_e), yığinsal (bulk) alüminyum alaşımıyla ilgili özelliklerdir. Katsayı (m), genellikle 1,5-1,7 arasında bulunur (Simarcık *et al.* 1995).

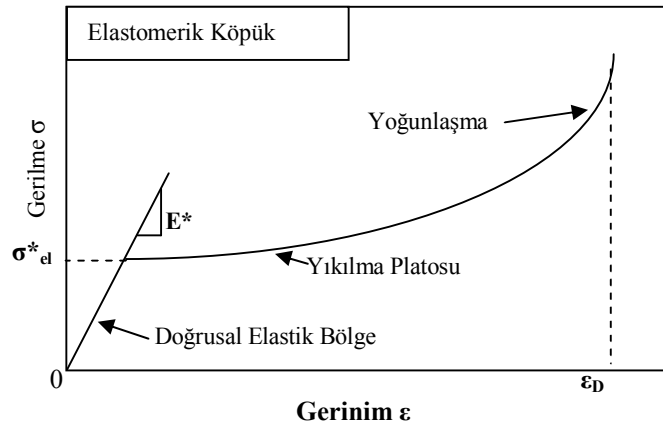
Metal köpükler üç düzeyde karakterize edilebilir. Birinci düzeyde, gözeneklilik niteliği tamamen göz ardı edilerek, yığinsal bir mühendislik malzemesi olarak düşünülebilirler. İlgilenilen malzeme özellikleri, işleme sertleşmesi ve plastik yıkılma altındaki köpüklerin davranışları kadar iyi, rijitlik, dayanıklılık, sertlik ve yoğunluktur. Bu parametrelerin verilen köpük çeşidi için tekrarlanabilir olması önemlidir (Yıldırım 2010).

İkinci düzeyde, metal köpükler hücrelerin topluluğu olarak görülebilirler. İlgilenilen özellikler; tipik bir örnek içerisinde hücre boyut aralığı ve dağılımını, hücre şeklini,

hangi hücrelerin birbirleriyle düzenli bağlantı halinde olduğunu, kalınlığı, uzunluğu, düzenli biçimde olmasını, hücre yüzeylerinin kesitsel profilini içerir. Köpüklerin mekanik özelliklerine en uygun hale getirmeye, hücre yapısının bu görünüşü ve yoğun malzeme özellikleri arasındaki ilişkiyi keşfetmeye yönelik birçok yeni çalışma bulunmaktadır (Yıldırım 2010).

Üçüncü düzeyde; köpük oluşturan metalin mikro yapısı önemli olmakla birlikte, fazların dağılımı da önemli olabilir. Metal köpük üretimi, ayrıca mekanik performansı etkileyebilecek, katkı veya kararlaştırıcı ya da yüzey aktif madde rolü oynayan çok iyi ayrılmış katı fazlar oluşturulmasını gerektirebilir. Mikro yapı ile yığın özellikleri arasındaki ilişki nispeten daha az bilinmektedir (Yıldırım 2010).

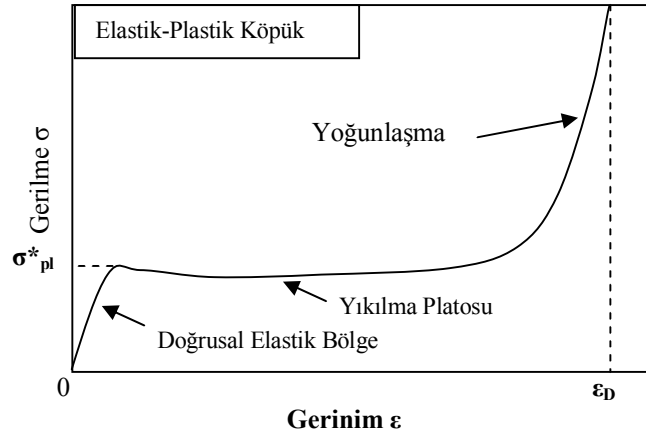
Mekanik davranışlarına göre metalik köpükler; elastomerik, elastik-plastik ve elastik kırılğan olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Şekil 3.4). Metalik köpükler için aşağıda gösterilen gerilim-gerinim eğrileri uygulanan yükün şekline göre (basma, çekme vb.) değişkenlik göstermekte ve değişik mekanizmalar işlemektedir (Bor et al. 2007). Metalik köpükler çekme gerilmesi altında kırılğan davrandığından bu malzemeler mekanik olarak basma kuvvetlerinin olduğu alanlarda kullanılmaktadırlar (Tunçer 2006).



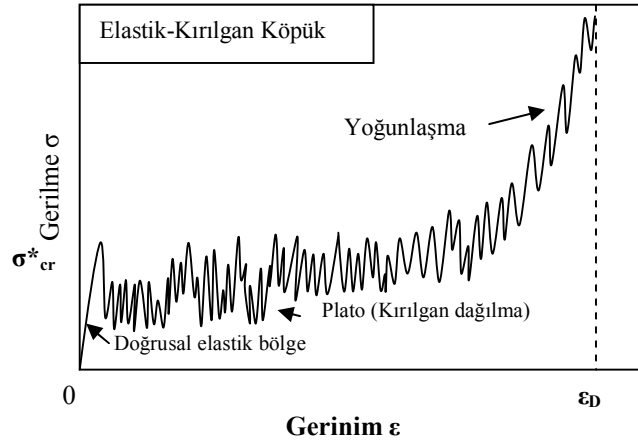
Şekil 3.4 Elastomerik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği (Bor *et al.* 2007).

Bütün köpükler düşük gerinim (yığılma) değerlerinde "doğrusal elastik" davranış gösterirler. Bu bölgedeki eğim elastiklik modülünü (E^*) verir. Artan gerinimle, gerilme-gerinim grafiğinde uzun bir "yıkılma platosu" gözlenir ve bu bölgeyi sabit

gerinimde gerilmenin oldukça dik şekilde arttığı "yoğunlaşma" bölgesi izler (Şekil 3.5) (Tunçer 2006).



Şekil 3.5 Elastik-plastik köpüklerin tipik basma gerilme-gerinim grafiği (Bor *et al.* 2007).



Şekil 3.6 Elastik-kırılgan köpüklerin tipik gerilme-gerinim grafiği (Bor *et al.* 2007).

Lineer elastik bölgede deformasyon, hücre duvarlarının bükülmesi veya genişlemesiyle kontrol edilmektedir. Bu bölge, birkaç deformasyon mekanizmasından oluşan (elastik bükülme, gevrek kırılma veya deformasyonun yoğunlaşması) çökme bölgesiyle sona ermektedir. Bu bölgede bir alandaki hücrelerin çökmesiyle oluşan yerel deformasyon, çökmeyen bölgelere doğru ilerleyerek devam etmektedir. Deformasyonun belirli bir bölgede yoğunlaşması ve deforme olmayan bölgelere doğru ilerlemesi sebebiyle bu bölgedeki gerilmelerde düşme ve yükselme gözlenmektedir. Çökme bölgesi sabit veya birim şekil değişim miktarı ile artan bir plato gerilmesinde gerçekleşmektedir. Kritik bir birim şekil değişim miktarından sonra hücre duvarlarının tamamen çökmesi ile

yoğunlaşma bölgesi başlamaktadır. Bu bölgede gerilme artarak yoğun alüminyum (Al) metalinin gerilmesine ulaşmaktadır (Yıldırım 2010).

Alüminyum köpüklerin basma altındaki davranışları; yoğunluğa, hücre geometrisine ve yapıldıkları metalin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir.

Çökme veya plato gerilmesi yoğunluğun artması ile yükselmektedir. Benzer şekilde yapıldıkları metalin akma gerilmesinin artmasıyla köpükteki gerilmelerin yükselmesi beklenmektedir (Yılmaz *et al.* 2001).

Kapalı hücreli köpükler açık hücreli olanlara oranla daha yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahiptir. Açık gözenekli köpüklerden farklı olarak basma kuvveti karşısında deformasyon mekanizmasında hücre duvarının esnemesi ve büzülmesi de önemli bir rol oynadığından, bu tip gözenek yapısına sahip köpüklerde hücre duvarları yapıyı rijitleştirir. Hücre duvarları tarafından izole edilmiş gözeneklerin içini kaplayan gaz, basma esnasında hücre duvarlarının hareketi sebebiyle sıkıştığından basıncı artırır. Bu basınç artışı elastiklik modülü hesaplamalarında oldukça önemli rol oynar (Tunçer 2006).

3.4.1. Elastik Modül

Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri, bir dizi modül ile tanımlanan lineer elastik davranıştır. İzotropik malzemelerin lineer elastik karşılıklarını karakterize etmek için iki modüle gerek vardır. Bunlar; Young's modülü E ve kesme modülü G 'dir. Bazı köpükler üretim işlemlerinden dolayı izotropik değildir. Bu nedenle lineer elastik davranışı belirlemek için ikiden daha fazla modüle ihtiyaç vardır (Degischer and Kristz 2002).

İzotropik durumda ve bazı kapalı hücreli metalik köpüklerin daha az veya daha fazla izotropik olması nedeniyle Formül 3.2'de bulunan Elastik modülü (E), kesme modülü (G), kütle modülü (K) ve elastik Poisson oranı (ν) arasındaki ilişki iyi bilinmelidir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, K = \frac{E}{3(1-\nu)} \quad (3.2)$$

Yapının, hücresel malzeme veya köpük olması durumunda “modül” ifadesinin kullanılması genelde uygun değildir. Çünkü köpük, iskelete benzer bir yapıdır ve “sertlik” kullanılmalıdır. Ancak, bir süreklilik olarak malzemenin yeni bir sınıfı şu an olağan bir şekilde dikkate alınmalıdır. Bundan dolayı genel malzeme özellikleri onları karakterize etmek için kullanılır. Hücresel bir yapının Young’s modülü sabit bir malzeme değildir ve esas olarak hücresel metalin mimarisine bağlı olduğu için dikkat edilmesi gerekir (Degischer and Kristz 2002).

Metalik köpüklerdeki en önemli özellik göreceli yoğunluktur (ρ^*/ρ_s). Hücresel malzemelerin yoğunluğu (ρ^*), duvarlardan meydana gelen hücresel malzemenin yoğunluğu ise (ρ_s)’dir. Çizelge 3.1’de bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları verilmiştir (Dumais 2009).

Çizelge 3.1. Bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları (Dumais 2009)

Hücresel Malzeme	ρ^*/ρ_s
Ultra düşük yoğunluklu köpükler	0,001
Polimerik köpükler	0,05-0,2
Mantar	0,14
Yumuşak ağaçlar	0,15-0,4
Gözenekli katılar	> 0,3

Açık hücreli ve kapalı hücreli yapılar arasında önemli derecede farklılıklar vardır. Açık hücreli köpükler, bağlanmış sinir ağları tarafından temsil edilir. Ana deformasyon mekanizması, nispeten daha yüksek köpük yoğunluklarında ($p>0,1$) hücre duvarlarının eğilmesine ek olarak kenarların basılması ve uzamasıdır. Kapalı hücreli köpüklerde hücre duvarları, yapı ile sıkışmış hücre kenarları arasındadır. Hücre kenarlarındaki sıkışma, uzama ve eğilmenin yanı sıra, aynı zamanda hücre duvarlarındaki zar gerilimleri deformasyon mekanizması üzerinde büyük bir rol oynar. Hücre duvarlarında ortaya çıkan daha yüksek sınırlamalar nedeniyle, kapalı hücreli yapılardaki elastik

modü teorik olarak, aynı göreceli yoğunluğa sahip açık hücreli yapılar ile karşılaştırıldığında daha büyüktür (Yıldırım 2010).

Doğrusal bölgedeki elastik davranış mekanizması hücrelerin kapalı veya açık olmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Bor *et al.* 2007). Gibson ve Ashby, basit çubuk modelleri kullanarak, ideal kapalı hücreli köpüklerin elastik modülleri için aşağıdaki denklemi türetmişlerdir.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \rho \quad (3.3)$$

Bu denklemde sırasıyla, E^* ve E_s köpük ve hücre metalinin elastik modülleridir. Nispi yoğunluk (ρ) ise Denklem 3.4' de gösterilmektedir.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.4)$$

Gibson ve Ashby basit bir çubuk modeli kullanarak kapalı hücre metalik köpükler için Denklem 3.5 elde edilir.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (3.5)$$

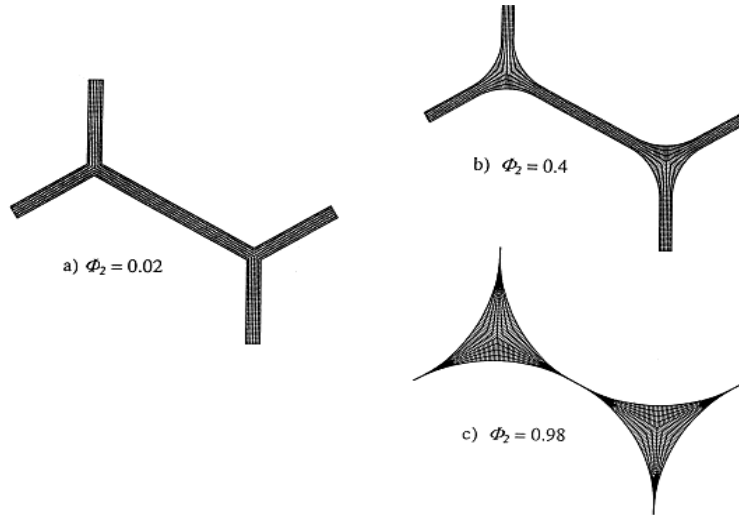
Bu denklemde sırasıyla E^* ve E_s köpük ve hücre metalin elastik modülleridir. C_1 hücre geometrisine bağlı sabit sayıdır. C_1 izotropik kapalı hücre köpükler için 0,33 hücreler ve içi boş kürelerin yüzey merkezli kübik şeklinde paketlenmesi için 0,35 ve bal peteği için 1 olarak hesaplanmıştır. ρ^* ve ρ_s köpüğün ve hücre metalinin yoğunluğudur (Gibson and Ashby 1997, Yılmaz *et al.* 2001).

Ticari üretilen kapalı hücreli Al köpüklerin ve özellikle düşük yoğunluktaki köpüklerin deneysel elastik modülleri Denklem 3.5 'den hesaplanandan oldukça düşüktür. Modül azalması kısmen hücre köşelerinin hücre duvarlarından daha kaim olmasından kaynaklanmaktadır. Bu ise yüzey gerilmelerinin sıvı metali hücre köşelerine doğru çekmesinden dolayı oluşmaktadır (Yılmaz *et al.* 2001). Ashby ve Gibson, köpük metalinin

hücre duvarları ve köşelerinde ki dağılımını da içeren aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1 (1 - \phi^2) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6 verilen Φ değeri, köşelerde bulunan metalin oranına ve şekline göre değişmektedir (Şekil 3.7). C_1 köpük hücrelerin şekline bağlı sabitlerdir.



Şekil 3.7. Sonlu elemanlar metodu sonunda Φ nin değişimi (Simone and Gibson 1998)

Gibson ve arkadaşları yapmış oldukları sonlu elemanlar analizleri sonucunda tetrakaidekahedral hücre yapısına ait bir köpüğün formülasyonlarını Denklem 3.7 de olduğu gibi sadeleştirmişlerdir (Gibson and Ashby 1997).

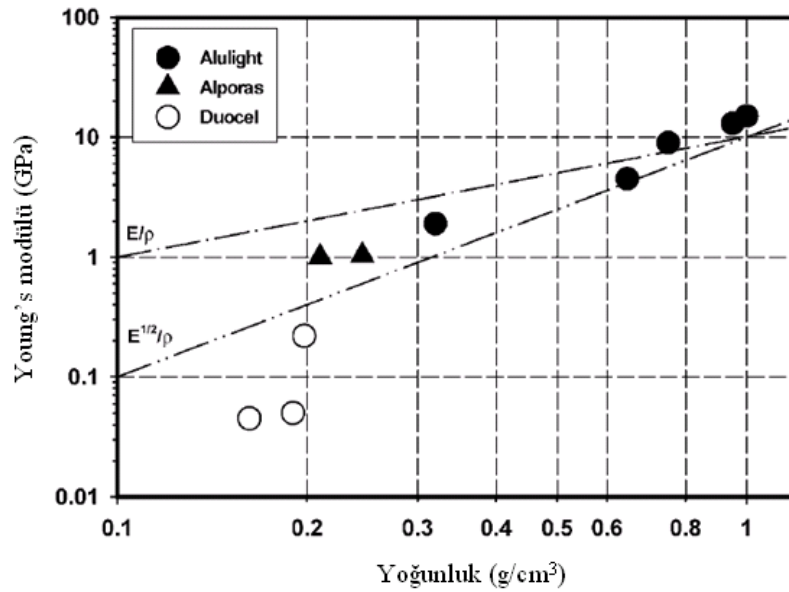
$$\frac{E^*}{E_s} = 0,32 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + 0,32 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.7)$$

Kapalı hücreli köpüklerde, hücre yüzlerinin gerilmesi beraberinde hücre köşelerinin bükülmesini getirir. Bu yüzden elastiklik modülü eşitliği, yüzey gerilmesi ve kenar bükülmesiyle ilgili lineer yoğunluk evresine sahip olur. Bu durumda yukarıdaki denklem genişletilerek aşağıdaki eşitliğe uyarlanabilir. Burada C_p , gözenek duvarlarındaki katı oranını (Alulight için 0,92–0,94) ifade eder (Adreus et al. 1999).

Gözeneklerin eğilmesi, gözenek kenarının delik olması veya homojen olmayan gözenekler alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan unsurlardır. Ayrıca

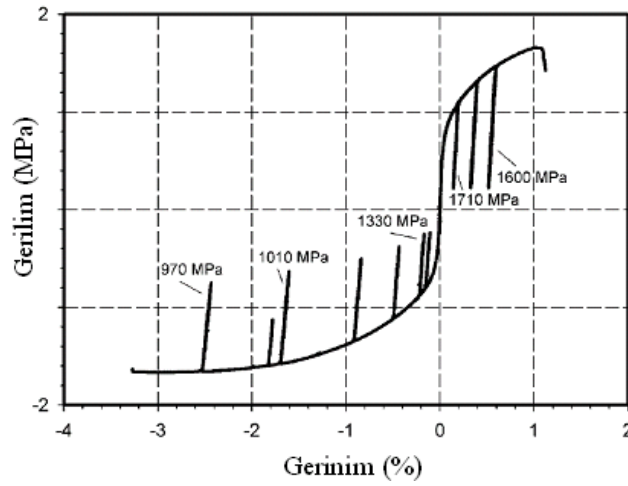
açık gözenekli alüminyum köpüklerin elastik deformasyon özellikleri farklıdır (Çinici 2004)

Köpüklerin nispi yoğunlukları arttıkça ($p^*/p_s > 0.1$) hücre duvarlarının gerilimi veya basılmasından kaynaklanan etki daha belirgin hale gelmektedir. Kapalı hücreli köpüklerde hücre köşeleri eğilmekte ve genişmekte veya daralmaktadır. Diğer yandan hücre yüzlerini oluşturan membranlar gerilmekte ve eksenel hücre duvar elastikiyetinin elastik modülüne etkisini arttırmaktadır (Bor *et al.* 2007).



Şekil 3.8 Açık hücreli ve kapalı hücreli alüminyum köpüklerin farklı tipleri için göreceli köpük yoğunluğu üzerine elastiklik modülünün etkisi

Eğilme, burulma, gerilme ve hücre kenarları ve hücre duvarlarının çatlaması gibi deformasyonlar ile bir köpüğün yapısı değişir. Bu nedenle, Young's modülü gerinim ile değişecektir (Şekil 3.8). Genelde bu deformasyonlar, başlangıçtaki Elastik modülü zorluğunun ölçümünü yaptığı için yumuşak bir köpüğün gerilim-gerinim eğrisi içinde yalnızca çok küçük bir lineer elastikliğe sahiptir. Şekil 3.9'de, bir Alporas köpüğünün ($p_r = 0.1$) basma, gerilim ve yükün kaldırılmasındaki gerilim-gerinim eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.9 Kapalı hücreli bir alüminyum köpük için ölçülmüş yük kaldırma modülü ile gerilim-gerinim ilişkisi

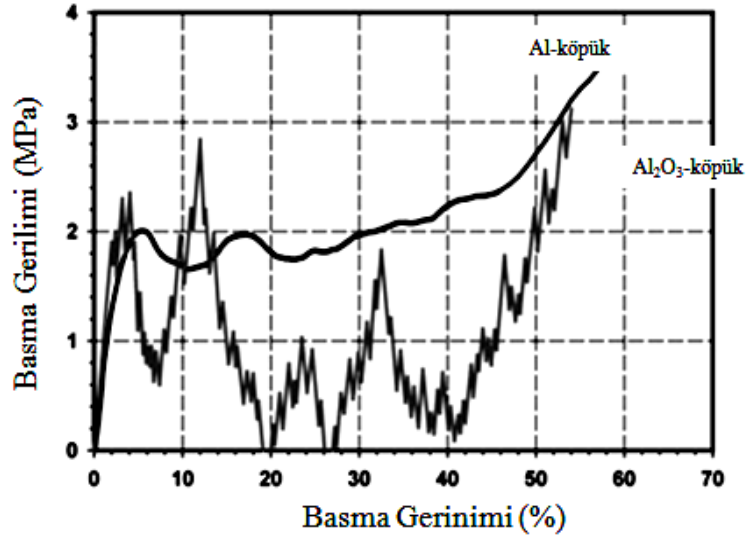
3.4.2. Basma Davranışı

Hücreli metaller basma testinde Şekil 3.10’da gösterildiği gibi bir “plato bölgesi” ile benzersiz bir gerilim-gerinim eğrisi göstermektedir. Buna göre gerilim, gerinin geniş bir bölümü dışında neredeyse eşittir. Bu davranış, enerji absorpsiyon uygulamaları için nispeten sabit düşük gerilme ile deformasyonun büyük bir miktarı absorbe edildiğinden dolayı hücreli metalleri ilginç kılar. Malzemede, hangi köpükten yapıldığına bağlı olarak farklı deformasyon mekanizmaları (elastomerik, kırılma ve sünek davranış) gözlemlenebilir. Metalik köpükler genellikle büyük bir sünek davranış gösterirler.

Plato gerilmesinin köpüğün enerji emme kapasitesine etkisi oldukça fazladır. Mükemmel bir kapalı hücreli köpük yapısında plastik deformasyonun, hücrelere uygulanan basma kuvvetine dik bir yönde hücre duvarlarının genişmesi şeklinde oluşması beklenmektedir.

Bu durumda plato gerilmesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir. Burada C , geometriye bağlı sabit, σ_{ys} ise köpük metalinin akma gerilmesidir (Yılmaz *et al.* 2001).

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C_2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (3.8)$$



Şekil 3.10 Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada gerilim-gerinim eğrisi

Hücre genişlemesinin hücre duvarı bükülmesiyle eş zamanlı oluşması durumunda ise, aşağıdaki denklem plato gerilmesinin hesaplanmasında kullanılabilir. Eğer hücre duvarları uygulanan yük yönünde bükülecek kadar ince ise plato gerilmesi hücre duvarı bükülmesi ile belirlenir. C_2 geometriye bağlı sabittir ve yaklaşık 0,3 olarak alınabilir (Andrews *et al.* 1999).

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = C_2 \left(\phi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_2' (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.9)$$

Gibson ve arkadaşları yapmış oldukları sonlu elemanlar analizleri sonucunda tetrakaidekahedral hücre yapısına ait bir köpüğün formülasyonlarını denklem 3.9'da olduğu gibi sadeleştirmişlerdir (Gibson and Ashby 1997).

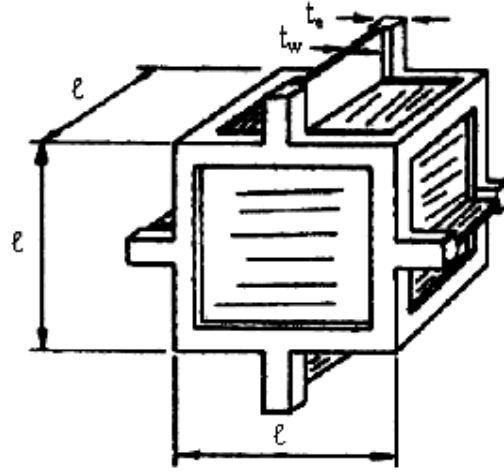
$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = 0,33 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + 0,44 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3.10)$$

Gibson ve Ashby, köpükleri katı direkler ve direklerin orta noktalarında bulunduğu tabakalar içeren küplerden oluşan yapı ile modellemişlerdir. Bu modele göre, plato gerilmesi sadece hücrelerin boyutuna (ℓ) ve hücre köşesi (t_e) ile hücre duvarı (t_w)

kalınlıklarına bağılıdır. B_1 ve B_2 sabitlerdir.

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = B_1 \left(\frac{t_e}{\ell} \right)^3 + B_2 \left(\frac{t_w}{\ell} \right) \quad (3.11)$$

Bu iyi bir tahmin sunmaktadır. Ancak, kesin bir tasarım için yetersizdir. Model, özdeş kübik hücreleri varsaymaktadır. Nitekim ne hücre boyut dağılımı, hücre köşesi ve hücre duvarı kalınlıkları ne de farklı kusurlar (kırılmış hücre duvarları ile hücre köşeleri ve duvar eğrilikleri gibi) göz önüne alınmıştır (Şekil 3.10).



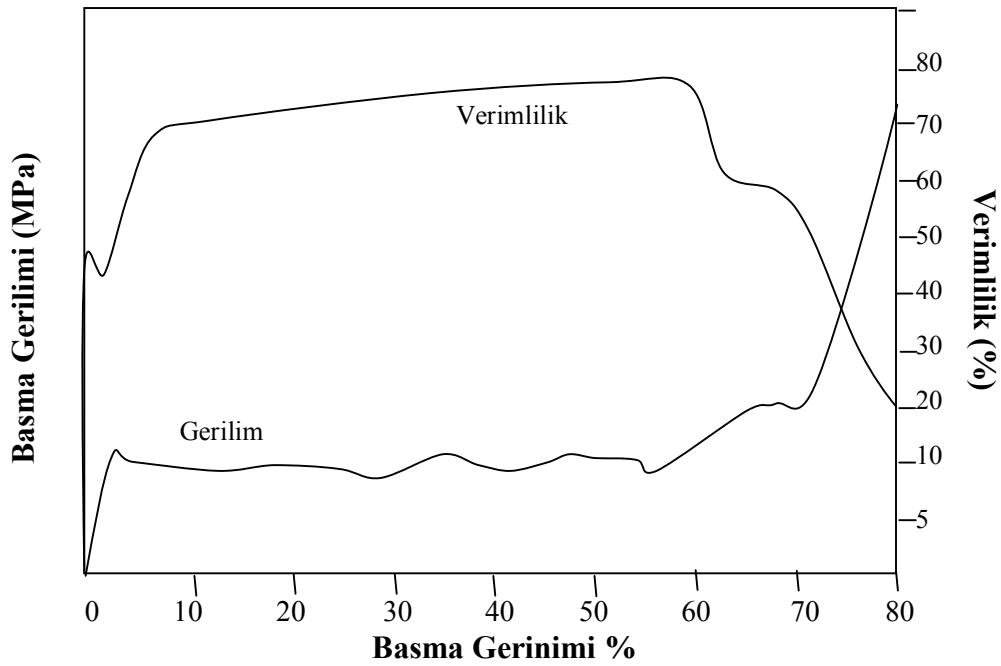
Şekil 3.11 Gibson ve Ashby modeline göre kapalı hücreli yapı.

Basma testleri göstermektedir ki, sabit plato gerilmesi sadece bir ilk yaklaşım olarak alınabilir. Aslında plato gerilmesi, deformasyonun artmasıyla yavaşça artmaktadır. Plato gerilmesindeki bu artışın nedeni, hücre boyutu ve hücre duvarı / hücre köşe kalınlıkları dağılımı olabilir. Yoğunlaşma gerinimi için ilk tahmin Gibson ve Ashby tarafından verilmiştir. Açık ve kapalı hücreli köpüklerin her ikisi için yoğunlaşma gerinimini nispi yoğunluğun lineer fonksiyonu olarak bulmuşlardır. Buna göre yoğunlaşma gerinimi (ϵ_D) aşağıdaki formüle göre hesaplanır (Kadar *et al.* 2005).

$$\epsilon_D = 1 - 1,4p \quad (3.12)$$

Şekil 3.11’de basma yükü altındaki alüminyum köpüğün deformasyon davranışı gösterilmektedir. Malzeme tarafından hacim başına emilen enerji, gerilim-gerinim

eğrisinin altındaki bölge ile doğrudan ilişkilidir. Köpük sabit bir deformasyon gerilimi gösterir ve bu nedenle her ikisi de belirli gerilim seviyesine kadar yüklendiğinde bütün alüminyum, bir parçasından çok daha fazla deformasyon enerjisi emebilir. Emilen enerjinin büyük bir bölümü alüminyum köpüğün büyük bir avantajı olarak geri dönüşümsüz olarak çevrilir. Yoğun matrisli malzeme aynı gerilim seviyesinde, yük kaldırıldıktan sonra depolanan enerjinin çoğunu bırakır. Tepki olmaksızın kontrollü bir darbe enerji Emilimi (örnek olarak otomobil ezilme bölgelerinde) istenilirken, yoğun bir malzemenin bu elastik davranışı rahatsız edicidir (Baumeister *et al.* 1997).

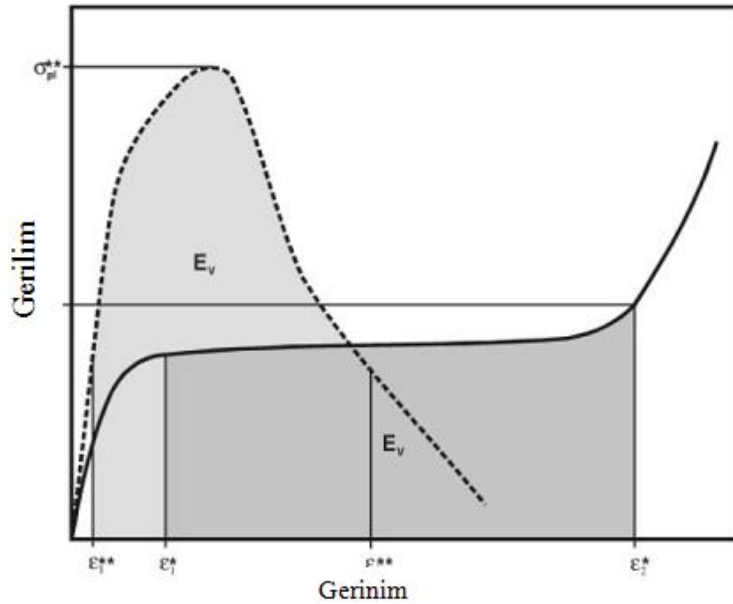


Şekil 3.12 Bir Al-12Si köpüğün basma gerilimi ve enerji emilim verimi (Baumeister *et al.* 1997)

3.4.3. Enerji Emilimi ve Darbe Davranışı

Enerji emilim sistemlerindeki uygulamalar, metal köpükleri kullanmak için büyük potansiyel sunmaktadır. Yüksek derecede gerilme ortaya koymadan enerji emebilme özelliği, metal köpüğe çeşitli yapısal uygulamalar sağlar. Açıkçası, köpük verilen bir pik gerilme derecesinde yoğun katıdan çok daha fazla enerji emebilir. Metal köpükler, kendine özgü yüksek dayanım ve bununla birlikte yüksek miktarda enerji verimliliği sergilerler (Yu and Banhart 1997).

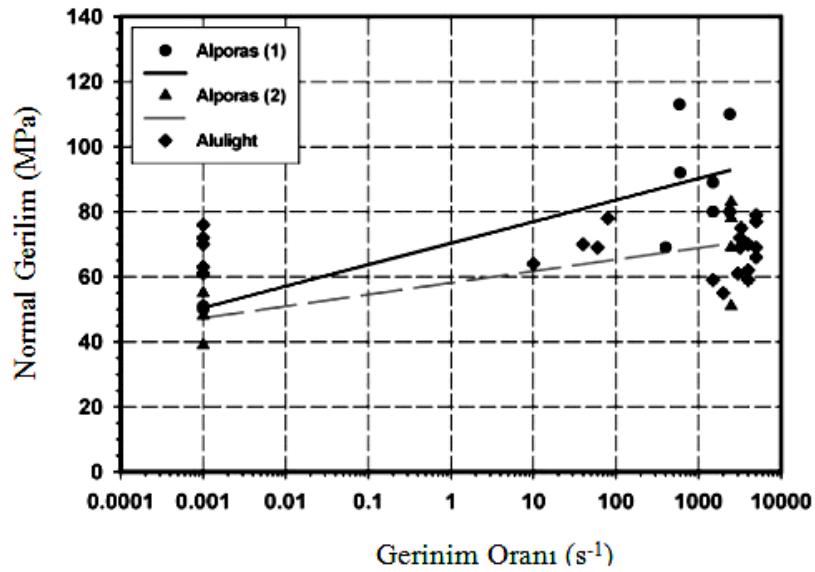
Hücresel metaller, geniş plato sistemi nedeniyle iyi bir enerji absorpsiyon verimine ve iyi bir enerji absorpsiyon kapasitesine sahiptir. Bir darbe anında, kinetik enerjiyi absorbe etmek için kuvvetler, gerilim seviyesi tarafından kontrol edilir. Darbe kuvvetleri, bir kişinin yaralanmasını veya bir paketin hasar görmesini engellemek için belli bir değeri aşmamalıdır. Bu nedenle Şekil 3.13’de gösterildiği gibi enerji emiliminde, yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değildir. Aynı zamanda malzemenin gerilim-gerinim eğrisi de büyük bir rol oynar. Belli bir gerinim aralığında hacim başına düşen emilmiş enerji miktarı E_v olarak gösterilmiştir ve iki farklı emici içinde aynıdır. Emicinin gerilim en yüksek noktası plato bölgesinin dışında daha yüksektir ve bu darbe kuvvetlerini arttıracaktır (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 3.13 İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

Taşıma sistemlerinde darbe emici olarak kullanılan hücresel metaller için yalnızca enerji absorpsiyon kapasitesi önemli değil aynı zamanda darbe davranışı da önemlidir. Kaza durumlarında oluşabilen yüksek deformasyon oranları, köpüğün mekaniksel özelliklerini değiştirebilir. Bunlar iki noktada dikkate alınmalıdır: Hücre kenarlarının ve duvarlarının eylemsizlik kütlesi ve kapalı hücreli bir köpüğün hücreleri içindeki gaz basıncı ve gaz akışı. Her iki etki de akış gerilimini arttırabilir. Bu nedenle, gerinim oranının artması ile köpüğün plato gerilimi de artar. Bu durum, akış geriliminin artmasının önemli olmadığı açık hücreli yapılarda daha yüksek oranlarda gözlemlenir.

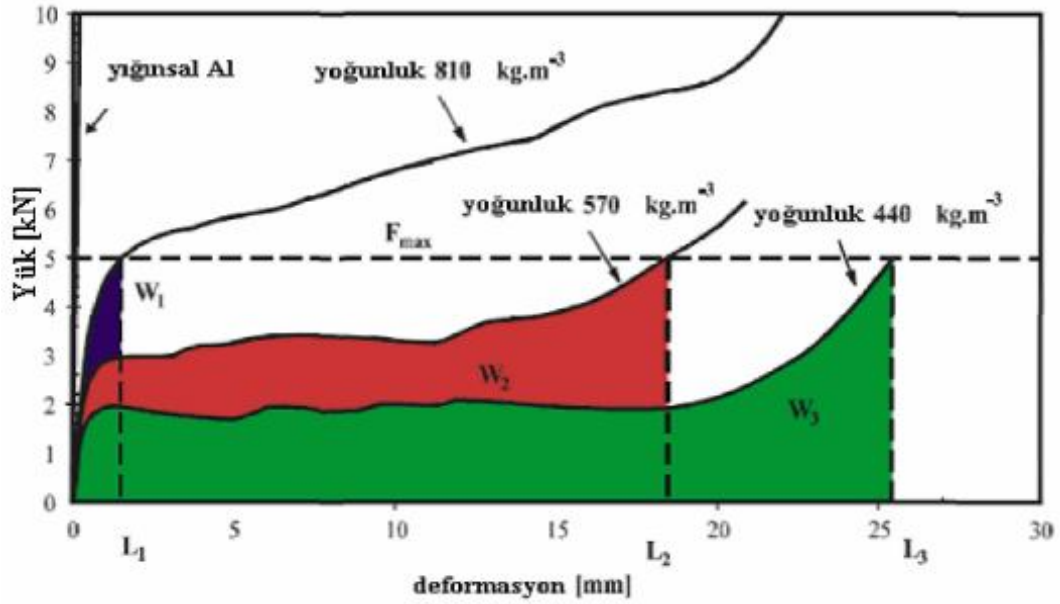
Yapısal elementlerin eylemsizlik kütlesi akış geriliminde hiçbir katkı sağlamaz. Bu durum, metal köpüklerin bir kısmının gerilim-gerinime bağıllık göstermesi nedeniyle, kapalı hücreli köpüklerde farklıdır. Gerçek kapalı hücreli metalik köpükler genelde, sıklıkla üretim işleminde ortaya çıkan hücre duvarlarındaki bazı başlangıç hataları içermesi nedeniyle tamamen kapalı hücreli yapılar değildirler. Hatalara ek olarak, hücre duvarları yırtılması deformasyon işlemi esnasında oluşur. Bu hatalardan dolayı hücreler arasındaki gaz akışı, gerinim oranına bağlıdır. Böylece, hücreler içindeki gaz basıncı yüksek hızlı deformasyon esnasında akış geriliminin de katkısıyla artar. Deformasyon bantlarındaki bölgesel gerinim nedeniyle, bölgesel gerinim oranı ilk küresel olarak ölçülmüş değerden çok daha yüksektir. Dolayısıyla, gerinim oranı etkisi ile artacaktır. Alüminyum köpüklerdeki araştırmalar Şekil 3.14’de gösterildiği gibi, gerinim oranı 10^{-3} ’den 10^3 ’e arttığında plato gerilimi %20–90 arasında artış göstermiştir. Gerinim oranı etkisi genellikle köpükten yapılan alaşım ve hücre morfolojisi tarafından kontrol edilmektedir (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 3.14 İki farklı alüminyum tipinin plastik dayanıma bağlı olarak değişen gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

Yük-çökme eğrisi altındaki alan, plastik deformasyon için ihtiyaç olan enerjiyi tanımlamaktadır. Plastik deformasyon için, verilen yük değerine kadar (F_{max}) köpükte uygulanan enerji, eğer çarpışma enerjisi emilimi düşünülmekte ise, çok önemli bir parametredir. Nitekim bu enerji görünür yoğunluğa kuvvetle bağlıdır. Eğer yoğunluk çok

düşük ise, köpük yeterli derecede çarpışma enerjisi emiliminden önce ezilir. Eğer yoğunluk çok yüksek ise, köpükteki gerilme düşük enerji emilimindeki verilen kritik değeri (F_{max}) aşar. Aşağıdaki şekilde gölgeli alanlar, plastik deformasyon için yük 5 kN uygulandığında gereken enerji değerini (W) tanımlamaktadır (Şekil 3.15) (Simancik et al. 1997).



Şekil 3.15 AlMgSi alaşımından hazırlanmış, çeşitli yoğunluklu alüminyum köpükler için basma yük-deformasyon eğrileri, ($W_2 > W_3 > W_1$) (Simancik et al. 1997).

Basma test verilerinden, deformasyon boyunca enerji emilimi hesaplanabilir. Enerji emilim verimliliğini tanımlayan eşitlik aşağıda verilmiştir.

$$A(\epsilon) = W/W_0 = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon / \epsilon \cdot \sigma(\epsilon) \quad (3.13)$$

Burada sırasıyla W ve W_0 , basma gerinimi sonundaki (plato geriniminin sonundaki) etkin absorbe edilen enerjiyi ve gerilme-gerinim eğrisinde dikdörtgensel değişimi gösteren ideal emici maddeyi tanımlamaktadır (Yang and Nakae 2000).

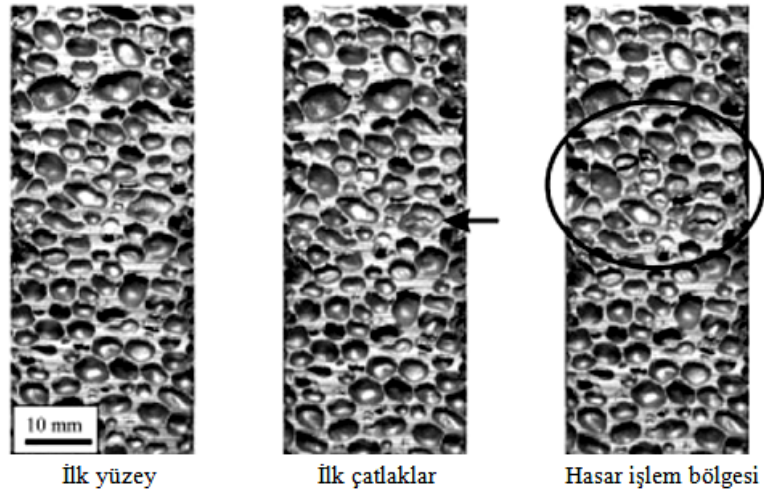
3.4.4. Gerinim Davranışı

Metal köpüklerin üretim işlemlerindeki iyileştirmeler, metalik köpüklerin kalitesini arttırmıştır ve gerçek bir yapısal malzeme olarak yeni uygulamalar ortaya çıkarmıştır. Mekaniksel özelliklerden dolayı, gerinim ve kırılma gibi davranışlara ek olarak basma ve enerji absorpsiyon performansının da bilinmesi gerekmektedir (Degischer and Kristz 2002).

Başlangıçtaki deformasyon modu, açık hücreli köpüklerdeki hücre kenarlarının esnemesi ve basma eğrisi, kapalı hücreli köpüklerdeki hücrelerdeki basma eğrisine çok benzerdir. Ancak akma sonrasındaki aşamada, deformasyon mekanizmaları basmadan oldukça farklıdır. Basmada, hücrenin kırılma veya plastik çöküşü, eksenel yüklemeye dik olarak deformasyon bantları içerisinde gerçekleşir. Gerinimde, hücre duvarları ve hücre kenarları içinde çekme geriliminin baskın olmasından dolayı bu elementlerin burulması mümkün değildir (Degischer and Kristz 2002).

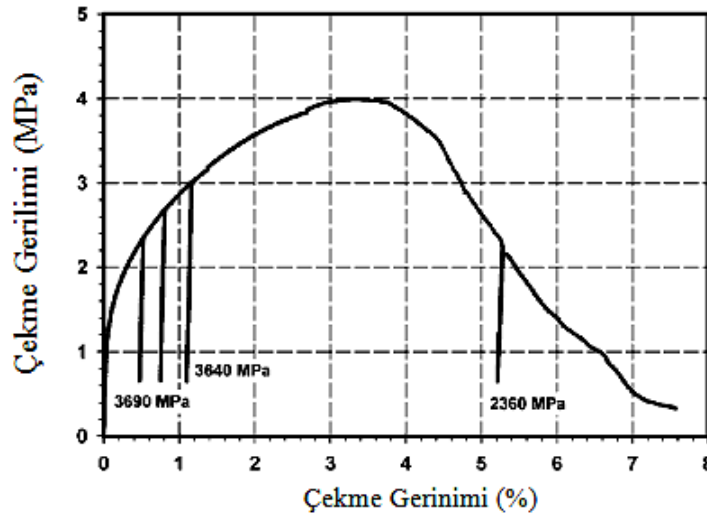
Sünek hücreli metallerde (örneğin alüminyum köpükler), hücre kenarları ve hücre duvarlarının çatlaması, bir ana çatlağın yayılmaya başlamasından önce de görülebilir. Bir hasar işlem bölgesi, deformasyonun ve yoğunluğun artması ile gelişmeye başlar. Kapalı hücreli metallerde birkaç hücre duvarı bu hasar işlem bölgesi içinde yırtılır (Degischer and Kristz 2002).

Ayrıca deformasyon, hücreli yapı içindeki zayıf bir yol boyunca ana çatlağın yayılmasına ve gelişmesine yol açar. Sadece güçlü hücre kenarları bozulmaz ve birlikte iki köpük parçasını tutarlar. Bu işlem, akış gerilimini düşürür. Gerilim-gerinim eğrisi içindeki olaylar, sünek bir kapalı hücreli alüminyum köpüğün hasar mekanizması ve ilgili deformasyon işlemi Resim 3.1’de gösterilmiştir (Degischer and Kristz 2002).



Resim 3.1 Alüminyum köpüğün gerinimdeki hasar mekanizması (Degischer and Kristz 2002)

Bazı zayıf hücre duvarlarında çatlak oluşmuş ve daha sonra bir hasar işlem bölgesi gelişmiştir. Şekil 3.16’da ise bu hasar bölgesinin gerilim-gerinim eğrisi mevcuttur.

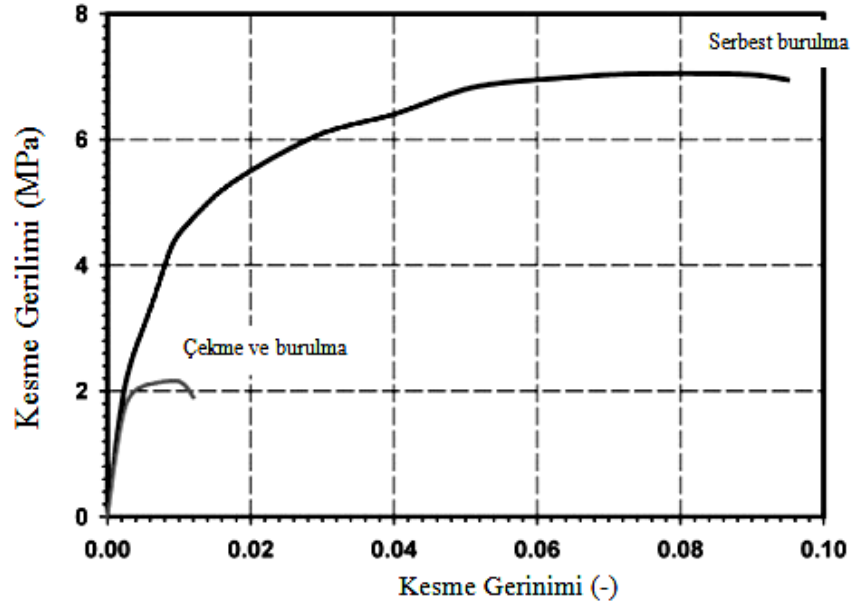


Şekil 3.16 Yük kaldırma modülü ile alüminyum köpüğün çekmedeki gerilim-gerinimi (Degischer and Kristz 2002)

3.4.5. Burulma Davranışı

Burulmada, hücre kenarları eğilmeye, hücre duvarları ise eğilme ve kesmenin bir kombinasyonuna maruz kalır. Kesme davranışı, malzeme yasalarının gelişimi ve ayrıca sandviç yapılarıdaki uygulamalar için önemlidir (Degischer and Kristz 2002)..

Çoğu köpük, çekme testleri ile karşılaştırıldığında serbest bükmede önemli derecede deformasyon başarısızlığı gösterir. Tipik bir örneği Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Numune kırıldığında bükme testi esnasında aksenal olarak sabitse, çekme gerilmeleri numune üzerinde oluşmuştur ve hasar için gerilim, gerinim testlerinde belirlenmiş seviyede azalır (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 3.17 Bükmede aksenal çekme gerilimi ve aksenal olmayan gerilim ile alüminyum köpüğün gerilim-gerinim eğrisi (Degischer and Kristz 2002)

Numune içindeki çeşitli gerilim bölgeleri, bükme testi esnasında numune üzerine çekme ve basma yükleri uygulanması ile elde edilmiştir (Degischer and Kristz 2002).

3.4.6. Termal, Elektriksel ve Akustik Davranış

Köpükler, belirli koşullar altında titreşimleri ve sesi sönümleyebilir. Üstelik köpüklerin termal iletkenliği düşüktür. Bu özellikleri ile üstün olmamakla birlikte (polimer köpükler ses emici olarak daha iyidir) köpüğün diğer özellikleri ile birleştirildiğinde yararlı olabilir (Banhart 2005).

Hücrel metallerde, polimer ve daha seramik matrisin, elektriksel iletkenliği için farklılıklar vardır. Bu basit gerçek, büyük ölçüde tipik uygulamaları değiştirir. Seramik

ve polimerik köpükler, yalıtım ve yapısal muhafazalar için kullanılabilir. Köpük metallerin elektriksel iletkenliği gözeneklilik ile önemli derecede azalmasına rağmen, hala iyi elektriksel topraklama, düşük elektrik teması veya elektromanyetik dalgaları emme kapasitesini sağlamak için oldukça yeterlidir. Açık hücreli yapı ile metalik sünger olması durumunda, büyük erişilebilir alanda elektrik potansiyelini dağıtmak için iletkenliğe izin verir ve bu da onları pil elektrotları için cazip hale getirmektedir. Hücresel nikeller, bu uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.2’de farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş alüminyum köpüklerin yoğunluğu, termal ve elektriksel iletkenliği gösterilmiştir (Degischer and Kristz 2002).

Çizelge 3.2. Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücresel alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği (Degischer and Kristz 2002)

Tedarikçiler	Yoğunluk (kg.m ⁻³)	Termal iletkenlik (W/mK)	Elektriksel iletkenlik (m/Ωmm ²)
Alporas	570	-	9.9
	400	-	5.0
	300	-	3.8
	200	-	2.6
	94	-	1.0
Alulight	500	13	3.1
	400	10	2.6
	300	8.9	1.9
Cymat	540	0.91	-
	410	0.7	-
	270	0.4	-
	160	0.36	-
	68	0.28	-
ERG	330	-	2.1
	250	-	1.6
	200	-	1.2
	140	-	0.9
Norsk Hydro	300	2.1	0.50
	250	2.1	0.36
	150	1.5	0.27

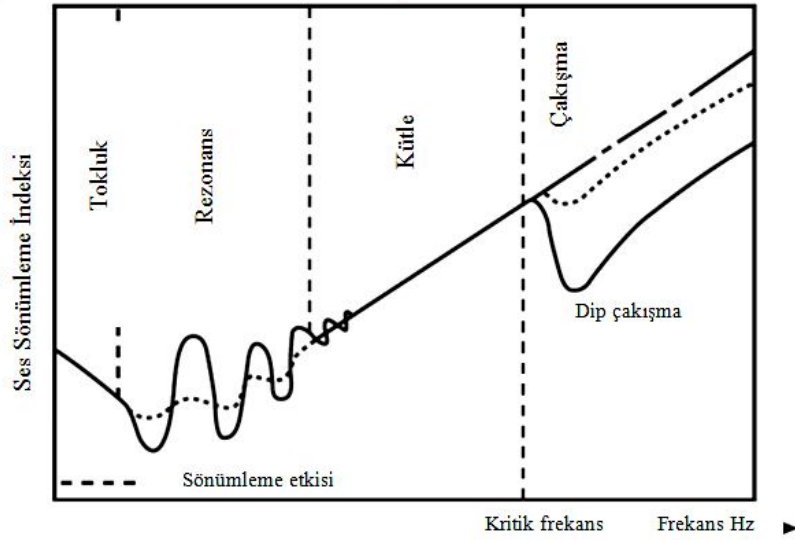
Hücresel metaller ile ilgili pratik öneme sahip ana termal özellikler, ergime noktası, kararlı sıcaklık, ısı genleşme katsayısı, termal iletkenlik, termal difüzyon, yüzeye yayılma, ısı ve termal şok direncidir. Bu özelliklerin bir kısmı, dökme malzemeler için hemen hemen aynıdır, diğerleri ise gözenek yapısına bağlıdır (Degischer and Kristz 2002).

Hücresel metallerin ergime noktası, köpükten yapılmış bir alaşım için pratik olarak aynıdır. Ancak yüzey yoğun olarak (örneğin malzemenin alüminyum olması durumunda) ergime noktası yüksek olan bir oksit tabakası tarafından kapatılmıştır. Oksit tabakası ile çevrilmiş yüzey bölgesi, artan gözeneklilik ve azalan gözenek boyutu ile artar. Yapı, yeterince uzun süre için ergime noktasına yakın hava veya oksitleyici atmosfer içerisinde ısıtıldığında, oksit tabakasının kalınlığı artar ve daha kararlı hale gelir. Belirli bir kalınlığa vardıktan sonra numunenin mekaniksel kararlılığına bağlı olarak, metalik hücre duvarları seramik bir köpük içine hücresel metalin çevrilme sıcaklığından sonra tamamen okside olur. Örneğin bu davranış, Duocell süngerlerine benzer açık hücreli metalik öncülerden seramik süngerin hazırlanması için kullanılmıştır (Degischer and Kristz 2002).

Bir birim sıcaklık tarafından hücresel yapının sıcaklığını arttırmayı gerektiren enerji, birim kütle dikkate alındığında hücre duvarlı malzemeler için hemen hemen aynıdır. İnce oksit yüzeyleri ve hava içerdiği için küçük fark oluşabilir. Ancak hücresel bir yapıda birim hacme düşen öz ısı (C_v), önemli derecede daha düşük olmasına sebebiyet verir. Termal kapasitenin düşük olduğu uygulamalar için (örneğin hızlı ısıtma ve soğutma sistemleri için) metalik köpükler gereklidir (Degischer and Kristz 2002).

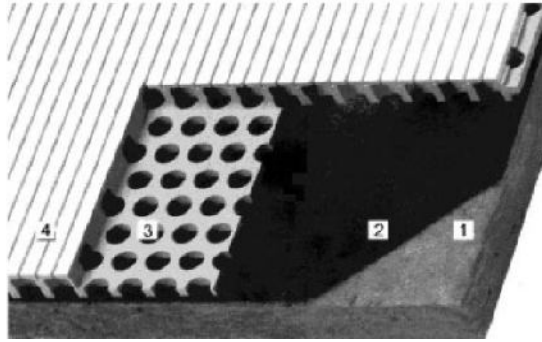
Hücresel metallerin ısı genleşme katsayısı (α), termal iletkenlikten (λ) çok daha düşük olduğunda hücre duvarlı malzeme ile neredeyse aynıdır. Distorsiyondan kaynaklanan yüksek ısı, (α/λ) oranının yükselmesi ile artar. Bunu önlemek için, ısıtma veya soğutmada hücresel yapı içindeki sıcaklık farkları en aza indirilmelidir (Degischer and Kristz 2002).

Malzemenin ses yalıtım performansı, ses iletim katsayısı ile ses azaltma endeksi doğru orantılı olduğu için logaritmik skala da bu değer, ses azaltma endeksi açısından tanımlanmıştır. Bir panel için ses iletim katsayısı, ses yoğunluğu olayında iletim oranı tarafından belirlenir. Ses azaltma endeksi, frekansa, yapının malzemesine ve geometrisine bağlıdır. Belirli bir malzeme için ses azaltma endeksi, belirli frekans aralığında önem kazandığından çeşitli mekanizmalar tarafından kontrol edilir. Şekil 3.18'de iletim kaybı eğrisinin genel formu görülmektedir (Degischer and Kristz 2002).



Şekil 3.18 Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı (Degischer and Kristz 2002)

Frekans, maksimum ses emilimine ulaşıldığında boşluk geometrisi tarafından ayarlanabilir. Düşük frekanslara doğru (tercihen 100-1000Hz aralığında) emilim performansı artar. Şekil 3.19’da ses emiliminin artması amacıyla malzemenin kendi üzerine daha karmaşık yapıların yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Tipik bir ses emici yapı: kalın cam fiber emici (1), ince koruyucu ve sönümleyici folyo (2), rezonatör boşluğuna sahip ağaç panel (3) ve dış tasarım (4) (Degischer and Kristz 2002).

3.5. Metalik Köpüklerin Üretim Yöntemleri

Metalik köpükler uzun yıllardır üretilmekle birlikte daha düşük maliyet ve daha iyi performans sağlayan ürünler meydana getirilebilmesi için birçok üretim metodu geliştirilmiştir. Farklı üretim yöntemlerinden bazıları ise ticari isimleri ile adlandırılmıştır.

Metalik köpüklerde; ergitme ve toz bazlı genel olarak iki farklı üretim yöntemi mevcuttur. Çizelge 3.3’de üretim yöntemlerinin bir özeti gösterilmiştir (Gergely et al. 2000).

Çizelge 3.3. Temel malzeme özellikleri ile birlikte verilen metalik köpüklerin ve köpüklü yapıların ana üretim tekniklerinin listesi (Gergely *et al.* 2000)

Üretim Tekniği	Katı Hal Bileşimi	Gözeneklilik	Hücre boyutu ve tipi	Ticari adı veya tipi
Ergitme bazlı yöntemler				
Gaz enjeksiyon	Al alaşımları+ Seramik parçacıkları	%80-98	3-25mm, kapalı hücreli	ALCAN (ayrıca CYMAT ve HYDRO)
Gecikmeli serbest gaz üretimi	Al alaşımları+ Seramik parçacıkları	%50-96	0,8-3mm, kapalı hücreli	FORM GRIP
Oksidasyondan önce <i>in situ</i>	CP Al+ (oksidasyon parçacıkları)	%89-93	4,8mm, kapalı hücreli	ALPORAS
Ötektik gaz reaksiyonu	Ni, Cu, Mg, Al ve diğer malzemeler	%5-75	5µm-10mm, açık ve kapalı hücreli	GASAR
İnfiltrasyon ve replikasyon	6101 ve A356	%88-92	0,5-4,3mm, açık hücreli	DUACEL
	Al	%60-70	10µm-1mm, açık hücreli	Çoğaltılmış köpük yapısı
	Al, Mg ve Ti alaşımları	<%55	0,06-3,7mm, seramik içi boş küreler	Sintaktik gözenekli yapılar
<u>Toz bazlı yöntemler</u>				
Köpükleştirici öncü ile birleştirilmiş toz katkısının ısıtılması	Al alaşımları+ artık oksit parçacıklar	%63-89	1-8mm, kapalı hücreli	ALULIGHT FOAMINAL (IFAM) ALUFOAM
Hapsolmuş öncü gazın ısıtılması	Ti-6Al-4V	%20-40	10-100µm, kapalı hücreli	LDC sandviç
Sinterleme	Çelik, Ti ve Ni bazlı içi boş küreler	%65-87	0,5-6mm, kapalı hücreli	İçi boş küre yapılar
	Farklı metal tozlar	%30-50	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş tozlar
	Farklı metal fiberler	<%95	Ara bağlantılı ağlar	Sinterlenmiş fiberler

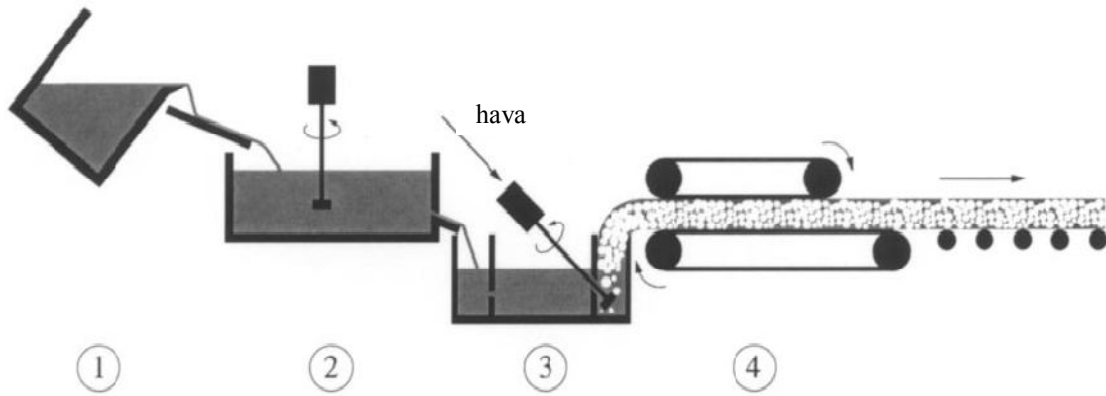
3.5.1. Ergitme Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Ergitme ve döküm yöntemi ile metalik köpük üretimi başlıca üç aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada köpürtülecek metal veya alaşım ergiyik hale getirilir. İkinci aşamada gözenekli yapı oluşturmak için gaz veya köpürtücü madde ilave edilir. Üçüncü aşamada soğutma işlemi yapılarak ergiyik metal katı hale getirilir (Çinici 2004).

Ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturularak yapılan köpük üretiminde, sıvının yüksek kaldırma kuvvetinden dolayı yüzeye doğru hızlı kabarma eğiliminde olan gaz kabarcıklarıyla metalik köpük şekli verilmiştir. Aşırı derecede yüksek viskozite, kabarcıkların düzeninin bastırılmasına neden olurken, aşırı derecede düşük viskozite, kabarcıkların hızlı yüzdürülmesine neden olur (Ashold 1999).

3.5.1.1. Gaz Enjekte Ederek Gözeneklendirme

Köpüklendirme için bu ilk yol, alüminyum ve alüminyum alaşımları kullanılarak Norveç'te Hydro alüminyum ve Kanada'da Cymat alüminyum firmaları tarafından kullanılmıştır. Kullanılan metotlar ve patentler Alcan International tarafından geliştirilmiştir. Şekil 3.20'te bu işlemin şematik bir özeti gösterilmiştir (Ogan 2008).

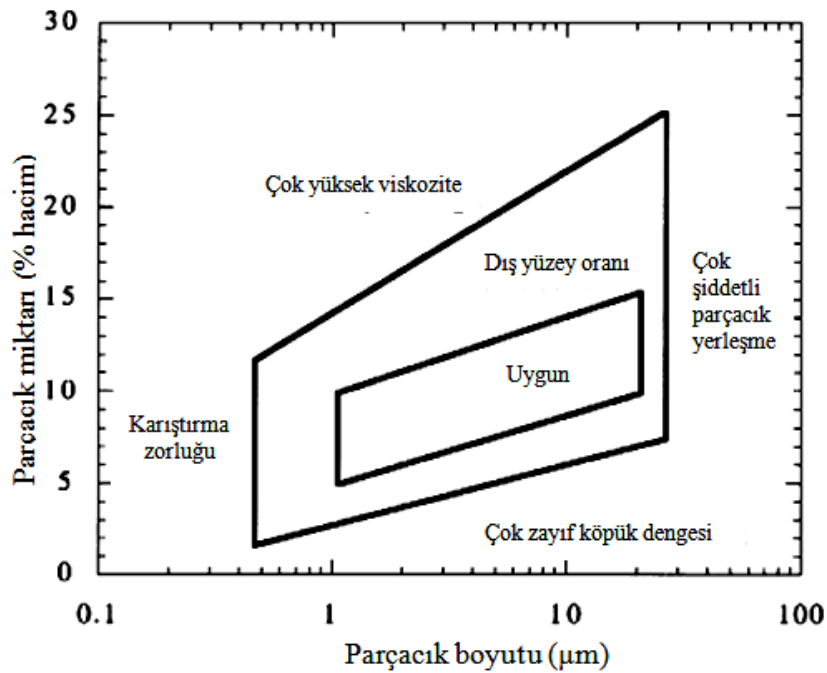


Şekil 3.20 İnce panellerin üretimi için Alcan tarafından geliştirilmiş sürekli olan köpük işleminin şematik gösterimi. Resimdeki sistemin bileşenleri: 1-Ergitme fırını, 2-Bekletme fırını, 3-Köpükleştirme kabı, 4-İkiz kemer tekerlekleri (Ogan 2008).

Şekil 3.20' de gösterildiği gibi, ilk aşamada köpürtülecek metal ergitilir. Ergitilen metal içerisine viskoziteyi ayarlamak için refrakter parçacıklar ilave edilir ve karıştırılır. İkinci

aşamada özel olarak tasarlanmış dönel pervane ve titreşimli nozullar yardımıyla ergiyik içerisine hava, azot veya argon üflenerek gaz kabarcıkları meydana getirilir. Yüzeyde oluşan metal-gaz kabarcıkları taşıma bantları kullanılarak ergiyik yüzeyinden çekilip düz levha şeklinde hafifçe haddeden geçirilmiştir. Son olarak metalik köpük soğutulmuştur (Çinici 2004).

Bu işlemde kullanılan refrakterler, zirkon veya silisyum karbür, alüminyum oksit, magnezyum oksit ve titanyum diborür gibi parçacıklardır ve genellikle bazı eritilmiş alüminyum alaşımlarından birini stabilize etmek için kullanılmışlardır. Takviye parçacıkları %10-20 hacminde ve 5-20 μ m boyutları arasında ilave edilir. Parçacık hacmi ve boyutunun çok az veya fazla seçilmesi çeşitli problemler yaratmaktadır. Bu durum Şekil 3.21’de görülmektedir (Gergely *et al.* 2000, Banhart 2005, Özer 2005).

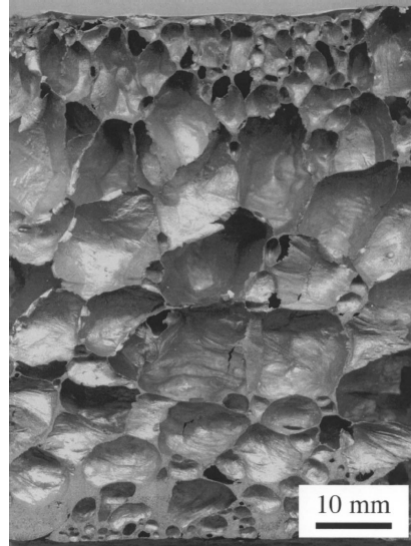


Şekil 3.21 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi yardımıyla üretilen köpüğün optimizasyonu için önerilen seramik parçacık boyutu ve hacim oranları (Gergely *et al.* 2000)

Bu yöntemle üretilmiş alüminyum köpüğün yoğunluğu 0,069 g/cm³ ile 0,54 g/cm³ arasında değişmekte, ortalama gözenek ebatları 3-25 mm ve gözenek duvar kalınlığı 50-85 μ m arasında olmaktadır. Özel olarak tasarlanmış dönel pervaneler ve titreşimli nozullarla homojen dağılımlı gaz kabarcıkları meydana getirmek mümkündür. Gaz akışı, nozul titreşim frekansı, pervane hızı ve diğer parametrelerin ayarlanması ile

ortalama gözenek boyutları, ortalama gözenek duvar kalınlığı ve köpük yoğunluğu değiştirilebilir. Kullanılan çeşitli alaşımlar ise şöyledir: 1060, 3003, 6016 veya 6061 gibi dövme alaşımlar veya AlSi10Mg (A359) dökme alaşımlar gibi çeşitli alüminyum alaşımlar (Kenny 1996, Banhart 2001).

Ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilerek üretilen metalik köpüğün gözenek yapısı Resim 3.2’de gösterilmiştir. Hafif haddeden geçirilerek oluşturulan metalik köpükte, gözeneklerin birbirlerine benzedikleri görülmüştür. Yer çekimi etkisinden dolayı ergiyik metalde aşağı doğru meydana gelen akma, üst kısımda gözenek yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur. Metalik köpük merkezinde meydana gelen uzun soğuma süresinden dolayı gözeneklerde genişleme meydana gelmiştir (Çinici 2004).



Resim 3.2 Gaz enjeksiyon (Alcan) yöntemi ile üretilmiş bir köpüğün bir bölümünün optik mikrografı (Çinici 2004)

Bu yöntemin en önemli avantajı büyük hacimlerdeki köpüklerin sürekli bir şekilde üretilmesi ve düşük yoğunluğun başarılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpük metaller daha düşük fiyata sahip olabilmektedir. Kanada şirketi Cymat 1,5 m genişlikte, 2,5-15 cm kalınlığında köpük plakaları saatte 1000 kg kapasite ile dökmeaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise üretilen panellerin kesilmesi, istenilen şekle getirilmesi gibi problemlerdir. Yöntemin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.4’de görülmektedir (Özer 2005).

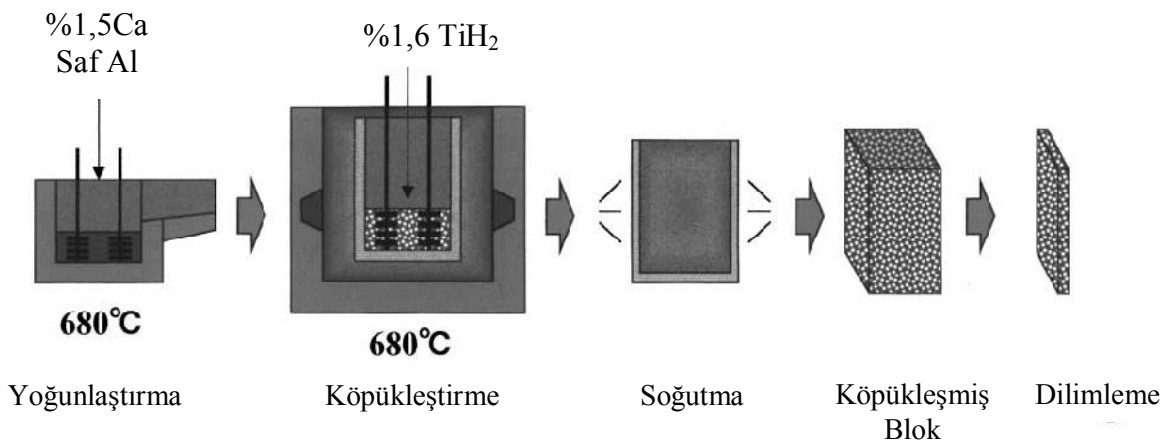
Çizelge 3.4. Gaz üfleyerek üretilen metalik köpüklerin avantaj ve dezavantajları (Özer 2005).

Avantajlar	Dezavantajlar
• Sürekli üretim için çok uygun bir yöntemdir ve büyük miktarlarda üretim yapılabilir. • Ucuz ve nispeten basit bir işlemdir.	• Gaz dağılımını kontrol etmek zordur ve gözenekler her zaman büyüktür (0,5-1cm). • Gözenek boyutu üzerinde kontrol zordur ve tesadüfi çok büyük gözenekler oluşabilir bu da mukavemeti kötü etkiler. • Sadece levha dökümüne uygundur ve yüzey kesimi düzensizdir. • Önceden seramik parçacıkların araştırılması gerekir. Bu bütün alaşımlar için uygun değildir (Bazı alaşımlar yeteri kadar viskoz değildir).

3.5.1.2. Köpükleştirici Ajanlar Yardımıyla Köpük Üretimi

Alüminyum köpük üretmek için toplu bir döküm işlemi olan bu işlemin patenti, Japonya Amagasaki'deki Shinko Wire Company Ltd. Şti. tarafından alınmıştır ve bu köpük şu an endüstriyel alanda “ALPORAS” ticari ismiyle kullanılmaktadır. Firma, 1986'dan beri günde 1000kg köpük üretim hacmi ile köpükler üretmektedir. Şekil 3.22'de bu işlemin genel bir şekli gösterilmiştir (Akiyama *et al.* 1987, Gergely *et al.* 2000, Banhart 2001, 2003, 2005, Çinici 2004, Özer 2005) .

Bu işlemde ilk olarak, eriyik alüminyum (yaklaşık 680⁰C) içerisine kalsiyum (yaklaşık olarak metal ağırlığının %1,5 oranında) dağıtılır ve karıştırılır. Bu esnada, kalsiyumun oksijene karşı büyük bir ilgisi olduğundan, meydana gelen CaO ve CaAl₂O₄ gibi oksitlenmiş ve ince bileşikler, eriyik geneline dağılmışlardır. Bu, eriyiğin viskozitesinin önemli derecede artmasına neden olur.

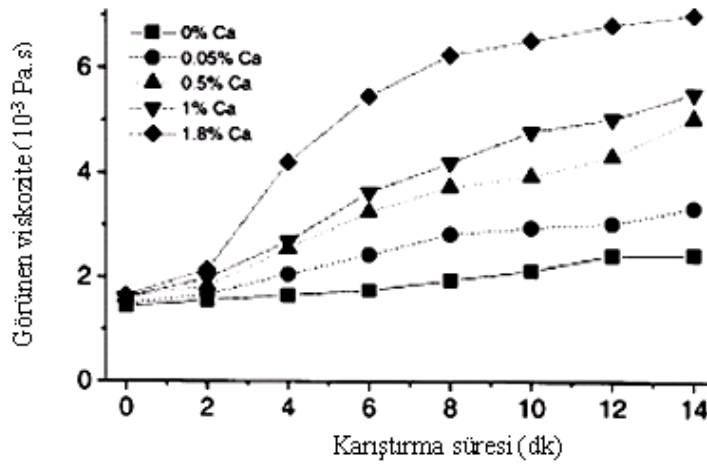


Şekil 3.22 Köpürtücü ajanlar ile eriyiğin direkt köpükleştirilmesi (Alporas işlemi)

Ardından, eriyik içerisine titanyum hidrit tozu ilave edilir ve eriyik, daha sonra bir kalıba dökülür. Hidrit, termal ayrışmaya ve/veya oksidasyon reaksiyonuna uğrar ve gaz, eriyik içerisinde köpükler oluşturur. Son olarak köpük, hava püskürtmeli soğutma kullanılarak soğutma oranının arttırılması ile katılaşmasına izin verilir. Köpükleştirme tamamlandığında eriyik, hidrojenin serbest kalması ve köpüklerin birleşmesi veya çökmesinden önce köpük katılaşmıştır (Gergely 2000 *et al.*, Ashby *et al.* 2000).

İşlemin kontrolü basınç, sıcaklık ve zamanın ayarlanması ile sağlanmaktadır. Şekil 3.23’de farklı kalsiyum oranlarıyla viskozitesinin değişimi gösterilmektedir (Ashby 2000 *et al.*, Miyoshi *et al.* 2000).

Bu yöntemle üretilmiş köpüklerin boyutları 2050 x 450 x 650mm, gözenek boyutları yaklaşık 4,8mm ve gözenekliliği ise %84-93 oranındadır. Malzeme, yapısal homojenliği açısından ticari olarak en iyi kapalı hücreli köpüklerden biri olarak kabul edilir. Resim3.3’de bu yöntemle üretilmiş bir alüminyum köpük gösterilmiştir (Gergely *et al.* 2000).



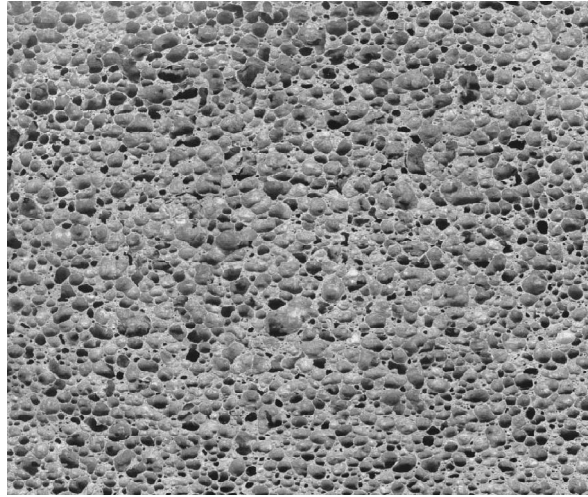
Şekil 3.23 Kalsiyum metalinin ilave edilip karıştırılmasından sonra bir alüminyum eriyiğin viskozitesi üzerine karıştırmanın etkisi (Miyoshi *et al.* 2000)

Alporas işleminin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.5’de verilmiştir (Özer 2005).

Çizelge 3.5. Alporas yönteminin avantaj ve dezavantajları

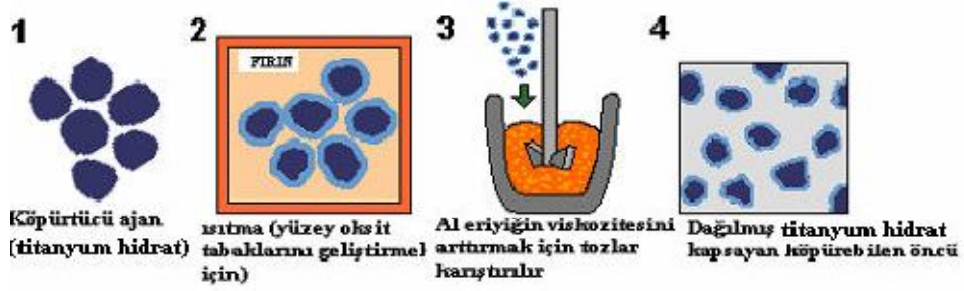
Avantajlar	Dezavantajlar
• Oldukça tekdüze (üniform) hücre boyutu. Alcan yönteminden daha homojen köpük yapısı. • Küçük hücreler.	• Katkı malzemelerinden dolayı pahalı bir yöntem • İstenilen son şekilde parça üretilmemesi

Alporas yöntemine ek olarak diğer bir benzer üretim ise FORMGRIP dir. Bu işlem, “Foaming of reinforced metals by gas release in precursors” kelimelerinin baş harfleri kullanılarak FORMGRIP ismini almıştır. Bu işleme göre titanyum hidrat parçacıkları, sıvı metale eklenip karıştırıldıktan sonra eriyiğin katılaşmasına olanak verilmiştir (Banhart 2003, Babcsan *et al.* 2003, Banhart 2005, Özer 2005)



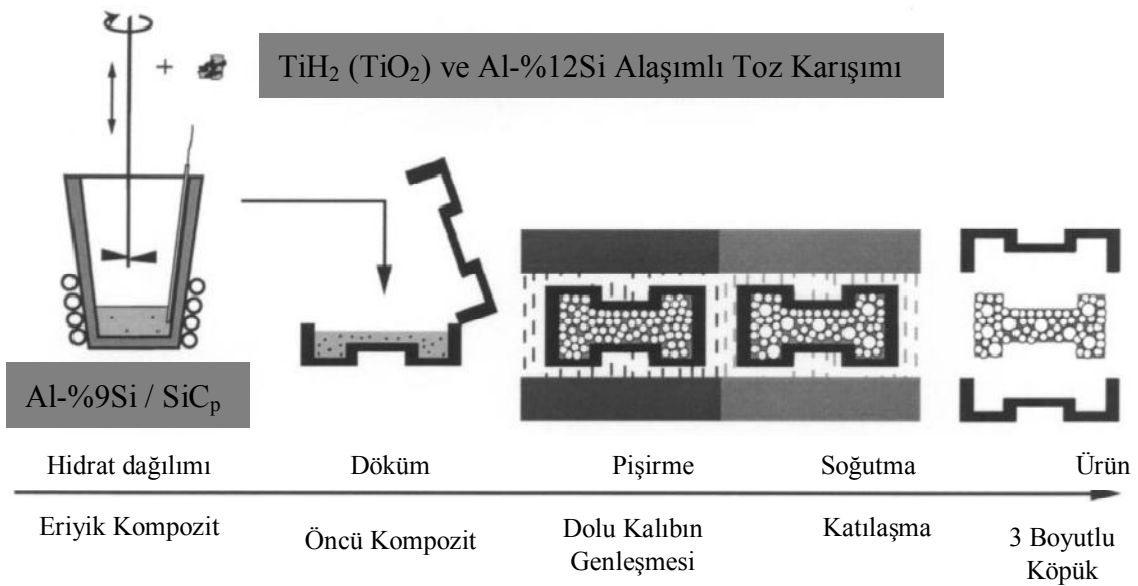
Resim 3.3 TiH₂ eklenmesi ile köpükleştirilmiş 80*80 mm² boyutundaki alüminyum köpüğün gözenek yapısı (Banhart 2001)

Şekil 3.24’de görüldüğü gibi ilk işlem olarak, titanyum hidrat ısıtılma tabi tutulur ve eriyik içerisinde ayrışmalarını geciktirmek için her hidrür parçacık üzerinde bir oksit bariyeri oluşturulur. Daha sonra hidrit, eriyik alüminyumla karıştırılır (bununla beraber viskoziteyi arttırmak için eriyiğe SiC parçacıkları ilave edilir) ve hidrit parçacıkların üzerindeki oksit, çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynar. Bu da metal, köpürtücü ajan ve SiC’den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretir. Kararlı köpükler elde etmek için hacimsel olarak %10-15 SiC parçacıkları içeren eriyikler kullanılır (Banhart 2000, 2003, 2005, Babcsan *et al.* 2003, Özer 2005).



Şekil 3.24 FORMGRIP işleminin ilk adımı (Özer 2005)

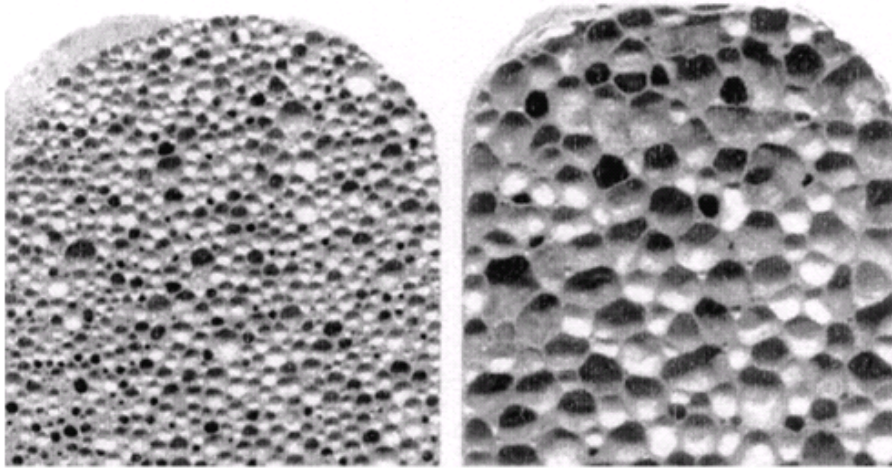
İşlemin ikinci adımında, titanyum hidritin hidrojen gazı salıp çözünmesi için alaşım eritilerek, öncü yaklaşık 630°C 'ye ısıtılır. Dağılımın gelişmesinden dolayı köpükler tekdüze bir yapıya sahiptir. Pişirme zamanı ayarlanarak, 1-10 mm arası hücre boyutu ve %50-95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Daha sonra soğutularak ürün elde edilmektedir. Şekil 3.25'de FORMGRIP yönteminin tamamı şematik olarak görülmektedir (Özer 2005).



Şekil 3.25 FORMGRIP işleminin şematik olarak gösterimi (Gergely *et al.* 2000)

Köpükleştirme işlemi, farklı sıcaklık oranları ve final köpükleştirme sıcaklıkları tarafından etkilenebilir. Bu da, Resim 3.4'de görüldüğü gibi farklı gözenek boyutlarına sahip çeşitli ürünlerin oluşumunu sağlamaktadır (Banhart 2000).

FORMGRIP işleminin ilk ve ikinci adımlarında dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. İlk işlemden, titanyum hidrat parçacıkların eriyiğe atılıp karıştırılırken, erken hidrojen dönüşümünü önlemek için ya katılma hızı olmalıdır ya da köpükleştirici ajan, bu aşamada daha çok gazın serbest kalmasını önlemek için pasif olmak zorundadır. İkinci adımda ise kalıp içerisinde TiH_2 tozlarının homojen dağılımı oldukça zordur. Bu yüzden, TiH_2 tozları nispeten yavaşça karıştırılarak eriyik içerisine ilave edilip ve daha sonra soğutmaya bırakılabilir (Banhart 2003, 2005, Babcsan *et al.* 2003).



Resim 3.4 Silisyum karbürlü alüminyum köpükler (Banhart 2000)

TiH_2 ; alüminyum ve alüminyum alaşımı metalleri ile döküm, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak metalik köpük üretimlerinde temel malzeme olarak kullanılmaktadır. TiH_2 ün köpürtücü ajan olarak kullanılabilmesi için alüminyumun sıvı veya yarı katı şeklinde olması gerekmektedir (Kevorkijan, 2010).

Ancak TiH_2 ün döküm ve toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum alaşımı metalik köpük üretimi için kullanılsalar da büyük ölçekli uygulamalarda çeşitli kusurları vardır. Bu sınırlamalar şunlardır (Kevorkijan, 2010):

- TiH_2 nin dekompoze olma sıcaklığı $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmasından dolayı üretim için çok düşüktür. Bu sıcaklık alüminyum alaşımları için $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında olması gerekmektedir.
- TiH_2 ün pahalı olması rekabeti düşürmektedir.

- Üretimlerde yüzeyde belirli bir koruyucu tabaka (TiO ve TiH_2 tabakası) oluşturmak için yüzeyi kapsayan oksidasyon ile TiH_2 ön işleme tabi tutulması gerekmektedir. Buda maliyeti artırmaktadır.
- TiH_2 tozları köpürtücü ajan olarak kullanılması durumunda köpük stabilitesini sağlayabilmek için diğer katı parçacıklara (örn SiC) ihtiyaç vardır.
- TiH_2 ün yoğunluğu ($3,9 \text{ g/cm}^3$) ergimiş alüminyumun yoğunluğundan ($2,7 \text{ g/cm}^3$) yüksek olması sebebiyle yer çekimi etkisiyle aşağı doğru çöktürmekte ve gözenek yapısının düzenini bozmaktadır.

TiH_2 'ün köpürtücü ajan olarak kullanılmasının maliyetinin çok fazla olması sebebiyle alternatif olarak mermer tozu veya sentetik kalsiyum karbonat (CaCO_3) son derece umut vericidir (Kevorkijan, 2010).

Yakın zamanda, CaCO_3 vasıtasıyla alüminyum alaşımlarının köpükleştirilmesi yeniden araştırılmış ve “FORMGRIP” işlemine benzer olarak “FOAMCARP” işlemi geliştirilmiştir. CaCO_3 köpüğünden meydana çıkan CO_2 , bir oksit tabakası oluşturarak hücrelerin yüzeyini oksitlendirir ve CO 'yu azaltır (Wightman and Fray 1983, Gergely *et al.* 2003).

FORMGRAP işlemi olarak adlandırılan bu teknik, ekonomik cazibesi ve kirlilik toleransı açısından bir eriyik yönteminin avantajlarına sahiptir. Aynı zamanda malzemenin katı haldeki stoku, bir kalıp içerisine yerleştirilebilmesi ve basit bir “fırın” operasyonu yardımıyla köpükleştirilebilmesi için uygundur ve üretilebilmesinde toz bazlı yöntemlerin çok yönlü karakteristiğinin olmasının da payı vardır. Köpükleşmiş metal, geleneksel yöntemlerle üretilmiş parçalarla birleştirilebildiği için bu teknik aynı zamanda karmaşık sistemlerin üretimi için de uygundur (Gergely *et al.* 2000).

TiH_2 aksine kalsiyum karbonat düşük maliyetli ve ergimiş alüminyumun yoğunluğu ile ($2,71 \text{ g/cm}^3$ - $2,83 \text{ g/cm}^3$) hemen hemen aynıdır. Buna ek olarak dekompeze sıcaklığı 660°C ile 930°C arasındadır. Ayrışma sıcaklığının alüminyumun ergime sıcaklığının üstünde olması ergitme ve köpürtücü ajan tekniği ile metalik köpük üretimi için uygun bir özelliktir.

Aynı miktardaki toz miktarı ile CaCO_3 'ın TiH_2 ile karşılaştırıldığında daha yüksek gözenek oluşumu ve daha ince hücre boyutuna sahip olması CaCO_3 tozlarını avantajlı duruma getirmektedir (Nakamura *et al.* 2002). Gergely ve arkadaşları TiH_2 yerine CaCO_3 kullanımının köpük üretiminde maliyeti önemli derecede düşürdüğü ve daha üniform hücre yapısına sahip metalik köpük imal edilebileceği sonucuna varmışlardır (Gergely *et al.* 2003).

Direk olarak köpürtücü ajan olarak CaCO_3 tozlarının alüminyum ve alaşımları için kullanılabilirliği incelenmiş olmasına rağmen, CaCO_3 ün toz morfolojisi (ortalama parçacık boyutu ve partikül dağılımının köpük oluşuma etkisi üzerine ek bir çalışma), köpük stabilitesi ve daha iyi bir köpük oluşumunda CaCO_3 ün dekompozisyonunun rolü gibi konularda çalışılması gerekmektedir (Kevorkian, 2010).

3.5.1.3. Gaz-Ötektik Reaksiyonunu Kullanarak Köpük Üretimi

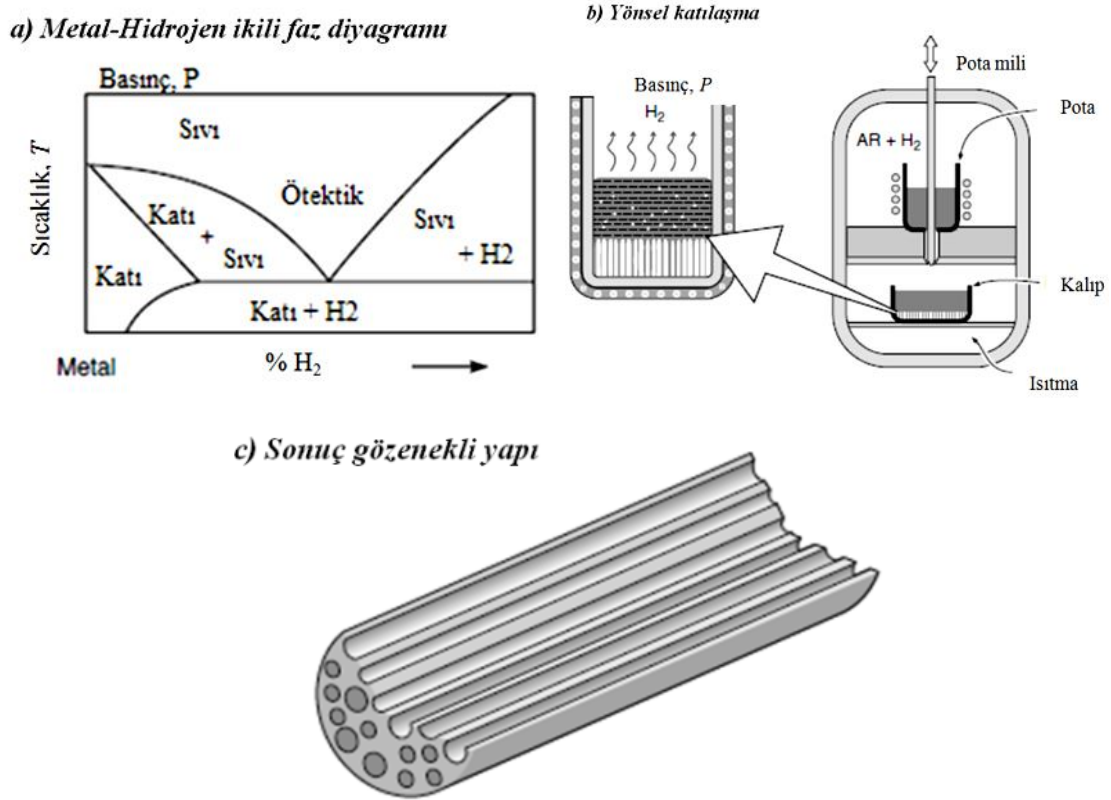
Katı-gaz ötektik katılaşması ile meydana gelmiş gözenekli malzemeler için “gasar” kelimesi, bir Rus kısaltması olan “gaz takviyeli” anlamına gelir. Yakın zamanda bu yöntem Japonya’da, lotus köklerine benzerliğinden dolayı “yapılandırılmış lotus” ismine uyarlanmıştır (Hyun and Nakajima 2003, Banhart 2001).

GASAR yönteminde metal, üst kısımdaki pota içerisinde ergitilmiştir. Dışarıdan sistem içerisine gönderilen hidrojen gazı eriyik tarafından emilir. Emilen hidrojen gazı metali çözerek, ergiyik metal içerisinde gaz kabarcıkları oluşturur. Ergiyik metal içerisindeki hidrojenin çözücülüğü, basıncın artması ile artar. Gaz emmiş olan ergiyik, tabanı soğutulmuş olan başka bir pota içerisine aktarılır. Ergiyik metal, potanın soğutulmuş olan tabanından yukarı doğru ilerleyerek katılaşır. Sistemin tamamı kontrollü basınç altındaki gaz ile kuşatılmıştır. Katılaşma hızı 0.05-5 mm/sn oranındadır. Bu işlemin basit bir şematik diyagramı Şekil 3.26’da gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000, Çinici 2004).

Bu yöntemle üretilmiş malzemelerin gözenek morfolojisi büyük oranda, gaz içeriği, eriyik üzerindeki basınç, sıcaklık azaltma oranı ve yönü ve eriyiğin kimyasal bileşeni ile

belirlenmiştir. Gözenek çapları 10µm-10mm, gözenek uzunlukları 100µm-300mm ve gözeneklilik %5–75 oranındadır.

GASAR yönteminin pek çok işlem değişkeni olduğundan dolayı gözenek yapısının kontrolü ve optimizasyonu zordur. Bu işlem bazı güvenlik sorunları oluşturmaktadır.



Şekil 3.26 GASAR üretimi için gaz-metal ötektik katılaşması (Ashby *et al.* 2000)

Sonuç olarak bu malzemelerle üretilmiş ürünler pahalıdır ve buna rağmen GASAR malzemeler, büyük ilgi çekerek ilk yüksek gözenekli malzemeler arasında yer almıştır. Bu malzemeler laboratuvar ile sınırlı kalmış ve henüz ticari olarak kullanılabilir değildir (Ashby *et al.* 2000).

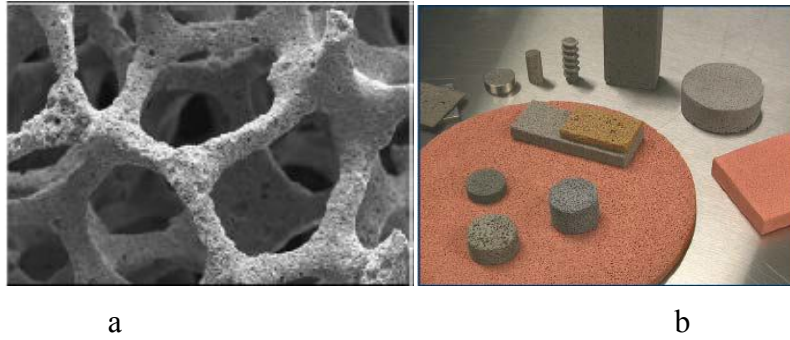
3.5.1.4. Dökme, Süzme ve Çoğaltma Tekniği ile Köpük Üretimi

Bu işlemle üretilmiş ürünler ticari olarak “Duocel” ismiyle bilinmektedir ve işlem, 1968’den beri California’daki Energy Research and Generation (ERG) Inc. tarafından

kullanılmaktadır. Bu metot Şekil 3.27’de şematik olarak gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000).

İşlemde ilk olarak, istenilen hücre boyutu ve göreceli yoğunluğa göre açık hücreli bir polimer köpük şablon kalıbı seçilmiştir. Bu şablon kalıp, bir kalıba dökülen çamur (seramik toz) ile kaplanabilir, daha sonra kurutulur ve kum kalıba gömülür. Kalıp daha sonra, ardından olumsuz bir köpük görüntüsü bırakarak, hem döküm malzemesinin sertleşmesi için ve hem de polimer şablonun ayrışması için pişirilmiştir. Kalıp daha sonra bir metal alaşımı ile doldurulmuş ve ardından soğutulmuştur. Eriyik süzme esnasında orta düzeyli bir basıncın kullanımı, bazı sıvı alaşımların akış direncinin üstesinden gelebilir. Kalıp malzemeleri, soğuma ve yönsel katılaşmadan sonra, orijinal polimer köpüğe denk metal geride bırakarak çıkartılır.

Bu metot, 1-5mm gözenek boyutları ve 0.05 gibi düşük göreceli yoğunluklu açık hücreli köpükler sağlar. Bu işlem, hassas döküm yapılabilecek hemen hemen her metalden köpükler üretilmesi için kullanılabilir (Ashby *et al.* 2000). University of Aachen’de elde edilen bazı alüminyum köpük örnekleri Resim 3.6’da görülmektedir (Ogan 2008).

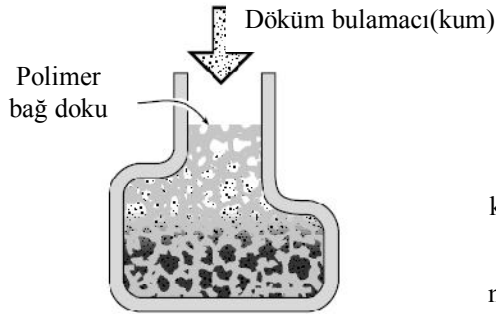


Resim 3.6 (a) : “Duocell” in görünüşü. (b) : Hassas dökümle üretilen parçalar (Ogan 2008)

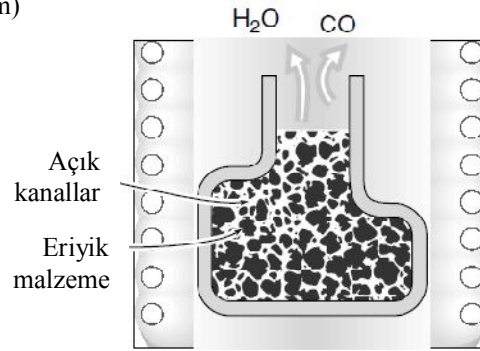
Duocel köpük, savunma ve havacılık uygulamaları gibi çeşitli sanayilerde kullanılmıştır. Köpük gözenekliliği %88-92 arasında değişir ve mevcut ortalama hücre boyutları 4-3-2-1 ve 0.5 mm’dir. Köpük için kullanılmış tipik alüminyum alaşımları 6101 ve A356’dır (Gergely *et al.* 2000).

AÇIK HÜCRELİ ERİYİK İÇİNDEKİ KATILAŞMA

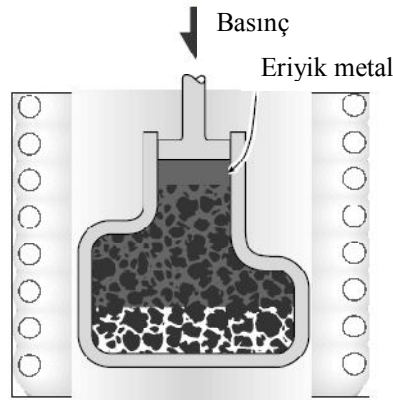
a) Kalıp



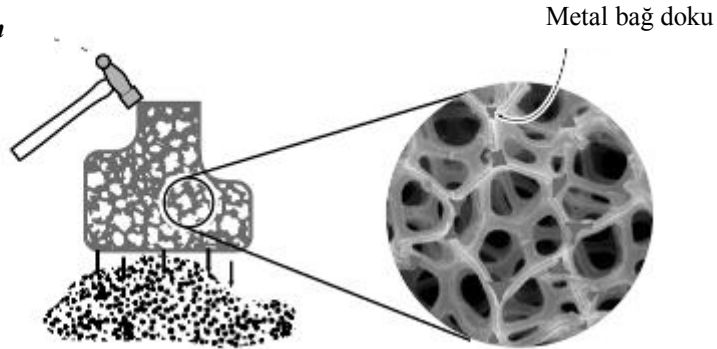
b) Yanma



c) Süzme



d) Eriyik malzemenin çıkarılması



Şekil 3.27 Açık hücreli köpükler üretmek için kullanılmış hassas döküm metodu (DUOCEL işlemi)
(Ashby *et al.* 2000)

3.5.1.5. Boşluk Tutucu Teknik İle Metalik Köpük Üretimi (Sentaktik Köpük)

Sentaktik köpükler ilk olarak 1960 yılında geliştirilmiş olup deniz altılarında kullanılmışlardır (Chittineni 2009). Sentaktik köpükler polimerik yada metal matris içine gömülü boşluk tutucu malzemeler veya seramik parçacıklara sahip kompozit

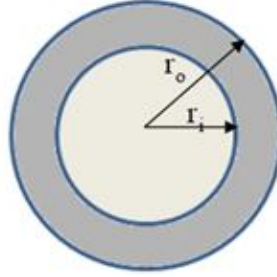
malzemelerdir (Egidio et al. 2000). Amerikan test ve malzeme birimine göre sentaktik köpükler reçine matris içinde boşluklu küresel dolgu maddeleri içeren malzeme olarak tanımlanmaktadır (Chittineni 2009). Sentaktik köpükler üretiminde matris içine içi boş küreler katılarak yoğunluklar düşürülür. Genellikle mikro yapıda katılan bu dolgu maddeleri cam, seramik, çelik veya alüminyum gibi malzemelerden yapılabilmekte ve farklı boyutlarda olabilmektedir (Ashida 1995, Gupta et al.2001)

Metal matrisli sentaktik köpükler nispeten yeni malzemelerdir (Zhao et al. 2008). Bu köpükler geleneksel metalik köpüklerden biraz farklıdır. Sentaktik köpüklerin diğer geleneksel köpüklere (infiltrasyon, ergiyik vb. yöntem ile üretilen) nazaran daha yüksek yoğunluklara sahip olmalarına rağmen izotropik özellikleri, yüksek basınç dayanımları iyi enerji emilimi ve yüksek mukavemet gibi avantajları vardır (Bahnhart 2001, Miyoshi et al. 2000, Marchi and Mortensen 2001, Wu et al.2007). Sentaktik köpüklerde matris olarak genellikle alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Araştırmacılar sentaktik köpük üretimi için boşluk tutucu malzeme ve şekil verme teknikleri kullanmaktadır.

Sentaktik köpük kompozitler düşük ısı iletkenlik ve yüksek spesifik mukavemete sahiptirler (Woldesenbet et al. 2005, Zhang and Ma 2009). Bu kompozitler çeşitli hassas ağırlık uygulamalar için sandviç yapılarda temel malzemesi olarak kullanılabilmekte, ayrıca yüksek özgül dayanımı, yüksek hasar toleransı, ısı ve elektrik yalıtımı ve mükemmel sönümleme özelliklerinden dolayı üstün özelliklere sahiptirler (Gupta 2002). Sentaktik köpüklerin geniş bir mekanik özelliğe sahip olmaları ile iyi bir titreşim sönümleme karakteristikleri sayesinde üretimlerde istenilen fonksiyonda (çok fonksiyonlu olarak) üretilabilmektedir.

Sentaktik köpükler bu özelliklerinden dolayı günümüzde uçak, uzay gemisi ve denizcilikte yapısal uygulamalarında kullanılmış olup uygulama alanları genişlemiş ve önemli malzemeler arasına girmişlerdir (Bardella and Genna 2001, Gupta et al. 2001). Dolgu malzemesi olarak Cenospere kullanılmış alüminyum matrisli sentaktik köpükler yangına dayanıklı ses ve darbe emici enerji gibi özelliklerinden dolayı denizaltılarda kullanılmıştır. Uygulamada matris yoğunluğu içersine katılan boşluk tutucu malzemenin

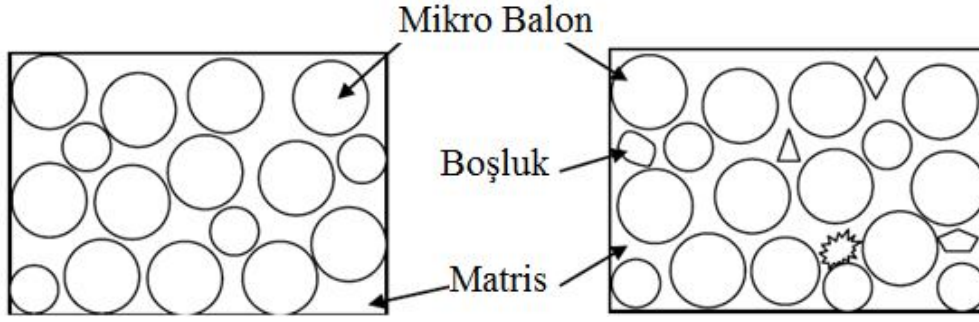
(mikrobalon) yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir (Gupta and Ricci 2006). Yapılan çalışmalara göre köpüğün yoğunluğu iki farklı şekilde değiştirilebilmektedir. Bunlardan birincisi boşluk tutucu malzeme miktarını değiştirerek veya farklı yoğunlukta boşluk tutucu malzeme kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. İkinci yöntemde sentaktik köpüğün özelliklerinde hiçbir değişiklik olmadan mikrobalonların yarıçapları ile ilgili olduğundan tasarımda daha fazla esneklik sağlamaktadır (Chittineni 2009).



şekil 3.28 Mikrobalon şematik gösterimi(Chittineni 2009)

Yarıçap oranı denklemde gösterildiği gibi mikro balonların dış yarıçapı ile i yarıçapı oranı olarak tanımlanır. Mikro balonların şematik görünüşü şekil 3.28’de gösterilmektedir. Dış yarıçap r_0 ve i yarıçap r_1 arasındaki fark duvar kalınlığı olarak adlandırılmaktadır (Chittineni 2009). Mikrobalonların yoğunluk ve mukavemeti yarıçap ile ters orantılıdır. Düşük duvar kalınlığı büyük i yarıçaplı balonlarda düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı sentaktik köpükler retiler (Gupta et al. 2004). Buna karşılık yüksek yoğunluklu mikro balonlar sentaktik köpüklere yüksek basma dayanımı ve daha düşük gerinim kırılması özelliklerini kazandırır (Woldesenbet et al.2005, Gupta and Woldesenbet 2003). Deniz ve havacılık yapısal uygulamaları göz önüne alındığında sentaktik köpüklerde kullanılan mikro balonların i yarıçaplarının köpüklerin mekanik özelliklerine etkileri üzerine oldukça fazla çalışmalar yapılmaktadır.

Sentaktik köpükler matris ve mikrobalonları olması sebebiyle iki fazlı yapılarıdır. Bu köpüklerin mikrobalonları içersinde boşluk olması sebebiyle kapalı gözenek olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak sentaktik köpük imalatı sırasında hava veya boşluk matris içersinde sıkışıp kalabilir. Matris içersinde hava veya boşlukların olması durumunda açık hücreli olarak adlandırılır ve böyle bir durumda sentaktik köpüklerde üç fazlı yapı oluşmaktadır. Sentaktik köpüklerin iki veya üç fazlı olması şekil 3.29’da şematik olarak gösterilmiştir (Chittineni 2009).



Şekil 3.29 Sentaktik köpüklerde iki veya üç fazlı olması durumunun şematik gösterimi (Chittineni 2009)

3.5.2. Toz Bazlı Metalik Köpük Üretimi

Hücreli metalik yapılar yapmak için erimiş bir metal yerine, tozlaşmış biçimdeki katı metaller kullanılmıştır. Toz, tüm işlem boyunca katı haldedir ve sadece bir sinterleme işlemi veya diğer katı hal işlemlerinden geçer. Bu, kapalı gözenek oluşumu eğilimine neden oluyorsa, yalnızca sıvı hal yüzey geriliminden beri ortaya çıkan hücreli yapısının morfolojisi için çok önemlidir. Oysaki sinterlenmiş gözenekli ürünler, sinter boyunları ile bağlanmış daha fazla veya daha az küresel parçacıklar, tipik olarak izole edilmiş açık hücreler gösterir. Günümüzde, tozlar veya fiberlerin kaybolan hacimlerinin sinterlenmesi, P/M sanayisinde belirlenmiş bir üretim yöntemi ve gözenekli metaller elde etmek için en basit yoldur. Daha ileri teknolojilerde, bir toz sıkıştırması içindeki gazın tutulmasıyla, içi boş kürecikler veya boşluk tutan doldurucu malzemeler kullanarak veya finalde, metal toz çamurlarının köpükleştirilmesiyle gözeneklilik oluşturabilir (Banhart 2001).

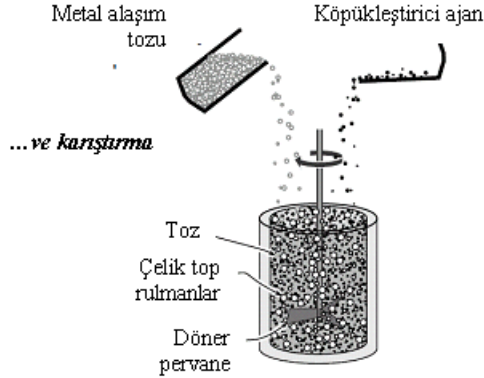
3.5.2.1. Öncü Malzemeler Karıştırılmış Tozun Pişirilmesi ile Gözeneklendirme

Köpükleştirici ajanlar, karıştırma ve tozların birleştirilmesi ile katı haldeki metaller içine ilave edilebilir. En fazla kullanılan köpükleştirici ajan olan titanyum hidrat, yaklaşık 465°C’de ayrışmaya başlar ki o saf alüminyum (660°C) ve onun alaşımlarının ergime noktasının çok altındadır. Bu, toz metalürjisi işlemi kullanılarak katı alüminyum içindeki köpükleştirici ajanın dağıtılması ile bir köpük oluşumuna imkân sağlar ve daha sonra metalin kısmi veya tam erimesi, kabarcıkların gelişimine imkân sağlayan ve gaz salınımına neden olan yeterli sıcaklığa çıkarılır. Bu işlem Şekil 3.30’de şematik olarak

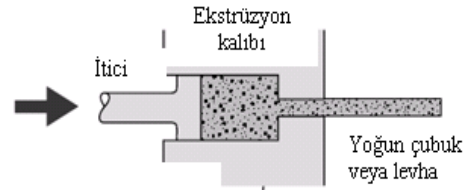
gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000).

YARI-KATI İÇİNDE PARÇACIK AYRIŞMASI

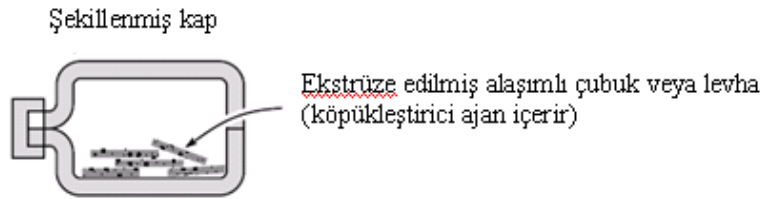
a) İçeriklerin Seçilmesi



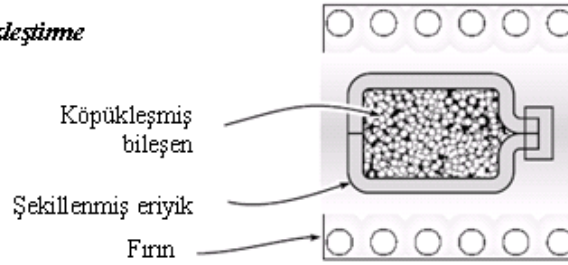
b) Pekleşme & Ekstrüzyon



c) Şekillenmiş eriyik



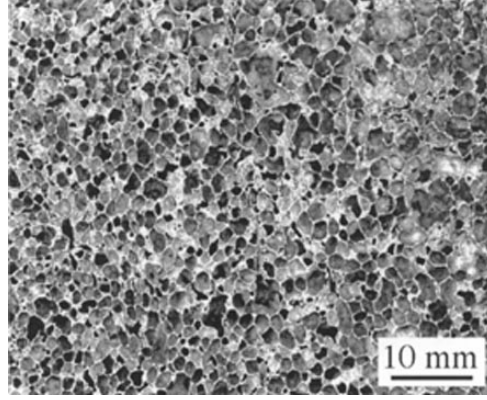
d) Köpükleştime



Şekil 3.30 Yarı-katı içindeki gaz salan parçacıklar ile üretilen metal köpükler için kullanılmış toz metalürji adımlarının sırası (Ashby *et al.* 2000)

İşlem, bir alüminyum alaşımı tozu ile bir köpükleştirici ajan parçacıklarının birleştirilmesi ile başlar. İçerikler iyice karıştırıldıktan sonra toz, soğuk olarak sıkıştırılır ve daha sonra teoriksel yoğunluğa yakın levha veya bir çubuk şekline ekstrüze edilir. Bu “öncü” malzeme, küçük parçalar halinde doğranmış, ağzı kapalı bölünmüş bir kalıp içerisine yerleştirilmiş ve alaşım katılaşma sıcaklığının biraz üzerine kadar ısıtılmıştır. Titanyum hidrat daha sonra ayrılmış, yüksek bir basınç ile boşluklar oluşturmuştur. Bu, yarı-katı akış ve şişen alüminyum ile genişleyerek, kalıbı dolduran bir köpük oluşturur.

İşlem, 0.08 gibi düşük bir göreceli yoğunluklar ve kap ile aynı şekle benzer bileşenler şeklinde sonuçlanır. Köpük, 1-5mm çapındaki oranlar ile kapalı hücrelere sahiptir. Resim 3.7’de bu işlemle üretilmiş bir alüminyum alaşımın optik mikrografi gösterilmiştir (Ashby *et al.* 2000, Gergely *et al.* 2000).

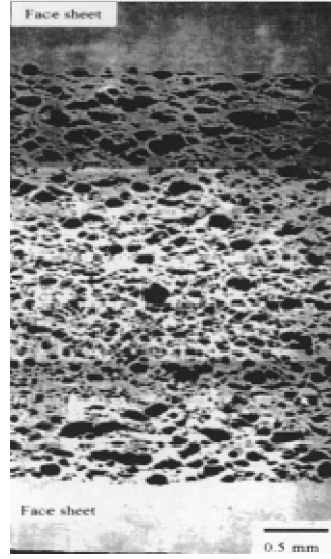


Resim 3.7 Alulight işlemi kullanılarak bir toz yöntemi öncüden pişirilmiş köpükleşmiş alüminyum alaşımdan bir bölümün optik mikrografi (Gergely *et al.* 2000)

Bu metot, alüminyum ve alaşımları ile sınırlı değildir. Kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal ve alaşımları, işlem parametreleri ve köpürtücü maddelerle ayrıştırılarak metalik köpük elde edilebilir. Köpürtücü madde olarak TiH_2 gibi metal hidrürlerin yanında karbonatlar (kalsiyum karbonat, potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat), hidratlar (alüminyum sülfat hidrat, alüminyum hidroksit) veya hızlıca buharlaşan maddeler (cıva bileşikleri veya pulverize edilmiş organik maddeler) kullanılabilir (Çinici 2004).

3.5.2.2. Düşük Yoğunluklu Çekirdeğin Gaz Kaynaklı Büyümesi ile Gözeneklendirme

Düşük yoğunluklu çekirdek (LDC) işlemi, McDonnell-Douglas Şirketi tarafından patenti alınmış, ayrılmaz gözenekli cisimlerin (ilk olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı) üretilmesi için bir metottur. Bu metodun gelişimi, benzer mekaniksel performans ile maliyet de geleneksel bal peteği yapılar ile rekabet edebilecek bir malzeme için talep ile yönlendirilmiştir. Resim 3.8’de bir LDC sandviç levha kesiti gösterilmiştir (Martin 1996, Gergely *et al.* 2000).

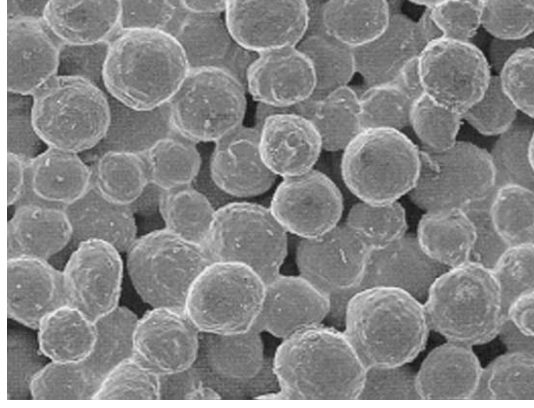


Resim 3.8 Gazın genişlemesi ile basınçlandırılması tarafından köpükleştirilmiş bir çekirdek ile Ti-6Al-4V alaşımının LDC sandviç levhası boyunca bir bölümün optik mikrografı (Gergely *et al.* 2000)

Bu yöntemde toz, gözenek seviyesinin yaklaşık %2 seviyesine kadar birleştirilir, gözenekler yüksek basınçlı argon ile doldurulmuştur. Daha sonra HIP malzeme, geleneksel teknikler kullanılarak net şekle yakın bir ürünün içine sıcak olarak işlenmiştir. Sonunda, malzeme, uygun bir süre (6-24 saat) için 0.6Tm'den daha yüksek sıcaklıklarda tavlınmıştır. Bu, alaşımın yumuşamasına yol açar ve hapsolmuş gazın basıncını daha da artırır. Bu da, malzemenin genişlemesine yol açar, yaklaşık %20-40 gibi çekirdek gözeneklilik seviyesi ile sandviç bir yapı ortaya çıkarır. Bu yolla, boyutları 2000x1200x4 mm'ye kadar LDC malzeme levhaları üretilmiştir. Tipik çekirdek boyutları, 10-100 μm oranındadır (Gergely *et al.* 2000).

3.5.2.3. Toz ve Fiber Sinterleyerek Köpük Üretimi

Gözenekli yapıların üretimi genelde, toz miktarı ve hazırlanması, sıkıştırma veya döküm ve sinterleme gibi çeşitli adımlar içerir. Sinter sıcaklıkları yaklaşık 820°C civarındadır ve %20-50 oranında gözeneklilikler elde edilebilmesine rağmen dayanımları nispeten düşüktür. Böyle bir malzeme Resim 3.9'da gösterilmiştir (Banhart 2001).



Resim 3.9 Yaklaşık 100 μ m çapındaki parçacıklardan yapılmış sinterlenmiş bronzun gözenekleri (Banhart 2001).

Sinterleme öncesi tozlara, aksenel kalıp sıkıştırılması, izostatik presleme veya merdaneli haddeleme yapmak onların temas noktalarındaki parçacıklara soğuk kaynak yapılması ile ham parçacığın dayanımı arttırılır. Sonraki sinterleme, dayanımı ve yoğunluğu daha da arttırır ve çok ince bir gözeneklilik ile karakterize edilmiş parçalar üretilebilir.

Alüminyum alaşımlı tozlar veya tanelerden elde edilen gözenekli metaller, alüminyumun genellikle, birlikte sinterlemeden gelen parçacıkları önleyen yoğun bir oksit tabakası ile çevrilmiş olması sebebiyle diğer metallerin kullanımından daha zordur. Bu sorunu aşabilmek için ilk olarak, parçacıklar arasında oluşan metalik bağları ve oksit filmleri kırarak presleme yaparak, bu esnada toz veya tanelerin karışımı deforme edilebilir. Alternatif olarak, 595-625°C de sinterleme esnasında düşük bir eriyik ötektik alaşım formu olarak örneğin bakır, silikon veya magnezyum sinterleme yardımcıları kullanılabilir (Banhart 2001).

Fiber sinterleme, yaklaşık %95'e kadar gözeneklilik seviyesi ile yüksek gözenekli malzemelerin üretimi için kullanılmıştır. Lifli yapılar, tozlardan hazırlanmış gözenekli malzemeler ile karşılaştırıldığında şu avantajlara sahiptir (Gergely *et al.* 2000):

- Gözeneklilik, çok geniş sınırlar içerisinde kontrol edilebilir,
- Oldukça yüksek dayanım ve süneklik seviyelerine ulaşılabilir,
- Ürünler, yüksek geçirgenliğe sahip olabilir
- Bu tip lifli ağlar, iyi enerji emme karakteristikleri sergileyebilirler.

Metal fiberlerden üretilen gözenekli malzemeler pahalıya mal olmuştur. Bunun temel sebebi ise fiber hazırlama maliyetidir (Gergely *et al.* 2000).

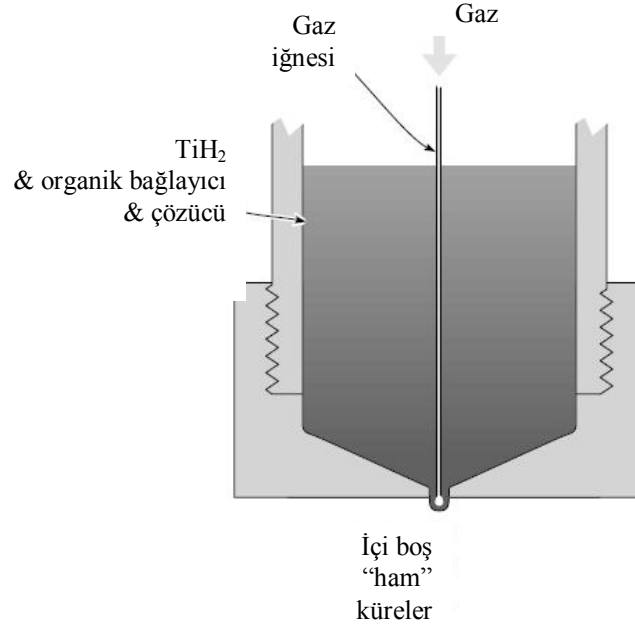
3.5.2.4. İçi Boş Kürelerin Sinterlenmesiyle Gözeneklendirme

İçi boş küreler (200µm-10mm çapı, 1µm-1mm duvar kalınlığında), dağıtılmış parçacıklar, bir bağlayıcı, film bir stabilize edici öncü ve titreşen gaz içsel jet içerisinde geçirilirken eş eksenel bir nozulun dışsal jet içerisindeki sürekli bir sıvı fazı içeren bir bulamacın enjekte edilmesi ile yapılabilir. Bulamaç malzemesi silindirden içi boş küreler şeklinde, yüzey gerilimi ve hidrostatik kuvvetler altında periyodik olarak ısıran nozuldan ayrılır. Bunlar, sıvı ve uçucu malzemelerin çıkarılmasıyla sertleştirilir. İçi boş ham mikro kürecikler bu yolla ağırlıklı olarak, dağıtılmış parçacıklar ve bağlayıcılar oluşturularak hazırlanmıştır. Potansiyel olarak daha ucuz olan içi boş küreler elde etme yolu, atomize edilmiş gaz ile rutin olarak üretilmiş tozdan onları ayırmaktadır (Gergely *et al.* 2000).

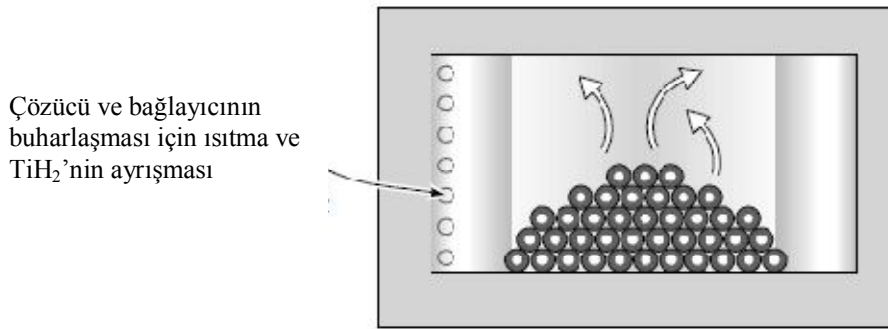
Diğer bir yöntemde içi boş küreler “atomizasyon” çamuru yardımıyla üretilip, paslanmaz çelik gözenekli yapılar(gözeneklilik seviyesi %80-87) üretmek için Georgia Teknoloji Enstitüsü’nde istihdam edilmiştir. Küreler, çözücüleri çıkarmak ve bağlayıcıyı buharlaştırmak için ısıtılmış, uzun bir damla kulesinde onların uçması esnasında buharlaşması ile sertleştirilmiştir. Son bir ısıtma işlemle metal hidrat, içi boş metal küreler bırakarak ayrılmıştır. Şekil 3.31’de bu işlem şematik olarak gösterilmiştir (Gergely *et al.* 2000, Ashby *et al.* 2000).

İÇİ BOŞ KÜRESEL TOZ SENTEZİ

a) İçi boş kürelerin bulamaca dökümü



b) İçi boş kürelerin metalizasyonu



Şekil 3.31 Açık ve kapalı hücreli gözeneklilik ile bir köpük oluşturmak ve içi boş küreler oluşturmak için Georgia Tech yöntemi (Ashby *et al.* 2000)

3.5.2.5. Sinterleme ve Çözme Tekniği (SDP) İle Metalik Köpük Üretimi

Metalik köpük üretiminde ergiyik gaz enjeksiyon, döküm ve infiltrasyon yöntemi, toz metalürjisi, ergitme yöntemi gibi birçok üretim yöntemleri vardır (Michailidis and Stergioudi 2011).

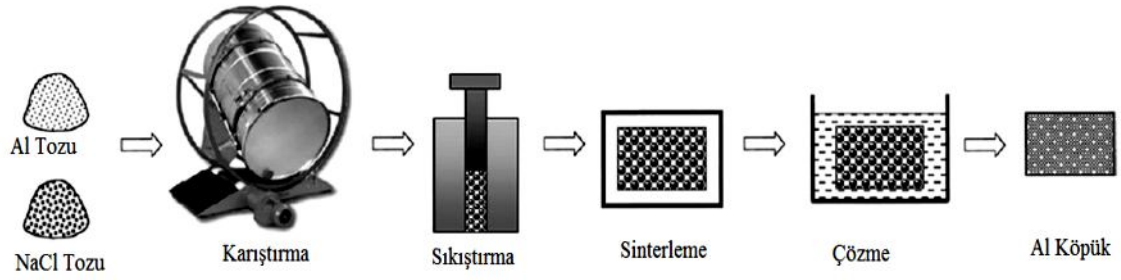
Ancak toz metalurjisi yöntemi üretimdeki esnekliğinden dolayı metalik köpük üretiminde tasarımcılar tarafından en çok tercih edilen yöntemler arasındadır (Michailidis and Stergioudi 2011, Jiang, et al. 2005b).

Sinterleme ve çözme işlemlerini içeren SDP adı verilen yeni bir köpük üretim tekniğini geliştirmiştir. SDP yönteminde boşluk tutucu malzeme kullanılarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilir. Daha sonra boşluk tutucu malzeme çözdürülme işlemi gerçekleştirilir ve açık hücreli metalik köpük elde edilir. Yöntemi ilk olarak Kuchek 1966 gerçekleştirmiş olup son yıllarda benzer çalışmalar yapılmıştır. (Li et al. 2003, Gaillard et al. 2004, Zhao and Sun 2001). Açık gözenek yapısı sebebiyle filtreler, ısı değiştiricileri gibi bazı uygulamalarda kullanım alanı bulabilir (Hussain and Suffin 2011).

Bu yöntem üzerine son zamanlarda birçok araştırma yapılmış olup saf Al köpük üretimi için NaCl yerine şeker kamışından üretilmiş kristaller, boşluk tutucu malzeme kullanmışlardır (Michailidis and Stergioudi 2011). Mustapha ve arkadaşları saf Al tozu ve NaCl kullanarak metalik köpük üretiminde sinterleme sırasındaki basınç uygulamanın etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Deneyler sonucunda SDP yöntemi ile üretilen fabrikasyon köpüklerden daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları sonucuna varmışlardır (Mustapha et al. 2011). Jiang ve arkadaşları ise SDP yöntemi ile al köpük üretiminde infiltrasyon ve döküm yöntemi kullanmış olup üretmiş olduğu metalik köpüğün mekanik özelliklerinin daha düşük olabileceği sonucuna varmıştır (Jiang et al. 2005).. Benzer bir çalışmada Al köpüklerdeki basınç ve deformasyon işlemleri üzerine araştırma yapılmış olup metalik köpüklerdeki gözenek şekli gözenek deformasyonunu etkilediği sonucuna varmışlardır (Hussain and Suffin 2011).

Metalik köpük üretiminde SDP yönteminin birçok avantajı vardır. Örnek olarak gözenek boyutu, gözenek morfolojisi, gözenek oranı gibi bazı özellikler sayılabilir. Böylece gözenek boyutları istenilen ölçüde tek bir adımda gerçekleştirilebilir (Jiang et al. 2005b). SDP yönteminin dezavantajları ise NaCl tozlarının yapıdan tamamen uzaklaştırılamaması ve metalin korozyona uğraması gibi kusurları vardır (Hussain and Suffin 2011).

Bu yöntem basit bir şekilde anlatılacak olursa Al ve NaCl tozları karıştırılarak yapı içerisinde sıkıştırılır. Sıkıştırılan preform Al ergime sıcaklığının biraz altındaki bir sıcaklıkta sinterlenerek alüminyumun hücre yapısı oluşturulur. Daha sonra preform su içerisinde çözdürülerek açık gözenekli yapı elde edilir (Şekil 3.36) (Moloodi and Raiszadeh 2011).



Şekil 3.32 SDP tekniği ile metalik köpük üretimi (Moloodi and Raiszadeh 2011)

İlk aşamada farklı boyutlarda gözenek oluşturabilmek için tuzlar eleklerden geçirilmiştir. Tuz ile Al tozları karıştırılmadan önce NaCl tozları 110 °C civarında bir saat ve daha sonra 400 °C de 45 dk fırın içerisinde ısıtılmıştır (Sun and Zhao 2005).

Sinterleme sürecinde Al tozlarının oksitlenmesini önlemek için farklı bir gaz ortamı oluşturulabilir, Vakum ortamında sinterleme yapılabilir veya Al tozu içersine Mg tozu karıştırılarak oksitlenme önlenabilir. % 0,15 Mg tozu karıştırmak sinterleme işlemini kolaylaştırmaktadır (Shaffer et al. 2001).

İlk önce Al ve Mg tozları homojen olarak karıştırılır ve sonrasında NaCl tozları içersine atılarak homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılma işlemi gerçekleştirilir. NaCl tozları yapı içersine % 30–70 arasında karıştırılabilir. Tozların sıkıştırılma işleminde sıcak veya soğuk presleme işlemi yapılabilir. Daha sonra karışım kalıp içersine konularak 100–600 MPa basınç aralığında hidrolik pres altında sıkıştırılır. Presleme işleminden sonra sinterleme işlemine geçilir. Sinterleme işleminde önceden ısıtılmış elektrikli fırınlar kullanılır. Fırın sıcaklığı 650–700 °C sıcaklıklar seçildiği zaman (Al ergime 660 °C) Metal sıvı hale gelerek NaCl arasındaki boşlukları tamamen

dolduracaktır. Sıcaklık daha düşük bir değerde seçilecek olursa sinterleme uzun zaman alacak ve oksidasyona neden olacaktır. Sıcaklık aşırı derecede yüksek olduğu zaman ise sinterleme süresi içerisinde yapı üzerinde baloncuklar oluşarak yapıdan dışarı doğru akacaktır. Deneylerde sinterleme aralığı sıcaklığa bağlı olarak 2–20 saat arasında değişmektedir. Sinterleme normal atmosfer ortamında gerçekleştirileceği zaman numune bir kalıp içersine yerleştirilerek her iki ucu oksitlenmeyi önlemek için kapatılır. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra soğutma işlemi fırın ortamından çıkarılmış numune hava püskürtülerek soğutma işlemi gerçekleştirilir. Soğutma işleminden sonra sıcak bir su içersine konularak tuzların çözme işlemi gerçekleştirilir. Tuzları tamamen ortadan kaldırmak için ultrasonik yıkayıcı kullanılabilir. Tüm tuzun çözülebilmesi uzun bir süre alabilir. Tuz çözme işlemi tamamlandıktan sonra etanol ile yıkanarak kurutma işlemi gerçekleştirilir (Hussain and Suffin 2011).

4. MATERYAL ve METOT

Deneysel çalışmalarda üç farklı yöntem ile metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimde kullanılan yöntemlerin üretim şekilleri incelenmiş ve üretilen köpüklerin otomotiv sektöründe kullanılabilirliği hakkında sonuçlar çıkarılmaya çalışılmıştır. Birinci yöntem olan toz metalürjisi yönteminden çözünen preform tekniği kullanılarak metal köpük üretim incelenmiştir. Çözünen preform malzemesi olarak farklı şekil ve morfolojiye sahip NaCl ve Na₂CO₃ taneleri kullanılmıştır. Köpük metali olarak ise Alüminyum ve Çinko metalleri kullanılmıştır.

İkinci yöntemde ergitme ile metalik köpük üretimi yapılmıştır. Üretimde köpük metali olarak alüminyum kullanılmış, köpürtücü ajan olarak mermer tozu (CaCO₃) kullanılmıştır. Deneylerde köpürtücü ajan miktarları tespit edilmeye çalışılmıştır. Mermer tozu miktarı tespit edildikten sonra mermer tozunun yanında SiC ve Al₂O₃ takviye olarak kullanılmış olup bunun köpürmeye etkileri incelenmiştir.

Üçüncü yöntemde ise boşluk tutucu malzemeler ve ergitme ile metalik köpük üretilmiştir. Boşluk tutucu olarak geliştirilmiş silika jeller kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda geliştirilen silika jeller eleklerden geçirilerek tane boyutlarına göre sınıflandırılmışlardır. Sınıflandırılan silika jeller arasına ergitilmiş Al ve Al-12Si alaşımı vakum döküm yöntemi ile sızdırılarak metalik köpük üretimi gerçekleştirilmiştir.

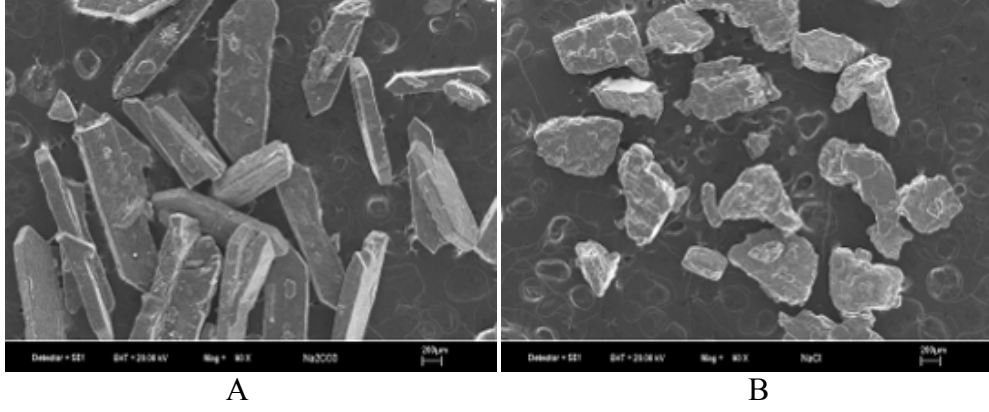
4.1 Toz Metalürjisi Yöntemi İle Metalik Köpük Üretimi

Deneylerde kullanılan cihaz ve malzemeler hakkında aşağıda ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir.

4.1.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler

Deneylerde A.Aesar firmasına ait -40+325 mesh boyutlarında Alüminyum kompozisyonu ve -100 mesh Çinko metal tozları kullanılmıştır. NaCl olarak mutfak tipi kaya tuzu kullanılmıştır. Na₂CO₃ ise proje kapsamında temin edilmiştir. Farklı tane

morfolojisine sahip NaCl ve Na₂CO₃ tanelerinin SEM görüntüleri Resim 4.1’de gösterilmiştir. Tuz taneleri eş eksenli iken, Na₂CO₃ taneleri çubuksu bir yapıya sahip olduğu görülmektedir



Resim 4.1. SEM’de çekilmiş tane morfolojileri A: Na₂CO₃, B: NaCl.

4.1.2 Metalik Köpük Üretiminde Kullanılan Cihazlar

Metalik köpük üretiminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus köpürme işlemi tamamlandıktan sonra numunenin hızla fırından çıkartılıp soğutulma işlemine geçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle üretimlerde arabalı bir fırın tasarlanmıştır.

Fırın PC 442/6 PID kontrollü olup maksimum sıcaklığı 1300 °C’ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca arka kısmında bir gaz giriş kanalı sayesinde istenilen durumlarda fırın içersinde farklı gaz ortamları oluşturulabilmektedir.

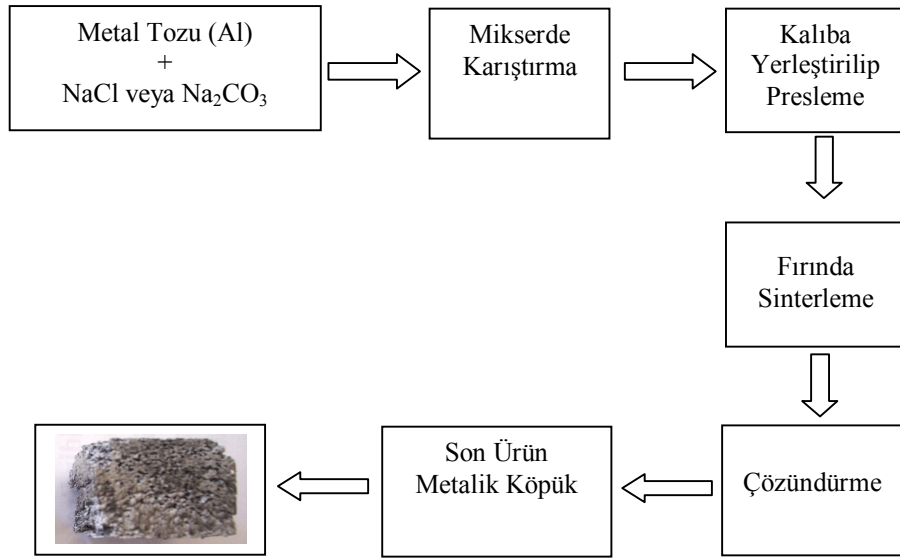
Terazi hem toz tartımında hemde ergitme işlemlerinden önce alüminyum numunelerin tartımında kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan terazi 200 g kapasitede ve 0,001 g hassasiyete sahiptir.

Manyetik karıştırma cihazı, çözünen proform tekniği ile metalik köpük üretiminde, tuzların çözünme hızının kontrolünde kullanılmıştır. Maksimum 340 °C sıcaklık ayarlı, 400 W ısıtıcı gücünde ve 0–1500 rpm devir aralığında çalışabilen, 20 lt kapasite özelliklerine sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı tuzların çözünme hızı çok rahatlıkla kontrol edilebilmektedir.

Numune üretiminde soğuk presleme yapılmıştır. Üretimde kullanılan pres otomatik ve manüel ilerleme kontrollü ayrıca maksimum 200 bar basınca kadar ayarlanabilmektedir.

4.1.3 Toz Metalürjisi Yöntemi ve Çözünen Preform Tekniği İle Metalik Köpük Üretimi

Metalik köpük üretiminde kullanılan fırın hakkında bilgi Bölüm 4.1.2 de verilmiştir. Toz metalürjisi ile üretilecek olan metalik köpüklerde izlenecek yöntem ve işlem akışı şematik olarak Şekil 4.1’de görülmektedir.



Şekil 4.1. Toz metalürjisi yönteminde izlenen işlem sırası

NaCl taneleri öncelikle kırma ve eleme işleminden geçirilmiştir. Eleme sonucunda tuz taneleri elekler yardımıyla (-2 mm, +1 mm) ve (-1 mm, + 500 µm) boyut aralıklarına ayrılmış ve daha sonra 100 °C’ de 24 saat üzerinde nem birikintileri kalmaması için kurutulmuştur. Na₂CO₃ taneleri elenerek (-1 mm, + 500 µm) boyut aralığına getirilmiştir. 30 gramlık (Al Tozu + Tuz) numuneler hazırlanmıştır. Bu amaçla metalik tozlar, NaCl ve Na₂CO₃ ile farklı oranlarda karıştırılmıştır. Tozların karıştırma işleminde herhangi bir cihaz kullanmadan 10 dk. süre ile boş bir kap içersine konularak elde karıştırılmıştır. Tartılan metal tozları ve tuzlar karıştırıldıktan sonra 150 bar sabit basınç altında çelik kalıp içerisinde kuru presleme tekniği ile şekillendirilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelerin sinterleme öncesinde ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür.

Şekillendirilen alüminyum esaslı numuneler sabit sıcaklıkta (630 °C) 3 saat süreyle sinterlenmiştir. Fırın ısıtma hızı 5 °C/dk olarak alınmıştır. Çinko esaslı numuneler ise 300 °C’de 3 saat süreyle yine aynı ısıtma hızıyla sinterlenmiştir. Sinterleme normal atmosfer şartları altında yapılmıştır.

Sinterleme sonrasında numuneler içerisindeki NaCl ve Na₂CO₃’ü çözündürme işlemi için 70-75 °C’deki sıcak suya daldırılmıştır. Bu amaçla ısıtıcılı manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Her bir numune için 100 dakikalık çözünme süresi uygulanmıştır. Sabit su hacmi olarak 600 ml kullanılmıştır. Çözünme işleminin verimini arttırmak için karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma devri olarak 210 devir/dk hız uygulanmıştır (Resim 4.2).



Resim 4.2. Çözündürme düzeneği

4.2. Köpürtücü Ajan İlavesi İle Metalik Köpük Üretimi

4.2.1. Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler

Ergitme yönteminde ise % 99,7 saflığında Etial 7 külçeler kullanılmıştır. Külçeler ilk önce ergitme potasına göre yaklaşık 400–600 g arasında şerit testere yardımıyla kesilmiş daha sonra ergimiş alüminyum 200 g’lık küçük potalara dökülerek gram ayarlaması yapılmıştır. Numunelerde sürekli olarak sabit alüminyum ağırlığı olan 200g’lık alüminyum parçalar kullanılmıştır. Malzemenin spektral analizi Çizelge 4.1 de verilmiştir.

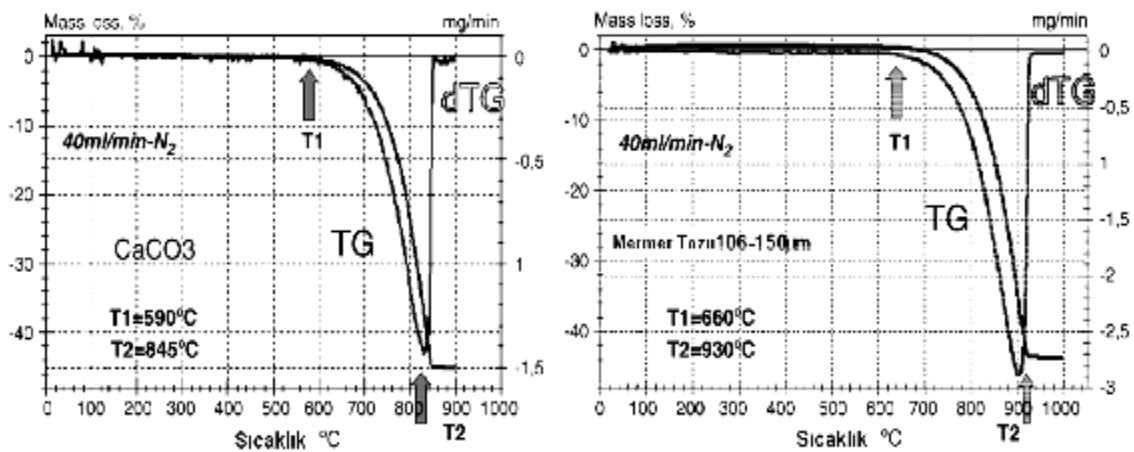
Çizelge 4.1 Etial-7 külçelerin spektral analizleri

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
Etial- 7	%0,25	%0,40	%0,05	---	---	---	---

Üretim sırasında köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozu içerisinde yüksek oranda kalsit minerali vardır. Kalsit; karbonatlı kayaçları oluşturan ve kimyasal formülü CaCO_3 olan endüstriyel bir mineraldir. Çeşitli şekillerde kristalleşebilen mineral, camsı parlaklıkta ve renksiz saydam yapıdadır. Öğütüldüğünde beyaz renkli bir toz elde edilir. Kalker ya da kireç taşı olarak adlandırılan karbonatlı kayaçlar suyun doğrudan kristalleşmesi veya deniz canlılarının kabuklarının birikip sıkışması ile oluşmuştur (İnt. Kyn. 4) .

Kalsiyum karbonatın doğada bulunduğu kayaçlar içinde en yoğun bilinenleri, aragonit, kalsit, vaterit, tebeşir, kireç taşı, mermer ve travertendir (İnt. Kyn. 5). Afyonkarahisar bölgesinde de oldukça geniş bir alanda mermer bulunduğu için kalsiyum karbonat yerine köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanılmıştır.

Şekil 4.2’ de kalsiyum karbonat ve mermer tozunun TG eğrileri görülmektedir. CaCO_3 590 °C de karbondioksit gazını vermeye başlayıp 845 °C de bitmektedir. Mermer tozu ise 660 °C de başlayıp 930 °C bitmektedir.



Şekil 4.2. Sentetik kalsiyum karbonat ve mermer tozunun termogravimetrik (Cambronero et al. 2005)

Grafikten de görüleceği gibi mermer tozu karbondioksit gazını daha yüksek sıcaklıkta bırakmakta ve daha uzun süre de bitmektedir. Üretimlerde DTA/TG eğrileri dikkate alınarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan mermer tozu eleklerden geçirilerek sınıflara ayrılmıştır. Mermer tozları 1-250 mikron, 250-500 mikron ve 500-1000 mikron arası olmak üzere üç farklı boyutta köpürtücü ajan kullanılmıştır.

Köpürtücü ajan tekniğinde homojen bir gözenek oluşumunu sağlamak için kullanılan diğer tozlar ise seramik tozlarıdır. Bu tozlardan metalik köpük teknolojisinde en çok kullanılanları SiC ve Al₂O₃ dür. Tozlar Sigma Aldric firmasından temin edilmiş olup SiC tane boyutu 200–450 mesh (75-35 mikron), Al₂O₃ tozunun tane boyutu ise 200-325 mesh (75-45 mikron) dir. Özellikle SiC içerside barındırdığı silisyum sayesinde alüminyuma bir miktar akıcılık katmaktadır. Ayrıca katılan katkı maddeleri gaz kabarcıkların toplanmasında etkili bir katalizör olarak da görev yapmaktadır. Bu katkı maddeleri ile gözenekler daha homojen olmaktadır.

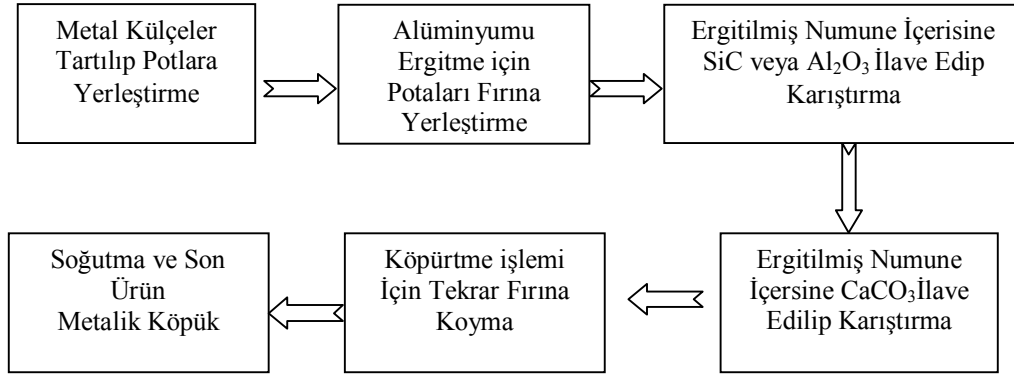
4.2.2. Metalik Köpük Üretimi İçin Kullanılan Cihazlar

Köpürtücü ajan ilavesi ile metalik köpük üretimi için kullanılan fırın Bölüm 4.1.2 de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ergimiş alüminyum içersine katılan katkı maddeleri (SiC veya Al₂O₃) ve Mermer tozlarının homojen karıştırılabilmesi için hassas bir şekilde devir ayarının yapılabilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda alınan numune karıştırma cihazı 60–2000 rpm devir aralığında çalışan analog devir ayarlı İKA marka karıştırıcı kullanılmıştır.

Üretimlerde SiC ve Metal olmak üzere iki çeşit pota kullanılmıştır. SiC potalar daha çok alüminyum ve alaşımlarının ergitme işlemlerinde kullanılmıştır. Metal potalar ise köpük üretim işlemlerinde kullanılmıştır.

4.2.3. Köpürtücü Ajan Yöntemi ile Metalik Köpük Üretim Prosesi

Şekil 4.3’de tez kapsamında ergiyik yönteminde izlenen yol şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.3 Ergitme yönteminde izlenecek yolun şematik gösterimi

Numune üretimi için Al miktarı olarak sabit 200 g. ağırlık seçilmiştir. Köpük üretiminde kullanılacak olan tüm malzemeler hassas bir şekilde terazide tartılmıştır. Resim 4.3’de ergitilmiş Al içersine katılmak üzere tozların hazırlık aşaması görülmektedir.



Resim 4.3 Toz içeriklerin hazırlanması

Daha sonra ergitilmek üzere 800 °C’deki önceden ısıtılmış ergitme potaları içersine konularak fırına bırakılmıştır.

Fırın içersindeki potalarda eriyen Al dışarı alınarak içine köpürtücü ajan ve takviye elamanları dökülüp bir mikser aracılığıyla 40 s. süreyle karıştırılmıştır. Resim 4.4’de ergitme işlemi sonunda tozlar katılmak üzere fırında dışarıya alınan pota içersindeki alüminyum görülmektedir.



Resim 4.4 Köpürtme işlemi öncesindeki ergimiş alüminyum

Karıştırma tamamlandıktan sonra köpürme işlemini gerçekleştirmek üzere tekrar fırına konulmuştur. Fırında yaklaşık 10 dk. bekledikten sonra elde edilen ürün havada soğumaya bırakılmıştır.

4.3. Vakum Döküm Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi

4.3.1 Deneylerde Kullanılan Sarf Malzemeler

Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpük için %99,7 saflığındaki alüminyum (Etial-7) ve Al-12Si alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan metalik malzemelerin spektral analizleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Etial-7 ve Al-12Si külçelerin spektral analizleri

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
Al-12Si	%12,33	%0,161	% 0,0085	%0,0041	%0,158	%0,00097	%0,0038
Etial- 7	% 0,25	% 0,40	% 0,05	---	---	---	---

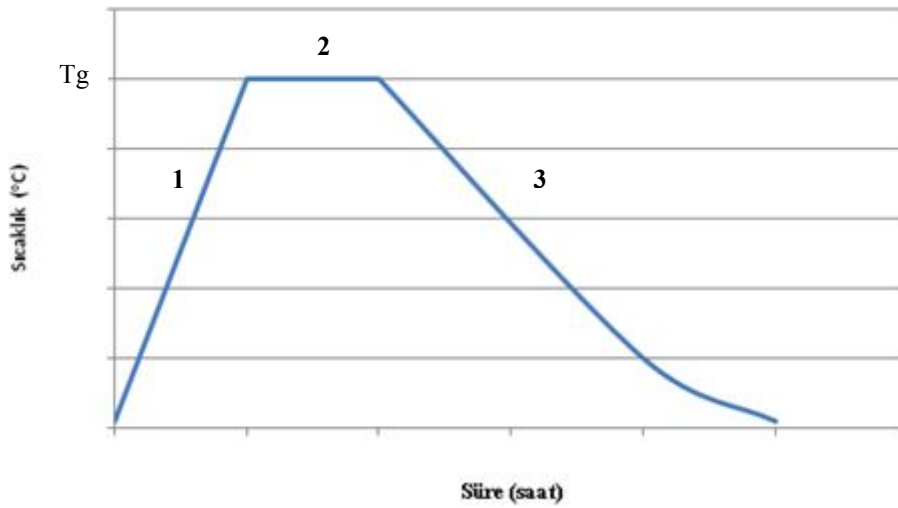
Çözünmeyen tip boşluk tutucu malzeme üretmek için Damla Kimya Ltd. Şti. tarafından sağlanan 1-3mm boyutunda beyaz silika jel kullanılmıştır. Silika Jel köpük üretiminden önce farklı sıcaklıklarda ısıtılma işleminden geçirilerek yoğunluğu azaltılmıştır. Silika jel küreleri 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C’ye kadar standart fırın rejimi ile ısıtılarak

genleşmeleri sağlanmıştır. Resim 4.5’ de işlem öncesi ve sonrasındaki paslanmaz çelik kab içerisindeki silikajeller görülmektedir.



Resim 4.5 Silikajel görüntüsü

Uygulanan ısıtma ve soğutma rejim grafiği Şekil 4.4’de görülmektedir. Döküm işlemine geçilmeden önce gözenek yerinde hacim oluşturacak malzeme olarak kullanılacak ham silika jeller bir ön işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem için, ham silika jel 300’er g. miktarlar ile bir paslanmaz çelik potanın içerisine yerleştirilmiştir.



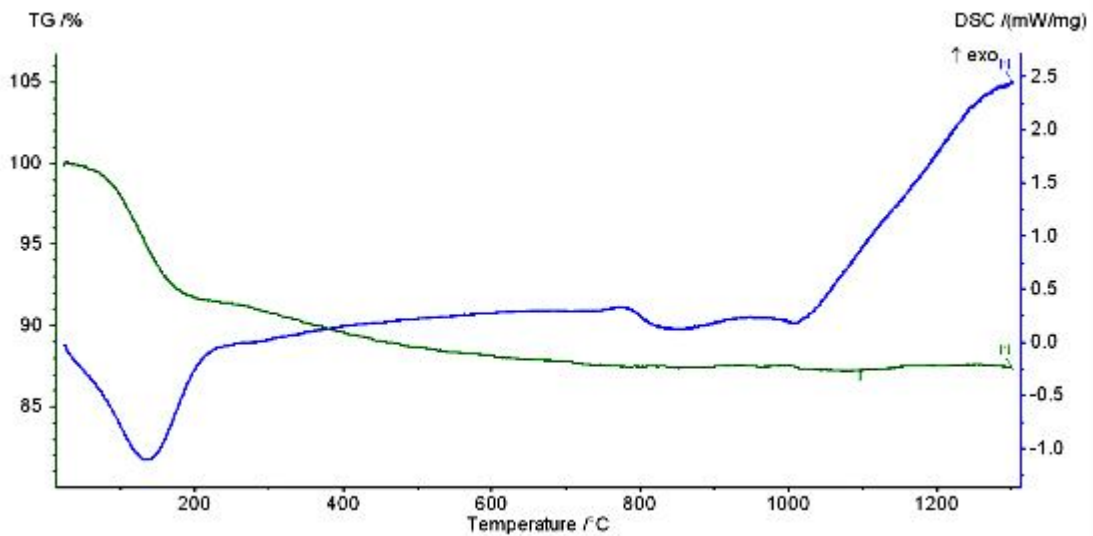
Şekil 4.4 Silika jellerin genişletilmesinde kullanılan ısıtma ve soğutma rejimi

Pota elektrikle ısınan bir fırın içerisine yerleştirilerek farklı sıcaklıklara çıkarılmıştır.

Silika jellerin genleştirme işleminde fırın sıcaklık rejimleri sabit olarak alınmıştır. Sıcaklık yükselme hızı olarak tüm işlemlerde 10 °C/dk ısınma hızıyla ve fırın istenilen sıcaklığa çıktıktan sonra bir saat fırında bekletilmiştir. Fırın sıcaklıkları ise 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri seçilmiştir.

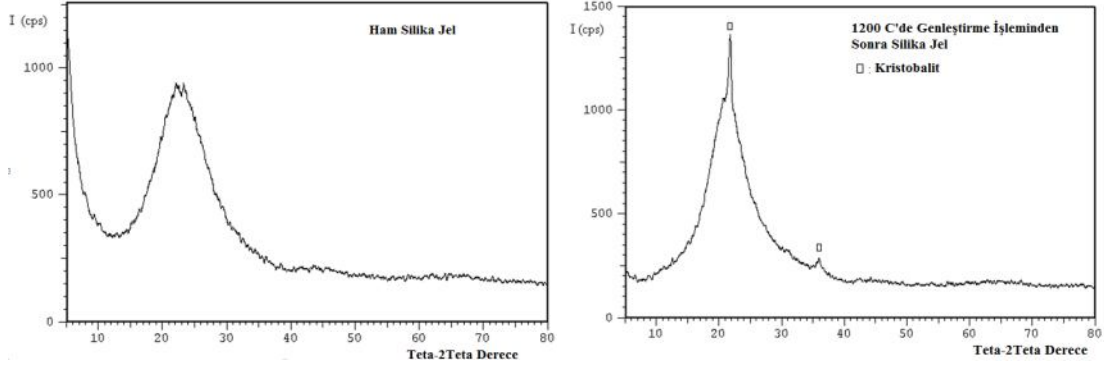
Şekil 4.4’de görüldüğü gibi genleşme işlemi 3 bölüme ayrılmıştır. 1’nci bölümde genleşecek olan silika jeller oda sıcaklığından, genleştirilmek istenen sıcaklığa kadar 10°C/dk hız ile ısıtılmıştır. Silika jeller 2’nci bölümde, genleştirilmek istenen sıcaklıkta yaklaşık olarak 1 saat bekletilmiştir. 3’üncü bölümde ise silika jeller, yaklaşık 200 °C’ ye kadar fırın içerisinde, daha sonra ise oda sıcaklığına kadar havada soğumaya bırakılmıştır.

Şekil 4.5’de Silika jellerin TG ve DSC analizi görülmektedir. Analizler 1300 °C’ye kadar yapılmış olup TG ve DSC analizlerinin her ikisinde de 100 °C civarında ani bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş silika jel içinde bulunan nemin kaybolmasından kaynaklanmaktadır. DSC analizindeki 800 °C ve 1000 °C civarındaki değişimler yapıdaki genleşmelerden kaynaklanmaktadır. 1000 °C den sonra ani bir yükselme görülmektedir. 1000 °C den başlayan büyük bir ekzotermik pik olduğu görülmektedir. Bu ise amorf yapıdan kristal yapıya dönüşümün işaretidir. 1100 °C ‘den sonra Silika jellerin yapısı değişerek sinterlenmiştir. Silika jellerin bu yapısal değişimi SEM analizlerinde de açık olarak görülmektedir.



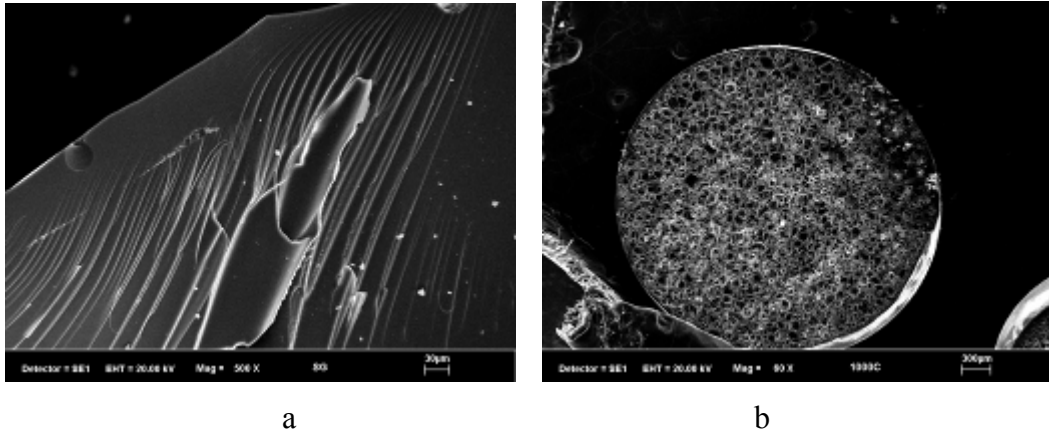
Şekil 4.5 Silika jellerin TG ve DSC analizi

Şekil 4.6'da Ham ve 1200 °C'de genleştirilmiş silika jellerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Analizler sonucunda silika jel yapısının amorf bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiş olup, genleştirme işleminden sonra yapının kristalleştiği sonucuna varılmıştır.



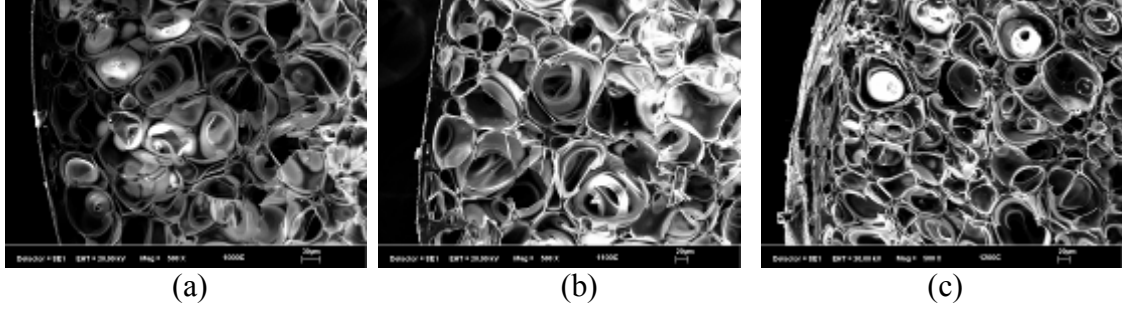
Şekil 4.6 Ham ve 1200 °C de genleştirilmiş silika jelin XRD sonucu

Genleştirme öncesi silika jel kırık yüzey görüntüsü ve genleştirme işlemi sonrası gözenek yapısı görüntüleri Resim 4.6'da gösterilmiştir. Yapı incelendiğinde genleştirme öncesi yoğun silika jel yapısı gözlenirken (Resim 4.6 a), genleştirme işlemi sonrasında tamamen gözenekli hafif silika jel tane yapısı gözlemlenmektedir (Resim 4.6 b).



Resim 4.6 Silika jel yüzeyi (a); genleştirme işlemi öncesi silika jel kırık yüzeyi, (b); genleşme sonrası gözenekli silika jel küre yapısı

Resim 4.7'de gösterilen kürelerin dış çeper kalınlıkları karşılaştırıldığında, sıcaklığın artmasıyla çeper kalınlıklarının azaldığı gözlemlenmiştir.



Resim 4.7 Farklı sıcaklıklarda işlem görmüş silika jellerin gözenek ve duvar yapıları (a:1000°C, b: 1100 °C, c: 1200 °C)

1200 °C’de yapılan genleştirme işlemi sonrası dış çeperleri çok inceldiği ve kırılğan küreler olduğu görülmüştür. Gözenek büyüklükleri karşılaştırıldığında ise 1100 °C’de yapılan genleştirme işlemi sonunda daha iri boyutlu gözenekler elde edildiği görülmüştür. 1200 °C’de sıcaklığın yüksekliği nedeniyle silika jel tanelerinin sinterlenmeye başladığı ve bu nedenle gözenek boyutlarının tekrar küçülmeye başladığı gözlenmiştir. Çizelge 4.3’de görüleceği gibi yoğunlukları da artmaktadır. Malzemeyi hafifletme yönünden 1200 °C de üretilen silikajeller uygun olmayacağı için üretimlerde 1200°C için silika jel şişirme işleminden vazgeçilmiş olup yalnızca 1000–1100 °C’ler için üretimler yapılmıştır. Çizelge 4.3’de farklı genleştirme sıcaklıkları sonrasında ölçülen silika jel yoğunlukları verilmiştir. Buradan da görüleceği gibi 1100 °C’de en düşük yoğunluklu taneler elde edilmektedir. Yoğunluk ölçümü yapılırken kütle / hacim oranı kullanılmıştır. Silika jel yoğunlukları için her gruptan 20 adet küre seçilmiş ağırlık ve çapları ölçülmüştür. Hacimler hesaplandıktan sonra her küre için yoğunluk hesaplanmış ve ortalama değerler çizelgede verilmiştir. Çizelge 4.3’de görüleceği gibi çap arttıkça silikajellerin yoğunluğu düşmektedir.

Elde edilen genleşmiş silika jeller, farklı açıklıklara sahip eleklerden elenerek (-5,60+4,75), (-4,75+ 4,00) ve (-4,00+2,00) mm sınıflara ayrılmıştır.

Çizelge 4.3 Farklı genleşme sıcaklığına bağlı silika jel yoğunlukları.

	1000 (°C)	1100 (°C)	1200 (°C)
2,00-4,00 mm	0,95 (g/cm ³)	0,28(g/cm ³)	0,31(g/cm ³)
4,00-4,75 mm	0,57 (g/cm ³)	0,19(g/cm ³)	0,20 (g/cm ³)
4,75-5,60 mm	0,40 (g/cm ³)	0,13(g/cm ³)	0,15 (g/cm ³)

4.3.2. Metalik Köpük Üretimde Kullanılan Cihazlar

Külçe alüminyum ve alüminyum-silisyum alaşımlı malzemeler, döküm işleminde kullanılacak ağırlık için ve potaya sığacak şekilde uygun boyutlarda kesilmiştir. Bu işlem için DISPA DMSY 280 marka ve model şerit testere kullanılmıştır.

Alüminyum köpük üretiminde kullanılan pota ve kalıp ısıtılmıştır. Fırında ısıtılan yalnız pota olmayıp bununla birlikte silika jellerin bulunduğu metal kap ve kalıp da ısıtılmıştır. Kalıp ve silika jellerin oda sıcaklığında bulunması, döküm esnasında sıvı metalin hızlı soğumasına neden olmuş ve sıvı metalin taneler arasında ilerlemesini zorlaştırmıştır. Kalıp ve silika jellerin ısıtılması, sıvı alüminyumun silika jel taneleri arasından kolayca sızmasını kolaylaştırmıştır. Kalıp ve silika jellerin ısıtılması için ikinci bir fırın kullanılmıştır

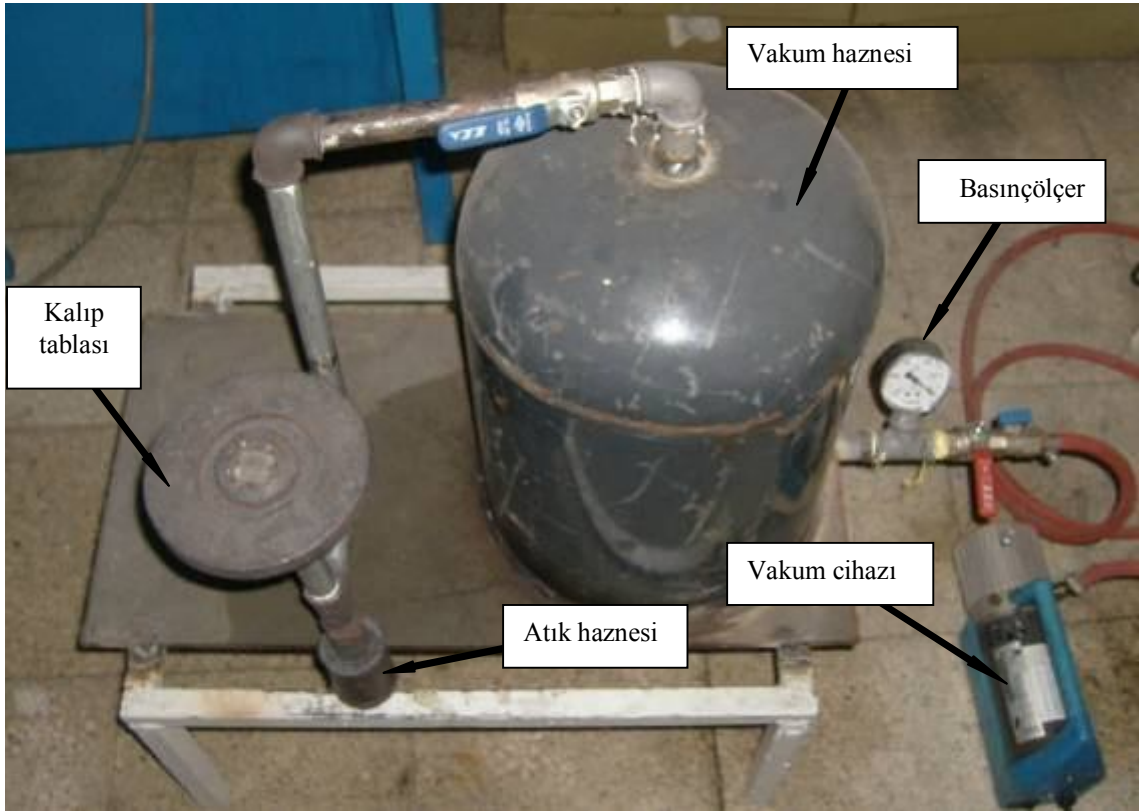
Fırının belirli bir sıcaklık ölçeri olmasına rağmen K tipi (Ni-NiCr) bir termokupl ve buna bağlı sıcak ölçer cihazla potanın içinde eritilen metalin sıcaklığı termokuplun erimiş metale daldırılması ile hassas olarak ölçülmüştür. Ayrıca fırının içersindeki kalıp ve pota sıcaklığı ile silika jellerin bulunduğu kabın sıcaklığı ise optik pirometre ile hassas olarak ölçülmüştür. Kullanılan bu cihazlar, Resim 4.8’de gösterilmiştir.



Resim 4.8 Pota sıcaklığının ölçülmesinde kullanılan cihaz

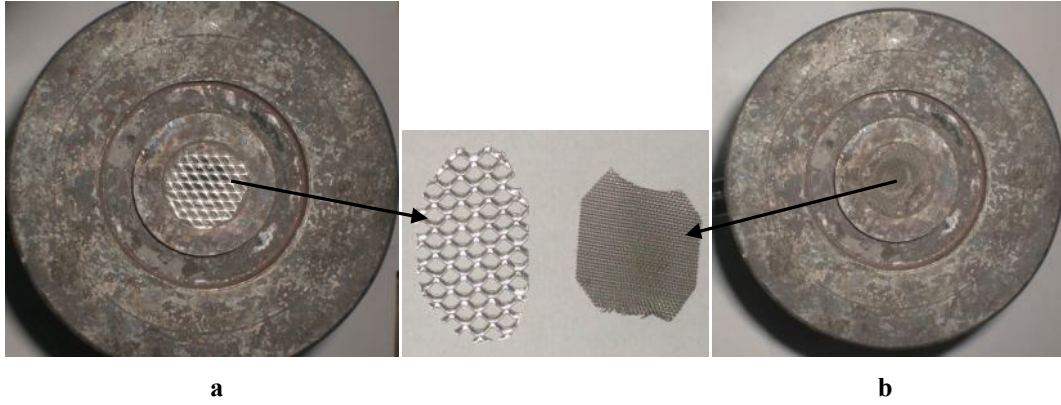
Kalıbın içerisine yerleştirilen silikajel taneleri arasına sıvı alüminyum vakum yöntemiyle sızdırılmıştır. Kullanılan vakum döküm sistemi Resim 4.9’da gösterilmiştir.

Alüminyum köpük oluşturma tertibatı; bir vakum pompası, metal bir vakum haznesi, bir basınçölçer, kalıbın oturduğu tabla ve boru sisteminden oluşmaktadır. Döküm işlemi için öncelikle fırın çalıştırılarak içerisine, içerisinde alüminyum veya alüminyum-silisyum alaşımı bulunan pota yerleştirilmiştir.



Resim 4.9 Vakum döküm tertibatı

Fırının yan kısımlarında bulunan çıkıntılara ise kalıp ve içerisinde silika jellerin bulunduğu metal kap konulmuştur. Silika jellerin vakum borusuna kaçmaması için kalıbın oturduğu tablaya alüminyum bir filtre konulmuştur (Resim 4.10 a). Alüminyum filtre içinden ergimiş alüminyum çok fazla geçmesi nedeniyle daha dar gözenek yapısına sahip çelik filtreler kullanılmıştır (Resim 4.10 b).



Resim 4.10 Vakum hattında kullanılan filtreler a: Alüminyum Filtre, b: Çelik Filtre

Sıcaklıklar istenilen değerlere ulaştığında bir maşa yardımıyla öncelikle ısıtılmış olan kalıp, vakum döküm tertibatında bulunan tablaya konulmuştur. Hemen ardından, kalıp içerisine ısınmış olan silika jeller dökülmüş ve hemen üzerine, silika jellerin döküm esnasında yüzmesini önlemek için çelik bir filtre konulmuştur. Daha sonra vakum haznesi içerisindeki hava alınarak yaklaşık -0,8 bar basınç değerine ulaşılmış ve vanalar kapatılmıştır. Döküm sıcaklık değerine ulaşan sıvı alüminyum ve Al-12Si alaşımı, içerisinde silika jeller bulunan kalıba ilave edilmiş ve daha sonra bekleme yapılmadan vakum haznesinin vanası açılmıştır.



Resim 4.11 Kalıbın genel görünüşü kalıbın kesit görünüşü

Vakumlu hava, silika jeller üzerindeki sıvı alüminyumu silika jeller içerisine sızmasını

sağlamıştır. Kullanılan metalik döküm kalıbının boyutları: iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm, boyu ise 100 mm'dir. Döküm kalıbı iki parça halinde tasarlanmış olup iki adet kelepçe ile birleştirilebilmektedir. İki parça olarak yapılmasının amacı soğumaya bırakılan numunenin soğuduktan sonra döküm kalıbından daha rahat çıkarılabilmektedir. Resim 4.11'de döküm kalıbının bir resmi gösterilmiştir.

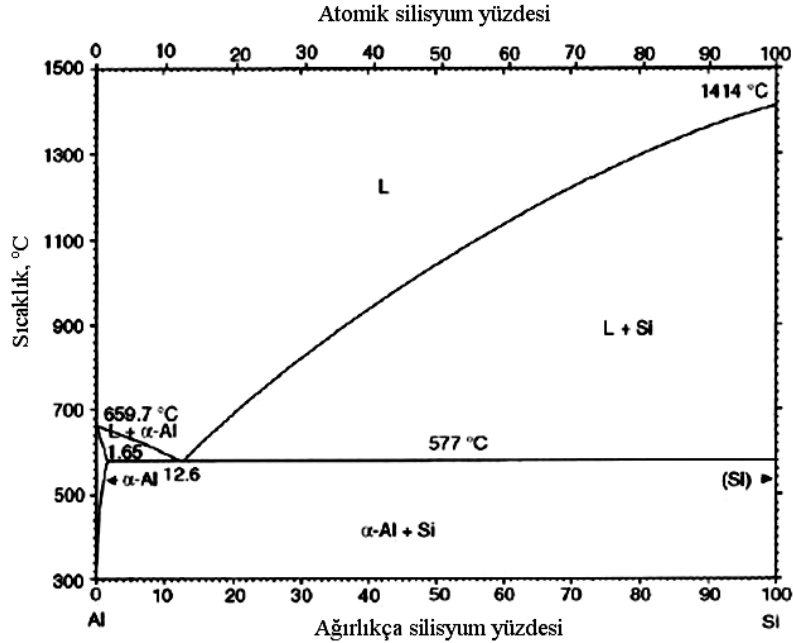
4.3.3. Vakum Döküm Yöntemi İle Numune Üretim Prosesi

Çizelge 4.4'de Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları bir çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 4.4 Al ve Al-12Si döküm sıcaklıkları

Döküm malzemesi	Döküm sıcaklığı (°C)
Al	750
Al-12Si	650

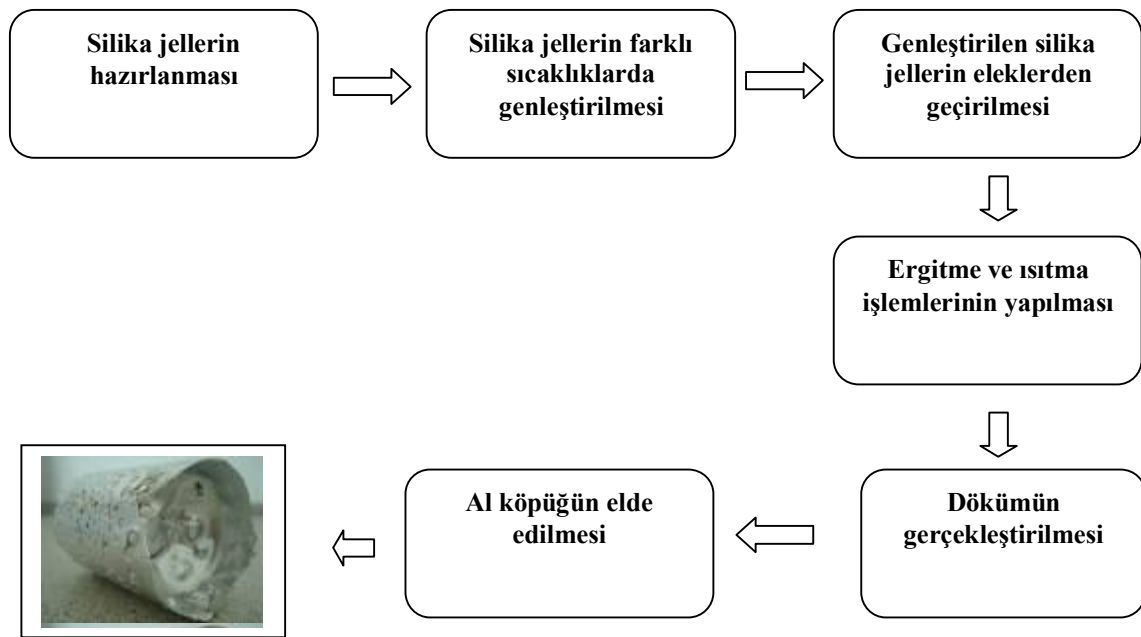
Çizelge 4.4 incelendiğinde, döküm sıcaklıkları kullanılan döküm malzemesine göre değişiklik göstermiştir. Bu değişiklikler, Al-Si denge diyagramı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 4.7'de Al-Si denge diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Al-Si denge diyagramı (İnt Kay. 6)

Şekil 4,7'deki Al-Si denge diyagramı incelendiğinde, Al'un ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 670°C, Al-12Si alaşımının ergime sıcaklığı ise 577°C'dir. Al-12Si ötektik alaşımdır. Akıcılığı iyi bir alaşım olduğu için döküm sıcaklığı saf Al ye göre azaltılmıştır. Döküm esnasında ergitilen metallerin sıcaklıkları ise Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi döküm sıcaklıklarından biraz fazladır.

Döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüğün üretim akım şeması şematik olarak Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Döküm yöntemiyle elde edilecek alüminyum köpüğün akım şeması

Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri yapılan numuneler ve kodları Çizelge 4.5'de görülmektedir. Üretimlerde aynı çapta farklı yoğunlukta olmak üzere üretimler yapılmıştır. Ayrıca alüminyum ve alüminyum silisyum alaşımlı olmak üzere toplam oniki farklı seride numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.5 Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük serileri

Seri Adı	Silika jel Çapı (mm)	Genleşme Sıcaklığı	Bileşim
AS 240	2,00-4,00	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
AS 470	4,00–4,75	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
AS 560	4,75–5,60	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
AS 241	2,00-4,00	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
AS 471	4,00–4,75	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
AS 561	4,75–5,60	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al-12Si
Al 240	2,00-4,00	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al
Al 470	4,00–4,75	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al
Al 560	4,75–5,60	1000°C’de genleşmiş silika jel	Al
Al 241	2,00-4,00	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al
Al 471	4,00–4,75	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al
Al 561	4,75–5,60	1100°C’de genleşmiş silika jel	Al

4.4. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Yapılan Deneyleri

4.4.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney için numunelerin aynı boyutlara getirilmesi gerekmektedir. Bunun için kullanılan cihazlardan biride numune kesme cihazıdır. Üretilen numunelerin basma testi ve çentik darbe deneyi için boyutlarının ayarlanması işlemlerinde kullanılmıştır.

Hücre duvar analizleri için numuneler METKON marka metalografik numune hazırlama cihazı kullanılarak 100-200-320-600-800 ve 1000 numaralı zımpara işlemine tabi tutulmuştur (Resim 4.23). Daha sonra incelemeler için Dino marka USB mikroskop altında fotoğraflar çekilmiştir.

Metalografik taşlama ve parlatma cihazı; çift diskli, 200 mm veya 250 mm disk çapına uygun 3/4 HP yüksek torklu sessiz motor 50-600 rpm arası kademesiz değişken dönme hızı, Motor aşırı yük koruma rölesi, su ayar valfi özelliklerine sahiptir.

4.4.2.Toz Metalürjisi ile Yapılan Metalik Köpük Deneyleri

4.4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Deneylerde daha çok hücre yapısı hakkında araştırma yapılmıştır. SEM analizleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Merkezindeki cihaz kullanılmıştır. Cihaz LEO 1430 VP model olup W (Tungsten) filament ile çalışmaktadır. Cihaz üzerinde ikincil elektron (secondary electron), geri yansıyan elektron ve X ışınları (EDX, X-ray Spectroscopy) detektörü bulunmaktadır.

4.4.2.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

T/M yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpüklerin yoğunlukları, numunelerin hacimsel bütünlüklerini koruyamadıkları için yoğunlukları ölçülememiştir.

4.4.2.3 Basma Dayanımı Deneyleri

Basma dayanımı köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir yöntem olmasından dolayı tez kapsamında üretilen alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmıştır. Basma dayanımı, yapısal bütünlüğünü koruyamayan T/M ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmış fakat başarılı olunamamıştır.

4.4.3 Köpürtücü Ajan Tekniği ile Üretilen Metalik Köpük Deneyleri

Köpürtücü ajan tekniği ile üretilen metalik köpük deneyler iki bölümde incelenmiştir. Birincisi proses için yapılan deneyler olup üretimi etkileyecek parametreler incelenmiştir. Diğer bölümde ise üretimden sonra yapılacak olan, yoğunluk, mikroskop ve mekanik testler gibi testleri kapsamaktadır.

4.4.3.1 Proses İçin Yapılan Deneyler

Köpürtücü ajan tekniği kullanılarak metalik köpük üretimi için yapılan Deneylerde alüminyum içersine katılan katkı maddeleri ve köpürtücü ajan olarak kullanılan mermer

tozunun tane boyutu, miktarı gibi özellikler incelenmiştir. Deneylerin üretimle olan diğer kısmı ise köpürtmeyle ilgili olan karıştırma süreleri, devri, fırın sıcaklığı gibi parametreler ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Üretimde kullanılan malzemeler ve cihazlar hakkında ayrıntılı bilgi Bölüm 4.2 de bahsedilmiştir.

4.4.3.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Köpürtücü ajan yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, hacim ve kütle formülleriyle hesaplanmıştır. Aynı numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış fakat numunelerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan düşük olduğu için suda yüzmüş ve yoğunlukları ölçülememiştir.

4.4.3.3. Basma Dayanımı Deneyleri

Köpürtücü ajan yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanan basma deneyi için numuneler 40x40 mm (boy x çap) standart boyutlara getirilmiştir. Deneyde kullanılan Shimadzu marka universal çekme-basma cihazı 10 ton kapasitelidir. Basma deneyinde numunelere, 1 mm/dk hız ile yaklaşık %50 deformasyon uygulanmıştır.

4.4.3.4 Hücre ve Yüzey İncelemesi

Köpürtücü ajan yöntemi ile elde edilen alüminyum köpüklerin mikroskopik incelemeleri Dino marka USB mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Resim 4.25’de görülen mikroskop 640x480 pixels kamera çözünürlüğü, 10x~230x büyütme özelliklerine sahiptir.

4.4.4 Vakum Döküm Yöntemi ile Üretilen Metalik Köpük Deneyleri

Vakum döküm yöntemi ile üretilen metalik köpüklerde SEM, yoğunluk ve basma deneylerinin yanında çentik darbe test cihazı kullanılarak darbe sönümleme özellikleri araştırılmıştır.

4.4.4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpüklerin analizlerinde Bölüm 4.4.1 de bahsedilen SEM görüntüleme çalışması Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde daha çok hücre yapısı hakkında araştırma yapılmıştır.

4.4.4.2 Numune Yoğunluklarının Ölçülmesi

Vakum döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, hacim ve kütle formülleriyle hesaplanmıştır. Aynı numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış fakat numunelerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan düşük olduğu için suda yüzmüş ve yoğunlukları ölçülememiştir. Ayrıca kullanılan silikajellerin su çekmesi nedeniyle Arşimet yöntemi kullanılamamıştır.

4.4.4.3 Basma Dayanımı Deneyleri

Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanan basma deneyi için numuneler 50x70 mm (boy x çap) standart boyutlara getirilmiştir. Deneyde kullanılan Schimadzu marka universal çekme-basma cihazı 10 ton kapasitelidir. Basma deneyinde numunelere, 1 mm/dk hız ile yaklaşık %50 deformasyon uygulanmıştır.

Deneyler sonunda Silika jel Çaplarının ve yoğunluklarının dayanıma etkisi, kullanılan malzemenin dayanıma etkisi gibi konular ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.4.4.4 Çentik Darbe Direnci Dayanımı Deneyleri

Numune kesme cihazı kullanılarak çentik darbe testi için üretilen numuneler 10x10x55 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler çentik darbe test cihazında teste tabi tutulmuştur. Deneylerde Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalografi Laboratuvarında bulunan Çentik Darbe Test Cihazı kullanılmıştır. Deneylerde WPM 300 marka çentik darbe test cihazı kullanılmıştır.

Deneyler sonucunda yoğunluğun ve silika jel çapının çentik darbe direnci dayanımına etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.4.4.5 Hücre Duvarı Analizleri

Hücre duvar analizlerinde USB mikroskop kullanılarak hücre duvarları analiz edilmeye çalışılmıştır. Mikroskop hakkında ayrıntılı bilgi Bölüm 4.4.3.4’de ayrıntılı olarak bahsedilmiştir.

4.4.4.6 Elastik-Plastik Deformasyon ve Enerji Absorbe Özellikleri

Elastik ve plastik deformasyon özellikleri, basma dayanımı grafiklerinden elde edilen sonuçlar ile Ashby ve Gibson un geliştirmiş oldukları teorik formüller kullanılarak bir karşılaştırma yapılmıştır.

Enerji absorbe özelliğinin tespitinde ise eğri benzeştirme yöntemi kullanılarak eğrinin altında kalan alanlar hesaplanmıştır.

5. BULGULAR

Deneylerde; Toz metalurjisi ile üretilen numuneler, Köpürtücü ajan tekniği ile üretilen numuneler ve Vakum döküm yöntemi ile üretilen numuneler olmak üzere üç farklı yöntem kullanılması sebebiyle bu başlıklar altında incelenecektir.

5.1. Toz metalürjisi ile üretilen numuneler

Yapılan şekillendirme ve sinterleme işlemleri sonucunda elde edilen numuneler çözündürme işlemine tabi tutulmuş ve meydana gelen ağırlık kayıpları değerlendirilerek Çizelge 5.1’de sonuçlar gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Çözünen preform tekniği ile üretilen numunelerin değişimi

Numune Kodu	Metal (%)	Tuz (%)	Tuz Tane Boyutu	Ham Ağırlık (g)	Çözünme sonrası ağırlık (g)	Değişim (%)
U1	% 60 Al	%40 Na ₂ CO ₃	-1 mm, + 500 µm	29,445	19,088	35,0
U2	% 50 Al	%50 Na ₂ CO ₃	-1 mm, + 500 µm	27,930	17,576	37,0
U3	% 70 Al	%30 Na ₂ CO ₃	-1 mm, + 500 µm	29,785	22,186	25,5
S1	% 60 Al	%40 NaCl	-1 mm, + 500 µm	29,769	20,013	32,7
S2	% 60 Al	%40 NaCl	-2 mm, + 1 mm	28,949	21,319	26,3
S3	% 60 Al	%40 NaCl	%50 -1 mm + 500 µm %50-2mm, + 1 mm	29,791	21,069	29,3
O1	% 60 Al	%40 NaCl	-1 mm, + 500 µm	29,796	21,015	29,5
O2	% 60 Al	%40 Na ₂ CO ₃	-1 mm, + 500 µm	29,270	18,627	36,4
O3	% 60 Al	%20 Na ₂ CO ₃ %20 NaCl	-1 mm, + 500 µm	29,856	19,501	34,7

Na₂CO₃ katkısı ile üretilen U serisi numunelerde katkı miktarının artmasıyla şekillendirmede problemler yaşanmıştır. Çubuksu tane şekline bağlı olarak presleme esnasında katmanlaşma görülmüştür (Resim 5.1). Çizelge 5.1’den de görüleceği gibi Na₂CO₃ katkılı numuneler daha fazla ağırlık kaybetmiştir. Çözünme esnasında sodyum karbonat tanelerinin NaCl tuzuna göre çok daha hızlı çözündüğü gözlenmiştir. Hızlı çözünme davranışı nedeniyle Na₂CO₃ katkılı numunelerde parçalanmalar ve ayrılmalar gözlenmiştir. Na₂CO₃ oranı arttıkça yapıdaki bozulmalar dahada artmaktadır.



Resim 5.1. U serisindeki numunelerin görüntüleri ve katmanlaşmalar.

Farklı boyutlarda NaCl içeren S serisi Alüminyum köpüklerde yapısal olarak hatasız numuneler üretilmiştir (Resim 5.2). Kullanılan NaCl tanelerinin büyüklüğüne bağlı olarak çözünme hızında azalma gözlemlenmiştir. Kullanılan tuz tane boyutu arttıkça gözeneklerin boyutu da artmıştır.



Resim 5.2 S serisindeki numunelerin görüntüleri

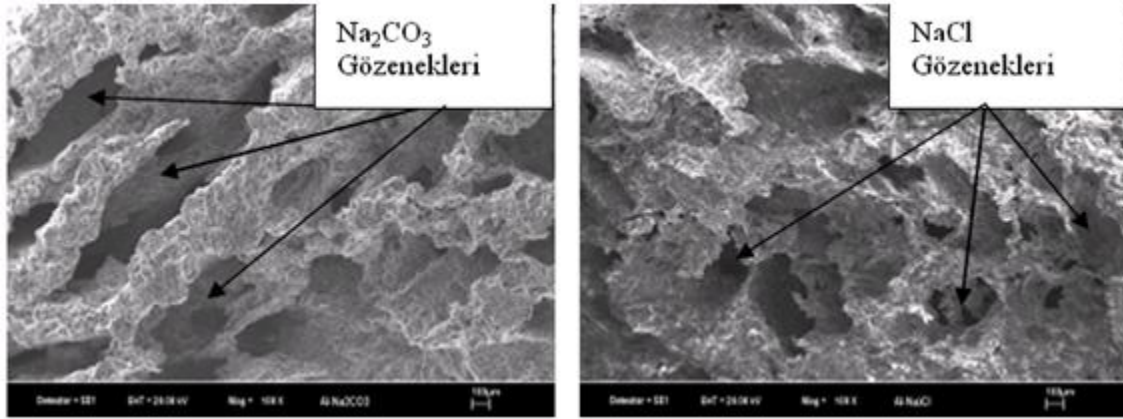
NaCl ve Na_2CO_3 beraberce içeren O3 serisi numunelerde, doğrudan sodyum karbonat kullanımı ile meydana gelen katmanlaşmaların azaldığı gözlemlenmiştir (Resim 5.3). Köpük metal içindeki ağırlıkça eşit miktardaki NaCl ve Na_2CO_3 katkısının yapıya getirdiği özellikler O1 ve O2 numunelerinde gözlenmektedir.



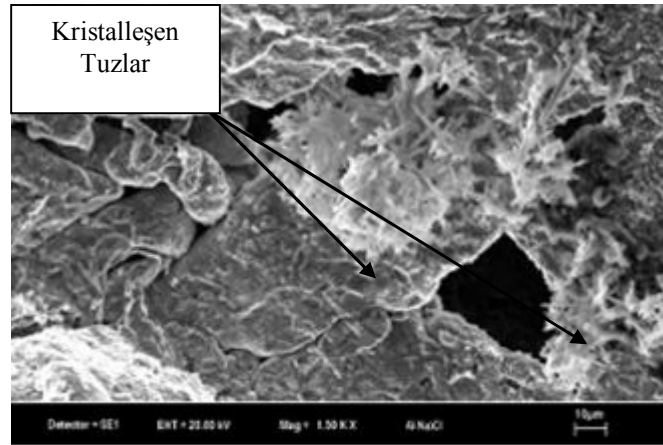
Resim 5.3 O serisindeki numunelerin görüntüleri.

5.1.1 SEM Analizleri

Resim 5.3’de Na_2CO_3 ve NaCl ‘nin çözünmesi sonucu ortaya çıkan gözenek yapıları gösterilmiştir. Na_2CO_3 şekline bağlı olarak uzamış gözenek yapısı oluşurken, NaCl ’nin küresel şekline bağlı olarak eş eksenli gözenekler oluşmuştur.



Resim 5.3. Numunelerde oluşan farklı gözenek yapıları



Resim 5.4 Gözenek içinde yeniden kristalleşen NaCl

Resim 5.4’ te Alüminyum ile NaCl tuzunun bileşiminden yapılan açık gözenekli metalik köpüğün SEM incelemesi görülmektedir. İncelemeler sonucunda yeniden kristalleşen tuz yapıları dikkat çekmektedir.

5.1.2 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Alüminyum oksijene karşı aktif bir metaldir. Oksitlenmeyi önleyebilmek için toz karışımının içine Mg konulmasına rağmen Al oksitlenmesi önlenememiş ve bundan dolayı zayıf bir hücre yapısı oluşmuştur. Bu nedenden dolayı T/M yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpük numuneler, hacimsel bütünlüklerini koruyamadıkları için yoğunlukları ölçülememiştir.

5.1.3 Basma Dayanımı

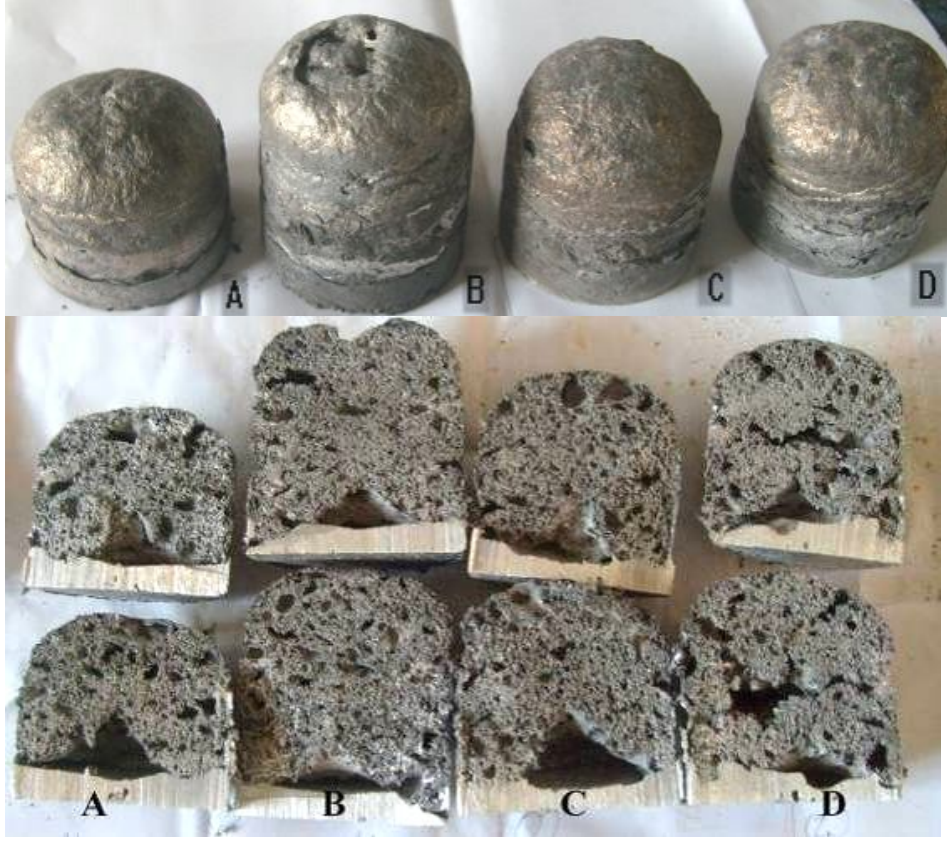
Basma dayanımı köpüklerin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir yöntem olup farklı yöntemlerle üretilen alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmıştır. Basma dayanımı, yapısal bütünlüğünü koruyamayan T/M ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanmaya çalışılmış fakat başarılı olunamamıştır.

5.2 Köpürtücü Ajan Tekniği ile Üretilen Numuneler

5.2.1 Köpürtücü Ajan Miktarı Tespiti

Çalışmada köpürtücü ajan miktarı tespit edilmeye çalışılmıştır. Resim 5.5’ de köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanılarak üretilmiş metalik köpükler görülmektedir. Deneylerde ana metal olarak 200 g ağırlığında saf Al kullanılmıştır. Köpürtücü ajan olarak Al gırılığının %2,5-%10 oranında mermer tozu miktarları denenmiştir. Kullanılan mermer tozu +250,-500 mikron boyutundadır. Mermer tozu miktarı arttıkça gözenekler belirli bir orana kadar artmakta ve daha sonra tekrar azalmaktadır. Çalışmalar sonucunda en fazla ve gözenek oluşumu %5 mermer tozu miktarında görülmektedir.

Mermer tozu miktarı %5 in altına indikçe gaz verecek madde miktarı azaldığı için gözenek oluşumu azalmaktadır. %5 in üzerindeki mermer tozu oranlarında ise gözeneklerde bozulmalar meydana gelmektedir.



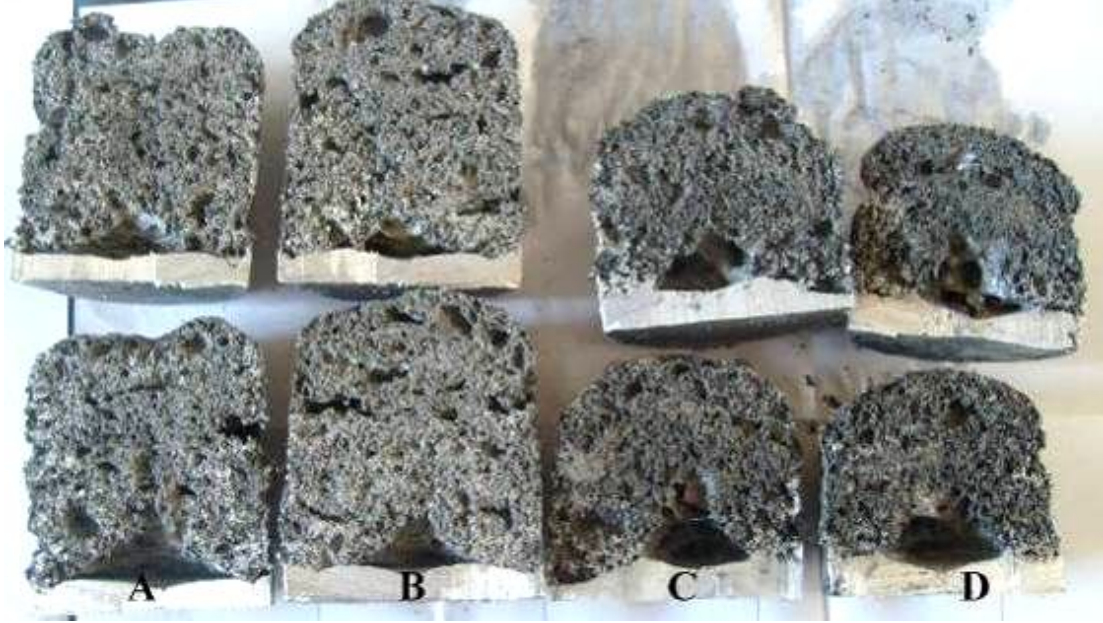
A: %2,5 B: %5 C: %7,5 D: %10

Resim 5.5 Alüminyum ve mermer tozu karışımından oluşan metalik köpüklerin mermer tozu ilavesine göre değişimi

5.2.2 Katkı Maddesi Miktarı Tespiti

Deneylerde 200 g Al kullanılmış olup Resim 5.6' de %5 oranında mermer tozunun yanında belirli oranlarda takviye elemanı olarak SiC katılmış numuneler gös"terilmiştir. Deneyde %1,25 - %5 oranında SiC takviye malzemesi oranları denenmiştir. SiC oranı arttıkça belirli bir orana kadar gözeneklenme artmakta ve daha sonra tekrar azalmaktadır.

En iyi sonuç %1,25 - %2,5 oranında SiC miktarlarında görülmektedir. SiC kullanımının amacı gaz küreciklerine heterojen çekirdeklenme noktası oluşturmak ayrıca sıvı alüminyumu belirli bir miktar akıcı hale getirmektir. Böylece daha kolay gözenek oluşumu gerçekleşmektedir. % 2,5 SiC miktarından sonra hücre duvarlarında kırılmalar meydana gelerek yapı bozulmakta ve homojenlik kaybolmaktadır. Bunun sonucu olarak ta Resim 5.6' da görüleceği gibi daha geniş gözenekler oluşmaktadır.



A: %1,25 SiC

B: % 2,5 SiC

C: %3,75 SiC

D: %5 SiC

Resim 5.6 Alüminyum, SiC ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler (%5 mermer tozu)

Yapılan bir diğer çalışmada ise Al ve mermer tozu oranı aynı kalmış, SiC tozu yerine Al_2O_3 tozu kullanılmıştır (Resim 5.7). Katkı miktarı oranları SiC ile aynı olarak katılmıştır (%1,25-%5). Köpürme işlemi SiC deki kadar olmamakla birlikte oran olarak benzer sonuçlarla karşılaşılmıştır. En iyi köpürme olarak % 2,5 Al_2O_3 katılan numunede elde edilmiştir. Al_2O_3 miktarı arttıkça köpürme kötüleşerek homojen bir yapı elde edilememiştir.

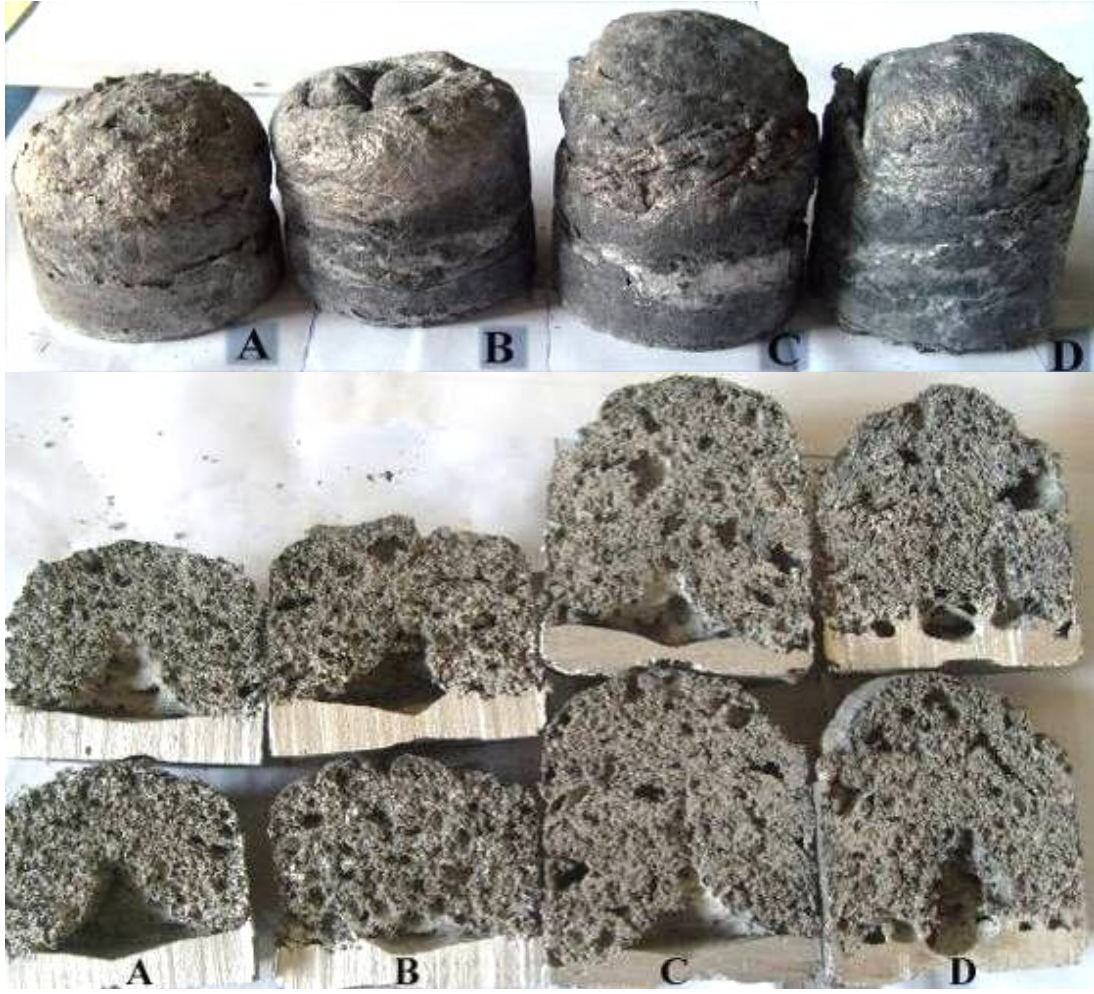


A: %1,25 Al_2O_3 **B:** % 2,5 Al_2O_3 **C:** %3,75 Al_2O_3 **D:** %5 Al_2O_3

Resim 5.7 Alüminyum, Al_2O_3 ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler (%5 mermer tozu)

Takviye miktarının tespiti için yapılan başka bir çalışmada üretilen numunelerde SiC ve Al_2O_3 %50 oranlarda karışım olarak kullanılmış olup sonuçlar Resim 5.8 de görülmektedir. Deneylerde mermer tozu ve Al miktarları bir önceki çalışmadaki ile aynı oranlarda katılmıştır. Deney sonuçlarına göre en iyi oran olarak % 2,5 SiC, +%2,5 Al_2O_3 tozlarının toplamından elde edilen %5 SiC+ Al_2O_3 tozu belirlenmiştir. Karışım oranı azaldıkça köpürme kötüleşmektedir.

Deney sonucunda SiC tozu Al_2O_3 tozuna göre daha etkili olduğu görülmektedir. Ancak SiC akıcılığı çok fazla artıracığı için hücre duvarları çok fazla incelmekte böylece gözenek oluşumunu kötüleştirmektedir.



A: %1,25 SiC+Al₂O₃ B: % 2,5 SiC+Al₂O₃ C: %5 SiC+Al₂O₃ D: %7,5SiC+ Al₂O₃

Resim 5.8 Alüminyum, Al₂O₃, SiC ve mermer tozu karışından oluşan metalik köpükler

5.2.3 Karıştırma Devrinin Köpürmeye Etkileri

Köpürtücü ajan miktarı ve katkı maddesi oranı, deneyleri yapılırken karıştırma devri ve süresinin köpürmeye etkisi görülmüş olup en ideal devir ve sürenin tespiti için bu deneylerin yapılmasına ihtiyaç olduğu görülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde karıştırma devrinin köpürmeye etkisi incelenmiştir. Çalışmada 600–2000 1/dk. arasında numune karıştırma cihazı kullanılmış olup toplamda sekiz farklı deney yapılmıştır. Numenlerde içerik olarak 200 g. Al, 10 g. Mermer tozu, 5 g. SiC kullanılmıştır.

Üretilen numuneler incelendiğinde (Resim 5.9) 600-1000 1/dk' ya kadar numunelerin hiçbirinde gözenek oluşumu gerçekleşmemiştir. 1000 1/dk'dan sonra köpürme meydana gelmiştir.

En iyi kabarma D5 kodlu 1600 1/dk'da yapılan numunede gerçekleşmiştir. 1800-2000 1/dk'daki numunelerde ise devrin çok yüksek olması sebebiyle karıştırma esnasında potadan dışarı doğru ergimiş alüminyum sıçramalar meydana gelmiştir. Bu hem numune kaybına sebebiyet vermekte hemde tehlike arz ettiğinden dolayı karıştırma devri olarak 1600 1/dk seçilmiştir.



Resim 5.9 Karıştırma devrinin köpürmeye etkisi

Üretilen numunelerin ortalama boyutları kumpas ile ölçülerek Çizelge 5.2'de verilmiş olup burada görüleceği gibi fazla kabarma D6 numaralı numunede meydana gelmiştir.

Çizelge 5.2 Üretilen numunelerin boyutları

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Karıştırma Devri (1/dk)	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Ortalama Yükseklik (mm)	24,04	25,40	29,73	58,32	61,87	73,49	69,57	62,26

5.2.4. Karıştırma Süresinin Köpürmeye Etkileri

Bir önceki çalışmada karıştırma devri tespit edilmiş olup bu çalışmada ise karıştırma süresinin köpürmeye etkisi incelenmiştir. Deneylerde önceki yapılan deneylerden elde

edilen veriler kullanılmış olup, ergimiş alüminyum fırından çıkartılıp 10-60 sn arasında karıştırılmış ve karıştırma süresi bitiminde tekrar aynı sıcaklıktaki fırına kabartma işlemi için tekrar konulmuştur.

Resim 5.10'de görüldüğü gibi en iyi kabarma S3 ve S4 numunelerinde oluşmuştur. 20 saniye ye kadar olan karıştırma süresinde Al ile Mermer ve SiC tozları homojen olarak karıştırılamamıştır. S5 ve S6 numunelerinde ise karıştırmanın fırın dışında yapılması nedeniyle pota içerisindeki alüminyum katılaşmaya başlamış olup karıştırma işlemi kötüleşmiştir.

Çizelge 5.3 Karıştırma süresinin köpük oluşumuna etkisi

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Karıştırma Süresi (s)	10	20	30	40	50	60
Ortalama Yükseklik (mm)	59,25	64,26	87,13	88,17	84,59	63,96



Resim 5.10 Karıştırma süresinin köpürmeye etkisi

Karıştırma süresi tespiti için üretilen numunelerinin ortalama boyutları ölçülerek Çizelge 5.3’de verilmiştir. Tablodan da görüleceği gibi en fazla köpük oluşumu S3 ve S4 numaralı numunelerde görülmüştür. S5 numunesinin üretimi sırasında görülen katılaşma nedeniyle, S4 numunenin üretim sırası kullanılan 40 s. Süre, diğer üretimler için karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.

5.2.5. Fırın Sıcaklığının ve Fırında Bekleme Süresini Köpürmeye Etkisi

Köpük oluşumunu etkileyecek başka bir parametre ise köpürtme sıcaklığı ve köpük oluşumu esnasında fırında bekleme süresidir. Bu nedenle en ideal fırın sıcaklığını belirleyebilmek için fırın sıcaklıkları 740 °C’ den başlayarak 950 °C ye kadar 30°C’ lik artışlarla belirlenmeye çalışılmıştır. Bekleme süresi olarak ise her sıcaklık değerinde 5–10–15 ve 20 dk. olarak seçilmiştir. Deneylerde iki adet fırın kullanılmış olup bir tanesinde ergitme işlemi gerçekleştirilmiş, diğerinde ise köpük oluşumu için kullanılmıştır. Ergitme sıcaklığı olarak 750 °C seçilmiştir. Bu sıcaklığın üstüne çıkıldıkça karıştırma esnasında köpürme oluşmaktadır. Altına düştükçe ise karıştırma için ergitme potası fırından çıkarıldığı anda karıştırma süresi tamamlanmadan katılaşma oluşmaktadır. Üretilen tüm numunelerin içerikleri Çizelge 5.4’da ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 5.4 Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresini köpürmeye etkisi

	Alüminyum (g)	Mermer Tozu (g)	SiC (g)	Karıştırma Hızı 1/dk	Ergitme Sıcaklığı °C	Fırında Bekleme Süresi (dk)	Yükseklik (mm)
T1,1	200	10	5	1600	740	5	39,54
T1,2	200	10	5	1600	740	10	63,76
T1,3	200	10	5	1600	740	15	73,83
T1,4	200	10	5	1600	740	20	71,81
T2,1	200	10	5	1600	770	5	60,80
T2,2	200	10	5	1600	770	10	65,30
T2,3	200	10	5	1600	770	15	71,49
T2,4	200	10	5	1600	770	20	69,55
T3,1	200	10	5	1600	800	5	67,25
T3,2	200	10	5	1600	800	10	71,52
T3,3	200	10	5	1600	800	15	73,70
T3,4	200	10	5	1600	800	20	71,29
T4,1	200	10	5	1600	830	5	67,48
T4,2	200	10	5	1600	830	10	75,87
T4,3	200	10	5	1600	830	15	76,50
T4,4	200	10	5	1600	830	20	73,12
T5,1	200	10	5	1600	860	5	69,42
T5,2	200	10	5	1600	860	10	78,82
T5,3	200	10	5	1600	860	15	87,38
T5,4	200	10	5	1600	860	20	80,91
T6,1	200	10	5	1600	890	5	71,53
T6,2	200	10	5	1600	890	10	80,45
T6,3	200	10	5	1600	890	15	84,31
T6,4	200	10	5	1600	890	20	71,25
T7,1	200	10	5	1600	920	5	77,69
T7,2	200	10	5	1600	920	10	77,35
T7,3	200	10	5	1600	920	15	79,20
T7,4	200	10	5	1600	920	20	72,60
T8,1	200	10	5	1600	950	5	76,63
T8,2	200	10	5	1600	950	10	80,39
T8,3	200	10	5	1600	950	15	77,95
T8,4	200	10	5	1600	950	20	75,75



T1,1

T1,2

T1,3

T1,4



T2,1

T2,2

T2,3

T2,4



T3,1

T3,2

T3,3

T3,4



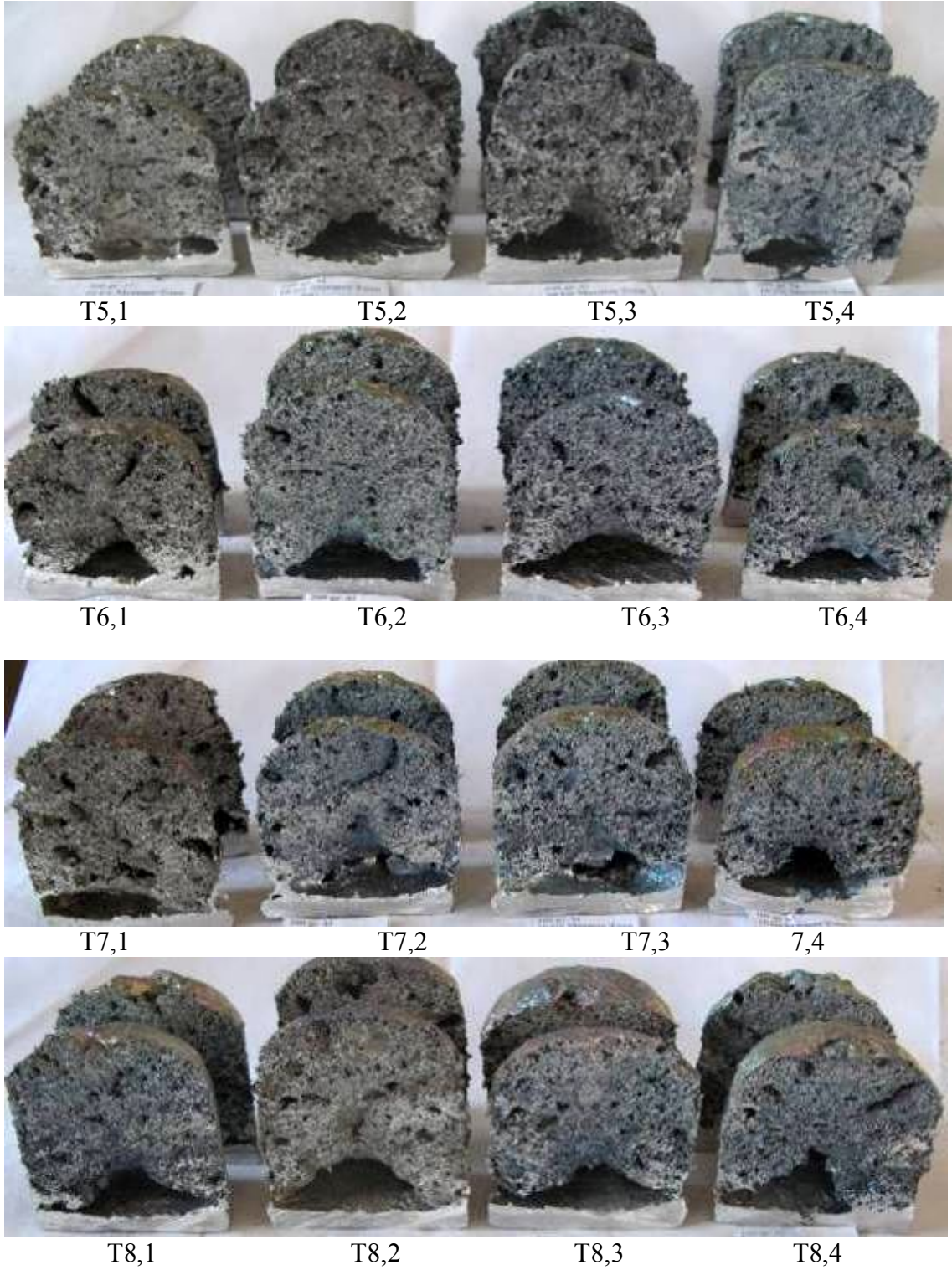
T4,1

T4,2

T4,3

T4,4

Resim 5.11 Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresinin köpürmeye etkisi



Resim 5.11 (Devam) Fırın sıcaklığının ve fırında bekleme süresinin köpürmeye etkisi

Literatür araştırmasında yapılan sıcaklık deneylerinde toz metalürjisi yöntemi ile metalik köpük üretimlerinde ortalama 700–720 °C civarında köpürtme sıcaklığı kullanmışlardır. Ergitme yöntemi ile deney yapanlar ise biraz daha yüksek sıcaklıklarda

deneyler yapmışlardır. Kevorkijan yapmış olduğu çalışmada köpürtme sıcaklığı olarak 650–750 °C arasında deneyler yapmış, ergitme sıcaklığı olarak 750 °C olarak belirlemiştir. Deneylerinde köpürtücü ajan olarak CaCO_3 kullanmıştır (Kevorkijan, 2010). Haesche ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada ise köpürtücü ajan olarak CaCO_3 ve $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomit) kullanmış deneylerinde köpürtme sıcaklıkları olarak 750–800 ve 825 °C sıcaklıkları kullanmıştır (Haesche, 2010).

Sıcaklık arttıkça köpürme miktarı artmakla birlikte belirli sıcaklıktan sonra köpürme sonucunda oluşan gözeneklerin kapanmasından dolayı yüksekliklerde azalmalar görülmektedir. Resim 5.11’de görüleceği gibi tüm deneylerde 15 dk bekleme süresinde en iyi numuneler elde edilmiştir. Üretilen numuneler arasında T5,3 ve T6,3 numaralı numunelerde en yüksek numune yüksekliği elde edilmiştir. Fakat bu numunelerde alt bölgede kalan boşluklar çok fazladır. Bekleme süresi 20 dk olan deneylerde katılan mermer tozlarının gaz verme işleminin tamamlanması sebebiyle numune tekrar ergimeye geçmekte ve alt tarafta oluşan boşluk azalmaktadır.

T5,1 – T8,4 (860°C-950°C) arasındaki tüm numunelerde alt kısımda kalan boşluk artmaktadır. Yapılan deneylerde kritik üretim sıcaklığı olarak 800°C civarında yapılması uygun görülmektedir. Deneyler sonucunda elde edilen sıcaklık literatürdeki yapılan deneylerden biraz yüksek olduğu tespit edilmiştir. Literatürdeki yapılan deneylerde köpürtücü ajan olarak CaCO_3 kullanılması ve bu tozun DTA grafikleri incelendiğinde gaz verme sıcaklığı olarak 575-590 °C ler civarında CO_2 gazı vermeye başlayıp yaklaşık 845-860°C civarında sonra ermektedir. Literatürdeki deneylerde kullanılan köpürtme sıcaklıkları yaklaşık olarak bu iki sıcaklıkların ortası civarındadır. Mermer tozunun DTA grafiğinden elde edilen verilere göre gaz verme sıcaklığı 660°C başlayıp 930°C de sonlanmaktadır. Bu nedenden dolayı deneyler 740-950°C ler arasında yapılmıştır. Deneyler sonucunda 800–830 °C arası en ideal köpürtme sıcaklığı olarak tespit edilmiştir. Yapılmış olan deneylerde köpürtücü ajan olarak mermer tozu kullanılmış olması sebebiyle deneyler sonucunda daha yüksek sıcaklıklarda en ideal köpürme elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklık mermer tozunun gaz verme sıcaklığının yaklaşık olarak ortalama bir değeridir.

5.2.6. Köpürtücü Ajan Tane Boyutunun Köpürmeye Etkisi

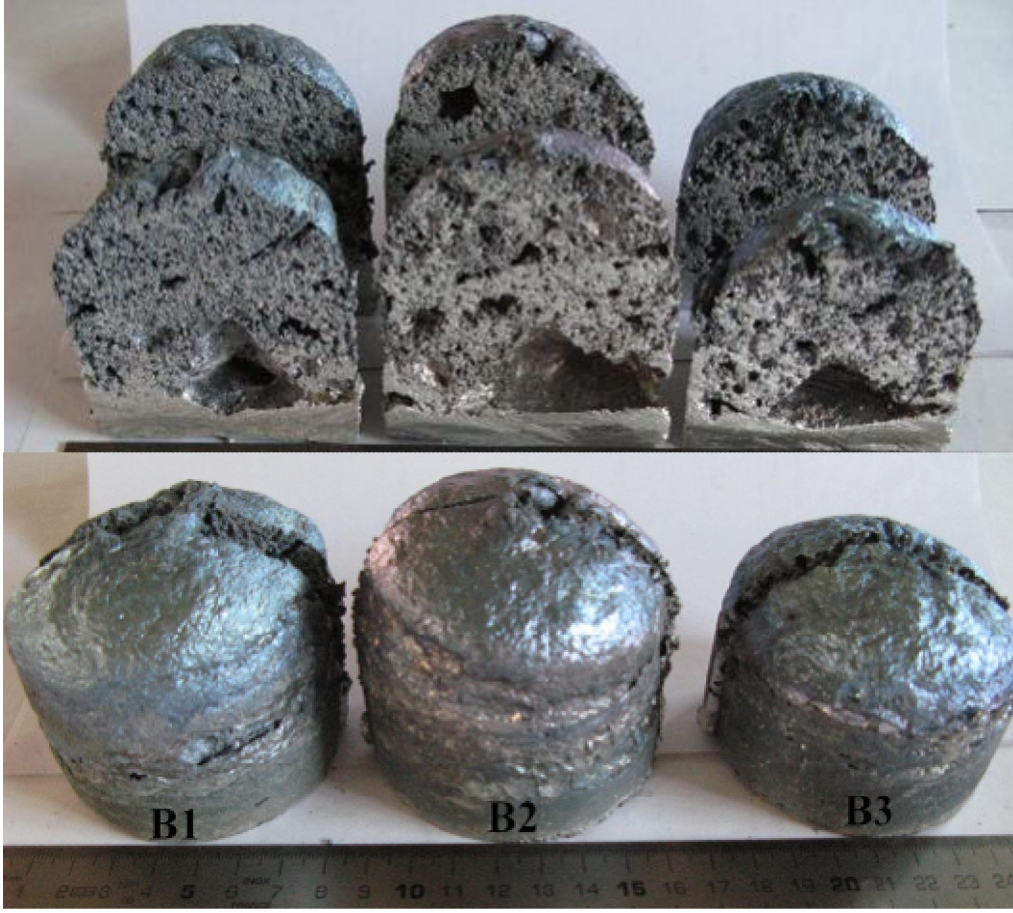
Çalışmanın bu bölümünde köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi incelenmiştir. Üretilen numunelerde mermer tozu tane boyutları; -250 μm , +1 μm , - 500 μm , + 250 μm , ve -1mm, +500 μm arası olmak üzere üç farklı boyut seçilmiştir. Kütle olarak aynı miktarda mermer tozu kullanılmıştır. Tane boyutu küçüldükçe üretilen numunenin köpürmesi artmaktadır. Tane boyutu -1mm, + 500 μm arasında olan B3 kodlu numunede en az köpürme görülmüştür. Bunun sebebi olarak gaz veren tane sayısının azalması sebebiyle daha az gözenek oluşumu meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tüm numunelerde bir önceki çalışmalardan elde edilen değerler olan 800 °C sıcaklık, 1600 d/d karıştırma devri, 40 sn karıştırma süresi, 15 dk. fırında bekleme ve sabit oranda Al, SiC tozu kullanılmıştır. Bu değerler Çizelge 5.5’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tane boyutu -250 μm , +1 μm arasında üretilen numunelerde ise karıştırmada bazı problemlerle karşılaşmıştır. Tane boyutunun çok küçük olması, karıştırıcının dönme hızı nedeniyle pota içersinde kenarlara savrulması sonucu homojen bir karışım elde edilememiştir. Bu nedenle en ideal tane boyutu olarak -500 μm , + 250 μm arası seçilmiştir.

Çizelge 5.5 Köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi

	Al (g)	Mermer Tozu (g)	SiC (g)	Karıştırma Devri 1/dk	Ergitme Sıcaklığı °C	Fırında Bekleme Süresi (dk)	Tane Boyutu (μm)	Yükseklik (mm)
B1	200	10	5	1600	800	15	-250	69,45
B2	200	10	5	1600	800	15	+250,-500	70,35
B3	200	10	5	1600	800	15	+500,-1000	58,20

Resim 5.12’te köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi üzerine yapılan çalışmada üretilen numuneler görülmektedir.



Resim 5.12. Köpürtücü ajan tane boyutunun köpürmeye etkisi

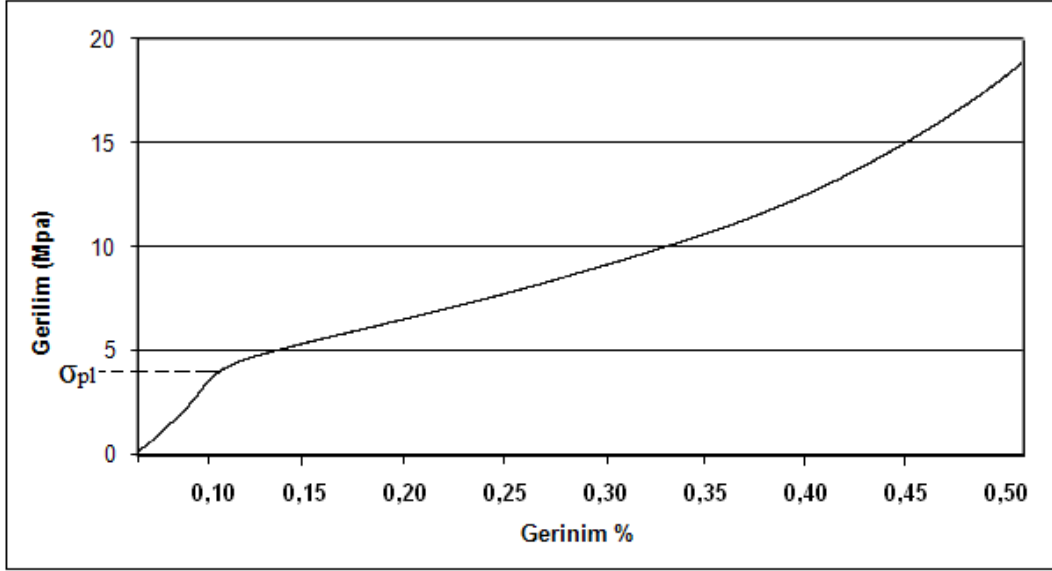
5.2.7 Numunelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Köpürtücü ajan yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, hacim ve kütle formülleriyle hesaplanmıştır. Aynı numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış fakat numunelerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan düşük olduğu için suda yüzmüş ve yoğunlukları ölçülememiştir. Üretilen numunelerden tornalama işlemi yapılarak standart numuneler elde edilmiştir. Daha sonra yoğunlukları ölçülmüş ve ortalama 0,4-0,6 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

5.2.8 Basma Dayanımı

Köpürtücü ajan yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanan basma deneyi için tornalama işlemi ile numuneler 40x40 mm (boy x çap) standart boyutlara getirilmiştir. Deneyde Schimadzu marka universal çekme-basma cihazı kullanılmış olup 1mm/dk basma hızı ve yaklaşık % 50 deformasyon uygulanmıştır.

Elde edilen basma deney grafiklerinden, plastik yıkım gerilimi hesaplanmıştır. Buna göre grafiklerdeki numunenin, elastik bölgedeki davranışını gösteren çizgi ve plastik bölgedeki davranışını gösteren çizgiye doğrusallar çizilmiş, bu çizgilerin kesiştiği yer plastik yıkım gerilimi olarak ölçülmüştür. Şekil 5.1’de basma grafiği görülmektedir.

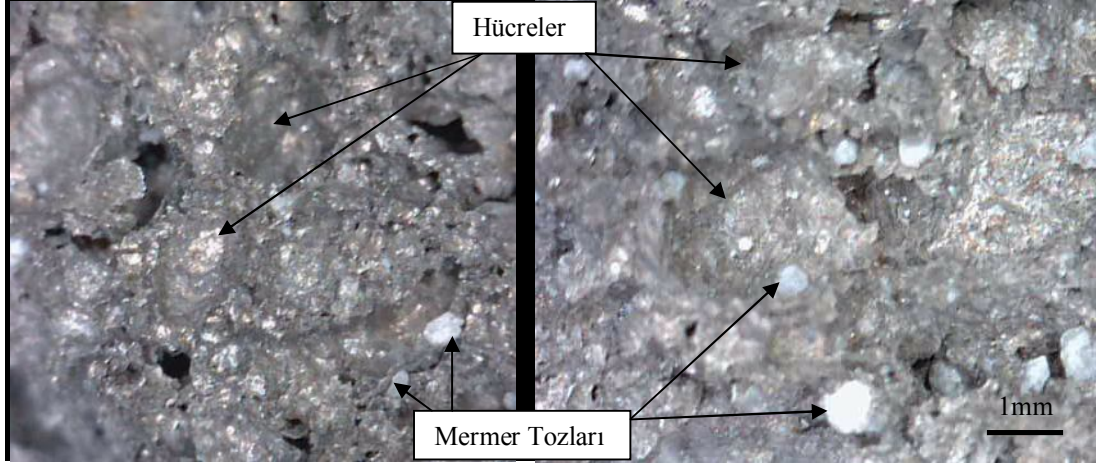


Şekil 5.1 Plastik yıkım geriliminin ölçülmesi için basma deney grafiği

Şekil 5.1’den de görüleceği gibi deney sonucu normal bir köpük basma grafiği şeklinde elde edilmiştir. Gergely ve arkadaşları CaCO_3 kullanarak yapmış oldukları alüminyum köpük üretmişler, ve üretilen numunelerin basma dayanımı sonucunda yaklaşık 5 MPa plastik yıkım gerilimi elde etmişlerdir (Gergely et al., 2002). Cambroner ve arkadaşları köpük üretiminde mermer tozu ve CaCO_3 kullanmışlar ve basma dayanımlarını mermer tozundan üretilen numune için 6,11 MPa, CaCO_3 kullanılarak üretilen numunelerde ise 4,55 MPa olarak ölçmüşlerdir (Cambroner et al. 2005). Deneyler sonucunda literatüre yakın bir plastik yıkım gerilimi elde edilmiş olup yaklaşık 4,35 MPa olarak ölçülmüştür. Hücre duvarları kırılmaya başladığı anda dayanım düşmekte bir sonraki hücre duvarına gelince dayanım tekrar artmaktadır. Hücre duvarlarının aşama aşama kapanması yıkım geriliminden sonra uzun bir plato şeklinde artmıştır.

5.2.9. Stereo Mikroskop İncelemesi

Köpürtücü ajan yöntemi ile elde edilen alüminyum köpüklerin mikroskobik incelemeleri Dino marka USB mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Görüntüler Resim 5.13’de görülmektedir.

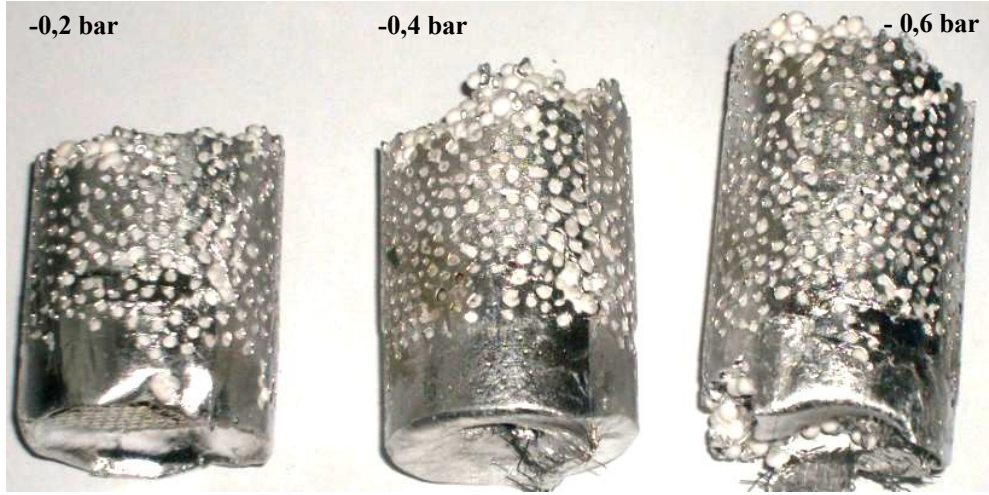


Resim 5.13 Köpürtücü ajan tekniği kullanarak üretilen metalik köpük hücre görüntüleri

Resim 5.13 incelendiğinde mermer tozları çok net olarak hücreler içerisinde görülmektedir. Mermer tozlarının alüminyum içerisinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Ergitme yönteminde vizkoziteyi kontrol etmek çok zor olduğu için hücre duvarlarında kırılmalar meydana gelerek daha büyük hücreler oluşmaktadır. Bu sebeple gözenek oluşumunda homojen olmayan bir dağılım gözlenmektedir.

5.3. Vakum Döküm Yöntemi ile Üretilen Numuneler

Döküm yöntemi ile elde edilecek olan alüminyum esaslı köpük numunelerin üretimi için; çeşitli sıcaklıklarda genleştirilen silika jel taneleri, alüminyum veya alüminyum-silisyum alaşımı kullanılmıştır. Kullanılan vakumlu döküm sisteminde, sıvı alüminyumun kalıp içerisindeki silika jel tanelerinin arasına homojen olarak sızmasını sağlamak için kalıp ısıtma, silika jel tanelerinin ısıtılması, vakum basıncının ayarlanması ve döküm sıcaklığının ayarlanması gibi ön çalışmalar gerçekleştirilerek homojen alüminyum köpükler elde edilmeye çalışılmıştır.



Resim 5.14 Düşük vakum değerlerinde dökülen deneme numuneleri

Döküm işleminin ilk denemelerinde -0,1 ve -0,8 bar arasında değişen vakum değerleri kullanılmıştır. Resim 5.14’de de görüleceği gibi vakum değerinin düşük olması sebebiyle sıvı metalin kürecikler arasında yeterli şekilde ilerlemeyememektedir. Bu nedenle her üretim için vakum değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Vakum değeri kullanılan silika jel ve metal ile farklılık göstermektedir. 1000 °C’de genişletilmiş silika jeller kullanılarak yapılan metalik köpük üretimlerinde daha yüksek vakum değeri tespit edilmiştir. Buna paralel olarak kalıp ve silika jel sıcaklıklarının da artırılması gerekmektedir. Kullanılan silika jel boyutları büyüdükçe vakum değerinin de düştüğü gözlemlenmiştir. Aynı şekilde silika jel ve kalıp sıcaklıkları da düşürülmüştür. 1100°C’de genişletilmiş silika jellerde basınç değeri çok daha düşüktür. 1100 °C’de genişletilmiş olan silika jellerin yoğunluklarının düşük olması sebebiyle vakum daha iyi nüfuz etmekte ve bu sebeple vakum değerinin düşürülmesi gerekmektedir. Aynı şekilde basınçla paralel olarak kalıp ve silika jel sıcaklıkları da düşürülmüştür. Kullanılan metaller ile basınç arasında çok farklılık gözlemlenmemiştir. Farkın olmamasının sebebi döküm sıcaklıkları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Saf alüminyum için döküm sıcaklığı 750 °C olarak tespit edilmiş olup, Al-12Si metali için bu değer 650 °C olarak tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının düşük olması alaşım içerisinde silisyumdan kaynaklanmaktadır. Üretimde kullanılan vakum değerleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Elde edilecek alüminyum köpük numunenin daha homojen elde edilmesi için kalıbın ve silika jellerin ısıtılması yöntemine de başvurulmuştur. İlk

denemelerde kalıp ısıtılmasa da, sonraki çalışmalarda kalıp sıcaklığı değişik sıcaklık aralıklarında ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Kalıp sıcaklıkları 30 °C–450 °C arasında farklı sıcaklıklarda denenmiş olup üretimde kullanılan ortalama sıcaklıklar Çizelge 5.6 de görülmektedir.

Silika jeller ve kalıp sıcaklıkları, aynı veya yakın sıcaklıklarda olması istenilmektedir. Eğer kalıp sıcaklığından çok fazla sıcaklık farkı olursa (daha düşük sıcaklıklarda) kalıp çok hızlı soğumakta ve bunun sonucu olarak da alüminyum hızlı bir şekilde soğuyarak silika jeller arasına giremeden katılaşmaktadır.

Çizelge 5.6 Malzeme üretiminde kullanılan basınç ve sıcaklık değerleri

Numune	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Silikajel Sıcaklığı (°C)	Kullanılan Malzeme Miktarı (g)	Vakum Değeri (bar)
AS 240	650	350	350	180	0,80
AS 470	650	200	200	185	0,54
AS 560	650	65	30	190	0,24
AS 241	650	100	30	180	0,25
AS 471	650	60	30	185	0,15
AS 561	650	40	30	190	0,10
Al 240	750	300	300	180	0,80
Al 470	750	150	150	185	0,45
Al 560	750	75	30	190	0,25
Al 241	750	100	30	180	0,25
Al 471	750	80	30	185	0,12
Al 561	750	55	30	190	0,10

Kalıp sıcaklığı normalden fazla olduğu durumlarda sıvı metal vakum etkisi ile sistem içersine kaçarak silika jeller arasında daha az kalmaktadır. Bunun sonucunda da silika jelleri çevreleyen alüminyum duvarlar incelmekte ve dayanım düşmektedir. Vakum daha da yüksek olursa numunelerin üst bölgesinde alüminyumun büyük bir kısmı aşağı inmektedir.

Çizelge 5.6 incelendiğinde, döküm esnasındaki kalıp sıcaklıkları ve silika jel sıcaklıkları farklılıklar göstermiştir. AS 241-561 ile Al 241-561 serili üretimindeki kalıp ve silika

jel sıcaklıkları ile AS 240-560 ile Al 240-560 serili numuneler arasında da sıcaklıklar yakın derecededir. Fakat bu iki seri arasına üretimindeki kalıp ve silika jel sıcaklıkları ile vakum değerleri farklıdır. Bunun sebebi üretimde kullanılan silika jellerden kaynaklanmaktadır. 1100 °C’de genişletirilen silika jeller ile 1000°C’de genişletirilen silika jellerin içyapıları farklıdır. 1100 °C’de üretilen silika jellerin mikro yapı fotoğraflarından da görüleceği gibi daha fazla genleşmeleri sebebiyle vakum etkisi daha iyi nüfuz etmekte ve bu nedenden dolayı daha düşük vakum değerlerinde numuneler üretilmektedir. AS serisi Al-12Si esaslı köpük üretiminde, sıvı metalin silika jeller arasına sızması, daha kolay olduğu gözlenmiş, sıcaklık değerleri düşürülerek Çizelge 5.6’deki değerler optimum olarak belirlenmiştir.

Üretilen numunelerdeki silikajel çapları arttıkça, kalıp sıcaklıkları ve silikajel sıcaklıkları düşmektedir. Çaplar arttıkça küreler arasındaki boşluklar arttığı için vakum daha etkili olmakta ve sıvı metal bu kısımlardan daha rahat akmaktadır. Bu nedenden dolayı vakum değerlerinin de düşürülmesi gerekmektedir.

5.3.1. Numunelerin Kesitleri ve Yoğunluk Ölçümü

Döküm yöntemiyle elde edilen numunelerin boyutları, dökümden sonra dökümün alt ve üst kısımlarından uygun şekilde kesilerek deneyler için standart (50x70 mm) (çapxboy) ölçülere getirilmiştir. Resim 5.15’de ilk dökülen numune ile deney için belirli ölçülerde kesilmiş numunenin resimleri gösterilmiştir.

Deney için elde edilen numuneler boyuna kesilerek, iç kısımdaki alüminyum ve silika jel granüllerinin dağılımı incelenmiştir. Buna göre numunelerin hemen hemen her tarafında homojen bir dağılım gözlemlenmiştir



Resim 5.15 Kalıptan ilk çıkan numunenin şekli ve deneye hazır hale getirilmiş numune

Resim 5.16’da görüldüğü gibi üretilen numuneler kapalı bir gözenek yapısına sahiptir.



Resim 5.16 Boyuna kesilen alüminyum köpük numune

İncelenmiş olan alüminyum köpük numunenin döküm esnasındaki durumu göz önüne alındığında, dökülen alüminyum miktarı numunenin alt kısmına doğru artmaktadır. Bir başka ifadeyle üst kısımda daha az alüminyum miktarı bulunmakla birlikte alt kısımlarda daha fazla alüminyum miktarına sahip alüminyum köpükler elde edilmiştir. Alt kısımda alüminyum miktarının daha fazla olma sebebi, döküm esnasındaki vakumdan kaynaklanmıştır. Vakum miktarı azaldığında ise tam ters olaylar gerçekleşmektedir. Sıvı alüminyum alt kısımlara inmeden üst tarafta katılaşmaktadır.

Vakum döküm yöntemiyle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluk ölçümleri, hacim ve kütle formülleriyle hesaplanmıştır. Aynı numunelerin yoğunlukları Arşimet yöntemi ile ölçülmeye çalışılmış fakat numunelerin yoğunlukları suyun yoğunluğundan düşük olmasından dolayı suda yüzmüştür. Diğer bir sebep ise boşluk tutucu olarak kullanılan silikajellerin su tutması nedeniyle yoğunlukları ölçülememiştir. Üretilen numunelerden tormalama işlemi yapılarak standart numuneler elde edilmiş ve daha sonra yoğunlukları tespit edilmiştir. Tespit edilen yoğunluklar, Çizelge 5.7’de görülmektedir. Literatürde klasik yöntemlerle üretilen metalik köpüklere kıyasla yoğunlukları oldukça fazladır. Ancak Sentaktik köpüklerle karşılaştırıldıklarında ise benzer sonuçlar alınmıştır. Yoğunlukların yüksek olmasının temel sebebi silika jel kürelerinin etrafında kalan boşlukların tamamen alüminyum ile doldurulmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 1000 °C’de genleştirilmiş olan silika jellerin yoğunluklarında yüksek olması üretilen numunelerin yoğunluklarını artırmaktadır.

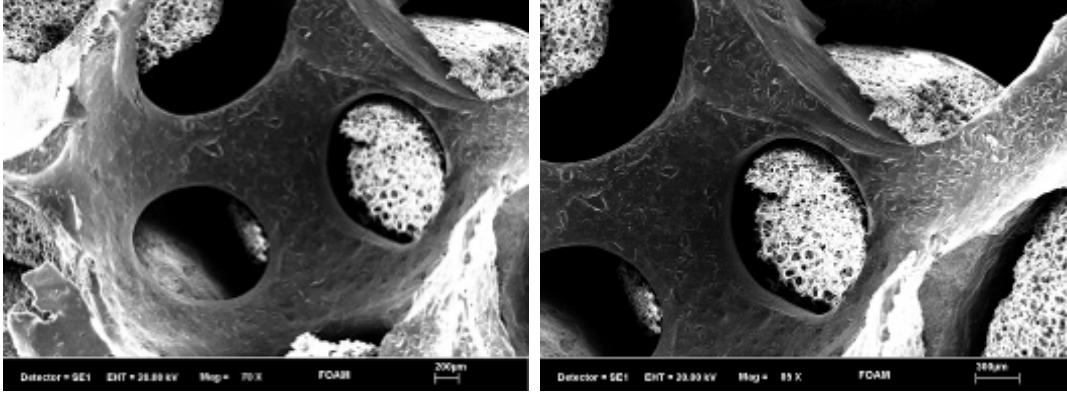
Çizelge 5.7 Vakum döküm yöntemi ile üretilen numunelerin yoğunlukları

Numune Adı	Silika jel Yoğunluğu (g/cm ³)	Silika jel Çap (mm)	Numune Yoğunluğu (g/cm ³)
AS 240	0,95	2,00–4,00	1,33
AS 470	0,57	4,00–4,75	1,28
AS 560	0,40	4,75–5,60	1,14
AS 241	0,28	2,00–4,00	0,98
AS 471	0,19	4,00–4,75	0,93
AS 561	0,13	4,75–5,60	0,84
Al 240	0,95	2,00–4,00	1,36
Al 470	0,57	4,00–4,75	1,23
Al 560	0,40	4,75–5,60	1,13
Al 241	0,28	2,00–4,00	1,06
Al 471	0,19	4,00–4,75	1,01
Al 561	0,13	4,75–5,60	0,96

5.3.2. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemesi

Döküm yöntemi ile elde edilen alüminyum köpüklerin SEM (Taramalı elektron mikroskobu) görüntüleme çalışması Afyon Kocatepe Üniversitesi, TUAM’da gerçekleştirilmiştir.

Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri, döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpük numunenin düzenli bir hücre yapısı olduğunu göstermiştir. Genleşmiş silika jel taneleri etrafında düzenli oluşmuş, homojen hücre duvarları görülmektedir. Hücre duvar kalınlıklarının değişkenliği ise dikkat çekicidir. Kalıbın üst kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha ince hücre duvarları bulunurken, alt kısmına denk gelen numunenin iç yüzeyinde daha kalın hücre duvarları gözlemlenmiştir (Resim 5.17).



Resim 5.17 Alüminyum köpük numunenin, farklı büyütmelere sahip SEM görüntüleri

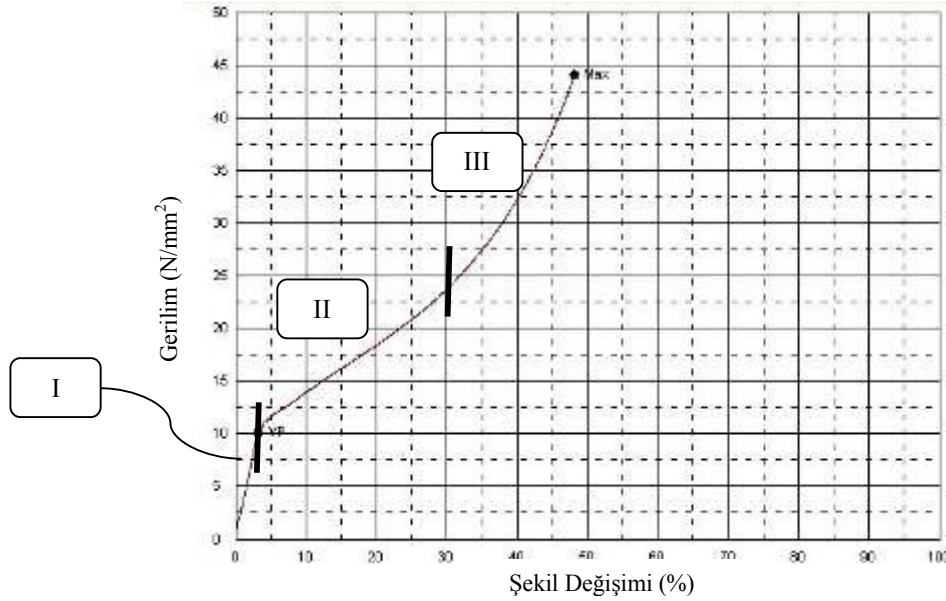
Resim 5.17 incelendiğinde, döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpükler, açık ve kapalı olmak üzere her iki gözenek tipini de içerisinde barındırmaktadır. Ancak ağısı yapının az olması ve gözenekler arasında duvarların bulunması, ağırlıklı olarak kapalı gözeneklerin bulunduğunu göstermiştir.

5.3.3 Basma Dayanımı

Döküm yöntemi ile üretilmiş alüminyum köpüklere uygulanan basma deneyi için numuneler 50x70 mm (çap x boy) standart boyutlara getirilmiştir.

Elde edilen basma deney grafiklerinden, plastik yıkım gerilimi hesaplanmıştır. Buna göre grafiklerdeki numunenin, elastik bölgedeki davranışını gösteren çizgi ve plastik bölgedeki davranışını gösteren çizgiye doğrusallar çizilmiş, bu çizgilerin kesiştiği yer plastik yıkım gerilimi olarak ölçülmüştür.

Döküm yöntemi ile üretilen alüminyum köpük numunelerin basma deneyleri, her serilerden 5'er numune alınarak gerçekleştirilmiş ve ortalama grafikleri çizilmiştir. Bu deneye göre her numune, 1mm/dk hız ile yaklaşık olarak 35 dakika boyunca deformasyona maruz bırakılmış ve yaklaşık %50 deformasyona uğratılmıştır. Alüminyum esaslı köpük olan Al serisi numunelerin basma deney örnek grafiği Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Basma deney grafiği

Şekil 5.2'de temsili olarak gösterilmiş olan grafik incelendiğinde 3 ana bölgeden oluşmaktadır. "I" bölgesinde numune, elastik bölgede bulunmaktadır ve silika jeller kırılmaya başlamamıştır. "II" bölgesinde numune, plastik hasara maruz kalmış, hücrelerdeki silika jeller hasara uğramış ve hücreler kapanmaya başlamıştır. "III" bölgesinde ise numune, hücreler tamamen kapanmış ve süngerimsi özelliğini kaybetmiştir. Metalik köpüklerde II. bölge "plato bölgesi" olarak adlandırılır. Bu bölgede malzeme içindeki gözenekler teker teker deforme olarak hücre duvarları plastik deformasyona uğramaya başlar. Gerilimin azaldığı bu bölgenin eğiminin azalması ile eğri altında kalan alan artmıştır. Bu ise malzemenin daha büyük bir enerji sönümleme yeteneği olduğu anlamına gelir.

5.3.3.1 Silika jel çaplarının Dayanıma Etkisi

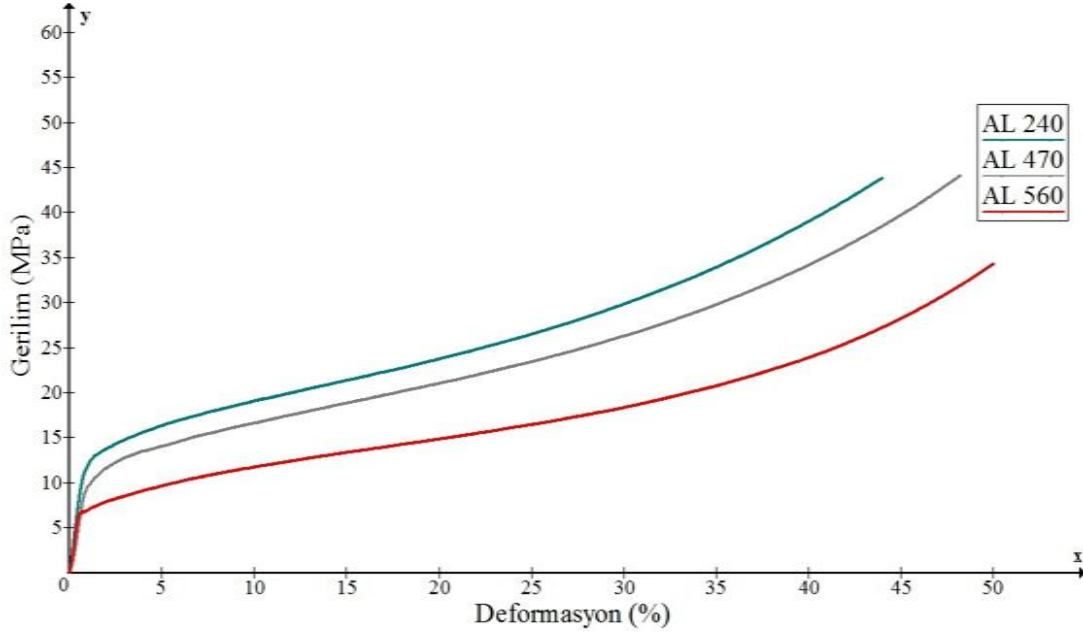
Çalışmada silika jel çaplarının basma testine etkisi iki kısımda incelenmiştir. Birincisi Al esaslı üretilmiş olan numunelerden elde edilen grafiklerdir. Diğeri ise Al-12Si alaşımlı alüminyumdan üretilmiş olan numunelerdir.

5.3.3.1.1 Al esaslı malzemeler için silika jel çaplarının dayanıma etkisi

Al esaslı 1000°C de genleştirildikten sonra farklı tane boyutları gruplarına ayrılarak gruplandırılmış silika jeller kullanılarak üretilen numunelerden elde edilen verilerle şekil 5.3 te görülen eğriler elde edilmiştir.

şekil 5.3 incelendiğinde küre çapları ($\emptyset \uparrow$) arttıkça malzemenin plastik yıkım geriliminin ($\sigma_{pl} \downarrow$) düştüğü tespit edilmiştir. Tane boyutu küçüldükçe, numunede oluşan hücre miktarı ve dayanımın arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca içyapı dikkate alındığında küre etrafındaki yoğun kısımlar küçük hücreli numunelerde daha da arttığı görülmektedir. Basma grafiklerinde II bölge diye ifade ettiğimiz kısım daha da yataya yakın seviyede seyrettiği görülmektedir. Küre çapları küçüldükçe silika jel içyapısındaki genleşmenin az olması sebebiyle silika jellerin dayanımı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak ta grafikten de grleceği gibi malzeme dayanımı artmaktadır.

Küre çaplarına paralel olarak üretilen numunelerin yoğunlukları da değışmektedir. Küre apı arttıkça üretilen numunelerin daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Aynı ldeki numunelerde ap ile doğru orantılı olarak hücre duvar sayısı artıp azalacağından küçük çaplı numunelerde çok daha fazla hücre duvarı oluşmaktadır.



Şekil 5.3 Alüminyum esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1000°C de genişletilmiş silika jeller)

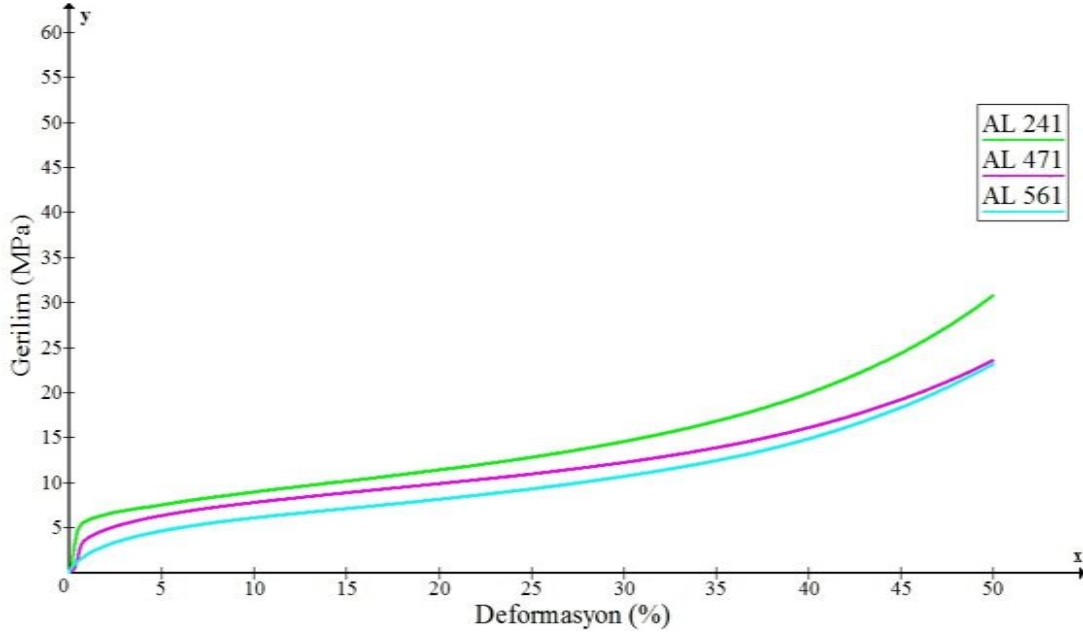
Ayrıca küçük çaplı numunelerin içyapısı incelendiğinde genellikle kapalı hücre formuna sahiptir. Çaplar arttıkça hücre şekli daha çok açık gözenekli forma doğru dönmektedir. Bunun sonucu olarak ta küçük çaplı numunelerin basma dayanımları yüksek olmaktadır.

Çizelge 5.8. Al 1000 serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri

Seri Adı	Kullanılan Tane Boyutu (mm)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa)	Rölatif Yoğ. ρ^*/ρ_s	Küre Yoğunlukları (g/cm ³)
Al 240	2,00–4,00	13,00	0,49	0,95
Al 470	4,00–4,75	11,30	0,45	0,57
Al 560	4,75–5,60	9,50	0,41	0,40

Çizelge 5.8 incelendiğinde serilerin I, II ve III bölgelerindeki eğim, yoğunlukla doğrudan ilişkili olarak değişmiştir. Alüminyum köpükler için “II” bölgesindeki eğimin oldukça düşük olması istendiği göz önüne alınırsa Al560 kod numaralı numune, istenilen en iyi özelliklere sahip olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.4’de 1100°C’de genişletilmiş silika jeller kullanılarak üretilen numunelerden elde edilen basma grafiği sonucu görülmektedir.



Şekil 5.4 Alüminyum esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1100°C de genişletilmiş silika jeller)

Şekil 5.4 incelendiğinde 1100°C’de genişletilmiş silika jeller ile üretilen numunelerden elde edilen basma grafiğine benzer Gerilim – Deformasyon eğrisi elde edilmiştir. Silika jel çapları küçüldükçe silika jellerin dayanımı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak ta grafikten de görüleceği gibi malzeme dayanımı artmaktadır. Silikajel çaplarına paralel olarak üretilen numunelerin yoğunlukları da değişmektedir. Silikajel çapı arttıkça silikajel yoğunluklarının azalması sonucunda üretilen numunelerin daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Numune yoğunluklar arttıkça plastik yıkım gerilmeleri artmaktadır. Üretilen numunelerin relatif yoğunlukları Çizelge 5.9’da verilmiştir.

Çizelge 5.9 Al 1100 serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri

Seri Adı	Kullanılan Tane Boyutu (mm)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa)	Rölatif Yoğ. ρ^*/ρ_s	Küre Yoğunlukları (g/cm ³)
Al 241	2,00–4,00	6,50	0,39	0,28
Al 471	4,00–4,75	5,90	0,36	0,19
Al 561	4,75–5,60	4,30	0,35	0,13

Al esaslı numunelerin basma testi sırasında yapısında herhangi bir bozulma olmamıştır. Deformasyon süresi boyunca numuneler düzenli bir şekilde şekil değişimine uğramıştır.

Darbe enerjisi sönümleyici malzemelerden istenilen akordeon şeklinde şekil değişikliği istenilmektedir. Üretilen numunelerden buna benzer bir şekil değişimi elde edilmiş olup Resim 5.18’de basma testi sırasında ve sonrasındaki numuneler görülmektedir.

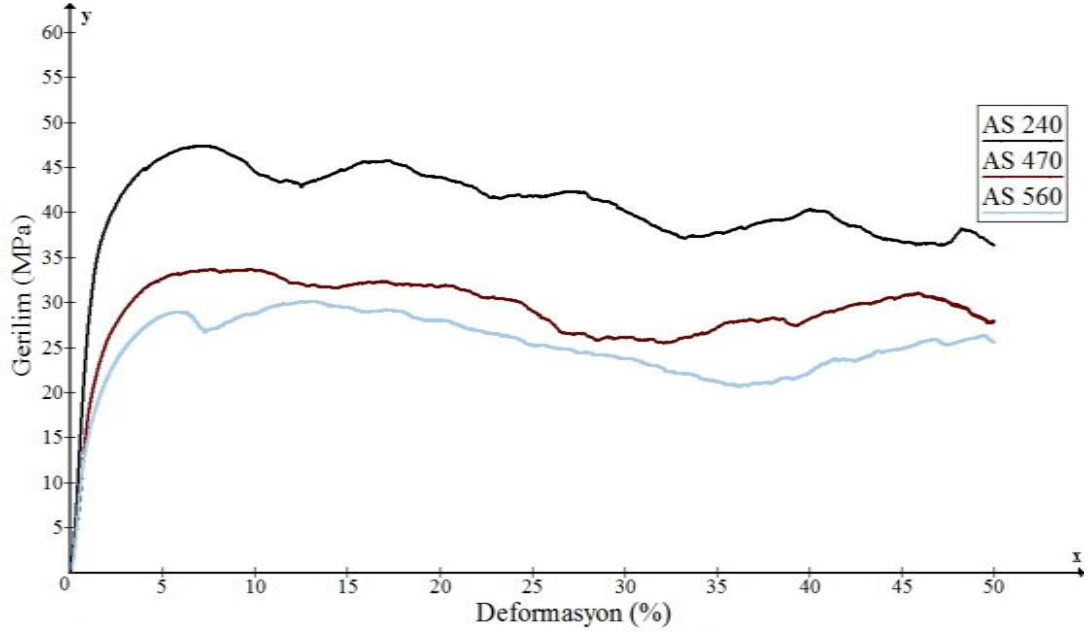


Resim 5.18 Basma testi sırasında ve sonrasındaki Al esaslı numune

5.3.3.1.2 Al-12Si alaşımlı malzemeler için silika jel çaplarının dayanıma etkisi

Al-12Si esaslı 1000°C de genişletilmiş silika jeller kullanılarak üretilen numunelerden elde edilen verilerle Şekil 5.5 te görülen eğriler elde edilmiştir.

Şekil 5.5 incelendiğinde küre çapları arttıkça malzemenin plastik yıkım gerilimi düştüğü sonucuna varılmıştır. Ancak II bölge diye ifade ettiğimiz kısım Al numunelerine göre daha da yatay seviyede seyrettiği görülmektedir. Al numunelere göre plastik yıkım gerilimleri çok yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi alüminyum içersindeki silisyumdan kaynaklanmaktadır. Küre çapları küçüldükçe silika jellerin dayanımı da artmaktadır. Bunun sonucu olarak ta grafikten de görüleceği gibi malzeme dayanımı artmaktadır. Küre çaplarına paralel olarak üretilen numunelerin yoğunlukları da değişmektedir. Ayrıca silika jel çapı küçüldükçe daha fazla gözenek oluşması ve küçük gözeneklerin dirençlerinin daha yüksek olması sebebiyle AS 240 kodlu numune en yüksek plastik yıkım gerilimine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5 Al-12Si esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1000°C de genleştirilmiş silika jeller)

Küre çapı büyütülce üretilen numunelerin daha hafif olduğu gözlemlenmiştir. Küre çapına bağlı olarak hücreler daha çok açık gözenekli yapıya dönmesi sonucunda dayanım azalmakta, bunun sonucu olarak basma dayanımları düşmektedir. Deneyler sonucunda gözlenen önemli nokta, Al-12Si esaslı numunelerin grafiklerinde III bölge olarak belirtilen kısım elde edilememiştir. Bunun sebebi Resim 5.19 incelendiğinde çok net olarak görülebilmektedir. Al-12Si alaşımının sünekliği Al'ye göre düşük olması nedeniyle hücre duvarlarında gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu nedenle III bölgede gözlemlenmesi gereken mukavemet artışı görülemeden deney sonuçlanmıştır.



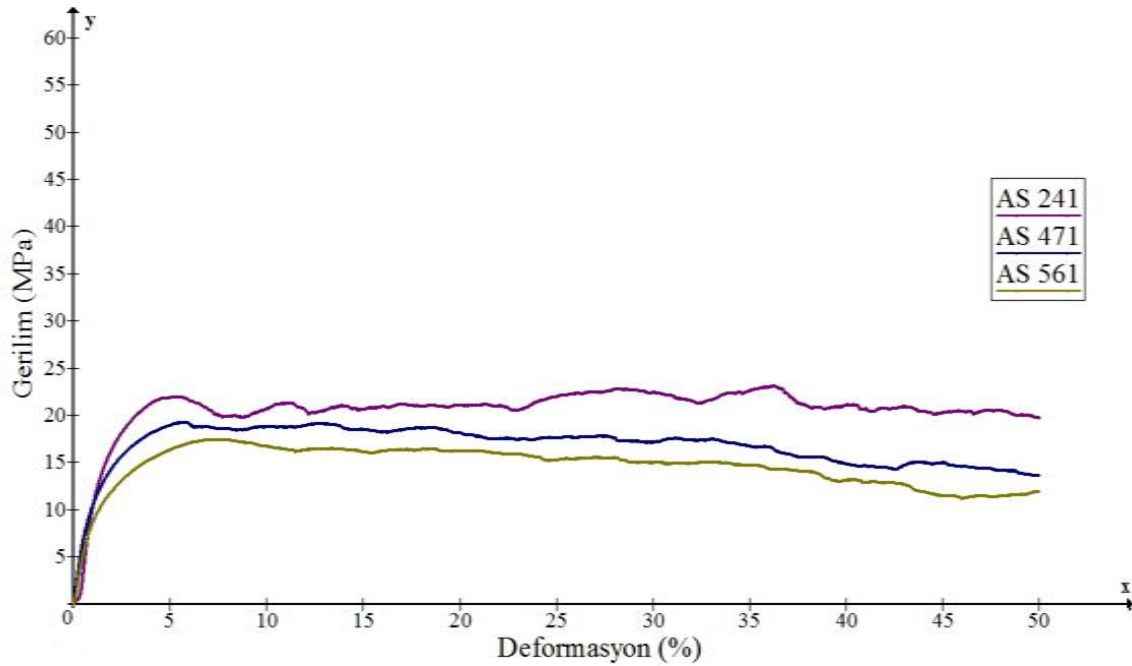
Resim 5.19 Basma testi sırasında ve sonrasındaki Al-12Si içerikli numune

Çizelge 5.10’ da Al-12Si numunelerinin relatif yoğunluk ile basma testinden elde edilen plastik yıkım gerilmeleri görülmektedir.

Çizelge 5.10 AS (Al-12Si) serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilmeleri

Seri Adı	Kullanılan Tane Boyutu (mm)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa)	Rölatif Yoğ. ρ^*/ρ_s	Küre Yoğunlukları (g/cm ³)
AS 240	2,00–4,00	43,30	0,57	0,95
AS 470	4,00–4,75	32,50	0,48	0,57
AS 560	4,75–5,60	27,90	0,43	0,40

Şekil 5.6’da 1100°C de genişletilmiş silika jeller ile üretilmiş olan Al-12Si esaslı numunelerin basma deney grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde Şekil 5.5 teki grafiğe benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.6 Al12Si esaslı malzemelerin basma deney grafiği (1100°C de genişletilmiş silika jeller)

Farklı olarak 1100 °C deki silika jellerin dayanımının düşük olması sebebiyle plastik yıkım gerilmeleri, 1000 °C’de genişletilmiş silika jellerden üretilen numunelerden daha düşük çıkmıştır. 1000°C’de genişletilmiş silika jellerden üretilen numunelere benzer şekilde bu numunelerde de III bölge grafiklerde görülmemektedir.

Çizelge 5.11’de Al-12Si numunelerinin rölatif yoğunluk ile basma testinden elde edilen plastik yıkım gerilmeleri görülmektedir.

Çizelge 5.11 AS serisi numunelerin basma deney grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilmeleri

Seri Adı	Kullanılan Tane Boyutu (mm)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa)	Rölatif Yoğ. ρ^*/ρ_s	Küre Yoğunlukları (g/cm ³)
AS 241	2,00–4,00	22,20	0,37	0,28
AS 471	4,00–4,75	21,10	0,35	0,19
AS 561	4,75–5,60	19,30	0,32	0,13

5.3.3.2 Silika Jel Yoğunluklarının Basma Dayanımına Etkisi

Deneylerde iki farklı sıcaklıkta silika jeller genleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Bunun sonucu olarak silika jeller farklı yoğunluklarda genleşmişlerdir. Dolayısıyla üretilen malzemelerinde yoğunlukları farklılık göstermektedir. Silika jel tane boyutu ve kullanılan malzeme aynı olmasına karşın, genleştirme sonucunda elde edilen yoğunlukların basma dayanımına etkisi çok farklıdır. Çalışma Al ve Al-12Si esaslı iki farklı malzeme kullanıldığı için iki bölümde incelenmiştir.

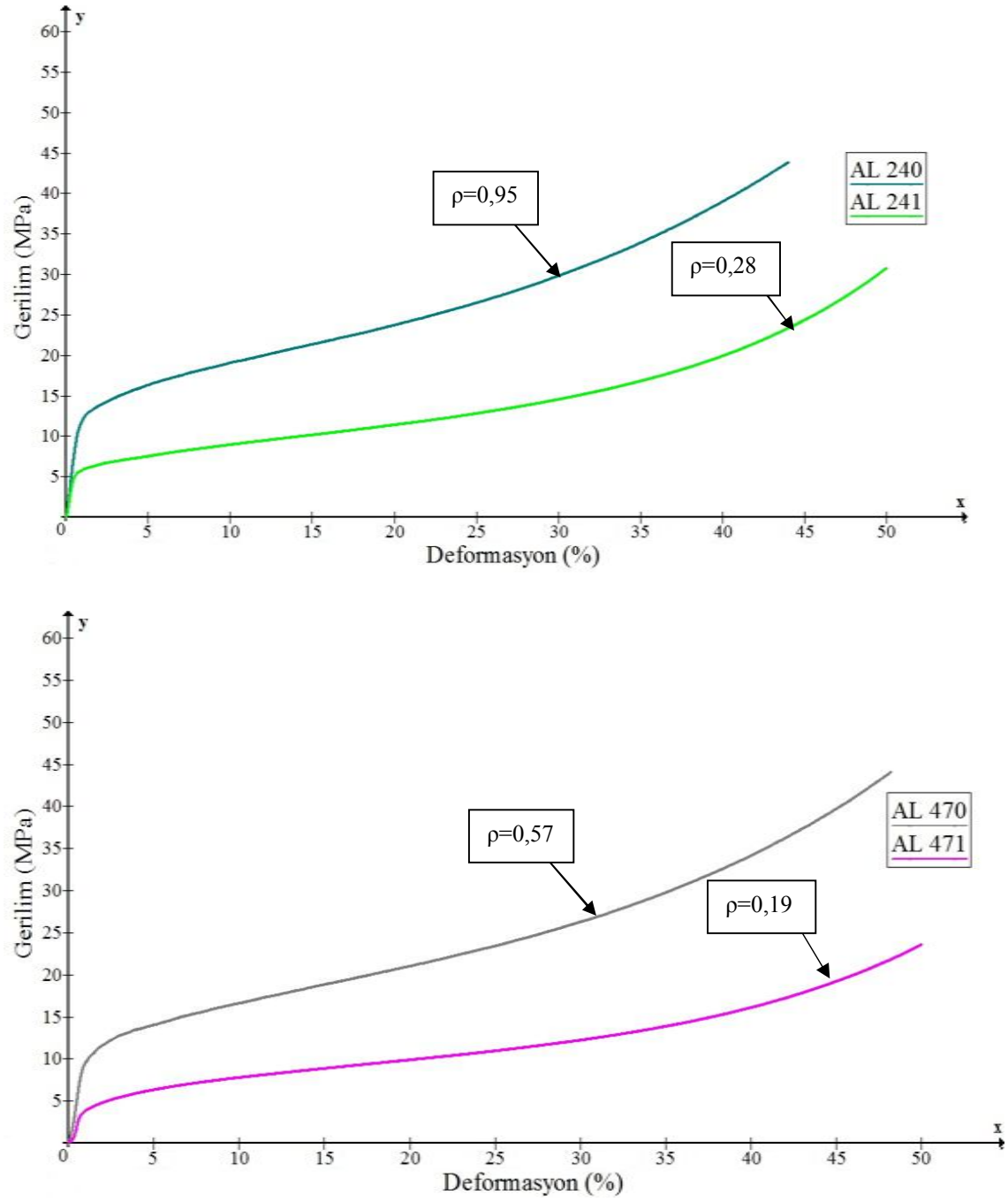
5.3.3.2.1 Al esaslı malzemeler için silika jel yoğunluklarının basma dayanımına etkisi

Şekil 5.7’de Al esaslı malzemeler için aynı çap (2,00–4,00 / 4,00–4,70 / 4,75–5,60) gruplarında fakat farklı yoğunluk değerlerindeki silika jellerin basma dayanımına etkisi görülmektedir.

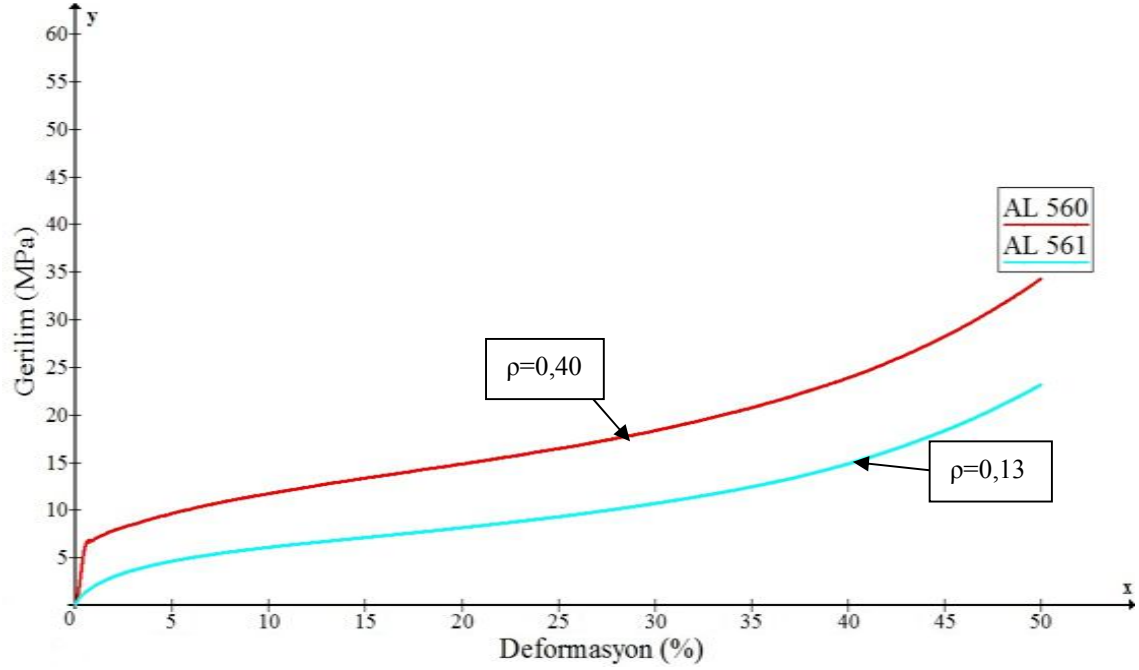
Şekil 5.7 deki grafiklerden de açık olarak görüleceği gibi silikajeller arasındaki yoğunluk farkı arttıkça plastik yıkım gerilmelerinde bağlı olarak Gerilme- Deformasyon grafikleri arasındaki farkta artmaktadır. Yoğunluk farkı azaldıkça eğriler birbirine daha da yaklaşmaktadır. Gerilme – Deformasyon grafikleri arasındaki en fazla fark silikajel çapı 2,00–4,00 mm kullanılan numunelerde görülmüştür.

Buradan elde edilen verilerin sonucunda dikkate çarpan en önemli husus silika jel

tanelerinin yoğunlukları önemli bir üretim parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 5.7 Al esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deney grafiği



Şekil 5.7 (Devam) Al esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deney grafiği

Çizelge 5.12 Al esaslı numunelerde silika jel yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması

Silika jel çapı (mm)	1000 °C'de üretilen silakajel yoğ. (g/cm ³)	Plastik Yık. Ger. σy (MPa) 1000 °C	1100 °C'de üretilen silakajel yoğ. (g/cm ³)	Plastik Yık. Ger. σy (MPa) 1100 °C
2,00–4,00	0,95	13,00	0,28	6,50
4,00–4,75	0,57	11,30	0,19	5,90
4,75–5,60	0,40	9,50	0,13	4,30

Çizelge 5.12'deki değerler incelendiğinde aynı çaptaki silika jel yoğunluk ve plastik yıkım gerilimleri olarak aralarında sabit bir oran tespit edilmiştir. Bu oran 1000 °C de üretilen silika jel yoğunluğu 1100 °C de üretilen silika jel yoğunluğunun yaklaşık üç (3) katı iken, plastik yıkım gerilimlerinde yaklaşık iki (2) kat olarak tespit edilmiştir. Çaplar artmasına rağmen aralarındaki oranlar aynı kaldığı gözlemlenmiştir.

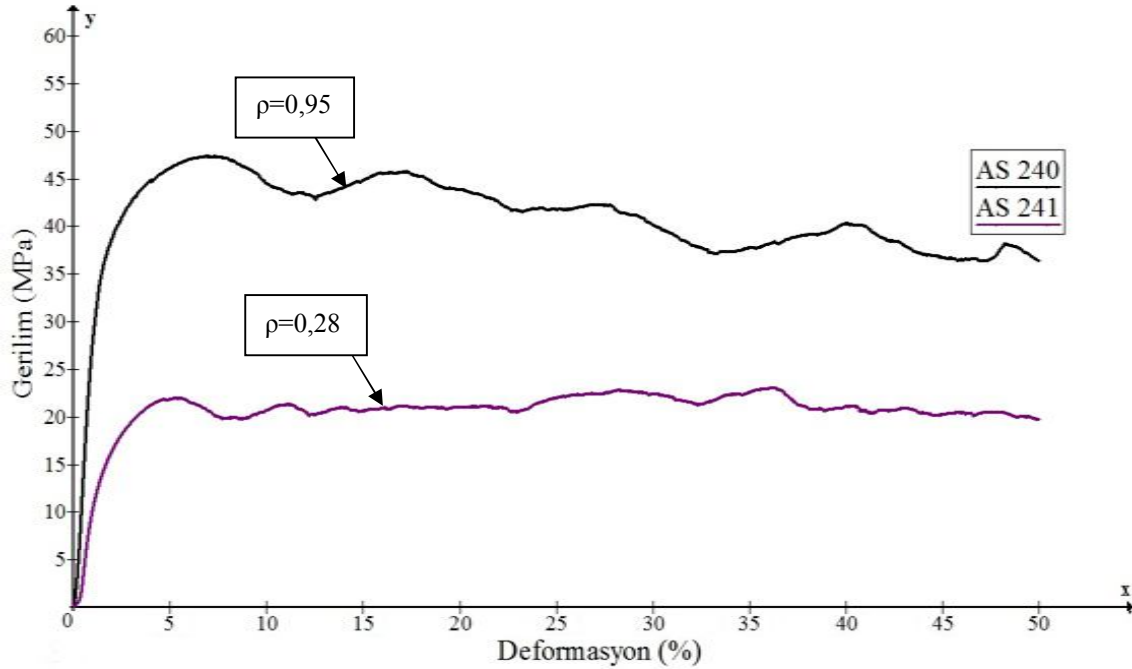
5.3.3.2.2 Al-12Si alaşımlı malzemeler için silika jel yoğunluklarının basma dayanımına etkisi

Şekil 5.8'de Al-12Si esaslı malzemeler için aynı çaplarda fakat farklı yoğunluk değerlerindeki silika jellerin basma dayanımına etkisi görülmektedir.

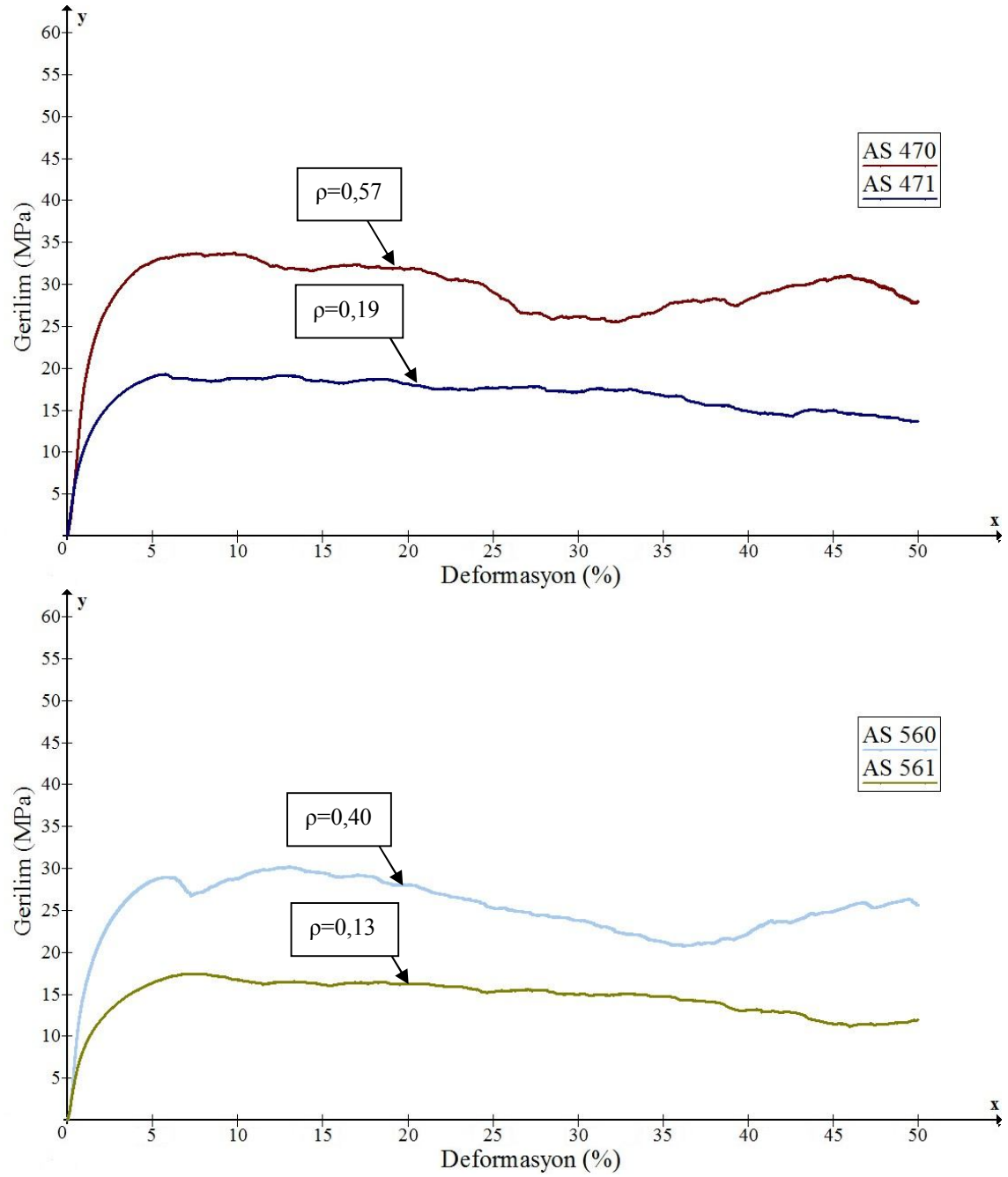
Al-12Si esaslı numunelerin akma dayanımları Al esaslı numunelere oranla daha yüksektir. Silika jellerin arasındaki yoğunluk farkı arttıkça Gerilme - Deformasyon grafiklerinden de görüleceği gibi aralarındaki farklarda artmaktadır. Silika jel çapları arttıkça eğriler birbirine daha da yaklaşmaktadır. En fazla fark 2,00–4,00 mm arasında üretilen numunelerde görülmüştür. Yoğunluğu yüksek olan numunelerin eğrileri çok fazla salınım yaparken düşük yoğunluklu numuneleri basma eğrileri daha doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 5.13’de Al-12Si esaslı numunelerden elde edilen plastik yıkım gerilimleri ile yoğunluklar arasındaki değerler gösterilmiştir.

Çizelge 5.13 Al12Si esaslı numunelerde silika jel yoğunlukları ile plastik yıkım gerilimlerinin karşılaştırılması

Silika jel çapı (mm)	1000 °C’de üretilen silakajel yoğ. (g/cm ³)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa) 1000 °C	1100 °C’de üretilen silakajel yoğ. (g/cm ³)	Plastik Yık. Ger. σ_y (MPa) 1100 °C
2-4	0,95	43,30	0,28	22,20
4-475	0,57	32,50	0,19	21,10
4,75-5,6	0,40	27,90	0,13	19,30



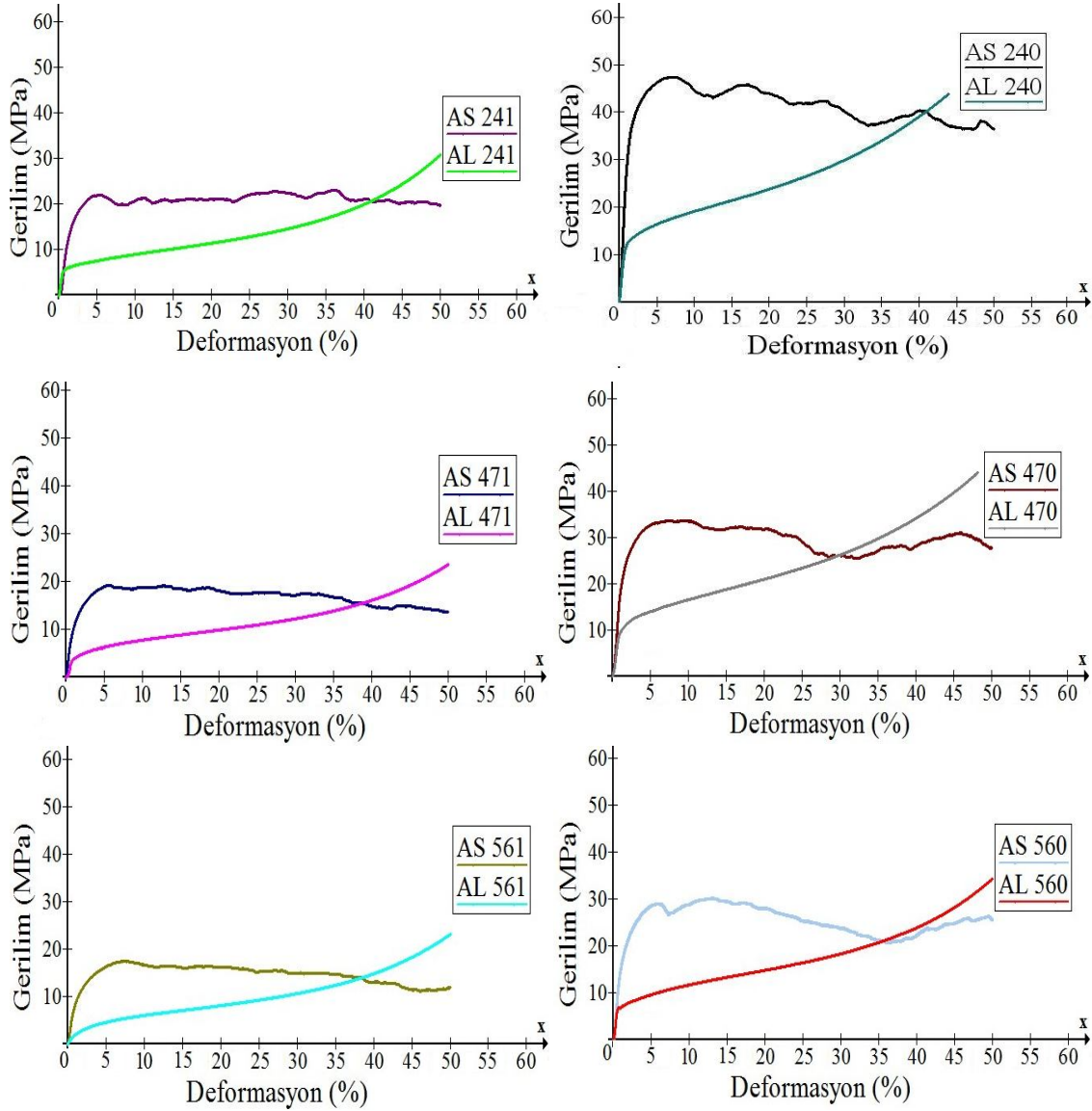
Şekil 5.8 Al-12Si esaslı malzemelerin farklı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi



Şekil 5.8 (Devam) Al12Si esaslı malzemelerin farklı silikajel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi

5.3.3.3 Alaşımın malzeme dayanımına etkisi

Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin farklı yoğunluktaki numunelerin basma deney sonuçları Şekil 5.9 da görülmektedir.



Şekil 5.9 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin aynı silika jel yoğunluklarındaki numunelerin basma deneyi

Şekil 5.9’ da görüldüğü gibi Al-12Si alaşımından üretilen numunelerin plastik yıkım gerilimleri saf Al ye göre çok yüksek olmakla birlikte en yüksek akma mukavemeti 1000 °C genişletilmiş, silika jel çapı 2-4mm arasında olan numunelerde (AS 240 ve AL 240) elde edilmiştir. Yoğunluğu düşük olan numunelerde daha düşük akma mukavemeti gözlemlenmiş olup en düşük akma dayanımı 1100 °C genişletilmiş, silika jel çapı 4,75-5,6 mm arasında olan numunelerde (AS561 ve AL561) gözlemlenmiştir. Silikajel çapı azaldıkça hücre duvar boyutları küçüldüğü için malzemenin dayanımı artmaktadır. Xiao-qing ve arkadaşları Al-Mg-Si alaşımlı ve Al-Cu-Mg alaşımlı açık hücreli metalik

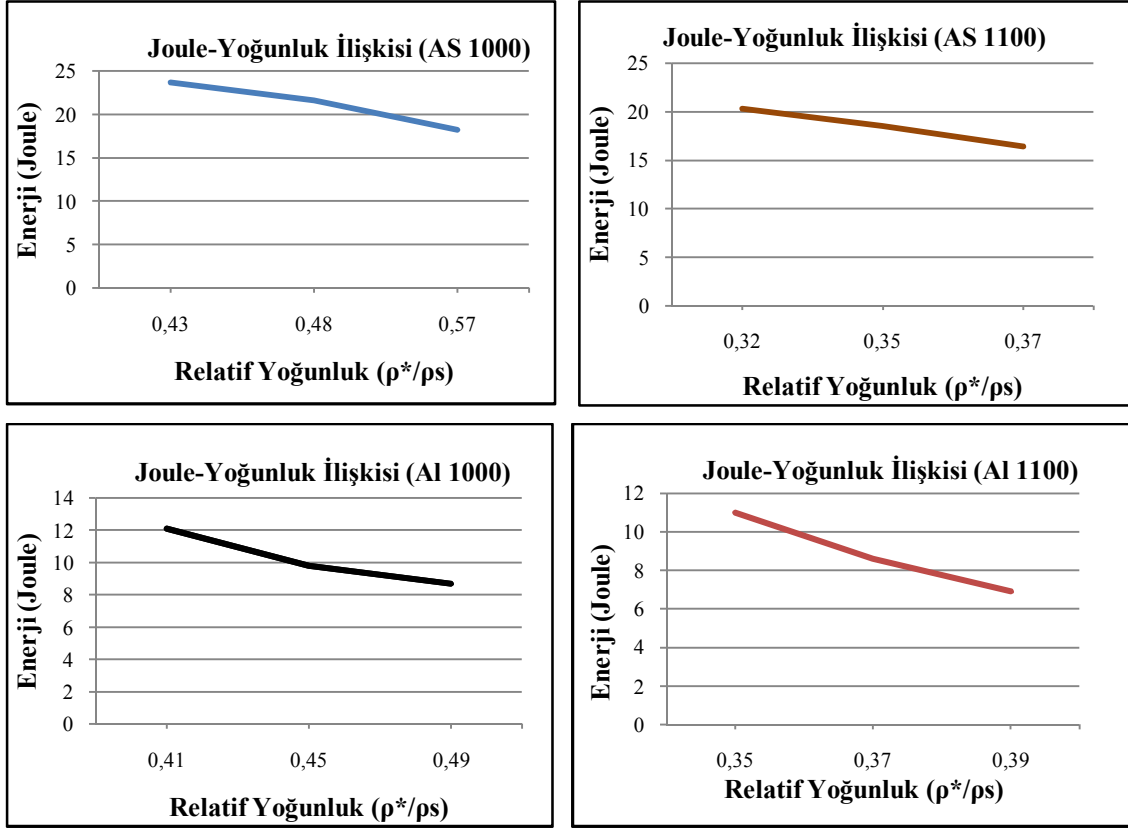
köpüklerin enerji absorpsiyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları deneylerinde Si alaşımlı köpüklerde plastik yıkım gerilimi olarak yaklaşık 15,58–20,88 MPa arasında bir gerilim bulmuş Al-Cu alaşımlı köpüklerde ise 12,09–15,33 MPa değerleri tespit etmişlerdir (Xiao-qing et al. 2006). Deneylerde bulunan silisyum alaşımlı üretilen numunelerden elde edilen değerler literatürdeki değerlerden çok yüksektir. Yüksek olmasının temel sebebi alaşım içersindeki silisyumdan kaynaklanmaktadır. Diğer bir önemli nokta ise üretilen numunelerin yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle dayanımda artmaktadır. Alüminyumdan üretilmiş numuneler için ise literatürde yapılan çalışmalara benzer şekilde yaklaşık 5-15 MPa arasında plastik yıkım değerleri tespit edilmiştir.

5.3.4 Çentik Darbe Dayanımı

Çalışmanın bu bölümünde üretilen numunelerden 10x10x55 mm ölçülerinde numuneler numune kesme cihazında kesilerek hazırlanmıştır. Deneyler için çentiksiz numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Bölüm 4'te açıklanan çentik darbe test cihazında teste tabi tutulmuştur.

5.3.4.1 Yoğunluğun Çentik Darbe Dayanımına Etkisi

Yoğunluğun çentik darbe dayanımına etkisi Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi tüm numunelerde yoğunluk azaldıkça numunelerin çentik darbe dayanım değeri giderek artmıştır. Saf alüminyumun sünek bir yapıya sahip olması sebebiyle darbe testinde bükülme meydana gelmiş ve darbe direnci ölçülememiştir (Resim 5.20). Al-12Si malzemenin ise gevrek olması sebebiyle darbe dayanımı ölçülmüş olup, darbe enerji değeri 14 Joule'dür. Elde edilen değerler sonucunda göreceliğe bağlı olarak enerji absorbe ve darbe dayanımı artmaktadır.



Şekil 5.10 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin farklı yoğunluktaki numunelerin çentik darbe deneyi

Grafiklerden de görüleceği gibi daha düşük yoğunluklu numunelerin darbe sönümleme özellikleri, yoğunluğu yüksek olan numunelere göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Gözenekli yapıların darbe enerjisi absorbe edebildiği darbe testi sonucunda açıkça görülmektedir. Al-12Si numunesinin kırılmasından elde edilen sonuç 14j olarak tespit edilmesine rağmen aynı malzemeden üretilmiş gözenekli yapıların hepsinin kırılma enerjisi bu değerden daha yüksektir. Sirong You ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda relatif yoğunluk arttıkça enerji absorpsiyon kapasitesinin düştüğü sonucuna varmışlardır (You et al. 2009). Roberto Montanini alüminyum köpükler üzerine yapmış olduğu çalışmasında ise benzer olarak relatif yoğunluğun artması sonucunda enerji absorbesinin düştüğü sonucuna varmıştır (Montanini 2005).

Çizelge 5.14’de deneylerden elde edilen ortalama enerji sönümleme değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.14 Çentik darbe deney sonuçları

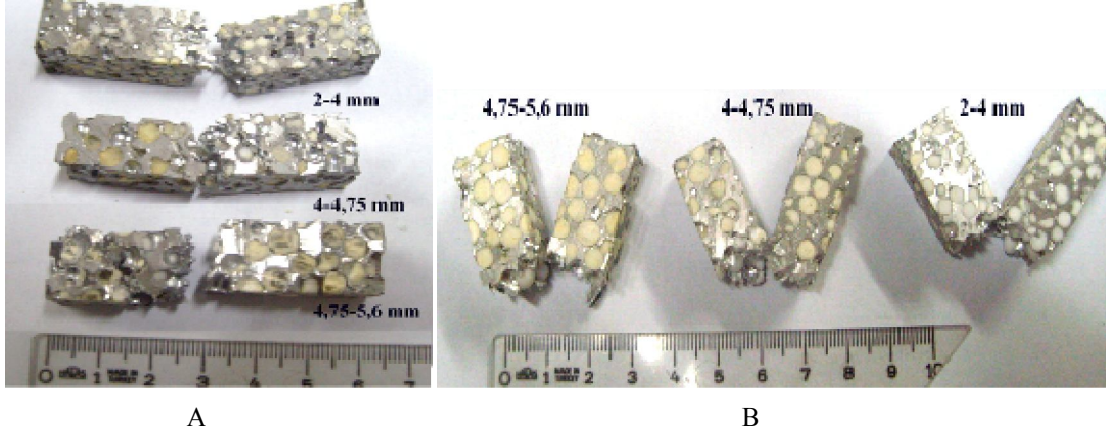
Numune Kodu	Enerji (Joule)	ρ^*/ρ_s
Saf Al12Si	14,0	1,00
Saf Al	Enerjiyi yuttu	1,00
AS 240	18,2	0,57
AS 470	21,6	0,48
AS 560	23,7	0,43
AS 241	16,4	0,37
AS 471	18,5	0,35
AS 561	20,3	0,32
Al 240	8,7	0,49
Al 470	9,8	0,45
Al 560	12,1	0,41
Al 241	6,9	0,39
Al 471	7,6	0,37
Al 561	11,0	0,35

Ham malzemelerden yapılan çentik darbe numuneleri Resim 5.20’de, köpük numunelerden üretilen çentik darbe numuneleri ise Resim 5.21’de görülmektedir.



Resim 5.20 Al12Si ve Al parçalarının darbe testi sonucundaki görüntüleri

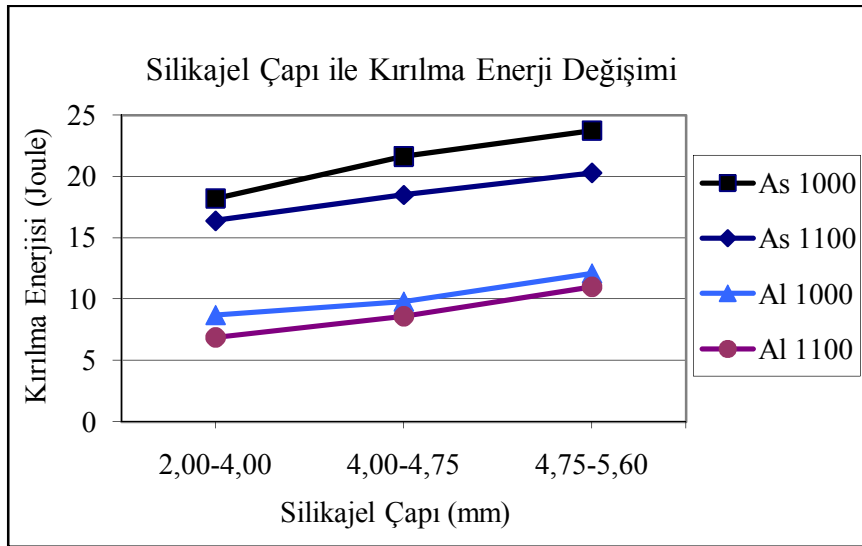
Resim 5.21’de görüldüğü gibi Al-12Si den üretilen numuneler darbe sonucu çok rahatlıkla iki parça haline bölünmektedir. Al’dan üretilen numunelerde ise alüminyumun sünek olmasında dolayı bir miktar bağlantı kalmaktadır.



Resim 5.21 Çentik darbe testi numuneleri (A: Al-12Si Numuneler, B: Al Numuneler)

5.3.4.1 Silika Jel Çapının Çentik Darbe Direnci Dayanımına Etkisi

Silika jel çapının çentik darbe direnci dayanımına etkisi Şekil 5.11’de görülmektedir.

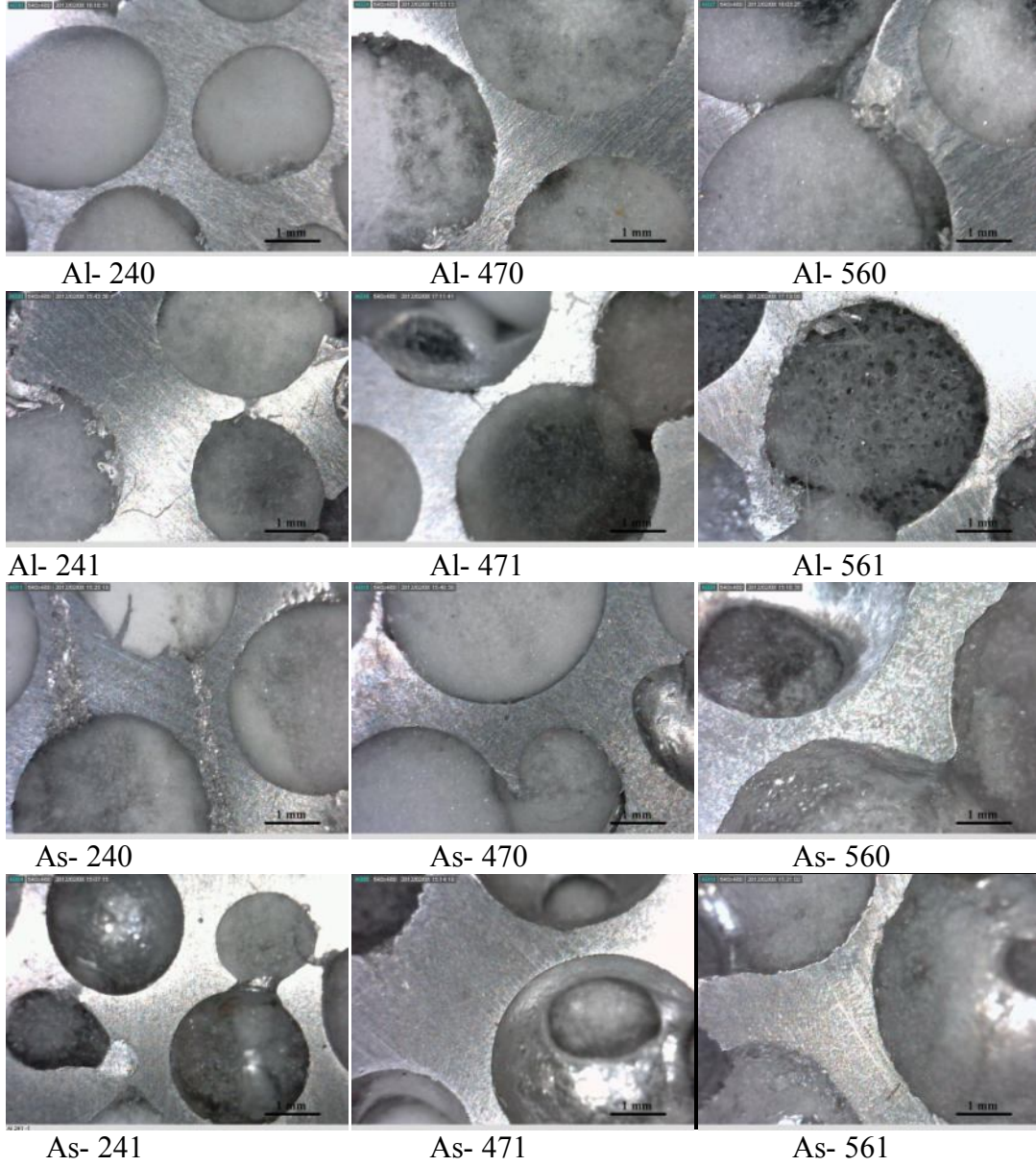


Şekil 5.11 Al-12Si ile Al esaslı malzemelerin silika jel çapı ile enerji absorblama değişimi

Şekil 5.11 incelendiğinde silikajel çapları büyüdükçe köpüklerin enerji absorbe edebilme özelliği artmaktadır. Çap büyüdükçe gözenekler arttığı için şekil değişim daha fazla olmakta dolayısıyla absorbe edebildiği enerji daha da artmaktadır. Deneyler sonunda saf metalin (Al-12Si) 14 joule olarak ölçülmüşken metalik köpük numunelerin enerji değerleri kullanılan silika jel çapına göre yaklaşık 25 joule’e kadar çıkmaktadır. Malzemeyi kırmak için gerekli enerji artmakta bu ise gözeneklerin gelen enerjiyi absorbe ettiği sonucunu çıkarmaktadır.

5.3.5 Hücre Duvarı Analizleri

Hücre duvarlarının analizi için Bölüm 4’de bahsedilen USB mikroskop kullanılmıştır.



Resim 5.22 Hücre duvar fotoğrafları

Resim 5.22 incelendiğinde 1000 °C’de genişletilmiş silika jellerden üretilen numunelerin hücre duvarları ve gözenekler yapısal olarak daha homojen bir şekilde görülmektedir. 1100 °C’de genişletilmiş silika jel kullanılarak üretilen numunelerin silikajel yoğunluklarının düşük olmasından dolayı yüzey düzeltme işlemi sırasında

(zımparalama) yerlerinden ayrılarak çıkmışlar ve sonrasında hücre duvarlarının beraberinde kırıldığı gözlemlenmiştir. Silika jel çapı büyüdükçe hücre duvarlarında incelendiği görülmüştür. Ayrıca çaplar büyüdükçe hücreler arasında bir bağlantı gözlemlenmiş bunun sonucundada açık gözenekli yapıya daha yatkın bir köpük yapısı görülmüştür. Al ve Al-12Si numuneleri arasında inceleme yaptığımızda ise alüminyum esaslı numunelerin hücre yapıları daha düzgün yapıya sahip iken Alüminyum silisyum alaşımlı malzemeden üretilen numunelerin hücre duvarları Silisyum alaşımından kaynaklanan daha kırılğan bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Üretilen numunelerin gözenek tipi olarak küçük silikajel çapı kullanılan numunelerde daha çok kapalı hücre tipi yapıya sahiptirler. Silikajel çapı büyüdükçe numunelerde yapı giderek açık gözenekli şekline dönüşmektedir.

5.3.6 Elastik ve Plastik Deformasyon Özellikler

Elastik özellikler malzemelerin en önemli özellikleridir. Metalik köpük yapıların basma mukavemeti metal yapılara kıyasla yoğunluk, hücre geometrisi gibi özelliklerinden dolayı farklı bir davranış gösterir. Basma grafiklerinden elde edilen veriler Bölüm 3.4'te verilen Formül 3.7'deki Gibson-Asbhy teoremine göre denklemde yerleştirildiğinde Çizelge 5.15'deki sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan Alüminyum malzemeler için $E_s=69$ GPa, Al-12Si Malzemeler için ise $E_s=73$ GPa olarak alınmıştır (Konstantinidis et al 2005, Simone and Gibson 1998).

Çizelge 5.15 Ashby-Gibson teoremine göre elastik modül

Numune Adı	ρ^*/ρ_s	E_s (GPa)	E^* (GPa)
AS 240	0,57	73	20,86
AS 470	0,48	73	16,63
AS 560	0,43	73	14,40
AS 241	0,37	73	11,83
AS 471	0,35	73	11,08
AS 561	0,32	73	9,78
Al 240	0,49	69	16,28
Al 470	0,45	69	14,22
Al 560	0,41	69	12,73
Al 241	0,38	69	11,79
Al 471	0,36	69	11,02
Al 561	0,35	69	10,38

Çizelge 5.15 incelendiğinde yoğunluğun azalmasıyla elde edilen Elastik Modül düşmektedir. En yüksek Elastik Modül değeri AS 240 kodlu numunede elde edilmiş olup en düşük sonuç ise yoğunluğu en düşük olan AS 561 kodlu numunede elde edilmiştir. 1000 °C’de genleştirilmiş ve 2–4 mm çapındaki silikajel kullanılan numunelerde daha yüksek Elastik Modül tespit edilmiştir. Bu numunelerin hücre yapısının kapalı gözeneğe daha yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.16 incelendiğinde yoğunluğun azalmasıyla plastik yıkım gerilimleri düşmektedir. Çizelge 5.18 de Gibson-Asbhy teoremi (Formül 3.10) ile basma grafiğinden elde edilen plastik yıkım gerilimlerinin yakınlığı “% oran” olarak tespit edilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan Alüminyum malzemeler için $\sigma_s = 52$ GPa, Al-12Si Malzemeler için ise $\sigma_s = 150$ GPa olarak alınmıştır (Konstantinidis et al 2005, Simone and Gibson 1998). Basma grafiklerinden elde edilen plastik yıkım gerilimleri ile karşılaştırıldığında Al 241, Al 471 ve Al 561 kodlu numuneler haricinde tüm numunelerde %87-%97 arasında yakın değerler bulunmuştur. Bu fark, üretimde elde edilen numunelerin hücre duvarları ile matematiksel çalışmada elde edilen hücre duvarları için kullanılan katsayıdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 5.16 Ashby-Gibson teoremine göre plastik yıkım gerilimi

Numune Adı	ρ^*/ρ_s	σ_s	σ^*_{teo}	σ^*_{grafik}	Oran %
AS 240	0,5692	150	42,13	43,30	0,97
AS 470	0,4809	150	34,49	32,50	0,94
AS 560	0,4309	150	30,42	27,90	0,92
AS 241	0,3697	150	25,65	22,20	0,88
AS 471	0,3511	150	24,24	21,10	0,88
AS 561	0,3177	150	21,76	19,00	0,87
Al 240	0,4937	52	12,33	13,00	0,95
Al 470	0,4455	52	10,95	11,30	0,97
Al 560	0,4093	52	9,95	9,50	0,95
Al 241	0,3855	52	9,32	6,50	0,70
Al 471	0,3654	52	8,77	5,90	0,67
Al 561	0,3487	52	8,34	4,30	0,52

5.3.7 Enerji Sönümleme Özelliği

Köpükler darbe enerjisinin büyük bir kısmını plastik deformasyon enerjisine çevirerek, objedeki yükü zarar verebilecek seviyelerin altında tutar. Yoğun metallerle karşılaştırıldığında, köpük malzeme sabit bir yük altında daha fazla enerji emme kapasitesine sahiptir. Enerji absorbe miktarı basitçe gerilim deformasyon grafiği (belirli bir deformasyona kadar) altındaki alana tekabül etmektedir.

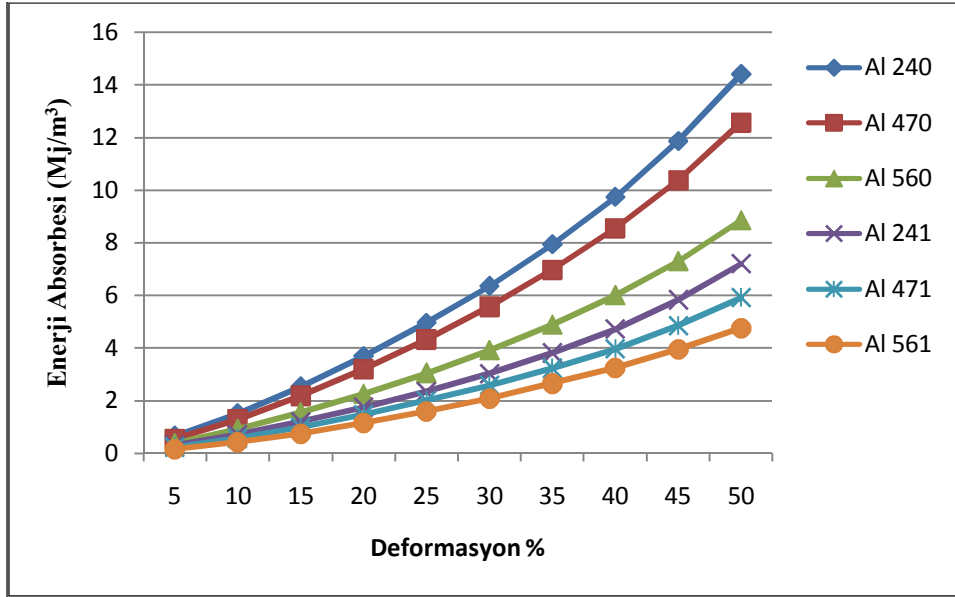
Çizelge 5.17’de basma testinden elde edilen kuvvet-şekil değişimi grafiği altında kalan alanlar eğri benzeştirme yapılarak tespit edilmiştir. Çizelgeden de açıkça görüleceği gibi şekil değişimler arttıkça harcanan enerjilerde artmaktadır. En büyük enerji absorbesi AS 240 kodlu numunede gerçekleşmiştir. En düşük ise Al 561 kodlu numunede gerçekleşmiştir.

Çizelge 5.17 Şekil değişimi ile enerji çözümleme miktarı

Numune Adı	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	R ²
AS 240	1,74	4,13	6,38	8,53	10,66	12,76	14,74	16,62	18,52	20,40	R ² =0.83
AS 470	1,18	2,89	4,55	6,10	7,59	9,00	10,33	11,67	13,16	14,66	R ² =0.89
AS 560	1,00	2,48	3,95	5,35	6,70	7,95	9,07	10,13	11,31	12,61	R ² =0.92
AS 241	0,75	1,84	2,87	3,88	4,95	6,08	7,20	8,26	9,30	10,32	R ² =0.89
AS 471	0,69	1,66	2,60	3,49	4,39	5,28	6,13	6,92	7,66	8,38	R ² =0.93
AS 561	0,58	1,45	2,28	3,08	3,86	4,65	5,40	6,09	6,71	7,29	R ² =0.95
Al 240	0,66	1,52	2,54	3,69	4,96	6,36	7,94	9,74	11,86	14,40	R ² =0.98
Al 470	0,55	1,29	2,19	3,20	4,33	5,57	6,96	8,54	10,38	12,56	R ² =0.99
Al 560	0,39	0,92	1,55	2,26	3,05	3,92	4,89	6,00	7,30	8,85	R ² =0.99
Al 241	0,30	0,71	1,20	1,75	2,35	3,03	3,81	4,72	5,83	7,20	R ² =0.99
Al 471	0,23	0,57	0,99	1,47	2,00	2,58	3,23	3,97	4,85	5,91	R ² =0.99
Al 561	0,16	0,42	0,75	1,15	1,59	2,08	2,35	2,85	3,65	4,75	R ² =0.99

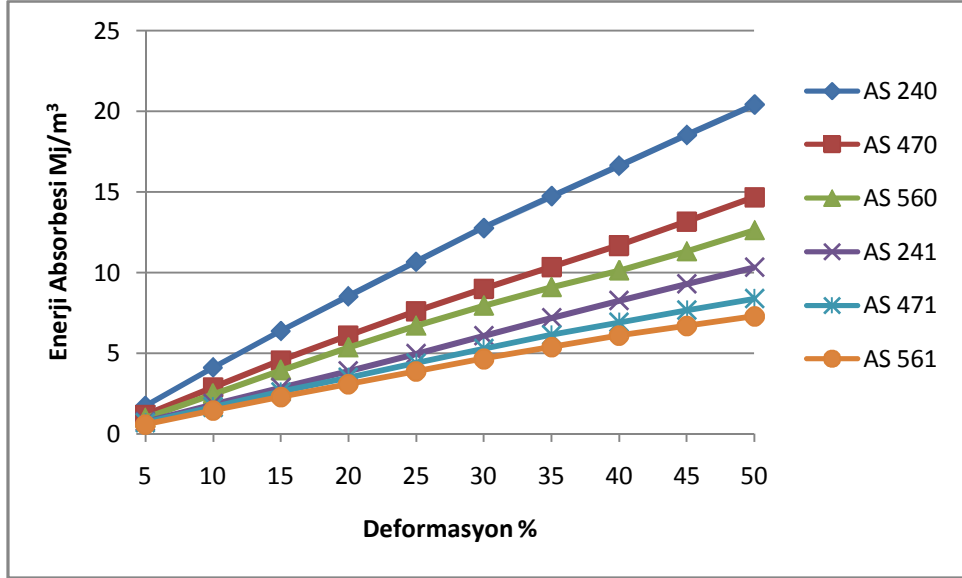
Şekil 5.12’de alüminyum numunelerin şekil değişimi ile enerji absorbe edebilme kabiliyetleri görülmektedir. Şekil değişim miktarı arttıkça absorbe etkileri enerjide artmaktadır. En yüksek enerji şekil değişim değeri Al 240 kodlu numune de ölçülmüş olup yaklaşık 15 Mj/m³’dür. Numunelerin şekil değişim ile enerji absorbeleri parabolik bir eğri oluşmaktadır. Sirong Yu ve arkadaşları açık gözenekli ZA22 metalik köpükler

üzerinde deneyler yapmışlardır. Deney sonuçlarında üretilen numunelerin yoğunluklarına göre 4 MJ/m^3 ile 12 MJ/m^3 arasında enerji absorbe değerleri tespit etmişlerdir (Yu et al. 2009). Michalidis ve arkadaşları alüminyum köpüklerin deformasyon ve enerji absorbesi üzerine benzer bir çalışma yapmış olup, şekil değişimi arttıkça enerji absorbe değeri arttığı sonucuna varmışlardır (Michalidis et al 2011).



Şekil 5.12 Alüminyum malzemeler için şekil değişimi - enerji çözümleme

Şekil 5.13 de alüminyum silisyum alaşımlı numunelerin şekil değişimi ile enerji absorbe edebilme kabiliyetleri görülmektedir. Şekil değişim miktarı arttıkça absorbe etkileri enerjide artmaktadır. Numunelerin şekil değişim ile enerji absorbe grafikleri alüminyum içerikli köpüklere nazaran daha düz bir eğri oluşmaktadır. Bunun sebebi alüminyum silisyum alaşımlı numunelerin gerilim-deformasyon eğrilerinin çok gevrek bir yapıya sahip olması ve üçüncü bölge olarak belirtilen bölgeye geçememesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 5.13.'deki grafiklerde belirtilen alüminyum içerikli köpüklere benzer şekilde paralel olarak görülmekle birlikte eğriler arasındaki fark en fazla AS240 ile AS470 kodlu numuneler arasında görülmektedir.



Şekil 5.13 Al12Si malzemeler için şekil değişimi-enerji absorbesi

En yüksek enerji şekil değişim değeri AS 240 kodlu numune de ölçülmüş olup yaklaşık 20 Mj/m^3 dür. En düşük değer ise yaklaşık 7,3 Mj/m^3 olarak ölçülen AS561 kodlu numunede görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Açık gözenekli köpükler otomotiv sektöründe filtre, ısı iletimi istenilen yerlerde (kalorifer radyatörleri, katalitik konvertör) kullanılabilir. Bu amaçla açık gözenekli yapı üreilmeye çalışılmış ancak iyi bir sonuç alınamamıştır. Toz metalürjisi tekniği kullanarak üretilen metalik köpüklerden elde edilen genel sonuçlar şunlardır:

- Toz metalürjisi yönteminde seçilen tozların küresel veya çubuksu olması, tozların homojen karışmasında farklılıklar oluşmasına neden olmuştur. Küresel olan tozlar daha homojen karışırken, çubuksu tozların homojen karışmadığı görülmüştür. Dolayısıyla homojen olmayan bir gözenek yapısı elde edilmiş olup çubuksu tozların dağılımının yapı içersinde belirli bir bölgede toplanması durumunda hücre duvarları oluşmamakta veya zayıf bir hücre duvarı oluşması sebebiyle çözünme esnasında yapı dağılmaktadır.
- Toz metalürjisi ile üretilen numunelerde üretimde kullanılan presin en yüksek basıncının 200 bar olması sebebiyle alüminyum köpük numunelerin yapısal bütünlüğünü koruyabilmesi için gerekli olan preslenme basıncına ulaşılammıştır. Literatürdeki araştırmalara göre pres basıncının düşük olması sebebiyle (350-650 bar) yapıda dağılmalar görülmüştür.
- Toz metalürjisi yöntemi ile elde edilen alüminyum köpük numunelerin sinterlenme sıcaklığı olarak 640°C ve süre olarak da 2 saat sürenin uygun olduğu görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının daha yüksek seçilmesi veya sürenin daha uzun seçilmesi, alüminyum köpük numunelerinin ergimesi, oksitlenmesi veya yapısal bütünlüğünün bozulmasına neden olmuştur.
- Toz metalürjisinde kullanılan NaCl ve Na₂CO₃ boşluk tutucu tozlardan çözünmeye en uygun olan toz NaCl olarak belirlenmiştir. Na₂CO₃ tozları ise suda çözünme esnasında hızlı bir çözünme gerçekleştirdiği ve çözünme hızının kontrol altına alınamaması sebebiyle alüminyum tanelerinin birbirinden ayrılmasına

neden olmuş, dolayısıyla köpük numunenin yapısal bütünlüğünün bozulduğu görülmüştür.

- Alüminyum köpük elde etmek için yapılan çözme işleminde, suyun çözme sıcaklığı NaCl için 80°C olarak tespit edilmiştir. Diğer boşluk tutucu toz olan Na₂CO₃ için sıcaklığın çözme işlemine etkisinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Na₂CO₃ kullanıldığında çözme işleminin oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ancak buna rağmen Na₂CO₃ boşluk tutucu tozlar, alüminyum köpüğün yapısal bütünlüğünü bozmuştur.

Deneysel çalışmaların ikinci bölümü olan ergitme yöntemi ile metalik köpük üretiminde daha başarılı bir köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen metalik köpüklerin yoğunluklarının düşük olması sebebiyle otomotiv sektöründe küçük darbeleri (yayalara çarpma durumunda motor kaputu, tampon dış bölümü vb.) absorbe etme alanlarında kullanılabileceği sonucu çıkarılabilir. Metalik köpük üretimi ile elde edilen ürünlerden çıkarılan sonuçlar şunlardır:

- Ergitme yöntemi ile üretilen tüm numunelerin orta kısmında boşluk oluştuğu görülmektedir. Boşluk hacminin, numune üretim sıcaklığı, fırında bekleme süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Üretimde alüminyum ergiyik halde iken fırından çıkartılıp mermer tozu ve diğer tozların katılması esnasında alt bölgeler orta ve üst kısımlara göre çok daha hızlı soğumaktadır. Bunun sonucunda da orta bölgeler sıvı halde iken alt bölge katılaşmakta tekrar fırına konulduğunda ise sıvı bölgelerde hızla gözenek oluşumu gerçekleşmekte katı bölgeler ise eriyemeden mermer tozunun gaz vermesi tamamlanmaktadır. Bu sebeple alt bölgelerde gözenek oluşumu gerçekleştirilememiştir.
- Numunelerde en fazla gözenek oluşumu %5 mermer tozu miktarında tespit edilmiştir. Mermer tozu miktarı %5 in altına indikçe gaz verecek madde miktarı azaldığı için gözenek oluşumu azalmaktadır. %5 in üzerindeki mermer tozu oranlarında ise gözeneklerde bozulmalar meydana gelmektedir.

- %2,5 oranında SiC oranı katkı maddesi olarak tespit edilmiştir. % 2,5 SiC miktarından sonra hücre duvarlarında kırılmalar meydana gelerek yapı bozulmakta ve homojenlik kaybolmaktadır. SiC %2,5'in altında katıldığında ise yeteri miktarda akıcılık ve heterojen çekirdeklenme noktası oluşmaması sebebiyle hücre miktarı azalmaktadır.
- SiC katılan numuneler, Al_2O_3 katılan numunelere göre daha iyi bir köpürme gerçekleşmiştir. SiC içerdiği silisyum nedeniyle alüminyumun akıcılığını bir miktar artırmaktadır. Bu sebepten dolayı gözenek oluşumu Al_2O_3 'e göre daha iyi ve homojen olmaktadır.
- Karıştırma devrinin gözenek oluşumunda en etkin parametrelerden biri olarak tespit edilmiştir. 1000 1/dk.'ya kadar köpürme gerçekleşmemiştir. En iyi sonuç D5 kodlu 1600 1/dk.'da yapılan numunede gerçekleşmiştir. Bu devirden sonraki yapılan çalışmalarda ise ergimiş alüminyum potadan sıçramış ve tehlikeli bir durum oluşmuştur.
- Karıştırma süresinin köpürmeye etkisi çalışmasında, en iyi kabarma S3 ve S4 (30-40sn) numunelerinde oluşmuştur. Süre azaltılırsa yeter derecede homojen karışım elde edilememiş olup gözenek oluşumu gerçekleştirilememiştir. Süre uzatıldığında ise karıştırma esnasında alüminyum katılaşmaktadır.
- Fırın sıcaklığının köpürmeye etkisi çalışmasında, sıcaklık arttıkça köpürme miktarı artmaktadır. T5,3 ve T6,3 numaralı numunelerde en yüksek kabarma elde edilmiştir. Fakat bu numunelerde alt bölgede kalan boşlukların çok fazladır. Bu nedenle T3,3 kodlu numunenin üretim sıcaklığı olan 800 °C ideal köpürtme sıcaklığı olarak seçilmiştir.
- Fırında bekleme süresinin köpürmeye etkisi çalışmasında 20 dk. bekleme süresinde oluşan gözeneklerin kapanmasından dolayı, yüksekliklerde azalma görülmektedir. Fırın sıcaklığına bağlı olarak fırında bekleme süresi ayarlanması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklarda daha kısa bekleme süresinde daha fazla gözenek oluşumu gerçekleşmekte fakat yüksek sıcaklık nedeniyle alüminyum

oksitlenmektedir. Bu nedenle en ideal fırın sıcaklığı olan 800 °C için en ideal fırında bekleme süresi 15 dk. olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında kullanılan üçüncü metot ise boşluk tutucu teknik ile metalik köpük üretimidir. Sentaktik köpük diye adlandırılan bu köpüklerin basma dayanımları genel itibariyle çok yüksektir. Bu sebeple otomotiv sektöründe özellikle büyük kazalarda darbelerin absorbe edilmesi kısımlarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Özellikle yan direklerin iç kısımlarında ön şase kısımlarında bu tür köpükler ile daha iyi bir enerji absorbe edilebileceği beklenebilir. Sentaktik köpüklerin üretimi ve deneyler sonucundan elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Tane boyutunun -250 µm, +1 µm arasında üretilen numunelerde, karıştırma esnasında tane boyutunun çok küçük olması ve karıştırıcının dönme hızı nedeniyle pota içersinde kenarlara savrulması sonucunu ortaya çıkarmıştır. Bunun sonucu olarak homojen bir karışım elde edilememiştir. Tane boyutu -1mm, +500 µm arasında olan B3 kodlu numunede en az gözenek oluşumu görülmüştür. Bunun sebebi olarak gaz veren tane sayısının azalması ile daha az gözenek oluşumu meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle en ideal tane boyutu olarak -500µm, +250µm arası seçilmiştir.
- Silika jellerin genleştirme şartları, yoğunlukların değişimini önemli derecede etkilemektedir. 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C gibi farklı sıcaklıklarda genleştirilmiştir. Her bir serinin ağırlık, hacim ve yoğunlukları ölçülmüş olup, yoğunluklarına bakıldığında, 1100 °C sıcaklıkta genleştirilmiş olan silika jellerin yoğunluğunun diğer sıcaklıkta genleştirilmiş silika jellerin yoğunluklarından düşük olduğu görülmüştür. 1000 °C de silika jeller yeteri kadar genleşmemiştir. 1200°C de ise silika jel yapısının amorf bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiş olup, genleştirme işleminden sonra yapının kristalleştiği sonucuna varılmıştır. Böylelikle yoğunluklar artmaktadır.
- Al ve Al-12Si malzemelerinin ergime sıcaklıkları arasındaki farklılık nedeniyle prosesde değişiklikler yapılması gerektiği sonucu çıkmıştır. Saf alüminyum için döküm sıcaklığı 750 °C olarak tespit edilmiş olup, Al-12Si metali için bu değer

650 °C olarak tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının düşük olması alaşımın içerisinde silisyumdan kaynaklanmaktadır.

- Basma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre döküm yöntemiyle üretilmiş alüminyum köpüklerde Al-12Si esaslı köpük, Al esaslı köpükten daha mukavemetli olduğu ortaya çıkmıştır. Bu fark alaşım olan silisyumdan kaynaklanmaktadır. Silisyum, alüminyuma mukavemetini artırıcı özellikler kazandırmaktadır.
- Elde edilen Al ve AS serisi numunelerden, yoğunluğu en düşük olan AS561 kod numarasına sahip Al-12Si esaslı metalik köpüktür. Bunun nedeni olarak ise 1100 °C’de genleştirilmiş silika jelin yoğunluğunun, diğer sıcaklıklarda genleştirilmiş olan silika jellerden daha düşük olduğu düşünülmektedir. Silika jel yoğunluğu üretim yoğunluğu için temel parametreler arasında yer almaktadır.
- Döküm yöntemiyle elde edilen alüminyum köpüklerin çekilen SEM görüntülerinden, açık ve kapalı olmak üzere her iki hücre tipini de gösterdiği fakat numunelerde ağırlıklı olarak hücre duvarlarının bulunması kapalı hücreli alüminyum köpüğe yakın bir ürün elde edildiğini göstermiştir.
- Döküm yöntemi ile üretilmiş metalik köpüklerin vakum kısmına yakın olan bölgedeki alüminyum miktarı daha fazla, vakum kısmından uzaklaştıkça alüminyum miktarı azalma göstermektedir. Bu nedenden dolayı vakum değerlerinde üretilecek numuneye göre bazı vakum değeri deneyleri yapılmış olup kullanılan silika jel ve metale göre farklı üretim basınçları tespit edilmiştir. Vakum değeri arttıkça numune alt bölgelerde daha fazla yoğunlaşmakta ve üst bölgede kalmamaktadır. Tersine vakum değeri düşürüldüğünde ise alt bölgelere alüminyum inmeden üst tarafta katılaşmaktadır.
- Elastik ve plastik deformasyonlarda kullanılan Gibson Ashby teoremine göre Al241, Al471 ve Al561 kodlu numuneler haricinde tüm numunelerde elastik modül ve gerilme değerleri %85-%97 arasında bir yakın değerler bulunmuştur.

- Genleştirilmiş silika jel kullanımı ve vakum döküm yöntemi kullanılarak hücre yapısı ve yoğunluğu kontrol edilebilir, özellikleri tahmin edilebilir köpüklerin yapılabileceği sonucuna varılmıştır.
- Üretimlerde vakum döküm yöntemi ile daha düşük maliyetli köpükler elde edilmiştir.
- Sentaktik köpüklerin yoğunlukları klasik yöntemlerle üretilen köpüklere göre çok yüksek olmasına rağmen literatürdeki araştırmalara göre sentaktik köpüklerin yoğunlukları 1g/cm^3 fazla olmaktadır. Bu veriler ışığında literatürdeki sentaktik köpüklerin altında bir yoğunluk değeri sonucuna varılmıştır. Bu kullanılan boşluk tutucu malzemelerin yoğunluğu ile doğrudan ilgili bir durumdur.

7.TARTIŞMA

Toz metalurjisi ile üretilen numunelerde soğuk presleme basıncı max. 200MPa olması nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Literatürdeki araştırmalarda bu basınç 650 MPa'a kadar çıkmaktadır. Bu nedenle en ideal presleme basıncı araştırması yapılabilir. Eğer düzgün bir yapı elde edilebilirse bu numunelerin mekanik ve ısı özellikleri gibi özellikleri araştırılabilir.

Ergitme yöntemi ile üretimlerde köpük üretimini etkileyebilecek köpürtücü ajan miktarı ve tane boyutu, karıştırma süresi, fırın sıcaklığı ve fırında bekleme süresi gibi tüm deney şartları denenmiş fakat numunelerin alt kısmında köpürmeyen bölge ve üzerinde büyük bir boşluk oluşmaktadır. Bu problemler giderilememiştir. Farklı fırın tasarımı yapılarak fırın içerisinde karıştırma işlemi sonucunda ve karıştırma süresinin artırılması ile bu problemlerin en aza indirilebileceği düşünülmektedir. Homojen bir yapı elde edildikten sonra yoğunluklar üzerine çalışmalar yapılabilir.

Boşluk tutucu tekniği ve vakum döküm yöntemi kullanılarak üretilen metalik köpük üretiminde homojen malzemeler üretilmiştir. Üretimlerde homojen bir yapı elde edilmesine rağmen yoğunluklar normal alüminyum köpüklere oranla yüksek çıkmaktadır. Boşluk tutucu olarak daha hafif malzemeler kullanılarak yoğunluk düşürülebilir. Ayrıca üretimde alüminyum miktarı azaltılarak daha düşük köpük üretim deneyleri yapılabilir. Otomotiv sektörünün en önemli problemleri arasında yeralan ve metalik köpüklerin diğer önemli özellikleri arasındaki ses yalıtımı, ısı iletimi ve titreşim absorbesi gibi konularda üzerine deneyler yapılabilir.

8. KAYNAKLAR

- Abdullatef, E. N., Jaber, M. A. (2009). Preparation of Al-12si Foam Using Liquid Technique. *Eng. & Tech. Journal*, 27: 2479-2493
- Amjad, S. (2001). Thermal conductivity and noise attenuation in aluminium foams, Wolfson College University of Cambridge.
- Andrews, E., Sanders, W. and Gibson, L.J. (1999). Compressive and tensile behaviour of aluminum foams, *Material Science and Engineering A270*, 113-124.
- Ashby, M.F., Jones, D.R.H. (1998). Engineering Materials 2, Third Edition: An Introduction to Microstructures, *Processing and Design* (International Series on Materials Science and Technology.
- Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N.G. (2000). Metal foams: a design guide, Butterworth-Heinemann publication,
- Ashold, P. (1999). Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Verlag, German,13.
- Ashida, K. (1995). Handbook of Plastic Foams: Types, Properties, *Manufacture and Applications*, Noyes Publications,147-163.
- Avarisli, O. ve Uğuz, A. (2003). Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, Bursa
- Banhart, J. (2000). Manufacturing routes for metallic foams, *Journals of Materials*, 52: 22–27.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46: 559–632.
- Banhart, J. and Weaire, D. (2002). On the road again: metal foams find favor. *Physics Today*, 37–42.

- Banhart, J. (2003). Aluminium foams: On the road to real applications. *Mrs Bulletin*, 290, April.
- Banhart, J. (2005), Aluminum foams for lighter vehicles. *Int. J. Vehicle Design*, Vol. 37, Nos. 2/3
- Bardella, L., and Genna, F., (2001). On the elastic behavior of syntactic foams, *Int J Solids Stru*; 38:7235–7260.
- Baumeister, J., Banhart, J., Weber, M. (1997). Aluminum foams for transport industry. *Materials & Design*, Vol. 18, Nos. 4+6, pp. 217–220.
- Baumgartner, F., Duarte, I. and Banhart, J., (2000). Industrialization of powder compact foaming process. *Advanced Engineering Materials*, 2, 4: 168–174.
- Bor, Ş., Tahrani, E., Esen, Z. ve Kotan, G., (2007). Toz metalurjisi yöntemiyle köpüksü saf titanyum ve Ti6Al4V alaşım üretimi ve karakterizasyonu. Tübitak projesi, 104M121.
- Bryant, J. D., Crowley, M., Wang, W., Wilhelmy, D., Kallivayalil, J. (2007). Development of Alcoa Aluminium Foam Products. *Metal Foam*, 2007, 19–22
- Cambronero, L. E. G., Ruiz-Romana, J. M., Corpas, F. A., Ruiz Prieto, J. M., (2009). Manufacturing of Al–Mg–Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1803–1809
- Chittineni, K., (2009). Alloy Gradient Syntactic Foams. Jawaharlal Nehru Technological University, Master of Science, India
- Cao, X., Wang, Z., Ma, H., Zhao, L., Yang, G. (2006). Effects of cell size on compressive properties of aluminum foam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 2: 351–356
- Csilla, K., Franti, S.C., Janos, L., Gyorgy, V., Zsuzsanna R. (2007). Acoustic emission of metal foams during tension. *Materials Science and Engineering*, 462, 316–319.

- Çinici, H., (2004). Toz metalürjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi, Gazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Davies, G.J., Zhan, S., (1983). Review metallic foams, their production, properties and applications. *Mat ScL*, 18: 1899–1911.
- Degischer, H. P., Kristz, B., (2002). Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications.
- Despois, J.F., Marmottant, A., Salvo, L., Mortensen, A. (2007). Influence of the infiltration pressure on the structure and properties of replicated aluminum foams, *Materials Science and Engineering*, A 462, 68–75.
- Dou, Z.Y., Jiang, L.T., Wu, G.H., Zhang, Q., Xu Z.Y., Chen, G. Q. (2007). High strain rate compression of cenosphere-pure aluminium syntactic foams. *Scripta Materialia*, 57: 945-978
- Dumais, J., (2009). Lectures on Biomechanics, Lecture 3: Cellular Solids, Lesson notes.
- Egidio, R., Enrico, P., Alberto, C., (2000). Mechanical behaviour of a syntactic foam: Experiments and Modelling. *Int. J. of Solids and Structure*. 37: 5773-5794
- Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M. (1999). Kapalı hücre alüminyum köpük metallerin üretim metotları ve mekanik özellikleri. *TMMOB Metalürji Dergisi*, 23 (120): 35-42,
- Ergönenç, Ç., (2008). Development and Design of Closed-Cell Aluminium Foam-Based Lightweight Sandwich Structures for Blast Protection. Izmir Institute of Tecnology, Master Thesis, Izmir.
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., Ferreira, J. M. F. (2009). Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, 35: 229–235.
- Fuganti, A., Lorenzi, L., Hanssen, A. G., Langseth, M. (2000). Aluminum foam for automotive applications, *Advanced Engineering Materials*, 4: 200-204.

- Gaillard, C., Despois, J.F., Mortensen, A. (2004). Processing of NaCl powders of controlled size and shape for the microstructural tailoring of aluminium foams. *Materials Science & Engineering A*, 374: 250–62
- Gergely, V., Degischer, H.P., Clyne, T.W., (2000). Recycling of MMCs and production of metallic foams. *Comprehensive Composite Materials* 3: 797- 820.
- Gergely, V., Curran, D.C. and Clyne, T.W. (2002). Advances in the melt route production of closed cell aluminium foams using gas-generating agents. Global Symposium on Materials Processing & Manufacturing Processing & Properties of Lightweight Cellular Metals & Structures,
- Gergely, V., Curran, D.C. and Clyne, T.W. (2003). The FOAMCARP process, *Comp. Sci.and Technology*.
- Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1997). Cellular solids: Structure and properties, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN 0-521-49560-1.
- Gupta, N., Brar, B. S. and Woldesenbet, E., (2001). Effect of filler addition on the compressive compressive and impact properties of glass fibre reinforced epoxy, *Bulletin of Materials Science*, 2: 219-223.
- Gupta, N., Woldesenbet, E., Kishore, S, Sankaran, S. (2002). Response of syntactic foam core sandwich structured composites to three-point bending, *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 4: 249–272.
- Gupta, N., Kishore, E., Woldesenbet, E., Sankaran S., (2001). Studies on compressive failure features in syntactic foam material. *Journal of Materials Science*. 36: 485-449.
- Gupta, N., Woldesenbet, E., (2003). Hygrothermal studies on syntactic foams and compressive strength determination, *Composite Structures*, 61(4): 311-320.

- Gupta, N., Woldesenbet, E., Mensah P. (2004). Compression Properties of Syntactic Foams: Effect of Cenosphere Radius Ratio and Specimen Aspect Ratio, *Composites: Part A*, 35: 103-111.
- Gupta, N. and Ricci, W., (2006). Comparison of compressive properties of layered syntactic foams having gradient in microballoon volume fraction and wall thickness, *Materials Science and Engineering A*, 427: 331–342.
- Güden, M., Kavi, H. (2006). Quasi-static axial compression behavior Of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes. *Thin-Walled Structures* 44: 739–750.
- Güden, M., Yüksel, S., Taşdemirci, A., Tanoğlu, A. (2007). Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axia crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tube. *Composite Structures*, 81: 480-490.
- Haesche, M., Lehmhus, D., Weise, J., Wichmann, M., Mocellin, M. C. I. (2010). Carbonates as foaming agent in chip-based aluminium foam precursor. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26 (9): 845-850
- Hall, I.W., M. Guden, M., Yu, C.J. (2000). Crushing of aluminum closed cell foams: Density And Strain Rate Effects. *Scripta mater.* 43: 515–521.
- Hanssen, A.G., Langseth, M., Happerstad, O.S. (2000). Static and dynamic crushing of circular aluminum extrusions with aluminum foam fitler. *Int J. Of Impact Eng*, 24 (5): 475-507.
- Hernandez, A.R.A. (2005). Combined flow and heat transfer characterization of open cell aluminum foams. University of Puerto Rico, Master of Science.
- Hyun, S.K., Nakajima, H. (2003). Effect of solidification velocity on pore morphology of lotus-type porous copper fabricated by unidirectional solidification, *Materials Letters*, 57, 3149 – 3154

- Jiang, B., Zhao, N.Q., Shi, C.S., Du, X.W., Li, J. J, Man, H.C. (2005a). A novel method for making open cell aluminum foams by powder sintering process. *Materials Letters*, 59: 3333 – 3336.
- Jiang B., Zhao N. Q., Shi C. S., Li J. J. (2005b). Processing of open cell aluminum foams with tailored porous morphology. *Scr. Mater.*, 53: 781–785.
- Kadar, Cs., Kenesei, P., Lendvai, J. and Rajkovits, Zs. (2005). Energy absorbtion properties of metal foams. *Materials World*, VI. Evfolyam 1.szam.
- Kanahashi, H., Mukai, T., Yamada, Y., Shimojima, K., Mabuchi, M., Aizawa, T., Higashi, K. (2001). Experimental study for the improvement of crashworthiness In AZ91 magnesium foam controlling its microstructure. *Materials Science and Engineering A308*, 283–287.
- Kenny, L. D. (1996). Mechanical properties of particle stabilized aluminum foam, *Materials Science Forum*, Vol. 217 – 222, p 1883–1890.
- Kevorkijan, V. (2010). Low Cost Aluminium foams made by CaCO_3 articulates. *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, 549.74:621.762.
- Konstantinidis, I, Ch., Papadopoulos, D. P., Lefakis, H., Tsipas, D. N. (2005). Model for determining mechanical properties of alumunium closed-cell foams. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 43, 157-167
- Li, J. R., Cheng, H. F., Yu, J. L., Han, F. S. (2003). Effect of dual-size cell mix on the stiffness and strength of open-cell aluminum foams. *Materials Science & Eng A*, pp.240–248.
- Mantini, R. (2005). Measurement of strain rate sensitivity of aluminium foams for energy dissipation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47: 26-42.
- Marchi, C.S., Mortensen, A., (2001). Deformation of open-cell aluminum foam. *Acta mater*, 49: 3959–3969.
- Miller ,F. (2002). Lightweight Construction. *Fraunhofer Magazine*, 4: 8-12

- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., and Kitahara, A. (2000). ALPORAS Aluminium foam: production process, properties, and applications. *Advanced Engineering Materials*, 4: 179- 183.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Mukai, T., Kanahashi, H., Kohzu, H., Tanabe, S. and Higashi, K. (1999). Enhancement of energy absorbtion in a closed-cell aluminum by the modification of cellular structures. *Scripta Materialia*, 41: 10, 1055-1060.
- Michailidis, N., Stergioudi, F., Tsouknidas, A. (2011). Deformation and energy absorption properties of powder-metallurgy produced Al foams. *Materials Science and Engineering A*, 528: 7222-7227.
- Michailidis, N. and Stergioudi, F. (2011). Establishment of process parameters for producing Al-foam by dissolution and powder sintering method. *Mater. Des.*, 32(3): 1559–1564.
- Mondal, D. P., Das, S., Remakrishan, N., Bhasker, U. K. (2009). Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique. *Composites Part A*, 40: 279-288.
- Mustapha, F., Mustapha, M., Noorsal, K., Mamat, O., Hussain, P., Ahmad, F., Muhamad, N., Haris, S.M. (2010). Preliminary study on the fabrication of aluminium foam through pressure assisted sintering dissolution process. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (12): 1598–1612.
- Nakamura, T., Gnyloskurenko, V.S., Sakamoto, K., Byakova, V. A., Ishikawa, R. (2002). Development of new foamin agent for metal foam. *Materials Transaction*. 43: 1191–1196.
- Ogan, A. D., (2008). Alüminyum esaslı gözenekli malzeme elde edilmesi, karakterizasyonu ve bazı özelliklerinin irdelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Doktora, Kayseri.
- Onck, P. R. R., Merkerk, V., Raaijmakers, A., De Hosson, J. TH. M. (2005). Fracture of open- and closed-cell metal foams. *Journal Of Materials Science*, 40: 5821–5828.

- Orbulov, N. I., Ginzler, J. (2012). Compressive characteristics of metal matrix syntactic foams. *Composite: Part A*, 43: 553-561
- Ozan, S., Çay, V., V. (2006). Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminum metal foam, manufactured by powder metallurgy process. *Teknoloji*, 4: 245–250.
- Özer. G. (2005). Alüminyum esaslı köpük metal üretimi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Palmer, R. A., Gao, K., Doan, T. M., Green, L., Cavallaro, G. (2007). Pressure infiltrated syntactic foams—Process development and mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 464: 85–92
- Rajendran, R., Prem, S.K., Chandrasekar, B., Gokhale, A., Basu, S. (2009). Impact energy absorption of aluminum foam fitted AISI 304L stainless steel tube. *Materials and Design*, 30: 1777–1784.
- San, M.C., Mortensen, A., (2001). Deformation of open-cell aluminum foam. *Acta Mater*, 49: 3959–3969.
- Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degbcher, H.P., (1997). Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminum foam. *Acta Mechanica*, 125: 95-103
- Sertkaya, A. A. (2008). Alüminyum köpüğün ısı değiştirici olarak tasarımı ve ısı transferi modeli, Selçuk Üniversitesi, Doktora Tezi, Konya.
- Schaffer, G. B., Sercombe, T.B., Lumley, R. N. (2001). Liquid phase sintering of aluminium alloys. *Materials Chemistry Physics*. 85–91
- Shapovalov, V., I. (1998). Formation of ordered gas-solid structures via solidification in metal- hydrogen system, *Porous and Cellular Materials for Structural*. 521: 281
- Simancik, F., Degischer, H.P. and Wörz, H. (1995). Foamed aluminium-light, structural and insulation material, Euromat 95, Italia.

- Simancik, F., Jerz, J., Kovacik, J. and Minar, P. (1997). Aluminium foam- a new light weight structural material. *Kovove Materialy*, 35: 265-277.
- Simone, A. E. and Gibson, L. J. (1998). Effects of Solid Distribution on The Stiffness and Strength of Metallic Foams. *Acta Metallurgica Inc.* 6: 2139-2150.
- Sun, D.X., Zhao, Y.Y., (2005). Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process. *Materials Letters*, 59: 6– 10.
- Surace, R., De Filippis, L. A. C., Niini, E., Ludovico, A. D. and Orkas, J. (2009). Morphological investigation of foamed aluminum parts produced by melts gas injection. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering Volume*, Article ID 506024, 9.
- Tao, X. F., Zhao, Y. Y., (2009). Compressive behavior of Al matrix syntactic foams toughened with Al particles. *Scripta Materialia*, 61: 461- 464
- Tunçer, N., (2006). Metalik köpük malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu. Anadolu Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Uçak, T., (2003). The effects of process parameters on the cell morphology of the aluminum foam. Istanbul Technical University, Master of Science, Istanbul.
- Wadley, H.N.G. (2002). Cellular metals manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, 4: 10, 726–733.
- Woldesenbet, E., Gupta, N., Jerro, H. D. (2005). Effect of Microballoon Radius Ratio on Syntactic Foam Core Sandwich Composites. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 7: 95–111.
- Wu, G. H., Dou, Z. Y., Sun, D. L., Jiang, L. T., Ding, B. S., He, B. F., 2007. Compression behaviours of cenosphere–pure aluminum syntactic foams. *Scripta Mate*, 56: 3, 221–224.

- Yang, C. C. and Nakae, H. (2000). Foam structure effect on the compression behavior of foamed aluminum alloy. *ISIJ International*, 40: 12, 1283-1286.
- Yıldırım, Ş. (2010). Parçacık takviyeli alüminyum köpük metalinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Dumlupınar Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Yılmaz, S., Güden, M., ve Elbir, S. (2001). Kompozit alüminyum köpük malzemesinin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu. Tübitak projesi, Misag-135.
- Yi, F., Haiwu, Z., Zhengang, Z., Fangqiou, Z. (2002). The Microstructure and electrical conductivity of aluminum alloy foams. *Material Chemistry and Physics*, 78: 196–201.
- Yu, C. J. and Banhart, J. (1997), Mechanical properties of metallic foams. Fraunhofer USA Metal Foam Symposium, 37-48.
- Yu, S., Liu, J., Wei, M., Luo, Y., Zhu, X., Liu, Y. (2009). Compressive property and energy absorbtion characteristic of open-cell ZA22 foams. *Materials and Design*, 30: 87-90
- Zeytin, K. H., (2000). Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği. OSD Raporu, Kocaeli.
- Zhang, L. P., Zhao, Y. Y., (2007). Mechanical response of Al matrix syntactic foams produced by pressure infiltration casting. *J. Compos. Mater.* 41: 2105–2117.
- Zhang, L. and Ma J. (2009). Processing and characterization of syntactic carbon foams containing hollow carbon microspheres. *Carbon vol*, 47: 1451–1456.
- Zhao, Y. Y. and Sun D. X. (2001). A novel sintering-dissolution process for manufacturing Al foams. *Scripta Materialia*, 44: 105–109.

Zhu, F., Zhao, L., Lu, G., Gad, E. (2009). A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, 36: 687–699.

İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

- | | |
|--|-------------|
| 1- http://www.mmo.org.tr | 02.03.2011. |
| 2- http://www.metaldunyasi.com | 07.03.2011. |
| 3- http://www.gidamo.org.tr | 24.04.2011. |
| 4- http://www.kozanyapi.com/mikronize-kalsit-urun-grubu/405-kalsit-caco3.html | 24.02.2012. |
| 5- http://tr.wikipedia.org/wiki/Kalsiyum_karbonat | 24.02.2012. |
| 6- http://cumalifaydali.blogspot.com/2008/12/alminyum-silisyum-alam.html | 28.04.2012. |

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İbrahim YAVUZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Karaarslan/Afyonkarahisar 10.12.1979
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0505 522 2603 / iyavuz@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Endüstri Meslek Lisesi, Afyonkarahisar, 1996
Lisans : Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv
Öğretmenliği, Elazığ, 2003
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. 2005

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim
Fakültesi Makine Eğt Böl. / 2003-Devam Ed.

Yayınları (SCI ve diğer) :

- Bayrakceken H., Tasgetiren S., Yavuz İ., (2007) Two cases of failure in the power transmission system on vehicles: A universal joint yoke and a drive shaft, Engineering Failure Analysis, Volume 14, Issue 4, 716-724
- Yavuz İ., Taşgetiren S., (2008) Yeni Bir Dişli Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Makine İhtisas, 54, 14-17
- Kızılaslan K., İşel B, Yavuz İ., (2010) Dişli Çarklarda Meydana Gelen Hasar Türleri, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Teknik Not, Cilt: 7, No:1, 119-129
- Yavuz İ., (2010) Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, Teknik Not, cilt 2, 49-58
- Yavuz İ., Başpınar M., S., Bayrakceken H., (2009) Metalik Köpük Malzemelerin Taşıtlarda Kullanımı, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, cilt 1, 43-51,
- Yavuz İ., Bayrakceken H., Mutlu İ., (2006) Taşıt Güvenliğinde Fren Test Cihazlarının Önemi ve Frenleme Kuvveti Ölçümleri, Trafik ve Yol Güvenliği Üçüncü Uluslararası Kongre, 17-19 Mayıs 2006,, 242-251
- Baydır Ş., A., Yavuz İ., Aksoy F., Bayrakceken H., Mutlu İ. (2006), İleri pasif Güvenlik Sistemleri ve Trafik Kazalarındaki Önemi, Trafik ve Yol Güvenliği Üçüncü Uluslararası Kongre, 17-19 Mayıs 2006, 981-990, 2006

- Sugoðu, İ., Yavuz İ., Mutlu, İ., (2009), Polimerik Kompozit Sürtünme Malzemelerinde Üretim Basıncının Performansa Etkisinin Araştırılması, International Advanced Technologies Symposium
- Yavuz A., Yavuz İ., Başpınar M., S., Bayrakçeken H. (2011) Effect Of Dissolving Agent Shape For The Microstructural Tailoring Of Sdp Processed Aluminum Foams, The sixth International Advanced Technologies Symp, 16-18 Mayıs 2011, Material Science & Metallurgy Technologies
- Yavuz İ., Başpınar M., S., Bayrakçeken H. (2011) Effect Of Different Ratio Sic And Al₂O₃ Addition On The Foaming Of Aluminum Foams Produced By Melting Route, 6th International Advanced Technologies Symposium , 16-18 Mayıs 2011 , Material Science & Metallurgy Technologies
- Aksoy F., Yavuz İ., Bayrakçeken H. (2005) Akıllı Ulaşım ve Gelişmiş Araç Kontrol Sistemleri, Trafik ve Yol Güvenliği Üçüncü Ulusal Kongresi ve , 4-6 Mayıs 2005, 450-457
- Yavuz İ., Aksoy F., Bayrakçeken H. (2005), Taşıt Güvenliğinde Kullanılan GPS Sistemleri, Trafik ve Yol Güvenliği Üçüncü Ulusal Kongresi ve , 4-6 Mayıs 2005, 443-449
- Yavuz İ., Bayrakçeken H., Kontbilek M., (2006) Fren Test Cihazları Ve Eğimli Yol Şartlarında Fren Kuvveti Ölçümleri, OTEKON 06 3. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-28 Haziran 2006

Diğer konular