

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI



METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE
ANALİZİ

ŞEVKET KAYIŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Yunus Onur YILDIZ

SİNOP-2024

TEZ KABUL

ŞEVKET KAYIŞ tarafından hazırlanan “**METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**” başlıklı bu çalışma, 12.02.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT
Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İmza

**Üye
(Danışman)** Dr. Öğretim Üyesi Yunus Onur YILDIZ
Sinop Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İmza

Üye Dr. Öğretim Üyesi Ünal DEĞİRMENCİ
Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek
Okulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Makine
Programı İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Fadime DİRİK

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şevket KAYIŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS SEMİNERİ

METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

ŞEVKET KAYIŞ

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖGR. ÜYESİ YUNUS ONUR YILDIZ

Malzeme biliminin güncel gelişmeleri arasında metal köpük malzemeler önemli bir yer tutmaktadır. Metalik köpükler, hafiflikleri ve yüksek mukavemetleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada kullanılan önemli malzemelerdir. Metalik Köpükler, enerji, ses, radyasyon ve titreşim sönümleme; susturucu, filtrasyon ve ısı eşanjörü gibi çok çeşitli alanlarda farklı amaçlar doğrultusunda kullanılırlar. Çalışmanın ilk bölümünde, metalik köpüklerin üretim yöntemleri ve köpürtme ajanlarının etkisi üzerine yapılan literatür taraması yapılmıştır. Bu tarama, farklı metal alaşımlarının köpürtme sürecinde kullanılan ajanlarla birlikte nasıl davrandığını ve elde edilen köpüklerin fiziksel özelliklerini açıklar. İkinci bölümde, sonlu elemanlar yöntemi ve analiz için kullanılan matematiksel modeller anlatılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak metalik köpüklerin davranışını analizinde kullanılan malzeme modeli ve buna ait denklemler tanımlanmaktadır. Üçüncü bölümde, belirlenen bir model için sonlu elemanlar analizi sonuçları sunulmaktadır. Metalik köpüklerin basma yüklemesi altında şekil değiştirme gerilme, deformasyon gibi mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Bu analizler, farklı yükleme hızlarına sahip metalik köpük yapılarının davranışını incelemektedir. Son bölümde, çalışmanın sonuçları ve elde edilen bulgular özetlenmektedir. Sonuçlar, metalik köpüklerin üretimi ve mekanik özelliklerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebileceğini araştırılıp, sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizlerin tasarım süreçlerinde ve malzeme seçiminde kullanılabilmesini hedeflenmektedir.

ANAHTAR KELİMELE: Köpük metal üretim yöntemleri; Alüminyum köpük metal;
Sonlu elemanlar yöntemi

Şubat 2024, 84 Sayfa

ABSTRACT

MSC SEMINAR

PRODUCTION OF METALLIC FOAMS AND ANALYSIS OF THE MECHANICAL PROPERTIES USING BY FINITE ELEMENT METHOD

ŞEVKET KAYIŞ

SINOP UNIVERSITY INSTITUTE OF GRADUATE PROGRAMS

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. YUNUS ONUR YILDIZ

Metal foam materials have an important place among the current developments of materials science. Metallic foams are important materials used in many industrial applications due to their light weight and high strength. Metallic foams are used for different purposes in a wide variety of fields such as energy, sound, radiation and vibration damping; silencers, filtration and heat exchangers. In the first part of the study, a literature review on the production methods of metallic foams and the effect of foaming agents was carried out. This review explains how different metal alloys behave together with the agents used in the foaming process and the physical properties of the foams obtained. In the second part, the finite element method and the mathematical models used for the analysis are described. The material model and its equations used to analyse the behaviour of metallic foams using the finite element method are described. In the third section, the results of the finite element analysis for a given model are presented. The mechanical properties of metallic foams such as strain stress and deformation under compression loading are analysed. These analyses investigate the behaviour of metallic foam structures with different loading rates. In the last section, the results of the study and the findings are summarised. The results aim to investigate that the production and mechanical properties of metallic foams can be analysed by finite element method and the analyses performed by finite element method can be used in design processes and material selection.

KEYWORDS: Foam metal production methods; Aluminium foam metal; Finite element method

February 2024, 84 Page

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Yunus Onur YILDIZ, ve çalışma arkadaşlarına teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Malzeme nedir?	2
1.2. Metalik köpük.....	3
1.2.1. Metal Köpük ve Gözenekli Materyaller:	3
1.2.2. Kapalı hücreli köpükler.....	5
1.2.3. Açık hücreli köpükler.....	5
1.3. Metal köpük özellikleri.....	6
1.3.1. Metalik Köpüklerin Fiziksel Özellikleri	6
1.4. Metalik Köpüklerin Yapısal Özelliği	7
1.4.1. Gerilim-Gerinim değişimi.....	9
1.4.2. Köpük metallerin enerji emilimi	10
1.4.3. Metal köpüklerin mekanik özelliklerini belirleyen faktörler	11
1.5. Günümüzde Köpük Metal.....	12
2. METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM METODLARI	15
2.1. Sıvı Metale Gaz Enjeksiyonu ile Metal Köpük İmalatı.....	16
2.2. Sıvı Metale Köpürtücü Maddeler Eklenerек Metalik Köpük İmalı	19
2.3. Eriyik filtreleme işlemi ile metal köpük imalatı	22
2.4. Sıvı metal kullanarak köpürme öncüllerinin (FORMGRIP) İmalatı:	23
2.5. Toz metalürjisi ile metal köpük imalatı;	24
3. METAL KÖPÜK UYGULAMA ALANLARI	29
3.1. Köpük Metalin Endüstriyel Kullanım Alanları	30
3.1.1. Otomotiv Sektörü.....	30
3.1.2. Hafif Yapılar	31

3.1.3. Darbe emilimi	32
3.1.4. Alüminyum Köpükten Üretilebilecek Otomotiv Parçaları	33
3.1.5. Gürültü Seviyelerini Azaltmaya Yönelik Önlemler.....	33
3.1.6. Havacılık Ve Uzay Endüstrisi.....	34
3.1.7. Gemi İnşaatı	36
3.1.8. İnşaat Endüstrisi.....	37
3.1.9. Spor Malzemeleri.....	38
3.1.10. Demiryolu Endüstrisi	38
3.1.11. Makina Yapımı	39
3.2. Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları	40
3.2.1. Isı eşanjörleri.....	40
3.2.2. Filtre Ekipmanları	40
3.2.3. Biyomedikal Endüstrisi.....	41
3.2.4. Katalizör Destekleri	41
3.2.5. Akışkan Depolama ve Transferi	41
3.2.6. Akışkanların Yönetimi.....	41
3.2.7. Püskürtücüler	41
3.2.8. Akü Elektrotları.....	42
3.2.9. Alev Geciktiriciler:	42
3.2.10. Elektrokimyasal Uygulamalar.....	42
3.2.11. Dekoratif ve sanatsal amaçlar için hücre malzemeler	42
4. EZİLEBİLİR KÖPÜK METAL İÇİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	45
4.1. Sonlu elemanlar Metodu.....	45
4.2. Ezilebilebilir Köpük Modeli	46
5. ALUMİNYUM EZİLEBİLİR KÖPÜĞÜN BASMA DAYANIMININ	
İNCELENMESİ	50
5.1. MODELLEME	50
5.2. DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI	57
5.3. BASMA ANALİZ SONUÇLARI	58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 4.1 Üç tip alüminyum köpüğün tipik özellikleri	19
Tablo 5.1 Metal Köpük Uygulamaları	30
Tablo 8.1 Malzeme bilgisi	52



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Farklı Metallerden Oluşan Köpük Metallere.....	1
Şekil 1.2 Bir Malzeme Fazının Diğerinin İçine Dağıldığında Oluşan Yapılar.....	3
Şekil 1.3 Metal Köpüklerin Gözenek Yapısı	4
Şekil 1.4 Metal Köpük Malzemenin Kapalı Gözenekli Yapısı	5
Şekil 1.5 Kapalı Hücreli Köpük Gözenek Yapısı Ve Modeli.....	5
Şekil 1.6 Açık Hücreli Köpük Metal Gözenek Yapısı Ve Modeli	6
Şekil 1.7 Plastik-Elastik Metalik Köpüğün Gerilme-Gerinim Diyagramı.....	9
Şekil 1.8 Metal Köpükler İçin Gerilime-Birim Şekil Değişimi Grafiği.	10
Şekil 1.9 Kapalı Ve Açık Hücreli Metalik Köpüklerin Mikroskop Görüntüleri	11
Şekil 1.10 Gaz Enjektisi Yöntemi İle Üretilen Köpük Metal	12
Şekil 1.11 Metal Köpük Pazarı	13
Şekil 2.1 Metalik Köpüğün Hücresel Yapısı	15
Şekil 2.2 Metalik Köpüklerin Soyağacı	16
Şekil 2.3 Sıvı Metale Gaz Enjeksiyonu İle Köpük İmali.....	16
Şekil 2.4 Erimiş Metale Gaz Enjeksiyonuyla Oluşan Metalik Köpük	17
Şekil 2.5 Parça Boyut Ve Hacim Arasındaki İlişki	17
Şekil 2.6 Eriyik Metallere Köpürtücü Ajanların Eklenmesi.....	20
Şekil 2.7 Al Eriyiğindeki Ca Oranının, Görünür Viskozitesi İle Zaman Grafiği	21
Şekil 2.8 Sıvı Metale Köpürtücü Ajanların Eklenmesiyle Üretilen Köpüklerde Gözenek Morfolojisi.	21
Şekil 2.9 Tipik Hücre Yapısı	22
Şekil 2.10 Gasar Yöntemiyle Açık Gözenekli Metal Köpük Üretim Metodu.....	23
Şekil 2.11 Gasar Yöntemi Kullanılarak Üretilen Köpüklerin Gözenek Yapısı.....	23
Şekil 2.12 Formgrip Yöntemi	24
Şekil 2.13 Formgrip Metoduyla Üretilen Köpük Yapısı	24
Şekil 2.14 Ifam Proses Diyagramı	25
Şekil 2.15 Tih2'nin Alüminyum İçinde Zamanın Bir Fonksiyonu Olarak Genleşme Özellikleri	26
Şekil 2.16 Toz Metalurjisi İle Üretilen Alüminyum Köpüklerin Gözenek Yapısı.	26
Şekil 2.17 Net Şekilli Parçalar Üretilmesi	27

Şekil 2.18 T/M Prosesi İle Üretilen Köpüklü Al Ürünler	28
Şekil 2.19 Bükülmüş Al Sandviç Köpük Formu	28
Şekil 3.1 Metal Köpüklerin Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamaları.	31
Şekil 3.2 Köpük Alüminyum Sandviç Örneği.	32
Şekil 3.3 Köpük Alüminyum Sandviç Panel	32
Şekil 3.4 Darbe Emici Parça Örneği	32
Şekil 3.5 Dikey Kuvvetlere Maruz Kaldığında Alüminyum Köpüklü Ve Köpüksüz 304 Paslanmaz Çeliğin Deformasyonu.	33
Şekil 3.6 Salıncak Grubu Ve Alüminyum Köpük Yapısı.	33
Şekil 3.7 Viyadüklerde Köpük Alüminyum Ses Yalıtım Uygulaması.	34
Şekil 3.8 Otoyollarda Ses Yalıtımı.	34
Şekil 3.9 Kompresörlere Ait Alüminyum Köpük Susturucu	34
Şekil 3.10 Sandviç Köpük Levhalardan Yapılmış Roket Konileri	35
Şekil 3.11 Isı Eşanjörü Parçaları	35
Şekil 3.12 Kompozit Aynalar İçin Kullanılan Parçalar	36
Şekil 3.13 Optik Teleskop Köpük Metal Parçası	36
Şekil 3.14 Uçak Kanatları İçin Metalik Köpük Örneği	36
Şekil 3.15 Metal Köpüklerin Deniz Yapılarındaki Muhtemel Kullanım Alanları	37
Şekil 3.16 Alüminyum Köpüğün Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Örneği	38
Şekil 3.17 Köpük Metalin Demiryollarında Kullanımı.	39
Şekil 3.18 Metalik Köpükten Yapılmış Darbelere Karşı Koruyucu Ürün	39
Şekil 3.19 Metalik Köpükten Yapılmış Isı Eşanjörü	40
Şekil 3.20 Nikel Köpük, Nimeh Ve Nicd Pillerde Pozitif Elektrot Olarak Kullanılır....	42
Şekil 3.21 Köpük Metal Masa Ve Sandalyeler	43
Şekil 3.22 Tasarım Ürünleri	43
Şekil 3.23 Dekor Uygulamaları.	44
Şekil 4.1 eleman Modelinde Düğüm Noktaları ve Elemanlar	46
Şekil 4.2 Ezilebilir Köpük Akma Yüzeyi	47
Şekil 5.1 Parça Oluşturma	50
Şekil 5.2 Silindir Numunenin Oluşturulması	51
Şekil 5.3 Malzeme Özelliklerinin Girilmesi	51
Şekil 5.4 Malzeme Özelliklerinin Numune İle İlişkilendirilmesi	52
Şekil 5.5 Birleştirme “Assembly” Kısmı	53

Şekil 5.6 Yükleme Çeşidinin Seçimi	53
Şekil 5.7 Yükleme Seçenekleri	54
Şekil 5.8 Sınır Şartlarının Tanımlanması	54
Şekil 5.9 Z-Yönünde Deplasman Tanımlanması	55
Şekil 5.10 Ağ Yapısının Örülmesi	55
Şekil 5.11 Analizin Verilmesi	56
Şekil 5.12 Sonuçların Alınması	56
Şekil 5.13 Doğrulama Numunesinin Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	57
Şekil 5.14 Yarı Statik Analiz Sonucundaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	58
Şekil 5.15 Zamana Bağlı Açık (Explicit) Analiz Sonucundaki Farklı Yükleme Hızlarındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafikleri	59
Şekil 5.16 200 Mm/Sn Yükleme Hızındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	60
Şekil 5.17 100 Mm/Sn Yükleme Hızındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	60
Şekil 5.18 50 Mm/Sn Yükleme Hızındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	61
Şekil 5.19 20 Mm/Sn Yükleme Hızındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	61
Şekil 5.20 10 Mm/Sn Yükleme Hızındaki Gerilme-Şekil Değiştirme Grafiği	62

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

C	: Karbon
N	: Azot
O	: Oksijen
S	: Kükürt
H	: Hidrojen

Kısaltmalar

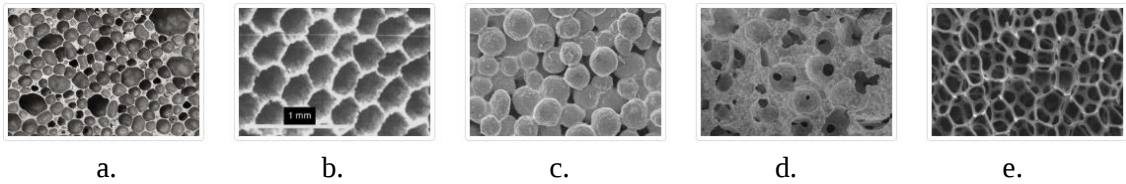
CAGR	: Bir Yıllık Bileşik Büyüme Oranı
GSYİH	: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

1. GİRİŞ

Mevcut mühendislik malzemeleri bazı teknik, çevresel, ekonomik ve estetik açılardan yetersizdir ve bu eksiklikler araştırmacıları yeni nesil malzemelere odaklanmaya zorlamaktadır. Dolayısıyla stratejik avantajlar sunan entegre malzemeler, geçmiş ve günümüz dünyasında giderek daha önemli bir araştırma ve üretim alanı haline gelmektedir (Jerz, 2010).

Bu yeni nesil malzemelere yönelik, Sosnik ilk olarak 1948 yılında alüminyumdan cıva buharlaştırarak metal formlar üzerinde çalışmış, Elliott ise 1951 yılında metal formlar üretmek için aynı yöntemi tekrarlamıştır. Sonraki yıllarda metal köpükler ve diğer gözenekli metal yapılar üretim alternatifleri araştırılmıştır (Yavuz, 2010).

Metalik köpüklerin yapısının çoğunluğu (%75-90) gözeneklerden oluşan katı bir saf metal veya alaşım olarak tanımlanabilir. Metal köpükler ısıya dayanıklılıkları, iletken olmamaları, düşük yoğunlukları, enerji emme kapasiteleri, yüksek kırılma ve kesme mukavemetleri ve hafiflikleri nedeniyle tercih edilmektedir (J. Gibson, 1996).



Şekil 1.1 Farklı metallerden oluşan köpük metallere ait görüntüler.

Şekil 1.1 de, ilk resim bir alüminyum köpüğü, ikincisi tek boyutta uzanan hücrelere sahip hücresel demir bazlı bir malzemeyi (MER Corp.), üçüncüsü aslında bir metal sünger oluşturan sıradan sinterlenmiş bronz tozlarını (ancak bu tür yapılar daha ziyade "sinter metal" veya "gözenekli metal" olarak adlandırılır), dördüncüsü ise hücrelerin kapalı olması koşulu biraz genişletilirse, kapalı hücre olarak da adlandırılabilen bir alüminyum süngerini göstermektedir. Beşinci resim bir nikel sünger (Inco) göstermektedir (Banhart, 2005).

Şekil 1.1 'de gösterilen metalik köpüklere ilave olarak, kurşun, titanyum, çelik, çinko, nikel ve kalay alaşımları gibi diğer metaller ve metal alaşımları da gözenekli olabilir (Bram M. vd., 2000).

1.1 Malzeme nedir?

Malzeme, ürün ve teknik sistemlerin yapımında kullanılan belirli mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip katı bir maddedir. Malzemeler tarihte her zaman önemli bir rol oynamıştır ve tarihteki birçok dönem, o zamanlarda keşfedilmiş ve üretilmiş olan malzemelerin adını almıştır (Neolitik, Bronz Çağı vb.).

Malzemeleri sınıflandırmanın farklı yolları vardır, fakat araştırmacılar için yapılabilecek en makul gruplandırma aşağıdaki gibidir:

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler
- Yarı iletkenler

Metal malzemeler: Demir, çinko, bakır ve alüminyum gibi baz metaller ve bunların diğer elementlerle çelik ve bronz gibi alaşımlar.

Metallerin karakteristik özelliklerini aşağıda listelenmiştir:

- Kristalli yapıya sahiptir.
- Yüksek mukavemetlidir.
- Şekillendirilmesi kolaydır.
- Yüksek tokluğa sahiptir.
- Basma dayanımı neredeyse çekme dayanımına eşittir.
- Genel olarak düşük korozyon direncine sahiptir.
- Elektrik ve ısı iletkenlikleri yüksektir.
- Parlak görünümlü olup şeffaf değildir.

Metal malzemeler, genel olarak iki grup olarak değerlendirilir;

- Demir esaslı metaller ve alaşımları: (Çelik ve Dökme demir vb.)
- Demir dışında kalan metal ve alaşımları: (Magnezyum, alüminyum, çinko, bakır, titanyum, nikel ve alaşımları vb.)

Cam-seramikler: Bir yada daha fazla metalin, metal olmayan bir elementin birleşmesi sonucu (C, N, O veya S) oluşmaktadır.

Polimerler (Plastikler): Genellikle petrol türevlerinden elde edilen maddelerdir. Polimerin yapısı genellikle C, H, O, N, S oluşur.

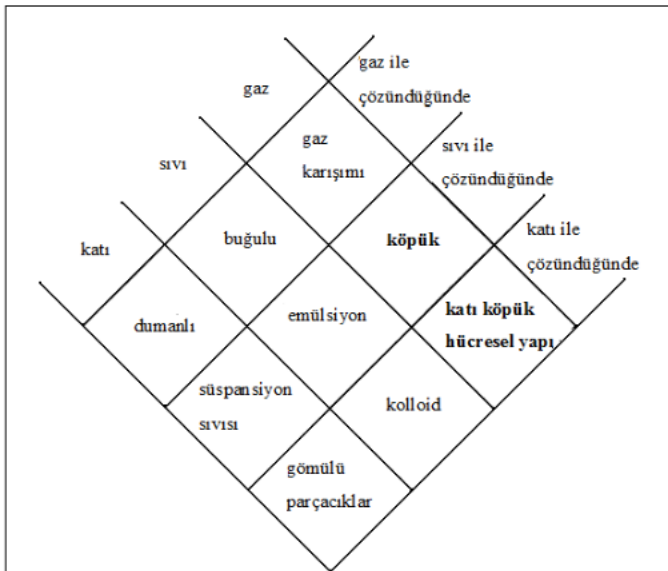
Kompozitler (Karma Malzemeler): Makro düzeyde, yukarıda bahsedilen üç malzemeden iki veya daha fazlasının kombinasyonu, bu malzemelerin mükemmel özelliklerini birleştiren veya tamamen yeni özellikler sunan malzemeler meydana getirebilir ve bu malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılır.

Yarıiletkenler: Yarıiletken malzemeler ne tam bir iletken ne de tam bir yalıtkandırlar. Yarı iletken malzemeler elektronik için çok kritik öneme sahip olup çiplerin, işlemcilerin ve transistörlerin üretiminde kullanılırlar. Silikon ve germanyum en yaygın kullanılanıdır (Aran, 2008).

1.2 Metalik köpük

1.2.1 Metal Köpük ve Gözenekli Materyaller:

Yüksek gözenekliliğe sahip köpüklü ve hücreli malzeme yepyeni bir malzeme sınıfıdır. Bu tür malzemelerin kapalı hücreli olmaları halinde yüksek mukavemet ile nispeten düşük özgül ağırlığa, açık hücreli olmaları halinde ise çok fazla gaz geçirgenliği ve ısı iletkenliğine sahip oldukları görülmektedir. Doğada bulunan gözenekli malzemelere örnek olarak ahşap, kemik ve bal peteği yapıları verilebilir (Banhart, 2000b).



Şekil 1.2 Bir malzeme fazının diğerinin içine dağıldığında oluşan yapılar.

Şekil 1-2'de bir malzeme fazının diğerinin içinde dağılmasıyla meydana gelen yapı göstermektedir. Şekilde köpük yapısı bir sıvı içinde çözünmüş gaz boşluğu olarak

gösterilmektedir. Metal köpükleri tanımlamak için hücresel metaller, gözenekli metaller, katı metal köpükler ve metal süngerler arasında ayırım yapmak gerekir.

Hücresel metal: Birçok iç boşluğa sahip bir metal yapıyı temsil eden en yaygın tanımdır.

Gözenekli metal: Metal plakalar veya desteklerle birbirinden desteklenen çok sayıda boşluğa sahip metal, seramik veya polimer malzemeden yapılmış bir yapı. Gözenekli metaller özel bir hücresel metal türüdür. Metal faz, bir gaz fazı içeren kapalı gözeneklerle ayrılır.

Metal köpükler: Gözenekli yapıların alt üyesidir. İmalat veya soğutma işlemine bağlı olarak şekli değişen çok yüzeyli hücrelerden oluşurlar.

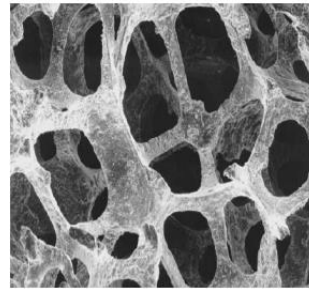
Metal süngerler: Genellikle birbirine bağlı boşluklara sahip metal hücreler şeklindedir (Banhart, 2023).

Bu nedenle, farklı yöntemlerle elde edilen gözenekli tüm içi boş yapılar köpük olarak kabul edilemez. Metal köpükler hücresel yapılarına göre iki kategoriye ayrılabilir: açık hücreli ve kapalı hücreli (Banhart, 2023; İhvan, 2008).

İki tür metal köpük vardır: “açık gözenek” ve ”kapalı gözenek”. Metal köpükler %80-90 oranında gözeneklerden oluşur. Kabarcıklar birbirine bağlıysa, bu tür metal köpükler açık gözenekli olarak adlandırılır. Kapalı hücreli metal köpükler ise her bir kabarcıkta gaz boşluklarına sahiptir ve birbirlerinden izole edilmişlerdir (Amjad, 2001). Şekil 1.3 ve 1.4 açık ve kapalı hücreli metal köpüklerin gözenek yapısını göstermektedir.



a) Açık gözenekli malzeme yapısı

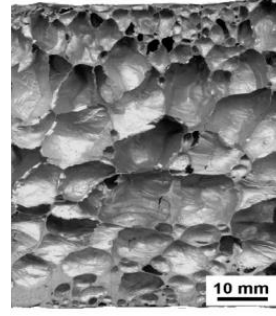


b) Açık gözenekli malzeme yapısının SEM görüntüsü (Banhart, 2001; Losito, 2008)

Şekil 1.3 Metal Köpüklerin Gözenek Yapısı



a. Kapalı gözenekli malzeme yapısı



b. Kapalı gözenekli malzeme yapısının SEM görüntüsü (Amjad, 2001; Liu & Liang, 2001)

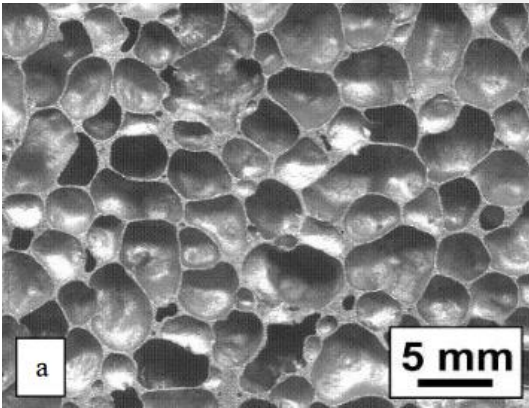
Şekil 1.4 Metal köpük malzemenin kapalı gözenekli yapısı

1.2.2 Kapalı hücreli köpükler

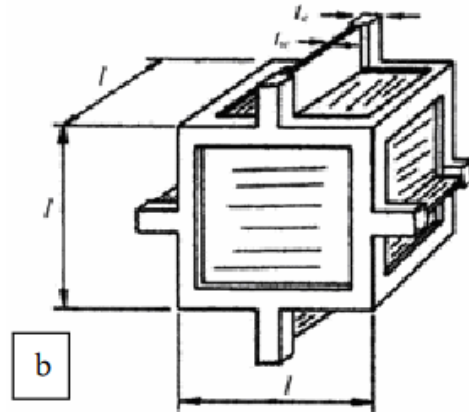
Gaz her bir hücrede hapsedilmiş ve hücreler neredeyse sızdırmaz duvarlarla ayrılmışsa bu tür köpüklere "kapalı hücreli köpük" olarak adlandırılır (Sertkaya, 2008).

Şekil 3.4 a'da bağımsız bir metal gözenek yapısının bir örneği ve Şekil 3.4 b'de gözeneklerin duvarlarla ayrıldığı bağımsız bir gözenek modeli gösterilmektedir.

Kapalı kafes(hücre) yapıdaki metalik köpükler, açık kafes yapılara göre daha iyi darbe dayanımı ve ses emme özelliklerine sahiptir. Güçleri, sertlikleri ve darbe dirençleri nedeniyle yapısal uygulamalar için de kullanılabilirler (Uzun, 2008; Zaman, 2011).



a) Kapalı kafesli(hücreli) metal köpük



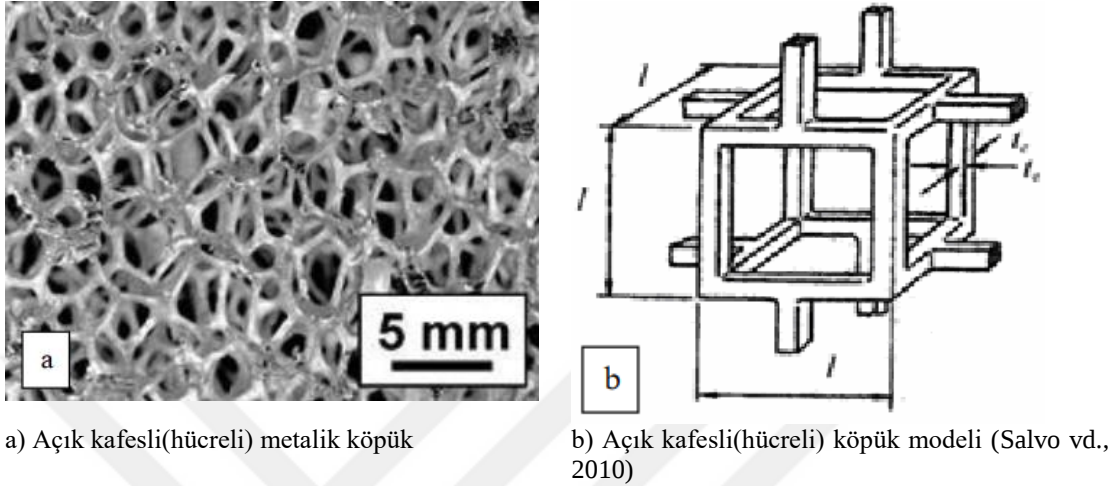
b) Kapalı Kafesli (Hücreli) Metal Köpük Modeli (Salvo vd., 2010)

Şekil 1.5 Kapalı hücreli köpük gözenek yapısı ve modeli

1.2.3 Açık hücreli köpükler

Gözenekler birbirine bağlıysa, köpük "açık hücreli köpük" olarak adlandırılır (Sertkaya, 2008). Açık hücreli köpük yapısının bir örneği Şekil 3.5 a'da ve açık hücreli köpük modeli Şekil 3.5 b'de gösterilmiştir. Açık hücreli köpükler, gözenek aralarındaki boşluklar ve yüksek yüzey alanı nedeniyle yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahiptir. Açık hücreli

köpüklerin en belirgin özellikleri çok iyi gaz ve ısı geçirgenliğine sahip olmalarıdır. Kapalı hücreli köpüklere kıyasla çok daha zayıf olan mekanik özellikleri nedeniyle, açık hücreli köpükler genellikle fonksiyonel amaçlar için kullanılır (Jiang vd., 2005).



Şekil 1.6 Açık hücreli köpük metal gözenek yapısı ve modeli

1.3 Metal köpük özellikleri

Metal köpükler sadece hafif olmakla kalmaz, aynı zamanda termal, akustik ve titreşim sönümleme özelliklerine de sahiptir. Ayrıca metal köpükler mekanik özellikler, ısı direnci ve yapının yüksek sıcaklıklarda çökmemesi açısından polimerlere göre daha üstündür. Köpükler nikel, alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi çeşitli metallerden yapılmaktadır. Son zamanlarda metal köpüğün avantajları hava, kara ve deniz taşımacılığında metal parçalara alternatif olarak metal köpük parçaların veya metal köpük ile doldurulmuş parçaların kullanılmasına yol açmıştır. Enerjinin daha verimli kullanılması için düşük yoğunluklu bileşenlere ihtiyaç duyan otomotiv endüstrisi, daha hafif bileşenler üretmek için metal köpük kullanımını teşvik etmiştir. Alüminyum, köpüklü bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak nikel, titanyum ve tantal madenleri de özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılabilmektedir (Dahil, 2017).

1.3.1 Metalik Köpüklerin Fiziksel Özellikleri

Alüminyum köpük ekmek, kemik, ahşap ve mercana benzer bir gözenekli yapıya sahiptir. Bağıl yoğunluk (U^*/U_s) kavramı bir köpük yapısının özelliklerini belirleyen en önemli parametredir ve köpük malzemesinin yoğunluğunun (U^*) hücre duvarlarını oluşturan

malzemenin (matris malzemesi) yoğunluğuna (U_s) oranı olarak tanımlanır. Köpük yapıların bağıl yoğunluğu 0,02 ila 0,1 gr/cm³ arasında değişmektedir. Alüminyum köpük yapılar su üzerinde yüzebilir çünkü 0,81 gr/cm³ olan yoğunlukları suyun 1 gr/cm³ olan yoğunluğundan daha azdır (M. F. Ashby, 2005).

Bir gözenekli malzemenin hem bir malzeme hem de bir yapı olmasının nedeni, her bir hücrelerin uzunluğunun milimetre veya mikrometre düzeyinde olmasıdır. Böyle bir durumda, gözenekli malzemeler geleneksel mekanik metotlar aracılığıyla uzay kafesi yapılarla aynı şekilde incelenebilir. Ancak, diğer yöntemler dikkate alınırsa, petek yapının özellikleri ayrı bir yapısal malzeme olarak değerlendirilmelidir. Bu değerlendirmede, gözenekli yapı tek parça bir yapı halinde değerlendirilmelidir (M. F. Ashby, 2005).

1.4 Metallik Köpüklerin Yapısal Özelliği

Köpük hücrelerinin iki tip yapısı vardır. Bunlar kapalı gözenekli yapılar ve açık gözenekli yapılardır. Kapalı gözenekler köpük yapılarda, açık gözenekler ise sünger yapılarda bulunur. Bağımsız hücre yapılarında hücreler birbirlerine yakınken, açık hücre yapılarında hücreler birbirlerine bağlıdır. Açık hücre yapılarında hücreler arasındaki bağlantılar destek olarak adlandırılır. Buna karşılık kapalı hücreli köpükler gözeneklerin kenarları ile birbirinden ayrılır. Köpükler metallerde, köpük yapısı, hücreler arasında sıralanan birbirine bağlı yüzeyler tarafından oluşturulur (Banhart, 2000a, 2001). Köpüğün mikro yapısı, darbe yönünden bağımsız olarak yüksek darbe enerjisini absorbe ederken düşük ağırlık sağlar.

Metal köpüğün faydaları arasında elektromanyetik kalkan, yüksek sıcaklıklarda iç yapının daha iyi korunması ve herhangi bir yönden gelen şok ve titreşimi absorbe etme yeteneği bulunmaktadır. Metal köpüğün erime noktası metalinkine yakındır. Buna ek olarak, malzemenin yüzeyinde genellikle bir oksit tabakası bulunur. Malzeme havada veya oksitleyici bir banyoda yeterince uzun bir süre ısıtılırsa, oksit tabakası gittikçe kalınlaşır, erime noktası artar ve malzeme daha kararlı hale gelir (Banhart, 2001).

Araştırma sonuçları; üniform olmayan hücre kalınlığı, hücre eliptikliği, morfolojik düzensizlikleri ve hücre büyüklüğü dağılımlarının etkileri nedeniyle metalik köpüğün plato geriliminin azaldığını göstermektedir (Çinici, 2004). Gerilme- gerinim (birim şekil değiştirme) diyagramının (σ - ϵ) lineer elastik bölgesinde, alüminyum köpük mekanik

açından mukavemetli olarak elastik deformasyona uğrar. Bu bölgede gerilme-gerinim; gözenek duvarları ile kontrol edilir. Gözenek çeperi büküldüğünde ve kırıldığında, lineer elastik bölge sona erer ve çökme bölgesi başlar. Gözenekli malzemelerin en önemli özellikleri, malzemenin hem yapısını hem de fonksiyonel özelliklerini belirleyen gözeneklerin sayısı (bağıl Yoğunluğu), biçimi ve dağılımıdır (L. J. Gibson & Ashby, 1997).

Bazı alüminyum köpüklerin sertliğine bakıldığında, ERG'nin polimer köpük ile eriyik döküm yoluyla üretilen açık hücreli alüminyum köpüğünün sertliği Duocel'in açık hücreli alüminyum köpüğünün sertliğine yakın (35 HV) ve Alporas'ın kapalı hücreli alüminyum köpüğünden daha düşüktür. Alulight'ın toz metalürjisi ile üretilen kapalı hücreli alüminyum köpüğünün sertliğinden (54,8 HV) daha düşüktür, bu da hücreli alüminyum köpüğünün sertliğinden (30,5 HV) daha düşüktür. Alporas tarafından eriyiğe bir şişirme maddesi eklenerek üretilen bağımsız hücreli alüminyum köpük (30,5 HV), Alporas tarafından eriyiğe bir köpürtücü madde eklenerek üretilen bağımsız hücreli alüminyum köpükten (30,5 HV) daha düşüktür ve Alulight'ın toz metalürjisi işlemiyle üretilen bağımsız hücreli alüminyum köpüğünden (54,8 HV) daha düşüktür (ERG Materials & Aerospace, n.d.; Idris vd., 2009).

Metal köpüklerin özelliklerini maddeler halinde listeleyelim:

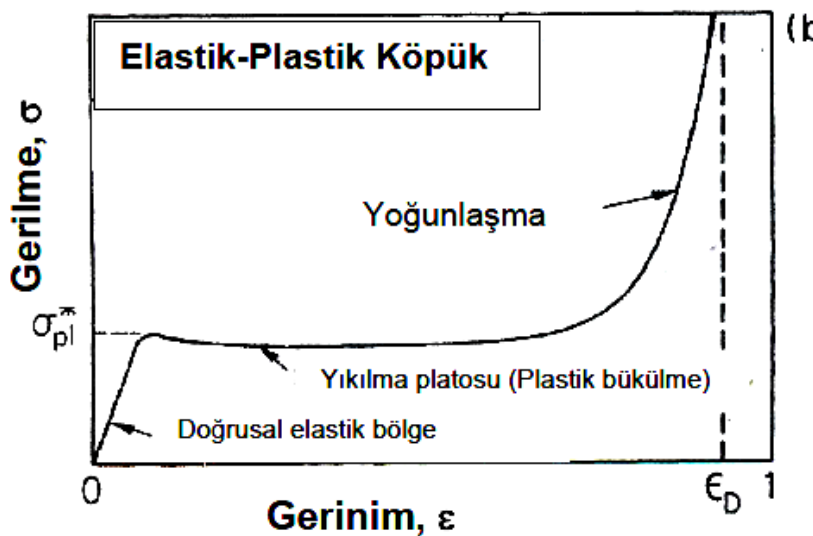
- 1) Metal köpüklerin yapısı polimerlere göre daha güçlüdür, yüksek sıcaklıklara daha iyi dayanır, iç yapıyı daha iyi korur ve yüksek sıcaklıklarda zehirli gazlar üretmez.
- 2) Üretilen her şey geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılmıştır.
- 3) Hafiflik başlıca avantajlarından biridir.
- 4) Her açıdan gelen titreşimleri ve şokları emer.
- 5) Elektromanyetik alana karşı koruyucudur.
- 6) Köpük malzemeler, alaşımı ile aynı ergime noktasına sahiptir. Köpük malzeme yüzeyinde çoğunlukla bir oksit tabakası bulunur. Köpük malzemelerde bir oksit banyosunda ya da havada yeterince uzun bir süre ısıtılırsa, oksit tabakası kalınlaşır, ergime noktası yükselir ve malzeme daha kararlı hale gelir (Banhart, 2001).
- 7) Köpük metaller çok düşük bir özgül yanma ısısına sahiptir, bu da düşük termal kapasite gerektiren uygulamalarda önemlerini artırır.

8) Köpük metal alaşımları, gözenekli yapısı onları termal etkiye karşı daha dayanıklı hale getirir (Çinici, 2004).

9) Kapalı hücreli metal köpükler yüksek ısı iletkenliğine sahiptir ve bu nedenle ısı yalıtımı olarak kullanılabilirler. Açık hücreli metal köpükler de ısı eşanjörlerinde kullanılabilir çünkü bunlar sıvı geçirgen özelliğine sahip olduklarından, akışkan durumdaki sıvı ile metal arasında geniş bir temas yüzeyine sahiptir.

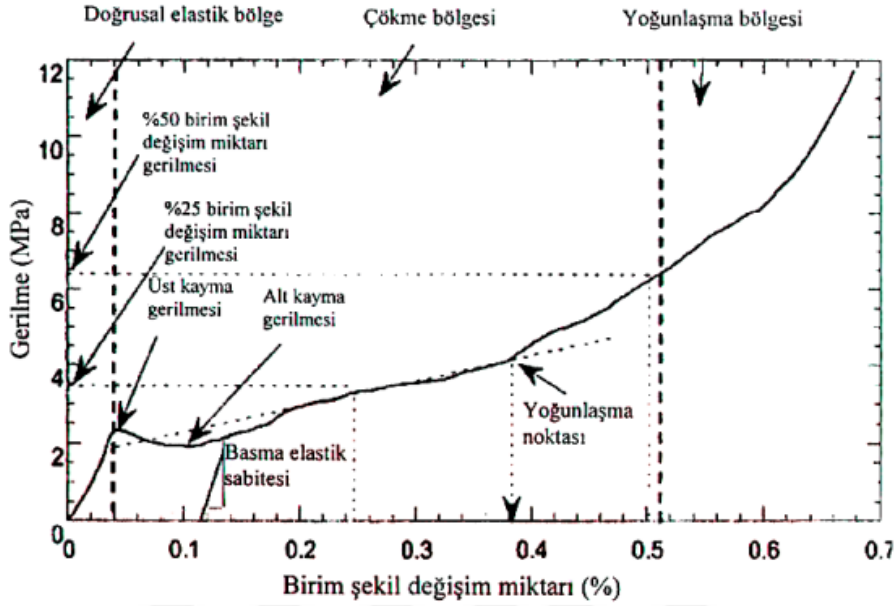
1.4.1 Gerilim-Gerinim değişimi

Şekil 1.7, metalik köpüğün basma yönündeki şekil değiştirmesi, deformasyon eğrisini göstermektedir. Metalik köpüğün uzama miktarı küçük olmasına rağmen, uzama gerilme ile orantılıdır. Başka bir deyişle, Köpük metal diyagramının ilk kısmında gösterildiği gibi doğrusal elastik özelliklere sahiptir. Elastisite modülü (E^*), bu doğrusal elastisite aralığında grafiğin eğiminden belirlenebilir. Gerinim arttıkça, gerilme-gerinim diyagramında uzun bir "kırılma platosu" belirir ve bunu bir "sıkıştırma bölgesi" izler. Sıkıştırma bölgesinde, gerilme keskin bir şekilde artarken gerinim neredeyse sabit kalır. Köpük metallerdeki plato bölgesi, gözenek duvarları basınç kuvvetleri altında çarpıştığında elastik genişlemiş metallerde gözenek çökmesi ile ilişkilidir. Gözenekler tamamen çökmeye çalıştığında, gözenek duvarları birbiriyle temas eder ve uygulanan çekme kuvveti metalik malzemeyi sıkıştırır. Bu da gerilme-gerinim diyagramının sağ tarafında gerilme artışına neden olur (L. J. Gibson & Ashby, 1997).



Şekil 1.7 Plastik-elastik metalik köpüğün gerilme-gerinim diyagramı.

Köpük metaller düşük uzama oranlarında lineer elastik özelliklere sahiptir. Burada eğrilik elastik modülü (E^*) temsil eder. Gerinim arttıkça, gerilme-gerinim diyagramında uzun bir 'çökme platosu' ortaya çıkar ve bunu sabit bir gerinimde gerinimin hızla arttığı bir 'sıkıştırma bölgesi' takip eder. Basma kuvvetine maruz kalan köpüklerinde plato bölgesinin uzunluğu gözeneklerin çökmesi ile ilgilidir. Elastik-plastik köpüklerde (örneğin metalik köpükler) gözenek çökmesi, gözenek duvarları çarpıştığında ve kırıldığında gerçekleşir. Gözenekler hemen hemen tamamıyla çöktüğünde, gözenek çeperleri temas eder ve katı malzeme basınç nedeniyle sıkışmaya başlar. Sonuç olarak, gerilme-gerinim diyagramının son bölgesinde gerilme hızla artar (Başpınar & Yurtcu, 2011).



Şekil 1.8 Metal köpükler için gerilme-birim şekil değişimi grafiği.

1.4.2 Köpük metallerin enerji emilimi

Köpüklü metal, çekme kuvvetlerine maruz kaldıklarında kırılan hale geldiklerinden, yüksek basma kuvvetlerine sahip mekanik uygulamalarda kullanılabilirler. Köpüklü metaller, basma kuvvetlerine maruz kaldıklarında hücre duvarları plastik olarak deforme olduğundan yüksek enerji emme özelliklerine sahiptir. Uygulanan gerilimin sönmelenme veya aktarılma derecesi gözenek yapısındaki değişikliklerle kontrol edilebilir, bu da metal köpükleri enerji emilimi gerektiren uygulamalar için cazip hale getirir (Markaki & Clyne, 2000).

1.4.3 Metal köpüklerin mekanik özelliklerini belirleyen faktörler

Bağıl yoğunluk (ρ^*/ρ_s), metal köpüğün yoğunluğu (ρ^*) ile hücre duvarlarını oluşturan malzeme yoğunluğu (ρ_s) arasındaki orandır ve gözenekli metallerin özellikleri hakkında bilgi veren karakteristik bir değerdir. Genel olarak, gözenekli malzemelerin bağıl yoğunluğu 0,3'ten azdır (Başpınar & Yurtcu, 2011).

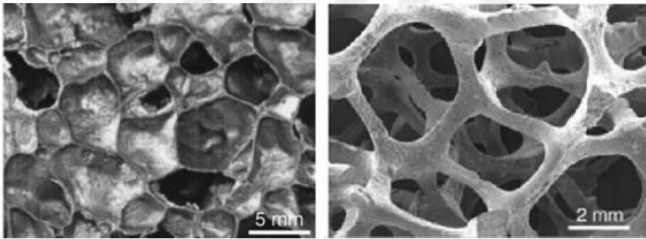
Gözenek boyutu

Gözenek boyutu, köpük metalin yapısal ve termal özellikleri üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olmasına rağmen temel bir faktördür.

Gözenek boyutu, köpük metallerin mekanik ve termal özellikleri üzerinde sadece küçük bir etkiye sahip olmasına rağmen önemli bir parametredir.

Gözenek boyutu, malzeme özelliklerinin modellenmesi için önemlidir. İki boyutlu gözenek yapısına sahip malzemelerin (örneğin bal peteği yapısı) modellenmesi göreceli olarak kolayken, düzensiz yapılara haiz gözenekli köpüklerin modellenmesi çok zordur. Üç boyutlu gözenek yapısına sahip köpüklerin mekanik özellikleri, gözenek yapısının kapalı veya açık olmasına bağlıdır.

Gözenekleri hücre duvarları ile ayrılmış köpükler kapalı hücreli köpükler olarak adlandırılırken, birbirine bağlı gözeneklere sahip köpükler açık hücreli köpükler olarak adlandırılır. Neredeyse tüm gözenekli malzemeler açık ve kapalı olarak her iki gözenek türünü de içerir (L. J. Gibson & Ashby, 1997).

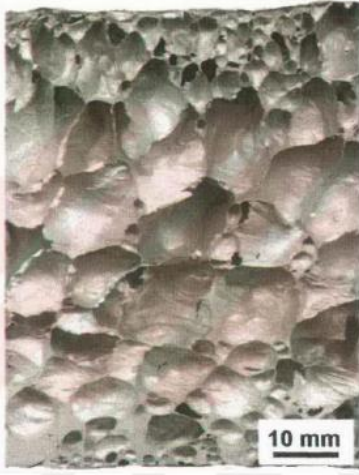


Şekil 1.9 Kapalı ve açık hücreli metalik köpüklerin mikroskop görüntüleri.

Gözenek biçimi

Düzenli bir gözenek şekline sahip metallerin gözenek şekli izotropik özellikler sergiler. Buna karşılık, uzun veya hafifçe yassılaştırmış gözeneklere sahip metallerin gözenek şekilleri, yönelimlerine bağlı olarak farklı özellikler sergiler (Simancik vd., 2002)(Şekil

1.9). Şekil 1.10: Gaz enjeksiyonu ile üretilen köpüklü bir metalin gözenek yapısı (Prakash vd., 1995).



Şekil 1.10 Gaz enjektisi yöntemi ile üretilen köpük metal

20. yüzyılın sonunda, dünya çapında birçok şirket alüminyum köpük üretmeye başladı. Ancak, Norveç'teki Hydro ve Toronto'daki Cymat, gazın doğrudan erimiş metale enjekte edildiği gaz-sıvı köpürtme süreçlerini geliştirerek metal köpüklerin büyük ölçekli üretimine başlayan ilk şirketler oldu ve Cymat daha sonra Hydro'yu devraldı ve üretim hacimlerini artırmak için ilk kez hızlı üretim hattını geliştirdi (Polat vd., 2010).

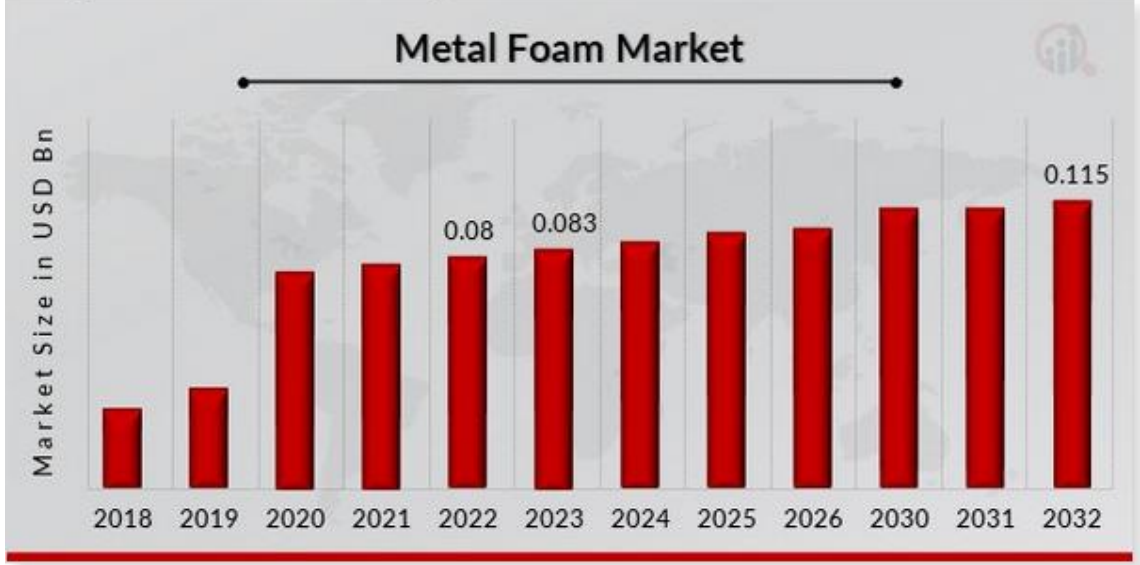
Alüminyum levha, mükemmel mekanik, akustik, termal, elektriksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle çok çeşitli endüstriyel ve işlevsel ürünlerde kullanılmaktadır. Günümüzde köpük alüminyum çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Köpük metal esas olarak otomotiv, savunma ve inşaat gibi birçok yapısal uygulamada kullanılabilir. Ayrıca, titreşim sönümleme ve hücreli kompozit yapılar için açık hücre yapıları da gereklidir (M. F. , Ashby vd., 2000; Banhart, 2001).

1.5 Günümüzde Köpük Metal

Metalik köpük malzemeler sahip oldukları özellikler nedeniyle günümüzde önemi giderek artan malzemelerdir.

Metal Köpük Pazar Büyüklüğü 2022 yılında 0,08 Milyar ABD Doları olarak görülmüştür. Metal köpük endüstrisinin 2023 yılında 0,083 Milyar ABD Dolarından 2032 yılına kadar 0,115 Milyar ABD Dolarına yükseleceği ve önümüzdeki süreçte (2023 - 2032) %4,20'lik bir yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) sergileyeceği öngörülmektedir.

Metal köpüklerin ana kullanım alanlarından biri tıbbi cihazların üretimidir. Bu tıbbi cihazlara yönelik talepteki artış, pazarı yönlendiren önemli bir etkidir. Ayrıca, ısı eşanjörlerinde metal köpüklerin kullanımının yaygınlaşması pazarın genişlemesini hızlandıracaktır.



Şekil 1.11 Metal köpük pazarı

Metal köpük pazarındaki önemli trendlerden biri de, inşaat sektöründe hafif malzemelere yönelik artan taleptir. Gelişmekte olan ülkelerde inşaat maliyetleri, kişi başına düşen gelirin ve yaşam standartlarının yükselmesinin yanı sıra gelişen inşaat faaliyetlerinin bir sonucu olarak artmaktadır. Yukarıda bahsedilen durum, önümüzdeki yıllarda metal köpük pazarı üzerinde olumlu bir etki yaratacaktır. Hindistan, Çin, Vietnam ve Endonezya gibi Güney Asya ülkelerinde inşaat sektörü hızla büyüyor ve bu ülkeler için GSYİH(gayri safi yurtiçi hasıla) büyüme oranlarının %5 ila %7 arasında olacağı tahmin ediliyor.

Metal köpük pazarı, suya ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı ürünlere olan ihtiyacın artması nedeniyle hızlı bir şekilde genişlemeye devam edecektir. Metal köpük pazarını; elektrik iletkenliği, termal yönetim ve darbe emme yetenekleri gibi öne çıkan nitelikleri tarafından yönlendirmesi beklenmektedir. Alüminyum köpüklerin, otomotiv ve taşımacılık sektörlerinde yüksek mukavemet, hafiflik ve tokluk özelliklerinin bir sonucu olarak popülaritesinin artacağı tahmin edilmektedir.

Metal köpüklere, özellikle de alüminyum köpüklere yönelik talebi etkileyen bir diğer önemli unsur da sürdürülebilirliktir. Geri dönüştürülmüş kaynaklardan yapılan alüminyum köpüklerin üretiminde köpük stabilize edici kimyasallar kullanılmamaktadır.

Bu unsurlar, malzemelerin satın alınabilirliğine ve çevre dostu olmasına katkıda bulunur. Alüminyum köpüklerin duvar kaplamaları, aydınlatma armatürleri, mozaik döşeme ve showroom vitrinleri gibi daha fazla uygulamada kullanılması, dünya çapındaki metal köpük pazarının gelir açısından büyümesine yardımcı olmaktadır (Nagrle, 2023).

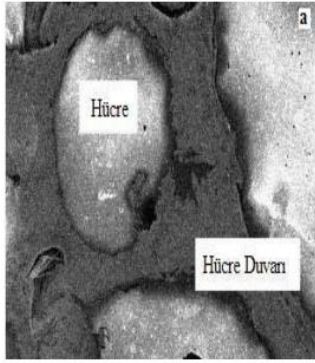
Bununla birlikte, seçilen ürün bilgisayar ortamında modellenip, özellikle üç boyutlu tasarım sayesinde metal köpüğün kullanım anında gerekli mekanik özelliklere sahip olup olmayacağı ya da hangi parametrelerle sahip olacağı öngörülebilme ve üretim parametreleri bu bilgilere göre ayarlanabilmektedir. Çevre duyarlılığı, doğal kaynakların kıtlığı ve enerji verimliliği gibi konuların giderek önem kazandığı günümüzde, malzeme, zaman ve ekonomik kaynak israfının önüne geçecek olan bu çalışma da önemli bir bileşendir.

Metal köpüklerin üretim süreçleri ve yöntemleri karmaşıktır ve hassas parametreler içerir. Ayrıca bilgisayar ortamında tasarlanmaları ve analiz edilmeleri zordur ve karmaşık algoritmalar içerirler. Bilgisayar ortamında tasarlanan metal köpükleri üretilen malzemeye uyarlamak ve sonuçları doğru bir şekilde analiz etmek için, bunları üretim sürecine göre tasarlamak gerekir.

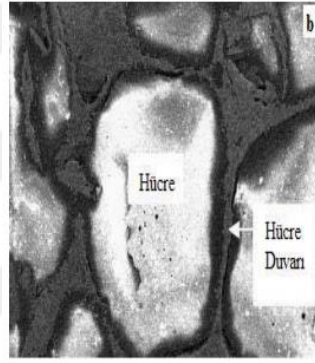
Bu çalışmada ezilebilir alüminyum köpüğün farklı yükleme hızlarındaki basma yüküne karşı gösterdiği mekanik davranışını anlamak için sonlu elemanlar ile analizler yapılmıştır. Malzemenin köpük malzeme olması nedeniyle ezilebilir köpük (crushable foam) modeli kullanılmış ve numunenin modellenmesinde ve sonlu elemanlar analizinde Abaqus adlı ticari sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu programda yarı statik (quasi-static) analiz ve zamana bağlı açık (explicit) analiz yapılmış ve iki analiz türü arasındaki fark ortaya konulmuştur. Ayrıca ezilebilir alüminyum köpük malzemenin farklı yükleme hızlarındaki davranışları da analiz edilmiştir.

2. METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM METODLARI

"Köpük" terimi genellikle bir sıvı içinde dağılmış kabarcıklardan oluşan bir yapı olarak tanımlanır. Bilim insanları da benzer bir tanım kullanmaktadır. Yapı boyunca dağılmış küçük kabarcıklara sahip bir sıvıya sıvı köpük denir. Katı metal köpükler, sıvı metal köpüğün sıcaklığı donma noktasının altına düştüğünde oluşur. Metalik köpükte kabarcıkların meydana getirdiği boşluk bir "hücre"dir (Şekil 2.1). Hücreler, duvarları ve köşelerden oluşur. Bir hücre duvarı iki hücre arasındaki sınırdır ve bir hücre köşesi üç kabarcığın kesiştiği yerdir. Hücre köşeleri hücre duvarlarından daha kalındır. (YAVUZ, 2011)



(a) 675 °C'de hücre yapısı



(b) 685 °C'de hücre yapısı (Mondal vd., 2009)

Şekil 2.1 Metalik köpüğün hücresel yapısı

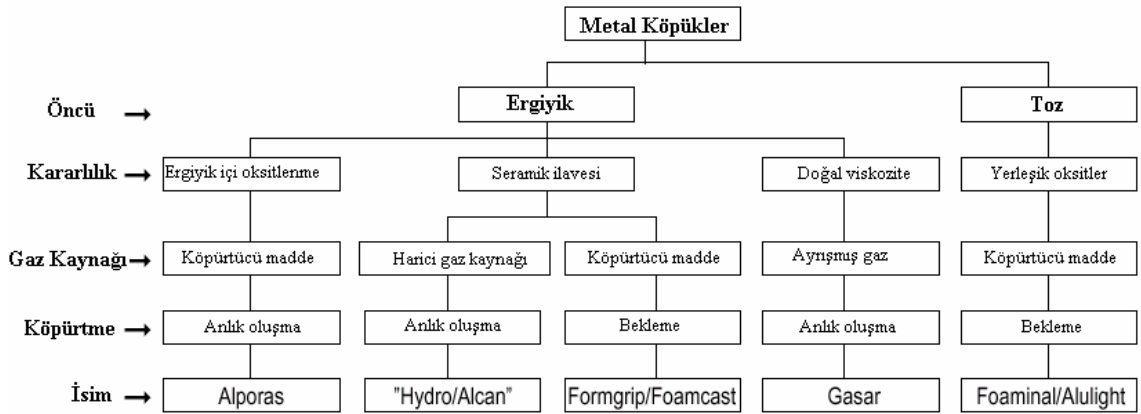
Gözenekli metalik malzemelerin yapısal uygulamaları kapsamında otomotiv, demiryolu, inşaat, havacılık, denizcilik ve medikal alanlar yer alırken, fonksiyonel uygulamaları ise filtrasyon ve ayrıştırma, ısıl eşanjörler, soğutucu sistemler, elektro-kimyasal prosesler, suyun arıtılması ve sıvı depolama ve transferini içermektedir (Banhart, 2001, 2005).

Yukarıdaki uygulamalarda gözenek oluşturmak için işlevsel olarak kullanılabilecek metal ile alaşımları arasında alüminyum, bakır, çelik, nikel bazlı süper alaşımlar, kurşun, çinko ve kalay bulunmaktadır (Banhart, 2005; Simancik vd., 2002). Son yıllarda, metal köpükler yukarıdaki uygulamaların birçoğu için kullanılmaktadır. Özellikle alüminyum köpüklerin fiziksel ve mekanik özellikleri, bileşimin yanı sıra malzeme özellikleri tarafından da kontrol edilmektedir (Deqing & Ziyuan, 2003). Aynı zamanda, metal köpüklerin fonksiyonel kullanımı, ortaya çıkan metal köpüğün gözenek yapısına bağlıdır.

Köpük metal üretim süreçleri genellikle üreticiler tarafından farklı isimler altında tanımlanır, ancak araştırmacılar bazen bunları köpüğün gözenek yapısına göre tanımlar.

Metal köpükler toz metalürjisi, çökeltme (ayırma) ve eritme yoluyla üretilebilir. Bu işlemlerin bazılarında eriyiğe bir gaz enjekte edilir veya bir köpürtme maddesi kullanılır. Titanyum Hidrür tozu yaygın olarak köpürtme maddesi olarak kullanılır (TiH_2) (Banhart, 2001; Cambronero vd., 2009). Araştırmacılar, son zamanlarda kalsiyum karbonatın karbonat köpükleri olarak bilinen metal köpüklerde çökmesi ile oluşan yeni yapılar üzerinde çalıştılar (Bryant vd., 2007).

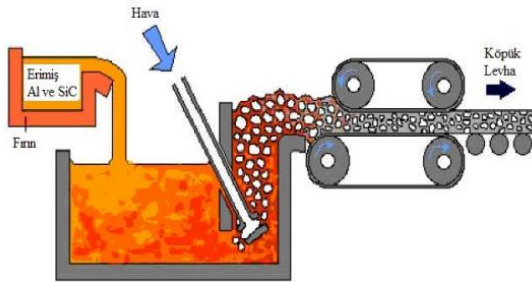
Şekil 2-2, Geçmişten günümüze metal köpüklerin nasıl üretildiği ve çeşitli marka isimleri de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Metalik köpüklerin soyağacı

2.1 Sıvı Metale Gaz Enjeksiyonu ile Metal Köpük İmalatı

En basitinden, erimiş alüminyum kabının tabanına hava enjekte etmektir. Erimiş metale gaz enjekte etme yöntemi Şekil 2-3. 'de şematik olarak gösterilmiştir(Aksekili, 2005).

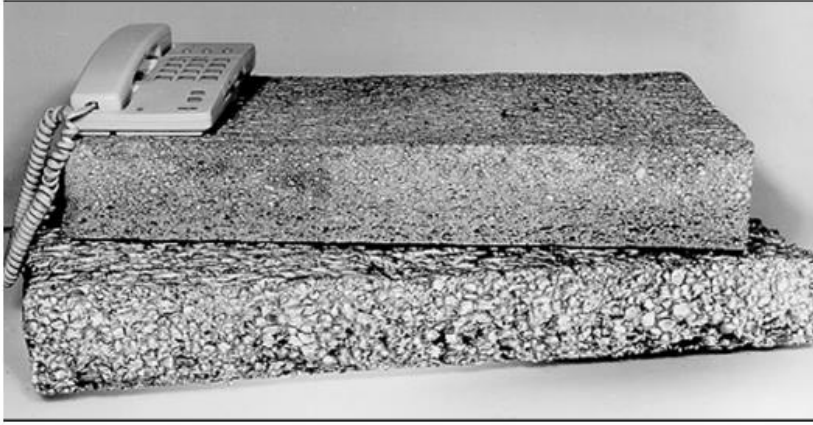


Şekil 2.3. Sıvı metale gaz enjeksiyonu ile köpük imali (Curran & John, 2003).

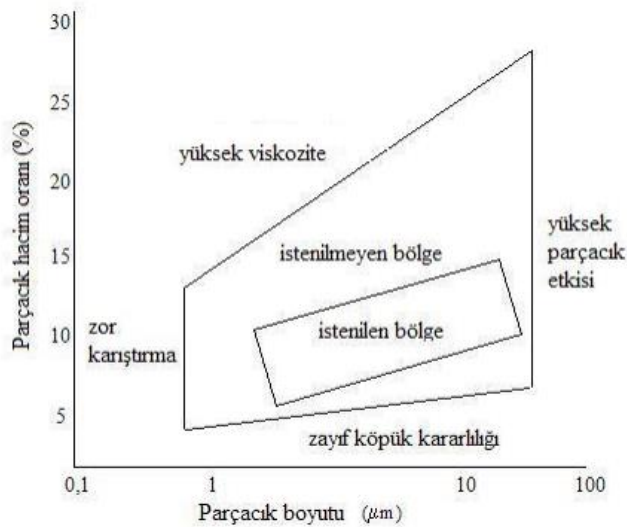
Kullanılan gaz doğrudan sıvı metale eklenirse, gaz kabarcıkları rahatlıkla oluşmaktadır. Bu gaz kabarcıklarının homojen dağılımını, boşluk yapısını ve hücre duvar kalınlığını ayarlamak güçtür. Bu metoda göre metal, seramik partiküller eklenerek daha stabil hale getirilebilir. Kararsız gözenek yapısı nedeniyle, gözeneklerin dış yüzeyinin üst kısmında oluşan kabarcıklar köpüklenmeden kaçacaktır (Amjad, 2001).

Silisyum karbür, alüminyum oksit veya magnezyum oksit (SiC , Al_2O_3 veya MgO_2) gibi seramik parçacıklar, viskozitesini kontrol etmek için sıvı metale eklenir (Banhart, 2001, 2005; İp vd., 1999).

İkinci aşamada, gazlar (hava, nitrojen, argon) bir rotasyon tahrikli pervane kullanılarak metal matris kompozitin içine üflenir. Basınçlı hava tarafından oluşturulan kabarcıklar yüzeyde yüzmeye başlar. Yüzeyde yüzen kabarcıklar bir taşıma bandı aracılığıyla boşaltılır. Son işlemde, elde edilen köpük katılaştırılır. Alüminyum köpük yoğunluğu $0,069 \text{ g/cm}^3$ ile $0,54 \text{ g/cm}^3$ aralığında, yaklaşık gözenek boyutu 3 ile 25 mm arasında ve gözenek duvar kalınlığı 50 ile 85 μm arasında değişmektedir (Banhart, 2001). Kanada'daki ALCAN alüminyum köpük panel üretimi için bu prosesi kullanmaktadır. Şekil 2.4, Norveç'teki Hydro Aluminium firmasında bu prosesi kullanılarak üretilen metal köpüğü göstermektedir (Banhart, 2000a, 2001).



Şekil 2.4 Erimiş metale gaz enjeksiyonuyla oluşan metalik köpük



Şekil 2.5 Parça boyut ve hacim arasındaki ilişki

Parçacıkların hacmi ile parça tane boyutları arasındaki ilişkiye bağlı olarak üretilen köpüklerin hem büyük hem de küçük sorunlar oluşabilir. Şekil 2.5 parçacık boyutu ve hacim oranı arasındaki ilişkiyi göstermektedir (Banhart, 2000a, 2001).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları için ilk köpürtme yöntemi Kanadalı Cymat Aluminium şirketi tarafından icat edilmiştir. Alüminyum alaşım eriyiğini stabilize etmek için silisyum karbür, alümina ve magnezyum oksit parçacıkları (genellikle her biri bir tane) kullanılır. Güçlendirilmiş parçacıkların hacim oranı genellikle %10-20'dir ve ortalama parçacık boyutu 5-20 mikrondur. Köpürtme işlemi, eriyikte eşit dağılımlı kabarcıklar üreten özel olarak tasarlanmış bir çark ya da vibrasyonlu tüp aracılığıyla ergimiş metal içerisine gaz (hava, nitrojen veya argon) enjeksiyonu yapılarak gerçekleştirilir. Dökümdeki seramik partiküller köpüğü nispeten inert (hareketsiz) hale getirir. Köpüklü metal, kapalı bir dış yüzeyle doğrudan döküm makinesinden kullanılabilir veya köpürtmeden sonra gerektiği gibi kesilebilir. Bu doğrudan köpürtme işleminin avantajı olarak; yüksek köpük hacmi, sürekli üretim imkanı ve düşük yoğunluklu yapılar üretilmesini sağlar (Banhart, 2005).

Takviye elemanı olarak kullanılan partiküllerin köpükleri stabilize etme mekanizmaları literatürde tartışma konusudur. Hücre duvarındaki partikül kümelenmesinin köpük stabilizasyonunda önemli bir rol oynadığı yaygın olarak kabul edilmektedir. İlk olarak, partiküller yüzey viskozitesini artırır ve böylece film tabakası deşarjı engeller. İkincisi, partiküller eriyik tarafından kısmen ıslatılır (Banhart, 2001; Deqing & Ziyuan, 2003).

Son zamanlarda, Avusturya Metalürji İşleri ve Hafif Metaller Yetkinlik Merkezi'ndeki (LKR) fizikçiler tarafından eriyik köpürtme işlemi geliştirilmiştir. (Babcsán vd., 2004) Ayrıca, köpüğün kalıplara dökülmesiyle kapalı hücrelere sahip hibrit kalıplanmış köpük parçalar elde edilmiştir. Bu ticari buluş 14 farklı alüminyum köpükten oluşmakta olup Metcomb olarak adlandırılmaktadır (Leitmeier vd., 2002).

Cymat veya Metcomb köpükleri ile ilgili tipik bilgiler Tablo 4.1'de verilmiştir (Banhart, 2005).

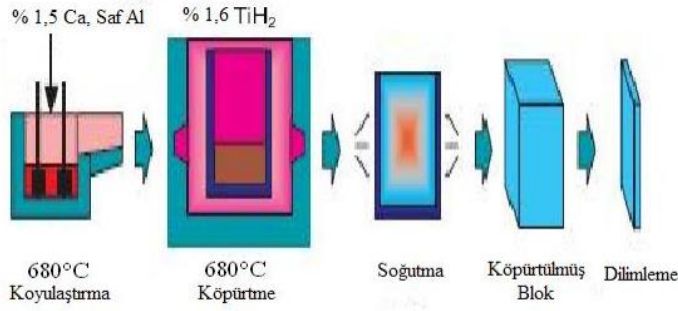
Tablo 2.1 Üç tip alüminyum köpüğün tipik özellikleri

Özellikler	Cymat veya Metcomb tip Köpükler	Alporas tip Köpükler	Alulight Tip Köpükler
Tipik Ürünler	Paneller: $\leq 16 \times 1 \times 0.2 \text{ m}^3$ karışık şekilli kısımlar (Metcomb)	Bloklar: $\leq 2 \times 0.6 \times 0.5 \text{ m}^3$ dilimler: 10 mm kalınlık	Bloklar: $\leq 1 \times 1 \times 0.5 \times 0.2 \text{ m}^3$ karışık şekilli kısımlar AFS-sandviç paneller: $\leq 2 \times 1 \times 0.02 \text{ m}^2$ 0.3-0.7
Yoğunluk aralığı (g/m^3)	0,069-0,54	0,18-0,24	0,3-0,7
Gözenek çap (mm)	3-0,25	2-10	210
Hücre duvar kalınlığı (μm)	50-85	-	50-100
Uygun alaşım aralığı	Al alaşımları	Al, AlZnMg	Al-, An-0Pb-, Sn-, Au-
Literatür	Ashby vd.(2000) Harte ve Nichol (2001) Leitlmeimer vd. (2002) Kenny (1996)	Ashby vd.(2000) Miyoshi (1999)	Ashby vd.(2000) Baumgartner at al. (2000) Baumeister (2000) Stanzick at al. (2002), Seeliger(1999-2001)
Köpük Üretici ve distribütör web adresleri	www.cymat.com www.lkr.at www.hkb.at	www.metalfoam.co.kr www.gleich.de	www.aulight.com www.lkr.at www.alm-gmbh.de www.ifam.fgh.de

Şu anda erimiş metali köpürtmek için üç yöntem bulunmaktadır: Bunlardan ilki ergimiş metale bir gaz enjekte edilmesini içerir; ikincisi atomizasyon faktörünü serbest bırakmak için gazı erimiş metalle karıştırmak ve böylece ilgili gazın sıvıya girmesini sağlamak; ve üçüncüsü daha önce sıvı içinde çözünmüş bir gazın çökeltilmesini içerir (Banhart, 2005; Haydn & Wadley G., 2002).

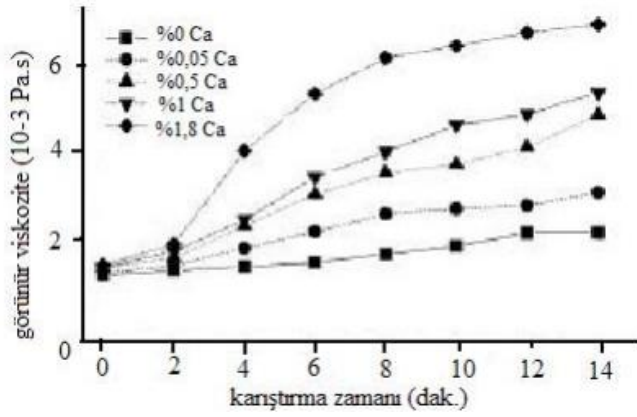
2.2 Sıvı Metale Köpürtücü Maddeler Eklenerek Metalik Köpük İmali

Eriyiği köpürtmenin ikinci bir yöntemi, eriyiğe gaz vermek yerine köpürtücü ajanı doğrudan eriyiğe eklenmesidir. Köpürtücü ajan ısı karşısında ayrılarak gaz açığa çıkarır ve köpürme işlemine devam eder. Bu metodun güncellenmiş bir modeli Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Haydn & Wadley G., 2002).



Şekil 2.6 Eriyik metallere köpürtücü ajanların eklenmesi

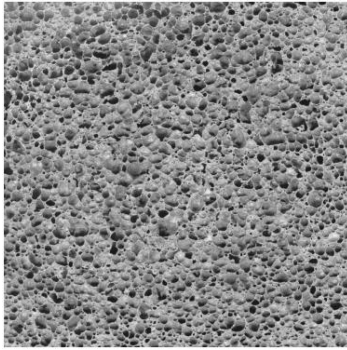
Bu üretim yöntemi, küçük ölçekli endüstriyel üretim yerlerinde de tercih edilmekte olup 1986 yılından beri Japonya'da Shinko Wire Industries tarafından kullanılmakta olup günlük üretim miktarı 1000 kg'a kadar çıkmaktadır (Amjad, 2001). Bu yöntemde, 680°C'deki alüminyum eriyiğine kalsiyum metali eklenmekte ve birkaç dakika karıştırılarak alüminyum eriyiğinin viskozitesi beş kat arttırılmaktadır. Sıvı metal, CaO, CaAl_2O_4 ve bazı durumlarda Al_4Ca oluşumu nedeniyle viskoz hale gelir. Şekil 2.7 farklı kalsiyum ekleme oranlarının alüminyum eriyiğinin viskozitesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Nihai formun üretiminde, kalsiyum genellikle ağırlıkça yaklaşık %1,5-3 miktarlarındadır. İstenen viskosite değeri elde edildiğinde, TiH_2 kıvamlaştırılmış sıcak sıvıya eklenir ve hidrojen gazını serbest bırakmak için köpürtme ajanı olarak görev yapar. Tipik uygulamada ağırlık bazında %1,6 TiH_2 eklenir. Eriyik hızla genişlemeye başlar ve oluşan köpük giderek depoyu doldurur. Köpüklenme süreci belirli bir basınçta gerçekleşmektedir. Tank alaşım ergime derecesinin 16°C altına kadar soğutulduğunda, sıvı köpük daha sonraki işlemler için kalıptan çıkarılan katı alüminyum köpüğe dönüşmeye başlar. Tip ölçülerdeki malzemenin köpürtülmesi işleminin tamamı yaklaşık 15 dakika sürer. Kullanılan yöntemde köpürtme işlemi eriyiğe gaz enjekte edilerek değil, doğrudan TiH_2 , ZrH_2 vb. gibi bir köpürtücü madde eklenerek yapılır. Zirkonyum hidratın (ZrH_2) köpürtücü bir madde olarak mevcut olduğu bilinmektedir. Ancak yüksek maliyeti nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır (Banhart, 2001; Miyoshi vd., 2000).



Şekil 2.7 Al eriyiğindeki Ca oranının, görünür viskozitesi ile zaman grafiği

Üretim parametrelerinin dikkatli bir şekilde ayarlanması homojen bir köpük elde edilmesini sağlar. Bu şekilde elde edilen köpük Alporas ticari adıyla bilinir ve mevcut en üniform alüminyum köpüklerdendir.

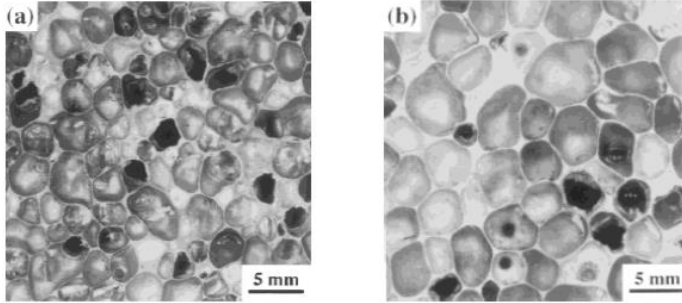
Köpüğün yapısı Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Deneysel sonuçlar, ortalama gözenek boyutu ile viskozite arasında bir korelasyonun yanı sıra köpük çekirdeğin nihai kütlesi ile viskozite arasında bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Literatür, 670-705°C köpürme sıcaklığında ve ağırlıkça %0,5-0,6 konsantrasyonda köpürtücü ajanı olarak zirkonyum hidrat (ZrH_2) kullanılmasını önermektedir (Banhart, 2001).



Şekil 2.8 Sıvı metale köpürtücü ajanların eklenmesiyle üretilen köpüklerde gözenek morfolojisi.

Shinko Wire, taneli kalıplama yoluyla Alporas polistiren köpük üretmekte ve elde edilen malzemenin yoğunluğunu ve gözenek boyutunu kontrol edebildiğini iddia etmektedir (Şekil 2.9). Shinko Wire, genelde 2050*650*450 mm boyutlarında köpük bloklar üretmektedir. Blokların gözenek boyutları yaklaşık 2-10 mm ve kesim yoğunluğu genellikle 0,18-0,24 g/cm³'tür. Özkütle değişimleri hem yatay hem de dikey olarak gözlemlenir ve en düşük değerler köpük bloğun üst orta kısmında kaydedilir. Köpüğe

köpürtücü ajan ekleme yönteminin ana dezavantajı, gaz ayrıştırma reaksiyonunun tozun eriyiğe eklenmesinden hemen sonra başlamasıdır. Sonuç olarak, yüksek kaliteli köpük elde etmek, gözenek yapısını ve köpürme yöntemini kontrol etmek zordur (Banhart, 2001, 2005; Miyoshi vd., 2000).



a) Ufak hücre yapısı

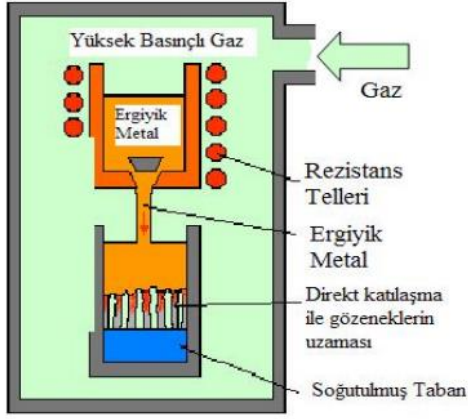
b) Geleneksel Arporas (Miyoshi vd., 2000)

Şekil 2.9 Tipik hücre yapısı

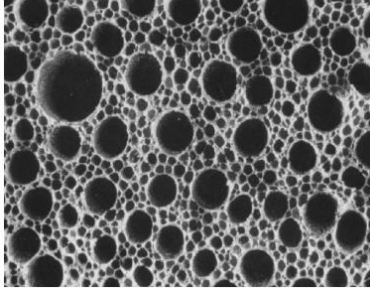
2.3 Eriyik filtreleme işlemi ile metal köpük imalatı

Bu metod yaklaşık on yıl önce bazı metal yapıları ötektik sistemlerde hidrojen ile köpürtmek için kullanılmıştır (Banhart, 2001). GASAR yönteminde metal bir üst rezervuarda çözülür. Dışarıdan verilen hidrojen sıvı tarafından emilir. Emilen hidrojen metali ayrıştırır ve sıvı metalde kabarcıklar oluşturur. Hidrojenin sıvı metal içindeki çözücü etkisi artan dış basınçla birlikte artar. Gaz tarafından emilen erimiş metal, soğutulmuş bir tabana sahip başka bir kaba dökülür. Sıvı metal katılaşır ve soğutulmuş kabın tabanından yükselir. Tertibatın neredeyse tüm parçaları basınçlı bir gazla çevrilidir. Katılaşmanın ortalama hızı 0,05 mm/s ile 5 mm/s arasında değişir. Şekil 2.10, GASAR metodunun şematik bir gösterimidir (Banhart, 2003; Çinici, 2004).

Bu yöntemle üretilen metal köpüklerdeki gözenekler katılaşmaya paralel olarak oluşur ve genellikle küresel şekildedir. Gözeneklerin şekli ve boyutu, kullanılan metal veya alaşımın kimyasal bileşimi, erime sıcaklığı, gaz basıncıyla ve soğutma yönüyle kontrol altına alınabilir. Alüminyum, nikel, bakır, demir, magnezyum ve muhtelif alaşımları bu tekniği kullanarak köpük üretmek için kullanılabilir. Gözenek boyutu 10 μ m ile 10 mm arasında ve gözeneklilik %5 ile 75 arasında değişmektedir (Banhart, 2001). Oluşan gözenek tipleri genellikle daireseldir ve gözeneklerin dağılımları eşittir (Şekil 2.11).



Şekil 2.10 GASAR yöntemiyle açık gözenekli metal köpük üretim metodu



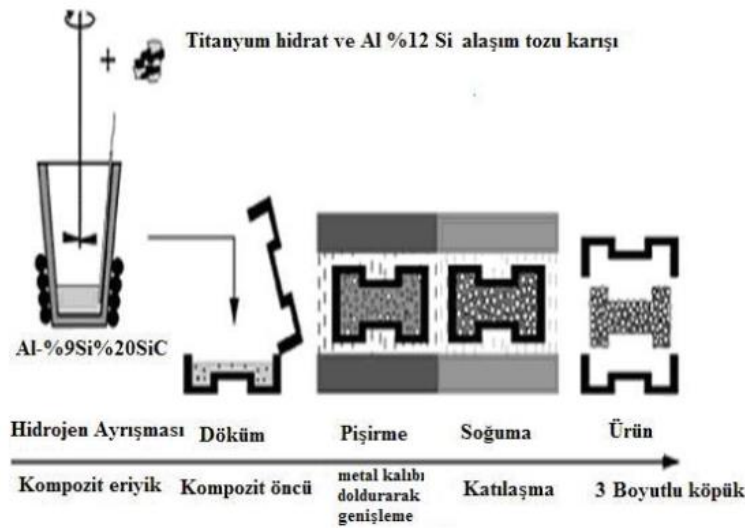
Şekil 2.11 GASAR yöntemi kullanılarak üretilen köpüklerin gözenek yapısı

2.4 Sıvı metal kullanarak köpürme öncüllerinin (FORMGRIP) İmalatı:

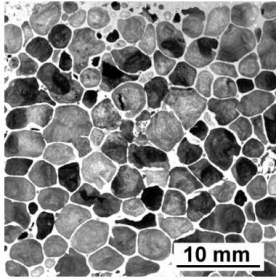
Eritme yöntemi kullanılarak köpüklü hücre yapısına sahip köpük alüminyum üretmek için iki ana yöntem bulunmaktadır. İlk yöntem, Japonlar tarafından geliştirilen sıvı bir yapıya köpürtücü bir maddenin eklenmesidir. Bu işlem, erimiş alüminyum karışımına kalsiyum ilavesine dayanmaktadır. Sonraki aşama hidratlı titanyum tozunun eklenmesidir. Böylece hidratın çökmesi erimiş alüminyumda kabarcıklar oluşturur. İkinci yöntem ise ALCAN'ın patentli sürekli dökme işlemidir. Bu işlemin ana ilkesi, eriyik içinde kabarcıklar (genellikle hava) oluşturan seramik parçacıkların alüminyuma eklenmesidir. Sonuç olarak, erimiş alüminyumun yüzeyinde kabarcıklar oluşur. Bağımsız bir kabarcık yapısına sahip köpüklü alüminyum üretmek için kullanılan bir diğer yöntem ise, köpürtücü bir madde içeren metal tozundan elde edilen bir öncü malzemenin sinterlenmesidir (Amjad, 2001).

FORMGRIP (Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursors) ile ifade edilen bir süreç, alüminyum bazlı köpükler üretmek için yukarıda belirtilen yöntemlerin avantajlarını birleştiren başka bir süreçtir (Frei vd., 2002). Bu yöntemde, gaz oluşturan titanyum hidrat ve alüminyum tozları ilk adımda karıştırılır. Ön ısıtma ile yüzeyde bir

titanyum dioksit bariyer tabakası oluşturulur. Hidratlar, homojen oksidasyon sağlamak için düzenli aralıklarla karıştırılır. Karıştırılan toz, geleneksel mekanik karıştırma (1200 rpm) kullanılarak yavaşça soğutulan Al/SiC kompozit eriyiği (620°C) içinde dağıtılır. Toz ilavesinden hemen ardından eriyik takriben bir dakika süreyle karıştırılmaktadır. Göreceli olarak daha az boşluk oranına haiz bir kompozit öncü malzeme elde etmek için bu yöntem kullanılmıştır. Sürecin ikinci aşamasında, grafit kalıp (30*30*45 mm) içindeki öncü malzeme sıvı hale getirilmiş ve hidrojen ayrıştırması ile bal peteği yapısı elde edilmiştir (Amjad, 2001; Frei vd., 2002). Şekil 2.12'de bahsedilen yöntem ile elde edilen metal köpüklerin boşluk yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.12 FORMGRIP yöntemi



Şekil 2.13 FORMGRIP metoduyla üretilen köpük yapısı

2.5 Toz metalürjisi ile metal köpük imalatı;

Köpük metaller, Almanya'nın Bremen kentindeki "Institut Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung" 'da (IFAM) geliştirilen yöntemlerle elde edilebilmektedir. Bu yöntemlerin temel konsepti nispeten eski olmasına rağmen, köpük bileşenlerinin yeterli kalitede olması son zamanlarda yeni köpüklerin yaygın olarak

üretilmesine yol açmıştır. Başlangıç malzemesi olarak metal tozlarının kullanılması nedeniyle bu yöntem genellikle “Toz Metalürjisi” (T/M) olarak adlandırılır.(Banhart, 2001) T/M metodunun temsili şeması Şekil 2.14'de gösterilmektedir (Stöbener vd., 2003).

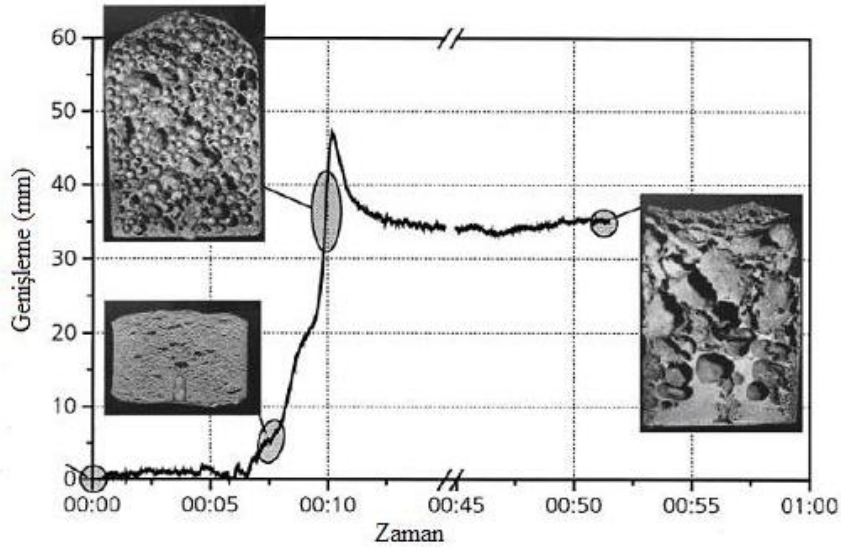


Şekil 2.14 IFAM proses diyagramı

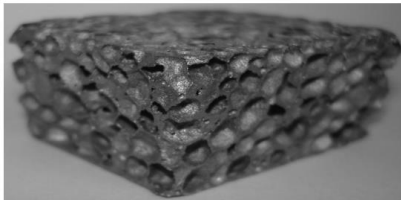
Üretim süreci, metal tozlarının (monometalik tozlar, alaşım tozları ve metal tozlarının karışımları) ve köpürtücü tozların karıştırılmasıyla başlar. Karışım daha sonra yarı mamul bir ürün üretmek için daha sert bir hale getirilerek sıkıştırılır (yoğunlaştırılır). Prensip olarak sıkıştırma, köpürtücü ajan tozunu tutan herhangi bir işlemle gerçekleştirilebilir. Sıkıştırma proseslerine ilişkin örnekler arasında sıcak tek yönde sıkıştırma ya da izostatik sıkıştırmanın yanı sıra profil çekilmesi de yer almaktadır. Kalıplama yöntemi, istenen başlangıç malzemesinin biçimine bağlı olarak seçilebilir. Ekstrüzyon açık ara en ekonomik ve tercih edilen yöntemdir. Öncül malzeme büyük bir dikkatle üretilmelidir. Bunun nedeni, bu aşamada meydana gelen artık gözenekler ve diğer hataların sonraki süreci olumsuz etkileyebilmesidir. Bir sonraki adım, ana malzemenin erime noktasına yakın bir sıcaklıkta ısıtmaktır. Isıtıldığında, matris malzemesi içinde dağılmış olan köpürtücü maddesi tozu daha yoğun hale gelir. Bir sonraki adım, matris malzemesinde eşit olarak dağılmış köpürtücü tozunu ayırmak için öncü malzemeyi matris malzemesinin erime noktasının üzerinde veya yakınında bir sıcaklıkta ısıtmaktır. Açığa çıkan gaz, sıkışan öncül malzemeye etki ederek genişlemesine neden olur. Tam genişleme zaman, sıcaklık ve öncül boyutuna bağlıdır ve birkaç saniyeden birkaç dakikaya kadar sürebilir (Banhart, 2001; Stöbener vd., 2003). Şekil 2.15 alüminyum ve TiH₂ öncülleri için

genleşme eğrilerini göstermektedir. Şekil 2.16'den de görülebileceği gibi, genişleyen köpüğün hacmi zamana bağlıdır ve farklı genleşme seviyelerinde bazı morfolojik özellikler gösterir. Köpüğün maksimum genleşmesi ve ardından çökmesi oldukça homojen bir köpük morfolojisi ile ilişkilidir. Köpük malzemeden hidrojen çıkışı TiH_2 tozunun ayrışma sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda başlar; TiH_2 partikülleri metal matriste bulunan hidrojenin salınmasını önler; TiH_2 ayrıştıkça hidrojen kabarcıklar halinde salınır ve artan termal maruziyetle matris malzemesini genişletir (Banhart, 2001; Yu vd., 2006).

Katı metal köpüklerin maksimum genleşmesi ve yoğunluğu, köpürtücü madde miktarı ve diğer bazı köpürme parametreleri (sıcaklık ve ısıtma hızı) değiştirilerek düzenlenebilir. Çinko ve alüminyum alaşımlarının titanyum ve zirkonyum hidrürler (TiH_2 , ZrH_2) ile köpürtülmesi mümkündür. Çelik, karbonatlarla (örn. $SrCO_3$) köpürtülebilir. Köpürtücü madde olarak metal hidratlar kullanıldığında, köpürtücü madde içeriği çoğu durumda yaklaşık %1 olmalıdır (Banhart, 2001).

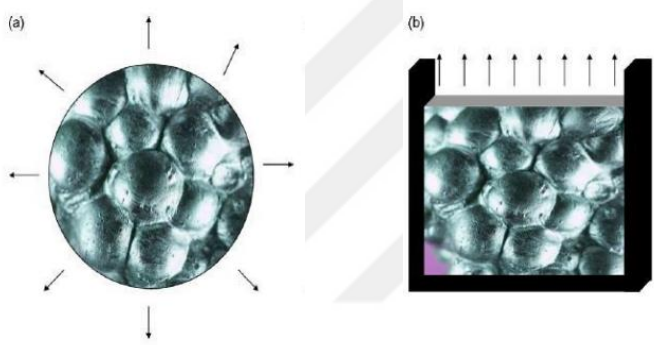


Şekil 2.15 TiH_2 'nin alüminyum içinde zamanın bir fonksiyonu olarak genleşme özellikleri



Şekil 2.16 Toz metalurjisi ile üretilen alüminyum köpüklerin gözenek yapısı.

Bu metod sadece alüminyum ve alüminyum alaşımları ile sınırlandırılmaz; kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve başka metallerle ve alaşımlarıyla da köpürtme metodunun parametreleri kullanılarak yapılabilir. Son zamanlarda, yumuşak çelik tozu da bu yöntem kullanılarak köpürtülebilmektedir (Neville & Rabiei, 2008). Köpükleme işleminde sıklıkla baz alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır; $AlSi_7Mg$ ve $AlSi_2$ gibi döküm alaşımları da düşük erime noktaları ve iyi köpükleme özellikleri nedeniyle köpükleme için sıklıkla kullanılır. Düzensiz şekilli metalik köpükler, başlangıç malzemesinin bir kısmının bir fırında köpürtülmesiyle üretilebilir. Genleşme belirli kurallarla sınırlandırılırsa durum değişir. Köpüğün sınırlandırılması ve düzleştirilmesi işlemi, başlangıç malzemesinin daha sonra ısıtılan ve genişen içi boş bir kalıba yerleştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Delik tesviyesinin şematik bir gösterimi Şekil 2.17'de gösterilmiştir (Babcsán vd., 2007).

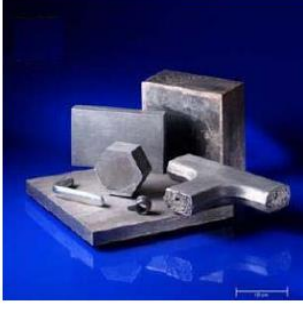


a) Cidarsız biçimde köpürme

b) Cidarlı biçimde köpürme (Babcsán vd., 2007)

Şekil 2.17 Net şekilli parçalar üretilmesi

Köpürtülecek malzeme bir fırında köpürtüldüğünde, öncü malzeme düzensiz şekilli bir köpük haline gelir ve ana malzemenin genleşmesi sınırlandırılmadığı sürece yayılır. T/M köpükleme işleminde, öncü malzeme içi boş bir tüpe veya kalıba yerleştirilir ve ardından ısıtılır, burada öncü malzeme genişler ve uyumlu bir yapısal şekil alır (Babcsán vd., 2007). Sıcaklık ve köpürme süresi dengelenirse, ısıtma süresi boyunca yapısal olarak stabil, düşük yoğunluklu bir malzeme elde edilebilir. Daha uzun köpüklenme süreleri sonunda geniş gözenekli ve oldukça düşük yoğunlukta yapılar ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda hafif malzemelere olan ilgi giderek artmaktadır ve bilhassa Almanya'daki Fraunhofer Malzeme Araştırma Enstitüsü (IFAM) toz metalürjisi kullanarak çeşitli karmaşık yapılarıdaki köpüklü metalleri üretmek için bir teknoloji geliştirmiştir.



Şekil 2.18 T/M prosesi ile üretilen köpüklü Al ürünler



Şekil 2.19 Bükülmüş Al sandviç köpük formu

3. METAL KÖPÜK UYGULAMA ALANLARI

Yoğunluğu düşük metal köpüklerin titreşim sönümleme, hava geçirme, ısı iletme, ses yalıtımı ve enerji absorbe etme özelliklerinden dolayı birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak inşaat ve otomotiv endüstrilerinin yanı sıra biyomalzemeler, havacılık ve denizcilik gibi gelişen alanlar verilebilir (Banhart, 2000b; Kavi vd., 2006; Polat vd., 2010).

Hafifliği, yüksek mukavemeti, akustik ve ısı yalıtım özellikleri nedeniyle köpük metaller, araç motor bölmelerinde tercih edilen bir malzemedir. (Banhart, 2000b; Polat vd., 2010) Araç imalatında güvenliği artırmak için boşluklarda, (tampon ile şasi arasındaki alan) tampon ve kapılarında dolgu malzemesi olarak kullanılır (Banhart & Weaire, 2002; Polat vd., 2010).

Bunun yanı sıra, yoğunluğunun düşük ve mukavemetinin yüksek olması nedeniyle havacılık endüstrisi tarafından da tercih edilmektedir (Banhart, 2000b). Yüksek mukavemetli hafif sandviç paneller ve alüminyum köpük levhalar, özellikle bal peteği kompozit metaller de düşük üretim maliyetleri nedeniyle bir seçenektir.

Düşük yoğunluğuna ek olarak, korozyon direnci ve hafifliği köpüklü alüminyum denizcilik endüstrisi için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir. Köpüklü alüminyum, özellikle özel koşulların ve standart dışı tasarımların çok yaygın olduğu denizcilik endüstrisinde her şekle sokulabilen bir metaldir (Özer & Ekerim, 2009; Polat vd., 2010).

İnşaat sektörü, çatı kaplaması ve bölme duvarların ısı yalıtımının yanı sıra bina cephelerinin kaplanması için kullanılan alüminyum köpük için bir başka popüler uygulama alanıdır. Ses emici ve akustik özellikleri nedeniyle alüminyum köpük günümüzde otoyollar, tüneller ve viyadükler için gürültü bariyeri olarak da kullanılmaktadır. Düşük ağırlığı nedeniyle alüminyum köpük, prefabrik binaların ve hareketli köprülerin yapımında çok avantajlıdır.(Polat vd., 2010).

Alüminyum köpükler kompakt mikro hücreli ısı eşanjörleri, hava soğutma kondansatörleri, elektronik cihazların soğutulması, endüstriyel fırınlar, yük taşımacılığı, spor ekipmanları, demiryolu endüstrisi, kimyasal elektronik reaktörler, alev tutucular, dekoratif ve otomotiv uygulamaları gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Polat

vd., 2010). Tablo 3.1 metal köpükler için gerekli olan benzersiz özellikleri ve uygulamaları özetlenmektedir.

Tablo 3.1 Metal Köpük Uygulamaları

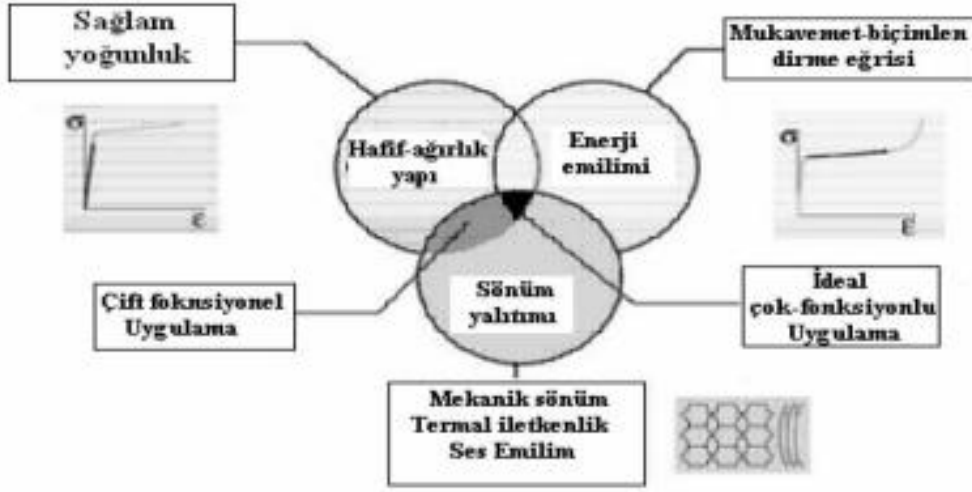
Uygulama Alanı	Belirgin Özelliği	Uygulama Yeri
Hafif Yapılarda	Bükmeye karşı özellikle yüksek tokluk/ağırlık oranı	Al köpük bagaj kapağı olarak, uzay endüstrisinde
Sandviç yapıların omurgası	Düşük yoğunluk yüksek kayma ve çatlak mukavemeti	Kompozit yapılarda
Mekanik sönümleme	Katı maddelerden 10 kat fazla enerji sönümleme	Çarpışma elemanı (crash box) olarak, alüminyum araba yedek parçalarında
Titreşim kontrolü	Aynı ağırlığa sahip katı malzemeye nazaran köpük panellerin bükülme altında doğal titreşim frekansının yüksekliği	Araba motor blokları
Akustik absorbe	Ağ yapısına sahip metal köpüklerin akustik absorbe özelliklerinin yüksekliği	Yapı malzemesi
Enerji ile etkileşimi	Sabit basınç altında yüksek enerji absorbe özelliği	Spor aletleri
Isı ile etkileşim	Açık hücreli yapılar özellikle daha fazla yüzey alanına sahip olduklarından yüksek ısı iletim özelliklerine sahiptirler	Isı değiştiriciler, buzdolabı, (İGBT) Integrated Gate Bipolar Transistör
Isı kalkanı	Özellik alüminyum köpüğün kapalı hücre yapısında direk ateşe üstün direnç özelliği	Askeri uygulamalarda, ateş söndürücü
Döküm için tüketilir çekirdek	Alüminyum dökümde kompleks şekilli yapıların oluşturulması	Dökümde maça olarak Al köpük kullanılması
Biyouyumlu ara bağ aparatları	Biyouyumluluk özelliği	İmplant malzeme olarak kalça, kol vb. protez(titanyum köpük)
Filtreler	Yüksek sıcaklık gaz ve sıvıların filtrasyonunda	Nikel köpükler, kimyasal filtre olarak
Korozyon direnci	Korozyona karşı yüksek direnç	Korozyon direnci yüksek metalik köpükler özellikle denizcilik uygulamaları
Elektrot ve katalitik taşıyıcılar	Yüzey alan/hacim oranına balı yüksek reaksiyon yüzey alanı	Ni-Cd Pillerde

3.1 Köpük Metalin Endüstriyel Kullanım Alanları

3.1.1 Otomotiv Sektörü

Metal köpükler, hafiflikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.1'te otomotiv endüstrisinde kullanılan farklı özelliklere

sahip üç alüminyum köpük gösterilmektedir. Şekildeki kutular daireler içindeki köpük özelliklerinin avantajlarını, daireler ise üç uygulamayı göstermektedir. İdeal olarak, köpükler her üç özellikte de üretilmelidir (Banhart, 2001).



Şekil 3.1 Metal köpüklerin otomotiv endüstrisindeki uygulamaları

3.1.2 Hafif Yapılar

Hafif yapı, genleştirilmiş polistirenin iki özelliğine dayanmaktadır: neredeyse tersine çevrilebilir elastik deformasyon ve yüksek sertlik-ağırlık oranı. Bu oran, aynı ağırlıktaki geleneksel panellerden beş kat daha yüksektir (Evans vd., 1998). Araçların ağırlıklarını hafifletmek için sandviç panel şeklindeki metal köpükler kullanılabilir. Örneğin, kaput, bagaj kapağı ve üstü açılabilir tavan gibi yüksek sertlik gerektiren alanlarda burulma deformasyonunu ve titreşimi önlemek için kullanılabilirler (Banhart vd., 1999). Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapıların araçların ağırlığını azaltmada çok faydalı olduğu kanıtlanmıştır. 3D köpükten yapılan alüminyum sandviç yapılar, geleneksel otomotiv çelik panellerinden ortalama olarak sekiz kat daha dayanıklı ve %25 daha hafif yapıya sahiptir. Şekil 3.2 ve 3.3 'de bir alüminyum gövdeli sandviç yapısı gösterilmektedir.



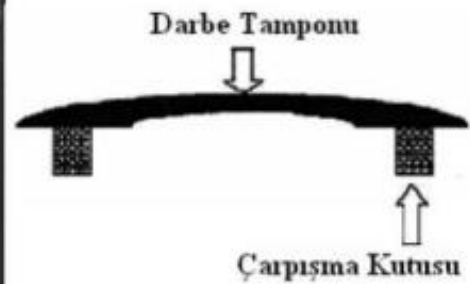
Şekil 3.2 Köpük alüminyum sandviç örneği



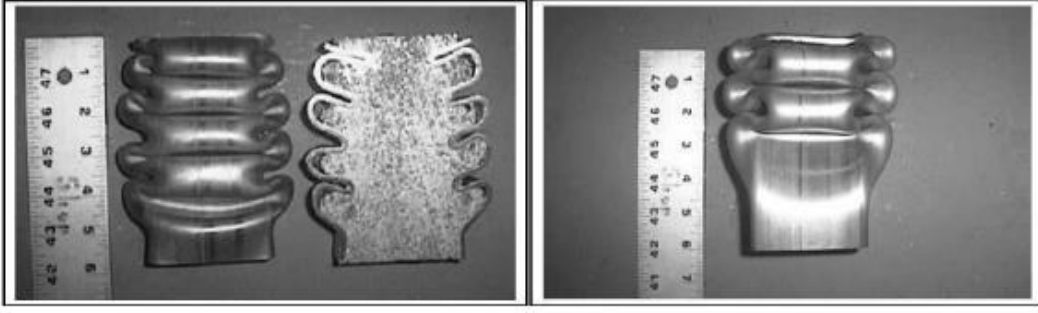
Şekil 3.3 Köpük alüminyum sandviç panel

3.1.3 Darbe emilimi

Darbe emiciler, alüminyum köpük araçlarda darbe emici olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle çeşitli tiplerde çarpışma kutuları tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu çarpışma kutuları tampon ile ön koruma arasına yerleştirilir. Çarpışma kutusu Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Saatte 20 km'nin altındaki hızlarda bir çarpışma durumunda, bu çarpışma kutusu çarpışmanın tüm enerjisini emer ve deformasyon nedeniyle araç şasesinde hasar görmesini önler (Baumgärtner vd., 2000). Şekil 3.5'te alüminyum köpük ile doldurulmuş 304 paslanmaz çelik ve alüminyum köpüksüz 304 paslanmaz çeliğin aksenal kuvvetler altındaki deformasyonunun bir fotoğrafı gösterilmektedir (Yavuz, 2010).



Şekil 3.4 Darbe emici parça örneği



Şekil 3.5 Dikey kuvvetlere maruz kaldığında alüminyum köpüklü ve köpüksüz 304 paslanmaz çeliğin deformasyonu.

3.1.4 Alüminyum Köpükten Üretilebilecek Otomotiv Parçaları

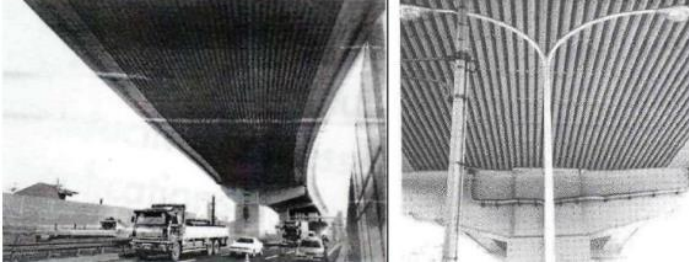
Araçlarda kullanılan salıncak demirleri, monte edildikleri yere bağlı olarak farklı kalınlık ve boyutlara sahiptir. Takıldıkları yere ve kullanım amaçlarına bağlı olarak salıncak kollarının işlevlerinin zamanla bozulduğu kanıtlanmıştır. Salıncak grubunun iç kısımları, parçaların ömrünü uzatmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için köpük alüminyum ile doldurulabilir (Başer, 2012). Şekil 3.6'da gösterilen salıncak grubu için uygun yoğunlukta köpük alüminyum tercih edilirse, ağırlıkları önemli ölçüde artmaz.



Şekil 3.6 Salıncak grubu ve alüminyum köpük yapısı.

3.1.5 Gürültü Seviyelerini Azaltmaya Yönelik Önlemler

Ses yalıtımı ve ses izolasyonu otomotiv endüstrisinde çok önemlidir. Alüminyum metal köpük, araçlarda gürültü ve hava kirliliğini önlemek için kullanılır. Örneğin, köprülerin altındaki ALPORAS yapısal köpük panelleri, köprü'nün altından geçen araçların sesini sönümleyerek gürültü kirliliğini azaltmaktadır. Şekil 3.7'de bir köprü altındaki ses emici panelin tasarımı gösterilmektedir (YAVUZ, 2011).



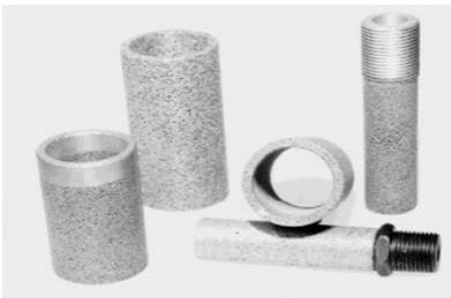
Şekil 3.7 Viyadüklerde köpük alüminyum ses yalıtım uygulaması

Polimer köpükler ses yalıtım malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Polimer köpükler, köpüğün yapıldığı ana metalden çok yüksek bir kayıp katsayısına ve daha düşük elastisite modülüne sahiptir, bu da ses titreşimlerini azaltmaya yardımcı olur. Köpüğe giren ses dalgalarının bir kısmı yapısı tarafından absorbe edilirken bir kısmı da yansıtılır. Köpükler 1-5 kHz frekanslarındaki akustik titreşimlerin %99'unu absorbe edebilir. (Şekil 3.7, 3.8, 3.9)



Şekil 3.8 Otoyollarda ses yalıtımı.

Kompresörlerden ve pnömatik sistemlerden kaynaklanan gürültü, Şekil 3.9'da gösterildiği gibi alüminyum köpükten kullanılarak azaltılabilir.



Şekil 3.9 Kompresörlere ait alüminyum köpük susturucu

3.1.6 Havacılık Ve Uzay Endüstrisi

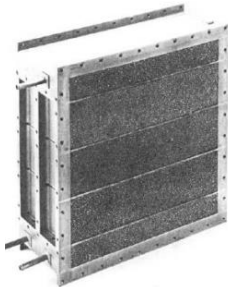
Köpük metal malzemelerin hafifliği, havacılık ve otomotiv endüstrileri için çok önemli bir faktördür. Havacılık ve uzay sanayisinde ayrıca uzay aracı iniş takımlarındaki enerjiyi

emen malzemelere alternatif olabileceği düşünölen metal köpüklerin kullanımı da araştırılmaktadır (YAVUZ, 2011). Şekil 3.10'daki Ariane 5 roketinin konik yapısı, üretimi çok pahalı olan bal peteği şeklindeki köpük metalden yapılmaktaydı. Petek şeklindeki köpük metalin yerini, üretimi daha basit ve çok daha ucuz olan çok katmanlı (sandviç) köpük almıştır ve tercih edilen bu çok katmanlı yapı, gerekli ağırlığı gerekli mukavemet seviyesiyle destekleyebilmektedir.



Şekil 3.10 Sandviç köpük levhalardan yapılmış roket konileri

Hafif ancak mukavemetli köpük yapıların kullanımı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde çok benzerdir. Otomotiv endüstrisi gibi havacılık endüstrisi de yüksek performansları ve düşük maliyetleri nedeniyle köpük sandviç panellere ilgi duymaktadır (Şekil 3.11). Boeing, kapsamlı araştırmalara dayanarak, gaz tutucu yöntemler kullanan köpüklü alüminyum sandviç paneller ve büyük titanyum köpük sandviç parçaları geliştirmiştir. Bu köpük paneller helikopterin kuyruk kısmı yerine monte edilebilmektedir. Bu köpük panellerin ana avantajı kavisli ve üç boyutlu olabilmeleridir. (Şekil 3.11, 3.12, 3.13, 3.14).



Şekil 3.11 Isı eşanjörü parçaları



Şekil 3.12 Kompozit aynalar için kullanılan parçalar



Şekil 3.13 Optik teleskop köpük metal parçası



Şekil 3.14 Uçak kanatları için metalik köpük örneği

3.1.7 Gemi İnşaatı

Hafif malzemeler, yüzer uygulamalar için gemi yapımında çok önemli bir rol oynamaktadır. Tüm yüksek teknolojili yolcu gemileri alüminyum bal peteğinden, alüminyum panellerden ve alüminyum profillerden yapılabilir. Bazılarında köpüklü alüminyum gövdeli sandviç paneller kullanılabilmektedir. Mükemmel titreşim sönümleme özelliklerinden ödün vermeden yapısal stabilite ve düşük ağırlık sağlamak için, köpük alüminyum levhalar yüksek elastikiyete sahip bir malzeme olan poliüretan yapıştırıcı ile birbirine bağlanmalıdır. (Yavuz, 2010) Köpüklü metallerin gemi inşasındaki bazı uygulamalar Şekil 3.15 de yer almaktadır.

	a) Egzozun akustik ve termal yalıtımı
	b) Egzoz sistemlerinde kıvılcım önleyiciler
	c) Hızlı devriye gemilerinin rijitliğini ve yüzebilirliğini arttırmak

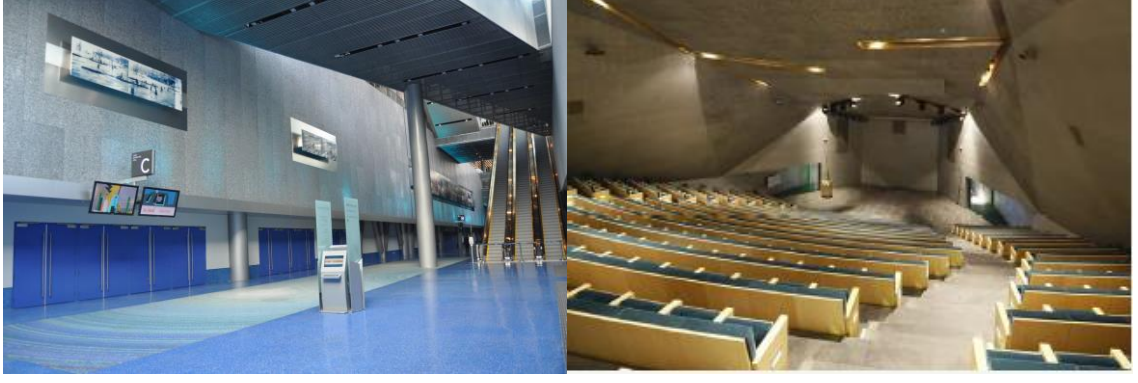
a)	d) Duvarların ve perdelerin yangın söndürme amaçlı kaplamaları;
b)	e) Tehlikeli yüklerin taşınması için konteynerler veya soğutulmuş konteynerler
c)	f) Yüzebilen yönlendirme işaretleri
d)	g) Hafif helikopter iniş pistleri
e)	h) Rijitliği ve yangına dayanıklılığı artırılmış kurtarma tekneleri gibi.
f)	
g)	
h)	

Şekil 3.15 Metal köpüklerin deniz yapılarındaki muhtemel kullanım alanları

3.1.8 İnşaat Endüstrisi

Alüminyum köpük paneller, asansörlerin enerji tüketimini en aza indirmeye yardımcı olur. Asansörlerin yeni nesilleri hızlıdır, bu nedenle hızlanmak ve yavaşlamak için hafif yapılara ihtiyaç duyarlar. Aynı zamanda hafif ve dayanıklı yapıların emniyet gereksinimlerini de karşılaması gerekir. Yangına karşı duvarlar ve acil çıkışlar, düşük ısı iletkenliğine ve mükemmel yangın direncine sahip köpüklü alüminyumdan yapılmıştır. İnşaatta alüminyum köpük için birçok uygulama vardır. Alüminyum köpük ayrıca çeşitli destek elemanlarının (örneğin merdiven korkulukları, balkon korkulukları) yapımında da kullanılmaktadır. Şu anda bu amaçla kullanılan malzemelerin bazıları çok ağır ve yanıcıdır. Alüminyum köpük kullanımı bu sorunları çözmektedir. Şekil 3.16'de inşaatta metal köpük kullanımına bir örnek gösterilmektedir.





Şekil 3.16 Alüminyum köpüğün yapı malzemesi olarak kullanım örneği

3.1.9 Spor Malzemeleri

Bu sektördeki yüksek fiyatlar nedeniyle, yeni malzemelerin kullanımı çok elverişlidir. Örneğin, alüminyum köpük, iyi enerji emme kapasitesi nedeniyle futbolcular için koruyucu ekipman olarak kullanılabilir (Banhart, 2001).

3.1.10 Demiryolu Endüstrisi

Enerji emilimi, arabalarla çarpışma riskinin bulunduğu kentsel alanlarda seyahat eden tramvaylar için özellikle önemlidir. Japon tramvayları çarpma enerjisinin emilimini artırmak için metal köpük bloklarla donatılmıştır. Hafif elemanların avantajları otomobillerle aynıdır, ancak binek araçlar çok daha geniştir (Banhart, 2005).





Şekil 3.17 Köpük metalin demiryollarında kullanımı.

Darbe emiciler raylı sistemlerde de kullanılabilir. Tramvaylar buna bir örnektir. Tramvaylar küçük çarpışmalara karşı etkili bir şekilde korunmalıdır. Ayrıca, bir yaya ile kaza olması durumunda, çarpışmadan sonra yayanın aracın altında sürüklenmemesi sağlanmalıdır. Şekil 3.18 çarpışma koruma sistemlerinde polistirenin önemini göstermektedir (Yavuz, 2010).



Şekil 3.18 Metalik köpükten yapılmış darbelere karşı koruyucu ürün

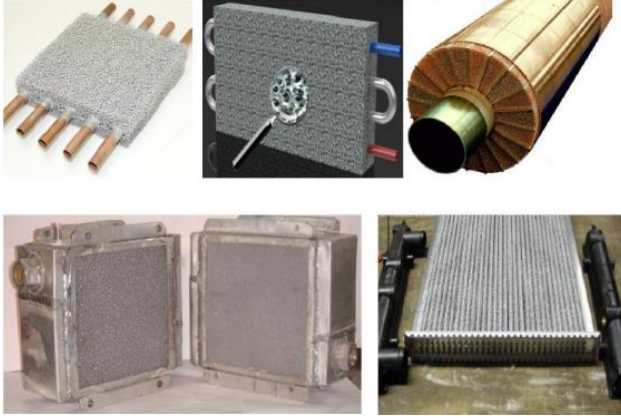
3.1.11 Makina Yapımı

Köpük metallerin makina mühendisliğinde birçok ilginç uygulaması vardır. Akslar gibi uzun süredir tercih edilen metallerden bazı bileşenlerin yerine sönümlemeyi arttırmak ve ataleti azaltmak için köpük kolon bileşenleri kullanılabilir. Bu tür bileşenler frezeleme, boyama ve matkap tezgahlarında kullanılabilir. Metal köpük gövdeli malzemeler elektrikli makineler için elektromanyetik kalkan olarak kullanılabilir. Titreşimli değirmenlerde zararlı ve ilave titreşimleri sönümlemek için kullanılabilirler (Banhart, 2001).

3.2 Köpük Metallerin Fonksiyonel Uygulamaları

3.2.1 Isı eşanjörleri

Yüksek ısı iletkenliği ve aşınma dayanımı sayesinde açık hücreli köpükler ısı eşanjörü olarak kullanılabilir (bakır bazlı köpükler ve açık hücreli alüminyum vb). Kapalı hücreli köpükler daha düşük ısı iletkenliğine sahip olup ısı kalkanı olarak kullanılabilirler. Yüzeyleri soğutma için de kullanılabilir çünkü ısı transferini destekleyen yüksek bir yüzey/hacim oranına sahiptirler (Doğan vd., 2015). Metal köpüklerin ısı eşanjörü olarak kullanımına örnek olarak bilgisayar çipleri, radyatörler ve elektronik cihazlara güç sağlayan mikroelettronik ekipmanlar gösterilebilir (GÜVEN, 2011). Şekil 3.19'da metalik köpük matris içindeki tüplerden oluşan modifiye edilmiş soğutucular ve diğer ısı eşanjörlerine örnekler gösterilmektedir.



Şekil 3.19 Metalik Köpükten yapılmış ısı eşanjörü

3.2.2 Filtre Ekipmanları

Filtreler iki tipdir: İlk kategori, sıvı içerisinde dağılmış katı parçacıkları veya lifleri yakalayıp ayıranlar ve bir gaz içinde dağılmış katı veya sıvı parçacıkları yakalayanlar. Bu tür filtreler örnek olarak ikincil polimer eriyiklerini saflaştırmak, biradaki mayayı veya kirlenmiş yağları temizlemek için kullanılanlar verilebilir. İkinci kategori, dizel motorun egzozunu temizlemek ve hava emiş yollarındaki nemi gidermek için kullanılan filtreleri içerir. Bu tür filtrelerin önemli özellikleri filtrasyon hassasiyeti, yüksek parçacık tutma, temizlik, mekanik özelliği, aşınma dayanımı ve maliyetlerdir (Banhart, 2001).

3.2.3 Biyomedikal Endüstrisi

Titanyum veya kobalt-krom alaşımları biyouyumludur ve bu nedenle protezlerde kullanılabilir. Metal köpükler mükemmel yoğunluk dağılımı ile istenilen ölçülerde şekillendirilmeyi sağlar (Banhart, 2001).

3.2.4 Katalizör Destekleri

Aslında bir katalizörün verimliliği büyük ölçüde katalizör ile reaksiyona giren sıvı veya gaz arasında geniş bir yüzeyin bulunmasına bağlıdır. Öncelikle katalizörün gözenekli yapıya sahip olması gerekir ve bu mümkün değilse gözenekli seramik gibi sistemler düşünülmelidir. Seramik oldukça esnek ve termal olarak iletken olmasına rağmen, bu malzemeler gözenekli metallerle değiştirilebilir (Banhart, 2001).

3.2.5 Akışkan Depolama ve Transferi

Toz metalürjisinde gözenekli maddelerin ilk uygulamalardan biri, yağın parçacıkların gözeneklerinde biriktiği ve atık yağın kademeli olarak serbest bırakılmasıyla yer değiştirdiği kendinden yağlamadır. Bu kullanım sadece yağ ile sınırlanmamaktadır. Su da kademeli olarak serbest bırakılır ve böylece otomatik nem kontrolü için kullanılabilir. Kokular depolanıp ve kademeli olarak buharlaştırılabilir. Gözenekli nozullar yüzeydeki suyu ve yapıştırıcıyı hapsedip dağıtabilir. Sıvıların kılcal transferi sadece nozüle basılarak sağlanabilir. Son olarak, aşırı düşük sıcaklıklar gerektiğinde sıvıları sabit, tek tip bir sıcaklıkta tutmak için açık gözenekli metal bir yapı kullanılabilir. Ayrıca köpük, kısmen dolu tanklarda gereksiz hareketi azaltır (M. F. , Ashby vd., 2000).

3.2.6 Akışkanların Yönetimi

Gözenekli malzemeler sıvıların ve gazların akışını kontrol etmek için kullanılır. Köpük metaller rüzgar tünellerinde akış düzenleyici ve vanalarda akış yönlendirici olarak kullanılır (Banhart, 2001).

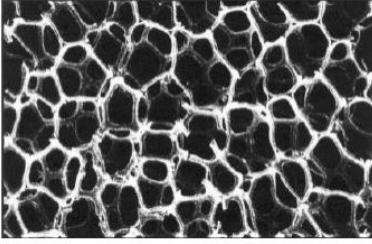
3.2.7 Püskürtücüler

Bazı durumlarda sıvının içine eşit ve sabit bir oranda gaz verilmesi gerekir. Alkolsüz içeceklerin karbondiyoksit gazı buna bir örnektir. Bu süreç, yeterince küçük gaz kabarcıkları üretebilen ve ısı, darbeye ve korozyona dayanıklılık gibi kriterleri karşılayan

gözenekli bileşenler gerektirmektedir. Metalik köpükler, gözenekli seramiklerden daha uygun bir seçenek olabilmektedir (Banhart, 2001).

3.2.8 Akü Elektrotları

Kurşun köpük, kurşun-asit akülerdeki etkin maddeler için taşıyıcı bir malzeme görevi üstlenebilir ve çok hafif elektrotlar üretmek için geleneksel kurşun kafeslerin yerini alabilir. (Şekil 3.20) (Banhart, 2001).



Şekil 3.20 Nikel köpük, NiMeH ve NiCd pillerde pozitif elektrot olarak kullanılır.

3.2.9 Alev Geciktiriciler:

Yüksek iletkenlikli hücre duvarı malzemelerine sahip gözenekli metaller yanıcı gazların alev yayılımını durdurmak için kullanılabilir. Bazı alev geciktirici açık hücreli köpükler 500 m/s veya daha yüksek hızlarda ilerleyen alevleri durdurabilir (Banhart, 2001).

3.2.10 Elektrokimyasal Uygulamalar

Nikel köpük, elektrokimyasal reaksiyonlarda elektrot malzemesi olarak kullanılır. Filtre pres elektrotları, yalıtılmış metal plakalardan oluşan bir katmandan oluşur. Metal plakalar, türbülansı önlemek için plastik kafes ve yalıtım folyosu ile birbirinden ayrılmıştır. Gözenekler, açık gözenekli bir nikel malzeme tabakası ile değiştirilir.

Bu, türbülans için desteği korurken elektrotların yüzey alanını artırır. Bu, daha kompakt bir reaktör tasarımına olanak sağlar (Banhart, 2001).

3.2.11 Dekoratif ve sanatsal amaçlar için hücre malzemeler

Metalik köpükler tasarımcıların hayal gücünü yakalayan yeni bir üründür ve kullanımları giderek yaygınlaşmaktadır. Sanatsal veya estetik kullanımlar, yalnızca geleneksel malzemelerden farklı dokunsal ve görsel efektler yaratmayı amaçlamaktadır (Şekil 3.22). Gümüş ve altın bazlı köpük malzemeler mücevher endüstrisine hafif ve görsel olarak çekici yeni olanaklar sunmaktadır. Polistiren köpük içinde alüminyum, yüksek kaliteli

lambalar, saatler ve mobilyalar üretmek için kullanılmaktadır (Şekil 3.21 ve 3.23). Köpüklü alüminyumdan yapılan masa ve sandalyeler büyük ölçüde geliştirilmiş mekanik özelliklere sahiptir. Alüminyum köpük ayrıca üst düzey ses sistemlerinin üretiminde de kullanılmaktadır. Geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında köpük sadece daha yüksek mukavemete ve daha iyi mekanik yastıklama özelliklerine sahip olmakla kalmaz, aynı zamanda teknolojik olarak gelişmiş, yenilikçi ve estetik açıdan hoş bir malzemedir (Banhart, 2001).



Şekil 3.21 Köpük metal masa ve sandalyeler



Şekil 3.22 Tasarım ürünleri



Şekil 3.23 Dekor uygulamaları.

4. EZİLEBİLİR KÖPÜK METAL İÇİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

4.1 Sonlu elemanlar Metodu

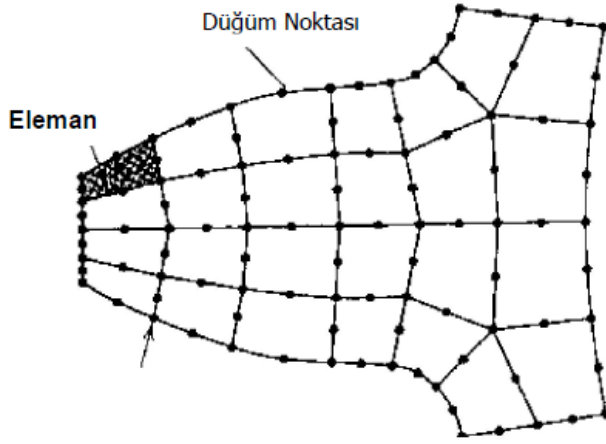
Sonlu elemanlar yöntemi mühendisler ve bilim insanları girişimiyle önerilmiş ve geliştirilmiştir. Yöntem ilk kez gerilme analizi problemlerinde kullanılmıştır. Bütün bu çalışmalarda bir boyut aralığının hesaplanması gerekmektedir. Gerilme analizlerinde söz konusu değer yer değiştirme ya da gerilme alanı, termal analizlerde sıcaklık alanı ya da ısı akısı, akışkan problemlerinde ise akış fonksiyonu ya da potansiyel hız fonksiyonudur (B.NATH & Çeviren: Doç Durmuş GÜN, 1993).

Sonlu parametreler yönteminde, tüm yapı ve performans önceden belirlenen birçok elemana ayrılır. Şekil 4.1'da gösterilenler gibi elemanlara " nod " olarak adlandırılırlar ve nokta nokta yeniden birleştirilirler. Böylece bir denklem sistemi elde edilir.(Kohnke, 1999). Gerilme analizinde, bu denklemler nodlardaki dengeyi tespit etmek için kullanılır. Elde edilen denklem, yapılan işe bağlı olarak çok sayıda hatta binlerce olabilir. Bu denklem sisteminin çözülmesi bir bilgisayar gereklidir.

Sonlu elemanlar yönteminin temel fikri, sürekli fonksiyonları yerel sürekli fonksiyonlarla (genellikle polinomlar) temsil etmektir. Bu, hesaplanacak bir değişkenin (örneğin bir ofset) bir eleman içindeki değerinin, bu elemanın düğüm noktalarındaki değerlerle enterpolasyon yoluyla bulunacağı anlamına gelir. Sonlu elemanlar yönteminde, bilinmeyen ve aranan değerler bu nedenle düğüm noktalarındaki değerlerdir. Belirli bir prensip (örneğin minimum enerji prensibi) uygulanarak, düğüm noktalarındaki boyutsal alan değerleri için bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemini matris formunda gösterimi;

$$[K] \cdot [D] = [R]$$

Burada [D] düğümlerdeki boyutsal alanın bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde [K] rijitlik matrisi olarak adlandırılır.



Şekil 4.1 Eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

4.2 Ezilebilen Köpük Modeli

Ezilebilir köpük malzemeler, tipik olarak metal veya polimerden yapılmış katı hücrelerdir. Küçük bir elastik aralığa sahiptirler ve ardından hücre duvarlarında ve köşelerindeki burkulma ve deformasyon tarafından yönetilen doğrusal olmayan kalıcı deformasyona sahiptirler. Yaygın uygulamalar arasında enerji emiliminin önemli olduğu genişletilmiş polistiren gibi ambalaj malzemeleri ve yüksek sertlik-ağırlık oranının gerekli olduğu köpük çekirdekli sandviç paneller yer alır.

Deshpande ve Fleck'in ilk çalışmasına dayanan model, ezilebilir köpük malzemelerin monotonik akma, pekleşme evrimi ve elastik olarak boşalmasını ele alır. Yüksek hızlı yükleme, büyük deformasyonlar veya döngüsel yükleme gibi monotonik olmayan akma davranışı için muhtemelen uygun değildir (Deshpande & Fleck, 2000).

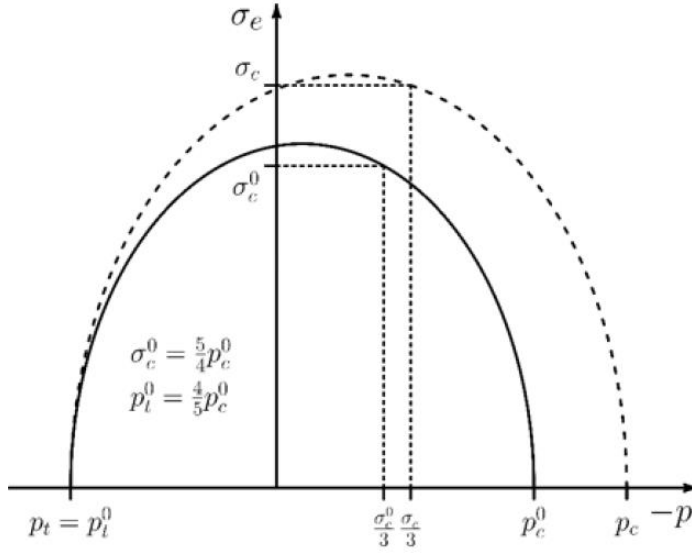
Ezilebilir köpüklerin akma davranışı hem deviatorik hem de hidrostatik yüklemeye bağlıdır. Şekil 4.23: Ezilebilir Köpük Akma Yüzeyi'nde (s. 84) gösterilen akma fonksiyonu şöyledir:

$$f(\sigma, \sigma_c, p_c) = \sqrt{\sigma_e^2 + \alpha^2 (p - \bar{p})^2} - Y_s$$

Burada σ_c ve p_c gelişen tek eksenli ve mutlak hidrostatik basınç akma değerleridir ve von Mises efektif gerilme ve hidrostatik basınçtır:

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2} s:s \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$p = \frac{1}{3} \text{trace}(\sigma)$$



Şekil 4.2 Ezilebilir Köpük Akma Yüzeyi

Türetilen malzeme parametreleri şekil faktörü, akma yüzeyinin hidrostatik merkezi ve maksimum kesme değeridir. Bunlar ilk tek eksenli akma gerilmesi, ilk mutlak hidrostatik sıkıştırma akma gerilmesi ve hidrostatik çekme akma gerilmesi için giriş parametrelerinden türetilir. Akma gerilmesi oranlarının tanımlanması,

$$k_t = \frac{p_t}{p_c^0}$$

$$k_c = \frac{\sigma_c^0}{p_c^0}$$

türetilen malzeme parametreleri şu şekilde verilir:

$$\alpha = \frac{3k_c}{\sqrt{(3k_t + k_c)(3 - k_c)}}$$

$$\bar{p} = \frac{p_c - p_t}{2}$$

$$Y_s = \alpha \frac{p_c + p_t}{2}$$

Tek eksenli akma gerilmesi σ_c , plastik gerilmenin κ_c eşdeğer bir fonksiyonu olarak değişir:

$$\sigma_c = \Omega(\kappa_c) \sigma_c^0$$

burada Ω kullanıcı tanımlı multilineer bir pekleşme fonksiyonudur.

Akma yüzeyi öyle bir şekilde pekleşir ki, hem hidrostatik gerilme akması p_t hem de akma yüzeyi elipsinin α en boy oranı pekleşme sırasında sabit kalır. Bu dönüşüm, tek eksenli akma gerilmesi pekleşmesinin bir fonksiyonu olarak mutlak hidrostatik sıkıştırma akmasının pekleşmesini verir:

$$p_c = \frac{\sigma_c \left(\sigma_c \left(\frac{1}{\alpha^2} + \frac{1}{9} \right) + \frac{p_t}{3} \right)}{p_t + \frac{\sigma_c}{3}}$$

Eşdeğer plastik gerilmenin κ_c gelişimi seçilen iki yöntemden birini izler. Değişim, akış potansiyeline veya tek eksenli akma gerilmesine bağlı olan iş oranına dayanır. (s. 86):

$$\dot{\kappa}_c = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sigma \dot{\epsilon}_{pl}}{Q}$$

$$\dot{\kappa}_c = \frac{\sigma \dot{\epsilon}_{pl}}{\sigma_c}$$

Burada plastik şekil değiştirme oranı $\dot{\epsilon}_{pl}$ ve akış potansiyelidir Q :

$$Q = \sqrt{\sigma_e + \beta^2 p^2}$$

Burada β , aşağıdaki gibi plastik Poisson oranının ν^{pl} bir fonksiyonu olan bir şekil faktörüdür:

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - 2\nu^{pl}}{1 + \nu^{pl}}}$$

Bu ilişkilendirilmemiş akış potansiyeli, simetrik olmayan bir malzeme sertlik matrisi ile sonuçlanır.

Ezilebilir Köpük Malzeme Modelinin Tanımlanması

İzotropik veya anizotropik elastik davranışı tanımlayın (MP veya TB, ELASTİK). Ezilebilir köpüğün akma veri tablosunu (TB,CFOAM,,,AKMA) girin ve aşağıdaki sabitleri girin:

Sabit	Anlam	Özellik
C1	σ_c^0	Tek Eksenli Sıkıştırma Akması
C2	p_c^0	Hidrostatik Sıkıştırma Akması
C3	p_t	Hidrostatik gerilme Akması

Akma gerilmesi yandaki değerleri sağlamalıdır. $\sigma_c^0 > 0, p_c^0 > 0, p_t > 0$, ve $p_c^0 > \sigma_c^0 / 3$.

Tek eksenli sıkıştırma akması pekleşmesini tanımlamak için, çok doğrusal bir pekleşme verisi başlatın tablosunu (TB,CFOAM,,,MHARD) açın ve aşağıdaki veri çiftlerini tanımlayın:

Sabit	Anlam	Özellik
X	κ_c	Plastik şekil değiştirme değeri
Y	Ω	Bağıl stres değeri

$\kappa_c = 0$ 'de bağıl gerilme değeri $\Omega = 1$ 'den başlamalı ve monoton olarak artmalıdır. (Azalan bağıl gerilme değerleri malzemede yumuşama davranışı gösterir ve yakınsama zorluğuna yol açabilir.)

Pekleşme tipi, aşağıdaki girdileri içeren bir veri tablosu (TB,CFOAM,,,HTYPE) aracılığıyla belirtilir:

Sabit	Anlam	Özellik
C1	κ_c	Sertleştirme tipi

C1 = 0 (varsayılan), eşdeğer plastik gerininin, plastik potansiyele eşlenik işe dayalı olarak değiştiğini belirtir. C1 = 1, eşdeğer plastik gerininin, tek eksenli sıkıştırma akma gerilmesine eşlenik işe dayalı olarak değiştiğini belirtir.

Plastik potansiyel şekil; aşağıdaki bilgileri içeren bir veri tablosuna (TB,CFOAM,,,PPR) girilen plastik Poisson oranı ile belirlenir:

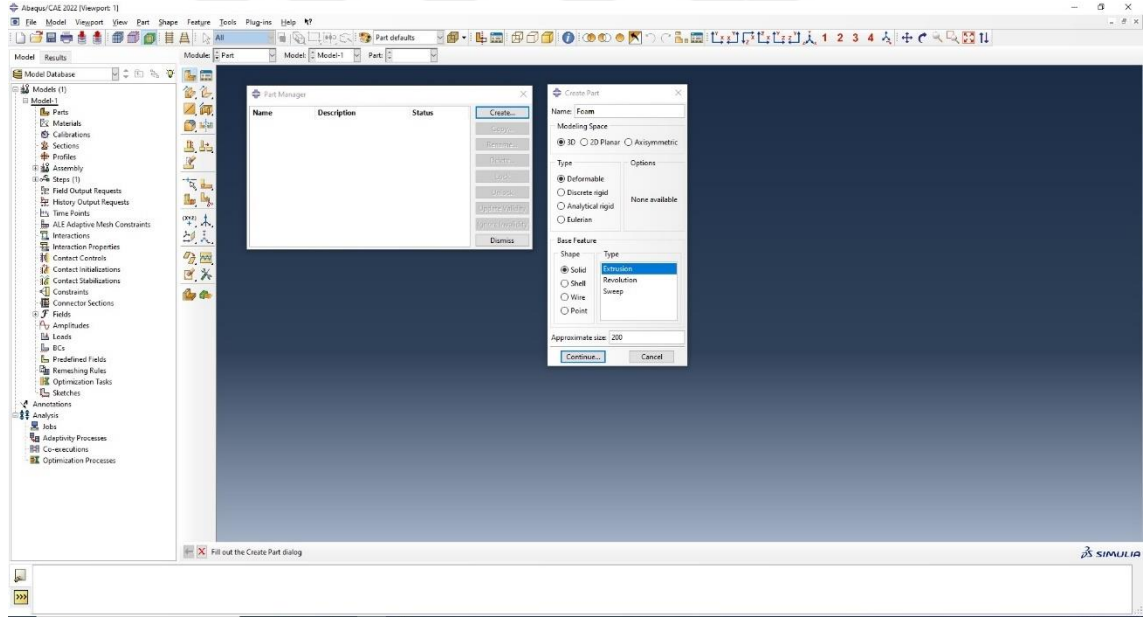
Sabit	Anlam	Özellik
C1	ν^{pl}	Plastik Poisson oranı

Plastik Poisson oranı için geçerli aralık $-1 < \nu^{pl} < 0.5$. di

5. ALUMİNYUM EZİLEBİLİR KÖPÜĞÜN BASMA DAYANIMININ İNCELENMESİ

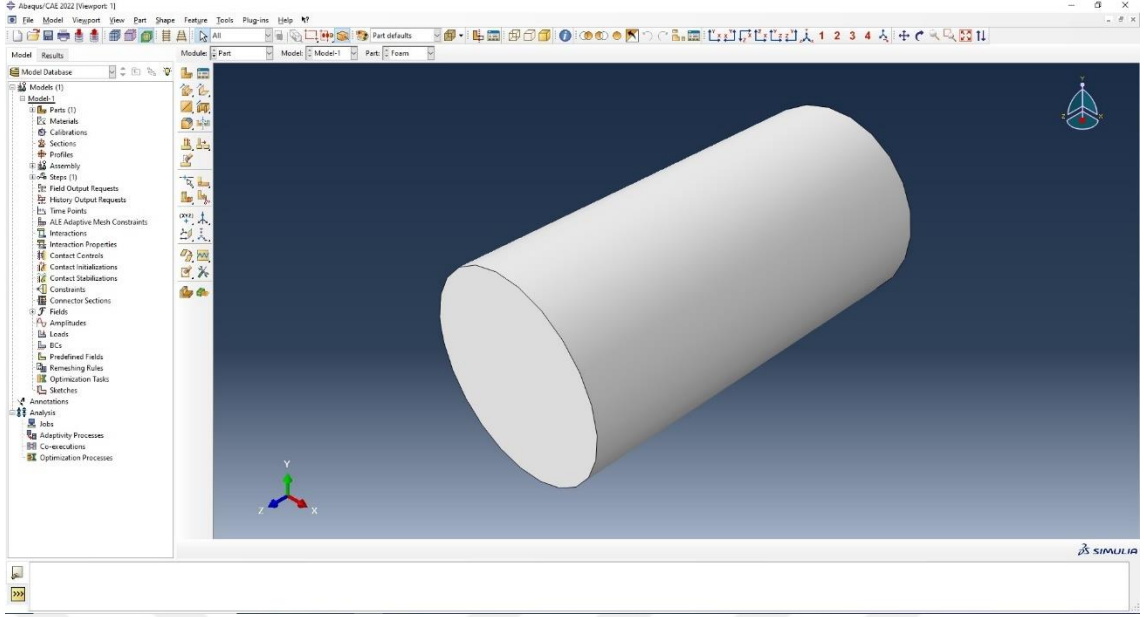
5.1 MODELLEME

Ezilebilir alüminyum köpüğün farklı yükleme hızlarındaki basma yüküne karşı gösterdiği mekanik davranışını anlamak için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Malzemenin köpük malzeme olması nedeniyle bir önceki bölümde anlatılan ezilebilir köpük (crushable foam) modeli kullanılmıştır. Numunenin modellemesinde ve analizinde Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu programda yarı statik (quasi-static) analiz ve zamana bağlı açık (explicit) analiz yapılabilmektedir. Bu sayede ezilebilir alüminyum köpük malzemenin farklı yükleme hızlarındaki davranışları analiz edilmiştir. Numunenin modellemesinden analiz aşamalarına kadar Abaqus programında yapılan işlemler sırasıyla açıklanacaktır.



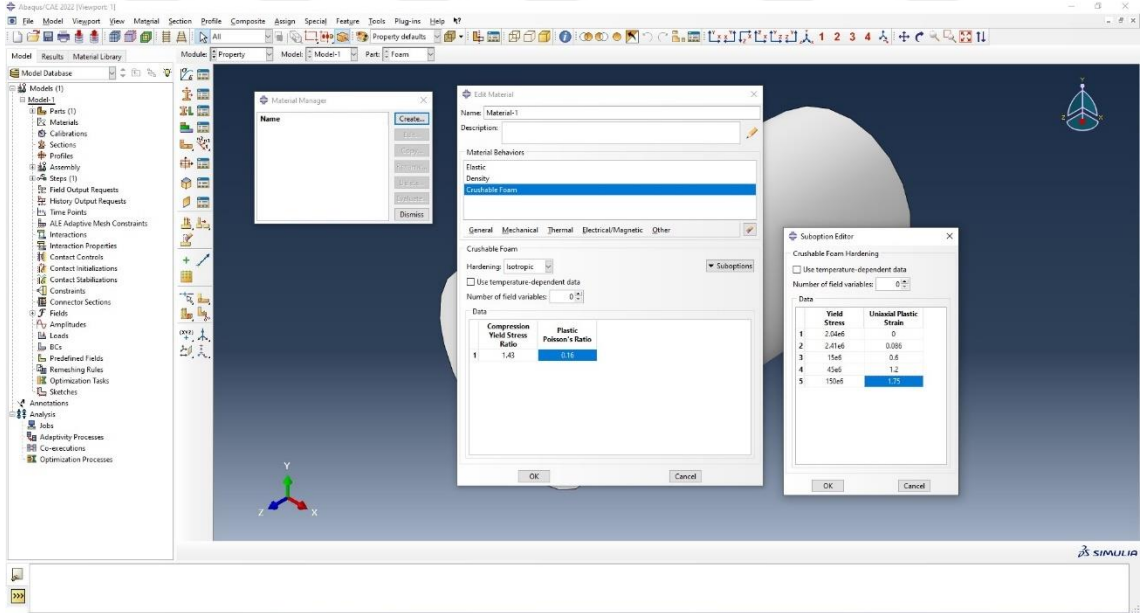
Şekil 5.1 Parça oluşturma

Modelleme işlemi parça oluşturma (Create Part) ile başlanmaktadır. Burada parçanın deforme edilebilir ve katı (solid) olmasına dikkat edilir (Bkz. Şekil 8.1).



Şekil 5.2 Silindir numunenin oluşturulması

Parça oluşturma sekmesi ile parçamızı oluşturacak geometrinin çizimi yapılır. Çizim kısmından iki nokta (merkez – dış nokta) ile bir çember ($r=0.05$ m) oluşturulur ve onayla birlikte çemberin ne kadar uzatılacağı bilgisi ($h=0.2$ m) girilir. Bu sayede bir silindir numune elde edilir (Bkz. Şekil 5.2).

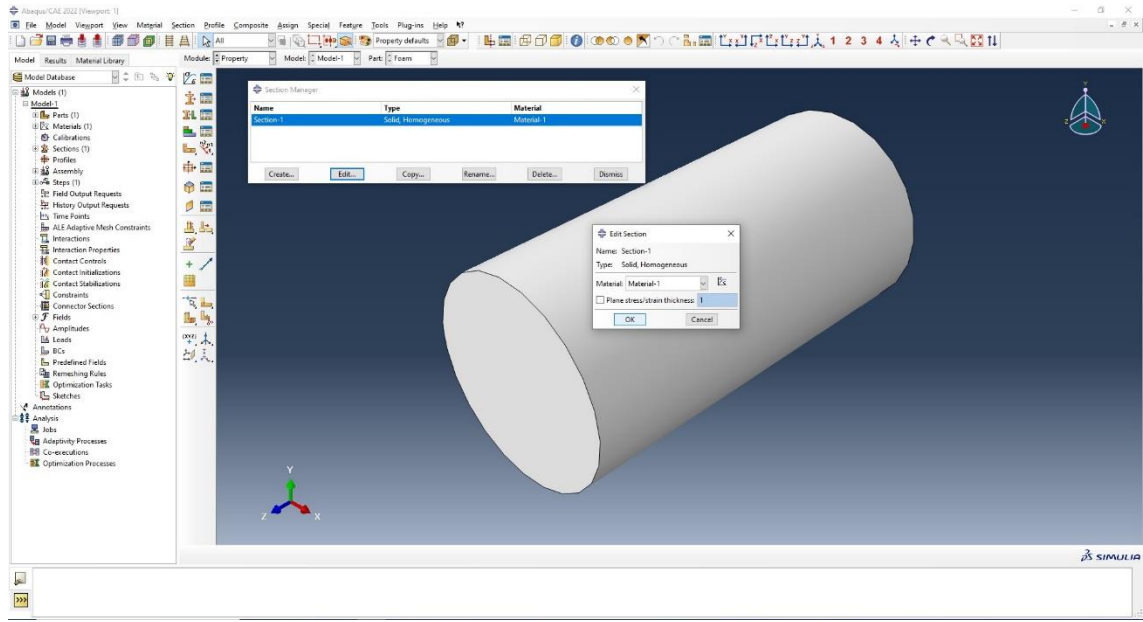


Şekil 5.3 Malzeme özelliklerinin girilmesi

Module kısmından malzeme özelliklerinin girildiği “property” kısmı seçilerek, malzeme özelliklerinin girildiği sekmeye ulaşılır. Burada malzemenin sırasıyla elastik özellikleri, yoğunluğu ve plastik (crushable foam) özellikleri girilir (Bkz. Şekil 5.3).

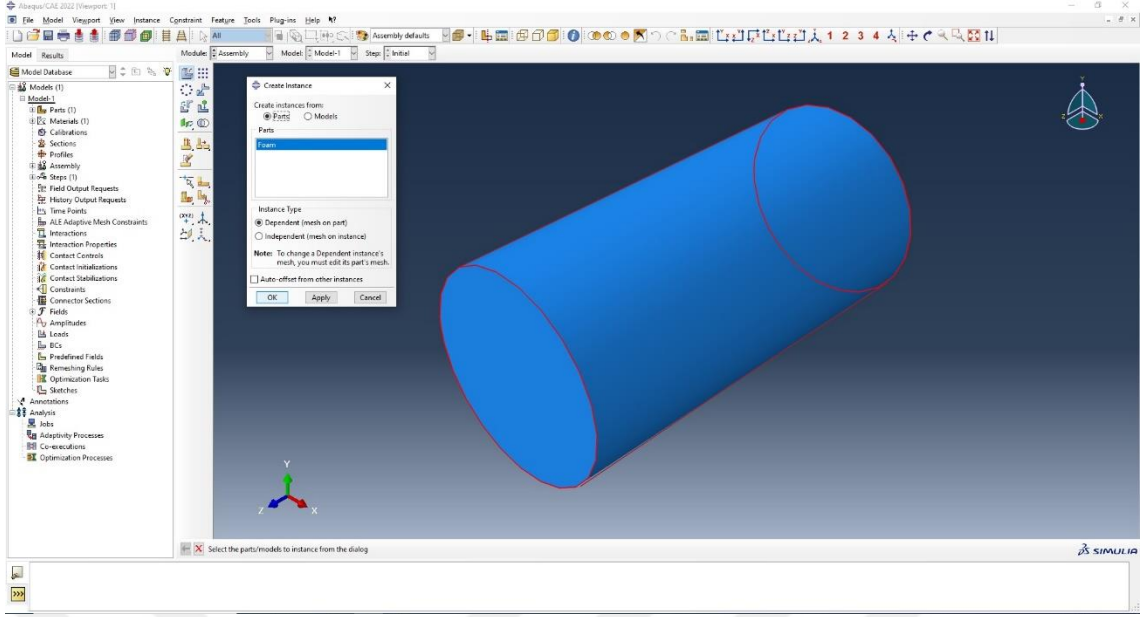
Tablo 5.1 Malzeme bilgisi

Material	Elastic			Plastic		
	Density (kg/m ³)	Moduls (MPa)	Poissons's ratio	Yield stress (MPa)	Stress (MPa)	Strain
Alum foam	500	202	0	2,04	2,41	0,086
					15,0	0,600
	Abaqus Parameters				45,0	1,200
	k	1,43				
	Vpl	0,16				



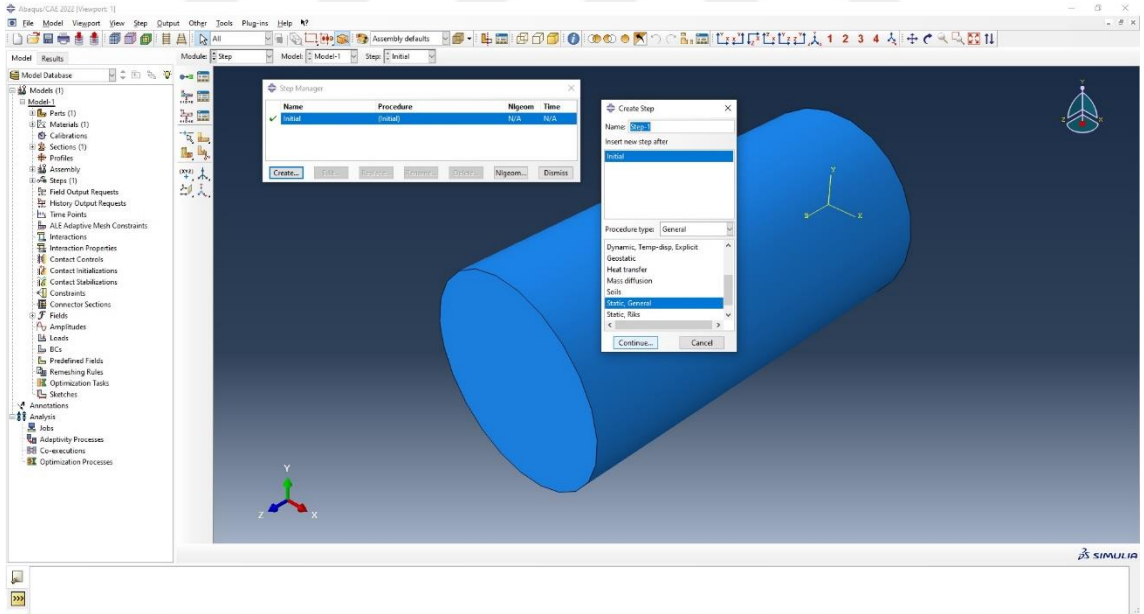
Şekil 5.4 Malzeme özelliklerinin numune ile ilişkilendirilmesi

Malzeme özelliklerinin girilmesinden sonra bu malzeme özellikleri ile daha önceden çizdiğimiz numune parçasını sırasıyla “create section” ve “assign section” komutları ile birbiri ile ilişkilendiriyoruz (Bkz. Şekil 5.4).



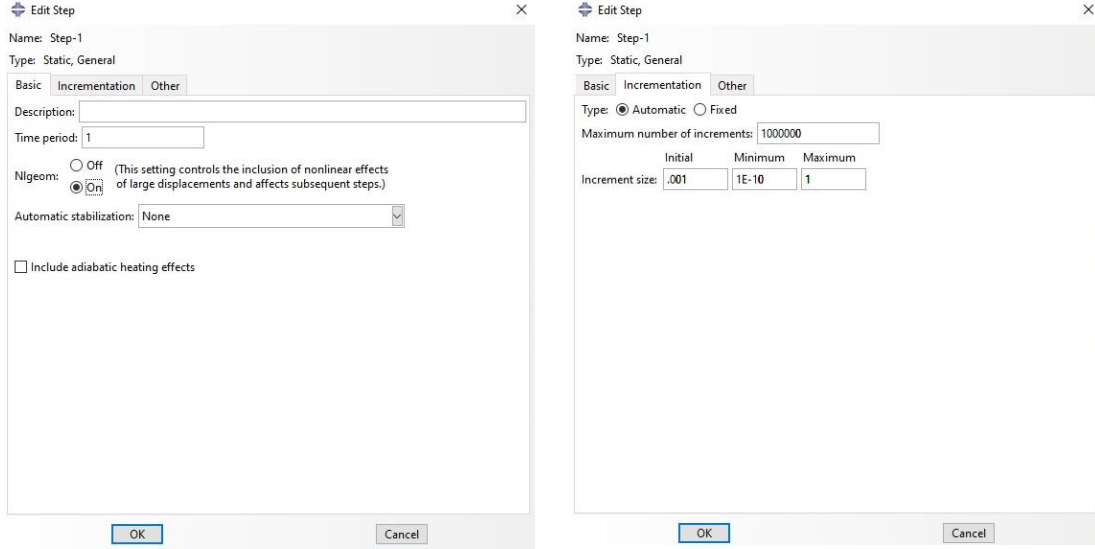
Şekil 5.5 Birleştirme “Assembly” kısmı

Abaqus’te yapılan analizlerin genelde birden fazla parçadan oluştuğu için bu parçalar bu modül kısmında birleştirilir. Analizimiz tek parça numuneden oluştuğu için parça seçilerek bu kısım geçilir (Bkz. Şekil 5.5).



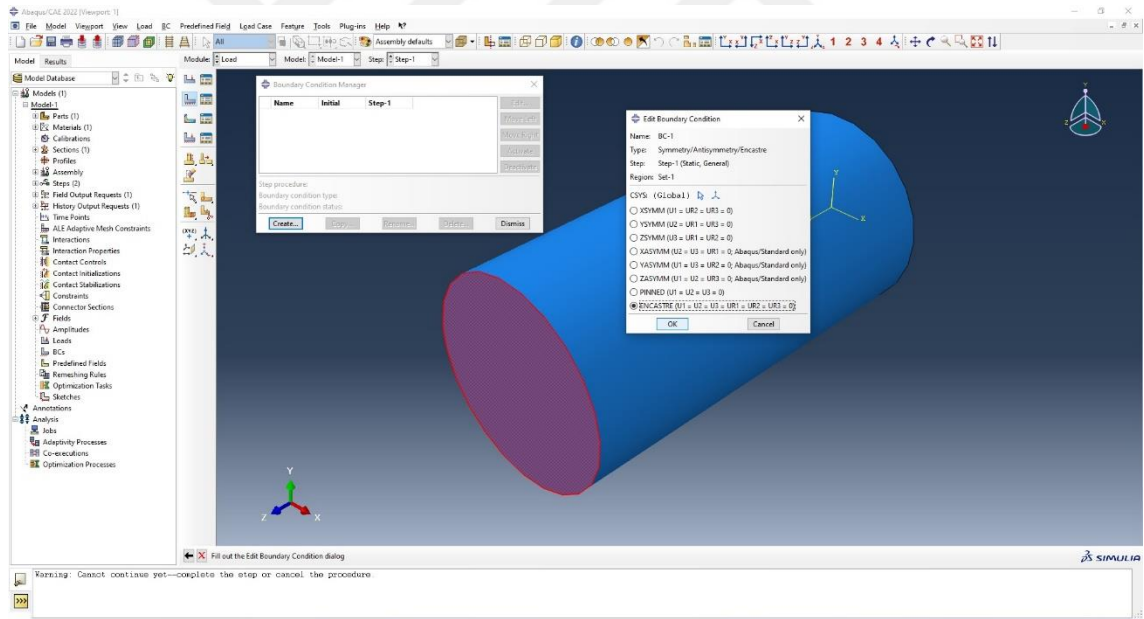
Şekil 5.6 Yükleme çeşidinin seçimi

Modül kısmından “step” kısmına gelindiğinde yarı statik (quasi-static) analiz yapmak için “static general” kısmı seçilir (Bkz Şekil 5.6).



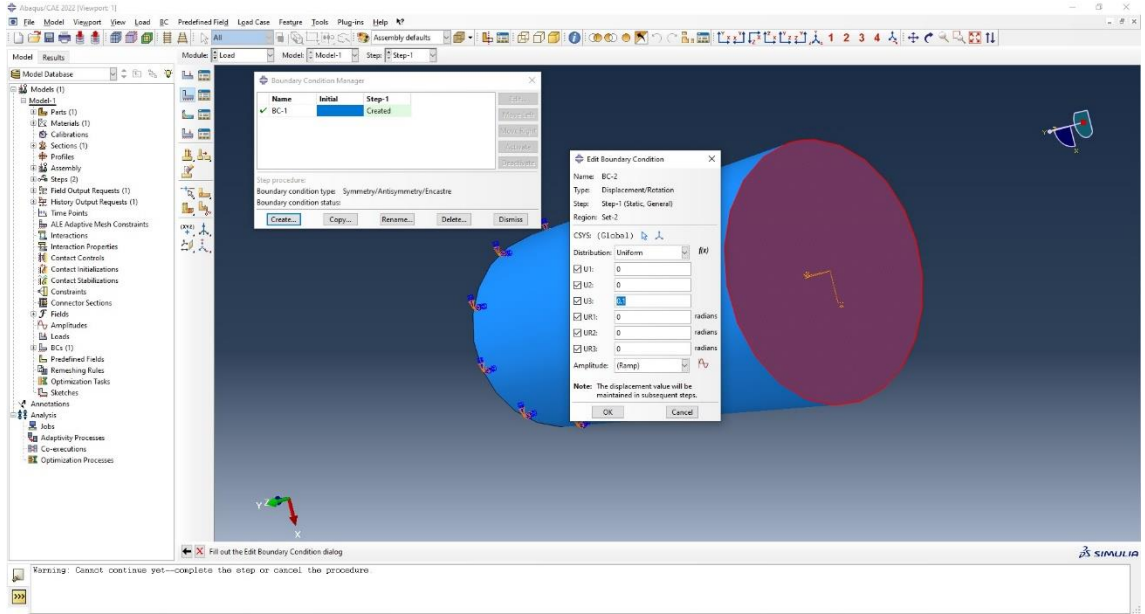
Şekil 5.7 Yükleme seçenekleri

Daha sonra çıkan menüden geometrik nonlineerite açık konumuna getirilir ve ilk yükleme, adım sayısı ifadeleri Şekil 5.7’deki gibi girilir.



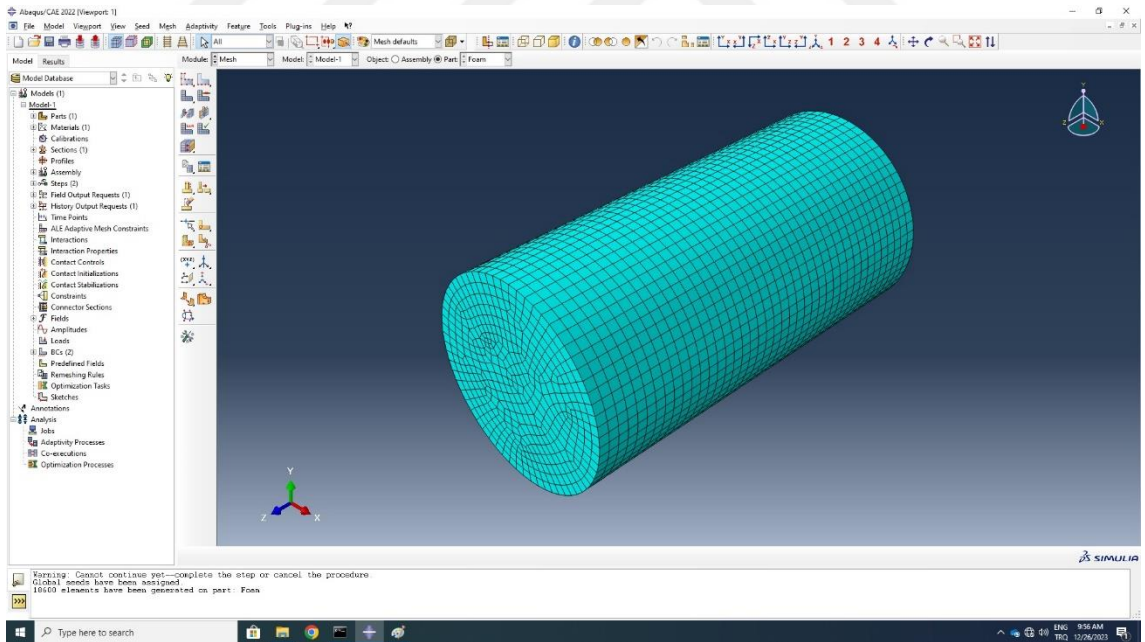
Şekil 5.8 Sınır şartlarının tanımlanması

Yükleme (Load) modülünden silindirin bir ucu ankastre seçilerek tüm deplasmanlar ve dönmeler sıfırlanır (Bkz Şekil 5.8).



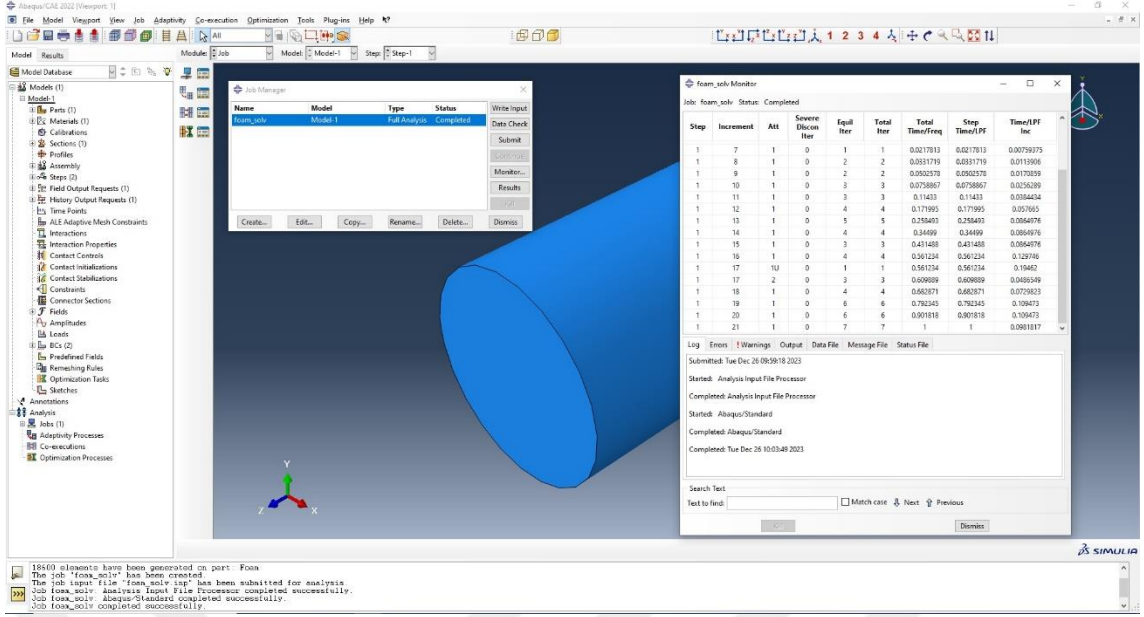
Şekil 5.9 Z-Yönünde Deplasman Tanımlanması

Yüklem (Load) modülünden silindirin diğer ucu seçilerek z-yönü dışındaki tüm deplasmanlar ve dönmeler sıfırlanır (Bkz Şekil 5.9). Sadece z-ekseni doğrultusunda 0.1 m yer değiştirme verilir.



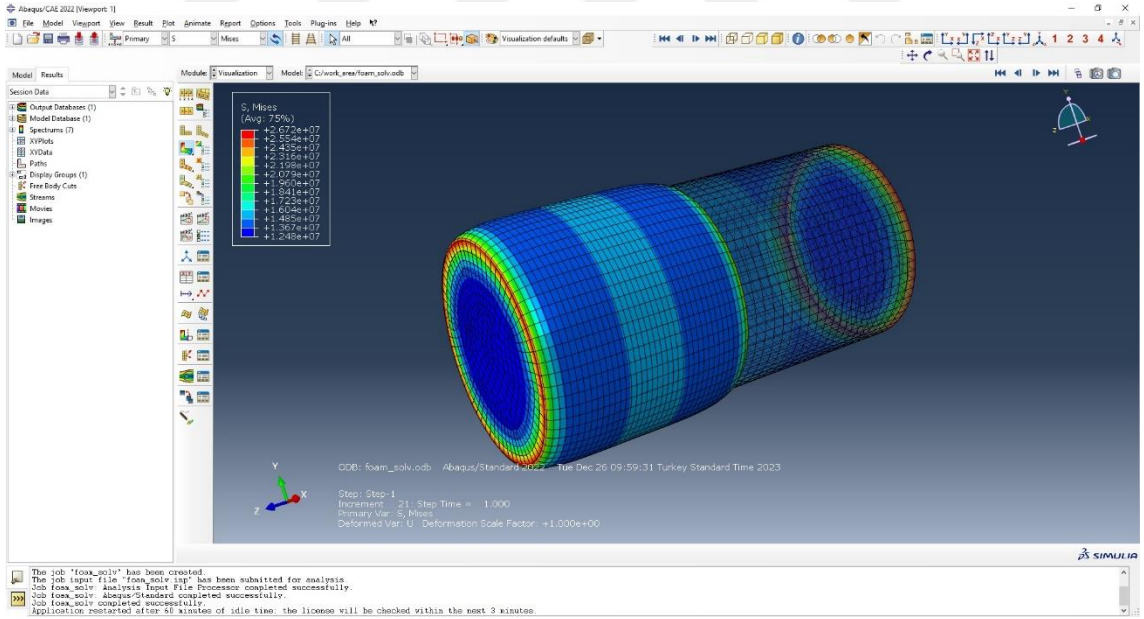
Şekil 5.10 Ağ yapısının örülmesi

“Mesh” modülü kullanılarak C3D8R eleman tipi ile numune parçamıza ağ örülür (mesh yapılır) (Bkz Şekil 5.10). Burada eleman boyutu 0.005 ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 5.11 Analizin verilmesi

Çözümün yapılması için iş (job) tanımlanarak, iş submit edilir. Monitör kısmından çözüm esnasındaki adımlar, yakınsama parametreleri, hatalar ve uyarılar takip edilebilir (Bkz Şekil 5.11).

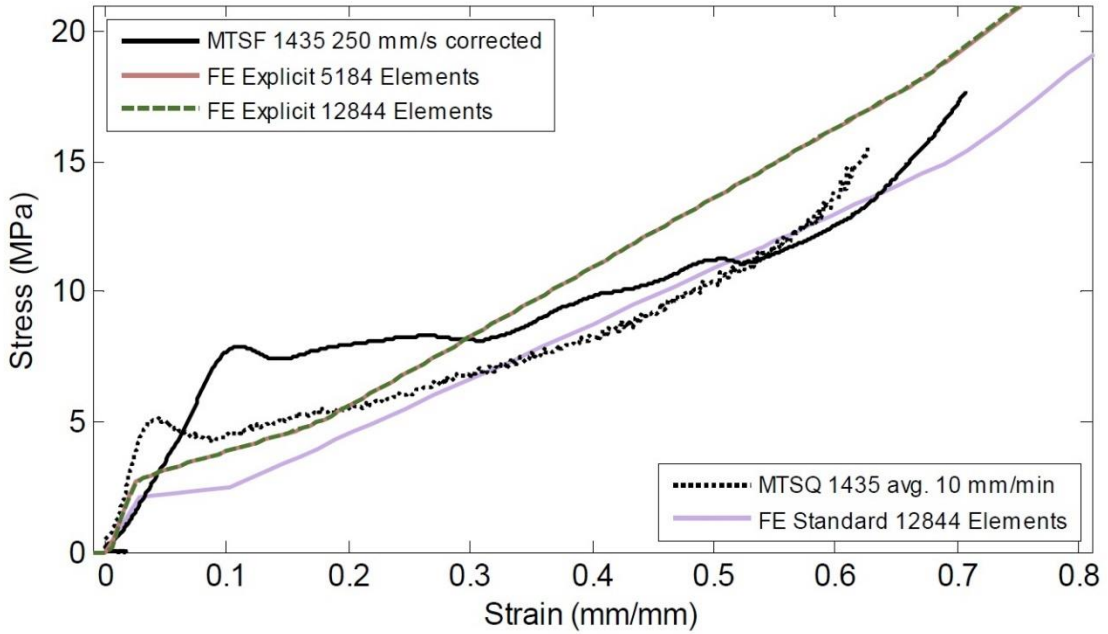


Şekil 5.12 Sonuçların alınması

Çözümün yapılmasından sonra “Visualization” modülünden submit edilen analizin tüm çıktıları görülebilir (Bkz Şekil 5.12).

5.2 DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışmasında ezilebilir alüminyum köpük malzemenin basma yükü altındaki mukavemet davranışı incelenmiştir. Ezilebilir alüminyum köpük malzemenin, malzeme sabitleri için literatür taraması yapılmıştır. Burada; malzemenin izotropik pekleşme yaptığı varsayımı kullanılmıştır. (Kaczyński vd., 2020) Bu varsayıma göre çıkarılan malzeme sabitlerine Tablo 5.1’de yer verilmiştir. (Kaczyński vd., 2020) Bu bağlamda yapılan deneysel çalışmalar ile nümerik çalışmalar sayesinde malzeme modelinin doğruluğu ilgili literatürde (Whisler, 2014) gösterilmiştir.

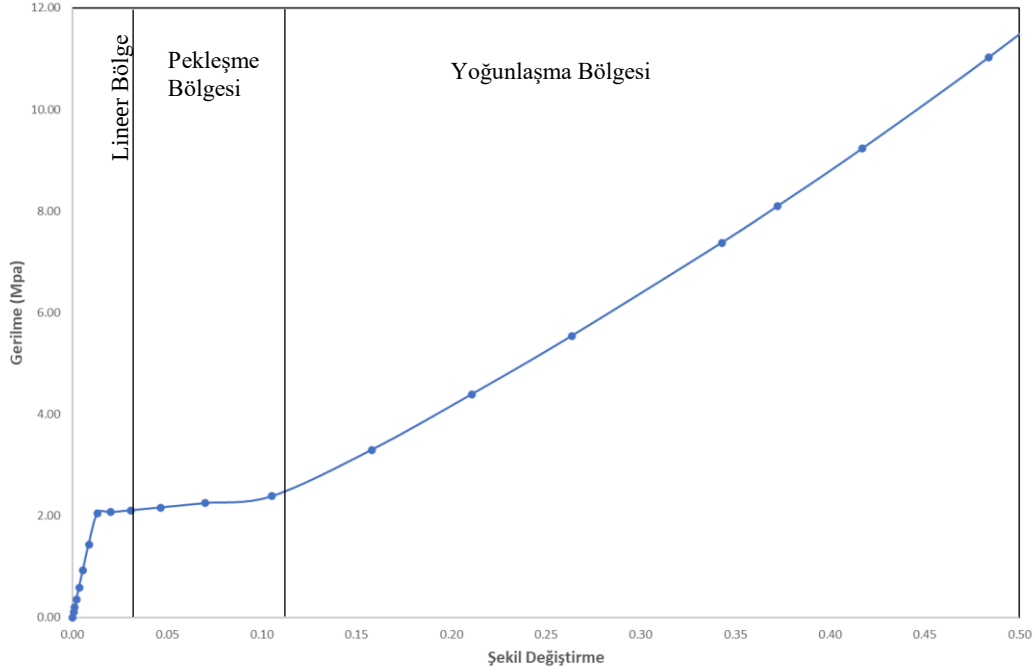


Şekil 5.13 Doğrulama numunesinin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Whisler, 2014).

Şekil 5.13’de alüminyum köpüğün hem yarı statik (quasi-static) hem de zamana bağlı açık (explicit) yükleme altındaki deneysel (MTSQ/MTSF) ve nümerik (FE) karşılaştırılmaları görülmektedir. Sonlu eleman yöntemi ile deneysel sonuçların özellikle pekleşme (hardening) ve yoğunlaşma (densification) kısımlarında birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Her ne kadar elastik lineer bölgede tam bir uyuşma olmasa da, basma numuneleri için daha önemli olan pekleşme bölgesindeki uyum nedeniyle bu malzeme modeli ve sabitleri tezimizde kullanılmıştır.

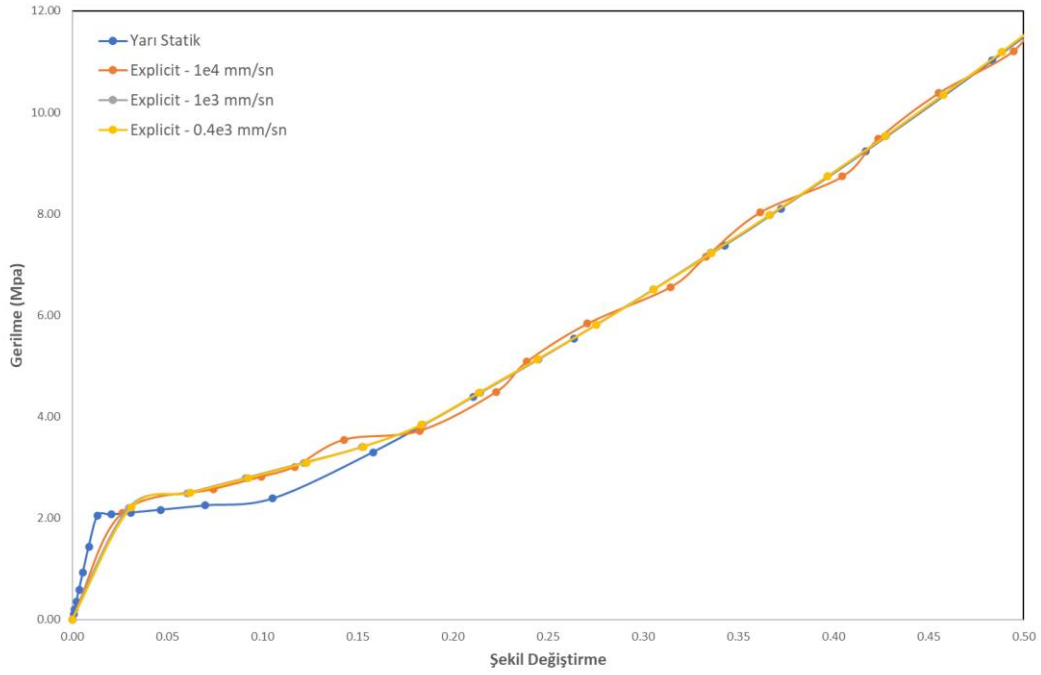
5.3 BASMA ANALİZ SONUÇLARI

Yapılan sonlu elemanlar analizinde belirlenen geometrinin ($r=0.05$ m ve $h=0.2$ m olan silindir) basma yükü altındaki davranışı incelenmiştir. Yapılan analizler ilk önce yarı statik (quasi-static) şeklinde daha sonra ise farklı şekil değiştirme hızları için zamana bağlı açık (explicit) analiz yapılmıştır. Bu analizlere bağlı olarak gerilme – şekil değiştirme grafikleri Şekil 5.14- 5.20 arasında verilmiştir.



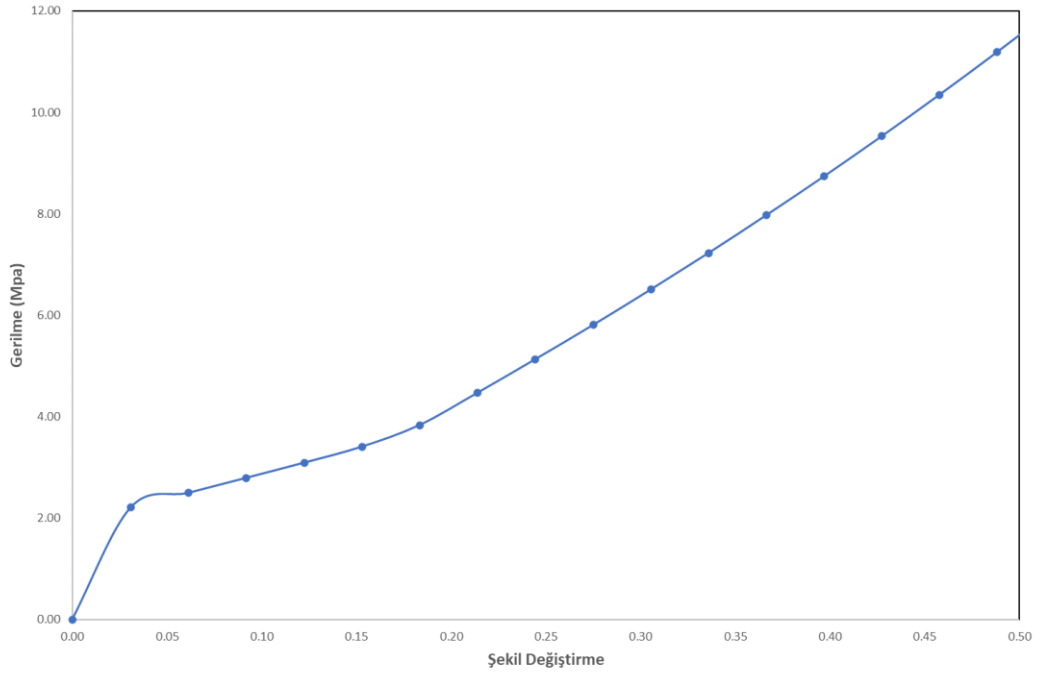
Şekil 5.14 Yarı statik analiz sonucundaki gerilme-şekil değiştirme grafiği

Buna göre verilen gerilme – şekil değiştirme grafiklerinde üç farklı bölge gözlemlenmiştir. Bunlar sırasıyla lineer, pekleşme (hardening) ve yoğunlaşma (densification) kısımlarıdır. Bu kısımlar Şekil 5.14’de açıkça gösterilmiştir.

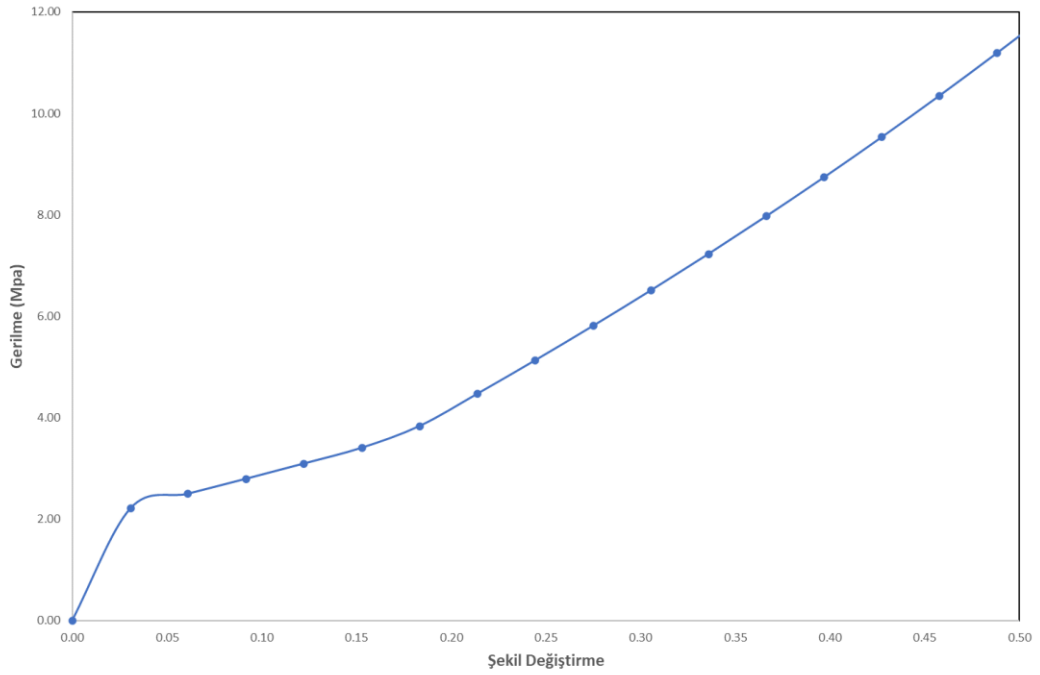


Şekil 5.15 Zamana bağlı açık (explicit) analiz sonucundaki farklı yükleme hızlarındaki gerilme-şekil değişirme grafikleri

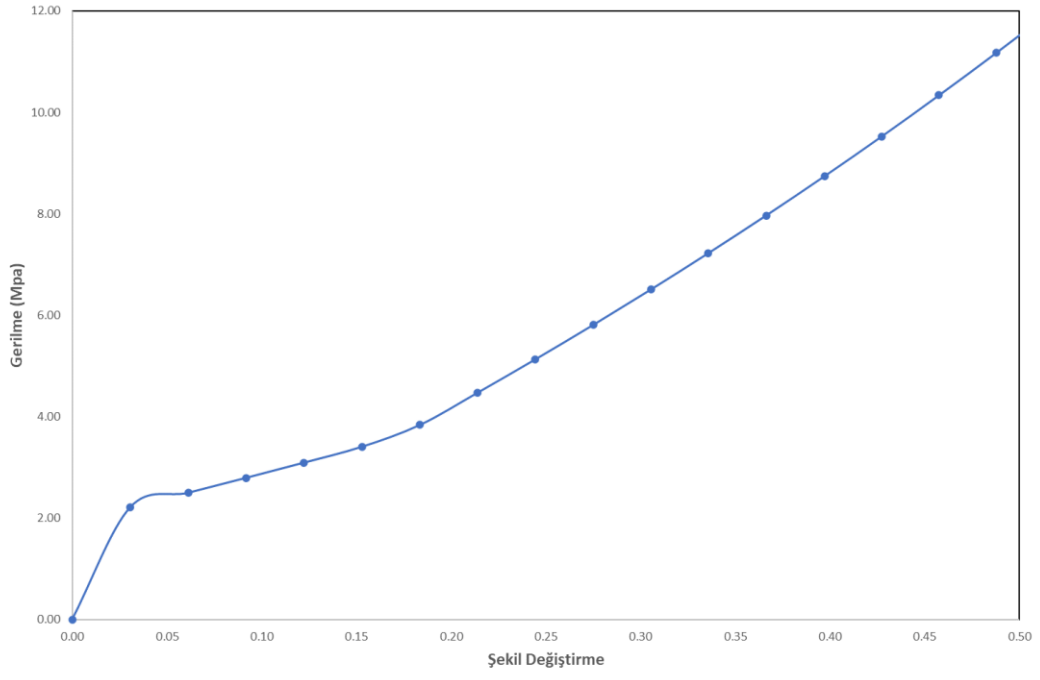
Ayrıca şekil değişirme hızı azaldıkça numunenin davranışı yarı-statik duruma doğru kaydığı görülmüştür. Genel olarak yarı statik ile zamana bağlı analizlerin farklı olduğu alanlar lineer ve pekleşme bölgelerinde gözlemlenmiştir. Şekil değişirme hızı azaldıkça gerilme şekil değişirme eğrisinin lineer bölgede eğimin düştüğü bundan dolayı rezilyansının da düştüğü gözlemlenmiştir. Pekleşme bölgesindeki platonun daha yüksek gerilme değerlerinde seyretmesi her ne kadar tokluğu arttırsa da, genel olarak lineer bölgedeki kayıplardan dolayı malzemenin darbe dayanımında bir değişimin olmayacağı gözlemlenmiştir. Bu da yapının darbe emme özelliğinin iyi olduğu çıkarımını ortaya atmamamıza neden olmuştur.



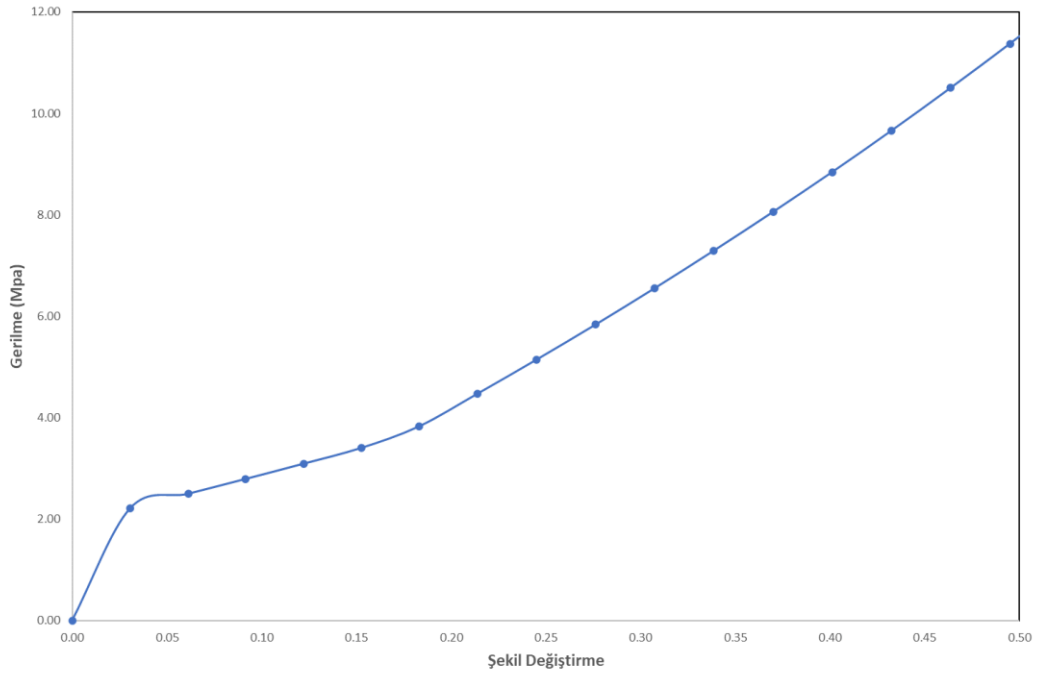
Şekil 5.16 200 mm/sn yükleme hızındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği



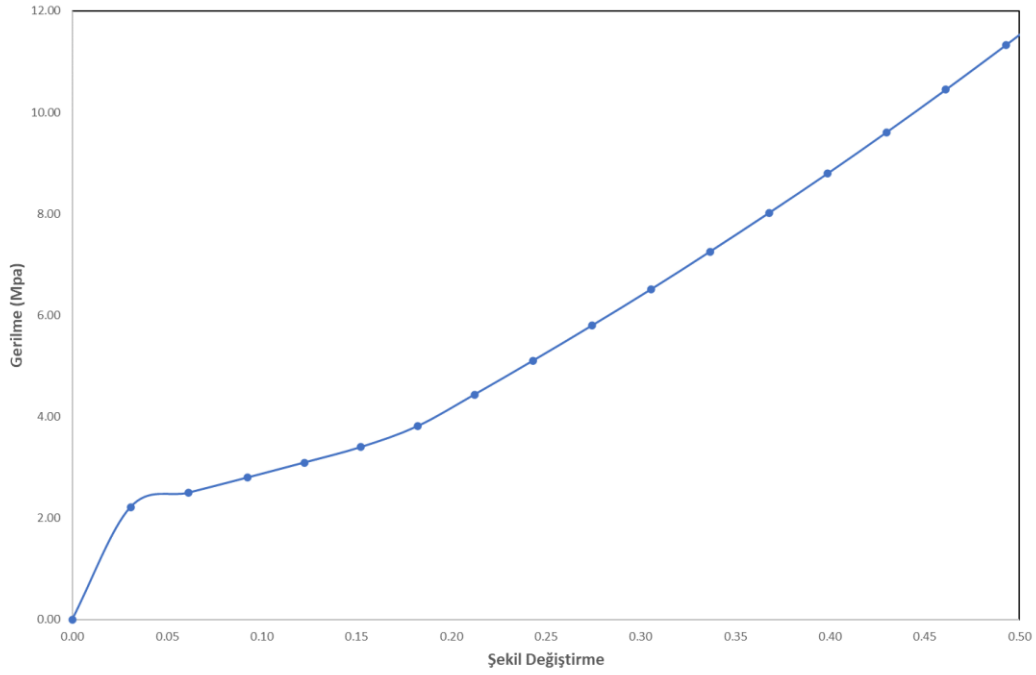
Şekil 5.17 100 mm/sn yükleme hızındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.18 50 mm/sn yükleme hızındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.19 20 mm/sn yükleme hızındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 5.20 10 mm/sn yükleme hızındaki gerilme-şekil değiştirme grafiği

Daha düşük şekil değiştirme hızlarında gerilme şekil değiştirme eğrilerinde fazla bir fark gözlemlenmemiş olup, sürenin artması ile analiz süresinin logaritmik artmasından dolayı 10 mm/sn'den daha yavaş analizler gerçekleştirilmemiştir. 10 mm/sn – 200 mm/sn hızlardaki yüklemelere ilişkin analiz sonuçları Şekil 8.16-8.20 arasında sunulmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, alüminyum metalik köpük malzemelerinin Abaqus sonlu elemanlar programı ve ezilebilir köpük (crushable foam) modeli yardımı ile basma yükü altındaki mekanik özelliklerini araştırmaktadır. Yükleme daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi önce yarı statik (quasi-static) şeklinde daha sonra ise farklı şekil değiştirme hızları için zamana bağlı açık (explicit) analiz yapılmıştır.

Ayrıca analizler sonucunda elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafiklerinde köpük malzemeler için beklenen üç farklı bölge gözlemlenmiştir. Bu bölgeler lineer, pekleşme (hardening) ve yoğunlaşma (densification) kısımları olup, yapının basma yükü altındaki davranışını anlamamızı kolaylaştırmıştır.

Elde edilen sonuçlar ile metal köpük malzemelerin özellikle darbe sönümlemenin ihtiyaç duyulduğu uygulama alanlarının belirlenmesinde yardımcı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma; farklı metal ve metal alaşımlı köpük malzemeler üzerine gelecekte yapılacak araştırmalarda yardımcı bir kaynak olacaktır.

KAYNAKLAR

- Aksekili, İ. (2005). *The Application of Aluminum Foam For The Heat and Noise Reduction in Automobiles*. Izmir Institute of Technology.
- Amjad, S. (2001). *Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams*. [Master dissertation, Wolfson College University of Cambridge]. Campus Repository.
- Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design* (3rd Ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Ashby, M. F. , Evans, A. , Fleck, N., Hutchinson, J. W. , Wadley H.N.G., & Gibson L. J. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*, Elsevier Science.
- Babcsán, N., Leitmeier, D., Degischer, H. P., & Banhart, J. (2004). The Role of Oxidation in Blowing Particle-Stabilised Aluminium Foams. *Advanced Engineering Materials*, 6(6), 421–428.
- Babcsán, N., Moreno, F. G., & Banhart, J. (2007). Metal Foams - High Temperature Colloids: Part II: In Situ Analysis of Metal Foams. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 309(1–3), 254–263.
- Banhart, J. (2000a). Manufacturing Routes For Metallic Foams. *Journals of Materials*, 52(12), 22–27.
- Banhart, J. (2000b). Properties and Applications of Cast Aluminium Sponges. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 188–191.
- Banhart, J. (2001). Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559–632.
- Banhart, J. (2003). Aluminum Foams: on The Road to Real Applications. *Mrs Bulletin*, 28(4), 290–295.
- Banhart, J. (2005). Aluminium Foams For Lighter Vehicles. *International Journal of Vehicle Design*, 37, 114–125.
- Banhart, J. (2023). Erişim: 31 Ocak 2024, <http://www.metalfoam.net/>
- Banhart, J., Ashby, M. F., Fleck, N. A., & Publishing, V. ~ T. (1999). *Metal Foams and Porous Metal Structures*.
- Banhart, J., & Seeliger, H. W. (2008). Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications. In *Advanced Engineering Materials*, 10(9), 793–802.
- Banhart, J., & Weaire, D. (2002). on The Road Again: Metal Foams Find Favor. *Physics Today*, 55(7), 37–42.
- Başer, T. A. (2012). Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51–58.

- Başpınar, M. S., & Yurtcu, Ş. (2011). Metalik Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Matematiksel Modeller. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 69–78.
- Baumgärtner, F., Duarte, I. , & Banhart, J. (2000). Industrialization of Powder Compact Foaming Process. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 168–174.
- B.Nath, & Çeviren: Durmuş Gün. (1993). *Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri*. Sakarya Üniversitesi Matbaası.
- Bram M., Stiller C., Buchkremer H. P., Stöver D., & Baur H. (2000). *High-Porosity Titanium, Stainless Steel, and Superalloy Parts*. Advanced Engineering Materials.
- Bryant, J. D. , Crowley, M. D. , Wilhelmy, M. D. , Kallivayalil, J. A. , & Wang, W. . (2007, January). *Development of Alcoa Aluminum Foam Products*. Porous Metals and Metallic Forms: Metfoam07.
- Cambronero, L. E. G., Ruiz-Roman, 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(4), 1803–1809.
- Çinici, H. (2004). *Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Esaslı Metalik Köpük Üretimi*. [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Curran, D. C., & John, S. (2003). *Aluminium Foam Production Using Calcium Carbonate As A Foaming Agent*.
- Dahil, L. (2017). Alüminyum Köpük Malzemenin Dinamik Davranışlarının İncelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* , 17, 352–356.
- Deqing, W., & Ziyuan, S. (2003). Effect Of Ceramic Particles On Cell Size and Wall Thickness of Aluminum Foam. *Materials Science and Engineering: A*, 361(1–2), 45–49.
- Deshpande, V. S., & Fleck, N. A. (2000). Isotropic Constitutive Models For Metallic Foams. *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 48(6–7), 1253–1283.
- Doğan, A., Atmaca, İ., & Özbacı, O. (2015). Metal Köpük Malzemeler ve Yüzey Soğutmada Kullanımı. *Teskon 2015 / Bilimsel / Teknolojik Çalışmalar*, 2641–2652.
- Erg Materials & Aerospace*. (N.D.). Retrieved December 7, 2023,
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., & Ashby, M. F. (1998). Cellular Metals. *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, 3, 288–303.
- Frei, J., Gergely, V., Mortensen, A., & Clyne, T. W. (2002). The Effect of Prior Deformation on The Foaming Behavior of “Formgrip” Precursor Material. *Advanced Engineering Materials*, 4(10), 749–752.
- Gibson, J. (1996). *Cellular Materials: Structure, Properties, and Application*. National Academy of Sciences.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids: Vol. 2*. Cambridge University Press.

- Güven, Ş. Y. (2011). Toz Metalurjisi ve Metalik Köpükler. *Sdu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 22–28.
- Haydn, N., & Wadley G. (2002). “*Cellular Metals Manufacturing*”, *Advanced Engineering Materials* (Vol. 10).
- Idris, M. I., Vodenitcharova, T., & Hoffman, M. (2009). Mechanical Behaviour and Energy Absorption of Closed-Cell Aluminium Foam Panels in Uniaxial Compression. *Materials Science and Engineering: A*, 517(1–2), 37–45.
- İhvan, S. (2008). *Metal Enjeksiyon Kalıplama ile Gözenekli Metal Üretimi* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Ip, S. W., Wang, Y., & Toguri, J. M. (1999). Aluminum Foam Stabilization By Solid Particles. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 38(1), 81–92.
- Jerz, J. (2010). *Selection of Engineering Materials and Advanced Technologies for Specific Industrial Applications*.
- Jiang, B., Zhao, N. Q., Shi, C. S., Du, X. W., Li, J. J., & Man, H. C. (2005). A Novel Method For Making Open Cell Aluminum Foams by Powder Sintering Process. *Materials Letters*, 59(26), 3333–3336.
- Kaczyński, P., Ptak, M., & Gawdzińska, K. (2020). Energy Absorption of Cast Metal and Composite Foams Tested in Extremely Low And High-Temperatures. *Materials and Design*, 196.
- Kavi, H., Toksoy, A. K., & Guden, M. (2006). Predicting Energy Absorption in a Foam-Filled Thin-Walled Aluminum Tube Based on Experimentally Determined Strengthening Coefficient. *Materials Design*, 27(4), 263–269.
- Leitlmeier, D. , Degischer, H. P. , & Flankl, H. J. . (2002). “*Development of a Foaming Process For Particulate Reinforced Aluminum Melts*” *Advanced Engineering Materials* (Vol. 4).
- Liu, P. S., & Liang, K. M. (2001). Functional Materials of Porous Metals Made by P/M, Electroplating and Some Other Techniques. *Journal of Materials Science*, 36(21), 5059–5072.
- Losito, O. (2008). An Analytical Characterization of Metal Foams for Shielding Applications. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 233–238.
- Markaki, A. E., & Clyne, T. W. (2000). Characterisation of Impact Response of Metallic Foam/Ceramic Laminates. *Materials Science and Technology*, 16(7–8), 785–791.
- Miyoshi, T. , Itoh, M. , Akiyama, S., & Kitahara, A. (2000). Alporas Aluminum Foam Production Process, Properties, and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2, 179–183.
- Mondal, D. P., Goel, M. D., & Das, S. (2009). Effect of Strain Rate And Relative Density on Compressive Deformation Behaviour of Closed Cell Aluminum–Fly Ash Composite Foam. *Materials & Design*, 30(4), 1268–1274.

- Nagrale, P. (2023, November). *Metal Foam Market Size, Share & Forecast Report 2032*.
- Neville, B. P., & Rabiei, A. (2008). Composite Metal Foams Processed Through Powder Metallurgy. *Materials & Design*, 29(2), 388–396.
- Özer, G., & Ekerim, A. (2009). *Alüminyum Köpük Metal Üretiminde Sıcaklığın Köpük Oluşumuna Etkisinin Araştırılması*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), Karabük, TURKEY.
- Polat, B. D. , Keleş, Ö. , & Taptık, İ. Y. (2010). Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri. *Metal Dünyası*, 205, 2–7.
- Prakash, O., Sang, H., & Embury, J. D. (1995). Structure And Properties of Al-Sic Foam. *Materials Science And Engineering: A*, 199(2), 195–203.
- Salvo, L., Suéry, M., Marmottant, A., Limodin, N., & Bernard, D. (2010). 3d İmaging in Material Science: Application of X-Ray Tomography in *Comptes Rendus Physique* (Vol. 11, Issues 9–10, Pp. 641–649). Elsevier Masson Sas.
- Sertkaya, A. A. (2008). Alüminyum Köpüğün Isı Değiştiricisi Olarak Tasarımı ve Isı Transferi Modeli [Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Simancik, F. , Rajner, W. , & Rainhard, L. (2002). “Reinforced Alulight For Structural Use”, in: Processing and Properties of Lightweight Cellular Metals and Structures. *Tms Annual Meeting*, 25, 173–174.
- Stöbener, K., Baumeister, J., Lehmhus, D., Stanzick, H., & Zöllmer, V. (2003). *Composites Based on Metallic Foams: Phenomenology; Production; Properties and Principles*.
- Uzun, A. (2008). *T/M Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Küresel Şekilli Metalik Köpük Üretimi ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Gazi Üniversitesi.
- Whisler, D. A. (2014). *A Non-Explosive Methodology For Generating Wide Area Close-in Dynamic Blast Pressure Loads on Flexible Armor Panels* [University of California].
- Yavuz, A. (2011). *Boşluk Tutucu Tekniği ile Alüminyum Esaslı Metal Köpük Üretimi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- Yavuz, İ. (2010). Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları. Teknik Not, Taşıt Teknolojileri Dergisi (TATED) Cilt:2, No:1, s.49-58, 2010
- Yu, H. J., Yao, G. C., & Liu, Y. H. (2006). Tensile Property of Al-Si Closed-Cell Aluminum Foam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16(6), 1335–1340.
- Zaman, E. (2011). *Açık Hücreli Alüminyum Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Zhou, J. (2006). *Advanced Structural Materials: Properties, Design Optimization, and Applications* (Winston O., T. S. Srivatsan, & W. O. Soboyejo, Eds.; Taylor & Francis Group). Crc Press.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : ŞEVKET KAYIŞ

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Süleyman Demirel Lisesi, 1998

Lisans : Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, 2005

Mesleki Deneyim

Staj : Kale Doğalgaz Ltd. Şti 2005-2006

İş Yeri : Deniz Mühendislik Şevket Kayış 2006-2007

İş Yeri : Promet Müşavirlik Ltd. Şti. 2007-2008

İş Yeri : Sarılar Group Ltd Şti 2008-2009

İş Yeri : Tümaş A.Ş. 2009-2010

İş Yeri : Kolin İnşaat A.Ş.2010-2012

İş Yeri : TCDD Genel Müdürlüğü Demiryolu Yapım Dai. Bşk., 2012-