T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜKLERİN TİTREŞİM SÖNÜMLEME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ

İPEK BİNGÖL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi NİLHAN ÜRKMEZ TAŞKIN

EDİRNE-2020

İPEK BİNGÖL' ün hazırladığı "**ALÜMİNYUM KOMPOZİT KÖPÜKLERİN TİTREŞİM SÖNÜMLEME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ** başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Metin AYDOĞDU	……
Doç. Dr. Bedri Onur KÜÇÜKYILDIRIM	……
Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN	……

Tez Savunma Tarihi:
...../……/……

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Nilhan ÜRKMEZ TAŞKIN ……
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……
Doç. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

.... / .... / ....
İpek BİNGÖL
İmza

Yüksek Lisans Tezi
Alüminyum Kompozit Köpüklerin Titreşim Sönümleme Kabiliyetlerinin İncelenmesi
Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ÖZET

Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar alüminyum metal köpük malzemelerin mühendislik ve endüstriyel uygulamaların ihtiyaçlarına yönelik malzemeler olduğunu göstermiştir. Gözenekli yapılarından dolayı sahip oldukları hafif yapıları, yüksek enerji sönümleme kabiliyetleri, çok iyi ses emme kapasiteleri ve diğer hücresel metallere kıyasla daha yüksek basma mukavemetleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Üstün mekanik özellikleri sayesinde kullanım alanının genişlemesi bu malzemeleri araştırılmaya değer ve rekabetçi malzemeler haline getirmiştir.

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak EN AW 5754 alaşımı ve takviye olarak SiCp (500 mesh) kullanılarak üretilmiş olan iki farklı takviye oranına (hacimce %10 ve %20) sahip alüminyum kompozit köpük malzemelerin titreşim sönümleme kabiliyetleri deneysel bir çalışma gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Köpük malzemelerin performanslarını karşılaştırma amacı ile alüminyum alaşımı ve endüstride çoğunlukla sönüm elemanı olarak kullanılan kauçuk malzeme kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler belirlenen frekans aralıklarında, sabit ivme genlikli sinüsoidal frekans tarama testine tabi tutularak dinamik elastik modül eğrileri elde edilmiştir. Dinamik elastik modül eğrileri karşılaştırıldığında, alüminyum kompozit metal köpük malzemenin dinamik elastik modülü endüstride sönüm elemanı olarak kullanılan kauçuk malzemenin dinamik elastik modülünden yüksek fakat alüminyum alaşımı malzemenin dinamik elastik modülünden düşük olduğu görülmüştür.

Bu deneysel çalışmalar sonucunda düşük yoğunluğa sahip alüminyum metal köpük malzemelerin, alüminyum alaşım malzemeye kıyasla daha iyi titreşim sönümleyebildiği fakat kauçuk malzeme ile kıyaslandığında titreşim sönümleme kabiliyetinin düşük olduğu görülmüştür. Alüminyum köpük malzemelerin tekrarlı

kuvvetlere maruz kaldığında kısa sürede denge durumuna dönmeleri mümkün olmadığı için titreşim sönüm elemanı olarak kullanılmalarının etkin sonuç vermeyeceği ancak titreşim yalıtımı için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Yıl : 2020
Sayfa Sayısı : 95
Anahtar Kelimeler : Metal Köpük, Alüminyum, Titreşim Analizi, Sönümleme, Ses Emilimi, Dinamik Elastik Modül

Master Thesis
Investigation of Vibration Damping Capabilities of Aluminum Composite Foams
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

Scientific research in recent years has shown that aluminum metal foam materials are materials for the needs of engineering and industrial applications. Due to their porous structure, they stand out with their light structure, high energy absorption capability, very good sound absorption capacity and higher compression strength compared to other cellular metals. The expansion of the area of use due to their superior mechanical properties has made these materials worth researching and competitive materials.

In this study, the vibration damping capabilities of aluminum composite foam materials with two different reinforcement ratios (10% and 20% by volume) produced using EN AW 5754 alloy as matrix material and SiCp (500 mesh) as reinforcement were investigated by conducting an experimental study. In order to compare the performance of foam materials, aluminum alloy and rubber material, which is mostly used as damping element in industry, were used. The prepared samples were subjected to a sinusoidal frequency scanning test with constant acceleration amplitude in the specified frequency ranges and dynamic elastic modulus curves were obtained. When the dynamic elastic modulus curves were compared, it was seen that the dynamic elastic modulus of aluminum composite metal foam material was higher than the dynamic elastic modulus of the rubber material used as the damping element in the industry, but lower than the dynamic elastic modulus of the aluminum alloy material.

As a result of these experimental studies, it has been observed that aluminum metal foam materials with low density can absorb vibration better than aluminum alloy material, but have low vibration absorption capability compared to rubber material. As it is not possible for aluminum foam materials to return to equilibrium in a short time when

subjected to repetitive forces, it is concluded that using them as a vibration damping element will not give effective results, but can be used for vibration insulation.

Year : 2020
Number of Pages : 95
Keywords : Metal Foam, Al Metal, Vibration, Vibration Analysis, Damping, Sound Absorption

TEŞEKKÜR

Eğitim hayatımın başlangıcından bugünlere kadar gelmemde büyük emeği olan sevgili anneme ve babama,

Yüksek lisans eğitimimi tamamlamamda bana en büyük desteği veren, hoşgörü ve iyi niyeti ile yardımını esirgemeyen, bilgi ve birikimleri ile destekleyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Nilhan Ürkmez TAŞKIN' a,

Tez çalışmamı değerli yorumları ve bilgisi ile destekleyen Doç. Dr. Vedat TAŞKIN' a

Bu çalışmanın tüm aşamalarında bana destek veren ve yardımını esirgemeyen sevgili Özcan Armağan AYAN'a,

Bu çalışmanın uygulama aşamasına değerli bilgi ve birikimi ile katkıda bulunan Muammer YAZICI'ya, Tekno Kauçuk Sanayii A.Ş.'ye ve Ekomak Endüstriyel Kompresör- Edirne'ye teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **vi**
TEŞEKKÜR ..... **viii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiv**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xv**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xviii**
BÖLÜM 1 ..... **1**
GİRİŞ **1**
BÖLÜM 2 ..... **3**
METALİK KÖPÜKLER **3**
2.1. Metal Köpük Malzemeler 3
2.2. Metal Köpüklerin Yapısı 5
2.3. Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpükler 7
BÖLÜM 3 ..... **10**
METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ **10**
3.1. Ergiyik Metal İçerisine Gaz Enjektesi ile Metalik Köpük Üretimi 10
3.2. Eriyik Metale Köpürtücü Madde İlavesi 11
3.3.Toz Metalurjisi 12
3.4. Yarı Katı İçinde Gaz Bırakan Partikül Çözülmesi 13
3.5. Sprey Şekillendirme (Osprey) Yöntemi 13
BÖLÜM 4 ..... **15**
METAL KÖPÜK MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI **15**
4.1. Hafif Yapılar 15
4.2.Otomotiv Endüstrisi 16
4.3. Hava ve Uzay Endüstrisi 18
4.4. Makine Yapımı 18
4.5. Kaza Enerji Emilimi 19

4.6. Demiryolu Endüstrisi 20
4.7. Biyomedikal Kullanım Alanı 21
4.8. Ses Emilimi 21
4.9. Susturucular 22
4.10. Isı Değiştiriciler 23
4.11. Eşanjörler ve Soğutma Makinaları 24
4.12. Alev Durdurucular 24
BÖLÜM 5 25
METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ 25
5.1.Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri 25
5.2. Metalik Köpüklerin Mekanik Özelliklerini Belirleyen Parametreler 27
5.2.1.Göreceli Yoğunluk 27
5.2.2. Gözenek Boyutu 28
5.2.3. Gözenek Şekli 28
5.2.4. Gözenek Geometrisi 29
5.2.5. Elastik Modül 29
5.2.6. Basma Davranışı 30
5.2.7. Darbe Davranışı 33
5.2.8. Ses Emme 34
5.2.9. Termal ve Elektriksel Davranış 35
BÖLÜM 6 37
TİTREŞİM 37
6. Titreşim Hareketi 37
6.1. Basit Harmonik Hareket 39
6.2. Fourier Analizi (Fourier Dönüşümü) 41
6.3. Titreşim Parametreleri 42
6.3.1. Periyot 42
6.3.2. Frekans 43
6.3.3. Açısal Frekans 43
6.3.4. Genlik 43
6.3.5. Faz (Faz Gecikmesi) ve Faz Açısı 44
6.3.6. Dalga Formu 44
6.3.7. Yer Değiştirme 45
6.3.8. Titreşim Hızı 45

6.3.9. Titreşim İvmesi 46
6.4. Titreşim Analizi ve Ölçümü 46
6.4.1.Titreşim Sinyallerinin Toplanması- Titreşim Transdüserleri 47
6.4.2. Hız ve İvme Ölçerler 48
6.4.3. Titreşimlerin Elektrik Sinyaline Dönüştürülmesi 48
6.4.4. Sürekli Titreşim Kaynaklı Çalışan Yapılar 48
6.4.5 Titreşim Sönümleyen Elemanlar 50
6.4.5.1.Çelik Yaylar 50
6.4.5.2.Elastomerler 50
6.4.5.3.Mantarlar ve Keçeler 51
BÖLÜM 7 52
LİTERATÜR TARAMASI 52
BÖLÜM 8 57
MATERYAL ve METOD 57
8.1. Malzeme Seçimi 58
8.2. Numunelerin Hazırlanması 58
8.3. Yoğunluk Ölçümü 60
8.4. Titreşim Test Düzeneği 61
8.5. Titreşim Sönümleme Deneyi 63
8.6. Dinamik Elastisite Modülü (Complex Modulus) 65
BÖLÜM 9 66
DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA 66
BÖLÜM 10 72
SONUÇLAR 72
KAYNAKLAR 74
ÖZGEÇMİŞ 77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al : Alüminyum

Ca : Kalsiyum

CaO : Kalsiyum Oksit

E **:** Gözenekli Malzemenin Elastik Sembolü

E^* : Dinamik Elastisite Modülü

δo : Peak (Maksimum) Gerilme

εo : Peak (Maksimum) Gerinme

i : Kompleks Modül Katsayısı

f **:** Frekans

Fs : Geri Çağırıcı Kuvvet

g **:**Yer Çekim İvmesi

k **:**Yay Katsayısı

m : Kütle

SiC **:** Silisyum Karbür

t : Zaman

T : Periyot

Ti_2Br : Titanyum Brorür

TiH_2 : Titanyum Hidrür

℃ **:** Santigrat Derece

V : Hız

Vi : İlk Hız

Vmax : Maksimum Hız Değeri

φ : Faz Açısı

ρ **:** Yoğunluk

λ : Dalga Boyu

μ : Mikron

π	: Pi
ω	: Açısal Hız
x	: Yer Değiştirme
xi	: İlk Konum

KISALTMALAR DİZİNİ

CMM : Cell Metal Materials
CPM : Cyles Per Minute
dk : dakika
dev : devir
FFT : Fast Fourier Transform (Fast Fourier Dönüşümü)
Hz : Hertz
ISO : International Organization for Standardization
mm : Milimetre
pk : Peak (Tepe)
Rad : Radyan
rpm : Revolations Per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)
RMS : Root Mean Square (Karekök Ortalama)
sn : Saniye
T/M : Toz Metalurjisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Metal kompozit köpük 4
Şekil 2.2. Endüstriyel köpük üretimi ile elde edilen alüminyum köpük malzemeler 4
Şekil 2.3. AL5754 metal kompozit köpük 5
Şekil 2.4. Farklı faz durumlarındaki köpük oluşumu 6
Şekil 2.5. Açık ve kapalı hücre örneği 8
Şekil 2.6. Kapalı gözenekli alüminyum kompozit köpük 9
Şekil 3.1. Gaz enjekte edilerek üretilen köpüğün üretiminin şematik gösterimi 10
Şekil 3.2. Eriyik metale köpürtücü madde ilavesi ile köpük üretimi 11
Şekil 3.3. Toz metalurjisi prosesi 12
Şekil 3.4. Yarı-Katı halde gaz bırakan partiküller vasıtasıyla üretilen metal köpüklerin toz metalurjisi adımları 13
Şekil 3.5. Osprey şekillendirme yöntemi ile köpük üretimi 14
Şekil 4.1. Köpük malzemelerin gözenek yapısına göre kullanım alanları 15
Şekil 4.2. Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği 16
Şekil 4.3. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler 17
Şekil 4.4. Metal köpüklerin otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları 17
Şekil 4.5. Sandviç köpük panelden yapılmış roket konisi 18
Şekil 4.6. Çarpışma kutusu örnekleri 20
Şekil 4.7. Otomobiller için darbeli enerji emilimi bileşenleri 20
Şekil 4.8. Titanyum köpüğünden yapılan bir kalça eklemi 21
Şekil 4.9. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular 23
Şekil 4.10. Al köpük ısı değiştiriciler 23
Şekil 5.1. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen hücresel metallerin topoloji örnekleri 27
Şekil 5.2. Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada, gerilim-gerinim eğrisi 31

Şekil 5.3. Elastomerik köpüğün basma gerilim-gerinim eğrisi 32
Şekil 5.4. Elastik-Plastik Köpüğün Basma Gerilim-Gerinim Eğrisi 32
Şekil 5.5. Elastik-kırılgan köpüğün basma gerilim-gerinim eğrisi 33
Şekil 5.6. İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi 34
Şekil 5.7. Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı 35
Şekil 6.1. Yay kuvvet dengesi 37
Şekil 6.2. Yay kütle dengesi 38
Şekil 6.3. Basit harmonik hareketi gösteren deneysel düzenek 39
Şekil 6.4. Basit harmonik hareket yapan bir parçacık için bir x-t eğrisi 40
Şekil 6.5. Basit harmonik dalga-zamana göre kütle-yay hareketinin geometrik yeri 41
Şekil 6.6. Fast fourier dönüşümü 42
Şekil 6.7. Genlik-zaman eğrisindeki rms, tepe ve tepeden tepeye değerleri 44
Şekil 6.8.Özdeş frekans ve genlik değerindeki iki farklı dalga arasındaki faz gecikmesi... 45
Şekil 6.9. Hızın değişken fonksiyonunu gösteren grafik 46
Şekil 6.10. Titreşim analizi aşamaları 47
Şekil 6.11. Vibrasyon transdüserleri 47
Şekil 6.12. Titreşim sönümleyici çelik yaylar 50
Şekil 7.1. Numune alüminyum köpük örneği 54
Şekil 8.1. Titreşim testi akış diyagramı 58
Şekil 8.2. Microcut 200 hassas kesme cihazı 59
Şekil 8.3. Deney numuneleri 59
Şekil 8.4. Hassas Tartı (Archimedes Prensibi) 60
Şekil 8.5. Archimedes prensibi ile yoğunluk ölçümü aşamaları 61
Şekil 8.6. Titreşim sarsıcı test sistemi 61
Şekil 8.7. Spectral dynamic test cihazının teknik özellikleri 62
Şekil 8.8. Titreşim test düzeneği 62
Şekil 8.9. Numunelerin test cihazına bağlanması 63
Şekil 8.10. Giriş ve çıkış ivme ölçerleri 64
Şekil 8.11. Titreşim analizi testi 64
Şekil 8.12. Dinamik elastik modül 65

Şekil 9.1. A Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 67
Şekil 9.2. B Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 67
Şekil 9.3. C Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 68
Şekil 9.4. D Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 68
Şekil 9.5. E Grubu alüminyum malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 69
Şekil 9.6. F Grubu kauçuk malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi 69
Şekil 9.7. Karşılaştırma dinamik elastik modül-frekans eğrisi 70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. Alüminyum ve alüminyum köpük malzemelerinin bazı mekanik özellikleri 26
Çizelge 5.2. Ticari metalik köpük malzemelerin bazı özellikleri 27
Çizelge 5.3. Bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları 28
Çizelge 5.4. Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücresel alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği 36
Çizelge 8.1. Numunelerin özellikleri 60
Çizelge 9.1. Numunelerin yoğunluk ve dinamik elastik modül sonuçları 66

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Metal köpük malzemeler son yıllarda hem bilimsel hem de endüstriyel uygulamalar açısından kullanım alanlarının artması ile beraber ilgi çekici bir araştırma alanı haline gelmiştir. Odun, sünger ve kemik gibi yüksek spesifik sertlik, yüksek özgül mukavemet ve iyi enerji emme kapasitesine sahip olan doğal malzemelerin hücreler içerdiği bilinmektedir. Metalik köpükler de son yıllarda, bu tür benzer özelliklere sahip yapay hücresel malzemeler içerisinde yerini almıştır. Özellikle alüminyum (Al) alaşımlı kapalı hücreli metal köpüklerin, farklı sanayi sektörlerinde kullanım alanlarının artması, hafif, enerji emici ve sönümleyici yapıları bu malzemelerin kullanım alanlarını arttırmıştır. Ayrıca hafif yapıları sayesinde taşıma söz konusu olduğunda taşıyıcı araçların ağırlıklarını azaltmada muazzam bir potansiyele sahiptir (Duarte & Oliveira, 2012).

Al metal köpük malzemeler otomotiv sanayinde potansiyelini önemli bir şekilde hissettirmektedir. Otomobil karoserinde güvenlik amaçlı kullanılan bazı çelik malzemelerin yerini alüminyum malzemeler almıştır. Otomobillerin pasif güvenlik sistemleri hem maliyet hem de ağırlık açısından üreticilere ek bir yük getirmektedir. Bu nedenle pasif güvenlik olarak tabir edilen 5-15 km/saat hızlarda, güvenliği sağlayan çelik parçalar yerine Al esaslı köpük malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Köpük malzemenin hafiflik ve enerji sönümleyebilme yeteneği üreticilerin ilgisini bir anda bu yöne çekmiştir. Alman otomobil üreticisi Audi yeni A8 modelinde, bu malzemeyi tampon altlarında ve kapı aralarında darbe kutucukları olarak kullanmış ve toplamda 100–150 kilogram civarında bir tasarruf sağlamıştır. Yüksek şekil değiştirme oranlarına kadar kırılmadan deforme olmaları ve yüksek miktarda enerji emebilme kapasitelerinden dolayı taşıtlarda çarpışma darbe enerjisini emebilen dolgu malzemeleri olarak kullanılmaya başlanmıştır (Dahil, Başpınar &Karabulut, 2011).

Mühendislik uygulamalarında, tasarlanan bir ürün için malzeme tayini en önemli aşamadır. Malzemenin maksimum kapasitede işlem görmesi tasarlanan ürünün ömrünü uzatan en önemli etkenlerden bir tanesidir. Özellikle titreşim kaynaklı çalışan yapıların doğal frekanslarının ve sönüm değerlerinin bilinmesi tasarım açısından önemlidir.

Bu çalışmada Al kompozit köpük malzemelerin mekanik özellikleri dikkate alınarak tekrarlı yükler altındaki titreşim sönümleme kabiliyeti araştırılmıştır. İki farklı yoğunluk aralığına sahip alüminyum EN AW 5754 tür metali kullanılarak üretilmiş kompozit köpük malzemeler, alüminyum malzeme ve kauçuk malzemeden numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler belirli bir frekans aralığında, sabit ivme genlikli sinüsoidal frekans tarama testine tabi tutularak dinamik elastik modül eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen dinamik elastik modül eğrilerine göre alüminyum kompozit köpüklerin alüminyum ve kauçuk ile karşılaştırmalı olarak titreşim sönümleme kabiliyeti yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2

METALİK KÖPÜKLER

2.1. Metal Köpük Malzemeler

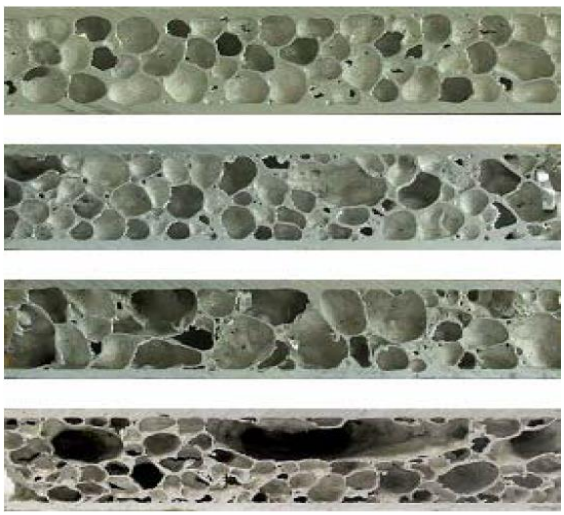
Metalik köpüklerle ilgili ilk çalışmayı Benjamin Sosnick, 1948 yılında alüminyum içerisinde cıva buharlaştırarak yapmıştır. Alüminyum ve cıva karışımını kapalı bir kapta ve yüksek basınç altında eritmiştir. Basınç kaldırılınca cıvanın alüminyumun erime ısısında buharlaştığını ve köpük oluşumunun gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Daha sonra ise John Elliott 1961 yılında Bjorkstenh Araştırma Laboratuvarı'nda aynı metodu tekrarlayarak metalik köpüğü üretmiştir. Sıklıkla atıfta bulunulan metalik hücresel malzemelere dair genel bir yeniden gözden geçirme makalesi 1983 yılında Davies ve Zhen tarafından yayınlanmıştır. Bu yayından önce metallik köpüklerin üretim, karakterizasyon ve uygulamalarıyla alakalı yeni birçok gelişme olmuştur (Ertürk, 2013).

Son 15 yılda metal köpük malzemeler bilimsel ve endüstriyel araştırmalarda ve mühendislik çalışmalarında en ilgi çekici malzemelerden biri haline gelmiş, farklı metal ve alaşımların köpük olarak üretildiği çalışmalar çoğalmıştır. Ancak alüminyumdan yapılan köpüklerin, özellikle otomotiv endüstrisindeki endüstriyel uygulamalar için ciddi bir aday olduğu kanıtlanmıştır (Matijasevic, 2006). Metal köpük malzemelere bir örnek Şekil 2.1'de verilmiştir (Ürkmez Taşkın & Taşkın, 2015).



Şekil 2.1. Alüminyum kompozit köpük (Ürkmez Taşkın & Taşkın, 2015).

Gözenekli metal malzemelerin ticarileştirilmesi ve endüstriyel alandaki kullanımı gelişen teknolojinin bir miktar gerisinde kalmıştır, ancak 1990'lı yılların başlarında dünya çapındaki araştırma ve geliştirmelerin yükselişinin ardından bir artış elde etmiştir. Şekil 2.2'de endüstriyel köpük üretimi ile elde edilen köpük malzemenin gözenek yapısı yer almaktadır. Gözenekli metaller tarafından sunulan fiziksel ve mekanik özelliklerin, yoğun metallerle elde edilemeyen kombinasyonların veya gözenekli polimerlerin ve seramiklerin benzersiz kombinasyonu, bu malzemelerin kullanımına yönelik merak uyandırmıştır. Korozyona karşı dayanıklı olmaları, hafif yapıları, enerji, titreşim ve sesi emme yetenekleri ve yüksek sıcaklıkta iyi ısıl iletkenlik kabiliyetlerine sahip olmaları bu malzemeler üzerinde yoğunlaşmaya odaklanmaktadır (Matijasevic, 2006).



Şekil 2.2. Endüstriyel köpük üretimi ile elde edilen alüminyum köpük malzemeler (Seeliger, 2003).

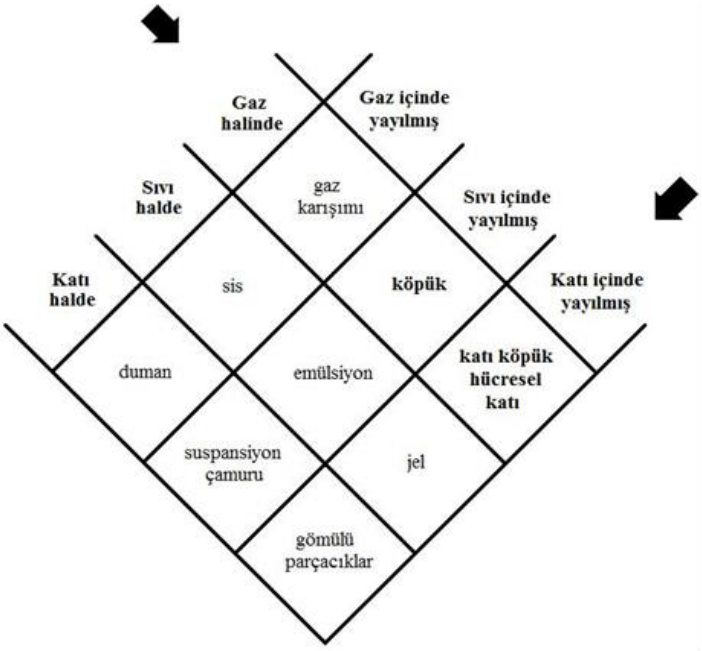


Şekil 2.3. Al-5754 Kompozit Köpük (Ürkmez Taşkın & Taşkın, 2015).

Piyasada bulunan metal köpük malzemelerin çoğu, nikel, magnezyum, kurşun, bakır, titanyum, çelik ve hatta altın içeren alaşımlara dayanmaktadır. Şekil 2.3'te gösterilen görsel ise alüminyum metalinden üretilmiş kompozit köpük malzemedir. Metal köpükler arasında Al alaşımları düşük yoğunlukları, süneklik, ısı iletkenlikleri, yüksek ve rekabetçi maliyetleri nedeniyle ticari olarak en çok kullanılan malzemelerdendir (Güden, Kavi & Toksoy, 2004).

2.2. Metal Köpüklerin Yapısı

Köpük terimi her zaman doğru olarak kullanılmamaktadır. Bu sebeple ayrıntılı olarak ele alınmalıdır. Şekil 2.4 incelendiğinde bir fazın diğer bir faz içerisindeki dağılım olasılıklarının tamamının listelendiği görülmektedir. Buradaki her bir faz maddenin 3 halinden biridir. Köpükler sıvı ya da katı fazlardan birisinde düzenli dağılıma sahip gaz fazı barındırırlar. Bağımsız gaz sırasıyla sıvı ya da katı kısımdan ayrılmış olarak yer alır. Böylece hücreler sıvı ya da katı tarafından tamamen çevrelenmiş ve birbirinden bağımsız bir durumdadır. Köpük terimi esas anlamıyla gaz kabarcıklarının sıvı içerisinde dağılarak hapsolduğu yapı anlamı taşır.



Şekil 2.4. Farklı faz durumlarındaki köpük oluşumu (Banhart, 2001).

Bu tip köpük morfolojileri sıvının katılaştırılmasıyla elde edilebilir ve katı köpük olarak adlandırılırlar. Metalik köpük genel olarak katı köpük yapı olarak belirtilir, sıvı metalik köpük ise yalnız malzeme üretim sürecinde meydana gelen bir fazdır. Katı köpükler daha sık bir kullanıma sahip olan hücresel katı olarak ifade edilen kavramın özel bir halidir (Ertürk, 2013).

Hücresel malzemelerin birim hücre uzunlukları milimetre veya mikrometre düzeyindedir. Bu durum hücresel malzemeleri yapısal bir malzeme olarak ele almayı gerektirir. Hücresel malzemeler tıpkı uzay kafes yapılarının analiz edilişi gibi klasik mekanik metotları kullanılarak analiz edilebilir.

Gözenekli malzemelerin yapısal ve işlevsel özelliklerini belirleyen faktörler arasında gözenek miktarı (göreceli yoğunluk), şekli ve dağılımı önemli bir yer almaktadır.

Yoğunluk hücre yapısından başka matris metalinin alaşım kompozisyonu ve metalürjik durumu köpük yapının mekanik özelliklerini belirleyen temel değişkenlerdir. Göreceli yoğunlukla basma mukavemeti ve elastik modülü arasında açık bir ilişki bulunmaktadır. Gözenek boyutu da önemli bir parametre olmakla birlikte birçok mekanik ve ısıl özelliği nispeten az miktarda etkiler. Gözenek şekli ise malzeme özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Eş eksenli gözenek yapısına sahip malzeme izotropik özellik gösterirken az miktarda uzamış veya düzleşmiş gözeneğe sahip malzemede dahi yöne bağlı özellik

değişimi gözlemlenir. Yapısal malzemelerin en önemli özelliklerinden biri doğrusal elastik davranışlarıdır. Metalik köpükler birçok yapısal işlev gerektiren uygulamalarda kullanıldığından performanslarını belirleyen en önemli parametreleri elastik modülü ve basma mukavemetidir

İlk çalışmalar köpük özelliklerinin bağıl yoğunlukla ilişkisini $\tilde{\rho}/\ \rho_s$ (katı malzemenin hacme göre oranı) doğrusal olarak gerçekleştiğini varsaymıştır. Ancak birçok köpük yapı için durum böyle değildir. Köpük yapıların mekanik özelliklerini inceleme üzerine yürütülen araştırmaların temelini Gent ve Thomas isimli araştırmacıların 1950-70'li yıllardaki çalışmaları ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmalar köpüklerin termal, mekanik ve elektriksel özelliklerinin kapsamlı bir şekilde elde edilmesine ön ayak olmuştur.

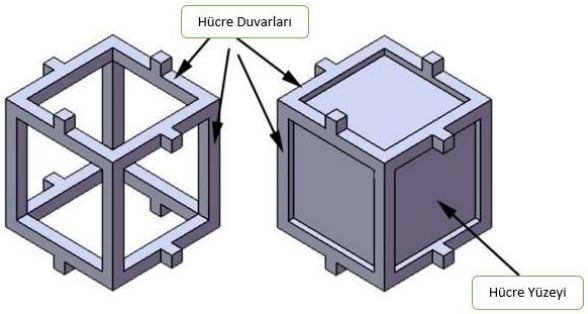
Bu gelişmelerin ardından yapılan çalışmalarda, köpük yapı ister açık isterse kapalı hücre tipinde olsun bükme etkisinin etkin faktör olduğu ortaya konulmuştur. Gerilmenin etkin olduğu tam üçgen kafes yapı tipindeki köpüklerden (belirli bir bağıl yoğunlukta) beklenilen rijitlik ve dayanım değerlerinin çok alt seviyede olması bükme etkisinin bir sonucudur. Fikir vermesi açısından, bağıl yoğunluğu 0,1 (hücre duvarları hacmin %10'u) olan zayıf bağlı kafes yapılı metal köpük ile aynı bağıl yoğunluklu üçgen kafes tipindeki köpüğün gerilme hâkim bir yapıdan 10 kat daha az serttir. Eğilme ve gerilmenin etkin olduğu köpük yapıların termal, mekanik ve elektriksel özelliklerini belirtmek üzere boyutsal yöntemler kullanarak basitleştirilmiş birtakım kurallar belirlemeye çalışmışlardır (Ertürk, 2013).

2.3. Açık ve Kapalı Hücreli Metal Köpükler

Metal köpükler, genellikle çokyüzlü hücrelere sahip olan bir hücresel metal alt grubudur, ancak yönlü katılaşmanın farklı morfolojiler oluşturduğu durumlarda şekiller değişebilir. Metal köpükler açık hücreli, kapalı hücreli veya ikisinin bir kombinasyonu olarak oluşturulabilirler. Gözenekleri nedeniyle açık hücreli, kapalı hücreli metal köpükler olarak ikiye ayrılır. Açık hücreli köpük, birbirine bağlı katı çubukların bir ağını oluşturur. Açık hücreli köpük, akışkan ortamın içinden geçmesini sağlar. Kapalı hücre köpüğü, tüm duvarları birbiriyle paylaşan bitişik bir kapalı gözenekler ağından oluşur. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi kapalı ve açık hücre konfigürasyonu arasındaki fark

gözeneklerde açıkça görülebilmektedir Açık hücre, filtrelemeden ısı değişimine kadar değişen farklı uygulamalar için sıvıların ve gazların geçişine izin verir ve köpüğün yüzey alanını arttırırken kapalı hücre konfigürasyonu enerji emiliminde ve otomobil tamponlarında, köprülerde ve binalarda olduğu gibi yapısal uygulamalar için idealdir. Bir sıvı ortam, kapalı hücre köpüğünden geçemez. Kapalı hücre köpükleri, yüksek sertlik ve düşük yoğunluklarından dolayı hafif yapılarda kullanılmaktadır. Metal köpüklerin gelişimi, metal olmayan köpükler ve katı metallerle karşılaştırıldığında avantajlı özellikler görülür. Metal olmayan köpüklere kıyasla, metal köpükler daha yüksek sertlik, ağırlık oranlarında daha iyi mukavemet, artan darbe enerjisi emilimi, yüksek sıcaklıklara daha fazla tolerans ve olumsuz çevre koşullarına dayanım avantajları sunar. Katı metallere kıyasla, metal köpükler daha yüksek özgül dayanım değerleri sunar ve hücrelerin boyutu, şekli ve hacim kesrini değiştirerek, çok çeşitli uygulamaların taleplerini karşılamak için mekanik özellikleri de geliştirilebilir (Shaik & Venkates, 2012).

Kapalı hücreli köpük malzeme yapısı Şekil 2.6'da açıkça görülebilmektedir. Kapalı hücreli köpük malzemelerin açık hücrelilere nazaran daha yüksek mukavemet, rijitlik ve darbe dayanımına sahip olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür. Hücre duvarları tarafından izole edilmiş gözeneklerin içini kaplayan gaz, basma esnasında hücre duvarlarının hareketi sebebiyle sıkıştığından basıncı arttırır. Bu basınç artışı elastik modülü hesaplamalarında oldukça önemli bir role sahiptir. Açık gözenekli malzemelerde rijitlik düşük olmasına karşın yüksek ısı taşınım özelliklerine sahip olduklarından yanma odalarında veya yüksek güç üreten makinalarda kullanım alanı bulmaktadır (Ertürk, 2013).



Şekil 2.5. Açık ve kapalı hücre örneği (Gibson & Ashby, 1997).



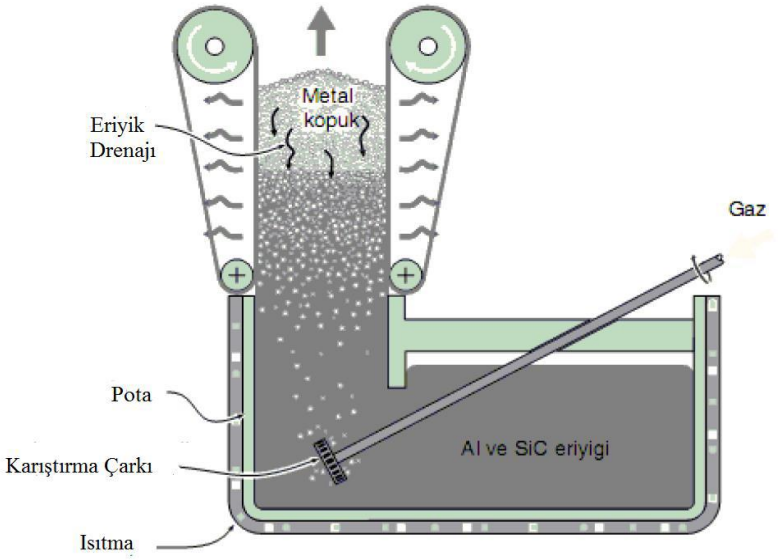
Şekil 2.6. Kapalı gözenekli alüminyum kompozit köpük (Ürkmez Taşkın, & Taşkın, 2015).

BÖLÜM 3

METAL KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Ergiyik Metal İçerisine Gaz Enjektesi ile Metalik Köpük Üretimi

Bu üretim yöntemi ilk olarak Kanada'daki Cymat Alüminyum Corp şirketi tarafından ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknikte, erimenin viskozitesini arttırmak ve köpüklenme özelliklerini ayarlamak için magnezyum oksit parçacıkları, silisyum karbür ve alüminyum oksit kullanılmıştır. Alüminyum alaşımlarının ana metal olarak kullanıldığı bu üretim yönteminde saf alüminyuma veya alaşımlarına %15 e kadar işlem görmüş seramik parçacıklar eklenir. Bu parçacıkların boyutları genel olarak 25 µm çapına kadar çıkabilir. Seramik takviye olarak, karbürler, oksitler veya nitrürler kullanılabilir. Gazlar, Şekil 3.1'de görülebileceği gibi özel olarak tasarlanmış dönen çarklar veya titreşimli nozüller ile enjekte edilir (Uçak, 2007).



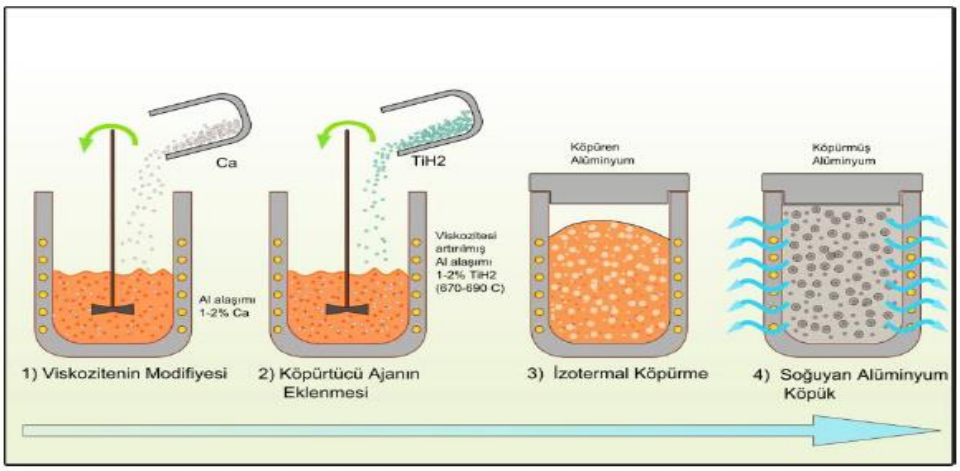
Şekil 3.1. Gaz enjekte ile köpük üretiminin şematik gösterimi (CYMAT ve HYDRO) (Ashby vd., 2000).

3.2. Eriyik Metale Köpürtücü Madde İlavesi

Bir metal eriyiği ile köpük oluşturmanın alternatif diğer bir yolu, içine eriyen gaz yerine eriyiğe doğrudan bir köpük yapıcı madde eklemektir. Şekil 3.2'de bu üretim yönteminin tüm aşamaları gösterilmiştir.

Bu işlemde ilk olarak eriyik stabilize etmek için kalsiyum (Ca) genellikle ağırlıkça %1,5-3 oranında eklenir. İstenen viskoziteye ulaştıktan sonra, genellikle ağırlık olarak yaklaşık %1-2 TiH_2 eklenir. Sıcak viskoz eriyiğinde bir hidrojen kaynağı olarak görev yapan bileşikten Hidrojen ayrışmasının bir sonucu olarak, eriyik genleşmeye başlar ve köpüklenerek içinde bulunduğu kabı doldurur. Köpüklenme aşaması sabit basınçta gerçekleşir. Köpüklenme aşamasından sonra, kap soğutulur ve katı alüminyum köpük daha ileri işlemler için kalıptan çıkarılır.

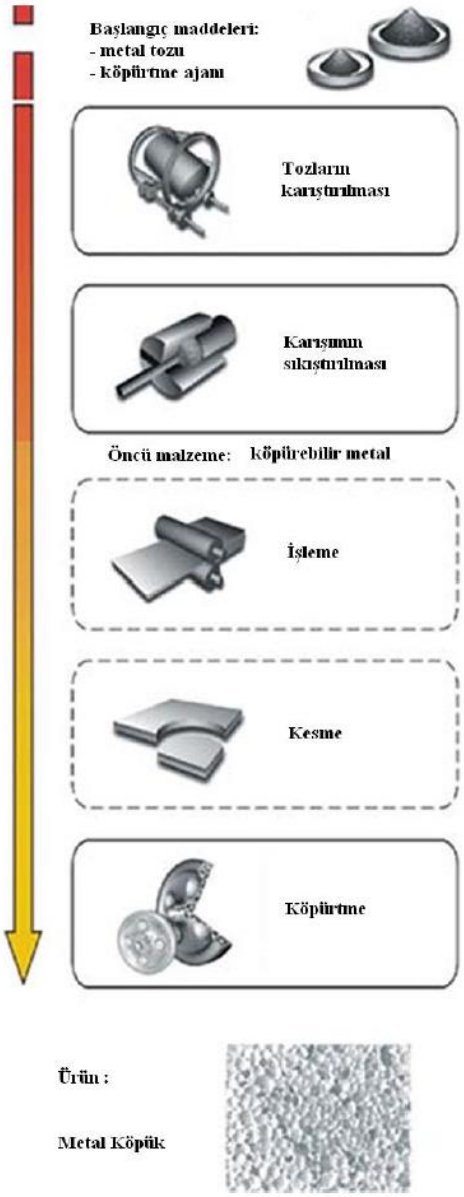
Bu üretim yönteminde viskozite artışı, kalsiyumun oksijenle olan etkileşiminde meydana gelen kalsiyum oksit (CaO) ve kalsiyum aluminat ($CaAl_2O_4$) oluşumundan kaynaklanmaktadır. Kalsiyumun alüminyum eriyiğine eklenmesinin veya eriyik atmosferi içinde karıştırılmasının eriyikte görünür viskozitesini artırabildiği belirtilmiştir. Bunun nedeni, karıştırmanın neden olduğu girdabın, eriyikteki oksit filmini tahrip etmesi ve alüminyumun oksidasyonuna neden olmasıdır. Kalsiyum ne kadar fazla ilave edilirse, oksidasyon o kadar güçlü olur, erimiş halde o kadar fazla oksit bulunur, bu nedenle görünür viskozite de artar. (Uçak, 2007).



Şekil 3.2. Eriyik metale köpürtücü madde ilavesi ile köpük üretimi

3.3.Toz Metalurjisi

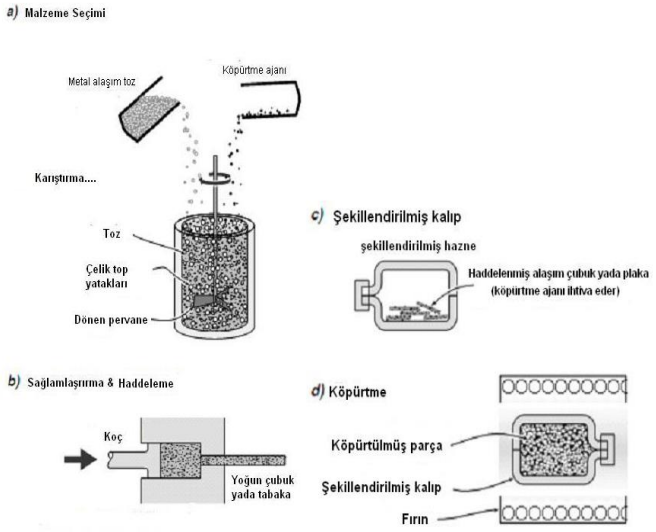
Toz olarak üretilebilen alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, yüksek hız çelikleri, alüminyum, titanyum gibi birçok metal malzemeyi toz metalürjisi yöntemi ile şekillendirmek mümkündür. Son yıllarda özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan parçaların bir bölümünün üretimi tamamen bu yöntemle yapılmaktadır (Tiryaki, 2016). Şekil 3.3'te toz metalurjisi ile köpük malzeme üretiminin tüm aşamaları yer almaktadır.



Şekil 3.3. Toz metalurjisi prosesi (Tiryaki, 2016).

3.4. Yarı Katı İçinde Gaz Bırakan Partikül Çözülmesi

Bu üretim yönteminde katı toz haldeki metal içerisine köpük yapıcılar karıştırılarak üretim yapılır. Genellikle bünyesinde H_2, CO_2 veya O_2 bulunduran özellikle de hidrürler tercih edilir. Örneğin TiH_2 465 °C'de difüzyon yolu ile bünyesinde hidrojen gazını açığa çıkarmaya başlar ve bu sıcaklık alüminyum ve alaşımlarının ergime sıcaklığından düşüktür. Böylece köpük yapıcının toz metalürji prosesleri kullanılarak katı alüminyum içinde dağıtılması ve sıcaklığın arttırılarak yarı katı hale gelen metal içerisinde gaz çözündürülerek, kabarcık büyümesi sağlanabilir. Şekil 3.4'te yarı katı üretim metodunun aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



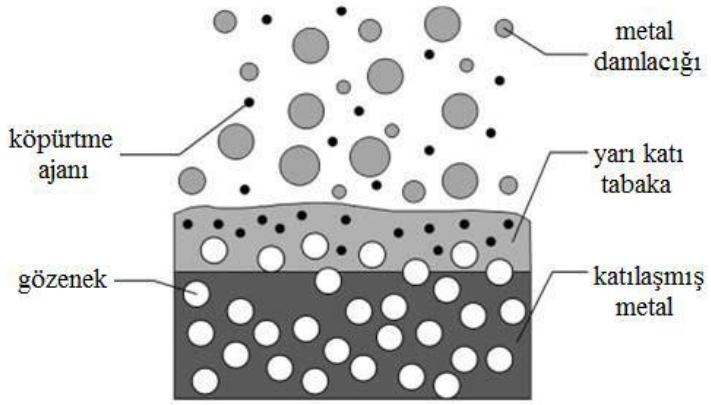
Şekil 3.4. Gaz açığa çıkaran parçacıklar ile üretilen metal köpüklerin toz metalurjisi adımları (Fraunhofer ve Alulight Prosesleri), (Çağlar, 2009).

3.5. Sprey Şekillendirme (Osprey) Yöntemi

Sprey şekillendirme yöntemi farklı metal ve alaşımlarının üretimine olanak sağlayan bir köpük üretim yöntemidir. Metal eriyik sürekli olarak atomize edilir ve küçük metal damlacıklarının hızla uçuştuğu bir sprey meydana getirilir. Damlacıklar bir alt tabaka kütük, sac, tüp gibi belirlenen şekle uygun yoğun bir birikinti oluşturmak üzere seçilen parametrelere göre toplanıp büyürler. Spreyle biçimlendirilmiş malzemelerin içeriğinde düşük miktarda oksit, ince taneli veya yüksek miktarda yarı kararlı alaşım fazları mevcuttur. Genellikle bu özelliklerin kombinasyonu geleneksel döküm

yöntemleriyle elde edilemez. Açıklaması yapılan bu yöntemde ticari olarak temin edilebilen 2,1-3,6 mm çapındaki içi boş alümina küreler ve 100-200 mm et kalınlığı kullanılmıştır. Küreler çelik bir kalıp içerisine dizilmiş ve yüksek yoğunluklu sıkı paket düzenini sağlamak için titreşim uygulanmıştır. Ardından küre yığını 700 °C 'de magnezyum eriyiği ile basınç altında infiltre edilmiştir.

Sprey işlemini bir özelliği özellikle çekici kılmaktadır. Oksitler, karbürler veya saf metaller gibi tozların sprey içerisinden enjeksiyon edilip bunların tepkimeye girmesine müsaade edilerek ya da sıvı metal damlacıkları tarafından ıslatılması ve metal içerisine dahil olarak tabaka üzerine çöktürme yoluyla tabakanın özelliklerinin iyileştirilme olanağı vardır. Karbür ve oksit tozları ilave edilirse bu yöntemle metal matrisli kompozitlerin üretilmesi mümkündür. Enjekte edilmiş olan tozların erimiş metal ile temas halinde olmaları ve büyük miktarda gaz salınımında bulunmaları durumunda, gözenek yapısı oluşturulabilir. Şematik açıklama Şekil 3.5'te sunulmuştur. Bu yöntem ile %60 oranına kadar gözeneklilik elde etmek mümkündür. Ancak gözenek morfolojisinin dağılımı düzen bakımından zayıftır (Ertürk, 2013).

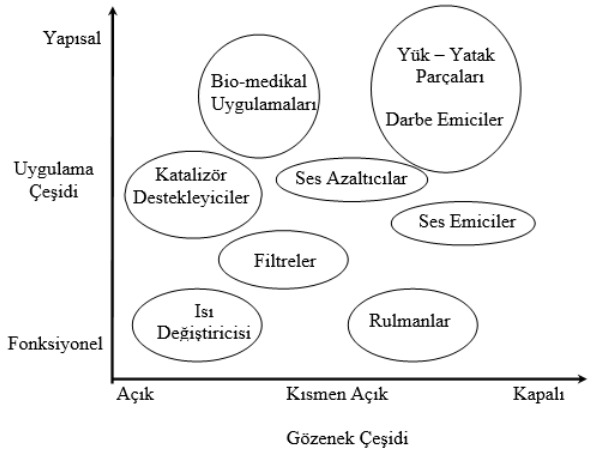


Şekil 3.5. Osprey şekillendirme yöntemi ile köpük üretimi (Ertürk, 2013).

BÖLÜM 4

METAL KÖPÜK MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Metalik köpükler son yıllarda mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı çeşitli ve yeni uygulama alanları bulmaktadır. Malzeme gözenekliliğine bağlı olarak kullanım alanlarının değiştiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Gözenek yapısına göre kullanım alanları (Banhart, 2001).

4.1. Hafif Yapılar

Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapılar taşıyıcı araçların ağırlıklarını azaltmak için iyi bir çözüm olarak görülmektedir. Şekil 4.2'de gösterilen üç boyutlu bu sandviç paneller orijinal çelik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olmasına rağmen %25 daha hafiftir (Yu, Eifert, Banhart, & Baumeister, 1998).

Alüminyum sandviç paneller köpürebilir öncü malzemeler üzerine alüminyum yüzey plakaların birleştirilmesiyle oluşturulur ve daha sonra plaka, köpük yapıcı tozların

gaz salınımı yapacağı sıcaklığa çıkarılarak öncü malzemelerin yaklaşık %400 genişlemesi ve %80 gözeneklilikte bir yapı oluşturması sağlanır (Patrick, 2000).



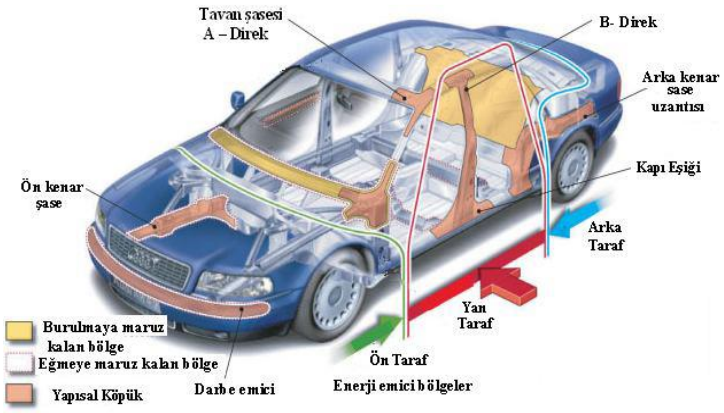
Şekil 4.2. Alüminyum hafif-ağırlıklı sandviç panel örneği (Banhart, 2003).

Hafif ağırlıklı yapılarda rijitlik-kütle oranının yüksek olması özelliği aranmaktadır. Metal köpük kullanımı kütle kazancına neden olur. Ayrıca kapalı hücreli ve az hatalı köpük kullanılarak daha yüksek elastisite modülü elde edilir ve rijitlik-kütle oranı artırılabilir. Bunun yanı sıra, daha dirençli ve darbeye dayanıklı özellikler sağlanır. Özellikle sandviç şeklinde üretilen alüminyum köpükler motor kapağı, bagaj kapağı ve açılır tavan gibi burulma deformasyonundan kaçınmak ve titreşimi önlemek için yüksek dayanım gereken uygulamalarda kullanılmaktadır (Türker, Güven &Ertürk, 2011).

4.2.Otomotiv Endüstrisi

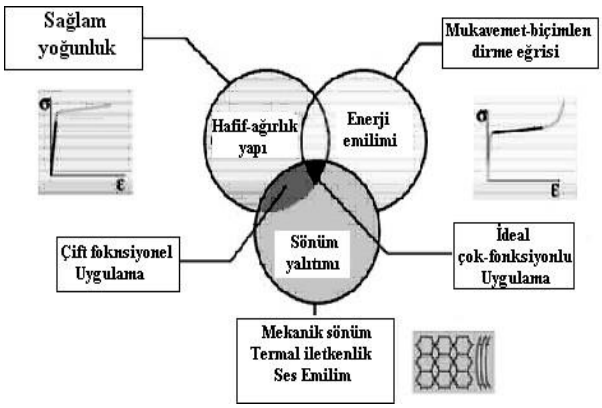
Son dönemlerde otomobillerde güvenlik talebindeki artış, daha ağır araç kullanılmasına neden olmuştur. Bu durum yakıt tüketimini artırdığı için, ağırlığı azaltmak adına ek hesaplamalara gerek duyulmaktadır. Özellikle Avrupa ve Japonya'da daha kısa araçlar tasarlanmaktadır. Ancak ağırlığı azaltmak adına yapılan bu kısalma yolcu bölümünde kısıtlama ile gerçekleşmemelidir. Böylece daha küçük motorlar ve parçalar üretilmiş; ancak motor ve diğer parçaların birbirlerine daha yakında toplanması yüzünden ısınma sorununa veya çarpma bölümünün azaltılmasıyla çarpma güvenliği sorununa neden olmuştur. Ayrıca araçlardan akustik yayılımı azaltma ihtiyacı yeni ses soğuruculara

gereksinime sebep olmuştur. Metal köpükler, düşük yoğunluk, ısıl iletkenlik, enerji, ses ve titreşim emme özellikleriyle beraber bu problemlere çözüm sunmaktadır. Şekil 4.3'te Audi A8 gövdesinde gösterildiği gibi karoser üzerinde birçok noktada yapısal köpük parçalar bulunmaktadır (Degischer & Kriszt, 2002).



Şekil 4.3. Audi A8 üzerinde kullanılan yapısal köpük malzemeler (Degischer & Kriszt, 2002).

Şekil 4.4'te otomotiv endüstrisinde, metalik köpüklerin avantajlı görülen üç farklı uygulama alanında hangi amaçlarla kullanıldığını göstermektedir. Burada daireler uygulama alanlarını, dıştaki kutularda köpük özelliklerinin avantajını göstermektedir. Hedef imal edilen parçanın her üç önemli özelliği de gösterebilecek şekilde üretilebilmesidir (Banhart, 2003).



Şekil 4.4. Metal köpüklerin otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları (Banhart, 2003).

4.3. Hava ve Uzay Endüstrisi

Dayanımı yükseltilmiş köpük metallerin hafif-ağırlıklı yapılarının otomotiv endüstrisinde kullanılmasıyla birlikte benzer şekilde kullanımı hava-uzay endüstrisinde de önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Köpük metal sandviç paneller diğer alternatiflerinden yüksek performansı daha ucuza sağladıkları için tercih edilmektedir. Örneğin Boeing, alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panel üretimi ile ilgili çalışmaları helikopter kuyruk çubuklarında kullanımını sağlamak amacı ile yapmaktadır. Helikopter üreticileri yine alüminyum köpük metalleri farklı parçaların yerine kullanmayı amaçlayan çalışmalar yapmaktadır. Şekil 4.5'te köpük panellerin kullanılmış olduğu roket konisi yer almaktadır. Bu çalışmadan anlaşılacağı üzere köpük malzemelerin uzay sanayisinde de kullanım alanı mevcuttur.



Şekil 4.5. Sandviç köpük panellerden yapılmış roket konisi (Seelinger & Banhart, 2008).

Uzay sanayisi de uzay araçları iniş takımlarında, enerji absorber malzemesi alüminyum köpüklerin kullanımını amaçlayan çalışmalar yapmaktadır (Banhart, 2003).

4.4. Makine Yapımı

Metalik köpüklerin makine yapımında da ilginç uygulamaları mevcuttur. Sert köpükleştirilmiş parçalar veya köpük doldurulmuş sütunlar durgunluğu azaltılarak ve

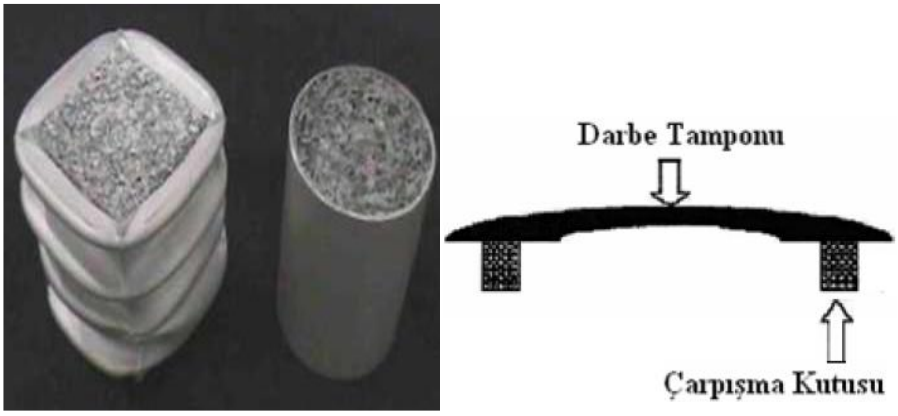
sönümlemeleri arttırılarak mil, merdane ya da platformlarda geleneksel metal malzemelerinin yerine kullanılmaktadır.

Köpürtülmüş metaller, portatif matkap ya da öğütme makineleri gibi elektronik ev aletlerinde elektromanyetik kalkan özelliği sağlamaları sayesinde kullanılabilir. Ayrıca, öğütme disklerinin yapısal gövdeleri, öğütme malzemesi dairesel çevresine bağlanarak alüminyum köpükten yapılabilir. Böylece diskin iç sönümlemesi zararlı titreşimlerden korumaya yardımcı olmaktadır. Yine alüminyum köpükler teleskop aynalarına destek olarak kullanılır. Bir diğer uygulama ise sıcak veya korozif ortamların dolgu seviyesini ölçen flatörlerdir. Bu flatörlerin yüksek mukavemetli, oldukça hafif ve yüzebilir dolgu malzemeleri olması beklenir. Bunun için, ince kaynaklanmış titanyum levhalar kullanılabilir. Ancak, bu flatörler pahalı olmaktadır. Onun yerine, dış basınca karşı koyan ve gerekli kaldırma kuvvetini sağlayan alüminyum köpük parçalar kullanılabilir (Banhart, 2001).

4.5. Kaza Enerji Emilimi

Birçok hücresel katı, geniş bir gerilme aralığı boyunca neredeyse sabit bir stres seviyesinde deformasyonları nedeniyle mükemmel enerji emicilerdir, ancak metal köpükler, çok daha yüksek mukavemetlerinden dolayı geleneksel köpüklerden daha iyi performans gösterebilir. Bu malzemelerin, özellikle otomotiv endüstrisinde, enerji emici olarak geniş kullanım alanı bulmasının ana nedeni budur.

Şekil 4.6'da yer alan köpük dolgulu bölümlerin boş bölümlerle karşılaştırılması durumunda etki daha da belirgin hale getirilebilir. Bir köpük dolgusu, içi boş bölümlerin deformasyon davranışını ve başarısızlık modunu önemli ölçüde değiştirir ve bu nedenle ilave emme etkileri ve ağırlık tasarrufuna yol açabilir.



Şekil 4.6. Çarpışma kutusu örnekleri (Banhart, 2003).

Köpük malzemelerin otomotiv endüstrisindeki en yaygın kullanımına örnek olarak Şekil 4.7'de yer alan darbe emiciler gösterilebilir.



Şekil 4.7. Otomobiller için darbeli enerji emilimi (Banhart, 2003).

4.6. Demiryolu Endüstrisi

Özellikle, hafif demiryolu takımları ve araçlarla çarpışma olasılığı olan tramvaylar için enerji emilimi önemli bir konudur. Japon trenleri, enerji emilimini geliştirmek için alüminyum köpük bloklarla donatılmaktadır.

4.7. Biyomedikal Kullanım Alanı

Biyo uyumlulukları nedeniyle protezlerde veya dental implantlarda titanyum veya kobalt kromlu alaşımlar kullanılır. Şekil 4.8'de titanyum köpüğünden yapılan bir kalça kemiği eklemi gösterilmiştir. Hücresel yapıların içlerinde doku gelişimine izin vermeleri ihtimali bu malzemelerin biyo malzeme olarak kullanımlarını cazip hale getirmektedir. İmplantlarda kullanıldığında oluşan doku gelişimi implantla çevresindeki doku arasında nispeten kalıcı ve sağlam bir bağ oluşmasını sağlar. Dokunun büyümesini sağlamak için, biri genellikle termal püskürtme veya başka usullerle protez üzerinde aynı veya başka biyo-uyumlu malzemenin gözenekli bir katmanını üretir. Dahası, magnezyum köpükleri, kemik büyümeye devam ettiği sürece yük taşıyıcı bir yapıya hizmet eden, ancak vücut tarafından daha sonra iyileşme aşamasında yavaş yavaş emilen, biyolojik olarak parçalanabilen implantlar olarak kullanılabilir (Marra, 2014).



Şekil 4.8. Titanyum köpüğünden yapılan bir kalça eklemi (Marra, 2014).

4.8. Ses Emilimi

Ses emilimi, makine yapımında ve inşaat mühendisliğinde önemli bir kriterdir. Metal köpüğün ses emme oranı %80'in üzerine çıkmazken, geleneksel ses emme materyallerini (yani cam yünü) aldığımızda geniş bir frekans aralığında %99,9'a ulaşır. Ancak metal köpüğün bu malzemelere göre üstün özellikleri vardır. Geleneksel gözenekli

malzemeler gibi ne tutuşur ne de higroskopiktir ve gözenekli metal malzemeler bu amaçlar için çok uygundur (Champoux & Alard, 1991).

Metal köpüklerin, aynı malzemenin metal haline göre elastisite modülleri daha düşük ve kayıp faktörü en az 10 kat daha büyük olduğu için titreşimler, genellikle ısıya çevrilerek, daha etkili biçimde sönümlenir. Böylece metal köpükler ses problemlerinden sakınma olanağı sağlayarak ses kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır. Yolcular dış kaynaklardan gelen seslerden korunmalı ve otomobiller gibi gürültülü makinelerden çıkan seslerin çevreye serbestçe yayılması engellenmelidir. Gözenekli malzemeye gelen ses dalgasının bir kısmı yansır, bir kısmı ise yapıya girer. Yapıya giren dalganın da bir kısmı emilirken kalanı iletilir. Yapıya giren ses gözenekler arasında azaltılır. Metal köpükler genellikle 1-5 kHz aralığındaki frekansları %99'a kadar emebilir. Japonya'da otoyollarda ve diğer yoğun yollarda trafik gürültüsünü azaltmak için ses emici olarak alüminyum köpük kullanılmaktadır. Kamu binalarının giriş hollerinde, iç ses emilimi için köpük paneller kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

4.9. Susturucular

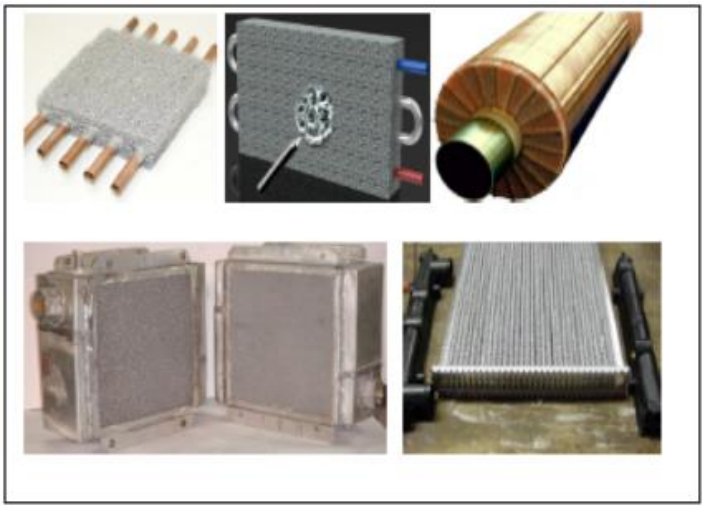
Gürültü önlemede önemli bir çözüm olarak kullanılan susturucular, açık ve kapalı metal köpüklerin kullanılabileceği alanlardan bir tanesidir. Yapılan çalışmalar özellikle kapalı hücreli metal köpüklerin önemli ölçüde ses absorbe etme kabiliyeti olduğunu göstermiştir. Şekil 4.9'de bu amaçla geliştirilen susturucular görülmektedir.



Şekil 4.9. Alüminyum köpükten yapılmış susturucular (Degischer vd., 2002).

4.10. Isı Değiştiriciler

Metal köpük ısı değiştiricilerin kanatlı ısı değiştiricilerin yerini alması çok zor olmayacaktır. Bunun nedeni çok benzer özelliklere sahip olmaları ve metal köpüklerin birim hacmindeki yüzey alanlarının, aynı boyuttaki konvansiyonel ısı değiştiricilere oranla oldukça fazla olmasıdır (Sertkaya, 2008). Şekil 4.10'da yer alan alüminyum köpük malzemeden imal edilen ısı değiştiriciler köpük malzemelerin ısı transferi alanındaki kullanımına örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 4.10. Alüminyum köpük ısı değiştiriciler (Girlich, 2006).

4.11. Eşanjörler ve Soğutma Makinaları

Alüminyum veya bakır esaslı metal köpükler yüksek ısı iletkenliğine sahip olduklarından ısı eşanjörü olarak kullanılabilmektedirler. Açık hücreli metal köpükler içerisinden geçirilen gaz veya sıvı kontrollü olarak soğutulabilir veya ısıtılabilir, basınç düşüşleri minimize edilebilir. Bilgisayar çipleri ve mikro elektrik cihazların soğutulması için yine açık hücreli köpük metaller kullanılabilmektedir. Termal iletkenliği yüksek metallerden akış direnci yüksek olacak şekilde gözenek yoğunluğu ve boyutu ayarlanmış metal köpüklerle yapılan uygulamalar bu anlamda başarılı olacaktır (Evans, Hutchinson & Ashby, 1999).

4.12. Alev Durdurucular

Hücresel metaller, hem gözenek çeperlerinde oluşan yüksek ergime derecesine sahip oksitler nedeniyle hem de gaz geçişine engel olacak yapıları nedeniyle yanıcı gazların alev yayılımını durdurmak için kullanılmaktadır. Açık hücreli köpükler saniyede 500 metre ilerleyen yangını, durdurma kapasitesine sahip olduğu, herhangi bir alev meydana geldiğinde bu malzemeler sayesinde alevlerin yüksek hızlarda ilerleyemediği literatürde belirtilmektedir. Metal köpükler pratikte yanıcı gazlar taşıyan, borularda kullanılmaktadır (Banhart, 2001).

BÖLÜM 5

METAL KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.1.Metal Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Gözenek oranı yaklaşık olarak %40-98 hacim aralığında olan metalik köpükler elverişli mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli mühendislik uygulamaları için yeni bir malzeme sınıfı haline gelmiştir. Şimdiye kadar, gözenekli metal yapılar için birçok uygulama fikri veya uygulama alanları olmuştur. Bu uygulamalar içerisinde kimyasal işlem için filtre ya da ısı eşanjörü, otomotiv uygulamalarında darbe enerjisi emici olarak kullanımı gösterilebilir. Ayrıca ses ve ısı yalıtımı, hafif yapı veya enerji emilimi ve titreşim sönümleme özellikleri göz önüne alındığında metal köpük malzemeler diğer alanlarda da kullanımı artan malzemelerdendir. Fiziksel ve mekanik özelliklerinden, özellikle korozyon direncinden ve düşük ısı iletkenliğinden ve havacılık ve otomotiv endüstrisindeki uygulamaları için tercih edilir (Zhang & Zhang, 2019).

Metalik köpükler farklı şekillerde üretilebilse de, bugüne kadar çoğunlukla hala yüksek maliyet veya düşük kalite ile karakterize edilirler. Bununla birlikte, son birkaç yılda kalite kontrol ve maliyet düşürme konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Fırsatları değerlendirmek ve bu köpüklü malzemeyi yenilikçi mühendislik uygulamaları için uygulamak, metal köpüklerin özelliklerini modelleme ve deneysel doğrulama ile değerlendirmek çok önemlidir. Şekil 5.1'de farklı üretim yöntemleri ile üretilen her bir köpüğün hücresel görüntüsünün detayları gösterilmiştir. Bu farklı hücresel yapılarından dolayı farklı mekanik özellikler sergilemektedirler.

Metalik köpükler gözenekli yapıları sebebiyle hafif yapıdadır ve rijitlik-ağrılık oranları yüksektir. Bu özellikleri, metal köpüklere eş yönlü olarak mekanik enerji absorbe etme, iyi ısı ve titreşim izolasyonu sağlamaktadır (Başpınar &Yurtçu, 2011).

Çizelge 5.1'de Alüminyum malzeme ile Alüminyum köpük malzemenin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma tablosuna bakıldığında köpük malzemelerin yoğunluk başta olmak üzere üstün mekanik özellikleri gösterilmiştir.

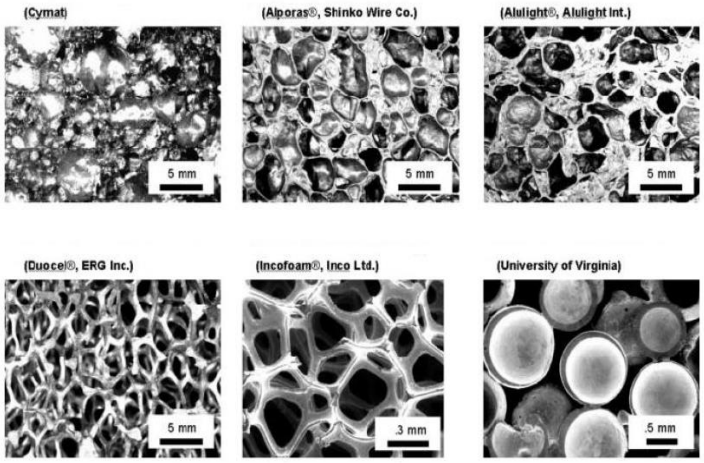
Çizelge 5.1. Alüminyum ve alüminyum köpük malzemelerinin bazı mekanik özellikleri (Babcsan, Leitlmeier & Degischer, 2003)

Malzeme	Alüminyum	Alüminyum Köpük
Yoğunluk ρ, (g/cm^3)	2,7	0,07 - 0,95
Çekme Mukavemeti (MPa)	100 - 300	0,04 - 30
Elastik Modul, E (GPa)	70	0,02 - 14
Özgül Bükülme Rijitliği ($\sqrt{E}/\rho$)	3,1	2 - 3,39
Enerji Absorbe Kapasitesi (kJ/lt)	–	0,05 - 20
Ses Sönümleme (%)	0	10 - 90
Kayıp Faktörü (η)	10^{-4}	0,3 - 0,002
Isıl İletkenlik (W/m.K)	236	0,3 - 11
Direnç (μΩ.cm)	2,65	20 - 3000

Metal ve polimer köpüklerin yapısal uygulama alanları kesişmektedir. Bu sebeple metal ve polimer köpüklerin basma ve enerji emme özellikleri karşılaştırılabilir. Polietilen ve alüminyum köpük malzemelerden benzer yoğunluğa sahip numuneler oluşturulup yapılan basma deneyleri, metal köpüğün basma gerilmesinin üç kat yüksek olduğunu göstermiştir. Metal köpükler deformasyon enerjisini plastik deformasyona dönüştürürler. Polimer köpükler ise depo ettikleri deformasyon enerjisini yükün kalkmasıyla serbest bırakırlar (Yu, Eifert, Baumeister & Banhart, 1998). Çizelge 5.2'de alüminyum köpük malzemelerin üretim yöntemine göre farklılık gösteren mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Ticari metalik köpük malzemelerin bazı özellikleri (Çağlar, 2009)

Özellikler	Cymat	Alulight	Alporas	ERG	Inco
Malzeme	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
İzafi Yoğunluk, ρ / ρ_0	0,02 - 0,2	0,1 - 0,35	0,08 - 0,1	0,05 - 0,1	0,03 - 0,04
Yapı	Kapalı Hücre	Kapalı Hücre	Kapalı Hücre	Açık Hücre	Açık Hücre
Young Modülü, E[MPa]	0,02 - 20	1,7 - 12	0,4 - 1	0,06 - 0,3	0,4 - 1
Poisson Oranı, v	0,31 - 0,34	0,31 - 0,35	0,31 - 0,36	0,31 - 0,37	0,31 - 0,38
Basma Mukavemeti, σ_C [MPa]	0,04 - 7	1,9 - 14	1,3 - 1,7	0,9 - 3	0,6 - 1,1
Çekme Mukavemeti, σ_T [MPa]	0,05 - 85	2,2 - 30	1,6 - 1,9	1,9 - 3,5	1 - 2,4
Kırılma Tokluğu, K_{IC} [Mpa.$m^{1/2}$]	0,03 - 0,5	0,3 - 1,6	0,1 - 0,9	0,1 - 0,2	0,6 - 1
Isıl İletkenlik, q [W/m.K]	0,3 - 10	3,0 - 35	3,5 - 4,5	6,0 - 11	0,2 - 0,3



Şekil 5.1. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen hücresel metallerin topoloji örnekleri (Haydn, 2002).

5.2. Metalik Köpüklerin Mekanik Özelliklerini Belirleyen Parametreler

5.2.1.Göreceli Yoğunluk

Hücresel malzemeleri karakterize eden en belirgin özellikleri göreceli yoğunluklarıdır.

Göreceli yoğunluk (ρ^*/ρ_s) hem köpüğün imal edildiği malzemenin yoğunluğuna hem de yeni oluşan yapının yoğunluğuna bağlıdır. Kısaca köpük malzemenin yoğunluğunun (ρ^*)

hücre duvarını oluşturan malzemenin yoğunluğuna (ρ_s) oranıdır. Genel olarak Hücresel malzemelerin yoğunluğu 0.1- 0.9 aralığına sahiptir. Çizelge 5.3'te bazı köpük malzemelerin göreceli yoğunlukları gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Bazı hücresel malzemelerin göreceli yoğunlukları (Dumais, 2009)

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

5.2.2. Gözenek Boyutu

Gözenek boyutu hücresel metallerde mekanik özellikleri önemli oranda etkileyen parametrelerdendir. Gözeneklerin düzgün küresel yapıda veya düzensiz olması da matematiksel model oluşturulmasında oldukça önemlidir. İki boyutlu hücre yapısı olan (bal peteği yapısı) malzemelerin modellenmesi, düzensiz geometrik hücre yapısı olan üç boyutlu malzemelere nispeten daha kolaydır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri aynı zamanda açık veya kapalı gözenek yapısına sahip olmalarına da önemli ölçüde bağlıdır.

5.2.3. Gözenek Şekli

Eş eksenli hücre yapısına sahip malzemeler izotropik özellik gösterirken az miktarda uzamış veya düzleşmiş hücreli yapıya sahip malzemeler anizotrop özellik gösterirler (Degischer, H.P. & Krist, 2002).

5.2.4. Gözenek Geometrisi

Malzemelerin geometrik iç yapısının ve fiziksel özelliklerinin ısı iletim katsayısı, elektriksel direnç gibi özellikler üzerindeki etkisi olduğu hakkında pek çok deneysel ve teorik çalışma mevcuttur. Örneğin, Ajyazov ve Domashney 1968, sıcak şekillendirilmiş titanyum nitritte gözenekliliğin ısıl iletkenlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. (Aivazov & Domashhev, 1968) Oda sıcaklığındaki, farklı hücresel yapıya sahip metal parçaların elektiksel ve ısıl iletkenliklerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Deneylerden teorik sonuçlarla uyum içinde sonuçlar elde edilmiştir. Aiyazov ve Domashney ısıl iletkenlik için, toz geometrisinden bağımsız deneysel bir ifade önermişlerdir:

$$\frac{c}{c_s} = \frac{1-\epsilon}{1+n\epsilon^2} \qquad (5.3)$$

Bu bağıntıda ;

c: Hücresel katının ısıl iletim katsayısı, W/mK

c_s: Katının ısıl iletim katsayısı, W/mK

ϵ: Gözeneklilik (%)

n: deneysel sabittir

Dolayısıyla eşitlik;

$\frac{c}{c_s} = \frac{1-\epsilon}{1+11\epsilon^2}$ olarak yazılabilir. *(5.4)*

5.2.5. Elastik Modül

Metal köpüğün doğrusal elastik özellikleri açık ya da kapalı hücreli oluşuna bağlıdır. Deneysel çalışmalar açık ve kapalı hücreli köpüklerin farklı özelliklerde olduğunu belirtmektedir. Açık hücreli köpükler temel olarak hücre duvarı eğilmesi ile şekil değiştirirken kapalı hücreli köpüklerde şekil değişimi hücre iç çeperlerinin deformasyonu ile üç boyutlu şekil değişimi ile gerçekleşir. Gibson ve Ashby'nin (1997) geliştirdiği hücre modeline göre gözenekli malzemelerin elastik modülleri ve plato gerilmeleri ile göreceli yoğunlukları aşağıdaki eşitliklerle ilişkilendirilmiştir.

Açık Hücreli Köpükler;

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (5.5)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \sim 0{,}3 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5.6)$$

Kapalı Hücreli Köpükler;

$$\frac{E}{E_s} = \Phi\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1+\Phi)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + \frac{P_0(1-2\nu^*)}{E_s(1-\frac{\rho^*}{\rho_s})} \quad (5.7)$$

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} \sim 0{,}3\left(\Phi\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} + 0{,}4(1-\Phi)\frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (5.8)$$

E: Hücresel malzemenin elastiklik modülü

E_s: Hücresel malzeme hücre duvarlarını oluşturan malzemenin elastik modülü

ρ^*: Hücresel malzemenin yoğunluğu

ρ_s: Hücresel malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin yoğunluğu

σ_{pl}: Plato Gerilmesi

σ_{ys}: Hücresel malzemenin hücre duvarlarını oluşturan malzemenin akma gerilmesi

Φ: Kapalı hücreli malzemenin gözenek duvarlarındaki katı oranı

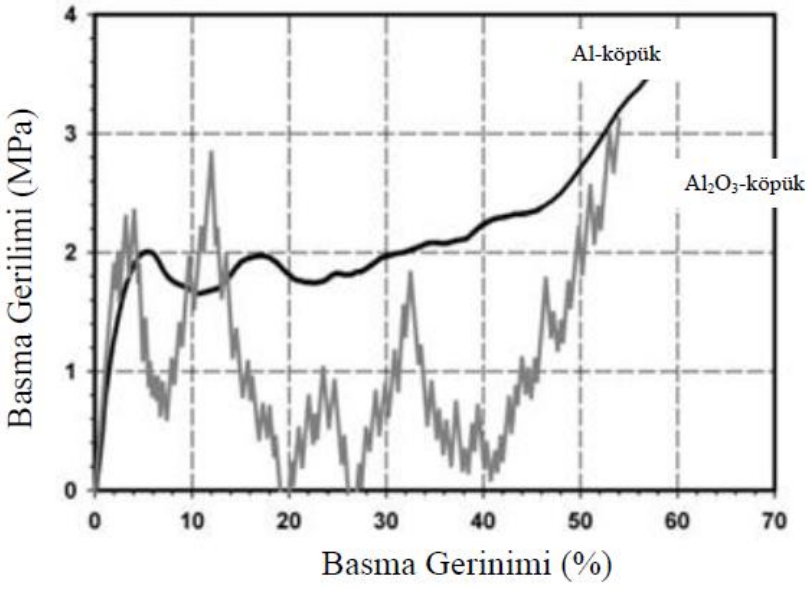
P_0: Atmosfer Basıncı

C_1 sabiti bütün geometrik orantı sabitlerini temsil etmekte ve yapılan çalışmalarda bu sabitin yaklaşık 1 olduğu belirtilmiştir (Queheillalt, Katsumura, Wadley & H.N.G., 2004).

5.2.6. Basma Davranışı

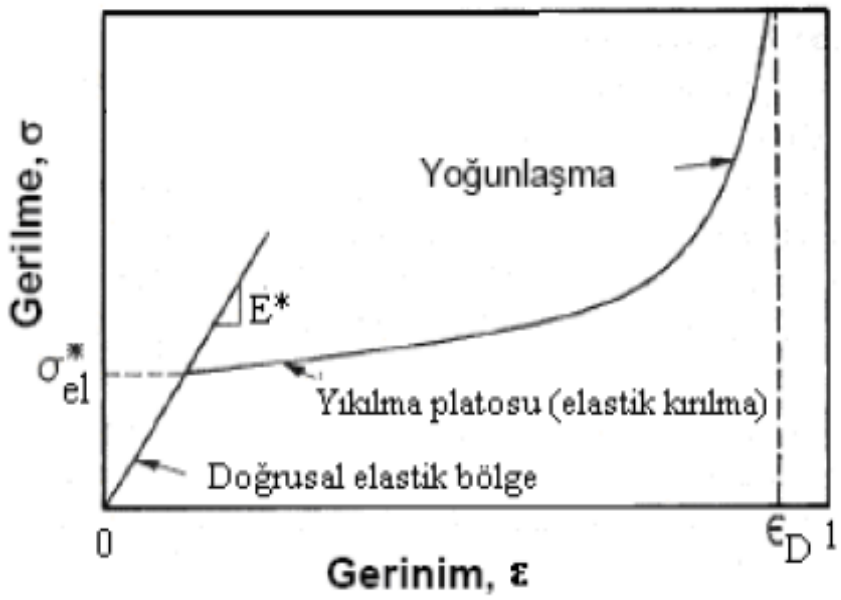
Hücresel metaller basmada, Şekil 5.2'de gösterildiği gibi bir 'plato bölgesi' ile benzersiz bir gerilim- gerinim eğrisi göstermektedir. Buna göre gerilim, gerinimin geniş bir bölümü dışında neredeyse eşittir. Bu davranış, enerji absorbsiyon uygulamaları için nispeten sabit düşük gerilme ile deformasyonun büyük bir miktarı absorbe edildiğinden dolayı hücresel metalleri ilginç kılar. Malzemede, hangi köpükten yapıldığına bağlı

olarak farklı deformasyon mekanizmaları (elastomerik, kırılgan ve sünek davranış) gözlemlenebilir. Metalik köpükler genellikle büyük bir sünek davranış gösterirler.

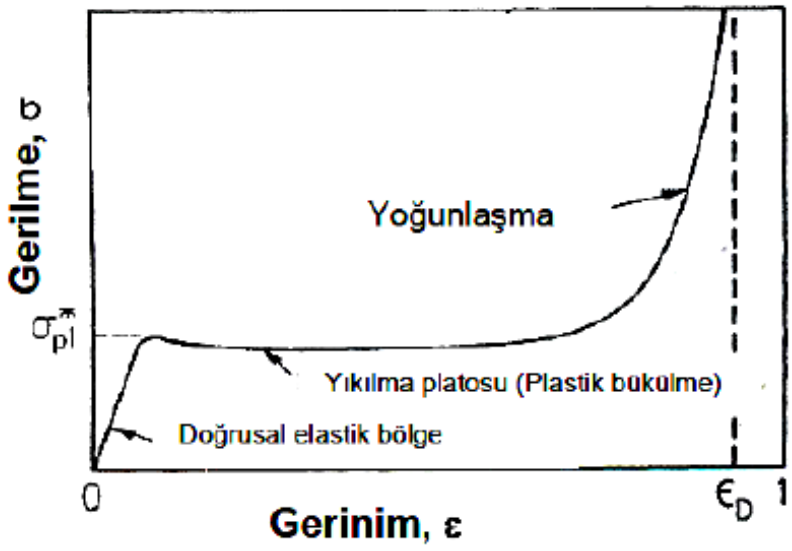


Şekil 5.2. Sünek bir alüminyum köpük ve gevrek bir alüminyum köpük için basmada, gerilim-gerinim eğrisi (Ashby vd., 2000).

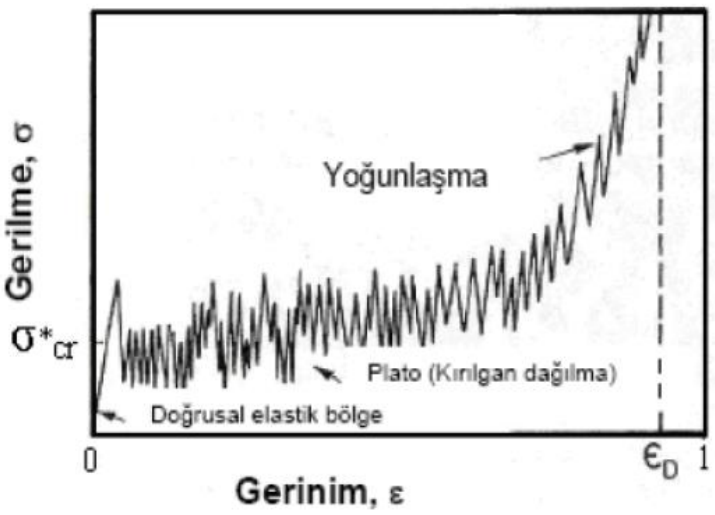
Şekil 5.3'te elastomerik, Şekil 5.4'te elastik- plastik ve Şekil 5.5'te elastik köpüklerin basma gerilim-gerinim grafikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi kırılgan köpüklerde hücre duvarlarının kırılmasıyla gerilimde ani düşüş yaşanmakta, sonrasında hücrelerin yığılmasıyla tekrar gerilimde artış olmaktadır. Bu nedenle dalgalı bir yapıya sahiptir. Kauçuk köpükle elastomerik; metal köpükler elastik-plastik; seramik köpükler ise elastik- kırılgan basma davranışı gösterirler (Yu, Eifert, Baumeister & Banhart, 1998).



Şekil 5.3. Elastomerik köpüğün basma gerilim-gerinim eğrisi (Ashby vd., 2000).



Şekil 5.4. Elastik-Plastik köpüğün basma gerilim-gerinim eğrisi (Ashby vd., 2000).



Şekil 5.5. Elastik-Kırılgan köpüğün basma gerilim-gerinim eğrisi (Ashby vd., 2000).

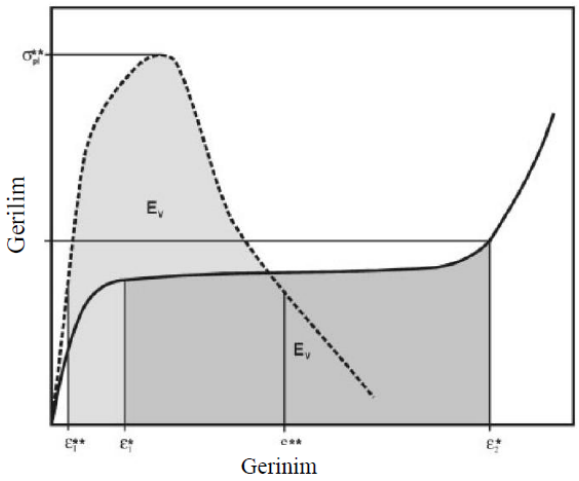
Grafikler üç alana bölünebilir. Elastik deformasyon bölgesi, yüksek plastik gerinimin olduğu plato bölgesi ve yoğunlaşma bölgesi. Köpükler önce düşük gerilimlerde elastik deformasyona uğrarlar. Boşluklar yığılana, yani yoğunlaşma olana kadar plastik deformasyon olur. En son olarak yoğunlaşma gerçekleşir. Bu bölgede, uzamada kademeli olarak artış olur. Bu kademeli yoğunlaşma yüksek gerinimlere kadar gerçekleşmektedir. Böylece, yüksek miktarda enerji emilimi elde edilmektedir (Vendra, Rabiei & Ferguson, 2013).

Plastik deformasyon, deformasyon bantlarında veya malzeme yoğunlaşmaya ulaşıncaya kadar genelde yüksek hücrelerde oluşan yığılma bantlarında oluşur. Bu bantlar büyük gözeneklerde başlar ve yükleme eksenine dik olarak yayılırlar. Gözeneklerin dağılımı homojen olmazsa yığılma bantlarının yeri tahmin edilemez (Vendra vd., 2013).

5.2.7. Darbe Davranışı

Hücresel metaller (özellikle köpükler) ve bazı polimer köpüklerin basma davranışlarından dolayı özellikle enerji absorbsiyon uygulamaları için uygundur. Bu uygulamalar için metal köpüklerin avantajları; nispeten düşük yoğunluk, ayarlanabilir plato gerilim seviyesi iyi, sıcaklık direnci ve yanmazlık gibi özelliklerdir. Bu nedenle taşıma ve paketleme endüstrisi ürünleri için metalik köpükler kullanılabilir.

Enerji soğurma sistemlerindeki uygulamalar, metal köpüklerin kullanımı için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Kinetik enerjiyi yüksek bir stres seviyesi oluşturmadan emme özelliği, çeşitli yapısal uygulamalar ile metal köpüğü sağlar. Kinetik enerjiyi absorbe ederken tepe stresi azaltma kabiliyeti köpükleri genel olarak mükemmel bir enerji emici yapar. Özellikle metal köpükler yüksek bir mukavemet sergilerler ve bu nedenle verimli bir şekilde yüksek miktarda enerji emerler. Şekil 5.6'da iki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.6. İki farklı enerji emicinin basma gerilim-gerinim eğrisi (Degischer & Kristz, 2002).

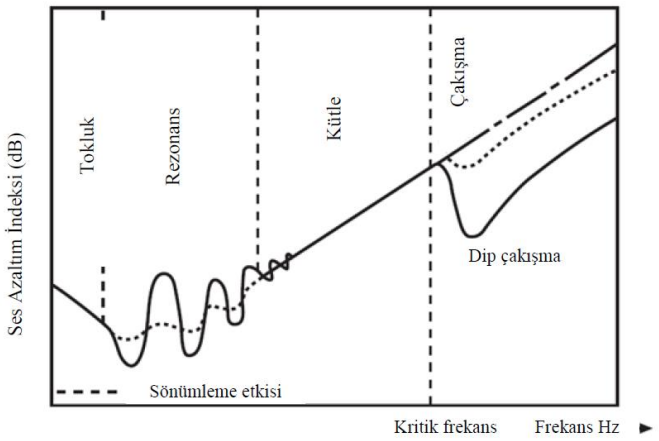
5.2.8. Ses Emme

Ses absorbsiyonu uygulamalarında genellikle polimer köpükler kullanılır (Endler, Lahner & Hoffmann 1997).

Diğer metal malzemelerde olduğu gibi metal köpüğe ulaşan ses dalgalarının bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı malzeme tarafından soğurulur bir kısmı da iletilir. Metal köpükler de soğurma oranı bazı frekanslarda %99 a kadar çıkabilir (genellikle 1-5 Hz). Bu da ses izolasyonun ve soğurulmasının oldukça önemli olduğu otomotiv, havacılık endüstrisinde önemli bir araştırma konusudur (Shinko Wire Co,1998).

Malzemenin ses yalıtım performansı, ses iletim katsayısı ile ses azaltma endeksi doğru orantılı olduğu için logaritmik skalada bu değer, ses azaltma endeksi açısından

tanımlanmıştır. Bir panel için ses iletim katsayısı, ses yoğunluğu olayında iletim oranı tarafından belirlenir. Ses azaltma endeksi, frekansa, yapının malzemesine ve geometrisine bağlıdır. Belirli bir malzeme için ses azaltma endeksi, belirli frekans aralığında önem kazandığı için çeşitli mekanizmalar tarafından kontrol edilir. Şekil 5.7'de iletim kaybı eğrisinin genel formu görülmektedir (Degischer & Kristz, 2002).



Şekil 5.7. Belirli bir malzeme ve yapı geometrisi için frekansın, bir panelin ses azaltım endeksine bağlılığı (Degischer & Kristz, 2002).

5.2.9. Termal ve Elektriksel Davranış

Hücresel metallerde, polimer ve seramik matrisin, elektriksel iletkenliği için farklılıklar vardır. Bu seramik ve polimerik köpükler, yalıtım ve yapısal muhafazalar için kullanılabilir. Köpük metallerin elektriksel iletkenliği gözeneklilik ile önemli derecede azalmasına rağmen, hala iyi elektriksel topraklama, düşük elektrik teması veya elektromanyetik dalgaları emme kapasitesini sağlamak için oldukça yeterlidir. Açık hücreli yapı ile metalik sünger olması durumunda, büyük erişilebilir alanda elektrik potansiyelini dağıtmak için iletkenliğe izin verir ve bu da onları pil elektrotları için cazip hale getirmektedir. Hücresel nikeller, bu uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 5.4'te farklı üretim yöntemleriyle üretilmiş alüminyum köpüklerin yoğunluğu, termal ve elektriksel iletkenliği gösterilmiştir. Gaz kabarcıklarının varlığı, hücresel katıların elektriksel, termal ve akustik özelliklerini önemli derecede etkiler (Degischer & Kristz 2002).

Çizelge 5.4. Tedarikçi veri formundan alınan oda sıcaklığında ölçülmüş çeşitli yoğunluklardaki hücresel alüminyumun, elektriksel ve termal iletkenliği (Degischer & Kristz 2002).

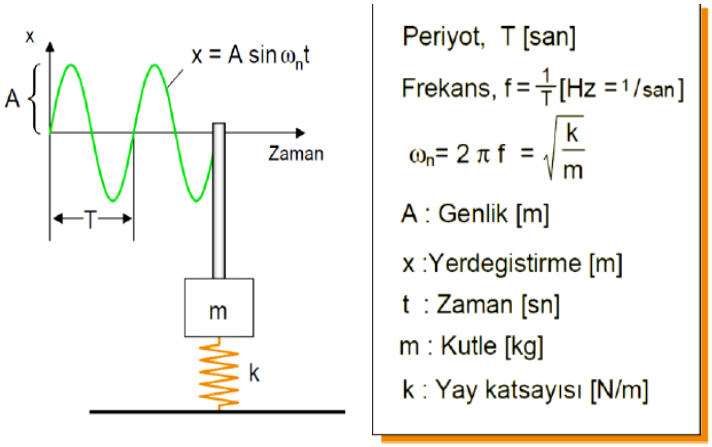
Tedarikçiler	Yoğunluk (kg/m^3)	Termal İletkenlik (W/mK)	Elektriksel İletkenlik (m/Ω.mm^2)
Alporas	570	–	9,9
	400		5
	300	–	3,8
	200	–	2,6
	94	–	1
Alulight	500	13	3,1
	400	10	2,6

BÖLÜM 6

TİTREŞİM

6. Titreşim Hareketi

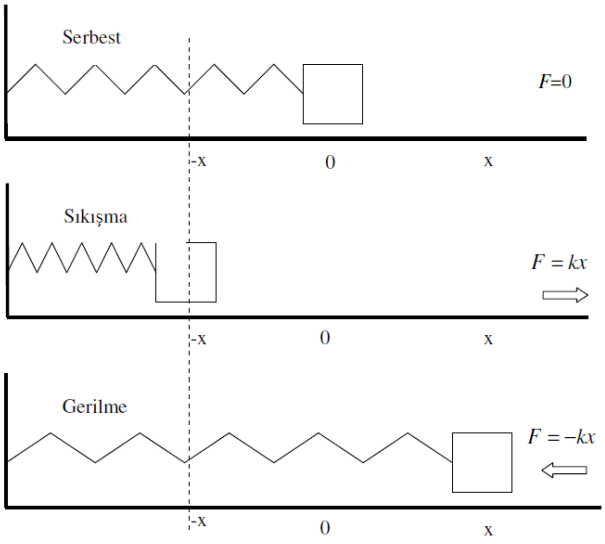
Titreşim, bir denge noktası etrafında ileri-geri hareket ile oluşan mekanik salınımlar olarak tanımlanabilir. Bu salınımlar periyodik olabileceği gibi rastgele de olabilir (Şekil 6.1.). Bazı sistemlerde titreşim gerekli olarak görülürken birçok sistemde istenmez, çünkü titreşim demek boşa harcanan enerji, ses ve gürültü demektir. Örneğin, içten yanmalı motorların çalışmasında, elektrik motorlarının ya da herhangi mekanik aracın çalışmasında oluşan hareketler istenmeyen titreşimleri üretir. Bu titreşimler motorlardaki dönen mekanik elemanların balanssızlığı, rulman hasarları, dişli hasarları, mekanik gevşeklik ve bunun gibi nedenlerden dolayı oluşur (Atakav, 2019).



Şekil 6.1. Yay kuvvet dengesi (Atakav, 2019).

Şekil 6.2’ de bir kütleye kuvvet uygulanmakta ve uygulanan kuvvetin etkisiyle yay sola doğru hareket ederek sıkışmaktadır. Kütle serbest bırakıldığında geri hareket

ederek başlangıç konumuna (denge konumuna) geri dönmektedir ve ardından yayın gerilimi kütlenin hareketine engel olana kadar kütle ileri geri hareketine devam eder. Eğer sistemde sönümleyici veya harici bir kuvvet yoksa bu hareket teorik olarak sonsuza kadar devam eder. Bu hareket titreşim hareketidir.



Şekil 6.2. Yay kütle dengesi (Atakav, 2019).

Bir yay ile sabit bir yere bağlı ilk blok, denge konumundan küçük bir *x* uzaklığı kadar uzaklaştırıldığında yay, cisim üzerine yer değiştirme ile orantılı:

$Fs = -kx$ *(6.1.)*

Şeklinde bir kuvvet uygular. Şekil 6.2.'deki kuvvet daima denge konumuna doğru yöneldiği ve yer değiştirmeye zıt olduğu için bu kuvvete geri çağırıcı kuvvet denir. Blok, Şekil 6.2'de *x=0* konumunun sağına hareket ettiğinde yer değiştirme pozitif ve geri çağırıcı kuvvet sola doğru yönelmiştir. Blok, *0* konumunun soluna doğru hareket ettiğinde yer değiştirme negatif ve geri çağırıcı kuvvet sağa doğru yönelmiştir.

Eşitlik 6.1. deki, Newton'un ikinci yasasını bloğun hareketine (Eşitlik 6.2.) uygulanırsa,

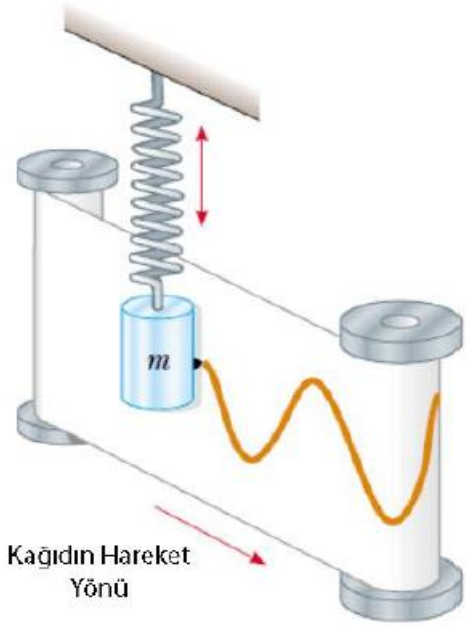
$Fs= -kx = ma$ *(6.2.)*

$$a= -\frac{kx}{m} \qquad (6.3.)$$

İvme değeri (Eşitlik 6.3.) elde edilir. İvme, bloğun yer değiştirmesi ile orantılıdır ve yönü yer değiştirmenin yönüne zıttır. Bu şekilde davranan sistemler basit harmonik hareket olarak adlandırılır.

6.1. Basit Harmonik Hareket

Cismin ivmesinin, cismin bir denge konumundan olan yer değiştirmesi ile orantılı olduğu ve zıt yönde yöneldiği her durumda cisim basit harmonik hareket yapar. (Serway & Beicher, 2000)



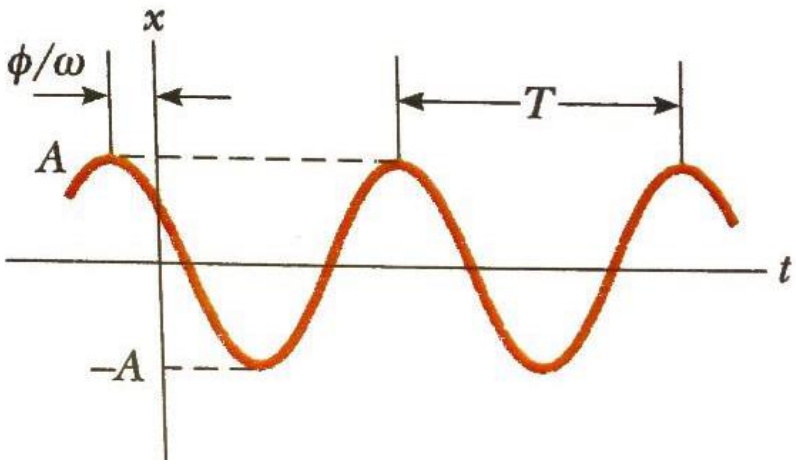
Şekil 6.3. Basit harmonik hareketi gösteren deneysel düzenek (Serway & Beicher, 2000).

Basit harmonik hareket gerçekleştiren bir deney düzeneği Şekil 6.3'te verilmiştir. Bir yayın ucuna bağlanmış olan *m* kütleli cisim ve bu cisme kâğıt üzerinde iz bırakması amacıyla bir kalem bağlanmıştır. Cisim basit harmonik hareket yaptığında, bu kâğıt cismin hareketinin doğrultusuna dik yönde kaydırılır ve kalem dalga şeklinde bir desen oluşturur. x ekseni boyunca hareket eden bir cismin, denge konumundan ölçülen x yer değiştirmesi Eşitlik 6.4.'te verilmiştir.

$$x=A\cos(\omega t+\varphi) \qquad (6.4.)$$

Cismin yer değiştirmesi Eşitlik 6.4.'e göre zamanla değişiyorsa, cisim basit harmonik hareket yapıyor denir. Burada A, ω ve φ sabittir. Bu sabitlerin fiziksel anlamları, Şekil 6.4.'te *x*' i t'nin fonksiyonu olarak çizilen grafikte inceleyebilirsiniz.

Şekil 6.4.'te oluşan desen, Şekil 6.3.'te verilen deney düzeneğinde oluşan desendir. *A*, oluşan harmonik hareketin genliğini gösterir ve cismin +*x* ya da -*x* yönündeki en büyük yer değiştirme değeridir. *ω,* sabiti harmonik hareketin açısal frekansıdır ve cismin radyan cinsinden bir saniye içerisinde taradığı açıyı gösterir. Sabit açı *φ*'ye faz sabiti ya da faz açısı denir ve cismin başlangıç yer değiştirmesi ve hızından yararlanarak elde edilir. Eğer cisim *t=0*'da *x=A* maksimum konumunda ise, bu durumda *φ=0* olur ve *x*'in *t*'ye göre eğrisi Şekil 6.4.(b)'de gösterildiği gibi olur. Cisim *t=0'*da başka bir konumda ise *φ* ve *A* sabitleri, *t=0* anında yer değiştirme değerini verir. *(ωt + φ)* büyüklüğüne hareketin fazı denir ve iki parçacıklı sistemlerin yaptığı hareketlerin karşılaştırılmasında kullanılır (Serway & Beicher, 2000).



Şekil 6.4. Basit harmonik hareket yapan bir parçacık için bir x-t eğrisi (Serway & Beicher, 2000).

Şekil 6.4'te kütlenin sıfır konumundan deplasmanının sonuna kadar olan hareketi ve tekrar sıfır konumuna dönmesi ve alt deplasmanına ulaşması ve sıfır konumuna dönmesi bir çevrimi oluşturduğu görülmektedir. Bir çevrimlik harekette bu sistemin titreşiminin ölçülmesi için gerekli olan tüm bilgi mevcuttur. Tekrarlanan cevrim hareketi periyodik veya harmonik olarak adlandırılmaktadır. Kütlenin deplasmanı ve geçen zaman arasındaki bağıntıyı bir sinüsoidal denklemle ifade edebiliriz (Arslan, 2010).

$X = x_0 \ sin \ \omega t$ *(6.5)*

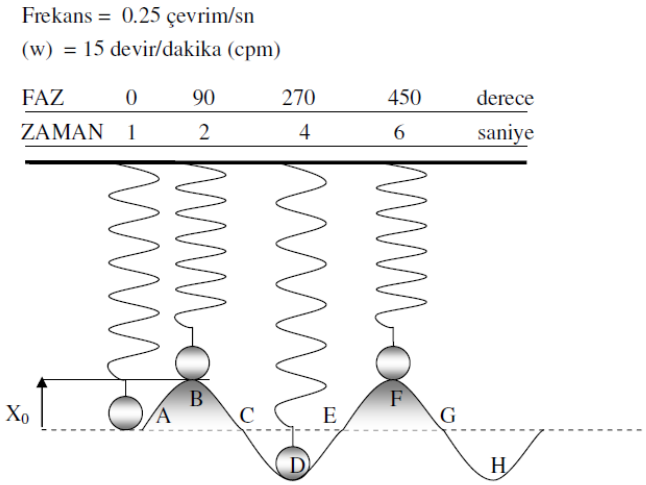
Burada;

X [m] : Verilen herhangi bir andaki deplasman,

$x_{0\,[m]}$: Maksimum deplasman,

ω [rad/sn] $= 2\pi f$;

f [Hz] : Frekans ; t [sn] : Zaman



Şekil 6.5. Basit harmonik dalga – zamana göre kütle-yay hareketinin geometrik yeri (Arslan, 2010).

Kütle yukarı ve aşağı hareket eder ve hız sıfırdan maksimuma değişir. Kütle hızı deplasman denkleminin zamana göre türevinden elde edilir. Şekil 6.5'te zamana göre kütle yay hareketinin geometrik yeri gösterilmiştir.

$$\text{Hız} = \frac{dx}{dt} = x_0 \,.\, \omega \,.\, \cos(\omega t) \qquad (6.6)$$

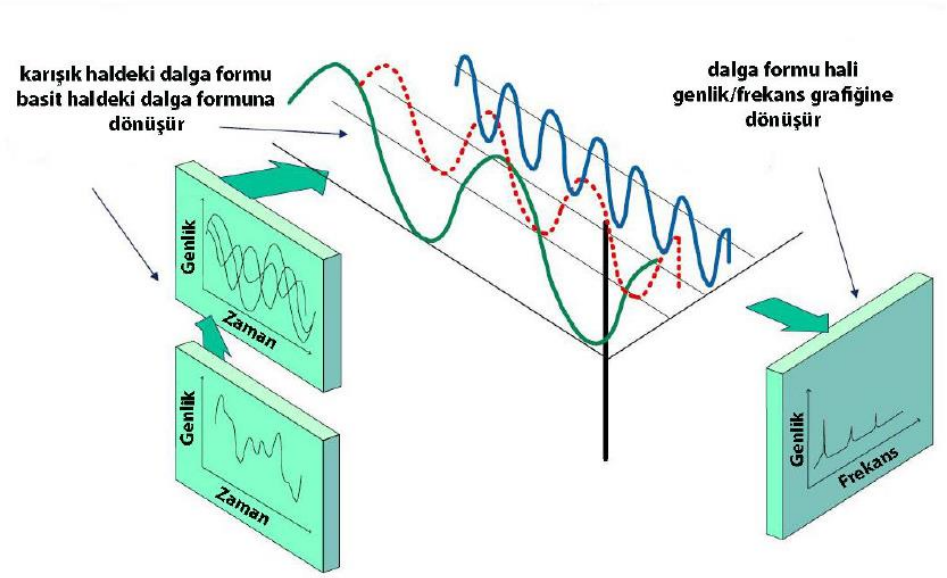
Benzer olarak kütlenin ivmesi de değişmektedir ve kütlenin ivmesi hız denkleminin zaman göre türevinin alınması ile elde edilir.

$$\text{İvme} = \frac{d(\text{hız})}{dt} = x_0 \,.\omega^2 . \sin(\omega t) \qquad (6.7)$$

6.2. Fourier Analizi (Fourier Dönüşümü)

Titreşim ölçümlerinde makinelerden toplanan titreşim verileri, tüm sinüsoidal dalgaların üst üste eklenerek oluşturdukları karmaşık yapılı dalga şeklindedir. Titreşim analizinin yapılabilmesi için karmaşık yapılı dalgayı oluşturan tüm sinüsoidal dalgaların ayrıştırılması gerekmektedir. Fourier Dönüşümü sayesinde karmaşık yapılı dalgayı oluşturan sinüsoidal dalgalara ulaşılır (Girdhar, 2004).

Fourier Dönüşümü Şekil 6.6'da gösterildiği gibi genlik-zaman şeklindeki karmaşık yapılı dalga formunu genlik-frekans spektrumuna dönüştürür. Fourier dönüşümüne Spektral Analiz' de denir. Bu dönüşüm FFT (Fast Fourier Transform) analizörleri aracılığıyla yapılır.



Şekil 6.6. Fast fourier dönüşümü (Köse, 2009).

6.3. Titreşim Parametreleri

Titreşim hareketi salınımlı bir harekettir. Bu tip hareketler bir denge veya referans nokta etrafında yapılan hareketlerdir ve harmonik hareket adını alırlar. Yer değiştirme, cismin durgun pozisyonuna göre o anki pozisyonunu belirtir. Birbiri ile bağlantılı dört titreşim parametresi vardır: Frekans, ivme, hız ve yer değiştirme. Tek frekans değeri için bu parametrelerden ikisi biliniyorsa, geri kalan parametreler hesaplanabilir.

6.3.1. Periyot

Titreşim hareketinin bir tam turunun ne kadar süre içerisinde gerçekleştiğinin ölçüsüdür. Titreşimin tekrarlanma süresi de olarak tanımlanır. Birimi saniyedir. T ile gösterilir.

6.3.2. Frekans

Titreşim hareketinin birim zamanda tekrarlanma sayısıdır. Frekans aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

- Titreşim hareketinin birim zamanda tekrarlanma sayısıdır. Birimi Hertz (Hz)' dir.
- Titreşim hareketinin bir dakika içinde tekrarlanma miktarıdır. Birimi RPM (Revolution per minute). RPM / 60 = Hz olarak dönüşüm yapılabilir.

6.3.3. Açısal Frekans

Dönme hareketi yapan bir cismin birim zamanda kat ettiği yolun radyan cinsinden değeridir. Birimi rad / sn 'dir. $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ şeklinde ifade edilir.

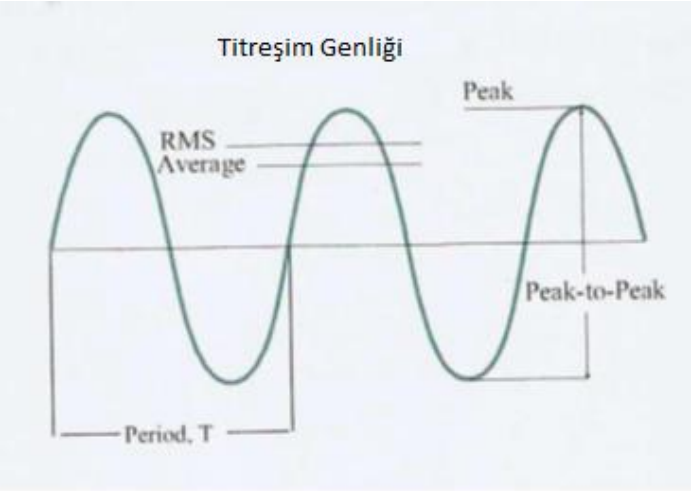
6.3.4. Genlik

Titreşimin şiddetini gösterir ve sinüs eğrisinin 0 noktası ile tepe noktası arasındaki mesafesidir. Bir makineye etkiyen tüm kuvvetlerin oluşturduğu titreşimlerin toplam büyüklüğü olarak tanımlanır. Şekil 6.7'de titreşim genliği grafiğinde belirtilen noktalara bakılarak titreşimin genlik değeri yorumlanabilir.

Pik, tepe (peak): Sinyalin bir yönde eriştiği maksimum değerdir.
Pik-Pik (P-P): Sinyalin (+) tepe noktası ile (-) tepe noktası arasındaki uzaklığı temsil eder. Bir makine ya da elemanının titreşiminin toplam genliğini verir. Pik değerinin iki katına eşittir.
Etkin değer (RMS): Adını 'root mean square' teriminin baş harflerinden almıştır. Bir sinyalin
$t_1 - t_2$ Aralığındaki değerlerinin karelerinin ortalamasının kareköküdür. (Hancı, 2009)

RMS = $\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T X^2\,(t)dt}$

RMS = 0.707 x Tepe değer ifadesi olarak da hesaplanabilir ve RMS ile tepe değer arasında dönüşüm yapılabilir. (Hancı, 2009)



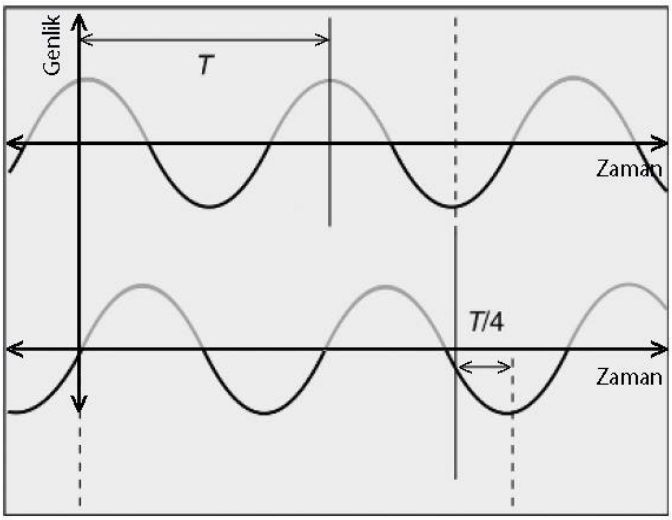
Şekil 6.7. Genlik-zaman eğrisindeki rms, tepe ve tepeden tepeye değerleri (Mobius Institute, 2005).

6.3.5. Faz (Faz Gecikmesi) ve Faz Açısı

Özdeş frekans ve genlik değerine sahip iki dalganın tepe noktası arasında T/4 birim kadar bir zaman farkı vardır. Bu gecikmeye faz ya da faz gecikmesi denir ve faz açısı ile ölçülür. T birim zaman aralığındaki bir tam çevrim tamamlandığı için faz açısı 360° dir. Bu nedenden dolayı T/4 zaman dilimindeki faz açısı 90° dir (Girdhar, 2004).

6.3.6. Dalga Formu

Yer değiştirme, hız ve ivme kavramları sinüs ve kosinüs dalgaları şeklinde gösterilebilir. Dalga formu hareketin zamana karşı anlık durumunu gösteren grafik ya da görseldir. Şekil 6.8'de verilen grafikte iki farklı dalga formu arasındaki faz gecikmesi üzerinden dalga formu gösterilmiştir (Girdhar, 2004).



Şekil 6.8. Özdeş frekans ve genlik değerindeki iki farklı dalga arasındaki faz gecikmesi (Girdhar, 2004).

6.3.7. Yer Değiştirme

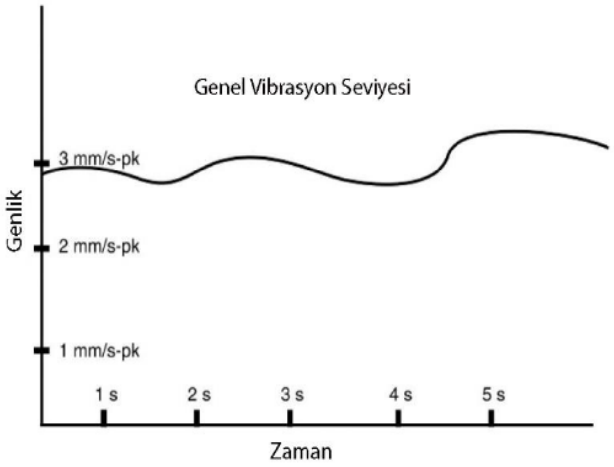
Titreşim hareketi yapan kütlenin hareket ettiği toplam mesafedir. Sinüsoidal dalga formundaki alt tepe nokta ile üst tepe nokta arasında kalan dik uzunluktur. Tepeden tepeye (Peak to Peak) olarak da adlandırılır. SI birim sisteminde mikron (1/1000 mm) birimi kullanılarak ölçülür.

6.3.8. Titreşim Hızı

Titreşim hareketi yapan kütle hareket ettikçe hızı değişir. Hareketin alt ve üst sınırlarında hızı sıfırdır. Hızın sıfır olduğu noktadan sonra kütlenin hareket yönü değişir. Kütle nötr pozisyondan geçtiği anda hızı maksimum olur. Bu maksimum hıza kütlenin ulaşmış olduğu hızın tepe (Peak) noktası denir. Sinüsoidal dalga formundaki alt tepe nokta ile nötr, ya da aynı şekilde nötr noktası ile alt tepe nokta arasında kalan dik uzunluktur. Birimi mm/s'dir.

Uluslararası Standartlar Teşkilatı (ISO), makinelerdeki titreşim değerlerinin ölçülürken hız-RMS (Root Mean Square) yani hızın ortalama karekökü olarak

değerlendirilmesini önermiştir. Bunun nedeni hızın değişken fonksiyonuna karşılık daha efektif bir değer elde edilmesidir. Daha yüksek hız–RMS değeri, genellikle benzer bir hız-tepe değerinden daha fazla hasar vericidir (Girdhar, 2004).
Hızın zamana bağlı değişimi Şekil 6.9'da verilen grafikte görülmektedir (Girdhar, 2004).



Şekil 6.9. Hızın değişken fonksiyonunu gösteren grafik (Girdhar, 2004).

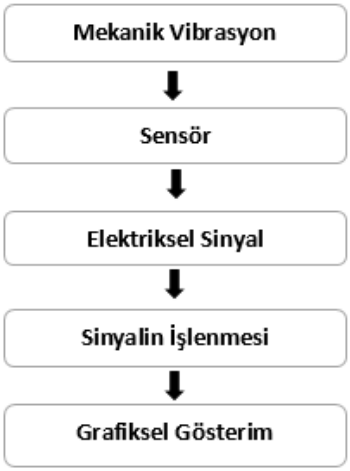
6.3.9. Titreşim İvmesi

Titreşim ivmesi, titreşim hızındaki değişim oranıdır. Yay-kütle düzeneğinde hızın sıfır olduğu alt ve üst tepe noktalarında titreşim ivmesi maksimum değere ulaşır. İvme normalde *g* olarak gösterilir. *g* değeri yeryüzündeki yer çekimi kuvvetinin oluşturduğu hızlanmadır ve 9,80665 *m/s* değerine eşittir. Dalga formunun tepe noktasını (peak) referans alır (Girdhar, 2004).

6.4. Titreşim Analizi ve Ölçümü

Titreşim kaynaklı sistemlerde bunu saptamak ve çözüm yolu aramak için öncelikli olarak titreşim analizi yapılır. Bu titreşim analizi yapılırken Şekil 6.10'da gösterilen adımlar izlenir.

- Ekipman titreşim verilerinin toplanması
- Titreşim sinyalinin bir elektriksel sinyale dönüştürülmesi
- Elektriksel sinyalin bileşenlere ayrılması
- Titreşim verisi ile ilgili bilgi ve dokümanların oluşturulması



Şekil 6.10. Titreşim analizi aşamaları

6.4.1.Titreşim Sinyallerinin Toplanması- Titreşim Transdüserleri

Yapısal titreşimlerin ölçülmesi için transdüser ve titreşim toplayıcı kullanılır. Transdüser, bir dönüştürücüdür ve titreşim gibi bir enerji tipini farklı bir enerji tipine (elektrik akımı veya voltaja) dönüştüren bir aygıttır. Şekil 6.11'de farklı ölçüm çeşitlerindeki vibrasyon transdüserleri gösterilmiştir.



Şekil 6.11.Vibrasyon transdüserleri

Genellikle kullanılan trandüserler; Hız ölçerler (Velocity Transducers), İvme Ölçerler (Accelermeters) ve Eddy Probları olarak adlandırılır. Her bir transdüser tipinin belirli uygulamalar için farklı avantajları ve sınırları bulunmaktadır.

6.4.2. Hız ve İvme Ölçerler

Dönen ekipmanın titreşiminin izlenmesi hız ölçümü yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu tipteki bir titreşim transdüseri birçok analizöre kolaylıkla monte edilebilir ve diğer sensörlere göre daha az maliyete sahiptir.

6.4.3. Titreşimlerin Elektrik Sinyaline Dönüştürülmesi

Titreşim transdüserleri bir ekipmanın fiziksel titreşim hareketini elektrik sinyaline çevirir. Temasla çalışırlar ve titreşim seviyesinin görülmesini (analog veya dijital olarak) sağlarlar. Elde taşınan titreşim ölçerlerde algılama için genelde ivme ölçerler bazen de hız ölçerler kullanılmaktadır. Bu cihazla ivme, hız ve deplasman bilgileri elde edilebilir. Bunlar ufak, hafif ve günlük kullanımlar için uygundur.

6.4.4. Sürekli Titreşim Kaynaklı Çalışan Yapılar

Sürekli titreşim ile çalışan elemanlar kullanım yerlerine göre bazı durumlarda mekanik problemlere yol açarken bazı durumlarda da ergonomik yaşam kalitesini etkilemektedir. Yapılarda meydana gelen titreşimler insan yaşamını olumsuz yönde etkileyen unsurlardan bir tanesidir. Yapının ve içindeki titreşim kaynaklarının çalışması sonucu yapılar işlev ve hasar yönünden, kullanıcılar ise sağlık ve konfor yönünden etkilenebilmektedir. Depremler, fırtınalar gibi yapıların titreşime maruz kalmasına sebep olan doğal afetler dışında; ulaşım araçlarının oluşturduğu trafik, inşaat faaliyetleri, kazılar gibi dış faktörler, kullanıcıların hareketleri, makinelerin çalışması gibi yapı içi faktörler

yapıların birbirinden farklı frekans, genlik ve yönlerde, 0,1 Hz – 500 Hz arasında titreşimine sebep olmaktadır (Işık & Kuruşçu, 2018).

Taşıtlarda meydana gelen titreşim yol zeminindeki düzensizlikler, su hattı kapakları, tümsekler, taşıtların hareketi esnasında titreşimi önemli ölçüde oluşturan ve arttıran etkenlerdir. Araçlar zemine paralel yönde hareket ettiği için minimum düzeyde titreşim oluştururlar fakat bu etkenlerle karşılaştığında araç ağırlığı ve hareket esnasında oluşan enerji süspansiyonlardan tekerleklere, tekerleklerden zemine iletilerek kuvvetli titreşimler meydana getirir. Araçlarda meydana gelen bu tip titreşimler sürücü konforunu olumsuz yönde etkiler.

Raylı sistem ulaşım ağları yer altında metro, karada tramvay, uzun mesafelerde tren olarak çeşitli tip ve donanımdaki araçlarla sürekli gelişmektedir. Enerjinin lokomotif ve vagonlardan tekerleklere, oradan raya, rayın bastığı zemine ve toprağa iletilmesiyle oluşan titreşim yapının toprak altındaki bölgelerine ve temeline ulaşır. Rayların ve lokomotifin mekanik durumu, vagonların bakımı, tekerlekler titreşim oluşturabilecek önemli etkenlerdir. Bu sistemlerde meydana gelen titreşimlerin minimize edilmesi raylı ulaşım sistemleri için önemli bir çalışma olacaktır.

Mekanik sistemlerden kompresör, asansör, hidrofor, havalandırma, ısıtma cihazları gibi çeşitli mekanik ekipmanlarda yer yer meydana gelen titreşimler çalışma verimini düşürür. Bu elemanlar genellikle sürekli çalışır vaziyette olup, doğru dizayn edilmeden uygunsuz şekilde montaj yapıldığında gürültü ve titreşime sebep olabilmektedir. Her biri titreşim oluşturan mekanik ekipmanlar, proje aşamasında göz önüne alınıp kurulumları sırasında doğru malzeme ve teknik detayların uygulanmasıyla titreşimi en az düzeyde iletecek ve kullanıcıların konforunu etkilemeyecektir. Bu tür sistemlerde titreşim ve ses izolasyon çalışmaları sürekli olarak devam etmektedir. Titreşimler anlık veya devamlı etkisiyle yapı elemanlarında tahribat oluşturabilir veya kullanıcı konforunu olumsuz yönde etkileyebilir. Yapıların çeşitli kullanım amacı ve işlevleri vardır. Titreşimler, hasar oluşturmak haricinde yapının işlevine zarar verebilir, yapı içindeki çalışmaları durdurabilir veya hatalı işlemler yapılmasına neden olabilir. Titreşim kaynağını tamamen ortadan kaldırmak her durumda mümkün olmadığı için çeşitli sönümleme elemanları kullanılarak bu duruma çözüm aranmaktadır.
Titreşim izolasyonu akademik çalışmalar içerisinde önemli bir yere sahiptir ve bu konuda yapılan çalışmalar devam etmektedir.

6.4.5.Titreşim Sönümleyen Elemanlar

6.4.5.1.Çelik Yaylar

Titreşim yalıtımı için kullanılan malzemeler içinde, en büyük elastik deformasyonu çelik yaylar sağlar. Çok hafif ve hassas makinelerin yalıtımından çok ağır ve endüstriyel makinelerin yalıtımına kadar birçok yerde kullanılır

Titreşim yalıtımında kullanılan çelik yaylar, yüksek dayanımlı alaşımlardan imal edildiklerinden ve çelik muhafaza içinde çalıştıklarından dolayı ömürleri, yalıtım yaptıkları cihazların ve makinaların ömürlerinden çoğunlukla daha uzundurlar. Şekil 6.12. te titreşim sönümleyici çelik yaylar görülmektedir.



Şekil 6.12. Titreşim sönümleyici çelik yaylar

6.4.5.2.Elastomerler

Elastomerler titreşimlerin ve gürültünün absorbe edilmesi için oldukça iyi sönümleyici malzemelerdir. Kauçuk- elastomer malzemeler genellikle bütün süspansiyon sistemlerinde bulunan, titreşim sönümleme elamanı olarak kullanılan hiperelastik malzemelerdir. Hareketli parçalardan gelen titreşim, şok ve darbe gibi etkileri

sönümleyerek makine veya araç gövdesine iletilmesini engelleyen, en önemli parçalardan biridir. Süspansiyon elemanlarının birbirlerine ve ana gövdeye bağlantılarında kauçuk burçlar kullanılmaktadır. Burçlar, süspansiyon sistemlerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi ve tasarlanması safhasında da anahtar rol üstlenmektedir.

6.4.5.3.Mantarlar ve Keçeler

Mantar, düşük yoğunluğu, düşük gaz ve sıvı geçirgenliği, ısı taşınım katsayısının düşüklüğü ve yüksek deformasyon kabiliyeti sebebi ile çok iyi bir sönümleyicidir. Toz halde elde edilip polimerlerle karıştırılarak titreşim sönümleyici plakalar elde edilir. Bu yolla elde edilen plakalar çok iyi birer titreşim sönümleyicisi olup 150 N/cm^2'ye kadar gerilme oluşturan sistemlerde kullanılabilirler.

Keçe, hayvanlardan elde edilen yünün pres altında sıkıştırılmasıyla elde edilir. Ses absorbsiyon özellikleri iyi olmasına rağmen nem ile uzun süre temasta olduğunda elâstik özelliklerini kaybederler ve katılaşırlar. Bu sebeple uzun ömürlü dinamik sönümleyici olarak düşünülmezler.

BÖLÜM 7

LİTERATÜR TARAMASI

Literatür taraması iki bölüm olarak incelenmiştir. İlk bölümde titreşim sönümleme elemanları olarak kullanılan malzemeler, ikinci bölümde ise Al köpük malzemelerin titreşim üzerine yapılan çalışmaları incelenmiştir.

Kauçuk, titreşim meydana gelen sistemlerde veya makinelerde titreşim sönümleyici olarak büyük bir önem taşımaktadır. Bu sebeple titreşim önleyici kauçuk izolatörler üzerine çeşitli bilimsel araştırmalar yapılmıştır.

Sun, Chen, Zhang ve Zhang (2007)'nin yapmış oldukları çalışmada titreşim izolasyon sisteminin performansını incelemişlerdir. Basit bir titreşim izolasyon sistemi üzerinde teorik ve nümerik analizler yapmışlardır. Deney düzeneği olarak iki metal kütle arasına farklı sertliklerdeki iki kauçuk titreşim izolatörü yerleştirmişler ve bu iki kütle arasındaki güç transferini özel titreşim algılayıcılar ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda verim oranının ve güç transferinin izolatöre bağlı olarak değiştiği ortaya çıkmıştır. Böylelikle daha karmaşık ve kompleks sistemler için titreşim izolatörü tasarlamanın mümkün olduğunu ifade etmişlerdir (Sun,Chen, Zhang & Zhang, 2008).

Malekzadeh (2009) yılında yapmış olduğu araştırmada, elastik yüzey üzerindeki a,b,c ölçülerindeki metal plakanın x,y,z eksenlerinde, üç boyutlu (3D) serbest titreşim analizini incelemişlerdir. Metal plakanın her köşesinde titreşim ölçümleri yapılmış ve elde edilen değerleri formülize ederek üç boyutlu serbest titreşim analiz yapmıştır. Deneylerde iki farklı elastik yüzey üzerinde aynı metal plakanın titreşim analizini yapmış ve elde edilen sonuçları her iki düzenek için kıyaslamıştır. Her iki ölçümlerde de farklı sonuçlar elde etmiş ve sisteme uygun olan elastik zemin hakkında fikir elde etmiştir (Malekzadeh, 2009).

Bayraktar ve Temel (2006) yılında yapmış oldukları çalışmada, çamaşır makinesinin dinamik davranışını deneysel ve teorik incelemişlerdir. Çamaşır makinesinin tasarım aşamasında iken, titreşim davranışını en uygun hale getirebilmek için bir tasarım metodolojisi geliştirmeyi hedeflenmişlerdir. Çamaşır makinesinin 0–400 Hz frekans aralığında, toplu ve yayılı parametreli elemanların bulunduğu bir titreşim modeli kurulmuş ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Deneysel Modal Analiz yöntemi ile inceleme yapmışlardır. Yapılan bu çalışma ile, çamaşır makinesi üreticilerinin talep ettiği sürede ve hassasiyette, tasarım aşamasındaki çamaşır makinesinin titreşim performansı hakkında ön kestirim yapabilecekleri ortaya çıkmıştır (Bayraktar & Temel, 2006).

Forrest (2006) yılında yapmış olduğu araştırmada, küçük ölçekli üç titreşim izolatör modelinin deneysel olarak şekil analizi üzerinde çalışma yapmıştır. Çalışmada, önce iki metal plaka arasına bir kauçuk sonra iki metal plaka arasına iki kauçuk ve son olarak da üç metal plaka arasına sekiz kauçuk parçası koyarak her birinin mekanik olarak titreşimlerini ölçmüştür. Plakalar arasına konan kauçuk parça miktarı arttıkça titreşim sönümleme daha da artacağı için sekiz kauçuk parçası bulunan sistemin titreşim frekansı diğerlerine göre daha az çıkmıştır. Buradan da, titreşimli çalışan sistemlerde izolatör miktarının ve büyüklüğünün seçimi o sistemin ağırlığına ve çalışma şartlarına göre önemli olduğu ortaya çıkmıştır (Forrest, 2006).

Plooy, Heyns ve Brennan (2005)'nin yapmış oldukları çalışmada, ayarlanabilir titreşim sönümleyici bir izolatörün geliştirilmesi üzerinde değişik incelemeler yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde, içerisindeki sıvıyı pnömatik olarak sıkıştıran piston şeklinde bir prototip hazırlamışlar ve sistemde meydana gelen titreşimin ölçümlerini yapmışlardır. Hava ile sıkıştırma sırasında pistonun sistemin üst kısmına basınç yapacağı için oraya kauçuktan izolatör yerleştirmişlerdir. Yapmış oldukları sistem basınç yönünden ayarlanabilir olduğu için farklı basınçlarda meydana gelen titreşim ve gürültüyü incelemişledir. Sonuç olarak sistemi 12 Hz frekansın üzerinde bile 90 dB ses seviyesinde çalıştırabilmeyi başarmışlardır (Plooy vd., 2005).

Dahil, gözenekli malzemelerin sönümlemeye etkisi üzerine çalışmıştır. Dahil, çalışmasında gözenekli malzemelerin sönümlemeye etkisini araştırmıştır (Dahil, Başpınar &Karabulut, 2011).

Dahil ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, A356/SiCp kompozit köpüklerin ses absorbe etme yeteneklerinin yüksek olduğunu belirtmiştir. Köpük yapısı ve büyük

miktarda SiC partikülleri ve SiC/Al ara yüzlerinin varlığı nedeniyle Al kompozit köpük parçalar Al köpüklerden daha iyi sönümleme ve ses emme özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir.

Yin ve Rayess (2014) yaptıkları çalışmada alüminyum köpük ve polimer kompozitin dinamik ve sönümleme özelliklerini karakterize etmeyi araştırmıştır. 1x1x1,35 inç büyüklükteki 5 adet numune (Şekil 7.1) üzerinde üç grup oluşturarak test yapmışlardır.



Şekil 7.1. Numune alüminyum köpük örneği

Sağdan sola: Silikon kauçuk numune, Silikon kauçuk / alüminyum köpük kompozit, sadece alüminyum köpük, RTV / alüminyum köpük kompozit, sadece RTV

Köpük boşluğunun sıvı kauçuk ile doldurulmasıyla alüminyum bir köpük / kauçuk kompozit yapılır. Sertleştiğinde, kompozitin döngüsel sıkıştırma yükü altında test edildiği ve hem sönüm kaybı faktöründe hem de sadece alüminyum köpük üzerindeki dinamik sertlikte önemli bir artış gösterdiği gösterilmiştir. Birleştirilen malzemenin (alüminyum köpüğün içindeki kauçuk) etkisinin, iki malzemenin yan yana etkisinden daha büyük bir düzende olduğu bulunmuştur. Bu etki, kauçuğun alüminyum köpük hücrelerinin içine hapsolmasından sonra hacimsel değişime karşı aşırı bir şekilde karşılanması ile açıklanmaktadır (Yin & Rayess, 2014).

Marra (2014) yaptığı köpük dolgulu titanyum tüplerin sönümleme özelliklerini ve döngüsel yükleme davranışlarını incelemiştir. Bu faktörlerin sönümleme kapasitesine etkisini belirlemek için, köpükte iki yoğunluk seviyesine ve tüp ile köpük arasında iki çeşit ara yüze (doğal ve bağlı) sahip tüpler incelenmiştir. Esas olarak sönümü araştırmak için her bir tüp üzerinde darbe uyarımına bağlı modal analiz yapılmıştır. Ayrıca, döngüsel bükülme yüklemesi sırasında yer değiştirme, enerji ve akustik emisyon evrimi izlenmiş ve incelenmiştir.

Bu çalışma, Bell Textron Canada firmasının helikopterlerde köpük dolu tüplerin yapısal bileşen olarak kullanılmasına olan talebi ile yapılmış ve tüm çalışma Politecnico di Milano, Piacenza'nın MUSP laboratuvarı ve Montréal'in ÉTS (École de technologie Superiéure) arasında ortak olarak geliştirilmiştir (Marra, 2014).

Ertürk yaptığı çalışmada alüminyum köpüğün sönümleme davranışı ile endüstriyel kullanımda olan bir sönümleme pedinin davranışı karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bir sistem ani darbe, şok türü bir kuvvet etkisine maruz kaldığında bu etkinin elimine edilmesi amacıyla metal köpüğün sönüm elemanı olarak kullanılması mümkündür. Ancak şok etkisinin tekrarlı olmaması esastır. Çünkü metal köpüklerin sönümlemede esneme toparlanma karakteristiği yani denge durumuna dönüş hızı tekrarlı darbeler altında yavaştır ve gecikme gösterir. İstenilen durum sistemin kendi denge durumuna en hızlı şekilde dönmesidir. Sönüm malzemeleri sistemi denge durumuna dönmeye zorlarlar bu işlevi yerine getirirken titreşim ve gürültüyü kendi bünyelerinde yayarlar. Sönümleme amacıyla kullanılan köpük tiplerinin yaygın tanımlamaları şok emici, yavaş toparlama, yastıklama, darbe koruyucudur. Damping faktörü olarak tanımlanan boyutsuz büyüklük değeri üretilen alüminyum köpük numuneler üzerinden gerçekleştirilen ve 15 ölçüm ortalamasından 50 Hz doğal frekansta 0,0422 olarak belirlenmiştir. Tekrarlı titreşime maruz sistemlerde, titreşim genliğinin yüksek olması durumunda ve titreşim hali ile sistemin doğal frekansının aynı olması durumlarında metalik köpüklerin sönüm ve izolasyon elemanı olarak kullanılmaları söz konusu olabileceğini belirtmiştir.

Alüminyum köpüğün ve endüstriyel titreşim pedinin analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu analizlere göre endüstriyel titreşim pedi 75 Hz doğal frekansta 0,0217 sönüm oranı, alüminyum köpük ise 50 Hz doğal frekansta 0,0422 sönüm oranı gözlenmiştir. Bir sistem ani darbe, şok türü bir kuvvet etkisine maruz kalarak 50Hz ve üzeri titreşim etkisi altında ise bu etkinin elimine edilmesi amacıyla metal köpüğün sönüm elemanı olarak kullanılması mümkündür. Ancak şok etkisinin tekrarlı olmaması esastır (Ertürk, 2013).

Banhart ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Alüminyum köpüklerin mekanik sönümleme özellikleri ölçmüştür. Parazitik sönümü önleyen kayıp faktörünü ölçmek için deneysel bir aparat hazırlamışlardır. Rasgele uzaysal yoğunluk değişimlerinden kaynaklanan zorluklar tartışılmıştır. Sorunların üstesinden gelmek için bir prosedür

önerilmiş ve test edilmiştir. Ölçülen kayıp faktörleri, alüminyum köpüklerin çoğu büyük dökme alüminyum alaşımlarına kıyasla geliştirilmiş ve artan porozite seviyesi ile artan bir sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada metalik köpüklerin kayıp faktörünün ölçümü sırasında ortaya çıkan zorlukları analiz edilerek, kayıp faktörünü ölçmek için bir prosedür önerilmiştir. Çalışmada kullanılan $AlSi_2$ alaşımlı köpük üzerinde toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Çalışmada kullanılacak numune boyutları l = 230 mm, w = 25 mm, b = 25 mm ve t = 5 mm olarak belirlenmiştir. 7 farklı numune belirlenerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak oldukça gözenekli, homojen olmayan alüminyum bazlı köpüklerin sönümleme kapasitesi, bu tür ölçümlerin kesinliği çok yüksek olmasa da, değiştirilmiş bir örnek geometrisine dayanan yeni tasarlanmış deneysel bir yöntem kullanılarak kolayca ölçülebilir. Yerel yoğunluk değişimlerinden dolayı sönümleme titreşim frekansına bağlıdır, ancak bu zorlukların üstesinden gelmek için ortalama bir kayıp faktörü kullanılabilir. Bu ortalama değer, köpüğün görünen yoğunluğunun azalan bir fonksiyonudur. Sönümleme kapasitesinin daha da iyileştirilmesi, çeşitli alaşım bileşimlerinin ve termal geçmişlerin etkisinin araştırılmasını gerektirecek ve daha yüksek seviyelerde sönümlemeye yol açabileceği için metal köpükler için yeni uygulamalara yol açacaktır (Banhart, Baumeister & Weber, 1995).

BÖLÜM 8

MATERYAL ve METOD

Bu deneysel çalışmada EN AW 5754 metal alaşımından üretilen kapalı hücreli alüminyum kompozit köpük malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemeler Taşkın Ürkmez N. tarafından yürütücülüğü yapılan Tubitak 1001 Projesi kapsamında yarı katı üretim yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Taşkın Ürkmez N., 2009). Bu tezde söz konusu bu Al kompozit köpük malzemelerin titreşim sönümleme özelliği araştırılmıştır

İki aşamalı olarak gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, Al köpük malzemelerden belirlenen boyutlarda numuneler elde etmek için kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı yoğunluklardaki 4 farklı numune grubundan 2'şer adet olarak kesilen metal köpük numunelerin Archimedes prensibine göre yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Metal köpük numunelerin titreşim sönümleme kabiliyetinin araştırılması yapılırken herhangi bir titreşim sönümleme kabiliyeti olmayan alüminyum metal malzeme ve endüstride sönüm elemanı olarak kullanılan kauçuk malzemedende yaklaşık olarak aynı boyutlarda numuneler belirlenmiştir. İkinci aşamada ise sabit ivme genlikli frekans tarama testi için sistem belirlenmiştir. Hazırlanan 6 farklı numune grubundan 2'şer adet olarak belirlenen numuneler test düzeneğine sabitlenmiştir. 10-2800 Hz aralığında her bir numune eksenel yönde titreşim kuvvetine maruz bırakılmıştır. Bu numunelerin dinamik karakterizasyon testleri sonucunda 'Dinamik Elastik Modül Eğrileri' elde edilmiştir. Bu eğrilere bakıldığında her frekans için çok farklı değerler oluştuğu görülmektedir. Her bir frekans için çok fazla veri oluşması konunun anlaşılmasını karmaşık hale getireceği için elde edilen verilerde ortalama sonuçlar ve grafikler oluşturulmuştur. Malzemelerin dinamik elastik modül eğrilerine bakılarak titreşim sönümleme kabiliyeti karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.



Şekil 8.1. Titreşim testi akış diyagramı

8.1. Malzeme Seçimi

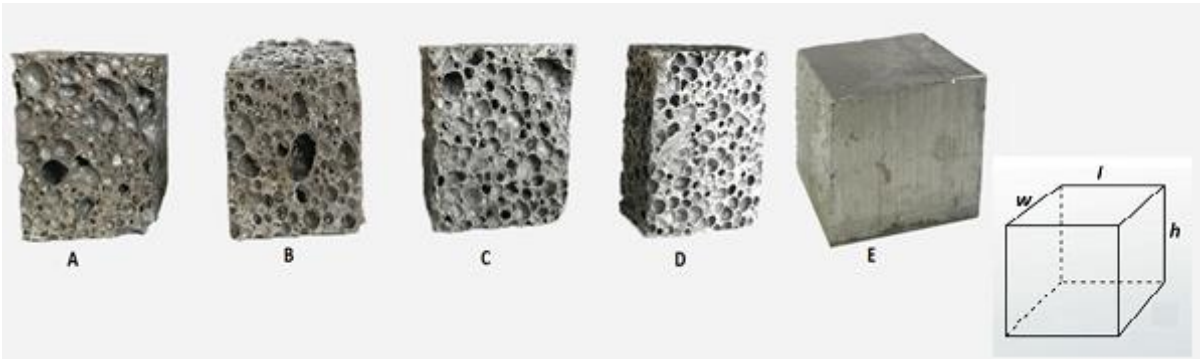
Bu deneysel çalışmada iki farklı takviye oranlarında %10 ve %20 SiC içeren EN AW 5754 kapalı hücreli metal köpük malzeme seçilmiştir. Deneyde EN AW5754 köpük malzemenin seçilmesinin nedeni 5754 alaşımından üretilen alüminyum köpük malzemenin elastik özelliklerinin 6000 veya 8000 seri alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek oluşudur.

8.2. Numunelerin Hazırlanması

EN AW 5754 metalinden üretilen kompozit köpük malzemelerin test düzeneğine uygun olacak şekilde boyutları belirlenmiştir. Alüminyum köpük malzemelerden dört farklı gruptan 2'şer adet olarak seçilen malzemeler üzerinde kesme işlemi uygulanmıştır. Kesme işlemi için elmas kesici uca sahip Metkon marka Microcut 200 hassas kesme cihazı kullanılmıştır. 2600 dev/dk hızla dönen elmas kesici uç ile boyutları belirlenen köpük malzemelerden numuneler elde edilmiştir.



Şekil 8.2. Microcut 200 hassas kesme cihazı



Şekil 8.3. Deney numuneleri

Şekil 8.3'te gösterilen her bir numune grubu için (A, B, C, D) % SiC takviye oranı ve yoğunluklarına göre belirlenen köpük numuneler, (E) Dolu Alüminyum Malzeme ve numunelere ek olarak endüstride sönümleme elemanı olarak kullanılan kauçuk malzeme ile deney numuneleri hazırlanmıştır.

Numune seçimi yapılırken herhangi bir elastik özelliği bulunmayan Al metal malzeme ve endüstride sönümleme elemanı olarak kullanılan, elastik özelliği yüksek olan kauçuk malzeme seçilmiştir. Köpük malzemelerin sönümleme özellikleri bakımından bu iki malzemeye kıyasla sönüm kabiliyetini gözlemlemek amaçlanmıştır.

Çizelge 8.1. Numunelerin özellikleri

Numune	Malzeme	SiC (%)	Numune Boyutu *(l*w*h)*	Yoğunluk (g/cm^3)
A	Köpük	10	25x25x21	0,504
B	Köpük	10	25x25x21	0,672
C	Köpük	20	25x25x21	0,442
D	Köpük	20	25x25x21	0,566
E	Alüminyum	0	25x25x21	2,700
F	Kauçuk	0	25x25x21	0,921

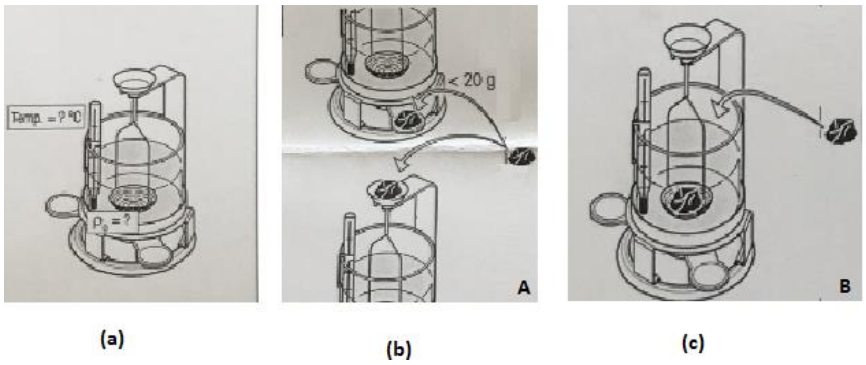
8.3. Yoğunluk Ölçümü

Numunelerin yoğunluk ölçümü Archimedes Prensibi ile yapılmıştır. 1/1000 gr hassasiyetli tartı kullanılarak havada ve saf su içindeki ağırlıklar tespit edilmiş ve havadaki ağırlıklardan sudaki ağırlıklar çıkarılarak hacimler hesaplanmıştır. Gözeneklerin içerisine ölçüm sırasında suyun girmemesi için numune yüzeyleri streç film ile kaplanarak işlem yapılıp ölçümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.4. Hassas tartı (Archimedes Prensibi)

Şekil 8.5'te gösterilen (a) 20 ℃'de saf su eklenen cam kap, (b) köpük malzemenin havadaki ağırlığının ölçülmesi (c) streç ile kaplanmış köpük malzemenin saf sudaki ağırlığının ölçülmesi; Archimedes prensibine göre havadaki ve saf su içerisindeki ağırlıkların ölçümü farklarından yola çıkılarak hesaplanmıştır.



Şekil 8.5. Archimedes prensibi ile yoğunluk ölçümü aşamaları

8.4. Titreşim Test Düzeneği

Metalik kompozit köpük malzemelerin titreşim sönümleme kabiliyetinin ortaya konması amacıyla Spectral Dynamics Test cihazı kullanılmıştır. 10-2800 Hz aralığında frekans değerine sahip olan bu sistemde yatay ve dikey yönde test yapılabilmektedir.



Şekil 8.6. Titreşim sarsıcı test sistemi

TEST CİHAZI

Makine Tipi: Electrodynamic Shaker

Marka: Spectral Dynamic

Model: SD8360-13

TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Yatay Yön

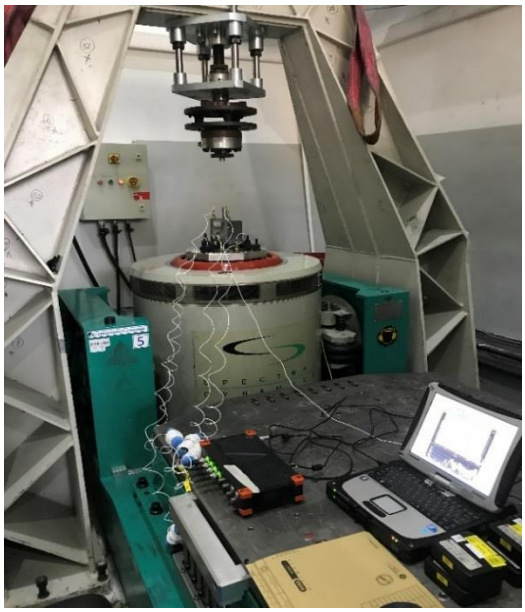
- **Kullanılabilir Frekans Aralığı: 5-2800 Hz**
- **Maksimum Yer Değiştirme: ± 25.5 mm**
- **Maksimum Hız: 2 m/sn**
- **Maksimum İvme: 100g**
- **Ağırlık: 90 kg**
- **Ölçüler: 1000mmx1000mmx300mm**

Dikey Yön

- **Efektif Ağırlık: 108 kg**
- **Maksimum Frekans: 2000 Hz**
- **Maksimum İvme: 27.7 g**

Şekil 8.7. Spectral dynamic test cihazının teknik özellikleri

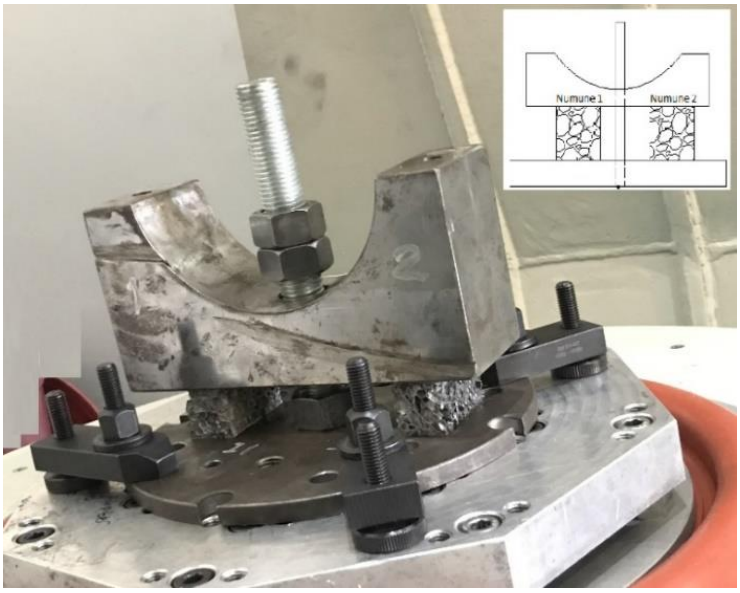
Titreşim analizi deney düzeneği; 1 adet elektro dinamik sarsıcı, 5 adet ivme ölçer ve bu ivme ölçerlerin bağlandığı bir dönüştürücü sistem ve grafik verilerinin toplandığı bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 8.8. Titreşim test düzeneği

8.5. Titreşim Sönümleme Deneyi

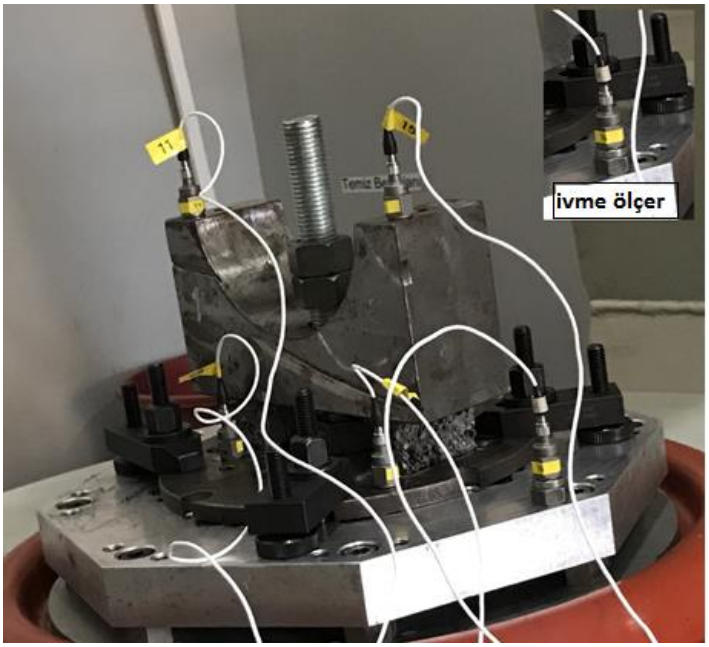
Alüminyum kompozit köpük, metal alüminyum ve kauçuk malzemeden elde edilen yaklaşık olarak eş geometrili numuneler Şekil 8.9'da gösterildiği gibi deney düzeneğinin alt plakasına yataklandı. Aynı gruptan iki adet numune test sisteminin alt plakasına merkezden eşit mesafede olacak şekilde yapıştırıldı ve plakanın alt yüzeyi frekans giriş bölgesi olarak belirlendi. Test sisteminin tabanına yapıştırılan numunelerin sarsıcının çalıştırılmasından sonra sabit olarak kalmasını sağlamak ve çıkış frekansını tespit etmek için üzerine 6 kg ağırlığında bir kütle yerleştirilip numunelerin üst yüzeyleri de bu kütleye yapıştırıldı. Yapıştırma işleminde patex marka yapıştırıcı kullanıldı. Köpük malzemelerin deney tablasına yapıştırma işleminde Taşkın'ın yapmış olduğu çalışma referans alınmıştır (Şahin A. & Taşkın, Ürkmez N., 2011)



Şekil 8.9. Numunelerin test cihazına bağlanması

Her bir numune grubu dikey yönde 10-2800 Hz frekans aralığında titreşime maruz bırakıldı. Zemin ve kütlenin numune yapışma bölgelerinden ivme verilerini toplamak için numune alt ve üst noktalarına ivme ölçerler yerleştirildi. Her bir ivme ölçerin bir ucu

sisteme diğer ucu sinyal alıcı cihaza bağlandı. Bu sinyal alıcı cihaz grafiksel gösterimi ve sonuçların değerlendirilmesi için bilgisayar sistemi ile eşleştirildi.



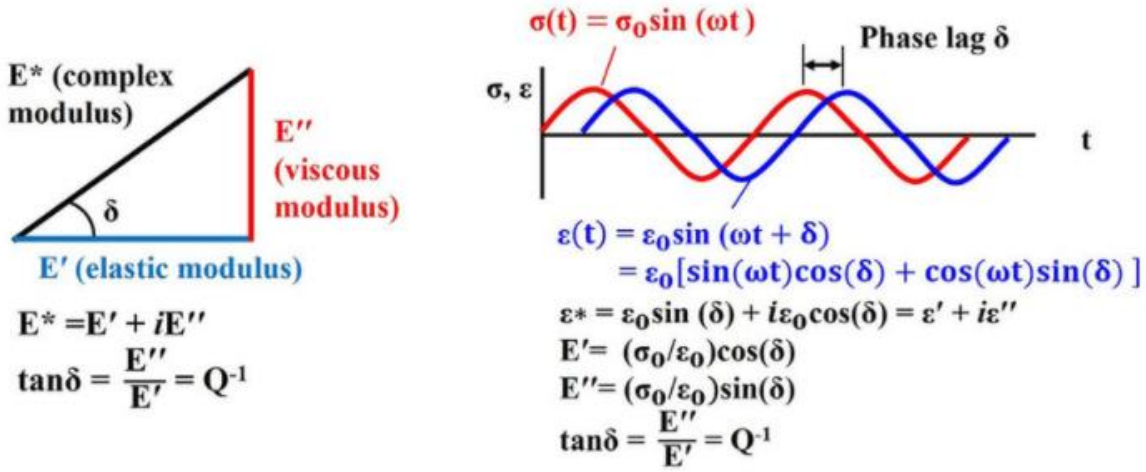
Şekil 8.10. Giriş ve çıkış ivme ölçerleri



Şekil 8.11. Titreşim analizi testi

8.6. Dinamik Elastisite Modülü (Complex Modulus)

Doğrusal viskoelastik malzemeler için, sürekli sinüsoidal yükleme altındaki gerilme/gerinim ilişkisine dinamik (kompleks) elastik modülü (E^*) olarak tanımlanır. Bu, frekans alanında sürekli uygulanan sinüzoidal yüklemeye maruz kalan doğrusal visko-elastik malzemeler için gerilmeyle gerinimi ilişkilendiren karmaşık bir sayıdır. Kompleks modül adı verilen bu modül aynı zamanda, genliğin oranı olarak tanımlanır (Charles, Stephens, Mahoney, & Hansen, 2003).



Şekil 8.12. Dinamik elastik modül grafiği

BÖLÜM 9

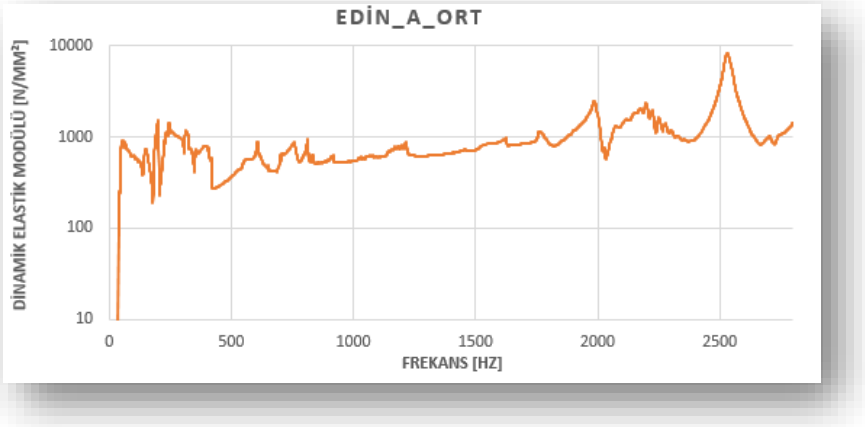
DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

Her bir numune grubu için belirlenen frekans aralığında gerçekleştiren deneysel çalışmada ortalama dinamik elastik modül değerleri Çizelge 9.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 9.1. Numunelerin yoğunluk ve dinamik elastik modül sonuçları

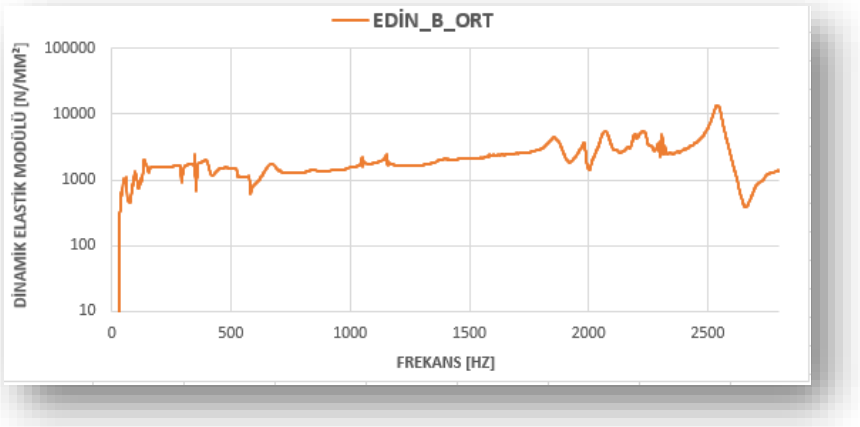
Numune	Malzeme	SiC (%)	Numune Boyutu *(l*w*h)*	Yoğunluk (g/cm^3)	Dinamik Elastik Modülü (N/mm^2)
A	Köpük	10	25x25x21	0,504	353,52
B	Köpük	10	25x25x21	0,672	954,69
C	Köpük	20	25x25x21	0,442	1190,8
D	Köpük	20	25x25x21	0,566	863,84
E	Alüminyum	0	25x25x21	2,700	36055,01
F	Kauçuk	0	25x25x21	0,920	124,13

A grubu %10 SiC takviyeli malzemenin dinamik elastik modül-frekans eğrisi Şekil 9.1'de verilmiştir. Burada 10-2800 Hz frekans aralığında A numunesinin sönümleme karakteristiği kauçuk ile kıyaslandığında düşük kalmıştır. Bu malzemeyi Al malzeme ile karşılaştırdığımızda belli bir sönümleme durumunun mevcut olduğunu fakat tam anlamıyla bir yay gibi davranmadığını görülmektedir.



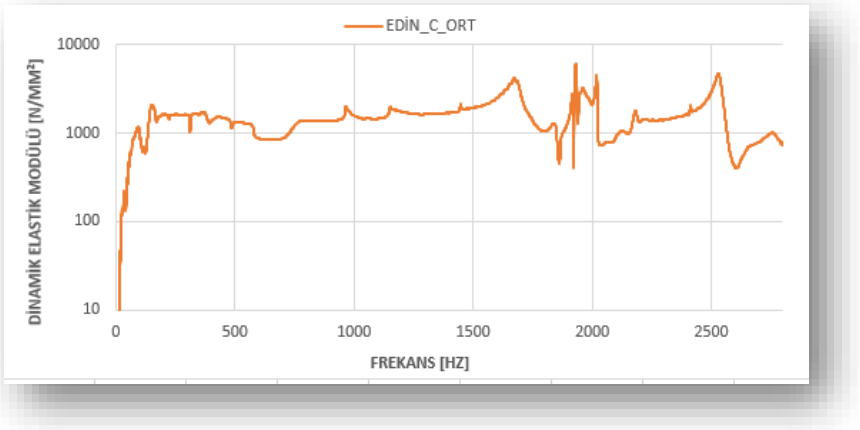
Şekil 9.1. A Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

B grubu %10 SiC takviyeli köpük malzemede ise ;10-2800 Hz aralığında dinamik elastik modülü 1000 N/mm^2 üzerine çıkmıştır ve 2800 Hz frekans değerine kadar dinamik elastik modülü artarak devam etmektedir.



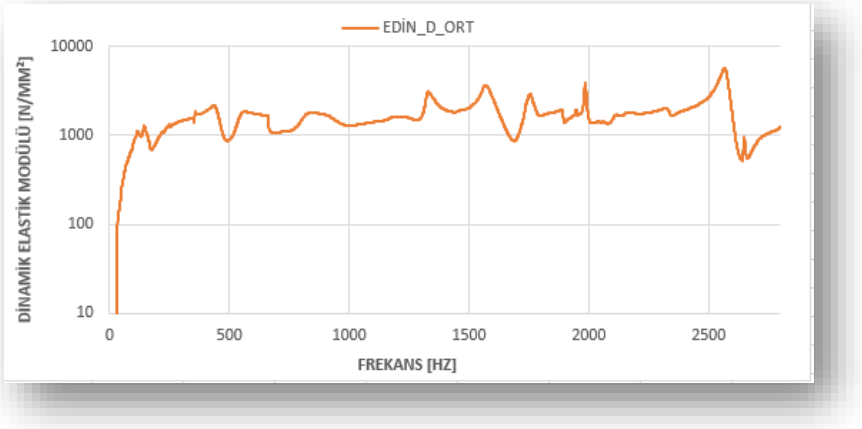
Şekil 9.2. B Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

Şekil 9.3'te C grubu numunesinin dinamik elastik modül eğrisi gösterilmiştir. C grubu numunesinin elastik davranışı B ve D grubu numuneleri ile benzerdir. 10-2800 hz aralığındaki elastik modül değeri 1000 N/mm^2 ve üzerinde devam etmektedir.



Şekil 9.3. C Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

D grubu numunesinin B ve C numunelerine yakın bir dinamik elastik davranışı sergilemektedir.

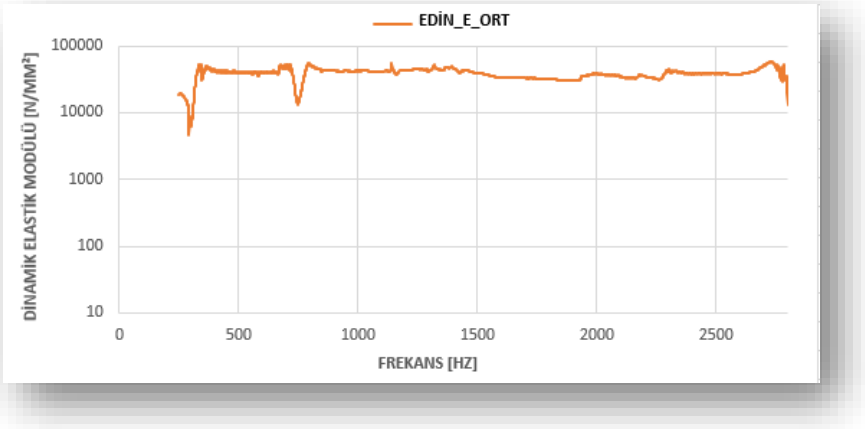


Şekil 9.4. D Grubu köpük malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

Burada köpük numuneler içerisinde bir karşılaştırma yapıldığında 4 farklı gruptaki köpük numunelerinin dinamik elastik davranışına göre sönümleme karakteristiği en iyi olan malzeme A grubu köpük malzemesidir.

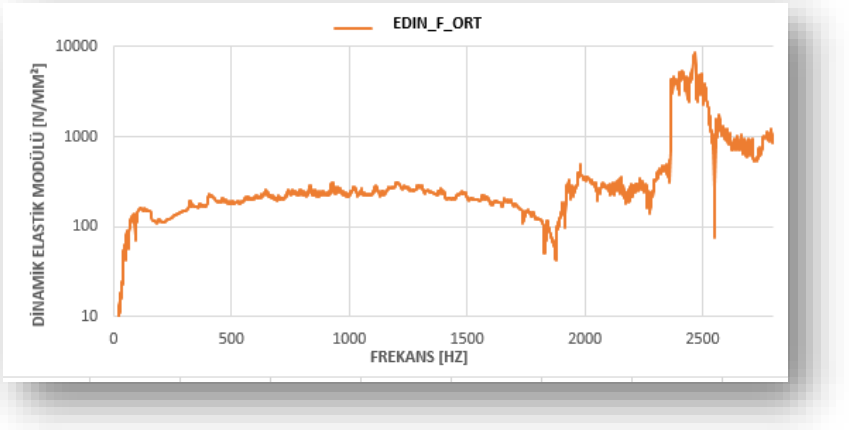
Şekil 9.5'te alüminyum malzemenin dinamik elastik modül eğrisi gösterilmiştir. Alüminyum dinamik elastisite modülü idealde dinamik olarak bir değişkenlik göstermemelidir. Uygulanan testte kullanılan test fikstürü ve bağlantı şeklinden kaynaklı olarak 300 Hz'in altında uyumlu bir test verisi elde edilemediği görülmüştür. Alüminyum numune için 250-2800 Hz arasındaki elde edilen elastik modül değeri genel olarak alüminyum malzemeler için bilinen değer aralığının çok altında seyretmektedir. Normal

şartlar altında 68000-72000 N/mm² seviyesinde seyreden alüminyum dinamik elastisite modülü, yapılan testlerde 36055 N/mm² seviyesinde çıktığı görülmektedir. Bunun temel nedeninin bağlantı tekniği olarak kimyasal yapıştırıcı kullanmak olduğu düşünülmektedir.



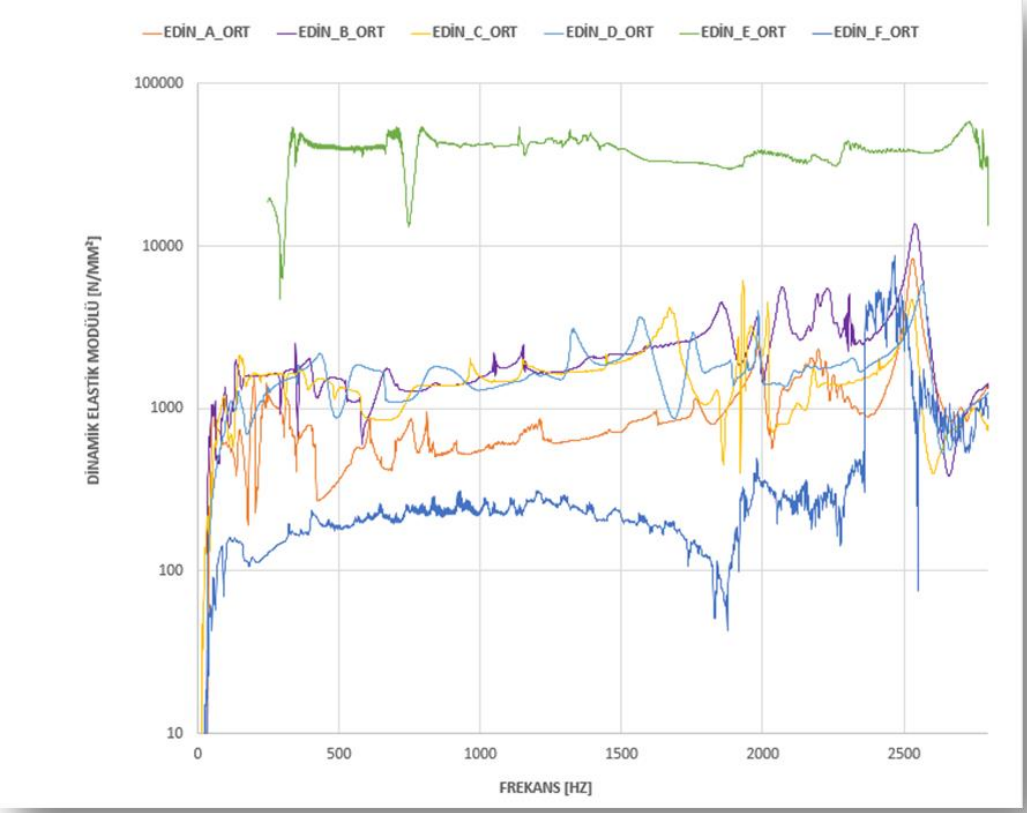
Şekil 9.5. E Grubu alüminyum malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

Sönümleme elemanı olarak kullanılan kauçuk malzemede ortalama dinamik elastik modül değeri E_{0_F} = 124.13 N/mm² bulunmuştur. Bu değer sönümleme için ideal kabul edilen bir değerdir. Bir numunenin sönümleme elemanı olarak kullanılabilmesi için darbe veya tekrarlı yüklere maruz kaldığında esneme toparlanma karakteristiğinin hızlı olması esas şarttır. Bu malzemede elastik modülünün düşük olması tekrarlı yükler altında hızlı bir şekilde ilk haline geri dönmesini sağlamaktadır.



Şekil 9.6. F Grubu kauçuk malzeme dinamik elastik modül-frekans eğrisi

Yapılan testlerde aynı sürede ve frekansta titreşime maruz bırakılan 6 adet farklı numune üzerinde dinamik elastik modül katsayıları karşılaştırılarak köpük malzemelerin sürekli titreşime maruz kaldığında sönümleme karakteristiği incelendi. Al malzeme ve kauçuk malzeme ile köpük malzemelerin karşılaştırılması Şekil 9.7'de verilmiştir. Burada dinamik elastik modülü yüksek olan alüminyum malzemenin hiç sönümleme yapmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Buna karşın kauçuk malzemenin çok iyi sönümleme yaptığı ve sönümleme katsayının düşük olduğu görülüyor. Al metal köpüklerin bir sönümleme gerçekleştirdiği fakat tekrarlı kuvvetlere maruz kaldığında sürekli bir sönümleme gerçekleştirmediği anlaşılmıştır.



Şekil 9.7. Karşılaştırma dinamik elastik modül-frekans eğrisi

Al kompozit köpük malzemelerde SiC oranının artmasıyla malzemenin statik elastik modülünün arttığı biliniyor. Bu durum dinamik elastik modülüne göre değerlendirildiğinde SiC oranının artmasıyla dinamik elastik modülünün de artması

beklenir. Ancak yapılan bu çalışmada Çizelge 9.1 incelendiğinde bu durumun geçekleşmediği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise Al kompozit köpük malzemeler içerisindeki gözenek dağılımlarının farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Köpükler endüstride farklı kullanım alanlarına sahip malzemelerdendir. Bunlar içerisinde darbe sönümleme, izolasyon malzemesi, ısı iletim özelliğine bağlı olarak eşanjörler veya şok emiciler olarak kullanılabilir. İhtiyaca yönelik olarak metalik köpük malzemenin belirlenmesi söz konusu olduğunda göz önünde bulundurulması gereken konu sönümlemeye mi yoksa izolasyona mı ihtiyaç duyulduğunun belirlenmesidir. Yapılan testlerde görüldüğü gibi köpük malzemelerin sönümleme elamanı olarak kullanılmasından çok izolasyon malzemesi olarak kullanılması mümkündür. Çünkü metal köpüklerin tekrarlı yükler altında denge durumuna dönüş hızı yavaştır. Sönümleme elemanlarında istenilen özellik sistemin kendi denge durumuna en hızlı şekilde dönmesidir. Sönüm malzemeleri sistemi denge durumuna dönmeye zorlarlar bu işlevi yerine getirirken titreşim ve gürültüyü kendi bünyelerinde yayarlar. Bu nedenle köpük malzemelerin izolasyon malzemesi olarak kullanılması daha uygundur.

BÖLÜM 10

SONUÇLAR

Bu çalışmada bir dizi köpük malzemenin alüminyum ve kauçuk malzeme ile karşılaştırmalı olarak dinamik elastik modül karakteristiği üzerinden titreşim sönümleme kabiliyeti araştırılmıştır. Deneysel veriler sonucunda elde edilen genel değerlendirmeler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

1) Alüminyum malzemenin dinamik elastisite modülü Al köpük malzemeler ve kauçuk malzeme ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Titreşime bağlı olarak hesaplanan dinamik elastisite modülüne bakıldığında Al malzemenin sönümlemeye katkısının olmadığı sonucuna varılmıştır.
2) Al köpük malzemelerin dinamik elastisite modülü kauçuk malzeme ile Al malzeme arasında bir değerde olduğu görülmüştür. Bu durumda Al köpük malzemelerin titreşim sönümlemeye bir katkısı olabilir ancak sönümleme elemanı gibi davranmaları söz konusu değildir.
3) Kapalı hücreli Al köpükler içerisinde, %10 SiC takviyesi ve %20 SiC takviyesi karşılaştırıldığında SiC takviye oranı az olan köpük malzemenin daha iyi sönümleme gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir.
4) İncelenen Al köpük malzemeler içerisinde 0,504 g/cm^3 yoğunluğa sahip numunenin dinamik elastisite modülü en düşüktür. Sönümlemeye en fazla katlı sağlayan numune olarak belirlenebilir.
5) Al köpük malzemeler mühendislik yönüyle değerlendirildiğinde tekrarlı kuvvetlere maruz kaldığında denge durumuna dönmesi yavaştır. Bu nedenle bir sönümleme elemanı gibi görev yapmaları mümkün değildir.

6) Al köpük malzemelerin gürültü ve titreşimi kendi içinde yayarak izolasyon malzemesi olarak görev yapmaları mümkün olabilir.
7) Askeri uygulamalarda inilmesi gereken yataklama frekansı seviyesi 5-10 hz aralığıdır, alüminyum metal köpüklerde ise 400-600 hz arasında bir yataklama frekansı görülmüştür. Bu durumda alüminyum metal köpüklerin askeri uygulamalarda kullanılması söz konusu olabileceği düşünülmüştür.

KAYNAKLAR

Aivazov, M. I., & Domashhev, I. A. (1968). Influence of Porosity on the Conductivity of the Hot Pressed Titanium Nitride Specimens, Poroshkovaya Metallurgiya *(Soviet P/M and Metal Ceramics),* 8(9): 51-54.

Arslan, S. (2010). *Titreşim Analizi ile Fanlarda Arıza Teşhisi ve Kestirimci Bakım*, (Yüksek Lisans Tezi), Zonguldak Karaelmas Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak

Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. (2000). *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heinemann.

Atakav, A.N. (2019). *Çelik Halat Titreşim İzolatörlerinin Titreşim Karakteristiklerinin İncelenmesi,* (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Babcsan, N., Leitlmeier, D., & Degischer, H. (2003). Foam ability of Particle Reinforced Aluminum Melt. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.34*.22-29. 10.1002/mawe.200390011.

Başpınar, M.S., & Yurtcu, Ş. (2011). Metalik Köpük Malzemelerin Mekanik Özelliklerini Belirlemede Kullanılan Matematiksel Modeller, *Electronic Journal of Machine Technologies,* 8(1): 69-78.

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

Banhart, J. (2003). Aluminium Foams for Lighter Vehicles, *International Journal of Vehicle Design*, 1-19.

Banhart, J., Seelinger, H.W. (2008). Aluminium Foam Sandwich Panels: Metallurgy, *Manufacture and Applications*.

Banhart, J., Baumeister, J., & Weber, M. (1995). Damping Properties of aluminium foams, *Frauhofer Institue for Applied Metarial Research*

Bayraktar, F., & Temel, H. (2006). Çamaşır makinesinin dinamik davranışının deneysel ve teorik incelenmesi, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, *5 (2):* 135–144

Champoux, Y., Allard, J.F. (1991). Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *J Appl Phys*, *70 (4)*, 1975–1979

Charles, E., Stephens, J., Mahoney, J., & Hansen, G. (2003), Dynamic Modulus Test Protocol, Problems and Solutions, University of Connecticut

Çağlar, S. İ. (2009). *Alüminyum Esaslı Kompozit Köpük Üretimi ve Karakterizasyonu*, (Yüksek Lisans Tezi), Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne

Dahil, L., Başpınar, S., Karabulut, A. (2011). *Damping Effect of Porous Materials*, (Yüksek Lisans Tezi), Afyon Kocatepe Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon

Degischer, H.P., & Krist, B. (2002). Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications, *Wiley-VCH, ISBN 3*-527- 29320-5.

Duarte, I., & Oliveira, M. (2012). *Aluminium Alloy Foams*: Production and Properties. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Portugal

Işık M.E. & Kuruşçu A.O. (2018). *Yapısal Titreşimlerin Kullanıcı Konforuna Etkisi*, (Makale), Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul

Dumais, J. (2009). Lectures on Biomechanics, Lecture 3: Cellular Solids, *Lesson notes.*

Endler, F., Lahner, S., Hoffmann. (1997). *Metallscha¨ume." In: Banhart J, editor. Proc. Symp. Metallscha ¨ume*, Bremen, Germany, 6–7 March. Bremen: MIT Press–Verlag, p.117 [in German].

Ertürk A.T. (2013). *Alüminyum Köpük Malzemelerin Uygulamaya Yönelik Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*, (Doktora Tezi), Koceli Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Koceli.

Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M.F. (1999), *Prog Mater* Sci;43:171

Forrest, J.A. (2006). Experimental modal analysis of three small-scale vibration isolator models, *Journal of Sound and Vibration*, *289 (1-2):* 382– 412

Güden, M., Kavi, H., Toksoy, K. (2004). Alüminyum Kapalı Hücreli Köpüklerin Toz Metalurjisi ile Üretilmesi, *Metalurji Dergisi*, Sayı 120

Girlich, D. (2006). *Open Pore Metal Foam Description and Applications*, GmbH Enderstrasse 94(G), 01277 Dresden, Germany.

Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*, Oxford: Elsevier

Gibson, J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids structure and properties*, Cambridge University Press.

Hancı, G. (2009). *Lastik Endüstrisinde Kullanılan Kestirimci Bakım Uygulamaları*, (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya

Haydn, N. G. (2002). Cellular Metals Manufacturing, *Advanced Engineering Materials 4*, No. 10.

Köse, R. K. (2009). Makina Arızası Belirlenmesinde Kullanılan Vibrasyon Analizinde Dairesel Titreşim Dalga formu, Mühendis ve Makine, 50, 61-65).

Malekzadeh, P. (2009). Three-dimensional free vibration analysis of thick functionally graded plates on elastic foundations, Composite Structures, 89 (3): 367–373

Marra, A. (2014). *Vibration Damping and Cyclic Loading Behavior of Aluminum Foam Filled Tubes*, Politecnico Di Milano, School of industrial and İnformation Engineering Master of science in Mechanical Engineering

Matijasevic, B. (2006). *Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making* Improved Metal Foams, Process Sciences the Technical University, Berlin

Mobius Institute, (2005). Glossary Diagnostic Guide Useful Charts And Tables, Washington: Mobius Software P/L

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

Ürkmez Taşkın, N., & Taşkın, V. (2015). *Continuous composite metal foam production and method and device for stirring particle reinforced composite metal*. WO Patent, WO2015094139A3. Erişim adresi Google Patents

Ürkmez Taşkın, N., Şahin A. (2011). Effect of Aging Time at High Temperature on the Shear Strength of Adhesively Bonded Aluminum Composite Foam Joints, *The Journal of Adhesion 95 (4)*, 308-324

Ürkmez Taşkın, N., Taşkın, V., Aydoğdu, M. (2010). *SiCp Takviyeli Alüminyum Köpük Malzemenin Yarı-Katı Üretim Yöntemi Kullanılarak Sürekli Formda Üretilmesi*, Tubitak 1001 Projesi

Patrick, K. (2000). Ultra-Light Aluminium Foam Materials Offer Advantages in Automotive Application, *Idustrial Heating*, 35-36.

Plooy, N.F., Heyns, P.S., Brennan, M.J. (2005). The development of a tunable vibration absorbing isolator, *International Journal of Mechanical Sciences, 47 (7):* 983–997

Shaik, D. A., Venkates, S. (2012). *Development of Porous Aluminium Foam for Making Commercial Vehicle Leaf Spring, Institute of Technology, Coimbatore*, India, Department of Metallurgy, P.S.G. College of Technology, Coimbatore, India

Seeliger, H.W. (2003). *Aluminium foam sandwich ready for market introduction*. In: J. Banhart, NA. Fleck, A. Mortensen, editors. *Cellular metals manufacture, properties, applications*. Germany: MIT-Verlag Berlin; p. 5–12,

Sertkaya, A.A. (2008). *The Production of Aluminium Foam As Heat Exchanger & Heat Transfer Modelling*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Selçuk University, Konya.

Serway, R. A., & Beicher, R. J. (2000). Physics For Scientists And Engineers With Modern Physics (5. Baskı). *Saunders College Publishing*.

Shinko Wire Co., (1998). *Product information*, Alporas, Japan.

Sun, H.L., Chen, H.B., Zhang, K., Zhang, P.Q. (2008). Research on performance indices of vibration isolation system, *Applied Acoustics*, 69 (9): 789–795

Türker, M., Güven, E. A., Ertürk, A. T. (2011). Ultrasonik yöntem ile tahribatsız malzeme muayenesi, *Metal Dünyası, 222*, 108-115.

Tiryaki, M. (2016). *Köpük Metal Üretimi ve Mekaniksel Özelliklerinin Belirlenmesi,* (Yüksek Lisans Tezi), Dumlupınar Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya

Uçak, T. (2007). *The Effects of Process Parameters on the Cell Morphology of the Aluminum Foam*, (Yüksek Lisans Tezi), Boğaziçi Üniversitesi / Yüksek Lisans Çalışmaları Enstitüsü, İstanbul.

Vendra, L.J., Rabiei, A., Ferguson. (2013). A Comparision of Composite Metal Foam's Properties and Other Comparable Metal Foams, *Materials Letters, 63*: 533-536.

Yin, S., Rayess, N. (2014). *Characterization of polymer-metal foam hybrids for use in vibration dampening and isolation*, Department of Mechanical Engineering, University of Detroit Mercy, Detroit, MI 48221, USA

Yu, C.J., Eifert, H., Baumeister, J., Banhart, J. (1998). Metal foaming by a powder metallurgy method: production, properties and applications, *Mat. Res. Innovat, 2:* 181-188

Zhang, Y., & Zhang, F. (2019). *Vibration and Buckling of Shear Deformable Functionally Graded Nanoporous Metal Foam Nanoshells*- College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China- College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China

ÖZGEÇMİŞ

İpek BİNGÖL 24 Kasım 1992 yılında Malatya'da doğmuştur. İlköğretimi Edirne Şehit Asım İlköğretim okulunda, lise öğrenimini ise Edirne 1.Murat Lisesinde tamamlamıştır. 2011 yılında İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne başlamış ve 2016 yılında mezun olmuştur. 2017 yılında Trakya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. 2018 yılından beri Ekomak Endüstriyel Kompresör firmasında Tasarım Mühendisi olarak çalışmaktadır.