



**ÇARPIŞMA KUTULARININ İÇERİSİNE
YERLEŞTİRİLEN FARKLI ALAŞIMLARDAKİ
ALÜMİNYUMLARIN DAYANIMA OLAN
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Batuhan KOCAOĞLU

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Samet USLU**

**ÇARPIŞMA KUTULARININ İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI
ALAŞIMLARDAKİ ALÜMİNYUMLARIN DAYANIMA OLAN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Batuhan KOCAOĞLU

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Samet USLU**

**KARABÜK
Mayıs 2021**

Batuhan KOCAOĞLU tarafından hazırlanan “ÇARPIŞMA KUTULARININ İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI ALAŞIMLARDAKİ ALÜMİNYUMLARIN DAYANIMA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Samet USLU

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21/05/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. M. Bahattin ÇELİK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Samet USLU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞİMŞEK (İAÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Batuhan KOCAOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇARPIŞMA KUTULARININ İÇERİSİNE YERLEŞTİRİLEN FARKLI ALAŞIMLARDAKİ ALÜMİNYUMLARIN DAYANIMA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Batuhan KOCAOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Samet USLU

Mayıs 2021, 106 sayfa

Dünya genelinde artan nüfus ve buna istinaden artan otomobil sayısı trafik kazası riskini artırmaktadır. Artan bu riskten dolayı otomobil üreticileri olası kaza durumlarında şoför ve yolcuları korumak amacıyla çeşitli güvenlik önlemleri almaktadır. Bu önlemler; kazanın meydana gelme olasılığını düşürmek ve sürücünün kazadan kaçınmasına yardımcı olmak için kullanılan ABS, ASR, EPS gibi sistemleri içeren aktif güvenlik sistemleri ve bir kaza meydana geldiğinde, otomobil içerisinde bulunanların kazadan en az seviyede etkilenmelerini sağlamak amacıyla kullanılan emniyet kemerleri, hava yastıkları, araç şasisinin yapısı gibi pasif güvenlik sistemleridir. Çarpışma kutuları, önden veya arkadan çarpmalı bir kaza durumunda darbeyi ilk olarak karşılayan, ortaya çıkan deformasyon enerjisini sönmüleyerek otomobil içerisine mümkün olan en az seviyede iletilmesini sağlayan pasif güvenlik sistemi elemanlarından birisidir. Çarpışma kutuları üstlendiği görev bakımından

otomobiller üzerinde önemli bir konuma sahiptir. Bundan dolayı, çarpışma kutularının enerji sönümlene kabiliyetinin artırılması son derece önemli bir konudur. Bu çalışmada, normal şartlarda içi boş olarak imal edilmekte olan çarpışma kutularının enerji sönümlene kabiliyetlerini artırabilmek amacıyla içerisine alüminyum köpük esaslı malzemelerin yerleştirilmesi ve dayanımına olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, üç farklı alüminyum alaşımı seçilerek, en iyi enerji sönümlene kabiliyetini belirlemek amacıyla kıyaslama yapılmıştır. Alüminyum köpük esaslı malzemelere drop testi ve basma testi yapılarak malzemenin iç yapısında meydana gelen mikro yapıdaki değişiklikler taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope, SEM) ile incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Alüminyum köpük, çarpışma kutusu, enerji sönümlene

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ALUMINIUM IN DIFFERENT ALLOYS PLACED IN COLLISION BOXES ON THE STRENGTH

Batuhan KOCAOĞLU

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Samet USLU

May 2021, 106 pages

The increasing population worldwide and the increasing number of automobiles accordingly are increasing traffic accidents. Various security measures are possible to protect the driver and passengers in possible accident situations from this increased risk. This information: Safety systems that contain active systems such as ABS, ASR, EPS, which are used to reduce the likelihood of an accident and help the driver avoid an accident, and when an accident comes, passive safety belts, airbags, the structure of the vehicle chassis, etc. systems. It is one of the passive safety system elements that absorbs the deformed energy that occurs first and ensures that it is transmitted into the car as quickly as possible in the event of a collision, a frontal or rear impact accident. In terms of the mission undertaken, the collision it is an important durability on automobiles. From this, it is extremely important to increase the energy absorption capability of crash boxes. This is aimed to increase the energy absorption capabilities of crash boxes, which are normally manufactured as hollow,

by placing aluminum-based materials in them and examining their effect on the strength. This type has been tested to determine the best energy absorption ability by selecting three different aluminum alloys. Drop test and compression test were performed on aluminum foam-based materials, and the microstructure formed in the inner structure of the material was examined with a trouser scanning electron microscope (scanning electron microscope, SEM).

Key Word : Aluminum foam, crash box, energy absorption

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmayı yılmadan, usanmadan bilgilerini benimle paylaőan her zaman manevi desteğini hissettiğim değerli hocam Doç. Dr. Samet Uslu'ya, her Őeyden önce iyi bir insan olmayı ilke edinmiő ve bizlere bunları aőılayan saygıdeğer büyüğüm ve hocam Prof. Dr. Mustafa Bahattin elik'e, kendini geliştirme arzusu ve ilgisi ile yapmış olduğumuz çalışmaların tamamında bizlere destek olan İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Öğrencisi Oğuzhan Yıldırım'a manevi desteğini her bir ömür hissettiğim kıymetli annem ve babama, torunları olmaktan hep mutluluk duyacağım anneannem ve dedeme, büyük bir aidiyet ve gurur duyarak görev yaptığım Türk Hava Kuvvetleri' ve 'Biz Karabük Üniversiteliler' benliğini benimsemiő o büyük Karabük Üniversitesi Ailesine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1 BOŞ ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR	11
2.2 KÖPÜK MALZEME İLE DOLU ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR	25
BÖLÜM 3	38
ÇARPIŞMA KUTULARININ SAHİP OLDUĞU KABİLİYETLER	38
BÖLÜM 4	42
ALÜMİNYUM	42
4.1 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	43
4.1.1. 1xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	43

	<u>Sayfa</u>
4.1.2. 2xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	44
4.1.3. 3xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	44
4.1.4. 4xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	44
4.1.5. 5xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	45
4.1.6. 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	45
4.1.7. 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	45
4.1.8. 8xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	46
4.2. METALİK KÖPÜKLER TARİHÇESİ VE KULLANIM ALANLARI.....	46
4.2.1. Endüstriyel Kullanım Alanları.....	48
4.2.1.1. Otomotiv Endüstrisi	48
4.2.1.2. Uzay ve Hava Endüstrisi.....	53
4.2.1.3. Gemi ve Demiryolu Endüstrisi	53
4.2.1.4. İnşaat ve Makine Endüstrisi.....	55
4.2.1.5. Biyomedikal ve Spor Endüstrisi	56
4.2.2 Alüminyum Köpük Uygulamaları	56
4.2.2.1. Isı Değiştiriciler ve Soğutma Makineleri	56
4.2.2.2. Katalizör Yatakları.....	57
4.2.2.3. Su Arıtma, Sıvıların Depolanması ve Transferi.....	58
4.2.2.4. Susturucular	58
4.2.2.5. Elektrokimyasal Uygulamalar ve Pil Elektrotları	59
4.3. METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	60
4.3.1 Açık Hücreli Metalik Köpük Malzemeler	61
4.3.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpük Malzemeler	61
4.3.2.1. Gaz Enjeksiyon Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi	62
4.3.2.2 Köpürtücü Madde İlavesi ile Metalik Köpük Üretimi.....	64
4.3.2.3 Katı- Gaz Ötektik Katılma Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi .	66
4.3.2.4. Polimer Köpük Kullanarak Köpük Malzeme Üretimi	67
4.3.2.5 Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi.....	68
BÖLÜM 5	70
MATERYAL METOD	70

Sayfa

5.1. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM YÖNTEMİNE GÖRE METALİK KÖPÜK ÜRETME AŞAMALARI.....	70
5.1.1. Toz Karışımının Hazırlanması İşlemi.....	70
5.1.2. Presleme ve Sinterleme İşlemleri	73
5.1.3. Kesme İşlemleri	74
5.1.4. Serbest Köpürtme İşlemleri	74
5.1.4.1 Alüminyum Alaşımların Serbest Köpürtme İşlemleri	75
5.1.5. Kapalı Kalıpta Köpürtme İşlemleri	80
5.1.5.1. Kapalı Kalıpta Köpürtülen Alaşımların Gözenek Yapısının İncelenmesi	82
5.2. BASMA DENEYLERİ	85
BÖLÜM 6	88
SONUÇLAR VE BULGULAR	88
6.1. BASMA DENEY SONUÇLARI	88
6.1.1. 700 °C’de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları	88
6.1.2. 725 °C’de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları	91
6.1.3. 750 °C’de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları	93
6.2. BOŞ ÇARPIŞMA KUTUSU ile ALÜMİNYUM KÖPÜK TAKVİYELİ ÇARPIŞMA KUTULARININ KIYASLANMASI.....	98
BÖLÜM 7	99
SONUÇ VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	101
ÖZGEÇMİŞ	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. TÜİK 2020 yılı trafik kaza oluş şekilleri.	2
Şekil 1.2. Bir aracın iskelet yapısı ve çarpışma kutuları.	3
Şekil 1.3. Önden çarpışmalı kazalarda enerji dağılımı	4
Şekil 1.4. Audi A8 model otomobilde bulunan alüminyum parçaları.	5
Şekil 1.5. Audi A3 Alüminyum levhadan üretilmiş ön bölüm.	5
Şekil 1.6. Alüminyum şok emme kabiliyeti (M. Dündar, G. Güngör).	6
Şekil 2.1. Kapalı hücreli ve açık hücreli metalik köpük mikroskop görüntüleri	8
Şekil 2.2. Mevcut ve alternatif çarpışma kutusu modelleri	14
Şekil 2.3. Tampon ve darbe emici sonlu elemanlar modeli	16
Şekil 2.4. Analiz boyunca deformasyon şekilleri	17
Şekil 2.5. Eksenel simetrik girintilere sahip konik enerji sönümleyiciler.....	18
Şekil 2.6. Üzerlerinde çarpışma başlatıcı delikler bulunan çarpışma kutuları.	19
Şekil 2.7. Hücre çapları (a) 6,4 mm, (b) 4,8 mm, (c) 3,2 mm ve et kalınlığı 0,13 mm olan alüminyum profillerin simülasyon görüntüleri.....	20
Şekil 2.8. Pnomatik çarpışma test düzeneği.....	21
Şekil 2.9. Farklı köşe kıvrım açılarına ait profiller.	22
Şekil 2.10. Sonlu elemanlar analizi ile deformasyona uğramış çarpışma kutuları. ..	24
Şekil 2.11. Alüminyum köpük ile doldurulmuş AlSi 304L çelik profil.	25
Şekil 2.12. Çarpışma kutularının deformasyon sonucundaki görüntüleri.....	26
Şekil 2.13. Altıgen paketlenmiş çoklu profil tasarımı: a) Boş b) Al köpük dolu.....	27
Şekil 2.14. Kare paketleniş çoklu profil tasarımı a) Boş b) Al köpük dolu	28
Şekil 2.15. Boş alüminyum profillerin çeşitli yüzdelerdeki deformasyonu.....	28
Şekil 2.16. 0,35g/cm ³ yoğunluğa sahip alüminyum köpük malzeme ile dolu profillerin çeşitli yüzdelerdeki deformasyon görüntüleri.....	29
Şekil 2.17. Köpük malzeme dolu profillerin gerçek (a) ve sonlu elemanlar (b) görüntüleri.	30
Şekil 2.18. 1,5 mm (a), 2 mm (b) ve 3 mm (c) et kalınlığına sahip çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesi	31
Şekil 2.19. İçerisi köpük malzeme ile dolu dairesel ve kare profiller.....	32
Şekil 2.20. Eksenel yük altındaki boş ve metalik köpük ile dolu dairesel ve kare profiller.....	33

Şekil 2.21. Çarpışma kutusu ve çarpışma bölgesi.....	35
Şekil 2.22. Köpük dolu çarpışma kutusunun kesit görünüşü.....	36
Şekil 3.1. İdeal bir çarpışma kutusunun Kuvvet-Deformasyon miktarı grafiği.....	39
Şekil 3.2. Eksenel yükte boş ve köpük dolu çarpışma kutularının deformasyonu.....	41
Şekil 4.1. Alüminyum metal köpük sandviç panel örneği.....	48
Şekil 4.2. Güvenlik duvarı ve gövdesi alüminyum köpük panellerden yapılmış hafif ağırlıklı araç tasarımı.....	49
Şekil 4.3. Otomobillerde kullanılan köpük dolgulu bağlantı parçaları.....	50
Şekil 4.4. Metalik köpük malzemelerin kullanımında otomotiv endüstrisindeki faydaları.....	51
Şekil 4.5. Çarpışma kutusu örnekleri.....	52
Şekil 4.6. Eksenel yönde basınç altında kalan içi alüminyum köpüklü ve köpüksüz paslanmaz.....	52
Şekil 4.7. Teleskop kollu vinç köpük metal uygulaması.....	53
Şekil 4.8. Gemilerde köpük metal kullanımı.....	54
Şekil 4.9. Tramvaylar için darbe emici yapı.....	54
Şekil 4.10. Yapı malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpükler.....	55
Şekil 4.11. Köpük metal ısı degistirici.....	57
Şekil 4.12. Hafif ağırlıklı ve basınç uyumlu depoda deflektör olarak alüminyum köpük kullanımı.....	58
Şekil 4.13. Susturucu olarak kullanılan alüminyum köpükler.....	59
Şekil 4.14. NiMeH ile NiCd bataryalarda artı elektrot olarak kullanılan köpük haldeki nikel.....	60
Şekil 4.15. Gözeneklik oranına göre metalik köpük malzemelerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları.....	60
Şekil 4.16. Açık hücreli metalik köpük malzemelerin yapısı.....	61
Şekil 4.17. Kapalı hücreli metalik köpük malzemelerin yapısı.....	62
Şekil 4.18. Eriyik metale gaz enjektisi yöntemi.....	63
Şekil 4.19. Karıştırma süresinin vizkozite üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 4.20. Eriyik metale köpürtücü madde ilavesi yöntemi.....	65
Şekil 4.21. Blok şekilde elde edilen metalik köpüğün kesilmiş halde gözenek yapıları.....	65
Şekil 4.22. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi.....	66
Şekil 4.23. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm (Banhart, 2000).....	67
Şekil 5.1. 150 µm'lik Al 5083 ve Al 6061 Tozları.....	70
Şekil 5.2. Sıkıştırma kalıbı.....	71

Şekil 5.3. 60x60x10 mm'lik kapalı sıkıştırma kalıbı.	71
Şekil 5.4. Turbula.	73
Şekil 5.5. Presleme ve sinterleme işlemleri sonucu oluşan ürün.	74
Şekil 5.6. Farklı sıcaklık ve sürelerde serbest köpürtülmüş alüminyum köpükler. ...	76
Şekil 5.7. 700 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).	77
Şekil 5.8. 725 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).	77
Şekil 5.9. 750 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).	78
Şekil 5.10. Al 6061 alaşımının kapalı kalıpta 750 °C (solda) ve 725 °C de (sağda) köpürmeleri	81
Şekil 5.11. Al2024 alaşımının gözenek boyutları.	82
Şekil 5.12. Al5083 alaşımının gözenek boyutları.	83
Şekil 5.13. Al6061 alaşımının gözenek boyutları.	84
Şekil 5.14. Instron 3369 marka basma-çekme test cihazı.	86
Şekil 5.15. Numunelerin basma deney görselleri (Al5083- Al2024- Al 6061).	87
Şekil 6.1. 700 °C'de Al2024,Al5083,Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği. 89	
Şekil 6.2. 700 °C'de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.	89
Şekil 6.3. 725 °C'de Al2024,Al5083,Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği. 91	
Şekil 6.4. 725 °C'de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.	92
Şekil 6.5. 750 °C'de Al2024,Al5083,Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği. 94	
Şekil 6.6. 750 °C'de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.	94
Şekil 6.7. Al5083 alaşımının 3. numunesinin 725 °C'de maksimum sıkıştırma gerilimi 55,941 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu. 96	
Şekil 6.8. Al6061 alaşımının 3. numunesinin 750°C'de maksimum sıkıştırma gerilimi 37,887 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu. 96	
Şekil 6.9. Al2024 alaşımının 3. numunesinin 750 °C'de maksimum sıkıştırma gerilimi 50,705 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu.	97
Şekil 6.10. Al6061 alaşımının basma deneyi uygulaması esnasında sırasıyla 1-2-3-4 durumlarında uğradığı deformasyonlar.	97
Şekil 6.11. Yer değiştirmeye bağlı olarak sönmölenen enerjideki değişimler.	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Profil ebatları (Kim ve diğerleri, 2008).	23
Çizelge 5.1. Al2024'e ait hacim ve yoğunluk tablosu.	72
Çizelge 5.2. Al5083'e ait hacim ve yoğunluk tablosu.	72
Çizelge 5.3. Al6061'e ait hacim ve yoğunluk tablosu.	72
Çizelge 5.4. 700 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.	79
Çizelge 5.5. 700 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.	79
Çizelge 5.6. 725 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.	79
Çizelge 5.7. 725 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.	80
Çizelge 5.8. 750 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.	80
Çizelge 5.9. 750 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.	80
Çizelge 5.10. Al2024 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması. ...	83
Çizelge 5.11. Al5083 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması. ...	83
Çizelge 5.12. Al5083 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması. ...	84
Çizelge 5.13. 750 °C'de numunelerin köpürme öncesi ve sonrası kalınlık değişimi- lineer uzama miktarları.	85
Çizelge 6. 1. 700 °C'de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.	88
Çizelge 6.2. 725 °C'de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.	91
Çizelge 6.3. 750°C'de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- ABS : kilitleme önleyici sistem
ASR : anti patinaj sistemi
ESP : elektrik denge programı
TiH₂ : titanyum hidrit
Rcar : otomobil araştırmaları araştırma konseyi
Al : Alüminyum
 ρ : bağıl yoğunluk
E_T : sönümlenen enerji
F : kuvvet
E_m : özgül enerji sönümleme
m : kütle
F_{ort} : ortalama ezilme kuvveti
S_s : son deformasyon miktarı
S_b : ilk deformasyon miktarını
 η_F : ezilme kuvveti verimini
S_{max} : maksimum deformasyon miktarı
l : çarpışma kutusu ilk boyu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde ulaşımda en çok tercih edilen ulaşım araçları otomobillerdir. Otomotiv sektörü son yıllarda oldukça önemli gelişmeler göstermiş ve zamanla artan talebe ve zorlu rekabet şartlarına rağmen mümkün oldukça fazla güvenlik, düşük ağırlık ve yüksek performansla cevap vermeye çalışılmıştır. Oluşan bu rekabet ortamında üretici firmalar ucuz ve güvenli araçları kısa sürede tüketiciyle buluşturma amacıyla birlikte ürün geliştirme süreçlerini kısa ve verimli tutma bilinci içerisinde olduklarıdır.

Karayolu ulaşımının gün geçtikçe artmasına bağlı olarak trafik yoğunluğu da artmaktadır. Taşıt sayısının artması ile trafikte meydana gelen kazalar da artmaktadır. Otomobil üreticileri meydana gelecek kazaların azaltılması ve kaza anında araç sürücülerin ve yolcuların zarar görmemesi veya oluşacak zararın en aza indirgenmesi amacı ile güvenli araçlar tasarlanmakta, üretmeye çalışmaktadırlar. Şekil 1.1’de 2020 Aralık ayı ve 2020 yılı tamamına ait ülke geneli trafik kazaları oluş şekli gösterilmiştir.

**ÖLÜMLÜ-YARALANMALI TRAFİK KAZALARININ
OLUŞ ŞEKLİNE GÖRE TÜRLERİ
(Ülke Geneli)**

S.N KAZA OLUŞ TÜRÜ	2020 ARALIK	2020 YILI
1 Karşılıklı Çarpışma	579	9.310
2 Arkadan Çarpma	1.044	16.612
3 Yandan Çarpma	3.009	46.400
4 Yan Yana Çarpışma	141	2.045
5 Duran Araca Çarpma	139	2.042
6 Zincirleme Çarpışma	24	366
7 Çoklu Çarpışma	25	362
8 Engel/Cisim ile Çarpışma	523	8.466
9 Yayaya Çarpma	1.299	21.765
10 Hayvana Çarpma	52	854
11 Devrilme/Savrulma/Takla	1.119	17.157
12 Yoldan Çıkma	1.377	22.145
13 Araçtan İnsan Düşmesi	54	1.231
14 Araçtan Cisim Düşmesi	4	65
15 Park etmiş araca çarpma	58	1.185
TOPLAM	9.447	150.005

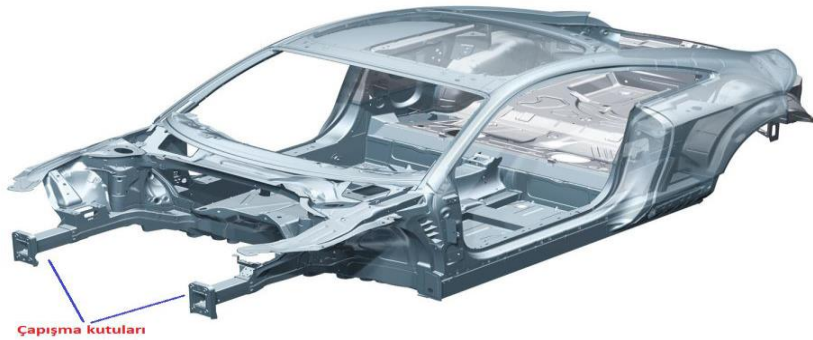
Şekil 1.1. TÜİK 2020 yılı trafik kaza oluş şekilleri.

Ülkemizde ölümlü ve yaralanmalı kaza oluş şekilleri ve kazaların yaşanmasında otomobiller için güvenlik tedbirleri artırılmalı, yolcu ve sürücü güvenliğinin sağlanması amacıyla meydana gelecek çarpışmalardan maddi zararı da azaltacak ürünler üretilmelidir. TÜİK verilerine göre 2020 yılında güncel olarak meydana gelen kazaların %30 u yandan çarpma, %14,7 si yoldan çıkma, %14,5 i yayaya çarpma, %11,4 devrilme, %11'i arkadan çarpma, %6,2 si karşılıklı çarpışma, %5 i cisim ile çarpışma gibi kazaların büyük çoğunluğu bu şekilde gerçekleşmiştir.

Otomotiv firmaları kaza esnasında yaşanan çarpışmanın güvenliğini ön planda tutarak birçok çalışma yapmıştır. Bu çalışmalar neticesinde birçok güvenlik sistemi geliştirilmiştir. Bu güvenlik sistemleri aktif ve pasif güvenlik sistemi olarak iki guruba

ayrılmaktadır. Aktif güvenlik sistemleri meydana gelecek olan kazanın olasılıklarını düşürürken pasif güvenlik sistemleri ise kaza meydana geldikten sonra yolcularda oluşacak zararın en aza indirilmesini sağlayan sistemlerdir. Örnek olarak aktif güvenlik sistemleri; kilitleme önleyici sistem (ABS), anti patinaj sistemi (ASR), elektronik denge programı (ESP), hız kontrolü ve park sensörü gibi sistemlerdir. Pasif güvenlik sistemleri aktif güvenlik sistemlerinin yeterli olmadığı zamanlarda devreye giren elemanlardır. Örnek olarak çarpışma kutuları, emniyet kemeri, hava yastığı gibi taşıt elemanları pasif güvenlik sistemlerindedir.

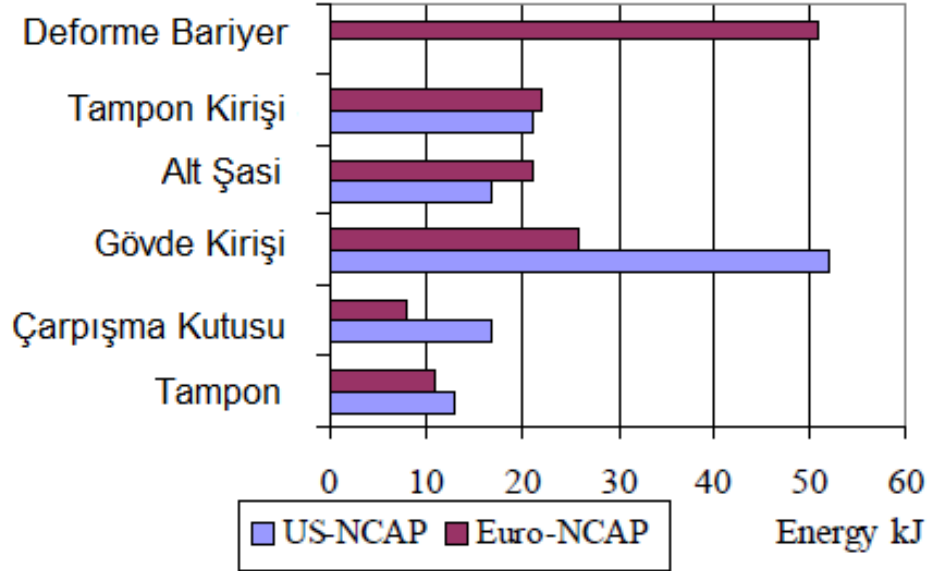
Emniyet kemeri meydana gelen kaza esnasında yolcunun ileriye oluşacak hareketini kısıtlarken, hava yastıkları ise olası çarpma esnasında yolculara ulaşacak darbe şiddetini emerek ölüm ve yaralanma olasılığını düşürür. Çarpışma kutularının da durum meydana gelen çarpma anında oluşacak darbeleri emerek yolcuların bu darbelerden minimum seviyede etkilenmesini sağlamaktır. Çarpışma kutuları araçların ön ve arka kısımlarında bulunup hem önden hem de arkadan olan çarpışmalarda güvenliği sağlar. Şekil 1.2'de iskelet yapısı ve çarpışma kutusuna ait görsel gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Bir aracın iskelet yapısı ve çarpışma kutuları.

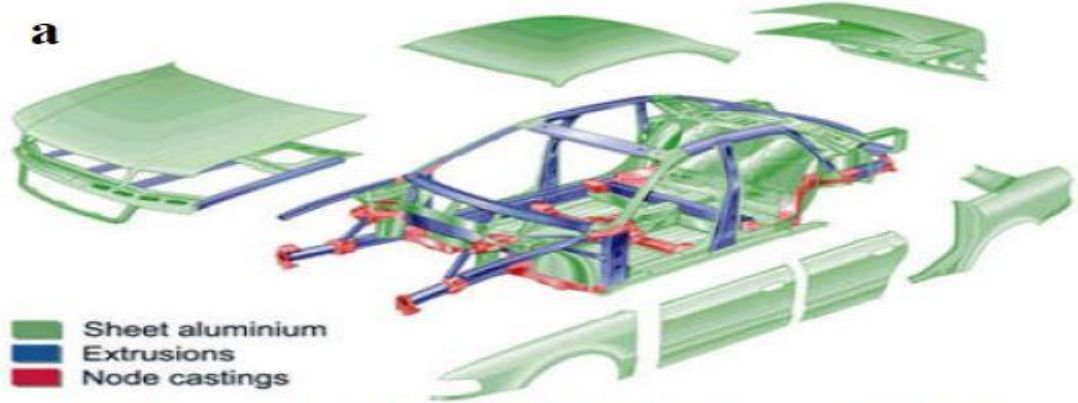
Kaza esnasında oluşan darbe kuvvetleri otomobile farklı büyüklükler halinde dağılmaktadır. Bu kuvvetlerin meydana getirdiği darbe enerjisinin çoğunluğu otomobilin ön kısmında bulunan parçalar tarafından sönmülenir. Çarpışma kutuları ise oluşan darbe kuvvetlerini tampon ile ilk olarak karşılayan parçalardır. Otomobil üreticileri tarafından referans olarak kabul gören ve sahip olduğu verileri ile uluslararası alanda geçerliliği bulunan US-NCAP ve EURO NCAP (New Car Assessment Programme) gerçekleştirilen bir çarpışma testi sonucunda meydana gelen

enerjinin araç üzerindeki parçalara göre dağılımını belirlemiştir. Çarpışma kutuları bu darbe enerjisinin yaklaşık %20'sini üzerine almaktadır. Şekil 1.3'te enerji dağılımı belirtilmiştir.



Şekil 1.3. Önden çarpışmalı kazalarda enerji dağılımı (Griškevičius vd., 2002).

Üretimde verimlilik esas alınırken işletme giderlerini de azaltmaya çalışan üretim anlayışıyla çevreyi daha az kirleten, geri dönüşümlü malzemelerin daha kolay olduğu, konfor ve emniyetli araçlar üretilmesi başlamıştır. Bu yaklaşımla birlikte otomobillerin sahip olduğu ağırlık en önem arz eden konudur. Otomobillerden azaltılan her 100 kg'lık ağırlık ile yakıt tüketiminde 0,6 litre/100 km yakıt tasarrufu sağlanmaktadır. Bu sayede egzoz gazının etkilerinin ve maliyetin aşağıya düşmesi sağlanmaktadır. Bu anlamda Alüminyum, ağırlığın düşürülmesinde en kilit rolü almıştır. Alüminyum emniyet ve konforu azaltmadan güvenle kullanılan bir malzemedir. Yoğunluğu çeliğin üçte biri kadardır. Hafif olmasına rağmen sahip olduğu mukavemetinin yüksek olması sebebi ile otomobillerde genelde tercih edilme sebebidir. Alüminyum kullanılan ortalama binek araçlarda 1400 kg'lık ağırlıkta 300 kg'lık bir ağırlık avantajı sağlamaktadır. Şekil 1.4'te Audi A8 model otomobilde bulunan alüminyum parçaları gösterilmiştir.



Audi A8 Model otomobilin alüminyum parçaları
 yeşil : alüminyum sac malzeme
 mavi : alüminyum ekstrüzyon parçalar
 kırmızı : doküm parçalar

Şekil 1.4. Audi A8 model otomobilde bulunan alüminyum parçaları.

Alüminyumun tercih edilmesinin başka bir sebebi ise araç tasarımında en önemli ayrıntı yolcu güvenliğidir. Çarpma sırasında ortaya çıkan enerji yolculara yansımadan darbe emiciler tarafından absorbe edilmelidir. Alüminyum absorbe durumuna en uygun elementtir. Taşıt ağırlığı ve de güvenlik önlemlerini iyileştirmek maksadıyla alüminyum alaşımları kullanımı tercih nedenidir. Şekil 1.5'te Audi A3 Alüminyum levhadan üretilmiş ön bölüm tasarımı ele alınmıştır.



Şekil 1.5. Audi A3 Alüminyum levhadan üretilmiş ön bölüm.

Otomobillerdeki yapının kinetik enerjiyi absorbe etme kapasitesi, kullanılan malzemenin mekanik karakteristikleri, tasarım ve montaj şekilleri ile belirlenmektedir. Yapılan çarpışma testi çalışmalarında, enerji absorbe etme karakteristiklerinin alüminyum tercih edilmesi ile iyileştirilebildiğini ortaya koymuştur. Şekil 1.6’da alüminyumun şok emme kabiliyeti sergilenmiştir.



Şekil 1.6. Alüminyum şok emme kabiliyeti (M. Dünder, G. Güngör).

Bu nedenle alüminyum ön darbe sistemlerinde kullanım için idealdir. Tasarımla baz alındığında ise uygun yerlerde ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiş alüminyum parçalar kullanılarak montaj işlemlerinden kaçınmak ve yapıyı daha güçlü hale getirmek mümkündür. Böylece hem %50 daha hafif hem de sertliği (rijitliği) artmış bir yapı sağlamak mümkün olabilmektedir. Yoğunluk farkı da hesaba katıldığında alüminyum çeliğe kıyasla 2.5 kat daha dayanıklı olup, çarpışma anında çarpışma enerjisini çeliğe kıyasla 2 kat daha fazla yutmaktadır. Alüminyumdan üretilmiş olan güvenlik ekipmanları çarpışma esansında akordiyon gibi katlanarak çarpışmadan doğan darbe kuvvetlerini emer ve taşıt içindeki sürücü ve yolcuları koruma sağlar. Alüminyum çelikten daha hafif olduğundan taşıt ağırlığını arttırmadan, çarpışma güvenliğini arttıracak ön ve arka buruşma bölgelerinin derinliğini ve direncini arttırma imkânı tanımaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Metalik köpükler, süngerlere benzer gözenekli yapılara sahiptirler. Köpükler doğal bir ürün değildir. Gözenekli yapı, ancak bazı işlemler uygulandıktan sonra meydana gelir. Doğal köpük ile hiçbir bağlantısı olmamasına rağmen, görünüm ve bazı özellikleri açısından “metalik köpük” diye adlandırılırlar (Çinici, H., 2004).

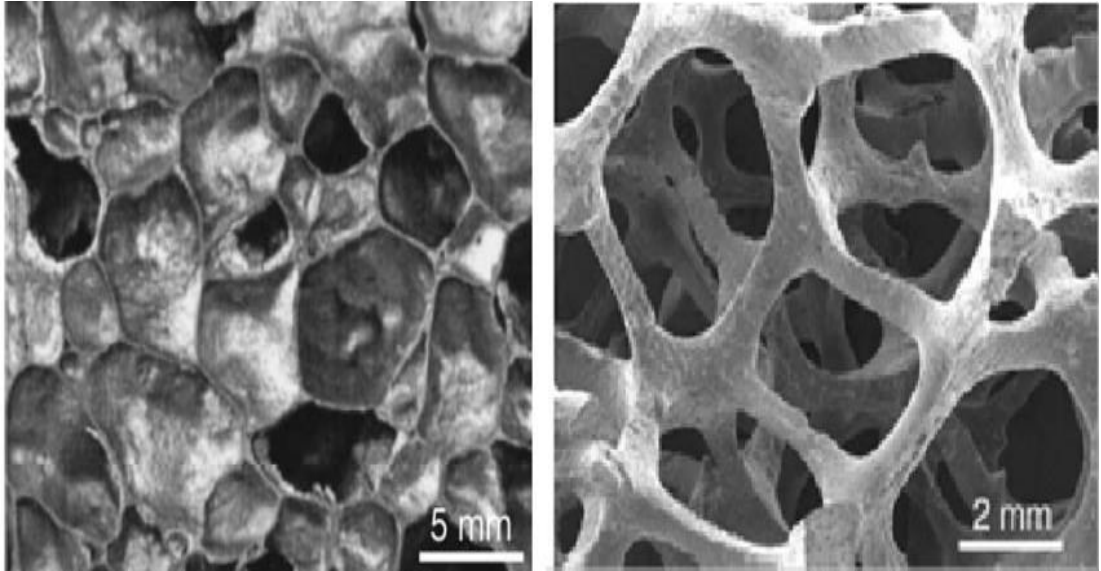
Metalik köpükler, metal ve alaşımların mekanik özelliklerinin yetersiz kalabildiği çalışmalar ve uygulamalar için boşluklu yapılarda üretimleri yapılan gözenekli yapıda malzemelerdir. Özellikle son zamanlarda metal köpüklere artan ilgi, metal köpüklerin yoğun metaller, köpük seramikler veya polimerlerle elde edilemeyecek mekanik özelliklerin bileşimine sahip olmaları sebebiyle oldukça artmaktadır (Banhart vd., 2008)

Yüksek dayanım gücü, düşük yoğunluk ve ağırlıklarına ek olarak oldukça iyi düzeyde ses ve enerji sönmüleyebilme özellikleriyle otomotiv, denizcilik, havacılık ve inşaat gibi temel sektörlerde önemi oldukça artmıştır. Ayrıca geri dönüşebilen, yeniden kullanılabilen ısı iletimleri düşükve sıvı şok dayanımlar iyi düzeyde olan malzemelerdir. Bunlara ek olarak, enerji absorbe edip emebilme kapasitesi, elastik modülüyet, sertlik dayanımı gibi mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini geliştirmek için seramik ilavesi yapılarak seramik katkılı metal matrisli kompozit köpük üretimi yapılmaktadır (Güven, 2007)

Metalik köpükler yapısal olarak gaz ile dolu, çevresi sıvı ya da katı malzemeler ile kapatılmış olan gözenekli yapılara sahip malzemelerdir. Bu malzemeler doğal değil, çeşitli proseslere tabi tutularak elde edilmektedirler.

Metalik köpükler şekil olarak gözenekli, katı ve gaz durumlarında bulunan maddelerin bileşimi olarak bilinir. Bu yapıyı gözenekli şekilde oluşturabilmek için bazı malzemelerin kullanılması gerekmektedir. Bu malzemelerin üretimi esnasında oluşacak gözeneklerin mümkün oldukça homojen şekilde dağılması istenmektedir (Amjad, 2001).

Açık hücreli köpükler iç içe geçmiş gözeneklerden oluşurken, kapalı hücreli köpükler ise birbiri ile bağı bulunmayan gözeneklerden oluşmaktadır. Kapalı hücreli köpükler genelde daha yüksek basma mukavemeti ve dayanım sergilerler. Bu sebeple otomotiv sektörü için tamponları, salıncak kolu ve karoser gibi bölgelerde, askeri alanda zırhlar gibi yüksek mukavemet ve enerji absorbe edebilme kapasitesinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Diğer yandan ise iç içe geçmiş gözeneklerin varlığı ve büyük iç yüzey alanına sahip olmasından dolayı açık gözenekli köpüklerden birçok farklı çalışma ve uygulama alanlarında yararlanılmaktadır. Şekil 2.1’de kapalı ve açık hücreli metalik köpüklerin mikroskop görüntüleri verilmiştir. Isıdeğiştiriciler, katalizör destekleri, kemik implantları, alev durdurucular, su arıtma ve akustik gibi örnekler verilebilir (Banhart vd. 2002).



Şekil 2.1. Kapalı hücreli ve açık hücreli metalik köpük mikroskop görüntüleri (Zhou, 2006).

Hücre yapısı esas alınarak metalik köpük malzemeler açık hücreli ve kapalı hücreli olarak ikiye ayrılmışlardır. Her iki yapıda da metalik köpükler %80- %90 oranlarında boşluk %10-%20 oranlarında ise malzemeden meydana gelmektedirler. Metalik köpük malzemelerde gözenekler arasında herhangi bir bağlantı varsa bu tür köpüklere açık hücreli metalik köpük, gaz hücreler içerisinde hapsedilmiş ve sızdırmazlık derecesinde birbirlerinden duvarlarla ayrılıyorsa kapalı hücreli metalik köpük olarak isimlendirilmektedirler (Sertkaya, 2008).

Metal köpükler, gözeneklerinin birbirlerinden ince bir metal duvarlarla ayrıldığı yapısal malzemelerdir. Gözenekli yapıları, metalik oluşumları, yüksek rijitlik seviyeleri, yüksek dayanıklılık-ağırlık oranları ve yüksek enerji emebilme kapasiteleri ve düşük yoğunluklu özelliklerinden dolayı titreşim azaltabilme, ses emebilme ve yangına karşı dayanıklılık gibi artı işlevsel özellikleri barındırmaktadır (Chenggong vd., 2003).

Metalik köpükler, ısı yalıtım alanında da oldukça fazla kullanılmaktadır. Özellikle kapalı hücre yapılı metalik köpükler, geleneksel olarak kullanılan vakumsuz yalıtım malzemelerine göre daha az termal iletkenlik seviyelerine sahiptir. Metal köpüklerdeki ısı akışını sınırlayan bazı faktörler şunlardır: düşük katı faz hacim oranı; tekrarlı olarak emilim ve hücre duvarlarından yansıtılmalarıyla küçük hücre boyutları; hapsolmuş gazların düşük iletkenliğidir (Güven, vd. 2011)

Ses emebilme özelliği, malzemenin sahip olduğu titreşim enerjisini emmesiyle ilgilidir. Gözenekli malzemeler, gözenek yapılarının etkili titreşim emilimine öncülük etmesinden ötürü iyi derecede ses emebilme özelliğine sahiptir. Ses dalgaları köpük malzeme yüzeyine ulaştığında, hava gözenekler boyunca titrer ve hücre duvar malzemesinin de titreşmesine sebebiyet vermektedir. Takviye malzemesi ile enerji emebilme özelliği üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır. Çünkü; matris ile takviye malzemesi ısı genleşmedeki uyumsuzluk ile takviyenin mikroplastik deformasyonu veya ara yüzeydeki yüksek dislokasyon yoğunluğu gibi sebepler ses emebilme kapasitesini artırıcı etken olmaktadır (Chenggong vd., 2003).

Gözenekli metallerin en önemli sahip olduğu özelliklerinden bir tanesi de bağıl yoğunluktur (ρ). Formülü [$\rho = \rho^* / \rho_0$]’dir. ρ ve ρ_0 sırasıyla gözenekli malzemenin yoğunluğu ve hücre duvarlarının yapıldığı malzemenin yoğunluğudur. Bağıl yoğunluk arttığında hücre duvarlarının yapısında kalınlaşma meydana gelmektedir. Köpük malzemelerin özelliklerini etkileyen başka faktörler ise gözenek şekli, gözenek boyutu ve gözenek dağılımıdır (Lukkassen vd. 2007)

Metalik köpükler için, bağıl yoğunluğun karesi, elastik modulus ile doğru orantılıdır. Diğer bir söyleyişle metalik köpükler yoğun hallerinden daha az düşüklükte elastisite modülüne sahiptir ama köpüklerin rijitlikleri daha yüksektir. Örnek olarak yoğun metal levha yerine eşit ağırlıkta ve aynı metalden köpük yapılı başka bir levha kullanıldığında levhanın kalınlığı da artacaktır. Ancak köpük levha, yoğun olan levhadan beş kat veya daha fazla kalınlığa sahip olursa, rijitliğe (bükülmeye) karşı ortaya konulan direnç de beş kattan daha fazla artacaktır. Bu durum da metalik köpüklerin rijitlik-ağırlık oranlarının oldukça yüksek olduğunu ve yapısal uygulama alanlarında önemli rolleri olduğunu göstermektedir (Banhart vd, 2002).

Açık gözenekli metalik köpüklerin tersine kapalı gözenekli metalik köpüklerin basma kuvveti altında hücre duvarlarının uzaması ve büzülmesi deformasyonu etkileyen faktörlerdir. Bu sebepten dolayı kapalı gözenekli metalik köpüklerin hücre duvarları meydana gelen yapılarda rijitliği artırıcı rol oynamaktadır. Ayrıca kapalı gözenekli metalik köpüklerin açık gözenekli yapıda olanlara karşı darbe dayanımı ve mukavemeti de daha yüksektir (Yıldırım, 2010).

Metalik köpüklerin, sahip olduğu hücre yapılarının homojen yapıda olması oldukça önemli bir konudur. Hücre yapısındaki yaşanan farklılıklardan ötürü büyük yapılı hücrelerdeki deformasyon yerleşmesi, köpüğün maruz kalacağı yük altındaki performansını da sınırlandırır. Ticari alanda en çok tercih edilen ve kullanılan hücresel metaller, ana metalinin mekanik özellikleriyle bütünleştirilerek tahmin edilen özelliklere ulaşamamaktadır. Bu durum da kayıp olan hücre duvarları, hücre duvarlarında oluşan kıvrılmalar gibi yapıdaki morfolojik hatalara sebep olarak gösterilmektedir. Hafif ağırlıklı malzemelerin sahip olduğu tüm avantajlarından yararlanabilmek için bu hatalar giderilmelidir. Ayrıyeten, toz metalurjisi üretim

yöntemi ile elde edilen metal matrisli köpükler, diğer metal köpüklere göre daha yüksek basma mukavemeti, mukavemet-yoğunluk oranı ve enerji emme özelliği gösterirler

Bu tez çalışmasında elde ettiğimiz numunelerin homojen yapıda olabilmesi ve çalışma alanımızda kullanabilmemiz için köpürtücü madde ile üretim metodu ve proseslerini kullanıp mümkün olduğunda hücrenin ve gözeneklerin morfolojik yapısının eşit dağılımını sağlamaya çalışarak Al2024, Al5083, Al6061 serisi metalik köpük ve numunelerini ürettik. Hücre yapıları ve dağılımlarını inceleyip literatür araştırması kısmında grafik ve yorumlar yapılmıştır.

2.1 BOŞ ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tasarım yapılarındaki farklılıklar sebebiyle çarpışma kutularının enerji sönmleme kapasitelerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Çarpışma kutularında farklı geometrik yapılarına sahip olmalarına rağmen genel olarak konik enerji yutucular, boru tipi enerji yutucular, çokgen kolonlar, sandviç plakalar, petek yapılar ve başka şekillerde sınıflandırmaları yapılabilmektedir (Alghamdi, 2001).

Yapılan çalışmaların çoğunda çarpışma kutuları çoğunlukla tepe açısı olmayan düz bir yapıya sahiptirler (Cerit, 2011). Çarpışma kutuları taşıtlarda dolu ve boş profiller halinde bulunmaktadır. Boş profiller meydana getirildikleri malzemelerin sahip olduğu mekanik özelliklere göre farklı enerji sönmleme kabiliyetlerine sahiptirler. Boş profillerin enerji sönmleme kapasitelerini yapılan bazı işlemlerden sonra artırmak mümkündür. Enerji sönmleme kapasitesinin artırılması yapılan bazı çalışmalarda darbe emici görevi olarak tercih edilen malzemelerin geometri kesitleri değiştirilmiş ve iç kısımları oldukça yüksek mukavemetli malzemelerle doldurulmuştur.6060 serisi Alüminyum alaşımlı malzemedan elde edilmiş olan kare kesitli bir çarpışma kutusunun eksenel yükler altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyleerde dinamik yük ve yavaş basmaya karşı dayanımları canlandırılmıştır. Deneyleerde numunelerin farklı et kalınlıkları ve 8-20 m/s

aralığındaki hızlar değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Çarpışmada dinamik etki yaratmak için 56 kg'lık bir kütle kullanılmıştır. Yaşanan deformasyon neticesinde meydana gelen enerji ile aksenal olarak kalıcı yer değiştirmenin aynı yönde bir eğilimi olduğu, profillerde simetrik olarak oluşan deformasyonun ise profilin et kalınlığı ve malzemelerin sertlik derecesine göre değişiklik oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yavaş basma ve dinamik yükler karşısında ezilmelerden dolayı ortaya çıkan katlanmanın asimetrik ya da simetrik olmasının sönmölenen enerjiye etkisi sonucunda, simetrik olan ezilmelerde çok daha fazla enerji sönmölendiğı ortaya konmuştur (Langseth vd. 2007)

Çok hücreli olarak imal edilen düz çarpışma kutularında kesit geometrisinin etkisi incelenmişlerdir (Najafi, A., vd., 2008). Yapılan çalışmada tek hücreli kare kesitli ve kare kesitin iki, üç, dört ve dokuz eşit parçaya ayrıldığı beş farklı kesit alanına sahip yapılar ile tümünün dış ve iç hücreleri kare prizma olan, iç ve dış hücrelerin bağlantı şekilleri farklı olan dört farklı kesit geometrisine sahip yapılar kullanılmıştır. Yapılara iki adet dinamik çarpışma simölasyonuna göre yükleme yapılmıştır. Çarpışma performansının kuvvet-yer değiştirme ölçütü olarak ele alındığı ezilme şekli, özgül enerji emilimi ve ezilme boyunca oluşan mesafe kullanılmıştır. Bu çalışmada kesit geometrisine bağılı olarak iç ve dış hücrenin bağlantısının çarpışma karakteristiğinde etkili olduğu değerlendirilmiştir. Çok hücreli yapıların tek hücreli yapılara göre 3-5 kat daha fazla enerji sönmöledikleri, iki kata kadar da daha fazla özgül enerji emilimi sağladıkları ortaya konmuştur.

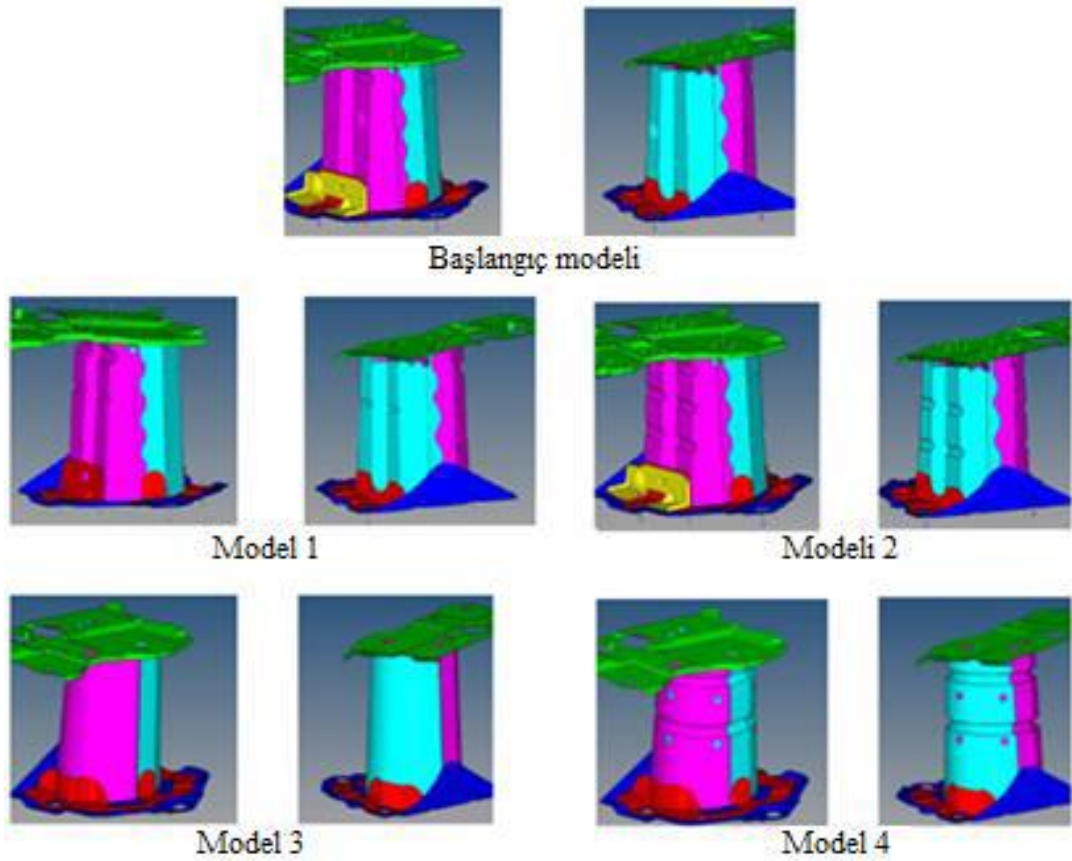
Çok hücreli çarpışma kutularını üzerinde yapılan bir diğör çalışma çarpışma kutularının çok amaçlı optimizasyonudur. Bir, iki, üç ve dört hücreli olarak sınıflandırılmış olan 400 mm uzunluğunda kare kesitli çarpışma kutularının et kalınlığı ve kesiti meydana getiren karenin ayrıt uzunlukları değişken bırakarak arkalarına 500 kg'lık yük sabitlenmiş biçimde rijit bir duvara 10 m/s hız ile çarpma testini sonlu elemanlar analizleri oluşturmuşlardır. Tasarımdaki belli değişkenleri ile minimum çarpma kuvveti ve maksimum özgül enerji emilimine göre optimize üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Sonuçta özgül enerji sönümleme kapasitesi kesitlerde bulunan hücre sayılarının artması ile arttığı tespit edilmiştir. Bu durumda hücre sayısının yükseltilmesi ile çarpışma kutularının sahip olduğu ilk deformasyona başlaması için gerekli olan maksimum deformasyon kuvvetinin de artmasına neden olduğu belirtilmiştir (Hou vd. 2008).

Bir diğer çalışma ise farklı geometrik yapıları bulunan çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerini ortaya konulmuştur. Çalışma için kullanılması planlanan çarpışma kutularının geometrileri yuvarlak, kare ve elips olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda çarpışma kutuları için seçilen malzemeler çelik ve alüminyum olmak üzere, et kalınlıklarını da 1,25 mm ve 1,5 mm olarak belirlemişlerdir. Tüm çarpışma kutularının boyları 150 mm olarak belirlenmiş olup sahip oldukları genişlikler ise 30 mm olarak ele alınmıştır. Yapılan çalışmada deformasyonun sağlanabilmesi için 9,396 m/s'lik hıza sahip 100 kg'lık bir kütle çarpışma kutularının üzerine gönderilmiştir. Yapılan işlemlerin ardından son olarak deformasyonun tamamlanması ile en yüksek enerji sönümlemesi sağlayan çarpışma kutusunun elips yapısına sahip çarpışma kutularının olduğunu elde etmişlerdir. Elips yapılı çarpışma kutularının diğer yapıdaki çarpışma kutularına göre deformasyon esnasında daha iyi deforme olduğunu belirlemişlerdir. Malzeme özellikleri açısından ise kullanılan çelik yapılı çarpışma kutularının alüminyum yapılı çarpışma kutularına göre enerji sönümleme kapasitelerinin yaklaşık 5 kat fazla olduğunu ortaya koymuşlardır (Marzbanrad vd, 2009).

Konik yapılı enerji sönümleyici çarpışma kutuları çarpışma boyunca sağladıkları net ve kararlı kuvvet–yer değiştirme durumundan dolayı tercih edilen çarpışma kutusu türleridir. Bu nedenle yapılmış olan çalışmada konik ve düz yapıda bulunan enerji emici yapıları statik ve dinamik aksenal yük altında karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmalarının sonucunda statik yükleme esnasında koni açısı arttıkça maksimum çarpışma enerjisinin azaldığı neticesine varmışlardır. Ek olarak konik yapılı enerji sönümleyicilerin yanal kuvvetlere karşı direncinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Nagel, G.M., vd. 2004).

Birbirinden farklı geometrik şekillerdeki çarpışma kutularının önden darbe olarak çarpma durumlarında enerji sönümlenme kapasitelerini anlayabilmek için sonlu eleman analizi yapmışlardır. Profillerin sahip olduğu et kalınlıklarını ve geometrilerini değiştirmek suretiyle bazı denemelerde bulunmuşlardır. Yapılan bu çalışmada farklı geometrik yapılara sahip çarpışma kutuları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu çarpışma kutularının bazıları Şekil 2.2’de görülmektedir (Demirci vd., 2014).

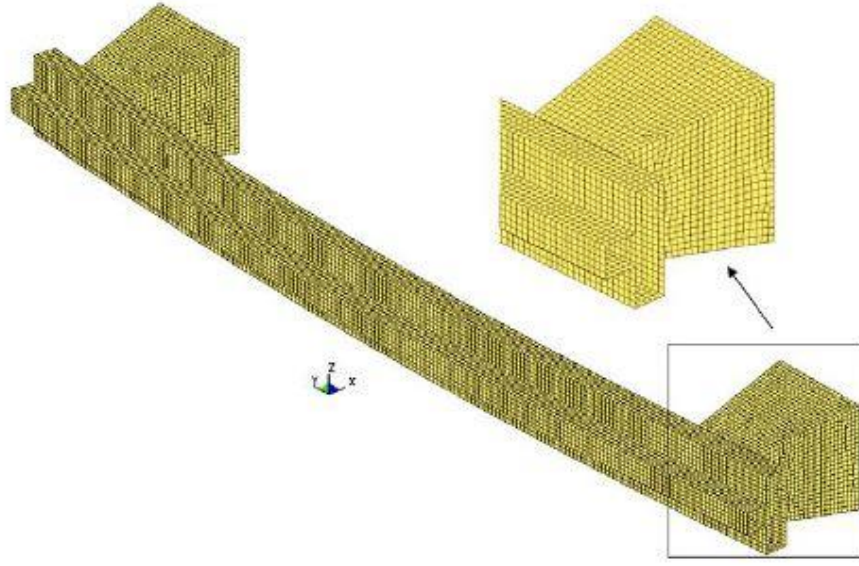


Şekil 2.2. Mevcut ve alternatif çarpışma kutusu modelleri (Demirci vd, 2014).

Çelikten yapılmış çarpışma kutuları ile LS-DYNA yazılımı ile 15,6 m/s lik hızda 80 kg kütleli düz bir duvara aksel doğrultuda çarpışma gerçekleştirilerek sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. 90 mm’lik meydana gelen deformasyon mesafesinde sonlu elemanlar analizleri yapılan tüm modellerin ezilme kuvvetinin verimi, enerji sönümlenme ve birim kütle başına düşen enerji sönümlenme kapasitesi hesaplanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen 1 numaralı modelin mevcut modele daha iyi olduğu, 6,66 kJ’lük enerji sönümlenme kapasitesinin 6,7 kJ’e çıktığı ve maksimum deformasyon kuvvetinin 107 kN’dan 106 kN’a indiği tespit edilmiştir (Demirci vd. 2014).

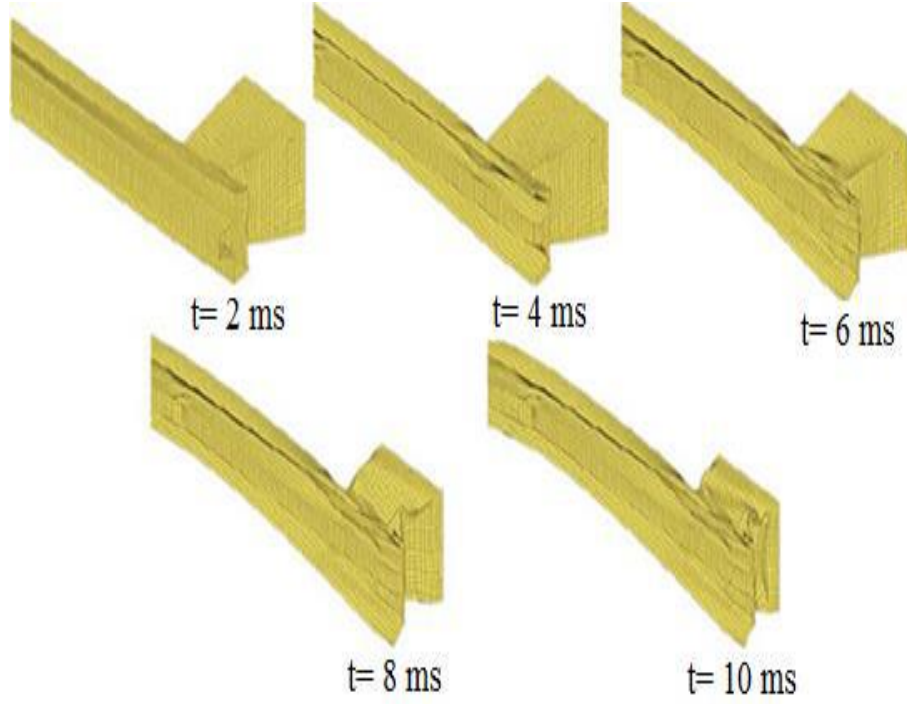
Yapılan bir başka çalışmada çok hücre yapılı enerji sönümleyici yapıların kesitlerinin şekli, koni açısı ve hücre yapısının çarpışma performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Kesit şekline göre düz dairesel, düz kare, konik dairesel ve konik kare olarak sınıflandırılan dört farklı yapı belirlenmiştir. Seçilen bu dört yapının her yedi farklı şekilde olmak üzere çoklu hücrelere bölünmüştür. Duvar kalınlığı ile koni açısı da tasarımın değişkeni olarak belirlenmiştir. Çarpışma performansı değerlendirmesini çarpışma kuvveti verimi ve özgül enerji emilimi ile ortaya konacak ölçütler kullanılarak yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda duvar kalınlığı ve koni açısı gibi parametreler sabit tutulduğunda en iyi performansa sahip çok hücreli tasarımın en düşük performansa sahip tek hücreli tasarıma göre %165 daha yüksek çarpışma kuvveti verimi ve %237 daha yüksek özgül enerji emilimi sağladığı tespit edilmiştir. Tasarımın bütün parametre değişkenleri kullanıldığında ise koni açısının çarpışma kuvveti verimi ve özgül enerji emiliminde ve bu değerlere ek olarak sırasıyla %5 ve %7, koni açısı değişiminin de %4 iyileşmeye sebebiyet verdiği tespit edilmiştir (Altın vd., 2019).

Bir diğer yapılan çalışma da sonlu elemanlar yöntemi aracılığı ile LS-DYNA yazılımı kullanılarak darbe emici sistemler üzerine yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada %40 ofsetten meydana gelen bir tampon modeli ile çarpışma LS-DYNA ile meydana getirilmiş ve Şekil 2.3'te Tampon ve darbe emici sonlu elemanlar modeli olarak gösterilmiştir (Öztürk, İ., vd.,2008).



Şekil 2.3. Tampon ve darbe emici sonlu elemanlar modeli (Öztürk vd., 2008).

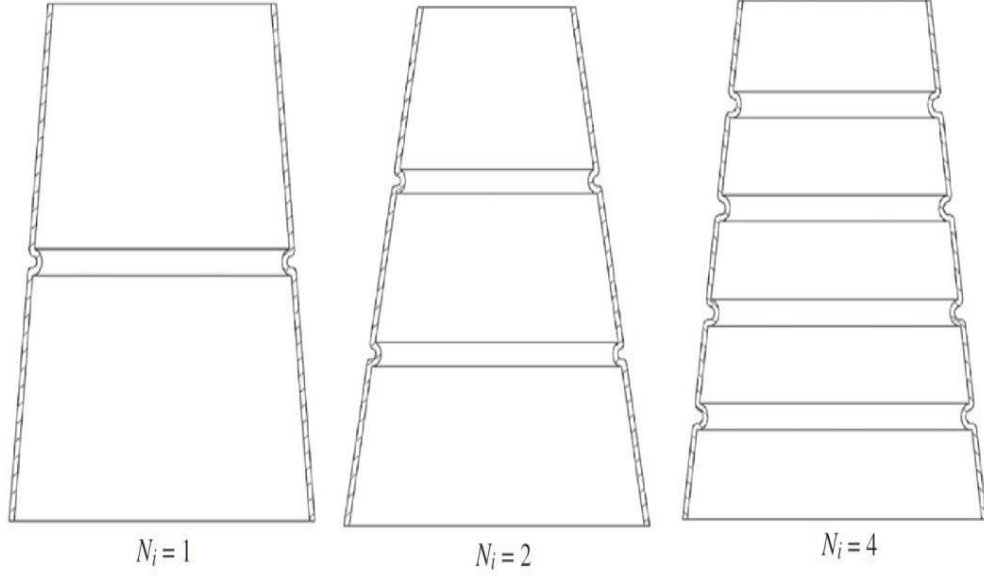
Şekil 2.3'te gösterildiği gibi sonlu elemanlar yöntemi ile meydana getirilen tamponun arka kısmına çarpışma kutusunun modelini yapılmıştır. Kullanılan parça için seçilen malzeme DP600 yüksek mukavemetli çeliği olarak belirlenmiştir. Analizler esnasında oluşturulan yapıda deformasyon meydana gelmesi için 15,8 m/s hıza sahip bir aracın çarpışma anında meydana getirdiği enerjiye denk olan 1000 kg kütleye sahip bloğun oluşturulan tampon modeline çarpması planlanmıştır. Çarpışmada kullanılan malzememe için seçilen et kalınlığını 1 mm olarak ele alınmıştır. Yapılan analiz sonucunda tampon üzerinde meydana gelen deformasyon görüntüsü Şekil 2.4'te analiz boyunca deformasyon şekilleri olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Analiz boyunca deformasyon şekilleri (Öztürk vd., 2008).

Çarpışma kutusuna uygulanan analiz süresince tasarlanan tampon ile iç içe katlanarak deforme olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma neticesinde analiz edilen modelde 10 m/s'lik süre içerisinde sönmölenen enerji kapasitesi $4,21 \times 10^6$ J olarak bulunmuştur. Bununla beraber 1000 kg'lık kütleli blok 15,8 m/s'lik bir hızla tampona çarptığı varsayıldığında açığa çıkan toplam enerjinin yaklaşık %3,4'lük kısmının, tasarlanan çarpışma kutusu tarafından sönmölendiğini belirlenmiştir.

Yapılan çalışmaların bir diğeri çarpışma esnasında yolculara ulaşan maksimum kuvvetin düşürölebilmesi için tasarlanan çarpışma kutularında ezilme başlatıcı yapılar bulundurmaktır. Bu yapılar sayesinde ezilme başladığında gerekli kuvvet düşürölmektedir. Ezilme başlatıcı yapılara örnek verilecek olursa Mamalis'in tasarlamış olduğu kare kesitli çarpışma kutuları üzerine delikler açılarak istenen kısımları zayıflatılmıştır (Mamalis vd., 2009). Literatürdeki yapılan bazı diğeri çalışmalarda da çarpışma kuvveti veriminin arttırılması ve maksimum çarpışma kuvveti ile ezilme başlatıcı olarak girintiler kullanılmasıdır. Yapılan bir çalışmada kullanılan bir, iki ve dört adet Şekil 2.5' te aksenal simetrik girintilere sahip konik enerji sönmöleyiciler gösterilmiştir.



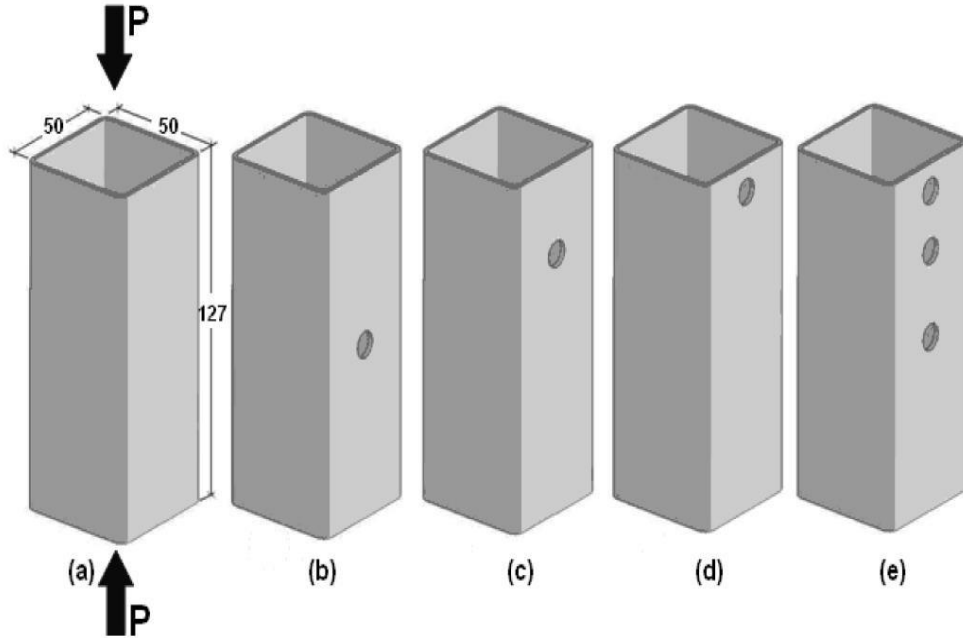
Şekil 2.5. Eksenel simetrik girintilere sahip konik enerji sönümleyiciler.

Acar vd. (2011) çalışmalarında üzerlerinde eksenel simetrik girintiler bulunduran konik şekilli çarpışma kutularının çok amaçlı optimizasyonunu incelenmiştir. Tasarımda taban çapı 150 mm, boyu 180 mm olan bir enerji sönümleyici yapı tercih edilmiştir. Konik yapıda koni açısı, duvar kalınlığı, girinti sayıları ve eksenel simetrik girintilerin yarıçapları tasarımın değişkenleri olarak belirlenmiştir.

Çarpışma kutularının sahip olduğu çarpışma performansları çarpışma kuvveti verimi ve özgül enerji emilimi değerlerine göre değerlendirilmiş olup, en yüksek çarpışma kuvveti verimi için çok sayıda ve yüksek yarıçaplı girintilere, düşük et kalınlığına ve ortalama koni açısına ihtiyaç olduğu, özgül enerji emilimi değerinin maksimumuna ulaşmak için ise tam tersine az sayıda ve düşük yarıçaplı girintinin kalın et kalınlıklı ve düşük koni açılı bir geometri ile birlikte kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan diğer bir çalışmada kare kesit yapıdan oluşan düz çelik tüplerin üzerlerinde açılmış olan ezilme başlatıcı deliklerin etkisi incelenmiştir. Çalışmalarda tercih edilen kare kesitli enerji sönümleyicilerin boyları 127 mm ve ayrıtları 50 mm kullanılmıştır. Açılan deliklerin pozisyonları şekilde gösterildiği gibidir. Bu delikler

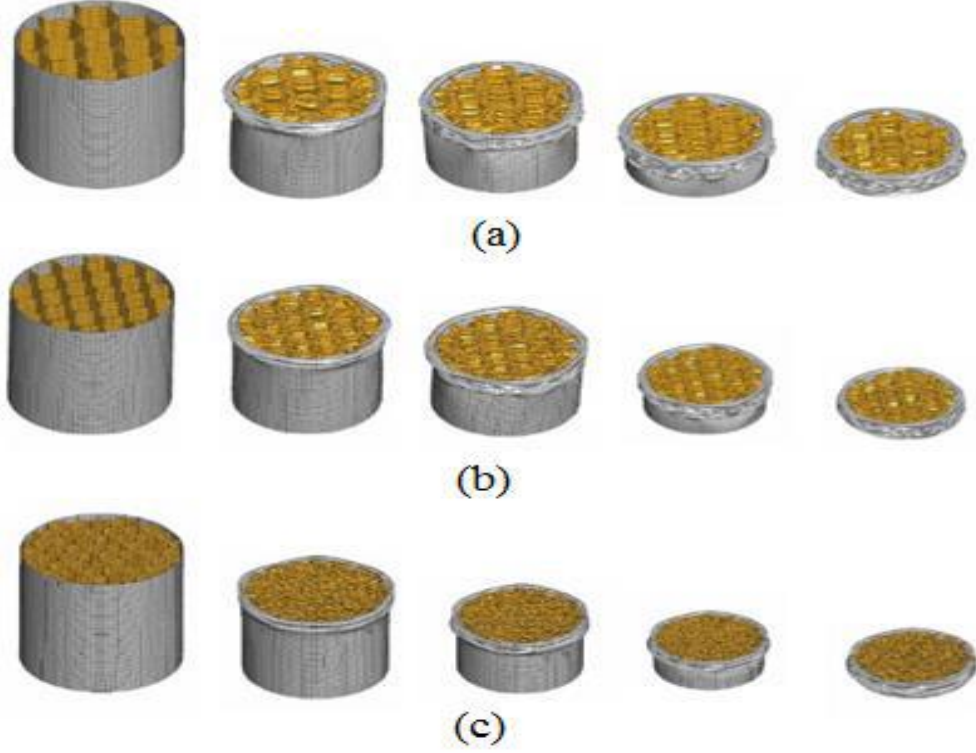
tek tarafa ya da karşılıklı olacak şekilde iki duvara açılarak, 5mm ve 10mm olarak iki farklı çap seçilerek toplamda 17 farklı kombinasyon üzerinden belirlenmiştir. Tüm çarpışma kutuları dakikada 5 mm ilerleyen ve 10 kN kapasiteli bir test cihazın tarafından ezilmişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde açılan delik çapının, deliğin bulunduğu pozisyon kadar mühim olmadığı ve tek tarafa açılmış olan deliğin çarpışma kuvvetini ciddi olarak düşüremediği tespit edilmiştir. Ancak en fazla enerji sönmüleyebilen ve en düşük çarpışma kuvveti sağlayan yapının, orta kısmında karşılıklı olarak iki duvarda açılan 10 mm çapında delik olan kombinasyon olduğu sonucuna varılmıştır (Acar, E., vd., 2011). Şekil 2.6'da üzerlerinde çarpışma başlatıcı delikler bulunan çarpışma kutuları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Üzerlerinde çarpışma başlatıcı delikler bulunan çarpışma kutuları.

Aktay vd. (2011) tarafından yapılmış olan çalışmada bal petek yapı ile doldurulan alüminyum profillere aksenal yükler altında basma testleri uygulanmış ve bu profillerin enerji sönmüleme kapasitelerini araştırmışlardır. Testlerde hücre çapları 3,2 mm, 4,8 mm ve 6,6 mm, et kalınlıkları 0,9 mm ile 0,15 mm arasında farklı geometrilere sahip bal petek yapılar kullanmışlardır. Bal petek yapıları ve alüminyum yapıdan oluşan içersine yerleştirdikleri malzemeleri ile uzunluklarını 25,4 mm ve et kalınlıklarını 0,29 mm olarak belirlemişlerdir. Daha sonra üretilmiş olan profillere boy uzunluklarının % 50 ile % 80'ini deforme edebilecek biçimde

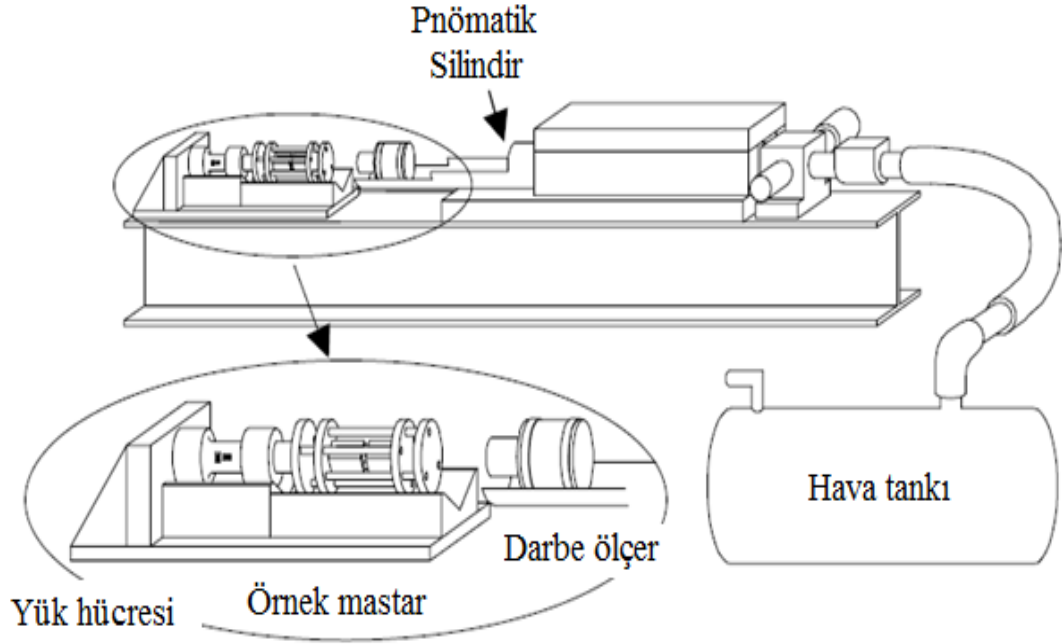
basma testleri uygulamışlardır. Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda farklı geometrik yapılara sahip olan bal petek yapı ile doldurulmuş profillerin geometrilerinde meydana gelen değişim Şekil 2.7.'de gösterilmiştir (Aktay, L., Çakıroğlu, C., ve Güden, M. 2011).



Şekil 2.7. Hücre çapları (a) 6,4 mm, (b) 4,8 mm, (c) 3,2 mm ve et kalınlığı 0,13 mm olan alüminyum profillerin simülasyon görüntüleri.

Yapılan çalışma sonucunda çarpışma kuutusunda bulunan bal petek yapının hücre çapı 3,2 mm olduğunda özgül enerji sönmleme kapasitesinin 9,68 kJ/kg olduğu hesaplanmıştır. Hücre çapı 4,8 mm'ye çıkarıldığında özgül enerji sönmleme kapasitesi 9,14 kJ/kg ve 6,4 mm'ye çıkarıldığında ise 8,11 kJ/kg olarak tespit edilmiştir.

Başka bir çalışmada otomobillerde çarpışma sırasında ortaya çıkan deformasyon hızını ve bu hıza bağlı olarak malzeme mukavemetinde meydana gelen değişimler gözlemlenmiştir. Yapılmış olan testlerde çarpışma kutularındaki deformasyonu oluşturmak amacıyla Şekil 2.8'de gösterilen pnömatis tip darbe test cihazı kullanmışlardır (Lee vd, 1999).



Şekil 2.8. Pnömatik çarpışma test düzeneği (Lee ve diğerleri, 2000).

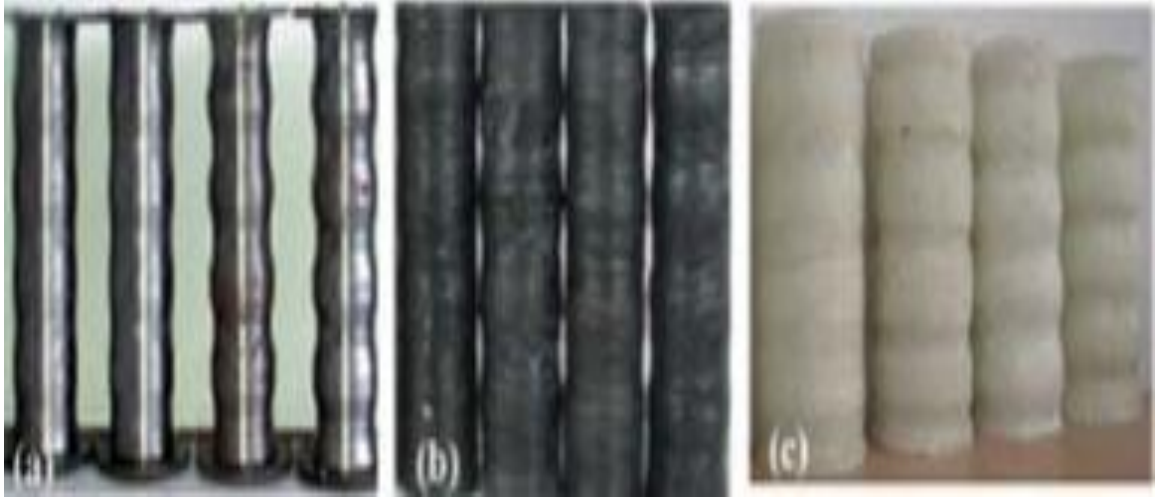
Çarpışma sırasında darbe hızı 5-13 m/s olarak belirlenmiştir. Yapılan testler sonucunda çarpışma kutularındaki enerji sönümlenme karakteristiklerinde deformasyon hızının oldukça etken olduğu, cam elyaf ilaveli kompozit malzemelerin ölçülen değerlerdeki deformasyon hızının ise dinamik olan yüklemelerde %80 daha iyi bir sonuç verdiğini belirtilmiştir. Ek olarak kompozit malzeme türlerinin de enerji sönümlenme kapasitelerinin deformasyon hızıyla orantılı olduğu belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalardan bir tanesi de belirlenen altı adet çarpışma kutularının üzerine farklı boyut ve şekillerde çentikler oluşturularak enerji sönümlenme kabiliyetlerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan bu çentikleri tam veya yarı bir profil genişliğinde tutmuşlardır. Üretilen çarpışma kutularının malzemesini de Al 6063 alaşımından imal etmişlerdir (Lee, S., vd., 1999).

Öncelikle profillere basma testleri uygulamış ve sonrasında sonlu elemanlar analizleri vasıtasıyla testlerini doğrulamışlardır. Elde edilen verilerde çentikli yapıya sahip çarpışma kutularında ezilme kuvvetlerini hemen hemen yarıya düşürdüğünü gözlemlenmiştir. Çentik yapısına göre tam ve yarı çentikli çarpışma kutularını

kıyaslandığında ise yarı çentikli yapıdaki çarpışma kutularının daha fazla enerji sönümlenmesi sağladığını ortaya koymuşlardır.

Enerji sönümlenme, darbe absorbe etme çalışmaları çeşitli şekillerde bulunan bazı malzemeler üzerinde de test edilmektedir. Profil değişkenliğinden yararlanılarak enerji sönümlenme kabiliyetlerinde değişkenlik sağlandığı birçok çalışmada ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada Şekil 2.9'da gösterilen farklı köşe kıvrım açlarına ait profiller yuvarlak şekilli malzemelere zıt olarak profildeki oluk şekillerin ezilmeye karşı sergilenen davranışları ve enerji sönümlenme kabiliyetleri incelenmişlerdir (Elgalai, A.M., vd.,2004).



Şekil 2.9. Farklı köşe kıvrım açlarına ait profiller (Elgalai ve diğerleri, 2004).

Deneyleerde kullanılan malzemeler olan cam elyaf ve karbon fiber yapıllı iki tip çarpışma kutusu test edilmiştir. Teste tabii tutulan çarpışma kutularında köşe oluk kıvrım açısı 10 ile 40 derece arasında olması ayarlanmıştır. Uygulanan testler neticesinde çarpışma kutularında artan oluk sayısıylaberber enerji sönümleyebilme yeteneğinin, özgül enerji sönümlenme ve ezilme kuvvetinin artış gösterdiği ortaya konulmuştur. Ek olarak 40 derece açılı karbon fiber malzemededen imal edilmiş olan çarpışma kutularının en yüksek enerji sönümleyebilme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Bir başka gerçekleştirilen çalışmada çelik malzemeden imal edilmiş çarpışma kutularının yerine tercih edilmiş olan sıkıştırılmış cam fiber destekli polyester çarpışma kutularıdır. Çarpışma kutuları birbirinden değişik geometrik yapıda ve çeşitli pah açısına sahip olarak tasarlanmıştır. Tasarlanmış olan çarpışma kutularının birincisi 55 mm iç çap ve 2,5 mm et kalınlığına ve ikincisi ise 65 mm iç çap ve 5 mm et kalınlığına sahiptir. Kullanılan iki numunede de boylar 100mm olarak sabit boyda tutulmuştur.

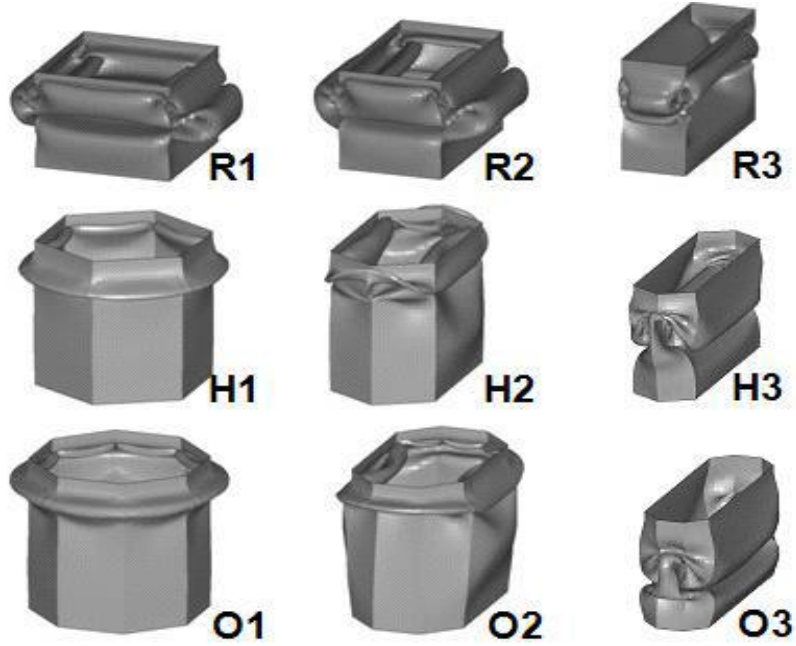
Yapılan testlerde numuneler üzerinde deformasyon kuvveti uygulanması amacıyla 100 mm/dk hızlı servo hidrolik test cihazı kullanılmıştır. Testlerde 47 kN ve 92 kN'luk yükler çarpışma kutuların üzerine uygulanmıştır. Elde edilen verilerle aynı şartlarda çapı diğerine göre küçük olan numunenin 51 kJ/kg, çapı diğerine göre büyük olan numunenin ise 37 kJ/kg'lık enerji sönümleyebildiğini belirtilmiştir. Değişkenlik gösteren pah açılarıyla da numunelerin sönümleyebildikleri enerji kapasitelerinde değişiklik gösterdiğini, 45° lik açığa sahip numunenin 35° lik açığa sahip numuneden daha fazla enerji sönümlediğini ortaya konulmuştur (Sjögren, A., vd.,2004).

İçi boş yapıları çarpışma kutuları üzerine yapılan bir diğer çalışmada çarpışma kutularının geometrik yapıları değiştirilerek darbeye karşı enerji sönümleme kapasitelerinin arttırılmasını hedeflenmiştir. Bu çalışmada tercih edilen çarpışma kutularını dikdörtgen, altıgen ve sekizgen olmak üzere üç farklı şekilde oluşturmuşlardır. Profil ölçüleri Çizelge 2.1'de belirtildiği gibidir (Kim, S.B., vd., 2008).

Çizelge 2.1. Profil ebatları (Kim ve diğerleri, 2008).

Şekil	Model	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)
Dikdörtgen	R1	80	80
	R2	60	100
	R3	40	120
Altıgen	H1	92,37	106,66
	H2	66,18	121,79
	H3	40	136,9
Sekizgen	O1	96,57	96,57
	O2	68,27	115,15
	O3	40	133,72

İmal edilen çarpışma kutularının malzeme seçimi alüminyum AA7003-T3 malzemesinden yana olmuştur. Çalışma iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak istenilen özelliklere göre imal edilmiş olan çarpışma kutuları basma testlerine tabi tutulmuştur. İkinci olarak dinamik testlerle elde edilen sonuçlarla çarpışma kutuları hakkındaki verileri bilgisayar ortamına aktarılmış ve LS-DYNA yazılımı yardımıyla profillerin sonlu elemanlar analizleri yapılarak doğrulama işlemi sonucu karşılaştırmalar yapılmıştır. Analizlerin sonucuna göre profillerin uğradığı şekil değişiklikleri Şekil 2.10'da gösterildiği biçimdedir.



Şekil 2.10. Sonlu elemanlar analizi sonucu deformatsyona uğramış çarpışma kutuları.

Yapılan çalışmalar esnasında RCAR (Research Council Automobile Repairs) regülasyonları dikkate alınmıştır. Bu regülasyonla birlikte bir otomobilin çarpışma anında %40 ofsetle ve 4,1 m/s'lik hızdaki çarpışma koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Çalışmanın gerçekleşmesi sonucu en yüksek enerji sönümleme kapasitesini sağlayan profilin geometrik yapısından dolayı dikdörtgen geometriye sahip olan çarpışma kutusu olduğu belirtilmiştir.

2.2 KÖPÜK MALZEME İLE DOLU ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEME KARAKTERİSTİKLERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR

İçi köpük malzeme ile doldurulmuş çarpışma kutuları için yapılan Rajendran vd. (2009)'nin yapmış olduğu çalışma çarpışma kutuları içerisine yerleştirilmiş alüminyum alaşımli metalik köpük malzemeler ile çarpışma kutularının enerji sönümleyebilmedeki kapasite artışları incelemiştir. Çalışmada tercih edilen çarpışma kutularının malzemesini AISi 304L çeliği olarak belirlemiştir. Üretilmiş olan 1mm et kalınlığında, 80 mm çapında ve 100 mm yükseklikteki çarpışma kutularının içerisine enerji sönümleme kapasitesini artırabilmek maksadıyla kapalı hücreli alüminyum köpük malzemeleri yerleştirilmiştir. Şekil 2.11'de alüminyum köpük ile doldurulmuş AISi 304L çelik profil gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Alüminyum köpük ile doldurulmuş AISi 304L çelik profil.

Deneyle 9 m yüksekliğe kadar yükselebilen ve 600 kg'lık bir ekicin çarpışma kutuları üzerine düşmesi ile yapılmıştır. İçi boş ve içi alüminyum köpük malzeme ile dolu çarpışma kutuları darbe test düzeneğine yerleştirilerek 3,5 ile 7 m arasındaki farklı yüksekliklerden serbest bırakılan 600 kg ağırlığındaki destek ile darbe uygulanmıştır. Neticede arpışma kutuları üzerinde meydana gelen deformasyonları ve enerji sönümleme kapasitelerini incelenmiştir. Uygulanmış olan darbeler sonucunda meydana gelen deformasyonlar Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



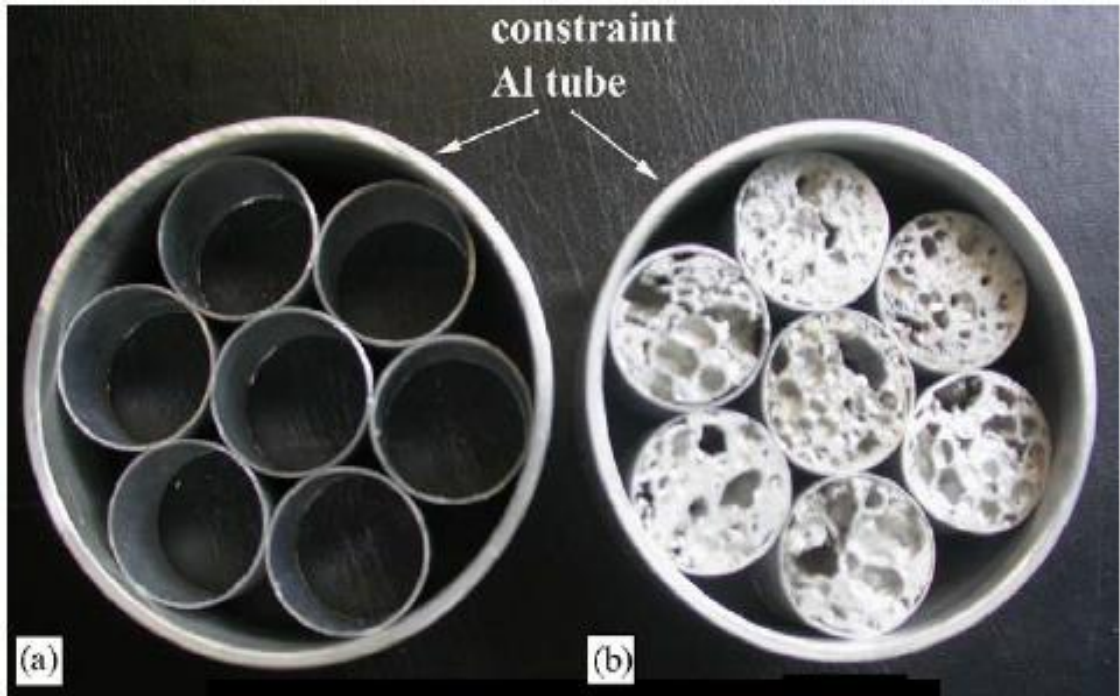
Şekil 2.12. Çarpışma kutularının deformasyon sonucundaki görüntüleri.

İçi köpük malzeme ile dolu olan elik profilin meydana gelen darbe karşısındaki enerji sönümleme kapasitesi içi boş profile göre çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Metalik köpük malzemeler sahip oldukları mekanik özellikleri sebebiyle günümüzde önemli bir yere sahiptirler. Enerji sönümleme kabiliyetlerinin olabildiğince yüksek olması, düşük ağırlıkları, ısıl izolasyon ve titreşim azaltma gibi fonksiyonel özellikleri mevcuttur. Alüminyum esaslı metalik köpüklerin son yıllarda artan popülaritesi ile çeşitli kullanım alanlarının yanı sıra darbe enerjisini plastik

deformasyon enerjisine çevirebilir ve çoğu metalden daha fazla enerji sönümleyebilirler (Yavuz vd., 2009).

Alüminyum köpüklerle ilgili Güden ve Kavi (2006)' nin çalışmasında, altıgen ve kare geometriye sahip paketlenmiş boş ve alüminyum köpük malzeme ile dolu profillerin basma test şartlarında durumları incelenmiştir. Yuvarlak ve kare şekillerinde bulunan çarpışma kutularının içerisine Şekil 2.13'te gösterildiği gibi görülen $0,27 \text{ g/cm}^3$, $0,35 \text{ g/cm}^3$ ve $0,43 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu bulunan üç farklı metalik köpük malzemedan meydana gelen profilleri altıgen ve kare geometri şeklinde yerleştirilmiştir.



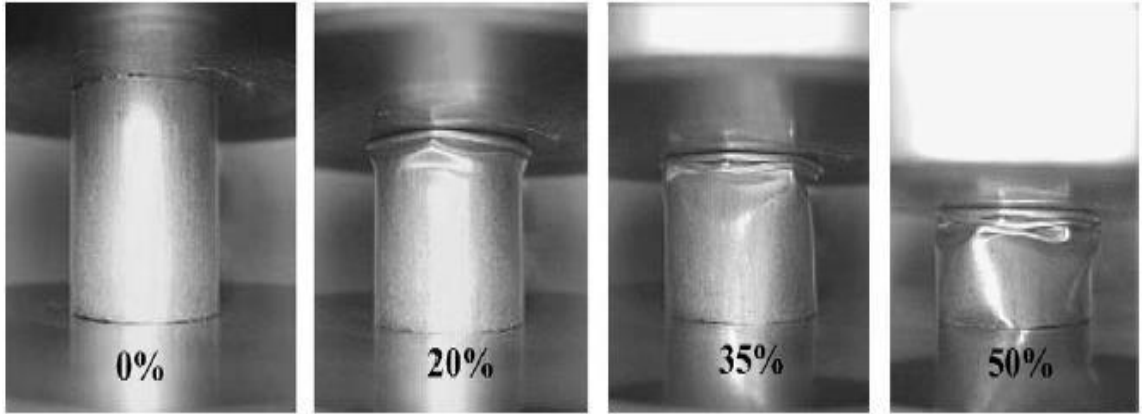
Şekil 2.13. Altıgen paketlenmiş çoklu profil tasarımı: a) Boş b) Al köpük dolu Güden ve Kavi (2006).

Kare paketlenmiş çoklu profil tasarımına ait içi boş ve içi alüminyum köpük dolu olan görsel Şekil 2.14.'te gösterildiği gibidir.

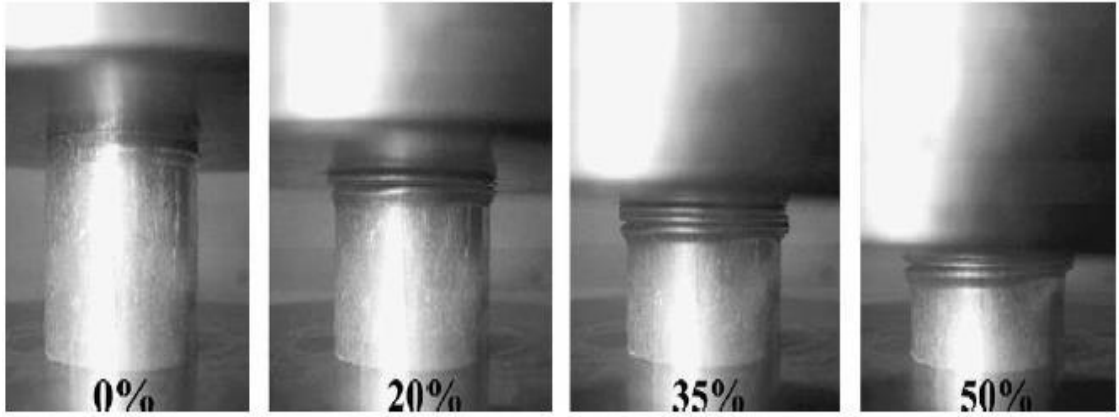


Şekil 2.14. Kare paketleniş çoklu profil tasarımı a) Boş b) Al köpük dolu Güden ve Kavi (2006).

Çalışmada kullanılan çarpışma kutularının et kalınlığı 2,5 mm, boyu 75 mm ve çapı 35 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen profiller basma test şartlarında test edilmiş ve her bir profil Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da görüldüğü gibi %0, %20, %35 ve %50 oranlarında sıkıştırılarak deformasyona uğratılmıştır.



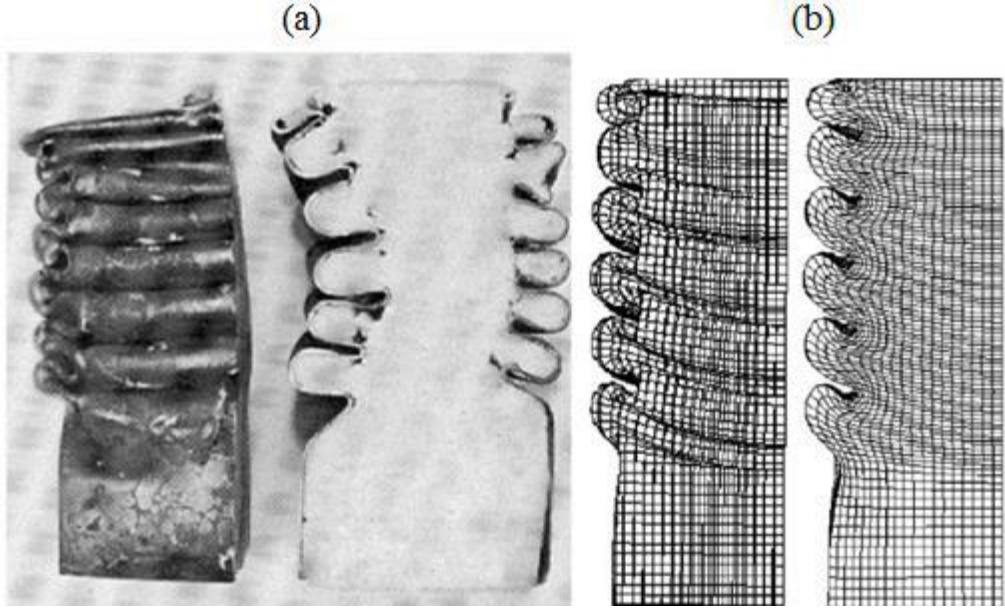
Şekil 2.15. Boş alüminyum profillerin çeşitli yüzdelerdeki deformasyonu (Güden ve Kavi (2006)).



Şekil 2.16. $0,35\text{g/cm}^3$ yoğunluğa sahip alüminyum köpük malzeme ile dolu profillerin çeşitli yüzdelerdeki deformasyon görüntüleri Güden ve Kavi (2006).

Sonuç olarak içi boş ve içi köpük malzemelerle farklı yoğunluklarda doldurulmuş profillerin özgül enerji sönümleme kapasitesinin arttığı, içi köpük malzemeler ile doldurulmuş profillerin içi boş profillere göre daha fazla özgül enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu, profilleri çoklu profiller şeklinde tasarlamının uygulanan maksimum deformasyon kuvvetinde yoğunluk değişimi ile ilişkili olarak %10 ile % 20 arasında artışa sebep olduğu tespit edilmiştir.

Mirfendereski vd. (2008)'nin yapmış oldukları bir çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi vasıtası ile köpük malzeme ile doldurulan ince kabuklu kare profile sahip çarpışma kutularının dinamik ve yavaş basma anında oluşan yükler karşısında enerji sönümleyebilme kapasiteleri ile ezilme kuvvet verimini tespit edilmiştir. Ek olarak köpüğün sahip olduğu yoğunluğu ve kabuk kalınlığını darbe yükleri altında çarpışma kutularında meydana gelen deformasyona olan etkileri belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak tasarlanan çarpışma kutularının iç kısmına köpük malzeme yerleştirilmiş sonrasında oluşturulan profillere yük bindirilerek deformasyona uğraması sağlamıştır. Kullanılan köpük malzemenin yoğunluğu $95,5\text{ kg/m}^3$, profillerin uzunluğu 300 mm, taban genişliği 100×50 mm ve et kalınlığı 0,83 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma Şekil 2.17'de gösterildiği gibi sonucunda elde edilen veriler bilgisayarlı ortamda sonlu elemanlar yöntemi vasıtası ile teyit edilmiştir.

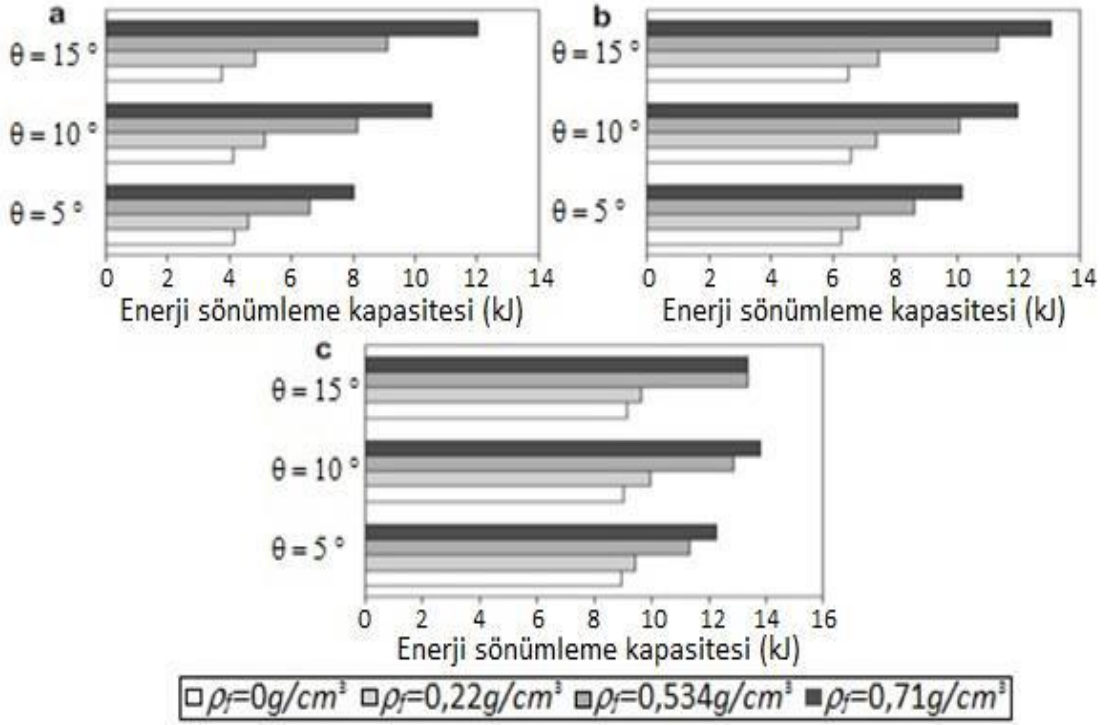


Şekil 2.17. Köpük malzeme dolu profillerin gerçek (a) ve sonlu elemanlar (b) görüntüleri.

Yapılan tüm çalışmaların neticesinde köpük yoğunluğunun artışıyla sönmölenen enerji kapasitesinin 6 kJ/kg'dan 14 kJ/kg'a kadar arttığı hesaplanmıştır. Ek olarak ilk deformasyon kuvvetinin boş durumda iken 350 kN içerisine köpük malzeme doldurulmasıyla birlikte yoğunluk artışına bağılı olarak 360 kN'a kadar arttığı ve buna bağılı olarak ezilme kuvveti veriminin azalacağını belirtmişlerdir. Kullanılan çarpışma kutularının koniklik açısına sahip olması düz açılı olacak şekilde tasarlanana göre deformasyon kuvvetlerini azaltacağı, et kalınlığının ise ufak bir miktar artması ile sönmölenen enerji miktarının da aynı oranda artacağı belirlenmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada Ahmad ve Thambiratnam (2008), birbirinden farklı geometrik yapısı bulunan üç farklı çarpışma kutusu tasarlamışlardır. Çarpışma kutularının sahip olduğu et kalınlıkları 1,5 mm, 2 mm ve 2,5 mm, uzunlukları ise 200 mm olarak belirlenmiştir. Tasarlanan çarpışma kutularını 5°, 10° ve 15° tepe açısına sahip olacak şekilde oluşturulmuştur. Çarpışma kutularının iç kısmına enerji sönmöleme kapasitesini yükseltmek amacıyla 0,22 g/cm³, 0,53 g/cm³ ve 0,71 g/cm³ yoğunluklu köpük malzemeler yerleştirilmiştir. Elde edilen profiller sonrasında 10, 15 ve 20 m/s'lik hıza sahip 40, 60 ve 80 kg'lık kütleler altında deformasyona uğrattılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde et kalınlığı ve tepe açısı yüksek olan

çarpışma kutularının sönümleyebildikleri enerji miktarının daha fazla olduğunu tespit edilmiştir. Birbirinden farklı üç et kalınlığına sahip numunelerin sonlu elemanlar analiz sonuçları gözlemlendiğinde, tepe açılarının artmasıyla sönümlenebilen enerji kapasitesinin de arttığı ortaya konulmuş ve Şekil 2.18’de gösterilmiştir.

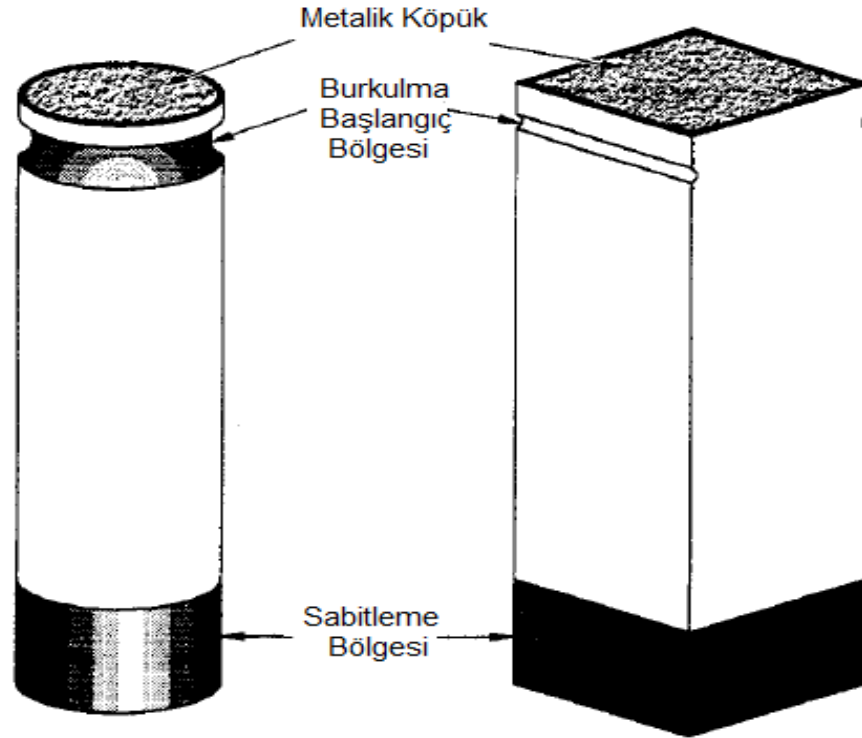


Şekil 2.18. 1,5 mm (a), 2 mm (b) ve 3 mm (c) et kalınlığına sahip çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitesi (Ahmad ve Thambiratnam, 2008).

Çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen köpük malzemelerin yoğunlukları arttıkça sönümlenen enerji kapasitesi de artmaktadır. Üç farklı et kalınlığında en yüksek enerji sönümleme kapasitesi içerisi $0,71 \text{ g/cm}^3$ yoğunluktaki köpük malzeme ile dolu olan çarpışma kutusudur. 1,5 mm et kalınlığına sahip çarpışma kutularının 12 kJ olan enerji sönümleme kapasitesi 3 mm et kalınlığına kadar yükseltildiğinde 14 kJ'e çıktığı belirlenmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada Hannes vd. (2010), kare kesit ve dairesel kesitli içi boş ve içi köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasiteleri belirlenmiştir. Çalışmada ilk olarak aşağıdaki şekilde gösterilen ve herhangi bir koniklik derecesi bulunmayan düz çarpışma kutuları tasarlanmıştır. Mevcut olan bu

çarpışma kutularının üst kısmına ilk katlanma sırasında meydana gelecek olan maksimum deformasyon kuvvetinin düşürülmesi maksadıyla burulma bölgesi adı verilen çentikli bölgeler oluşturulmuştur. Sonrasında bu çarpışma kutularının iç kısmına enerji sönmleme kapasitesini yükseltmek amacıyla $0,1 \text{ g/cm}^3$ ile $0,5 \text{ g/cm}^3$ arasındaki farklı yoğunluklarda köpük malzemeler yerleştirilmiştir. Şekil 2.19’da içi köpük malzeme ile dolu dairesel ve kare profiller görülmektedir.



Şekil 2.19. İçeri köpük malzeme ile dolu dairesel ve kare profiller Hannes ve diğerleri (2010).

Çalışmada ilk olarak boş kare ve dairesel kesitli çarpışma kutularının yavaş basma ve dinamik yük koşulları altında ezilme karşısındaki davranışları ile enerji sönmleme kabiliyetleri incelenmiştir. Yapılan yüklemeler neticesinde dairesel kesitli profillerin hem ezilmeye karşı direncinin hem de enerji sönmleme yeteneğinin kare profillerden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sonrasında aynı tip profilleri aynı test imkanları uygulayarak içleri metalik köpük malzeme dolu olacak şekilde denenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen deformasyon görüntüleri Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20. Eksenel yük altındaki boş ve metalik köpük ile dolu dairesel ve kare profiller Hannes ve diğerleri (2010).

Sonuç olarak belli bir yük altında dairesel kesitli çarpışma kutularının hem boş hem de köpük malzeme ile dolu iken sahip olduğu enerji sönmeme kapasitesi kare kesitli olan profile göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçla birlikte çarpışma kutularını katlanmaya uğraması için uygulanan deformasyon kuvvetinin dairesel kesitli çarpışma kutusunda kare kesitli çarpışma kutusuna göre daha düşük olduğu belirtilmiştir.

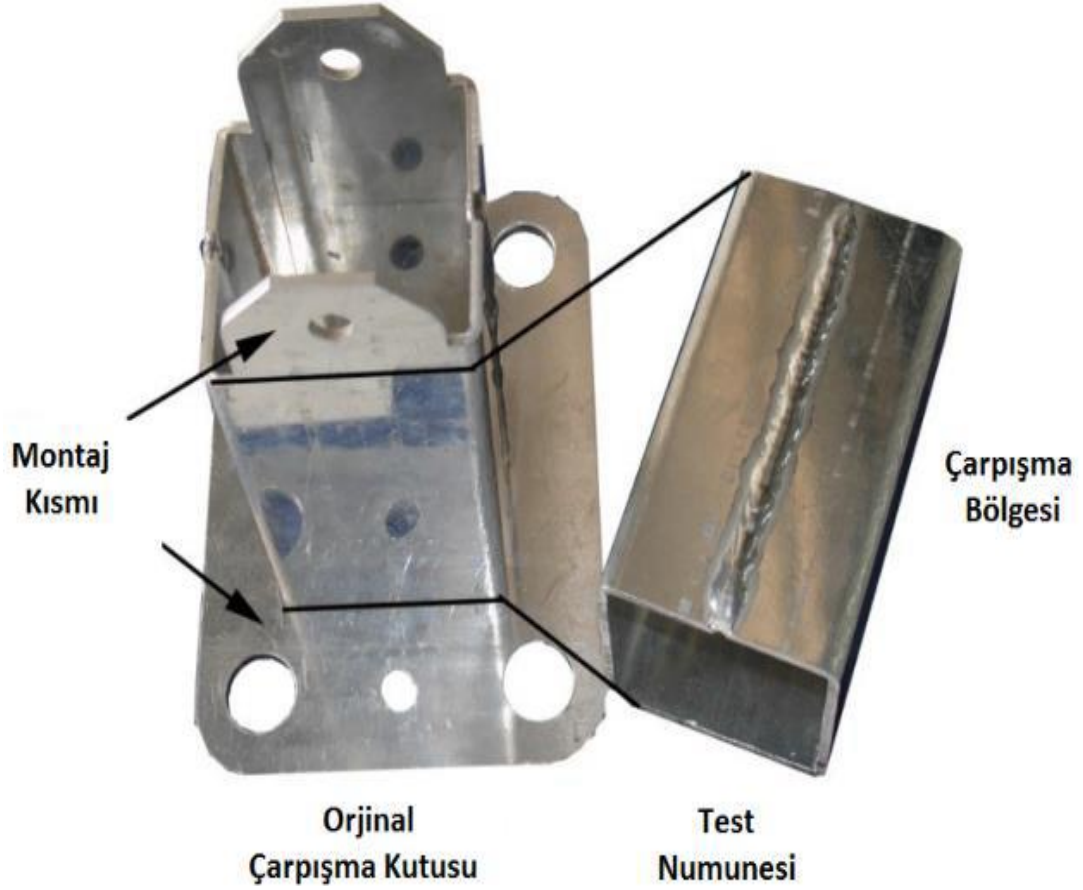
Altın M. (2017)'nin yapmış olduğu çalışmada iç içe geçmiş çok tüplü dairesel yapıda kesitli çarpışma kutularının içini köpükle doldurma ile yaratılan alternatiflerin optimizasyonu uygulanmıştır. En dışta bulunan tüpü konik şekilli olan, tek tüplü, çift tüplü ve üç tüplü kesit çeşitleri kullanılmıştır. Polinom yanıt yüzey yöntemi vasıtası ile eksenel ve yanal olmak üzere iki köpük doldurma şekli optimizasyonu uygulanmıştır. Yapılan çalışmanın ilk kısmında eksenel köpük ile doldurma optimizasyonu için tasarımda değişken olarak bu üç geometrik alternatifi, koni açısını, duvar kalınlığını, köpük yoğunluğunu ve köpük yüksekliğini belirlemişlerdir. İkinci kısımda ise yanal köpük ile doldurma optimizasyonu için tasarım değişkeni olarak köpük taban çapı tercih edilmiştir. Çarpışma kuvveti verimi ve özgül enerji emilimi değerlerini maksimum seviyede edecek şekilde yapılan optimizasyonlarda köpük yüksekliği sabit tutularak köpük çapının değiştirildiği yanal köpük doldurma

alternatifinin aksel köpük doldurma yöntemine göre çarpışma performansı ölçüt olarak ele alındığında daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Yanal köpük doldurma yöntemi ve aksel köpük doldurma yöntemi ile ulaşılan en iyi sonuçlara göre %19 daha yüksek çarpışma kuvveti verimi ve %6 daha yüksek özgül enerji emilimi elde edilmiştir.

Yapılan başka bir çalışmada Goel (2015) tarafından birbirinden farklı geometrik formlardaki içi boş ve içi köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerini ortaya çıkarmak amacıyla dinamik analizler yapılmıştır. Çalışmada kullanılan kare ve dairesel kesitli çarpışma kutuları tek, iç içe geçmiş iki profil ve iç içe geçmiş üç profil olacak şekilde tasarlanmıştır. Profillerin malzemesi alüminyum alaşımıdır. Çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen köpük malzemenin yoğunluğu $0,289 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Hazırlanmış olan profiller 500 kg'lık kütleyle sahip yük altında 20 m/s'lik sabit hız ile deformasyona uğratılmıştır. Analizlerin sonucunda içi boş ve içi köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının enerji sönümleme kabiliyetleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçta köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularının boş olan çarpışma kutularına göre daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu belirlendiği ve ek olarak çarpışma kutularının iç içe geçirilerek meydana getirilmesinden daha yüksek bir enerji sönümleme kapasitesi ortaya koyduğu belirlenmiştir. Tüm dairesel kesit yapıdaki çarpışma kutularının kare kesit yapıları olanlara göre daha yüksek bir çarpışma performansı sağladığı da ortaya konmuştur.

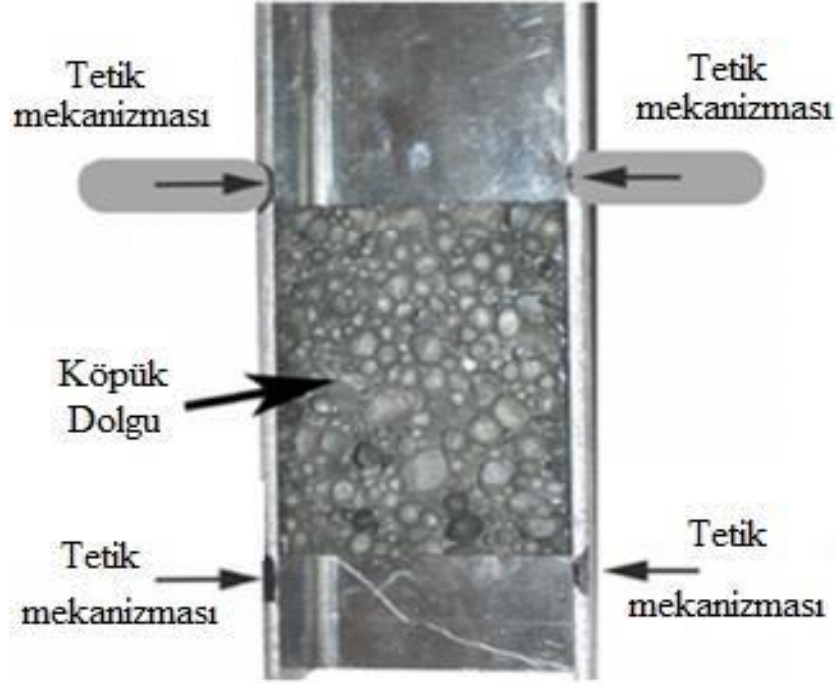
Toksoy (2009)'un yapmış olduğu bir çalışmada ise içerisine kapalı hücreli alüminyum köpük malzeme doldurulmuş kare kesit yapıları çarpışma kutularının uğradığı deformasyonlar incelenmiştir. Çalışmada kullanılan her bir çarpışma kutusunun et kalınlığı 2 mm, 2,5 mm ve 3 mm, boyutları $70,6\text{mm} \times 73\text{mm}$, $2\text{mm} \times 125,2\text{mm}$ ve $60\text{mm} \times 70\text{mm}$, $4\text{mm} \times 122,6\text{mm}$ olarak belirlemiştir. Çarpışma kutularının malzemesi 1050 H14 çelik malzemedir. Sonrasında çarpışma kutusunun içine köpük malzeme yerleştirmek amacıyla çarpışma bölgesinin bulunduğu kısım keserek çıkartılmıştır.

Şekil 2.21'de çarpışma kutusu ve çarpışma bölgesine ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.21. Çarpışma kutusu ve çarpışma bölgesi (Toksoy, 2009).

Çıkartılan çarpışma bölgesinin içine alüminyum köpük malzemeleri uygun ebatlarda keserek yerleştirilmiştir. İçine yerleştirilen alüminyum köpük malzemelerin sabit kalabilmesi ve maksimum deformasyon kuvvetini azaltabilmek amacıyla kutunun üzerine tetik mekanizmaları açılmıştır. Aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi tetik mekanizmaları çarpışma bölgesi numunesi üzerinden alt ve üst kısımdan belirlenmiş mesafelerde ezici tekerlekler yardımıyla presleme yaparak açılmıştır. Şekil 2.22’de Köpük dolu çarpışma kutusunun kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.22. Köpük dolu çarpışma kutusunun kesit görünüşü (Toksoy, 2009).

Oluşturulan bütün boş ve alüminyum köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularını basma testlerine tabi tutulmuş olup ve veriler sonlu elemanlar analizi sonucu ile teyit edilmiştir. Sonuçta içi alüminyum köpük ile dolu çarpışma kutularının boş olanlardan enerji sönmleme kabiliyeti açısından daha verimli olduğu görülmüştür. Deformasyona maruz kalma süresince boş profilde ezilme sonucunda iki adet katlanma olduğu, içine köpük malzeme bulundurulmuş profilde ise bu katlanmanın üçe çıktığını belirlenmiştir. Dolu profillerdeki ortalama ezilme miktarı boş tüplere göre %55 civarında ve özgül enerji sönmleme kapasitesinin ise %9,8 arttığı ortaya konmuştur. En yüksek enerji sönmleyebilme kapasitesinin ise 3 mm et kalınlığına sahip içi alüminyum köpük ile dolu çarpışma kutusunun sağladığı belirlenmiştir.

Ayrıntılı şekilde verilen tüm literatür çalışmalarına ait bilgiler genelde içi boş ve içi köpük malzeme ile dolu çarpışma kutularına yönelik yapılan çalışmaları ortaya koymaktadır. Ek olarak çarpışma kutularının performansını maksimum seviyede tutmak için birkaç değişken kullanılmıştır. Bu çalışmalara bağlı olarak;

- Çarpışma kutularının içerisinde bulunan köpük malzemenin cinsine göre polistiren köpük veya metalik köpük,

- Test yöntemine göre dinamik veya yavaş basma,
- Çarpışma kutularının açılı veya açısız olması durumu,
- Tek veya çok hücreli yapıda olması,
- Sonlu elemanlar veya deneysel yöntemler,
- Kesit geometrisinin üçgen, kare, dikdörtgen, yuvarlak, beşgen, altıgen, sekizgen veya elips oluşuna göre sınıflandırılmıştır.

BÖLÜM 3

ÇARPIŞMA KUTULARININ SAHİP OLDUĞU KABİLİYETLER

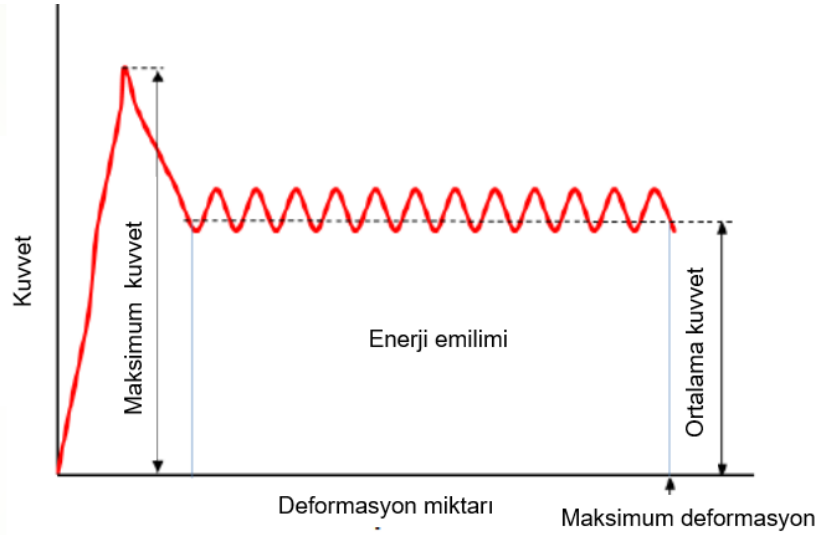
Çarpışma kutularının belli bir yük altında sergilediği davranış biçimi belirlemek için bazı kavramlar bilinmelidir. İdeal olan bir çarpışma kutusunda hakkında hâkim olunması gereken en temel kavramlar enerji Emilimi ve ezilme kuvvetinden meydana gelen verim değerlerinin yüksek olmasıdır. Söylenmek istenen çarpışma kutusunun enerji Emiliminin yüksek olması beklenirken aynı anda çarpışma bölgesinde meydana çıkan kuvvetlerin de birbirine olabildiğince yakın olması istenmektedir. Çarpışma bölgesinde oluşan kuvvetlerin birbirine yakın olması, araç içinde bulunan yolcuların çarpışma anında meydana gelen darbelerden en az seviyede etkilenmesi anlamına gelmektedir. Bu sebeple çarpışma bölgesinde ortaya çıkan ortalama kuvvet ve maksimum kuvvet arasındaki farkın mümkün oldukça az olması istenmektedir.

Son zamanlarda üretilen araçlardan beklenen yakıt tüketiminin az olması ve karbon emisyonunun azaltılması için araçların mümkün olduğunca hafif yapılı olması istenmektedir. Bu sebeple araçların özgül enerji Emiliminin de olabildiğince yüksek olması beklenmektedir. Çarpışma kutuları ile ilgili yapılan çalışmalarda enerji Emilimi artırılmaya yönelik çalışılsa da çarpışma kutularının hafifliği de göz ardı edilmemesi gereken en önemli ayrıntıdır. Çarpışma kutularında oluşan deformasyon veriminin asıl tanımı ise çarpışma kutusunda meydana gelen ezilme miktarının, çarpışma kutunun darbeye maruz kalmadan önceki sahip olduğu ilk boyuna oranı olarak belirtilmiştir. Çarpışma kutuları, çarpışma esnasında darbeye bağlı olarak ortaya çıkan enerjiyi ezilerek sönmüleyebildikleri için bu değer mümkün oldukça yüksek olması istenmektedir.

Enerji Sönümleme: Çarpışma kutularının deformasyona uğradıktan sonra sönmüleyebildiği enerji (E_T), çarpma kuvvetinin meydana getirdiği toplam iş olarak tanımlanır ve Eşitlik 3.1 ile elde edilir;

$$E_T = \int_{s_b}^{s_s} F \cdot dS \quad (3.1)$$

Denklem çarpışma kutularında meydana gelen Kuvvet-Deformasyon eğrisi altında kalan alan demektir. İdeal çarpışma kutusunun kuvvet-deformasyon eğrisi Şekil 3.1’de verildiği gibidir.



Şekil 3.1. İdeal bir çarpışma kutusunun Kuvvet-Deformasyon miktarı grafiği.

Özgül Enerji Sönümleme (ÖES): Özgül enerji sönümleme kapasitesi, enerji sönümleme kapasitesinin çarpışma kutusunun deformasyon öncesi kütlesine oranı olarak belirtilmiş ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$E_m = \frac{E_T}{m} \quad (3.2)$$

Özgül enerji emilimi, çarpışma kutularının sahip olduğu performansın ortaya çıkmasında en önemli tanımlardan biridir. Günümüzde otomobillerde yakıt tüketimi azaltılması için çarpışma kutularının hafifliği de ortaya çıkarılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu sebeple çarpışma kutularının enerji emilimini artırırken sahip oldukları ağırlıkların azaltılması da gerekmektedir. Çarpışma kutularının sahip olduğu performansın yüksek olması özgül enerji sönümlemesinin yüksekliği ile doğru orantılıdır (Baykasoğlu, 2014).

Ortalama Ezilme Kuvveti: Ortalama ezilme kuvveti çarpışma bölgesinde meydana gelen kuvvetlerin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır. Ortalama ezilme kuvvetinin sönmülenen enerjinin deformasyon miktarına bölünmesi ile aşağıdaki Eşitlik 3.3'te belirtildiği gibi elde edilebilir (Yıldız ve Demirci 2015).

$$F_{ort} = \frac{E_T}{S_s - S_b} \quad (3.3)$$

F_{ort} : Ortalama ezilme kuvveti,

E_T : Toplam sönmüleme enerjisini,

S_s : Son deformasyon miktarını,

S_b : İlk deformasyon miktarını göstermektedir.

Ezilme Kuvveti Verimi: Ezilme kuvveti verimi, ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine olan oranıdır ve Eşitlik 3.4 ile elde edilir.

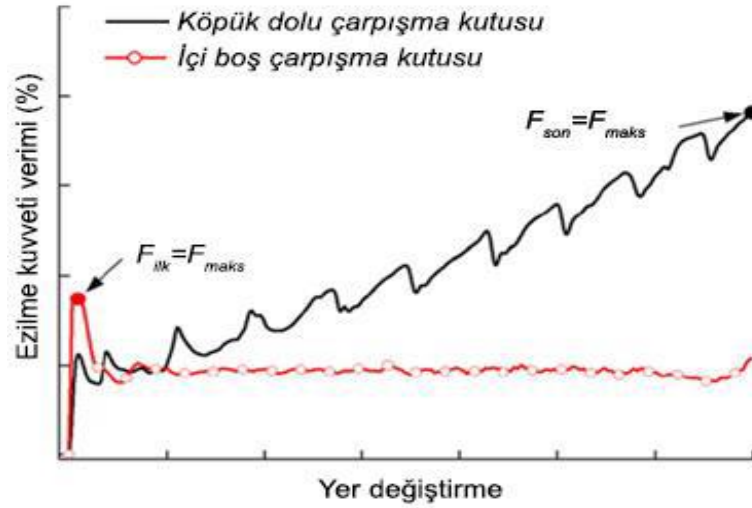
$$\eta_F = \frac{F_{ort}}{F_{max}} \quad (3.4)$$

η_F : Ezilme kuvveti verimini

F_{ort} : Çarpışma bölgesinde oluşan ortalama kuvvet

F_{max} : Maksimum kuvvet

Ezilme kuvvet veriminin yüksek olması için çarpışma anında çarpışma noktasında meydana gelen maksimum kuvvetin ortalama kuvvete mümkün oldukça yakın olması istenmektedir. İçi boş olan çarpışma kutularında maksimum ezilme kuvveti deformasyonun ilk başladığı anda, köpük dolu çarpışma kutularında ise deformasyonun ilerlemesiyle birlikte sonlara doğru oluşmaktadır. Şekil 3.2.'de aksenal yük altında içi boş ve içi köpük dolu çarpışma kutularının maksimum deformasyon kuvvetlerinin meydana geldiği noktalar görülmektedir (Altın, 2017).



Şekil 3.2. Eksenel yük altında boş ve köpük dolu çarpışma kutularının deformasyon.

Maksimum Deformasyon Kuvveti: Çarpışma kutularında üzerine gelen ilk kuvvetlerin çarpışma esnasında kutular üzerinde oluşturduğu kalıcı deformasyonlardır. Bu deformasyonlara uğramalarına neden olan kuvvetlerin en fazlası maksimum deformasyon kuvveti ile adlandırılır. Maruz kalınan kuvvetler deformasyonun başında olacağı gibi deformasyon ortaya çıktığında da oluşabilir. bu değerde ki yükseklik çarpışma kutusunun görevini tam olarak yapamamasına, meydana gelen darbeden çıkan kuvvetin direk olarak aracın şasisine ulaşmasına sebep yaratmaktadır. Yapılan tasarımlarda bu değerlerin mümkün oldukça minimum seviyede tutulması sağlanmaktadır.

Deformasyon verimi: Çarpışma kutusunun uğradığı deformasyon miktarıdır. Eşitlik 3.5'te gösterildiği gibi elde edilmektedir;

$$\eta_s = \frac{S_{max}}{l} \quad (3.5)$$

η_s : Deformasyon verimi

S_{max} : Maksimum deformasyon miktarı

l : Çarpışma kutusunun ilk boyu

Çarpışma kutularında deformasyon miktarındaki yükseklik enerji emilimindeki yükseklikle doğru orantılıdır. Bundan dolayı deformasyon verimindeki yükseklik çarpışma kutusunun performansını da pozitif bir etki ortaya çıkarmaktadır.

BÖLÜM 4

ALÜMİNYUM

Alüminyum; atom numarası 13 olan, periyodik tablonun 3A grubunda yer alan, gümüş renkli, sünek ve hafif bir metalik elementtir. Doğanın %8.2'sini oluşturur ve yerkabuğunda oksijen ve silikondan sonra en çok bulunan elementtir. Ayrıca, metal kullanımında demirden sonra en çok kullanılan elementtir. Ancak doğada tek saf halde bulunmaz, hep başka elementlerle bileşik halinde bulunur (Hasan, 2006).

Düşük yoğunluk, hafiflik, yüksek mukavemet, kolay işlenebilirlik, mükemmel korozyon direnci ve iyi ısı ve elektriksel iletkenlik alüminyumun en önemli özellikleri arasındadır. Bunlara ek olarak alüminyumun geri dönüşümü de kolaydır.

Alüminyumun genel özellikleri:

- Ağırlık: Yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$, yoğunluğu çelik yoğunluğunun 1/3'ü kadardır ve bundan dolayı da olabildiğince hafif bir malzemedir.
- Lineer genleşme: Diğer metallerle kıyaslandığında oldukça yüksek oranda doğrusal genleşmeye sahiptir.
- İşlenebilirlik: Kesme, öğütme, eğme ve delme gibi birçok işlemlerin kolayca uygulanabildiği bir malzemedir. Bu yüzden işleme boyunca enerji girişi oldukça düşüktür.
- Şekillendirilebilme: Alüminyumun iyi derecede olan işlenebilirliği ekstrüzyon bakımından önemlidir. Bir metalden, soğuk veya sıcak levha ve şerit haddelemesi ve eğme gibi şekil verme işlemlerinde bu özellik ön planda tutulmaktadır.
- İletkenlik: Alüminyum elektriksel ve iyi derecede ısı iletken malzemedir.

- Birleşme: Kesit tasarımında kolay birleştirme özelliği olan malzemelerden yararlanılmaktadır. Ergitme kaynağı, sürtünme bağ kurmada ve karıştırma kaynağı birleşmede kullanılır.
- Yansıtma: Alüminyum hem yayılan ısıyı hem de görünür ışığı iyi yansıtmaktadır.
- Korozyon direnci: Alüminyum oksijen ile havada kolayca reaksiyon kurarak oldukça ince bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Bu tabaka yoğun olmakla beraber iyi derecede korozyon direnci sağlar. Anotlama ile bu oksit tabakasının kalınlığını artırmakta bununla beraber doğal korozyonun koruma dayanımını geliştirmektedir. Ayrıca, alüminyum nötr ve asidikliğin az olduğu ortamlarda olabildiğince dayanıklıdır (Onuklu, E., 2015).

4.1 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum alaşımlarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ile alaşımda kullanılan elementlerine ve mikro yapısına endeksli olarak değişir. Alüminyuma katılan başlıca alaşımlar bakır, silisyum, mangan, çinko ve magnezyumdur. Alüminyum alaşımları döküm alaşımlar ve dövme alaşımlar olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Dövme alaşımlarının, kolayca şekillendirilebilmesi plastik deformasyon kabiliyetlerinin iyi derecede olmasındandır. Alüminyum döküm ve dövme alaşımlarının ise büyük bir kısmına ısıl işlem uygulanabilmektedir.

Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar şu şekilde yapılmaktadır;

4.1.1. 1xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

%99'dan fazla alüminyum oranına sahiptir. Korozyon direnci, ısıl ve elektrik iletkenliği oldukça iyidir. Mekanik özellikleri ise düşüktür. Gerinim sertleştirmesinden yararlanılarak mukavemette küçük artışlar elde edilebilir. Çoğunlukla elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. Kaynak yapılabilir.

Alaşımlar: 1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350 vs.

4.1.2. 2xxx Serisi Alüminyum Alaşımaları

Alaşım elementi esasen bakırdır. %6,3'e kadar bakır içermektedir. Magnezyum başta olmak üzere başka alaşım elementleri de barındırabilir. Çökelme sertleştirilmesi gösterir. Diğer alüminyum alaşımaları kadar iyi derecede korozyon dirençleri yoktur. Kaynak kabiliyeti, alaşıma bağlı ancak genelde iyi değildir. Bu serilerin öne çıkan tarafı 150 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda iyi bir dayanım gösterebilmeleridir. Yüksek mukavemet istenen uçak gövdesi ve bunların mekanik aksamları, araç gövde panelleri gibi ürünlerin üretiminde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle 2024 serisi alüminyum, en yaygın alüminyum çeşidi olup, uçak tasarımlarında tercih edilip, kullanılmaktadır.

Alaşımalar: 2011, 2014, 2017, 2018, 2124, 2219, 2319, 2010, 2030, 2060, 2240, 2420 vs.

4.1.3. 3xxx Serisi Alüminyum Alaşımaları

Alaşımın temel elementi mangandır. İyi derecede şekil değiştirme ve kaynak yeteneği ile oldukça iyi bir korozyon direncine sahiptir. Genel olarak ısıtılma işlemi göremez ancak serinin yaklaşık %25'i 1xxx serisi alaşıma göre daha kuvvetli alüminyum alaşımaları barındırmaktadır. 250 MPa değerine kadar tipik akma dayanımı mevcuttur. Kimyasal kaplar, içecek kutuları, endüstriyel çatı, eğri boru imalatlarında kullanılmaktadır.

Alaşımalar: 3003, 3004, 3105, 3830, 3850, 3900 vs.

4.1.4. 4xxx Serisi Alüminyum Alaşımaları

Alaşımın esas elementi silisyumdur. (Genel olarak Si oranı %12 civarlarına kadar çıkmaktadır). İçeriğinde Cu barındırıyorsa çökmesi sertleştirilebilir. Termal genişleme katsayısı oldukça düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı oldukça yüksek alaşımlardır. 4xxx serisi alaşımlar, önemli miktarda kömür grisi renginde silisyum içerdiğinden dolayı, genelde mimari uygulamalarda kullanılmakta ve anot-

oksit kaplamalarında tercih edilmektedir. Pistonlar gibi yüksek sıcaklığa dayanabilme özelliği olan parçaların üretiminde, kaynaklı yapılarda, levha imalatında kullanılırlar, kaynak teli ve lehim alaşımı olarak da kullanım alanı bulurlar.

Alaşımlar: 4032, 4043, 4145, 4643 vs.

4.1.5. 5xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Alaşımın esas elementi magnezyumdur. Magnezyum bulundurma oranı arttıkça sertlik ve mukavemet katsayısı artar ancak sineklik azalır. Çözeltide %5,1'e kadar Mg ilavesi ile deformasyon sertleşmesi hızını arttırır. 260 MPa'ya kadar akma dayanımı için soğuk sertleştirme uygulanabilir. Oldukça iyi bir kaynak kabiliyeti ve iyiye yakın dayanıma sahiptir. Bazı kimyasal ve deniz suyuna karşı oldukça yüksek korozyon dayanımına sahiptir. Özellikle gemi sanayinde geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır.

Alaşımlar: 5005, 5049,5052, 5083, 5754 vs.

4.1.6. 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Alaşımın esas elementleri magnezyum ve silisyumdur. Mg ve Si bileşenleri, Mg₂Si çökeltmeli sertleşmeye izin verir. 2xxx serisi alaşımlar ve 7xxx serisi alaşımlar kadar dayanıklı olamamalarına rağmen, 6xxx serisi alaşımları iyi derecede şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve kaynak kabiliyeti ve oldukça iyi bir korozyon direnci ile orta seviyede bir dayanıma sahiptir. Sac, levha, ekstrüzyon ürünü olarak bulunur. 5000 serisi gibi uygulamalara da sahiptir.

Alaşımlar: 6013, 6052 ve 6061 vs.

4.1.7. 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Alaşımın esas elementi çinko olup (%1-%9 arasında Zn bulundurmaktadır), genel olarak mukavemetini artırabilmek için Mg, Cu ve az miktarlarda Mn ve Cr ile

kullanılır. Isıl işlenebilirlik ve yüksek dayanım gösterebilmektedirler. 7XXX serisi alaşımlar, alüminyum alaşımlar içinde en yüksek mukavemete sahip olanlardır. Uçaklarda ve hava taşıtlarında tercih edilmekte sıklıkla kullanılmaktadır. Bakırlı alaşımlar çökeltme sertleştirilebildiği gözlemlenmiştir.

Alaşımlar: 7075, 7050, 7049, 7100, 7110 vs.

4.1.8. 8xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Alaşımların esas elementi lityumdur ve kalay eklentisi de yapılabilmektedir. Demir ve nikel alaşımları ile elektriksel iletkenlikten kayıp vermeden dayanımı arttırılabilmekte ve 8017 alaşımları gibi iletkenliği kuvvetli alaşımlarda kullanılmaktadır. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılması tercih edilen malzeme, iyi bir yorulma direncine ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Ancak diğer Al alaşımları ile kıyaslandığında üretimi için gerekli maliyeti oldukça yüksektir. Havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır.

Alaşımlar: 8006, 8111, 8079, 8500, 8510, 8520 vs.

Bu tez çalışmasında ayrıntılı olarak;

- Al2024 Alüminyum alaşımı,
- Al5083 Alüminyum alaşımı,
- Al6061 Alüminyum alaşımı belirlenen üretim yöntemleri ile üretilmiş gerekli numuneler farklı sıcaklık ve zamanlar kullanılarak elde edilmiştir.

4.2. METALİK KÖPÜKLER TARİHÇESİ VE KULLANIM ALANLARI

İlk metal köpük denemeleri 1943 yılında California'dan Benjamin Sosnick tarafından üretilmiştir. Benjamin, bu çalışmasında ergimiş alüminyum içinde köpürtücü madde olarak cıva kullanarak sünger şeklinde metal üretmeyi başarmıştır (O'Neill, A.T.,2004). 1950'lerde ise ilk kez açık hücreli yapıda metalik köpük üretilmiştir.

Ergiyik halde bulunan sıvı alüminyum sıkıştırılmış kaya tuzu tanecikleri içine dökülmüş ve tuzların çözünmesi ile açık gözenekler oluşturulmuştur. 1959 yılında yapılan çalışmalarda ise tamamen farklı bir yöntem bulunmuştur. United Aircraft Corporation tarafından oluşturulan bu yöntemde, toz halde bulunan metal yine toz haldeki gaz yapıcı madde ile karıştırılıp, elde edilen karışım metalin ergime sıcaklığına kadar ısıtılmış, gaz salıcı madde ile çözünme sağlanmış ve gaz salınımının büyük miktarda olması ile köpük yapının oluşmasını sağlanmıştır.

1970 yıllarında alüminyumun, köpük üretimi için ideal bir malzeme olduğu anlaşılmıştır. Enerji kaynaklarının sınırsızmış gibi görüldüğü o dönem, hafif malzemeler için çok ta uygun bir dönem değildi. Güvenlik, yeniden kazanım, tekrar kullanılabilme gibi özellikler de o yıllarda günümüzdeki kadar önem arz etmiyordu. 1975 yılından sonra metalik köpük araştırmalarındaki çalışma sayıları azalmış olsa da 1980'lerin sonuna doğru metalik köpük ile ilgili çalışmalar ve araştırmalar tüm dünyada yeniden hareket kazanmıştır (Çinici, H., 2004).

1990 yıllarında metal köpüklerin üretiminde kullanılan mevcut proseslerin geliştirilmesiyle birlikte bu alanda yapılan araştırmalarda artış görülmüştür. Bu dönemde, birçok bireysel çalışma ve araştırma projelerine ek olarak dünyada iki büyük araştırma programı başlatılmıştır. 1996'dan sonra devam eden dört yıl süreli bu programlarda; İngiltere ve ABD'deki üniversitelerle araştırma bağlantılı "Çok hafif metal yapılar üzerinde çok disiplinli araştırma girişimi ve 1999'da Alman üniversitelerinde "Hücreli metallere için DFG öncelik programı" çalışmaları yapılmıştır (Curran, D. C., 2003).

Korozyon direnci, düşük ergime sıcaklığı ve düşük yoğunluğundan dolayı günümüzde en çok tercih edilen metalik köpük formu alüminyum köpük metaldir. Demir, kurşun, nikel, çinko ve titanyum esaslı köpük metallere de üretilmektedir. İyi derecede bir köpük metal üretebilmek yüksek maliyet gerektirdiğinden, yaygın olarak köpük metallere sayısı sınırlı kalmıştır. Dünyadaki çoğu ülkelerde akademik alanda daha düşük maliyetle yüksek kalitede köpük metal üretebilme çalışmaları devam etmektedir (Özer, G., 2005).

Alüminyum ve alaşımlarının üretim şekil ve yöntemlerine bağlı olarak elde edilen metalik köpüklerin kullanıldığı çeşitli alan ve sektörler bulunmaktadır. Bu endüstriler ve uygulama alanları, kullanım amaçlarına bağlı olarak sıralanmıştır.

Bu tez çalışmasında ürettiğimiz alüminyum alaşımların otomotiv endüstrisinde kullanım alanları ve bir otomobilin çarpışma kutusuna yerleştirilen enerji absorbe edebilme yeteneği üzerine uygulama ve analizler yapılmıştır. Genel olarak kullanım alanlarına örnek verildikten sonra ayrıntılı şekilde otomotiv endüstrisi anlatılmıştır. Metalik köpüklerin yapısal ve fonksiyonel amaçlarla kullanım alanları ve örnekleri sırayla verilmiştir.

4.2.1. Endüstriyel Kullanım Alanları

4.2.1.1. Otomotiv Endüstrisi

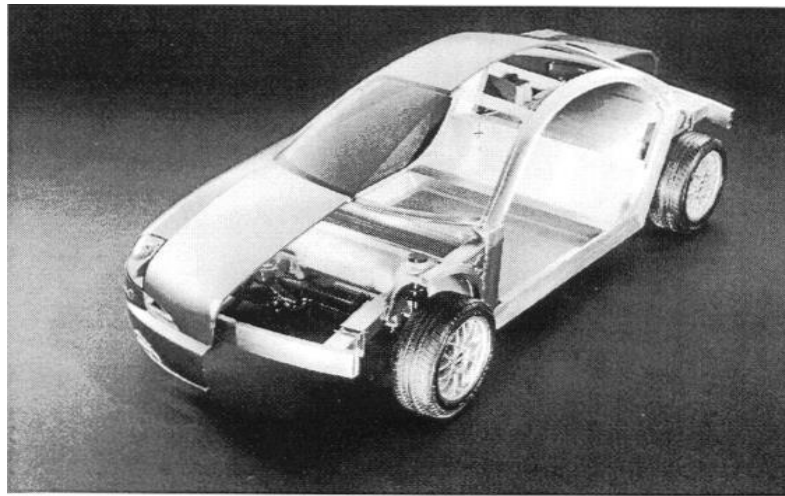
Metalik köpükler sağlam yapılı ve hafif ağırlıklı oldukları için otomobil ve bu sektörde yer alan araçların ağırlıklarını azaltmak amacıyla bu sektörde olabildiğince kullanışlı bir hal almaktadır. Taşıtlarda bulunan çelik sac yapılı panellere göre çok daha fazla dayanıklı, sağlam ve %25 hafif 3 boyutlu sandviç paneller tercih edilmektedir (Yavuz, 2010). Şekil 4.1’de köpük sandviç panel görseli verilmiştir.



Şekil 4.1. Alüminyum metal köpük sandviç panel örneği (Banhart, 2005).

Metalik köpük malzemelere olan ihtiyaçlar otomobil güvenlik sistemlerini artırmak için de kullanılmaktadır. Sahip oldukları düşük ağırlıkları ve yüksek enerji sönümlenme kabiliyetleri ile metalik köpük malzemeler birbirinden farklı otomobil parçalarında tercih edilmektedir. Özellikle üretimdeki yeniliklerle birlikte makul maliyetleri ile metalik köpük malzemelerin tercih edilme amacıdır. Otomobil üreticileri otomobillerde pasif güvenlik tedbirleri için çelik malzemelerden güvenlik sağlamak yerine hafifliği çok daha az olan alüminyum köpük malzemeler tercih etmeye başlamıştır. Alüminyum köpük malzemelerin hafifliği ve üst düzey enerji sönümlenme kabiliyetleri otomotiv sektöründe başlıca üretici firmaların ilgisini çekmiştir. Bir Alman firması üretimini ilk kez sağladığı bir otomobilin tampon kısmında, kapı kenar ve aralarında darbe emici kutu olarak kullanmış 100-150 kg arası otomobilin gövdesini hafifletmeyi başarmıştır (Oka, 2009).

Kapalı hücreli metalik köpük kullanılarak daha yüksek elastisite modülü elde edilir ve rijitlik-kütle oranı artırılabilir. Bu duruma ek olarak daha dirençli bir yapı ve darbeye dayanıklı özellikler de sağlanır. Şekil 4.2’de köpük panelden yapılmış hafif ağırlıklı araç tasarımı görülmektedir. Özel olarak sandviç şeklinde üretimi sağlanan metalik köpükler açılır tavan, motor kapağı ve bagaj kapağı gibi burulma deformasyonundan kurtulmak ve titreşimi önlemek için yüksek dayanım gereken uygulamalarda kullanılmaktadır (Güven, 2011).



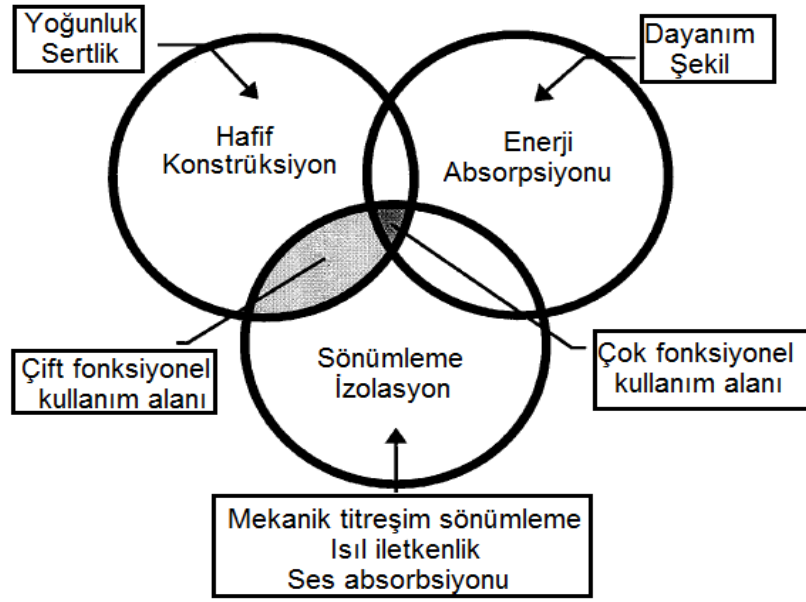
Şekil 4.2. Güvenlik duvarı ve gövdesi alüminyum köpük panellerden yapılmış hafif ağırlıklı araç tasarımı.

Yaralanma ve ölümlü kazaların son dönemlerde artması otomobillerde öncelikli yolcu ve ikincil olarak araç güvenliğinin artırılması konusunda çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Güvenliğin artırılması için kullanılan malzemelerin ağırlığı sebebiyle otomobile fazlaca yük binmiş, bu yüke bağlı olarak kullanılan yakıtın tüketimini de artırmıştır. Avrupa'da ve bazı Uzak Doğu ülkelerinde üretilmiş olan araçların boyutları genelde küçük yapıdır ve bu yapı içinde bulunan yolcuların hareket alanını kısıtlamakta ve rahat olmayan bir yolculuk ortaya koymaktadır. Otomobillerde tercih edilen metalik köpük malzemeler bu tarz problemlere de çözüm üretmişlerdir.

Metalik köpük malzemelerin tercih edildiği otomobiller üzerinde darbeye bağlı enerjisi sönmülmesi, konstrüksiyon ve izolasyon özellikleri bakımından birçok faydası bulunmaktadır. Bu sayede metalik köpük malzemeler buldukları otomobillerde çeşitli parçaların içlerinde dolgu malzemesi olarak da tercih edilmektedir. Bu özelliği sayesinde de parçaların otomobil üzerindeki ağırlığı azalmaktadır. Şekil 4.3'te Köpük dolgu bağlantı parçaları, Şekil 4.4'te ise otomotiv endüstrisine olan faydaları verilmiştir.

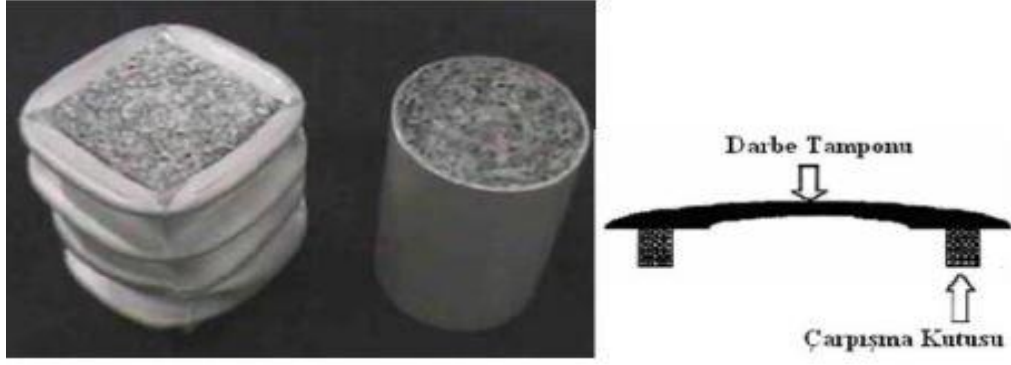


Şekil 4.3. Otomobillerde kullanılan köpük dolgulu bağlantı parçaları (Demirhan, 2010).

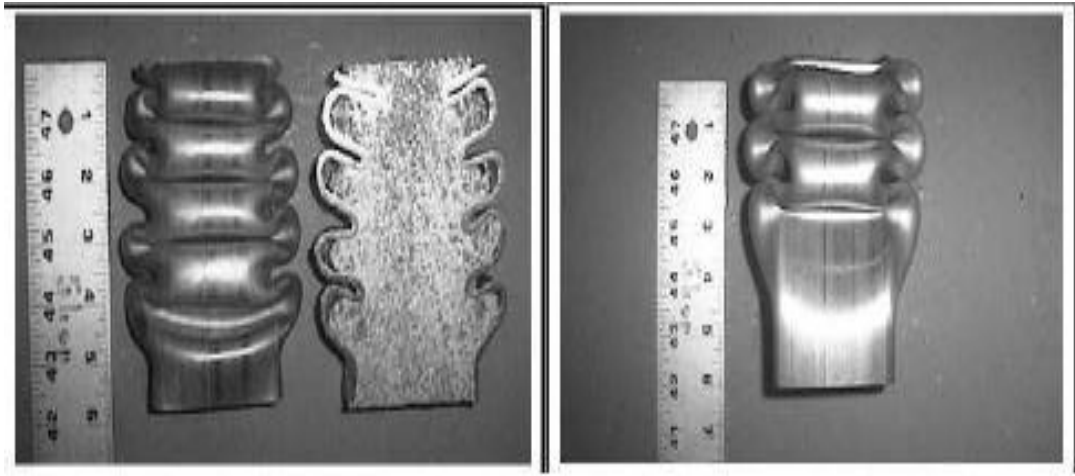


Şekil 4.4. Metalik köpük malzemelerin kullanımında otomotiv endüstrisindeki faydaları.

Alüminyum köpükler otomotiv sektöründe otomobillerde çarpışma emici görevi için de kullanılmaktadır. Bu durumda bazı çarpışma kutuları ve şekilleri geliştirilmiş uygun üretim yöntemleri ile ergonomik olarak kullanılmak üzere çalışmalar yapılmıştır. Çarpışma kutuları darbe tamponuyla ve ön korkuluk arasında konumlandırılır. Çarpışma kutusu görseli aşağıda verilmiştir. Bu çarpışma önleyici kutular sayesinde 20 km/s hızın altında meydana gelecek kazalarda oluşan bütün darbe enerjisini sönümleyerek deforme olurken bağlı buldukları otomobillerin şasilerinde bir hasarın meydana gelmesini de engellemişlerdir. Şekil 4.5'te ve Şekil 4.6'da boyutları aynı olan içi alüminyum köpük ile dolu ve içinde köpük bulunmayan paslanmaz 304 çeliğine eksenel yönde eşit kuvvet altında deforme görüntüleri yer almıştır (Yavuz, 2010).



Şekil 4.5. Çarpışma kutusu örnekleri (Banhart, 2005).



Şekil 4.6. Eksenel yönde basınç altında kalan içi alüminyum köpüklü ve köpüksüz paslanmaz.

Oldukça yüksek değere sahip mukavemetleri ile metalik köpükler, geleneksel olarak tercih edilen metallere göre daha iyi bir performans gösterirler. Otomobillerde takla ve yandan, dolaylı, önden gelen darbelere karşı meydana gelen hasarlar minimum seviyeye indirilebilir (Wood, 1998).

Teleskop kollu vinçler üzerinde bulunan kaldırma kollarında sandviç köpük malzeme tercih edilerek araç ağırlığı toplam 3,5 Ton ile sınırlandırılmıştır. Bu durum sonucunda vinç hem ağırlıkça hafifleyerek yakıt tasarrufu sağlanmış hem de taşıt şartnamesine uygun şekilde sahip olduğu hafifliği sayesinde kategori değiştiren Euro B grubu sürücü ehliyetli şoförlere bu araçları kullanım imkânı sağlanmıştır.



Şekil 4.7. Teleskop kollu vinç köpük metal uygulaması.

4.2.1.2. Uzay ve Hava Endüstrisi

Köpük metallerin ağırlığının hafif olması sonucu havacılık endüstrisi için oldukça önemli bir etkidir. Uzay endüstrisinde metalik köpüklerin uzay taşıtlarının iniş takımlarında, enerji absorbe edebilen çarpışma malzemesi yerine kullanılmasını üzerinde çalışılmaktadır (Yavuz, 2010).

Havacılık uygulamalarında; paha değeri yüksek olan bal peteği formunda kompozit malzemelerin yerine daha ucuz ve dayanıklı şekilde alüminyum köpük levhalar veya metalik köpük sandviç paneller tercih edilerek yüksek performans elde edilmektedir. Boeing firması, sandviç form yapılı titanyum köpük parçalarını ve metalik köpüklerini helikopterlerin kuyruk kısmında tercih etmektedir (Güven, vd., 2011).

4.2.1.3. Gemi ve Demiryolu Endüstrisi

Gemi inşasında hafifletilmiş formda kullanılacak malzemeler oldukça önem arz etmektedir. Modern olarak kullanılan gemilerin çoğu hadde yapılmış alüminyum, alüminyum petek ve alüminyum levha şeklinde yapılarından inşası sağlanabilir.

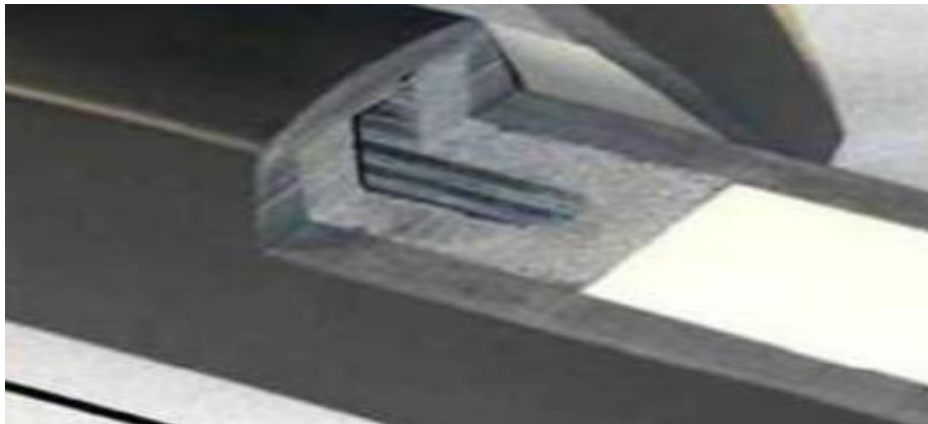
Alüminyum köpük levhalar, gemi yapılarının bazı yapılarında önemli bir etkidir. Levha yüzeyleri, alüminyum köpüklere elastisite seviyesi yüksek poliüretan malzeme ile yapıştırıldığında oldukça iyi bir sönümlemeyle birlikte hafiflik ve sertlik

sağlamaktadır (Banhart, 2001). Köpük metallerin gemicilik endüstrisindeki kullanım alanları Şekil 4.8’de belirtilmiş olup, anten platformları, fişek ambarları, gemi içi bölmeler ve ambar platformları gibi bölümleri kapsamaktadır (Yavuz, 2010).



Şekil 4.8. Gemilerde köpük metal kullanımı.

Şehir merkezlerinde insan ulaşımı için faaliyet gösteren tramvaylar için kaza riski oldukça yüksek ve mühim bir ayrıntıdır. Japonya’da yapılan çalışmalar sonucu trenler çarpma enerji soğurmasını arttırmak ve kazan sonu ortaya çıkan sonuçlarını azaltmak hedefiyle metalik köpük blokları üretilmiştir. Asıl amaçları otomobillerdeki darbe emici tamponlar gibi kullanımdır ancak yolcu taşıyan vagonlar için bu yapı oldukça büyüktür. Şekil 4.9’da tramvaylar için darbe emici yapı gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Tramvaylar için darbe emici yapı (Banhart, 2005).

4.2.1.4. İnşaat ve Makine Endüstrisi

Metalik köpükler inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Son dönemlerde modern binalarda beton yapı binalar yapılmaktadır. Betonun dış yüzeyleri ile metalik köpük paneller ile görünümü iyileştirme amaçlı dekor olarak kullanılmaktadır. Bu paneller oldukça sert olmasının yanı sıra hafif ve ateşe karşı da dayanım sağlamaktadır. Balkon korkuluklarında da aynı kullanımı tercih edilebilmektedir.

Alüminyum köpükler asansörlerde de enerji tüketimini azaltmaktadır. Son zamanlarda kurulan asansör sistemlerinin sahip olduğu hızın yüksek olması nedeniyle ani ivmelenme esnasında hafif yapı malzemeler son derece önemlidir. Yangın kapılarında alüminyum köpüklerin sahip olduğu düşük yoğunluk ve termal iletkenlik yangına karşı dayanımı artırmaktadır. Erime noktası oldukça düşük olan alüminyumların, alüminyum alaşımları ile üretilen köpüklerin yoğun alev karşı direnci çok yüksektir (Özer, 2005). Şekil 4.10'da yapı malzemesi olarak tercih edilen alüminyum köpükler gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Yapı malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpükler.

Köpük metallerin makine yapımında da çeşitli uygulamaları mevcuttur. Sert şekilde köpükleştirilmiş metal parçalar ya da köpük ile doldurulmuş sütunlar vasıtası ile durgunluğu azaltılarak ve sönümlenme kabiliyeti artırılarak mil, merdane veya bazı platformlarda genel olarak kullanılan metal malzemelerinin yerine tercih

edilmektedir. Bu bileşenlerin tamamı matkap ya da öğütme makinelerinde titreşimden kaynaklı oluşacak zararı kapatmak, zararlı ve ekstradan oluşan titreşimi sönmölemek amacıyla kullanılabilir (Banhart, 2011).

4.2.1.5. Biyomedikal ve Spor Endüstrisi

Yüksek fiyatlardan dolayı spor malzemeleri alanında yeni ve dayanıklı malzemeler için ideal ve karlı bir alandır. Örnek verilecek olursa futbolcular için kaval kemiği hususunda koruyucu bir malzeme olarak iyi bir enerji emici olan alüminyum köpüklerden yararlanılmaktadır (Çağlar, 2009).

Titanyum ya da kobalt-krom alaşımları ile üretilen malzemeler sağlık alanında protez ve diş implantlarında biyo uyumluluklarından dolayı tercih edilmektedir. Alüminyum köpüğün kullanılması gereken yerlerde dayanımı artırmak için yoğunluk dağılımı ayarlanabilmektedir. Diş implantlarının yüksek seviyede işlevsellik ve dayanıklılığı sağlanacak şekilde üretilmesi hususunda çalışmalar henüz netleşmemiştir.

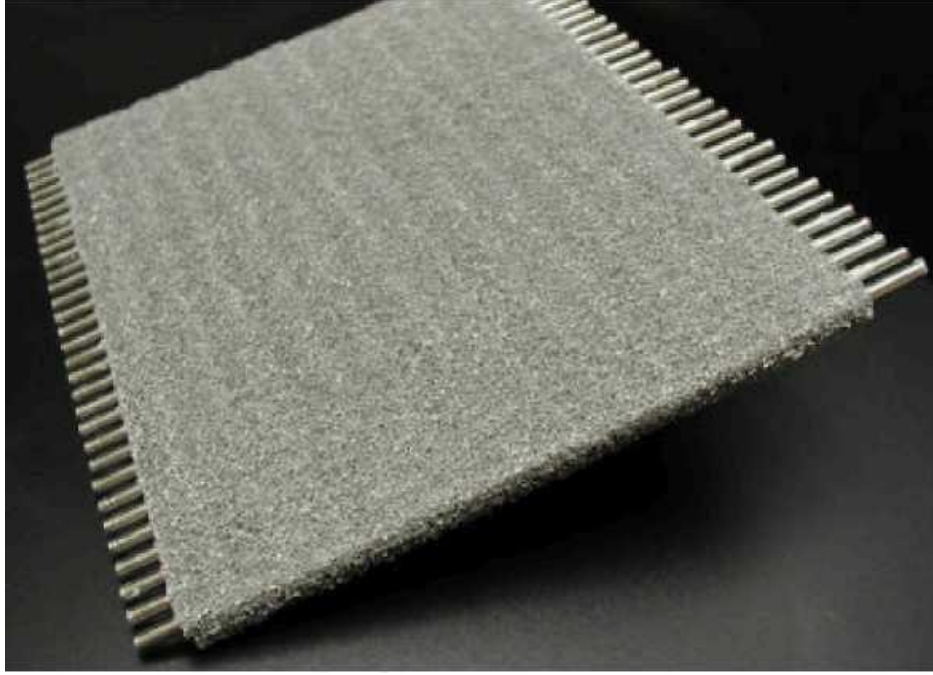
Diş implantlarının genliğinin çene kemik yapısının genliğine uyum sağlaması gerekmektedir. Metal köpüklerin sahip olduğu yoğunluk ile genlik arasındaki parametreler bilindiğinde, biyo uyumluluğu sağlayan, uygun modifikasyonda iyi bir implant üretilebilir (Wheeler, vd., 1983). Alüminyum köpükler yapı bakımından kemik ile benzerliğinden dolayı biyomalzeme olarak kullanılan Ti alaşımları ile elde edilen metalik köpüklerle protezler vücut ile uyumlu olarak kullanılabilir.

4.2.2 Alüminyum Köpük Uygulamaları

4.2.2.1. Isı Değiştiriciler ve Soğutma Makineleri

Açık hücreli metal köpüklerle elde edilen ısı değiştiriciler, güç elektronikleri için kompakt ısı emiciler, ısı kalkanları, hava soğutmalı kondensör kuleleri ve rejenaratörler gibi uygulamalarda ısı transferini artırabilmek için havacılık sektöründe oldukça fazla tercihe edilmektedir. Isı soğutucu ve ısıl değiştiricilerde sahip olunan ısıyı hızlı bir biçimde iletme için gerekli yüksek iletkenlik gerekliliğinden dolayı özellikle gösterildiği gibi alüminyum ve bakır köpüklerin

kullanımı mevcuttur. Köpük boyunca gaz ya da sıvının akışı sağlanarak ısı köpükten uzaklaştırılır. Akışkanın köpüğe giriş çıkış yapması sebebiyle ortaya çıkan basınçta düşüş mümkün olduğunca az olmalıdır. Basınçtaki düşüşü köpükteki açık hücreler azaltılabilmektedir (Ashby vd., 2000). Şekil 4.11’de ısı değiştirici rolü üstlenen köpük metaller yer almaktadır.



Şekil 4.11. Köpük metal ısı değiştirici (Haack vd., 2002).

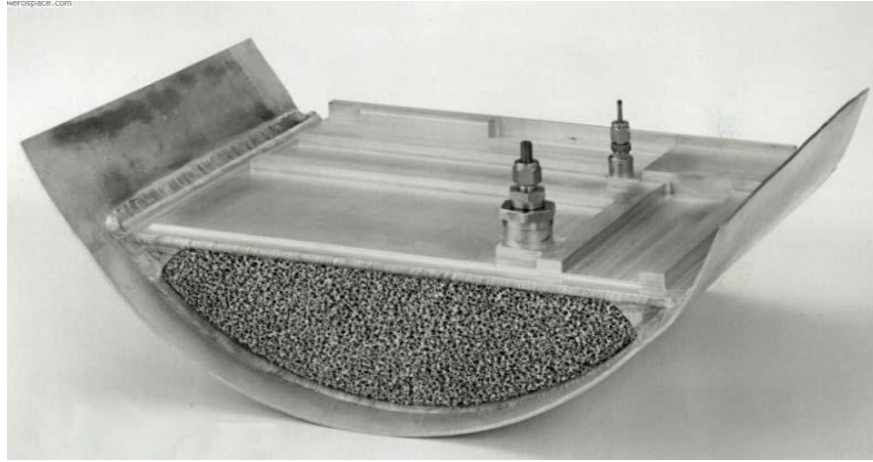
4.2.2.2. Katalizör Yatakları

Katalizörlerin reaksiyonda etkin rol alması reaksiyona girecek gaz ya da sıvı ile katalizör ilişki alanının yüksek olmasına endekslidir. Bu sebeple katalizörler gözenekli bir yapının içerisinde veya seramik olan gözenekli malzemeden yapılacaktır. Gözenekli köpük metaller seramiklerden daha çok tercih edilmektedir. Çünkü metalik köpük malzemelerin, yüzey alanının büyüklüğüne ters olarak kırılğanlığı olabildiğince azdır, termal iletkenlik seviyeleri de oldukça iyidir (Çağlar, 2009).

4.2.2.3. Su Arıtma, Sıvıların Depolanması ve Transferi

Su içerisinde bulunan zararlı iyonların konsantrasyonunu azaltmak için metalik köpükler tercih edilebilir. Kirlenmiş su gözenekliliği oldukça yüksek metalik köpükler içerisinden akıtılır (Banhart, 2001).

Dondurucu soğuk şartlarında, akışkanların depolanmasında, homojen şekilde ısıtılması ve soğutmasının sağlanması için açık hücreli metalik köpükler kullanılmaktadır. Alüminyum köpüğün belli oranda dolu depolarda sıvının için istenilmeyen hareketlerini azaltabilmek için deflektör görevli kullanımı görülmektedir. Deponun kızılötesi teleskop sistemlerinde sıvı azot depolanmasını sağlamaktadır (Banhart, 2011). Şekil 4.12’de deflektör olarak kullanılan alüminyum köpüğe ait görsel yer almaktadır.



Şekil 4.12. Hafif ağırlıklı ve basınç uyumlu depoda deflektör olarak alüminyum köpük kullanımı.

4.2.2.4. Susturucular

Titreşimden meydana gelen basıncı, mekanik titreşimleri ve ses darbelerini absorbe edip engellemek için toz metalürjisi üretim yöntemi ile elde edilen metalik köpükler kullanılabilir. Kompresör ya da pnömatik cihazlarda aniden meydana gelen basınç değişiklikleri, sinterlenmiş gözenekli elemanlar vasıtası ile sönmülenebilir (Özer, 2005). Şekil 4.13’te susturucu olarak kullanılan alüminyum köpükler yer almaktadır.

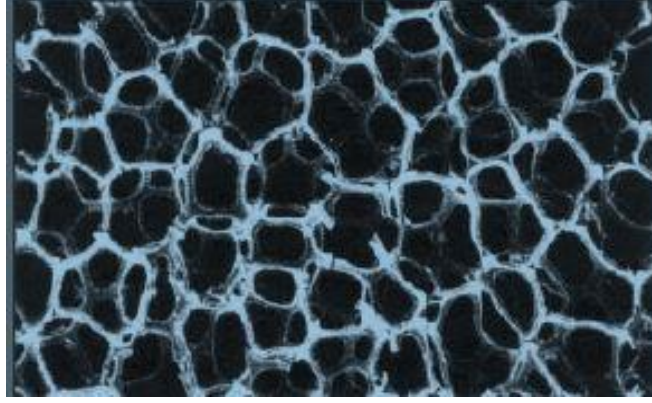


Şekil 4.13. Susturucu olarak kullanılan alüminyum köpükler (Banhart, 2001).

4.2.2.5. Elektrokimyasal Uygulamalar ve Pil Elektrotları

Nikel alaşımlı köpükler, elektrot rolünü elektrokimyasal reaktörlerde almaktadır. Filtre elektrotlarında, izole edilmiş metal plaka yığını kullanılır. Bu plaka yığınları türbülansla desteklenmiş plastik elek gözü ve yalıtkan özellikli zarlar tarafından ayrılmıştır. Açık hücreli nikel köpük levhaları, elek gözünün yerine kullanılması durumunda türbülans desteği sürer ve elektrot yüzeyi artırılır. Böylece reaktörün daha sıkı şekilde kurulması sağlanır (Banhart, 2011).

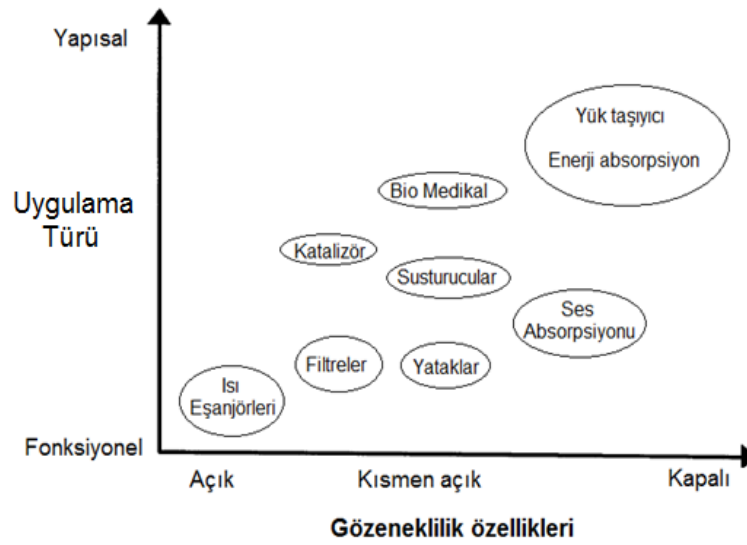
Kurşun alaşımlı köpükler sayesinde oldukça hafif elektrotlar üretilmesi için geleneksel olarak kullanılan kurşun kafeslerinin yerine kurşun-asit pillerde tercih edilip aktif malzemeye yataklık görevini üstlenebilirler. Ek olarak yeniden şarj edilebilme yeteneği olan Şekil 4.14'te gösterildiği gibi NiCd pillerinde, nikel köpük elektrot görevi üstlenerek ağırlıktan tasarruf ve olabildiğince yüksek enerji yoğunluğu sağlamaktadır (Banhart, 2011).



Şekil 4.14. NiMeH ile NiCd bataryalarda artı elektrot olarak kullanılan köpük haldeki nikel.

4.3. METALİK KÖPÜKLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

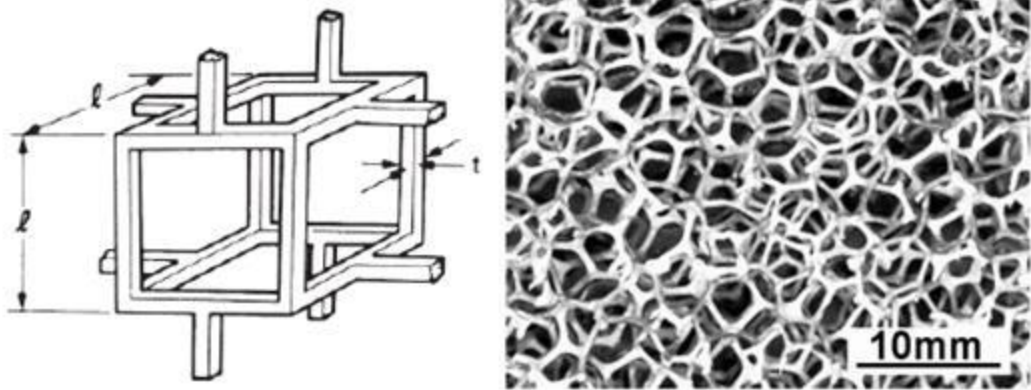
Metalik köpük malzemelerin açık, yarı açık ve kapalılık gibi yapısal anlamda farklı ve fonksiyonel kullanım alanları mevcuttur. Fonksiyonel olarak açık ve kapalı hücreli metalik köpük malzemelerin farklı kullanım alanları bulunmaktadır. Gözenek yapısının kapalılık ve açıklık durumlarına göre kullanım alanları Şekil 4.15.'te gösterildiği şekildedir. Çoğu alanda yoğunlukla kullanılan metalik malzemelerin istenilen ihtiyaçları kazandırmak konusunda yeterli özelliklere sahip oldukları bilinmektedir.



Şekil 4.15. Gözeneklilik oranına göre metalik köpük malzemelerin fonksiyonel ve yapısal kullanım alanları (Banhart, 2000).

4.3.1 Açık Hücreli Metalik Köpük Malzemeler

Açık hücreli metalik köpük malzemelerin gözenek yapıları ve gözenekleri arasında bulunan boşlukların ve yüzeylerinin geniş olması nedeniyle barındırdığı en önemli özelliği ısı transfer yeteneğinin olabildiğince yüksek olmasıdır. Bu özelliğin yanı sıra en mühim özelliği gaz geçirgenliğinin de fazla olmasıdır. Açık hücreli metalik köpüklerin sahip olduğu mekanik özelliği kapalı hücreli metalik köpük malzemelere göre daha düşük olması sebebiyle genel olarak fonksiyonel amaçlı kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 4.16'da bulunan görselde üretimi yapılan açık hücreli metalik köpük malzemenin SEM mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Açık hücreli metalik köpüklerin genel olarak kullanım alanları akışkan sönümlenme kanalları katalizör destekleri, biyomedikal malzemeler, ısı değiştiriciler, filtreler ve hava pilleridir (Yavuz, 2012).

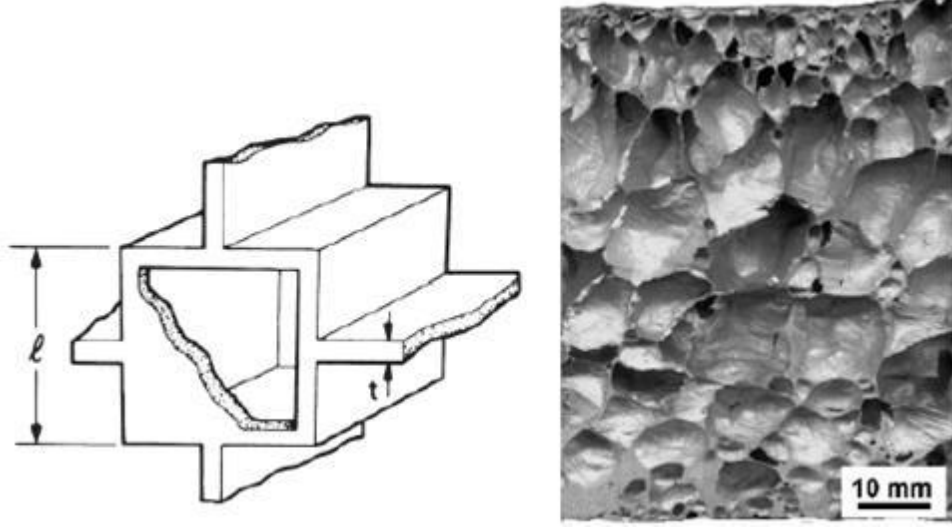


Şekil 4.16. Açık hücreli metalik köpük malzemelerin yapısı (Dumais, 2009; Amjad, 2001).

4.3.2 Kapalı Hücreli Metalik Köpük Malzemeler

Belli şartlarda ergiyik haldeki metaller, gaz kabarcıkları oluşturarak sıvı içerisinde köpürebilmektedir. Ergiyik halde bulunan metalik köpük malzemelerin içerisinde gözenekler oluşturabilmenin iki farklı yolu bulunmaktadır. Bunlardan birincisi ergiyik metal içerisine gaz salınımı sağlanarak köpürtücü malzemeler karıştırmak, ikincisi dışarıdan ergiyik metal içerisine gaz ilave etmektir. Etrafının katı ya da sıvı ile tamamen kaplanması hücreler arasında herhangi bir bağlantı olmamasına

sebebiyet vermektedir (Banhart, 2000). Şekil 4.17’de kapalı hücreli metalik köpüğün yapısı gösterilmektedir.



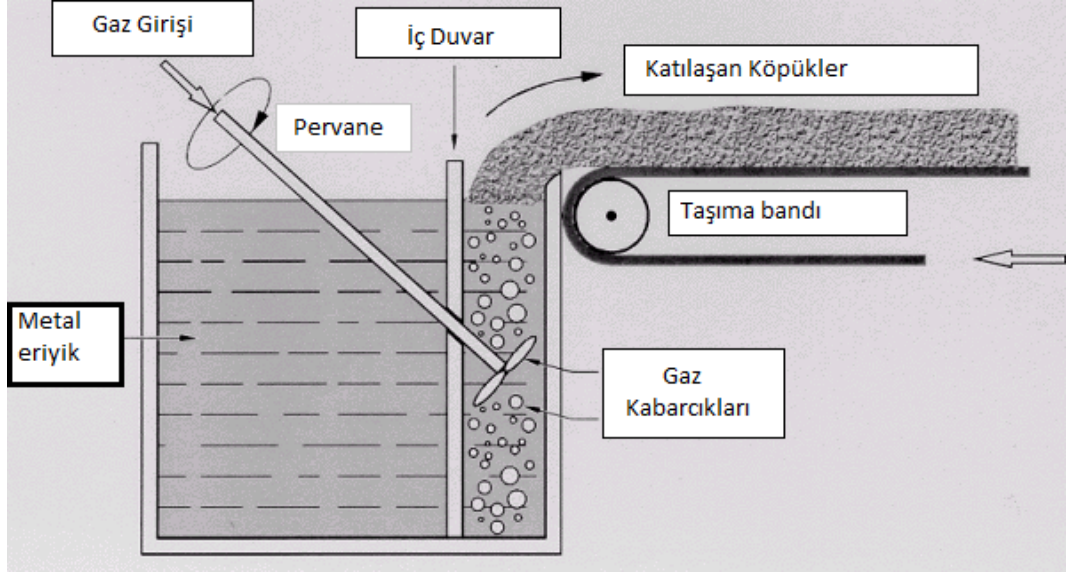
Şekil 4.17. Kapalı hücreli metalik köpük malzemelerin yapısı (Dumais, 2009; Amjad,2001).

Kapalı hücreli metalik köpük malzeme üretmek için üretim yöntemlerinden en fazla kullanılan metodlar ergiyik metal içerisine gaz enjekte edilme yöntemi ile metalik köpük üretimi, ergiyik metal içerisine köpürtücü madde ilave edilerek metalik köpük üretimi ve sıvı metal ile köpük üretimi olarak bilinmektedir (Seitzberger vd., 2000).

4.3.2.1. Gaz Enjeksiyon Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi

Bu yöntemle genel olarak alüminyum ve alaşımlarından oluşan köpükleri üretilmektedir. İlk olarak metal ergitilir. Eriyik metalin viskozite seviyesini artırmak için SiC, Al₂O₃ veya MgO tanecikleri kullanılarak metal matrisli kompozit elde edilir. Daha sonra, özel olarak tesis edilmiş dönen pervane eşliği ile eriyik metale hava, azot ya da argon üflenerek eriyik metal köpükleştirilir. Pervane sayesinde oldukça ince şekilde gaz kabarcıkları oluşur ve oluşan bu kabarcıklar homojen olarak dağılır. Eriyik metal yüzeyinde oluşan köpükler seramik tanelerin olması dolayısıyla oldukça kararlı seviyededir. Bu köpükler taşıma bandı ile çekilerek soğutulur ve katı hale getirilir (Banhart, 2001).

Köpük kararlılığını etkileyen bazı etkenler bulunmaktadır. Bu etkenlere örnek verilecek olursa; yüzey emilimi, yüzey devinimi, akışkanlık, hücre duvar kalınlığı ve elastisite denebilir (Ekerim 2009). Şekil 4.18’de eriyik metale gaz enjektisi yöntemi gösterilmiştir.



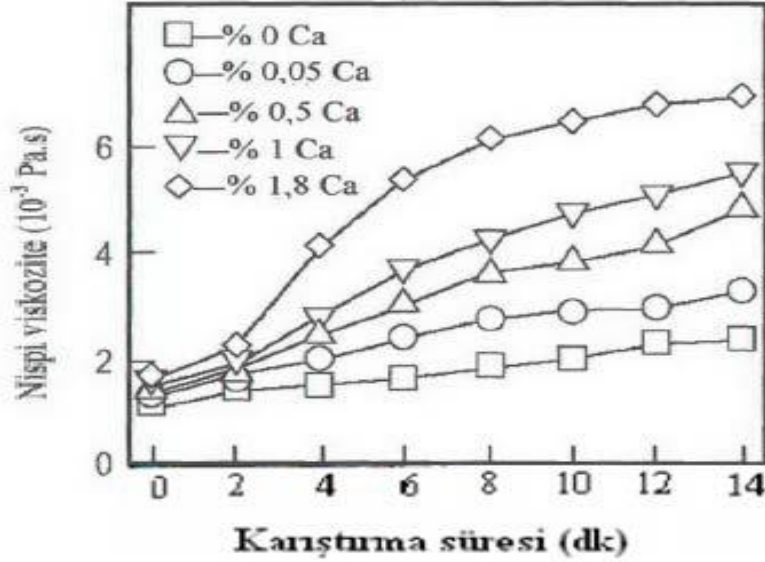
Şekil 4.18. Eriyik metale gaz enjektisi yöntemi (Gawdzinska ve Gucma, 2015).

Takviye tanelerinin hacimsel oranı genelde %10-20 arasındadır ve tanecik boyutu ise 5-20µm aralığındadır. Tanelerin hacminin, tane boyutunun fazla veya az olması bazı sorunlara ortaya çıkarmaktadır. Örnek olarak takviye seviyesinin az olması köpük kararlılığını azaltırken, fazla olması viskozitenin fazla olmasına sebep olmaktadır. Tanecik boyutunun az olması ise karışımın karıştırılmasını güçleştirirken, fazla olması da tanecik dağılımını olumsuz olarak etkilemektedir (Banhart, 2001). Bu metotla elde edilen metalik köpüklerin yoğunluğu ortalama 0,069–0,54 g/cm³ arasında olup, ortalama gözenek boyutu ise 3-25 µm arasındadır (Banhart, 2001). Bu yöntemin en büyük avantajları devamlı üretim imkânı sağlaması, başka üretim yöntemlerine göre ucuz olması ve yoğunluğun düşük olarak elde edilmesidir.

Dezavantajları ise metalik köpüğün en son işlemden önce kesme işlemine gereksinim duyması sebebiyle oluşabilecek açık hücreler ve takviye tanelerinin sebep olduğu kırılabilirliktir (Banhart, 2001).

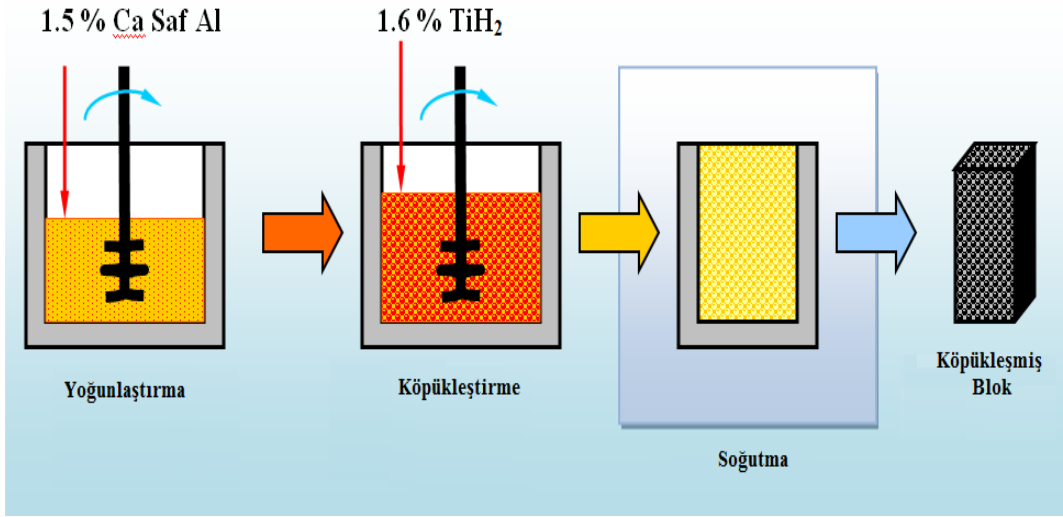
4.3.2.2 Köpürtücü Madde İlavesi ile Metalik Köpük Üretimi

Bu üretim yöntemi ile genellikle alüminyum ve alüminyum alaşım köpüklerinin elde edilmesi ve üretilebilmesi için uygulanır. İlk olarak, eriyik halde bulunan metale yaklaşık ağırlık seviyesi %1,5 kalsiyum katılarak bir süre karıştırılır. Kalsiyum eklenmesi CaO , CaAl_2O_4 ve Al_4Ca ara bileşimini meydana getirir ve böylece eriyik metalin viskozite seviyesi artar. Şekil'de karıştırma zamanının viskoziteye olan etkisi belirtilmektedir. İstenilen viskozite seviyesine ulaşıldıktan sonra, asıl köpürtücü madde olarak Titanyum Hidrür (TiH_2) ağırlıkça %1,6 oranında eklenir ve ardından homojen dağılımın elde edilmesi için birkaç dakika karıştırılır (Çinici, 2004). Şekil 4.19'da karıştırma sürelerinin viskozite üzerinde etkisi belirlenmiştir.



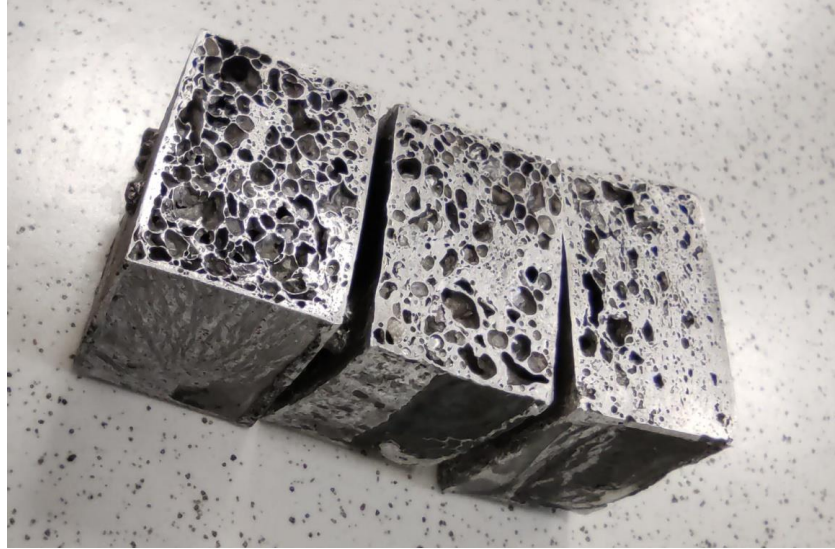
Şekil 4.19. Karıştırma süresinin viskozite üzerindeki etkisi (Çinici, 2004).

Sıcaklık seviyesinden dolayı TiH_2 elementlerine ayrılarak hidrojen gazı açığa çıkarır ve gözenek oluşumlarını sağlar. Sonrasında Şekil 4.20'de gösterildiği gibi eriyik metal yavaş şekilde genişlemeye ve zaman geçtikçe kalıbı doldurmaya başlar. Köpürme basıncı sabit olarak tutulmaktadır. Kalıp soğuması sağlanarak sıvı köpük katılaştırılır ve blok şeklinde köpük elde edilir (Strek, 2012; Banhart, 2000; Çinici, 2004).



Şekil 4.20. Eriyik metale köpürtücü madde ilavesi yöntemi (Çinici, 2004).

TiH₂ köpürtücü madde ilavesi ile çalışmamız sonucunda elde edilen üç adet blok metalik köpükler Şekil 4.21’de gösterildiği gibidir.



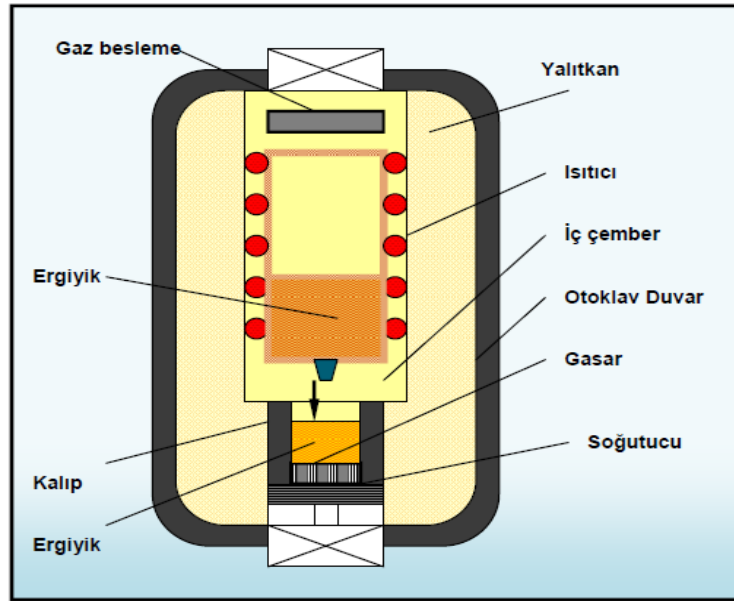
Şekil 4.21. Blok şeklinde elde edilen metalik köpüğün kesilmiş halde gözenek yapıları.

Bu üretim yönteminin en önemli avantajı sonuç köpüğünün oldukça homojen olmasıdır. Blok şeklinde bulunan bu son köpüğün yoğunluğu genelde 0,18-0,24 g/cm³ ve gözenek boyutu ise ortalama 2-10 mm arasında yer almaktadır (Strek vd., 2012).

4.3.2.3 Katı- Gaz Ötektik Katılma Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi

Bu yöntemin homojen özelliği diğer üretim yöntemlerine göre oldukça zayıftır. Hhücre büyüklüğü oluşumu ve birleşimini aynı anda gösteren küçük ve büyük gözenekli hücrelerden dolayı dengeli bir dağılım sağlayamamaktadır. Üretim yönteminde ötektik reaksiyon özelliğine sahip metalik yapıları köpürtmek için hidrojen gazı kullanılmaktadır (Banhart, 2000).

Bu yöntem GASAR olarak bilinmektedir. Üretim yöntemi uygulanırken, metal bir tank içerisinde ergitilir. Ayrıca dışarıdan eklenen hidrojen gazı ergiyik halde bulunan metal tarafından emilir. Hidrojen gazının metal tarafından emilmesi sonucu metalin bozulmasını sağlayarak ergiyik haldeki metalin iç kısımlarında gaz kabarcıklarının oluşmasını sağlar. Sonrasında dışarıdan uygulanan artı bir basınç değeriyle metal iç kısmına karıştırılan hidrojen gazının çözünebilir etkisinin artmasına neden olur. Gazı sönümleyen ergiyik sıvı, alt kısmı soğutululan başka bir tank içerisine alınır. Alınan sıvı hareketini metal tankın soğuk kısımlarına doğru ilerletirken katılma eğilimine ile katılma sağlanır (Çinici, 2012). Şekil 4.22’de Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile elde edilmesi gösterilmektedir.

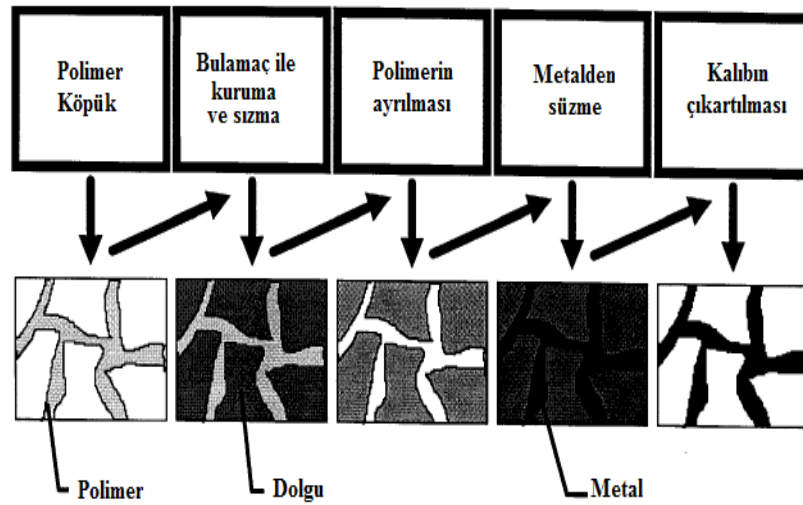


Şekil 4.22. Açık gözenekli metalik köpüğün GASAR yöntemi ile üretimi (Çinici, 2012).

GASAR üretim yöntemi ile elde edilmiş olan metalik köpük malzemelerin katılaşması ile şekil alırlar ve küresel şekilde hücreler meydana getirirler. Kullanılan metalin ve alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri, gaz basıncı, ergime sıcaklığı ve soğutma hızı metalik köpük hücrelerinin şekil ve ebatlarının oluşmasında etkin rol oynar.

4.3.2.4. Polimer Köpük Kullanarak Köpük Malzeme Üretimi

Alüminyum metalik köpükler elde edebilmek için kullanılan bir diğer üretim yöntemi Polimer esaslı malzeme kullanılmasıdır. Bu yöntem ile üretim şematik olarak aşağıda belirtilmiştir. Üretim yöntemi ile köpük malzeme yapılırken ısıl direnç seviyesi yüksek olan malzemeler kullanılmaktadır. Isıl direnci yüksek malzemelere örnek olarak alçı, kalsiyum karbonat veya mullit verilebilir. Üretim yönteminde polimer esaslı malzeme bünyeden ayrıştırılır. Sonuç itibariyle oluşan boşluklara sıvı alüminyum kaynaklı malzeme dökülür (Sertkaya, 2008). Şekil 4.23'te polimer döküm yöntemi ile hassas döküm yapılmasına ait görsel verilmektedir. Bu üretim yöntemi ile çoğu metalden döküm yoluyla köpük malzeme üretebilmek mümkündür. Bu üretim yönteminin dezavantajları arasında döküm yapılırken boşlukların tam olarak doldurulamaması, tek yönde katılaşma sağlanması ve sonucunda kalıp olarak kullanılan malzemelerin üretilen metalik köpüğe zarar vermesi sayılabilir.



Şekil 4.23. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm (Banhart, 2000).

4.3.2.5 Toz Metalurjisi Yöntemi ile Metalik Köpük Üretimi

Metalik köpükler metal tozlarının yardımları ile de üretilebilir (Banhart, 2000b; Baumgärtner vd., 2000; Banhart ve Duarte, 2000). Üretimin ilk aşamasında köpürtücü madde vasıtası ile toz halde bulunan metaller (alaşım tozları, metal toz karışımları veya temel metal tozları) karıştırılır.

Kompaktlama genelde normal atmosfer ve yüksek basınç ile tozların sıkıştırılması işlemidir. Birleşme sırasında boşluklu oluşturmaya yarayan etken madde işlemler sırasında iyi karıştırılmalı yeterli seviyede matrisli yapıya gömülmesine dikkat edilmelidir. Kompaktlama yöntemi örnekleri izostatik (tek eksenli sıkıştırma), toz haddeleme veya çubuk ekstrüzyon olabilir (Banhart, 2000b).

Üretimin başlangıcında matris oluşmasına ve karıştırma süresine itina ile yaklaşılmalıdır. Dikkat edilmezse heterojen karışım başta olmak üzere devam eden işlemlerde sonuçlar istenildiği gibi olmayabilir. Sonrasındaki ilk işlem, ergime noktasına yaklaşan sıcaklıklardaki matris malzemenin ısıl işlemidir. Metal ile matris içindeki köpürtücü madde birbirinden ayrışır ve eldeki malzemede eriyerek gaz kuvvetlerini serbest bırakır. Sonuçta gözenekli yapı meydana gelir. (Banhart, 2000).

Bu üretim yöntemi ile alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dışında, kalay, çinko, pirinç, kurşun, altın ve bazı diğer metal ve metal alaşımlarının da kendilerine uygun köpürtücü madde eşliğinde köpük üretimi gerçekleştirilebilir. Köpürtücü madde olarak belirlenen TiH_2 gibi metal hidrürler, karbonatlar, hidratlar veya diğer hızlı şekilde buharlaşabilen malzemeler örnek verilebilir (Çinici, 2004).

Toz metalurjisi üretim yöntemi ile metalik köpük üretiminde oldukça hassas olunması gerekmektedir. Sebebi gözenek boyutlarındaki artış ve katılaşmanın gerçekleştiği anda gözenek yapılarının bozulması, çökmesi ve düzensiz katılaşma gibi bazı hatalar sonucu üretilmek istenen metalik köpüğün kalitesinin istenen seviyede olmamasına neden olur. Ayrıca başka bir ayrıntı ile köpürtücü ajan ve köpürtme sıcaklığı oranına bağlı olarak lineer genişleme için artış meydana gelir (Türker, 2009).

Toz metalurjisi üretim yöntemi ile bilinen basit düzeyde metalik köpük üretimine binayen, içi boş kalıp ya da sandviç köpük, profil içerisinde köpürtme ve küresel köpük üretilmektedir. Bu çeşitliliğin sayesinde profillerin çeşitli kullanım alanlarına bağlı olarak enerji sönümleme yetenekleri de artış gösterecektir (Kılıçaslan, 2016).

Toz Metalurjisi ile üretim yönteminin sağladığı avantajlar;

- Boyut kontrollü ve karmaşık şekilli üretim yapılabilmektedir.
- Malzeme kaybı oldukça azdır.
- Talaşlı kaldırma gibi ekstra işlemlere gerek yoktur.
- Üretim nispeten hızlı ve düşük maliyetlidir.
- Yüksek ergime sıcaklığına sahip metaller düşük maliyette üretilmektedir.
- Çeşitli alaşımlama sistemler ve partikül takviyeli kompozitler üretilmektedir. (Güven, 2011)

BÖLÜM 5

MATERYAL METOD

5.1. TOZ METALURJİSİ ÜRETİM YÖNTEMİNE GÖRE METALİK KÖPÜK ÜRETME AŞAMALARI

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü (Ankara), üniversiteye ait laboratuvarlarda, toz metalurjisi yöntemi ile metalik köpük üretme adımları izlenerek çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde serbest köpürme ile köpürtülen ve kapalı kalıpta köpürtülen metalik köpükler üretilmiştir.

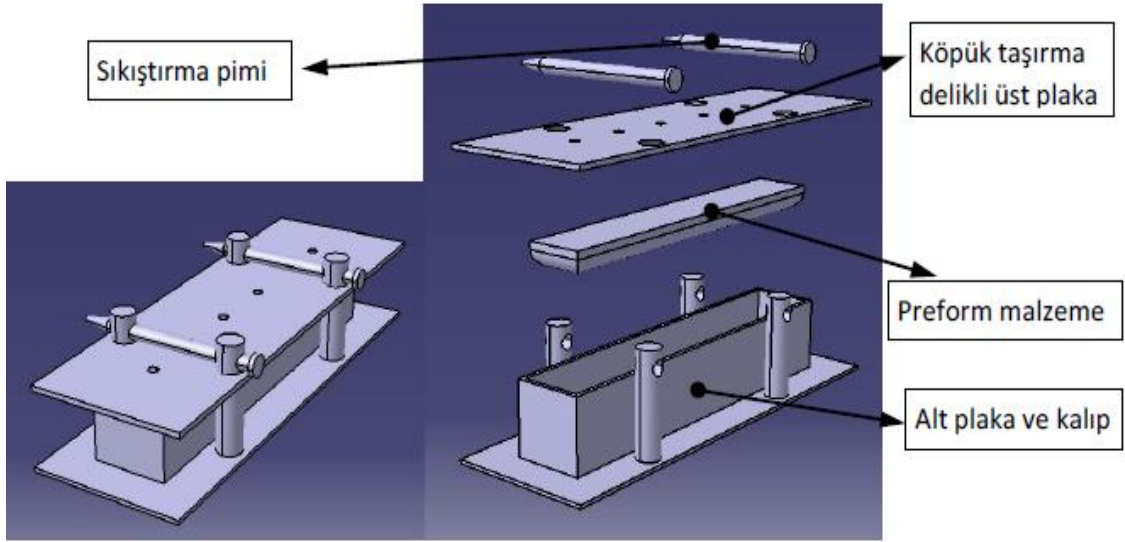
5.1.1. Toz Karışımının Hazırlanması İşlemi

Toz metalurjisi üretim yöntemine literatür kısmında ayrıntılı bilgiler verilmiş olup, ilk aşamada köpürtülecek maddenin tozları ile köpürtücü madde tozları karıştırılmalıdır. Tozların özellikleri aşağıda verilmiştir. 150 μm ortalama tane boyutundaki Al2024, Al5083 ve Al6061 tozları ile köpürtücü madde tozu olarak Aldrich'ten temin edilen - 325 mesh ortalama tane boyutlu TiH_2 tozları kullanılmış ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 150 μm 'lik Al 5083 ve Al 6061 Tozları

Tozları preslemek için tasarladığımız kalıbın hacmine uygun miktarda toz koymak için her bir tozun ağırlığı hesaplanarak toz karışımları hazırlanmıştır. Kullanılan kalıbın boyutları 60x60x10mm'dir. Kalıba ait örnek Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.2. Sıkıştırma kalıbı



Şekil 5.3. 60x60x10 mm'lik kapalı sıkıştırma kalıbı.

Ağırlık hesapları elektronik hassas terazide yapılmıştır. Bu hesaplamalar Çizelge 5.1’de Al2024 için, Çizelge 5.2’de Al5083 için, Çizelge 5.3’te Al6061 için aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Çizelge 5.1. Al2024’e ait hacim ve yoğunluk tablosu.

Al 2024	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)
1.numune	6,88	2,73
2.numune	7,44	2,76
3.numune	6,88	2,73

1.numune: $d_{Al2024} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,73 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 98,28 \text{ gr}$

2.numune: $d_{Al2024} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,76 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 99,36 \text{ gr}$

3.numune: $d_{Al2024} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,73 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 98,28 \text{ gr}$

Çizelge 5.2. Al5083’e ait hacim ve yoğunluk tablosu.

Al 5083	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)
1.numune	7,87	2,65
2.numune	8,52	2,64
3.numune	8,07	2,63

1.numune: $d_{Al5083} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,65 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 95,4 \text{ gr}$

2.numune: $d_{Al5083} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,64 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 95,04 \text{ gr}$

3.numune: $d_{Al5083} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,63 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 94,68 \text{ gr}$

Çizelge 5.3. Al6061’e ait hacim ve yoğunluk tablosu.

Al 6061	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (gr/cm ³)
1.numune	8,68	2,71
2.numune	8	2,62
3.numune	8,02	2,65

1.numune: $d_{Al6061} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,71 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 97,56 \text{ gr}$

2.numune: $d_{Al6061} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,62 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 94,32 \text{ gr}$

3.numune: $d_{Al6061} \times 60 \times 60 \times 10 \text{ mm} = 2,65 \text{ gr/cm}^3 \times 36 \text{ cm}^3 = 95,4 \text{ gr}$

Köpürtücü madde olarak toz karışımlarında kullanılan TiH₂, alüminyum köpükler ideal olarak kullanılması gereken miktar %0,6-1 arasındadır. Bu çalışmada %1 TiH₂ kullanılmıştır.

Ağırlıkları yukarıdaki gibi ölçülen tozların turbula ile homojen bir karışım elde edilmesi için 45 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karıştırıcı olarak kullanılan turbula Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Turbula.

5.1.2. Presleme ve Sinterleme İşlemleri

Karışımı hazır hale getirilen toz numuneler (Al 2024- Al 5083- Al 6061), hava ortamında tek eksenli çalışma mekanizmasına sahip hidrolik preste yaklaşık 10 ton basınç altında preslenerek yarı mamül hali aldırılmıştır. Presleme işleminin ardından yarı mamül hale getirilen tozların, sonradan yapılacak işlemlerde dağılmaması toz halindeki parçacıkların birbirine bağlı olarak dayanıklı ve mukavemetli bir yapının oluşması ardından köpürtme aşamasında oluşan yapının gözeneklerinden köpürtücü gazların çıkmaması amacıyla sinterleme işlemi uygulanmıştır. Hava ortamında gerçekleşen sinterleme işleminde elde edilen yarı mamüller 45 dakika süresince ısıtılarak 500 °C sıcaklığa ulaşmıştır. 500 °C’ye ulaşan yarı mamüller 35 dakika boyunca 100 Ton basınç altında sinterlenmiş ve soğutulmaya bırakılmıştır. Presleme ve sinterleme işlemlerine ait görseller Şekil 5.5’te verilmiştir.



Şekil 5.5. Presleme ve sinterleme işlemleri sonucu oluşan ürün.

5.1.3. Kesme İşlemleri

Ebatları 60x60x10 mm köpürtme işlemine hazırlanmış mamüller her bir alüminyum alaşımından dörder adet malzeme abrasif aşındırma cihazında kesildi. Bu malzemeler kapalı kalıpta ve farklı sıcaklıklarda köpürtmede kullanılmak üzere hazırlandı. Ardından birer adet 30x30x10 mm boyutlarındaki malzemeler ise serbest köpürtme işlemi için hazırlandı.

5.1.4. Serbest Köpürtme İşlemleri

Köpürtme işlemi için hazırlanmış olan numuneler önceden ısıtılarak 698 °C'ye getirilen fırında serbest halde köpürtmeye bırakılmıştır. Köpürtülecek numunelerin üç farklı sıcaklığa (700 °C–725 °C–750 °C) ulaşması ve bu sıcaklarda yoğunluk ve hacimlerinin değişimleri gözlenmektedir. Numunelerin fırına yerleşmesi ve alınması

arasında geçen süreler 5, 10 ve 15 dakika olarak üç parametre kullanılmış olup, $\Delta T=50$ °C sıcaklık değişimi gözlenmiştir.

5.1.4.1 Alüminyum Alaşımların Serbest Köpürtme İşlemleri

Al 2024 alaşımı için serbest köpürtme işlemi;

725 °C lik sıcaklığa sahip fırına alaşım numunelerinin konarak 5-10-15 dakikada içerisindeki serbest köpürmesi gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçlarımıza göre fırına malzememizi ilk koyduğumuzda fırının sıcaklığı 698 °C'ye düştü ve 1 dakika sonra fırının sıcaklığı tekrar 725 °C'ye yükseldi. İlk numune 700°C sıcaklıkta 5 dakika, ikinci numune 700 °C sıcaklıkta 10 dakika, üçüncü numune 700 °C sıcaklıkta 15 dakika bekledikten sonra sırasıyla aynı işlemler 725 °C ve 750 °C için uygulanmış olup malzemenin köpürmesi sonucu ve hızlı bir şekilde fırından çıkartılmıştır.

Al5083 alaşımı için serbest köpürtme işlemi;

725 °C sıcaklığa sahip fırına alaşım numunelerinin konması sonucu 5-10-15 dakika içerisindeki serbest köpürmeleri gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçlarına göre fırına malzemenin ilk koyulduğunda fırının sıcaklığı 672 °C'ye düşürülmüş ve 2 dakika sonra fırının sıcaklığı 700 °C'ye yükseltilmiştir. İlk numune 700 °C sıcaklıkta 5 dakika, ikinci numune 700 °C sıcaklıkta 10 dakika, üçüncü numune 700 °C sıcaklıkta 15 dakika bekledikten sonra sırasıyla aynı işlemler 725 °C ve 750 °C için uygulanmış olup malzemenin köpürmesi sonucu ve hızlı bir şekilde fırından çıkartılmıştır.

Al6061 alaşımı için köpürtme işlemi;

725 °C sıcaklığa sahip fırına alaşım numunelerinin konması sonucu 5-10-15 dakika içerisindeki serbest köpürmeleri gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçlarına göre fırına malzemenin ilk konulduğu anda fırının sıcaklığı 691 °C'dir ve 1 dakika sonra fırının sıcaklığı tekrar 700 °C'ye yükseltilmiştir. Diğer alüminyum alaşımlara uygulandığı gibi bu çalışmada da ilk numune 700 °C sıcaklıkta 5 dakika, ikinci numune 700 °C

sıcaklıkta 10 dakika, üçüncü numune 700 °C sıcaklıkta 15 dakika bekledikten sonra sırasıyla aynı işlemler 725 °C ve 750 °C için uygulanmış olup malzemenin köpürmesi sonucu ve hızlı bir şekilde fırından çıkartılmıştır. Şekil 5.6'da farklı sıcaklık ve sürelerde serbest köpürmede alüminyum köpüklerin görselleri verilmiştir.



Şekil 5.6. Farklı sıcaklık ve sürelerde serbest köpürtülmüş alüminyum köpükler.

Şekil 5.7'de 700 °C'de sırasıyla 5, 10 ve 15 dakika süre ile serbest köpürtülen Al2024, Al5083, Al6061 alaşım köpüklere ait görseller verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.7. 700 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).

Şekil 5.8'de 725 °C'de sırasıyla 5, 10 ve 15 dakika süre ile serbest köpürtülen Al2024, Al5083, Al6061 alaşım köpüklere ait görseller verilmiştir.



(a)



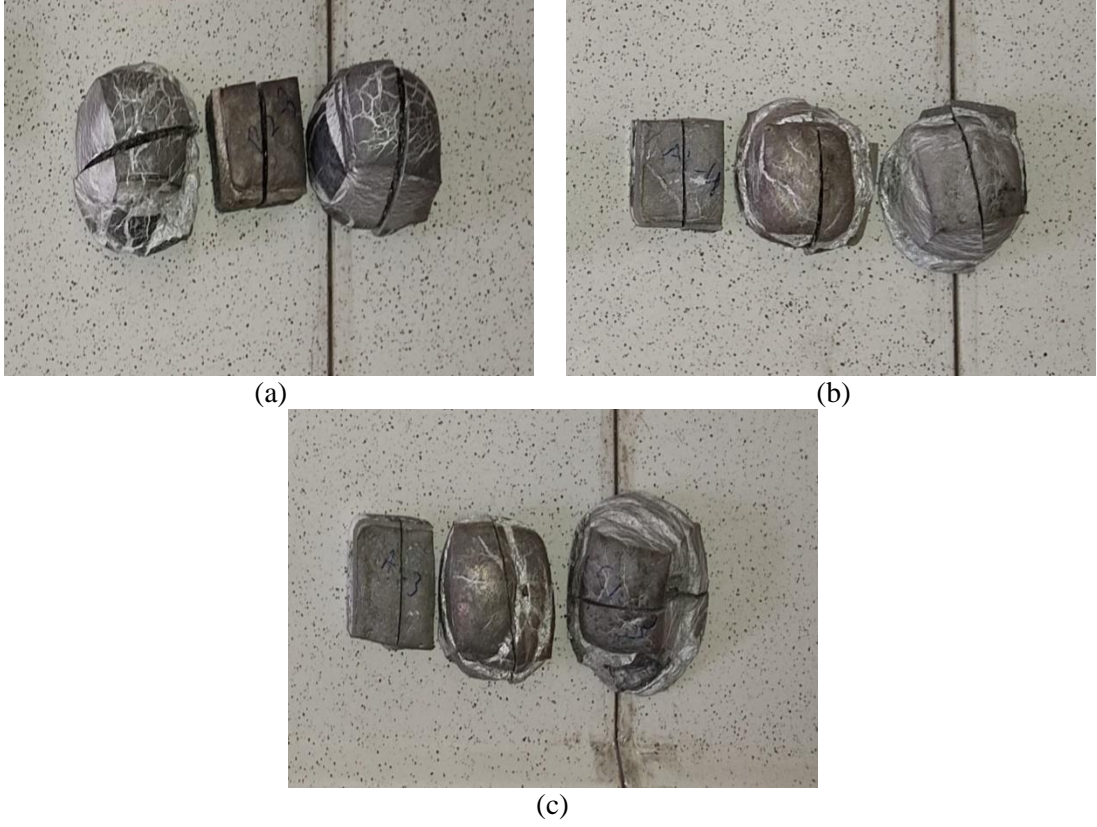
(b)



(c)

Şekil 5.8. 725 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).

Şekil 5.9'da 750 °C'de sırasıyla 5, 10 ve 15 dakika süre ile serbest köpürtülen Al2024, Al5083, Al6061 alaşım köpüklere ait görseller verilmiştir.



Şekil 5.9. 750 °C 'de (a) 5 dakika, (b) 10 dakika ve (c) 15 dakika süre ile köpürtülen alüminyum köpükler (Al2024-Al5083-Al6061).

Köpürtme işlemi neticesinde köpürme oranlarına göre alüminyum alaşımları içerisinde Al 2024 alaşımının en az köpüren olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi içinde yer alan Cu alaşım elementidir. Cu alaşım elementinin sahip olduğu yoğunluk $8,96 \text{ g/cm}^3$ olduğundan köpürme işlemi sırasında sıvılaştıran alüminyum alaşımı hidrojen gazlarının basıncıyla genişleme yaşamış ancak Cu elementinin sahip olduğu ağırlıktan dolayı kısa bir süre içinde köpüren alüminyum alaşımının çökmesine ve içinde bulunan gazların serbest kalıp yapıdan ayrılmasına sebep olduğu belirlenmiştir.

Üç farklı alaşımın farklı sıcaklıklarda 1.numuneleri üzerine yapılan köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk-hacim değerleri Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. 700 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Yoğunluk (gr/cm ³)	Köpürtme Sonrası Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	2,72	1,98	2,76
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	2,63	1,56	2,71
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	2,69	1,23	2,75

Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere 700 °C'de köpürtülen alaşımların tamamında köpürme sonrası sahip olunan yoğunluklar tüm bileşimlerde düşmüş, yoğunluğu %54,2 ile en çok azalan Al6061 Alaşımından meydana gelen bileşim olmakla beraber Al5083 %40,7 ve Al2024 %27,2 azalarak takip etmiştir.

Çizelge 5.5. 700 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Hacim (cm ³)	Köpürtme Sonrası Hacim (cm ³)	Hacimsel Genleşme Artış Oranı (%)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	6,77	9,32	37,66
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	8,47	14,24	68,12
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	8,71	19,2	120,43

Çizelge 5.6. 725 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Yoğunluk (gr/cm ³)	Köpürtme Sonrası Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	2,75	0,76	2,76
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	2,65	1,01	2,71
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	2,70	1,07	2,75

Çizelge 5.6'da görüldüğü üzere 725 °C'de köpürtülen alaşımların tamamında köpürme sonrası sahip olunan yoğunluklar tüm bileşimlerde düşmüş, yoğunluğu %72,4 ile Al2024 alaşımından meydana gelen bileşim olmakla beraber Al5083 %61,8 ve %60,3 ile Al6061 takip etmiştir.

Çizelge 5.7. 725 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Hacim (cm ³)	Köpürtme Sonrası Hacim (cm ³)	Hacimsel Genleşme Artış Oranı (%)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	7,37	26,74	262,8
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	8,17	21,4	161,93
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	8,02	20,35	153,74

Çizelge 5.8. 750 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası yoğunluk değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Yoğunluk (gr/cm ³)	Köpürtme Sonrası Yoğunluk (gr/cm ³)	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	2,73	1,82	2,76
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	2,62	2,04	2,71
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	2,70	2,09	2,75

Çizelge 5.8'de görüldüğü üzere 750 °C'de köpürtülen alaşımların tamamında köpürme sonrası sahip olunan yoğunluklar tüm bileşimlerde düşmüş, yoğunluğu %33,3 ile en çok düşen Al2024 Alaşımından meydana gelen bileşen olmakla beraber, %22,6 düşen Al6061 bileşeni ve sonrasında %22,1 düşen Al5083 bileşeninde yoğunluk azalmıştır.

Çizelge 5.9. 750 °C'de alüminyum bileşimlerin köpürme öncesi ve sonrası hacimsel değişimleri.

Bileşim	Köpürtme Öncesi Hacim (cm ³)	Köpürtme Sonrası Hacim (cm ³)	Hacimsel Genleşme Artış Oranı (%)
%99 Al2024 + %1 TiH ₂	7,81	11,7	49,8
%99 Al5083 + %1 TiH ₂	8,65	11,11	28,4
%99 Al6061 + %1 TiH ₂	8,11	10,56	30,2

5.1.5. Kapalı Kalıpta Köpürtme İşlemleri

Alüminyum alaşımlar kapalı kalıpta köpürtme işlemleri Şekil 5.10'da gösterilen 30x30x20 mm boyutundaki kalıplara konuldu ve hazırlanan kapalı köpürtme kalıbına

yerleştirildi. Yapılan bu deneyde üç farklı alaşımdan üçer köpük üretildi ve malzeme köpürtüldü.



Şekil 5.10. Al 6061 alaşımının kapalı kalıpta 750 °C (solda) ve 725 °C de (sağda) köpürmeleri

Al2024 alaşımı için köpürtme işlemi;

725 °C lik sıcaklığa sahip fırına alaşımların konarak köpürmesi gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçlarımıza göre kapalı kalıpta bulunan alaşımların fırına ilk konulduğu anda fırının sıcaklığı 695 °C'ye düştü ve 1 dakika sonra fırın sıcaklığı 700 °C'ye yükseldi. 700 °C de 5 dakika boyunca bekletilen alaşım, i kinci alaşımın konulması sonucu alınmış olup 700 °C sıcaklıkta 10 dakika bekletilen alaşım, fırın sıcaklığı 725 °C 'ye çıkması ile alınmış ve ardından üçüncü alaşım malzemesi konulmuştur. 725 °C'de 15 dakika bekledikten sonra köpüren alaşım 750 °C 'ye ulaşan sıcaklığın ardından hızlı bir şekilde fırından alınmıştır.

Al5083 alaşımı için köpürtme işlemi;

Al 2024 alaşımında uygulanan tüm prosesler aynı şekilde Al 5083 serisi içinde uygulanmıştır. Kapalı kapt köpürtme işlemlerine 725 °C lik sıcaklığa sahip fırına alaşımların konarak köpürmesi gözlemlenmiştir. Gözlem sonuçlarımıza göre kapalı kalıpta bulunan alaşımların fırına ilk konulduğu anda fırının sıcaklığı 695 °C'ye

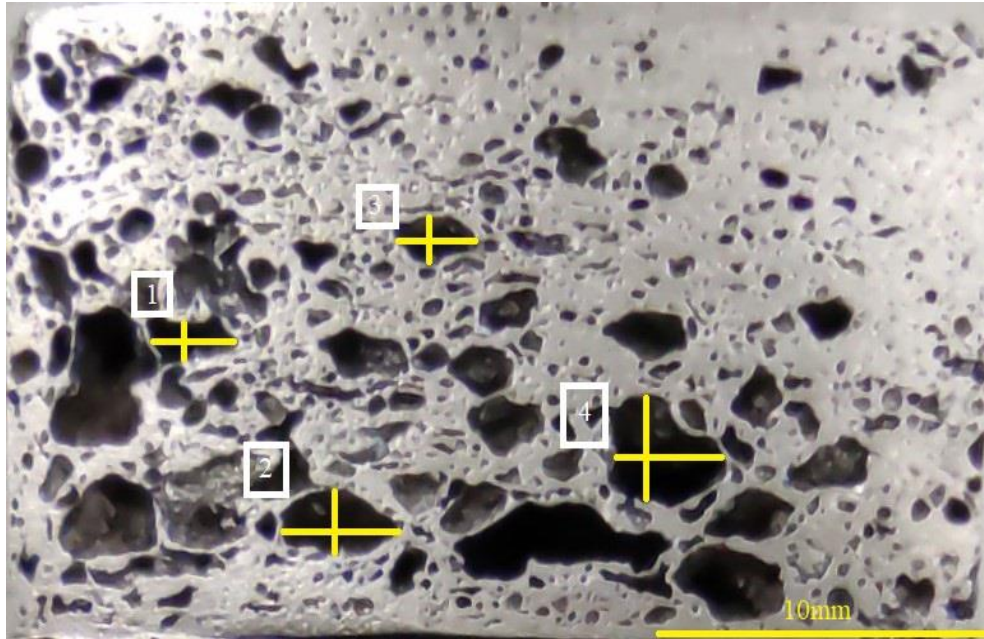
düştü ve 1 dakika sonra fırın sıcaklığı 700 °C'ye yükseldi. 700 °C de 5 dakika boyunca bekletilen alaşım, ikinci alaşımın konulması sonucu alınmış olup 700 °C sıcaklıkta 10 dakika bekletilen alaşım, fırın sıcaklığı 725 °C 'ye çıkması ile alınmış ve ardından üçüncü alaşım malzemesi konulmuştur. 725 °C'de 15 dakika bekledikten sonra köpüren alaşım 750 °C 'ye ulaşan sıcaklığın ardından hızlı bir şekilde fırından alınmıştır.

Al6061 alaşımı için köpürtme işlemi:

Diğer iki alaşımda yapılan uygulamaların tıpkısı Al 6061 alaşımı içinde uygulanmış olup kapalı kaptaki köpürtme işlemi sonucu fırından alınan metalik köpüklerin şekilleri aşağıdaki gibi gösterilmiş, gözenek boyutları incelenmiş ve köpürme miktarlarının farkları kıyaslanmıştır.

5.1.5.1. Kapalı Kalıpta Köpürtülen Alaşımların Gözenek Yapısının İncelenmesi

Şekil 5.11'de Al2024 alaşımının gözenek boyutları verilmiş ve dört nokta üzerinden hesaplama yapılmıştır.



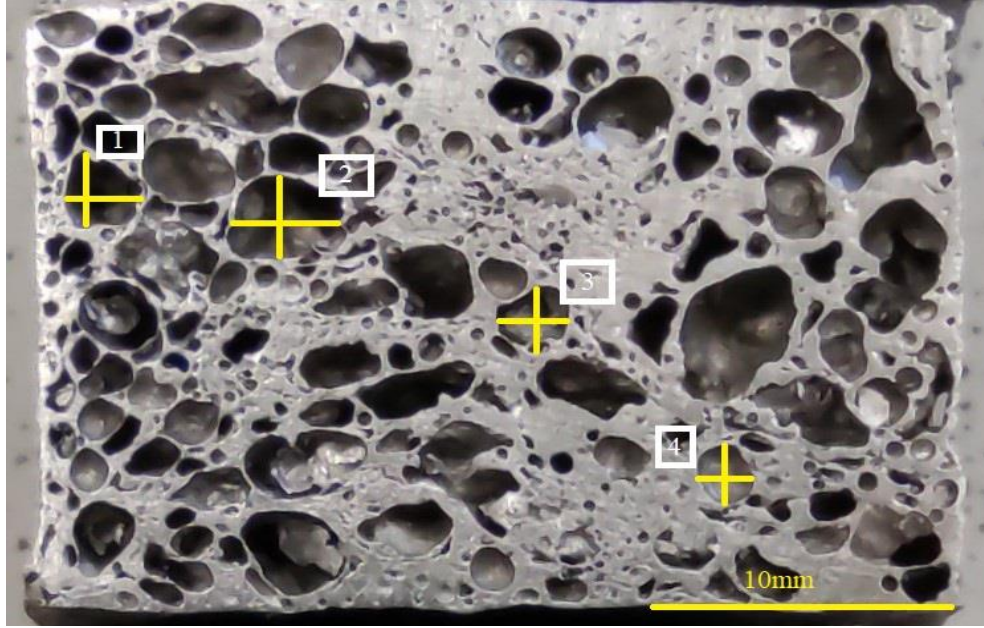
Şekil 5.11. Al2024 alaşımının gözenek boyutları.

Çizelge 5.10. Al2024 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması.

Al 2024	X	Y	Küreselleşme Oranı (Y/X)	Gözenek Boyutu (X+Y) /2
1. Gözenek	5,27 mm	1,63 mm	0,309	3,45
2. Gözenek	7,27 mm	3,63 mm	0,499	5,45
3. Gözenek	5 mm	2mm	0,4	3,5
4. Gözenek	6,72 mm	6 mm	0,892	6,36

Al2024 alaşımının sahip olduğu ortalama küreselleşme oranı 0,525 ve rastgele seçilen dört adet gözenegin ortalama gözenek boyutları 4,69 dur.

Şekil 5.12’de Al5083 alaşımının gözenek boyutları verilmiş ve dört nokta üzerinden hesaplama yapılmıştır.



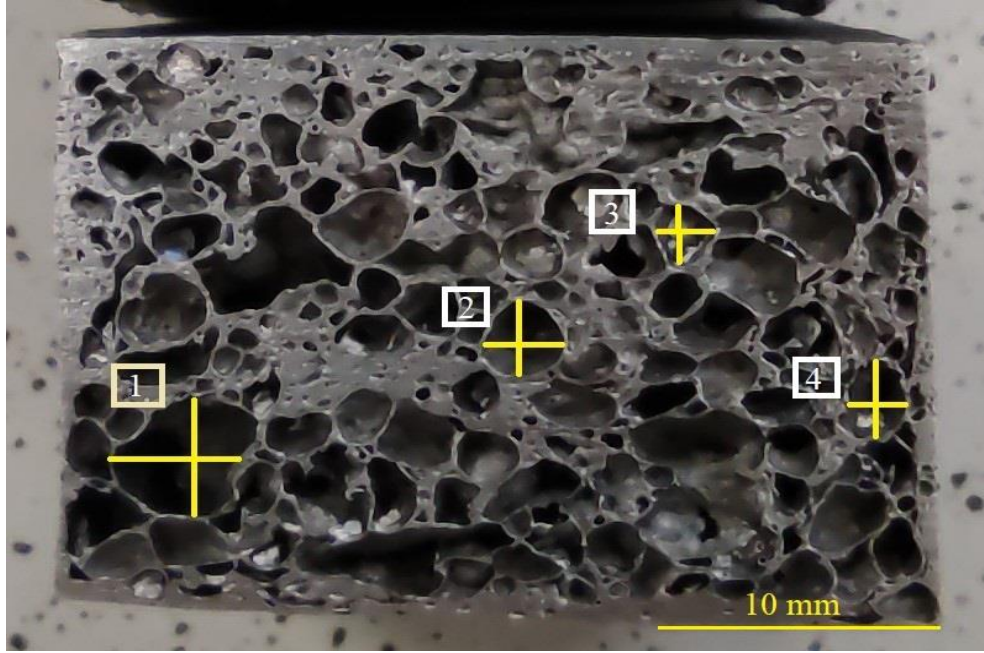
Şekil 5.12. Al5083 alaşımının gözenek boyutları.

Çizelge 5.11. Al5083 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması.

Al 5083	X	Y	Küreselleşme Oranı (Y/X)	Gözenek Boyutu (X+Y) /2
1. Gözenek	5mm	5,2 mm	1,04	5,1
2. Gözenek	7,2 mm	5,8 mm	0,8	6,5
3. Gözenek	4,8 mm	4,6 mm	0,95	4,7
4. Gözenek	3,8 mm	4,6 mm	1,21	4,2

Al5083 alaşımının sahip olduğu ortalama küreselleşme oranı 1 ve rastgele seçilen dört adet gözeneğin ortalama gözenek boyutları 5,125 dir.

şekil 5.13'te Al6061 alaşımının gözenek boyutları verilmiş ve dört nokta üzerinden hesaplama yapılmıştır.



şekil 5.13. Al6061 alaşımının gözenek boyutları.

Çizelge 5.12. Al5083 alaşımının küreselleşme ve gözenek boyutu hesaplanması.

Al 6061	X	Y	Küreselleşme Oranı (Y/X)	Gözenek Boyutu (X+Y) /2
5. Gözenek	4,6 mm	4,4 mm	0,95	4,5
6. Gözenek	3 mm	3 mm	1	3
7. Gözenek	2 mm	3,2 mm	1,6	2,6
8. Gözenek	1,66 mm	2 mm	1,20	1,83

Al6061 alaşımının sahip olduğu ortalama küreselleşme oranı 1,1875 ve rastgele seçilen dört adet gözeneğin ortalama gözenek boyutları 2,98 dur.

Kapalı kalıpta 750 °C de ve 10 dakikada köpürtülen Alüminyum Alaşımların gözenek yapıları ve boyutları incelendiğinde küreselleşme oranı en düşük çıkan Al alaşımının Al2024 olduğu, en yüksek olanının ise Al5083 Alaşımına ait olduğu

gözlemlenmiştir. Gözenek yapıları ve homojenlik açısından en ideal olan alaşımın ise köpürme şekli ve eş dağılım açısından Al6061 olduğu söylenebilir.

Ek olarak yapılan bir diğer çalışmada her bir Al alaşımdan dörder numune çıkmış ve birer numunenin diğer numunelere göre köpürme öncesi ve köpürme sonrası kalınlık (mm) değişimi-lineer uzaması da tespit edilmiştir. 750 °C’de eş sıcaklıkta meydana gelen Al alaşımların kalınlık değerleri;

Çizelge 5.13. 750 °C’de numunelerin köpürme öncesi ve sonrası kalınlık değişimi-lineer uzama miktarları.

Köpürme Sonrası	Köpürme Öncesi	
Al2024 14,1mm	9,42mm	A 3-1
	9,26mm	A 3-2
	9,53mm	A 3-3
Al5083 15,51mm	10,22mm	B 3-1
	10,24mm	B 3-2
	10,22mm	B 3-3
Al6061 14,32mm	10,16mm	C 3-1
	10,02mm	C 3-2
	10,24mm	C 3-3

A 3-1: Al2024 Alaşımının 3.parçanın 1.numunesi

A 3-2: Al2024 Alaşımının 3.parçanın 2.numunesi

A 3-3: Al2024 Alaşımının 3.parçanın 3.numunesi

B 3-1: Al5083 Alaşımının 3.parçanın 1.numunesi

B 3-2: Al5083 Alaşımının 3.parçanın 2.numunesi

B 3-3: Al5083 Alaşımının 3.parçanın 3.numunesi

C 3-1: Al6061 Alaşımının 3.parçanın 1.numunesi

C 3-2: Al6061 Alaşımının 3.parçanın 2.numunesi

C 3-3: Al6061 Alaşımının 3.parçanın 3.numunesi

5.2. BASMA DENEYLERİ

Dikdörtgen şekle sahip numunelerin basma deneyleri, maksimum 50 kN yük kapasitesi bulunan bilgisayar kontrollü 220 V / 50 Hz AC güçlü Instron 3369 marka universal çekme-basma test cihazında yapılmıştır. Numunelerin tamamı %70-80 deformasyon miktarına erişinceye kadar, 1mm/saniye deformasyon hızı ile deforme edilmişlerdir.

İnstron çekme-basma cihazı zemin modelleri genellikle güçlü metal ve alaşımlar, gelişmiş kompozitler, hava-uzay ve otomotiv yapıları, cıvatalar, bağlantı elemanları ve çelik plakaların testlerinde kullanmak amacıyla tasarlanmıştır.

- ✓ Malzemelerin sünekliği,
- ✓ Malzemelerin mukavemeti
- ✓ Malzemelerin rijitliği gibi özellikleri belirlenebilir.

Şekil 5.14'te Instron 3369 marka basma-çekme test cihazına ait görsel verilirken, Şekil 5.15'te Al5083, Al2024, Al 6061 sırasıyla numunelere ait basma deneyleri verilmiştir.



Şekil 5.14. Instron 3369 marka basma-çekme test cihazı.



Şekil 5.15. Numunelerin basma deney görselleri (Al5083- Al2024- Al 6061).

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE BULGULAR

6.1. BASMA DENEY SONUÇLARI

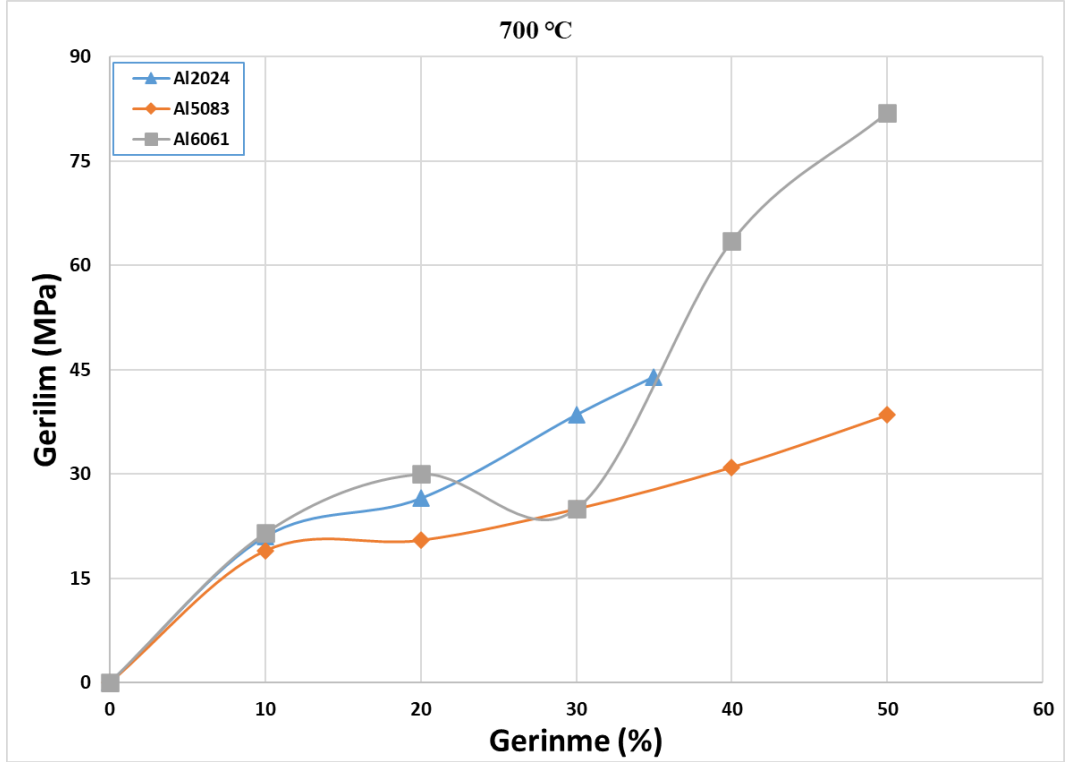
Elde edilen numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi maksadı ile basma testleri uygulanmıştır. Farklı sıcaklıklarda elde edilen basma numunelerinin hazırlanması ve basma test uygulamaları ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Farklı yoğunluklara sahip eş boyutlarda kare kesitli dikdörtgen şekilli numuneler basma testlerinde kullanılması için abrasif aşındırıcı makinasında kesilmişlerdir. Kesilen bu numuneler hazırlanan kapalı kalıp hücrelerine koyularak fırında köpürtme işlemine tabi tutulmuştur.

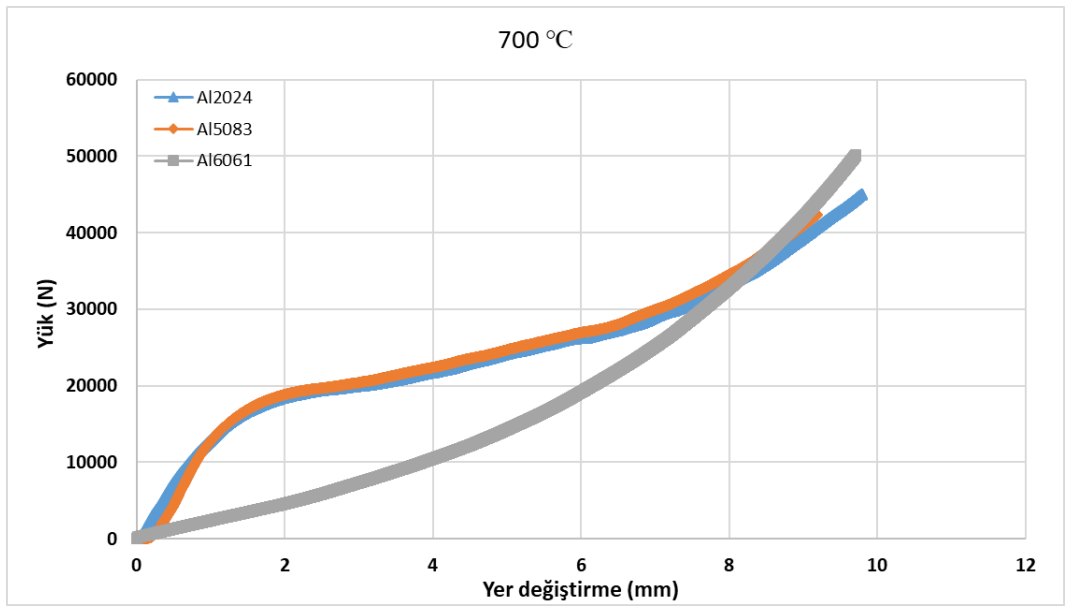
6.1.1. 700 °C’de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları

Çizelge 6. 1. 700 °C’de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.

700 °C	Al2024	Al5083	Al6061
Maksimum yük altında basınç gerilimi (N)	28532,37	42261,57	52501,32
Maksimum sıkıştırma gerilimi (MPa)	43,511	65,285	83,754
Maksimum sıkıştırma gerginliği (%)	33,13082	48,449	46,887
Maksimum geriliminde uzama miktarı (mm)	7,123	10,489	9,330
Kopma yük miktarı (N)	28532,37	42261,57	52501,32
Genişlik (mm)	30,50	29,9	31,5
Et kalınlığı (mm)	21,50	21,65	19,90
Kopmada yaşanan uzama miktarı (mm)	7,123	10,489	9,330
Kopmada basınç gerilimi (MPa)	43,511	65,285	83,754
Kırılmada basınç gerinimi (mm/mm)	0,33131	0,4844	0,4688
Kırılma enerjisi (J)	114,978	232,873	221,645
Maksimum basınçta yer değiştirme miktarı (mm)	15,924	10,48	16,018
Maksimum basınçta basınç yükü gerilimi (N)	28532,37	42261,57	52501,302
Mil yüksekliği (mm)	21,50	21,65	19,90
Alan (mm ²)	655,75	647,335	626,85
Geometri	Dikdörtgen	Dikdörtgen	Dikdörtgen



Şekil 6.1. 700 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği.



Şekil 6.2. 700 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.

Al 2024 grafiği için %13,5’te malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğunu göstermektedir. Alınan bu noktada malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardında da gözenekler çökmeye başlar. Akma

noktasında meydana gelen gerilim düşüşünün sebebi Al2024 alaşımının içinde yüksek miktarda bakır içermesidir. Bu sebeple gözenekler bakırın etkisiyle daha serttir ve sünekliği oldukça düşüktür.

Maksimum sıkıştırma gerginliğinin artması ile maksimum sıkıştırma geriliminin de arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yükte 28,53 kN basınç gerilimi altında 43,511 MPa maksimum sıkıştırma gerilimi meydana gelmiştir ve malzemede 7,123 mm uzama miktarı meydana gelmiştir. Kırılmanın yaşandığı anda basınç gerinimi 0,33133 mm/mm ve açığa çıkan enerji 114,978 J'dür.

Al5083 grafiği için %17 gerinme değeri malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğu belirlenmiştir. Bu akma noktasında malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardından da gözenekler çökmeye başlar. %35 sıkıştırma gerginliğinden sonra malzemedeki gerilimin sürekli ve keskin bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Maksimum yükte 42,261 kN basınç gerilimi altında 65,285 MPa maksimum sıkıştırma gerilimi meydana gelmiştir ve malzemede 10,489 mm uzama miktarı meydana gelmiştir. Kırılmanın yaşandığı anda basınç gerinimi 0,4844 mm/mm ve açığa çıkan enerji 232,873 J'dür.

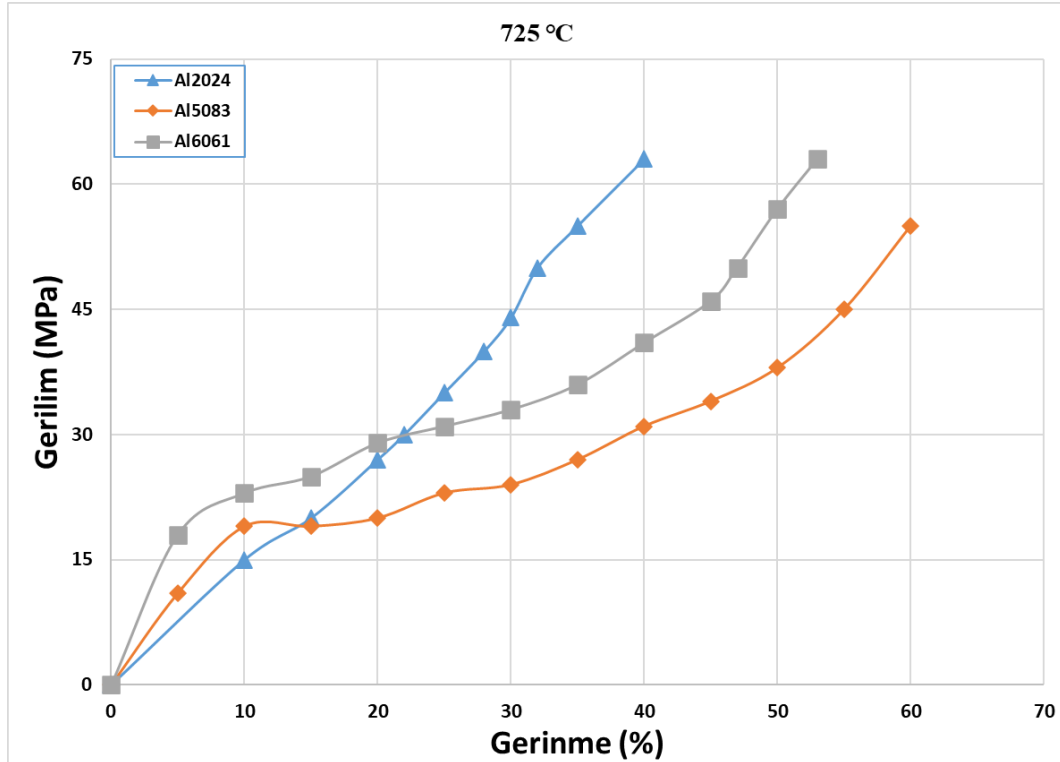
Al6061 grafiği için %9 gerinme değeri malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğu belirlenmiştir. Bu akma noktasında malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardından da gözenekler çökmeye başlar. %20 sıkıştırma gerginliğinden sonra malzemedeki gerilimin sürekli ve parabolik bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Maksimum yükte 52,501 kN basınç gerilimi altında 83,754 MPa maksimum sıkıştırma gerilimi meydana gelmiştir ve malzemede 9,330 mm uzama miktarı meydana gelmiştir. Kırılmanın yaşandığı anda basınç gerinimi 0,4688 mm/mm ve açığa çıkan enerji 221,645 J'dür.

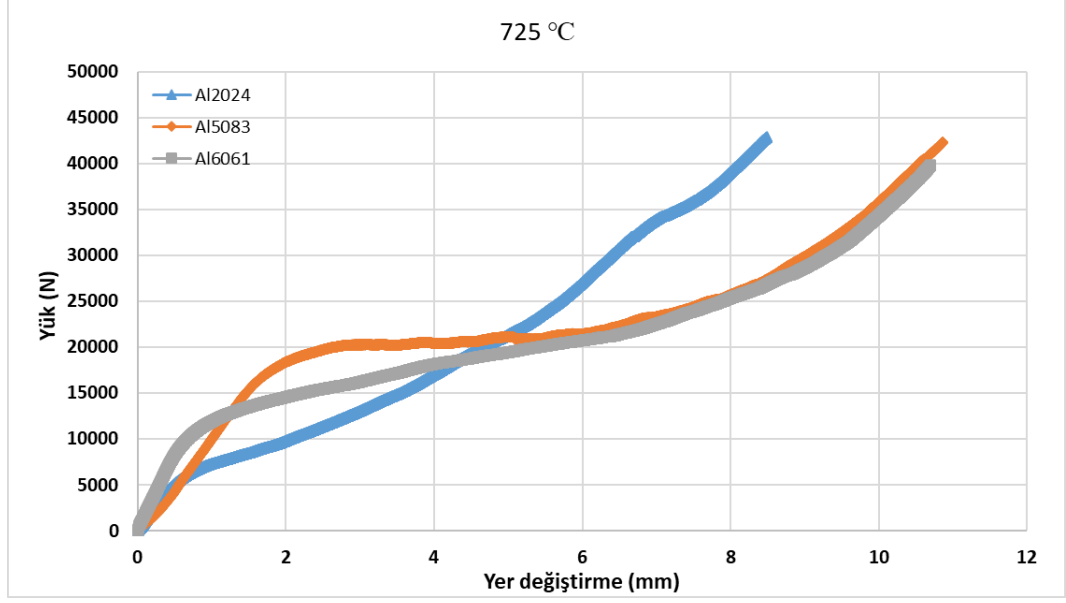
6.1.2. 725 °C’de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları

Çizelge 6.2. 725 °C’de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.

725 °C	Al2024	Al5083	Al6061
Maksimum yük altında basınç gerilimi (N)	42916,905	35158,431	39829,221
Maksimum sıkıştırma gerilimi (MPa)	64,391	55,941	63,617
Maksimum sıkıştırma gerginliği (%)	39,49	59,462	52,517
Maksimum geriliminde uzama miktarı (mm)	8,491	12,754	10,704
Kopma yük miktarı (N)	42916,905	35158,431	39829,221
Genişlik (mm)	31	29,3	30,75
Et kalınlığı (mm)	21,5	21,45	20,36
Kopmada yaşanan uzama miktarı (mm)	8,491	12,745	10,704
Kopmada basınç gerilimi (MPa)	64,391	55,941	63,617
Kırılmada basınç gerinimi (mm/mm)	0,39495	0,594	0,525
Kırılma enerjisi (J)	169,556	214,101	221,711
Maksimum basınçta yer değiştirme miktarı (mm)	8,491	16,103	16,120
Maksimum basınçta basınç yükü gerilimi (N)	42916,905	35158,426	39829,221
Mil yüksekliği (mm)	21,5	21,45	20,36
Alan (mm ²)	666,50	628,485	626,070
Geometri	Dikdörtgen	Dikdörtgen	Dikdörtgen



Şekil 6.3. 725 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği.



şekil 6.4. 725 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.

Al2024 grafiği için sıkıştırma gerginliğinin artması ile sıkıştırma geriliminin de hemen hemen doğrusal arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yükte 42,916 kN basınç gerilimi altında 64,391 MPa maksimum sıkıştırma gerilimi meydana gelmiştir ve malzemede 8,491 mm uzama miktarı meydana gelmiştir. Kırılmanın yaşandığı anda basınç gerinimi 0,394 mm/mm ve açığa çıkan enerji 169,556 J’dür.

Al5083 grafiğinde net olarak görünen %17 gerinme değerini geçtikten hemen sonra malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğu belirlenmiştir. Bu akma noktasında malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardından da gözenekler çökmeye başlar. %32 sıkıştırma gerginliğinden sonra malzemedeki gerilimin sürekli ve keskin bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Al5083 basma sonuçları ele alındığında maksimum yükte 35,158 kN basınç gerilimi altından 55,941 MPa sıkıştırma gerilimi oluşmuş ve malzeme de 12,754 mm uzama meydana gelmiştir. Kırılma yaşandığı anda basınç gerinimi 0,594 mm/mm olarak ölçülmüş olup açığa çıkan enerji 214,101 J’dür.

Al6061 grafiği ele alındığında %20 gerinme değeri geçildikten sonra malzemenin elastikiyeti sonlanmış plastik bölgeye geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Akma

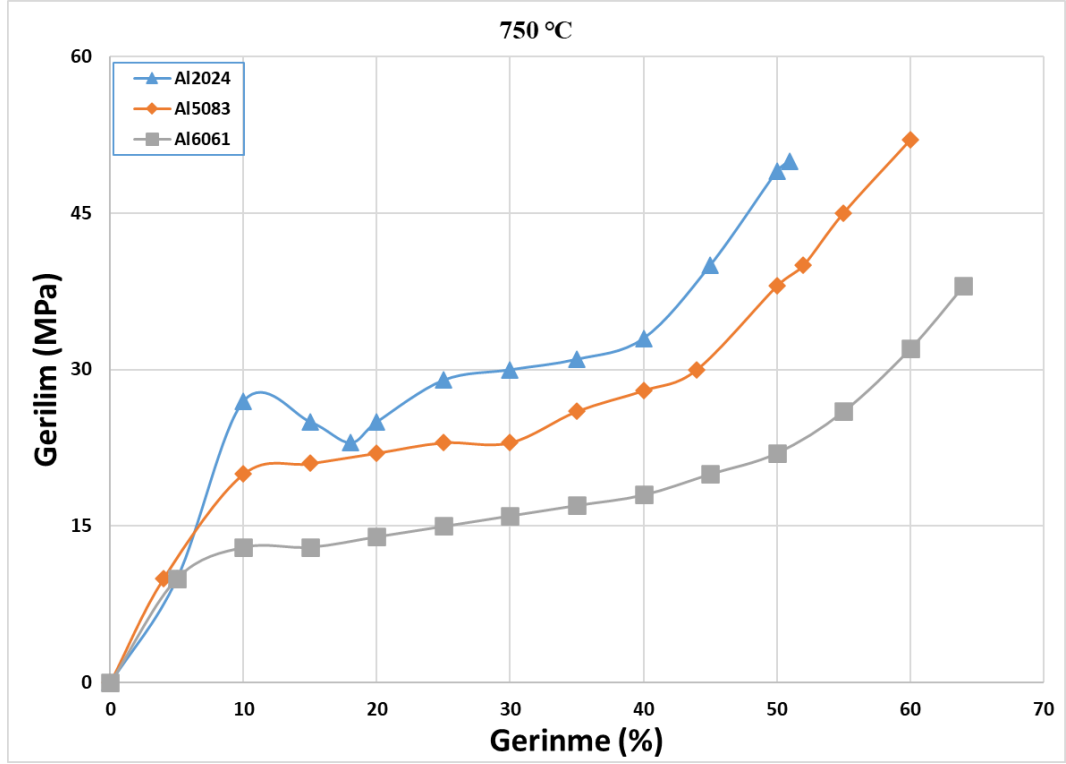
noktasının olduğu yerden itibaren gözenekli yapı deforme olmaya ardından da çökmeye başlar. %26'lık gerginliğin ardından ise gerilim sürekli ve parabolik olarak artış göstermiştir.

Al6061 alaşımının sahip olduğu verilerde maksimum yükte 39,828 kN basınç gerilimi, 63,617 MPa maksimum basma gerilimi uygulanmış 10,704 mm uzama meydana gelmiştir. Kırılma yaşandığı anda basınç gerinimi 0,525 mm/mm olarak hesaplanmış ve açığa çıkan enerji 221,711 J'dür.

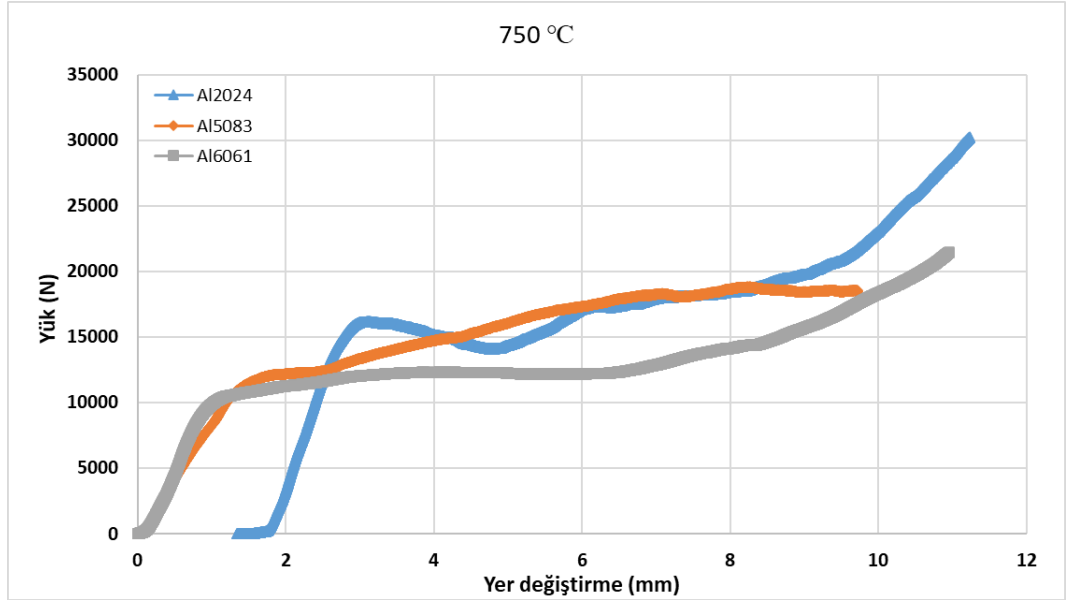
6.1.3. 750 °C'de elde edilen numunelere ait grafik ve deney sonuçları

Çizelge 6.3. 750°C'de elde edilen numunelerin basma deney sonuçları.

750 °C	Al2024	Al5083	Al6061
Maksimum yük altında basınç gerilimi (N)	30234,372	31820,988	23228,134
Maksimum sıkıştırma gerilimi (MPa)	50,705	52,683	37,887
Maksimum sıkıştırma gerginliği (%)	50,578	60,065	62,974
Maksimum geriliminde uzama miktarı (mm)	9,888	12,013	12,374
Kopma yük miktarı (N)	30234,372	31820,988	23228,34
Genişlik (mm)	30,50	30,20	31,20
Et kalınlığı (mm)	19,55	20,00	19,65
Kopmada yaşanan uzama miktarı (mm)	11,230	12,013	12,374
Kopmada basınç gerilimi (MPa)	50,705	52,683	37,887
Kırılmada basınç gerinimi (mm/mm)	0,505	0,600	0,629
Kırılma enerjisi (J)	165,905	192,156	134,108
Maksimum basınçta yer değiştirme miktarı (mm)	15,988	16,094	16,078
Maksimum basınçta basınç yükü gerilimi (N)	30234,373	31820,988	23228,123
Mil yüksekliği (mm)	19,55	20,00	19,65
Alan (mm ²)	596,275	604,000	613,080
Geometri	Dikdörtgen	Dikdörtgen	Dikdörtgen



Şekil 6.5. 750 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının gerilim-gerinim grafiği.



Şekil 6.6. 750 °C’de Al2024, Al5083, Al6061 alaşımlarının yük-yer değiştirme grafiği.

Al 2024 grafiği için %17’de malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğunu gözlenmektedir. Alınan bu noktada malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardında da gözenekler çökmeye başlar.

Al2024 grafiği için sıkıştırma gerginliğinin artması ile sıkıştırma geriliminin de hemen hemen doğrusal arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yükte 30,234 kN basınç gerilimi altında 50,705 MPa maksimum sıkıştırma gerilimi meydana gelmiştir ve malzemede 9,888 mm uzama miktarı meydana gelmiştir. Kopma anındaki uzama miktarı ise 11,230 mm'dir. Kırılmanın yaşandığı anda basınç gerinimi 0,505 mm/mm ve açığa çıkan enerji 165,905 J'dür.

Al5083 grafiğinde net olarak görünen %18 gerinme değerini geçtikten hemen sonra malzemenin elastik bölgesinin sonlandığını plastik bölgeye geçişin olduğu belirlenmiştir. Bu akma noktasında malzemedeki gözenekler plastik deforme olmaya ardından da gözenekler çökmeye başlar. %33 sıkıştırma gerginliğinden sonra malzemedeki gerilimin sürekli ve keskin bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

Al5083 basma sonuçları ele alındığında maksimum yükte 31,820 N basınç gerilimi altından 52,683 MPa sıkıştırma gerilimi oluşmuş ve malzeme de 12,013 mm uzama meydana gelmiştir. Maksimum basınç altında yaşanan uzama miktarı ise 16,094 mm olarak ölçülmüş, kırılma yaşandığı anda basınç gerinimi 0,594 mm/mm ve açığa çıkan enerji 214,101 J'dür.

Al6061 grafiği ele alındığında %11 gerinme değeri geçildikten sonra malzemenin elastikiyeti sonlanmış plastik bölgeye geçiş yaptığı gözlemlenmiştir. Akma noktasının olduğu yerden itibaren gözenekli yapı deforme olmaya ardından da çökmeye başlar. %25 lik gerginliğin ardından ise gerilim sürekli ve parabolik olarak artış göstermiştir.

Al6061 alaşımının sahip olduğu verilerde maksimum yükte 23,228 kN basınç gerilimi, 37,887 MPa maksimum basma gerilimi uygulanmış 10,704 mm uzama meydana gelmiştir. Maksimum basınçta yer değiştirme miktarı 16,078 mm olarak ölçülmüş, kırılma yaşandığı anda basınç gerinimi 0,629 mm/mm olarak hesaplanmış ve açığa çıkan enerji ise 134,108 J'dür.

Uygulanan basma deney sonucunda alüminyum köpüklerin fiziksel durumu;



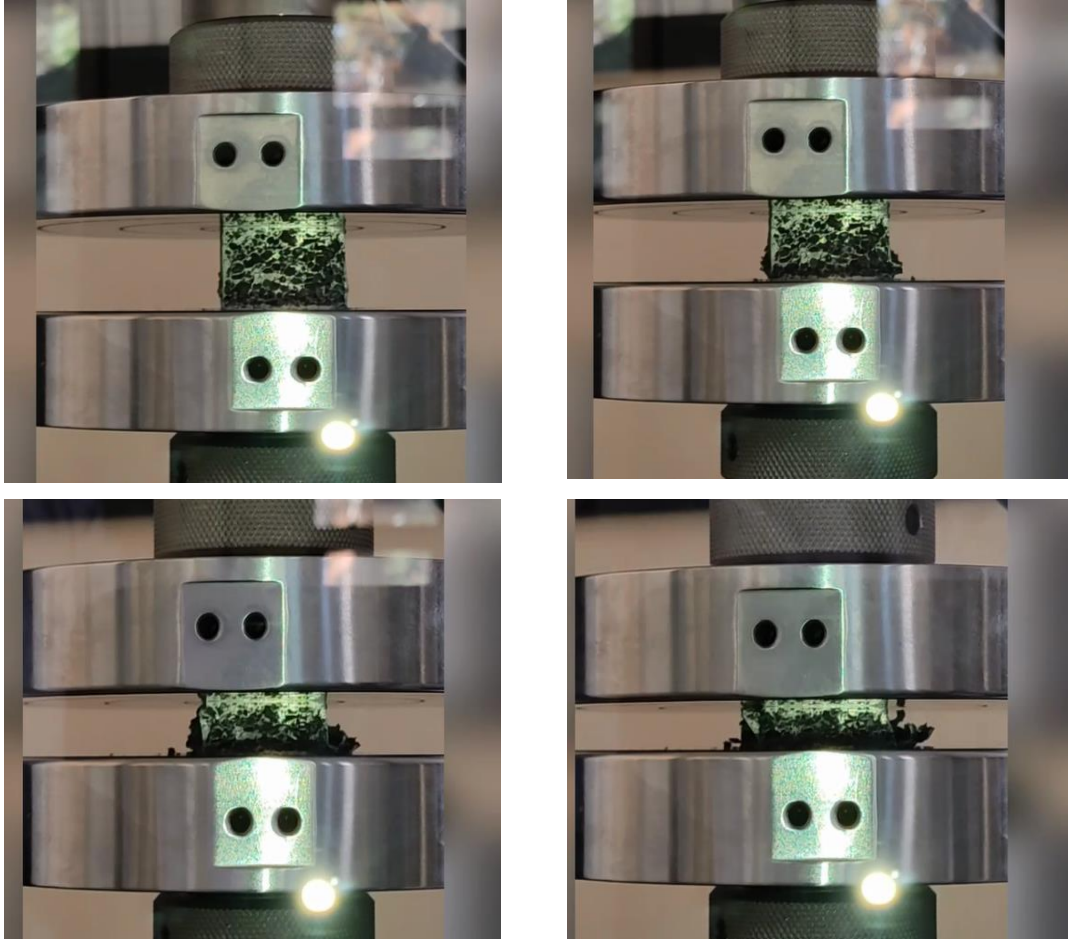
Şekil 6.7. Al5083 alaşımının 3. numunesinin 725 °C’de maksimum sıkıştırma gerilimi 55,941 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu.



Şekil 6.8. Al6061 alaşımının 3. numunesinin 750°C’de maksimum sıkıştırma gerilimi 37,887 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu.



Şekil 6.9. Al2024 alaşımının 3. numunesinin 750 °C de maksimum sıkıştırma gerilimi 50,705 MPa olarak uygulanan basma sonucu fiziksel durumu.

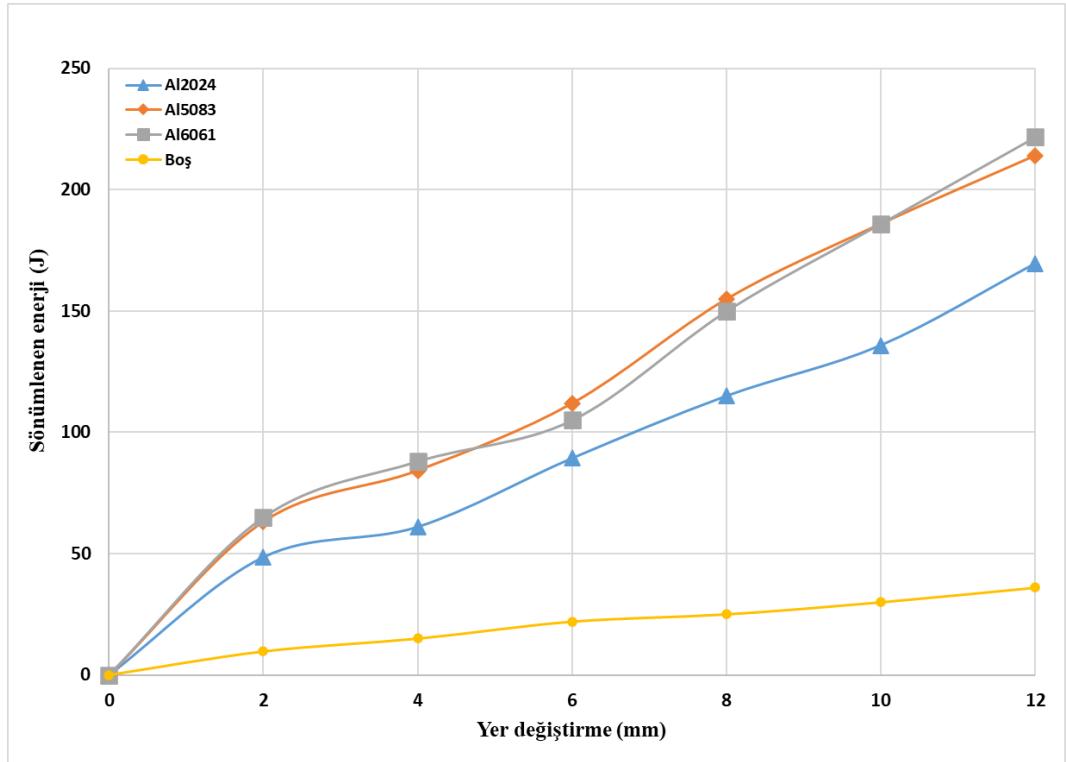


Şekil 6.10. Al6061 alaşımının basma deneyi uygulaması esnasında sırasıyla 1-2-3-4 durumlarında uğradığı deformasyonlar.

Alüminyum köpükler ile kıyaslanması amacıyla boş çarpışma kutularına basma testi uygulanmıştır. Numunelerin tamamına %70-80 deformasyon miktarına erişinceye kadar 1mm/saniye deformasyon hızı ile basma testi uygulanmıştır.

6.2. BOŞ ÇARPIŞMA KUTUSU ile ALÜMİNYUM KÖPÜK TAKVİYELİ ÇARPIŞMA KUTULARININ KIYASLANMASI

Farklı sıcaklıklarda, farklı alaşımlardaki alüminyum köpüklerin basma testi sonuçları incelendiğinde genel olarak tüm alüminyum köpük türleri için 725 °C'deki sonuçların sönmülenen enerji açısından daha iyi olduğu görülmektedir. Buna istinaden, 725 °C'deki sonuçlar referans olarak seçilmiş ve boş çarpışma kutusu ile kıyaslanmıştır. Şekil 6.11'de yer değiştirmeye bağlı olarak sönmülenen enerjideki değişimler alüminyum köpükler ve boş çarpışma kutusu için gösterilmiştir. Al5083 ve Al6061 neredeyse yakın değerlerde enerji sönmüleme yeteneğine sahipken, Al2024 daha düşük seviyelerde kalmıştır. Boş çarpışma kutusunun sönmüleyebildiği enerji miktarı ise Al5083 ve Al6061'e göre neredeyse 4-5 kat daha azdır. Bu sonuçlara göre, alüminyum köpük takviyesi ile iyileşme sağlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 6.11. Yer değiştirmeye bağlı olarak sönmülenen enerjideki değişimler.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç farklı alüminyum alaşım kullanılarak alüminyum malzemeler üretilmiş ve üretilen bu köpüklere daha sonra basma testi uygulanarak enerji sönümlene karakteristikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Alüminyum köpük için en uygun alüminyum alaşım türü ve köpürtme özellikleri belirlenmeye çalışılmış ve son olarak boş çarpışma kutusu ile enerji sönümlene kabiliyetleri kıyaslanmıştır. Yapılan tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Köpürtülecek numunelerin üç farklı sıcaklığa (700 °C – 725 °C – 750 °C) ulaşması sağlanarak, bu sıcaklarda yoğunluk ve hacimlerinin değişimleri gözlemlenmiştir. Bu gözlemler için üç farklı süre (5, 10 ve 15 dk) seçilerek etkileri tespit edilmiştir. Genel olarak en fazla yoğunluk düşüşü 725 °C’de elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta en yüksek yoğunluk azalması %72,4 ile Al2024 alaşımında gözlemlenirken, sırasıyla Al5083 ve Al6061 alaşımında %61,8 ve %60,3 azalma tespit edilmiştir.
- Sönümlenen enerji bakımından en yüksek değerler 725 °C’de elde edilmiştir. En yüksek sönümlenen enerji değeri 221,711 J ile Al6061 alaşımında elde edilmiştir. Al2024 ve Al5083 alaşımında ise bu değer sırasıyla 169,556 J ve 214,101 olarak ortaya çıkmıştır.
- Boş çarpışma kutusu ile yapılan kıyaslamaya göre enerji sönümlene miktarının alüminyum köpükler ile yaklaşık 4-5 kat arttığı gözlemlenmiştir.

7.2. ÖNERİLER

- Çalışmamızda seçmiş olduğumuz boş çarpışma kutusu şeklini dikdörtgen olarak belirleyip içini alüminyum köpük ile doldurduk. Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda farklı kesit alanları ve şekle sahip çarpışma kutuları tercih edilebilir. Altıgen, dairesel, kare vb. gibi farklı şekillerde seçilip içi boş ve içi dolu olarak dayanım hesaplanabilir.
- Ansys analizi yapılarak optimum seviye belirlenebilir.
- Bu çalışmada Al2024, Al5083 ve Al6061 alaşımları kullanılmıştır. Farklı Alüminyum alaşımları ile kıyaslama yapıp çalışmalar genişletilebilir. Alüminyum dışında farklı bir elementte tercih edilebilir.
- Köpürtme parametreleri olarak serbest ve kalıpta köpürtme dışında cam kalıpta köpürtme işlemleri uygulanarak köpürtme parametleri farkının etkileri ortaya konulabilir.
- Bu çalışmada köpürtücü ajan olarak TiH_2 kullanılmıştır. Köpürtücü madde olarak başka bir madde tercih edilip çalışma genişletilebilir.
- Kullanılan alaşımlarda Al5083 alaşımı yerine Al7075 alaşımı aynı sıcaklık ve sürelerde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Ahmad, Z., Thambiratnam, D.P. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. *Computers and Structures*, 1(87), 187-197. (2008).

Aktay, L., Çakıroğlu, C., and Güden, M. Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes. *The Open Materials Science Journal*, 5, 184-193 (2011).

Aktay, L., Toksoy, A.K., and Güden, M. Quasi-static axial crushing of extruded polystyrene foam-filled thin-walled aluminum tubes: Experimental and numerical analysis. *Materials & Design*, 27(7), 556-65. (2006).

Altın, M. Çarpışma Kutularının Üzerine Açılan Oyukların Çarpışma Performansı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 0900(1), 135–139. (2018).

Altın, M., Halis, S., Yücesu, H. S. Investigation of the Effect of Corrugated Structure on Crashing Performance in Thin-Walled Circular Tubes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1(2), 1–7. (2017).

Altın, M., Kılınçkaya, Ü., Acar, E., Güler, M.A., Investigation of combined effects of cross section, taper angle and cell structure on crashworthiness of multi-cell thin-walled tubes. *Int. J. Crashworthiness*, 24(2), 121–36. (2019).

Altın, M., Yücesu, H. S. Farklı Geometrik Yapılardaki Çarpışma Kutularının İçerisine Yerleştirilen Alüminyum Köpük Malzemenin Enerji Sönümlenme Kapasitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 0900(1), 141–148. (2019).

Andrews, E., Sanders, W. and Gibson, L.J., Compressive and tensile behaviour of aluminum foams, *Material Science and Engineering*, A270, 113-124. (1999).

Avarisli, O. ve Uğuz, A., Metalik köpük malzemelerin otomotiv endüstrisinde kullanılması, *VIII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu*, Bursa, 8 s. (2003).

Bahceci, E. ‘‘Kapalı Hücreli Metalik Köpüklerde Hücre Morfolojisinin Mekanik Özelliklere Etkisi ve Fotoelastisite Yönteminin Kullanılabilirliği’’, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2012).

Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 562-622. (2000).

Bor, Ş., Tahran, E., Esen, Z. ve Kotan, G., Toz metalurjisi yöntemiyle köpüksü saf titanyum ve Ti6Al4V alaşım üretimi ve karakterizasyonu, **TÜBİTAK Projesi**, 104M121,134s. (2007).

Çakır, B. 2024, 5083, ve 6061 Al alaşımlarının köpürebilirlik özelliklerinin belirlenmesi, Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü**, (2020).

Cerit, M. E. Şehirler arası otobüslerde önden çarpışma enerjisini yutucu pasif güvenlik sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, **Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 7-19. (2011).

Çinici, H. Toz metalurjisi yöntemi ile alüminyum esaslı metalik köpük üretimi. Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri**, Ankara. (2004).

Çinici, H. Toz metalurjisi yöntemi ile al esaslı parçacık takviyeli sandviç metalik köpük üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri**, Ankara. (2012).

Demirci, E., Yıldız, A.R., Semerci, F. Taşıtlarda önden çarpışma performansını etkileyen enerji yutucularının optimum tasarımı. **7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi**, Bursa, Türkiye. (2014, 26-24 Mayıs).

Dumais, J. **Lectures on biomechanics, lecture 3: Cellular solid**. Cambridge: Harvard University. (2009).

Elbir, S., Yılmaz, S., ve Güden, M., “Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metallerin Üretim Metodları ve Mekanik Özellikleri”, **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi**, (120):35-42. (1999).

Elgalai, A.M., Mahdi, E., Hamouda, A.M.S., and Sahari, B.S. Crushing response of composite corrugated tubes to quasi-static axial loading. **Composite Structures**, 66(1), 666-671. (2004)

Güden, M. Kavi, H. Quasi-static axial compressive behavior of constraint hexagon and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tubes. **Thin-Walled Structures**, 44(7), 739-750. (2006).

Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., and Li, W. Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design. **International Journal of Impact Engineering**, 35(11), 1355-1367. (2008).

Işık, A. Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2008).

İnternet: Serdar Korkut Bir Makine Mühendisinin Günlüğü, ‘‘Alüminyum Alaşımaları’’<https://www.serdarkorkut.com/2017/05/08/aluminyum-alasimlari> (2019).

Kavi, H., Toksoy, A.K., and Guden, M. Predicting energy absorption in a foamfilled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strength coefficient. *Materials & Design*, 27(4), 263-9. (2006).

Kim, S.B., Huh, H., Lee, G.h., Lee, M.Y., Yoo, J.S., Design of the crash section shape of an aluminum crash box for crashworthiness enhancement of a car. *International Journal of Modern Physics B*, 22(31), 5578-5583. (2008).

Langseth, M., Hopperstad, O.S. Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions. *International Journal of Impact Engineering*, 18(7-8),949-968. (1996).

Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., and Oh, J.E Effect of triggering on the energy absorption capacity of axially compressed aluminum tubes. *Materials and Design*, 20(1), 31-40. (1999).

Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Kostazos, P. K., and Hassiotis, G. Finite element simulation of the axial collapse of thin-wall square frusta *International Journal of Crashworthiness*, 6(2), 155-164. (2001).

Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Spentzas, K.N., Ioannidis, M.B., Koutroubakis, S., Kostazos, P.K., The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. *Int. J. Crashworthiness*, 14(5), 489–501. (2009).

Özdemir, S. Sonlu elemanlar analizinde istatistiksel metotların kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir. (2010).

Özer, G. ‘‘Alüminyum Esaslı Köpük Metal Üretimi’’, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2005).

Öztürk, İ., Kaya, N. Otomobil ön tampon çarpışma analizi ve optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 13(1), 119-127. (2008).

Sertkaya, A.A. Alüminyum köpüğün ısı değiştiricisi olarak tasarımı ve ısı transferi modeli, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri*, Konya. (2008).

Sertkaya, A. A. ‘‘Metal Köpük Isı Değiştiriciler,’’ *Mühendis ve Makina*, cilt 54, sayı 646, s. 22-26. (2013).

Simancik, F., Kovacic, J. and Minarikova, N., Deformation and fracture mechanism of aluminium foams, PM World Congress, European *Powder Metallurgy Association*, 5, 245-251. (1998).

Şahin, O., “Döküm Yöntemi ile Alüminyum Metal Köpük Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük (2017).

Toksoy, A.K., Güden, M. Partial Al foam filling of commercial 1050H14 Al crash boxes: The effect of box column thickness and foam relative density on energy absorption. **Thin-Walled Structures**, 48(7), 482-94. (2010).

Toksoy, A.K. Optimization of the axial crushing behavior of closed-cell aluminum foam filled welded 1050 al square-cross section crash boxes, Yüksek Lisans Tezi, **İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Fen Bilimleri**, İzmir, 20-138. (2009).

Tunçer, N., Metalik köpük malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, **Anadolu Üniversitesi Seramik Mühendisliği**, 92 s. (2006).

Türker, M., “Toz Metalurjisi Yöntemi ile Alüminyum Köpük Üretimi”, **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük Üniversitesi, Karabük, 1-6. (2009).

Wu, J., Song, G., Yeh, C., Wyatt, K. Drop impact simulation and test validation of lecommunication products, **InterSociety Conference on Thermal Phenomena**, Washington, USA. (1998).

Wu, S., Zheng G., Sun G., Liu Q., Li G., and Li Q. On design of multi-cell thin wall structures for crashworthiness. **International Journal of Impact Engineering**, 1(88) 102-117. (2016).

Yang, C.C. and Nakae, H., Foam structure effect on the compression behavior of foamed aluminum alloy, **ISIJ International**, 40, 12, 1283-1286. (2000).

Yavuz, A. Boşluk tutucu tekniği ile alüminyum esaslı metal köpük üretimi, Yüksek Lisans Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri**, Afyon. (2011).

Yavuz, İ., Başpınar, S., M., Bayrakçeken, H., “Metalik Köpük Malzemelerin Taşıtlarda Kullanımı” **Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi** (3) 43-51. (2009).

Yavuz, İ., Başpınar, M.S., and Bayrakçeken, H.. Ergitme yöntemi ile üretilen alüminyum köpüklerde değişik oranlarda SiC ve Al₂O₃ ilavesinin köpürme üzerindeki etkisi. **6th International Advanced Technologies Symposium**, Elazığ, Türkiye. (2011, 16-18 Mayıs).

Yavuz, İ., “Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları”, **Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED)**, Cilt:2, No:1, 49-58. (2010).

Yavuz, İ. Taşıtlarda kullanılan metal köpüklerin yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi. Doktora Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri**, Afyon. (2012).

Yıldırım, Ş. Parçacık takviyeli alüminyum köpük metalin fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri*, Kütahya. (2010).

Yılmaz, S., Güden, M., ve Elbir, S., Kompozit alüminyum köpük malzemesinin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin karakterizasyonu, *TÜBİTAK Projesi*, Misag-135,51 s. (2001).

Yılmaz, Ç. “5083 Kalite Alüminyum Alaşımının Homojenize Edilerek Sertlik Değerlerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trakya (2011).

Yin, H., Fang, H., Xiao, Y., Wen, G., and Qing, Q. Multi-objective robust optimization of foam-filled tapered multi-cell thin-walled structures. *Structural An Multidisciplinary Optimization*, 52(6), 1051-1068. (2015).

Yin, H., Wen, G., Liu, Z., Qing, Q. Crashworthiness optimization design for foam filled multi-cell thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 75, 8-17. (2014).

Zaman, E. Açık hücreli alüminyum köpük üretimi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri*, İstanbul. (2011).

Zarei, H., Kröger, M. Optimum honeycomb filled crash absorber design. *Materials and Design*, 29(1), 193-204. (2006).

Zhang, X., Cheng, G. A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns. *International Journal of Impact Engineering*, 34(11), 1739-52. (2007).

Zhang, Y., Sun, G., Li, G., Luo, Z., and Li, Q. Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria. *Materials & Design*, 38, 99-109. (2012).

Zhang, Z., Liu, S., and Tang, Z. Comparisons of honeycomb sandwich and foamfilled cylindrical columns under axial crushing loads. *Thin-Walled Structures*, 49(9), 1071-9. (2011)

ÖZGEÇMİŞ

Batuhan KOCAOĞLU ilk ve orta öğretimini bir Jandarma babanın evladı olması sebebiyle sırasıyla Zonguldak, Tunceli, Çorum, Bilecik ve Kırıkkale gibi birçok şehirde tamamladı. Kırıkkale Lisesi Fen Bölümü'nden mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Mühendisliği A.B.D.'na başlayıp 2016 yılında Onur Öğrencisi olarak mezun oldu. Lisans Tezini 2016 yılında 'TÜBİTAK - BİDEB 2209-B (2241-A) Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı' kapsamında 'Rejeneratif Frenlemeli Elektrikli Go-Kart Aracı' olarak yapmış ve TÜBİTAK tarafından 'Tebrik' edilmiştir. 2018 yılından itibaren büyük bir onur, şeref ve aidiyet duyarak Türk Silahlı Kuvvetleri Hava Kuvvetleri Komutanlığı'nda Hava Savunma Üsteğmen görev yapmaktadır. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Yüksek Lisansı'na başlamış tüm akademik ve askeri çalışmalarını ülkemizin savunma sanayiisinin, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ve bağlı kuruluşlarının yararına yapmaya devam etmektedir.