PARAŞÜTLE ATILAN ASKERİ ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN DARBE SÖNÜMLEYECEK PALET SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Ozan YAVUZ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PARAŞÜTLE ATILAN ASKERİ ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN DARBE SÖNÜMLEYECEK PALET SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Ozan YAVUZ
0009-0001-2216-3789

Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PARAŞÜTLE ATILAN ASKERİ ZIRHLI ARAÇLAR İÇİN DARBE SÖNÜMLEYECEK PALET SİSTEMİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Ozan Yavuz

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Yapılan tez çalışmasında uçaktan atılan askeri ekipmanların ve araçların karaya paraşütle hasar almadan inebilmesi için yeni bir platform/palet sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan palet sisteminde enerji sönümleyici malzeme olarak 0,41 g/cm3 yoğunluğa sahip kapalı hücreli alüminyum köpükler kullanılmıştır. Alüminyum köpük yapının etkisinin anlaşılabilmesi ve karşılaştırılabilmesi için hem alüminyum köpük kullanılan hem de kullanılmayan palet sistemi, bilgisayar destekli sonlu elemanlar analiz programında simüle edilmiştir. Analizler 4,6 m/s çarpışma hızına ve 9 000 kg yük değerine göre yapılmıştır. Yapılan analizlerde çarpışma sırasındaki deformasyonlar, zamana bağlı kuvvet değişimleri ve enerji sönümleme kapasiteleri incelenmiştir. Analiz sonuçlarından köpük kullanılan palet sisteminde, çarpışma kuvveti, sıkışma miktarı ve toplam sönümlenen enerji miktarı açısından köpüğün çok büyük avantaj getirdiği ortaya konulmuştur. Alüminyum köpük kullanıldığında, toplam sönümlenen enerji yaklaşık 3,83 kat artmaktadır.

Ayrıca çalışmada literatürden bilgiler verilmiştir. Kullanılan palet sistemleri, aerodinamik kavramlar, paraşüt sistemleri ve hava araçları hakkında bilgiler derlenmiş ve aktarılmıştır. Ayrıca bazı kütle değerleri için çarpma hızı, çarpışma ivmesi, kuvveti ve g değerleri gibi birtakım hesaplamalar yapılmış ve sunulmuştur. Çarpışma süresi uzadıkça, çarpışma kuvveti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Havadan indirme, metal köpükler, darbe sönümleme, airdrop sistemi, askeri araçlar, darbe sönümleyecek palet sistemi
2024, xi + 81 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN AND ANALYSIS OF SHOCK ABSORBING PALLET SYSTEM FOR MILITARY ARMORED VEHICLES LAUNCHED BY PARACHUTE

Ozan YAVUZ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

In the thesis study, a new platform/pallet system was designed to allow military equipment and vehicles dropped from aircraft to land with parachute without being damaged. Closed-cell aluminum foams with a density of 0.41 g/cm3 were used as energy absorbing material in the designed pallet system. In order to understand and compare the effect of the aluminum foam structure, the pallet system, both with and without aluminum foam, was simulated in a computer-aided finite element analysis program. Analyzes were made based on a collision speed of 4.6 m/s and a load value of 9 000 kg. In the analyses, deformations during the collision, time-dependent force changes and energy absorbing capacities were examined. From the analysis results, it has been revealed that foam brings a great advantage in the pallet system where foam is used, in terms of collision force, compression amount and total absorbed energy. When aluminum foam is used, the total absorbed energy increases by approximately 3.83 times.

Additionally, information from the literature is given in the study. Information about the platform systems used, aerodynamic concepts, parachute systems and aircraft were compiled and conveyed. In addition, some calculations such as impact speed, collision acceleration, force and g values were made and presented for some mass values. It has been observed that as the collision duration increases, the collision force values decrease.

Key words: Airdrop, metal foams, impact damping, airdrop system, military vehicles, shock absorbing pallet system
2024, xi + 81 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Her daim her konuda öğrencilerine destek olan, onlara yol gösteren ve tez çalışmamda büyük katkısı olan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır'a (Bursa Uludağ Üniversitesi) teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca tez çalışmasında analiz konularında destek olan ve bilgilerini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Betül Gülçimen Çakan'a (Bursa Uludağ Üniversitesi) teşekkürlerimi sunarım.

Bugüne kadar her anımda yanımda destek olan ve çaba sarf eden sevgili aileme çok teşekkür ederim.

Ozan YAVUZ
05/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Havadan İndirme Sistemleri 3
2.1.1. Airdrop türleri ve özellikleri 3
2.1.2. Airdrop için kullanılan hava taşıtları ve platformlar 4
2.1.3. Hava indirme operasyonlarında atılan yüklere ait örnekler 6
2.1.4. Havadan indirmede kullanılan paraşütler 11
2.2. Askeri Stratejiler 14
2.2.1. Büyük taarruz 14
2.2.2. Girit muharebesi 18
2.3. Metal Köpükler 22
2.4. Metal Köpük Malzemeleri 24
2.5. Açık Hücreli Metal Köpükler 26
2.6. Açık Hücreli Metal Köpüklerin Üretimi 31
2.7. Kapalı Hücreli Metal Köpükler 36
2.8. Kapalı Hücreli Metal Köpüklerin Üretimi 37
2.8.1. Erimiş metale gaz enjeksiyonu 38
2.8.2. Erimiş metal içerisinde köpük oluşturan parçacıklar 39
2.8.3. Toz haldeki metale köpükleştirici ajan eklenmesi 40
2.9. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları 42
2.10. Metal Köpüklerin Havacılık ve Savunma Sanayisindeki Kullanım Alanları 51
2.11. Airdrop Düşme Testi Konusunda Yapılan Araştırmalar 53
3. MATERYAL ve YÖNTEM 56
3.1. Aerodinamik Temel Kavramlar 56
3.1.1. Havanın özellikleri 56
3.1.2. Atmosferde serbest düşen cisim 57
3.1.3. Sürüklenme katsayısı 58
3.1.4. Terminal hız 58
3.2. G-11 Kargo Paraşütlerinin Teknik Özellikleri 59
3.3. Askeri Zırhlı Araç Örnekleri ve Kütleleri 60
3.4. Havadan İndirme Çarpma Hızı Hesapları 61
3.5. G Değeri 64
3.6. Havadan İndirme Çarpma Kuvveti Hesapları 65
3.7. Sonlu Elemanlar Modeli ve Çarpma Analizleri 69
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 71
5. SONUÇ 75
KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
W	Ağırlık
A	Alan
a	Çarpışma İvmesi Veya İvme
t	Çarpışma Süresi
g	g Değeri Veya Yer Çekimi İvmesi
ρ	Havanın Yoğunluğu
V	Hız
V_1	İlk Hız
x	Kullanılan Paraşüt Sayısı
m	Kütle
V_2	Son Hız
Cd	Sürüklenme Katsayısı
D	Sürüklenme Kuvveti

Kısaltmalar	**Açıklama**
Atv	All Terrain Vehicle- (Atv Aracı)
AFS	Aluminium Foam Sandwich (Alüminyum Köpük Sandviç)
dB	Desibel
ft	Feet (Uzunluk Ölçüsü Birimi)
inç	Inch (Uzunluk Ölçü Birimi)
JPADS	Joint Precision Airdrop System
Kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
kN	Kilonewton
lb	Libre – Pound
Max	Maksimum
m	Metre
mm	Milimetre
Min	Minimum
NASA	National Aeronautics And Space Administration
ppi	Pores Per İnch (İnç Başına Düşen Gözenek)
s	Saniye
vd	Ve Diğerleri

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Askeri nakliye uçağından havadan indirme (Airdrop) ile ekipman ve malzemelerin atılması (“Airdrop”, 2024)	4
Şekil 2.2.	Havadan indirme sistemlerinde kullanılabilecek hava araçları. A) Boeing C-17 Globemaster III nakliye uçağı ("Boeing C-17 Globemaster III", 2024). B) Lockheed C-130 Hercules nakliye uçağı ("Lockheed C-130 Hercules", 2024)..	5
Şekil 2.3.	V tipi airdrop platformu (United States Air Force vd., 2016)	5
Şekil 2.4.	Ekipmanla donatılmış 463L askeri palet sistemi (Snead, 2005)	6
Şekil 2.5.	Havadan indirme (airdrop) ile atılacak bir yükün bal peteği yapılar ile paketlenmesi. A) Önden görünüşü B) Yandan görünüşü C) Paketlenmiş hali (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)	7
Şekil 2.6.	MV700 ATV arazi aracı (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)	7
Şekil 2.7.	MV700 ATV arazi aracının düşük hızla havadan indirme (airdrop) için hazırlanması (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)	8
Şekil 2.8.	M1025 Armament Carrier aracının havadan indirme için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)	9
Şekil 2.9.	M101A1 Howitzer topçusunun airdrop için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)	9
Şekil 2.10.	M1081 2-1/2-ton kargo kamyonunun ek yükle birlikte airdrop için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)	10
Şekil 2.11.	Zodiac Mark 3 deniz aracının düşük hızla havadan indirme operasyonu için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)	10
Şekil 2.12.	Havadan indirmede kullanılan platformlara ait genel özellikler (Zarek, 2021)	11
Şekil 2.13.	Paraşüt türlerine ait teknik detaylar (Zarek, 2021)	12
Şekil 2.14.	G11 kargo paraşütleri (AvıTec, 2022)	14
Şekil 2.15.	Başkomutan Mustafa Kemal Atatürk'ün bir merasim kabul anındaki görüntüleri (Anadolu Ajansı, 2018)	15
Şekil 2.16.	Süvari kolordusu ve Atatürk (Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu, t.y.)	17
Şekil 2.17.	Girit Muharebesi (Öztürk, 2019)	19
Şekil 2.18.	Alman paraşütçü birliklerinin Girit Adası'na inmesi ("Battle of Crete", 2024)	20
Şekil 2.19.	Maleme Havaalanı – 1941 (Öztürk, 2019)	21
Şekil 2.20.	Doğal hücresel yapılı malzemelere ait örnekler (Rajak & Gupta, 2020)	22
Şekil 2.21.	2019 yılına kadar olan metal köpüklerin farklı alanlardaki yaklaşık kullanım oranları (Rajak & Gupta, 2020)	23

Şekil 2.22. İdeal bir enerji emici malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Ashby vd., 2000) 24
Şekil 2.23. Farklı bekletme süreleri sonucunda köpürtülmüş cürufta ortaya çıkan gözeneklilik yapısı. A) 40s B) 100s C) 150s (Murakami vd., 2014) 26
Şekil 2.24. Açık hücreli metal köpük resimleri. A) Açık hücreli metal köpük B) 80 ppi'lik (inç başına düşen gözenek) bir metal köpüğün taramalı elektron mikroskobundan alınan resmi (Quadbeck vd., 2007) 27
Şekil 2.25. Aynı boyutlardaki farklı hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerin gerilme – gerinim eğrileri (Kaya, 2020) 28
Şekil 2.26. Aynı boyutlardaki farklı hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerin enerji sönümleme verimliliği – gerinim eğrileri (Kaya, 2020) 29
Şekil 2.27. Farklı hücre boyutlarına sahip açık hücreli metal köpüklerin ses emme katsayıları (Quadbeck vd., 2007) 30
Şekil 2.28. 80 ppi hücre boyutuna sahip çeşitli yoğunluklardaki açık hücreli metal köpük malzemelerin basma mukavemeti değerleri (Quadbeck vd., 2007) 30
Şekil 2.29. Replikasyon yöntemi ile açık hücreli metal köpük üretim aşamaları (Kaya, 2020) 31
Şekil 2.30. Dairon ve arkadaşlarının farklı üretim metotlarını kullanarak ürettikleri açık hücreli metal köpükler (Dairon vd., 2011) 32
Şekil 2.31. Öncüler kullanılarak döküm metodu ile açık hücreli metal köpük üretim aşamaları (Dairon vd., 2011) 33
Şekil 2.32. Açık hücreli metal köpük üzerine döküm yapılarak kaplama işlemi. A) Üretim süreci B) Örnek parça (Dairon vd., 2011) .. 33
Şekil 2.33. Aglomerasyon tekniği ile üretilen açık hücreli metal köpük. A) Üretim süreci B) Örnek parça (Dairon vd., 2011) 34
Şekil 2.34. Ara yapı tekniği ile üretilen açık hücreli metal köpük. A) Üretim süreci B) Örnek parça (Dairon vd., 2011) 35
Şekil 2.35. Düzenli açık hücreli metal köpük örnekleri. A) Öncü yapı B) Kelvin yapılı düzenli açık hücreli alüminyum köpük C) Düzenli açık hücreli köpük içeren dökme demir bir parça (Dairon vd., 2011) 36
Şekil 2.36. Kapalı hücreli metal köpük yapılara ait örnek bir resim (Rajak & Gupta, 2020) 36
Şekil 2.37. Metal köpük üretim yöntemleri ve bağıl yoğunluk, hücre boyutu özellikleri (Ashby vd., 2000) 37
Şekil 2.38. Gaz enjeksiyon yöntemiyle metal köpük üretimi (Ashby vd., 2000) 38
Şekil 2.39. Cymat Technologies firması tarafından üretilen alüminyum köpükler (Cymat Technologies, 2021) 39
Şekil 2.40. Erimiş metal içerisinde gaz salan parçacıkların kullanılması ile alüminyum köpük üretimi. A) Vizkozite modifikasyonu, B) Köpükleştirici ajan eklenmesi, C) Köpükleşme D) Soğutma süreci (Ashby vd., 2000) 40

Şekil 2.41. Katı haldeki metal alaşımına köpük oluşturacak parçacıkların eklenmesi ile metal köpük üretimi. A) Malzemelerin karıştırılması B) Ekstrüzyon C) Kalıp içerisine yerleştirme D) Köpükleşme (Ashby vd., 2000) 41
Şekil 2.42. Metal köpüklerin hücre yapılarına göre kullanım alanı örnekleri (Rajak & Gupta, 2020) 42
Şekil 2.43. Köpüklü motor taşıyıcı parçanın darbe almış hali (Simancik, 2001) 43
Şekil 2.44. Alporas köpük kullanılan vakumlu kaldırma aleti. A) Önden görünüşü B) Çaprazdan görünüşü (Lefebvre vd., 2008) 44
Şekil 2.45. Freze ve kesme makinelerinde kullanılan Alporas köpük çekirdekli kiriş (Lefebvre vd., 2008) 45
Şekil 2.46. Alporas metal köpüğünün model yarış arabasında çarpışma koruyucusu olarak kullanılması. A) Köpük konulan kısım B) Aracın komple hali (Lefebvre vd., 2008) 45
Şekil 2.47. İç kısmı Cymat alüminyum köpüğü ile dolu tüpün deforme olmuş hali (Banhart, 2005) 46
Şekil 2.48. Alman yüksek hızlı tren prototipinde alüminyum köpük sandviç yapının kullanımı. A) Dışarıdan görünüşü B) İçeriden görünüşü (García-Moreno, 2016) 47
Şekil 2.49. Cymat firması tarafından İspanya'nın Terrasa şehrinde bulunan bir Protestan kilisesinin dış cephesinin Alusion köpük ile kaplanması (García-Moreno, 2016) 48
Şekil 2.50. Dış cephenin AFS yapılar ile kaplanması. A) Uzaktan görünüşü B) Yakından görünüşü (García-Moreno, 2016) 48
Şekil 2.51. Alüminyum köpük sandviç yapı ile granit taş yapı bileşiminin kurşun önleme özelliği. A) Önden görünüşü B) Arkadan görünüşü (Banhart vd., 2019) 49
Şekil 2.52. Alüminyum köpük içeren hafif yapılı patlamaya dayanıklı kapı örneği (Yao vd., 2014) 50
Şekil 2.53. Alüminyum köpük malzemenin gürültü önlemek amacıyla otoyol ve tren yollarında kullanılması. A) Tren yolunda kullanımı B) Otoyolda kullanımı C) Otoyolda kullanımı uzaktan görünüşü (China BeiHai, 2023) 51
Şekil 2.54. Savaş uçağının uçak gemisine iniş anı ("CATOBAR", 2023) 52
Şekil 2.55. Hava yastıklı palet sistemi (Hou vd., 2019) 53
Şekil 2.56. Araç bilgisayarı ve güç kaynağının tabanı ve gövdesine gelen filtrelenmiş şok sinyalleri A) Araç bilgisayarı B) Güç kaynağı (Hou vd., 2019) 54
Şekil 2.57. Farklı konumlarda bulunan bal peteği yapılarına ait sönümleme analiz çalışmaları için 4 farklı tasarım. A) Birinci tasarım B) İkinci tasarım C) Üçüncü tasarım D) Dördüncü tasarım (Yue vd., 2012) 54
Şekil 2.58. 1. tasarıma ait model ve analiz sonuçları. A) Sonlu elemanlar modeli B) Sonlu elemanlar analizi C) Analiz sonuçları (Yue vd., 2012) 55
Şekil 3.1. Havanın özelliklerine ait standart değerler (Glenn Research

Center, 2023) 57
Şekil 3.2. Atmosferde düşen bir cisim üzerine gelen kuvvetler (Glenn Research Center, 2022) 57
Şekil 3.3. Askeri zırhlı araç görselleri. A) NMS 4x4 Hafif Zırhlı Araç (Nurol Makina, 2024), B) Gölge Süvari İnsansız Kara Aracı (FNSS, 2024b), C) Akıncı ZMA Personel Taşıyıcı (FNSS, 2024a), D) M1151 ("M1151", 2023), E) M1126 ICV ("M1126 Infantry Carrier Vehicle", 2024), F) M3 Bradley (Alex, 2021) 60
Şekil 3.4. Model roketlerin paraşütle yere inişi için kullanılan hesaplamalar (Benson, t.y.) 61
Şekil 3.5. İçi su dolu bardağın ivme durumlarına göre etki eden g değerleri. A) İvme değeri sıfır B) Yukarı yönde 9,81 m/s2 ivme değeri ile hareket hali C) Aşağı yönde 9,81 m/s2 ivme değeri ile hareket hali D) Aşağı yönde 19,62 m/s2 ivme değeri ile hareket hali 64
Şekil 3.6. G değerinin etkileri (Başkut, 2019) 65
Şekil 3.7. Tasarlanan palet sisteminin gösterimi A) Darbe sönümleyici palet sisteminin sonlu elemanlar modeli, B) İçerisinde alüminyum köpük bulunan bir tüpün modeli 70
Şekil 4.1. İçi alüminyum köpük dolu ve içi boş tüplerden oluşan paletlerin deformasyonları ve Von Mises gerilme dağılımı. A) İçi boş yapı B) İçi alüminyum köpük dolu yapı 71
Şekil 4.2. Alüminyum köpük kullanılan (mor eğri) ve kullanılmayan (sarı eğri) palet modellerinin toplam sıkışma miktarları 72
Şekil 4.3. Çarpışma kuvvetinin alüminyum köpük kullanılan (kırmızı eğri) ve kullanılmayan (yeşil eğri) palet modellerinde zamana göre değişimi 73
Şekil 4.4. Sönümlenen enerji değerlerinin karşılaştırılması – Alüminyum köpük kullanılan (kahverengi eğri) ve kullanılmayan palet (sarı eğri) 73
Şekil 4.5. Alüminyum köpük kullanılan paletin (kahverengi eğri) ve bileşenlerinin (yeşil eğri: köpükler, pembe eğri: kılıflar) sönümlediği enerjinin kıyaslanması 74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Hava indirme platformu yükleriyle kullanılan kargo paraşütleri için askıdaki genel ağırlık sınırlamaları (United States Air Force vd., 2016) 13

Çizelge 2.2. Analizler sonucunda aracın farklı noktalarına gelen maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Yue vd., 2012) 55

Çizelge 3.1. G11 kargo paraşütlerine ait bazı teknik özellikler (Mills Manufacturing, 2024) 59

Çizelge 3.2. Şekil 3.3'de gösterilen zırhlı araçların ortalama kütle değerleri. A)(Uyanık, 2023), B)(FNSS, 2024b) , C)(FNSS, 2024a) , D)("M1151", 2023) , E)("M1126 Infantry Carrier Vehicle", 2024) , F)(Alex, 2021) 60

Çizelge 3.3. Atılacak kütlelere göre kullanılması gereken paraşüt sayıları (Mills Manufacturing, 2024) 62

Çizelge 3.4. Atılacak yüklere göre terminal hız hesapları 63

Çizelge 3.5. 0,015 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri 66

Çizelge 3.6. 0,045 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri 67

Çizelge 3.7. 0,2 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri 68

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında askeri alanda büyük önem arz eden ve potansiyele sahip olan, havadan indirme operasyonlarında kullanılan palet sistemlerine yönelik, bir tasarım ve analiz çalışması gerçekleştirilecektir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında öncelikle literatürden bilgiler verilecek, daha sonrasında birtakım hesaplamalar ve analizler yapılacaktır.

Ülkelerin kendi bağımsızlıklarını koruyabilmeleri ve bölgesel güç haline gelebilmeleri için askeri ve savunma sanayisine yönelik çalışmalar gerçekleştirmeleri, yeni teknolojiler ile rakiplerinin önüne geçmeleri oldukça önem arz etmektedir. Havadan indirme sistemleri de savaşlarda orduların manevra kabiliyetlerini arttırmaları, düşmana baskın düzenleme ve düşmanın planlarını bozması açısından kritik bir operasyondur. Havadan indirme kabiliyetine sahip ülkelerin avantajları oldukça fazladır. Bu bağlamda çalışmanın ilerleyen sayfalarında 2.2 Askeri Stratejiler başlığı altında geçmişteki bazı savaşlardan örnekler verilerek havadan indirme sistemlerinin önemi irdelenmiştir.

Basitçe anlatılacak olunursa, havadan indirme operasyonlarında askeri ekipman ve teçhizatlar, seyir halinde olan bir uçaktan önceden belirlenen bir konuma atılmaktadırlar. Bu operasyonlar sırasında değişik türde ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu ekipmanlara, darbeleri sönümleyecek palet sistemleri ve paraşütler örnek verilebilir. Havadan atılan ekipmanların yere çarpması sırasında zarar görmemeleri operasyonun başarısı ve askeri zaiyatın verilmemesi açısından oldukça önemlidir. Ayrıca muhtemelen ateş altında olacak olan askeri personelin, atılan ekipmanları hızlı bir şekilde kullanılabilir hale getirmesi önemlidir. Bu hususlara, tasarlanacak darbe sönümleyici palet siteminde dikkat edilmelidir.

Çalışmada havadan indirme sistemleri detaylı bir şekilde anlatılmış, türleri açıklanmış ve kullanılan hava araçlarına örnekler verilmiştir. Ayrıca paraşüt türleri ve özellikleri açıklanmış, daha önceden havadan indirme operasyonlarında kullanılmış bazı ekipmanlardan örnekler verilmiştir. Literatürdeki bazı paletler örnek olarak verilmiştir. Detaylara 2.1. Havadan İndirme Sistemleri başlığından ulaşılabilir.

Havadan yere atılacak ekipmanların zarar görmemesi oldukça önemlidir. Bu nedenle çarpma sırasında gelen enerjiyi sönümleyecek darbe sönümleyici yapılara ihtiyaç vardır. Çalışmada enerji sönümleme kapasiteleri yüksek olan metal köpük yapılardan yararlanılmıştır. Metal köpüklerin özellikleri, sınıfları, üretim yöntemleri ve kullanım alanları örneklerle birlikte detaylı olarak aktarılmıştır.

Çalışmada bazı aerodinamik temel kavramlar anlatılarak farklı kütleler için çarpışma hızı, çarpışma kuvveti ve g değerleri gibi çeşitli hesaplamalar yapılmıştır. Bunların yanı sıra darbe sönümleyici palet sistemi tasarlanmış ve sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Yapılan palet tasarımında kapalı hücreli alüminyum köpük yapılar kullanılmış ve Abaqus sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiş ve çıkan analiz sonuçları tartışılmıştır. Ayrıca karşılaştırma olması için paletin alüminyum köpük kullanılmayan hali de analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Havadan İndirme Sistemleri

Airdrop olarak adlandırılan havadan indirme operasyonları, seyir halindeki bir uçaktan yüklerin karaya atılmasıdır. Havadan indirme operasyonlarında erzak ve askeri ekipmanlar ve zırhlı araçlar atılabilmektedir. Genellikle bu yükler bir platform üzerine yüklenerek uçaktan atılmaktadırlar (United States Air Force vd., 2016).

Airdrop operasyonlarında atılan bu yüklerin, yerdeki birlikler tarafından kullanılabilmesi için hasar almaması ve yere güvenli bir şekilde inebilmesi oldukça önemlidir. Atılan yüklerin zarar görmemeleri için çeşitli sistemler ve ekipmanlar kullanılır. Atılacak yüklerin konulacağı platformlar, askı tertibatları ve zarar görmeleri engellemek amacıyla kullanılan örneğin bal peteği gibi enerji emici sistemler, atılacak yüke ve airdrop çeşidine göre uygun şekilde seçilir. Ayrıca havadan indirme türüne ve yükün durumuna göre kullanılacak paraşüt türü ve sayısı belirlenir (United States Of America Department Of The Army vd., 2016).

2.1.1. Airdrop türleri ve özellikleri

Üç farklı havadan indirme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; düşük hızla havadan indirme (low-velocity airdrop), yüksek hızla havadan indirme (high-velocity airdrop) ve serbest düşme (free drop). Düşük hızlı havadan indirme yönteminde atılacak yükler seyir halindeki uçaktan belirli bir yükseklikten atılırlar. Bu yöntemde ekipmanlar atılırken kargo paraşütleri kullanılarak ekipmanların yere iniş hızı yavaşlatılır. Ayrıca malzemelerin zarar görmelerini engellemek için yüklerin alt tarafında genellikle bal peteği (honeycomb) olarak adlandırılan enerji emici sistemler bulunmaktadır. Benzer teçhizatlar yüksek hızla havadan indirme yönteminde de kullanılır. Bu yöntemde malzemelerin üst kısmına dengeleyici paraşüt takılarak havadan indirme sırasında dik pozisyonun korunması hedeflenir. Diğer bir havadan indirme yöntemi olan serbest düşme yönteminde ise bazı malzemeler uçaktan paraşüt kullanılmadan atılırlar. Aşağıda **Şekil 2.1**'de askeri nakliye uçağından havadan indirme yöntemi ile atılan bazı

malzemeler örnek olarak gösterilmiştir (United States Of America Department Of The Army vd., 2016). Yukarıda anlatılan havadan indirme yöntemleri içerisinde düşük hızla havadan indirme, şu anda platform yüklerini havadan indirmek için kullanılan tek airdrop türüdür (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.1. Askeri nakliye uçağından havadan indirme (Airdrop) ile ekipman ve malzemelerin atılması (“Airdrop”, 2024)

2.1.2. Airdrop için kullanılan hava taşıtları ve platformlar

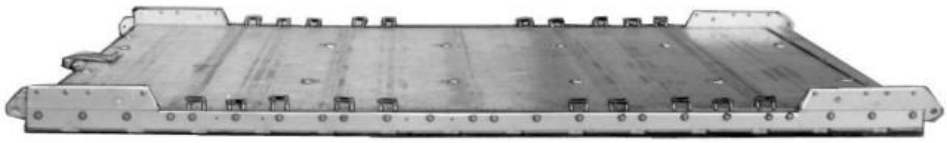
Kullanımda olan birçok hava aracı ile hava indirme operasyonları gerçekleştirilebilir. Ancak burada atılacak malzemelerin kütle değerleri ve boyutları önemlidir. Atılacak yükün durumuna göre kullanılacak hava aracı değişmektedir. Kullanılabilecek hava araçlarına birçok örnek verilebilir. Örnek olarak: C-23 (Sherpa) uçağı, CasA-212 uçağı, CH-47 (Chinook) helikopteri, UH-60 (Blackhawk) helikopteri, CH-46 (Sea Knight) helikopteri, C-17 nakliye uçağı ve C-130 nakliye uçağı (**Şekil 2.2 a, b**). Atılacak ekipmanlar hava aracının paraşüt kapısından veya rampasından atılabilir. Bu noktada önemli olan ekipmanın boyutu ve kütlesidir (United States Of America Department Of The Army vd., 2016). C-130 (Hercules) nakliye uçaklarının maksimum yük ağırlık sınırı 42 000 pound yani 19 050,88 kg iken C-17 (Globemaster) nakliye uçaklarının

maksimum yük ağırlık sınırları ise genellikle 60 000 pound yani 27 215,54 kg'dır. Ancak birden fazla platform için C-17 nakliye uçaklarından 110 000 pound yani 49 895,12 kg'a kadar havadan atılabilir (United States Air Force vd., 2016).



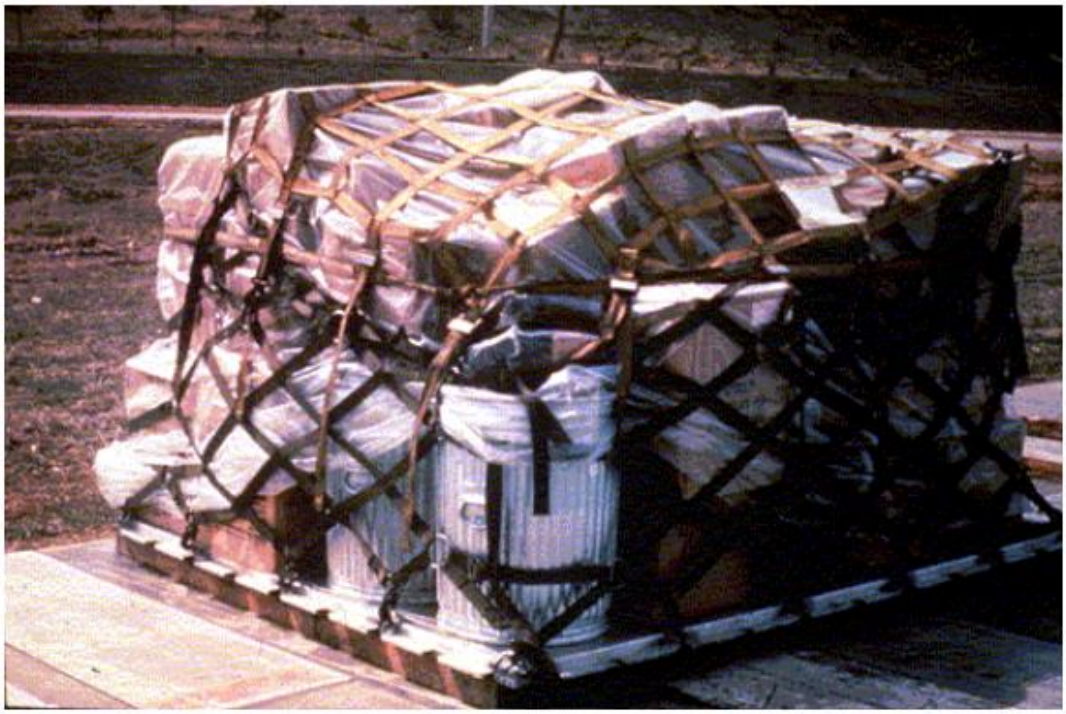
Şekil 2.2. Havadan indirme sistemlerinde kullanılabilecek hava araçları. **A)** Boeing C-17 Globemaster III nakliye uçağı ("Boeing C-17 Globemaster III", 2024). **B)** Lockheed C-130 Hercules nakliye uçağı ("Lockheed C-130 Hercules", 2024)

Şekil 2.3'te havadan indirme (Airdrop) operasyonlarında kullanılan palet/platformlardan birisi örnek olarak gösterilmiştir. **Şekil 2.3**'deki platform, literatürde "v tipi hava indirme platformu" olarak geçmektedir. V tipi platformlar, düşük hızla havadan indirme operasyonları için kullanılırlar ve karaya çarpmanın şokunu yayarlar (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.3. V tipi airdrop platformu (United States Air Force vd., 2016)

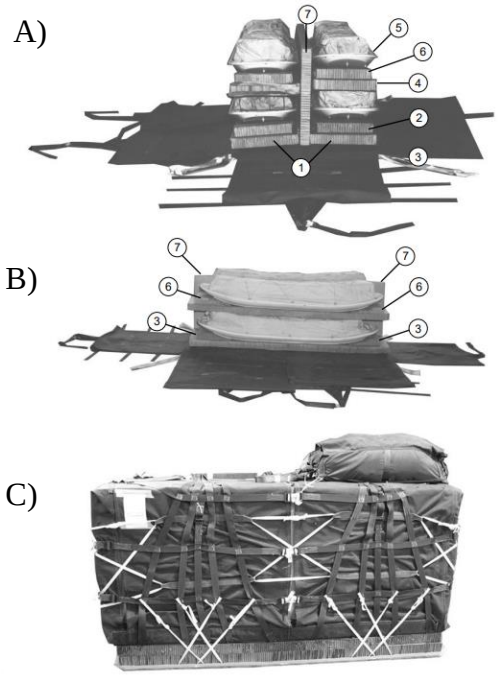
Şekil 2.4'de 463L askeri palet sistemi gösterilmiştir. Bir başka platform örneği olarak gösterilebilir. Hava kuvvetleri nakliyelerinde kullanılan 463L platformu 2,24 x 2,74 m boyutlarında ve üzerine 4 500 kg (10 000 lb) ağırlığa kadar yük konulabilmektedir (Snead, 2005).



Şekil 2.4. Ekipmanla donatılmış 463L askeri palet sistemi (Snead, 2005)

2.1.3. Hava indirme operasyonlarında atılan yüklere ait örnekler

Airdrop operasyonlarında atılan yüklere ilişkin bir örnek **Şekil 2.5 a, b, c**'de gösterilmiştir. Şekilde görülen malzemelerin uçaktan atıldıktan sonra yere inişi için G-12E kargo paraşütü kullanılır. Malzemelerin güvenli bir şekilde yere indirilebilmesi için bal peteği (honeycomb) enerji emici malzemeler kullanılmaktadır. Bu enerji emici malzemeler şekilden de görüleceği gibi parçaların altlarına ve ara boşluklara konulmaktadır. Bu yapı için izin verilen minimum yük 900 pounds (408,23 kg), maksimum yük 2 200 pounds (997,9 kg) (United States Of America Department Of The Army vd., 2016).



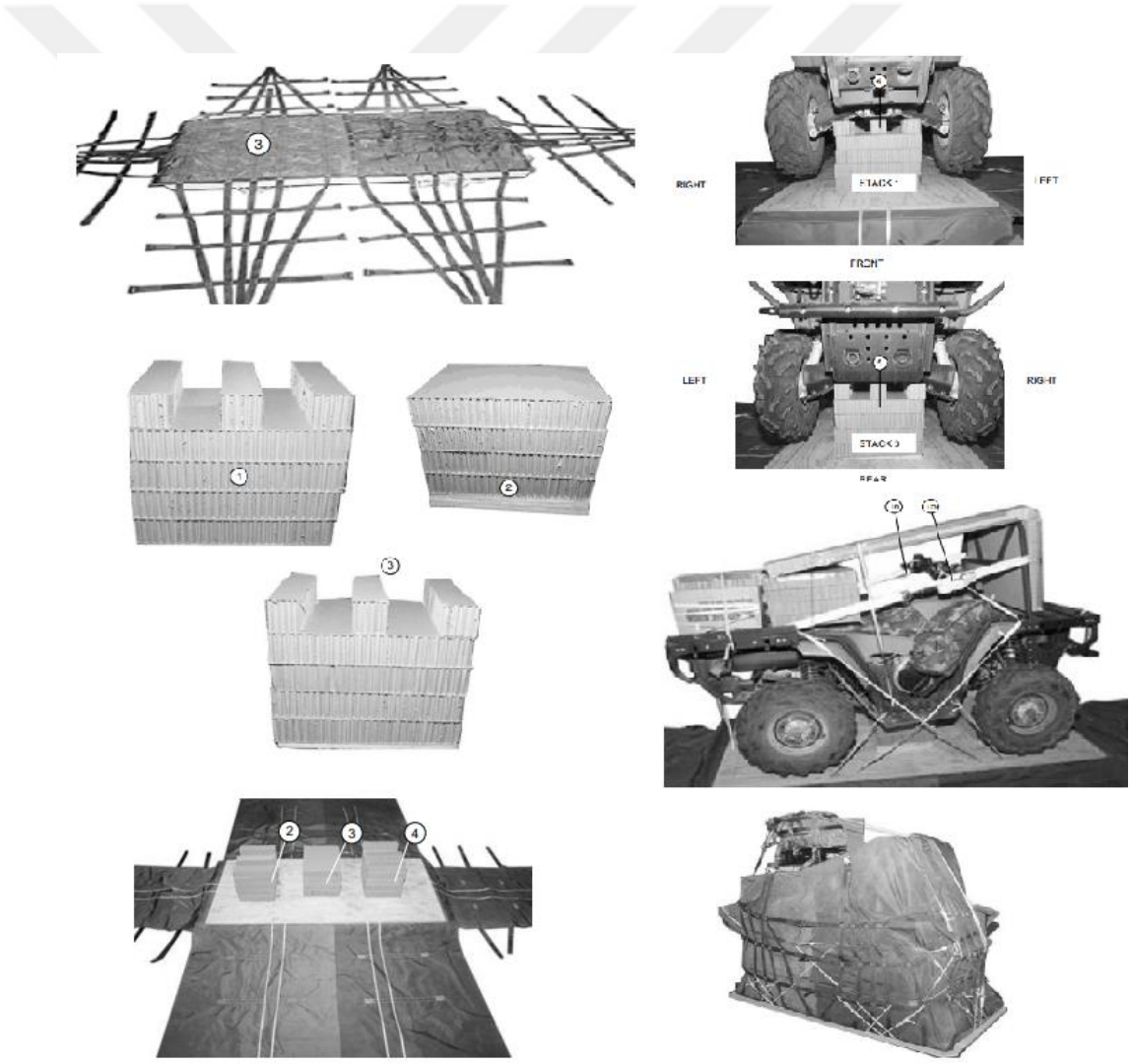
Şekil 2.5. Havadan indirme (airdrop) ile atılacak bir yükün bal peteği yapılar ile paketlenmesi. **A)** Önden görünüşü **B)** Yandan görünüşü **C)** Paketlenmiş hali (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)

Bir başka örnek olarak **Şekil 2.6**'da gösterilen MV700 ATV arazi aracının düşük hızla havadan indirme (airdrop) operasyonu için paketlenmesi verilebilir. MV700 ATV arazi aracı 472,64 kg (1 042 pound) ağırlığında, 2,26 metre (89 inç) uzunluğunda, 1,22 metre (48 inç) genişliğinde ve 1,47 metre (58 inç) yüksekliğindedir (United States Of America Department Of The Army vd., 2016).



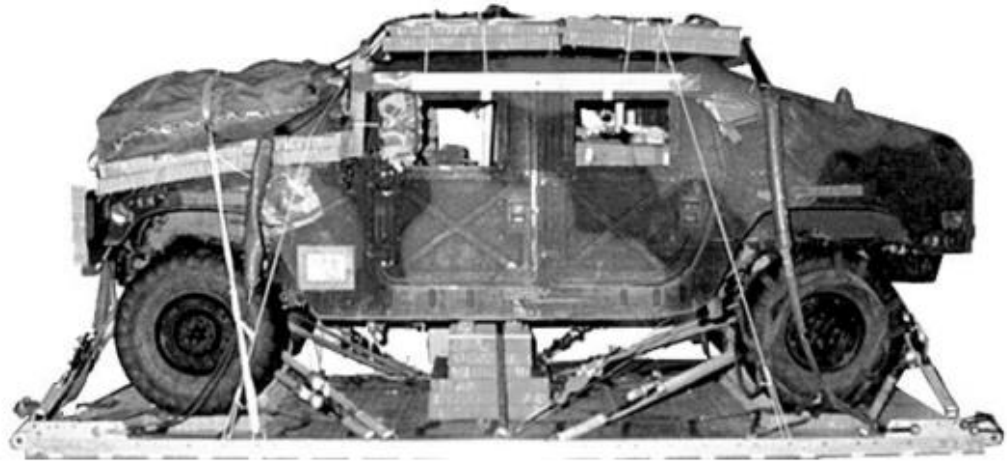
Şekil 2.6. MV700 ATV arazi aracı (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)

Öncelikle kaydırma tahtası hazırlanmış ve üzerine iki adet A-22 askı takımı yerleştirilmiştir. Sonrasında aracın hasar almaması için enerji emici malzeme olarak aracın şekline uygun olacak şekilde üç adet bal peteği (honeycomb) yapı hazırlanmış ve bir platformun üzerine yerleştirilmişlerdir. Daha sonra arazi aracı bal peteği yapıların üzerine yerleştirilmiş ve platforma sabitlenmiştir. Sonrasında arazi aracının arka tarafına ek yükler konularak sağlamlaştırılmış ve çeşitli yerlere bal peteği yapılar yerleştirilmiştir. Daha sonra tüm yapı kapatılarak kayışlar ile paketlenmiştir. Yük üzerine JPADS 2K ve paraşüt sistemleri kurulmuştur. **Şekil 2.7**'de sırasıyla yapılan işlemlere ait görseller ve yapının son hali verilmiştir (United States Of America Department Of The Army vd., 2016).



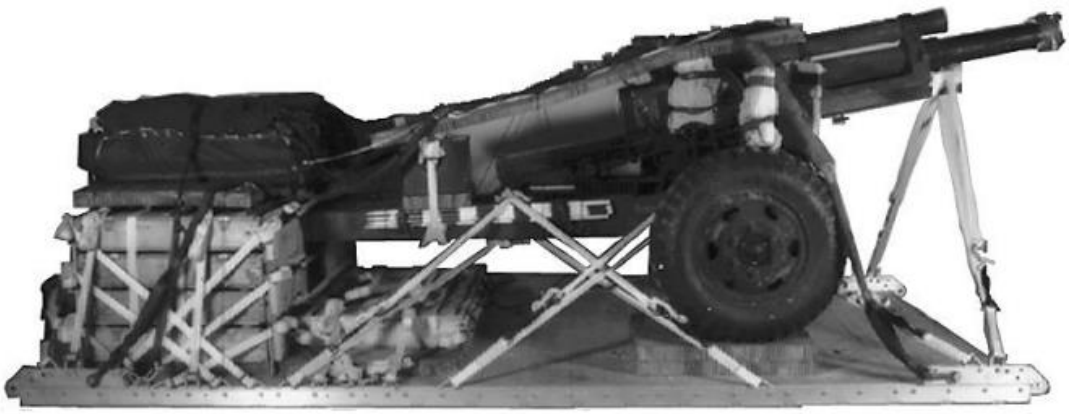
Şekil 2.7. MV700 ATV arazi aracının düşük hızla havadan indirme (airdrop) için hazırlanması (United States Of America Department Of The Army vd., 2016)

Yazının devamında sırasıyla başka örnekler gösterilmiştir. Örneğin **Şekil 2.8**'de M1025 Armament Carrier askeri aracının airdrop operasyonları için hazırlanmış hali gösterilmiştir. Şekilde gösterilen ekipmanın kütlesi 9 820 pound yani 4 454,28 kg'dır (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.8. M1025 Armament Carrier aracının havadan indirme için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)

Bir başka örnek olarak **Şekil 2.9**'da M101A1 Howitzer topçusunun havadan indirme operasyonları için hazırlanmış hali gösterilmektedir. Gösterilen yükün ağırlığı 9 500 pound yani 4 309,13 kg'dır (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.9. M101A1 Howitzer topçusunun airdrop için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)

Diğer bir örnek, **Şekil 2.10**'da gösterilmiştir. Şekilde ek yük ile M1081 2-1/2-ton kargo kamyonunun airdrop için hazırlanmış hali gösterilmektedir. Gösterilen yükün ağırlığı 28 014 pound yani 12 706,94 kg'dır. Yüksekliği 2,46 metre (97 inç), genişliği 2,74 metre (108 inç) ve kullanılan sistemlere göre uzunluğu 8 – 8,08 metre (315 – 318 inç) aralığında değişmektedir. C-130 ve C-17 uçaklarından atılabilir (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.10. M1081 2-1/2-ton kargo kamyonunun ek yükle birlikte airdrop için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)

Şekil 2.11'de farklı bir örnek olarak Zodiac Mark 3 deniz aracının, Mücadelede Harcanabilir Platform (Combat Expendable Platform) ile düşük hızla havadan indirme operasyonu için hazırlanmış hali gösterilmektedir. Gösterilen yükün ağırlığı 2 470 pound yani 1 120,37 kg'dır. Yüksekliği 1,52 metre (60 inç), genişliği 1,91 metre (75 inç) ve uzunluğu 4,67 metre (184 inç) boyutlarındadır. C-130 ve C-17 uçaklarından atılabilir. Kargo paraşütü olarak bir tane G-12E kullanılır (United States Air Force vd., 2016).



Şekil 2.11. Zodiac Mark 3 deniz aracının düşük hızla havadan indirme operasyonu için hazırlanmış hali (United States Air Force vd., 2016)

2.1.4. Havadan indirmede kullanılan paraşütler

Paraşütler aerodinamik ve fiziğin temel prensiplerini kullanırlar. Değişik türde şekillere sahip olan paraşütler, açıldıktan sonra içerisine dolan havanın etkisiyle insanların ve ekipmanların yüksek bir noktadan yere doğru güvenli bir şekilde süzülmelerini sağlarlar. Paraşütlerin tarihi çok eskiye dayanmaktadır. İlk kez kullanımı Çin İmparatorluğuna ve ilk paraşüt benzeri tasarımlar Leonardo da Vinci'ye kadar uzanmaktadır. Tarih boyunca geliştirilen paraşütler, günümüzde havacılık alanı için kendine önemli bir yer edinmiştir (GEÇİLİ, 2022). Bu başlık altında askeri alanda kullanılan paraşütler ve bunların teknik özellikleri incelenecektir.

Şekil 2.12'de verilen tabloda askeri araçlar gibi kırılabilecek, hasar alabilecek ekipmanlar için düşük hızla havadan indirme (Low velocity airdrop) operasyonlarında kullanılan platformların boyutları ve taşıdıkları ağırlıklar verilmiştir. Ayrıca C130 ve C17 uçaklarından atılabilecek maksimum ağırlıklar da karşılaştırma olması için tabloda verilmiştir. Bunlara ek olarak tablonun alt tarafında yan yana yerleştirilerek uçaktan atılan Dual Row Airdrop System (Dras – Çift Sıralı Airdrop Sistemi) örnekleri de verilmiştir (Zarek, 2021).

Platforms				
Length (ft)	Width (in)	Min Weight (lbs)	C-130 Max Weight (lbs)	C-17 Max Weight (lbs)
8	108	2,520	15,000	10,000
12	108	3,780	21,000	18,500
16	108	5,040	28,000	28,000
20	108	6,300	39,000	39,000
24	108	7,560	42,000	42,000
28	108	8,820	42,000	42,000
32	108	10,080	42,000	42,000
Dual Row Airdrop System (DRAS)				
18	88	7,500	N/A	14,500
18	88	7,500	N/A	14,500

Şekil 2.12. Havadan indirmede kullanılan platformlara ait genel özellikler (Zarek, 2021)

Paraşüt türlerine baktığımızda bunlar, piyadelerin kullandığı personel paraşütleri veya ekipmanların yere inişini sağlayan kargo paraşütleri olarak basitçe sınıflandırılabilirler. T11 Ana paraşüt, T11 Ters Paraşüt ve MC-6, RA-1 paraşütleri personel paraşütlerine örnek olarak verilebilir (Zarek, 2021).

Şekil 2.13'de paraşütler hakkında detaylı bir tablo paylaşılmıştır. Burada birçok farklı tipte paraşüt türü ve eğer küme halinde birlikte kullanılırlarsa değerlerin nasıl değiştiği listelenmiştir. Tabloya bakılarak düşük, orta ve yüksek hızla atılacak paraşütler görülebilir. Ayrıca bu paraşütlerin minimum düşürme yükseklikleri tablonun sağ tarafında verilmiştir. Bunlara ek olarak tabloda paraşütlerin taşıyabilecekleri minimum ve maksimum ağırlık sınırları da verilmiştir (Zarek, 2021).

SUSPENDED WEIGHT (LBS) (w/out parachute)			MINIMUM DROP ALTITUDE (feet AGL)
PARACHUTE	MINIMUM WEIGHT	MAXIMUM WEIGHT	
HIGH VELOCITY (HV)			
1 x 68" PILOT	75	150	None
3 x 68" PILOT	151	500	None
12-ft HV	151	500	400
15-ft EXT	151	500	400
26-ft HV	501	2,200	500
22-ft EXT	501	2,200	500
Medium VELOCITY (MV)			
G-15			
GRAVITY	501	2,200	400
EXTRACTION	1,000	2,000	400
LOW VELOCITY (LV)			
1 x 68" PILOT	30	50	None
3 x 68" PILOT	51	200	None
T-10 Mod Cargo	90	500	400
G-16			
1 - 4	2,500	22,000	750
5 - 8	22,001	42,000	975
G-14			
1	200	500	300
2	501	1,000	300
3	1,001	1,500	400
G-12E			
1	501	2,200	475
2	2,270	4,000	550
G-11B			
1	2,270	5,000	900
2	5,001	10,000	1,100
3	10,001	15,000	1,100
4	15,001	20,000	1,100
G-11C			
5	20,001	25,000	1,100
6	25,001	30,000	1,100
7	30,001	35,000	1,100
8	35,001	40,000	1,300
LCLA			
LCLV	501	2,200	850
Cross	80	200	350
Double Cross	201	400	350
JPADS (RAM AIR CARGO)			
2K MAGU	700	2,150	3,500 TRN, 5,000 OPER.
10K	4,500	9,500	3,500 TRN (Extrac Only), 5,000 OPER. (Extract or Grav)

Şekil 2.13. Paraşüt türlerine ait teknik detaylar (Zarek, 2021)

Askeri zırhlı araçların kütleleri fazla olduğu için onlara uygun paraşütlerin incelenmesi için **Çizelge 2.1** oluşturulmuştur. **Çizelge 2.1**'de kargo paraşütleri için askıdaki genel ağırlıklar verilmiştir. Askıdaki ağırlık, askıdaki toplam ağırlıktan kargo paraşütlerinin ağırlığının çıkarılmasıyla elde edilen ağırlıktır (United States Air Force vd., 2016).

Düşük hızla havadan indirme (low velocity airdrop) operasyonları için kullanılan kargo paraşüt türleri:

- G-11B Kargo Paraşütü: Paketlendiğinde montaj 250 pound (113,4 kg) ağırlığında (**Şekil 2.14**).
- G-11C Kargo Paraşütü: Paketlendiğinde montaj 250 pound (113,4 kg) ağırlığında.
- G-12E Kargo Paraşütü. Paketlendiğinde montaj 125 pound (56,7 kg) ağırlığında (United States Air Force vd., 2016).

Çizelge 2.1. Hava indirme platformu yükleriyle kullanılan kargo paraşütleri için askıdaki genel ağırlık sınırlamaları (United States Air Force vd., 2016)

Paraşüt Türleri	Min		Max	
	Pound	Kg	Pound	Kg
G-11B				
1	2 270	1 029,65	5 000	2 267,96
2	5 001	2 268,41	10 000	4 535,92
3	10 001	4 536,38	15 000	6 803,88
4	15 001	6 804,34	20 000	9 071,85
G-11C				
5	20 001	9 072,30	25 000	11 339,81
6	25 001	11 340,26	30 000	13 607,77
7	30 001	13 608,22	35 000	15 875,73
8	35 001	15 876,19	40 000	18 143,69
G-12E				
2	2 270	1 029,65	3 500	1 587,57



Şekil 2.14. G11 kargo paraşütleri (AvıTec, 2022)

2.2. Askeri Stratejiler

Askerî açıdan bakıldığında savaşlarda, tecrübe, eğitim seviyesi, kullanılan ekipmanlar, teknoloji, iaşe, birliklerin morali, savaşma amacı ve daha birçok savaşın seyrini değiştirebilecek etken bulunmaktadır. Bu başlık altında, havadan askeri teçhizat indirme kabiliyetinin savaşlarda ordulara katacağı avantajların daha iyi anlaşılabilmesi için tarihteki bazı önemli vakalardan örnekler verilmek istenmiştir. Büyük Taarruz ve Girit Muharebesi gibi önemli savaşlar anlatılarak çıkarımlarda bulunulmuştur.

2.2.1. Büyük taarruz

Büyük Taarruz Savaşı, Mondros Ateşkes Anlaşması ve Sevr Barış Antlaşması'ndaki maddelere karşı duran ve yurdunun işgaline direnen Türk halkının bağımsızlık

savaşlarından sonuncusu ve en önemli savaşlarından birisidir. Büyük Taarruz, Türkiye Cumhuriyeti Devleti'nin kuruluşunun önünü açan savaştır. Büyük Taarruz Savaş'ı batı cephesinde Yunan ordusu ile Türk ordusu arasında geçmiştir.

Büyük Taarruz Savaşı'nın öncesine bakıldığında Sakarya Savaşı'ndan sonra Yunan ordusu Sakarya Nehri'nin gerisine, Eskişehir – Afyon hattına kadar çekilmiştir. Sakarya Savaşı savunmasından sonra Türk ordusu silah ve asker sayısı bakımından Yunan ordusunun yarısı kadardır. Bu nedenle Türk ordusu taarruz kararı alsa da bir süre hazırlık yapıp beklemek zorunda kalmıştır (Görgülü, 1992).

Dönemin Türk Hükümeti ve Meclisi'nin saldırı yapılması isteklerine rağmen Başkomutan Mustafa Kemal Atatürk (**Şekil 2.15**) birçok defa savaşın tarihini erteleyerek doğru zamanı beklemiştir. Bu durum onun askeri dehasını göstermektedir. Doğru zamanı ve doğru yeri bekleyen Mustafa Kemal Atatürk yaklaşık on ay sonra Yunan ordusunu bir kerede denize dökmüştür (Görgülü, 1992).



Şekil 2.15. Başkomutan Mustafa Kemal Atatürk'ün bir merasim kabul anındaki görüntüleri (Anadolu Ajansı, 2018)

Yunan ordusu, Yunan Devleti'nin iç ve dış siyasi olaylarından ötürü, siyasetin ordu içerisine girmesi ve savaşın uzamasından ve barış isteklerinin artmasından ötürü morali düşük seviyededir. Buna karşın Türk halkı elindeki birçok şeyi Türk ordusuna vererek savaşı kazanma azmindeydiler (Görgülü, 1992).

Sakarya Savaşı'ndan Büyük Taarruz'a kadar geçen on aylık sürede Türk ordusu asker sayısını arttırmış, silah ve ekipman eksikliklerini gidermeye çalışmışlardır. Buna rağmen Yunan ordusu üstünlüğünü korumaktadır. Bunun dışında Türk ordusu on ay boyunca sıkı bir eğitim almıştır ve tatbikatlar yaparak savaşa hazırlanmışlardır (Görgülü, 1992).

Büyük Taarruz Savaşı öncesinde moral üstünlüğü Türk kuvvetlerinde olmasına rağmen asker ve teçhizat sayısı bakımından üstünlük Yunan kuvvetlerindedir. Ayrıca Türk kuvvetlerinin uzun sürecek olan bir savaşa dayanmaları zor gözükmektedir. Bu nedenle hızlı, kesin ve kati bir sonuç elde etmeleri gereklidir. Bunun üzerin Başkomutan Mustafa Kemal Paşa ve askeri komuta kademesi Yunan kuvvetlerinin tek seferde imha edilmesine ve vatan topraklarının kurtarılmasına karar vermiştir. Bunun için ordunun sıklet merkezini değiştirerek düşmanın zayıf noktasından baskın harekâtı düzenlenmesine karar verilmiştir (Görgülü, 1992).

Türk ordusu gizlice Yunan kuvvetlerinin savunma bakımından zayıf olduğu Afyon hattının güney tarafına kaydırılmıştır. Bu noktada asker sayısı bakımından kuvvet üstünlüğü Türk tarafına geçmiştir. Bu bölgeden piyade ve süvari birlikleri ile düşman mevzilerinin gerisine taarruzlar düzenlenmiş ve düşman kuvvetlerini kuşatmaya yönelik saldırılar yapılmıştır. Türk kuvvetlerinin beklenmedik baskınından ve manevra hareketleri ile kuşatıcı taarruzları nedeniyle düşman kuvvetlerinin büyük bir çoğunluğu yok edilmiştir. Sonrasında Başkomutan Mustafa Kemal Atatürk'ün "Ordular, ilk hedefiniz Akdeniz'dir. İleri!" emri üzerine takip hareketleri başlamıştır. Kaçan Yunan ordusu yaklaşık 450 km takip edilerek Ege Denizi'ne dökülmüştür. Anadolu Yunan işgalinden kurtulmuştur (Görgülü, 1992).

Bu savaş esnasında süvari birliklerinin (**Şekil 2.16**) önemi büyüktür. Süvari birlikleri, düşmanın beklemediği yerden, düşman hattını geçerek hızla yol almış ve düşmanın ana stratejik ve ikmal yolunu ele geçirmeyi başarmıştır. Bu durum Yunan kuvvetleri için bir dezavantajdır. Çünkü bir ordu için lojistik çok önemli bir unsurdur. Ayrıca süvari birlikleri düşmanın gerisinde bulunan ittihatta beklettiği kuvvetlere taarruz ederek Yunan kuvvetlerinin birleşmesini ve güçlenmesini engellenmiştir. Diğer bir yandan düşmanın paniğe kapılması ve yanlış kararlar vermesine yol açmıştır (Görgülü, 1992).



Şekil 2.16. Süvari kolordusu ve Atatürk (Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu, t.y.)

Bundan dolayı doğru zamanda düşman hattının gerisine sarkmak oldukça avantaj sağlayabilmektedir. Hava üstünlüğü sağlanan bölgelerde airdrop ile düşman hattının arkasına ulaşmak ve düşmana lojistik, askeri ve moral bakımından zarar vermek kritik önem taşımaktadır. Bu durum havadan indirme operasyonlarında zırhlı araç atabilme kabiliyetinin kazanılmasının, Türkiye Cumhuriyeti Ordusu için çok önemli olduğunu göstermektedir.

2.2.2. Girit muharebesi

Hava indirme operasyonlarının öneminin, daha iyi anlaşılabilmesi için aktarılacak bir diğer örnek ise Girit Muharebesi'dir. Girit Muharebesi 20 Mayıs – 1 Haziran 1941'de Almanya ve Müttefikler arasında geçmiştir ("Battle of Crete", 2024).

Girit Adası'nın önemi, hava saldırıları yapma potansiyelini barındırmasıdır. Hem Romanya tarafına hem de Yakın Doğu tarafına bombardıman uçakları ile müdahale şansını hem Müttefiklere hem de Almanlara kazandırmaktadır. Bu nedenle her iki taraf için de önem arz etmektedir. Ancak Girit Adası'nın getirdiği dezavantajlar da bulunmaktadır. Her iki taraf için de zafer sonrası bölgenin savunulması için garnizon bulundurulması ve birliklere, sivil halka malzeme yardımı yapılması gerekecektir. Dolayısıyla bu durum her iki tarafın nakliye gemileri için de risk oluşturmaktadır (Richter, 2013).

Girit Adası'nda bulunan Müttefik birliklerinin askeri teçhizatları yetersizdi. Durumu kötü olan az sayıda tank ve İtalyan malı silahlar bulunmaktaydı. Ayrıca Yunanistan işgali sonrası tahliye edilen Yunan birlikleri de Girit'te bulunmaktaydı. Erzak yardımı Mısır'dan düşman uçakları nedeniyle sadece geceleri yapılabiliyordu. Ege Denizi'nde Alman Donanması'nın gemisi bulunmamaktaydı ve Ege Denizi'nde geceleri İngiliz Donanması hüküm sürmekteydi. Bu nedenle Alman tarafı sadece gündüzleri balıkçı tekneleri kullanabilirlerdi. Ayrıca ağır silah ve ulaşım araçları için deniz yolu gerekliydi (Richter, 2013).

Alman tarafında Girit işgali için havadan indirme birlikleri kullanılacaktı (**Şekil 2.17**) ve hava indirme sonrasında savaşın koordine edilmesi gerekliydi. Ayrıca birliklerin kişisel teçhizatları Girit bölgesine uygun değildi. Alman hükümetinde ise asıl odak Barbarossa Operasyonu'ndaydı (Richter, 2013).



Şekil 2.17. Girit Muharebesi (Öztürk, 2019)

Savaş öncesi hazırlıklara baktığımızda; İngiliz kuvvetleri, havadan indirme operasyonunun yapılacağı dört noktayı savunacak bir şekilde konuşlandırıldı. İngilizler, birliklerinin çoğunu kıyıları koruyacak şekilde konuşlandırmışlardı. Almanların ise keşif görevleri başarısızlık ile sonuçlandı (Richter, 2013).

İngiliz tarafı için iletişim sisteminin kötü olması ve savunulacak yerler arasındaki mesafenin fazla olması bir dezavantaj oluşturdu. Ayrıca bazı noktalardaki komutanlar, vasıfsız ve dönemin savaş stratejileri konusunda geri kalmış durumdaydılar. Ayrıca Müttefik kuvvetlerinde çekiş motorları bulunmadığından ve gündüzleri Luftwaffe uçakları olması nedeniyle, birliklerin konum değiştirmeleri zor olmaktaydı. Buna karşın Alman paraşütçü birliklerinin silahları Müttefik birliklerin elinde bulunan İtalyan silahlarına kıyasla daha üstün ve havan topları hareketliydi (Richter, 2013).

Saldırı 20 Mayıs 1941 sabahında başladı. Savaşı Almanlar Atina'dan, İngilizler Kahire'den yönettiler. Berlin'in çok fazla kararlara müdahale etmemesi rağmen İngiltere tarafında hükümet kararlara müdahil oldu. Alman saldırısı iki dalga olarak

koordinasyonsuz bir şekilde gerçekleştirildi. Dört hedefe aynı anda saldırmak için yeterli nakliye uçağı bulunmamaktaydı. Ayrıca yakıt problemi bulunmaktaydı. Uçakların iniş ve kalkışında havada toz bulutları oluşturmalarından ikinci dalga gecikmeli olarak başladı. Ayrıca savaş uçaklarının yakıtı bittiğinden, paraşütçü birlikleri hava desteği olmadan atılmak zorunda kaldılar. Karaya iniş yapan birlikler (**Şekil 2.18**), gün sonunda her yönden savunma yapacak şekilde mevzilenmek zorunda kaldılar (Richter, 2013).

Paraşütçü birliklerinin ekipmanları ayrı olarak atılmaktaydı. Paraşütçüler iniş yaptıktan sonra ateş altındayken ekipmanları getirmeleri gerekiyordu. Bu durum oldukça riskliydi (Richter, 2013).



Şekil 2.18. Alman paraşütçü birliklerinin Girit Adası'na inmesi ("Battle of Crete", 2024)

Müttefik birliklerinin savunmaları gereken en önemli nokta Maleme bölgesiydi. Çünkü paraşütçü birliklerinin ele geçirme ihtimalinin olduğu tek bölge orasıydı. Ancak Maleme bölgesinde, ellerinde kuvvet olmasına rağmen bazı bölgelerin açık bırakılması Almanların karaya inmesine ve toplanıp saldırıya geçmesine olanak tanıdı. Yükseklik 107'yi savunan Müttefik birlikleri, Alman saldırılarına direnç göstermesine rağmen ağır

kayıplar verdiler. Ayrıca takviye kuvvetleri gelmediği için Müttefik birlikleri geri çekilmek zorunda kaldı. Daha sonrasında Alman birlikleri Yükseklik 107'yi ve hava sahasını ele geçirdiler. Maleme Havaalanı'nın (**Şekil 2.19**) ele geçirilmesinden sonra Alman tarafı için malzeme ve asker takviyesi avantajı arttı. Sonrasında Müttefik birliklerinin geri çekilme hareketleri başladı ve Sfakia'dan tahliyesi ile Girit Muharebesi sonlanmış oldu. İngiliz tarafının, düşmanın daha sonradan kullanmasını engellemek için Maleme Havaalanı pistlerini yok etmemesi diğer bir hatadır (Richter, 2013).



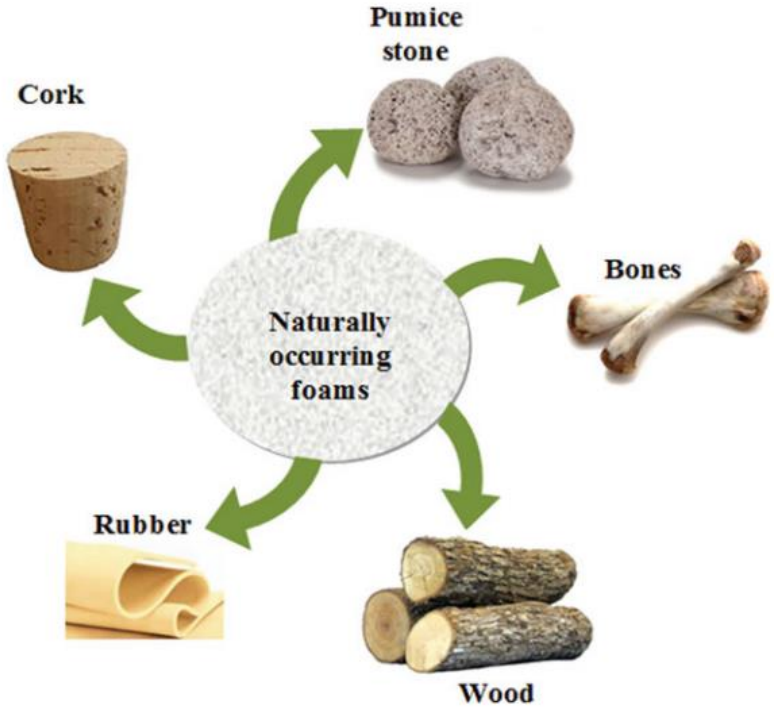
Şekil 2.19. Maleme Havaalanı – 1941 (Öztürk, 2019)

İngiliz tarafının sayıca üstün olmasına ve düşmana karşı hazırlıklı olmasına rağmen Alman tarafının muharebeyi kazanmasının en önemli faktörlerinden birisi, Alman kuvvetlerinin bölgedeki hem kara hem de deniz üzerindeki hava üstünlüğünü sağlamasıdır. Bu durum Müttefik birliklerinde moral kaybına neden olmuştur. Bir diğer önemli faktör ise Müttefik birliklerinin üst taraftan emir gelmeden kendi başına kararlar verememesidir. Ayrıca iletişim, haberleşme problemleri de dezavantajı arttırmıştır. Buna karşın Alman birlikleri kendi birlik komutanları ölse dahi görev bilinci ile kendi kararlarını verebilmektedir (Richter, 2013).

Girit Savaşı bize hava operasyonlarının önemini gösteren önemli bir örnektir. Hava indirme operasyonlarında düşmana karşı hava üstünlüğünün sağlanması çok önemlidir. Ayrıca karaya iniş yapan birliklerin hızlı bir şekilde ekipmanlarını alarak savaşa dahil olmaları oldukça önemlidir. Bu nedenle havadan indirme ile atılacak askeri zırhlı araçların veya malzemelerin kolayca ve hızlı bir şekilde aktif kullanıma gelecek şekilde tasarlanması önem arz etmektedir. Aksi takdirde düşman ateşi altında kalarak, büyük zaiyatlar verilebilir ve operasyon, amacına ulaşamayabilir.

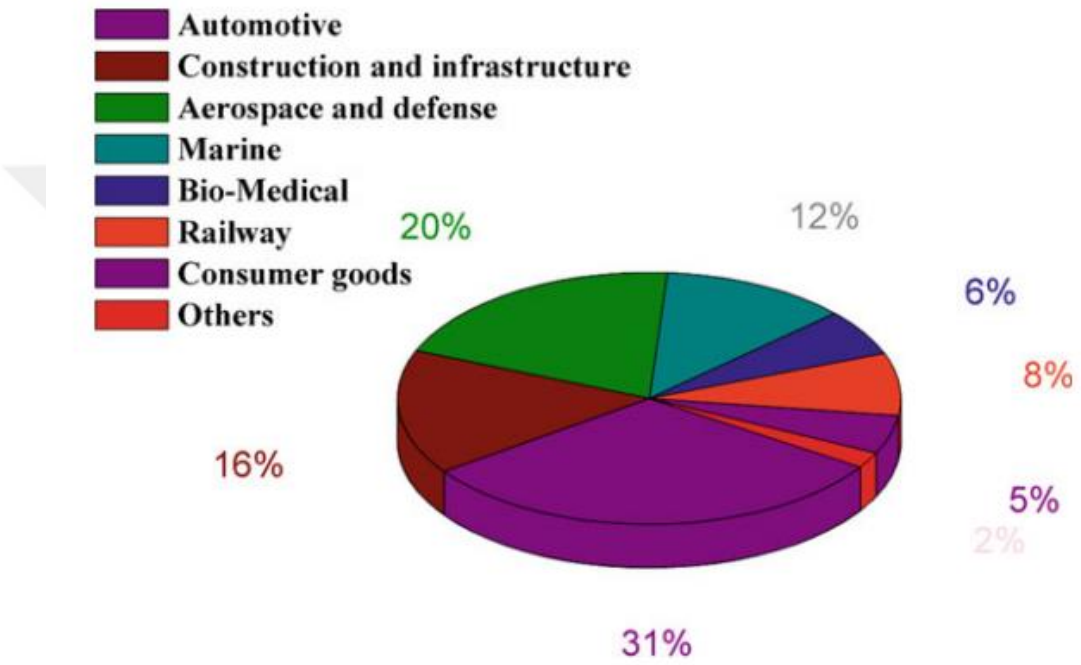
2.3. Metal Köpükler

Hücresel yapılı malzemeler, çeşitli özelliklere sahiptirler ve geçmişten günümüze birçok alanda kullanılmaktadır. Hücresel yapılı malzemeler doğal olarak bulunabileceği gibi yapay yollarla da elde edilebilirler. Doğal hücresel yapılı malzemelere örnek olarak canlıların kemik yapıları ve tahta malzemesini örnek verilebilir (Gibson & Ashby, 1997). **Şekil 2.20**'de doğal olarak elde edilen bazı hücresel materyallere örnek verilmiştir.



Şekil 2.20. Doğal hücresel yapılı malzemelere ait örnekler (Rajak & Gupta, 2020)

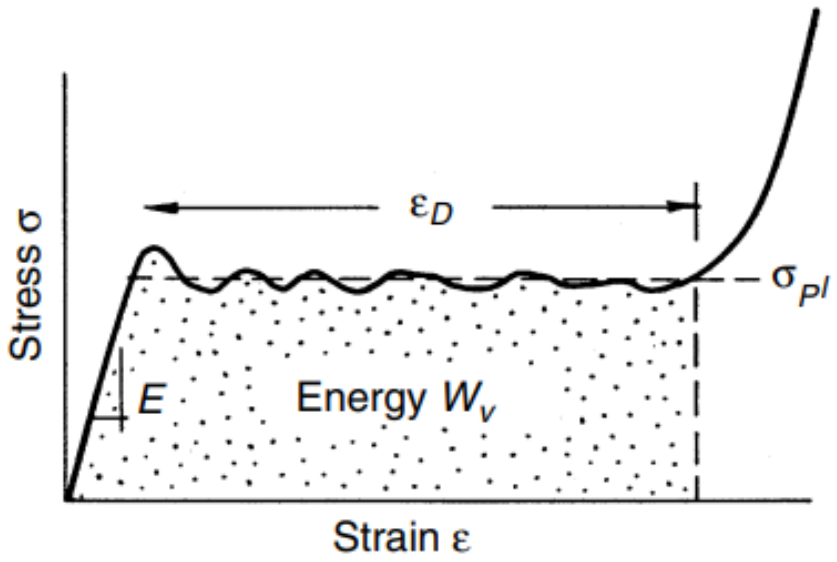
Metal köpük olarak adlandırılan kavram aslında metal malzemeler kullanılarak yapay yollarla elde edilen hücresel yapılı malzemelerdir. Birçok farklı eşsiz özelliğe sahip olan metal köpük yapılar, inşaat, otomotiv, havacılık sektörü ve savunma sanayi gibi birçok farklı alanda gittikçe daha önemli hale gelmektedir. **Şekil 2.21**'de metal köpüklerin 2019 yılına kadar olan farklı alanlardaki kullanım oranları yaklaşık olarak verilmiştir (Rajak & Gupta, 2020).



Şekil 2.21. 2019 yılına kadar olan metal köpüklerin farklı alanlardaki yaklaşık kullanım oranları (Rajak & Gupta, 2020)

Metal Köpükleri birçok farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Örneğin hücresel yapılarına, üretim yöntemlerine veya kullanılan metal malzemenin türüne göre farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Hücresel yapılarına göre sınıflandırılacak olunursa ikiye ayırılırlar: kapalı hücreli metal köpükler, açık hücreli metal köpükler. Yapılarındaki gözenekler birbirleri ile bağlantılı halde ise bunlara açık hücreli metal köpük denmektedir. Eğer gözeneklerin her biri birbirinden bağımsız yapıda ise ve aralarında ince duvar yapıları varsa bu yapılar kapalı hücreli metal köpükler olarak adlandırılmaktadır. Açık hücreli veya kapalı hücreli olmaları, metal köpüklerin kullanım alanlarını etkilemektedir (Rajak & Gupta, 2020).

Bazen çarpmalara, darbelere ve patlamalara karşı koruyacak yapılar ve malzemeler istenebilir. Bu tarz yerlerde gelen enerjiyi absorbe edecek malzemeler önem kazanır. Enerjinin iyi bir şekilde emilmesi, aslında malzemenin sabit bir gerilim altında (plato gerilimi) uzun düz bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizmesi anlamına gelir. Bu nedenle enerji emici malzemeler arasında en fazla enerjiyi absorbe edenler aslında en uzun platoya sahip olanlardır. İdeal bir enerji emici malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi aşağıdaki **Şekil 2.22**'de örnek olarak gösterilmiştir. Metal köpük malzemeler enerji emme özelliklerine sahiptirler. Bu nedenle çarpma ve darbelere karşı koruma istenen durumlarda kullanılabilirler (Ashby vd., 2000).



Şekil 2.22. İdeal bir enerji emici malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Ashby vd., 2000)

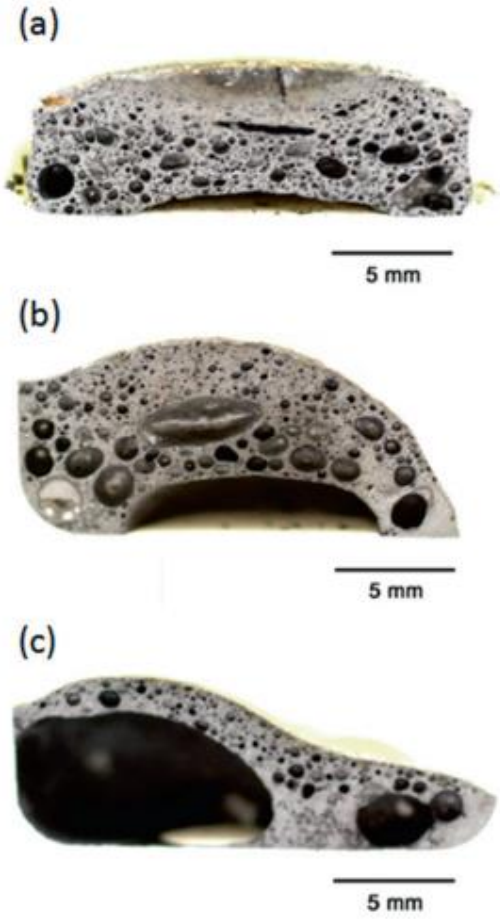
2.4. Metal Köpük Malzemeleri

Metal köpükler, alüminyum, nikel, çinko, magnezyum, titanyum, demir, çelik ve bakır gibi birçok metal malzemeden oluşturulabilirler. Bu malzemelerin içerisinde metal köpük yapımında en yaygın kullanılan malzeme alüminyum esaslı malzemelerdir (Rajak & Gupta, 2020). Yazının devamında bazı metal köpük malzemelerinden örnekler verilmiştir.

Walther vd. (2010), yaptıkları çalışmalar ile yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanmak için alaşımlı köpük üretimine yönelik yeni bir üretim süreci geliştirdiler. Geliştirdikleri bu toz metalürjisi üretim yöntemi ile korozyon ve yüksek sıcaklığa dayanıklı alaşımlı köpükler üretmek için nikel ve demir gibi malzemeleri kullandılar. Geliştirdikleri köpük malzemeler, otomotiv egzoz sistemlerinde ve elektrik alanında elektrot malzemesi gibi çeşitli alanlarda kulanım potansiyeli bulmaktadır (Walther vd., 2010).

Bu malzemelerin dışında çelik veya titanyum malzemelerinden oluşan metal köpükler geliştirilmeye devam etmektedir. Salimon vd. (2005), yaptıkları çalışmalarda çelik ve titanyum köpüklerin hangi alanlarda daha başarılı olacağını ve potansiyel kullanım alanlarına yönelik genel bir araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde ucuz çelik köpüklerin inşaat, gemi yapımı ve çarpma koruması istenen alanlarda; titanyum köpüklerin ise titanyum malzemesinin kullanıldığı havacılık ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanım potansiyeli bulunmaktadır (Salimon vd., 2005).

Alüminyum alaşımlı köpüklere kıyasla demir esaslı metal köpüklerin yüksek mukavemet, yüksek enerji emilebilirliği ve düşük maliyet gibi birtakım avantajları vardır. Ancak demir esaslı metal köpüklerin bazı üretim zorlukları bulunmaktadır. Murakami vd. (2014), cüruf köpürterek gözenekli demir esaslı metal köpük üretimi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada gözenekli demir malzemenin yeni üretim yöntemi olarak erimiş oksidin köpürtülmesi ve köpürtülmüş oksidin indirgenmesi incelenmiştir. Murakami vd. (2014), yaptıkları çalışmalarda erimiş oksidin köpürtülmesi ve köpürtülmüş oksidin indirgenmesi üretim yönteminde, bekletme süresinin gözeneklilik üzerinde önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır. **Şekil 2.23 a, b, c**'de farklı bekletme süreleri sonucunda ortaya çıkan köpürtülmüş cürufun gözeneklilik yapıları gösterilmiştir (Murakami vd., 2014).



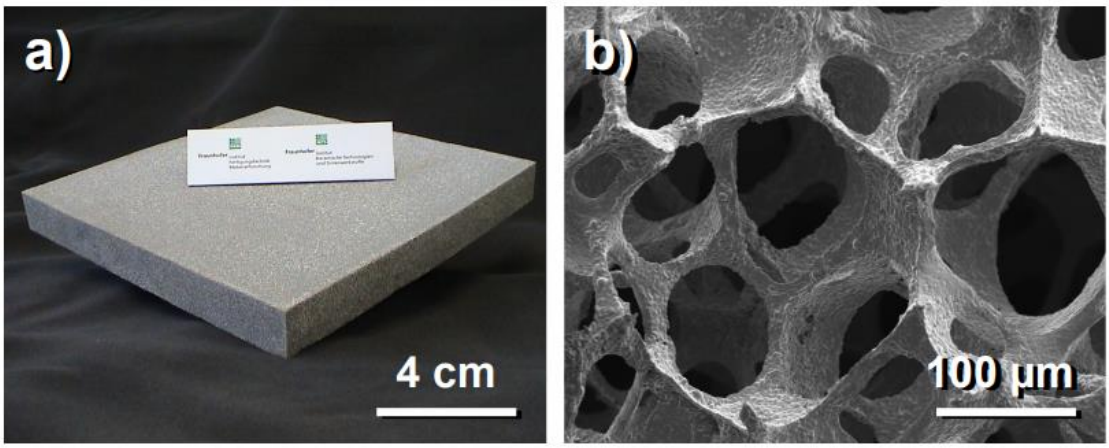
Şekil 2.23. Farklı bekletme süreleri sonucunda köpürtülmüş cürufta ortaya çıkan gözeneklilik yapısı. **A)** 40s **B)** 100s **C)** 150s (Murakami vd., 2014)

Bu kısımda anlatılan çalışmaların dışında metal malzemelerin üzerine daha pek çok çalışma bulunmaktadır. Genel bir uygulama alanı özeti vermek gerekirse yapısal ve havacılık alanında daha çok alüminyum, çelik ve demir köpükler; biyomedikal alanda titanyum, çelik, kobalt-krom ve bakır köpükler; kimyasal uygulamalarda ise daha çok nikel ve bakır esaslı metal köpükler kullanılmaktadır (Rajak & Gupta, 2020).

2.5. Açık Hücreli Metal Köpükler

Açık hücreli metal köpükler sahip oldukları hücresel yapıları sayesinde çeşitli özelliklere sahiptirler. Bu durum açık hücreli metal köpüklerin farklı alanlarda kullanılmasına olanak sağlar. Hücre yapılarının görülebilmesi ve mikroyapılarının daha

iyi anlaşılabilmesi için **Şekil 2.24 a, b**'de bir açık hücreli metal köpük örneği ve 80 ppi'lik (pores per inch – inç başına düşen gözenek) bir metal köpüğün taramalı elektron mikroskobundan alınan resmi gösterilmektedir (Quadbeck vd., 2007).



Şekil 2.24. Açık hücreli metal köpük resimleri. **A)** Açık hücreli metal köpük **B)** 80 ppi'lik (inç başına düşen gözenek) bir metal köpüğün taramalı elektron mikroskobundan alınan resmi (Quadbeck vd., 2007)

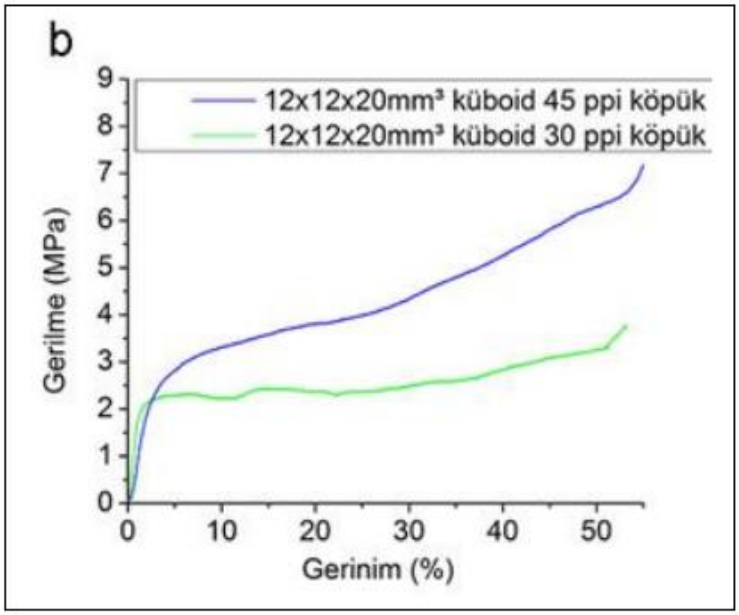
Açık hücreli metal köpüklerin ısıl iletkenlikleri iyidir. Bu nedenle ısı yalıtımı için kullanılmaları pek uygun olmamaktadır. Daha çok, ısı iletiminin önemli olduğu alanlarda kullanım alanı bulmaktadır. Örneğin iyi bir ısı transfer katsayısı sunmalarından dolayı ısı değiştiricilerinde kullanılabilirler (Lu vd., 1998).

Lu vd. (1998), açık hücreli metal köpüklerdeki ısı transfer mekanizmaları üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yayınladıkları makalede açık hücreli metal köpüklerin kompakt ısı değiştiricilerindeki kullanımlarını araştırmışlar ve bir analitik model oluşturmuşlardır. Analitik modelin uygulanabilirliği için hava taşıtlarında kullanılan çok katmanlı ısı değiştiricileri ve yüksek güçlü elektronik cihazlarda kullanılan ısı emici sistemleri örnek olarak göstermişlerdir (Lu vd., 1998).

Hafif yapılı bir malzeme olmaları, açık hücreli metal köpükler için önemli bir özelliktir. Aynı zamanda darbeleri sönümleyebilme özellikleri sayesinde örneğin taşıt kazaları gibi darbe ve çarpmaların oluşturacağı risklerin azaltılmasının istendiği alanlarda önem kazanmaktadırlar. Yapılan çeşitli çalışmalar incelendiğinde açık hücreli metal

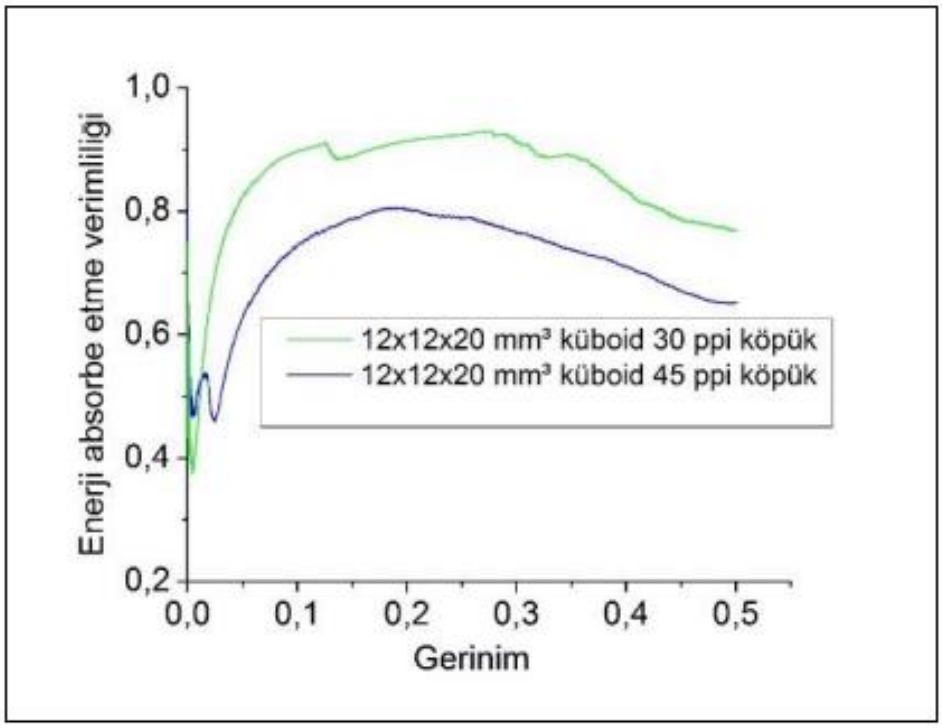
köpüklerde kullanılan metalin özellikleri, metal köpüğün yoğunluğu, hücre boyutları, hücre sayıları, hücre kirişlerinin boyutları gibi birçok parametrenin açık hücreli metal köpüklerin mekanik özelliklerini etkiledikleri görülmüştür (Kaya, 2020).

Kaya (2020), farklı boyut ve hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerde hücre sayısının ve anizotropinin enerji sönümleme verimliliği üzerine etkilerini incelemiştir. Yaptığı çalışmalarda 12x12x12 mm^3 aynı boyutta ve 30 ppi ve 45 ppi'lik (inç başına düşen gözenek) farklı hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerin basma deneylerini gerçekleştirmiştir. Sonrasında **Şekil 2.25**'te olduğu gibi gerilme – şekil değiştirme eğrilerini oluşturmuştur (Kaya, 2020).



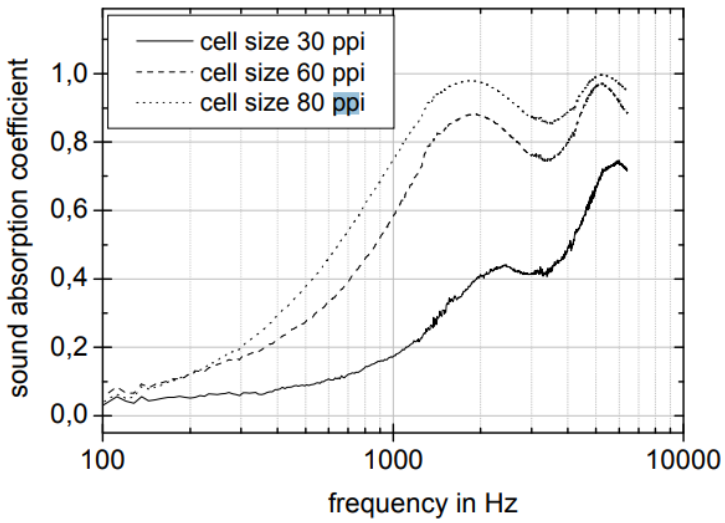
Şekil 2.25. Aynı boyutlardaki farklı hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerin gerilme – gerinim eğrileri (Kaya, 2020)

Hücre sayılarının enerji absorbe etme verimliliği üzerindeki etkilerini incelemek için **Şekil 2.26**'da gösterildiği gibi açık hücreli metal köpüklerin enerji absorbe etme verimliliği – şekil değiştirme eğrilerini ortaya koymuştur. Yaptığı çalışmalar neticesinde hücre sayısının, mukavemet, gerilme – şekil değiştirme eğrisinin şekli ve enerji sönümleme verimliliği gibi özellikler üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. Hücre sayısının azalmasıyla metal köpüklerde enerji sönümleme verimliliğinin arttığı görülmüştür (Kaya, 2020).



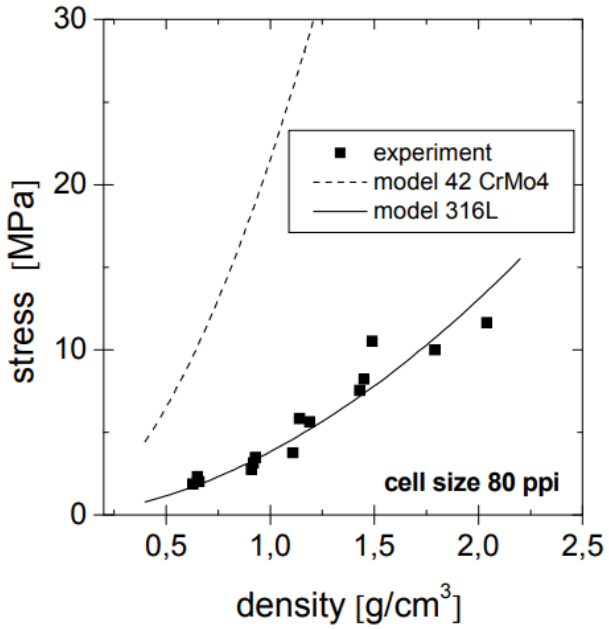
Şekil 2.26. Aynı boyutlardaki farklı hücre sayılarına sahip açık hücreli 316L çelik köpüklerin enerji sönümleme verimliliği – gerinim eğrileri (Kaya, 2020)

Quadbeck vd. (2007), 316L paslanmaz çelik malzemesini kullanarak replikasyon yöntemiyle çeşitli hücre boyutlarına ve yoğunluklara sahip açık hücreli metal köpükler üretmişlerdir. Ürettikleri açık hücreli metal köpükler üzerinde basma ve akustik testleri uygulayarak mekanik ve akustik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalara bakıldığında hücre boyutunun ve yoğunluğun mekanik ve akustik özellikleri etkilediği anlaşılmıştır. **Şekil 2.27**'de çeşitli hücre boyutlarına ait açık hücreli metal köpüklerin ses emme katsayıları gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde hücre boyutu küçüldükçe ses emme katsayısının arttığı anlaşılmaktadır. Sahip oldukları akustik özelliklerden dolayı metal köpükler, gürültünün sönümlenmesinin istendiği alanlarda kullanım alanı bulabilirler (Quadbeck vd., 2007).



Şekil 2.27. Farklı hücre boyutlarına sahip açık hücreli metal köpüklerin ses emme katsayıları (Quadbeck vd., 2007)

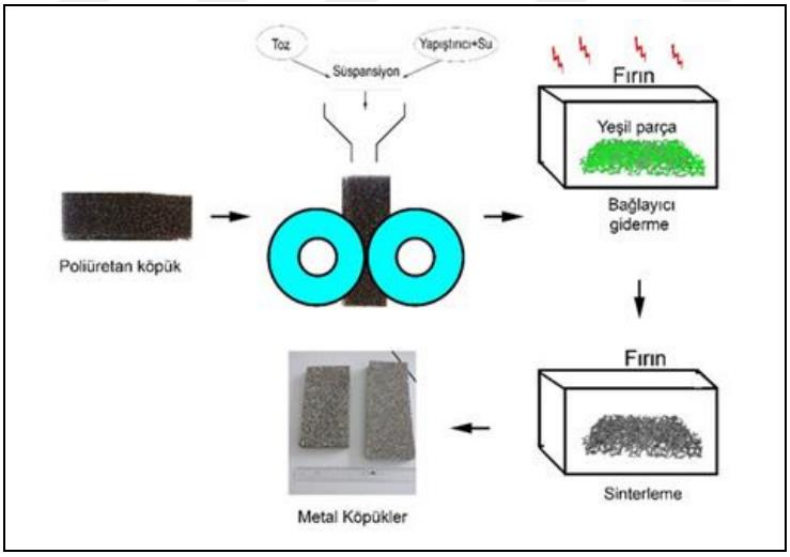
Quadbeck vd. (2007), yaptıkları çalışmalarda yoğunluğun açık hücreli metal köpüklerin mekanik özelliklerini etkilediğini göstermişlerdir. **Şekil 2.28**'de hücre boyutu 80 ppi olan çeşitli yoğunluklardaki açık hücreli metal köpük malzemelerin, basma mukavemeti değerleri gösterilmektedir (Quadbeck vd., 2007).



Şekil 2.28. 80 ppi hücre boyutuna sahip çeşitli yoğunluklardaki açık hücreli metal köpük malzemelerin basma mukavemeti değerleri (Quadbeck vd., 2007)

2.6. Açık Hücreli Metal Köpüklerin Üretimi

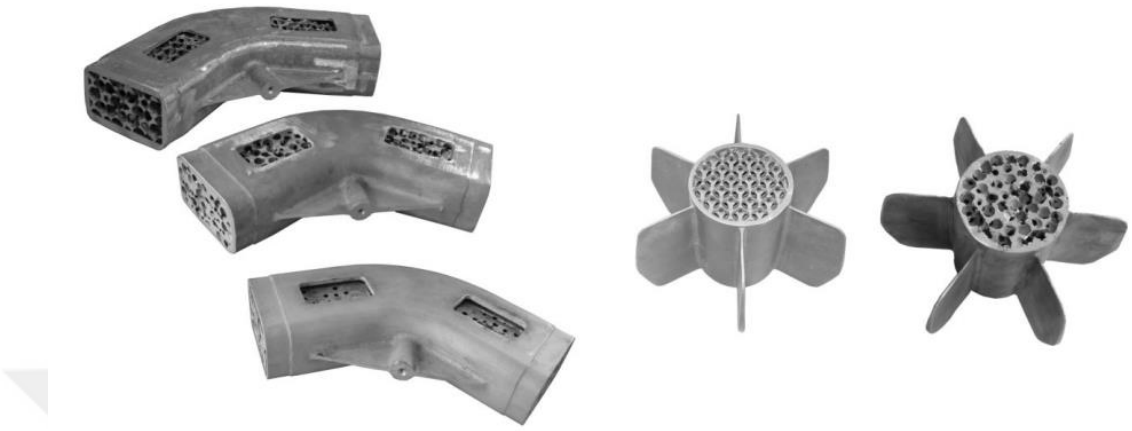
Metal köpüklerin farklı farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu başlık altında açık hücreli metal köpüklerin üretim yöntemlerinden bazılarına yer verilecektir. Açık hücreli metal köpüklerin üretim yöntemlerinin bir örneği olarak replikasyon yöntemi (**Şekil 2.29**) verilebilir. Replikasyon yöntemi birkaç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, kullanılacak metal malzemenin toz hali ve bazı katkı maddeleri bir araya getirilerek su bazlı bir karışım oluşturulur. Daha sonra ağsı bir yapıya sahip poliüretan köpük malzemeler şablon olarak kullanılırlar. Su bazlı karışım poliüretan şablon üzerine kaplanır. Sonrasında kurutma işlemi gerçekleştirilir. Kurutma işleminden sonra şablon ve diğer malzemeler termal yollarla uzaklaştırılarak geriye metal malzeme bırakılır. Sonrasında metal malzeme sinterlenir. Bu işlemler sonucunda açık hücreli metal köpük malzeme elde edilir. Replikasyon yöntemi ile homojen yapılı açık hücreli metal köpükler elde edilebilir. Ayrıca replikasyon yönteminin seri üretime uygun olması bir avantajdır (Quadbeck vd., 2007).



Şekil 2.29. Replikasyon yöntemi ile açık hücreli metal köpük üretim aşamaları (Kaya, 2020)

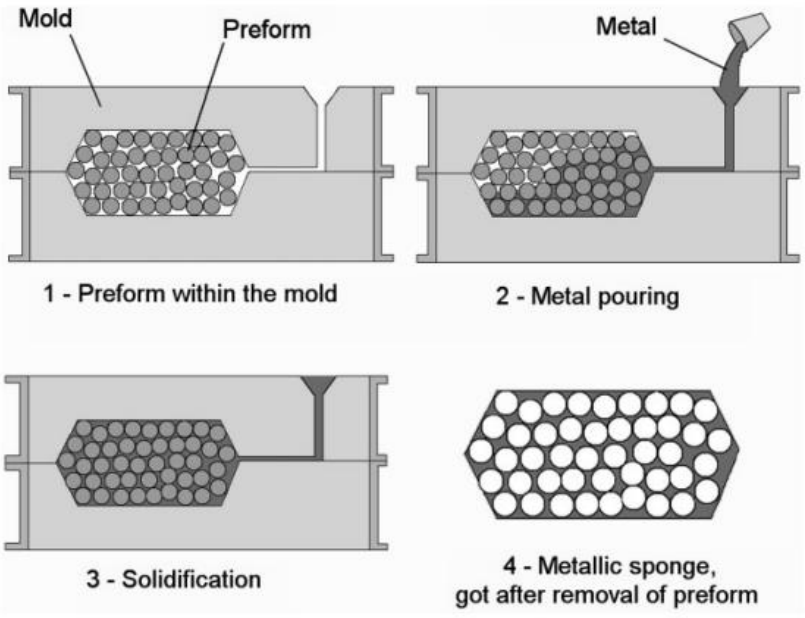
Dairon vd. (2011), döküm metoduyla açık hücreli metal köpük üretimi için CTIF tarafından geliştirilen ve patentli olan üretim yöntemlerini kullanmış ve ürettikleri stokastik veya düzenli açık hücreli metal köpüklerin enerji emilimi ve termal

özelliklerini incelemişlerdir. Dairon vd. (2011), çeşitli döküm yöntemleri ile ürettikleri açık hücreli metal köpükler **Şekil 2.30**'da gösterilmektedir (Dairon vd., 2011).



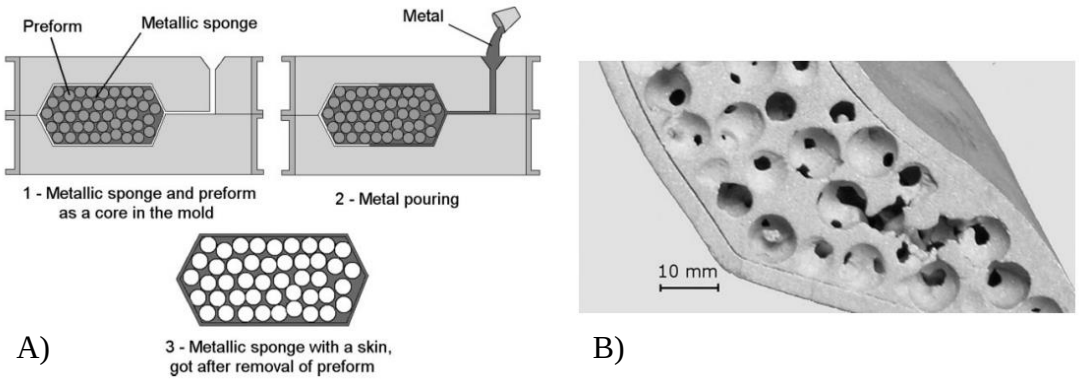
Şekil 2.30. Dairon ve arkadaşlarının farklı üretim metotlarını kullanarak ürettikleri açık hücreli metal köpükler (Dairon vd., 2011)

Replikasyon dışında diğer bir üretim yöntemi olarak döküm metodu ile açık hücreli metal köpüklerin üretimi mümkündür. CTIF tarafından geliştirilen döküm yöntemleri ile karmaşık şekilli fonksiyonel parçaların açık hücreli olarak üretilmeleri önemli bir avantajdır. **Şekil 2.31**'de basit hali ile herhangi bir dış kaplaması olmayan açık hücreli metallerin döküm metodu ile üretim aşamaları gösterilmektedir. Bu yöntemde öncü (preform) adı verilen yapılar kullanılmaktadır. Öncüler, tuz veya aglomere edilmiş refrakter parçacıklardan oluşmaktadırlar. Tuzdan yapılan öncü malzemeler kullanıldığında metal malzemede tuzdan dolayı hasar oluşabilmektedir. Bu durum için bazı çözüm yolları olsa bile Dairon ve arkadaşları aglomere edilmiş refrakter parçacıkları öncü olarak kullanmaktadırlar. **Şekil 2.31**'de gösterildiği gibi öncü malzemeler rastgele kalıp içerisinde yerleştirilirler ve sonrasında metal malzeme kalıba dökülür. Dökülen metal katılaştıktan sonra öncü yapılar kolayca çıkarılarak açık hücreli metal köpük üretilir. Aglomere edilmiş refrakter parçacıklardan oluşan öncüler içerisindeki bağlayıcılar, döküm esnasında yanarak uzaklaşır ve sonrasında öncüler kolayca çıkarılabilir (Dairon vd., 2011).



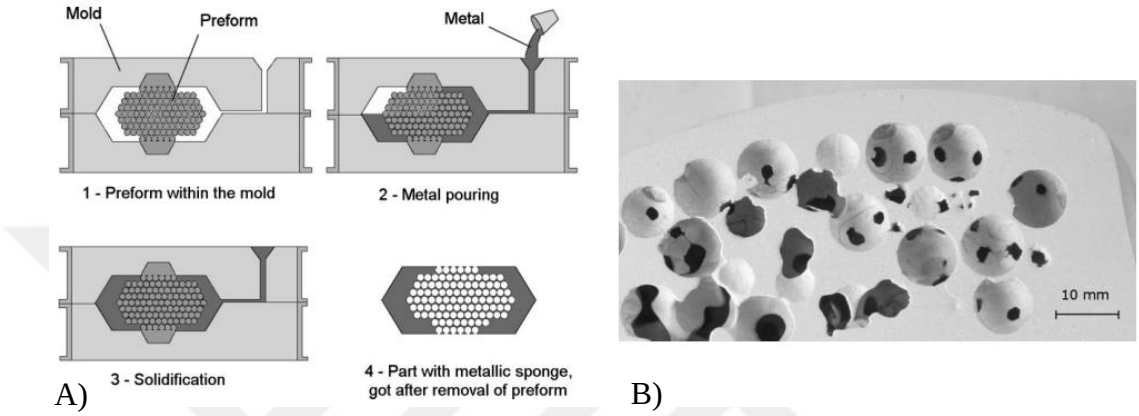
Şekil 2.31. Öncüler kullanılarak döküm metodu ile açık hücreli metal köpük üretim aşamaları (Dairon vd., 2011)

Yukarıda anlatılan üretim yöntemi ile ortaya çıkan açık hücreli metal köpüklerin dış yüzeylerinde boşluklar bulunmaktadır. Bazı durumlarda dış yüzeyin düzgün olması istenebilir. Bunun için en ucuz yöntem aşağıda **Şekil 2.32 a, b**'de gösterilmektedir. Metal köpük üzerine ikinci bir döküm yapılarak açık hücreli metal köpüğün dış yüzeyleri kaplanabilmektedir. Ancak bu yöntemde şekilden görülebileceği gibi yapılar arasında bazı bağ kusurları oluşmaktadır. Bu durum açık hücreli metal köpüğün termal özelliklerini etkilemektedir (Dairon vd., 2011).



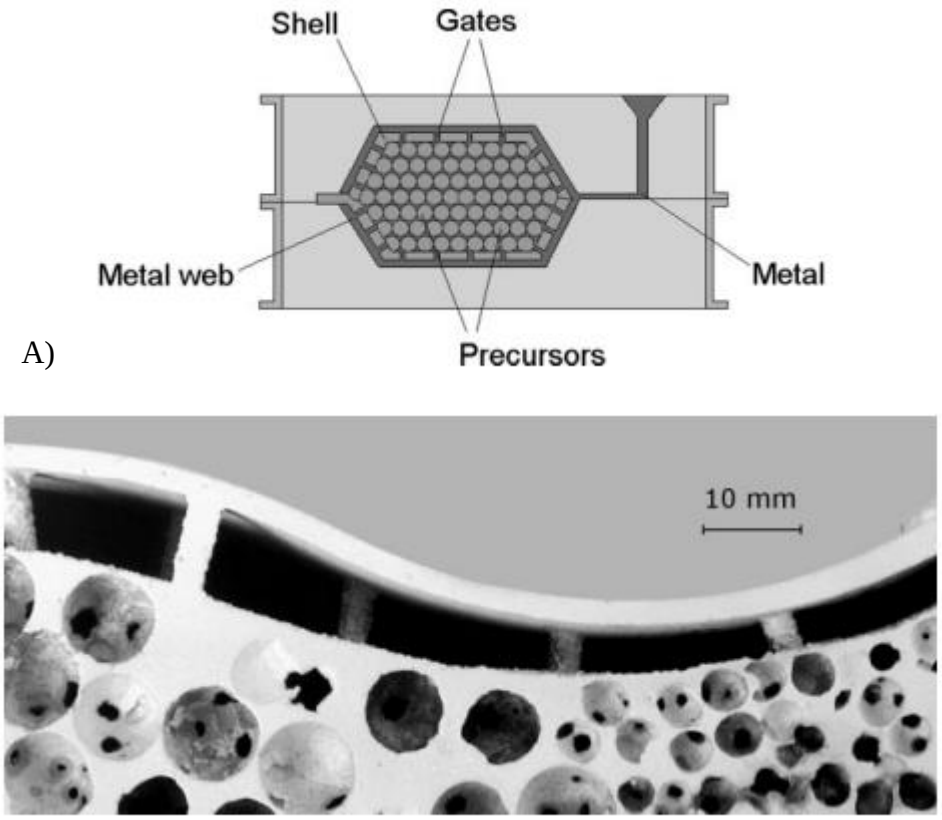
Şekil 2.32. Açık hücreli metal köpük üzerine döküm yapılarak kaplama işlemi. **A)** Üretim süreci **B)** Örnek parça (Dairon vd., 2011)

Yukarıdaki problemlerin oluşmaması için kullanılabilecek üretim yöntemlerinden birisi **Şekil 2.33 a, b**'de gösterilen aglomerasyon tekniğidir. Öncü yapılar şekilden görüldüğü gibi hazırlanarak kalıba yerleştirilir ve daha sonra metal dökme işlemi gerçekleştirilir. Katılaştıktan sonra öncü yapılar çıkarılarak metalürjik süreklilik içeren bir açık hücreli metal köpük üretilmiş olur (Dairon vd., 2011).



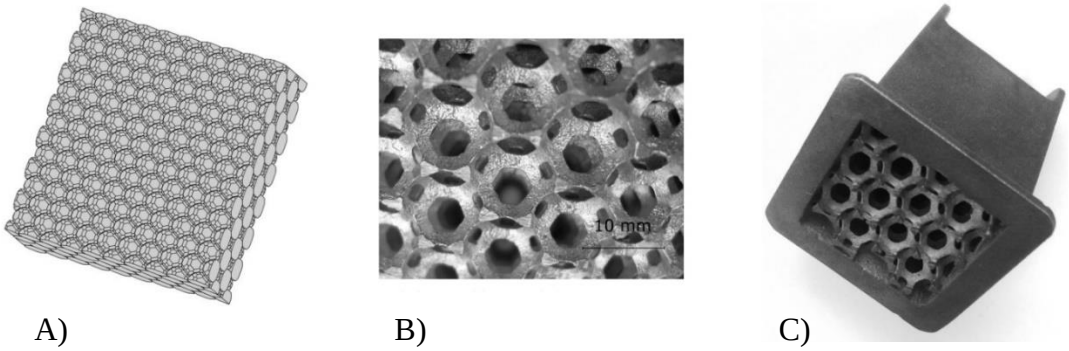
Şekil 2.33. Aglomerasyon tekniği ile üretilen açık hücreli metal köpük. **A)** Üretim süreci **B)** Örnek parça (Dairon vd., 2011)

Açık hücreli metal köpüğe dış yüzey oluşturmak için bir diğer üretim yöntemi ise **Şekil 2.34 a, b**'de gösterilen ara yapı tekniğidir. Bu üretim yönteminde şekilde gösterildiği gibi öncüler, üzerinde boşluklar bulunan bir kabuk kutu içerisine yerleştirilerek döküm kalıbına konulur. Daha sonra metal dökümü gerçekleştirilir. Kabuk ve öncü yapılar daha sonra çıkarılarak, dış yüzeyi bulunan bir açık hücreli metal köpük üretilmiş olur. Bu yapılarda dış yüzey ile açık hücreli köpük yapı arasında bir ara yapı bulunur (Dairon vd., 2011).



Şekil 2.34. Ara yapı tekniği ile üretilen açık hücreli metal köpük. **A)** Üretim süreci **B)** Örnek parça (Dairon vd., 2011)

Yukarıda anlatılan üretim yöntemleri dışında döküm yöntemi ile **Şekil 2.35 a, b, c**'de görülen düzenli açık hücreli metal köpükleri üretmek mümkündür. Bu yöntem için çok sayıda polihedrondan oluşan plakaların istiflenmesiyle oluşan tek parçalı öncü (preform) kullanılmaktadır. Oluşturulan öncü yapı daha sonra kalıba yerleştirilir ve önceki yöntemlerde olduğu gibi döküm işlemi gerçekleştirilir. Döküm işleminden sonra öncü yapı çıkarılarak düzenli açık hücreli metal köpük üretilir. **Şekil 2.35 a, b, c**'de solda öncü yapı gösterilmektedir. Ortadaki resimde Kelvin yapılı düzenli açık hücreli alüminyum köpük gösterilmektedir. Sağda ise düzenli açık hücreli köpük içeren dökme demir bir parça gösterilmektedir (Dairon vd., 2011).



A) B) C)

Şekil 2.35. Düzenli açık hücreli metal köpük örnekleri. **A)** Öncü yapı **B)** Kelvin yapılı düzenli açık hücreli alüminyum köpük **C)** Düzenli açık hücreli köpük içeren dökme demir bir parça (Dairon vd., 2011)

2.7. Kapalı Hücreli Metal Köpükler

Metal köpükleri birçok farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Hücre yapılarına göre sınıflandırıldığında açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Kapalı hücreli metal köpüklerde hücreler birbirlerinden bağımsızdır. Hücreler aralarında bulunan ince metal hücre duvarları ile birbirlerinden ayrılmışlardır. Bu durumu daha iyi izah etmek için **Şekil 2.36**'da kapalı hücreli metal köpük resmi örnek olarak gösterilmiştir (Rajak & Gupta, 2020).

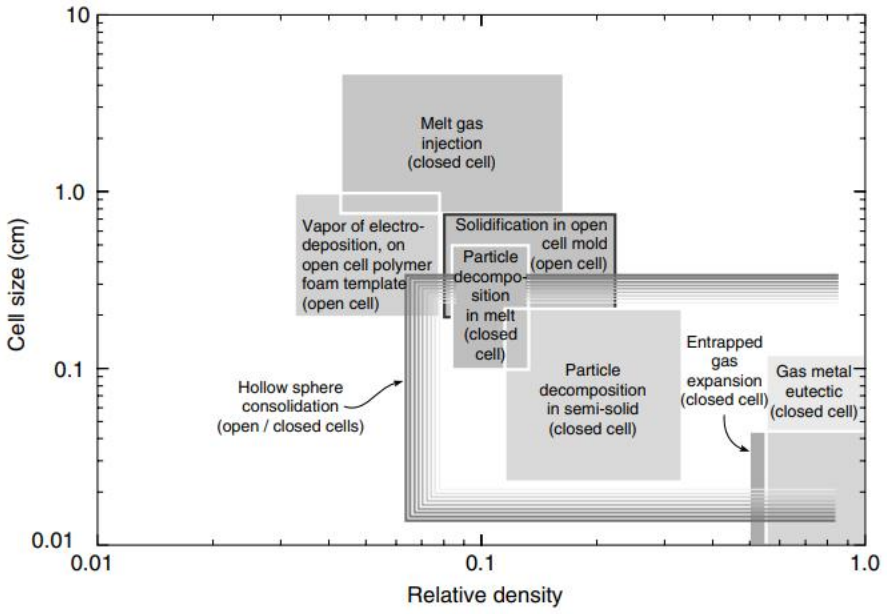


Şekil 2.36. Kapalı hücreli metal köpük yapılara ait örnek bir resim (Rajak & Gupta, 2020)

Kapalı hücreli metal köpükler, sahip oldukları iyi mekanik özelliklerden dolayı daha çok, yük taşıyan ve yapısal uygulamalar için kullanılmaktadır. Darbe emilimi özellikleri iyidir. Bu nedenle yüksek darbeli yerlerde kapalı hücreli metal köpükler daha çok tercih edilir. (Rajak & Gupta, 2020).

2.8. Kapalı Hücreli Metal Köpüklerin Üretimi

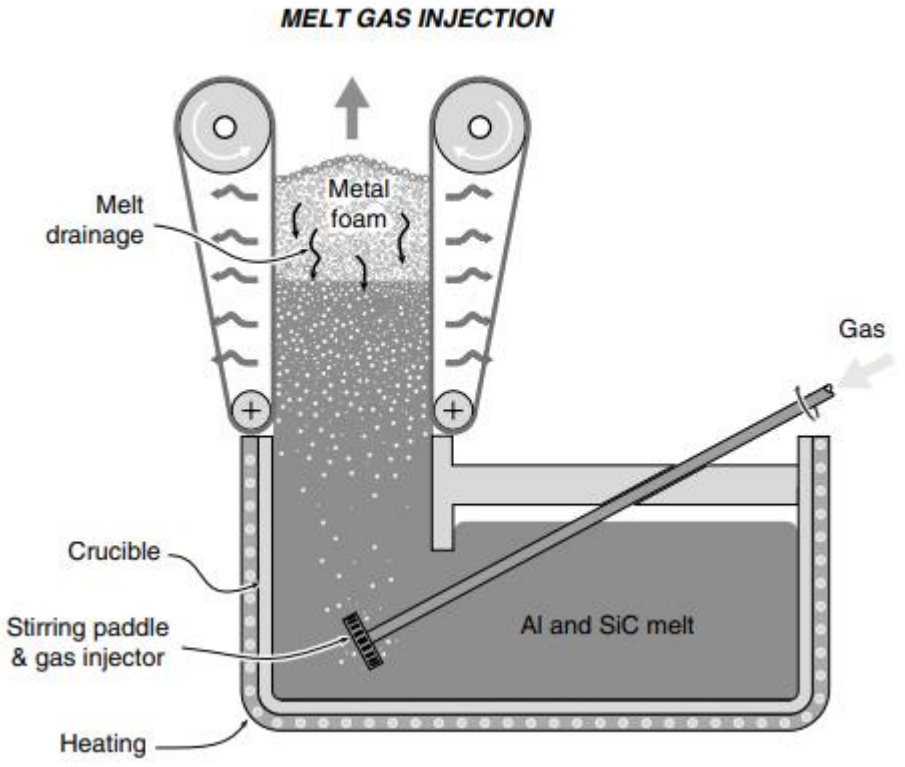
Metal köpükleri üretmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bazı kaynaklar bu yöntemleri sınıflandırmaya çalışmışlardır. Köpüğün üretim aşamasında bulunduğu duruma göre sınıflandırmalar yapılmıştır. Genel olarak köpük üretim yöntemleri köpükler katı halde, sıvı halde, buhar fazında ve elektrikli biriktirme yapılması için sulu çözeltide olmak üzere dört farklı gruba ayrılmaktadır. Bulundukları duruma göre farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları açık hücreli bazıları kapalı hücreli köpük üretimi için kullanılmaktadır. Bu kısımda kapalı hücreli metal köpük üretimi için en bilinen yöntemlerden bahsedilecektir. Aşağıdaki **Şekil 2.37**'de bazı metal köpük üretim yöntemleri ve ortaya çıkacak metal köpüklerin bağıl yoğunluk, hücre boyutu ve açık, kapalı hücre olma durumları verilmiştir (Ashby vd., 2000).



Şekil 2.37. Metal köpük üretim yöntemleri ve bağıl yoğunluk, hücre boyutu özellikleri (Ashby vd., 2000)

2.8.1. Erimiş metale gaz enjeksiyonu

Gaz enjeksiyon metodu ile kapalı hücreli metal köpükler üretmek mümkündür. Bu yöntemin alüminyum alaşımlarına uygulanması oldukça kolaydır. Genellikle alüminyum alaşımı ana metal olarak kullanılır. Alüminyum köpüklerin üretimi sırasında erimiş metal içerisine alümina, zirkonya, silisyum karbür veya titanyum diborür gibi küçük seramik parçacıklar ilave edilerek erimiş metalin viskozitesi yükseltilir ve köpük stabilize hale getirilir. Erimiş alüminyum içerisinde kabarcıkların oluşturulması için en yaygın olarak hava olmakla birlikte çeşitli gazlar kullanılabilir. Bu gazlar özel olarak tasarlanmış titreşimli nozullar veya döner pervaneler kullanılarak gaz kabarcıklarının oluşması ve bu kabarcıkların düzgün bir şekilde dağılması için erimiş metal içerisine enjekte edilir ve erimiş metal köpürtülür. Daha sonrasında oluşan metal köpük örneğin bir bant (konveyör) yardımıyla dışarı alınarak soğutulur ve katılaştırılır. Üretim yöntemi ile ilgili bir şema **Şekil 2.38**'de gösterilmiştir (Ashby vd., 2000; Babcsán vd., 2003).



Şekil 2.38. Gaz enjeksiyon yöntemiyle metal köpük üretimi (Ashby vd., 2000)

Erimiş metal içerisine gaz enjeksiyonu ile köpük üretimi doğrudan köpürtme yöntemi olarak sayılır. Düşük yoğunlukların elde edilebilmesi ve büyük hacimli köpüklerin devamlı olarak üretilebilmesi bu yöntemin avantajları arasındadır (Babcsán vd., 2003). Kanada'da bulunan Cymat Technologies firması tarafından, gaz enjeksiyon yöntemi kullanılarak alüminyum köpük malzemeler üretilmektedir. **Şekil 2.39**'da Cymat Technologies firmasının kendi internet sitesinden alınan alüminyum köpük malzeme resimleri gösterilmektedir (Cymat Technologies, 2021).

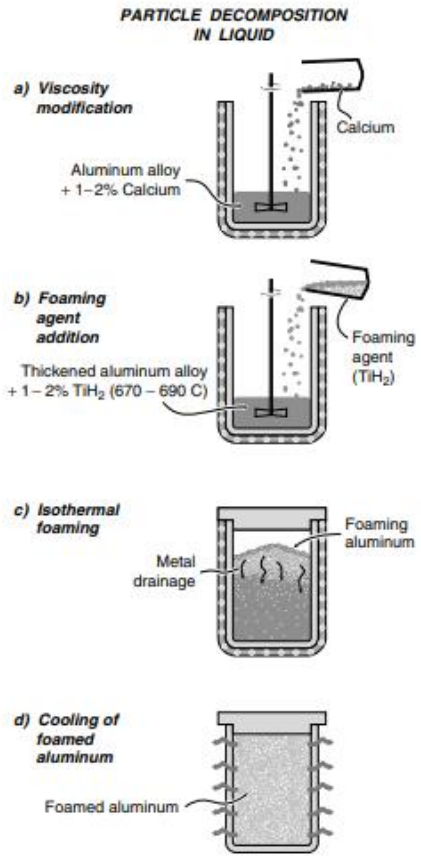


Şekil 2.39. Cymat Technologies firması tarafından üretilen alüminyum köpükler (Cymat Technologies, 2021)

2.8.2. Erimiş metal içerisinde köpük oluşturan parçacıklar

Bu yöntemde ısıtıldıklarında gaz açığa çıkaran maddeler kullanılarak metal köpük üretimi gerçekleştirilir. **Şekil 2.40 a, b, c, d**'de örnek olarak alüminyum köpüğün üretim aşamaları verilmiştir. Öncelikle alüminyum alaşımı erimiş hale getirilir. Daha sonrasında erimiş haldeki alüminyumun viskozitesini arttırmak için kalsiyum elementi eklenir. Daha sonra erimiş metal karıştırılır. Sonrasında erimiş haldeki alüminyum içerisinde ayrışarak gaz açığa çıkaracak olan TiH_2 eklenir. TiH_2 465 ˚C'nin üzerine ısıtıldığında ayrışarak gaz açığa çıkarır ve köpük oluşmasını sağlar. Köpük oluşmasına izin vermek için karıştırma işlemi bırakılır. Yapı yavaşça genişlemeye başlar ve

bulunduğu kabı doldurmaya başlar. Daha sonra yapı soğutulup katılaştırılarak alüminyum köpük oluşturulur. Bu yöntem ile üretilen Alporas adlı ticari alüminyum köpükler mevcuttur. Bu üretim metodu kullanılarak kapalı hücreli metal köpükler üretmek mümkündür (Ashby vd., 2000; Babcsán vd., 2003).



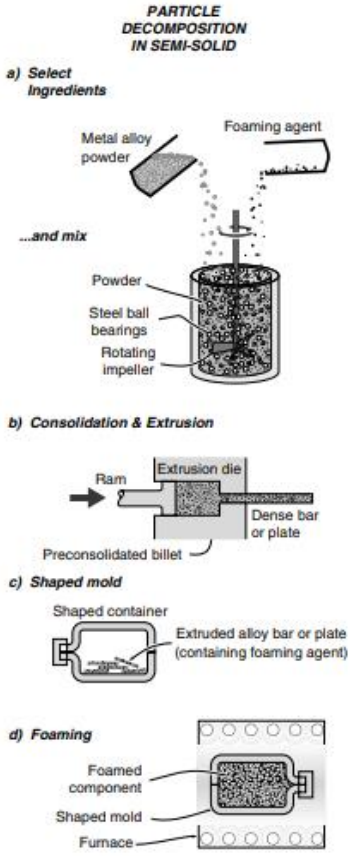
Şekil 2.40. Erimiş metal içerisinde gaz salan parçacıkların kullanılması ile alüminyum köpük üretimi. **A)** Vizkozite modifikasyonu, **B)** Köpükleştirici ajan eklenmesi, **C)** Köpükleşme **D)** Soğutma süreci (Ashby vd., 2000)

2.8.3. Toz haldeki metale köpükleştirici ajan eklenmesi

Bu yöntemde belirli bir sıcaklığa geldiğinde ayrışarak gaz açığa çıkaran köpükleştirici parçacıklar metal alaşıma, alaşım katı halde iken eklenir. Daha açıklayıcı olması için işlem adımları **Şekil 2.41 a, b, c, d**'de örnek olarak gösterilmiştir. Metal alaşımı toz halde iken köpük oluşmasını sağlayacak olan parçacıklar ile karıştırılır ve bileştirilir. Daha sonra oluşan yapı sıkıştırılır ve şekillendirilir. Sonrasında oluşan kompakt yapılar

kapalı bir kalıp içerisine konulur. Daha sonra kalıp ısıtılır. Belirli bir sıcaklıktan sonra yapı içerisinde bulunan parçacıklar ayrışarak gaz açığa çıkarırlar. Daha sonra yarı katı veya erimiş halde bulunan metal alaşımı kalıp içerisinde genişler. Sonrasında soğutma işlemi gerçekleştirilir ve metal köpük oluşturulur. Bu yöntem kullanılarak kapalı hücreli metal köpükler üretilebilir (Ashby vd., 2000).

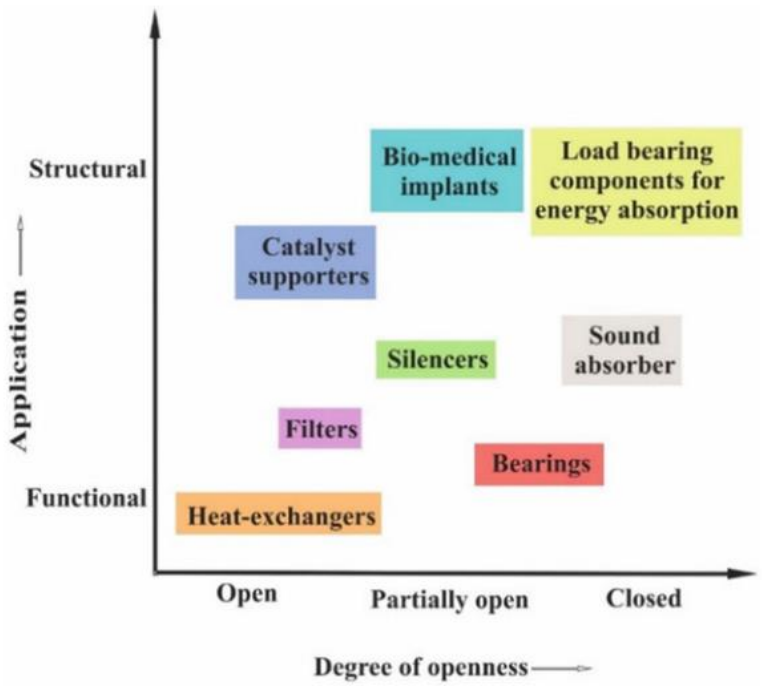
Bu yöntem kullanılarak ve köpükleştirilecek metal ve alaşımları için uygun köpükleştirici ajanlar seçilerek altın, kurşun, çinko, kalay, alüminyum ve alaşımları ve diğer bazı metallerden metal köpük oluşturmak mümkündür. Bu yöntemin önemli avantajlarından birisi de hazırlanan ön yapının kalıp içerisine konulup daha sonra köpürtülmesi ile karmaşık yapılı metal köpüklerin üretilmesini mümkün kılmasıdır (Babcsán vd., 2003).



Şekil 2.41. Katı haldeki metal alaşımına köpük oluşturacak parçacıkların eklenmesi ile metal köpük üretimi. **A)** Malzemelerin karıştırılması **B)** Ekstrüzyon **C)** Kalıp içerisine yerleştirme **D)** Köpükleşme (Ashby vd., 2000)

2.9. Metal Köpüklerin Kullanım Alanları

Metal köpükler, sahip oldukları çeşitli özelliklerden dolayı birçok farklı alanda kullanım potansiyeli bulmaktadırlar. Hafif yapıda olmaları, enerji sönümleyebilmeleri, elektriksel, ısıl ve akustik özelliklerinin olması metal köpük malzemeleri çok işlevli hale getirmekte ve kullanım potansiyelini arttırmaktadır. Metal köpükler havacılık, otomotiv, kimya endüstrisinde, biyomedikal alanlarda ve yapısal alanlarda kendine yer bulmaktadır. Kullanım alanlarını belirleyen bazı parametreler bulunmaktadır. Kullanılacakları yere göre metal köpük malzemelerden beklenen özellikler değişmektedir. Üretim yöntemi, kullanılan malzeme ve açık veya kapalı hücreli olma durumu metal köpüklerin özelliklerini belirlemektedir. Bunların dışında metal köpüklerin işlenebilme özellikleri ve maliyetleri de kullanım alanlarını etkilemektedir. Örneğin **Şekil 2.42**'de metal köpüklerin hücre yapılarına göre bazı kullanım alanları örnek olarak verilmiştir (Rajak & Gupta, 2020). Bundan önceki kısımlarda bazı konu başlıklarının altında kullanım alanları ile ilgili birtakım örnekler verilmiştir. Bu kısımda metal köpüklerin kullanım alanları daha detaylı ele alınacaktır.



Şekil 2.42. Metal köpüklerin hücre yapılarına göre kullanım alanı örnekleri (Rajak & Gupta, 2020)

Metal köpükler çok farklı alanlarda kullanılabilir. Örneğin hafif yük taşıyıcı panel olarak kullanılarak stantlarda, masalarda, vagonlarda, gemilerde, kapı ve zeminlerde veya mobilya alanında kullanılabilirler (Simancik, 2001).

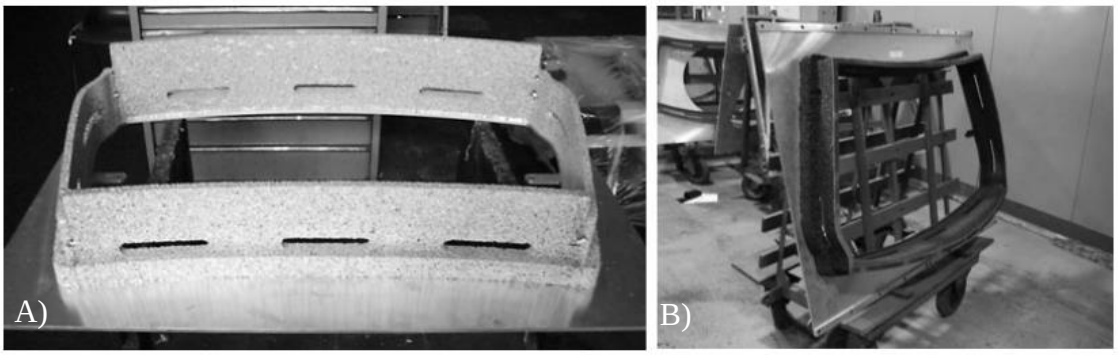
Hassas cihazları veya taşıt içerisindeki yolcuları ani çarpmalardan, darbelerden korumak için metal köpük malzemeler kullanılabilir. Çarpma sırasında gelen enerjiyi plastik deformasyona dönüştürerek yolcu ve cihazların hasar almasını engelleyerek koruyabilirler. Metal köpük malzemenin yoğunluğuna göre enerji emme kapasitesi değişmektedir. Bu tarz yerler için başka enerji emici malzeme ve sistemler olabilir. Fakat birden fazla yönde darbe olması durumunda metal köpükleri kullanmak daha uygundur. Otomotiv endüstrisinde alüminyum esaslı metal köpüklerin kullanımı üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Arabalarda gövde bölümlerinde, motor taşıyıcı bölümlerinde ve süspansiyon kısımlarında kullanım potansiyeli bulunmaktadır (Simancik, 2001). İçi boş olan metalik parçaların boş kısımlarının metal köpük ile doldurulması mekanik özellikleri iyileştirir. Enerji absorbe etme özelliklerini iyileştirir. Burulma ve burkulmaya karşı direnç gibi çeşitli mekanik özellikleri iyileştirir. Gürültü ve titreşimi azaltır (Simančík & Schoerghuber, 1998). **Şekil 2.43**'te köpüklü motor taşıyıcı parçanın darbe almış hali gösterilmiştir.



Şekil 2.43. Köpüklü motor taşıyıcı parçanın darbe almış hali (Simancik, 2001)

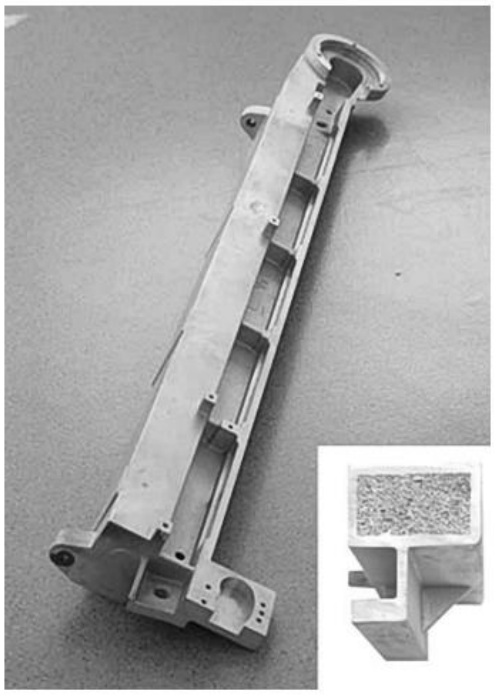
Son yıllarda yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere bazı şirketler tarafından üretilip, ticarileştirilen kapalı hücreli alüminyum köpük ve alüminyum köpük sandviç yapılar bulunmaktadır. Bir dizi şirket alüminyum köpük üretimi gerçekleştirmektedir. Bunlara birkaç örnek olarak Japonya'da bulunan Shinko Wire şirketi veya Avusturya'daki Alulight verilebilir (Lefebvre vd., 2008).

Japonya'da bulunan Shinko Wire şirketi, uzun yıllardır faaliyet gösteren alüminyum köpük üreticisidir. Alporas adını verdikleri alüminyum köpük ürünlerini üretip satmaktadırlar. Alüminyum köpük ürünlerinin ısı direnci özellikleri ve hafif yapıda olmaları kullanım alanları için önemli rol oynar. Hafif yapıda olmaları, hafif yapısal bileşen istenen yerler için önemlidir. Örneğin **Şekil 2.44 a, b**'de gösterilen alüminyum köpük malzemenin kullanıldığı vakumlu kaldırma aletinde alüminyum malzemesi yerine Alporas köpüğü kullanılarak ağırlık yaklaşık olarak 82 kg'dan 32 kg'a düşürülmüştür (Lefebvre vd., 2008).



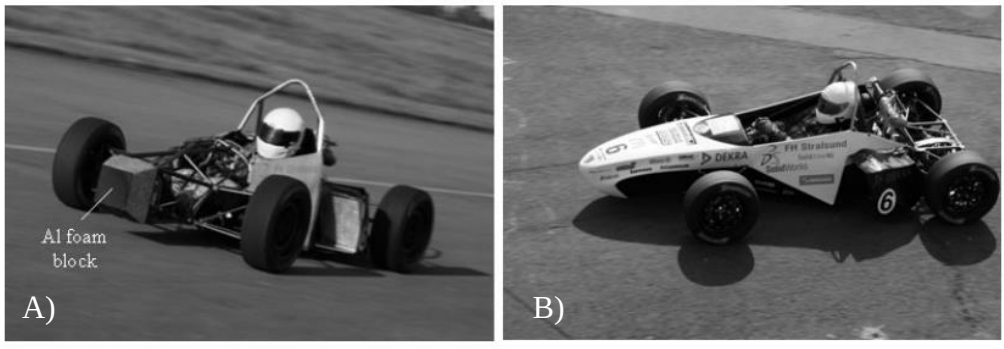
Şekil 2.44. Alporas köpük kullanılan vakumlu kaldırma aleti. **A)** Önden görünüşü **B)** Çaprazdan görünüşü (Lefebvre vd., 2008)

Bir başka örnek olarak freze ve kesme makinelerinde kullanılan alporas köpüklü yük taşıyıcı kiriş **Şekil 2.45**'te gösterilmiştir. Buradaki parça kapalı hücreli alüminyum köpük çekirdeklerin dökme alüminyum alaşımları ile kaplanması ile oluşturulmuştur. Parçanın iyi bir titreşim sönümleme kapasitesi vardır. Köpük kullanılmayan parça ile karşılaştırıldığında, köpüklü parça titreşim seviyesini %60 azaltabilmektedir (Lefebvre vd., 2008).



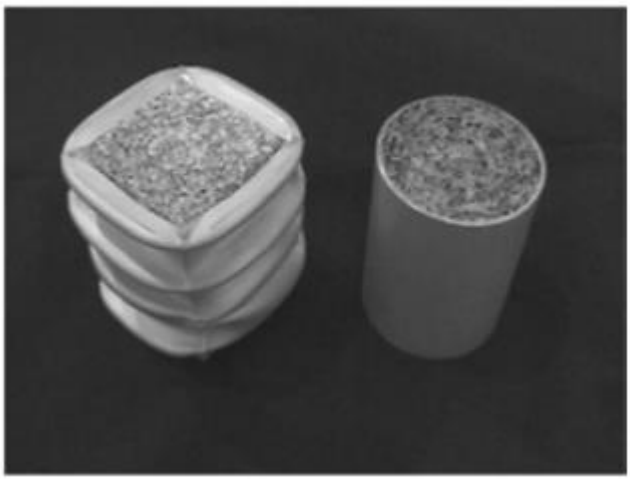
Şekil 2.45. Freze ve kesme makinelerinde kullanılan Alporas köpük çekirdekli kiriş (Lefebvre vd., 2008)

Alüminyum köpük malzemelerin iyi enerji absorbe etme özellikleri sayesinde araçlarda çarpmalara karşı enerji emici sistemler olarak kullanılması üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Örneğin Almanya'da bulunan Stralsund Teknoloji Üniversitesi'ndeki öğrenciler, model bir yarış arabasının (**Şekil 2.46 a, b**) şasisinin ön tarafına Alporas metal köpük blok koyarak çarpma elemanı sistemi olarak kullanmışlardır (Lefebvre vd., 2008).



Şekil 2.46. Alporas metal köpüğünün model yarış arabasında çarpışma koruyucusu olarak kullanılması. **A)** Köpük konulan kısım **B)** Aracın komple hali (Lefebvre vd., 2008)

Araçlarda kullanılan çarpışma kutuları (crash boxes) öncelikle araç içindeki yolcuların güvende kalması, sonrasında aracın önemli parçalarının hasar almaması ve kaza maliyetlerinin azaltılması için kullanılmaktadır. Alüminyum köpük malzemelerin otomotiv alanında, çarpışma kutularında enerji emici olarak kullanılması önemli görülmektedir. Çarpışma kuturları, çarpma sırasında plastik deformasyona uğrayarak enerjiyi emmek için kullanılırlar. Burada enerji emici sistem olarak içi boş tüpler kullanılabilir ve darbe sonucunda kıvrımlar oluşturarak plastik deformasyona uğrayıp enerji absorbe edebilirler. Ancak içi boş tüp yerine içerisinde alüminyum metal köpük çekirdek bulunan tüpler kullanıldığında daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür. Ayrıca sadece alüminyum köpük kullanmak yerine alüminyum köpük çekirdek ile doldurulmuş tüp kullanıldığında daha fazla enerji absorbe edilmektedir. Aşağıdaki **Şekil 2.47**'de içi Cymat alüminyum köpüğü ile dolu tüpün deforme olmuş hali gösterilmektedir. Cymat firması Valeo ile çarpışma kutusu tasarlamak için ortak olarak çalışmaktadırlar (Banhart, 2005).

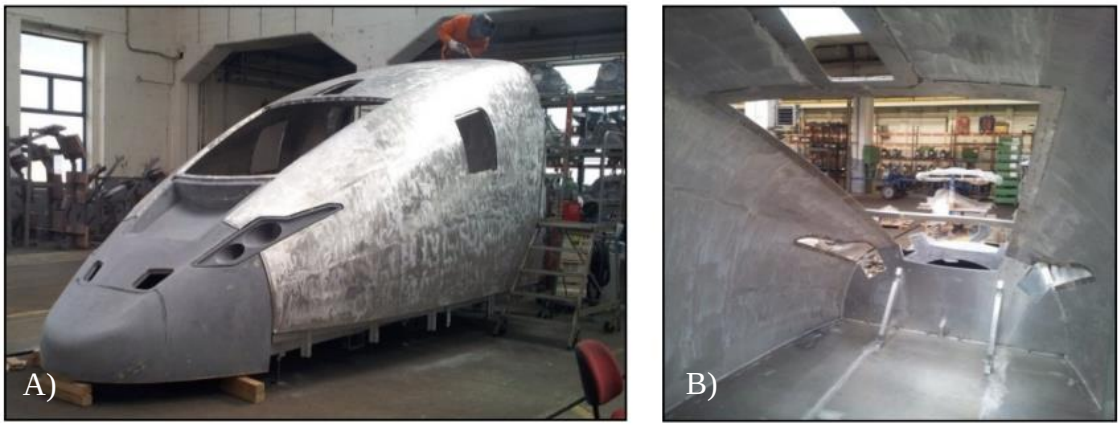


Şekil 2.47. İç kısmı Cymat alüminyum köpüğü ile dolu tüpün deforme olmuş hali (Banhart, 2005)

Metal köpüklerin bir başka kullanım alanı da NiMH ve NiCd piller için elektrot olarak kullanılabilmesidir. Bu kullanım alanı için Vale Inco şirketi büyük çapta nikel köpük üretimi gerçekleştirmektedir (Lefebvre vd., 2008).

Metal köpükler sahip oldukları akustik özelliklerden dolayı da kendilerine önemli kullanım alanları bulmaktadırlar. Gürültülü ortamlarda gürültüyü azalmak için metal köpükler kullanılabilir. Örneğin Alporas alüminyum köpükler gürültü azaltmak için kullanılabilirler (Rajak & Gupta, 2020).

Diğer alanlarda olduğu gibi ulaştırma alanında, demiryolu ve raylı sistemlerde metal köpükler kullanılabilmektedir. Örneğin metal köpükler, özellikle alüminyum köpükler, trenlerin lokomotiflerinde enerji absorbe etmeleri, hafif yapıda olmaları ve gürültü/ ses yönetimi için kullanılmaktadırlar. Kaza riskinin yüksek olduğu şehir için hatlarındaki tren ve tramvaylarda metal köpük kullanımı önem kazanmaktadır. Örneğin enerji absorbe edici sistemler olarak Alporas alüminyum köpük blokları Japon trenlerinde kullanılmaktadır. Bir başka örnek olarak **Şekil 2.48 a, b**'de alüminyum köpük sandviç yapının prototip Alman yüksek hızlı treninde kullanımı gösterilmiştir (Rajak & Gupta, 2020).



Şekil 2.48. Alman yüksek hızlı tren prototipinde alüminyum köpük sandviç yapının kullanımı. **A)** Dışarıdan görünüşü **B)** İçeriden görünüşü (García-Moreno, 2016)

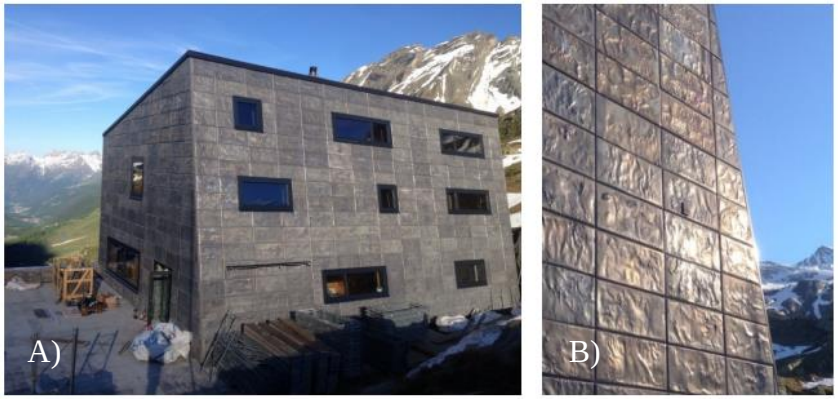
İnşaat sektöründe ve binalarda, metal köpüklerin kullanımı için uygun yerler bulunmaktadır. Metal köpükler bina cephelerinde ve asansör sistemlerinde kullanılabilirler. Hafif yapıda olmaları asansörlerde enerji verimliliği açısından önemlidir. Ayrıca asansör sistemlerinde metal köpükler enerji emici sistemler olarak yer alabilirler (Rajak & Gupta, 2020).

Metal köpükler mimari açıdan binaların cephelerine kaplanmak için kullanılabilirler. Örneğin 2003 yılında, Almanya'daki ofis binasını, mimar Slawomir Kochanowicz kapalı hücreli Alporas alüminyum köpüğü ile kaplamıştır. Bir başka örnek olarak **Şekil 2.49**'da verilen İspanya'nın Terrasa şehrinde bulunan bir Protestan kilisesinin dış cephesi Cymat firması tarafından kaplanmıştır (García-Moreno, 2016).



Şekil 2.49. Cymat firması tarafından İspanya'nın Terrasa şehrinde bulunan bir Protestan kilisesinin dış cephesinin Alusion köpük ile kaplanması (García-Moreno, 2016)

Bir başka örnek olarak 2015 yılında Pohltec Metalfoam'ın İsviçre'de bulunan bir kulübenin dış cephesini kaplaması **Şekil 2.50 a, b**'de gösterilmiştir. Yüksek rakımda bulunan kulübenin güçlü hava koşullarından korunması için alüminyum köpük sandviç (AFS) yapılar kullanılmıştır (García-Moreno, 2016).

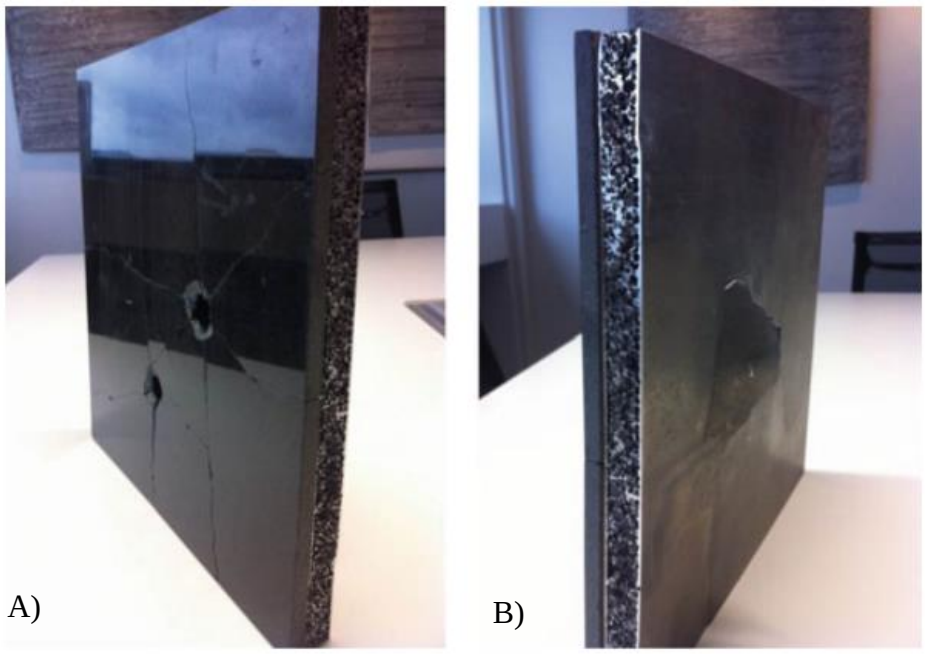


Şekil 2.50. Dış cephenin AFS yapılar ile kaplanması. **A)** Uzaktan görünüşü **B)** Yakından görünüşü (García-Moreno, 2016)

Metal köpükler burada sayılanların dışında, makine bileşenlerinde, biyomedikal uygulamalarda, fonksiyonel uygulamalarda, ısı eşanjörleri ve soğutma makinelerinde, pil elektrotlarında, yangın tehlikesi olan yerlerde alev tutucu olarak ve akustik kontrol olmak üzere pek çok alanda kullanılabilirler (Rajak & Gupta, 2020).

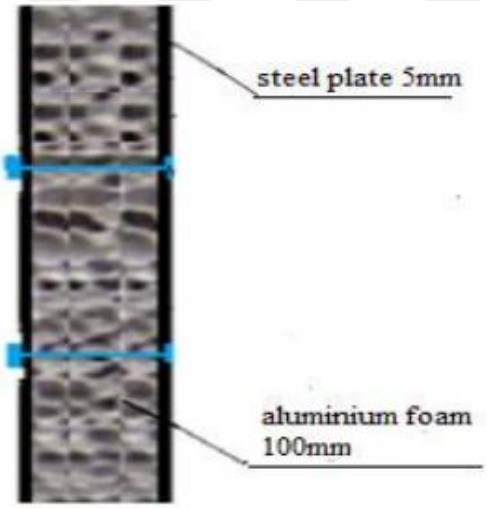
Alüminyum köpük malzemeler, kurşun geçirmez zırhlar için kullanılabilirler. Alüminyum köpük malzemelerin enerji soğurma özellikleri sayesinde birim alan başına düşen kurşun çarpma kuvveti azalır. Bu sayede kurşunun zırhı delmesi önlenebilir (Yao vd., 2014).

Metal köpüklerin kurşun önleme malzemesi olarak kullanılmasına ilişkin araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalara ait bir örnek **Şekil 2.51 a, b**'de gösterilmiştir. Burada alüminyum köpük sandviç yapı, sert bir taş yapı ile kullanılmıştır. Gelen mermi önce taş plakaya çarparak parçalanır. Ardından parçalanan mermi alüminyum köpük sandviç yapı tarafından durdurulur ve enerjisi dağıtılır. Bu birleşik yapı çeşitli silahlardan atılan kurşunları önlemede etkili olmuştur (Banhart vd., 2019).



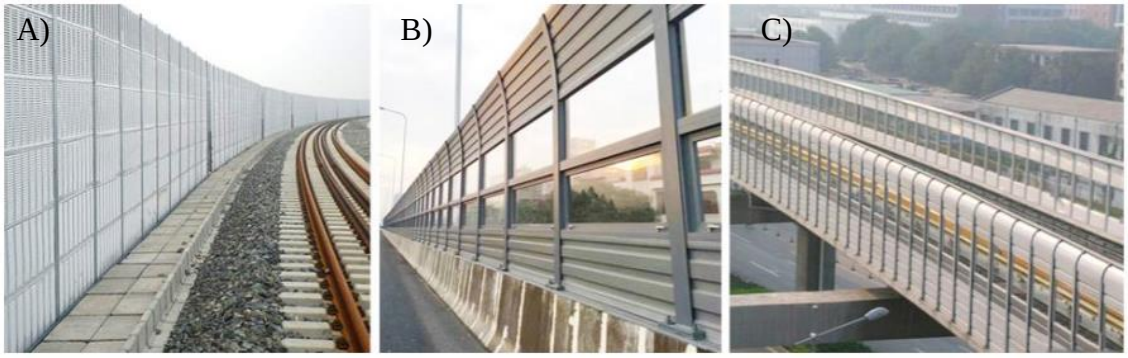
Şekil 2.51. Alüminyum köpük sandviç yapı ile granit taş yapı bileşiminin kurşun önleme özelliği. **A)** Önden görünüşü **B)** Arkadan görünüşü (Banhart vd., 2019)

Alüminyum köpük malzemelerin diğer bir kullanım alanı örneği olarak patlamaya dayanıklı kapılar örnek verilebilir. Günümüzde kullanılan patlamaya dayanıklık kapılar genellikle güçlendirilmiş beton ve çelikten imal edilmektedirler. Bu kapıların kalınlıkları 300 – 400 mm arasında değişmektedir. Kütleleri ise 20 – 30 ton arasında değişmektedir. Bu nedenle kapıların hareket ettirilmesi zor olmaktadır. Bunun yerine alüminyum köpük ve karbon çelik levhadan yapılan patlamaya dayanıklı kapılar (**Şekil 2.52**) daha düşük kalınlıklarda olabilmektedirler. Ayrıca bu kapılar daha hafif yapılı kapılardır. Alüminyum köpük malzeme kullanılarak üretilen patlamaya dayanıklı kapılar geleneksel patlamaya dayanıklı kapılara kıyasla, patlamaya karşı daha yüksek mukavemet göstermektedirler (Yao vd., 2014).



Şekil 2.52. Alüminyum köpük içeren hafif yapılı patlamaya dayanıklı kapı örneği (Yao vd., 2014)

Alüminyum köpük malzemesi birçok fonksiyonu olan ve farklı amaçlar için kullanılabilecek bir malzemedir. Birçok farklı alanda kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Örneğin gürültü ve ses emici özelliğinden dolayı ses yalıtımı amacıyla binalarda kullanılabilmektedir. Ayrıca ses bariyeri olarak otobanlarda, anayollarda ve yüksek hızlı tren raylarında kullanılabilmektedir. Yüksek hızlı trenler nedeniyle oluşan gürültüler, alüminyum köpük kullanarak 20 dB'den fazla azaltılabilmektedir (Yao vd., 2014). Alüminyum köpük malzemelerin gürültü önleme amacıyla ilgili kullanımlarına ilişkin bazı örnekler **Şekil 2.53 a, b, c**'de gösterilmiştir.



Şekil 2.53. Alüminyum köpük malzemenin gürültü önlemek amacıyla otoyol ve tren yollarında kullanılması. **A)** Tren yolunda kullanımı **B)** Otoyolda kullanımı **C)** Otoyolda kullanımı uzaktan görünüşü (China BeiHai, 2023)

2.10. Metal Köpüklerin Havacılık ve Savunma Sanayisindeki Kullanım Alanları

Otomotiv sektörü dışında havacılık ve uzay alanında da metal köpükler kendine, giderek daha fazla kullanım yeri bulmaktadır. Hafif yapıda olmaları, yangına ateşe dayanıklı olmaları havacılık ve uzay uygulamaları için önem taşımaktadır. Metal köpük yapılar yerine bal peteği yapılarda tercih edilebilir. Ancak metal köpük yapılar, bal peteği yapılara kıyasla izotropik mekanik özellikler sağlayarak ve yapıştırıcı madde kullanmadan kompozit yapılar tasarlamada avantaj sağlarlar. Ayrıca daha verimli ve daha düşük maliyetli yapılar oluşturulmasına olanak sağlarlar. Metal köpükler türbin kanatlarında ve motor contalarında kullanılabilirler. Boeing firması titanyum köpük sandviç yapıları ve alüminyum köpük sandviç yapıları uçak ve helikopterlerde kullanmaktadır. Metal köpükler uzay alanında da potansiyel oluşturmaktadırlar (Rajak & Gupta, 2020).

Metal köpük malzemeler, mukavemetli olmaları ve aynı zamanda hafif olmaları gibi özellikleri nedeniyle çok işlevli hafif malzemelere ihtiyaç duyulan havacılık ve uzay alanları için önemli malzemeler olmaktadır. Ensarioğlu vd. (2022), metal köpükler ve metal köpüklerin havacılık alanındaki uygulamalarına ait bugüne kadar yapılan çalışmaları derleyip anlattıkları bir çalışma ortaya koydular. Çalışmalarında öncelikle metal köpüklerin özeliklerine, üretim yöntemlerine ve bunların detaylarına yer verdiler. Çalışmada, açık hücreli ve kapalı hücreli metal köpüklerin birincil üretimlerinin yanı sıra, kesme, birleştirme, şekillendirme, kaplama gibi ikincil üretim yöntemleri ve

bunların avantaj/dezavantajları da aktarılmıştır. Ayrıca havacılık ve uzay alanındaki kullanım potansiyelleri, bugüne kadar yapılan çalışmalar örnekler ile anlatılmıştır (Ensarioglu vd., 2022).

Bunların dışında alüminyum köpük malzemenin savunma sanayi ve askeri alanda da kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Örneğin uçak gemisi güvertesinde kullanılabilirler. Uçaklar, gemi güvertesine iniş yaparlarken gemi güvertesinde bulunan bir kabloya kanca şeklinde takılarak hızlarını yavaşlatırlar. Bazı anlarda uçaklar iniş yaptıkları sırada güverteye temas ettikten sonra zeminden sekme ve kabloya takılmama durumları yaşanmaktadır. Uçak gemisi güverteleri alüminyum köpük malzeme kullanılarak imal edildiklerinde, bu ihtimal %50 azalmaktadır (Yao vd., 2014). Daha iyi anlaşılabilmesi için **Şekil 2.54**'te bir savaş uçağının uçak gemisine iniş anı gösterilmiştir.



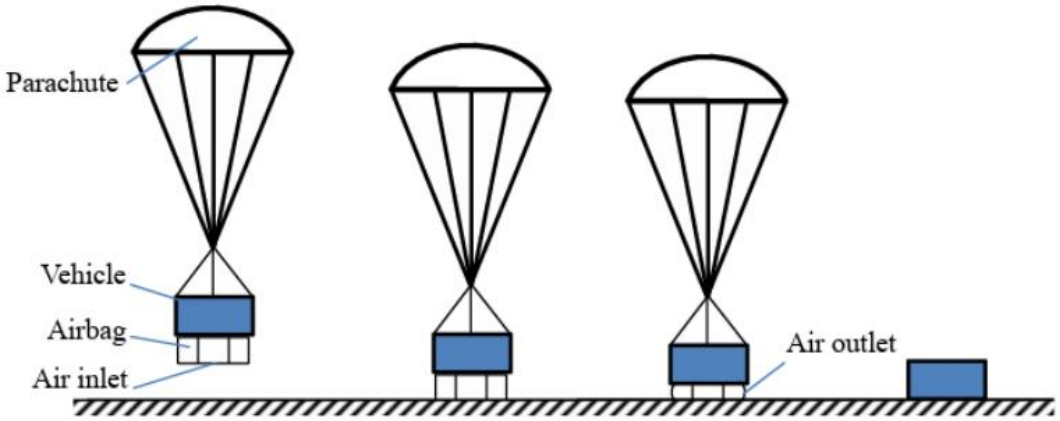
Şekil 2.54. Savaş uçağının uçak gemisine iniş anı ("CATOBAR", 2023)

Askeri alanda diğer bir kullanım alanı olarak havadan paraşütle atılan araçların ve malzemelerin yere güvenli bir şekilde inmesi için darbe sönümleyecek palet sistemleri örnek verilebilir. Ayrıca askeri alanda hızlı montaj edilebilen köprü yapılarında, alüminyum köpük malzeme kullanılabilir (Yao vd., 2014).

2.11. Airdrop Düşme Testi Konusunda Yapılan Araştırmalar

Belirli bir yükseklikten atılan ekipmanların veya taşıtların, yere güvenli bir şekilde inebilmesi için çarpmanın etkisi ile üzerlerine gelen kuvvetler, titreşimler ve çarpışma süresi gibi birçok parametre incelenmelidir. Atılan cihazların hasar almaması için tasarlanacak olan palet sistemlerinde bu değerlerin incelenmesi oldukça önemli olacaktır. Bu kısımda daha önceden düşme testi yapılan araçlar ile ilgili araştırmalara odaklanılacaktır.

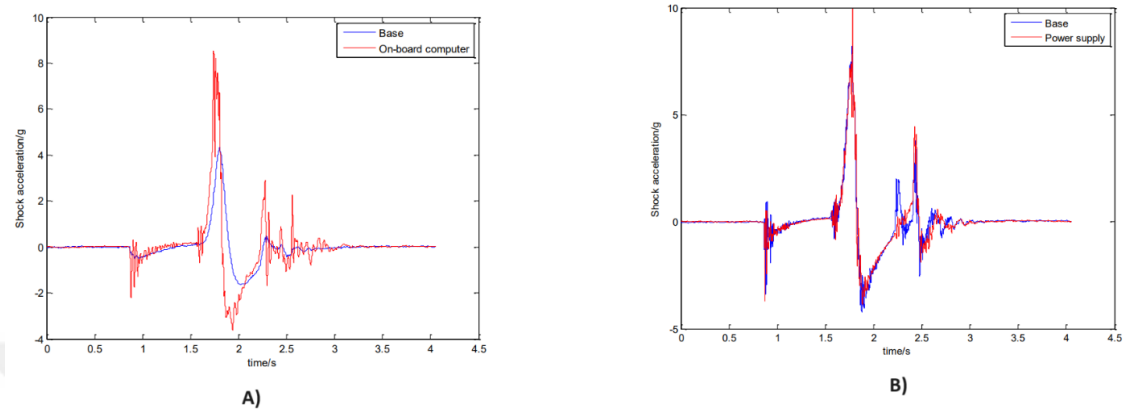
Hou vd. (2019), hava yastıklı palet sistemi kullanılarak havadan atılan tekerlekli zırhlı bir aracın, yere çarpması sırasında, yerleşik elektronik ekipmanlarına gelen şok titreşimlerini incelemek istediler. **Şekil 2.55**'te hava yastıklı palet sisteminin mantığı basitçe gösterilmiştir. Çalışmada şok titreşimlerini incelemek için düşme simülasyonu gerçekleştirdiler. Üzerinde şok ivme sensörleri ve çeşitli test aletleri olan araç, halatlar kullanılarak vinç yardımıyla, 9 m/s iniş hızı olacak şekilde, 4,1 metre yüksekliğe kaldırılarak serbest düşme için bırakılmıştır (Hou vd., 2019).



Şekil 2.55. Hava yastıklı palet sistemi (Hou vd., 2019)

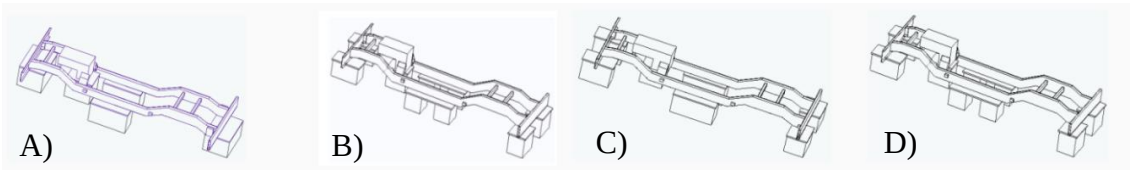
Şekil 2.56 a, b'de, düşme testi sonucunda araç bilgisayarı ve güç kaynağının tabanı ve gövdesine gelen filtrelenmiş şok sinyalleri gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde şok süresinin 0,15 – 0,2 s olduğu ve iki ekipmanın tepe ivmesi değerinin yaklaşık 10-15 g olduğu görülmektedir. Yapılan araştırmanın test sonuçları incelendiğinde, düşme testinde, aracın yerleşik ekipmanının, kaldırma halatının etkisi, hava yastıkları şoku ve

geri tepme iniş şoku olmak üzere üç aşamalı şok titreşimine maruz kaldığı görülmüştür. Ayrıca hava yastıklı palet sisteminin, çarpışma süresini uzatabildiği ve şok tepe değerini azaltabildiği gözlemlenmiştir (Hou vd., 2019).



Şekil 2.56. Araç bilgisayarı ve güç kaynağının tabanı ve gövdesine gelen filtrelenmiş şok sinyalleri **A)** Araç bilgisayarı **B)** Güç kaynağı (Hou vd., 2019)

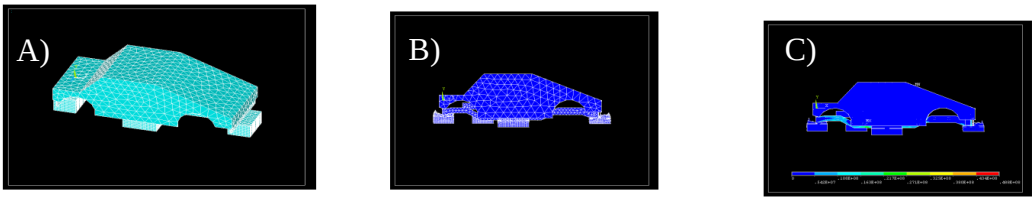
Havadan düşme simülasyonları konusunda yapılan çalışmalara diğer bir örnek olarak, Yue vd. (2012), yaptığı çalışma örnek gösterilebilir. Çalışmalarında darbe sönümleyici sistem olarak bal peteği (honeycomb) yapısını kullanarak, hafif off-road aracının gövde çerçevesi ve motoru üzerine gelen darbe analizlerini incelediler. Analiz çalışmalarında Ansys bilgisayar destekli analiz programını kullanmışlardır. Yapılan çalışmada, bal peteklerinin farklı yerlere konulduğu 4 farklı tasarım analiz edilmiştir (**Şekil 2.57 a, b, c, d**) (Yue vd., 2012).



Şekil 2.57. Farklı konumlarda bulunan bal peteği yapılarına ait sönümleme analiz çalışmaları için 4 farklı tasarım. **A)** Birinci tasarım **B)** İkinci tasarım **C)** Üçüncü tasarım **D)** Dördüncü tasarım (Yue vd., 2012)

Analiz gerçekleştirilirken öncelikle birtakım basitleştirmeler kabul edilmiştir. Bunlardan birkaç tanesine örnek olarak; aracın gövdesi kütle elemanı olarak düşünülmüş, süspansiyon, lastik ve yayın etkisi göz ardı edilmiştir. Düşme analizinde yatay hız

dikkate alınmamış, dikey hız 8 m/s olarak alınmıştır. Daha sonrasında 4 farklı tasarıma göre bilgisayar destekli analiz yapılmış ve gövde çerçevesi ve motor üzerine gelen maksimum ivme değerleri karşılaştırılmıştır (**Şekil 2.58 a, b, c**). Analizler sonucunda en yüksek gerilimler motorda meydana gelmiş ve çerçevenin göreli deformasyonu 1,5 cm'den az olmuştur (**Çizelge 2.2**) (Yue vd., 2012).



Şekil 2.58. 1. tasarıma ait model ve analiz sonuçları. **A)** Sonlu elemanlar modeli **B)** Sonlu elemanlar analizi **C)** Analiz sonuçları (Yue vd., 2012)

Çizelge 2.2. Analizler sonucunda aracın farklı noktalarına gelen maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Yue vd., 2012)

Maksimum İvme Değeri (g)	Ön Kiriş	Arka Kiriş	Sol Dikey Kiriş	Sağ Dikey Kiriş	Motor
1. Bal Peteği Tasarımı	17,4	16	20,1	19,9	21,7
2. Bal Peteği Tasarımı	19,7	17,3	20,3	20,5	22,5
3. Bal Peteği Tasarımı	18,1	18,8	21,5	23	23,7
4. Bal Peteği Tasarımı	17,2	16,5	21	21,2	22,06

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde havadan indirme operasyonlarında, darbe sönümleyici sistem olarak kullanılacak palet sistemi tasarlanacaktır. Tasarlanan palet sisteminde hem alüminyum köpük kullanarak hem de kullanmadan, Abaqus bilgisayar destekli analiz programında, düşme ve çarpışma analizleri yapılacaktır.

Tasarım ve analiz kısmına geçmeden, öncelikle aerodinamik bazı kavramlar açıklanacaktır. Birtakım askeri zırhlı araçların ve G-11 paraşütlerinin teknik özellikleri verilecektir. Farklı kütle değerleri için kaç tane paraşütün birlikte kullanılması gerektiği hesaplanacaktır. Sonrasında farklı kütle değerleri ve paraşüt sayılarına göre çarpışma hızı (terminal hız) hesaplamaları yapılacaktır. Farklı çarpışma süreleri için çarpışma kuvveti, çarpışma ivmesi ve g değerlerinin hesabı yapılacaktır.

3.1. Aerodinamik Temel Kavramlar

3.1.1. Havanın özellikleri

Uçaktan atılacak sistemler, hava içerisinde aşağıya düşecekleri için havanın özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Aslında hava olarak nitelendirilen kavram birçok gazın içerisinde bulunduğu bir gaz karışımıdır. İçerisinde yaklaşık %78 oranında nitrojen, %21 oranında oksijen ve karbondioksit, argon, su buharı gibi pek çok gaz bulunmaktadır. Gazın durumunu tanımlamak için farklı kavramlar kullanılabilir. Örneğin hareket halindeki bir gaz için “r” gaz yoğunluğu kavramını kullanmak daha doğrudur (Glenn Research Center, 2023).

Şekil 3.1’de yoğunluk, sıcaklık, basınç, vizkozite gibi havanın bazı özellikleri verilmiştir. Burada verilen değerler standart değerlerdir. Standart değerler, deniz seviyesindeki statik koşulları temsil eder ve mühendislik hesaplamaları için kullanılabilecek ortalama değerlerdir. Normalde havanın özellikleri konum, iklim şartlarına, rakıma ve zamana göre farklılıklar içerebilir. Ancak hesaplamaların

yapılabilmesi için standart değerlerden yararlanılabilir (Glenn Research Center, 2023). Hız hesaplamalarında havanın yoğunluğu 1,229 kg/m^3 olarak alınmıştır.

Air is a Gas. 78% Nitrogen, 21% Oxygen, traces H_2O, CO_2, Ar, ..

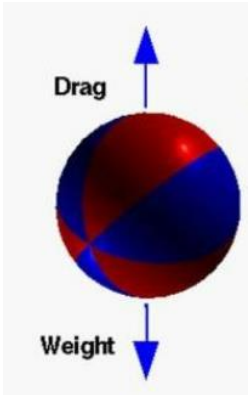
Property	Dimensions	Value (SLS*)	
		Metric	English
Mass, Volume			
Density (r)	mass/volume	1.229 kg/m^3	.00237 slug/ft^3
Specific Volume (v)	volume/mass	.814 m^3 /kg	422 ft^3 /slug
Pressure (p)	force/area	101.3 kN/m^2	14.7 lb/in^2
Temperature (T)	degrees	15° C 288° K	59° F 519° R
Viscosity (μ)	force-time/area	1.73 ×10^{-5} N-s/m^2	3.62 ×10^{-7} lb-s/ft^2
Gas Constant (R)	energy/mass/deg	.286 J / g / °K	53.5 ft-lb /lb/°R
Specific Heat (c_v)	energy/mass/deg	.715 J / g / °K	.17 BTU / lb/°R
Ratio (γ)	none	1.4	1.4

* Sea Level Static (Standard Day)

Şekil 3.1. Havanın özelliklerine ait standart değerler (Glenn Research Center, 2023)

3.1.2. Atmosferde serbest düşen cisim

Atmosferde düşen bir cisim üzerine **Şekil 3.2**'de gösterildiği gibi iki tane kuvvet etki eder. Bunlardan bir tanesi yer çekimi kuvvetidir (ağırlık). Diğeri ise havanın oluşturduğu dirençten kaynaklanan sürüklenme kuvvetidir. Eğer cisim boşlukta düşüyor olsaydı, cisme sadece yer çekimi kuvveti etki ediyor olacaktı (Glenn Research Center, 2022).



Şekil 3.2. Atmosferde düşen bir cisim üzerine gelen kuvvetler (Glenn Research Center, 2022)

Yer çekimi kuvveti denklemi aşağıda verilmiştir (Denklem 3.1). Cismin kütlesi ile yer çekimi ivmesinin çarpımından oluşmaktadır. Çalışmada yer çekimi ivmesi 9,81 m/s^2 olarak sabit kabul edilmiştir. Ayrıca Denklem 3.2'de sürüklenme kuvvetinin (D) formülü verilmiştir. Burada Cd sürüklenme katsayısını, "ρ" havanın yoğunluğunu, "V" hız değerini ve "A" ise alanı temsil etmektedir (Glenn Research Center, 2022).

$$W = m * g \tag{3.1}$$

$$D = Cd\rho\frac{V^2A}{2} \tag{3.2}$$

Newton'un ikinci hareket yasası kullanılarak, atmosferde düşen bir cismin ivmesi aşağıdaki Denklem 3.3'teki gibi hesaplanabilir (Glenn Research Center, 2022).

$$a = \frac{W - D}{m} \tag{3.3}$$

3.1.3. Sürüklenme katsayısı

Sürüklenme katsayı, sürüklenme kuvvetinin belirlenmesinde önemli bir katsayıdır ve genellikle deneysel yöntemler ile belirlenmiştir. Yoğunluk, hız ve alanı kontrol ederek, rüzgâr tünellerinde yapılan deneyler ile sürüklenme katsayıları belirlenebilir. Sürüklenme katsayısını etkileyen önemli parametrelerden birisi, referans alan değeridir (Glenn Research Center, 2023).

Deneyler ile elde edilen sürüklenme katsayısı değerlerini, gerçekteki durumları tahmin etmek için kullanabiliriz. Ancak bunun için havanın vizkozite ve sıkıştırılabilirlik değerlerinin deney ve gerçek arasında birbirine yakın olması gerekir. Bu durumları karşılaştırabilmek için Reynolds ve Mach sayıları, karşılaştırma için kullanılır (Glenn Research Center, 2023). Sürüklenme katsayısının paraşütler için tipik değeri yaklaşık 1,75'tir (Benson, t.y.). Hesaplamalarda bu değer kullanılacaktır.

3.1.4. Terminal hız

Atmosferde düşen bir cismin sürüklenme kuvveti, cismin ağırlığına eşitlendiğinde cismin düşey yöndeki ivmesi sıfır olacaktır (bkz. Denklem 3.3). Bu durumda

Newton'un birinci hareket yasasına göre cisim, sabit hız ile yani terminal hız ile düşmeye devam edecektir. Dolayısıyla bkz. Denklem 3.1 ve bkz. Denklem 3.2 eşitlenerek aşağıdaki terminal hız denklemine (Denklem 3.4) ulaşılır (Glenn Research Center, 2023).

$$V = \sqrt{\frac{2W}{Cd\rho A}} \tag{3.4}$$

Bkz. Denklem 3.4 bize farklı ağırlıklara, sürüklenme katsayılarına ve alanlara sahip cisimlerin, farklı hızlarda yere düşeceğini gösterir (Glenn Research Center, 2023).

3.2. G-11 Kargo Paraşütlerinin Teknik Özellikleri

G-11 kargo paraşütleri, ekipmanların platform üzerinde havadan atılması için yükün kütlesine göre bir veya birden fazla küme halinde kullanılırlar (Mills Manufacturing, 2024). Paraşütle atılan ekipmanların yere çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan paraşütlerin alanları bilinmelidir. Bu nedenle aşağıdaki **Çizelge 3.1**'de G-11 kargo paraşütlerine ait bazı özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.1. G11 kargo paraşütlerine ait bazı teknik özellikler (Mills Manufacturing, 2024)

Şekil	Düz Dairesel
Çap (nominal)	100 ft (10,7 m)
Malzeme	1,6 oz, Tip 3 Yırtılmaz Naylon Paraşüt Kumaşı
Askı Hattı Sayısı	120
Komple Montaj Kütlesi	250 lbs (113,4 kg)
Maksimum Yük Taşıma Kapasitesi	5 000 lbs (2 267,9 kg)

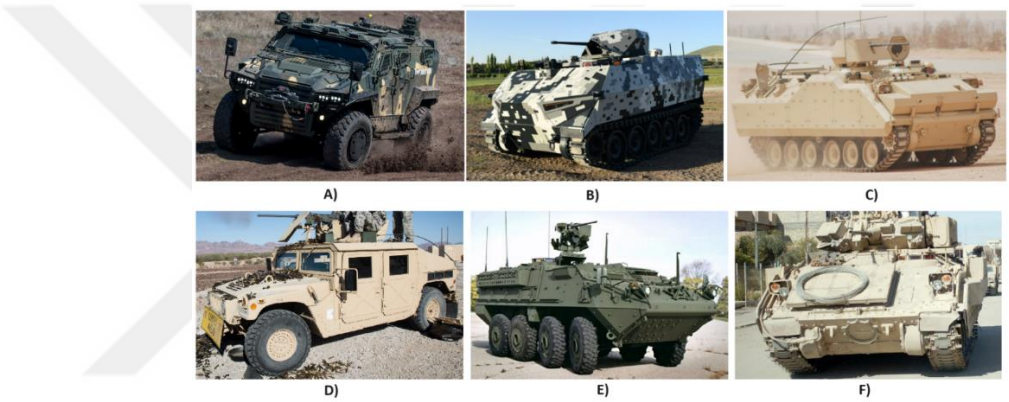
Çalışmada hız hesaplamaları için G-11 paraşütlerinin verileri kullanılacaktır. Çap değeri olarak 10,7 m kullanılacaktır. Bu durumda alan değeri Denklem 3.5'teki yarım küre yüzey alanı hesabına göre 179,8 m^2 çıkacaktır.

$$A = 2\pi r^2 \tag{3.5}$$

$$A = 2\pi 5{,}35^2 = 179{,}84 \cong 179{,}8\, m^2 \tag{3.6}$$

3.3. Askeri Zırhlı Araç Örnekleri ve Kütleleri

Havadan indirme sistemleri için yapılacak olan terminal hız hesaplamalarında atılacak yüklerin kütleleri bilinmelidir. Bu nedenle, bu başlık altında farklı ülkelerde kullanılan askeri zırhlı araçlara ait görsellere (**Şekil 3.3 a, b, c, d, e, f**) ve bu ekipmanların teknik özelliklerine (**Çizelge 3.2**) yer verilmiştir.



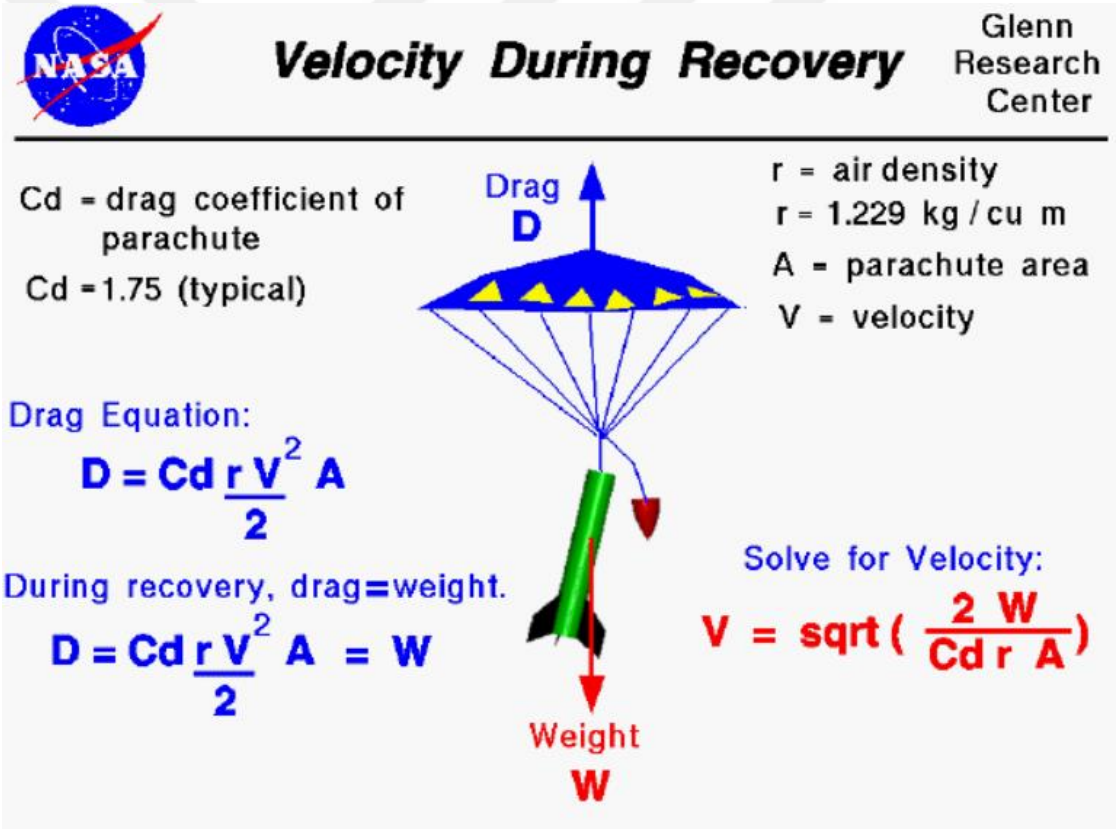
Şekil 3.3. Askeri zırhlı araç görselleri. **A)** NMS 4x4 Hafif Zırhlı Araç (Nurol Makina, 2024), **B)** Gölge Süvari İnsansız Kara Aracı (FNSS, 2024b), **C)** Akıncı ZMA Personel Taşıyıcı (FNSS, 2024a), **D)** M1151 ("M1151", 2023), **E)** M1126 ICV ("M1126 Infantry Carrier Vehicle", 2024), **F)** M3 Bradley (Alex, 2021)

Çizelge 3.2. Şekil 3.3'de gösterilen zırhlı araçların ortalama kütle değerleri. A)(Uyanık, 2023), B)(FNSS, 2024b) , C)(FNSS, 2024a) , D)("M1151", 2023) , E)("M1126 Infantry Carrier Vehicle", 2024) , F)(Alex, 2021)

Referans	Zırhlı Araç İsimleri	Ortalama Kütleleri (ton)
A)	NMS 4x4 Hafif Zırhlı Araç	8 – 12
B)	Gölge Süvari İnsansız Kara Aracı	13,5
C)	Akıncı ZMA Personel Taşıyıcı	18
D)	M1151	3,4
E)	M1126 ICV	16,47
F)	M3 Bradley	25

3.4. Havadan İndirme Çarpma Hızı Hesapları

Havadan indirilen sistemlerin yere çarpma hızı, ekipmanların üzerine gelecek olan şiddetin ölçülmesi için önemlidir. Yukarıda anlatılan temel kavramlar sonrasında bu kısımda, farklı kütleler için yere çarpma hızları hesaplanacaktır. Bkz. **Çizelge 3.2**'de yer alan örnek askeri araç kütlelerine bakılarak, hesaplamalarda 11 000 – 18 000 kg arasında 500 kg arttırımla on beş farklı kütle değeri için çarpma hızı hesabı yapılmasına karar verilmiştir. Hesaplamalarda NASA Glenn Araştırma Merkezi'nin (Glenn Research Center) paylaştığı **Şekil 3.4**'de gösterilen, model roketlerin paraşütle yere iniş hızlarını hesaplamak için kullanılan denklemlerden yararlanılacaktır.



Şekil 3.4. Model roketlerin paraşütle yere inişi için kullanılan hesaplamalar (Benson, t.y.)

Hız hesaplamaları öncesinde, kütlere göre kaç tane paraşüt kullanılacağı belirlenerek aşağıdaki **Çizelge 3.3** oluşturulmuştur. Paraşüt türü olarak G-11C paraşütleri seçilmiştir.

Çizelge 3.3. Atılacak kütlelere göre kullanılması gereken paraşüt sayıları (Mills Manufacturing, 2024)

Atılacak Toplam Kütle (kg)	Kullanılması Gereken Paraşüt Sayısı
11 000	5
11 500	6
12 000	6
12 500	6
13 000	6
13 500	6
14 000	7
14 500	7
15 000	7
15 500	7
16 000	8
16 500	8
17 000	8
17500	8
18 000	8

Hesaplamalarda, aşağıdaki Denklem 3.7'den yararlanılmıştır. Tek bir paraşütün alan değeri olarak daha önceden hesaplanan A=179,8 m^2, havanın yoğunluğu ρ=1,229 kg/m^3, yer çekimi ivmesi g=9,81 m/s^2 ve sürüklenmek katsayısı Cd=1,75 olarak alınmıştır.

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{Cd\rho \sum A}} \tag{3.7}$$

Örneğin 11 000 kg'lık atılacak bir yük için yere çarpma hızı aşağıdaki gibidir. Denklem 3.8'de gösterilen "x" sembolü, kullanılan paraşüt sayısını göstermektedir.

$$\sum A = x \times A = 5 \times 179{,}8 = 899\ m^2 \tag{3.8}$$

$$V = \sqrt{\frac{2mg}{Cd\rho \sum A}} = \sqrt{\frac{2 \times 11000 \times 9{,}81}{1{,}75 \times 1{,}229 \times 899}} = 10{,}565\ m/s \cong 10{,}57\ m/s \tag{3.9}$$

Bkz. Denklem 3.9'daki hesaplamada görüldüğü gibi 11 000 kg'lık bir yükün terminal hızı (yere çarpma hızı) 10,57 m/s'dir. Bkz. **Çizelge 3.3**'teki diğer kütleler için de aynı hesaplar yapılırsa **Çizelge 3.4**'teki çarpma hızı değerlerine ulaşılır.

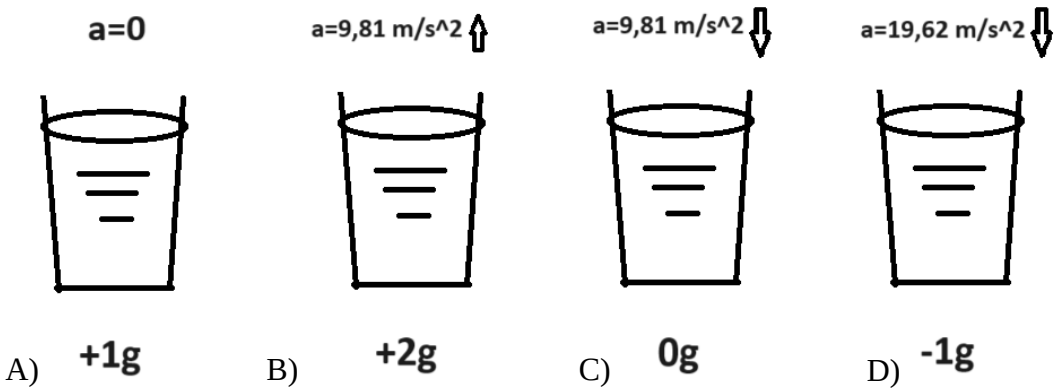
Çizelge 3.4. Atılacak yüklere göre terminal hız hesapları

Atılacak Toplam Kütle (kg)	**Kullanılması Gereken Paraşüt Sayısı**	**Terminal Hız (Çarpma Hızı) (m/s)**
11 000	5	10,57
11 500	6	9,86
12 000	6	10,07
12 500	6	10,28
13 000	6	10,48
13 500	6	10,68
14 000	7	10,07
14 500	7	10,25
15 000	7	10,43
15 500	7	10,6
16 000	8	10,07
16 500	8	10,23
17 000	8	10,38
17 500	8	10,53
18 000	8	10,68

Tez çalışması kapsamında, G-11 tipi kargo paraşüt üretici firmalarında Asr-Pioneer firması ile iletişime geçilmiştir. Ekipmanların yere çarpması sırasında, minimum hasar alacakları hız değeri sorulmuştur. Optimum çarpma hızının 8-12 ft/s (2,44-3,66 m/s) olduğu bilgisi alınmıştır.

3.5. G Değeri

G kuvveti, aslında bir kuvvet değil, ivmenin bir ölçüsüdür. Dünya için yer çekimi ivmesi (kütle çekim ivmesi) değeri yaklaşık 9,81 m/s^2'dir. Durağan haldeki cisimler için bu değer 1 g değeri olarak sayılır. Eğer cisim hareket halindeyse bu ivme değeri değişebilir. İşte bu durumu tanımlamak için g kuvveti olarak sıklıkla kullanılan terimden yararlanılır. Örneğin ivmesi sıfır olan için su dolu bir bardak düşünüldüğünde, bardak üzerine, Dünya merkezine doğru 9,81 m/s^2 (+1 g) bir ivme etki edecektir. Eğer bardak yukarı yönde 9,81 m/s^2 ivme ile hareket ederse, vektörel olarak düşünüldüğünde toplamda 19,62 m/s^2 (+2g) aşağı yönde ivme etki edecektir. Tam tersi düşünülürse, aşağı doğru 9,81 m/s^2 ivme ile hareket edilirse, bardak üzerine 0 g etki eder ve askıda kalma durumu yaşanır. Eğer içi su dolu bardak aşağı yönde 19,62 m/s^2 ivme ile hareket ederse, bardak üzerine -1g etki eder. Bu durumda suyun, dünya merkezi yerine ters yönde hareket etme eğiliminde olduğu gözlemlenir (Bakırcı, 2013). Görsel olarak daha rahat anlaşılabilmesi için aşağıdaki **Şekil 3.5 a, b, c, d** oluşturulmuştur.



Şekil 3.5. İçi su dolu bardağın ivme durumlarına göre etki eden g değerleri. **A)** İvme değeri sıfır **B)** Yukarı yönde 9,81 m/s^2 ivme değeri ile hareket hali **C)** Aşağı yönde 9,81 m/s^2 ivme değeri ile hareket hali **D)** Aşağı yönde 19,62 m/s^2 ivme değeri ile hareket hali

Belirli bir g değerinin üstü veya altı, insan sağlığı açısından zararlıdır. Bu nedenle örneğin savaş pilotlarının çok dikkatli olmaları gereklidir. +g değerlerinde, dokularda kopma veya bayılma gibi problemler oluşabilir. -g değerinde ise beyin kanaması riski

bulunmaktadır. Normal bir insan için g değerleri +9 g ile -3 g arasıdır (Bakırcı, 2013). **Şekil 3.6**'da g değerinin insanlar üzerindeki etkileri örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. G değerinin etkileri (Başkut, 2019)

3.6. Havadan İndirme Çarpma Kuvveti Hesapları

Bu başlık altında, farklı kütle değerlerine sahip ekipmanların, havadan paraşütle yere çarpmaları sırasında oluşan kuvvet değerleri hesaplanmaya çalışılacaktır. Kuvvet değerlerinin yanı sıra g değerleri de hesaplanacaktır. Bunlar için daha önceden bkz. **Çizelge 3.4**'te hesaplanan kütle ve hız değerlerinden yararlanılacaktır.

Yere çarpma sırasında, çarpışma süresi, ekipmanların ve paletin üzerine gelen yükü önemli ölçüde etkiler. 0,015 s, 0,045 s ve 0,2 s çarpışma süreleri, hesaplama için seçilmiştir. Örneğin 11 000 kg kütleye ve 10,57 m/s çarpışma hızına (terminal hız) sahip yükün, 0,015 s çarpışma süresine göre g değeri ve çarpışma kuvveti hesabı aşağıda gösterilmiştir. Burada "V2" son hızı, "V1" ilk hızı (terminal hız), "t" çarpışma süresini ve "a" çarpışma ivmesini simgelemektedir.

$$V_1 = 10{,}57\ m/s \tag{3.10}$$

$$V_2 = 0\ m/s \tag{3.11}$$

$$t = 0{,}015\ s \tag{3.12}$$

$$|a| = \left|\frac{V_2 - V_1}{t}\right| = \left|\frac{0 - 10{,}57}{0{,}015}\right| \cong 704{,}67\ m/s^2 \tag{3.13}$$

Bkz. Denklem 3.13'te hesaplanan çarpışma ivmesi değeri, yer çekimi ivmesi değerine bölünürse, çarpışma ivmesinin g değerine ulaşılabilir.

$$g = 9{,}81\ m/s^2 \quad (3.14)$$

$$G = \frac{a}{g} = \frac{704{,}67}{9{,}81} \cong 71{,}83 \quad (3.15)$$

Aşağıda bulunan Denklem 3.17 yardımı ile çarpışma kuvveti hesaplanabilir.

$$m = 11\ 000\ kg \quad (3.16)$$

$$F = m \times a \quad (3.17)$$

$$F = 11\ 000 \times 704{,}67 \cong 7\ 751{,}37\ kN \quad (3.18)$$

Yukarıdaki denklemler, diğer kütle değerleri için uygulanırsa aşağıdaki **Çizelge 3.5** elde edilir.

Çizelge 3.5. 0,015 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri

Çarpışma süresi: 0,015 s				
Atılacak Kütle (kg)	**Çarpışma Hızı (m/s)**	**Çarpışma ivmesi (m/s^2)**	**G değeri**	**Çarpışma Kuvveti (kN)**
11 000	10,57	704,67	71,83	7 751,37
11 500	9,86	657,33	67,01	7 559,3
12 000	10,07	671,33	68,43	8 055,96
12 500	10,28	685,33	69,86	8 566,63
13 000	10,48	698,67	71,22	9 082,71
13 500	10,68	712	72,58	9 612
14 000	10,07	671,33	68,43	9 398,62
14 500	10,25	683,33	69,66	9 908,29
15 000	10,43	695,33	70,88	10 429,95
15 500	10,6	706,67	72,04	10 953,39
16 000	10,07	671,33	68,43	10 741,28
16 500	10,23	682	69,52	11 253
17 000	10,38	692	70,54	11 764
17 500	10,53	702	71,56	12 285
18 000	10,68	712	72,58	12 816

Çarpışma süresi 0,045 s olarak seçilirse değerler **Çizelge 3.6**'daki gibi olacaktır.

Çizelge 3.6. 0,045 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri

Çarpışma süresi: 0,045 s				
Atılacak Kütle (kg)	**Çarpışma Hızı (m/s)**	**Çarpışma ivmesi (m/s^2)**	**G değeri**	**Çarpışma Kuvveti (kN)**
11 000	10,57	234,89	23,94	2 583,79
11 500	9,86	219,11	22,34	2 519,77
12 000	10,07	223,78	22,81	2 685,36
12 500	10,28	228,44	23,29	2 855,5
13 000	10,48	232,89	23,74	3 027,57
13 500	10,68	237,33	24,19	3 203,96
14 000	10,07	223,78	22,81	3 132,92
14 500	10,25	227,78	23,22	3 302,81
15 000	10,43	231,78	23,63	3 476,7
15 500	10,6	235,56	24,01	3 651,18
16 000	10,07	223,78	22,81	3 580,48
16 500	10,23	227,33	23,17	3 750,95
17 000	10,38	230,67	23,51	3 921,39
17 500	10,53	234	23,85	4 095
18 000	10,68	237,33	24,19	4 271,94

Eğer çarpışma süresi 0,2 s olarak seçilirse değerler aşağıdaki **Çizelge 3.7**'deki gibi olacaktır.

Çizelge 3.7. 0,2 s çarpışma süresine göre çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri

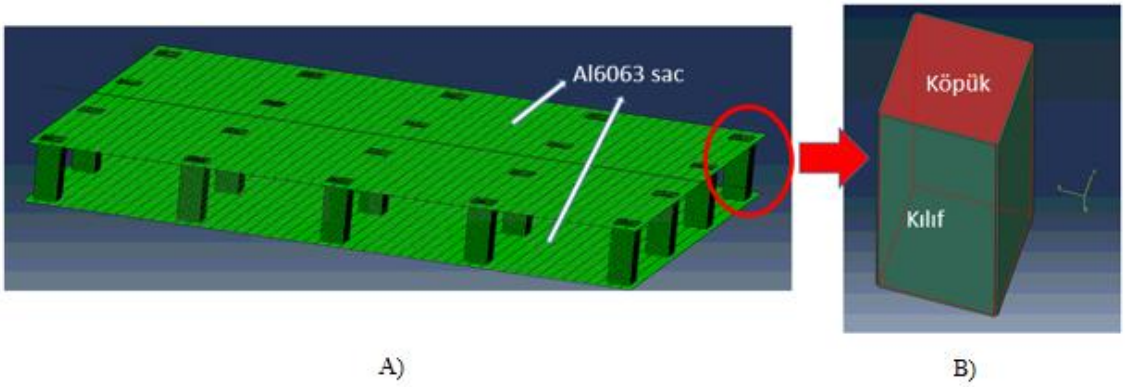
Çarpışma süresi: 0,2 s				
Atılacak Kütle (kg)	**Çarpışma Hızı (m/s)**	**Çarpışma ivmesi (m/s^2)**	**G değeri**	**Çarpışma Kuvveti (kN)**
11 000	10,57	52,85	5,39	581,35
11 500	9,86	49,3	5,03	566,95
12 000	10,07	50,35	5,13	604,2
12 500	10,28	51,4	5,24	642,5
13 000	10,48	52,4	5,34	681,2
13 500	10,68	53,4	5,44	720,9
14 000	10,07	50,35	5,13	704,9
14 500	10,25	51,25	5,22	743,13
15 000	10,43	52,15	5,32	782,25
15 500	10,6	53	5,4	821,5
16 000	10,07	50,35	5,13	805,6
16 500	10,23	51,15	5,21	843,98
17 000	10,38	51,9	5,29	882,3
17 500	10,53	52,65	5,37	921,38
18 000	10,68	53,4	5,44	961,2

Yukarıda gerçekleştirilen hesaplamalardan görüleceği gibi çarpışma süresi, parametreler üzerinde çok önemli bir etkendir. Çarpışma süresi uzadıkça çarpışma ivmesi, çarpışma kuvveti ve g değerleri düşmektedir. Bu nedenle tasarlanacak palet sistemlerinde çarpışma süresini uzatacak darbe sönümleyici sistemlerin kullanılması önemlidir. Çalışmada darbe sönümleyici sistem olarak, tasarlanacak palet yapılarında alüminyum köpük kullanılmasına karar verilmiştir.

3.7. Sonlu Elemanlar Modeli ve Çarpma Analizleri

Önceki kısımda sunulan araştırmalarla havadan indirme sistemlerinin önemine vurgu yapılmış ve yapılan hesaplamalar ile birtakım değerler ortaya konulmuştur. Bu başlık altında havadan indirme operasyonlarında kullanılacak askeri ekipman ve araçların zarar görmemeleri için bir palet sistemi tasarlanacaktır. Tasarlanacak palet sisteminin, yere iniş sırasında gelen enerjiyi emici bir sistem olması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda enerji emici sistem olarak alüminyum köpük malzemelerden yararlanılmıştır. Tasarlanan havadan indirme palet sisteminin sonlu elemanlar modeli Abaqus sonlu elemanlar yazılımında oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Çarpışma analizleri için eksplisit çözüm yönteminden yararlanılmıştır.

Aşağıdaki **Şekil 3.7 a, b**'de tasarlanan darbe sönümleyici palet sisteminin modeli gösterilmektedir. Şekilden görüleceği gibi paletin üst ve alt tarafında alüminyum sac levhalar bulunmaktadır. İki alüminyum sac levha arasında, yine alüminyum malzemeden yirmi adet dikdörtgen prizma tüp yerleştirilmiştir. Çalışmada hem içi boş alüminyum tüp bloklardan oluşan palet sistemi hem de içi dolu alüminyum tüp bloklardan oluşan palet sistemi analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. İçi dolu tasarımda, tüplerin içerisine kapalı hücreli alüminyum köpük malzemeler konulmuştur. Al6063 sac levhalar, 5 mm et kalınlığındadır ve boyutları ise 2 240 x 2 740 mm'dir. Prizmatik tüplerin alaşımı da yine Al6063 alaşımındandır. Et kalınlığı 2 mm ve boyutları ise 96 x 96 x 250 mm'dir. Alüminyum köpük, üç boyutlu gerilme eleman tipi (C3D8R) kullanılarak; sac levhalar ve tüpler, kabuk elemanlar (S4R eleman tipi) kullanılarak elemanlara ayrılmıştır.



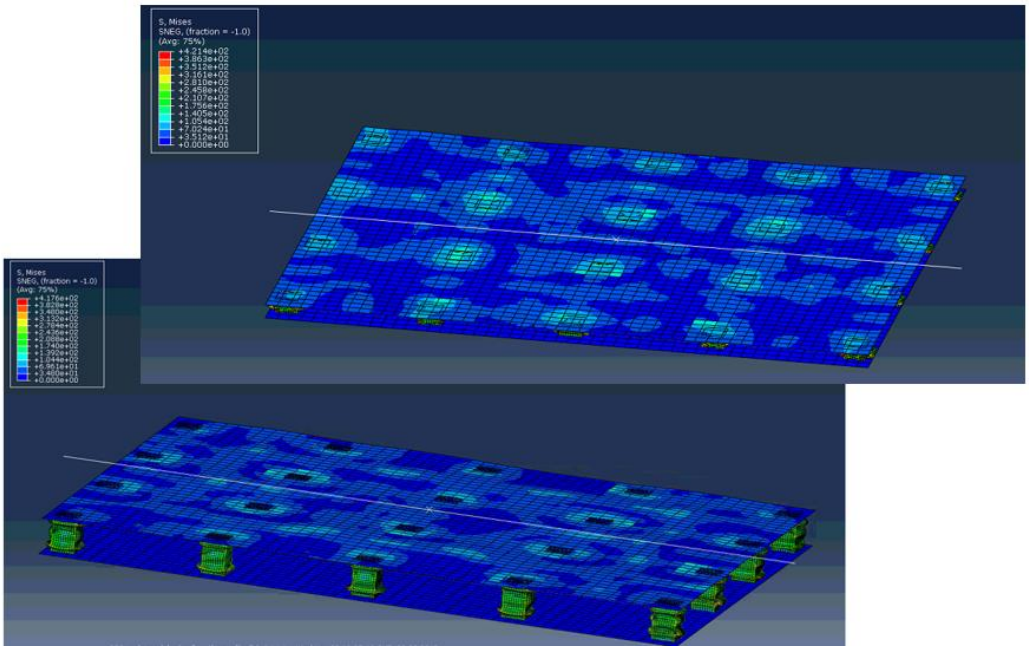
Şekil 3.7. Tasarlanan palet sisteminin gösterimi **A)** Darbe sönümleyici palet sisteminin sonlu elemanlar modeli, **B)** İçerisinde alüminyum köpük bulunan bir tüpün modeli

Alüminyum köpük malzeme için Abaqus programı içerisinde yer alan "crushable foam" modeli kullanılmıştır. Alüminyum sac levhalar içinse "Johnson-Cook" malzeme modeli kullanılmıştır. Gülçimen Çakan vd. (2019), "Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyeli çarpışma-kutularının mekanik performanslarının karşılaştırılması" isimli çalışmalarından yararlanılarak, Al6063 alaşımı ve alüminyum köpüğün (0,41 g/cm^3 yoğunluğunda) malzeme modelleri ve parametreleri sonlu elemanlar programına tanımlanmıştır (GÜLÇİMEN ÇAKAN vd., 2019). Analizler sırasında birtakım kabuller yapılarak paletin iki rijit plaka içerisinde sınır şartları oluşturulmuştur. Atılacak kütle değeri 9 000 kg ve çarpışma hızı 4,6 m/s olarak belirlenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu başlık altında, tasarlanan darbe sönümleyici palet sisteminin Abaqus programında gerçekleştirilen analiz sonuçları incelenecektir. Alüminyum takviyeli ve takviyesiz paletlerin deformasyonları, çarpışma kuvvetleri ve çarpışma sırasındaki enerji değişimleri incelenecektir.

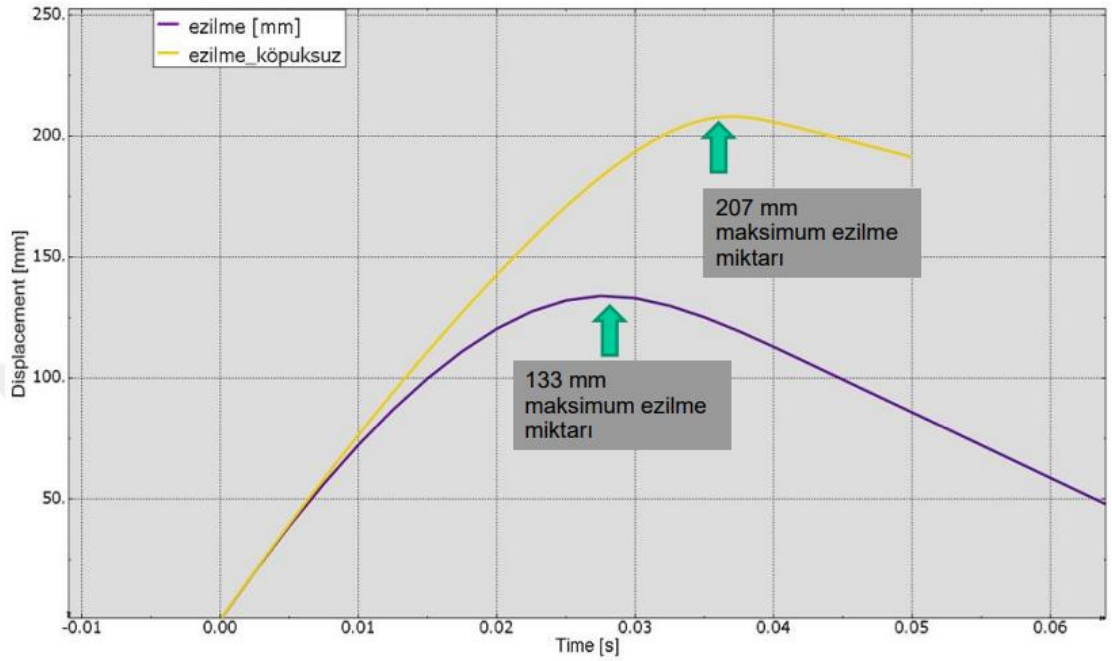
Aşağıdaki **Şekil 4.1 a, b**'de içi boş tüplerin olduğu palet sistemi ile içerisinde alüminyum köpük bulunan tüplerin olduğu palet sisteminin çarpışma sonrasındaki eşdeğer gerilme dağılımları ve deformasyon miktarları verilmiştir. Alüminyum köpük kullanımı, değerleri oldukça değiştirmektedir. Çarpışma sırasında içi boş alüminyum tüpler tamamen katlanarak ezilmektedirler. İçerisinde alüminyum köpük olan tüplerde ise köpüğün yoğunlaşma noktasına kadar ezilme gerçekleşmektedir.



Şekil 4.1. İçi alüminyum köpük dolu ve içi boş tüplerden oluşan paletlerin deformasyonları ve Von Mises gerilme dağılımı. **A)** İçi boş yapı **B)** İçi alüminyum köpük dolu yapı

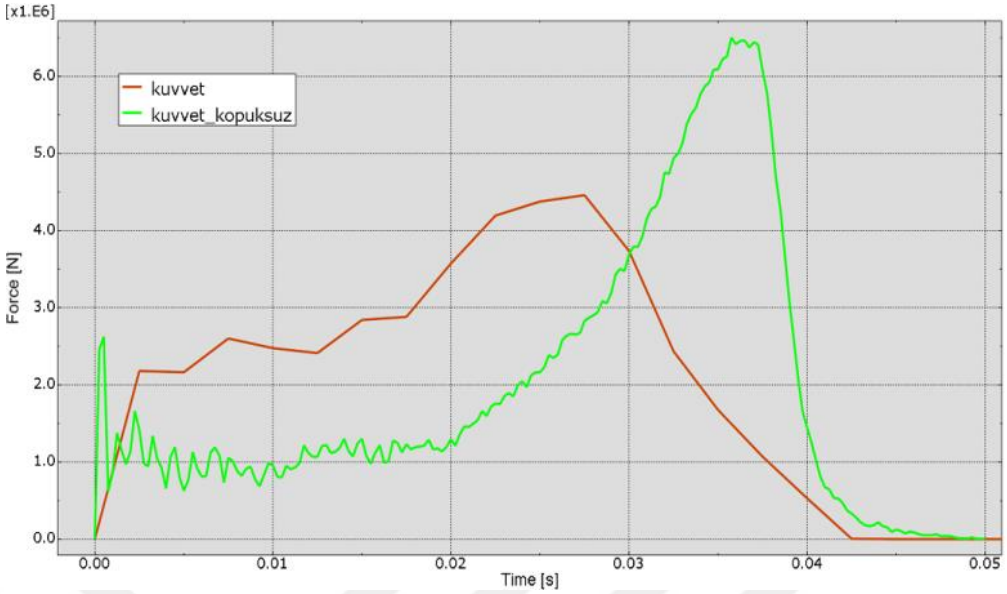
Şekil 4.2'de paletlerin toplam sıkışma miktarlarının grafiği gösterilmektedir. Grafikten görüleceği gibi eğer alüminyum köpük kullanılmazsa, toplam sıkışma miktarı 207 mm

olmaktadır. Eğer palet modelinde alüminyum köpük kullanılırsa, toplam sıkışma miktarı 133 mm'ye düşmektedir.



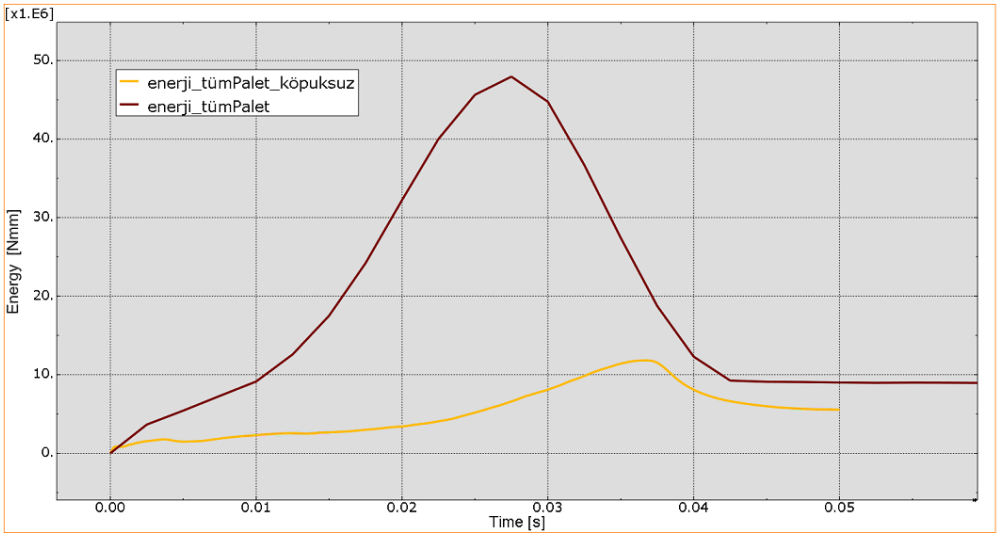
Şekil 4.2. Alüminyum köpük kullanılan (mor eğri) ve kullanılmayan (sarı eğri) palet modellerinin toplam sıkışma miktarları

Aşağıdaki **Şekil 4.3**'te alüminyum köpük kullanılan (kırmızı eğri) ve kullanılmayan (yeşil eğri) palet modellerine, çarpışma sırasında gelen kuvvetlerin zamana göre değişimleri verilmiştir. Alüminyum köpük kullanılmayan (yeşil) eğriye bakıldığında, çarpışmanın ilk başında ve çarpışma sürecinin sonunda kuvvetin pik değerler yaptığı görülmektedir. Grafikten, enerji sönümlemenin alüminyum köpük kullanılan modele göre çok fazla gerçekleşmediği görülebilir. Alüminyum köpük kullanılan (kırmızı) eğriye bakıldığında, kuvvettin zamana göre değişiminin daha istikrarlı olduğu görülebilir.



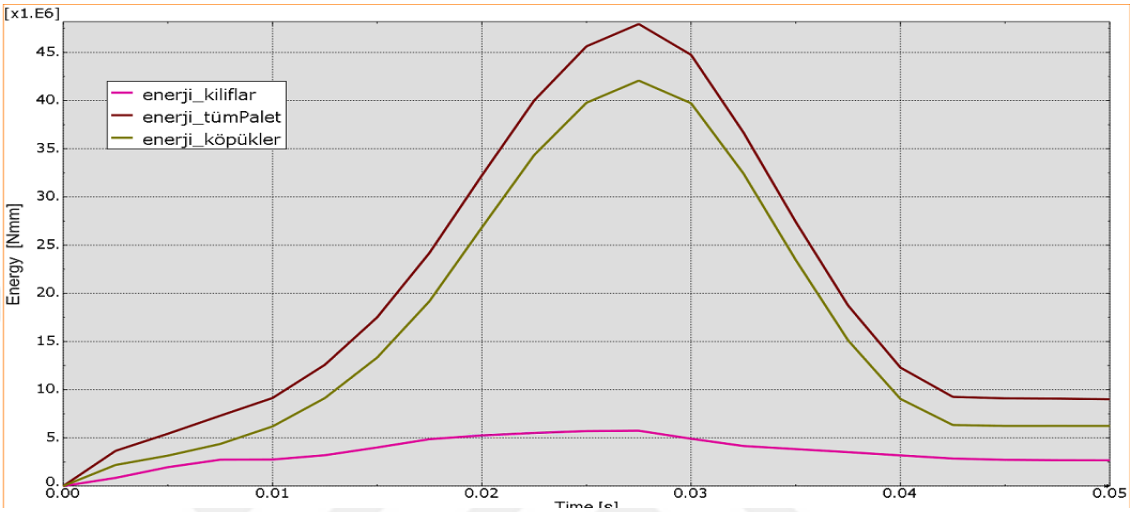
Şekil 4.3. Çarpışma kuvvetinin alüminyum köpük kullanılan (kırmızı eğri) ve kullanılmayan (yeşil eğri) palet modellerinde zamana göre değişimi

Şekil 4.4'te alüminyum köpük kullanılan (kahverengi eğri) ve kullanılmayan (sarı eğri) palet modellerinin, enerji sönümleme kapasiteleri kıyaslanmıştır. Grafikten görüleceği gibi eğer alüminyum köpük kullanılırsa, toplam sönümlenen enerji oldukça (yaklaşık 3,83 kat) artmaktadır. Alüminyum köpük kullanılmayan modele kıyasla, alüminyum köpük kullanıldığında sönümlenen enerji değeri 12 kJ'den 46 kJ değerine yükselmektedir.



Şekil 4.4. Sönümlenen enerji değerlerinin karşılaştırılması – Alüminyum köpük kullanılan (kahverengi eğri) ve kullanılmayan palet (sarı eğri)

Şekil 4.5'te içi alüminyum köpük dolu olan prizmatik tüplerin kullanıldığı paletin bileşenlerinin, darbe sönümlemeye olan etkileri incelenmek istenmiştir. Grafikten görüleceği gibi alüminyum köpüğün kendisi, onu saran kılıflara göre çok daha fazla enerji sönümlemektedir.



Şekil 4.5. Alüminyum köpük kullanılan paletin (kahverengi eğri) ve bileşenlerinin (yeşil eğri: köpükler, pembe eğri: kılıflar) sönümlediği enerjinin kıyaslanması

5. SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında, bir patent başvurusu yapılmış ürün olan yeni havadan indirme palet sisteminin, sonlu elemanlar metodu ile çarpışma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle literatürden bilgiler verilmiştir. Havadan indirme operasyonları detaylıca anlatılmıştır. Türleri ve kritik noktaları aktarılmış ve kullanılan hava taşıtlarından C-130 (Hercules) nakliye uçakları ve C-17 (Globemaster) nakliye uçakları gibi bazı uçaklar, özellikleri ile örnek olarak verilmiştir.

Tez çalışmasında ayrıca, havadan indirme operasyonlarında kullanılabilecek askeri araçlar, teknik özellikleriyle örnek olarak verilmiştir. Ayrıca paraşüt türlerine değinilmiş ve bu tarz operasyonlar için uygun olan paraşütler türleri aktarılmıştır. 11 000 kg – 18 000 kg arasında çeşitli yükler için G-11 paraşüt türünün uygun olduğu ve yapılan hesaplamalarla birlikte 5 ile 8 arası G-11 paraşütünün küme halinde kullanılması gerektiği görülmüştür. Ayrıca bu yük aralığı için çarpışma hızları hesaplanmış ve 9,86 m/s ile 10,68 m/s arasında değerlerin değiştiği görülmüştür. Sonrasında çarpışma kuvveti, çarpışma ivmesi ve g değerleri hesaplanmış ve çarpışma süresi uzadıkça, çarpışma kuvveti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Çalışmada darbe sönümleyici sistem olarak metal köpükler detaylı bir şekilde anlatılmış ve tasarlanan palet sisteminde 0,41 g/cm^3 yoğunluğa sahip kapalı hücreli alüminyum köpükler kullanılmıştır. İki alüminyum levha arasındaki yirmi adet prizmatik tüp içerisinde, alüminyum köpük kullanılmış ve kullanılmamış halleri Abaqus sonlu elemanlar yazılımında analiz edilmiştir. Analizler 9 000 kg yük değerine ve 4,6 m/s çarpışma hızına göre yapılmıştır.

Yapılan analizlerde alüminyum köpük kullanılan ve kullanılmayan palet sistemlerinin, çarpışma sırasındaki deformasyonları, zamana bağlı kuvvet değişimleri ve enerji sönümleme kapasiteleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarından köpüğün kullanılması durumunda, çarpışma kuvveti, sıkışma miktarı ve en önemlisi toplam sönümlenen enerji miktarı açısından köpüğün çok büyük avantaj getirdiği ortaya konulmuştur.

Yapılan çalışma sayesinde, havadan indirme operasyonlarında atılacak yüklerin zarar görmemesi için tasarlanacak palet sistemlerinde, enerji emici sistem olarak metal köpüklerin kullanılabileceği görülmüştür.

İlerleyen çalışmalarda daha yüksek kütle değerleri için (11 – 18 ton) analiz çalışmalarının yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca yapılacak çalışmalarda bilgisayar destekli yazılımın yanında gerçek zamanlı deneylerden yararlanılmasına karar verilmiştir. Bu deney çalışmalarında, atılacak yüklerin üzerine çeşitli sensörler konulup vinç yardımı ile kaldırılarak, düşme testleri gerçekleştirilecek ve analiz sonuçları karşılaştırılarak, doğrulamaları yapılacaktır.

Palet tasarımında farklı geometrilerde ve yoğunluklarda alüminyum köpük yapıların kullanılması da ayrı bir araştırma konusudur. Bunlara ek olarak atılacak yükün kütle dağılımı dikkate alınarak tasarlanacak palet sisteminde, alüminyum köpüklerin palete yerleştirileceği yerlerin analiz edilmesi ayrı bir araştırma konusudur.

KAYNAKLAR

Airdrop. (2024, Mayıs 14). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Airdrop#/media/File:JASDF_C-2(78-1205)_PDS_airdrop_demonstration_at_Miho_Air_Base_May_27,_2018_03.jpg

Alex, D. (2021, Mart 21). *M3 Bradley*. Military Factory. https://www.militaryfactory.com/armor/detail.php?armor_id=125

Anadolu Ajansı. (2018, Ağustos 29). *Genelkurmay arşivlerindeki Atatürk ve Büyük Taarruz'un az bilinen fotoğrafları*. Anadolu Ajansı. https://www.aa.com.tr/tr/pg/foto-galeri/genelkurmay-arsivlerindeki-ataturk-ve-buyuk-taarruzun-az-bilinen-fotograflari

Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal Foams*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7219-1.X5000-4

AvıTec. (2022). *G-11B CARGO PARACHUTE*. AvıTec. https://avitec.pl/our-offer/cargo-delivery-systems/g-11b-cargo-parachute/

Babcsán, N., Banhart, J., & Leitlmeier, D. (2003). Metal foams–manufacture and physics of foaming. *Proceedings of the International Conference Advanced Metallic Materials,* 5-15.

Bakırcı, Ç. M. (2013, Eylül 15). *G Kuvveti ve Yukarı Akan Su*. Evrim Ağacı. https://evrimagaci.org/g-kuvveti-ve-yukari-akan-su-1396

Banhart, J. (2005). Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of Vehicle Design, 37*(2/3), 114. https://doi.org/10.1504/IJVD.2005.006640

Banhart, J., García-Moreno, F., Heim, K., & Seeliger, H.-W. (2019). *Light-Weighting in Transportation and Defence Using Aluminium Foam Sandwich Structures* (ss. 61-72). https://doi.org/10.1007/978-981-15-1263-6_5

Başkut, Y. (2019, Mayıs 11). *Sadece Pilotların Maruz Kalmadığı "G Kuvveti" Nedir?* WEBTEKNO. https://www.webtekno.com/sadece-pilotlarin-maruz-kalmadigi-g-kuvveti-nedir-h67889.html

Battle of Crete. (2024, Mayıs 1). *Wikipedia*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Girit_Muharebesi

Benson, T. (t.y.). *Velocity During Recovery*. Glenn Research Center. 15 Mayıs 2024 tarihinde https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/rktvrecv.html#:~:text=The%20air%20density%20has%20a,produces%20a%20lower%20terminal%20velocity adresinden erişildi.

Boeing C-17 Globemaster III. (2024, Mayıs 30). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_C-17_Globemaster_III

China BeiHai. (2023). *Aluminum Foam.* China BeiHai. https://www.metalfoamweb.com/aluminum-foam/

Cymat Technologies. (2021). *Cymat Technology Production Process*. Cymat. https://www.cymat.com/technology-production-process/

Dairon, J., Gaillard, Y., Tissier, Jean.-C., Balloy, D., & Degallaix, G. (2011). Parts Containing Open-Celled Metal Foam Manufactured by the Foundry Route: Processes, Performances, and Applications. *Advanced Engineering Materials*, *13*(11), 1066-1071. https://doi.org/10.1002/adem.201100022

Ensarioglu, C., Bakirci, A., Koluk, H., & Cakir, M. C. (2022). *Metal Foams and Their Applications in Aerospace Components* (ss. 27-63). https://doi.org/10.1007/978-3-030-91873-6_2

FNSS. (2024a). *Akıncı ZMA Teknik Özellikler*. FNSS. https://www.fnss.com.tr/tr/urunler/akinci-zma-zirhli-muharebe-araci/akinci-zma-teknik-ozellikler

FNSS. (2024b). *Gölge Süvari İnsansız Kara Aracı*. FNSS. https://www.fnss.com.tr/tr/urunler/golge-suvari-insansiz-kara-araci/golge-suvari-teknik-ozellikler

García-Moreno, F. (2016). Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*, *9*, 85. https://doi.org/10.3390/ma9020085

GEÇİLİ, D. (2022). TÜRKİYE CUMHURİYETİ'NİN İLK YILLARINDA GEDİKLİ MEKTEBİNDE PARAŞÜTÇÜLERİN YETİŞTİRİLMESİ. *Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, *5*(2), 75-90. https://doi.org/10.38120/banusad.1173073

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular Solids*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326

Glenn Research Center. (2023, Kasım 21). *Drag Coefficient*. Glenn Research Center. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-coefficient-2/

Glenn Research Center. (2022, Temmuz 29). *Falling Object with Air Resistance*. Glenn Research Center. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/falling-object-with-air-resistance/

Glenn Research Center. (2023, Ocak 21). *Properties of Air*. Glenn Research Center. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/properties-of-air/

Glenn Research Center. (2023, Kasım 21). *Terminal Velocity Interactive*. Glenn Research Center. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/termvel/

Görgülü, İ. (1992). *BÜYÜK TAARRUZ*. Genelkurmay Basım Evi. https://www.msb.gov.tr/Content/Upload/Docs/askeritariharsiv/buyuktaaruz.pdf

GÜLÇİMEN ÇAKAN, B., ENSARİOĞLU, C., & ÇAKIR, M. C. (2019). Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyeli çarpışma-kutularının mekanik performanslarının karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *21*(1), 295-305. https://doi.org/10.25092/baunfbed.547179

Hou, J., Yu, G., Zhang, W., Wang, H., & Liang, Y. (2019). Test Research on Airdrop Shock Vibration of Armored Vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *616*(1), 012033. https://doi.org/10.1088/1757-899X/616/1/012033

Kaya, A. C. (2020). Effects of the cell number and anisotropy in the open cell metal foams on the energy absorption efficiency. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *26*(1), 45-50. https://doi.org/10.5505/pajes.2019.53810

Lefebvre, L.-P., Banhart, J., & Dunand, D. C. (2008). Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. *Advanced Engineering Materials*, *10*(9), 775-787. https://doi.org/10.1002/adem.200800241

Lockheed C-130 Hercules. (2024, Mayıs 26). *Wikipedia*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Lockheed_C-130_Hercules

Lu, T. J., Stone, H. A., & Ashby, M. F. (1998). Heat transfer in open-cell metal foams. *Acta Materialia, 46*(10), 3619-3635. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00031-7

Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu. (t.y.). *Fotoğraflarla Atatürk - Kurtuluş Savaşı*. Milli Savunma Üniversitesi Kara Harp Okulu. 22 Nisan 2024 tarihinde https://kho.msu.edu.tr/galeri/ataturk/kurtulus_savasi.html adresinden erişildi.

Mills Manufacturing. (2024). *G-11 Cargo Parachute Assembly*. MILLS MANUFACTURING. https://www.millsmanufacturing.com/products/g-11-parachute/

Murakami, T., Akagi, T., & Kasai, E. (2014). Development of Porous Iron based Material by Slag Foaming and its Reduction. *Procedia Materials Science, 4*, 30–35. https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.585

Nurol Makina. (2024). *NMS 4x4 Hafif Zırhlı Araç*. Nurol Makina. https://www.nurolmakina.com.tr/tr/urunler/nms-4x4-tr

Öztürk, Ö. (2019, Haziran 15). *16 – 31 Mayıs 1941: Girit'in işgali, Merkür Operasyonu*. Özhan Öztürk. https://ozhanozturk.com/2019/06/15/16-31-mayis-1941-merkur-operasyonu/

Quadbeck, P., Stephani, G., Kümmel, K., Adler, J., & Standke, G. (2007). Synthesis and Properties of Open-Celled Metal Foams. *Materials Science Forum, 534-536*, 1005-1008. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.534-536.1005

Rajak, D. K., & Gupta, M. (2020). *An Insight Into Metal Based Foams* (C. 145). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9069-6

Richter, H. (2013). Operation Mercury, The Invasion Of Crete. *Journal of New Zealand Studies*, *16*, 147-155.

Salimon, A., Bréchet, Y., Ashby, M., & Greer, A. (2005). Potential applications for steel and titanium metal foams. *Journal of Materials Science, 40*, 5793-5799. https://doi.org/10.1007/s10853-005-4993-x

Simancik, F. (2001). Metallic foam-ultra light materials for structural applications. *Inzynieria Materialowa*, *5*, 823-828.

Simančík, F., & Schoerghuber, F. (1998). Complex Foamed Aluminum Parts as Permanent Cores in Aluminum Castings. *MRS Proceedings, 521*, 151. https://doi.org/10.1557/PROC-521-151

Snead, J. (2005, Ocak 10). Configurable Air Transport. *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. https://doi.org/10.2514/6.2005-814

United States Air Force, United States Of America Department Of The Army, United States Marine Corps, & United States Of America Department Of Navy. (2016). *Airdrop of Supplies and Equipment: Rigging Airdrop Platforms; Airdrop Derigging and Recovery Procedures; Reference Data for Airdrop Platform Loads - TM 4-48.02/MCRP 4-11.3J/NAVSEA SS400-AB-MMO-010 REV 1/ TO 13C7-1-5* . https://armypubs.army.mil/ProductMaps/PubForm/Details.aspx?PUB_ID=106138

United States Of America Department Of The Army, United States Marine Corps, & United States Air Force. (2016). *Airdrop of Supplies and Equipment: Rigging Containers - TM 4-48.03/MCRP 4-11.3C/TO 13C7-1-11*. https://armypubs.army.mil/ProductMaps/PubForm/Details_Printer.aspx?PUB_ID=106141

Uyanık, S. (2023, Temmuz 25). *Nurol Makina NMS-L 4x4 Lansmanı Gerçekleşti*. Defence Turkey. https://www.defenceturkey.com/tr/icerik/nurol-makina-nms-l-

4x4-lansmani-gerceklesti-5650#:~:text=Tam%20bağımsız%20süspansiyon%20sistemiyle%20üstün,12%20ton%20kadar%20ağırlığı%20artırılabiliyor.

Walther, G., Kloeden, B., & Kieback, B. (2010). A New PM Process For Manufacturing Of Alloyed Foams For High Temperature Applications. Içinde *Proceedings of the World Powder Metallurgy Congress and Exhibition, World PM 2010* (C. 4).

CATOBAR. (2023). *Wikipedia*. https://tr.wikipedia.org/wiki/CATOBAR#/media/Dosya:USS_George_H.W._Bush_(CVN_77)_140716-N-CS564-177_(14496144977).jpg

M1126 Infantry Carrier Vehicle. (2024, Nisan 4). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/M1126_infantry_carrier_vehicle

M1151. (2023, Ekim 5). *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/M1151

Yao, G.-C., Luo, H.-J., & Cao, Z.-K. (2014). *The Manufacturing Technology of Aluminum Foam Material and Some Special Equipments*. https://doi.org/10.2991/icmsa-15.2015.161

Yue, J. T., Tang, L., & Guo, B. H. (2012). Simulation Analysis of Light Off-Road Vehicle's Body Frame during Airdropping. *Advanced Materials Research*, *460*, 202-205. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.460.202

Zarek, M. (2021). *AERIAL DELIVERY & FIELD SERVICES DEPARTMENT "HOW TO" REFERENCE HANDBOOK*. https://cascom.army.mil/g_staff/g3/TTD/Products/QM-How-to-Handbook/Aerial%20Delivery%20How%20to%20Final%201%20Dec%202021.pdf