

**T.C.**  
**HİTİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇEŞİTLİ ELYAF DİZİMLERİYLE OLUŞTURULMUŞ**  
**METAL KÖPÜK ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN**  
**MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Emre KARA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Halil AYKUL**

**OCAK 2012**

**ÇORUM**

## Kabul ve Onay

Emre KARA tarafından hazırlanan "Çeşitli Elyaf Dizilimleriyle Oluşturulmuş Metal Köpük Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi" adlı tez çalışması 20/01/2012 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Halil AYKUL



Yrd. Doç. Dr. Kamil ÖZDİN



Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman ASAN



Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 24/01/2012-tarih ve 2012/02 sayılı kararı ile Emre KARA'nın Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans / ~~Doktora~~ derecesi alması onanmıştır.



Doç. Dr. Ali KILIÇARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BEYANI**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Emre KARA

**ÇEŞİTLİ ELYAF DİZİMLERİYLE OLUŞTURULMUŞ METAL KÖPÜK  
ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Emre KARA

HİTİT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2012

**ÖZET**

Sandviç kompozit üretimi ile elde edilen başarıların gün geçtikçe artması, bu tip malzemelere olan ilgiyi yoğunlaştırmıştır. Bu tezde, hafiflik ve mukavemet özelliklerinden dolayı tercih edilen sandviç kompozitler ve bu malzemelere yaygın olarak uygulanan mekanik test yöntemleri incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, yüzeyi çeşitli elyaf dizilimleriyle oluşturulmuş, alüminyum köpük ve alüminyum köpük sandviç (AKS) panel çekirdekli sandviç kompozitlerin mekanik davranışlarının deneysel olarak incelenmesidir.

Sandviç kompozitlere yaygın olarak uygulanan mekanik test yöntemlerinden kenarına ve yüzeyine basma test yöntemleri, üç nokta eğilme test yöntemi ve düşük hızlı darbe test yöntemi uygulanmıştır. Her bir test yönteminin uygulama şekli ve test numuneleri gösterilerek, elde edilen grafikler sunulmuştur. Çalışmada, hafifliği yönüyle alüminyum köpük ve alüminyum köpük sandviç panel, çekirdek malzemeleri olarak kullanılmış ve bu köpükler hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Yapılan çalışmalar neticesinde sandviç kompozitlerin mevcut ağırlıklarına nazaran rijitlikleri ve mukavemetlerinin ne denli önemli olduğu gözlenmiştir. Benzer çalışmalarda kullanılan yüzey malzemeleri yerine bu çalışmada; tek eksenli dört kat  $[0^{\circ}]_{2s}$ , iki eksenli dört kat  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_{2s}$ , iki eksenli dört kat  $[45^{\circ}/-45^{\circ}]_{2s}$ , antisimetrik dizilimli iki eksenli dört kat  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s/[45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$  ve simetrik dizilimli iki eksenli dört kat  $[0^{\circ}/90^{\circ}]_s/[45^{\circ}/-45^{\circ}]_s$  olmak üzere beş çeşit elyaf dizilimiyle cam elyaf malzemeleri epoksi reçine emdirilerek Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) oluşturulmuş ve CTP, bu epoksi reçine vasıtasıyla çekirdek malzemesi olan alüminyum köpüğe yapıştırılmıştır. Alüminyum köpük sandviç panel çekirdekli kompozitler için ise iki kat  $[0^{\circ}/90^{\circ}/\text{Mat}]_s$  dizilimli cam elyaf ve farklı bir epoksi reçine kullanılarak CTP oluşturulmuş ve aynı reçine ile çekirdek malzemesine yapıştırılmıştır.

Basma ve eğilme test yöntemleri sonucunda, farklı oryantasyon açılarında elde edilen gerilme-%uzama ve yük-sehim eğrileri ile düşük hızlı darbe deneyi sonucunda farklı hızlarda elde edilen yük-zaman ve yük-uzama eğrileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

**Anahtar Sözcükler;** Sandviç Kompozitler, Alüminyum Köpük, Alüminyum Köpük Sandviç, CTP, Kenarına Basma Testi, Yüzeyine Basma Testi, Üç Nokta Eğilme Testi, Düşük Hızlı Darbe Testi

**INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIOURS OF METAL FOAM  
CORED SANDWICH COMPOSITES FORMED BY VARIOUS FIBER  
ORIENTATIONS**

Emre KARA

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE

January 2012

**ABSTRACT**

Day by day increment of the successes which are obtained by sandwich composite production was focused on the interest on this kind of materials. In this thesis, the sandwich composites which are preferred because of their light weight and strength properties and the mechanical test methods which are commonly applied on these materials have been investigated. The aim of this study is to be investigated the mechanical behaviours of sandwich composites which have aluminium foam and aluminium foam sandwich panel cores and the faces formed by various fiber orientations.

In the study, flatwise and edgewise compressive test methods, three point bending test method and low velocity impact test from mechanical test methods which are commonly applied on sandwich composites were applied. Application type and test specimen of every test method were shown, the curves obtained from the tests were presented. In the study, aluminum foam and aluminium foam sandwich panel were used because of its light weight and detailed information was given about these foams.

According to the results of the studies, it was observed how much important their rigidity and strength versus their existing weight. In this study, instead of face materials used in similar studies; Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) was constructed impregnating epoxy resin into fiber glass materials by five kinds of fiber orientation which are one axis and four layered  $[0^\circ]_{2s}$ , two axes and four layered  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}$ , two axes and four layered  $[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$ , anti symmetrically orientated two axes and four layered  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}/[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  and symmetrically orientated two axes and four layered  $[0^\circ/90^\circ]_{2s}/[45^\circ/-45^\circ]_{2s}$  and GFRP was bonded onto the aluminum foam core by this epoxy resin. GFRP was created by using two layered  $[0^\circ/90^\circ/\text{Unidirectional}]_s$  fiber glass and different epoxy resin for aluminium foam sandwich panel it was bonded onto core material by using same epoxy.

The obtained stress-strain and load-deflection curves at different orientation angles after compressive and bending test methods and the obtained load-time and load-deflection curves at different velocities after low velocity impact tests were reported comparatively.

**Key Words;** Sandwich Composites, Aluminium Foam, Aluminium Foam Sandwich, GFRP, Edgewise Compressive Test, Flatwise Compressive Test, Three Point Bending Test, Low Velocity Impact Test

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca engin bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle çok değerli katkılarda bulunan saygıdeğer Hocam Prof. Dr. Halil AYKUL'a ve yine engin tecrübelerinden yararlandığım Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde görev yapan Öğr. Gör. Hanifi Çinici'ye, üniversitemizin değerli öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Kubilay KARACI'ya, çalışmalarımın İtalya'da yer alan kısmında hem sosyal hem de bilimsel yardımlarından dolayı Messina Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstriyel Kimya ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Vincenzo Crupi'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen bütün Araştırma Görevlisi ve Uzman arkadaşlarıma da teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemde en önemli maddi ve manevi desteği sağlayan, emeklerinin ve haklarının karşılığını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, her an yanımda olan biricik AİLEM'e sağladıkları çok değerli katkılardan dolayı ayrıca sonsuz teşekkür ederim.

15 Eylül – 15 Aralık 2011 tarihleri arasında İtalya'nın Messina Üniversitesi'nde tezimle ilgili araştırmalar yapmak üzere burslu araştırmacı olarak 'Yurtdışı Lisansüstü Eğitim Bursları' kapsamında görevlendiren Yüksek Öğretim Kurulu'na desteklerinden dolayı teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	İV
ABSTRACT.....	VI
TEŞEKKÜR.....	VIII
İÇİNDEKİLER.....	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
RESİMLER DİZİNİ.....	XIV
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Sandviç Kompozitler.....	3
2.2 Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	6
2.2.1 Yüzey malzemelerine göre.....	6
2.2.2 Yapıştırıcı malzemelere göre.....	8
2.2.3 Çekirdek malzemelerine göre.....	10
2.2.4 Köpük çekirdekler.....	11
2.2.5 Metal köpükler.....	12
2.2.5.1 Metal köpük üretim metotları.....	14
2.2.5.1.1 Kapalı hücreli metal köpük üretim metotları.....	17
2.2.5.1.2 Açık hücreli metal köpük üretim metotları.....	24
2.2.5.2 Metal köpüklerin kullanım alanları.....	27
2.2.5.2.1 Metal köpüklerin yapısal uygulamaları.....	28
2.2.5.2.2 Metal köpüklerin fonksiyonel uygulamaları.....	32
2.2.5.3 Alüminyum köpüklerin ekonomisi ve geleceği.....	35
2.2.5.4 Alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri.....	36
2.2.5.4.1 Lineer elastik deformasyon.....	36
2.2.5.4.2 Plastik çökme ve yoğunlaşma.....	40
2.2.5.4.3 Enerji absorpsiyonu.....	44
2.3 Sandviç Malzemelerin Kullanım Alanları.....	45
2.4 Sandviç Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları.....	46
2.4.1 Sandviç kompozitlerin avantajları.....	47
2.4.2 Sandviç kompozitlerin dezavantajları.....	47
2.5 Sandviç Yapı Dizaynı.....	48
2.5.1 Eğilme rijitliği.....	48
2.5.2 Gerilmeler.....	50
2.5.3 Şahimler.....	53
2.5.4 Gerinim enerjisi (U).....	56
2.5.4.1 Çekirdek gerinim enerjisi ( $U_c$ ).....	58
2.5.4.2 Yüzey gerinim enerjisi ( $U_f$ ).....	59
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	60
3.1 Deneysel Malzemeler.....	60
3.1.1 Çekirdek malzemeleri.....	60
3.1.2 Yüzey Malzemeleri.....	61
3.1.3 Yapıştırıcı Malzemeler.....	61

3.2	Deneysel Yöntemler.....	61
3.2.1	Alüminyum köpük üretimi .....	61
3.2.1.1	Karıştırma ve presleme .....	62
3.2.1.2	Deformasyon .....	63
3.2.1.3	Köpükleştirme prosesi.....	64
3.2.2	CTP üretimi .....	65
3.2.3	Sandviç kompozit üretimi .....	65
3.2.4	Mekanik test yöntemleri .....	66
3.2.4.1	Sandviçin kenarı doğrultusunda (edgewise) basma test yöntemi .....	66
3.2.4.2	Sandviçin yüzeyi doğrultusunda (flatwise) basma test yöntemi .....	68
3.2.4.3	Üç nokta eğilme test yöntemi.....	75
3.2.4.4	Düşük hızlı darbe test yöntemi.....	77
4.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....	82
	KAYNAKLAR .....	85
	ÖZGEÇMİŞ .....	89

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Gaz üfleme metodunda kullanılan tipik alaşımlar .....	18
Çizelge 2.2. ALPORAS yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	20
Çizelge 2.3. FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları .....	22
Çizelge 2.4. Toz metalurjisi yönteminin avantaj ve dezavantajları.....	24
Çizelge 3.1. AKS panelin kimyasal kompozisyonu .....	60
Çizelge 3.2. AKS panelin fiziksel ve geometrik özellikleri .....	61
Çizelge 3.3. Alüminyum köpük test numuneleri.....	64
Çizelge 3.4. AKS panel çekirdekli sandviç üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri.....	78
Çizelge 3.5. Darbe testleri sonuçları .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Sandviç kompozitin temel elemanları.....	4
Şekil 2.2. Eğilme durumunda katı ve sandviç kirişlerin rijitliklerinin karşılaştırılması .....	4
Şekil 2.3. Eğilme durumunda sandviç kompoziti oluşturan elemanların taşıdığı yükler.....	6
Şekil 2.4. Metal köpük .....	13
Şekil 2.5. a) Gözenekli metal b) Metal sünger.....	14
Şekil 2.6. Metal köpüğün hücre yapısı.....	15
Şekil 2.7. a) Açık hücre modeli b) Kapalı hücre modeli.....	16
Şekil 8. a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal köpük.....	16
Şekil 2.9. Gaz üfleme metodu .....	17
Şekil 2.10. Alüminyum köpük üretiminde işlem sınırları .....	18
Şekil 2.11. Köpükleştirici ajanlar yardımıyla üretim yöntemi .....	19
Şekil 2.12. FORMGRIP işleminin birinci adımı.....	21
Şekil 2.13. FORMGRIP yönteminin aşamaları.....	22
Şekil 2.14. Toz metalurjisi metodu.....	23
Şekil 2.15. Hassas döküm metodu .....	25
Şekil 2.16. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm metodu .....	25
Şekil 2.17. DUOCEL metodu .....	26
Şekil 2.18. Boşluk tutucu malzeme ile üretimin şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.19. Köpük metallerin kullanım alanları .....	28
Şekil 2.20. Köpük metallerin otomotiv alanında uygulamaları .....	28
Şekil 2.21. Hafif ağırlıklı alüminyum sandviç panel .....	29
Şekil 2.22. Çarpışma kutusunun kullanıldığı yer .....	29
Şekil 2.23. Çarpışma kutusu numuneleri .....	30
Şekil 2.24. Tramvaylar için çarpışma emici.....	30
Şekil 2.25. Viyadük altında ses emen levha yapısı .....	31
Şekil 2.26. Metal köpük matrisli eşanjör .....	33
Şekil 2.27. Açık hücreli metal köpük boyunca soğutulan çoklu çip modülü.....	33
Şekil 2.28. Metal köpük susturucular.....	34
Şekil 2.29. Metal köpükten üretilmiş masa ve sandalyeler .....	35
Şekil 2.30. Metal köpüklerin tipik gerilme-gerinim grafiği.....	37
Şekil 2.31. Açık gözenekli metal köpüğün şematik gösterimi .....	38
Şekil 2.32. Eksenel basma durumunda gözenek kenarının eğilmesi .....	39
Şekil 2.33. Basma durumunda metal köpüğün tipik davranışı .....	41
Şekil 2.34. Köpük yoğunluğunun gerilmeye etkisi.....	41
Şekil 2.35. Açık gözenekli metal köpüklerde plastik menteşe oluşumu .....	42
Şekil 2.36. Basma durumunda kapalı gözenekli metal köpük için plastik çökme.....	43
Şekil 2.37. Basma durumunda Al köpük ve yüksek yoğunluklu malzemenin enerji absorbsiyonu.....	44
Şekil 2.38. Farklı yoğunluklardaki Al köpüklerin enerji absorpsiyonu .....	44
Şekil 2.39. Sandviç bir kiriş örneği.....	49
Şekil 2.40. Sandviç bir kirişte kayma gerilmesi dağılım çeşitleri (Anonim, 2003a) .	53
Şekil 2.41. Sandviç kirişin sehimi (Anonim, 2003a) .....	54

Şekil 2.42. Sandviç bir kirişin kayma deformasyonu (Anonim, 2003a).....	55
Şekil 2.43. zx-düzleminde deforme olan kirişin bir kesiti (Anonim, 2003a).....	57
Şekil 3.1. Sandviçin kenarı doğrultusunda basma testi gerilme-%uzama eğrileri.....	67
Şekil 3.2. Sandviçin kenarı doğrultusunda basma testi yük-sehim eğrileri .....	68
Şekil 3.3. Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma testi gerilme-%uzama eğrileri ....	69
Şekil 3.4. Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma testi yük-sehim eğrileri.....	70
Şekil 3.5. Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin [0°] elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	70
Şekil 3.6. Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin [0°/90°] elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	71
Şekil 3.7. Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin [45°/- 45°] elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	71
Şekil 3.8. Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin antisimetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	72
Şekil 3.9. Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin simetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	72
Şekil 3.10. Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin [0°] elyafli sandviç için karşılaştırılması .....	73
Şekil 3.11. Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin [0°/90°] elyafli sandviç için karşılaştırılması.....	73
Şekil 3.12. Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin [45°/-45°] elyafli sandviç için karşılaştırılması.....	74
Şekil 3.13. Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin antisimetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması.....	74
Şekil 3.14. Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin simetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması.....	75
Şekil 3.15. Oryantasyon açılarına göre gerilme-%uzama eğrilerinin karşılaştırılması .....	76
Şekil 3.16. Oryantasyon açılarına göre yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması .....	77
Şekil 3.17. TİP A grubu sandviçlerin yük-uzama eğrileri .....	79
Şekil 3.18. TİP B grubu sandviçlerin yük-uzama eğrileri.....	80
Şekil 3.19. TİP A grubu sandviçlerin yük-zaman eğrileri .....	80
Şekil 3.20. TİP B grubu sandviçlerin yük-zaman eğrileri.....	81

**RESİMLER DİZİNİ**

Resim 3.1. Alüminyum köpük sandviç panel.....	60
Resim 3.2. Presleme işlemi .....	62
Resim 3.3. Presleme sonucu elde edilen numune .....	62
Resim 3.4. Ekstrüzyon sonucu elde edilen numune.....	63
Resim 3.5. Haddelme sonucu elde edilen numune ve markalanması .....	63
Resim 3.6. Köpürme işleminden sonraki basma ve eğilme testi numuneleri .....	64
Resim 3.7. Basma ve üç nokta eğilme deneyleri için sandviç kompozit test numuneleri.....	66
Resim 3.8. Düşük hızlı darbe deneyi için sandviç kompozit test numunesi .....	66
Resim 3.9. Sandviçin kenarı doğrultusunda basma test düzeneği .....	67
Resim 3.10. Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma test düzeneği.....	69
Resim 3.11. Üç nokta eğilme test düzeneği .....	76

**SİMGELER VE KISALTMALAR**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
%	Yüzde
°C	Santigrat Derece
MPa	Megapaskal
kg/cm <sup>3</sup>	Kilogram/ Santimetre küp
μ	Mikron
g/cm <sup>3</sup>	Gram/ Santimetre küp
mm	Milimetre
cm	Santimetre
kg	Kilogram
m	Metre
km/h	Kilometre/ Saat
W/m <sup>2</sup>	Vat/ Metre kare
€/kg	Avro/ Kilogram
g/m <sup>2</sup>	Gram/ Metrekare
°	Derece
g	Gram
mm/min	Milimetre/ Dakika
FORMGRIP	Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor
CTP	Camelyaf Takviyeli Plastik
ASTM	American Society for Testing and Materials

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
SiC	Silisyum Karbür
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alümina
MgO <sub>2</sub>	Magnezyum Oksit
MPa	Megapaskal
AlSi8Mg	Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımı
AlSi8MgCuNi	Alüminyum-Silisyum-Magnezyum-Bakır-Nikel Alaşımı
AA 6061	Alüminyum Alaşımı
TiH <sub>2</sub>	Titanyum Hidrür
ZrH <sub>2</sub>	Zirkonyum Hidrür
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum Nitrür
CaCO <sub>3</sub>	Kalsiyum Karbonat
HfH <sub>2</sub>	Hafniyum Hidrür
AlSi7Mg	Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımı
Cr (VI)	Krom (VI)
AKS	Alüminyum Köpük Sandviç



## 1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, optimum ağırlık, korozyon direnci, ısı iletkenlik ve yüksek mukavemet gibi özellikleri temin edebilmek için iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle elde edilirler. Sandviç kompozitler ise, üç temel elemandan bir araya gelerek istenilen mekanik özelliği sağlamak amacıyla oluşturulurlar. Kompozit malzemelerin yapısal olarak alt dalı olan sandviç kompozitler, merkezinde bulunan çekirdek malzemesi, bu çekirdek malzemesinin alt ve üst yüzeylerinde yer alan yüzey elemanları, bu yüzey elemanları ile çekirdeği bir araya getiren yapıştırıcı maddenin kullanımı ile istenilen mekanik özelliği sağlamak amacıyla bir araya getirilerek üretilirler. Düşük özgül ağırlıklarına karşın sahip oldukları rijitlik, yüksek mukavemet, düşük ısı iletkenliği ve yüksek ısı mukavemetleri ile sandviç kompozitler, özellikle uçak ve uzay endüstrisinde kullanılmasına karşın, otomotiv, denizcilik, spor araçları ve ulaşım gibi birçok sektörde de geniş bir kullanım alanı bulmaktadır.

Sandviç kompozitlerin, hafiflik ve mukavemet açılarından avantajlı olmasına karşın, üretim maliyetinin yüksek olması ve yüzeyler arasındaki yapışmanın net olarak incelenememesi gibi bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Ancak son yıllardaki üretim yöntemlerinin çeşitliliğinin artması ile sandviç kompozitlerin üretim maliyeti bazı konvansiyonel malzemelerin üretimine nazaran daha ucuz olmaya başlamıştır (Tanatmış,1999).

Kompozit malzemeler tabakalı kompozitler ve sandviç kompozitler olarak iki şekilde üretilebilmektedir (Wick ve Veilleux, 1986). Özellikle hava araçlarında kalınlığın artmasıyla ağırlığın artması problemi sandviç yapı kullanılarak çözülmektedir ( Tolun, 1991).

Sandviç kompozitlerin özelliklerindeki farklılıklar ve üretim yöntemlerindeki karmaşıklıklardan dolayı bu kompozitlerin yapısal bütünlüğü ve özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için çeşitli mekanik deneylerin yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada bu özelliklerin tespiti için, üretilen sandviç kompozitlerin kenarı

(edgewise) ve yüzeyi (flatwise) doğrultusunda basma, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe mekanik test yöntemleri uygulanmıştır.

Çalışmada, öncelikle sandviç kompozitler ve üretilen sandviç kompozitin çekirdeğini oluşturan alüminyum metal köpüğün genel özellikleri incelenmiş, sandviç kompozitin yapısal elemanları olan çekirdekler, yapıştırıcılar ve yüzey malzemeleri ve bu malzemelerin uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir. Sandviç kompozitlerin kullanıldığı alanlar gösterilerek avantajları ve dezavantajları sunulmuştur. Daha sonraki bölümde ise üretilen sandviç kompozit hakkında detaylı üretim aşaması verilmiş ve uygulanan basma, üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe test yöntemlerinin sonuçları gösterilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, günümüzde gelişen teknoloji ile sandviç kompozitlerin yer aldığı sektörler açısından üretim maliyetinin azaltılması ve istenilen mukavemet değerlerinin yakalanması için uygulanan test yöntemlerinin önemi vurgulanmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1 Sandviç Kompozitler

Her ne zaman yeni bir malzeme veya üretim metodu geliştirilse, kullanımlarına dair bir tepki oluşmaktadır. Bu tepkileri gidermenin en iyi yolu ise yeni üretilen malzeme veya üretim metodu hakkında detaylı olarak bilgi vermektir.

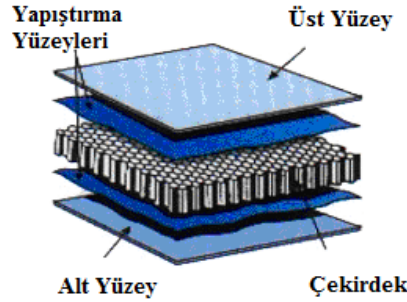
Tarihi olarak, aralarında belirli bir mesafe bulunan iki yüzeyin bir araya getirilerek kullanılması esası 1820 yılı civarında Delau tarafından bulunmuştur. Sandviç yapılar yoğun olarak ilk defa 2. Dünya Savaşı sırasında kullanılmıştır. Savaş sırasında İngiltere’de uçak yapımında kullanılan diğer malzemelerin bulunmaması sebebiyle Mosquito uçağında sandviç yapı kullanılmıştır. Bu sandviç yapıdaki yüzeyler kaplama tahtasından (veneer) ve çekirdek de balsa ağacından yapılmıştır (Anonim, 2003a).

Sandviç yapı hakkındaki ilk teorik yazılar 2. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıkmıştır. 1950’lerde sandviç yapının gelişimi özellikle balpeteği (honeycomb) malzemeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Balpeteği yapısı temel olarak uçak endüstrisinde çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktaydı. Bununla birlikte, balpeteğinin korozyonla ilgili büyük problemlerin olması gibi sınırlamaları mevcuttu (Anonim, 2003a).

1950’lerin sonunda ve 1960’lar boyunca çekirdek malzemesi olarak uygun olan farklı hücresel plastikler üretilmiştir. Başlangıçta poliüretan ve polisitiren gibi oldukça yumuşak malzemeler yalıtım özellikleri nedeniyle kullanılmıştır. Daha sonra daha yüksek yoğunluklu ve daha sert hücresel plastiklerin üretimi gerçekleştirilmiş ve böylelikle sandviç yapılar çok daha kullanışlı ve esnek bir konsepte bürünmüştür. Bugünlerde, muazzam sayıda farklı kalitedeki hücresel plastikler çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktadır (Anonim, 2003a).

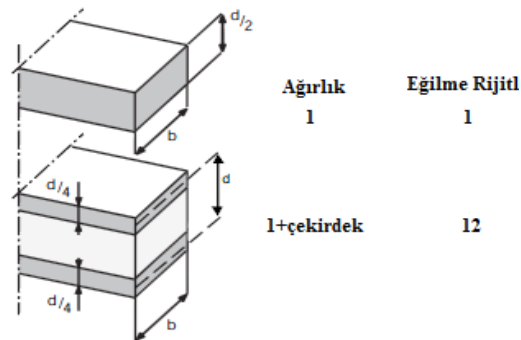
Sandviç kompozitler teknolojik kompozitlerin en önemli uygulamalarındandır. Tanım olarak kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin istenilen yerdeki

özelliği sağlamak amacıyla, makro düzeyde bir araya gelmesiyle elde edilen yeni bir malzemedir. Sandviç kompozitler de tanım olarak kompozit malzemelerin tanımına uymaktadır. Sandviç kompozitlerde farklı yapılar, istenilen yerdeki özelliğin sağlanması için birbirleri içinde çözünmeden bir araya getirilirler. Bir araya getirme işlemi, adhesive adı verilen yapışkan yüzeylerle sağlanmaktadır.



**Şekil 2.1.** Sandviç kompozitin temel elemanları

Sandviç bir yapı üç temel elemandan meydana gelmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere en dışta alt ve üst yüzeyler, orta kısımda çekirdek olarak adlandırılan malzeme ve bağlantıyı sağlayan yapıştırıcı (adhesive) katmanlardan oluşmaktadır. Her bir parça bir birim olarak kendisine ait olan spesifik fonksiyonunu yerine getirmektedir. Burada amaç malzemeleri maksimum verimlilikte kullanmaktır. Yüzey malzemeleri atalet momentini artırmak için birbirlerinden belirli bir mesafede yerleştirilirler ve dolayısıyla eğilme rijitliği artırılmış olur. Sandviç bir kiriş katı bir kiriş ile kıyaslandığında, aynı genişlik ve ağırlıktaki katı kirişe göre daha yüksek atalet momenti sebebiyle kayda değer derecede daha yüksek rijitliğe sahiptir (Anonim, 2003a).



**Şekil 2.2.** Eğilme durumunda katı ve sandviç kirişlerin rijitliklerinin karşılaştırılması

Basit bir örnek olarak Şekil 2.2, sandviç bir kiriş ile katı bir kiriş arasındaki eğilme rijitliği farkını göstermektedir. Sandviç kirişin eğilmesi durumunda yüzeyler normal gerilmeleri taşıırken, çekirdek malzemesi ise kayma gerilmesini taşımaktadır. Yine bu durumda yüzey malzemeleri de kayma gerilmesini taşımaktadır ancak ihmal edilebilecek ölçüde küçüktür (Anonim, 2003a).

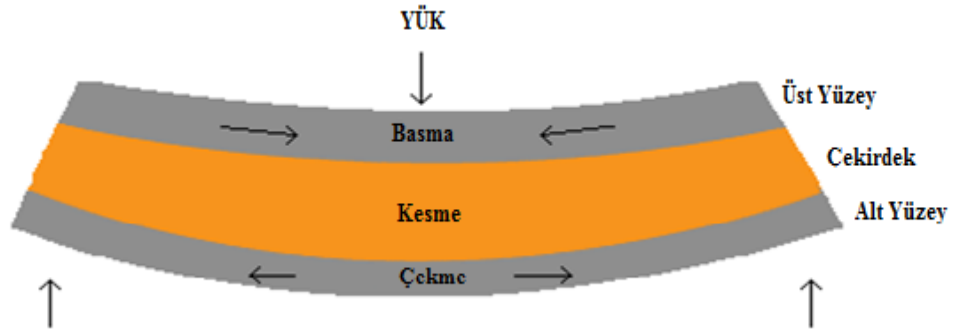
Sandviç içerisinde yer alan tüm elemanları şu şekilde açıklayabiliriz:

Yüzeyler, sandviç yapı içerisindeki basma ve çekme gerilmelerini taşır. Genellikle yüzey elemanı olarak çelik, paslanmaz çelik, alüminyum gibi konvansiyonel malzemeler kullanılmaktadır. Bir çok durumda cam veya fiber takviyeli plastikler yüzey malzemesi olarak seçmek de uygun bir durumdur. Çünkü bu tür malzemelerin uygulaması oldukça kolaydır.

Yüzeyler aynı zamanda bölgesel basınçları da taşımaktadır. Bölgesel basınç yüksek olduğunda yüzeyler kayma kuvvetleri için bölgesel basınçlara bağlı olarak boyutlandırılmalıdır.

Çekirdek, birçok önemli fonksiyona sahiptir. Yüzeyler arasındaki mesafeyi korumak için çekirdeğin yeterince rijit olması gerekmektedir. Yüzeylerin birbirleri üzerinde kaymaması için çekirdek, kayma durumunda çok rijit olmalıdır. Kayma rijitliği yüzeyleri birbirleriyle hareket etmeye zorlamaktadır. Eğer çekirdek kayma durumunda zayıfsa yüzeyler birlikte hareket etmez ve sandviç sertliğini kaybeder.

Adhesive (Yapıştırma Yüzeyi), yüzeyler ve çekirdeğin birlikte hareket etmesini sağlamak için yüzeyler ve çekirdek arasındaki kayma kuvvetlerini transfer edebilmelidir. Yapıştırma yüzeyi kayma ve çekme gerilmelerini taşıyabilmelidir.



**Şekil 2.3.** Eğilme durumunda sandviç kompoziti oluşturan elemanların taşıdığı yükler

Kısaca sandviç bir kompozitin sahip olması gereken özellikler özetlenirse; düşük yoğunluklu ve yeterince rijit bir çekirdek, mukavim yüzeyler, rijit ve mukavemetli yapıştırma bağlantısı olarak söylenebilir.

## 2.2 Sandviç Kompozitlerin Sınıflandırılması

Sandviç kompozitler, kendisini oluşturan elemanlarına göre değişiklik gösterdiğinden bir bütün olarak sınıflandırmaya tabi tutmak mümkün değildir. Sandviç kompozitlere giriş bölümünde bahsedildiği üzere, sandviç bir yapı üç temel elemandan oluşmakta idi. Bu yüzden sandviç kompozitleri bahsi geçen elemanlarına göre sınıflandırmaya tabi tutmak daha doğru olacaktır. Bu bölümde, sandviç kompozitlerde kullanılan yapılar, mevcut sektörler için bir sınıflandırmaya tabi tutulmuştur ve “gereç ve yöntem” bölümünde ise deneylerde kullanılan malzemeler hakkında daha detaylı bilgiye yer verilmiştir.

### 2.2.1 Yüzey malzemelerine göre

İnce levhalar halindeki hemen hemen tüm yapısal malzemeler sandviç kompozitin yüzeylerini oluşturmak için kullanılabilirler. Genellikle yüzey malzemesi olarak kullanılan materyaller metalik ve metal olmayan malzemeler olarak ikiye ayrılır. Metal malzemeler grubunda çelik, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları yer almaktadır. Metal olmayan malzemeler grubunda ise kontraplak, ahşap, takviyeli

plastik ve fiber kompozitler gibi malzemeler yer almaktadır. Yüzeylerde bulunması gereken öncelikli özellikler şunlardır: (Jappesen, 1997; Middleton, 1990; Anonim, 1999; Anonim, 2003b)

- Yüksek çekme ve basma mukavemeti
- Yüksek yüzey kalitesi
- Korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Yüksek eğilme mukavemeti sağlayan yüksek rijitlik

Cam elyaf; ilk kompozit panellerin yapımında kullanılan elyaf türü cam elyaf idi. Günümüzde çeşitli mukavemet özelliklerine sahip E, S ve R tipi cam elyafları sandviç kompozitlerin yüzeylerinde kullanılmaktadır. Cam elyaflar, reçineyi oldukça iyi özümseyebilen ve kullanımı kolay elyaflardır (Kolat, 2005).

Aramid elyaf; 1960'lı yılların sonlarında DuPont de Nemours tarafından piyasaya sürülen Kevlar aramidlerin en bilinenidir. Son yıllarda çeşitli imalatçılar değişik ticari isimlerle piyasaya aramid elyaflar sürmüşlerdir. Aramid elyafın spesifik çekme mukavemeti çelikten yaklaşık 5 kat daha fazladır yani 1 m boyunda 1 kg ağırlığında bir aramid halat, aynı boy ve ağırlıkta bir çelik halattan 5 kat daha fazla yük taşıyabilmektedir. Bu üstün çekme mukavemeti özelliği aramidlerin balistik koruma amaçlarıyla da kullanılmasına imkan tanımıştır. Sürtünme ve aşınmaya da çok dayanıklı olan bu tip elyaflar basmada aynı performansa sahip değildirler. Düşük yoğunlukları ve naylon temelli hidrofob yapıları kullanılan plastik matriksin aramid elyaflarını oldukça problemlili yapmaktadır. Aramidlerde, çok ileri reçine sistemlerinde bile, yapıdaki elyaf oranında %50'den iyisini elde etmek mümkün olamamaktadır. Ayrıca depolamada rutubet almaları bu ıslanmayı çok daha zor hale getirdiğinden yapısal bütünlük için bir tehlike oluşturur (Kolat, 2005)

Karbon elyaf; mukavemet olarak cam ve aramid elyaflarından çok daha üstün özellikler taşırlar. Darbelerin yutulması için ve çok düşük ağırlıkla rijitlik sağlamak amacıyla kullanılırlar. Düşük uzama seviyeleri ve kırılma noktaları başlarda problem

olmuşsa da günümüzdeki yüksek uzamalı karbon elyaflarının bulunmasıyla bu problemler ortadan kalkmıştır. Plastik matriks içerisinde ısınabilme özellikleri oldukça iyidir (Kolay, 2005).

Boron elyaf: Metal takviyeli kompozitlerde sıklıkla kullanılır. Gaz türbini kanatları gibi yüksek ısıda üstün mukavemet gerektiren yerlerde alüminyum oksit matriks içerisinde boron elyafları kullanılır (Kolay, 2005).

Diğer plastik elyaflar: kompozit yapılarda, az miktarda olsa da amaca uygun olarak naylon(Nomex) ve polietilen elyaflar da kullanılmaktadır (Kolay, 2005).

### **2.2.2 Yapıştırıcı malzemelere göre**

Birleştirme işlemi için birçok çeşit yapıştırıcı bulunmaktadır. Yapıştırıcılar sandviçin yapısal gerekliliklerini karşılayacak malzemeler arasında iyi ve uygun birleştirici özelliğe sahip olmalıdır. Yorulma mukavemeti, ısıl mukavemet ve sürünme mukavemeti yapıştırıcılar ile ilgili öncelikli olan özelliklerdir. Sıklıkla kullanılan bazı yapıştırıcılar şunlardır (Jappesen, 1997; Middleton, 1990; Anonim, 1999):

Epoksi reçine: genelde 20-90 °C arasında kurlaşen düşük sıcaklık reçineleri ve 130-220 °C arasında kurlaşen yüksek sıcaklık reçineleri bulunmaktadır. Bunların çözücüsüz kullanılma ve buhar oluşturmada kurlama gibi avantajları vardır. Bu da malzemede düşük bir hacim küçülmesi sağlar.

Çözücülerin bulunmayışı epoksileri neredeyse tüm çekirdek malzemeleri ile kullanılabilir hale getirmektedir. Epoksilerin gerilme dayanımı yaklaşık olarak 20-25 MPa'dır (Jappesen, 1997; Anonim, 2003b).

Geliştirilmiş epoksi reçineler: normal epoksilere benzerdir fakat büyük ölçüde direnç sağlayan polisülfat elastomer gibi sentetik kauçuk ile karıştırılmışlardır (Anonim, 2003b). Ne kadar fazla elastomer kullanılırsa, o kadar fazla tel haline getirilebilirlik artar. Ayrıca sürünme duyarlılığı da artarken, ısı direnci azalmaktadır.



Fenolikler; mükemmel bir dayanıma, yüksek mekanik özelliklere ve sürekliliğe sahiptirler. Başlıca dezavantajları, kürlenme yaparken gerekli boşaltma sırasında bir miktar su ortaya çıkartmalarındır. Viskozitesi oldukça yüksektir. Bu karakteristikler, boşaltımın engel olmadığı ve yüksek sıcaklık bağlantısı gerektiren petek yapımı prosesinde fenoliğin kullanımını kısıtlamaktadır. Dışarıya gaz salınımı fenoliğin sandviç yapıların birleştirilmesinde kullanımını kısıtlamaktadır (Anonim, 2003b).

Poliüretanlar; sandviç yapıları birleştirmede kullanılan en yaygın yapıştırıcılardır. Bunun sebebi çoğu malzemeye mükemmel yapışma özelliklerindedir. Değişik viskozitelere katı veya sıvı olarak kullanılabilirler. Yangın geciktirici ve su geçirmezlik özelliklerine sahiptir. Poliüretanlar çözücü içermediğinden çevreye zararları yoktur ve diğer reçineler arasında zehir oranı en az olan yapıştırıcılardır.

Akrilatlar; çok dayanıklıdır ve neredeyse kürlenme sırasında hiç hacim küçülmesi meydana getirmezler. Sandviç yapılarıdaki köpük çekirdeğin yüzey-çekirdek arası bağlayıcılığını artırmanın bir yolu da çekirdeğe en yakın ilk destekleyici tabakada akrilat kullanmaktır. Tabakanın geri kalan kısmı da ıslak olarak, örneğin akrilat tabakasının en üstünde polyeşter reçine kullanılarak tabakalandırılabilir ve böylelikle daha mükemmel bir iç bağlantı elde edilmiş olunur. (Anonim, 1999; Anonim, 2003b)

Polyester ve vinileşter reçineler; özellikle havacılık endüstrisinde güçlendirilmiş plastik kompozitlerde kullanılan en yaygın matris malzemeleridir. Prefabrike edilmiş tabakalar, örneğin köpük veya balsa çekirdekler tabakadaki aynı reçineyi kullanarak bağlantı oluşturabilirler. Genellikle tabaka doğrudan doğruya çekirdek üzerine inşa edilir ve tabakanın ilk katı çekirdeğe ıslak olarak yayılıp direkt olarak ona bağlanır. Bu işlemlerde tüm yüzey hücrelerini doldurmak şarttır. Aksi takdirde bağlantı hattında kuru alanlar kalabilir. (Jappesen, 1997; Middleton, 1990; Anonim, 2003b) Bu reçinelerin bir problemi, kürlenme sırasında meydana gelen hacim küçülmelerinin çok yüksek kesme gerilmesi meydana getirmesidir.

### 2.2.3 Çekirdek malzemelerine göre

İki ince levha arasına yapıştırılan çekirdek malzemesi rijit ve düşük ağırlıklı bir yapı oluşturur. Çekirdek malzemesi yapıya büyük bir basma mukavemeti de sağlamaktadır.

Sandviç bir yapıda çeşitli çekirdek formları kullanılmaktadır. Bunlar petek çekirdek, köpük çekirdek ve ahşap çekirdeklerdir (Jappesen, 1997).

*Balpeteği (Honeycomb) çekirdekler;* hafif ağırlıklı uçak yapılarındaki uygulamaların çoğunda köpük çekirdekler yer alırken, petek yapılar ise yüksek performanslı uygulamaların çoğunda sandviç çekirdeği olarak kullanılır (Crane, 1996; Jappesen, 1997). Bu tip çekirdek yapısı doğal bal peteği biçimindedir ve çok yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Bu nedenle uçak ve helikopterlerin taban ve duvar panellerinde, kaplamalarında, kompleks şekilli kontrol yüzeylerinde ve hatta bazı helikopterlerin rotor palalarında da petek yapılar kullanılmaktadır (Jappesen, 1997; Middleton, 1990).

Uçak petek çekirdekleri genellikle sabit veya değişken kalınlıkta imal edilirler. Petek yapı, kıvrılmış şeritlerden oluşan çekirdek malzemesinin birleştirilmesi ile oluşturulur. Şeridin yönü peteğin bir kenarından yırtarak bulunabilir. Yırtığın yönü şeridin yönüne paralel olur. Petek, şerit yönü dışında yırtılmamaktadır. Onarım yapılırken yenilenen şerit yönünün orijinal parçanın şerit yönünde olması gerekmektedir (Jappesen, 1997).

Petek, köpük yapıştırıcı ile tutturulabilir. Köpük yapıştırıcı birleştirilecek bölümler arasına yayılır. Yapıştırma işlemi sırasında köpük, petek çekirdeğin boşluklarına doğru yayılır. Bunun için ısıtılarak kurutulan köpük bir yapıştırıcı kullanılır (Jappesen, 1997).

Petek çekirdek, normalde kalınlık yönünde peteklere dikey yönde etki eden basma gerilmeleri etkisinde kalır. Bu nedenle dikey yönde yeterince dayanıklı olmalıdır. Petek çekirdek, genişlik doğrultusunda çok az mukavemete sahiptir (Crane, 1996)

Ahşap çekirdekler: balsa ağacı veya sert ağaçtan yapılan levhalar yüksek mukavemete sahip malzemelerden yapılan tabakalara yapıştırılırlar. Ahşap malzemeler yapıya yüksek bir basma dayanımı sağlamaktadır. Balsa ağacı çekirdek malzemesi olarak havacılık endüstrisinde yaklaşık olarak 40 yıldır kullanılmaktadır. (Anonim, 1999; Anonim, 2003b)

Çalışmada, yukarıda belirtilen çekirdek malzemeleri yerine köpük yapıya sahip çekirdekler kullanılmıştır. Bu sebeple köpük çekirdekler bir sonraki bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

#### **2.2.4 Köpük çekirdekler**

Uygulamalara bağlı olarak kullanılan birçok değişik tipte köpük bulunmaktadır. Köpükler onarım için kullanıldıklarında, uygun tipin uygun yoğunlukta kullanılması önemlidir (Jappesen, 1997).

Son zamanlarda yüksek yoğunluklu ve yüksek kaliteli hücresel köpüklerin gelişmesi, sandviç yapıların kullanımında oldukça etkili olmuştur. Hücresel köpükler, petekler kadar yüksek sertlik ve mukavemet/ağırlık oranına sahip değildirler. Öncelikle hücresel köpükler, peteklere nazaran daha ucuzdur fakat makroskobik seviyede katıdırlar. Bu da sandviç elemanlarının üretimini kolaylaştırır. Köpükler, yüzeyi birleştirmek için uygundur. Yüzey hazırlama ve şekil verme kolaydır. Köpükler, yüksek termal izolasyon ve akustik izolasyon özelliklerine sahiptirler. Çoğu köpüğün sıkı bir hücre yapısına sahip olması su nüfuziyetinin bir sorun olmaktan çıkmasına neden olmaktadır.

Düşük maliyetli, düşük ağırlıklı, mükemmel termal izolasyonlu, yüksek basma dayanımlı, nem oluşumunu engelleme ve yüksek korozyon dirençli olmaları

nedenleriyle özellikle havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılan (Anonim, 1999) köpük çeşitleri aşağıda verilmiştir.

Poliüretan köpükler; çok veya az açık hücreli olarak birçok değişik tipte üretilirler ve yoğunlukları  $30-500 \text{ kg/m}^3$  arasında değişiklik gösterir (Middleton, 1990).

PVC köpükler; hem polyester hem de epoksi reçineler ile kullanılabilir. Kızgın tel kesici ile kesilebilirler.

Suni köpük; genel olarak atölye yapımı uçaklarda kullanılır ve sadece epoksi reçine ile birlikte kullanılmalıdır. Polyester reçine suni köpüğü çözümlenebilmektedir.

İstenilen şekli verebilmek için suni köpük bir kızgın tel kesici ile kesilebilir. Kesilecek olan köpüğün her iki yüzüne de bir şablon yerleştirilir. Daha sonra tel ısıtılır ve şablon etrafından geçirilir. Düzgün kavisletilmiş yüzeyler kızgın tel kesici ile elde edilebilir. (Jappesen, 1997)

Üretan köpükler; hem epoksi hem de polyester reçine ile birlikte kullanılabilir. Üretan, suni köpüğün kesildiği kızgın tel ile kesilemez. Çünkü üretan yüksek sıcaklığa maruz kaldığında zararlı bir gaz ortaya çıkmaktadır. Üretan, genel amaçlı kullanılan kesici aletler ile kesilebilir.

Tez çalışmasında, köpük çekirdek çeşitlerinden metal köpüklerle ilgili araştırma yapılmıştır. Bu sebeple metal köpükler bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenmiştir.

### **2.2.5 Metal köpükler**

Metal köpükler, sünger ve mercan gibi gözenekli yapıların bir türüdür. Doğada saf halde bulunan bir ürün değildir. Şekil 2.4'te metal bir köpük örneği gösterilmiştir. Metal köpüklerin gözenekli yapıya sahip şekillerini alabilmeleri için köpürtücü

ajanlar olarak adlandırılan bazı fonksiyonel malzemeler kullanılmalıdır (Ma ve He, 1999). Metal köpüklerle ilgili yapılan çalışmalar sadece bilimsel anlamda değil, endüstriyel olarak da faydalı olmuştur ve son zamanlarda bu sayede düşük yoğunluklu olan malzemelerin geliştirilmesine karşın büyük bir talep artışı meydana gelmiştir. Özellikle düşük ağırlığın ve güvenliğin en önemli faktörler olarak yer aldığı otomotiv, deniz, uçak ve uzay endüstrisi gibi alanlardaki bazı mühendislik problemleri gözenekli malzemeler ile çözülmüş ve bu alanlarda metal köpüklere duyulan gereksinim gözlenmiştir. (Elliot, 1956)



**Şekil 2.4.** Metal köpük

Metal köpükler, iyi enerji absorbe özelliği, yüksek basma dayanımı, düşük özgül ağırlığına karşın yüksek rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özellikleri ile bilinirler. Özellikle alüminyum köpükler, çok hafif olması ve kapalı hücre yapısı ile göze çarpmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı alüminyum köpükler ses ve enerji absorpsiyonunda fonksiyonel olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

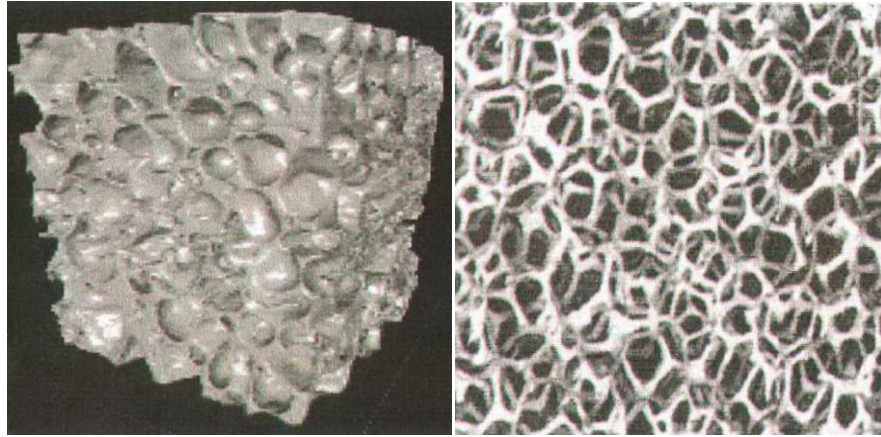
Metal köpüklerin farklı üretim yöntemlerinden dolayı birkaç çeşidi bulunmaktadır. Bu yüzden metal köpüklerin tam olarak teşhis edilmesi gerekmektedir. Bu teşhis için ise hücreli metaller, gözenekli metaller, katı metal köpükler ve metal süngerlerin anlamlarını bilmek gerekmektedir.(Banhart, 2001b)

Hücresel Metaller: Metalik yapı ile ilgili olan en genel anlamı ifade eder. Metalik yapı bir çeşit gaz boşluğu şeklinde bulunmaktadır.

Gözenekli Metaller: Hücresel metallerin özel bir türüdür. Boşlu türü sınırlandırılmıştır ve gözenekler genellikle yuvarlak ve birbirinden ayrılmıştır.(Şekil 2.5.a)

Katı Metal Köpükler: Gözenekli metallerin özel bir türüdür. Köpükler sıvı metalden dolayı meydana gelmiştir. Bu yüzden morfolojik olarak sınırlı yapıdadır. Gözenekleri kapalı, yuvarlak veya elipstir. Gözenek duvarlarının ince tabakalı olmasından dolayı diğerlerinden ayrılmaktadır.

Metal Süngerler: Diğer bilindiği ismi açık gözenekli metalik köpüklerdir. Deniz süngerine benzeyen bu tür köpüklerin gözenekli metal morfolojisinde genellikle boşluklar birbirine bağlanmıştır. (Şekil 2.5.b)



(a)

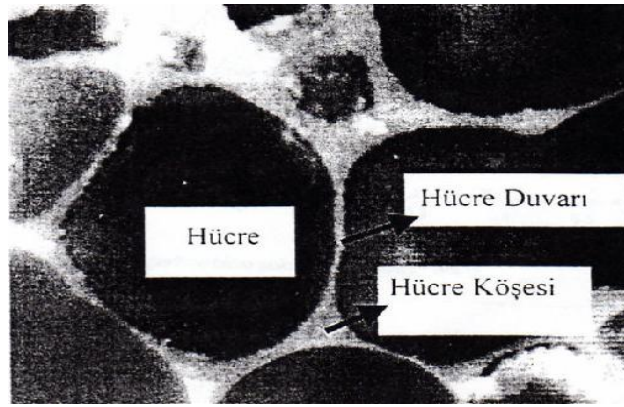
(b)

Şekil 2.5. a) Gözenekli metal b) Metal sünger

### 2.2.5.1 Metal köpük üretim metotları

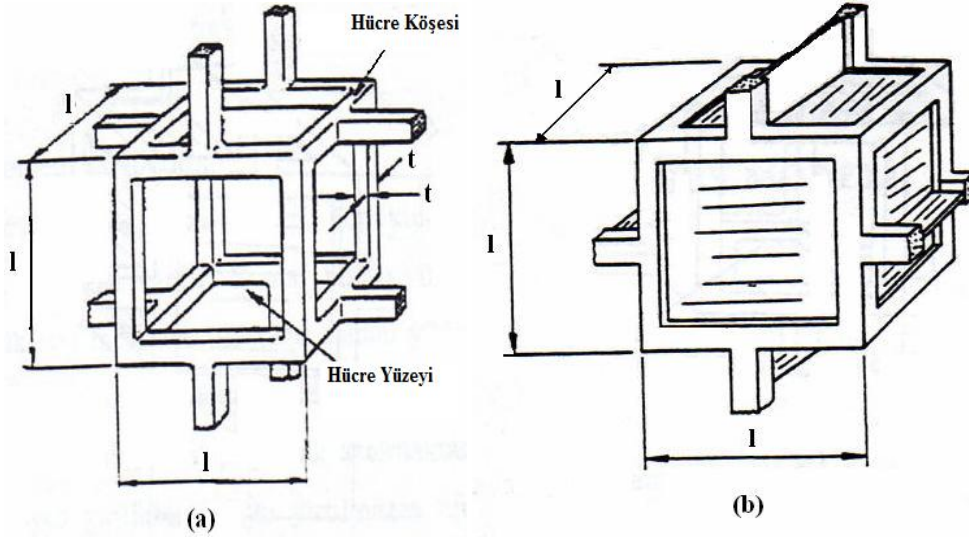
Alüminyum köpük metal uzun yıllardan günümüze çeşitli yöntemler kullanılarak geliştirilmiş olup ticari önemi nedeniyle en çok alüminyum gibi hafif metallerden üretilmektedir.

Yapısında dağılmış küçük boyutlu gaz kabarcıkları bulunan sıvılar, sıvı köpük olarak tanımlanır. Sıvı metal köpük, katılaşma noktasının altında bir sıcaklığa getirilirse katı metal köpük oluşur. Metal köpükte her bir gaz kabarcığının oluşturduğu hacme “hücre” denir (Şekil 2.6). Hücre, hücre duvarları ve hücre köşelerinden oluşur. Hücre duvarı iki gaz kabarcığının oluşturduğu sınır, hücre kösesi ise üç gaz kabarcığının kesiştiği yerdir. Hücre köşesi hücre duvarından daha kalındır (Elbir ve ark., 1999).

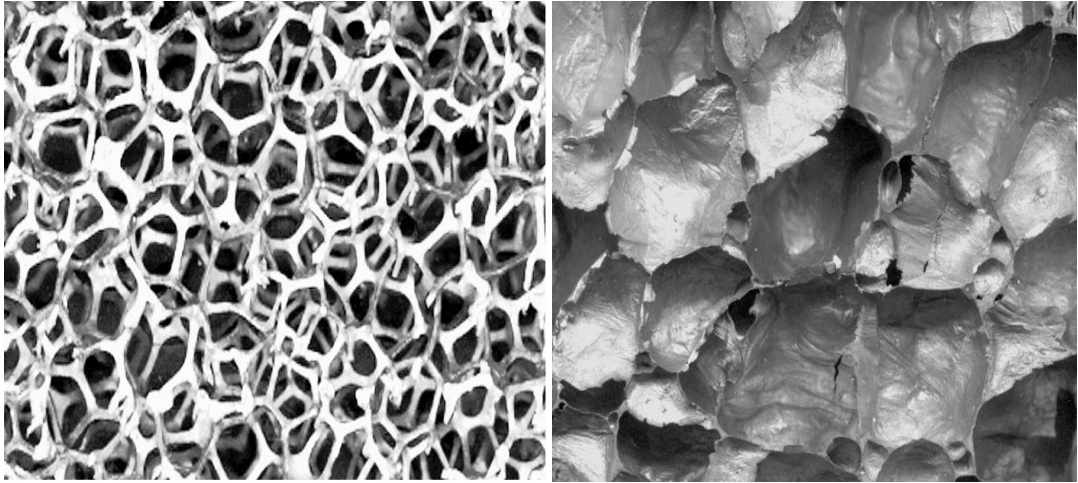


**Şekil 2.6.** Metal köpüğün hücre yapısı

Köpük metallerin “açık hücreli” ve “kapalı hücreli” olmak üzere iki çeşidi bulunmaktadır. Köpük metaller incelenmeden önce bu terimlerin ne anlama geldiğinin anlaşılması gereklidir. Metalik köpüklerin %80-90’ı gözeneklerden oluşmaktadır. Eğer gözenekler birbiriyle bağıntılı bir halde bulunuyorsa bu yapıya “açık hücreli köpük metal” adı verilmektedir. “Kapalı hücreli köpük metaller” de ise hücrelerin her birinin içerisinde gaz hapsedilmiştir ve birbirinden yalıtılmış bir halde bulunmaktadır. Şekil 2.7’de açık ve kapalı hücreli köpük metal hücre modelleri verilmiştir. Şekil 2.8’de de açık ve kapalı köpük metallerin hücre yapıları görülmektedir (Amjad, 2001).



Şekil 2.7. a) Açık hücre modeli b) Kapalı hücre modeli



(a)

(b)

Şekil 8. a) Açık hücreli metal köpük b) Kapalı hücreli metal köpük

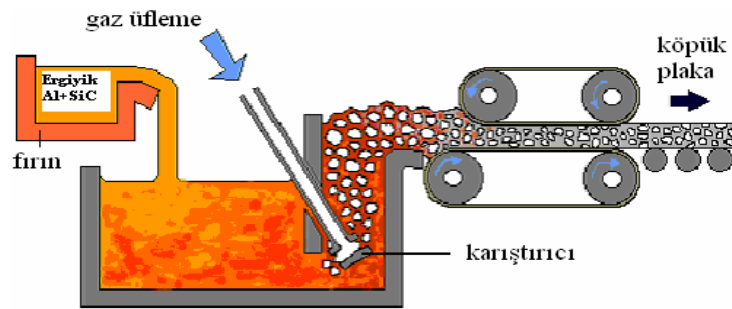
Köpük metallerin yukarıda belirtilen gözenek yapılarına göre çok çeşitli üretim yöntemleri olup, bu yöntemler aşağıda açıklanmıştır.



### 2.2.5.1.1 Kapalı hücreli metal köpük üretim metotları

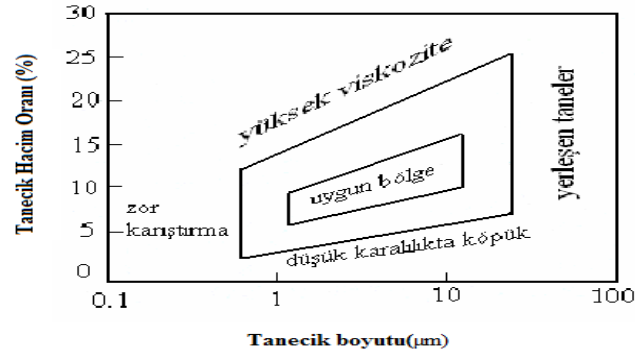
Kapalı hücreli köpük metaller için gaz üfleme, köpürtücü ajan kullanımı, toz metalurjisi ve köpükleşebilen öncülerin kullanılması gibi pek çok üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Gaz üfleme ile kapalı hücreli metal köpük üretim metodu; Hydro Aluminium (Norveç) ve Cymat Aluminium (Kanada) tarafından keşfedilmiştir. Bu yönteme göre (Şekil 2.10) SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya MgO<sub>2</sub> tozları eriyiğin viskozitesini yükseltmek için eriyiğe ilave edilmektedir. Burada oluşabilecek bir problem eriyiğe ilave edilen parçacıkların eriyik tarafından ıslatılabilmesi ve eriyik içinde homojen bir şekilde karışabilmeleridir. Bunun için özel bir karıştırma tekniği kullanılmaktadır. Köpüklenmekteki ikinci adım ise oluşan bu metal matris kompozite gaz ilave edilmesidir. Gaz olarak soy gazlar tercih edilmektedir (argon, vb.). Gaz, özel olarak dizayn edilmiş bir nozul yardımıyla eriyiğe ilave edilir. Böylece eriyik içinde tekdüze olarak dağılmış çok ince gaz kabarcıkları oluşur. Sonuçta oluşan köpükler eriyik yüzeyinde yüzer. Takviye taneciklerin eriyikte olmasından dolayı oluşan köpükler oldukça kararlı haldedir. Daha sonra oluşan köpük bir konveyör yardımıyla çekilerek soğuyup katılaşmasına izin verilir (Banhart, 2001a).



Şekil 2.9. Gaz üfleme metodu

Takviye parçacıkları %10–20 hacminde, ve 5-20 $\mu$  boyutları arasında ilave edilir. Parçacık hacmi ve boyutunun çok az veya fazla seçilmesi çeşitli problemler yaratmaktadır. Bu durum Şekil 2.10'da görülmektedir (Wood, 1996).



**Şekil 2.10.** Alüminyum köpük üretiminde işlem sınırları

Parçacıkların köpüğü kararlı hale getirme mekanizması literatürde tartışılmaktadır. Geniş olarak kabul gören parçacıkların hücre duvarı üzerinde yığılmasının köpüklerin kararlı hale getirilmesinde anahtar rol oynadığıdır. Öncelikle, parçacıklar yüzey viskozitesini arttırmakta bu da filmdeki drenajın hızını kesmektedir. İkinci olarak, parçacıklar eriyik tarafından kısmen ıslanmaktadır (Banhart, 2001a). Bu yöntemle köpük metal üretmekte kullanılan tipik alaşımlar ve parçacıklar Çizelge 2.1’de verilmiştir (Asholt, 1999).

**Çizelge 2.1.** Gaz üfleme metodunda kullanılan tipik alaşımlar

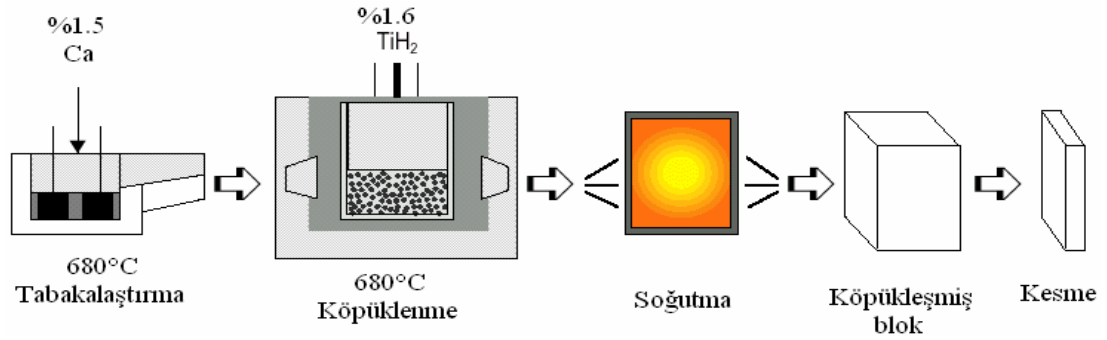
Temel Alaşım Adı	Parçacık Tipi	Parçacık Boyutu	Parçacık Miktarı
AlSi8Mg	SiC	10-30µm	% 10-30
AlSi8MgCuNi	SiC	10-30µm	% 10-30
AA 6061	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-30µm	% 10-30

Bu yöntemle üretilen alüminyum köpüklerin yoğunluğu 0,069-0,54 g/cm<sup>3</sup> arasında, ortalama hücre boyutları 3-25 mm arasındadır. Ortalama hücre boyutları gaz akış hızına, pervane dönüş hızına ve diğer parametrelere bağlıdır (Banhart, 2001a).

Bu yöntemin en önemli avantajı büyük hacimlerdeki köpüklerin sürekli bir şekilde üretilmesi ve düşük yoğunluğun başarılabilmesidir. Bu yöntemle üretilen alüminyum köpük metaller daha düşük fiyata sahip olabilmektedir (Banhart, 2001a).

Kanada şirketi Cymat 1.5 m genişlikte, 2.5-15 cm kalınlığında köpük plakaları saatte 1000 kg kapasite ile dökmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise üretilen panellerin kesilmesi, istenilen şekle getirilmesi gibi problemlerdir (Wood, 1996).

Köpükleştirici ajanlar yardımıyla kapalı hücreli metal köpük üretim metodu; köpüren eriyik oluşturmak için ikinci bir yol olup köpük oluşturuvcu gaz üflemek yerine eriyiğe direkt olarak köpükleştirici ajan ilave edilerek gerçekleştirilir. Köpükleştirici ajan etkili sıcaklıkta çözünerek gaz salmakta ve köpükleşmeyi sağlamaktadır. Şekil 2.12’de sistemin şematik görünümü verilmektedir. Yöntemin ticari adı “ALPORAS” olarak bilinmektedir (Miyoshi ve ark., 2000).



**Şekil 2.11.** Köpükleştirici ajanlar yardımıyla üretim yöntemi

Baloncukları kararlı hale getirmek için eriyiğin viskozitesini arttırmak ve yüzen baloncukları korumak lazımdır. Eriyiğe kalsiyum ilave edilerek eriyiğin viskozitesi ayarlanır. Bu yöntemde Ca, sıvı alüminyuma 680°C sıcaklıkta % 1.5 oranında ilave edilir ve karışım 6 dakika boyunca çevre atmosferde karıştırılır. Viskozite istenilen değere ulaşıncaya % 1.6 oranında titanyum hidrür (TiH<sub>2</sub>) eklenerek uygun viskozitede ve sıcaklıkta hidrojen gazı salması beklenir (Miyoshi ve ark., 2000). Hidrürün çözünme reaksiyonu (2.1) denkleminde görülmektedir.



Dökme ALPORAS bloklar 450x2050x650 mm boyutlarında ve 160 kg ağırlığındadır. Alüminyum köpük bloklar kalıptan çıkartılarak istenilen boyutlarda kesilirler.

Literatürde zirkonyum hidrürün ( $ZrH_2$ ) de alüminyum köpük üretiminde % 0.5–0.6 konsantrasyonlar arasında köpükleştirici ajan olarak kullanıldığından bahsedilmektedir. Fakat pahalı olduğu için tercih edilmez. Bu yöntemle elde edilen alüminyum köpük metalin yoğunluğu 0.18–0.24 g/cm<sup>3</sup> arasında olup, gözenek boyutları 2-10 mm arasındadır.

Burada eriyik viskozitesini arttırmak için kalsiyum dışında SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi parçacıklar kullanılabilir. Fakat sıcaklığı kontrol etmek zordur, karıştırma süresinin artması çalkalanmanın oluşmasına dolayısıyla daha sonra oluşabilecek köpük hücre boyutunun 20µ'un altında olmasına yol açmasına neden olur (Banhart, 2001a).

Çizelge 2.2'de ALPORAS yönteminin avantajları ve dezavantajları gösterilmektedir.

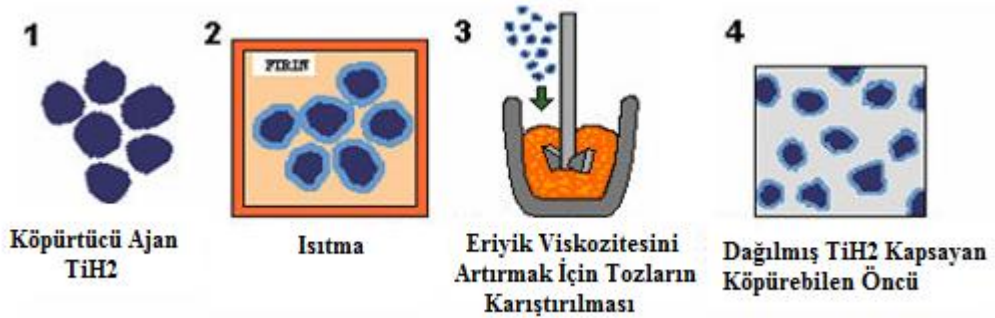
**Çizelge 2.2.** ALPORAS yönteminin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Oldukça tekdüze (uniform) hücre boyutu</li> <li>➤ Alcan yöntemine göre daha homojen köpük yapısı</li> <li>➤ Küçük hücreler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Katkı malzemelerinden dolayı pahalı olması</li> <li>➤ İstenilen son şekilde parça üretilmemesi</li> </ul>

*Köpürebilen öncüler kullanarak metal köpük üretimi;* kimyasal köpürtücü ajanlar kullanılarak üretilen metalik köpüklerin hücre yapı kontrolü, direkt olarak gaz üfleme yöntemiyle üretilenlere nazaran daha iyi sağlanmaktadır. Fakat köpürtücü ajanların eriyik içinde dağılmasının kontrol edilmesi zordur, bu da oluşan metalik köpük hücre yapısının homojen bir şekilde olmasının çok zor olduğu manasına gelmektedir. Köpürtücü ajanın eriyik içinde tam olarak dağılabilmesinin geliştirilmesi için pek çok yöntem araştırılmış ve denenmiştir. Bunun için geliştirilen bir yöntemde köpürtücü ajan, katı metal tozlarıyla karıştırılarak ısıtılmış ve sıvı metale eklenerek karıştırılmış (çok ince tozlar kullanılarak) ve çok muntazam bir karışma sağlanmıştır.

Bu karışıma “köpürebilen öncü karışım” adı verilmektedir. Bu yöntem direkt gaz yöntemiyle ve toz metalurjisi yöntemiyle olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır.

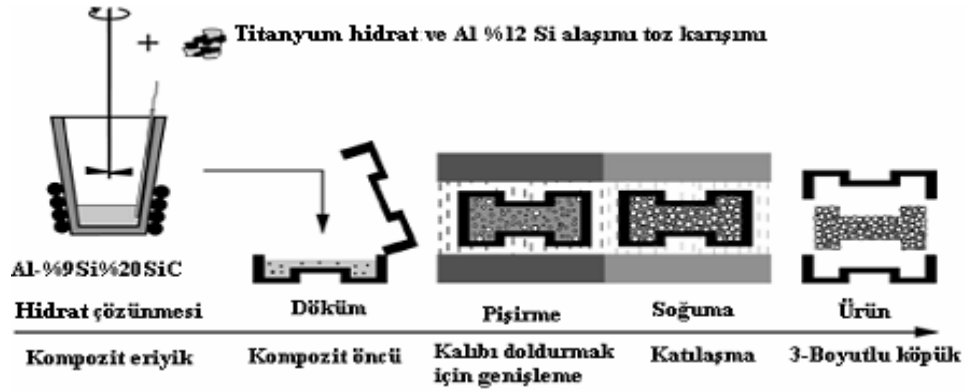
FORMGRIP metodu ile üretim, Foaming Of Reinforced Metal by Gas Release In Precursor kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır. Bu yöntemin diğer adı, sıvı metal yolu ile köpükleşebilen öncü üretimidir. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi titanyum hidrür ( $TiH_2$ ) ısıl işleme tabi tutulmaktadır ve bunun sonucunda yüzeyde titanyum oksit bir film tabakası oluşması muhtemeldir (sadece hidrojen geçirgenliği ile sınırlı olarak). Daha sonra hidrür eriyik alüminyumla karıştırılır (bu arada viskoziteyi arttırmak için SiC parçacıkları eriyiğe katılmalıdır). Hidrür parçacıkların üzerindeki oksit tabakası çözünmeyi geciktirici bariyer rolü oynamaktadır. Bu da metal, köpürtücü ajan ve SiC’den yapılmış düşük oranda gözenekli öncü üretilmektedir.



Şekil 2.12. FORMGRIP işleminin birinci adımı

İkinci adım, alaşımın eritilerek -bunun neden olacağı titanyum hidrürün hidrojen gazı salıp çözünmesi için- öncü yaklaşık  $630^{\circ}C$ 'ye pişirilir. Pişirme zamanı ayarlanarak, 1-10 mm arası hücre boyutu ve %50-95 gözenekli yapıya sahip köpükler elde edilebilir. Daha sonra soğutulularak ürün elde dilmektedir.

Dağılımın gelişmesinden dolayı köpükler tekdüze bir yapıya sahiptir. Şekil 2.13'te FORMGRIP yönteminin tamamı şematik olarak görülmektedir (Gergely ve Clyne, 2000).



Şekil 2.13. FORMGRIP yönteminin aşamaları

Çizelge 2.3'te FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları sunulmuştur.

Çizelge 2.3. FORMGRIP yönteminin avantaj ve dezavantajları

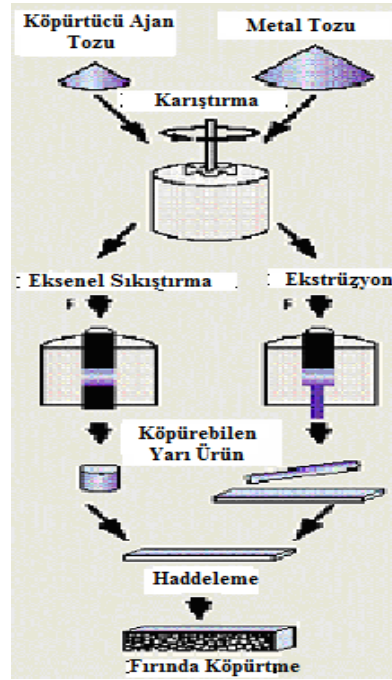
Avantajları	Dezavantajları
<p>Hücre tekdüzeliği ve kontrolü çok iyi yapılabilmektedir (ısıtma/soğutma işleminin ve toz köpürtücü ajanın bir fonksiyonu olarak).</p> <p>ALPORAS köpüğü ile aynı hücre boyutuna sahiptir.</p> <p>Son ürün şeklinde parçalar dökülebilmektedir.</p> <p>Bu işlem karmaşık kalıpları doldurmak için kullanılabilir.</p>	<p>Sınırlı malzemeler kullanılabilir.</p> <p>Seramik parçacıkların kullanılması zorunludur.</p> <p>Metal ergime sıcaklığında yeteri derecede viskoz değilse, köpük katılaşmadan önce sönecektir.</p>

Toz metalurjisi ile üretim, ALULIGHT ve FOAMINAL adlarıyla bilinen köpük metal üretim yöntemi olup, Fraunhofer-Institut (Bremen) tarafından patentlenmiştir (Haydn ve Wadley, 2002).

Bu yöntemde, toz metal ve köpük yapıcı madde karıştırıldıktan sonra presleme, ekstrüzyon ve haddeleme benzeri metal şekillendirme yöntemleri ile köpükleşecek yoğun yapıya sahip yarı ürün elde edilmektedir (Şekil 2.14). Köpükleşecek yarı ürün, metalin erime sıcaklığının üstüne ısıtılmakta ve bu esnada köpük yapıcı malzeme

bozunarak gaz açığa çıkarmaktadır. Açığa çıkan gaz, erimiş metalin genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmaktadır. Metal hidratların yanında (örneğin  $TiH_2$ ), karbonatlar (örneğin  $CaCO_3$ , potasyum karbonat, sodyum karbonat ve sodyum bikarbonat) ve buharlaşan maddeler (örneğin civa bileşikleri ve toz organikler) köpükleştirici ajan olarak kullanılabilirler.

Etkin bir köpüklenme için, gazın kaçmasına engel olabilecek yoğunluğa sahip bir yarı ürünün hazırlanması çok önemlidir; köpükleştirici maddenin metal içinde tamamen hapis edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sekilendirmede kullanılan sıcaklık ve basınç miktarları, toz metal parçacıklarını birbirine bağlayacak ve köpük yapıcı maddenin bozunumu ile oluşan hidrojen gazının kaçışını önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Haddeme yöntemi ile yapılan sıkıştırılarda  $350-450^{\circ}C$  arası sıcaklıklar parçacıklar arasında özellikle yüzey tabakalarında yayınma sağlamak için yeterlidir.



Şekil 2.14. Toz metalurjisi metodu

Yarı ürünün köpüklenmesi için gereken zaman, uygulanan sıcaklığa ve yarı ürünün büyüklüğüne bağlı olup, birkaç saniye ile birkaç dakika arasında değişmektedir. Bu yöntem ile sadece Al ve Al alaşımlarının kullanımı ile sınırlı olmayıp, kalay, çinko,

pirinç, kurşun, altın ve diğer bazı metal alaşımları da uygun köpük yapıcı madde ve işlem parametrelerinin seçilmesi suretiyle köpükleştirilebilir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları için köpürtme işleminde kullanılacak en iyi köpürtücü ajan titanyum hidrür ( $TiH_2$ )'dür. Alüminyum için  $TiH_2$  tozu genellikle %0.6-1 arasında kullanılır (Kennedy, 2002).

Diğer hidrürler ( $ZrH_2$  ve  $HfH_2$ ) pratikte kullanılabilmeyle beraber daha pahalı olduklarında tercih edilmezler.  $TiH_2$ 'nin hangi sıcaklıkta hidrojen salmasını belirlemek zordur (Banhart, 2004). Çizelge 2.4'te toz metalurjisi kullanılarak köpük metal üretiminin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Toz metalurjisi yönteminin avantaj ve dezavantajları

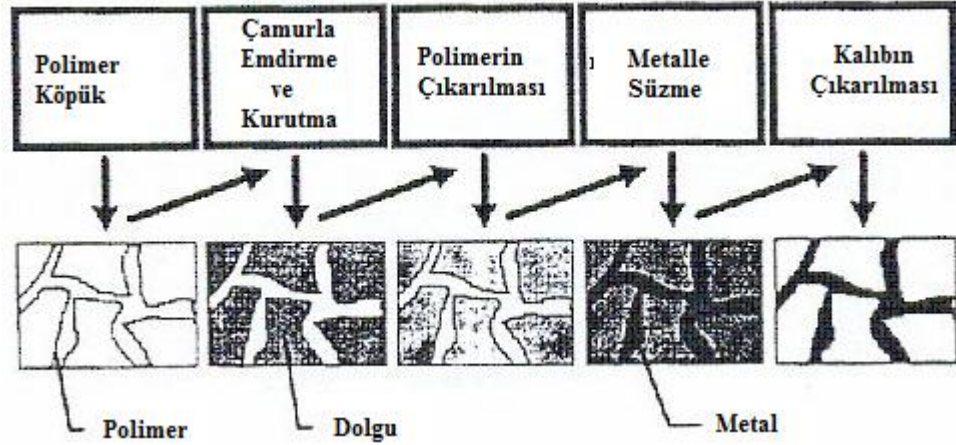
<b>Avantajları</b>	<b>Dezavantajları</b>
<p>Nihai ürüne yakın üretim mümkündür.</p> <p>Kompozitler üretilebilir.</p> <p>Alaşım seçiminde esneklik sağlar.</p> <p>Kararlaştırıcı ek malzemelere ihtiyaç yoktur.</p> <p>Seramik ve fiberler eklenebilir.</p>	<p>Tozların maliyeti yüksektir.</p> <p>Çok büyük parçaların üretilebilmesi çok zordur.</p>

#### **2.2.5.1.2 Açık hücreli metal köpük üretim metotları**

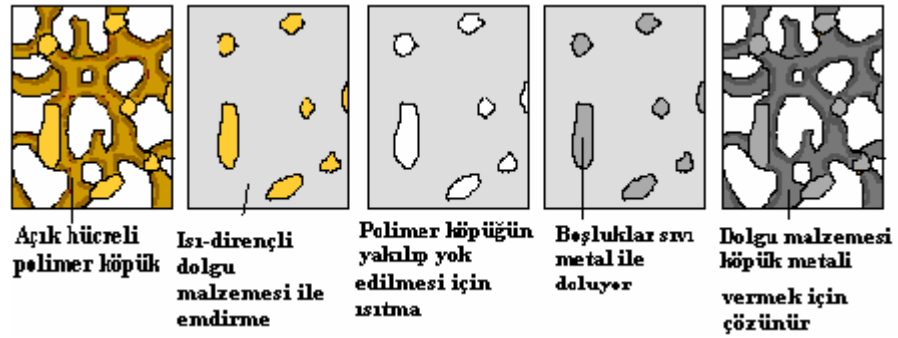
Açık hücreli köpük metaller genellikle hassas döküm yöntemleriyle üretilirler. Açık hücreli köpük metal üretmek için kullanılan başlıca yöntemler aşağıda verilmiştir.

Polimer köpük ile hassas döküm yöntemi: “emdirme” olarak adlandırılır (Amjad, 2001). Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da bu yöntem şematik olarak gösterilmiştir.





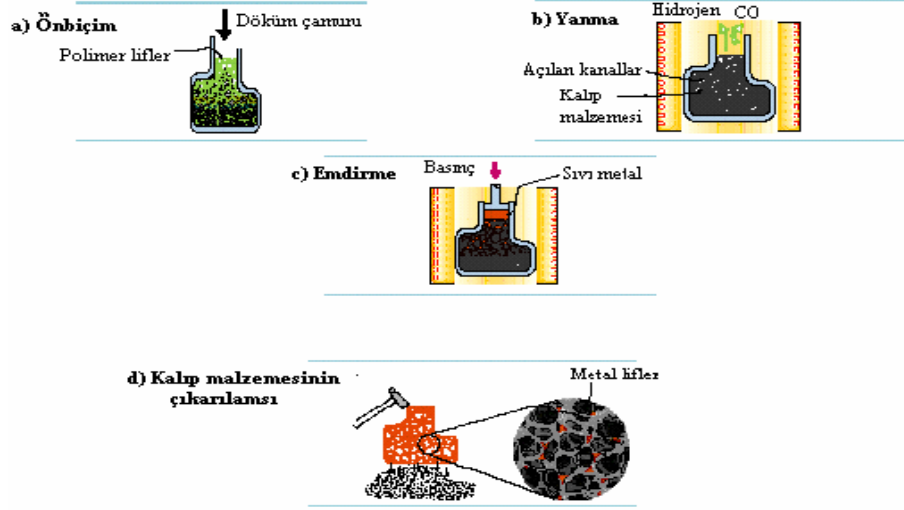
Şekil 2.15. Hassas döküm metodu



Şekil 2.16. Polimer köpük kullanılarak hassas döküm metodu

Bu işleme göre, polimer köpük (mesela poliüretan, polistiren) başlangıç noktası olarak kullanılır. Köpük yapısı açık hücrelidir ve sonra, müllit, kalsiyum karbonat ve fenolik reçine gibi yeterli ısı dirençli malzemelerle veya basit bir alçıyla doldurulur. Polimer kuruduktan sonra orijinal polimer köpük yapısının yerini alan açık boşluklara sıvı metal dökülür. Eğer dar boşluklara sıvı metal dolumu tam olmazsa basınç ve kalıbı ısıtma gerekli olabilir.

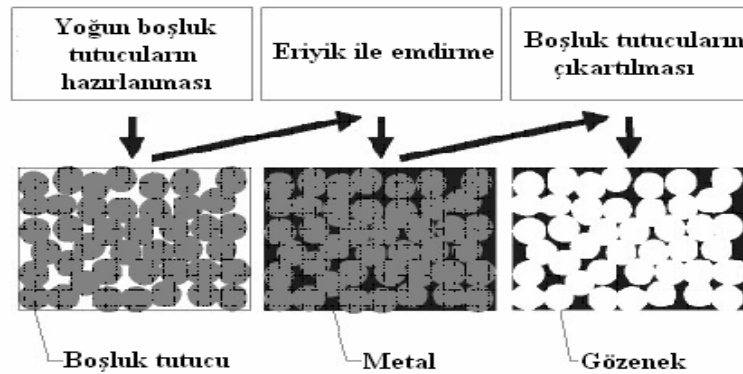
Kalıp malzemesi çıkarıldıktan sonra (mesela basınçlı su yardımıyla) orijinal köpük polimerin yerini metalik yapı tam olarak alır. Bu yöntemin ticari adı “DUOCEL” olarak bilinir ve ERG Malzeme ve Uzay Şirketi (ABD) tarafından desteklenmektedir. 6101 veya AlSi7Mg (A356) gibi alüminyum alaşımları bu yöntemde tercih edilmekle beraber bakır ve magnezyum gibi diğer metaller de kullanılabilir (Banhart, 2001a).



Şekil 2.17. DUOCEL metodu

İstenilen hücre boyutunda ve ilgili yoğunlukta hazırlanan açık hücreli polimer kalıp hazırlanır. Daha sonra kalıp, kalıp döküm çamuru (seramik toz) ile kaplanır. Kalıp, döküm malzemesini sertleştirmek ve polimer kalıbı ayrıştırabilme için pişirilir. Sonradan, kalıp metal alaşımı ile doldurulur ve soğumasına izin verilir. Soğutmadan sonra, kalıp malzemeleri çıkartılır, orijinal polimer köpüğün eşiti olan köpük metal kalıptan ayrılır. Alçı veya plastik gibi diğer kalıp malzemeleri de kullanılabilir.

Boşluk tutucu malzemelerin etrafına hassas döküm metodunda; köpük metaller inorganik hatta organik tanecikler veya küreler etrafına sıvı metal dökümü yoluyla üretilebilir. Tanecikler ya dökümden sonra metalik ürün olarak kalmakta ya da uygun bir çözücü veya asitle liç edilerek çıkarılmaktadır.



Şekil 2.18. Boşluk tutucu malzeme ile üretimin şematik gösterimi

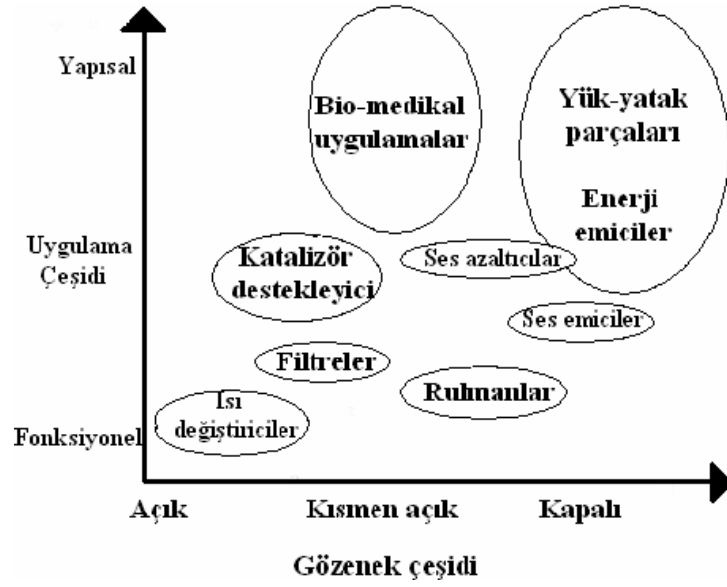
Vermikülit, çözülebilen tuzlar, genişleyen kil tanecikler, kum peletler, köpük cam küreler veya alüminyum oksit bos küreler inorganik dolgu malzemeleri olarak kullanılabilirler. İşlem adımları Şekil 2.18’de görülmektedir:

- Yoğun boşluk tutucuların hazırlanması: bunlar, organik veya inorganik olabilirler.
- Eriyik ile emdirme: tanecikler arasındaki çatlakların tamamen doldurulması için dış basınç gereklidir.
- Çıkarma: Dolgu tanecikleri liç işlemi veya ısı ile çıkarılabilir (Banhart, 2000).

Geniş bir oranda metal köpük bu yolla üretilebilir (alüminyum, magnezyum, çinko, kurşun, vb.) Bu yöntemin bir avantajı, verilen dolgu taneciklerinin tanecik boyutu dağılımı tarafından gözenek boyutu dağılımının kontrol edilebilmesidir. Öte yandan, bu yöntem ile elde edilen maksimum gözeneklilik %80’in altıyla sınırlıdır. (Banhart, 2001a).

#### **2.2.5.2 Metal köpüklerin kullanım alanları**

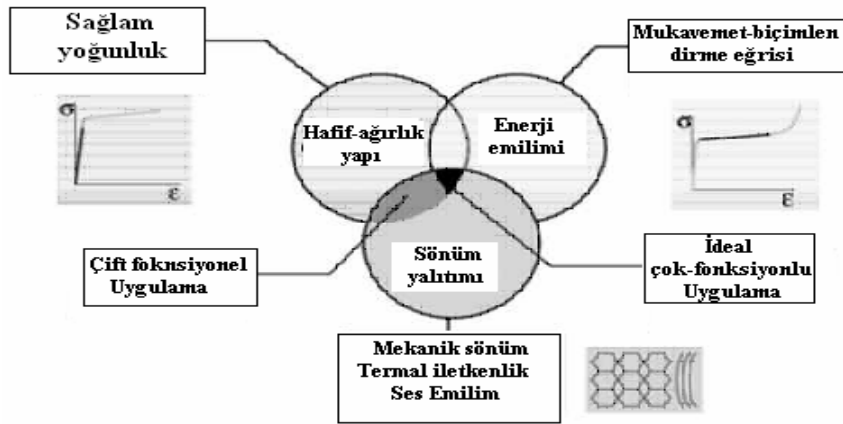
Köpük metaller birçok iyi özelliğinden dolayı kendilerine değişik endüstri kolunda pek çok kullanım alanı bulmuştur. Köpük metallerin hücre yapısına göre (açık veya kapalı oluşu) kullanım alanları değişmektedir. Köpük metallerin kullanım alanlarını, hücre çeşidi ve uygulama alanlarına göre (yapısal ve fonksiyonel) sınıflandırabiliriz. Birçok uygulamada başta alüminyum olmak üzere magnezyum ve titanyum köpük metaller tercih edilmektedir (Banhart, 2001a).



Şekil 2.19. Köpük metallerin kullanım alanları

### 2.2.5.2.1 Metal köpüklerin yapısal uygulamaları

Otomotiv endüstrisi; metal köpüklerin sıklıkla kullanıldığı yapısal uygulama alanlarından biri olup, Şekil 2.20 otomotiv endüstrisinde, üç tip uygulama alanında kullanılan metalik köpükleri (özellikle alüminyum köpükleri) özetlemektedir. Burada daireler üç uygulama alanını, dıştaki kutularda o alandan sorumlu köpük özelliklerinin avantajını göstermektedir. İdeal olanı parçanın üç özelliği de içerebilmesidir.



Şekil 2.20. Köpük metallerin otomotiv alanında uygulamaları

Hafif ve sağlam alüminyum sandviç yapılar arabaların ağırlıklarını azaltmak için yapılan çalışmalara oldukça yardımcı olmuştur. 3 boyutlu bu sandviç paneller arabalardaki orijinal çelik panellerden yaklaşık olarak 8 kat daha sağlam olup, %25 daha hafiftir (Yu ve ark., 1998).

Alüminyum sandviç paneller alüminyum yüzey plakaların üzerine köpük öncü kütüğü giydirilmesi ile oluşturulur. Daha sonra plaka, köpürtücü ajanın etkin olması için ısıtılır. Bu, köpük çekirdek yapı kalınlığının yaklaşık %400 genişlemesine ve %80 gözeneklilikte bir yapıya neden olur (Patrick, 2000). Şekil 2.21'de alüminyum sandviç yapı görülmektedir (Banhart ve Weaire, 2002).



**Şekil 2.21.** Hafif ağırlıklı alüminyum sandviç panel

Alüminyum köpüklerin otomotiv sanayindeki uygulamalarına bir diğer örnek çarpışma emicileridir. Birçok şirket yolcuları koruyarak, arabada meydana gelebilecek hasarı azaltıp dolayısıyla tamir masrafını indirmek için çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bunun sonucunda çarpışma kutuları keşfedilmiştir (Şekil 2.22). Bu çarpışma kutuları darbe tamponuyla ön korkuluk arasında yer almaktadır. Bu kutular 15 km/h hızdaki bir çarpışmada bütün enerjiyi emerek deforme olurlar ve arabanın şasisinde meydana gelebilecek daha pahalı bir hasarı önlerler (Banhart, 2003).



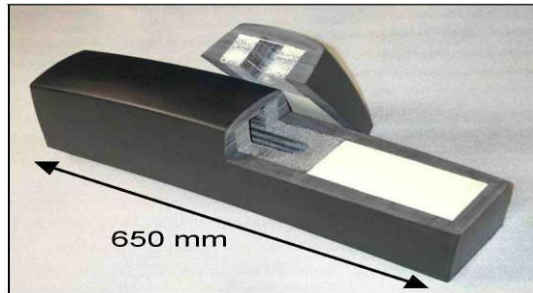
**Şekil 2.22.** Çarpışma kutusunun kullanıldığı yer

Çarpışma kutuları, alüminyum ekstrüzyon veya çelik bir dış yapının içerisine köpük çekirdek (göbek) malzemenin yerleştirilmesi ile oluşur (Şekil 2.23). İçerisinde alüminyum köpük bulunan bu kutular, içi bos çarpışma kutularına nazaran çok daha fazla enerji emebilirler (Banhart, 2003).



**Şekil 2.23.** Çarpışma kutusu numuneleri

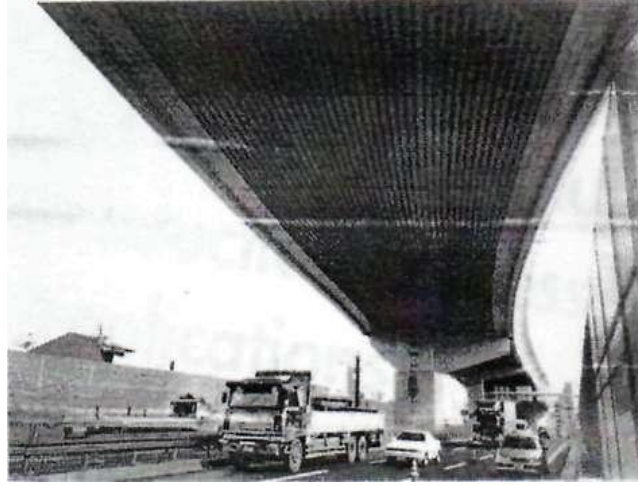
Enerji emiciler aynı zamanda ray bazlı sistemlerde de kullanılmaktadır. Buna bir örnek olarak otorayları verebiliriz. Tramvaylarda, yayalara çarparak araç altında sürüklenmelerini engellemek için koruma olmalıdır. Aynı zamanda, arabalarla temas gibi hafif çarpışmalardan korunmak için etkili çarpışma koruması gereklidir. Almanya'da bulunan 3 şirket (Siemens, Hübner ve Schunk Sintermetalltechnik ) tarafından tasarlanan tramvaylarda kullanılacak çarpışma emici sistemi Şekil 2.24'te görülmektedir.



**Şekil 2.24.** Tramvaylar için çarpışma emici

Bu yapı, ekstrüze tozlar tarafından endirekt olarak köpüren alüminyum köpük çekirdek tarafından oluşturulmuştur.

Ses emilimi ve yalıtımı otomotiv endüstrisi için çok önemli bir konudur. Alüminyum köpük metaller çok iyi ses yalıtımlarından dolayı bu sektörde kullanılmaktadırlar. Buna örnek bir uygulama Şekil 2.25'te görülmektedir (Miyoshi ve ark., 2000).



Şekil 2.25. Viyadük altında ses emen levha yapısı

Viyadüğün altına levha halinde konan ALPORAS köpük metal yapısı viyadük altından geçen araçların seslerini emerek gürültü kirliliğini ortadan kaldırmaktadır (Miyoshi ve ark., 2000).

Havacılık ve uzay endüstrisi: metal köpüklerin bir diğer yapısal alanını oluşturmaktadır. Köpük metallerin hafif-ağırlıklı yapılarının kullanımı otomotiv ve havacılık-uzay endüstrisinde birbirine çok benzemektedir. Uzay ve havacılık endüstrisi de köpük metal sandviç panelleri yüksek performansı daha ucuza sağladıkları için tercih etmektedir. Boeing (A.B.D.) alüminyum köpük çekirdekli alüminyum sandviç panelleri helikopter kuyruk çubuklarında kullanım yolları geliştirmiştir. Helikopter üreticileri alüminyum köpük metalleri bazı başka parçaların yerine kullanmayı denemektedirler.

Uzay sanayisi de alüminyum köpüklerin uzay araçları iniş takımlarında, enerji emen çarpımsa malzemesi olarak kullanılmasını geliştirmektedir (Banhart, 2001a).

Gemi inşa endüstrisinde: hafif ağırlıklı yapılar çok büyük bir yere sahiptir. Modern yolcu gemileri bütünüyle alüminyum ekstrüzyon, alüminyum levha ve alüminyum

bal peteği yapılarından oluşmaktadır. Alüminyum köpük çekirdekli sandviç paneller bu uygulamalardan bazılarında söz sahibi olacaktır. Eğer yüzey tabakaları çekirdek malzemesiyle oldukça elastik olan poliüretan yapıştırıcılarla bağlanırsa, mükemmel sönüm davranışlı hafif ve sağlam bir yapı elde edilir. Köpük metallerin gemi uygulamaları, ambar platformları, gemi bölmeleri, anten platformları ve fişek ambarları gibi alanları kapsamaktadır (Banhart, 2001a).

Konstrüksiyon endüstrisinde; alüminyum köpük ve köpük paneller asansörlerin enerji tüketimlerini azaltmak için oldukça yardımcı olmaktadır. Çok hızlı modern asansörlerde hafif-ağırlıklı inşa çok önemlidir. Bununla beraber, hafif-ağırlıklı inşa tekniği güvenlik kurallarına uymalıdır. Yangın duvarları ve çıkışları zayıf termal iletkenliği ve yangın direnci olan alüminyum köpük malzemelerle yapılmaktadır (Banhart, 2001a).

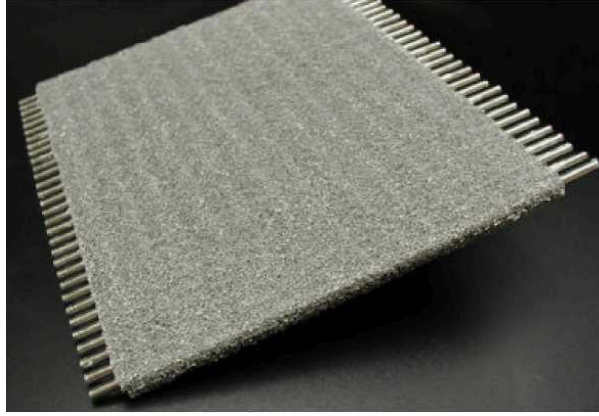
Spor ekipmanları sektöründe; metal köpükler yüksek sayılabilecek maliyetlerine rağmen, uygulamaya değer alan bulmuştur. Spor malzemelerinde, futbolcular için teknelik yapımında iyi enerji emiliminden dolayı alüminyum köpük kullanımı örnek olarak verilebilir (Banhart, 2001a).

#### **2.2.5.2.2 Metal köpüklerin fonksiyonel uygulamaları**

Metal köpüklerin bazı fonksiyonel uygulamaları aşağıda sunulmuştur.

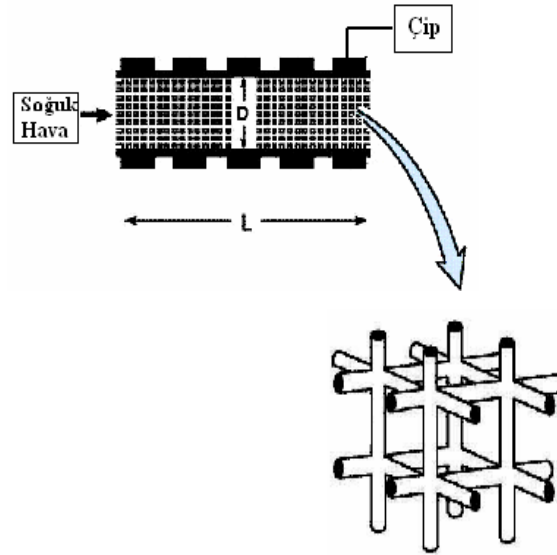
Eşanjörler (Isı Değiştiriciler); korozyon direnci, yüksek termal iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı açık hücreli alüminyum ve bakır bazlı köpük metaller ısı değiştirici olarak kullanılabilirler. Kapalı hücreli köpük metaller ise düşük termal iletkenliklerinden dolayı termal kalkan olarak kullanılırlar. Bu uygulamaya örnek olarak, yekpare soğutma radyatörleri ve bilgisayar çipleri ile güç elektroniği için mikro elektronik cihazlar verilebilir (Banhart, 2001a). Şekil 2.26'da metal köpük matrisi içine gömülmüş tüplerden oluşturulan gelişmiş yüksek sıcaklık radyatörü görülmektedir.





**Şekil 2.26.** Metal köpük matrisli eşanjör

Yüksek güç elektronik uygulamasına örnek olarak silisyum mikroçiplerin basınçlı devir daim ile soğutulması gösterilebilir. Silisyum mikroçipler yüksek güç yoğunluğunda çalışırlar ( $10^7$  W/m<sup>2</sup>'nin üzerinde) ve sıcaklıklarının düşük seviyede tutulması gerekir. Şekil 2.27'de görüldüğü gibi çipler açık hücreli köpük metal sandviç yapının üzerinde bulunan iki plakanın üzerine yerleştirilmiştir. Basınçla devir daim edilen soğuk hava çipleri soğutmaktadır.



**Şekil 2.27.** Açık hücreli metal köpük boyunca soğutulan çoklu çip modülü

Su arıtıcılarda; köpük metaller, suda çözülmüş istenmeyen iyonların konsantrasyonunu azaltmak için kullanılabilir. Bu uygulamada, su açık hücreli köpük

metal yapı içerisinde akıttır. İyonlar ile hücreli matris yapısı redoks reaksiyonuyla tepki gösterir. Hassas döküm ile üretilmiş alüminyum köpük metal yardımıyla, Cr(VI) iyonlarının redüksiyonu literatürde araştırılmıştır (Banhart, 2001a).

Susturucular: gürültüyü azaltmak için (örneğin, kompresörler için pnömatik aletlerde), Şekil 2.28'de örnekleri görülen uygun çeşidi kullanılarak gerçekleştirilebilir. (Banhart, 2000).



**Şekil 2.28.** Metal köpük susturucular

Filtreler: katı parçacıkları gaz veya sıvıdan veya iki sıvıyı birbirinden ayırmak için, büyük depo hacminden dolayı açık hücreli alüminyum köpük metaller ile üretilerek kullanılabilir (Banhart, 2000) .

Dekorasyon ve sanatsal faaliyetlerde: alüminyum köpükler süslü mobilyalar, saatler, lambalar gibi alanlarda kullanım olanağı bulmuştur. Eğer sandalye ve masalar alüminyum köpüklerden üretilirse, mekanik özellikleri oldukça iyi bir hale gelecektir. Şekil 2.29'da Britanyalı tasarımcı Max Lamb'in metal köpükten ürettiği masa ve sandalyeler dekoratif faaliyetlere bir örnektir. Yüksek fiyatlı hoparlör sistemleri alüminyum köpük metallerden yapılabilir. Alüminyum köpük kullanımı sadece yüksek sağlamlık ve mekanik özellikler sağlamaz aynı zamanda geleneksel eşyalara göre daha çekicidir (Banhart, 2001a).



**Şekil 2.29.** Metal köpükten üretilmiş masa ve sandalyeler

### 2.2.5.3 Alüminyum köpüklerin ekonomisi ve geleceği

Alüminyum köpükler ucuz bir malzeme çeşidi değildir. Birçok değişik ve yararlı uygulaması olmasına rağmen, yapımında kullanılan hammaddelerden dolayı (mesela metal matrisli kompozit,  $TiH_2$  gibi) maliyeti artmaktadır. Bundan dolayı, alüminyum köpüğün var olan malzemelerin yerini alması uygun görülmemektedir. Burada alüminyum köpüğün çok fonksiyonlu olması anahtar bir rol oynar. Çok-fonksiyonludan kasıt alüminyum köpüğün, mekanik, termal, akustik ve diğer üstün özellikleri gibi, tipik özellikleri ve ikincil uygulamalara (kesme, şekillendirme, geri dönüşüm gibi) uygun oluşudur.

Alüminyum köpüklerin maliyet durumları birçok uygulamada araştırılmış ve düşük hacimdeki üretimlerin pazarda yer bulabilmesinin ana problem olduğu görülmüştür. Yüksek hacimdeki üretimlerde, maliyeti ve dolayısıyla toplam fiyatı düşürecektir. ALULIGHT yeni tesisler kurarak büyük miktarlarda öncü malzeme üretmiş ve bu sayede üretim maliyeti 20 €/kg (1995) den 5 €/kg (2005) düşürülmüştür.

Alüminyum köpük maliyetlerini düşürmek için bir yöntemde üretimde ikincil alüminyum, metal matris hurdalar ve daha düşük fiyatlı köpürtücü ajanlar ( $TiH_2$  yerine kalsiyum karbonat) kullanımıdır (Asholt, 1999).

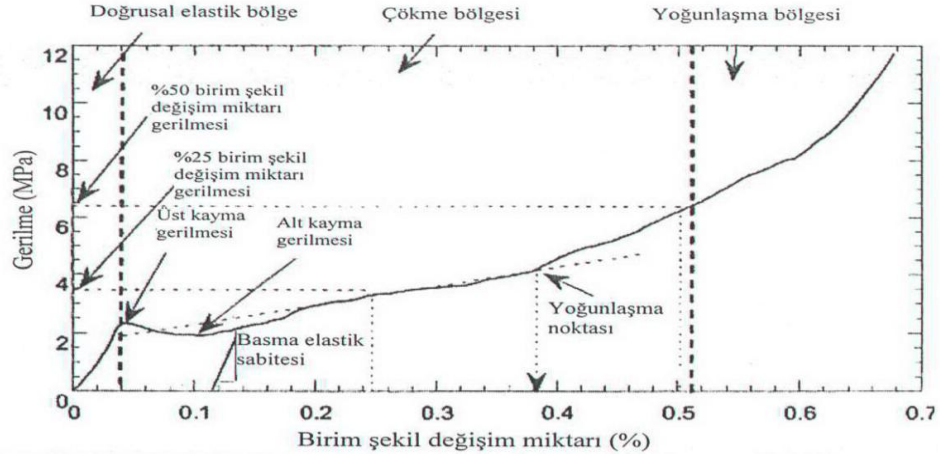
#### 2.2.5.4 Alüminyum köpüklerin mekanik özellikleri

Alüminyum köpüklerin düşük yoğunluk, iyi enerji absorpsiyonu ve yüksek dayanıklılık gibi özellikleri dolayısıyla birçok mühendislik uygulamalarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu özelliklerinin yanı sıra, basma gerilmesi altında oluşan deformasyon, elastik deformasyon, aksel basmalarda katlanma ve çentik özellikleri de oldukça önemlidir. Alüminyum köpüklerin bu bilgiler ışığında bazı mekanik özellikleri aşağıda sunulmuştur.

##### 2.2.5.4.1 Lineer elastik deformasyon

Metal köpüklerin lineer elastik özellikleri Young modülü ve kayma iie hesaplanmaktadır. Lineer elastik deformasyon, gözeneklerin açık veya kapalı olmasına göre değişiklik göstermektedir. Kapalı gözenekli köpükler açık gözeneklilere göre daha karmaşıktır. Eğer gözenek zarları ince olursa çatlama veya kırılma meydana gelebilmektedir. Bu duruma göre zarlarda bazı deformasyon gerilmeleri ortaya çıkar. Buradaki gerilme kuvvetini, köpük malzemesinin sahip olduğu gerilme kuvveti etki ederek artırır. Ayrıca gözenek içerisinde, gözenek akışkanının sıkıştırılmasıyla meydana gelen gerilme oluşur.

Şekil 2.30'da alüminyum köpüklerin gerilme-gerinim(birim şekil değiştirme) eğrisi gösterilmiştir ve köpüğün sahip olduğu üç farklı bölge de anlatılmıştır (Seitberger, 1997; Hanssen, 2000; Elbir, 1999; Davies, 1983b). Buradaki üç bölge sırasıyla; lineer elastik bölge, çökme ve yoğunlaşma bölgeleridir. Metal köpükler, tipik bir gerilme-gerinim eğrisi gösterirler ve lineer elastik bölgede elastik olarak deforme olurlar. Lineer elastik bölgede gerilme ve gerinim gözenek duvarı ile kontrol edilmektedir. Bu bölge, gözenek duvarlarının bükülmesi ve yırtılması ile sona erer ve çökme bölgesi başlar. Çökme, deformasyonun çok iyi sınırlandırıldığı elastik bölgeden deformasyonun diğer deforme olmamış kısımlara sıçramasıyla ilerler. Kritik bir genişlemede gözenek duvarları birbirine değmeye başlar ve bunun sonucunda yoğunlaşma meydana gelir.



Şekil 2.30. Metal köpüklerin tipik gerilme-gerinim grafiği

Alüminyum köpüklerin basma yükleri altındaki mekanik özellikleri yoğunluklarına ve ana metalin akma gerilmesine bağlı olarak değişmektedir. Basma gerilmesi, artan yoğunluk ve ana malzemenin akma gerilmesi ile artmaktadır. Alüminyum köpüklerin elastik modüllerini Gibson ve Ashby basit kübik ışın modelleri kullanarak formül halinde ifade etmişlerdir (Davies ve Zhen, 1983a). Bu modele göre formüller;

$$E^* = \frac{C_1 \rho}{E_s} \quad ve \quad E^* = \frac{C_2 \rho^*}{E_s} \quad (2.2)$$

olarak verilmiştir. Bu eşitliklerde  $E^*$  ve  $E^s$  sırasıyla köpüğün ve gözenek duvar malzemesinin elastikiyet modülleridir.  $C_1$  ve  $C_2$  katsayıları gözenğin geometrik düzlemine bağlıdır.  $C_1$  katsayısı izotropik kapalı gözenekler için 1/3, petek gözenekler için 0,35 olarak hesaplanır.  $C_2$  ise birim değere eşittir.  $\rho$  nispi yoğunluğu ifade etmektedir ve denklem (2.3)'te verildiği gibi tarif edilmektedir. Bu denklemde  $\rho^*$  ve  $\rho^s$  sırasıyla köpüğün ve gözenek duvar malzemesinin yoğunluğudur.

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (2.3)$$

Ticari alüminyum köpüklerin deneysel olarak ölçülen modül değeri denklem (2.4) ile hesaplanan değerlerden oldukça düşüktür.(Davies, 1983a) Bu modül değerinin az

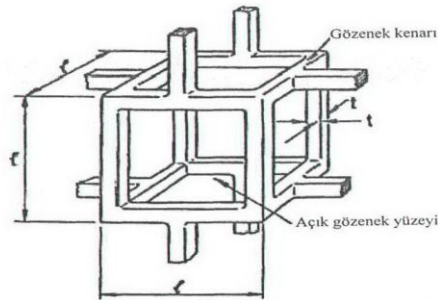
olması, gözenek içerisindeki köpürme köpürme işlemi sırasında yüzey gerilmesi dolayısıyla sıvı metalin kesişim bölgelerine çekilmeleri sebebi ile daha ince gözenek kenarlarının oluşmasından dolayıdır. Deneysel olarak tespit edilen köpüklerin modül verileri genellikle aşağıda verilen denkleme uymaktadır.

$$\frac{E^*}{E^s} = C\rho^n \quad (2.4)$$

Alüminyum köpükler için n değeri 1,5-2 ve C değeri yüksek kaliteli köpükler için 3, düşük kaliteli köpükler için ise 0,5 olarak kullanılmaktadır.(Davies, 1983a) Gözeneklerin eğilmesi, gözenek kenarlarının olmaması, gözenek kenarının delik olması veya homojen olmayan gözeneklerin bulunması Alüminyum köpüklerin mekanik özelliklerini azaltan faktörlerdir (Gradinger ve Rammerstorfer, 1999). Ayrıca, açık gözenekli alüminyum köpüklerin elastik deformasyon özellikleri farklı olmakla birlikte bu özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Açık hücreli alüminyum köpüklerin lineer elastik özellikleri; kübik yapıda yer alan bazı parametrelere bağlıdır. Açık gözenekli alüminyum köpükler, kübik yapı şeklinde şematik olarak Şekil 2.31’de gösterilmiştir. Verilen şekle göre, l kübik zarrın uzunluğunu, t kesişen kenarların kalınlığını ve I iki zar alanı arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Gözeneklerin nispi yoğunluğu olan  $\rho^*/\rho_s$  ifadesi, t ve l ölçüleri ile orantılıdır.

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad I = t^4 \quad (2.5)$$

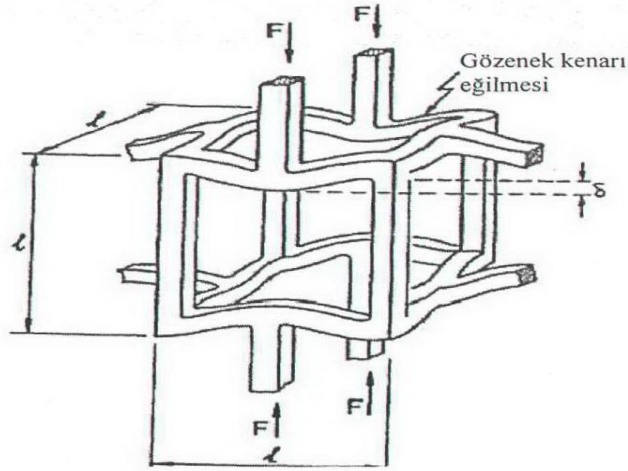


**Şekil 2.31.** Açık gözenekli metal köpüğün şematik gösterimi

Köpükler için Young modülü, orta noktasına  $F$  kuvveti uygulanmış  $l$  kirişinin elastik eğilmesinden hesaplanmıştır. Standart kiriş teorisi, bu eğilmeyi hesaplamak için kullanılmıştır. Bu teoriye göre deformasyon,

$$\delta = \frac{Fl^3}{E_s I} \quad (2.6)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Burada  $E_s$  kiriş malzemesinin Young modülüdür. Eksenel gerilme durumunda  $F$  kuvveti köpüğün diğer gözenek kenarlarına Şekil 2.32'de gösterildiği gibi aktarılmıştır.



**Şekil 2.32.** Eksenel basma durumunda gözenek kenarının eğilmesi

Buradaki kenar eğilmesi ve lineer elastik gerilmesi denklem (2.6)'dan bulunmuştur.  $F$  kuvvetinin  $\sigma$  basma gerilimi ile  $F = \sigma l^2$  şeklinde orantısı bulunmaktadır. Açık hücreli metal köpükler için elastikiyet modülü aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{C_1 E_s l}{l^4} \quad (2.7)$$

Bu denkleme göre;

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.8)$$

ifadesi bulunmuştur.  $C_1$  sabittir ve yaklaşık olarak 1'e eşittir.

Kayma elastikiyet modülü benzer yöntemlerle hesaplanmaktadır. Eğer kayma kuvveti köpüğe uygulanırsa, gözenek zarları eğilme olarak cevap verir. Eğilme ( $\delta = Fl^3/E_s I$ ), toplam kayma gerilmesi ve kayma gerinimi ile orantılıdır.

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{C_2 E_s I}{l^4} \quad (2.9)$$

Buradan yola çıkarak;

$$\frac{G^*}{E_s} = C_2 \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.10)$$

ifadesi bulunmuştur ve bu ifadede  $C_2$  değeri yaklaşık olarak 3/8'e eşittir.

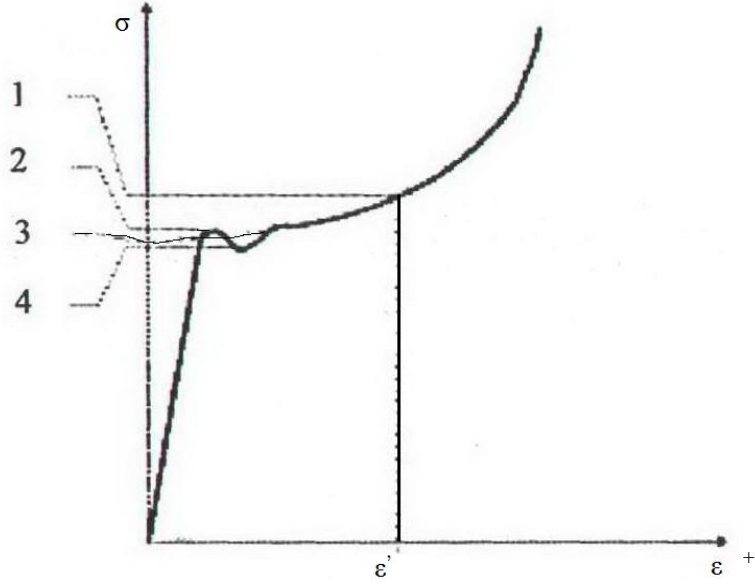
#### 2.2.5.4.2 Plastik çökme ve yoğunlaşma

Metal köpükler, metallere üretildikleri için belirli bir plastik şekil değiştirme bölgesine sahiplerdir. Bu plastik bölge, lineer elastik bölge üstündeki yüklenme durumunda plastik çökme şeklinde başlar. Plastik çökme, elastik eğilmeye benzer ve gerilme-gerinim grafiğinde geniş bir alana sebep olmaktadır. Gerinim bölgesinde geri kazanım olmamaktadır.

Metal köpükler genellikle akma noktasından itibaren plastik deformasyon özelliği sergilerler. Şekil 2.30'daki grafikte köpüğün genel deformasyon özellikleri verilmiştir. Başlangıçta, elastik deformasyonun ardından plastik deformasyona geçiş meydana gelmiştir. Bazı durumlarda ise bu iki sistemin ardından üst ve alt akma noktası meydana gelmiştir. Metal köpüklerin akma dayanımı Şekil 2.33'teki grafikte gösterildiği gibi dört noktadan oluşmaktadır. 1.nokta gerilme dayanımı noktasını,

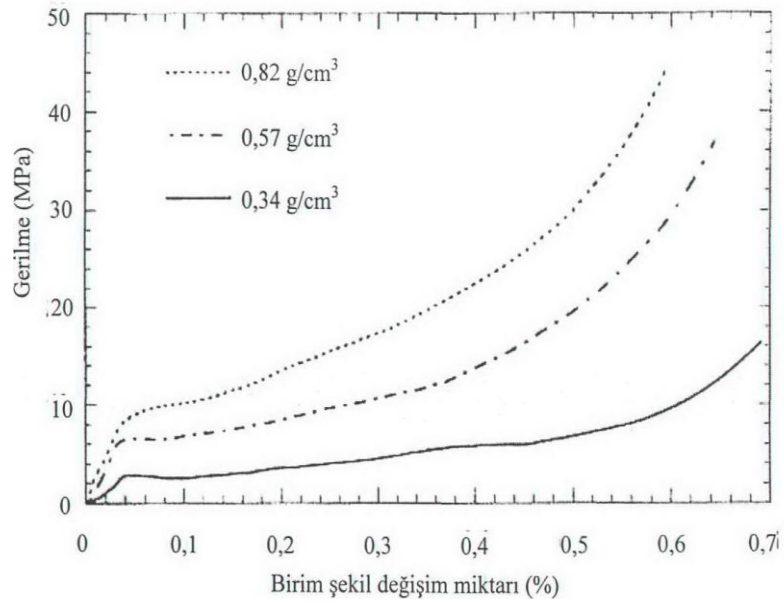


2.nokta üst akma noktasını, 3.nokta alt akma noktasını ve 4.nokta ise ekstrapolasyon noktasını ifade etmektedir.



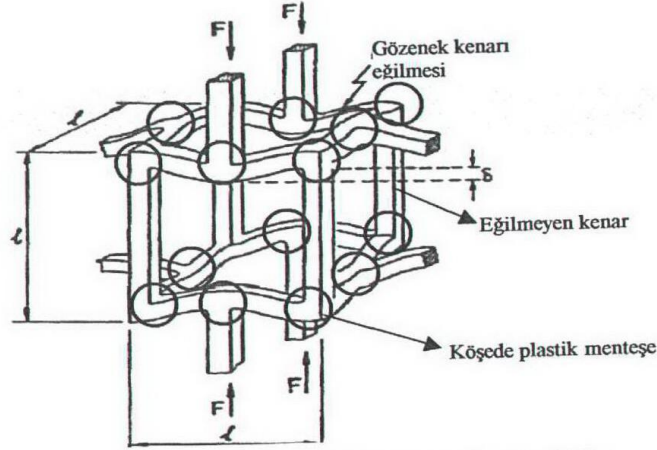
**Şekil 2.33.** Basma durumunda metal köpüğün tipik davranışı

Yapılan çalışmalara göre yüksek yoğunluktaki metal köpüğün yüksek gerilme miktarı gösterdiği Şekil 2.34'te gösterildiği gibidir.



**Şekil 2.34.** Köpük yoğunluğunun gerilmeye etkisi

Açık gözenekli metal köpüklerde plastik çökme, gözenek zarı üzerine gelen kuvvet miktarı ve plastik moment üzerindeki kuvvet etki ettiğinde meydana gelir. Bu sırada, basma yönüne paralel olan gözenek kenarında eğilme meydana gelmezken, gözenek köşelerinde Şekil 2.35'te gösterildiği gibi plastik menteşe görevi yapar. Kenarlarda oluşan moment denklem (2.11)'de verildiği gibi hesaplanır.

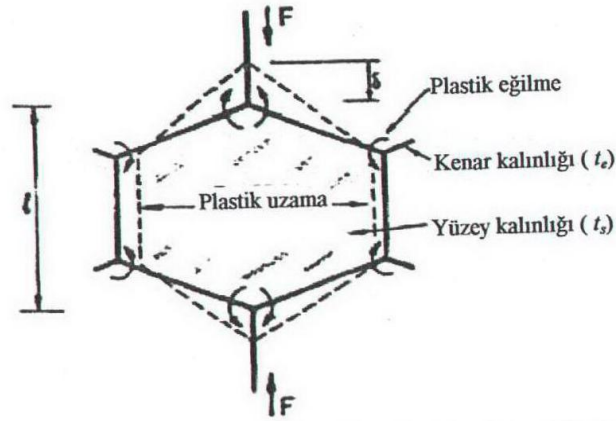


Şekil 2.35. Açık gözenekli metal köpüklerde plastik menteşe oluşumu

$$M_p = \frac{1}{4} \sigma_{ys} t^3 \quad (2.11)$$

Bu denklemde,  $M_p$  plastik moment,  $\sigma_{ys}$  gözenek duvar malzemesinin akma dayanımını simgelemektedir.

Kapalı gözenekli metal köpüklerde ise, plastik çökme zarlar üzerinde meydana gelmektedir. Plastik çökme, Şekil 2.36'da gösterildiği gibi zarların basma yönünde katlanmasıyla oluşur. Katlanmanın meydana gelmesi için gerekli olan kuvvet miktarı oldukça düşüktür. Fakat basma esnasında zarların katlanması için gerekli olan kuvvet, köpüğün akma noktasına önemli oranda katkı sağlamaktadır. Bu durum deformasyon artışı sırasında yapılan işin hesaplanması ile ilgilidir.



Şekil 2.36. Basma durumunda kapalı gözenekli metal köpük için plastik çökme

Bu grafiğe göre;  $t_e$  ve  $t_s$  sırasıyla gözenegin kenar ve yüzey kalınlıklarını ifade etmektedir. Basma durumunda yapılan iş ise;

$$F\delta = \alpha M_p \frac{\delta}{l} + \beta \sigma_{ys} \delta t_f l \quad (2.12)$$

denklemini ile hesaplanmaktadır. Burada  $\alpha$  ve  $\beta$  sabittir. Denkleminde  $F$  yerine  $\sigma l^2$  ve  $M_p$  yerine  $t^3/4$  konulursa;

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = \frac{\alpha}{4} \left( \frac{t_e}{l} \right)^3 + \beta \left( \frac{t_f}{l} \right) \quad (2.13)$$

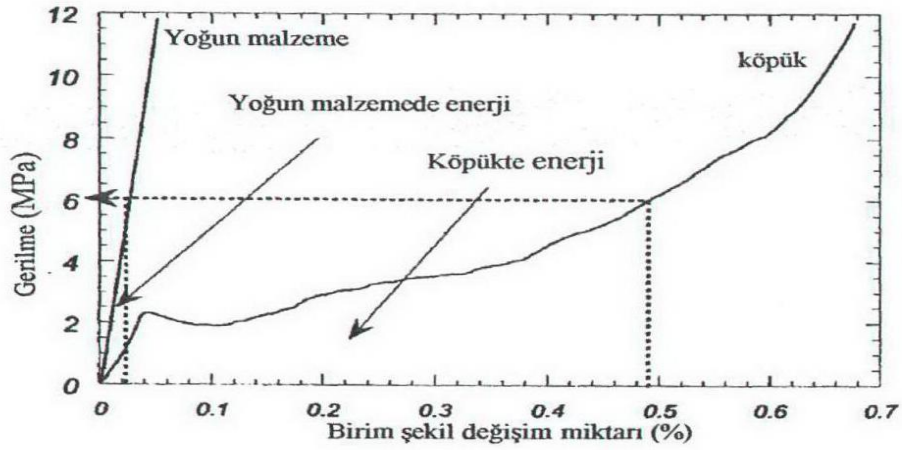
denklemini bulunur. Sonuç olarak;

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{ys}} = C_1 \left( \varphi \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} + C_2 (1 - \varphi) \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2.14)$$

denklemini elde edilmektedir. Kapalı gözenekli metal köpüklerde, zar gerilmesi hesaba katılır.  $C_1$  ve  $C_2$  sırasıyla 0,3 ve 1'e eşittir.  $\varphi$  açık gözenekli köpüklerde 1, kapalı gözenekli köpüklerde ise 0'a eşittir.  $\rho^* = \rho_s$  durumunda  $\sigma_{ys} = \sigma_{pl}$  olur. Bu eşitlik gözenek kenarı plastik eğilmesi ve yüzeyde plastik gerilmenin etkilerinin toplamını ifade etmektedir.

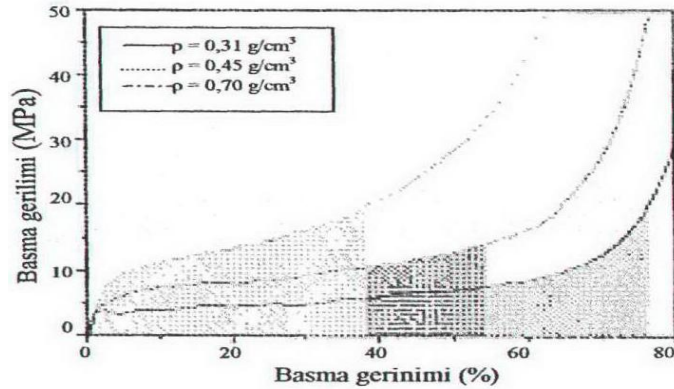
### 2.2.5.4.3 Enerji absorpsiyonu

Enerji absorpsiyonunu gerektiren mühendislik uygulamalarında metal köpük büyük bir öneme sahiptir. Şekil 2.37’de metal köpüğün enerji absorpsiyonunun önemini görmek için yüksek yoğunluktaki malzeme ile arasındaki karşılaştırma verilmiştir.



Şekil 2.37. Basma durumunda Al köpük ve yüksek yoğunluklu malzemenin enerji absorpsiyonu

Gerilme-gerinim grafiğinin altında kalan alan malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesini göstermektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere köpük malzeme, belirlenmiş gerilme miktarında yüksek yoğunluklu metalden daha fazla enerji emebilmektedir. Yapılan bir çalışmada farklı yoğunluklardaki Al köpüklerin yoğunluğunun, Şekil 2.38’de gösterildiği gibi enerji absorpsiyonunu etkilediği anlaşılmıştır.



Şekil 2.38. Farklı yoğunluklardaki Al köpüklerin enerji absorpsiyonu

Bu tez çalışmasında çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpük metalin bütün özellikleri, kullanım alanlarıyla birlikte yukarıda belirtildiği gibi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Esas olarak yapılan çalışma makro düzeyde sandviç malzemelerle ilgili olduğundan, ayrıca aşağıdaki gibi sandviç malzemelerin kullanım alanları, dizayn kriterleri ile avantajları ve dezavantajları da sunulmuştur.

### **2.3 Sandviç Malzemelerin Kullanım Alanları**

Sandviç malzemelerin en önemli özelliği bizimde üzerinde sıkça durduğumuz yüksek rijitlik kavramı olup özellikleri sadece bununla sınırlı değildir. Birçok endüstride pek çok alanda ihtiyaca cevap verecek nitelikte sandviç konstrüksiyonlar üretilebilmektedir. Dünyadaki malzeme kaynaklarının tükeneceği göz önünde bulundurulursa, bu yapıların önemi daha da artacaktır. Hafiflik, düşük maliyet ve yüksek dayanım çağımızın en önemli rekabet unsurlarıdır. Bu üç unsur sandviç yapılarda uygun yüzey, çekirdek ve de yapıştırıcı malzemesi seçmekle sağlanabilmektedir. Kompozit yapılar üzerindeki araştırma ve geliştirme faaliyetleri gelecek yıllarda sandviç konstrüksiyonların altın dönemlerini yaşayacağını ispatlar niteliktedir. Bu yapıları önemli kılan diğer özellikler ise şunlardır;

- Yüksek bükülme dayanımı ve rijitlik
- Hafif malzemelerden oluşması
- Uygun malzeme kombinasyonu ile düşük maliyet eldesi
- Termal yalıtım özelliği
- Ses Yalıtım özelliği
- Radar dalgalarına yakalanmaması
- Uygun aerodinamik yüzeyler oluşturabilmesi
- Yüksek hızlara dayanım (Kolat, 2005)

Bu özelliklere bağlı olarak bu yapıların kullanım alanları aşağıda özet olarak incelenmiştir:

Havacılık ve uzay endüstrisine yönelik uygulamalarda hafiflik ve rijitlik özellikleri en önemli konuma sahiptir. Bu endüstri kolunda sandviç kompozitler genellikle uçağın taban kaplamaları, kanat ve kuyruk parçaları, helikopter pervanesi, uzay mekiği konisi gibi parçalarda kullanılmaktadır.

Otomotiv endüstrisine yönelik uygulamalarda ise, otomobillerin tavan, direk, şasi ve gövdesinin birçok kısmında sıklıkla hafif ve rijitlikleri sebebiyle tercih edilmektedirler.

Spor ekipmanları endüstrisinde ise yarış bisikletinin omurgası gibi yapılarda tercih edilmekte ayrıca enerji endüstrisinde rüzgar türbini pervanesinde hafifliği nedeniyle ve yine aynı endüstride çeşitli eşanjörler olarak imal edilmektedir. Bunların yanı sıra, petekli yapılar enerji sönmüleme, radyo dalgası kalkanı, uyduların güneş panelleri gibi pek çok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. (Kolat, 2005)

Sandviç konstrüksiyonların diğer bir kullanım alanı da tekne ve yat imalatındadır. Günümüzde kalıp ile tekne üretimi maliyetli bir yöntemdir, her dönemin modasına göre tekne ve yatlarda modeller değişmektedir. Her değişen yeni bir model için kalıp hazırlamak maliyet açısından çok büyük bir yük getirecektir, bu sektördeki veriler kalıpsız tekne imalatı yönteminde ileriye giden firmaların büyük kazançlar elde edeceğini göstermiştir. Kalıpsız imalatın en bilinen yolu da, tabi ki sandviç yapılardan geçmektedir. Sadece sivil denizcilik için değil askeri amaçlar için de bu yapılar tercih edilmektedir, hafiflik avantajı sağlanarak askeri tekne ve gemilere yeni silahlar eklenebilmektedir.

#### **2.4 Sandviç Kompozitlerin Avantaj ve Dezavantajları**

Bütün malzemelerin kendilerine ait avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Sandviç kompozitlerin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar ise aşağıda sunulduğu gibidir.

### 2.4.1 Sandviç kompozitlerin avantajları

Sandviç kompozitlerin diğer kompozitler ve konvansiyonel malzemelere karşı daha fazla ilgi çekmelerinin ve bir alternatif haline gelmelerinin en önemli nedenleri şöyle sıralanabilir:

- Aynı ağırlıktaki konvansiyonel malzemelere oranla basma ve yorulma mukavemetlerinin çok daha fazla olması
- %25-45 daha hafif olmaları
- Yeni tasarım esnekliği sunmaları
- Düşük ısı geçirgenliği
- Korozyona karşı direnç
- Çekme dayanımlarının çelik ve alüminyuma göre 4-6 kat daha fazla olması
- Rijitliklerinin yoğunluklarına oranla, çelik ve alüminyumdan 3,5-5 kat daha fazla olması
- Yorulma mukavemetinin yüksek olması
- Darbe enerjisi absorpsiyonunun diğer malzemelere oranla önemli ölçüde yüksek olmasıdır.

### 2.4.2 Sandviç kompozitlerin dezavantajları

Sandviç kompozitlerin mantığı gereği, yapıyı oluşturan her tür bileşenin olumsuz özellikleri sandviç malzemeye de yansımaktadır. Örneğin, çekirdek malzemesi olarak kullanılan malzemenin düşük mukavemette oluşu ya da yapıştırıcı olarak kullanılan reçinenin organik çözücülere karşı dayanıksızlığı sandviç yapıda istenmeyen bazı özellikleri doğuracaktır. Sandviç kompozitlerin en büyük dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- Katlar arasında kalan hava ve gazlar malzemenin ömrünü azaltır.
- Ara katlar arasında kalan gizli yapışmaları incelemek zordur.

- Test yapma yöntemleri pahalıdır.
- Sıcaklık farklılıklarında bozulurlar.
- Ham malzemeleri pahalıdır ancak bağlantı elemanları sayısındaki azalış ve ağırlıktaki düşüş dikkate alındığında toplam maliyette bir düşme olduğu tespit edilecektir.
- Sandviç kompoziti oluşturan her bir bileşenin olumlu-olumsuz tüm özelliklerinin ana yapıya tümüyle yansımalarıdır.

## 2.5 Sandviç Yapı Dizaynı

Sandviç bir yapının dizaynında belirli bir plan ve prosedür oluşturulması gerekir. Mukavemet, statik, mekanik ve malzeme bilimleri kombinasyonu ile oluşturulan sistematik bir yaklaşıma ihtiyaç duyulur. Yapının çalışma şartları göz önüne alınarak konstrüksiyondan beklenen verimin sağlanması hedef alınmalıdır. Tüm bunlar detaylı bir mühendislik araştırması ve yaklaşımı ile mümkün olacaktır. Her mühendislik uygulamasında olduğu gibi girdi ve çıktılar tanımlanmalı prosesler arasında geri beslemelerle optimum dizaynlar oluşturulmalıdır. İmkanlar dahilinde bilgisayar destekli mühendislik programlarıyla simülasyonlar yapılmalıdır. (Anonim,2000)

Yürütülen bu çalışmada yer alan mekanik test yöntemlerine göre, sandviç yapı dizaynında önemli rol oynayan mukavemet ve mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir.

### 2.5.1 Eğilme rijitliği

Kirişlerdeki mühendislik gerilmesi teorisi, bazı modifikasyonlarla sandviç kirişlere kolaylıkla uyarlanabilir. Çekirdekte kayma eğilmesinin neden olduğu etkiler eklenmelidir ve eğilme rijitliği hesaplanırken bazı gerekli terimler ihmal edilebilir.

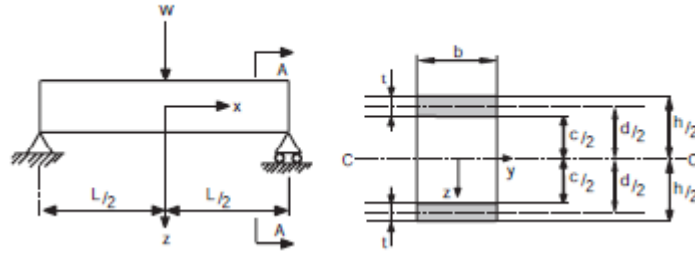
Genel kiriş teorisini kullanmak için öncelikle eğilme rijitliğini hesaplamak için basit bir yol bulmak gerekmektedir. Burada D olarak gösterilen kirişin eğilme rijitliği,



sandviç malzemede kullanılan yüzey ve çekirdek materyallerinin elastikiyet modülü (E) ve atalet momentinin (I) bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Sandviç kirişte D eğilme rijitliği aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır (Anonim, 2003a):

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (2.15)$$

Burada,  $E_f$  ve  $E_c$  sırasıyla yüzey ve çekirdeğin elastikiyet modülleridir. Bu denklemde kullanılan parametreler Şekil 2. 39'da gösterilen sandviç kiriş örneğinde yer alan boyutlandırmalardır. Denklem (2.15)'te yer alan ilk terim yüzeylerin bölgesel eğilme rijitliğini, ikinci terim ilk terimin eğilme için yüzeylerin merkezlerinden olan devriğini, üçüncü terim ise çekirdeğin kendisine ait eğilme rijitliğini simgelemektedir.



**Şekil 2.39.** Sandviç bir kiriş örneği

İlk terim miktarının ikinci terimin %1'inden az olması durumunda (Anonim, 2003a);

$$\frac{d}{t} > 5,77 \quad (2.16)$$

$d/t > 11,55$  olduğunda ilk terim ikinci terimin %0.25'inden daha az olacaktır ve böyle bir durumda yüzeyler ince kabul edilerek ilk terim ihmal edilebilir.

Üçüncü terim miktarının ikinci terimin %1'inden az olması durumunda ise (Anonim, 2003a);

$$\frac{E_f}{E_c} \cdot \frac{td^2}{c^3} > 16,7 \quad (2.17)$$

Böyle bir durumda üçüncü terim de ihmal edilebilir niteliktedir. Denklem (2.16)'daki koşul meydana geldiğinde eğilme rijitliği denklemi (Anonim, 2003a);

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (2.18)$$

halini almaktadır. Eğer denklem (2.17)'deki koşul meydana gelirse eğilme rijitliği denklemi (Anonim, 2003a);

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} \quad (2.19)$$

şeklini alır.

### 2.5.2 Gerilmeler

Sandviç bir kirişteki gerilmeler, kirişlerde uygulanan mühendislik gerilmeleri teorisinde yapılacak birkaç modifikasyon ile elde edilebilir. Şekil 2.39'da verilen sandviç bir kiriş için, merkezi eksen CC'nin altındaki z eksenine göre herhangi bir noktadaki gerinim  $Mz/D$  ile hesaplanır. Aynı noktadaki eğilme gerilmesini elde etmek için gerinim, uygun elastikiyet modülü ile çarpılmalıdır. Örneğin, yüzeylerdeki ve çekirdekteki gerilmeler sırasıyla (Anonim, 2003a);

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f ; \left( \frac{c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} ; -\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{c}{2} \right) \quad (2.20a)$$

$$\sigma_c = \frac{Mz}{D} E_c ; \left( -\frac{c}{2} \leq z \leq \frac{c}{2} \right) \quad (2.20b)$$

Maksimum gerilmeler z'nin maksimum değerini aldığı yukarıda belirtilen aralıklarla elde edilir. Yüzeylerdeki maksimum gerilmenin çekirdeğin maksimum gerilmesine oranı  $(E_f/E_c)(h/c)$  olarak bulunur.

Eğilme teorisi varsayımları ışığında  $z$  derinliğinde homojen bir kirişteki kayma gerilmesinin( $\tau$ ) genel ifadesi (Anonim, 2003a);

$$\tau = \frac{QS}{Ib} \quad (2.21)$$

ile verilmektedir. Burada  $Q$  kayma kuvvetini,  $I$  atalet momentini,  $b$  genişliği ve  $S$  de ilk yüzey alanını ifade etmektedir.

Sandviç bir kiriş için ise denklem (2.21) elastikiyet modülleri vasıtasıyla birkaç değişiklik yapılarak elde edilir (Anonim, 2003a):

$$\tau = \frac{Q}{Db} \sum (SE) \quad (2.22)$$

Bu ifadede yer alan  $D$ , tüm kesitin eğilme rijitliğidir ve  $\sum(S; E)$  ifadesi ise bütün kesitte yer alan parçalar için  $S$  ve  $E$  ifadelerinin ayrı ayrı toplamını göstermektedir. Örneğin, denklem (2.22) Şekil 2.39'da gösterilen bir sandviç kirişin çekirdeğinde  $z$  seviyesinde kayma gerilmesini belirlemek için uygulanırsa  $\sum(SE)$  ifadesi (Anonim, 2003a);

$$\sum (SE) = E_f \frac{btd}{2} + \frac{E_c b}{2} \left( \frac{c}{2} - z \right) \left( \frac{c}{2} + z \right)$$

şeklini alır. Böylece çekirdekdeki kayma gerilmesi (Anonim, 2003a);

$$\tau = \frac{Q}{D} \left[ E_f \frac{td}{2} + \frac{E_c}{2} \left( \frac{c^2}{4} - z^2 \right) \right] \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Yüzeylerdeki kayma gerilmeleri için benzer bir ifade elde edilebilir ve sandviçin derinliği boyunca bütün sistemdeki kayma gerilmesi dağılımı Şekil 2.40a'daki gibi gösterilebilir. Çekirdekdeki maksimum kayma gerilmesi denklem (2.23)'te  $z=0$  yazılarak elde edilir (Anonim, 2003a).

$$\tau = \frac{Q}{D} \left( E_f \frac{td}{2} + \frac{E_c c^2}{2 \cdot 4} \right) \quad (2.24)$$

Maksimum çekirdek kayma gerilmesinin ( $z=0$ 'da) minimum çekirdek gerilmesine oranı ( $z=\pm c/2$ 'de) (Anonim, 2003a);

$$\left( 1 + \frac{E_c}{E_f} \frac{1}{4} \frac{c^2}{td} \right)$$

olarak bulunur. Bu denklemdaki ikinci terimin miktarı %1'den az olduğunda (Anonim, 2003a);

$$4 \frac{E_f t d}{E_c c c} > 100 \quad (2.25)$$

şeklini alır. Eğer denklem (2.25) ifadesi sağlanırsa, kayma gerilmesi çekirdeğin kalınlığı boyunca sabit kabul edilebilir. Çünkü  $d \approx c$  ve denklem (2.17) ile (2.25)'teki koşulların etkileri benzerdir. Böylece sandviçin eğilme rijitliğine önemli bir katkıda bulunmak için çekirdeğin çok zayıf olduğu durumda, kayma gerilmesi çekirdeğin derinliği üzerinde sabit olarak kabul edilebileceği söylenebilir. Bu nedenle zayıf bir çekirdek için, denklemler (2.15) ve (2.23)'te  $E_c=0$  olarak yazmak mümkündür ve çekirdekteki sabit olan kayma gerilmesi (Anonim, 2003a);

$$\tau = \frac{Q E_f td}{D \cdot 2} \quad (2.26)$$

olarak verilir. Bu durumda oluşan kayma gerilmesi dağılımı Şekil 2.40b'de gösterilmiştir.

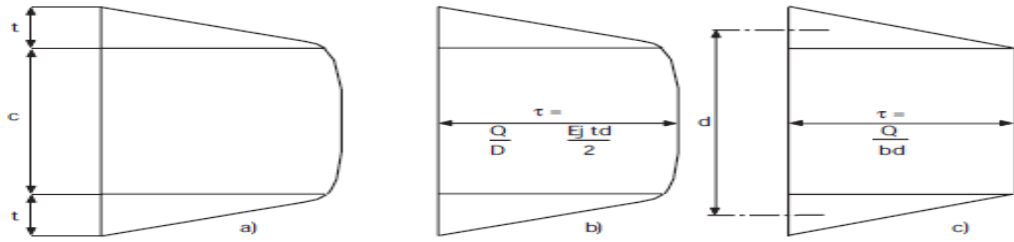
Bunlara ek olarak, yüzeylerin kendi ayrı eksenlerindeki eğilme rijitlikleri küçük ise (denklem (2.16) sağlandığında) denklem (2.15)'in sağ tarafında yer alan birinci ve üçüncü ifadeler atılarak (Anonim, 2003a);

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} \quad (2.27)$$

ifadesi elde edilir. Bu durumda denklem (2.23), çekirdekdeki kayma gerilmesi için aşağıda verilen en basit forma dönüşür (Anonim, 2003a):

$$\tau = \frac{Q}{bd} \quad (2.28)$$

Bu durum için ilgili grafik Şekil 2.40c'de gösterilmiştir.



Şekil 2.40. Sandviç bir kirişte kayma gerilmesi dağılım çeşitleri (Anonim, 2003a)

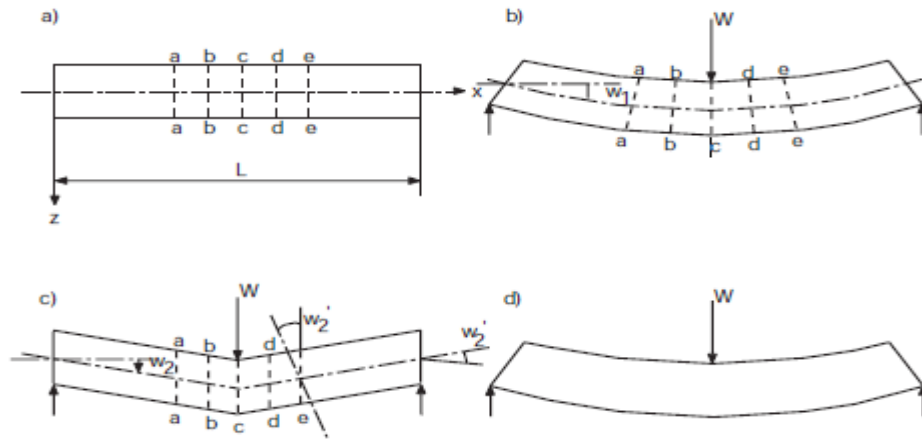
### 2.5.3 Sehimler

Bu çalışmada uygulanan mekanik testlerdeki yükler simetrik olduğundan, bu bölümde sadece simetrik yükler altında oluşan sehimler incelenmiştir. Simetrik yüklemeler durumunda sandviç kirişin eğilme rijitliği ve çekirdekdeki kayma gerilmesi denklem (2.27) ve (2.28)'de verildiği ve kayma gerilmesi dağılımı Şekil 2.40c'de gösterildiği gibidir.

İlk olarak kirişin enine deplasmanı ( $w_1$ ) eğilme teorisi yardımıyla aşağıdaki ifadeler kullanılarak hesaplanabilir (Anonim, 2003a):

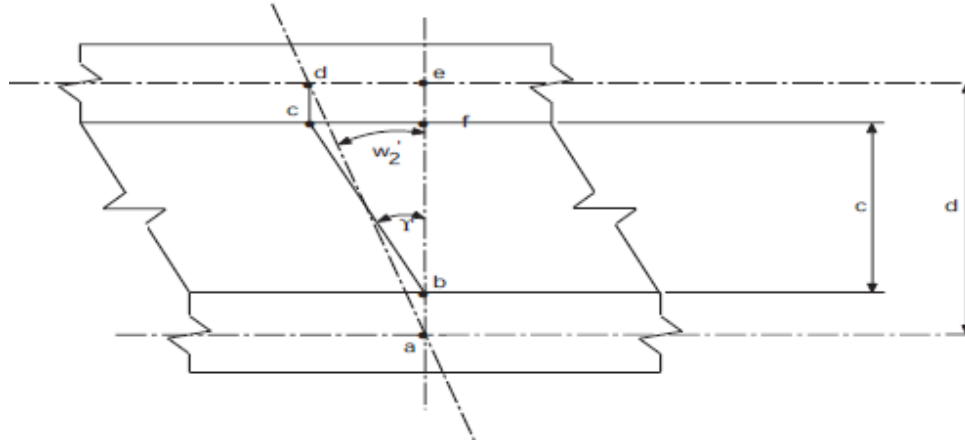
Sehim	$w$
Eğim	$+dw/dx=w'$
Eğrilik	$+w''$
$-M$	$+Dw''$
$-Q$	$+Dw'''$
$+q$	$+Dw^{(4)}$

Örneğin, Şekil 2.41b ortasından  $W$  ile yüklenmiş basit mesnetli bir kirişin eğilme deformasyonunu göstermektedir. Şekildeki a,b,c,d,e noktaları yüzeylerin merkez eksenleri üzerinde uzanmaktadır ve kesitleri(aa,bb,cc,dd,ee) yük altında dönmektedir. Bu durumda herhangi bir kesitteki kayma gerilmesi  $\tau = Q/bd$ 'dir. Bu ifade kayma gerinimi  $\gamma = Q/Gbd$  içerisine yazılabilir ve bu ifade çekirdeğin derinliği boyunca sabittir. Burada  $G$ , çekirdeğin kayma modülüdür. Bu kayma gerinimleri Şekil 2.40c'de gösterildiği gibi yeni bir çeşit deformasyona yol açmaktadır.



**Şekil 2.41.** Sandviç kirişin sehimini (Anonim, 2003a)

Kayma gerinimi nedeniyle oluşan  $w_2$  sehimini, kirişin eğimi  $dw_2/dx$  ve çekirdeğin kayma gerinimi  $\gamma$  Şekil 2.42'den elde edilebilir.



**Şekil 2.42.** Sandviç bir kirişin kayma deformasyonu (Anonim, 2003a)

Sandviçin kısa bir parçasını gösteren bu şekle göre, d-e mesafesi  $d(dw_2/dx)$ 'ye eşittir. Ayrıca bu mesafe, malzeme döndüğünde oluşan  $\gamma c$  ifadesine eşit olan c-f mesafesine eşittir. Buradan (Anonim, 2003a);

$$\frac{dw_2}{dx} = \gamma \frac{c}{d} = \frac{Q}{Gbd} \frac{c}{d} = \frac{Q}{AG} \frac{c}{d} \quad (2.29a)$$

Yüzeylerin ince olduğu kabul edildiğinde, c yaklaşık olarak  $w_2' = \gamma$  anlamına gelen d ile aynıdır ve (Anonim, 2003a)

$$w_2' = \frac{Q}{AG} = \frac{Q}{V} \quad (2.29b)$$

olarak bulunur. Burada V sıklıkla sandviçin kayma rijitliği olarak değerlendirilecektir. Çekirdekdeki kayma deformasyonu ile birleştirilen  $w_2$  deplasmanı denklem (2.29a)'nın integrali alınarak bazı özel problemler için elde edilebilir. Örneğin, ortasından W kuvveti ile yüklenmiş basit mesnetli bir kirişte, kirişin sol tarafında yer alan enine kuvvet Q,  $+W/2$ 'ye eşittir. Denklem (2.29a)'nın  $Q=+W/2$  olarak integre edilmesiyle deplasman (Anonim, 2003a);

$$w_2 = \frac{W}{2V} x + \text{sabit} \quad 0 \leq x \leq L/2$$

şeklini alır. Sabit ifade  $x=0$ 'da  $w_2=0$  olduğundan yok edilir.  $w_2$ 'nin maksimum değeri kirişin merkezi olan  $x=L/2$  noktasında meydana gelir ve

$$\Delta_2 = \frac{WL}{4V}$$

ifadesine eşit olur. Orta noktadaki toplam sehim  $\Delta$ , genel eğilme deplasmanı  $\Delta_1$ 'e deplasman  $\Delta_2$ 'nin eklenmesi ile bulunur (Anonim, 2003a):

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{WL^3}{48D} + \frac{WL}{4V}$$

Bazı durumlar için denklem (2.29b)'nin genel terimler çerçevesinde integre edilmesiyle aşağıdaki gibi daha uygun bir denklem elde edilebilir (Anonim, 2003a):

$$w_2 = \frac{M}{V} + \text{sabit} \quad (2.30)$$

Örneğin, iki mesnet arası mesafesi  $L$  ve üniform olarak dağılmış  $q$  yüklü basit mesnetli bir kiriş,  $+5qL^4/384D$ 'ye eşit  $\Delta_1$  merkezi eğilme sehimine sahiptir. Merkezindeki eğilme momenti  $+qL^2/8$  olduğundan merkezi kayma sehim  $\Delta_2$ ,  $+qL^2/8V$  olur. Böyle bir kirişte merkezdeki toplam sehim (Anonim, 2003a);

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \frac{5qL^4}{384D} + \frac{qL^2}{8V} \quad (2.31)$$

Aynı yolla diğer tip kirişler için toplam sehim ifadeleri elde edilebilir.

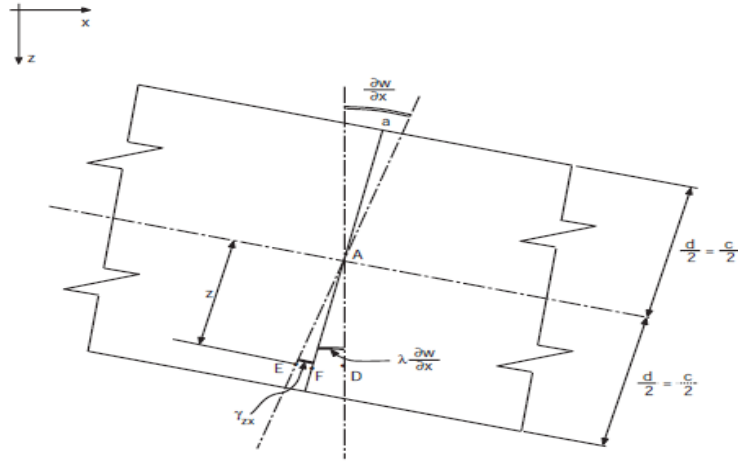
#### 2.5.4 Gerinim enerjisi (U)

İzotropik katı bir cismin gerinim enerjisi, gerinim enerjisinin cismin hacmi boyunca integre edilmesiyle aşağıdaki denklemde verildiği gibi hesaplanır (Anonim, 2003a):



$$U = \frac{E}{2g} \int_V (e_x^2 + e_y^2 + 2ve_x e_y) dV + \frac{G}{2} \int_V (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) dV \quad (2.32)$$

Burada  $g = 1 - \nu^2$ 'dir. Bu denklemde yer alan  $e_x$  ve  $e_y$  değerleri sırasıyla x ve y düzlemlerindeki normal gerinimi,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$  ve  $\gamma_{zx}$  değerleri ise sırasıyla xy, yz ve zx düzlemlerindeki kayma gerinimlerini sembolize etmektedir. Bu ifadelerin değerleri üç boyutlu gerilme durumuna göre aşağıda verilen şekil ve denklemlerle ifade edilmektedir:



**Şekil 2.43.** zx-düzleminde deforme olan kirişin bir kesiti (Anonim, 2003a)

Yukarıda verilen şekle göre zx-düzleminde meydana gelen kayma gerinimi (Anonim, 2003a);

$$\gamma_{zx} = (1 - \lambda) \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.33)$$

ile ifade edilir. Burada  $\lambda$  ifadesi 0 ile 1 arasında bir değerdir.  $\lambda = 1$  olduğunda kirişin kayma durumunda rijit olduğu,  $\lambda = 0$  olduğu durumda ise kirişte kayma rijitliği olmadığı kabul edilir. F noktasının yer değiştirmesine göre x ekseninde meydana gelecek deformasyon (Anonim, 2003a);

$$u = -z\lambda \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.34)$$

ile ifade edilir. Aynı yolla yz-düzlemindeki kayma gerinimi ve y eksenindeki deformasyon (Anonim, 2003a);

$$\gamma_{yz} = (1 - \mu) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.35)$$

$$v = -z\mu \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.36)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada  $\mu$  ifadesi  $\lambda$  ifadesinin yerini tutmaktadır. Bu ifadeler ışığında x ve y eksenlerinde meydana gelen normal gerinimler aşağıdaki denklemler ile ifade edilir (Anonim, 2003a):

$$e_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z\lambda \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.37)$$

$$e_y = \frac{\partial v}{\partial x} = -z\mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (2.38)$$

Bu bilgiler ile xy-düzlemindeki kayma gerinimi ise (Anonim, 2003a);

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = -z(\lambda + \mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.39)$$

denklemleri aracılığıyla elde edilir. Denklem (2.32) sırasıyla aşağıda gösterildiği gibi çekirdek ve yüzeyler için uygulanabilir.

#### 2.5.4.1 Çekirdek gerinim enerjisi ( $U_c$ )

Yapılan kabullere göre,  $e_x$ ,  $e_y$  ve  $\gamma_{xy}$  değerlerini içeren gerinim enerjisi ifadeleri sıfıra eşit olacaktır. Çekirdekte yer alan gerinim enerjisi, (2.33) ve (2.35) denklemlerinin denklem (2.32)'de yerlerine yerleştirilmesiyle aşağıdaki gibi hesaplanır (Anonim, 2003a):

$$\begin{aligned}
U_c &= \frac{G_c}{2} \int_V \left[ (1 - \mu)^2 \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + (1 - \lambda)^2 \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dV \\
&= \frac{G_c d}{2} \int_0^a \int_0^b \left[ (1 - \mu)^2 \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + (1 - \lambda)^2 \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right] dy dx
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Burada  $dV=dx \, dy \, dz$  'dir.

#### 2.5.4.2 Yüzey gerinim enerjisi ( $U_f$ )

Yapılan kabullere göre  $\gamma_{yz}$  ve  $\gamma_{zx}$  kayma gerinimleri bu durum için sıfırdır.  $e_x$ ,  $e_y$  ve  $\gamma_{xy}$  ifadelerinin yer aldığı denklemler, denklem (2.32)'de yerlerine yerleştirilir ve alt yüzey için  $z$  ifadesinin değeri olan  $+d/2$  denklemde yerine yazılırsa (Anonim, 2003a);

$$\begin{aligned}
U_{alt} &= \frac{E}{2g} \int_V \left[ \frac{d^2}{4} \lambda^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \frac{d^2}{4} \mu^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\vartheta \frac{d^2}{4} \lambda \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] dV \\
&\quad + \frac{G_f}{2} \int_V \frac{d^2}{4} (\lambda + \mu)^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 dV
\end{aligned} \tag{2.41}$$

sonucuna ulaşılır. Her iki yüzey için olan toplam gerinim enerjisi  $U_f$ ,  $t$  kalınlığı üzerinden alınan integrale ve  $G=E/[2(1+\vartheta)]$  yazılarak aşağıdaki gibi elde edilir (Anonim, 2003a):

$$\begin{aligned}
U_f &= \frac{E d^2 t}{4g} \int_0^a \int_0^b \left[ \lambda^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \mu^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\vartheta_f \lambda \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right. \\
&\quad \left. + \left( \frac{1 - \vartheta_f}{2} \right) (\lambda + \mu)^2 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dy dx
\end{aligned} \tag{2.42}$$

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Deneysel Malzemeler

##### 3.1.1 Çekirdek malzemeleri

Bu çalışmada çekirdek malzemesi olarak Türkiye’de basma ve üç nokta eğilme testleri için alüminyum köpük üretilmiş (Şekil 3.6), İtalya’da ise düşük hızlı darbe deneyi için Alulight® International GmbH firmasından temin edilen alüminyum köpük sandviç (AKS) panel (Şekil 3.1) kullanılmıştır. Türkiye’de üretilen alüminyum köpük için Gürel Makine A.Ş. firmasından sağlanan 325 mesh boyutunda ve %99,7 saflıkta alüminyum tozları ile MERCK firmasından sağlanan 325 mesh boyutunda ve %98 saflıkta TiH<sub>2</sub> köpürtücü tozları kullanılmıştır.



**Resim 3.1.** Alüminyum köpük sandviç panel

Çalışmada çekirdek malzemesi olarak kullanılan AKS panelin kimyasal, fiziksel ve geometrik özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

**Çizelge 3.1** AKS panelin kimyasal kompozisyonu

AKS panelin bölümleri	Kimyasal Kompozisyon
Yüzey	Al 99.6%, O 0.4%
Çekirdek	Al 82.3%, Si 17%, Ti 0.14%, O 0.56%
Epoksi Yapıştırıcı	C 72.12%, O 27.71%, Cl 0.17%.

**Çizelge 3.2** AKS panelin fiziksel ve geometrik özellikleri

Özellik	AKS	
	Yüzey	Çekirdek
Malzeme	Al (99.5%)	AlSi10
Yoğunluk [kg/dm <sup>3</sup> ]	2.73	0.53±0.06
Kalınlık[mm]	1	9
AKS panelin toplam yoğunluğu [kg/dm <sup>3</sup> ]	0.95±0.05	
AKS panelin toplam kalınlığı [mm]	11	

### 3.1.2 Yüzey Malzemeleri

Bu çalışmada yüzey malzemesi olarak cam elyaf takviyeli plastik (CTP) kompozit kullanılmıştır. Türkiye’de üretilen cam elyaf takviyeli plastikler için METYX firmasından sağlanan 600 g/m<sup>2</sup> ağırlığında, [0°] açılı, tek eksenli elyaf ve 600 g/m<sup>2</sup> ağırlığında, [0°/90°] ve [45°/-45°] açılı, iki eksenli (biaxial) cam elyaflar ile DURATEK firmasından sağlanan epoksi reçine kullanılmıştır. İtalya’da üretilen cam elyaf takviyeli plastikler için ise E tipi 300 g/m<sup>2</sup> ağırlığında, [0°/90°] açılı ve 600 g/m<sup>2</sup> ağırlığında, [0°/90°/Mat] dizilimli cam elyaflar ile Fratelli Zucchini firmasından sağlanan vinilester reçine ile Articoli Tecnici Per la Nautica firmasından temin edilen epoksi reçineler kullanılmıştır.

### 3.1.3 Yapıştırıcı Malzemeler

Yüzey malzemeleri ile çekirdek malzemelerini birbirine yapıştırmak için, CTP kompozit üretimi yapılırken kullanılan ve yukarıda belirtilen vinilester ve epoksi reçineler kullanılmıştır.

## 3.2 Deneysel Yöntemler

### 3.2.1 Alüminyum köpük üretimi

Toz metalurjisi metoduyla üretilen kapalı gözenekli alüminyum köpük metalin imalat prosesi aşağıda aşama aşama verilmiştir:

### 3.2.1.1 Karıştırma ve presleme

Ağırlıkça alüminyum tozları ve köpürtücü madde ( $TiH_2$ ) tozları %99:%1 oranında 1/10000 g hassasiyetinde terazi ile tartılarak homojen bir dağılımın oluşturulması için yüksek enerjili attritörde 45 dakika süre ile karıştırılmıştır. Karıştırılan tozlar universal test cihazında 350 MPa basınç altında preslenerek (Şekil 3.2), 100 mm çapında ve 75 mm yüksekliğinde silindirik numuneler üretilmiştir (Şekil 3.3).



**Resim 3.2.** Presleme işlemi



**Resim 3.3.** Presleme sonucu elde edilen numune

### 3.2.1.2 Deformasyon

Şekil 3.3'teki gibi elde edilen numuneler, Şekil3.2'de gösterilen üniversal tezgaha ilk deformasyon işlemi için ekstrüzyon aparatları yerleştirilmesiyle ekstrüzyon edilerek Şekil 3.4'te gösterilen 80x250x24 mm boyutunda numuneler haline getirilmiştir.



**Resim 3.4.** Ekstrüzyon sonucu elde edilen numune

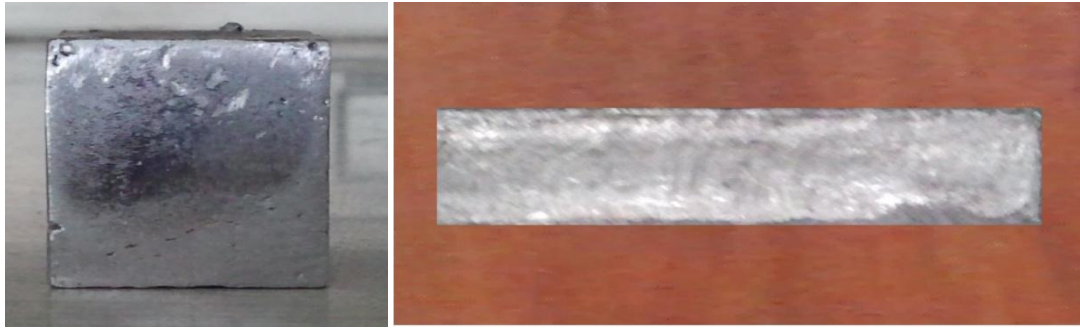
Ekstrüzyon işleminden sonra ikinci deformasyon işlemi olarak, 24 mm kalınlığındaki numuneler kademeli olarak 20mm,16mm,12mm ve son olarak 10mm'ye kadar haddelenerek ve her haddeme işleminden önce 500 °C'de birer saat tavlama fırınında bekletilerek Şekil3.5'teki gibi numuneler haline getirilmiştir. Elde edilen yeni numuneler markalanıp (Şekil3.5) giyotin makas ile kesilerek köpürme işlemi için hazır hale getirilmiştir.



**Resim 3.5.** Haddeme sonucu elde edilen numune ve markalanması

### 3.2.1.3 Köpükleştirme prosesi

Markalanıp kesilen numuneleri, uygulanan basma ve üç nokta eğilme test yöntemlerinin standartlarına uygun metal köpük haline getirmek için, öncelikle köpürtme kalıpları hazırlanmış, numuneler kalıplara teker teker yerleştirilmiş ve köpürme işlemi için kullanılan fırın 700 °C'ye ayarlanıp köpürme işlemine tabi tutulmuştur. Köpürme işlemi sırasında süre gözetilmeksizin, köpüren numunenin kalıp üzerinde açılan deliklerden çıkışının gözlemlenmesi yapılarak köpürme işlemi tamamlanmıştır. Köpürme işlemi tamamlanan bütün numuneler atmosfer ortamında soğutulmuştur. Deforme edilen basma testi numuneleri 10mm kalınlıktan 30mm kalınlığa üç kat, eğilme testi numuneleri ise 10mm kalınlıktan 20mm kalınlığa iki kat lineer olarak geniştilerilerek köpürtülmüştür.



**Resim 3.6.** Köpürme işleminden sonraki basma ve eğilme testi numuneleri

Köpürtülen alüminyum köpük metal test numunelerinin özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3** Alüminyum köpük test numunelerinin özellikleri

Numune Türü	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Boyutlar (mm)	Gözenek Miktarı (%)
Basma Testi Numunesi	0,784	30x30x30	97
Üç Nokta Eğilme Testi Numunesi	1,103	120x50x20	97



### 3.2.2 CTP üretimi

Türkiye’de üretilen CTP kompozitler için  $600 \text{ g/m}^2$  ağırlığında  $[0^\circ]$  açılı tek eksenli ve  $600 \text{ g/m}^2$  ağırlığında  $[0^\circ/90^\circ]$  ve  $[45^\circ/-45^\circ]$  iki eksenli cam elyaflar, 74g/26g epoksi/sertleştirici oranında hazırlanan epoksi reçine ile dörder kat  $[0^\circ]$ ,  $[0^\circ/90^\circ]$  ve  $[45^\circ/-45^\circ]$ , antisimetrik dizilimli iki eksenli dört kat  $[0^\circ/90^\circ]_s/[45^\circ/-45^\circ]_s$  ve simetrik dizilimli iki eksenli dört kat  $[0^\circ/90^\circ]_s/[45^\circ/-45^\circ]_s$  olmak üzere beş çeşit elyaf oryantasyonu seçilerek el yatırması yöntemi ile her bir yüzey için 2,5 mm kalınlığında üretilmiştir. İtalya’da üretilen CTP kompozitler için, E tipi  $300 \text{ g/m}^2$  ağırlığında  $[0^\circ/90^\circ]$  iki eksenli ve  $600 \text{ g/m}^2$  ağırlığında  $[0^\circ/90^\circ/\text{Mat}]$  dizilimli cam elyaflar, Fratelli Zucchini firmasından sağlanan vinilester için 50g/1g vinilester/sertleştirici oranında ve Articoli Tecnici Per la Nautica firmasından sağlanan epoksi için ise 50g/18,5g epoksi/sertleştirici oranında hazırlanan epoksi reçine ile çeşitli tabaka sayılarında ve kalınlıklarda el yatırması metodu ile üretilmiştir.

### 3.2.3 Sandviç kompozit üretimi

Türkiye’de el yatırması yöntemi ile üretilen CTP kompozitler, aynı epoksi yardımı ile alüminyum köpük yüzeyine yapıştırılmış ve  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de bekletilen pres tezgahı altına yük uygulamaksızın düzgün bir yüzey elde etmek ve epoksinin yüzeye tutunma kapasitesini artırmak için bir saat süreliğine bekletilmiştir. Bu şekilde elde edilen sandviç kompozit basma ve üç nokta eğilme test numuneleri sırasıyla Şekil 3.7’de verilmektedir.

İtalya’da da el yatırması yöntemiyle üretilen CTP kompozitler, üretim sırasında kullanılan aynı epoksi yardımı ile AKS panel yüzeyine yapıştırılmış ve oda sıcaklığında 48 saat süreyle bekletilerek AKS panelin yüzeyine tutunması sağlanmıştır. Bu şekilde üretilen düşük hızlı darbe deneyi sandviç test numuneleri Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



**Resim 3.7.** Basma ve üç nokta eğilme deneyleri için sandviç kompozit test numuneleri



**Resim 3.8.** Düşük hızlı darbe deneyi için sandviç kompozit test numunesi

### 3.2.4 Mekanik test yöntemleri

Üretilen test numunelerine uygulanan mekanik test yöntemleri ve bu testler sonucunda elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir:

#### 3.2.4.1 Sandviçin kenarı doğrultusunda (edgewise) basma test yöntemi

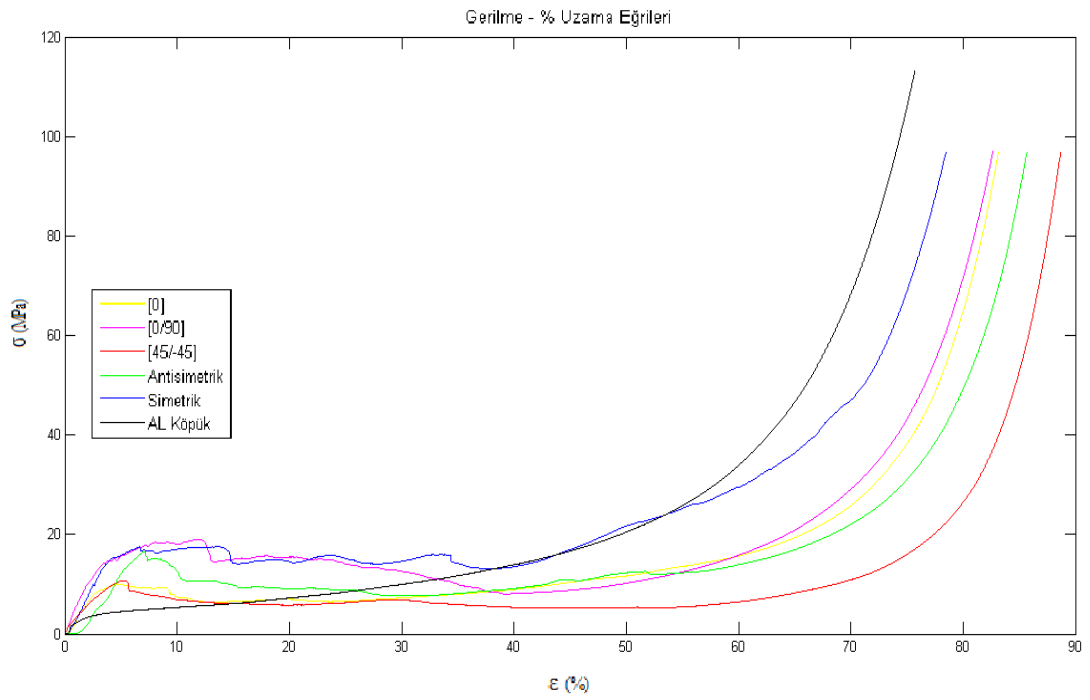
Bu test yönteminin uygulanması için ASTM C364-99 numaralı standart kullanılmıştır. Bu standarda göre numunelere yük uygulanan hareketli çene ilerleme hızı 0,5 mm/min'dir. Bu test metodu, düz yapılı sandviç yapıların sandviç yüzey düzlemine paralel doğrultuda basma özelliklerini kapsamaktadır. Standardına uygun hazırlanan numunelerin kenarları doğrultusunda basma testleri SHMADZU AUTOGRAPH AG-100 universal test cihazında gerçekleştirilmiştir.

Çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpüklerin bu test metodu için boyutları 30x30x30 mm olup, yüzey malzemesi olarak kullanılan CTP kompozitlerin boyutları ise 30x30x2,5 mm'dir. Bu test yönteminde, üretilmiş CTP kompozitlerin oryantasyon açlarına göre sandviç kompozitlerin ayrı ayrı testleri yapılarak, gerilme-

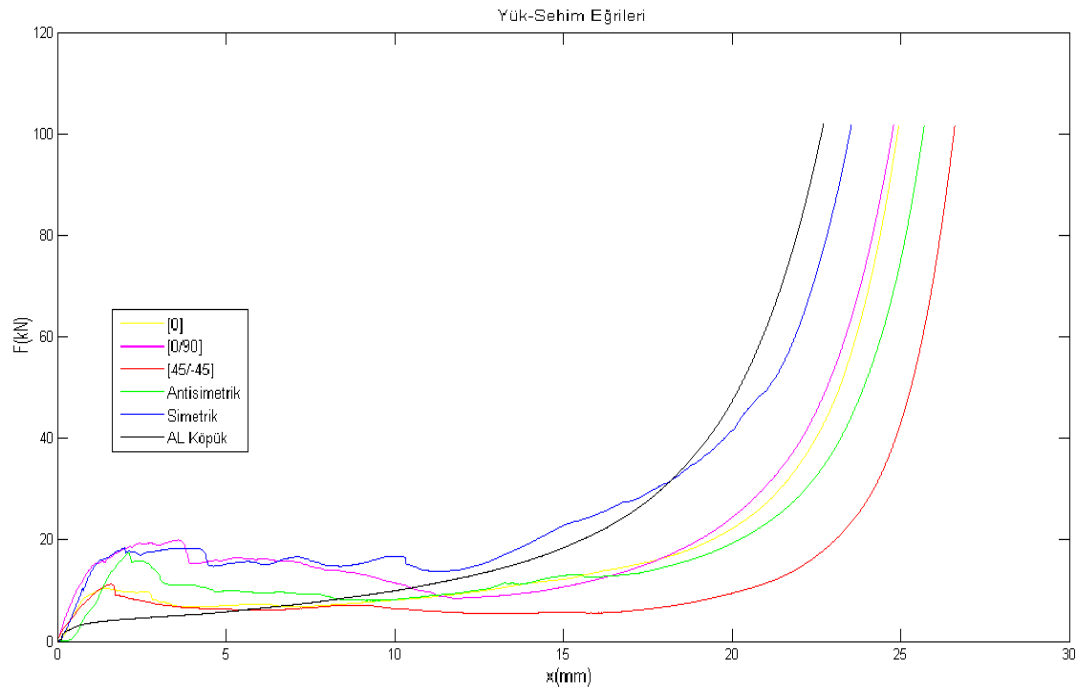
%uzama (Şekil 3.10) ve yük-sehim (Şekil 3.11) eğrileri elde edilmiştir. Sandviçin kenarı doğrultusunda basma test düzeneği Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



**Resim 3.9.** Sandviçin kenarı doğrultusunda basma test düzeneği



**Şekil 3.1** Sandviçin kenarı doğrultusunda basma testi gerilme-%uzama eğrileri

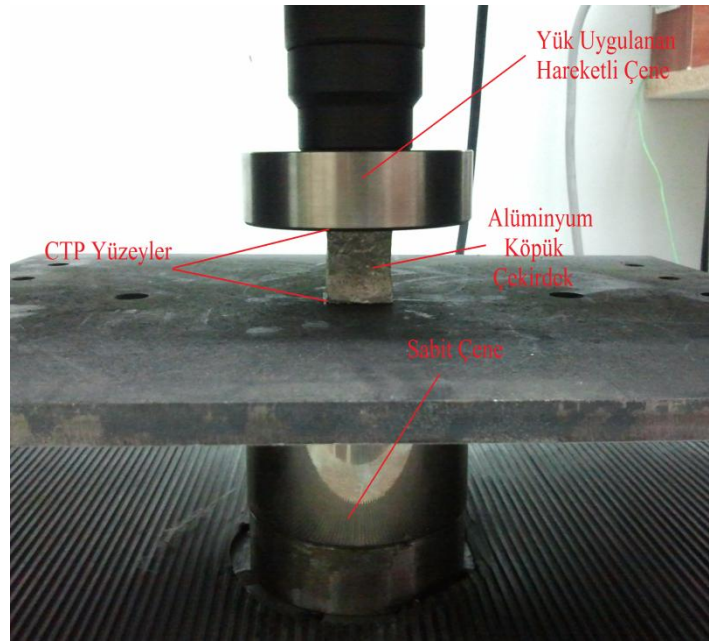


**Şekil 3.2** Sandviçin kenarı doğrultusunda basma testi yük-sehim eğrileri

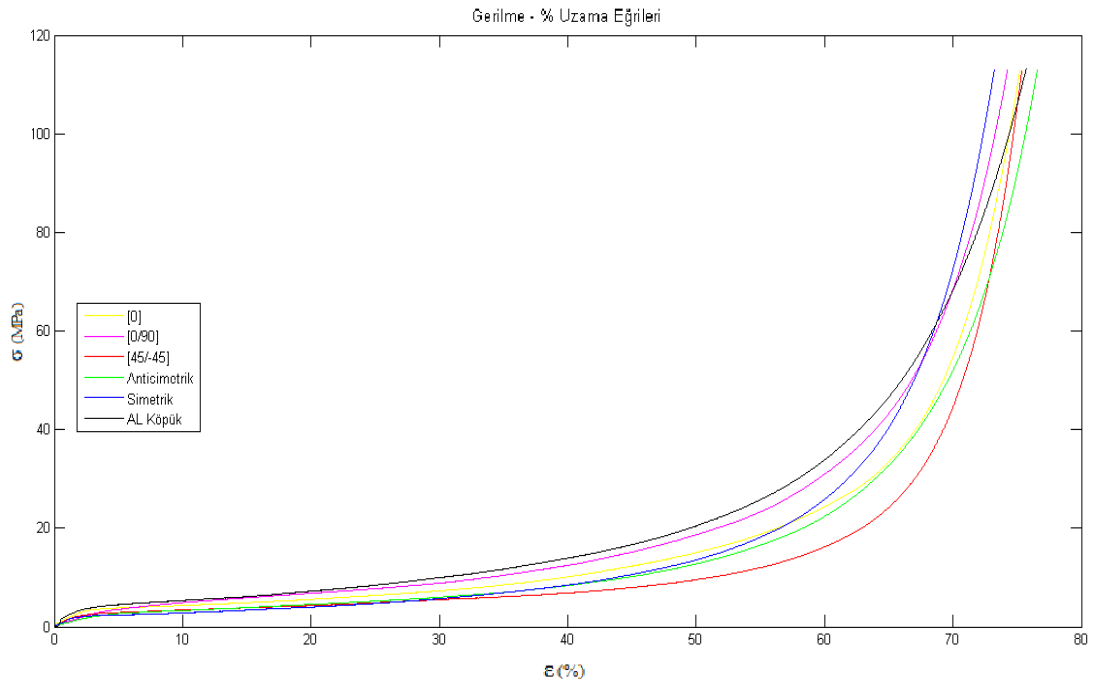
### 3.2.4.2 Sandviçin yüzeyi doğrultusunda (flatwise) basma test yöntemi

Bu test yönteminin uygulanması için ASTM C365-03 numaralı standart kullanılmıştır. Bu standarda göre numunelere yük uygulanan hareketli çene ilerleme hızı 0,5 mm/min'dir. Bu test metodu, sandviç yapıların basma dayanımının ve modüllerinin belirlenmesini kapsamaktadır. Standardına uygun hazırlanan numunelerin yüzeyleri doğrultusunda basma testleri SHIMADZU AUTOGRAPH AG-100 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir.

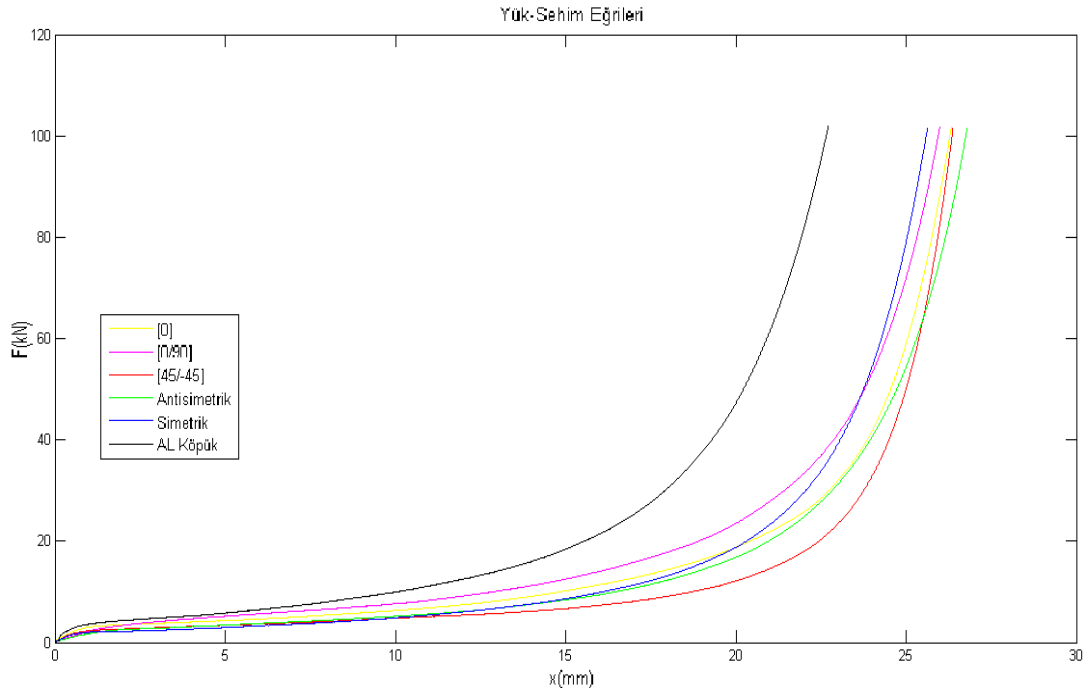
Çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpüklerin bu test metodu için boyutları 30x30x30 mm olup, yüzey malzemesi olarak kullanılan CTP kompozitlerin boyutları ise 30x30x2,5 mm'dir. Bu test yönteminde, üretilmiş CTP kompozitlerin oryantasyon açılarına göre sandviç kompozitlerin ayrı ayrı testleri yapılarak, gerilme-%uzama (Şekil 3.13) ve yük-sehim (Şekil 3.14) eğrileri elde edilmiştir. Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma test düzeneği Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



**Resim 3.10.** Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma test düzeneği

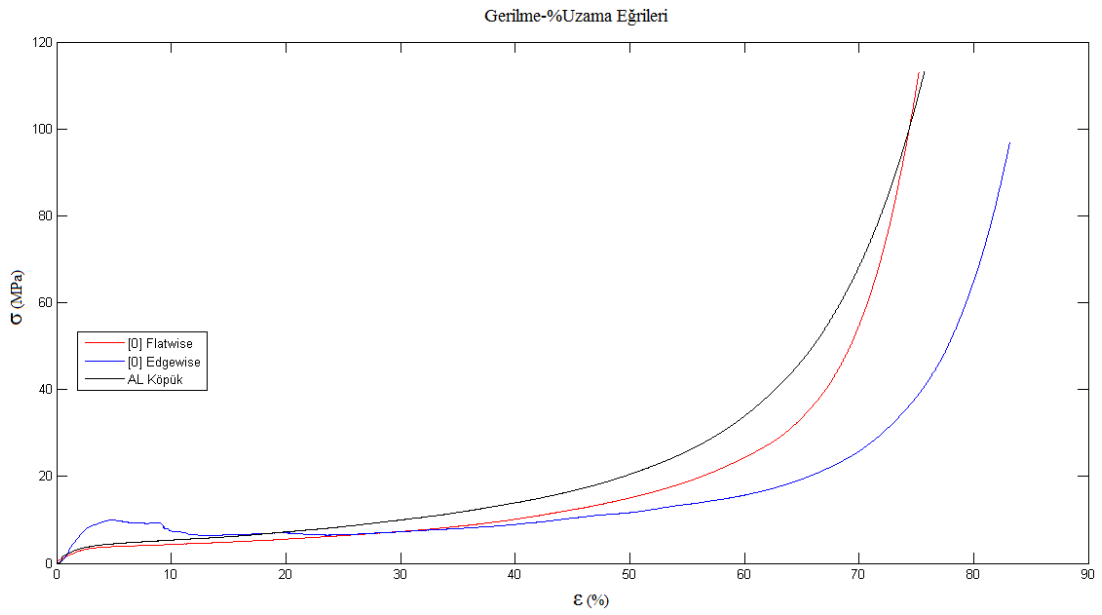


**Şekil 3.3** Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma testi gerilme-%uzama eğrileri

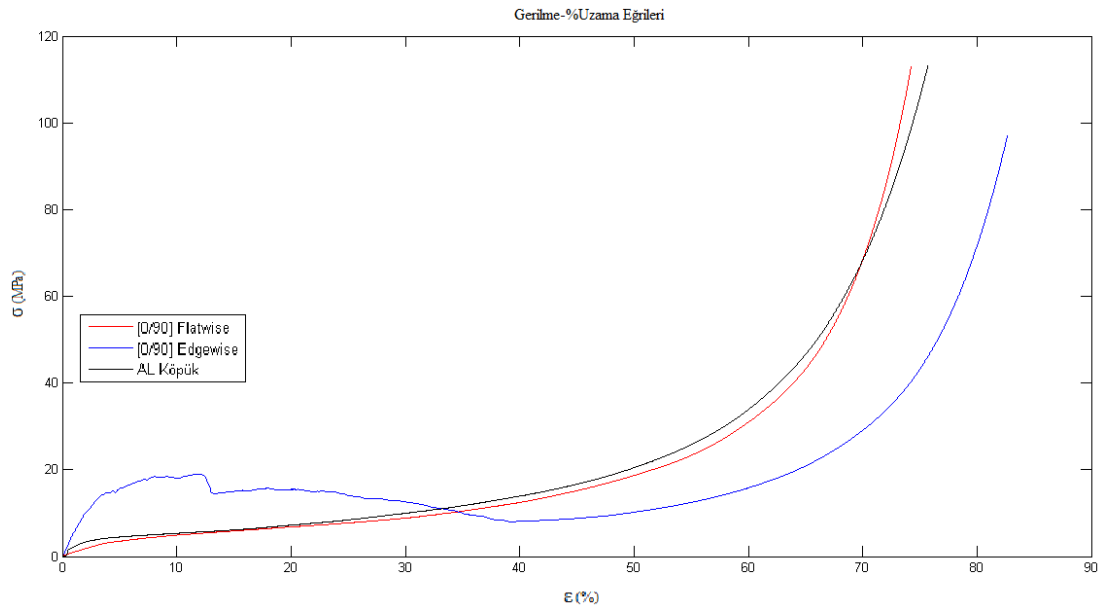


**Şekil 3.4** Sandviçin yüzeyi doğrultusunda basma testi yük-sehim eğrileri

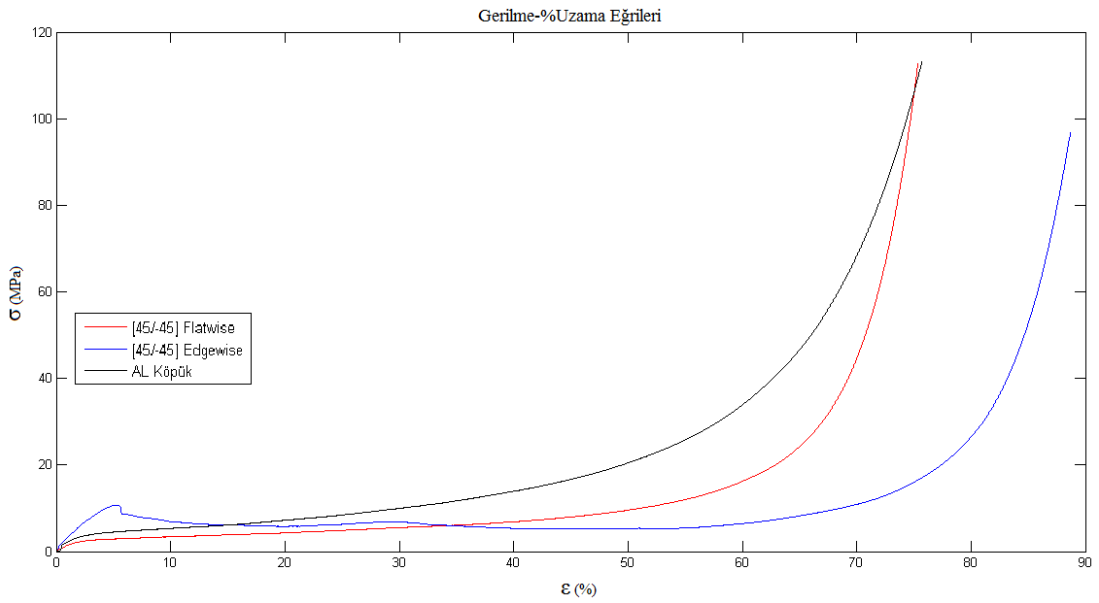
Elde edilen veriler ışığında, uygulanan basma testleri türleri açısından da karşılaştırmalı olarak aşağıdaki grafiklerde CTP kompozit oryantasyon açılarında göre gerilme-%uzama ve yük-sehim eğrileri ayrı ayrı sunulmuştur.



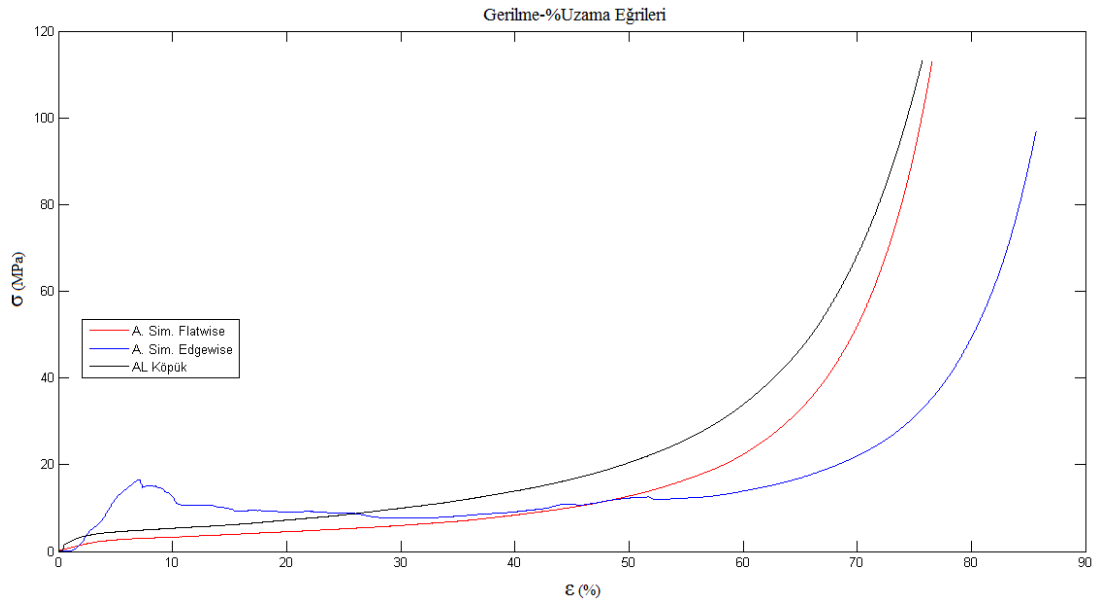
**Şekil 3.5** Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin  $[0^\circ]$  elyafli sandviç için karşılaştırılması



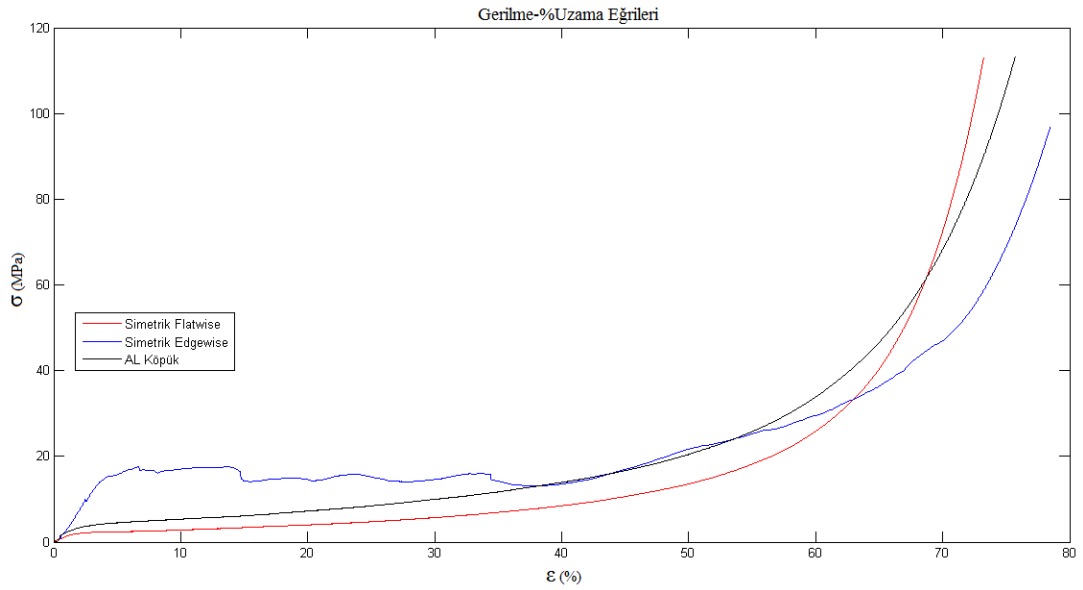
**Şekil 3.6** Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin  $[0^\circ/90^\circ]$  elyafli sandviç için karşılaştırılması



**Şekil 3.7** Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin  $[45^\circ/-45^\circ]$  elyafli sandviç için karşılaştırılması

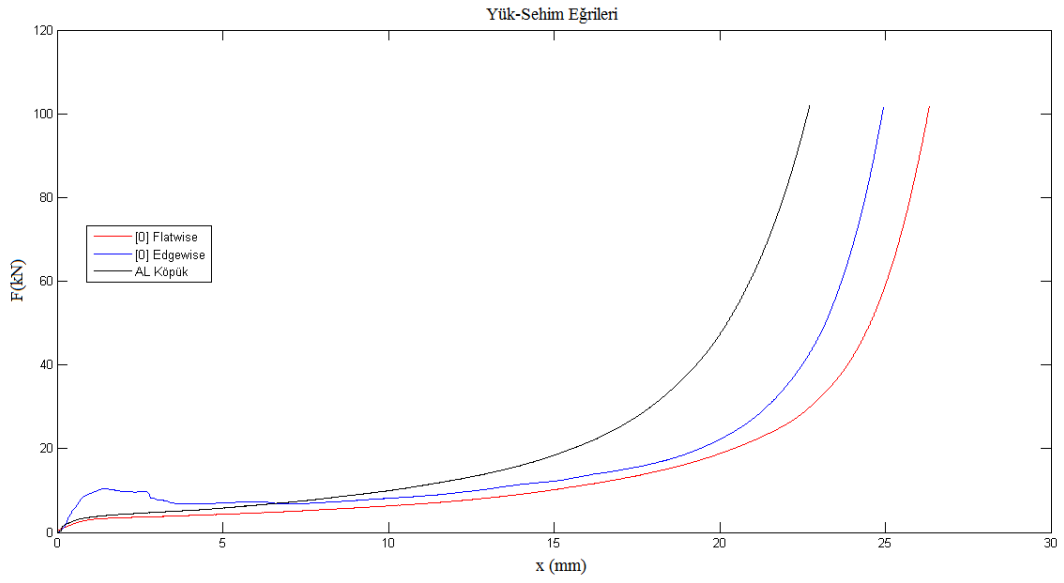


**Şekil 3.8** Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin antisimetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması

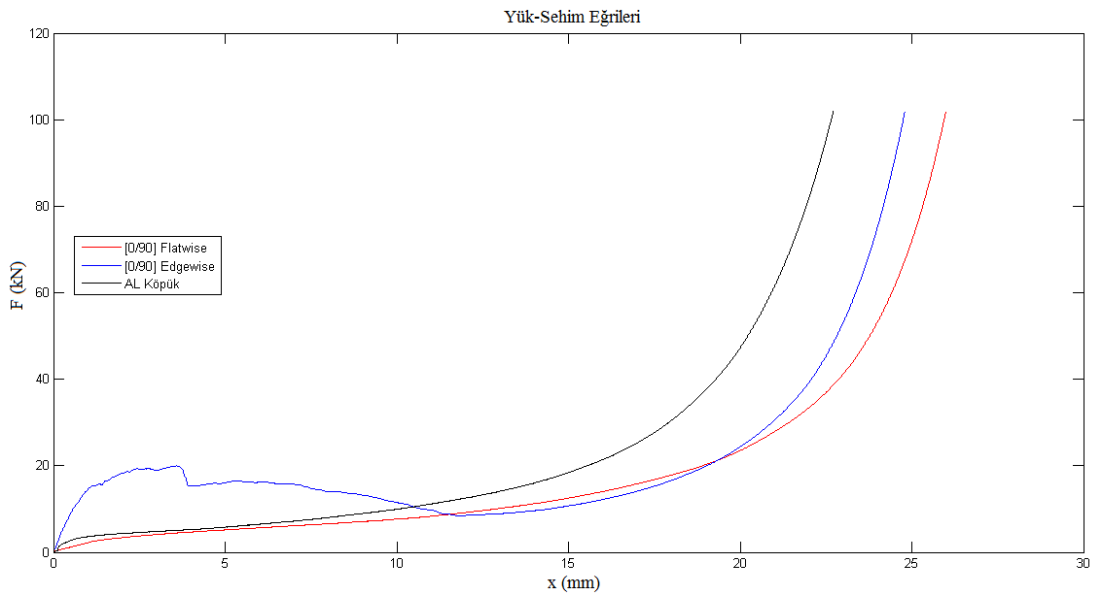


**Şekil 3.9** Uygulanan basma test metoduna göre gerilme-%uzama eğrilerinin simetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması

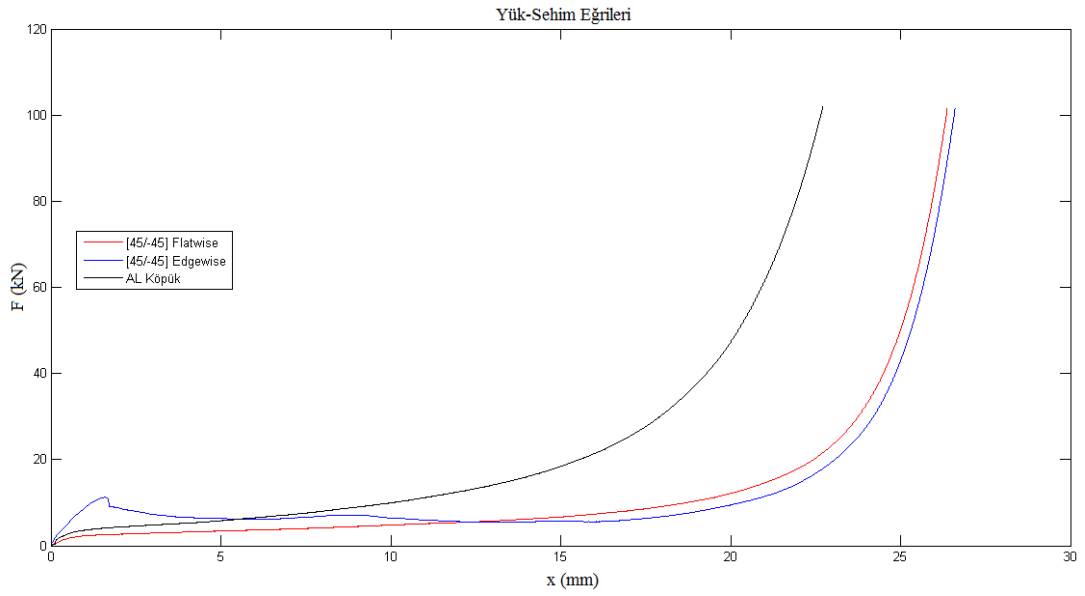




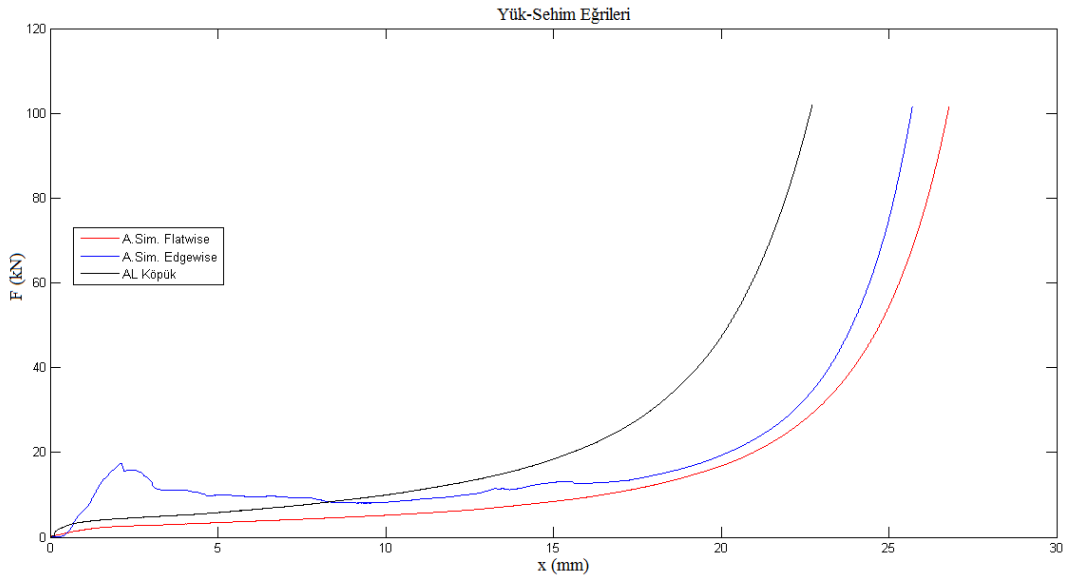
**Şekil 3.10** Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin  $[0^\circ]$  elyaflı sandviç için karşılaştırılması



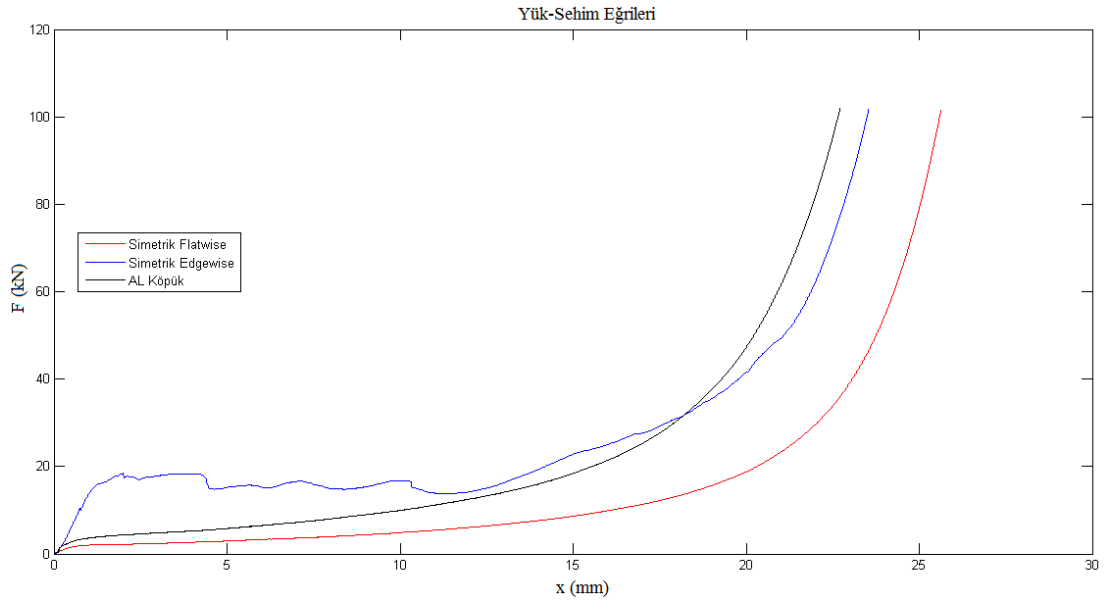
**Şekil 3.11** Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin  $[0^\circ/90^\circ]$  elyaflı sandviç için karşılaştırılması



**Şekil 3.12** Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin  $[45^{\circ}/-45^{\circ}]$  elyafli sandviç için karşılaştırılması



**Şekil 3.13** Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin antisimetrik elyafli sandviç için karşılaştırılması

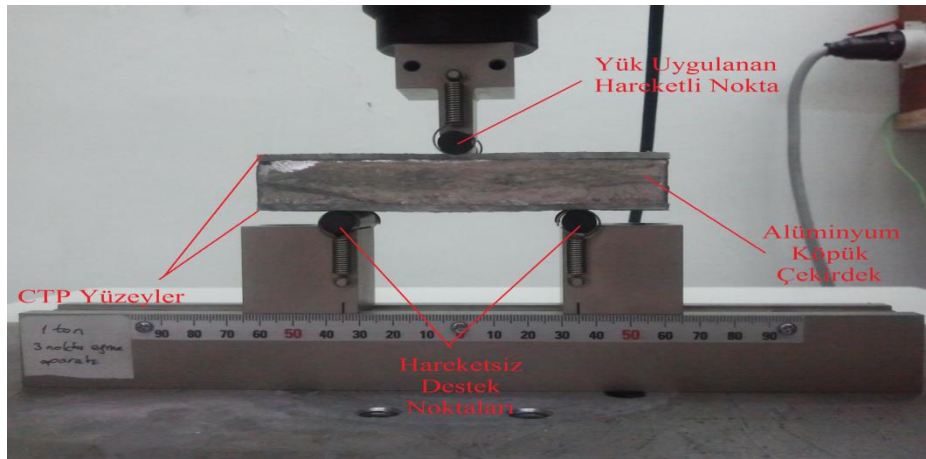


**Şekil 3.14** Uygulanan basma test metoduna göre yük-sehim eğrilerinin simetrik elyaflı sandviç için karşılaştırılması

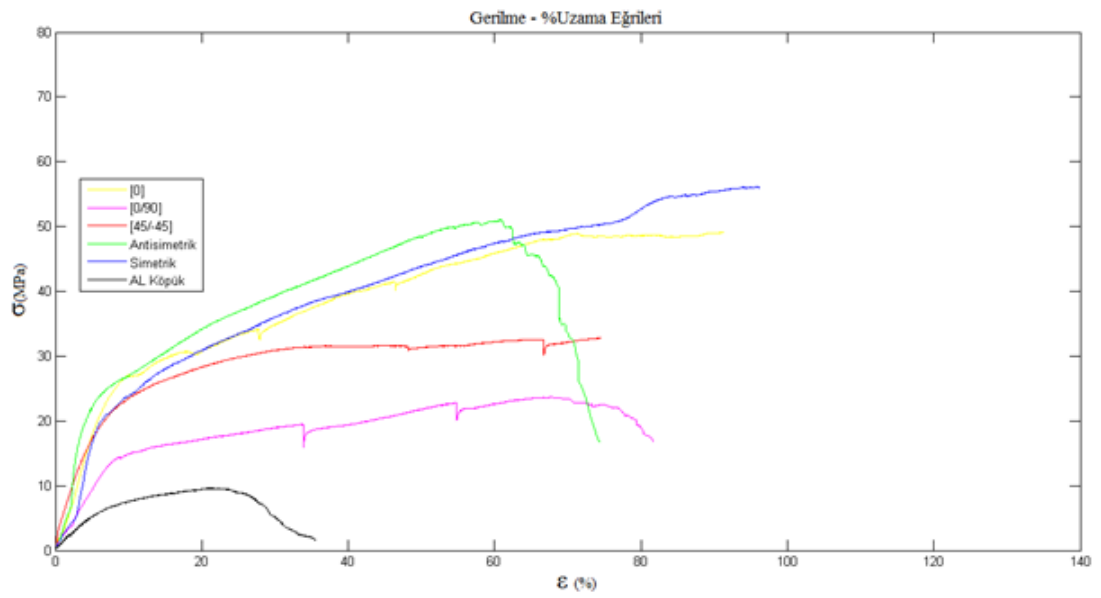
### 3.2.4.3 Üç nokta eğilme test yöntemi

Bu test yönteminin uygulanması için ASTM C393-00 numaralı standart kullanılmıştır. Bu standarda göre numunelere yük uygulanan hareketli nokta ilerleme hızı 1 mm/min'dir. Bu test metodu, düz sandviç yapıların eğilme rijitliğini, çekirdeğin kayma gerilmesi ve kayma modülünü ve yüzeylerin bası ve çeki gerilmelerini belirlemek için kullanılmaktadır. Standardına uygun hazırlanan numunelerin üç nokta eğilme testleri SHMADZU AUTOGRAPH AG-100 üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir.

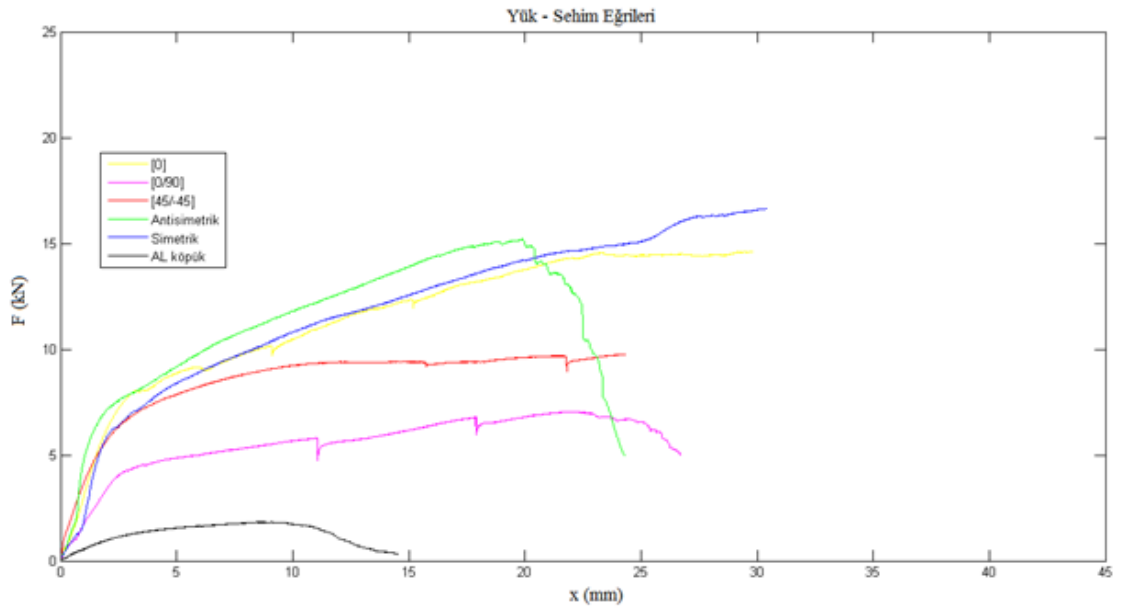
Çekirdek malzemesi olarak kullanılan alüminyum köpüklerin bu test metodu için boyutları 120x50x20 mm olup, yüzey malzemesi olarak kullanılan CTP kompozitlerin boyutu ise 120x50x2,5 mm'dir. Bu test yönteminde, üretilmiş CTP kompozitlerin oryantasyon açılarına göre sandviç kompozitlerin ayrı ayrı testleri yapılarak, gerilme-gerinim ve kuvvet-uzama eğrileri elde edilmiştir. Üç nokta eğilme test düzeneği Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



**Resim 3.11.** Üç nokta eğilme test düzeneği



**Şekil 3.15** Oryantasyon açılarına göre gerilme-%uzama eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.16 Oryantasyon açılarına göre yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması

#### 3.2.4.4 Düşük hızlı darbe test yöntemi

Bu çalışmada düşük hızlı darbe testleri, ISO 179-1 standardına göre hazırlanan numuneler üzerine Ceast Fractovis Plus universal darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu test yönteminde diğer test yöntemlerine nazaran çekirdek malzemesi olarak AKS panel kullanılmıştır.

Dinamik darbe testleri sandviç numuneler üzerine yaklaşık 7 kg ağırlığında vurucu kütle ile 1,3,4,6,7,8 ve 9 m/s hızlarında uygulanmıştır. Uygulanan darbe enerjisi değerleri 3,5–285 J aralığında değişmektedir. Darbe vurucu ucu olarak, 20 mm çapta yarı küresel bir uç kullanılmıştır. Üretilen sandviç numuneler ezilme olmaksızın 40 mm çaptaki rijit metal bir levha ile tamamıyla sabitlenmiştir. Farklı hızlarda uygulanan darbe deneyleri için üretilen sandviç numunelerin özellikleri aşağıdaki tabloda verilmektedir.

**Çizelge 3.4** AKS panel çekirdekli sandviç üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri

Grup Adı	AKS			CTP				Sandviç Numuneleri	
	Numune Numarası	Boyutları (mm)	Ağırlığı (g)	Cam Elyaf			Reçine Tipi	Toplam Kalınlık (mm)	Toplam Ağırlık (g)
				Çeşidi	Tabaka Kalınlığı (mm)	Kullanılan Tabaka Sayısı			
TİP A	1	75x50x11	34,71	[0°/90°]	0,2	6	Vinilester	13,40	48,21
	2	75x50x11	34,80	[0°/90°/Mat]	1	2	Vinilester	15,30	68,80
	3	75x50x11	33,18	[0°/90°/Mat]	1	2	Vinilester	14,10	67,18
TİP B	1	75x50x11	36,93	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,10	70,93
	2	75x50x11	33,46	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,20	67,46
	3	75x50x11	35,44	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,40	69,44
	4	75x50x11	35,44	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,40	69,44
	5	75x50x11	33,20	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,40	65,71
	6	75x50x11	34,14	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,40	67,23
	7	75x50x11	32,36	[0°/90°/Mat]	1	2	Epoksi	16,40	63,46

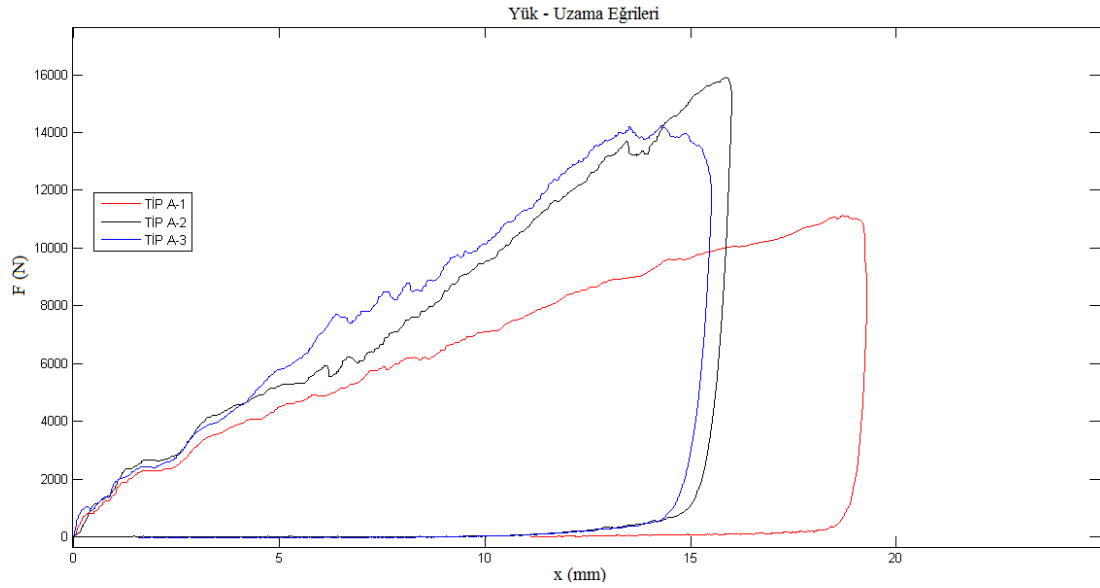
Darbe testleri sonucunda elde edilen sayısal veriler aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

**Çizelge 3.5** Darbe testleri sonuçları

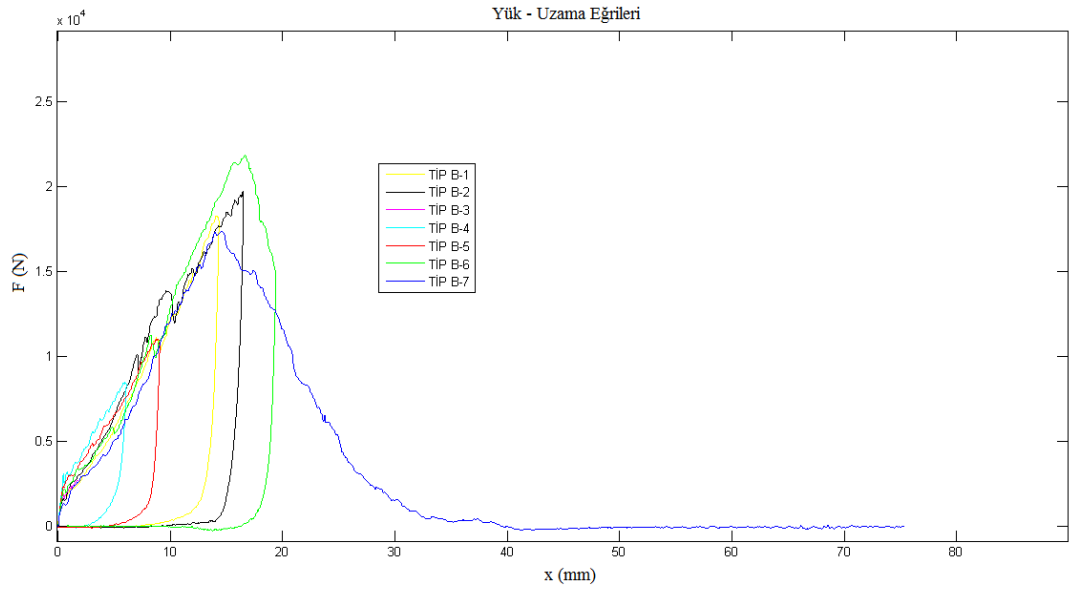
Grup Adı	AKS	Hız	Sandviç Numune	
	Numune Numarası	V[m/s]	F <sub>max</sub> [N]	E[J]
TİP A	1	6	11313	127
	2	6	15912	127
	3	6	14231	127
TİP B	1	6	18287	127
	2	7	19692	172,6
	3	1	2714	3,5
	4	3	8489	31,7
	5	4	11025	56
	6	8	21817	225
	7	9	17365	285

TİP A grubunda yer alan sandviçlere uygulanan hız değeri, Crupi ve ark. (2011)'nin yaptığı çalışmada AKS panelde tamamıyla delinmenin meydana geldiği değer olduğu için seçilmiştir. Bu grupta yer alan testlerde, vinilester reçine ve iki çeşit cam elyaf kullanılmış,  $[0^{\circ}/90^{\circ}/\text{Mat}]$  dizilimli elyaf ile daha iyi sonuç elde edilmiş ve yüzey malzemesinin kalınlığının artışı ile maksimum kuvvet değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, TİP B grubunda yer alan sandviçler için  $[0^{\circ}/90^{\circ}/\text{Mat}]$  dizilimli cam elyaf ve epoksi reçine ile daha kalın CTP yüzeyler üretilerek, sonuçlar TİP A grubu ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma neticesinde ise epoksi reçinenin daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilerek, bu epoksi reçine ve  $[0^{\circ}/90^{\circ}/\text{Mat}]$  dizilimli elyaf ile farklı hızlarda deneylerin uygulanmasına devam edilmiştir.

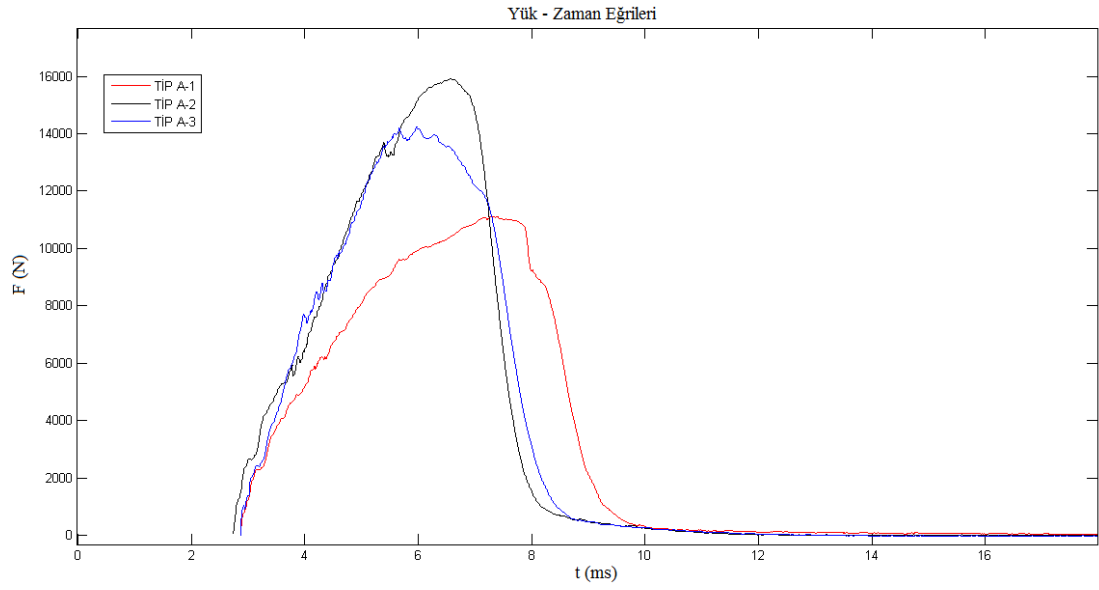
Farklı hızlarda uygulanan darbe testleri sonucunda elde edilen yük-uzama ve yük-zaman grafikleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.17 TİP A grubu sandviçlerin yük-uzama eğrileri

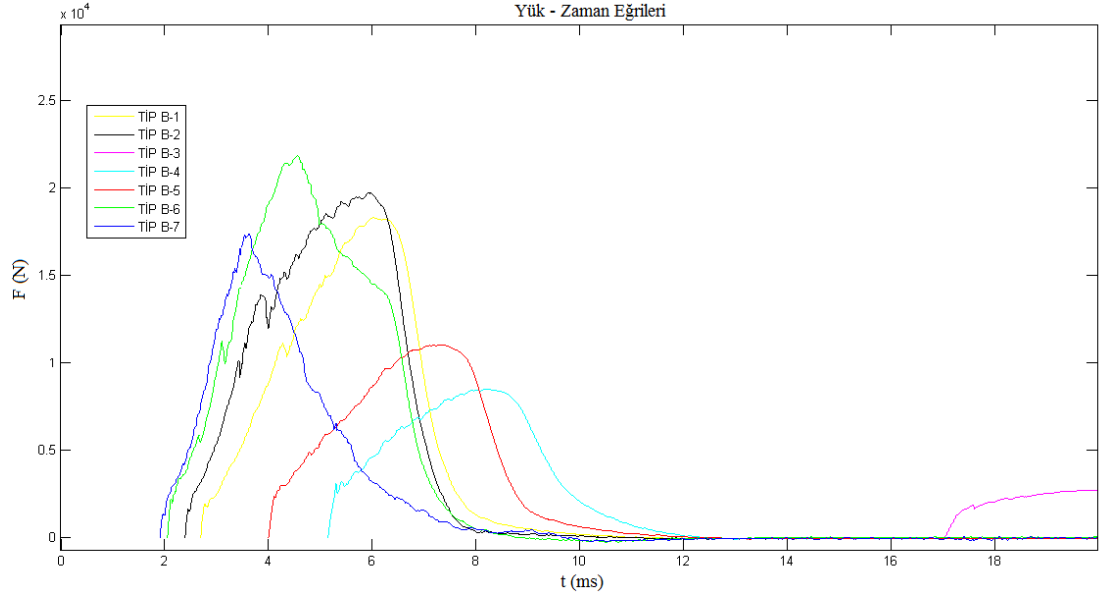


**Şekil 3.18** TİP B grubu sandviçlerin yük-uzama eğrileri



**Şekil 3.19** TİP A grubu sandviçlerin yük-zaman eğrileri





**Şekil 3.20** TİP B grubu sandviçlerin yük-zaman eğrileri

Elde edilen veriler ve eğrilere göre;

- $V=1$  m/s'de darbenin verdiği hasarın sadece CTP üst yüzeyinde olduğu ve CTP yüzeylerinin AKS panelden ayrılmadığı,
- $V=3$  m/s'de CTP yüzeylerden sadece darbe uygulanan üst yüzeyin AKS panelden ayrılmaya başladığı ve AKS panelin darbeden aldığı ilk hasara bu hız değerinde uğrayarak hasar için gerekli enerjinin 31,7 J olduğu,
- $V=4$  m/s'de darbenin uygulandığı CTP üst yüzeyinin tamamen AKS panelden ayrıldığı, ayrılma için gerekli olan minimum enerji değerinin 56 J olduğu ve CTP alt yüzeyinde ilk hasar oluşumunun başladığı,
- $V=6$  m/s'de tüm CTP yüzeylerinin tamamen AKS panelden ayrıldığı ve ayrılma için gerekli enerji değerinin 127 J olduğu,
- $V=8$  m/s'de AKS panelin alt yüzeyinde ilk hasarın meydana geldiği ve bu tip sandviç kompozitin taşıyacağı maksimum yükün 21817 N olduğu,
- $V=9$  m/s'de ise tüm sandviç kompozitte tamamıyla delinme meydana geldiği, tespit edilmiştir.

#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, literatürde sıklıkla kullanılan konvansiyonel yüzey malzemeleri yerine, cam elyaf takviyeli plastik kompozitler farklı oryantasyon açılarında uygulanarak hem alüminyum köpük çekirdekli hem de alüminyum köpük sandviç panel çekirdekli sandviç kompozitler üretilmiş ve endüstriyel uygulamaları açısından bu tip malzemelere sıklıkla uygulanan sandviçin kenarı ve yüzeyi doğrultusunda basma deneyleri ile üç nokta eğilme ve düşük hızlı darbe deneyleri uygulanmıştır.

Sandviç kompozit üretimi ülkemizde oldukça sınırlı sayıda ve kısıtlı imkanlarda yapılmaktadır. Buna rağmen sandviç kompozitlere olan ihtiyaç ise bütün endüstri kolları açısından oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu ihtiyaçtan kaynaklanan açığı kapatmak için gerekli teknik personel yetiştirilmeli ve nasıl ki geçmişte, kullanılan konvansiyonel malzemeler çağlara adını vermişse kompozit malzemeler de günümüze ve geleceğe damgasını vuracağından, bu malzemelerin imalat ve bakım-onarım imkanları artırılmalıdır.

Sandviç kompozit tasarımı yapılırken, uygulanacak endüstri kolları açısından değerlendirilmeli ve taşıyacağı statik ve/veya dinamik yüklere göre çeşitli yöntemlerle analizleri ve testleri yapılmalıdır. Tasarımda seçilen malzemeler uygulama yerine/yerlerine ve sağlanması istenen özelliğe göre titizlikle seçilmeli ve malzemeye etkiyecek bütün etmenler göz önünde bulundurulmalıdır. Sandviç kompozit üretiminde kullanılacak yüzey ve çekirdek malzemeleri ile yapışkanın seçimi, yüzey hazırlama ve üretim metodu sağlıklı ve istenilen özellikte bir malzeme için büyük önem taşımaktadır.

Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitin kenarı doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucunda elde edilen verilere göre, akma mukavemeti değeri en yüksek olan yönlendirme türünün  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  dizilimli sandviç olduğu, en düşüğünün ise  $[0^{\circ}]$  dizilimli sandviç olduğu, maksimum sehim değerinin  $[45^{\circ}/-45^{\circ}]$  dizilimli

sandviçte ve minimum sehım değerinin ise simetrik dizilimli sandviçte olduğu tespit edilmiştir.

Alüminyum köpük çekirdekli sandviç kompozitin yüzeyi doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucunda elde edilen verilere göre, akma mukavemeti değeri en yüksek olan yönlendirme türünün de  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  dizilimli sandviç olduğu, en düşüğünün ise simetrik dizilimli sandviç olduğu, maksimum sehım değerinin antisimetrik dizilimli sandviçte ve minimum sehım değerinin ise simetrik dizilimli sandviçte olduğu tespit edilmiştir.

Uygulanan basma testleri yöntemlerinden, sandviçin kenarı doğrultusunda uygulanan testlerde bütün oryantasyon açılarına göre elde edilen akma mukavemeti değerlerinin, sandviçin yüzeyi doğrultusunda uygulanan testlere göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Sandviçin kenarı doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucunda bütün oryantasyon açılarına göre elde edilen akma dayanımlarının, ayrı ayrı alüminyum köpüğün akma dayanımına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Sandviçin yüzeyi doğrultusunda uygulanan basma testleri sonucunda bütün oryantasyon açılarına göre elde edilen akma dayanımlarının, ayrı ayrı alüminyum köpüğün akma dayanımına göre daha az olduğu ancak sehımlerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Üç nokta eğilme deneyi sonucunda elde edilen verilere göre, maksimum dayanım değerinin en yüksek olduğu yönlendirme türünün simetrik dizilimli sandviç olduğu, minimum dayanımın ise  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  dizilimli sandviç olduğu tespit edilmiştir.

Üç nokta eğilme deneyleri sonuçları ışığında, bütün yönlendirme açılarına göre elde edilen maksimum dayanım değerlerinin, alüminyum köpüğün maksimum dayanım değerine nazaran çok daha fazla oldukları tespit edilmiştir.

Üç nokta eğilme deneylerine göre, maksimum elastisite modülüne sahip sandviçin antisimetrik dizilimli sandviç olduğu, minimum olanının ise  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  dizilimli sandviç olduğu tespit edilmiştir. Bütün yönlendirme açlarına göre elde edilen elastisite modülü değerlerinin, alüminyum köpüğün elastisite modülüne ayrı ayrı kıyasla hepsinin de daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Düşük hızlı darbe deneyi ile en iyi sonuçlar  $[0^{\circ}/90^{\circ}/\text{Mat}]$  dizilimli elyafla ve daha kalın CTP yüzey malzemesi ile elde edilmiştir. Ancak yüzey ayrışması yüksek hızlar için engellenememiştir. Daha esnek bir yapıştırıcı ile yüzey ayrışmasının engelleneceği ön görülmüştür.

**KAYNAKLAR**

- Amjad, S., 2001. Thermal Conductivity and Noise Attenuation in Aluminium Foams. A dissertation submitted for the degree of Master of Philosophy in Materials Modelling at the University of Cambridge.
- Anonim, 1999. M.C. Gill Corporation Doorways, A few of the more common configurations. <http://www.Mcgillcorp.com> (05.05.2011)
- Anonim, 2000. Honeycomb Sandwich Design Technology. Hexcell Composites, Publication No. AGU 075b
- Anonim, 2003a. Sandwich Concept. Diab Sandwich Handbook, <http://www.diabgroup.com> (05.11.2010)
- Anonim, 2003b. Sandwich Composites, <http://www.ndi.net> (23.04.2011)
- Asholt, P., 1999. Aluminium Foam Produced by the Melt Foaming Route Process, Properties and Applications. Hydro Aluminium R&D Materials Technology, Sunndalsøra, Norway, 133-140.
- Banhart, J., 2003. Aluminium Foams for Lighter Vehicles. International Journal of Vehicle Design, 1-19.
- Banhart, J., 2004. Industrialisation of Aluminium Foam Technology. 9th International Conference on Aluminium Alloys, 764-770.
- Banhart, J., 2001a. Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals And Metal Foams. Progress in Materials Science, (46):559-632.

- Banhart, J., 2001b. Manufacturing Routes for Metallic Foams. *Journal of Materials*, 52(12), 22-27
- Banhart, J., Weaire, D., 2002. On the Road Again: Metal Foam Find Favor. *Physics Today*, 37-42.
- Banhart, J., 2000. Properties and Applications of Cast Aluminum Sponges. *Advanced Engineering Materials*, (4):188-191
- Crane, D., 1996. *Airframe and Powerplant Mechanics-Airframe Handbook*. 600 s.
- Crupi, V., Epasto G., Guglielmino, E., 2011. Low-velocity impact strength of sandwich materials. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 13(4), 409-426
- Davies, G.J., Zhen S., 1983a. Metallic Foams: Their production, properties and applications. *Journal of Material Science*, 18:1899-1911
- Davies, G.J., Zhan, S., 1983b. Review metallic foams, their production, properties and applications. *Journal of Material Science*, 18:1899-1911.
- Elbir, S., Yılmaz, S., Güden, M., 1999. Kapalı Hücreli Alüminyum Köpük Metallerin Üretim Metodları ve Mekanik Özellikleri, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, (120):35-42.
- Elliot, J.C., 1956. US Patent, 2,751,289
- Gergely, V. ve Clyne, B., 2000. The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors. *Advanced Engineering Materials*, (4):175-178.

- Grading, R., Rammerstorfer, F.G., 1999. On the influence of mesoinhomogenities on the crush worthiness of metal foam. *Acta Materialia*, 47:143-148.
- Hanssen, A.G., Langseth, M., Happerstad, O.S. 2000. Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*, 24(5):475-507.
- Haydn, N. ve Wadley G., 2002. Cellular Metals Manufacturing. *Advanced Engineering Materials*, (10):726-733.
- Jappesen, A.P., 1997. Technician Airframe Textbook. Jeppesen sunderson Training Products, USA, 794 p.
- Kennedy, A. R., 2002. The Effect of TiH<sub>2</sub> Heat Treatment on Gas Release and Foaming Al- TiH<sub>2</sub> Preforms. *Scripta Materialia*, (47):763-767.
- Kolat, K., 2005. Farklı Ortamların Sandviç Kompozitlerin Kırılma Tokluğu üzerindeki Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ma, L., He, D., 1999. Cellular structure controllable aluminium foams produced by high pressure infiltration process. *Scripta Materialia*, 41(7):785-789
- Middleton, D.H., 1990 *Composite Materials in Aircraft Structures*. Longman, USA, 394 p.
- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., ve Kitahara, A., 2000. ALPORAS Aluminium Foam: Production process, Properties, and Applications. *Advanced Engineering Materials*, (4):179- 183.
- Patrick, K., 2000. Ultra-Light Aluminium Foam Materials Offer Advantages in Automotive Applications. *Industrial Heating*, 35-36.

- Seitzberger, M., Rammerstorger, F.G., Degischer, H.P., 1997. Crushing of axially compressed steel tubes filled with aluminium foam. *Acta Mechanica*, 125:95-103.
- Tanatmış, A.A. , 1999. Uçak Yapılarında Gelişmiş Malzemelerin Kullanımı. *Bilim Günleri*, TMMOB Mak. Müh. Odası, Denizli, 287-294.
- Tolun, S. ,1991. Uçak Yapıları. A.Ü Sivil Havacılık Y.O., Eskişehir, 493 s.
- Wick, C., Veilleux, R.F., 1986. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*. Vol.3, Chapter 8, 13-30.
- Wood, J. T., 1996. *Production and Application of Continuously Cast, Foamed Aluminium*. CYMAT.
- Yu, C. J., Eifert, H., Banhart, J., ve Baumeister, J., 1998. *Metal Foams*. *Advanced Materials&Processes*, 45-47.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KARA, Emre  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 09.07.1987 - ÇANKIRI  
Medeni hali : Bekar  
Telefon : 0 (364) 227 45 33 / 1242  
e-mail : [emrekara@hitit.edu.tr](mailto:emrekara@hitit.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği A.B.D	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi Çorum Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Çankırı Y.D.A. Lisesi	2005

## İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## Yabancı Dil

İngilizce

### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:**

1. Aykul. H, Sayman O., Özyılmaz E., Kara E."An Elastic-Plastic Stress Analysis in a Woven Steel Reinforced Thermoplastic Cantilever Beam Loaded Uniformly". **International Conference ICOME 2010**, 321-332, Craiova- Romania, 27-30 April 2010.
2. E., Kara, Aykul. H, Sayman O., Özyılmaz E."Elastic, Plastic and Residual Stress Analysis in Symmetric Thermoplastic Laminated Plates Under Various Temperature Change Through The Thickness: Analytical Solution".**International Conference ICOME 2010**, 405-416, Craiova- Romania, 27-30 April 2010.
3. Özyılmaz E., Aykul. H, Sayman O., Kara E."On Static Behavior of Dental Implants Under Different Load Directions". **International Conference ICOME 2010**, 221-224, Craiova- Romania, 27-30 April 2010.
4. Emre Kara, Halil Aykul, Onur Sayman, **Emre Özyılmaz**, Kamil Özdin. Elastic Plastic and Residual Stress Analysis of Simply Supported Thermoplastic Composite Beams Under a Transverse Uniformly Distributed Load. *The 2<sup>nd</sup> International Symposium on Computing in Science & Engineering (ISCSE 2011)* on June, 1-4, 2011, Kuşadası, Aydın, Türkiye.