



**CAM FİBER / SENTETİK KÖPÜK / POLİMER
KOMPOZİTLERİN DARBE VE BURKULMA
DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Esmâ GAVGALI

Yüksek Lisans Tezi

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı**

Prof. Dr. Mustafa YAMAN

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CAM FİBER / SENTETİK KÖPÜK / POLİMER KOMPOZİTLERİN
DARBE VE BURKULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Esmâ GAVGALI

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU

CAM FİBER / SENTETİK KÖPÜK / POLİMER KOMPOZİTLERİN DARBE VE BURKULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Prof. Dr. Mustafa YAMAN danışmanlığında, Esmâ GAVGALI tarafından hazırlanan bu çalışma 10/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr.Mustafa YAMAN

İmza :

Üye : Prof.Dr.Ömer GÜNDOĞDU

İmza :

Üye : Doç.Dr. Salih AKPINAR

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **1605/2019** tarih ve ..**21**.../.**28**... .. nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

CAM FİBER / SENTETİK KÖPÜK / POLİMER KOMPOZİTLERİN DARBE VE BURKULMA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Esmâ GAVGALI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YAMAN

Son zamanlarda teknolojideki hızlı gelişim ile birlikte hafif, yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Özellikle kapalı hücre yapılı sentetik köpükler, imalat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Sentetik köpükler, belirli hacim oranlarında mikro balon, epoksi ve reçinenin karışımıyla elde edilen polimer yapılarıdır. Bu kompozitler, gemi, otomotiv, havacılık, yapı ve inşaat ürünlerinden enerji sektörüne ve savunma sanayiine kadar farklı alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle yüksek zorlamalara maruz kaldığı ağır sanayi uygulamalarında yeterince dayanımlı olmaları beklenmektedir. Bu nedenle sentetik köpüklere fiber takviyesi yapılarak yüksek mukavemet kazandırılır.

Bu çalışmada; çeşitli yoğunluklara sahip mikro balon içeren sentetik köpük yapılar, cam elyaf takviyesiyle güçlendirilerek yüksek mukavemetli kompozit malzemeler üretilmiştir. Lineer izotropik elastik özelliklere sahip bu kompozitler tabakalı ve sandviç olmak üzere iki farklı yapıda üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere burkulma ve farklı enerji seviyelerinde darbe testleri uygulanmıştır.

Darbe testleri, 30J, 60J, 90J ve 120J enerji seviyelerinde yapılmıştır ve elde edilen verilerle yutulan enerji değerleri araştırılmıştır. Mikro balon hacim oranının belli bir orana kadar artması ve mikro balon yoğunluğunun artmasıyla darbe cevabının iyileştiği elde edilmiştir. Kritik burkulma yükü, deneysel çalışmalar ile elde edilmiştir. Deneysel numuneleri aksel bası yüküne maruz bırakılarak kritik burkulma yükü belirlenmiştir. Uygulanan testler sonucunda, her katmanında 460 kg/m³ yoğunluğa sahip mikro balon türünden yüzde otuz hacim oranında kullanılarak üretilen tabakalı yapının en iyi sonuçları verdiği elde edilmiştir.

2019, 84 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mikro balon, polimer matrisli kompozit, darbe testi, burkulma analizi

ABSTRACT

MS Thesis

DETERMINATION OF IMPACT AND BUCKLING BEHAVIORS OF GLASS FIBER / SYNTHETIC FOAM / POLYMER COMPOSITES

Esmâ GAVGALI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Machine Theory and Dynamics

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa YAMAN

The need for light, high strength and rigidity in materials has increased with the rapid development in technology recently. Especially synthetic foams with closed cell structures are widely used in the manufacturing sector. Synthetic foams are polymer structures obtained by a certain ratio of mixture of micro balloon, epoxy and resin. These composites are used in different areas such as ships, automotive, aerospace, building and construction products, energy sector and defense industry. They are expected to be sufficiently strong in heavy industrial applications where they are subjected to high stresses. Therefore, synthetic foams are reinforced by fiber reinforcement.

In this study, synthetic foam structures containing various densities of micro balloons are reinforced with glass fiber reinforcement and high strength composite materials are produced. These composites with linear elastic properties are produced in two different structures as laminar and sandwich. The composite materials were subjected to buckling and low velocity impact tests at different energy levels.

Low velocity impact tests were performed at 30J, 60J, 90J and 120J energy levels and the energy values swallowed with the obtained data were investigated. It was obtained that the impact response improved as the micro balloon volume ratio increased up to a certain rate and the micro balloon density increased. Critical buckling load was obtained by critical buckling load was determined.

As a result of the tests carried out, it was obtained that the laminate structure produced by using thirty percent volume of micro balloon species having 460 kg/m³ density in each layer achieved the best results.

2019, 84 pages

Keywords: Micro balloon, polymer matrix composite, impact test, buckling analysis

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince, benden bilgi ve birikimini hiçbir zaman esirgemeyen ve bana yardımcı olan tez danışmanın Sayın Prof. Dr. Mustafa YAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında desteklerini esirgemeyen jüri üyeleri Sayın Prof. Dr. Ömer GÜNDOĞDU'ya ve Sayın Doç. Dr. Salih AKPINAR'a teze katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Tezin yazım aşamalarında ilgi ve desteğinden dolayı değerli arkadaşım Sayın Arş. Gör. K. Çağla ÇIBIKÇI'ya, değerli çalışma arkadaşlarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Engin ERBAYRAK'a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi H. Süleyman GÖKÇE'ye desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Tezin deneysel çalışma safhasında desteklerini esirgemeyen Sayın Fatih DALLI'ya ve sevgili arkadaşım Sayın Eda Sıla DOĞAN'a katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli babam Prof. Dr. Mehmet GAVGALI'ya, canım annem Ayşegül GAVGALI'ya ve sevgili kardeşlerim Esra GAVGALI BAKİ, Recep GAVGALI ve M. Berk GAVGALI'ya her zaman yanımda oldukları için saygı ve sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Esmâ GAVGALI

Mayıs, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları.....	10
2.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	13
2.4. Matris Malzemeye Göre Kompozit Malzemeler.....	14
2.4.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler	15
2.4.2. Metal matrisli kompozit malzemeler.....	18
2.4.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler.....	18
2.5. Takviye Malzemeye Göre Kompozit Malzemeler	19
2.5.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler	21
2.5.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	21
2.5.3. Tabakalı kompozit malzemeler	23
2.5.4. Karma (Hibrid) kompozit malzemeler	24
2.6. Sentetik Köpük.....	24
2.7. Mikro Balon	25
2.8. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	26
2.9. El Yatırma Yöntemi	27
2.10. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı	27
2.11. Tabakalı Kompozit Malzemedeki Düşük Hızlı Darbe	28
2.11.1. Matris hasarı	29
2.11.2. Delaminasyon.....	31
2.11.3. Fiber kırılması/kopması.....	31

2.11.4. Nüfuziyet	32
2.12. Düşük Hızlı Darbe Testleri.....	33
2.13. Aletli Ağırlık Düşürme Darbe Testi	33
2.14. Burkulma	34
2.15. Lineer Burkulma Analizi.....	35
2.16. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Burkulma Davranışı	37
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	41
3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi	43
3.2.1. Tabakalı kompozit malzemelerin üretimi.....	43
3.2.2. Sandviç yapılı kompozit malzemelerin üretimi.....	46
3.2.3. Numunelerin hazırlanması	48
3.3. Darbe Testi	49
3.4. Burkulma Testi	50
3.5. Malzeme Özelliklerinin Hesaplanması	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	53
4.1. Darbe Deneyi Sonucu Bulgular.....	53
4.1.1. Tabakalı numunelerin enerji-zaman grafikleri	54
4.1.2. Sandviç numunelerin enerji-zaman grafikleri	59
4.1.3. Karşılaştırma ve regresyon analizi	63
4.1.4. Darbe deneyi sonrası numune görüntüleri.....	66
4.2. Burkulma Deneyi Sonucu Bulgular	68
4.2.1. Tabakalı numunelerin deneysel sonuçları	68
4.2.2. Sandviç numunelerin deneysel sonuçları	70
5. SONUÇ	74
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	80
EK 1.	80
EK 2.	82
EK 3.	84
ÖZGEÇMİŞ	85

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

d	:Vurucu ucun çapı
E	:Elastisite modülü
E_b	:Mikro balonun elastisite modülü
E_m	:Reçinenin elastisite modülü
E_s	:Sentetik köpüğün elastisite modülü
G_s	:Sentetik köpüğün kayma modülü
I	:Atalet momenti
K	:Kompozit yapının katmanı
L	:Uzunluk
P_{cr}	:Kritik burkulma yükü
S	:Sandviç kompozit yapı
t	:Plaka kalınlığı
T	:Tabakalı kompozit yapı
V_m	:Mikro balonun hacim oranı
w	:Genişlik
γ	:Kırılma enerjisi
η	:Yarıçap oranı
ν_b	:Mikro balonun Poisson oranı
ν_m	:Reçinenin Poisson oranı
ν_s	:Sentetik köpüğün Poisson oranı
π	:Pi sayısı
σ_e	:Eğme gerilmesi

Kısaltmalar

CFRP	:Karbon fiber takviyeli polimer
CTP	:Cam takviyeli polimer
FEM	:Sonlu elemanlar yöntemi
MB	:Mikro balon
PET	:Polietilen tereftalat
PUR	:Poliüretan
PVC	:Polivinil klorür
SI	:Uluslararası Birim Sistemi
TETA	:Triethylenetetramine

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin bileşenleri.....	14
Şekil 2.2. Matris malzemeye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	15
Şekil 2.3. Takviye elemana göre kompozit malzemelerin sınıflandırması.....	20
Şekil 2.4. Yapı bileşenlerinin gösterimi.....	20
Şekil 2.5. Sentetik köpük yapısı.....	25
Şekil 2.6. El yatırma yöntemi	27
Şekil 2.7. Darbe sonrası kompozit malzemede oluşan hasarlar.....	29
Şekil 2.8. Matris çatlaklarının gösterimi a)çekme çatlağı, b)kayma çatlağı	30
Şekil 2.9. Matris hasarları a) hasarın çam ağacı şeklinde gösterimi, b) hasarın ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde gösterimi.....	30
Şekil 2.10. Aletli ağırlık düşürme test cihazı.....	34
Şekil 2.11. Bası altında denge durumu	36
Şekil 2.12. Bası altında mod şekillerinin gösterimi	37
Şekil 3.1. Darbe testi için numune tasarımının gösterimi.....	40
Şekil 3.2. Burkulma testi için numune tasarımının gösterimi.....	40
Şekil 3.3. Mikro balon gösterimi	41
Şekil 3.4. Mikro balon, epoksi, sertleştirici, cam fiber ve yapıştırıcı gösterimi	42
Şekil 3.5. Fırınlanan tabakalı numune gösterimi	46
Şekil 3.6. Tabakalı ve sandviç yapıları darbe numunelerinin yan ve üst görünümü	48
Şekil 3.7. Sandviç ve tabakalı yapıları burkulma numunelerinin yan ve üst görünümü.....	48
Şekil 3.8. Kesme cihazı.....	49
Şekil 3.9. Darbe test cihazı	49
Şekil 3.10. Çekme-basma test cihazı	50
Şekil 3.11. Yükleme durumu	51
Şekil 4.1. Enerji-zaman grafiğı	54
Şekil 4.2. Enerji-zaman grafikleri a) T1, b) T2, c) T3, d) T4	55
Şekil 4.3. Enerji-zaman grafikleri a) T5, b) T6, c) T7, d) T8	56
Şekil 4.4. Enerji-zaman grafikleri a) T9, b) T10.....	57

Şekil 4.5. Enerji-zaman grafikleri a) T11, b) T12.....	57
Şekil 4.6. T13 numunesine ait enerji-zaman grafiği	59
Şekil 4.7. Enerji-zaman grafikleri a) S1, b) S2, c) S3, d) S4	60
Şekil 4.8. Enerji-zaman grafikleri a) S5, b) S6, c) S7, d) S8	61
Şekil 4.9. Enerji-zaman grafikleri a) S9, b) S10	62
Şekil 4.10. Enerji-zaman grafikleri a) S11, d) S12	62
Şekil 4.11. S13 numunesine ait enerji-zaman grafiği	63
Şekil 4.12. Hacim oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi	64
Şekil 4.13. Hacim oranının göreceli absorbe edilen enerjiye etkisi.....	64
Şekil 4.14. MB oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi	65
Şekil 4.15. Regresyon analizi.....	66
Şekil 4.16. Tabakalı kompozit numunelerin deformasyon gösterimi	69
Şekil 4.17. Tabakalı kompozit numunelerin hasar görüntüleri.....	69
Şekil 4.18. Sandviç kompozit numunelerin deformasyon gösterimi	70
Şekil 4.19. Sandviç kompozit numunelerin hasar görüntüleri	71
Şekil 4.20. Kompozit numunelerin burkulma yüklerinin karşılaştırması	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Cam fiber bileşenleri ve türleri	23
Çizelge 3.1. Mikro balon özellikleri	41
Çizelge 3.2. E-cam fiber, epoksi ve sertleştiricinin yoğunlukları ve elastisite sabitleri	42
Çizelge 3.3. Yapıştırıcı malzemenin yoğunlukları ve elastisite sabitleri.....	43
Çizelge 3.4. T1-T8 arası numunelerin katman bilgileri	44
Çizelge 3.5. T9-T13 arası numunelerin katman bilgileri	44
Çizelge 3.6. S1-S8 arası numunelerin katman bilgileri	46
Çizelge 3.7. S9-S13 arası numunelerin katman bilgileri	47
Çizelge 3.8. Sentetik köpüğün özellikleri	52
Çizelge 4.1. Kompozit numunelerin burkulma yük değerleri.....	71

1. GİRİŞ

Polimer matrisli kompozit malzemeler, gemi, enerji, havacılık, otomotiv endüstrisi gibi kullanım alanlarının yanı sıra savunma sanayi ihtiyaçlarına da karşılık vermektedir. Son yıllarda, küresel yapılı içi boş mikro balonlar (MB), matris elemanlar içerisine katılarak değerlendirilmektedir. Bu yapılar sentetik köpük olarak adlandırılmaktadır ve fiber güçlendirici takviyesi ile yüksek enerji absorbe edebilen kompozitler sınıfına girmektedir. Artan ihtiyaçlar çerçevesinde, bu malzemelere olan ilgi artmakta ve bu kompozitlerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar hızla artış göstermektedir. Cam elyaf takviyeli tabakalı ve sandviç polimer kompozit malzemelerin darbe ve burkulma davranışları üzerine pek çok çalışma yapılmıştır.

Tabakalı ve sandviç kompozit yapıların endüstriyel alanda kullanımının artması, kompozit yapıların eğilme, burkulma ve titreşim analizine uygun yeni teorilerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Literatürde kompozit yapılar için pek çok araştırma yer almaktadır. Fakat tabakalı kompozit yapılar ve sandviç kirişleri bir arada inceleyen çok az sayıda araştırma bulunmaktadır. Tabakalı kompozit yapıların ve sandviç kirişlerin eğilme, burkulma ve serbest titreşim analizi üzerine gerçekleştirilen çalışmaların literatür taraması yapılmıştır (Sayyad and Ghugal 2017).

Anderson ve Madenci (2000), düşük hızlı darbe testine tabi tutulan sandviç kompozitler ile ilgili deneysel bir araştırma yaptılar. Kompozit numuneler, yüzeyde grafit-epoksi tabakaları ve çekirdekte köpük veya bal peteği elemanlarından oluşmaktadır. Çekirdek malzemesi köpük olan numunelerde, 0.13 mm'nin üzerindeki girintilerde büyük miktarlarda hasar elde ettiler. Çekirdek malzemesi bal peteği şekline sahip numunelerde, 0.25 mm'lik girintilerde önemli miktarda iç hasar oluştuğunu rapor ettiler. Darbe enerji seviyeleri incelenmiş ve her iki tip numunenin çok az hasara uğradığı görüldü. Darbe enerjisi arttıkça, iki numune türünde de çatlaklar veya katmanların ortasından kenara kadar yırtılmalar ortaya çıkmıştır. Çarpışma bölgesinde ise yerel yıpranmadan kaynaklanan önemli hasarlar elde edildi.

Hazizan ve Cantwell (2002), düşük yoğunluklu polimer köpüklerden oluşturulan 11 adet sandviç yapının düşük hızlı darbe tepkisi üzerine araştırma yaptılar. Kırılgan çekirdek malzemeler olan PVC/PUR köpüklerde makas kırılması ve üst katmanda ezilme hataları görülmüştür. Araştırmacılar, darbe testi esnasında enerji yayılımına dayanan basit bir enerji dengesi modelinin, köpük bazlı sandviç yapıların elastik tepkisini modellemede kullanılabileceği gösterdiler. Sonuç olarak meydana gelen farklı tip hata modları, sandviç yapıların dinamik tepkisinin çekirdek malzemenin elastik özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir. Zhou *et al.* (2012), farklı katman sayılarına sahip PVC köpük numunelerin darbe cevabını incelediler. Yoğunlukları 60 ile 220 kg/m³ arasında değişen PVC köpüklerin delinme dirençlerinin yoğunlukta artışıyla doğru orantılı olarak arttığı tespit ettiler.

Schubel *et al.* (2005), karbon-epoksi yüzey tabakaları ve köpük çekirdek elemandan oluşan sandviç yapı kompozit numunelere düşük hızlı darbe testi uyguladılar. Düşük hızlı test sonrası numuneler üzerindeki hasar boyutunu incelediler. Deneysel sonuçları sonlu elemanlar modeli ve analitik sonuçlarla kıyaslanarak, yaklaşık aynı sonuçların elde edildiğini bildirdiler. Wang *et al.* (2013), karbon fiber yüzey tabakalı ve köpük çekirdekli sandviç panellerin düşük hızlı darbe davranışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemişler ve çeşitli darbe enerjilerinde test sonuçları ile nümerik sonuçların eşleştiğini rapor ettiler.

Potoğlu (2012), alt ve üst katmanlarındaki farklı yönlümelili fiber, çekirdek elemanda ise iki farklı malzeme (PVC, PET) kullanılarak sandviç kompozitlerin darbe davranışlarını inceledi. Farklı dizilimdeki numunelerden elde edilen bulgular ile, darbe parametrelerinin grafikleri oluşturulmuş ve elde edilen grafikler ve numunelerin darbe testi sonrası görüntüleri kıyaslanarak hasar mekanizmalarını incelemiştir.

Ataş ve Sevim (2010), çekirdek malzemesi olarak PVC köpük ve balsadan oluşan, üst ve alt katmanları ise takviye elemanlardan oluşan sandviç kompozit panellerin darbe tepkisi üzerine deneysel bir araştırma yaptılar. Numunelere, 5 J, 15 J, 30 J, 45 J ve 75 J darbe enerjilerinde bir dizi test gerçekleştirdiler. Darbe testi sonrasında numunelerin uğradığı hasarlar incelendi. Gözlemlenen başlıca hasarlar, üst ve alt katmanlarda lif ayrılmaları,

cam-epoksi katmanları arasında delaminasyonlar, çekirdek kırılmaları ve dış katman-çekirdek bağlantıları arasındaki kırılmalardır.

Bir diğer çalışmada, Kara (2006), E cam-epoksi tabakalı kompozit malzemelerin dinamik cevabı üzerine çalıştı. 180x50 mm, 180x100 mm ve 180x150 mm olmak üzere üç farklı boyutta üretilen numunelere, 2.0 m/s, 2.5 m/s ve 3.0 m/s olmak üzere üç farklı hızda düşük hızlı darbe testi yaptı. Tabakalar $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ şeklinde tek yönlü takviye eleman ile güçlendirilmiştir. Darbe testi sonrası numunedeki hasar incelendi. Darbe enerjisindeki artış ile beraber absorbe edilen enerji miktarının toplam enerji miktarına oranının arttığını elde etmiştir. Ayrıca numunelerdeki hasar alanının temas yüzeyinde oluşan alandan daha az olduğunu gözlemlemiştir.

Li ve Muthyala (2008), hibrit ızgaradan oluşan yeni bir sandviç kompozitin üretimi, numunelerin test edilmesi ve modellenmesi üzerine çalıştılar. Hibrit tabakalı yapılu hücreler, sürekli fiber takviyeli ve köpükle doldurulmuş polimer orto-ızgara yapıdan oluşmaktadır. Sandviç yapının darbe cevabı ve mukavemetini gözlemek için numunelere düşük hızlı darbe ve darbe sonrası bası testleri uyguladılar. Üretilen çekirdeğin enerji emilimini güçlendirdiği ve daha mukavim bir kompozit yapının elde edildiğini rapor ettiler.

Bir diğer çalışmada, E-camı-epoksi kompozit levhalar düşük hızlı darbeye maruz bırakılarak darbe cevabı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Kompozit numune boyutları 140x140x3 mm olup, 16 tabakalı ve $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_s$ oryantasyon dizilişine sahiptir. Numuneler dört tarafı ankastre olacak şekilde cihaza yerleştirilerek, 2 m/s, 2.5 m/s, 3 m/s, 3.5 m/s ve 4 m/s olmak üzere beş farklı hızda testler yaptılar. Sonlu elemanlar analizi sonucunda, darbenin elastik davranış sergilediği, darbe hızının artmasıyla beraber geri sekme hızının, yer değiştirme eğrisinin ve en büyük temas kuvvetinin arttığı sonuçları elde edilmiştir (Yapıcı ve Yapıcı 2012).

Özdemir (2012), tez çalışmasında sandviç plakalarda çekirdek malzemesinin ve çekirdek kalınlığının düşük hızlı darbe cevabına etkisini araştırmıştır. Çekirdek malzeme, üç farklı

kalınlıkta, aynı yoğunluklarda PVC ve PET köpük malzemelerden oluşmaktadır. 100x100 mm boyutlarında üretilen numunelere 10 J ile 70 J arasında 8 farklı enerji seviyesinde darbe testi yapmış ve sonuçlarını incelemiştir. Darbe testinde, çekirdek kalınlığının ve malzemesinin, absorbe edilen enerji miktarına önemli etkisi olduğunu elde etmiştir. Çekirdek kalınlığı arttıkça darbe enerjisinin azaldığını, azaldıkça darbe enerjisinin arttığını elde etmiştir. Ayrıca çekirdek kalınlığı arttıkça, numunelerin daha elastik davranış gösterdiği ve bu nedenle maksimum temas kuvveti değeri azalırken temas süresi ve maksimum sapma değerinin arttığını bildirmiştir.

Başka bir çalışmada, düşük hız etkisine maruz kalan sandviç kompozit levhalarda, çekirdek malzemenin ve katman kalınlığının darbe davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çekirdek yapı, yaklaşık 65 kg/m^3 ve 60 kg/m^3 yoğunluğa sahip ve 5 mm, 10 mm ve 15 mm kalınlıklarda köpük malzemelerden üretilmiştir. Sandviç kompozitlerin oryantasyon sırası $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/\text{çekirdek}/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ]$ ve boyutları 100x100 mm'dir. Oda sıcaklığında uygulanan darbe deneylerinde 10 J ile 70 J arasında değişen darbe enerjileri uygulanmıştır. Darbe testleri sonucunda, maksimum temas süresi ve maksimum temas kuvveti incelenerek absorbe edilen darbe enerjisi tespit edilmiştir. Sonuç olarak, çekirdek malzemenin ve numune kalınlığının, sandviç kompozit plakaların darbe davranışı üzerinde etkileri olduğu görülmüştür. Aynı kalınlıktaki her köpük malzeme için çarpma enerjisiyle doğru orantılı olarak çarpma hasarı alanının artış gösterdiği sonucu elde edilmiştir (Özdemir vd 2014).

Xiong *et al.* (2012), piramit kafes şeklinde karbon fiber kompozit sandviç panellerin hasar mekanizmalarını ve enerji emme kapasitelerini ölçmek için düşük hızlı darbe ve bası testleri yaptılar. Farklı yoğunluklara sahip hacimce 3 farklı çekirdekten oluşan sandviç paneller ürettir. Yarı statik bası altında, burkulmalar ve kırılmalar nedeniyle kafes tabakaların bütünüyle hasara uğradığı sonucu elde ettiler. Darbe testlerinde ise, düşük hız etkisinden kaynaklanan hasar modlarını incelediler. Cam fiber kafes kirişleri ile karşılaştırıldığında, karbon fiber piramit kafes kirişlerin yüksek enerji emme kapasitesine sahip olduğunu elde ettiler.

Woldsenbet (2008), cam MB ve epoksi matrizen oluşan düşük yoğunluklu sentetik köpüğün içine hacimce %1 nano kilin karıştırılmasıyla oluşan kompozit numunelerin darbe cevabını inceledi. MB'un yarıçap oranının darbe cevabını incelemek üzere, yoğunlukları 220 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 olan iki tip MB kullandı. Darbe testi için üretilen numune boyutları, $100 \times 100 \times 13 \text{ mm}$ 'dir. Üç farklı hızda darbe testi yapıldıktan sonra, SEM görüntüleri incelendi. Sonuçlar, nano kil katkısıyla mikro çatlakların makro çatlığa dönüşmediğini gösterdi. Ayrıca MB yoğunluğunda önemli bir artış olmadan da yüksek özelliklerin elde edilebileceği sonucuna ulaşıldığını bildirdi.

Karimpour Reyhan (2015), çalışmasında, çeşitli dolgu malzemeleri (balsa, bal peteği, poliüretan köpük ve sentetik köpük) kullanarak ürettiği numunelere titreşim ve darbe testi yaptı. Deneysel ve nümerik hesaplamalardan elde edilen sonuç ve grafikleri kıyaslayarak numune özelliklerini araştırdı. Sentetik köpükler ile üretilen numunelerin, darbe direncinin en yüksek olduğu ve delinmenin 120 J enerjide gerçekleştiğini bildirdi. Sırasıyla poliüretan köpük, balsa ve bal petek kullanıldığında ise delinmenin 75 J, 60 J ve 30 J darbe enerjisinde gerçekleştiğini gözlemledi.

Pham *et al.* (2018), tek fazlı yeni bir sentetik köpüğün darbe cevabını deneysel olarak incelediler. Sentetik köpük bileşeni, 172 kg/m^3 ila 366 kg/m^3 arasında değişen farklı yoğunluklara sahiptir. Hasarın malzeme yoğunluğundan ve darbe hızından olduğu tespit edildi. Darbe enerjisinin emilim kapasitesinin, makro içi boş kürelerin duvar kalınlığı ve yoğunluğundan etkilendiğini elde ettiler.

İçten vd (2007), cam lifi takviyeli epoksi kompozitlerde tabaka sıralanışının darbe davranışına etkilerini incelediler. Kullanılan fiber yoğunluğu ve tabaka sayısı aynı olup, tabaka yönlendirmeleri $[90/0]_6$, $[30/0]_6$ ve $[15/0]_6$ şeklindedir. Üretilen kompozit numune boyutları, $100 \times 100 \text{ mm}$ boyutlarındadır. Deneysel çalışmalar sonucunda, maksimum enerji absorbe eden numunelerin, $[15/0]_6$ yönlendirmesine sahip numuneler olduğu tespit edildi. Tabakalar arası açı düştükçe hasarın elips şekline döndüğünü ve minimum tabaka ayrılmalarının meydana geldiği sonucuna ulaşılar.

Türkmen ve Köksal (2013), 500x500x2 mm 500x500x2,5 mm ve 500x500x3 mm boyutlarında cam elyaf katmanlı numunelere çekme, üç noktadan eğme ve düşük hızlı darbe testleri yaptılar. 10 J, 15 J ve 30 J olmak üzere üç farklı enerji seviyesinde darbe testi uygulanan numunelerin test öncesi ve sonrası görüntülerini incelediler. Elde edilen grafikler incelendiğinde katman sayısının artışıyla absorbe edilen enerji değerinde de artış olduğunu tespit ettiler.

Hassan *et al.* (2014), düşük hızlı darbe altında cam elyaf takviyeli plastik tabakaların darbe cevabını deneysel ve sayısal olarak araştırdı. Numuneler, E-cam elyaf takviyeli epoksi reçineden oluşup el yatırma işlemiyle oda sıcaklığında bir gün kurutularak üretildi. Deneysel testler, 9.8 J ile 29.4 J arasında değişen farklı darbe enerji seviyelerinde gerçekleştirildi. Numune kalınlıkları ise, 2 mm, 3 mm ve 4 mm olarak tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal sonuçlar hesaplandı. Temas süresi ve maksimum temas kuvvetine göre, simülasyon ve deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğunu gösterdiler.

Esendemir ve Caner (2018), cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelere iki farklı enerji seviyesinde darbe testi uyguladılar. Numuneler, 100x100 mm boyutlarında olup darbe test standartlarına uygun olarak üretildi. Katman kalınlığı ve katman sayısının darbe cevabına etkisini incelemek üzere iki farklı kalınlık ve sekiz ve on altı olmak üzere farklı katman sayıları kullandılar. Kuvvet-çökme eğrileri, darbe enerjisi-maksimum kuvvet eğrileri, darbe enerjisi-çökme eğrileri, hız-zaman eğrileri, kuvvet-zaman eğrileri ve absorbe edilen enerji-zaman eğrileri incelediler. Elde edilen verilere göre, 8 tabakalı kompozit numunelerde, 20 J darbe enerjisinde delinme hasarı oluşmazken, 60 J darbe enerjisinde delinme hasarı gözlemlendiler. 16 tabakalı numunelerde ise delinme hasarı oluşmadığını bildirdiler.

Heimbs *et al.* (2009), üç farklı karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) malzemenin düşük hızlı darbe davranışını ön yüklemeli ve yüklemesiz durumlarda araştırdılar. Sonuç olarak fiberin örgü boyutunun ve katman sayısının darbe davranışını etkilediğini not ettiler.

Bir diğerk çalışmada, tek eksenli yüklemeye maruz içi boş küresel parçacıkların statik ve dinamik burkulması eleştirel olarak kıyaslandı. Kullanılan mikro balon yoğunlukları 150 kg/m³ ile 460 kg/m³ arasındadır. Mikro balon duvar kalınlığının, seçilen kabuk teorilerinin tahminlerine etkisi araştırıldı. Doğrusal olmayan analize ek olarak, statik burkulma yükünü çıkarmak için basitleştirilmiş iki yaklaşım ele aldılar. Sonuç olarak; elde edilen bulguların “*Sanders-Koiter*” teorisiyle uyum sağladığını gösterdiler (Shams and Porfiri 2014).

Moita *et al.* (2015), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çok katmanlı sandviç plakaların ve kabukların burkulmasını ve doğrusal olmayan analizini incelediler. Kahya (2016), sandviç çubukların ve tabaklı kompozit yapıların burkulma ve titreşimini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etti. Emam and Nayfeh (2009), yaptıkları çalışmada farklı sınır şartlarına sahip kompozit malzemelerin serbest titreşim ve burkulma sonrası davranışlarını incelediler.

Literatür taramasında farklı hacim oranlarında cam mikro balonlar ile oluşturulan tabakalı ve sandviç yapılı kompozit malzemelerin darbe ve burkulma davranışlarını birlikte inceleyen araştırmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, burkulma ve düşük hızlı darbe cevaplarının deneysel çalışmaları incelenerek literatüre katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

Bu çalışmanın amacı; polimer kompozit malzemelerde malzeme seçimi, malzeme türü, malzeme dayanımı, uygulanan kuvvetin etkisi ve numunelerde oluşan hasarları araştırmaktır. Bu doğrultuda matris eleman olarak farklı yoğunluk ve hacim oranlarına sahip mikro balon, epoksi, sertleştirici ve güçlendirici takviye eleman olarak E tipi cam elyaf kullanılmıştır. Tabakalar, üç farklı yoğunluğa sahip MB’un farklı yüzdelik hacim oranlarında kullanılmasıyla üretilmiştir. Sentetik köpüklerden oluşan katmanlar lineer elastik izotropik davranış sergilemektedir. Fiber takviyeli bu kompozit numunelerin darbe ve burkulma davranışları incelenmiştir. Numune özellikleri ve parametreler seçilirken daha önce yapılan çalışmalar dikkate alınmış ve çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

Çalışmanın kapsamı; literatür araştırması, kompozit malzemeler ile ilgili tanımlar, üretim yöntemleri, kullanım alanları, kompozit malzemelerin tercih edilme nedenleri gibi temel konuları, tez çalışmasında kullanılan malzemeler hakkında teorik bilgileri ve deneysel uygulamaların cevaplarını içermektedir.



2. KURAMSAL TEMELLER

Kompozit malzemelerin üretimi son yıllara atıf edilse de insanlar binlerce yıl önce kompozit malzemeler üretmiş ve hatta günlük hayatlarında kullanmışlardır. Kırılgan yapılı malzemeleri, bitkisel veya hayvansal liflerle destekleyerek yeni özelliklere sahip (sünek) kompozit malzemeler elde etmişlerdir. Kerpiç kompozit malzemelerin ilk örneği olarak kabul edilebilir. Çamur, su ve saman karışımıyla elde edilen tuğlaların hem bası hem de yırtılmaya karşı dayanımı oldukça yüksektir (Yeşildal 2010).

Bir başka kompozit malzeme ise betondur. Beton; agregası (küçük taşlar veya çakıl), çimento ve kum karışımıdır. Yüksek sıkıştırma mukavemeti sayesinde ezilmeye karşı direnci yüksektir. Ayrıca metal çubuk veya tel ilavesiyle beton yapılar güçlendirilebilir (eğilme mukavemeti artırılabilir), bu durum lifli kompozitler için iyi bir örnek teşkil eder (Callister and Rethwisch 2014).

20. yüzyılın ikinci yarısında gelişen teknoloji ile doğru orantılı olarak malzeme biliminde de hızlı gelişmeler kaydedilmiştir. Ana malzeme grubunda yer alan malzemeler yeryüzünde sınırlı miktarlarda bulunmaktadır. Ayrıca bu malzemeler ileri teknoloji ürünlerinden istenen özellikleri karşılayamamış ve teknolojideki gelişmelere ayak uyduramamıştır (Onat 2015). Geleneksel malzemeler, tüm olanakları, en modern teknikleri kullanırken bile yüksek mekanik özelliklere ve daha yüksek performans parametrelerine ulaşmada yetersiz kalmaktadır. Günümüzde kullanılmakta olan malzemelere takviye elemanları ilavesi ile yeni özellikler kazandırılarak yüksek teknoloji uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılar düzeyde kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. II. Dünya savaşı sırasında mevcut konvansiyonel malzemelerin yetersiz kalması nedeniyle modern kompozit malzemelerin üretimi başlamış ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar hala devam etmektedir. İlk modern kompozitlerin, güçlendirici takviye elemanı olan cam elyafın üretimiyle birlikte de cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler mühendislik alanında önemli bir yer almıştır (Şahin 2015).

2.1. Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları

İki veya daha fazla malzemenin (takviye elemanları, yapıştırıcılar ve dolgu maddeleri) makro, mikro veya nano düzeyde birleşimiyle oluşan ve daha iyi özelliklere sahip çok fazlı malzemeler “Kompozit Malzeme” olarak tanımlanır. Tek bir malzemede toplanamayan özellikleri, birbiri içerisinde çözünemeyen farklı malzemelerin karıştırılmasıyla, kullanım alanlarına uygun özelliklerin tek bir malzeme grubunda (kompozitlerde) toplanması ve her malzemenin tek başına sahip olduğu zayıflıkların giderilmesi amaçlanmaktadır. Ancak bazı özelliklerin kötüleşeceği de göz ardı edilmemelidir. Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre yoğunluğu çok daha düşük, mukavemeti yüksek, daha rijit, yüksek ısı dayanımı, yüksek kimyasal direnç ve kolay işlenebilirlik özellikleri göstermektedirler (Özdemir 2012; Türkmen ve Köksal 2013).

Mühendis ve tasarımcıların kompozit yapıları tercih etmelerindeki en önemli parametre, geleneksel malzemelerin aksine değişik performans özellikleri sunmasıdır. Kompozit malzemeler, imal edilecek parçadan beklenen çekme, eğilme, darbe, burkulma ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklere göre tasarlanmaktadır. Geleneksel malzemelere göre daha dayanımlı ve daha hafif oldukları için enerji tasarrufu, uzun kullanım ömrü ve verimlilik gibi avantajlar sağlamaktadırlar (Koruvatan 2008; Şahin 2015).

Kompozitlerin kullanım alanları:

Kompozitlerin kullanım alanları günümüzde giderek artmaktadır ve yeni geliştirilen üretim yöntemleri ile savunma sanayinden sağlığa kadar pek çok alanda öncelikli alanlar sınıfında yer almaktadır. Bir nevi kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Yalnız kompozit malzeme üretiminde; üretilen parçadan beklenen özellikler, parçanın hangi alanda kullanılacağı, çevresel faktörler ve üretim yöntemi gibi etkenler dikkate alınmalıdır.

Havacılık, Uzay ve Savunma Sanayinde: Yüksek özgül mukavemeti ve elastiklik modülüne sahip olması, düşük yoğunluğu nedeniyle yakıt tasarrufu sağlaması sayesinde

havacılık, uzay ve savunma sanayinde tercih edilen malzeme grubu arasına girmiştir. Özellikle düşük özgül mukavemetli olması, metalik malzemelere göre kompozitlere önemli bir avantaj sağlamıştır (Yeşildal 2010).

Deniz Taşımacılığı: Deniz endüstrisinde malzemelerden beklenen başlıca özellikler arasında iyi korozyon direnci, daha hızlı hareket edebilme özelliği ve hafiflik gelmektedir. CTP/Balsa ve CTP/PVC köpük sandviçler, karbon elyaf takviyeli kompozit, aramid ve cam elyaf takviyeli kompozitler yat gövdesi imalatında kullanılmaktadır (Türkmen ve Durmuş 2013).

Otomotiv Sektöründe: Otomotiv sanayinde kullanılan kompozit malzemelerden beklenen en önemli iki kriter, yakıt tasarrufu sağlaması ve emniyetli olmasıdır. Bu yüzden hafif ve mukavemetli olmaları beklenmektedir. Günümüzde kompozit malzemeler otomotiv sektöründe; pedallar, far gövdesi, filtre kutusu, otomobil kaportası, cam sileceği gibi çok geniş kullanım alanına sahiptir (Kıratlı 2012; Baş 2015).

Ulaşım Sektöründe: Araç iskeletlerinde ağırlıkça hafif olan kompozitler enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca ulaşım sektöründe özellikle trenlerde, bazı parçalar sürekli hasar görmekte ve değiştirmek zorunda kalınmaktadır. Bu gibi durumlarda kompozit malzemelerin düşük maliyeti avantaj sağlamaktadır. Araç ekipmanlarının çoğunda özellikle kaporta, kabin ve koltuk imalatında tercih edilmektedirler (Onat 2015).

İnşaat Sektörü: Kompozit malzemelerin, bina cephe korumaları, otobüs durakları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları gibi pek çok alanda uygulama alanları vardır. Esnek tasarım yöntemleri, nakliye ve montaj kolaylığı kompozitlere büyük avantajlar sağlamaktadır (Yeşildal 2010).

Diğer Sektörler: Sağlık, tarım, müzik aletleri, lunapark ekipmanları, elektrik ve ısı sektörleri gibi daha birçok endüstriyel alanda kullanımını hızla artmaktadır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler çoğu zaman modern uygulamalar için yüksek kaliteli malzemeler olarak kabul edilmektedir. Mevcut malzemelere yeni özellikler kazandırmak için üretilen kompozit malzemelerin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Malzemenin sahip olduğu olumsuz etkiler, kompozit malzemelere de yansımaktadır. Ayrıca avantaj olarak gösterilen özellikler her zaman avantaj olarak kabul edilmemelidir. Örneğin, belli bir konumda sabitlenmesi gerekmeyen ve kendi ağırlığı ile istenilen şekilde yüklenmeyen parçaların tasarımında hafiflik istenmeyebilir.

Bir ürünün maliyeti ve sürdürülebilirliği, yaşam döngüsü boyunca dikkate alınmalıdır. Örneğin, bir ürünün uzun ömürlü olması veya bakım maliyetlerinin azaltılması için kalıbının yüksek maliyetli olması gerekebilir. Bu gibi durumlarda üretimin maliyetinin artırılması toplam maliyeti azaltabilir.

Avantajları:

Çoğunlukla tek başlarına elde edilemeyen, farklı malzemelerin iyi özelliklerinin uygun matris ve takviye elemanı ile bir araya getirilmesiyle çeşitli avantajlar bir malzeme üzerinde toplanabilir. İstenilen özelliği elde etmek için; matris-takviye elemanı uyumu, üretim yöntemi, yapıştırma tekniği gibi faktörlere dikkat etmek gerekir (Şahin 2015).

- Yüksek mekanik özellikler,
- Tasarım (biçim, malzeme) seçeneklerinin esnekliği,
- Üretim kolaylığı,
- Düşük maliyet,
- Ağırlık tasarrufu,
- Korozyon dayanımı,
- Darbe dayanımı,
- Yüksek ısı dayanımı,
- Mükemmel yorulma dayanımı,

- Titreşim sönümleme,
- Kolay ve kalıcı renklendirilebilirlik (Yiğit 2010; Onat 2015).

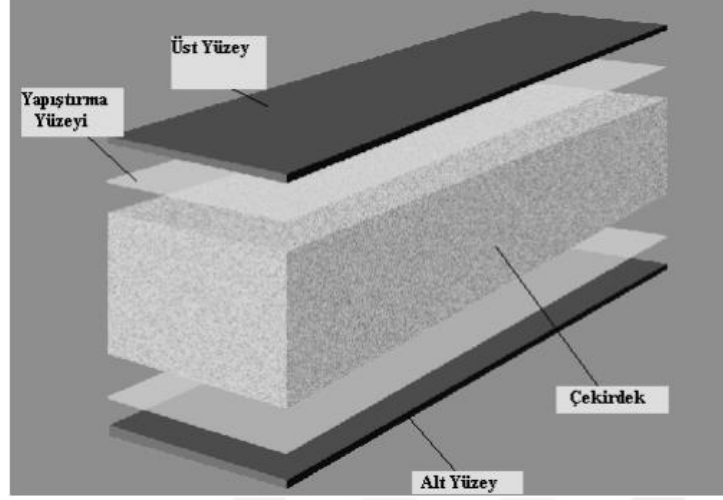
Dezavantajları:

Kompozit malzemelerin dezavantajlarını gidermek amacıyla yapılan çalışmalar başarılı sonuçlanırsa, metalik malzemelerden daha çok tercih edilen malzeme gurubu olacaktır.

- Yüksek malzeme maliyeti,
- Yüksek imalat maliyeti,
- Bazı kompozit malzemelerde üretim yönteminin metallere nazaran zor olması,
- Geri dönüşüm zorluğu,
- Kısıtlı raf ömrü,
- Sıcaklık sınırlamaları (Sezen vd 2015; Nijssen 2015).

2.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler; takviye elemanı ve bunun etrafında hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan malzemeden oluşmaktadır, bunlar sırasıyla takviye ve matris eleman olarak adlandırılır (Şekil 2.1) (Tortoç 2009). Matris eleman plastik deformasyon esnasında oluşan çatlak ve kopmaları önlerken, takviye eleman da mukavemet ve yük taşıma özelliklerini sağlamaktadır (Onat 2015).



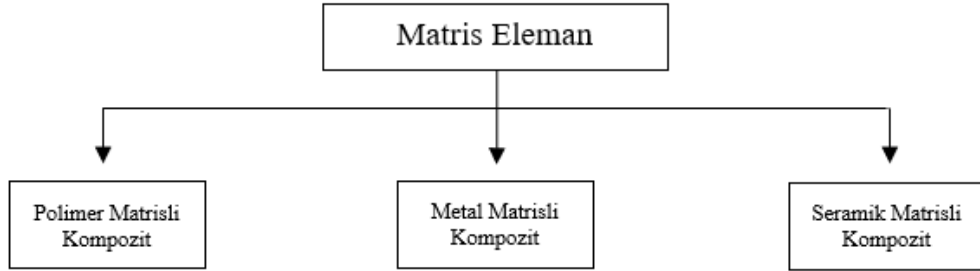
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerin bileşenleri

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kesin sınırlar çizilememekle birlikte matrisi oluşturan malzemeye ve takviye elemanının cinsine göre olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Matris malzemesine göre; metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler olmak üzere üç grup altında sınıflandırılır. Takviye elemana göre ise; parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Son zamanlarda birçok metal esaslı parçanın yerini alan ve metalik malzemelerin sahip olduğu tüm özellikleri üzerinde toplayan polimer matrisli mühendislik kompozitler geliştirilmekte olup, bunların pek yakın gelecekte ayrı bir başlık altında yer alacağı düşünülmektedir (Demirel 2007).

2.4. Matris Malzemeye Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde ana fazı matris oluşturmaktadır. Bal peteği, açık veya kapalı hücre biçiminde olabilen matris elemanı, kompozit malzeme içerisinde üç temel ihtiyaca cevap verir. Bunlar, takviye elemanları (fiber) bir arada tutmak, malzemenin maruz kaldığı yükü fibere iletme ve çevresel etkilere karşı malzemeyi korumaktır. Bu sayede fiberlerde oluşacak kopma ve çatlakları minimum seviyeye indirerek tokluğu artırır. Kısaca matris, bir bağlayıcı olarak görev yapmaktadır. Yoğunluğu, rijitliği ve mukavemeti fibere göre daha düşük olan matris elemanı, fiber takviyesiyle güçlendirilir.

Kompozit malzemenin üretim yöntemi ve kullanım alanına göre polimer, metal ve seramik matrisli malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.2) (Metin 2008).



Şekil 2.2. Matris malzemeye göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.4.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Günümüzde kompozit malzeme grubunda kullanılan malzemelerin başında polimer esaslı kompozit malzemeler gelir diyebiliriz. Karmaşık ve büyük parçaların üretim kolaylığı, ucuz oluşu ve üstün dayanım performansı başlıca tercih edilme sebebi olarak gösterilebilir (Sönmez 2009). Matris fazında genellikle plastik esaslı malzemeler kullanıldığı için “Takviye Edilmiş Plastikler” olarak da adlandırılmaktadır. Polimerler, örneğin ısı veya basınç ile şekillendirilebilen makro-moleküler bileşiklere dayalı malzemelerdir. Matris malzemesinin yaklaşık %90’ını polimer esaslı malzemelerin oluşturduğu ve çeşitli (doğal veya sentetik) takviye elemanları ile güçlendirilen polimer matrisli kompozitler; havacılık sektöründen otomotiv sektörüne kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Polimer esaslı matrisin genellikle fiber formunda sert, dayanımı yüksek takviye elemanları ile güçlendirilmesi ile elde edilen ve "fiberglas" olarak adlandırılan bu tür kompozitler, polyester esaslı matris reçinelerin cam fiberlerle takviye edilmesiyle üretilen malzemelerdir (Demirel 2007). İlerleyen kısımlarda polimer matrisli kompozit malzemelerin yapısını oluşturan matris ve takviye elemanı ayrı ayrı incelenecektir.

Matrislerin, dış etkenlere karşı yeterli mekanik özelliklere sahip olması (yüksek mukavemet ve mekanik özellikler (sertlik, dayanım) beklenir. Matris malzemenin

beklenen özelliklerin başında sertlik gelir ancak bu durumda malzeme gevrek davranış sergiler, bu gevrekleşme malzemenin işlevselliğini yok etmemelidir. Polimer esaslı malzemeler bu isteklere cevap verecek ölçüde iç yapılarına göre elastomer, termoset ve termoplastikler olmak üzere üç ana grup altında toplanabilir (Onat 2015).

Termoplastik:

Termoplastik malzemeler, genellikle sünek ve termoset malzemelere göre sertliği daha yüksek malzemelerdir (Baş 2015). Termosetlerin aksine birçok kez eritilebilirler. Bu özellik hem onarımı mümkün kılar hem de ekonomiklik sağlar (Demirel 2007; Karaaslan 2007).

Oda sıcaklığındaki katılar, ısıtıldığında yumuşar ve sıcaklık arttıkça da viskozitesi düşer, soğutulduğunda ise bunun tersine sertleşirler. Sıvılaşma sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda viskoziteleri yüksektir. Bu sebeple ara yüzeyde oluşan bağlar termosetlere göre daha zor oluşur. Buna rağmen kolayca şekillendirilebildikleri için bunların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır (Şahin 2015).

Elastomer:

Viskoz ve elastik yapıda olup termoplastiklerin bir alt üyesidir, sentetik polimer üretiminin yaklaşık %30'unu termoset ve elastomerler oluşturmaktadır. Moleküler yapıda termoplastiklerden farklıdır, yapıları C, H, O, S, F veya Cl gibi elementlerden oluşur ve az da olsa belirli bölgelerde doymamış "C" içeren çapraz bağlar mevcuttur. Bu nedenle birim şekil değiştirme kabiliyeti yüksek ve %1000'e kadar uzama kapasitesine sahiptirler. Mekanik zorlanmalar karşısında çapraz bağlar zorlanma yönünde açılarak yeniden istiflenir. Dış kuvvet ortadan kalktığında zincirler ilk boyutlarına geri dönerler. Doğal ve sentetik kauçuklar, elastomerlerin en büyük temsilcisidir (Şahin 2015).

Termoset:

Tercih edilen en yaygın matris eleman termosetlerdir. Kullanım öncesi sertleşmelerinin önlenmesi açısından dondurulmuş olarak muhafaza edilmesi gerekmektedir. Termoset plastik yapılar sıvı halde olup, ısıtıldığında sertleşir (katılaştır) ve son şeklini sonsuza kadar korurlar. Polimerleşme ve olgunlaşma sırasında şekillendirilebilir, ve daha sonra tekrar şekillendirilemezler, bu yüzden geri dönüşümleri olanaksızdır. Bu süreç tamamladıktan sonra moleküler zincirler çapraz olarak güçlü bağlarla birbirlerine bağlanırlar (Kara 2006). Polimerleşme esnasında oluşan çapraz bağlar termosetin ısı ile eritilmesini engellemektedir. Ancak, çapraz bağ sayısı düşükse, yüksek sıcaklıklarda yumuşatılabilir (Mallick 2007).

Termosetler, sertleştirici yardımıyla küçük monomer moleküllü yapının sağlam bağlar içeren polimer moleküllere dönüşmesiyle oluşur. Genellikle fiber takviyeli kompozit üretiminde kullanılırlar (Baş 2015). Isıl dayanımları, mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri termoplastiklere göre daha yüksektir. En yaygın kullanılan termoset reçineler, epoksi, polyester, vinilester ve fenoliktir (Kara 2006; Koruvatan 2008).

Epoksi Reçineler:

İleri kompozit malzemeler arasında en popüler matris eleman termoset epoksi reçinelerdir (Tenek and Argyris 1998). Epoksi reçineler, her bir molekülünde iki veya daha fazla epoksi grubunu içerirler. İstenen özellikler doğrultusunda farklı epoksi reçineler ile karıştırılabilirler (Rajendran and Viyagarangan 2001).

Epoksi reçineler; yüksek kopma mukavemeti, yüksek aşınma direnci, yüksek kimyasal direnç ve iyi sertleşebilme gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca fiberlerle birlikte kullanıldıklarında yüksek bağ mukavemeti gösterirler (Kayrak 1999). Epoksi reçineler tüm fiber takviye elemanlarıyla kullanılmaktadır. Kullanım amacı; yapının yüksek mukavemet ihtiyaçlarını karşılamasıdır. Kompozit üretim yöntemlerinin çoğunda

kullanılabilirler (CTP Teknolojisi 1985). Uzay uygulamalarında kullanılan polimer matrisli kompozitlerin yarısından fazlasında epoksi kullanılmaktadır (Kaw 2006).

2.4.2. Metal matrisli kompozit malzemeler

Matris malzemesi (ana malzeme) olarak; hafif metal (Titanyum, Alüminyum, Magnezyum vd.) ve metal alaşımlarının kullanıldığı, güçlendirici olarak; karbon, bor vd. takviye elemanlarının yapıya ilavesiyle oluşturulan kompozitlere “Metal Matrisli Kompozit” denir. Bu tip kompozit malzemelerde metallerin plastik şekil verme özelliği ile çeşitli takviye elemanlarının en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesi amaçlanmaktadır. Metal matrisli kompozitler; yüksek elastiklik modülü/yoğunluk, yüksek mukavemet/yoğunluk, yüksek korozyon ve yorulma direnci, yüksek aşınma direnci ve sertlik, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürünme oranı, düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleriyle gaz türbinlerinde, nükleer güç ekipmanlarında, uzay ve havacılık, denizcilik ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır (Demirel 2007). Korozif ortamlarda polimer kompozit malzemelere göre daha yüksek sıcaklıklara dayanabilirler.

Sürekli fiber takviyesinde zor ve karmaşık üretim yöntemleri, metallere göre sünekliğinin az olması, yüksek imalat maliyeti dezavantajları arasında yer almaktadır (Akdoğan 2008). Metal matrisli kompozit malzemelerin imalat maliyetlerinin azaltılmasıyla konvansiyonel metal malzemeleri geride bırakacağını görülmektedir (Sönmez 2009).

2.4.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramikler, genel olarak çok güçlü iyonik bağlanma ve bazı durumlarda kovalent bağlanma gösteren katı malzemeler olarak tanımlanabilir. Yüksek erime noktası, iyi korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda stabilite ve yüksek basınç dayanımı gibi özellikleri sebebiyle 1500°C'nin altındaki uygulamalar için seramik matrisli malzemeler favori kompozitler olmaktadır. Seramikler, bu önemli özelliklere sahip olmasının yanı sıra gevrek ve düşük çekme mukavemetine sahiptirler. Gevrek olmaları nedeniyle

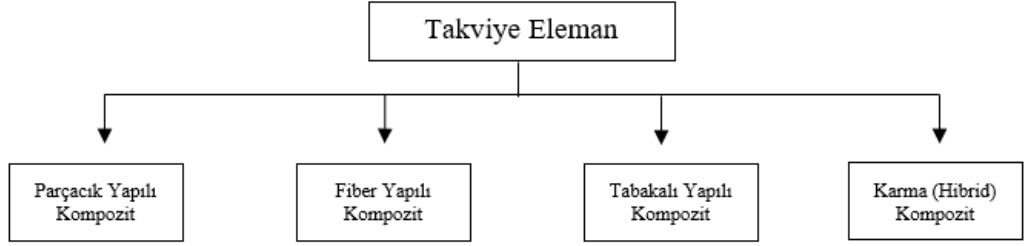
çatlaklara karşı çok hassastırlar. Tokluklarının çok düşük olması nedeniyle de uygulamada kullanım alanları çok kısıtlıdır. Seramiklerin bu özelliklerine yüksek tokluk ve yüksek süneklik özelliği kazandırmak için “Seramik Takviyeli Kompozitler” tasarlanmaktadır (Sarıtaş 1995). Seramikler, takviye malzemelerinden daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olduğu zaman elde edilen kompozitin üstün bir mukavemet seviyesine sahip olması muhtemel değildir. Bu durumda, kompozit malzemeler, soğutma esnasında seramik içinde direnç gösterir ve bu da matris içinde fiberden fibere uzanan mikro çatlaklara neden olur. Mikro kırılmalar, matrisin kırılmasından daha düşük bir gerilme değerinde gerçekleşebilir (Callister and Rethwisch 2014).

Seramik esaslı kompozitler, sürekli fiber takviyeli ve süreksiz fiber takviyeli kompozitler olmak üzere iki farklı grup altında toplanabilir. Süreksiz takviyeler; partikül, plaka, visker, fiber ve in-situ takviyeli kompozit yapıları içine almaktadır. Genellikle yekpare seramiklerin üretim yöntemleri olan enjeksiyonla kalıplama, çamur döküm, şerit döküm gibi yöntemler ile şekillendirilip daha sonra sinterlenmektedirler. Sürekli fiber takviyeli kompozitler; emdirme (buhar, sol, eriyik, vb.) yöntemleriyle hazırlanmaktadır. Seramik esaslı kompozitlerin başlıca kullanım alanları, uzay araçları ve askeri amaçla kullanılan parçalardır (Kalemtaş 2015).

2.5. Takviye Malzemeye Göre Kompozit Malzemeler

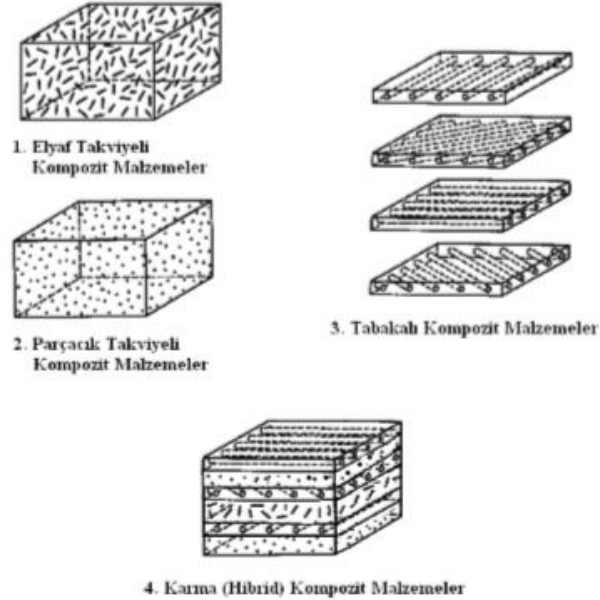
Kompozit malzemelere matris malzemesinin özelliklerini daha yüksek seviyelere getirebilmek amacıyla sert, dayanımı yüksek, aşınma direnci ve korozyon direnci yüksek malzemeler ilave edilmektedir. Bu tür malzemelere “Güçlendirici/Takviye Malzemeler” adı verilir. Metal ve plastik esaslı malzemelerle elde edilemeyen özgül dayanımı yüksek malzemeler genellikle fiber ve parçacık takviyesiyle elde edilir. Yakın geçmişte cam fiber kullanılsa da günümüzde çok farklı takviye elemanları kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak; karbon, alüminyum oksit, bor, silisyum karbür ve benzeri elemanlar gösterilebilir. Tek başlarına gevrek ve düşük yoğunluğa sahip olan bu malzemeler fiber şeklinde üretildiği zaman, yüzey pürüzsüzlüğü sayesinde fiber boyunca yüksek dayanıma sahip

olurlar. Takviye elemanın görevi; malzemenin maruz kaldığı yükü taşımak ve dayanımı artırmaktır. Matris eleman ile takviye eleman arasında fiziksel ve kimyasal uyum ne kadar iyi olursa yük fiberlere o kadar iyi dağıtılır (Şahin 2015).



Şekil 2.3. Takviye elemana göre kompozit malzemelerin sınıflandırması

Takviye elemanına göre kompozitler; parçacık takviyeli, elyaf takviyeli, tabakalı ve karma kompozitler olarak sınıflandırılır. Şekil 2.3’de takviye elemana göre sınıflandırma gösterilmiştir. Şekil 2.4’de ise yapı bileşenlerine göre gösterim verilmiştir (Koruvatan 2008).



Şekil 2.4. Yapı bileşenlerinin gösterimi

2.5.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Matris malzeme içerisine farklı bir malzemenin parçacık şeklinde ilavesiyle elde edilir. Bu tip kompozitler sıfır boyutlu kabul edilen mikroskobik partiküllerle veya tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin matris eleman içine yerleştirilmesiyle elde edilirler. Yapı içerisinde fiber hacim oranının %25'den fazla olmaması ve fiber parçacık boyutlarının 1µm'den büyük olmaması gerekmektedir. Parçacıklar, matris içinde rastgele ve dağınık halde bulunduğu için izotropik özellik sergilerler bu sayede yük; matris ve elyaf tarafından birlikte karşılanır (Şahin 2015).

Bu tip kompozitlerde mukavemet, takviye elemanın mukavemetine bağlıdır. Metal parçacık takviyeli kompozitler en yaygın kullanım alanlarıdır (Ataş 2007).

2.5.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiberler, farklı kaynaklarda lif veya elyaf olarak da adlandırılmaktadır. Genellikle kompozit malzemelerde takviye (fiber) malzemesi olarak; cam fiber, karbon fiber veya aramid fiber kullanılmaktadır. Üretim yöntemi ve ihtiyaca göre uzun sürekli fiberler veya kısa (kırpılmış) fiberler tercih edilir. Bunlar sünek ve yumuşak matris içerisine rastgele veya belirli bir düzende yerleştirilir. Yumuşak ve sünek matris içine ilave edilerek çekme dayanımı, yorulma dayanımı, rijitlik vb. gibi zayıf olan özelliklerin artışı amaçlanır. Fiberler, yüksek sıcaklık dayanımları ve yüksek elastik modülü sayesinde daha kararlı yapı oluşturmaktadır (Yıldızhan 2008; Önal 2013).

Fiberin temel görevi, malzemenin maruz kaldığı yükü taşımak ve matrisin dayanımını artırmaktır. Matris ise kuvveti fiberlere iletir ve fiberleri istenilen geometride tutar. Bu durumda fiber dayanımı kompozit malzemenin dayanımını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca fiberin uzunluk/çap oranı arttıkça fibere iletilen yük miktarı da artmaktadır. Fiberler yapı içerisinde ne kadar hatasız ve düzgün biçimde bulunursa yapının dayanımı o kadar iyi olur. Mukavemeti etkileyen bir diğer etken, fiberin matris içinde yerleşimidir. Matris içine paralel doğrultuda yerleştirilen fiberler ile dik doğrultuda yerleştirilen

fiberler karşılaştırıldığında paralel doğrultuda yüksek mukavemet sağlanmaktadır (Ataş 2007; Erkal 2015).

Cam Fiber:

Çoğunluklu olarak silis-kum (SiO_2) karışımından oluşmaktadırlar. Cam fiberler, boru tesisatları, tekneler ve basınçlı kaplar gibi geniş kullanım yelpazesine sahiptirler. Maliyet, ürün performansı, korozyon dayanımı ve kullanım kolaylığı gibi özellikleri sayesinde plastik endüstrisinde öncü takviye malzemesi olarak tercih edilirler (Karaaslan 2007).

E tipi cam fiber; rastgele veya yönlendirilmiş dağılımlı kırpıntılı (kısa) fiber ve sürekli fiber şeklinde olabilir. Reçineyi kolay emebildiği için kompozit üretiminde ki pek çok metot için elverişlidir. Nemli ortamlarda şişme, uzama, kopma ve kimyasal değişikliğe uğramazlar. E camı, iyi elektrik yalıtımı gerektiren uygulamalarda tercih edilse de dekorasyon ve yapısal ihtiyaçlar gibi pek çok uygulamada da kullanılmaktadır. S tipi cam fiber; yüksek çekme dayanımına ve elastik modülüne sahiptir. Bileşenleri ve üretim maliyeti nedeniyle E camına göre pahalıdır (Karaaslan 2007).

C tipi cam fiber; yüksek korozyon direncine sahiptir. Fakat mekanik özellikleri iyi değildir. Yüzeysel kusurları ve mikro-çatlaklar içermesi cam dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Şahin 2015). Cam fiber tiplerinin özellikleri ve yapı bileşenleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Hull and Clyne 1996).

Çizelge 2.1. Cam fiber bileşenleri ve türleri

Bileşen (%)	E-Camı	S-Camı	C-Camı
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	-
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O+K ₂ O	0.8	9.6	0.3
B ₂ O ₃	10.6	4.7	-
BaO	-	0.9	-
ρ (Mg m ⁻³)	2.6	2.49	2.48
K (W m ⁻¹ K ⁻¹)	13	13	13
α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	4.9	7.2	5.6
σ (GPa)	3.45	3.30	4.60
E (GPa)	76.0	69.0	85.5
T_{\max} (°C)	550	600	650

2.5.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler, farklı özelliklerde en az iki ve daha fazla katmanın birleştirilmesiyle oluşur. Sandviç yapıları malzemeler olarak da adlandırılırlar. Tabakalı yapının en büyük avantajı katmanların hepsi aynı olmak zorunda değildir; her bir katmanda farklı kompozit malzeme kullanılabilir (Metin 2008; Şahin 2015). Eğer katmanların hepsi aynı elemanlardan oluşuyorsa “izotropik (bütün yön ve doğrultularda aynı mekanik özellikler sergileyen malzeme)”, farklı malzemelerden oluşuyorsa “ortotropik (bütün yön ve doğrultularda farklı mekanik özelliklere sahip malzeme)” yapı olarak nitelendirilir (Demirel 2007). Katmanlar matris malzeme içerisinde farklı yönlendirilmiş fiberler, tek yönlü fiberler veya fiber takviyeli tabakalardan oluşabilir (Metin 2008; Şahin 2015).

Tabaka sayısı malzemedeki beklenen özelliklere göre belirlenebilir. Örneğin; dayanım ve mekanik özelliklerinin iyi performans göstermesi bekleniyorsa en az üç tabakadan oluşması gerekmektedir. Bu tabakalar farklı malzemelerden oluşabileceği gibi aynı malzemedeki de yapılabilir (Metin 2008; Hu 2009).

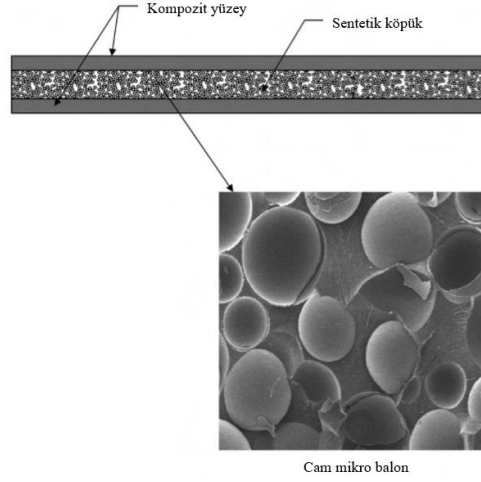
2.5.4. Karma (Hibrid) kompozit malzemeler

Kompozit malzemenin başka malzemelerle karışımıyla veya birden fazla fiberin aynı kompozit yapı içerisinde tasarlanmasıyla elde edilen yapılar “Karma Kompozit Malzemeler” olarak adlandırılır. Birden fazla malzeme grubunun sahip olduğu özellikler tek bir malzemede toplanır. Yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yüksek yorulma ömrü ve iyi korozyon direnci gibi özelliklerin malzemeye kazandırılması amaçlanır. Havacılık ve uzay, savunma ve otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılırlar. Yapısal uygulamalarda gösterdiği performans ile kullanım alanının artacağı düşünülmektedir (Kickelbick 2006; Sayer 2009).

2.6. Sentetik Köpük

Sentetik köpükler; epoksi gibi matris malzeme içerisinde seramik veya cam gibi içi boş kürelerin (mikro balon) yapılandırılmasıyla elde edilen kompozit malzemelerdir (Porfiri and Gupta 2009; Campbell 2010). Hafiflik, düşük ısı transferi, su geçirmeme ve suda batmama gibi özellikleri avantaj sağlamaktadır (Şansveren 2015). Sentetik köpükler, çeşitli yükleme koşulları altında iyi ezilme mukavemeti ve enerji emme kapasitesi özellikleriyle bilim ve mühendislik alanında ilgiyi üzerine çeken gözenekli bir malzeme türüdür (Gibson and Ashby 2003).

Sentetik köpükler, gözenekli-kapalı hücre yapısından dolayı süngere benzetilmekte ve kabarcıklı sünger olarak adlandırılmaktadır (Şansveren 2015). Epoksi matrisi içinde cam mikro balonun dağılımını gösteren sentetik köpüğün yapısı Şekil 2.5’te gösterilmiştir (Campbell 2010).



Şekil 2.5. Sentetik köpük yapısı

Deneysel çalışmalarda, malzemenin mikro yapısında bulunan matris ve mikro balonun oluşturduğu iki fiziksel faz “iki fazlı bir yapı” olarak adlandırılır. Mikro balonların sahip olduğu boşluk ayrı bir faz olarak kabul edilmemektedir. Katı parçacıklar için elde edilen deneysel teoriler içi boş parçacıklara uyarlandığında belirgin sapmaya neden olur. Aynı malzemenin katı ya da içi boş partiküllerini içeren kompozitlerin elastik modülleri farklıdır. İçi boş partiküller söz konusu olduğunda, etkili Young modülü, partiküllerin duvar kalınlığına ve daha spesifik olarak, duvar kalınlığı/partikül ebadı oranına bağlıdır. Bu nedenle, duvar kalınlığı dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla, sentetik köpüklerin mikro yapısının matris, mikro balon kabuğu ve mikro balonun içindeki hava boşluğu olmak üzere üç fazdan oluştuğu düşünülmektedir (Porfiri and Gupta 2009).

2.7. Mikro Balon

Cam mikro balonlar; çapı 1 μm ile 350 μm arasındadır. Ancak sentetik köpük dolgu malzemesinde 50 μm ile 100 μm arasında değişen mikro balonlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam mikro balonlar, kalsiyum karbonat (CaCO_3) gibi dolgu maddelerine göre 18 kat daha düşük özgül ağırlıklara sahiptir (Campbell 2010).

Seramik mikro balonlar, cam mikro balonlara nazaran daha yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptirler. Polimerik mikro balonlar ise cam veya seramiklere göre daha düşük yoğunlukludur ve daha düşük mekanik özelliklere sahiptirler (Campbell 2010).

Mikro balonların özellikleri; duvar kalınlığının artırılmasıyla daha yüksek yoğunluk kullanılarak iyileştirilebilir. Çoğu ticari uygulamada, mikro balonların paketleme yoğunluğunu arttırmak için bir boyut dayanımı gerçekleştirilir. Yüzde 60 ila 80 arasında ambalaj yoğunlukları sağlanmıştır (Campbell 2010).

2.8. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

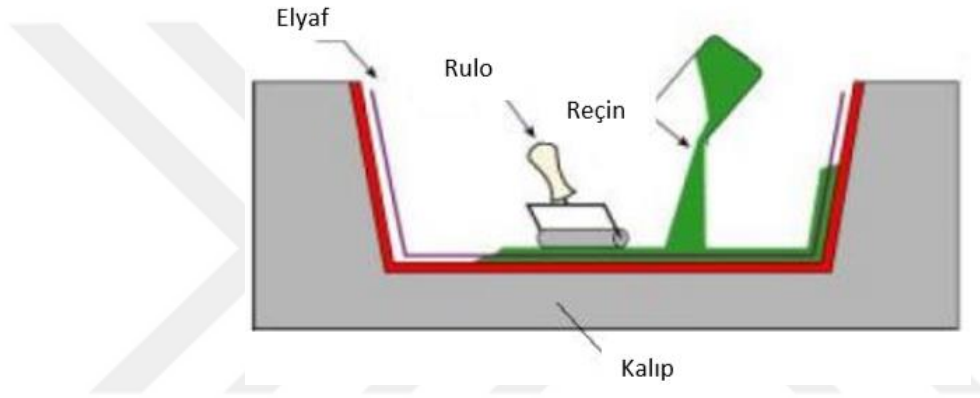
Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretimi; doğru teknikler yardımıyla ve uygun çalışma şartları altında takviye elemanının matris eleman içinde yapılandırılması ve sertleşmesidir. Bu süreç polimerizasyon olarak adlandırılır. Polimerizasyon öncesinde bağlantı elemanı olmadan bir arada bulunan elemanlar, polimer malzeme olan matris elemanının sertleşmesi ile kimyasal bağlanma gerçekleşir. Polimerizasyon sürecinde basınç, sıcaklık ve zaman en önemli parametrelerdir. İşlem esnasında fiberin matris eleman içerisinde doğru yapılandırılması ve ıslatılması gerekmektedir (Ersoy 2001; Biron 2007).

Polimer matrisli kompozit malzemelerin takviye elemanı ve matris elemanını uygun seçmek, istenilen yapıyı üretmek için yeterli değildir. Üretilen malzemeden beklenen özellikler için seçilen malzemeye ek olarak üretim yöntemi de etkilidir. Doğru üretim yöntemi, ürün boyutu, ürün sayısı şekli ve aynı zamanda hammadde arasındaki uyum da çok önemlidir, dikkat edilmemesi durumunda üründen beklenen performans elde edilemeyebilir (Sönmez 2009).

Polimer matrisli kompozit malzemelerde nihai üründen beklenen özelliklere göre pek çok üretim yöntemi mevcuttur. Açık kalıplama yöntemi ile numune üretimi en basit yöntemlerden birisidir.

2.9. El Yatırma Yöntemi

El yatırma yöntemi en basit kompozit üretim yöntemi olarak düşünülebilir. Kullanılan teçhizat ve malzemeler açısından düşük maliyetlidir. Kalıp; bir veya daha fazla parçadan oluşabilir. Takviye eleman olarak genellikle keçe veya dokuma lifler kullanılır. Epoksi olarak ise çok çeşitli kullanım alanına sahip polyesterler veya epoksiler tercih edilir (Şahin 2015). El yatırma yöntemi Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Baba 2015).



Şekil 2.6. El yatırma yöntemi

Reçine donduktan sonra parçayı kalıptan hasar görmeden çıkarabilmek için üretim işlemi başlamadan kalıba alkol, silikon gibi ayırıcı bir malzeme sürülmelidir. Daha sonra kalıp içerisine takviye eleman serilir, fırça veya rulo yardımı ile reçine ilave edilir. Takviye elemanın iyice emmesi sağlanır (Baba 2013).

2.10. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Kompozit malzemeler, mühendislik alanında bilhassa mekanik çalışma uygulamaları esnasında dışarıdan gelecek darbe yüklerine maruz kalabilirler. Malzemenin uygulama alanına göre çalışma şartlarını sağlayabilmesi ve maruz kalabileceği darbe yüklerine karşı beklenen cevabı vermesi istenir. Çeşitli darbe test cihazları yardımıyla darbe dayanımı ve darbe davranışı gibi veriler elde edilebilir (Metin 2008; Potoğlu 2012).

Darbe sonrası kompozit malzemelerde oluşan hasar, çarpışma türüne göre numunenin içyapısında veya yüklemeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir. Metal matrisli kompozit malzemelerin darbe sonrası tepkisi genellikle elastik uzama ve plastik şekil vermedir. Darbe sonrası hasar temas yüzeyinde olduğu anda kolaylıkla tespit edilebilir. Bu sebeple ani kopmalar meydana gelmez. Ancak kompozit malzemeler, metallere nazaran çok farklı hasar modlarına uğrayabilirler. Polimer matrisli kompozit malzemeler ise düşük hızlı darbeye karşı çok hassastır. Çarpışma, içyapıda gözle görülmeyen veya yapıda çok büyük hasarlara yol açabilir. İç hasar; yapının hasar mukavemetini ve çalışma ömrünü azalttığı için oldukça önemlidir. Eğer malzeme yeterince mukavemetli değilse beklenen performansı sergileyemez (Metin 2008; Potoğlu 2012).

Darbe testi; meydana gelebilecek hasarı önceden tahmin etmek, malzemenin kalıcı mukavemetini ve dinamik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır. Darbe mekaniği, çarpışma sırasında oluşan tepki kuvvetleri ve yapının bu kuvvetlere verdiği dinamik cevap ile ilgilenir (Metin 2008).

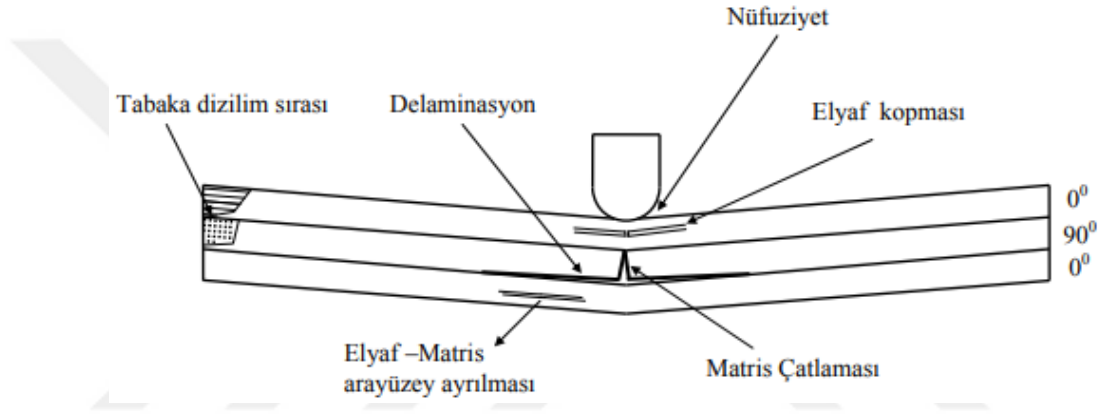
Darbe direncini inceleyebilmek için yapıya çeşitli darbe testleri (Izod ve Charpy sarkaç testi, silah testleri veya ağırlık düşürme testi) uygulanmalıdır. Darbe testleri düşük hızlı ve yüksek hızlı olarak uygulanabilir. Izod ve ağırlık düşürme testleri baz alınarak, 10m/s'nin altında gerçekleştirilen deneyler düşük hızlı darbe testi olarak adlandırılır (Cantwell and Morton 1991). Malzemenin üretimi, tamiri veya bakımı sırasında kaza sonucu bir parçanın düşmesi veya çarpması düşük hızlı darbeye örnek olarak verilebilir. Bu durumda malzeme yüksek ağırlıklı bir parçanın düşük hızlı darbesine maruz kalır ve kompozitin iç yapısında çeşitli hasar modları oluşur (Sayer 2009).

2.11. Tabakalı Kompozit Malzemedeki Düşük Hızlı Darbe

Polimer matrisli kompozit yapılar düşük hızlı darbenin sebep olduğu iç hasarlara oldukça hassastır. Tabakalı/sandviç polimer kompozit yapının darbe davranışı başlıca çarpışmanın türü, matris elamanın kalınlığı, matris malzemesi ve takviye elemanından etkilenir. Kalınlık boyunca takviye eleman yok ise, elastik özelliğin enine doğrultuda

düşük olması hasarın çoğunlukla enine doğrultuda olmasına yol açar (Metin 2008; Abrate 2011).

Düşük hızlı darbe testi polimer kompozit malzemenin absorbe edebildiği enerji miktarına göre numune yapısında farklı hasar modları oluşturur (Şekil 2.7) (Kara 2006). Bunlar; çeki-bası etkisi sonucu meydana gelen matris kırılması, tabakalar arasında ayrılma, fiber kırılması ve delinme olarak sıralanabilir (Metin 2008; Abrate 2011).

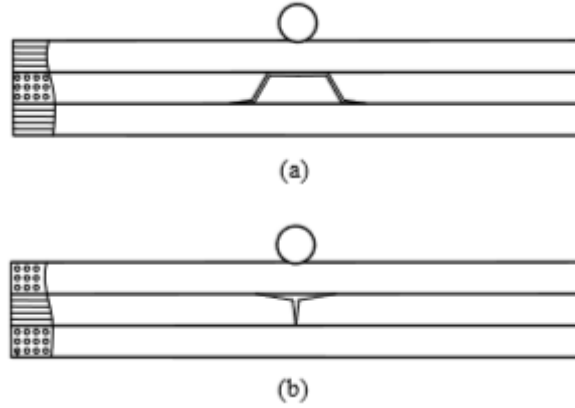


Şekil 2.7. Darbe sonrası kompozit malzemede oluşan hasarlar

Malzemenin darbe cevabı, yapının kalıcı mukavemeti hakkında bilgi edinmeyi ayrıca hasar başlangıcını ve ilerleyişini anlamak için gereklidir.

2.11.1. Matris hasarı

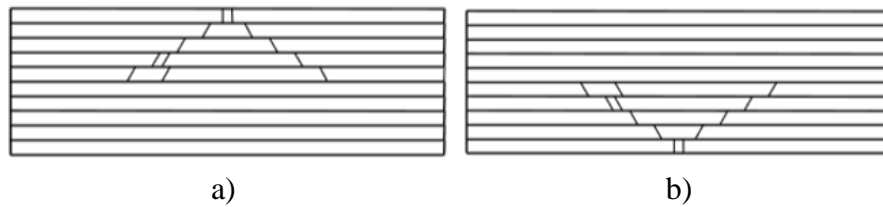
Matris hasarı; düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemede meydana gelen ilk hasardır. Düşük hızlı enerji seviyelerinde (1 ila 5 J arası) minimum hasar meydana gelir. Enine düşük hızlı darbeye maruz kalan malzemenin yüzeyinde oluşan yüksek kontak gerilmeleriyle matris çatlakları başlar ve tabaka ara yüzeylerinde ayrılmalara (delaminasyonlara) sebep olur. Matris çatlakları tek yönlü fiber tabakalarında genellikle fiber yönüne paralel düzlemlerde oluşur. Tabakalar arası ayrılmalara göre çekme ve kayma olmak üzere iki tip matris çatlağı oluşur (Metin 2008; Potoğlu 2012). Matris çatlağı oluşumu Şekil 2.8'de gösterilmiştir (Kara 2012).



Şekil 2.8. Matris çatlaklarının gösterimi a) çekme çatlakları, b) kayma çatlakları

Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin, tabakanın fibere dik yöndeki mukavemetini aşmasıyla ortaya çıkar. Kayma çatlakları ise orta düzlemde belirli bir açıda oluşur ki bu durum fibere dik yönde kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir (Sayer 2009; Kara 2012).

Kalın katmanlı kompozit malzemelerde matris hasarı, yüksek ve yerel gerilmeler sonucunda numunenin üst katmanında başlar. Hasar ilerledikçe yukarıdan aşağıya doğru çam ağacı şeklinde bir görüntü oluşur (Şekil 2.9.a). İnce katmanlı kompozitlerde ise numunenin alt katmanlarında oluşan eğilme gerilmeleri sonucunda ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde meydana gelir (Şekil 2.9.b) (Abrate 1998). Matris çatlaklarının ardından yapıda delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) başlar (Metin 2008; Potoğlu 2012).



Şekil 2.9. Matris hasarları a) hasarın çam ağacı şeklinde gösterimi, b) hasarın ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde gösterimi

Darbeye maruz kalan kompozit malzemenin matris hasarı reçinenin tokluğuna bağlıdır, fiberin özelliklerine bağlı değildir. Hasar matris çatlama ile başlar ve hasar başlangıcı

için gerekli olan enerji, büyük ölçüde matrisin mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Reçinenin bu mekanik özelliği sayesinde, malzemenin şekil değiştirme enerjisi ve çatlaklara karşı direnci iyileştirilebilir. Matris çatlağı katman ara yüzeylerine eriştiğinde tabakalar arası ayrılmalar başlar (Sayer 2009).

2.11.2. Delaminasyon

Delaminasyonlar, matris çatlamasından sonra yapıştırma bağlantısında meydana gelen hasarlardır. Yapıştırıcının darbe sonrası etkisinin azalmasıyla yapının mukavemetinde önemli derecede düşüş gözlenir, tabakalar arası ayrılmalar meydana gelir. Ancak bu ayrılmalar, aynı tabaka grubunda değil farklı fiber yönlenmelerine sahip tabakalar arasında oluşur (Kara 2012). Tabakalar arasındaki farklı fiber yönlenmeleri, tabakaların eğilme rijitliklerinde değişiklik gösterir. Delaminasyon başlangıcına sebep olan en önemli faktörlerden biri, bu eğilme rijitliklerinin farklı olması ve eğilmelerin sebep olduğu gerilmelerdir (Kıratlı 2012).

2.11.3. Fiber kırılması/kopması

Kompozit bir malzemenin üretiminde fiber kullanılması, hasar toleransının iyileştirilmesinde etkin bir role sahiptir. Fiber takviyeli bir malzeme düşünecek olursak, eşit darbe enerjilerinde, numunenin enerji emilim kabiliyetinin iyileştiği gözlemlenir. Tok bir reçine tercihi, fiber seçimi ve tabakalar arası uyumluluk ile darbe direnci yüksek kompozit malzemeler elde edilebilir (Sayer 2009).

Fiber kırılması/kopması, genellikle matris çatlaması ve delaminasyondan sonra meydana gelir, nüfuziyet oluşumunda da önemli bir rol sergilemektedir. Fiber hasarı, vurucu ucun batmasıyla oluşacağı gibi yüksek eğilme gerilmeleri sonucunda vurucu ucun altında darbe uygulanmayan yüzeyde de meydana gelebilir (Kara 2012; Potoğlu 2012). Fiber kırılması iki önemli olay sonucunda meydana gelir. Bunlar; vurucu temas ettikten hemen sonra oluşan yüksek yerel gerilmeler ve darbeye maruz kalmayan yüzeyde oluşan yüksek eğme

gerilmeleridir. Eğme gerilmelerinin olduğu arka yüzeydeki fiber kırılmasına/kopmasına sebep olan enerji eşitliği Denklem 2.1'den elde edilmektedir (Yüce 2007).

$$E = \frac{\sigma^2 w t L}{18E} \quad (2.1)$$

Burada; σ_e = eğme gerilmesi, E = elastisite modülü, w = genişlik, L = desteklenmeyen uzunluk ve t = plaka kalınlığıdır.

2.11.4. Nüfuziyet

Mikroskopik arıza modu olan nüfuziyet, elyaf hasarı kritik seviyeye ulaştığında, vurucu ucun yapıya tamamen nüfuz etmesiyle ortaya çıkar. Delme için gerekli olan darbe enerjisi eşiği yapının kalınlığı ile hızla yükselmektedir (Cantwell *et al.* 1989). Nüfuziyet esnasındaki enerji emiliminin ana formları; kesme, delaminasyon ve elastik eğilmedir. Numune kalınlığına bağlı olarak %50-60'ının "kesme" olduğu bildirilmektedir. Kesme durumunda numune üzerinde nüfuziyetin olduğu bölgeden bir parça ayrılır. Parçanın ayrılmasıyla absorbe edilen enerji, toplam absorbe enerjisinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Nüfuziyet süreci; elyaf boyutu, yönlendiği şekli, matris tipi ve ara yüzün yapışma özellikleri gibi faktörlerden etkilenmektedir. Absorbe edilen enerji miktarını hesaplamak için önerilen analitik nüfuziyet Denklem 2.2'den hesaplanmaktadır (Cantwell and Morton 1989; Abrate 2011).

$$E = \pi \gamma^2 t d \quad (2.2)$$

Burada, γ = kırılma enerjisi, d = vurucu ucun çapı ve t = plaka kalınlığıdır.

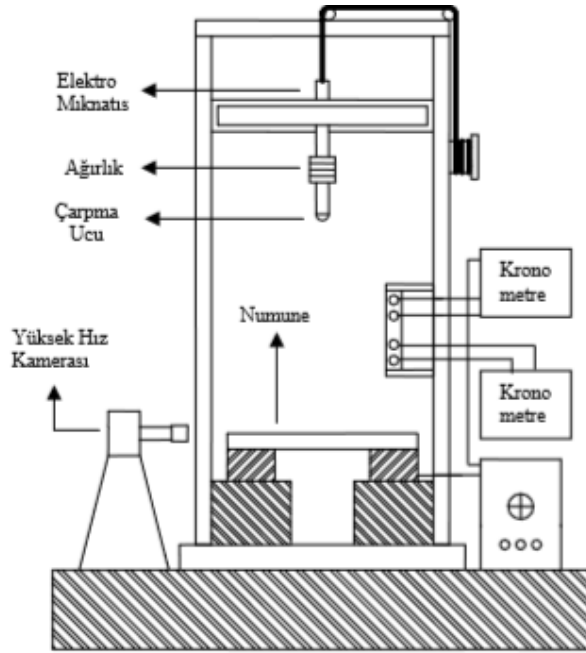
2.12. Düşük Hızlı Darbe Testleri

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe direncini karakterize etmek için, malzemelerin enine doğrultusundaki darbesiyle benzeşen sistemlerden yararlanılabilir. Kompozit malzemelerin darbe özelliklerini etkileyen faktörler arasında; test cihazı, vurucu ucun karakteristiği, vurucunun çarpma hızı ve kütlesi, numunenin cihazda konumlandırılması, numune özellikleri vb. etkenler önemli rol oynamaktadır (Metin 2008).

Malzemelerin darbe dirençlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan test yöntemleri vardır. Bunlar; sarkaç testleri, hava veya gaz silah testleri ve ağırlık testleri olarak sınıflandırılabilir.

2.13. Aletli Ağırlık Düşürme Darbe Testi

Aletli ağırlık düşürme darbe test cihazı, numune darbe dayanımını yani numune darbeye uğradığı zaman numunenin absorbe edebileceği enerji miktarını ölçmek için kullanılır. Son yıllarda aletli ağırlık düşürme testi malzemelerin dinamik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde test parametreleri daha geniş bir alanda belirlenebilir ve sonuçları analiz etmek diğer uygulamalara göre daha kolaydır. Ayrıca bu düzenek sayesinde numuneler tekrarlı darbe testlerine tabi tutulabilmektedir. Bir diğer avantajı ise, Izod ve Charpy test düzeneklerinde darbe limiti belirli iken, aletli ağırlık düşürme test metodunda vurucunun yüksekliği, numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi isteğe bağlı olarak ayarlanabilmektedir (Sayer 2009). Aletli ağırlık düşürme test cihazı Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Kara 2006).



Şekil 2.10. Aletli ağırlık düşürme test cihazı

2.14. Burkulma

Dikey yönde artan bir “P” basma yükü altında, kirişin ekseninden ayrılıp yanal yer değiştirmesine “burkulma” denir. Burkulma olayı, termal veya mekanik yüklemeler ve geometrik etkiler sonucu meydana gelir ve atalet momentinin en küçük olduğu ekseninde gerçekleşir. Burkulmaya uğrayan yapıların burkulma ve burkulma sonrası davranışı, yapıların stabilitesi ve tasarımlardaki ani başarısızlık sınırını tayin etmede yardımcı olur. Bu yüzden, burkulma olayı yapıların kararlılığında ve hasar mekanizmasında önemli bir role sahiptir (Alkeflawi 2018).

Yapı elemanlarının seçimi, dayanım, sağlamlık ve stabiliteye bağlıdır. Bası yüküne maruz kalan elemanlarda, yanal sapma veya bası dayanımının akma dayanımını aşmasıyla hasar mekanizmaları ortaya çıkabilir. Bir yapının davranışını belirlemek için malzemenin sadece mukavemetini ve sertliğini ele almak yeterli değildir. Bazı uygulamalarda stabilite önem teşkil edebilir. Son zamanlarda hafif kompozit yapı elemanları, endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bası yükü altında bir kirişin burkulması, aşırı yer değiştirmelerden kaynaklanan hasarı veya yapının denge konumundaki stabilite kaybını

göstermektedir. Bu hasarlar ani ve yıkıcı olabilir. Uygulamalarda ise hafif malzemelerden yüksek dayanım beklenmektedir. Bu sebeple, bu tür kompozit malzemelerin stabilite problemleri gitgide artan bir öneme sahip olmaktadır (Pekbey 2005).

Kararlılık, yapıların çökmeye karşı bütünlüğünü sağlamak için kontrol edilmesi gereken bir ifadedir. Katı cisimler mekaniğinde kritik bir problem olarak ele alınır ve stabilite teorisi olarak incelenir (Alkeflawi 2018). Stabilite analizi yapmak için kullanılan metotlardan biri, enerji yaklaşımıdır. Korunumlu kuvvetlere maruz kalan elastik bir sistem için, sistemin toplam potansiyel enerjisi genelleştirilmiş yer değiştirme denklemleri ve uygulanan aksenal kuvvet denklemleri ile hesaplanabilir (Pekbey 2005).

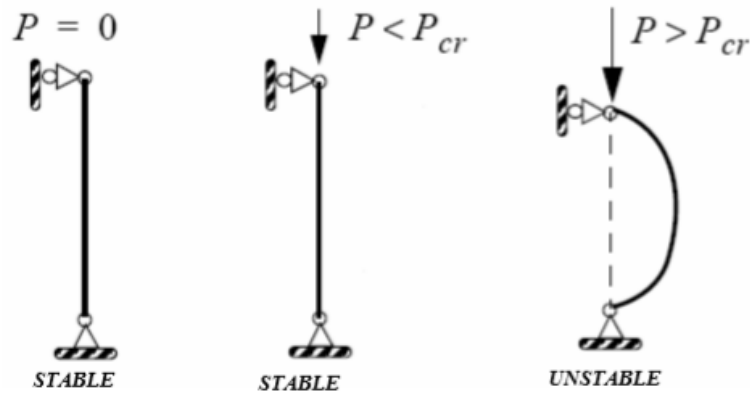
2.15. Lineer Burkulma Analizi

Euler burkulması, kullanılan malzemedeki bağımsız olarak uzun-ince bası elemanlarında meydana gelebilecek yapısal bir özelliktir. Dik yönde uygulanan “P” bası yükü arttıkça yapının çoğunda deplasmanlar kademeli olarak artış gösterir. Uygulanan yük çok büyükse, bu yer değiştirmelerde ani bir yükselme oluşabilir. Günlük hayatta, ince bir kabuğun bükülmesi, sıcak havalarda yolların çökmesi vb. örneklerine rastlanmaktadır. Diğer malzemeler için geçerli olan hesaplamalar aynı zamanda kompozitler için de geçerlidir. Sandviç kompozit yapılar, düzlemdeki basınç yüklerini absorbe edebilen yapısal elemanlar olarak çok uygundur (Nijssen 2015).

Günümüze kadar kiriş ve çubukların mekanik burkulma olayı, sistemin davranışını belirleyen fiziksel durumlar ele alınarak çeşitli modellerle incelenmiştir. Euler, bir çubuğun stabilite analizini elde etmiştir. Klasik burkulma analizi, özdeğer problemi ortaya çıkaran küçük sapmalar teoremine dayanmaktadır. Burada özdeğerler, özvektörlerle yani mod şekilleriyle birlikte bulunur. Bu özvektörlerin genliği belirli değildir. En küçük özdeğer, kritik burkulma yükü olarak adlandırılır. Bir çubuğun kritik burkulma yükü, sertliği ve uzunluğuna bağlıdır. Uzunluk arttıkça kritik burkulma yükü azalır ve yanal burkulma daha belirgin hale gelir. Kayma deformasyonunun etkisi kısa

çubuklar dışında genellikle çok küçüktür ve ihmal edilir. Euler teoremi, kesit deformasyonu olmaksızın ani yanal sapmaları içerir (Pekbey 2005).

Bir çubuğun burkulma eşiğindeyken taşıyabileceği maksimum aksel yük; klasik burkulma yükü, elastiklik modülü (E), atalet momenti (I) ve çubuğun boyuna (L) bağlıdır. Aksel bası yüküne maruz kalan çubuğun burkulma eşiğindeyken taşıyabileceği maksimum aksel yüke kritik yük denir, P_{cr} ile sembolize edilir. Dengesini koruyan sistemlerde meydana gelen tek deformasyon çubuk boyunun kısalmasıdır. Uygulanan yük kaldırıldığı zaman, çubuk orijinal denge konumuna geri dönecektir. Eğer $P > P_{cr}$ ise, yük kaldırıldığında sistem orijinal konumundan uzaklaşacaktır ve yeni bir denge konumu oluşturacaktır. Sonuç olarak, $P < P_{cr}$ durumunda sistem kararlı, aksi durumda yani $P > P_{cr}$ olduğu zaman sistem kararsızdır. Çubuğun bası altında denge durumu Şekil 2.11’de gösterilmiştir (Pekbey 2005).



Şekil 2.11. Bası altında denge durumu

Çeşitli mesnet hallerinde burkulma durumu değişiklik göstermektedir. Klasik haller veya diğer adıyla Euler halleri; bir ucu serbet diğer ucu ankastre kolon, bir ucu ankastre diğer ucu mafsallı kolon, iki ucu ankastre kolon ve iki ucu mafsallı kolon olarak sınıflandırılabilir. Biz bu çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest bir çubuk için burkulma durumunu inceleyeceğiz. Burkulma yükünün hesaplanırken, malzemenin lineer elastik bölge içinde ki davranışında Euler formülü kullanılabilir. Bir kolonun burkulma yükü hesaplanırken sağlanması gereken şartlar;

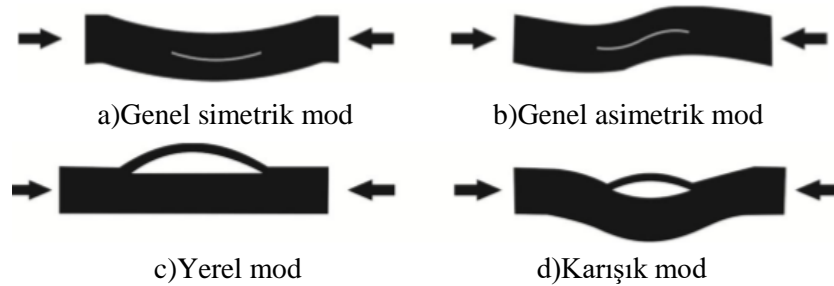
Kolon başlangıç anında doğru eksenli olmalı,
 Eğilme rijitliği uzunluk boyunca sabit olmalı,
 Malzeme lineer elastik, homojen ve izotropik yapıda olmalı,
 Yük aksenal uygulanmalı,
 Yerel burkulma meydana gelmemelidir.

Bir ucu ankastre diğer ucu serbest bir kolonun kritik burkulma yükü Denklem 2.3'de verilmiştir (Hibbeler 2011).

$$P = P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4L^2} \quad (2.3)$$

2.16. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Burkulma Davranışı

Tabakalı kompozit malzemelerle çalışırken burkulma nedeniyle oluşan hasarlar dikkate alınmalıdır. Matris çatlağı, elyaf kırılması, fiber elyaf bağlantı hasarı ve delaminasyonlar gibi tipik hasarlar meydana gelebilir. Bu hasar mekanizmaları içinde; yapı bütün olarak elastik olarak dışa doğru bükülebilir. Sadece katmanlar bükülebilir, bu durumda hasar genellikle delaminasyon hasarı ile sonuçlanır ve süreksizlik bölgesi oluşur. Yüzey ve çekirdek arasında oluşma durumunda yüzeyin bükülme direnci çekirdekten ayrı olarak meydana gelebilir. Yüzeylerden herhangi birinin burkulması, çekirdeğin yırtılmasına (dışa doğru yüzey çökmesi) veya çekirdeğin girinti hasarına (yüzeyin içe doğru bükülmesine) yol açabilir (Nijssen 2015).



Şekil 2.12. Bası altında mod şekillerinin gösterimi

Mod şekillerini etkileyen en önemli iki parametre delaminasyon uzunluğu ve kalınlığa göre konumudur. Eğer kirişin tamamı diğer sapma modlarından önce meydana gelirse bu “genel burkulma” modu olarak adlandırılır. Genel burkulma modunda, burkulma kolonun orta kısmına göre simetrik ise “simetrik”, deformasyon kıvrılma eğilimindeyse “asimetrik” genel burkulma olarak tanımlanır. Burkulma ilk olarak ince tabaka ayrılması ise “yerel burkulma” modu olarak hem genel hem yerel burkulma aynı anda oluşuyorsa “karişik burkulma” modu olarak adlandırılır. Mod şekilleri Şekil 2.12’de verilmiştir (Balcıoğlu 2012).



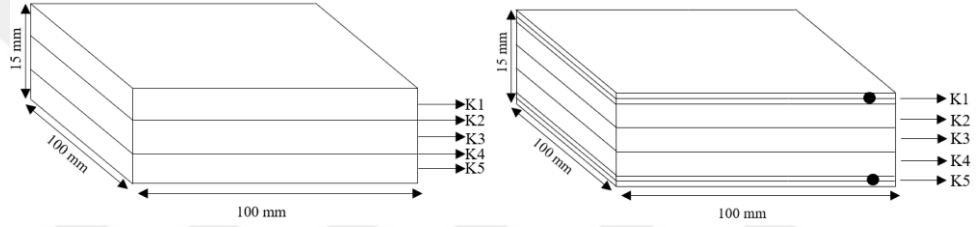
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Kompozit malzemelerden üretilecek yapı elemanlarının kullanıldığı yerde beklenen performansı sergileyebilmesi için öncelikle üretim yöntemi, fiber yönlmesi ve doğrultusu ve malzeme seçimi gibi parametrelerinin doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu gereksinimler, nihai ürünün dayanımını, elastik özelliğini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde tek veya çok katlı, düz veya değişik yönlmeli ve farklı doğrultularda kullanılan fiberler ve matris malzemeler yapının makro mekanik özelliklerini belirlemektedir. Bu nedenle, üretim metodunun belirlenmesiyle birlikte malzemenin tasarım aşaması da düşünölmelidir.

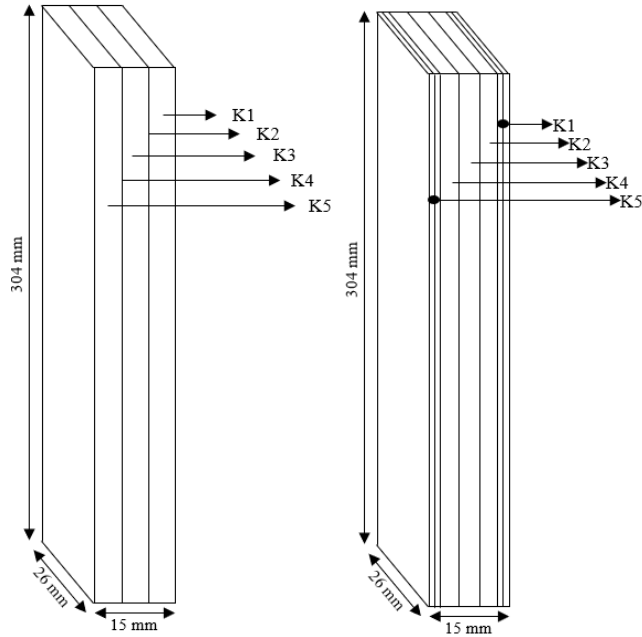
Bu tez çalışmasında üretilen tabakalı-sandviç polimer matrisli cam fiber takviyeli sentetik köpük malzemelerin darbe ve burkulma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Açık kalıplama yöntemi olan el yatırma yöntemi kullanılarak üretilen numuneler darbe ve burkulma testlerine tabi tutulduktan sonra elde edilen veriler ve grafikler yorumlanarak malzemelerin mekanik özellikleri kıyaslanmıştır. Üretimde kullanılan malzeme özellikleri, üretim yöntemi ve uygulanan testler hakkında bilgiler verilmiştir.

Cam takviyeli plastik tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testleri ve burkulma davranışlarının incelenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar incelendiği zaman, burkulma testlerinde standart numune boyutları kullanılmadığı görölmektedir. Katman sayısını belirleyebilmek için her iki test için de herhangi bir standarda rastlanmamıştır. Örneğin Öndürücü ve Karacan (2018), 150x1000 mm boyutlarında farklı yönlendirilmiş 8 ve 12 katmanlı cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin darbe cevabını incelemiştir. CoDyre and Fam (2016), matris elemanı köpük ve takviye elemanı cam fiber olan 3 katmanlı kompozit malzemelerin burkulma davranışını incelemiştir. Numunenin eni ve genişliği, 100x50 mm boyutlarında olup uzunluğu 750, 1000, 1250 ve 1500 mm'dir. Başka bir çalışmada (Kıratlı 2012), 8, 12, 16 ve 32 katmanlı fiber takviyeli kompozit malzemelerde katman sayısının burkulma yüküne etkisi incelenmiştir.

Matris malzemesi olarak sentetik köpük (MB, epoksi reçine ve sertleştirici) ve takviye eleman olarak E-cam fiber kullanılmıştır. Tabakalı kompozit malzemeler tek seferde üretilmiştir. Sandviç yapıları kompozit malzemeler ise her katman ayrı ayrı üretilerek yapıştırılmıştır. Katmanlarının birleştirilmesinde yapıştırıcı (epoksi ve sertleştirici karışımı) kullanılmıştır. Darbe deneyi numuneleri ASTM 3763 standartlarına uygun olacak şekilde 100x100x15 mm boyutlarında, burkulma deney numuneleri ise 26x15x304 mm boyutlarında kesilmiştir. Tabakalı numuneler “T”, sandviç numuneler ise “S” harfleri ile gösterilmiştir. Darbe ve burkulma testleri için üretilen numunelerin boyut ve tasarımı sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Darbe testi için numune tasarımının gösterimi



Şekil 3.2. Burkulma testi için numune tasarımının gösterimi

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada S₂₂, K₃₇ ve K₄₆ türünde üç farklı cam MB malzeme kullanılmıştır. Mikro balonlar 3M Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Farklı yoğunluklara sahip MB kullanımının amacı, katmanlarda farklılık gösteren yoğunluk parametresinin, mekanik özellikler üzerine etkisini incelemektir. İçi boş küreciklerden oluşan ince toz küre halindeki MB özellikleri Çizelge 3.1'de görseli ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Mikro balon özellikleri

MB Türü	Yoğunluk (kg/m ³)	Çap (µm)	Cidar kalınlığı (µm)	η (r _i /r _o)
S ₂₂	220	35	0.521	0.970
K ₃₇	370	45	1.024	0.948
K ₄₆	460	40	1.289	0.936



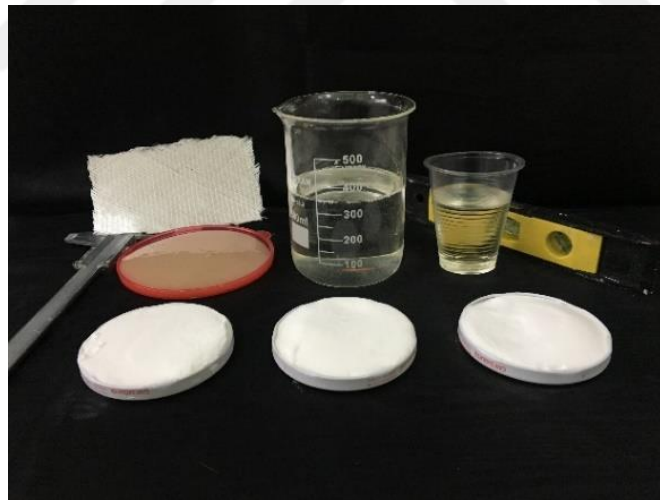
Şekil 3.3. Mikro balon gösterimi

Takviye eleman olarak [45, -45] yönlenmeli E-camı fiber kullanılmıştır. Matris eleman ise MB, epoksi ve sertleştiriciden oluşmaktadır. HUNTSMAN firmasına ait "Araldite GY 793 CH" kodlu epoksi reçine kullanılmıştır. Sertleştirici malzeme olarak yine

HUNTSMAN firmasına ait ‘‘TETA sertleştirici’’ kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin gorselleri Şekil 3.4’de, malzemelerin yoğunluk ve elastisite değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. E-cam fiber, epoksi ve sertleştiricinin yoğunlukları ve elastisite sabitleri

Materyal	Yoğunluk (kg/m ³)	Poisson Oranı	Elastisite Modülü (GPa)
E-Cam Fiber	2600	0.22	72
Epoksi	1130	0.35	1.652
Sertleştirici	9810	-	-



Şekil 3.4. Mikro balon, epoksi, sertleştirici, cam fiber ve yapıştırıcı gosterimi

Sandviĉ yapılı numunelerin katman birleştirme işleminde sertleştirici ve reĉine karışımıyla elde edilen karışım kullanılmıştır. Karışım; HUNTSMAN marka ‘‘Hardener HV 953’’ kodlu sertleştirici ve ‘‘Araldite AW106’’ kodlu reĉine bileşiminden oluşmaktadır. Yapıştırıcı; firmanın tavsiye ettiği aęırlıkĉa orana dikkat edilerek

oluşturulmaktadır. Karışımın gösterimi Şekil 3.4’de bileşenlerin özellikleri Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Yapıştırıcı malzemenin yoğunlukları ve elastisite sabitleri

Yapıştırıcı Bileşenleri	Özgül Ağırlık	Viskozite (Pa·s)	Renk
Sertleştirici	0.92	35	Bal
Reçine	1.17	50	Krem

3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzemelerin üretim yöntemi; literatürde yer alan bazı çalışmalar baz alınarak, numunenin kullanım alanına, ürün sayısına, ürün boyutuna ve numuneye kazandırılmak istenen yeni özelliklere göre belirlenmektedir. E-cam fiber takviyeli sentetik köpük polimer kompozit malzemeler, tabakalı ve sandviç yapılı olmak üzere iki farklı kombinasyonda üretilmiştir. Her iki deney numunesine göre üretim aşamaları bu bölüm içerisinde detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2.1. Tabakalı kompozit malzemelerin üretimi

Tabakalı kompozit numuneler farklı yüzdelik hacimlerde epoksi-sertleştirici karışımı ve farklı yoğunluklara sahip mikro balon türünün fiber liflerinin etrafına doldurulmasıyla elde edilmiştir. Bu çalışmada numuneler el yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir.

T1-T8 arasındaki numunelerde, 220 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB türü kullanılmıştır. Bu numunelerde katmanların hacimce yüzdelik oranları değişiklik göstermektedir. Katmanlar “K” harfi ile ifade edilmiş olup, içerikleri Çizelge 3.4’de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.4. T1-T8 arası numunelerin katman bilgileri

Tabakalı Seriler	MB yoğunluğu (kg/m ³)	MB:Epoksi hacim oranı (%)				
		K1	K2	K3	K4	K5
T1	220	30:70	*	30:70	*	30:70
T2	220	30:70	*	50:50	*	30:70
T3	220	50:50	*	30:70	*	50:50
T4	220	50:50	*	50:50	*	50:50
T5	460	30:70	*	30:70	*	30:70
T6	460	30:70	*	50:50	*	30:70
T7	460	50:50	*	30:70	*	50:50
T8	460	50:50	*	50:50	*	50:50
Katman kalınlığı (mm)	-	4,6	0,6	4,6	0,6	4,6

*Fiber takviye elemanı kullanılmıştır.

T9-T12 numunelerinde, katman 3 için mikro balon yoğunluğu 220 kg/m³ olarak sabit tutulurken katman 2 ve katman 4’de kullanılan MB yoğunluğu 370 kg/m³ ve 460 kg/m³ olarak değişmektedir. T13 numunesinde katman 1 ve katman 5 fibere epoksi emdirilerek üretilmiştir. Diğer katmanlar MB içermemektedir. Çizelge 3.5’de numune bilgileri verilmiştir.

Çizelge 3.5. T9-T13 arası numunelerin katman bilgileri

Tabakalı Seriler	MB:Epoksi hacim oranı (%)	MB yoğunluğu (kg/m ³)				
		K1	K2	K3	K4	K5
T9	30:70	370	*	220	*	370
T10	50:50	370	*	220	*	370
T11	30:70	460	*	220	*	460
T12	50:50	460	*	220	*	460
T13	0:100	-	*	-	*	-
Katman kalınlığı (mm)	-	4,6	0,6	4,6	0,6	4,6

*Fiber takviye elemanı kullanılmıştır.

Tabakalı kompozit üretiminde; yapının homojen olması, katmanların eşit kalınlıkta olması, fiberin matris eleman içerisinde çökme durumu ve fiber yönlenmesi unsurlarına dikkat edilmiştir. İlk olarak belirlenen yüzdelik hacim oranlarına göre malzemeler hazırlanır. Beher içine alınan epoksi 50°C sıcaklığında beher ısıtıcıda yarım saat ısıtılır. Daha sonra MB ilave edilir. Mümkün oldukça az hava baloncuklu karışım elde edilene kadar elle karıştırma işlemi yapılır. Cam mikro balonların kırılmaması için karıştırma hızı ve süresine dikkat edilmesi gerekmektedir. Karışım dinlendirildikten sonra sertleştirici eklenir. Sertleştiricinin kısa sürede donduğu göz önünde bulundurularak karışım işlemine devam edilir.

Kalıptan numunenin kolay çıkarılabilmesi için kalıp teflon kumaş ile kaplanır. Karışım kalıba döküldükten sonra içinde oluşan hava kabarcıklarını önlemek için kısa süre elle titreşim uygulanır. Kalıbın yerleştirileceği zemin hassas su terazisi ile kontrol edilir.

Kalıba dökülen karışım katılaşması için yaklaşık 2 saat dinlendirilir; fiberin çökmesini önleyecek kadar katı, fiberle bütünleşecek kadar sıvı bir yapının elde edilmesi amaçlanmaktadır. İstenilen boyut ve açığa sahip fiber kumaşı el yatırma yöntemiyle serilir. Fiber ve matris eleman bütünleşip sertleşinceye kadar yaklaşık bir gün beklenir. Aynı işlem diğer katmanlar için gerçekleştirilir. Numune sertleştikten sonra kalıp sökülerek numune çıkartılır ve 100°C sıcaklığında fırında 2 saat kurutulur (Şekil 3.5).

Numune yüzeyinde bulunan çapaklar, çıkıntılar ve pürüzler zımparalama işlemiyle giderilir. 304x130x15 mm boyutlarında elde edilen numunelerin yüzeyi “Maestro” marka titreşimli zımpara makinesi ile temizlenmiştir.



Şekil 3.5. Fırınlanan tabakalı numune gösterimi

3.2.2. Sandviç yapıli kompozit malzemelerin üretimi

Sandviç yapıli kompozit numunelerde ise alt ve üst katman lif etrafına epoksi-sertleştirici karışımından oluşturulmuştur. Orta katmanlar ise tabakalı numunelerin sıralanışıyla aynı olup, tüm katmanlar yapıştırıcı malzeme yardımıyla birleştirilmiştir.

S1-S8 arasındaki numunelerde, hacimce değişik yüzdelerde 220 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB kullanılmıştır. Katmanlarda kullanılan MB hacim oranı ve MB türü ve katman kalınlıkları Çizelge 3.6’da detaylı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 3.6. S1-S8 arası numunelerin katman bilgileri

Sandviç Seriler	MB yoğunluğu (kg/m^3)	MB:Epoksi hacim oranı (%)				
		K1	K2	K3	K4	K5
S1	220	*	30:70	30:70	30:70	*
S2	220	*	30:70	50:50	30:70	*
S3	220	*	50:50	30:70	50:50	*
S4	220	*	50:50	50:50	50:50	*
S5	460	*	30:70	30:70	30:70	*
S6	460	*	30:70	50:50	30:70	*
S7	460	*	50:50	30:70	50:50	*
S8	460	*	50:50	50:50	50:50	*
Katman kalınlığı (mm)	-	1,5	4	4	4	1,5

*Bu katman, fiberin epoksiye gömülmesiyle elde edilmiştir.

S9-S12 numunelerinde, katman 3 için mikro balon yoğunluğu 220 kg/m^3 olarak sabit tutulurken katman 2 ve katman 4’de kullanılan MB yoğunluğu 370 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 olarak değişmektedir. S13 numunesinde ise, katman 1 ve katman 5 fiber epoksi içine gömülerek üretilmiştir. Diğer katmanlar MB içermemektedir. S9-S13 arası sandviç kompozit numunelere ait katman bilgileri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. S9-S13 arası numunelerin katman bilgileri

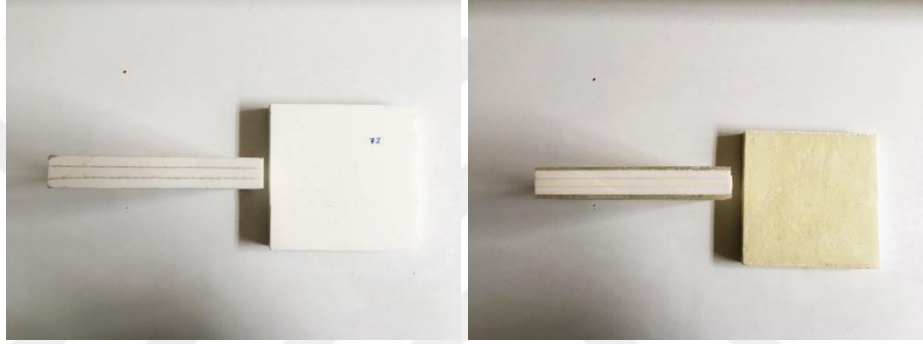
Sandviç Seriler	MB:Epoksi hacim oranı (%)	MB yoğunluğu (kg/m^3)				
		K1	K2	K3	K4	K5
S9	30:70	*	370	220	370	*
S10	50:50	*	370	220	370	*
S11	30:70	*	460	220	460	*
S12	50:50	*	460	220	460	*
S13	0:100	*	-	-	-	*
Katman kalınlığı (mm)	-	1,5	4	4	4	1,5

*Bu katman, fiberin epoksiye gömülmesiyle elde edilmiştir.

Sandviç kompozit üretiminde; 5 katman ayrı ayrı üretilerek yapıştırıcı yardımıyla birleştirilmiştir. Katman 1 ve katman 5, epoksi ve sertleştiriciden oluşmaktadır. Epoksi içine belirlenen oranda sertleştirici ilave edilmiş ve homojen yapı elde edilinceye kadar karıştırıldıktan sonra kalıba dökülür. Fiber, sıvı halde bulunan yapının içine gömülerek, fiberin karışımı iyice emmesi sağlandı. İki gün bekletilerek kalıptan çıkartıldı. Katman 2, katman 3 ve katman 4 ise tabakalı yapıda matris elemanının üretildiği gibi üretilmiştir. Tüm numuneler fırında 100°C sıcaklığında 2 saat kurutulmuştur. Zımparalama işlemiyle malzeme yüzeyleri temizlenerek yapıştırma işlemine uygulanmıştır. Yapıştırıcı; firmanın belirlediği ağırlıkça orana göre sertleştirici ve epoksinin bir kap içerisinde karıştırılmasıyla üretilmiştir. Temas yüzeylerinin bir tanesine, her tarafına eşit miktarda olacak şekilde 6 gr yapıştırıcı sürüldükten sonra 5 katman üst üste bindirildi ve kalıbın içerisine düzgün biçimde yerleştirildi. Yük altında iki gün sertleşmesi beklendi.

3.2.3. Numunelerin hazırlanması

Tabakalı ve sandviç yapılar üretildikten sonra uygun ebatlarda kesme işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar için hazır hale getirilen numune görselleri Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de verilmiştir. Numunelerin kesme işleminde; Atatürk Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Makine Teorisi ve Dinamiği Laboratuvarı’nda bulunan sulu kesim makinesi kullanılmıştır. Kesme cihazı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tabakalı ve sandviç yapıdaki darbe numunelerinin yan ve üst görünümü



Şekil 3.7. Sandviç ve tabakalı yapıdaki burkulma numunelerinin yan ve üst görünümü



Şekil 3.8. Kesme cihazı

3.3. Darbe Testi

Çalışma kapsamında Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümünde yer alan CEAST Fractovis Plus marka darbe cihazı kullanılmıştır. Ağırlık düşürme prensibiyle çalışan cihaz, maksimum 1800 Joule enerji seviyesinde çalışmaktadır. Vurucu uç ile ağırlık arasında bulunan kuvvet sensörü sayesinde zamana bağlı olarak ağırlığın sahip olduğu enerji bilgisayara aktarılır. Çelik malzemeden üretilmiş vurucu uç yarı küresel başlıklı olup 626 gr ağırlığında, 12,7 mm çapında ve maksimum 24 m/s hıza erişmektedir. Vurucu uca bağlı olan kuvvet dönüştürücüsü 22,24 kN yük kapasitesine sahiptir. Deneylerde kullanılan darbe test cihazı Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Darbe test cihazı

Vurucu uç ile numunenin yüzeyi temas ettiği zaman küçük alanda yüksek basınç oluşur. Uçun oluşturduğu kuvvet ile malzemenin verdiği tepki darbe sonrası hasarın çeşidini belirlemede yardımcı olur. Darbeye uğrayan yapı, vurucunun uyguladığı enerjinin tamamını absorbe edemediği zaman sekme meydana gelir. Sönümlenen enerji ile vurucunun sahip olduğu enerji eşit olduğunda ise uç numuneye saplanır. Numunenin absorbe edebildiği enerji vurucu uçun sahip olduğu enerjiden yüksek ise delinme meydana gelir. Sırasıyla sıçrama, nüfuziyet ve delinme enerjisi olarak adlandırılır. Deneyle üç enerji çeşidini içerecek şekilde yapılmıştır.

Numunelere, farklı enerji seviyelerinde (30 J, 60 J, 90 J, 120 J) düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Yarı küresel darbe ucu numunenin ortasına darbeyi uyguladıktan sonra darbe ucu tutularak tekrarlı darbe oluşumu engellenmiştir. Darbe testi boyunca veriler kuvvet algılayıcı yardımı ile bilgisayara iletilmiştir. Test öncesi ve sonrası numuneler fotoğraflanarak hasar miktarı gözlemlenmiş ve yutulan enerji-zaman grafikleri çizilmiştir. Numunelerin absorbe ettiği darbe enerjileri yorumlanmıştır.

3.4. Burkulma Testi

Burkulma testlerinde Atatürk Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nde bulunan SHIMADZU marka AUTOGRAPH AG-IS serisi Universal test cihazı kullanılmıştır. Makine hidrolik çekme-basma tertibatı ve gösterge panelinden oluşmaktadır. 100 kN'a kadar basma kuvveti oluşturabilmektedir. Şekil 3.9'da Universal Çekme-Basma Makinesinin görseli verilmiştir.



Şekil 3.10. Çekme-basma test cihazı

Deneme testleri ve cihaz ayarları yapıldıktan sonra tüm numuneler için burkulma testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler makinenin alt çenesine doğru şekilde yerleştirilerek sabitlenmiştir. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi numune üst yüzeyden başlık vasıtasıyla tek eksenli bası yüküne maruz bırakılmıştır. Malzeme kırılıncaya kadar yükleme yapılmış ve daha sonra yük kaldırılmıştır. Numunenin dayanacağı maksimum yük yani kritik yük (P_{cr}) cihazdan bilgisayara program aracılığıyla aktarılmaktadır. Elde edilen yer değiştirme-yük eğrisinin Hooke doğrusundan ayrıldığı nokta burkulma yükü olarak tanımlanmaktadır. Burkulma deneyleri 23°C’de oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Tüm burkulma testleri en az 3 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.11. Yükleme durumu

3.5. Malzeme Özelliklerinin Hesaplanması

Tasarlanan cam fiber takviyeli sentetik köpük polimer kompozit malzemelerin davranışlarını yorumlayabilmek için numunelere ait elastik sabitlerin hesaplanması gerekmektedir. Sentetik köpük malzemeler mekaniği genellikle deneysel çalışmalar ile elde edilmektedir. Porfiri and Gupta (2009), çalışmasında bu malzemelerin elastik sabitlerini hesaplamak için bir modelleme geliştirmiştir. Bu modellemenin içerdiği formülasyonlar ile MB ve reçineden oluşan matris yapının özellikleri belirlenebilmektedir. MB katkısının epoksi reçine içinde homojen olduğu ve kendi başına

ayrı bir izotropik yapı olduğu kabulü yapılmıştır. Sentetik köpüğün elastik özellikleri denklem 3.1 ve denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır (Porfiri and Gupta 2009).

$$E_s = E_m(1 + f_E(E_b, \nu_b, E_m, \nu_m, \eta)V_m) \quad (3.1)$$

$$\nu_s = \nu_m(1 + f_\nu(E_b, \nu_b, E_m, \nu_m, \eta)V_m) \quad (3.2)$$

E_s ve ν_s sentetik köpüğün elastisite modülü ve Poisson oranını ifade etmektedir. Sırasıyla E_b , ν_b , E_m ve ν_m ise MB ve reçinenin elastik sabitleridir. V_m , mikro balonun hacim oranıdır (Porfiri and Gupta 2009). Çizelge 3.8’de sentetik köpük için elde edilen elastik sabitler verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sentetik köpüğün özellikleri

ρ_{mb} (kg/m ³)	220		370		460	
V_{mb}	%30	%50	%30	%50	%30	%50
E_s (N/m ²)	1.75e09	1.83e09	1.97e09	2.18e09	2.04e09	2.30e09
ν_s	0.3425	0.3375	0.3168	0.2946	0.3075	0.2791
G_s (N/m ²)	1.85e09	1.86e09	1.78e09	1.75e09	1.75e09	1.69e09

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

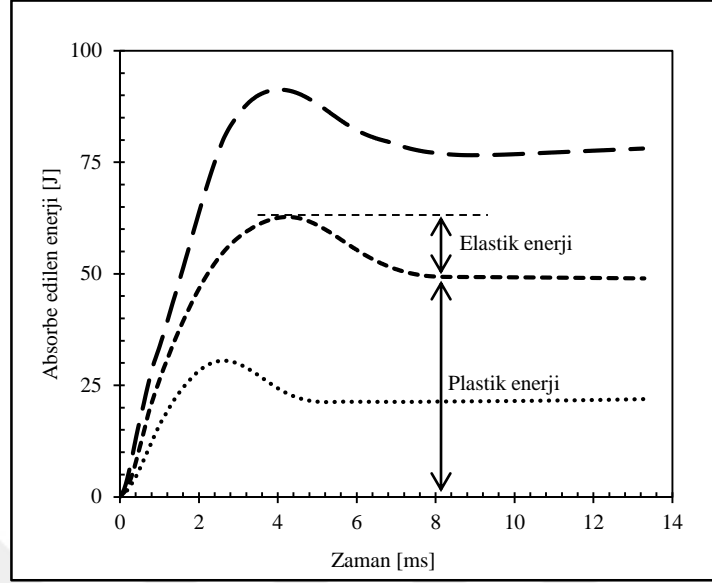
Sentetik köpük, cam MB'ların epoksi matris içinde yapılandırılması ile elde edilen hafif mühendislik köpüğüdür. Sentetik köpükler, içi boş küresel parçacıklar olup kapalı gözenekli köpükler olarak sınıflandırılır. Bu kapalı gözenek yapısı, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi avantajlar sağlar. Kullanılan MB hacim oranı ve MB türü malzemenin mekanik özelliklerini değiştirebilir. MB cidar kalınlığı ve yarıçapı da mekanik cevapları değiştiren parametreler arasındadır. Ayrıca takviye elemanlar sayesinde, kompozitlerin enerji absorbe etme yeteneği ve direnci artırılır.

Tez çalışması kapsamında, MB hacim oranının ve MB türünün kompozitlerin mekanik davranışları üzerine etkisini inceleyebilmek için, kompozit numunelerin darbe ve burkulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Darbe deneyleri sonucu çizilen, absorbe edilen enerji-zaman grafikleri yorumlanmıştır. Ayrıca, burkulma deneylerinden kritik burkulma yükleri elde edilmiştir. Bu kapsamda elde edilen deney sonuçları alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

4.1. Darbe Deneyi Sonucu Bulgular

Dört farklı enerji seviyesinde yapılan darbe testlerinden elde edilen veriler grafikler halinde sunulmuştur. Grafikler, kompozit yapısı, MB türü ve MB hacim oranlarına göre sınıflandırılmıştır. Regresyon analizi yapılarak sonuçlar kıyaslanmıştır.

Enerji-zaman grafiği numunelerin elastik ve plastik enerji miktarları hakkında bilgi vermektedir. Elastik enerji, vurucu ucun numuneye temas ettikten sonra geri sekmesine sebep olan enerji, plastik enerji ise numunenin hasara uğramasına sebebiyet veren absorbe edilen enerji miktarı hakkında bilgi vermektedir (Hebert *et al.* 2008). Elastik ve plastik enerjinin grafik üzerinde gösterimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

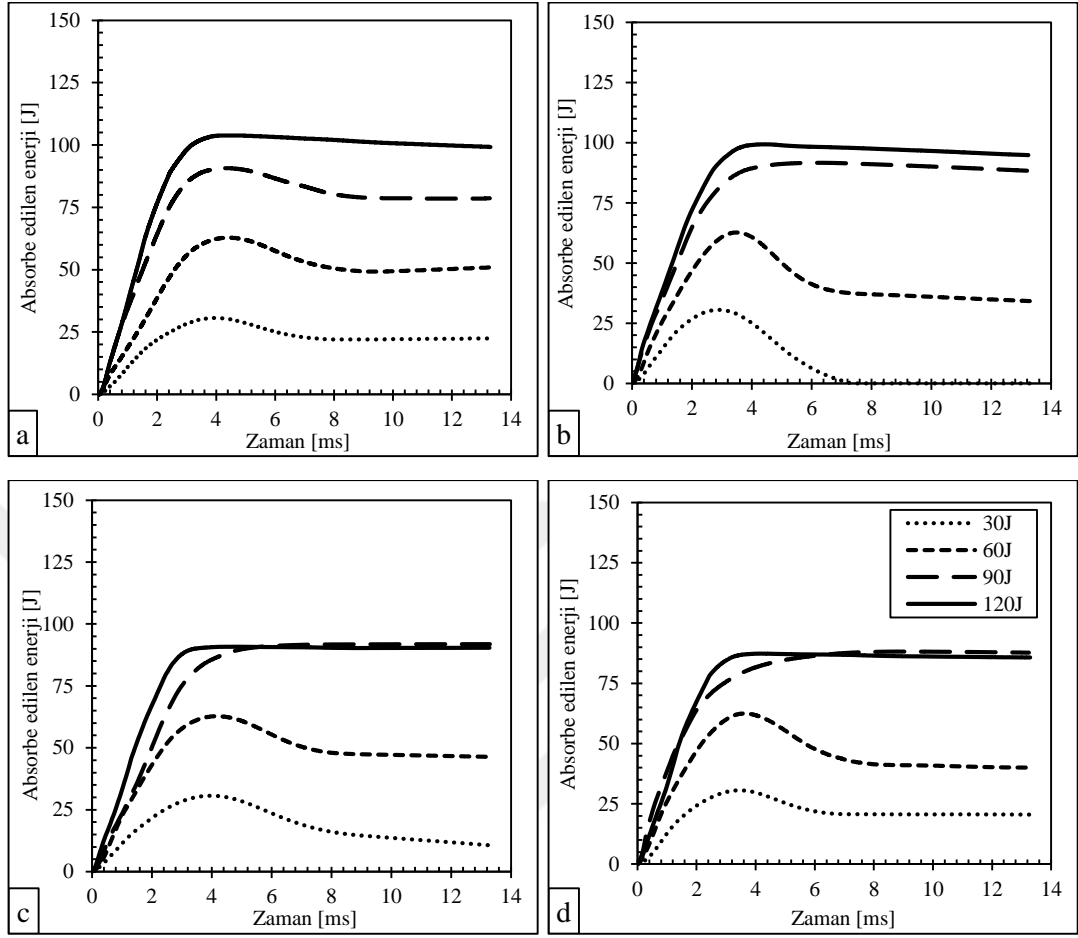


Şekil 4.1. Enerji-zaman grafiği

Enerji-zaman grafikleri, tabakalı ve sandviç yapıli kompozit numuneler için farklı darbe enerji seviyelerinde alınan cevaplara göre elde edilmiştir.

4.1.1. Tabakalı numunelerin enerji-zaman grafikleri

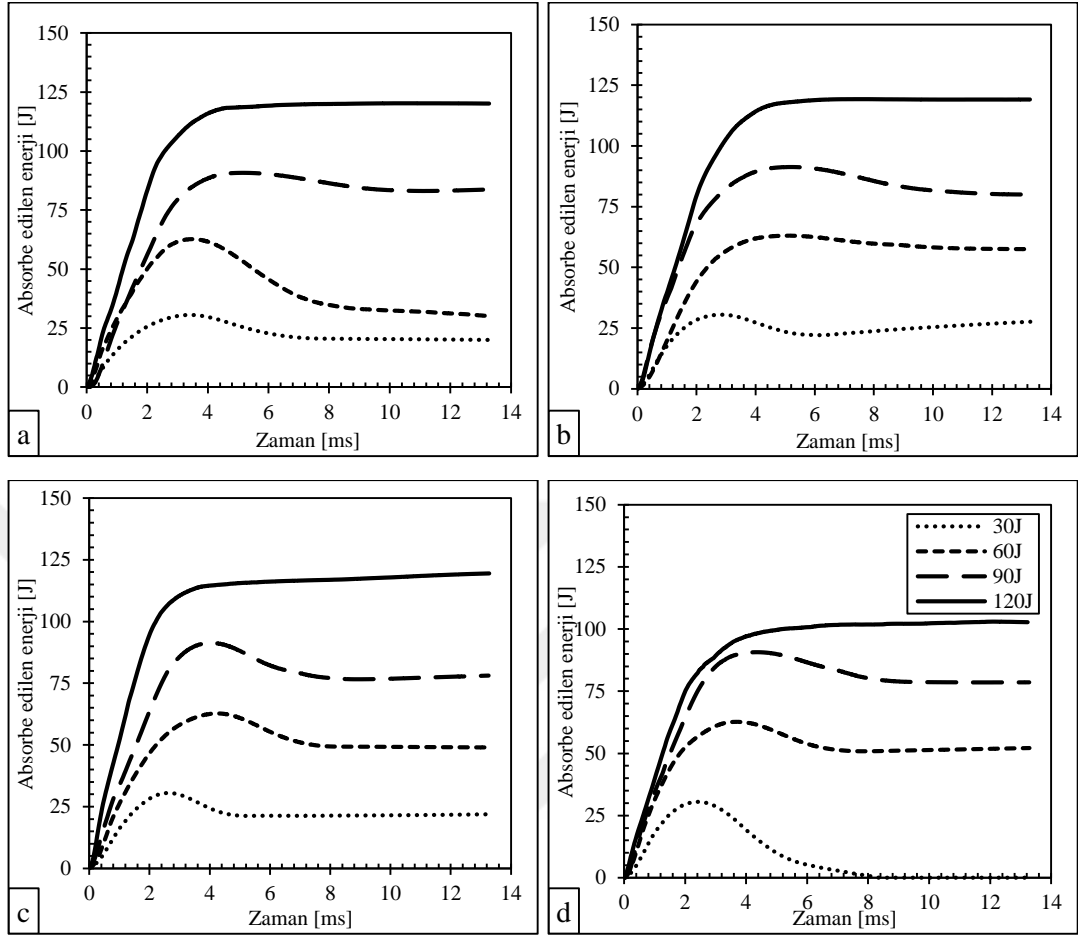
Şekil 4.2’de verilen grafiklerde, 30 J, 60 J, 90 J ve 120 J enerji seviyelerinde, katmanlarında 220 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB cinsi kullanılan tabakalı yapıli numunelerin enerji-zaman grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Enerji-zaman grafikleri a) T1, b) T2, c) T3, d) T4

Şekil 4.2 incelendiğinde, katmanların içerdiği MB oranının artmasıyla, absorbe edilen enerji miktarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.2.a'da %30 hacim oranında MB kullanılmış ve maksimum absorbe edilen enerji 108 J iken, Şekil 4.2.d'de %50 hacim oranında MB kullanılmış olup maksimum absorbe edilen enerjinin 87 J olduğu görülmektedir. Bu durumda, MB hacim oranı arttıkça yutulan enerji miktarının düştüğü yani MB oranının artışının depolanan darbe enerji miktarını olumsuz etkilediği görülmüştür.

Şekil 4.3'de verilen grafiklerde, katmanlarında 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB kullanılan tabakalı yapı numunelerin 30 J, 60 J, 90 J ve 120 J enerji seviyelerinde enerji-zaman grafikleri verilmiştir.

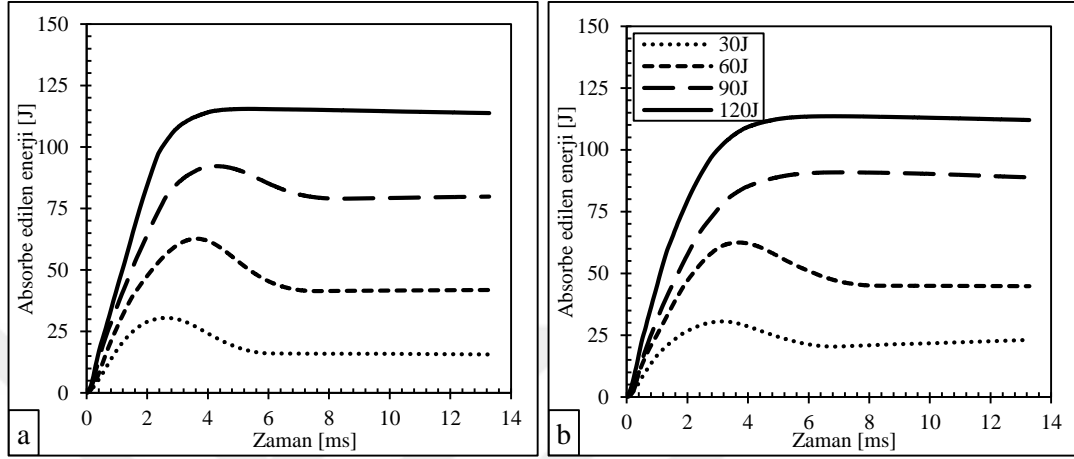


Şekil 4.3. Enerji-zaman grafikleri a) T5, b) T6, c) T7, d) T8

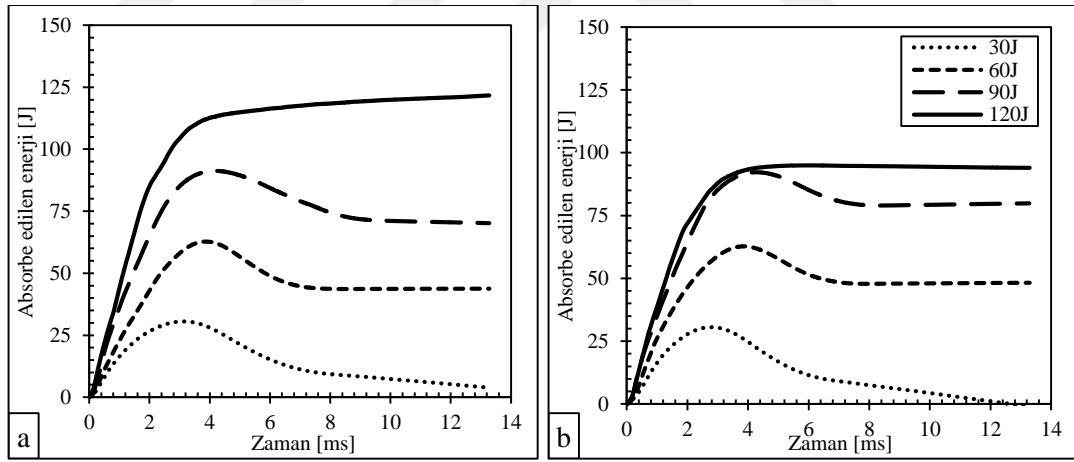
Şekil 4.3, 460 kg/m^3 yoğunluğunda tabakalı serinin 90 J enerjisi miktarının tamamını absorbe ettiğini göstermektedir. 120 J enerji seviyesinde yapılan darbe testlerine göre, malzemelerin dayanımı, T1 numunesinden sırasıyla T2, T3 ve T4'e doğru artmaktadır. Hacim oranının %30'dan %50'ye artışında absorbe edilen enerjinin ters orantılı olduğunu Çizelge 4.2'de yorumlamıştık. Şekil 4.3.b ve Şekil 4.3.c, darbe ucunun temas ettiği yüzey ile hasar miktarı arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Üst katmanların MB oranına bağlı olarak, T6 numunesinin T5'den daha verimli sonuç verdiği görülmüştür.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de verilen grafiklerde, tabakalarında farklı MB yoğunluğuna sahip numunelerin katmanlarında 220 kg/m^3 , 370 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB cinsi kullanılan tabakalı yapıları numunelerin 30 J, 60 J, 90 J ve 120 J enerji seviyelerinde

enerji–zaman grafikleri verilmiştir. En üst ve en alt katmanlarda ki MB yoğunluk değişiminin darbe enerjisine etkisini incelemek için bu kombinasyon tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. Enerji-zaman grafikleri a) T9, b) T10



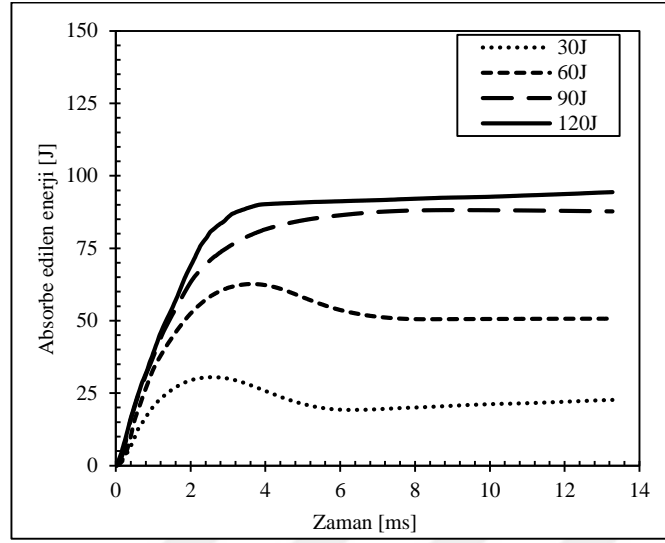
Şekil 4.5. Enerji-zaman grafikleri a) T11, b) T12

Enerji-zaman grafikleri incelendiğinde, MB hacim oranı arttıkça absorbe edilen enerji miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.4.b ve Şekil 4.5.b'de kıyaslandığında T10 numunesi yaklaşık olarak 90 J enerji absorbe ederken, T12 numunesi 95 J absorbe etmiştir. MB oranları aynı iken, K_{46} mikro balon türünün K_{37} 'ye göre daha fazla enerji depoladığı görülmektedir. Bu durum MB cidar kalınlığı artışının enerji miktarını pozitif

yönde etkilediğini gösterir (Çizelge 3.1). Aynı sonuçlar T9 ve T11 numuneleri için de geçerlidir.

Benzer şekilde, Bardella *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada, dört farklı hacim oranında (%30, %40, %50 ve %60) dört farklı mikro balon türü (K₄₆, K₃₇, S₃₂ ve S₂₂) kullanarak elde ettiği mikro yapılardan 16 adet model modelleme üzerine çalışmıştır. %60 hacim oranında MB içeren sentetik köpük numunelerden elde edilen gerilme-gerinim grafiklerinden 460 kg/m³ yoğunluğa sahip numunelerin diğerlerine göre daha dayanımlı olduğu görülmektedir. Sırasıyla K₄₆ türünden K₃₇, S₃₂ ve S₂₂'ye gidildikçe dayanım azalmıştır. Elde edilen sonuçlar en hafif mikro balon yoğunluğuna sahip sentetik köpüklerin daha erken hasara uğradığını göstermektedir. Hacim oranını değiştirerek tek bir mikro balon türünde ise MB miktarının azalımı dayanımı olumlu etkilemiştir. Aynı MB türüne sahip numuneler arasında ise hacim oranının %50'den %30'a kadar düşüşü dayanımı olumlu yönde etkilemiştir.

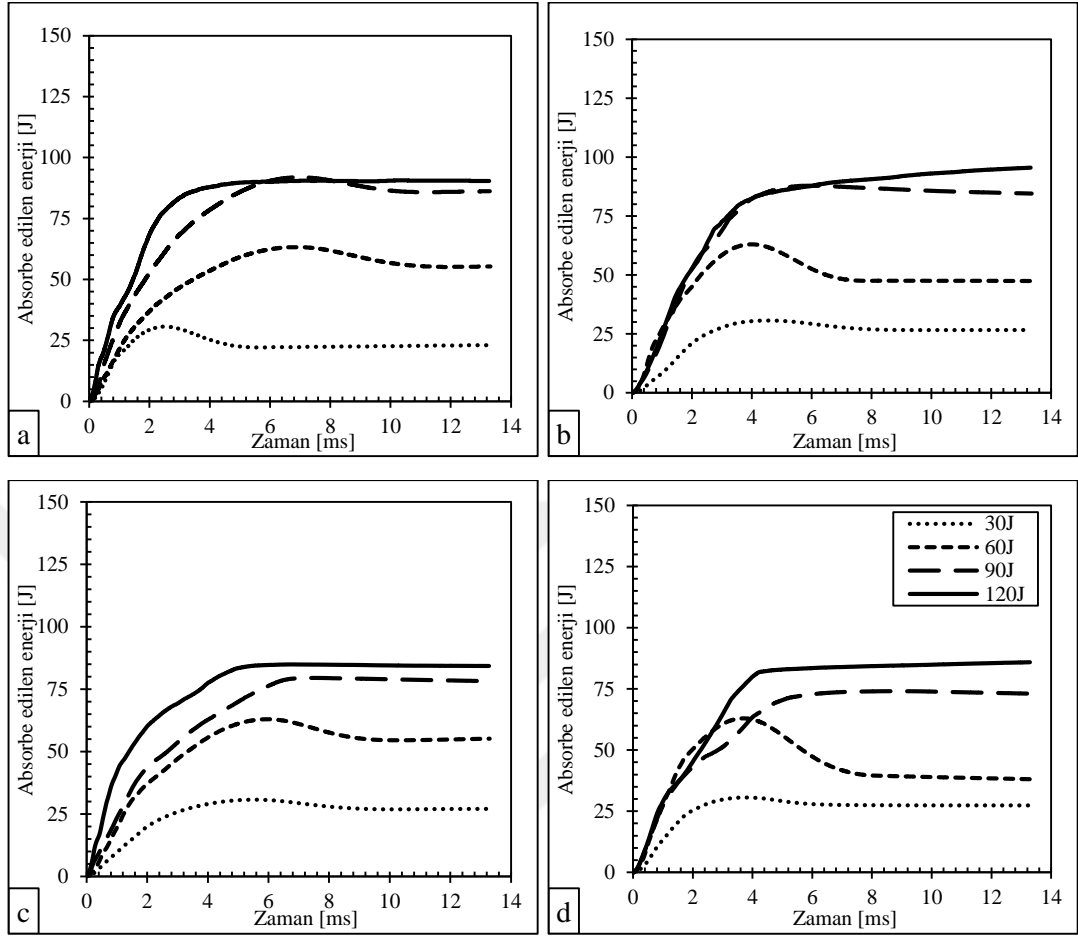
Son olarak, tabakalı yapılarda, MB içermeyen (epoksi) numunelerin enerji depolama kabiliyeti incelenmiştir. Absorbe edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. T13, maksimum 90 J enerji absorbe etmiştir. Diğer kompozit yapılarla kıyaslandığında, enerji absorbe etme kabiliyetinin T2, T3 ve T4 ile yaklaşık olarak aynı, fakat diğer numunelere göre daha düşük dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, matris elemana MB ilavesi ve MB yoğunluğunun artması daha mukavemetli bir yapı elde edilmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.6. T13 numunesine ait enerji-zaman grafiği

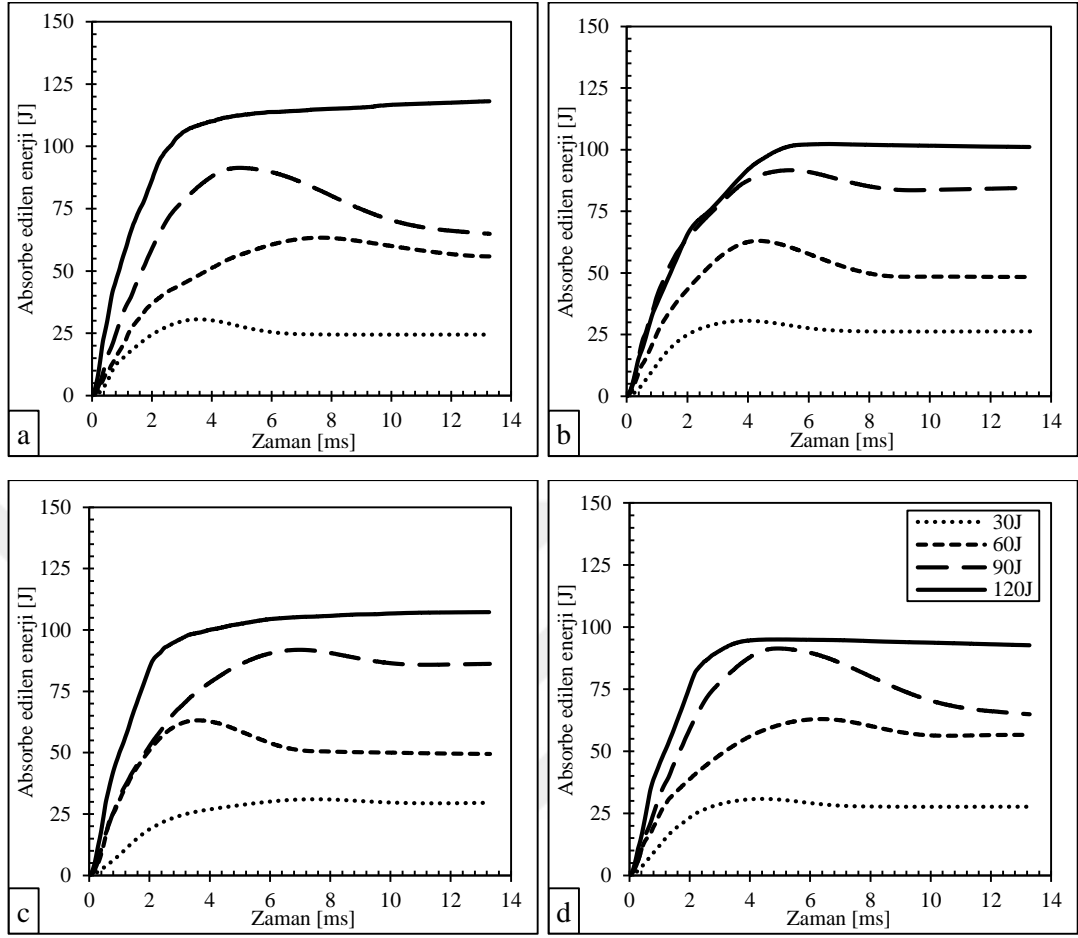
4.1.2. Sandviç numunelerin enerji-zaman grafikleri

Bu bölümde, tabakalı kompozitlerin katmanlarındaki MB sıralanışı ile aynı sırada katmanlar ayrı ayrı üretilerek, yapıştırıcı bağlantı ile birleştirilerek darbe cevabının değişimi araştırılmıştır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8, katmanlarında 220 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB cinsi kullanılan sandviç yapıları numunelerin 30 J, 60 J, 90 J ve 120 J enerji seviyelerinde enerji-zaman grafikleri verilmiştir.



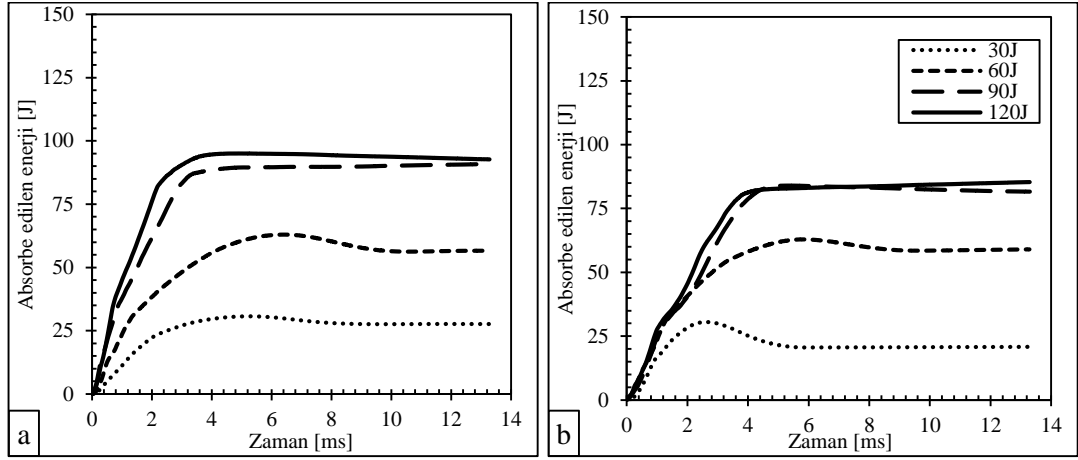
Şekil 4.7. Enerji-zaman grafikleri a) S1, b) S2, c) S3, d) S4

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de MB hacim oranı %30’dan %50’ye yükseldiği zaman depolanan enerji miktarının azaldığı görülmektedir. S1, S2, S3 ve S4 numunelerinin maksimum absorbe edebildiği enerji 85 J ile 90 J arasında değişmiştir, bu numuneler arasında en iyi performansı sergileyen S1 numunesinin 90 J enerjide delindiği elde edilmiştir. S5, S6, S7 ve S8 numunelerinde 95 J ile 110 J arasındadır. Bu da sandviç numunelerde, yapıştırma bağlantısının yapı bütünlüğünü olumsuz etkilediği ve daha çabuk hasara uğramasına sebep olduğunu göstermiştir.

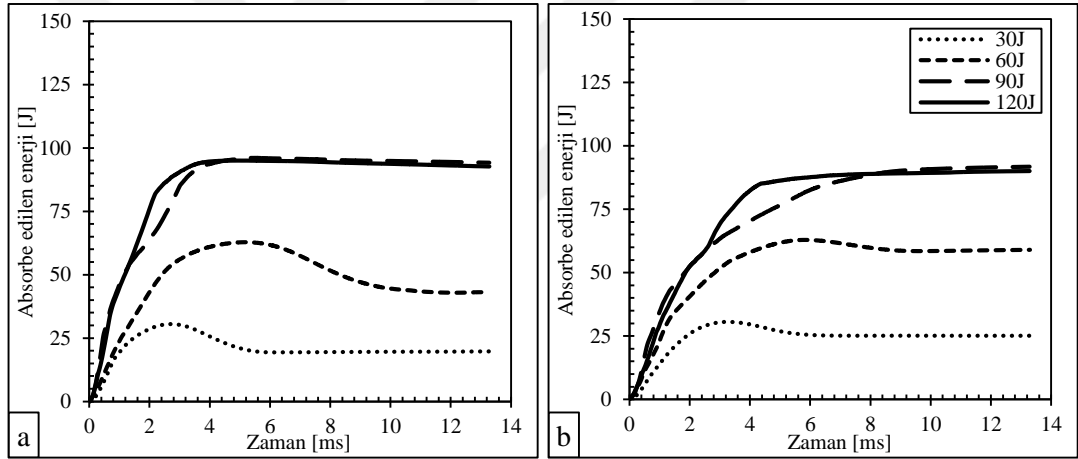


Şekil 4.8. Enerji-zaman grafikleri a) S5, b) S6, c) S7, d) S8

Woldesenbet (2008), K_{46} ve S_{22} mikro balon türlerinin darbe cevabını incelemiştir. K_{46} mikro balonun, S_{22} mikro balonlarına nazaran daha fazla darbe enerjisi absorbe ettiğini gözlemlemiştir. Bu durumu, K_{46} türüne ait çeper kalınlığının (2,74 mm), S_{22} türünün çeper kalınlığından (1,26 mm) daha büyük olması ile ilişkili olduğuna dayandırmıştır. S_{22} türünde ince çeper kalınlığı nedeniyle daha erken mikro balon kırılmaları başlamıştır. K_{46} türünde mikro balon kırılması devam etse bile, yayılma enerjisine ana katkı matris çatlamasından kaynaklanmıştır. Yüksek enerji seviyelerinde mikro balon kırılrsa da matrisin başarısız olmadığına bir göstergesi olduğunu ve K_{46} numunesinin S_{22} 'ye göre daha az hasara uğradığını, daha fazla enerji yuttuğunu bildirmiştir.

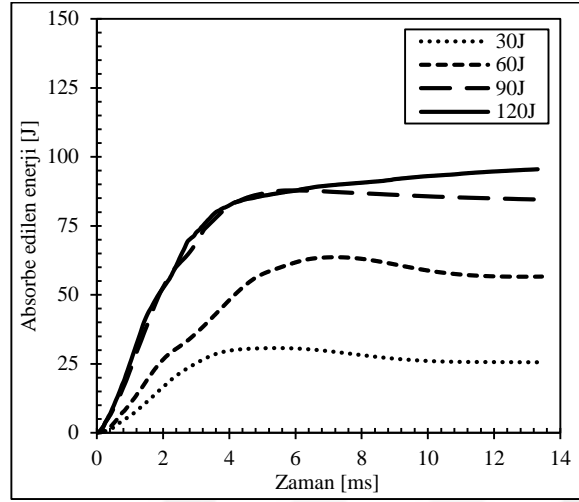


Şekil 4.9. Enerji-zaman grafikleri a) S9, b) S10



Şekil 4.10. Enerji-zaman grafikleri a) S11, d) S12

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'dan elde edilen veriler mikro balon yoğunluğu ve cidar kalınlığı arttıkça malzeme dayanımının arttığını göstermektedir. Detaylı bir şekilde ifade edecek olursak, MB yoğunluğu sırasıyla S₂₂, K₃₇ ve K₄₆'ya doğru artmaktadır. K₄₆ MB türü içeren sentetik köpüklerin daha fazla enerji absorbe ettiği görülmektedir. Rousseau *et al.* (2015), farklı hacim oranlarında (%5, %10, %20 ve %30) sentetik köpüklerin darbe cevabı üzerine çalışmışlardır. MB hacim oranına göre zayıflama katsayısının incelendiği grafikten elde ettiği sonuçlar, %30 hacim oranında mikro balon yoğunluğu arttıkça daha dayanımlı bir yapı elde ettiklerini bildirmişlerdir. Benzer sonuçlar kullanılan mikro balon yoğunluğunun darbe cevabını etkilediğini göstermektedir.

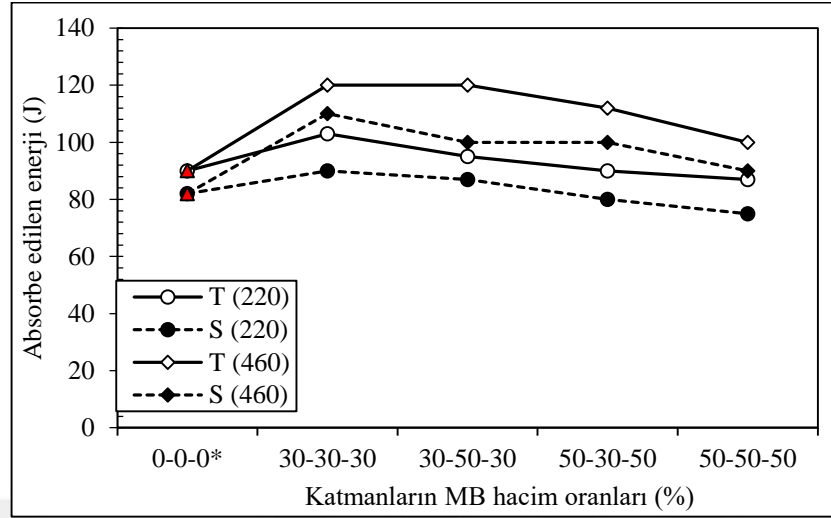


Şekil 4.11. S13 numunesine ait enerji-zaman grafiği

Sandviç yapılı ve MB içermeyen numunelerde, 82 J olan absorbe edilen enerji miktarının, tüm numunelerden düşük olduğu görülmüştür. Absorbe edilen enerji-zaman grafiği Şekil 4.11'de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, darbe dayanımının hem katmanların yapıştırıcı ile birleştirilmesinden hem de MB miktar ve yoğunluğundan etkilendiği net bir şekilde anlaşılmaktadır

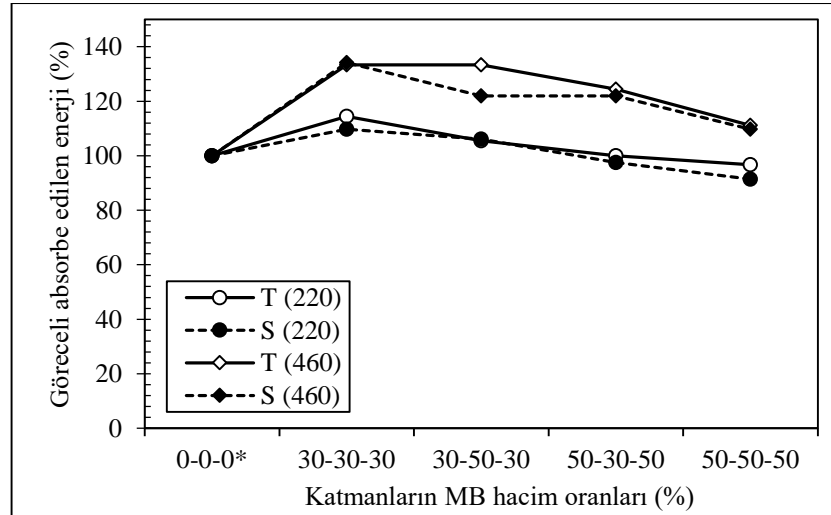
4.1.3. Karşılaştırma ve regresyon analizi

Şekil 4.12 incelendiğinde, tüm sonuçlardan, tabakalı yapılı kompozitlerin sandviç kompozitlerden daha fazla enerji absorbe ettiği gözlemlendi. Her iki yapı için MB içermeyen yapıdan, katmanlarında %30-30-30 hacim oranında MB kullanılan kompozit yapılara doğru absorbe edilen enerji miktarının arttığı, katmanlarında %50-50-50 hacim oranında MB kullanılan kompozit yapılara doğru ise azaldığı tespit edildi. Bu durum, katmanlarında 220 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB kullanılan numunelerde, %30-30-30 hacim oranında MB ilavesinin en iyi performansa sahip olduğunu göstermektedir.

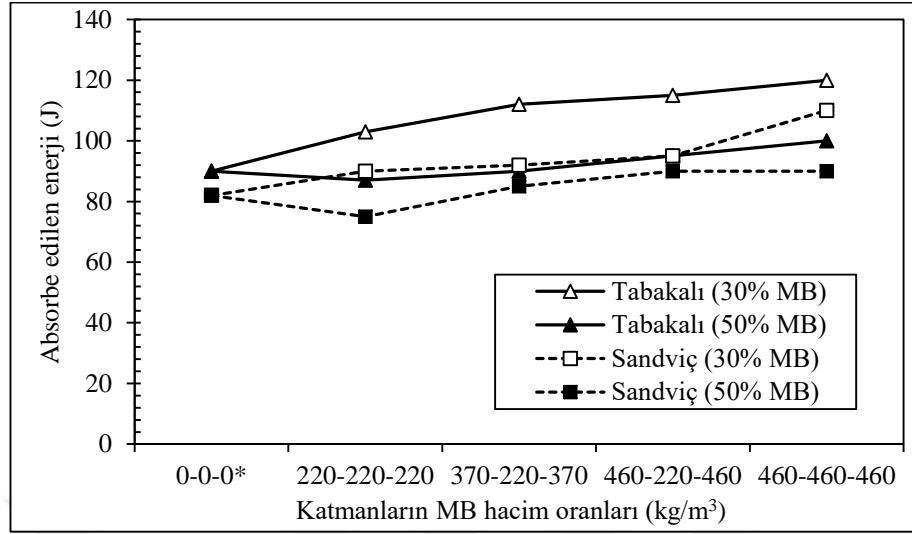


Şekil 4.12. Hacim oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi

MB içermeyen numunenin enerji seviyesini referans enerji seviyesi (%100) olarak kabul ettiğimiz zaman, MB ilave edildikçe absorbe edilen enerji değerleri %30-30-30'a kadar artış göstermektedir (Şekil 4.13). Bu sonuçlar, gereğinden fazla MB ilavesinin darbe dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir.



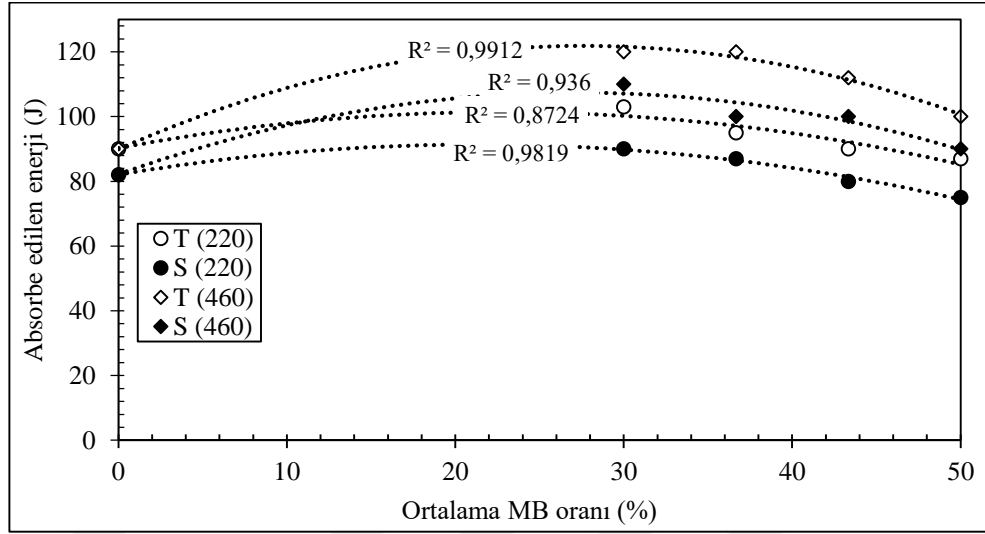
Şekil 4.13. Hacim oranının göreceli absorbe edilen enerjiye etkisi



Şekil 4.14. MB oranının absorbe edilen enerji miktarına etkisi

Şekil 4.14, iki faktörün absorbe edilen enerji miktarını olumlu etkilediğini göstermektedir. Bu faktörler, MB yoğunluğunun 220 kg/m^3 'den 460 kg/m^3 'ye artışı ve MB hacim oranının optimum %30 tercih edilmesidir. Tabakalı ve sandviç numunelerin her ikisinde de katmanlarında %30 hacim oranında 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB kullanılan numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetinin daha iyi olduğu görülmektedir. Bu sayede düşük yoğunluğa ve yüksek darbe dayanımına sahip numuneler elde edilmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, ikinci dereceden polinom denklemlerinde işlenerek regresyon analizi ile tekrar karşılaştırıldı (Şekil 4.15). Darbe testi sonucunda elde edilen veriler ışığında, kompozit türü ve MB türü için absorbe edilen enerjinin hacim oranına bağlı R^2 eğrileri elde edildi. Yapılan regresyon analizlerinde güvenilirlik seviyesi %95 olarak seçildi. Tüm kategorilerden elde edilen R^2 eğrileri, referans noktasından %30 MB hacim oranına kadar polinomial bir artış gösterirken, bu noktadan sonra azalma göstermektedir. Böylece, optimum hacim oranının %30 olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmadaki tasarım kullanılarak üretilecek numunelerde, işçiliği kolaylaştırmak, maliyeti azaltmak ve darbe dayanımını maksimum derecede iyileştirmek için %30-30-30 hacim oranı doğru seçim olacaktır.



Şekil 4.15. Regresyon analizi

4.1.4. Darbe deneyi sonrası numune görüntüleri

Darbe deney numunelerinde, vurucu ucun üst yüzeye darbe uygulaması sonucunda enerji seviyelerine bağlı olarak çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Matris hasarları, çatlak oluşumu ile başlar ve çatlaklar yapı içerisinde ilerledikçe kırılmalara neden olmaktadır. Matrisin zorlamaları sönümleyemediği durumda yük fiberlere iletilmektedir. Artan darbe enerjisi ile hasar, fiber yırtılmaları ve numunelerin kırılması ile sonuçlanmaktadır.

Dört farklı numune için tüm enerji seviyelerinde üst ve alt yüzeylerin hasar görüntüleri Ek 1 ve Ek 2’de verilmiştir. Tüm numuneler için, 30 J ve 60 J enerji seviyelerindeki numuneler ciddi bir şekilde hasara uğramamıştır, üst yüzeylerde matris ezilmesi alt yüzeylerde ise matris çatlakları oluşmuştur.

Yoğunluğu 220 kg/m^3 MB kullanılan tabakalı seride T8’in dayanımının en düşük olduğu enerji-zaman grafiklerinden belirlendi. T8’in darbe sonrası hasar görüntüsü incelenirse, elde edilen enerji-zaman grafiğini (Şekil 4.3) doğrular durumda olduğu görülmektedir. Enerji seviyesinin 90 J olarak uygulandığı zaman, ön yüzeyde ezilmeler, arka yüzeyde ise matris kırılmaları görülmektedir. Enerji seviyesinin 120 J olduğu durumda ise delinme gerçekleşmiştir. T2 numunesinde 90 J’de arka yüzeyde hafif matris çatlakları, ön yüzeyde

ise kırılmalar oluşmuştur. 120 J enerji seviyesinde, matris hasarı, fiber kırılması ve akabinde delinme meydana gelmiştir (Ek 1).

Orta katmanı 220 kg/m^3 , dış katmanları 370 kg/m^3 ve 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip numuneler arasında MB yoğunluğunun artışı sebebiyle dayanımı düşük olan numunelerin T10 ve T12 olduğu enerji-zaman grafiklerinden elde edildi (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10). Numunelerin üst ve alt yüzeyleri incelendiğinde, T12 numunesinde 30 J, 60 J ve 90 J enerji seviyelerinde daha fazla hasar oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum sentetik köpük malzemesi olan MB yoğunluğunun darbe enerjisine doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Darbe enerjisinin 120 J'a çıkarılması ile fiberler yükü taşıyamaz duruma gelmiş ve delinme meydana gelmiştir. Sonuç olarak, enerji seviyesinin artışı, oluşan hasar şeklini doğrudan etkilemektedir (Ek 1).

Sandviç yapılı kompozitler incelendiğinde, 120 J enerji seviyesinde numunelerin tamamında matris kırılmaları, fiber yırtılmaları ve delinme olayı net bir şekilde görülmektedir. 90 J enerji seviyesinde sadece S5, S6, S7 ve S8'in delinmediği elde edilmiştir. S8 için örnek numune görüntüsü Ek 2'de verilmiştir. Bu durumun 460 kg/m^3 yoğunluğa sahip MB kullanımından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır (Ek 2).

MB içermeyen (epoksi) tabakalı ve sandviç kompozit numunelerin 90 J enerji seviyesinde delindiği, 30 J ve 60 J enerji seviyelerinde ise arka yüzeyde önemli derecede matris çatlakları oluştuğu görülmüştür. MB kullanımının dayanımı olumlu etkilediği elde edilmiştir (Ek 3).

Tabakalı yapılı numunelerde vurucu ucun temas ettiği yüzey, sentetik köpük matris elemandır ve vurucu ucun matris eleman içinde ilerlemesi sonucu ilk fiber katmana ulaşmıştır. Fiberler köpük çekirdek elemanlarının arasında konumlandırılmıştır. Sandviç yapılı numunelerde, dış katmanlar epoksi içine gömülü fiberlerden, orta katmanlar ise sentetik köpük çekirdeklerden oluşmaktadır. Sandviç yapının tabakalı yapıya göre daha az mukavemetli olduğu görülmüştür. Sandviç yapılı numunelerin darbe dayanımının

düşük olmasının başlıca sebebi, katmanların yapıştırıcı ile bir araya getirilmesidir. Bir diğer etken ise vurucu ucun temas ettiği yüzeylerin farklı olmasıdır.

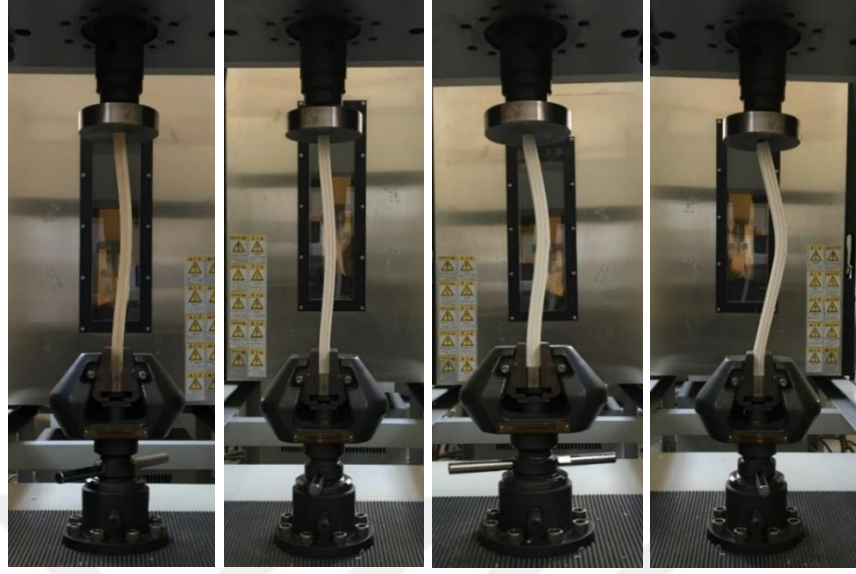
4.2. Burkulma Deneyi Sonucu Bulgular

Bu bölümde, sentetik köpük çekirdekli fiber takviyeli kompozit kirişlerin burkulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, burkulma yükünün hesabı için, yirmi altı adet kompozit kirişin her birinden 4 adet olmak üzere toplam 104 adet numune üretildi ve test edildi. Dikey konumdaki numuneler, eksen boyunca bası yükü altında teste tabi tutuldular. Bir numunenin burkulma yükü, o numuneye ait deneylerden elde edilen sonuçların ortalamaları alınarak elde edilmiştir.

Kritik burkulma yükü, elastisite modülü (E), atalet momenti (I) ve kirişin uzunluğuna (L) bağlıdır. Burkulma testlerine tabi tutulan malzemelerin tümü aynı uzunluğa sahiptir. Ve bu yük, malzemenin mukavemetinden bağımsızdır. Bu yüzden, kritik burkulma yüklerini yorumlarken malzemenin eğilme rijitliği dikkate alınır. Burkulma olayına karşı, eğilme rijitliği yüksek olan kirişler (EI), eğrilme rijitliği az olan kirişlerden daha iyi karşı koyabilir.

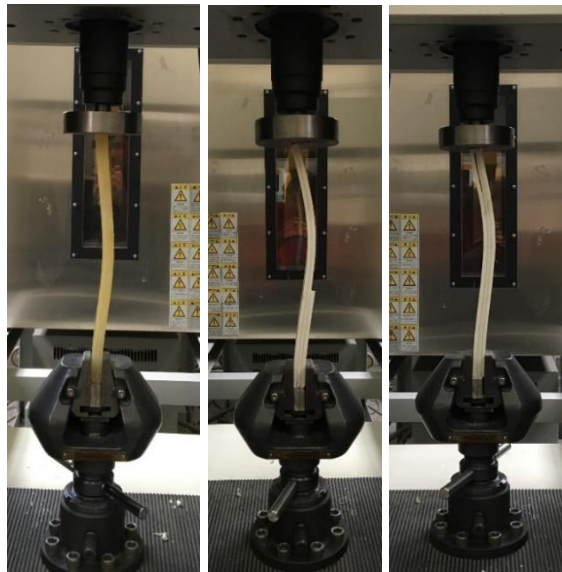
4.2.1. Tabakalı numunelerin deneysel sonuçları

Numune üretimi tamamlandıktan sonra, numunelere burkulma testleri yapıldı. Çeneler numune kalınlığına göre ayarlandı ve numuneler burkulma test cihazına uygun pozisyonda yerleştirildi. Numunenin bir kenarı alt çeneye sabitlenerek diğer kenarından birim yük uygulandı. Deneme testlerinden ve cihaz ayarlarından sonra, tüm tabakalı numuneler için testler yapıldı. Kuvvet-yer değiştirme grafikleri bilgisayar ortamında temin edildi ve kritik burkulma yükü tespit edildi. Numunelerin yanlış konumlandırılmasından dolayı yaşanan hatalar için bu testler tekrar edildi. Eksenel bası yükü altında bazı numuneler için burkulma olayı görüntüleri verilmiştir. Numunelerin hepsinin burkulma yükü altında, flambaj davranışı sergilediği görülmüştür. Tabakalı kompozit numunelerde flambaj oluşum aşamaları Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Tabakalı kompozit numunelerin deformasyon gösterimi

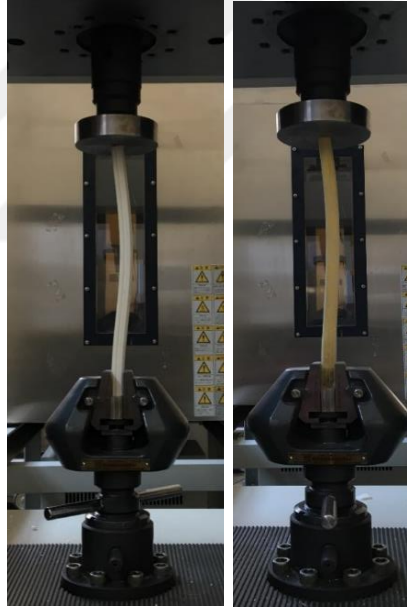
Burkulma yükünün artması ile eğilmenin yaşandığı dış katmanlarında matris hasarları başlamıştır. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi ile birlikte yük fiberlere iletilmektedir. Yapının yükü taşıyamaz duruma gelmesi sonucu, numuneler doğrusal olmayan davranış sergileyerek, fiber-matris kırılmaları ve ani numune kırılması gözlemlenmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Tabakalı kompozit numunelerin hasar görüntüleri

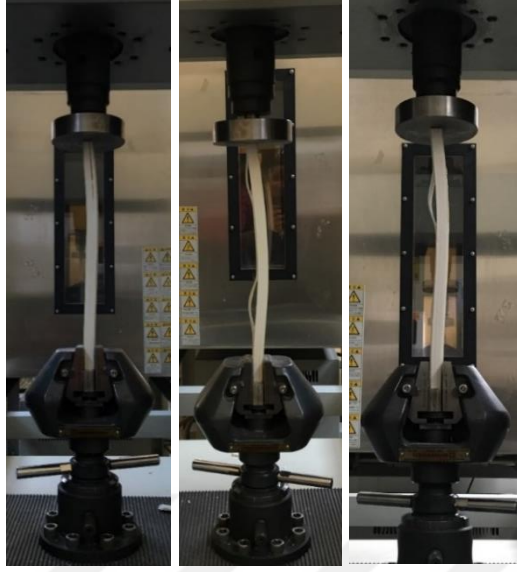
4.2.2. Sandviç numunelerin deneysel sonuçları

Bu bölümde, sandviç kompozit kirişlerin elastik burkulma davranışının incelenmesi sunuldu. Tabakalı numunelerin test işlem aşamaları, sandviç numuneler için de gerçekleştirildi. Tabakalı numunelerin uğradığı hasar ile sandviç yapılı numunelerin uğradığı hasar arasında dikkate alınacak derecede fark gözlemlenmiştir. Tabakalı numunelerin yapısında matris hasarları ve ani kırılmalar oluşurken, sandviç numunelerin yapısında matris hasarları, tabaka ayrılmaları ve daha sonra numune kırılma olayları oluşmuştur. Şekil 4.18’de aksenal bası yükü altında sandviç numuneler için örnek burkulma deformasyon görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.18. Sandviç kompozit numunelerin deformasyon gösterimi

Burkulma esnasında katmanlar arasında kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Bu kayma gerilmeleri delaminasyon ile ifade edilen ayrılmalara sebebiyet vermiştir. Sandviç numunelerin çoğunda, numunenin dış yüzeylere yakın katmanlarında ince film tabaka ayrılması olarak gözlemlenirken, diğer tabakaların bütünlüğünü koruduğu görülmüştür (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Sandviç kompozit numunelerin hasar görüntüleri

Her bir kompozit için deneysel testler sonucunda elde edilen kritik burkulma yük “ P_{cr} ” değeri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Numune kodları, tabakalı ve sandviç numunelerin katman ve bileşenlerini ifade etmektedir. “Materyal Yöntem” bölümünde numune bilgileri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

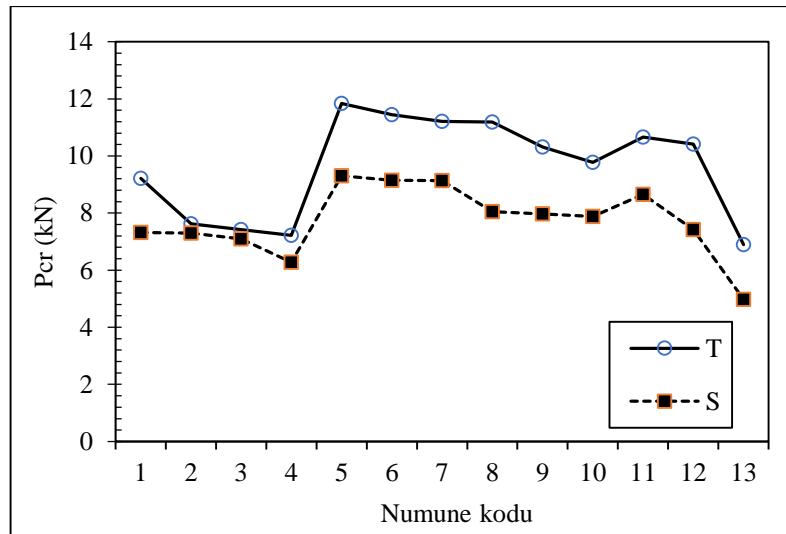
Çizelge 4.1. Kompozit numunelerin burkulma yük değerleri

Numune Adı	Tabakalı P_{cr} (kN)	Sandviç P_{cr} (kN)
1	9,220	7,320
2	7,625	7,300
3	7,416	7,100
4	7,215	6,275
5	11,840	9,300
6	11,450	9,150
7	11,212	9,133
8	11,191	8,045
9	10,312	7,966
10	9,775	7,876
11	10,660	8,654
12	10,410	7,425
13	6,893	4,975

Kritik burkulma yükü, teste tabi tutulan yapının sadece rijitliği ve uzunluğuna bağlıdır. Kompozit malzemelerin, bileşenlerine ve katmanlarına göre elastik özellikleri değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, bütün numunelerin boyu aynı olup bileşenleri farklıdır. Kritik burkulma yüklerinin kıyaslamaları malzeme bileşenleri ve hacim oranlarına göre yapılmıştır.

Çizelge 4.1 incelendiğinde, cidar kalınlığı daha düşük bir köpük çekirdek malzemesi kullanıldığı zaman, kuvvet, daha küçük bir yer değiştirme aralığında burkulma yüküne yükselir. K₄₆ MB türü kullanıldığında ise daha uzun yer değiştirme aralığında burkulma yükü elde edilir.

Kompozit ve tabakalı polimer kompozit malzemelerde kritik burkulma yükünün değişimi, köpük çekirdek malzemelerin enerji absorbe etme yeteneğinin bir sonucudur. Ek olarak, köpük çekirdek malzemelerinde MB hacim oranı belli bir değer üzerinde kullanıldıkça, kuvvet seviyelerinin ve yer değiştirmelerin arttığını; böylece daha yüksek seviyelerde burkulma yüküne ulaşıldığı elde edilmiştir. K₄₆ MB türünün %30-30-30 hacim oranında kullanılmasıyla üretilen cam fiber takviyeli tabakalı kompozit yapıların en iyi performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.20. Kompozit numunelerin burkulma yüklerinin karşılaştırması

Şekil 4.20, tabakalı ve sandviç yapılı numunelerin burkulma yüklerini kıyaslamak için elde edilmiştir. Katman diziliminin aynı olduğu iki yapı incelendiğinde, yüksek elastisite modülüne sahip MB türünün ve katmanlarında %30 hacim oranında MB kullanımının burkulma cevabını olumlu etkilediği görülmektedir. MB içermeyen yapılarda kritik burkulma yükü daha düşük çıkmaktadır. Sonuç olarak, epoksi matris içerisine MB ilavesi ve fiber takviyesi ile hafif ve dayanımlı mühendislik malzemeleri elde edilmektedir.



5. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan cam fiber takviyeli sentetik köpük polimer kompozitlerin düşük hızlı darbe ve burkulma davranışları araştırıldı. Bu amaçlar çerçevesinde, numunelerin tabii tutulduğu deneylerden elde edilen bulgular sayesinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

MB yoğunluğu 220 kg/m^3 'den 460 kg/m^3 'e yükseldikçe orantılı bir şekilde MB cidar kalınlığı $0.521 \mu\text{m}$ 'den $1.289 \mu\text{m}$ 'ye çıkmaktadır. MB yoğunluğunun ve cidar kalınlığının artması ile beraber tabakalı ve sandviç yapıları kompozit malzemelerin düşük hızlı darbeye verdikleri cevap pozitif yönde etkilenmektedir. Bu durumda, absorbe edilen darbe enerjisi artış göstermektedir.

MB içermeyen kompozit numunelerden, %30 hacim oranına kadar MB kullanılan yapılar karşılaştırıldığında, darbe dayanımını verimli bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. MB hacim oranı %30'dan %50'ye artmasıyla absorbe edilen enerji miktarı ve buna bağlı olarak düşük hızlı darbe dayanımı azalış göstermektedir. Farklı katman bileşenlerine sahip tabakalı ve sandviç yapıları kompozit numunelerin tümünde katmanlarında %30 hacim oranında MB kullanımı en iyi sonucu vermektedir.

Tabakalı kompozit numunelerin düşük hızlı darbeye verdikleri cevap, sandviç yapıları kompozit numunelerin darbe cevabından daha iyidir. Sandviç yapıların katmanlarını birleştirmek amacı ile kullanılan yapıştırma bağlantısı darbe dayanımını olumsuz etkilemektedir.

Elde edilen deneysel veriler, MB'ların elastisite modülünün artışı ile kritik burkulma yüklerinin arttığını göstermektedir. Katmanların her birinde %30 hacim oranında MB kullanılan numunelerde, sırasıyla K46, S37 ve S22 MB türü kullanılan numunelerin burkulma sonuçlarının daha iyi çıktığı görülmektedir. Tabakalı ve sandviç yapıları kompozit numunelerde tabakalı yapının daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S., 2011. *Impact Engineering of Composite Structures*, Springer Wien, 99p, 107-108p, New York.
- Akdoğan Eker, A., 2008. *Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- Alkeflawi, D.A.A.H., 2018. *Buckling and Post-Buckling Behaviors of Metal Sandwich Beams with Polymeric Foam Core*. M.Sc. Thesis, Erciyes University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kayseri, Türkiye.
- Anderson, T. and Madenci, E., 2000. Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composite Structures*, 50 (3), 239-247.
- Anonim, 2018a. https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/turkiye-tr/ (06.02.2018).
- Anonim, 2018b. https://www.huntsman.com/corporate/a/Home?p_langswitch=1 (08.02.2018).
- Atas, C. and Sevim, C., 2010. On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam. *Composite Structures*, 93, 40-48.
- Ataş, A., 2007. *Dokuma Fiber Takviyeli Paralel Pim Delikli Tabakalı Polyester Kompozit Plakaların Statik Yük Altındaki Davranışlarının İncelenmesi*. Y.L Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Baba, A.B., 2013. *Delaminasyonlu Tabakalı Kompozit Plakaların Burkulma Analizi*. Y.L Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Balcıoğlu, H.E., 2012. *Lateral Buckling of Laminated Composites with Delamination*. MS Thesis, Uşak University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Uşak, Türkiye.
- Bardella, L., Malanca, F., Ponzo, P., Panteghini, A., and Porfiri, M., 2013. A micromechanical model for quasi-brittle compressive failure of glass-microballoons/thermoset-matrix syntactic foams. *Journal of the Ceramic Society*, 34, 2605-2616.
- Baş, A., 2015. *Plastik Katkı Maddeleri'nin, İzotaktik Polipropilen Ahşap Kompozitlerin Yapı ve Özelliklerine Etkisi*. Y.L Tezi, Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yalova, Türkiye.
- Biron, M., 2007. *Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical Information for Plastic Users*. Elsevier, 9p, Oxford.
- Callister, W.D. and Rethwisch, D., 2014. *Materials Science and Engineering*, Wiley Press, 637-661p, USA.
- Campbell, F.C., 2010. *Structural Composite Materials*, ASM International, 272-273p, USA.
- Cantwell, W.J. and Morton, J., 1989. Geometrical effects in the low velocity impact response of CFRP. *Composite Structures*, 12(1), 39-59.
- Cantwell, W.J. and Morton, J., 1991. The impact resistance of composite. *Composites*, 22(5), 347-362.
- Cantwell, W.J., Curtis, P.T. and Morton, J., 1986. An assessment of impact performance of CFRP reinforced with high-strain carbon fibers. *Composites Science & Rechnology*, 25, 133-148.
- CoDyre, L. and Fam, A., 2016. The effect of foam core density at various slenderness

- ratios on axial strength of panles with glass-FRP skins. *Composites Part B*, 106, 129-138.
- CTP Teknolojisi, 1985. Cam Elyaf Sanayi A.Ş., 59s, Eskişehir, Türkiye.
- Demirel, A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Y.L Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Emam, S.A. and Nayfeh, A.H., 2009. Postbuckling and free vibrations of composite beams. *Composite Structures*, 88(4), 636-642.
- Ersoy, H.Y., 2001. Kompozit Malzeme, Literatür, 101-105s, İstanbul, Türkiye
- Esendemir, Ü. ve Caner A.Y., 2018. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (1), 207-215.
- Gibson, L.J. and Ashby, M.F., 2003. *Cellular Solids: Structures and Properties*, Cambridge University Press, 4-11p, England.
- Güney Erkal, Ö., 2015. Karbon Epoksi Kompozitin Camsı Geçiş Sıcaklığı Üzerine Farklı Kürleşme Çevrimlerinin Etkisi. Y.L Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Hassan, M.A., Naderi, S. and Bushroa, A.R., 2014. Low-velocity impact damage of woven fabric composites: Finite element simulation and experimental verification. *Material and Design*, 53 (2014), 706-718.
- Hazizan, Md.A. and Cantwell, W.J., 2002. The low velocity impact response of foam-based sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 33 (3), 193-204.
- Hebert, M., Rousseau, C-E. and Shukla, A., 2008. Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites. *Composites Structures*, 84(3), 199-208.
- Heimbs, S., Heller, S., Middendorf, P., Hähnel, F. and Weiße, J., 2009. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling. *International Journal of Impact Engeneering*, 36, 1182-1193.
- Hibbeler, R.C., 2011. *Mechanics of Materials*, Pearson Prentice Hall, 675-660p, USA.
- Hu, H., Belouettar, S., Potier-Ferry, M. And Makradi, A., 2009. A novel finite element for global and local buckling analysis of sandwich beams. *Composite Structures*, 90(3), 270-278.
- Hull, D., and Clyne, W.T., 1996. *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, 15p, England.
- İçten, B.M., Karakuzu, R., ve Ataş, C., 2007. Tabakalı Kompozitlerde Fiber Yönlenme Açısının Darbe Davranışına Etkisi. Ulusal Mekanik Kongresi, Isparta.
- Kahya, V., 2016. Buckling analysis of laminated composite and sandwich beams by the finite element method. *Composites Part B*, 91, 126-134.
- Kalemtaş, A., 2015. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler. *Putech & Composites*, Nisan, 20-25
- Kara, M., 2006. Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı. Y.L Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Kara, M., 2012. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların Basınç Altındaki Hasar Davranışı. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Karaaslan, N.H., 2007. Helikopter Rotor Palalarında Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi. Y.L Tezi,

- İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Karimpour Reyhan, S., 2015. Sandviç Yapılarda Kullanılan Farklı Dolgu Malzemelerinin Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Y.L Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Kaw, A.K., 2006. Mechanics of Composite Materials, CRC Press(Taylor&Francis), 28p, USA.
- Kayrak, M.A., 1999. Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri. Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, Türkiye.
- Kıratlı, S., 2012. Darbe Hasarlı Tabakalı Kompozitlerin Burkulma ve Esneklik Davranışı, Y.L. Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Konya
- Kickelbick, G., 2006. Hybrid Materials: Synthesis, Characterization and Applications, Wiley-VCH, 1-3, Weinheim
- Koruvatan, A., 2008. Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
- Li, G. and Muthyala, V.D., 2008. Impact characterization of sandwich structures with an integrated ortogrid stiffened syntactic foam core. Composites Science and Technology, 68 (9), 2078-2084
- Mallick, P.C., 2007. Fiber-Reinforced Composites Materials Manufacturing and Design, CRC Press, (89-99p), London, İngiltere.
- Metin, M., 2008. E Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. Y.L Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Moita, J.S., Araújo, A.L., Franco Correia, V.M., Mota Soares, C.M. and Mota Soares, C.A., 2015. Buckling and geometrically nonlinear analysis of sandwich structures. International Journal of Mechanical Sciences, 92, 154-161.
- Nijssen, R.P.L., 2015. Composite Materials an introduction, A VKCN Publication, 16, 60, 88p, Hollanda.
- Onat, A., 2015. Kompozit Malzemeler Ders Notu. Sakarya Meslek Yüksekokulu ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, Sakarya, Türkiye.
- Ödürücü, A., ve Karacan, A., 2018. Tabakalı cam elyaf/epoksi kompozitlerin darbe davranışının deneysel olarak incelenmesi. Journal of Engineering Sciences and Design, 6(3), 435-447.
- Önal, T., 2013. Kompozit Balsa Sandviç Yapıların Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Y.L Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Özdemir, O., 2012. Core Material Effect on Impact Behavior of Glass Fiber Sandwich Composites. MS Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, Türkiye.
- Özdemir, O., Karakuzu, R. and Al-Shamary, A.K.J., 2014. Core-thickness effect on the impact response of sandwich composites with poly(vinyl chloride) and poly(ethylene terephthalate) foam cores. Journal of Composite Materials, 49 (11), 1315-1329.
- Pekbey, Y., 2005. Buckling of Economical Composite Bars. Ph.D. Thesis, Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, Türkiye.
- Pham, T.M., Chen, W., Kingston, J. and Hao, H., 2018. Impact response and energy absorption of single phase syntactic foam. Composites Part B, 150, 226-233.
- Porfiri, M., and Gupta, N., 2009. Effect of volume fraction and Wall thickness on the

- elastic properties of hollow particle filled composites. *Composites: Part B*, 40, 166-173.
- Potoğlu, U., 2012. Sandviç Kompozit Plakların Darbe Davranışları. Y.L Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Rajendran, I. And Vijayaranga, S. Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms. *Computers&Structures*, 79(11), 1121-1129.
- Rousseau, C.E., Plume, G., Goni, M. and Ale, B., 2015. Behavior of syntactic foam under plate impact. *Mechanics Research Communications*, 83, 1-5.
- Sarıtaş, S., 1995. *Engineering Metallurgy and Materials*. Gazi Üniversitesi Yayınları, 5-30s, Ankara, Türkiye.
- Sayer, M., 2009. Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Sayyad, S.A. and Ghugal, Y.M., 2017. Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature. *Composite Structures*, 171, 486-504.
- Schubel, P.M., Luo, J. And Daniel, I.M., 2005. Low velocity impact behavior of composite sandwich panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (10), 1389-1396.
- Sezen, S., Duman, S., Kaplan, O., Ünsan, Y., ve Korkut, E., 2015 Deniz sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basit bir deney düzeneği. *GİDB Dergi*, 3, 41-62.
- Shams, A. and Porfiri, M., 2014. Axisymmetric static and dynamic buckling of hollow microspheres. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 61, 19-31.
- Sönmez, M., 2009. Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. Y.L Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Şahin, Y., 2015. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, 31-32, 36-42, 65-70 118, 126, 156, Ankara, Türkiye.
- Şansveren, F., 2015. Nano Partiküllü Kompozit Üretimi ve Titreşim Özelliklerinin Araştırılması. Y.L. Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Tenek, L., Argyris, J., 1998. *Finite Element Analysis for Composite Structures*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 39, Germany.
- Tortoç, A., 2009. Balsa/PVC Sandviç Yapılarda Kırılma Tokluğu Etkisinin Nümerik Çalışması. Y.L. Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Türkmen, İ. ve Durmuş, H., 2013. Deniz Taşıtlarının Üretiminde Kullanılan Kompozit Malzemeler. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 196, 26-35.
- Türkmen, İ. ve Köksal, N.S., 2013. Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (CTP) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 17-30.
- Wang, J. Wass, A.M. and Wang, H., 2013. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Composite Structures*, 96, 298-311.
- Woldsenbet, E., 2008. Low velocity impact properties of nanoparticulate syntactic foams. *Materials Science and Engineering: A*, 496 (1-2), 217-222.
- Xi, GuoQiang., 1998. *Experimental Investigation and Finite Element Nonlinear Analysis*

- of Continuous Composite Curved Multi-Cell Box-Girder Bridges. Ph.D. Thesis, Ottawa-Carleton Institute Department of Civil Engineering Degree, Ontario, Canada.
- Xiong, J., Vaziri, A., Ma, L., Papadopoulos, J. and Wu, L., 2011. Compression and impact testing of two-layer composite pyramidal-core sandwich panels. *Composite Structures*, 94, 793-801.
- Yapıcı, İ. ve Yapıcı, A., 2012. E-Camı/Epoksi tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2), 48-60.
- Yeşildal, S., 2010. Darbe Yüklerine Maruz Denizel Kompozitlerde Hasar Mekanizmaları. Y.L Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Yıldızhan, H., 2008. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Y.L Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye.
- Yiğit, A., 2010. Petek Yapılı Sandviç Yapıların Dinamik Özelliklerinin İncelenmesi. Y.L Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Yüce, İ., 2007. Dairesel Kompozit Tabakalarda Düşük Hızlı Darbe Hasarının İncelenmesi. Y.L Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Zhou, J. Hassan, M.Z., Guan, Z. and Cantwell, W.J., 2012. The low velocity impact response of foam-based sandwich panels. *Composites Science and Technology*, 72 (14), 1781-1790.

ÖZGEÇMİŞ

Esmâ GAVGALI, 1991 yılında Konya'nın Selçuklu ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Sabancı İlköğretim Okulu'nda 2005 yılında ve lise eğitimini Erzurum Anadolu Lisesi'nde 2009 yılında tamamladı. 2014 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Makine Teorisi ve Dinamiği Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.