

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATMANLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE DESTEKLENMİŞ
NOMEX BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI
DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Muhsin ALÇI**

**Danışman
Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2016
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KATMANLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE DESTEKLENMİŞ
NOMEX BAL PETEĞİ SANDVIÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI
DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Muhsin ALÇI**

**Danışman
Doç. Dr. Recep GÜNEŞ**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2015-5735 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Haziran 2016
KAYSERİ**

KABUL VE ONAY

Doç Dr. Recep GÜNEŞ danışmanlığında **Muhsin ALÇI** tarafından hazırlanan **“Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi”** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

30.06/2016

JÜRİ:

Danışman : Doç Dr. Recep GÜNEŞ



Üye : Prof. Dr. M. Kemal APALAK



Üye : Doç.Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 02/08/2016 tarih ve 2016/34-02... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



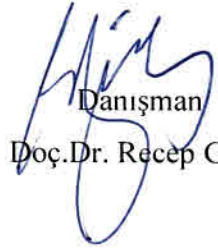
Muhsin ALÇI

YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI

“Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Tezi Hazırlayan
Muhsin ALÇI



Danışman
Doç.Dr. Recep GÜNEŞ



Makine Mühendisliği Bölümü ABD Başkanı
Prof. Dr. Necdet ALTUNTOP

TEŞEKKÜR

“Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapıların Düşük Hızlı Darbe Davranışının İncelenmesi” konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçların değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam sayın Doç. Dr. Recep GÜNEŞ’e teşekkür ederim.

Yaptığımız tüm çalışmalarda bize yol gösteren tecrübelerini bizimle paylaşarak ufukumuzu açan Anabilim Dalı Başkanı hocam sayın Prof. Dr. M. Kemal APALAK’a teşekkür ederim.

Deney numunelerinin üretilmesinde, deneylerin yapılmasında, analizlerin sonuçlandırılmasında yardımcı olan hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa YILDIRIM’a çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Mevlüt HAKAN’a Arş.Gör Umut ÇALIŞKAN’a, Arş. Gör Kemal ARSLAN’a, ve Arş.Gör. Buket TURGUT’a teşekkür ederim.

KATMANLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE DESTEKLENMİŞ NOMEX BAL PETEĞİ SANDVİÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muhsin ALÇI

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2016
Danışman: Doç.Dr. Recep GÜNEŞ

ÖZET

Sandviç kompozitler ve fiber takviyeli kompozitler, mukavemetlerinin ve rijitliklerinin ağırlıklarına oranlarının yüksek olmalarından dolayı hafifliğin önemli olduğu deniz, havacılık, otomotiv, savunma ve inşaat gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadırlar. Bu önemli avantajlarının yanında sandviç kompozitler ve fiber takviyeli kompozitler darbeye karşı oldukça hassastırlar. Düşük hızda darbe hasarının gözle fark edilememesinden dolayı bu kompozitler için en tehlikeli hasar şekli olarak düşünülmektedir.

Bu çalışmada, ilk olarak $[0/90]_4$ şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakanın ve daha sonra E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapıların düşük hızda darbe davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. $[0/90]_4$ şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakalar Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi (Vacuum Assisted Resin Infusion Method-VARIM) ile Erciyes Üniversitesi Mekanik Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Takviye plakalar ile Nomex bal peteği elle birleştirilerek sandviç yapılar elde edilmiştir. Darbe deneyleri ağırlık düşürme darbe cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Nomex bal peteği çekirdek ile $[0/90]_4$ şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi katmanlı kompozit takviye plakalardan oluşan sandviç yapının sayısal olarak modellenmesinde LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Katmanlı kompozit plakaların modellenmesinde delaminasyonun şeklini ve büyüklüğünü modelleyebilen MAT 162 malzeme modeli kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar ile sayısal model arasında uyumluluk elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük hızda darbe, Nomex bal peteği sandviç yapı, Katmanlı kompozit plaka, Eksplisit sonlu elemanlar metodu

**INVESTIGATION ON LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOUR OF NOMEX
HONEYCOMB SANDWICH STRUCTURES REINFORCED BY LAMINATED
COMPOSITE PLATES**

Muhsin ALÇI

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, June 2016

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep GÜNEŞ

ABSTRACT

Sandwich composites and fiber reinforced composites have been used in many different engineering applications in which the lightness is important like aviation, automotive, defense, civil and marine because of their high strength and stiffness to weight ratios. Despite these important advantages, sandwich composites and fiber reinforced composites are vulnerable against impact. Low velocity impact damage is considered as one of the most dangerous damage type for them due to the damage can not be noticed visually.

In this study, low velocity impact behaviour of E-glass/epoxy laminated composites which has $[0/90]_4$ stacking sequence and sandwich composite which is composed of Nomex honeycomb core and $[0/90]_4$ E-glass/epoxy laminated composite face sheets have been investigated numerically and experimentally. The $[0/90]_4$ E-glass/epoxy laminated composite plate was manufactured using Vacuum Assisted Resin Infusion Method (VARIM) in Mechanical Laboratory at Erciyes University. Sheet plates and Nomex honeycomb core were bonded manually in order to obtain sandwich structures. Impact tests were carried out by drop weight impact testing machine.

Numerical simulations for laminated composite facesheet reinforced Nomex honeycomb sandwich structure under low velocity impact were carried out using nonlinear finite element software LS-DYNA with implemented material model MAT 162 which is ability to predict the both orientation and shape of delamination. Good agreement with the experimental result was observed.

Keywords: Low velocity impact; Nomex honeycomb sandwich structures; Laminated composite plates; Explicit finite element method.

İÇİNDEKİLER

KATMANLI KOMPOZİT PLAKALAR İLE DESTEKLENMİŞ NOMEX BAL PETEĞİ SANDVİÇ YAPILARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ	
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Geleneksel Mühendislik Malzemeleri	4
1.2 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	5
1.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	6
1.4 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması	8
1.4.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler	9
1.4.2 Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozitler	11
1.4.2.1. Fiber Takviyeli Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler	15
1.4.3 Yapısal Kompozitler	23
1.4.3.1 Katmanlı (Tabakalı) Kompozitler	24

1.4.3.2 Sandviç Kompozitler	25
1.5 Literatür Özeti	26

2. BÖLÜM

GEREÇ ve YÖNTEM

2.1. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi	42
2.1.1. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi İle Katmanlı Kompozit Yapının Üretiminde Kullanılan Mazlemeler	43
2.1.2. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi İle Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Yapının Üretim Aşamaları	46
2.2. Bal Peteği Sandviç Kompozit Teknolojisi	50
2.2.1. Nomex Bal Peteği Çekirdek	53
2.2.2. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Üretim Aşamaları	54
2.3. Darbe Mekanikliği	56
2.3.1 Düşük Hızda Darbe	57
2.3.1.1 Düşük Hızda Darbe Altında Katmanlı Kompozit Yapıda Oluşan Hasar Modları	58
2.3.1.2 Düşük Hızda Darbe İle Sandviç Kompozitlerde Oluşan Hasar Modları	61
2.4. Sonlu Elemanlar Metodu	62
2.4.1. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakanın Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi	64
2.4.2. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi	67

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1 Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakanın Düşük Hızda Darbe Davranışı	71
---	----

3.2 Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Düşük Hızda Darbe Davranışı	77
---	-----------

4. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç ve Yorumlar	83
4.2 Öneriler	84
 KAYNAKLAR	 85
ÖZGEÇMİŞ	92

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1.	Katmanlı kompozitlerin gösterimi	24
Tablo 1.2.	Farklı malzeme kullanılması durumunda katmanlı kompozitlerin gösterimi	25
Tablo 2.1.	Çekirdek kalınlığının artmasıyla sandviç yapıdaki değişim[65]	51
Tablo 2.2.	Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit malzeme değerleri	69
Tablo 2.3.	Nomex bal peteği malzeme değerleri	69
Tablo 3.1.	22.7 ve 60.3 J için sandviç yapı elamanlarının sönmlediği enerji oranları	79

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1.	Fiber takviyeli katmanlı kompozit plaka	2
Şekil G.2.	Katmanlı kompozit yüzey plakaları ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviçyapı	2
Şekil 1.1.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [7].....	9
Şekil 1.2.	Elastiklik modülünün bakır matris içine saçınmış tungsten parçacıklı kompozit ile değişimi	11
Şekil 1.3.	Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri	11
Şekil 1.4.	Fiber takviyeli kompozitlerde kritik boy hesabı için diferansiyel eleman [5]	13
Şekil 1.5.	Fiber takviyeli kompozitlerde gerilme- fiber boyu ilişkisi [7]	14
Şekil 1.6.	Katmanlı kompozit yapısı.....	24
Şekil 1.7.	Sandviç kompozit örnekleri a) köpük çekirdek, b) ağ çekirdek, c) bal peteği çekirdek.....	26
Şekil 2.1.	Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle 3.2x12 m boyutlarındaki kompozit yapının üretilmesi [69].....	43
Şekil 2.2.	Ayırıcı film	43
Şekil 2.3.	Cam fiber kumaş.....	44
Şekil 2.4.	Soyma kumaşı.....	44
Şekil 2.5.	İnfüzyon filesi	45
Şekil 2.6.	Vakum naylonu.....	45
Şekil 2.7.	Çift yönlü yapışma sağlayan sızdırmazlık bandı	46
Şekil 2.8.	T bağlantı borusu, spiral hortum ve infüzyon filesi.....	46
Şekil 2.9.	Alüminyum masanın (kalıbın) temizlenmesi.....	46
Şekil 2.10.	Ayırıcı filmin alüminyum masa üzerine yapıştırılması	47
Şekil 2.11.	Cam fiber kumaşın serilmesi	47
Şekil 2.12.	Soyma kumaşı ve infüzyon filesinin serilmesi	48
Şekil 2.13.	Vakum ortamının oluşturulması	48
Şekil 2.14.	Reçinenin karıştırılması	49
Şekil 2.15.	Reçinenin vakum ortamında ilerlemesi	49
Şekil 2.16.	800x1200 mm boyutlarında üretilmiş katmanlı kompozit.....	50
Şekil 2.17.	Su jetiyle kesme işlemi ve 85x85 mm boyutlarında kesilmiş katmanlı	

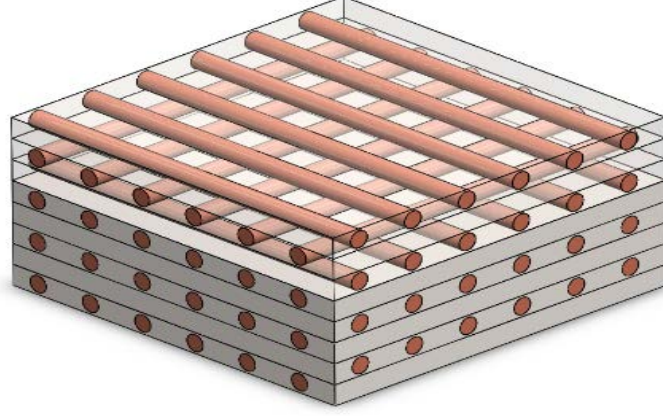
	kompozit.....	50
Şekil 2.18.	Bal peteği çekirdek yapısı [70]	51
Şekil 2.19.	Katı, I ve bal peteği çekirdeğe sahip kırımlarda gerilme dağılımları [71]	52
Şekil 2.20.	Bal peteği çekirdeğin yük altında ezilme davranışı [71]	53
Şekil 2.21.	Nomex bal peteği çekirdek	54
Şekil 2.22.	Nomex bal peteği çekirdek ve yüzey plakaları	54
Şekil 2.23.	Araldite 2015'in yüzey plakalarına dağıtılması	55
Şekil 2.24.	Nomex bal peteği çekirdek ve yüzey plakalarının birleştirilmesi.....	55
Şekil 2.25.	Deneyler için hazırlanmış numuneler.	56
Şekil 2.26.	Yüksek hızda darbeye uğrayan malzemede üç boyutlu büyüyen gerilme dalgaları a) yüksek hızda darbe, b) orta hızda darbe, c) düşük hızda darbe	57
Şekil 2.27.	Düşük hızda darbeye altında katmanlı kompozit yapılarda oluşan hasar modları	59
Şekil 2.28.	Matis çatlağının a) Çam ağacı şeklinde ilerlemesi, b) Ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde ilerlemesi [73].....	59
Şekil 2.29.	a) Çekme çatlağı ve b) Kayma Çatlağı [73]	60
Şekil 2.30.	Farklı katmanlarda oluşan delaminasyon yönlenmesi [73]	61
Şekil 2.31.	Bütün bir geometrinin sonlu sayıda elemana ayrılması [74]	63
Şekil 2.32.	Cam fiber takviyeli katmanlı kompozitin sonlu elemanlar modeli ve gerçek deney şartları	64
Şekil 2.33.	Katmanlı kompozitte delaminasyon yüzeyleri	65
Şekil 2.34.	Nomex bal peteği sandviç yapının sayısal modeli ve gerçek deney şartları	68
Şekil 2.35.	Nomex bal peteğinin elastiklik modülü ve akma değerinin belirlenmesinde kullanılan grafik	70
Şekil 3.1.	Sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması, vurucu enerjisi a) 10.09 J, b) 22.7 J, c) 40.36 J.....	72
Şekil 3. 2	Sayısal ve deneysel kinetik enerji-zaman grafiklerinin karşılaştırılması, vurucu enerjisi a) 10.09 J, b) 22.7 J, c) 40.36 J.....	73
Şekil 3.3.	Darbe enerjisinin 10.09 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması.....	74

Şekil 3.4.	Darbe enerjisinin 22.7 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması.....	75
Şekil 3.5.	Darbe enerjisinin 40.36 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 3.6.	Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için temas kuvvet- zaman grafiği.....	77
Şekil 3.7.	Darbe enerjisinin 63.06 J olduğu durum için temas kuvvet- zaman grafiği.....	78
Şekil 3.8.	Darbe enerjisinin 123.60 J olduğu durum için temas kuvvet- zaman grafiği.....	78
Şekil 3.9.	Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü.....	80
Şekil 3.10.	Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü.....	81
Şekil 3.11.	Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü.....	82

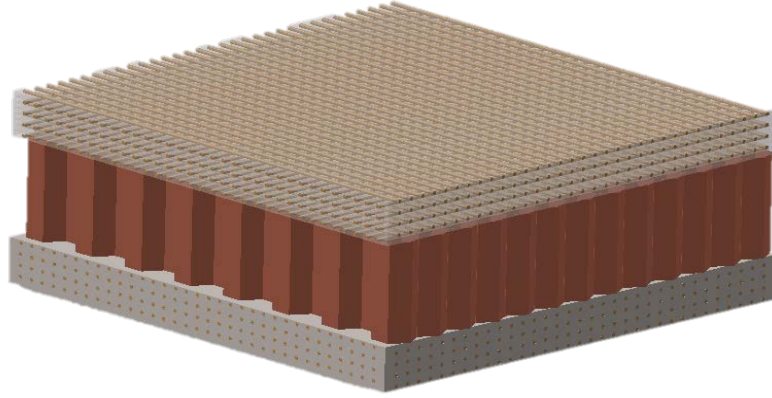
GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişimi ivmeli bir şekilde artmaktadır. Doğada sınırlı sayıda bulunan ve kullanım amacı kısıtlı olan ana malzemeler hızla gelişen teknoloji karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu noktada çözüm olarak, iki ya da daha fazla sayıda birbiri içerisinde çözünmeyen malzemelerin en üstün özelliklerini bir malzeme toplamak ve bu üstün özelliklerden aynı anda yararlanmak amacıyla bir araya getirilen kompozit malzemeler devreye girmektedir. Teorik olarak en az iki malzemenin bir araya getirildiği kompozit malzeme kombinasyonları sınırsız sayıda yeni malzeme oluşturmakta bu durum oldukça geniş bir araştırma alanı doğurmaktadır.

Farklı malzeme özelliklerinin birleştirildiği kompozit malzemelerde, malzemelerin bir araya getirilme şekilleriyle ve geometrileriyle malzeme özellikleri değişebilmektedir. Bu malzemeler yapısal kompozitler olarak adlandırılmaktadır. Yapısal kompozitler, geometrilerinin getirdiği yüksek rijitlik, yüksek mukavemet ve hafifliğin yanında kompoziti oluşturan malzemelerin getirdiği ısı iletkenliği, ısı yalıtkanlığı, aşınmaya karşı direnç, elektrik iletkenliği, elektrik yalıtkanlığı, ses yalıtkanlığı, korozyona karşı direnç, titreşim sönümleme ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay araçlarında, deniz araçlarında, otomotiv sanayinde ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal kompozit örneklerinden olan fiber takviyeli katmanlı kompozit yapı Şekil G.1’ de ve fiber takviyeli katmanlı kompozit yüzey plakaları ile desteklenmiş Nomex bal peteği çekirdeğine sahip sandviç yapı Şekil G.2’ de görülmektedir.



Şekil G.1. Fiber takviyeli katmanlı kompozit plaka



Şekil G.2. Katmanlı kompozit yüzey plakaları ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapı

Katmanlı kompozitler ve sandviç kompozitler birçok avantajları olmasına rağmen düşük hızlı darbenin sebep olduğu iç hasarlara karşı oldukça duyarlıdırlar. Kompozit yapılarda çoğu durumda hasar yüzeyde görülmezken iç hasar kompozit yapının mukavemetini ve kullanım ömrünü azaltmaktadır. Temel mühendislik malzemelerinden metallerde hasara uğrama şekilleri elastik uzama ve plastik deformasyon şeklindedir ve bu hasar tipleri birçok metal için geçerli olup açıklanabilmiştir. Heterojen ve anizotropik yapıya sahip fiber takviyeli katmanlı kompozit yapılar, düşük hızda darbeye maruz kaldıklarında farklı şekillerde hasara uğrarlar. Bu hasarlar:

- 1) Çekme, basma ve kayma gerilmelerinin etkisiyle fiberlere paralel yönde oluşan matris kırılmaları.
- 2) Katmanlar arasında oluşan gerilmelerden dolayı katmanlar arasında meydana gelen ayrılmalar (delaminasyon),
- 3) Fiber kırılmaları ve burkulmaları,
- 4) Nüfuziyet

şeklinde. Hasar modlarının birbirleri arasında oluşan etkileşim farklı hasar modunun başlamasına ve yayılmasına etki eder. Sandviç kompozitlerde oluşan hasar türleri ise;

- 1) Çekirdek burkulması
- 2) Darbenin uygulandığı üst plakada delaminasyon
- 3) Çekirdek kırılması
- 4) Matris kırılması
- 5) Plakada fiber kırılması şeklindedir [1, 2].

Kompozit malzemelerin üretimi ve hasar modlarının deneysel düzeneklerle incelenmesi oldukça pahalı ve zaman alıcı olmaktadır. Araştırmacılar, bu noktada analitik ve daha çok sayısal yöntemlere başvurumaktadırlar. Literatürde katmanlı kompozit ve sandviç kompozitlerin düşük hızda darbe davranışı ile ilgili birçok deneysel, sayısal ve analitik çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda araştırmacılar genellikle geliştirdikleri sayısal ve analitik bir modeli deneysel çalışmalarla doğrulamakta ve doğruladıkları modeli farklı kompozit yapı modellerinde kullanarak deneysel çalışmaların getirdiği masrafları azaltmaktadırlar.

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle $[0/90]_4$ şeklinde istiflenmiş cam fiber takviyeli katmanlı kompozit yapının üretimi vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile gerçekleştirilmiş, düşük hızda darbe deneyleri yapılmış, ve sayısal model oluşturulmuştur. Sonraki aşamada Nomex bal peteği çekirdeğe ve $[0/90]_4$ cam fiber takviyeli katmanlı kompozit yüzey plakalarına sahip sandviç yapı üretilmiş, düşük hızda darbe deneyleri gerçekleştirilmiş ve sayısal model oluşturulmuştur. Sayısal modeller ile deneysel sonuçlar arasında uyumluluk yakalanmıştır.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Geleneksel Mühendislik Malzemeleri

Günümüzde 50.000 den fazla mühendislik malzemesi farklı amaçlar için üretilmekte ve kullanılmaktadır [3]. Bu malzemeler; bakır, dökme demir ve pirinç gibi yüzyıllardır kullanılan geleneksel mühendislik malzemelerinin dışında son yüzyılda geliştirilip yaygınlaşan kompozitler ve ileri teknolojik malzemelere kadar olan geniş bir alanı kapsamaktadır. Bu kadar geniş bir alandan belirli bir amaç için malzeme seçmek, seçilen malzemenin üretim yöntemlerini bilmek, mühendisler için oldukça dikkat gerektiren sıkıntılı bir hale gelmiştir. Bu sebepten malzemelerin rijitlik, mukavemet, yoğunluk, erime noktası vb. gibi karakteristik özelliklerinden faydalanarak malzemeler metaller, plastikler, seramikler ve kompozitler şeklinde dört büyük grup halinde sınıflandırılmıştır.

Metaller, yüzyıllardır kullanılan geleneksel malzemelerdendir. Özellikle farklı metallerin karıştırılmasıyla oluşan alaşımlar da dahil edilince sayıları ve kullanım alanları oldukça geniş hale gelmektedir. Bunlar genel olarak plastik ve kompozitlere nazaran daha ağırdırlar. Sadece alüminyum, magnezyum ve berilyum gibi bazı metaller yoğunluk olarak plastiklere yaklaşabilmektedir. Örneğin çelik, plastiklerden 4 ile 7 kat arası daha ağırken, alüminyum 1.2 ile 2 kat arası daha ağırdır. Metaller yüksek rijitlik, mukavemet, termal kararlılık ve elektrik iletkenliğine sahiptirler. Metaller, plastiklere göre daha yüksek ısıl dirence sahip olmalarından dolayı yüksek sıcaklıklarda kullanılan vazgeçilmez malzemelerdendir.

Plastikler, son yüzyılda yaygınlaşmış ve özellikle 1980' ler den sonra üretim miktarı olarak çelikle yarışır hale gelmiştir. 1990' lı yıllardan sonra da üretim miktarı olarak geleneksel çeliklerden fazla üretilmeye başlamıştır. Plastikler özellikle düşük ağırlıkları kolay üretilibilmeleri ve korozyon dirençleri gibi özelliklerinden dolayı otomobillerde,

uzay araçları parçalarında ve tüketici malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Parça olarak üretildiklerinde yüzey kaliteleri genelde yüksektir. Bu sayede de metallerde olduğu gibi tekrar işlemlerden geçmezler, üretim maliyetini düşürürler. Plastikler düşük termal kararlılıklarından dolayı yüksek sıcaklıklarda çalışmak için uygun değildir. Çoğu plastiğin kullanım sıcaklığı 100°C iken bazı plastikler 100°C ile 200°C sıcaklıkları arasında kullanılabilmektedir.

Seramikler sahip oldukları güçlü kovalent bağlar sayesinde genelde yüksek sertliğe ve termal kararlılığa sahiptirler. Malzeme türleri arasında en rijit seramiklerdir. En beğenilmeyen özellikleri ise hemen hemen hiç süneklik göstermemeleri ve çok kırılğan olmalarıdır. Seramikler çok yüksek erime noktalarına sahiptirler ve aşınma dirençleri de oldukça iyidir. Bu özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda ve aşınmanın olduğu yerlerde kullanılırlar. Ancak seramik malzemelerin işlenebilirliği kolay olmadığı gibi, işlenmeleri de oldukça pahalıdır.

Kompozitlerin mühendislik malzemesi olarak araştırılıp geliştirilmesi 1930'lu yıllarda başlamıştır. Kompozit malzemeler, beğenilen özelliğe sahip geleneksel malzemelerden en az iki tanesinin makro boyutta birleştirilmesiyle istenilen özelliklerin elde edildiği yeni malzemelerdir. Özellikle hafiflikleri, yüksek mukavemet değerleri ile ortaya çıkan kompozitler, çeliğe göre %60-%80 arası, alüminyuma göre ise %20-%50 arası ağırlıkta azalma sağlayarak, hafifliğin önemli olduğu alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışmasının temelini oluşturan kompozit malzemeler ayrı bir başlık altında daha ayrıntılı olarak tanımlanmış ve incelenmiştir [3].

1.2 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Günümüzde kompozit malzeme denilince akla mühendislik bilgileriyle yoğrulmuş, üretimi zor, maliyeti yüksek ve çok karmaşık yapılara sahip malzemeler gelse de insanoğlunun ürettiği kompozit malzemelerin kökeni çok eskilere uzanmaktadır. Bilinen en eski kompozit malzemelerden birisi milattan önce Mezopotamya bölgesinde tahta parçalarının bir araya getirilip yapıştırılmasıyla üretilen kontrplak malzemelerdir. Mısır ve Mezopotamya bölgesinde yapılan arkeolojik çalışmalar samanın balçıkla birleştirilmesiyle oluşan kerpicin milattan önce 2181-2055 yıllarında dahi kullanıldığını

göstermektedir. M.Ö 25 yılları civarında yazıldığı tahmin edilen ‘De architectura’ isimli kitapta günümüzde de kullanılan Portland çimentosu betonundan bahsedilmektedir.

1200’ lü yıllarda Moğollar savaşlar kazanmalarında çok etkili olan günümüzün modern kompozit tanımına da uyan yayları icat etmişlerdir. Bu yayda tahta, boynuz, deri, geyik boynuzu, tendon ve bambu kullanılmıştır. Ana gövdeyi boynuzlar oluştururken tendon ve derinin görevi ise ana gövdeyi bir arada tutmaktır. Yapıştırıcı olarak ise balık tutkalları kullanılmıştır. Savaşlarda ateşli silahlar kullanılabildiği kadar Moğol yayları en uzun menzile sahip silahlar olarak kullanılmıştır. 1800’lü yıllarda selüloit, bakalit ve melamin gibi çapraz bağlanabilen moleküler yapıya sahip reçinelerin kullanılmaya başlaması kompozit malzemelerin gelişiminde bir dönüm noktası olmuştur.

1930’lu yıllar ise modern kompozit malzemelerin üretiminin başladığı yıllar kabul edilmiştir. Owens Corning şirketi 1935 yılında ilk fiber takviyeli kompoziti üretmiştir. Günümüzde de kür özelliklerinden dolayı kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılan polyeater reçinelerin 1936 yılında ilk patenti alınmıştır. 1938 yılında daha üstün özelliklere sahip epoksi reçineler kullanılmaya başlanmıştır.

1940’ lar da özellikle II. Dünya Savaşı’nın başlamasıyla kompozitlere olan ilgi artmıştır. Özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlıklarından dolayı cam elyaf takviyeli kompozitler yaygınlaşmıştır. 1947 yılında kompozit parçalar otomobil üretiminde kullanılmaya başlanmış ve 1950’li yıllarda artık farklı kompozit üretim metodları geliştirilmiştir.

1961 yılında cam fiber takviyeli kompozitlere nazaran daha üstün özelliklere sahip ilk karbon fiber takviyeli kompozitin patenti alınmıştır. 1971 yılında kimyasal direnci, darbe direnci ve ısı dayanımı yüksek olan Kevlar, DuPont firması tarafından piyasaya sürülmüştür. 1980’li yıllardan sonra artık geleneksel malzemelerin yerini farklı üretim metodlarının da geliştirilmesiyle üretimi daha da kolaylaşan, birden çok işlevi yapabilecek şekilde tasarlanan kompozit malzemeler almaya başlamıştır [4].

1.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin geleneksel mühendislik malzemelerine göre birçok avantajları bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Kompozit malzemeler çok yüksek özgül mukavemet değerlerine sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde uçaklarda ve otomobillerde yaygın şekilde kullanılmakta ve yakıt tasarrufu sağlamaktadırlar. Kompozitlerin özgül mukavemetleri çelik ve alüminyum alaşımlarının 3 - 5 katı arasında değişmektedir.
- Kompozit malzemeler yüksek yorulma dayanımına sahiptirler. Çelik ve alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımları statik dayanımlarının %50' sine kadar çıkabilirken, bu oran karbon/epoksi kompozitler için %90' ı bulmaktadır.
- Kompozit malzemeler yüksek korozyon dayanımına sahiptirler. Demir ve alüminyum su ve havanın varlığında kolay bir şekilde korozyona uğrarlar. Demir ve alüminyumda korozyonu önlemek için kaplama alaşımlandırma gibi fazladan işlemlere ihtiyaç duyulurken, kompozit üretiminde uygun malzemenin seçilmesiyle kolay bir şekilde korozyon önenebilir.
- Kompozitlerin en üstün özelliklerinden birisi de darbeye dayanıklı olmalarıdır. Cam ve Kevlar kompozitler çeliklere ve alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek darbe dayanımına sahiptirler.
- Kompozit malzemeler hafifliklerinin yanında yüksek rijitlik ve sertlik değerlerine sahiptirler.
- Kompozit malzemeler geleneksel mühendislik malzemelerine göre daha iyi titreşim sönümleme özelliğine sahiptirler.
- Kompozit malzemeler üretimde kullanılan bileşenlerinin elektriksel özelliklerine göre iyi bir yalıtkan ya da iyi bir iletken olabilirler.
- Kompozit malzemeler üretim sonunda iyi bir yüzey kalitesine sahiptirler.
- Kompozit malzemelerde çatlak ilerlemesi uygun malzeme bileşenlerinin seçilmesiyle en aza indirilebilir.
- Kompozit malzemelerde üretim esnasında reçineye ilave edilen uygun kimyasallarla istenilen renk verilebilir. Bu sayede ek işçilik ve masraftan kaçınılmış olunur.

Avantajlı yanlarının olduğu gibi kompozit malzemelerin de dezavantajları bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir;

- Kompozit malzemelerin üretimi alüminyum ve çeliğin üretimine göre oldukça pahalıdır. Birim ağırlığın fiyatı göz önüne alındığında kompozitlerin fiyatı alüminyum ve çeliğin fiyatına göre 5 - 20 kat arası daha fazladır.
- Geleneksel mühendislik malzemelerinin darbe altındaki elastik şekil değişimi, plastik deformasyon gibi davranışları açıklanabilmiştir. Ancak kompozitlerin darbe altındaki davranışları birbirlerinden çok farklıdır. Bu nedenle kompozitlerin darbe altındaki davranışı henüz standartlaştırılıp tam olarak açıklanamamıştır.
- Geleneksel malzemelerin standartlaştırılmış üretim yöntemleri bulunmaktadır. Kompozit malzemeler sınırsız kombinasyonlardan meydana geldiği için üretim yöntemlerinin standartlaştırılması zor olmaktadır.
- Kompozit malzemelerin termal dirençleri bileşenlerinin özelliklerine bağlıdır. Matris malzemesi olarak polimerlerin kullanıldığı kompozitlerde termal direnç düşüktür.
- Kompozit malzemeler nemden etkilenirler. Nem ile kompozit malzemelerin mukavemet değerlerinde azalma olur [5].

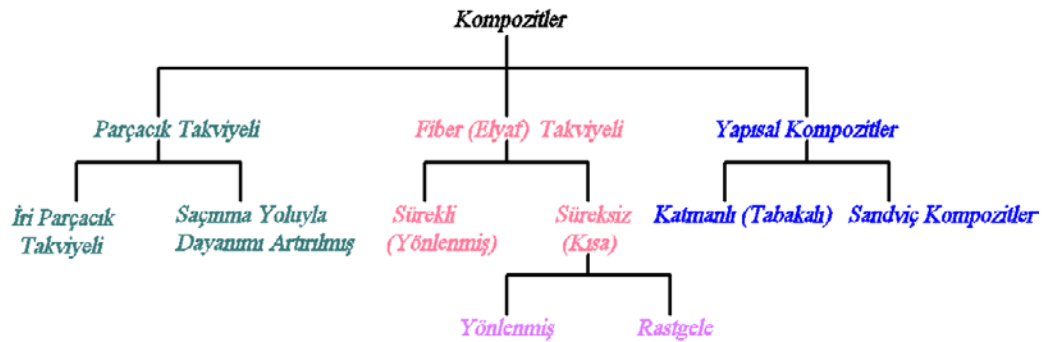
1.4 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Kompozit malzeme; iki ya da daha fazla sayıdaki, birbiri içerisinde çözünmeyen malzemelerin üstün özelliklerini, yeni bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde üretim aşamasında birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemeler genelde iki ayrı fazdan meydana gelmektedirler. Bunlar matris ve takviye elemanıdır. Matrisin görevi takviye elemanlarını bir arada tutmak, gelen yükü takviye elemanlarına iletme ve takviye elemanını korumaktır. Matris malzemesine göre genelde daha rijit bir yapıda olan takviye elemanlarının görevi ise kompozit yapı üzerine gelen yükün ekseriyetini taşımak, yapının rijitliğini ve mukavemetini artırmaktır [6].

Kompozit malzemeler üretilirken yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek rijitlik, yüksek yorulma dayanımı, kırılma tokluğu, yüksek aşınma direnci, yüksek sıcaklığa dayanım, ısı iletkenlik veya ısı yalıtım, elektrik iletkenliği veya elektriksel yalıtım ve akustik iletkenlik gibi belirli üstün bir özelliği sağlamak amacıyla tasarlanır ve üretilirler. Üretilen kompozit malzemelerde sayılan özelliklerin hepsini bir arada toplamak mümkün olmamaktadır. Ancak birden çok istenilen özellik bir kompozit malzeme de toplanabilir.

Örneğin; elektrik iletkenliği iyi olan bir kompozit malzemenin mukavemetinin yüksek olması ve yoğunluğunun düşük olması istenilebilir.

Belirlenen farklı özellikleri bir arada toplayabilen kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin birleşimiyle oluştuğu için sınırsız kabul edilebilecek bir malzeme kombinasyonuna sahiptir. Bu malzeme kombinasyonlarına bir de üretim yöntemlerinin çeşitliliği eklendiğinde kompozit malzemeleri sınıflandırmak oldukça güç bir hale gelmektedir. Literatürde kompozit malzemelerin herkes tarafından kabul görmüş ve standartlaşmış bir sınıflandırılması bulunmamaktadır. Ancak kompozitler matris malzemesine , matris-takviye elemanı malzemesine, takviye elemanlarının şekillerine ve yerleştirilmelerine göre sınıflandırmalara sahiptirler. Genel olarak kullanılan bir diğer sınıflandırma şekli ise Şekil 1.1'deki gibidir.



Şekil 1.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [7]

1.4.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler

İri parçacıklı ve saçınma yoluyla dayanımı artırılmış kompozitler parçacık takviyeli kompozitleri oluşturmaktadır. Bunlar arasındaki ayırım takviye veya dayanım artırma mekanizmalarına göre yapılır. İri terimi sürekli ortam mekaniğindeki kullanımından farklı olarak parçacık-matris etkileşiminin atomsal veya moleküller boyutta olmadığını ifade etmek için kullanılır. Parçacık takviyeli kompozitler; tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu $1\mu\text{m}$ 'den büyük ve elyaf hacim oran %25'den fazla kullanılmamaktadır. Burada yük elyaf ve matris tarafından birlikte taşınırken özellikler genelde izotropiktir. Bu kompozitler

metal seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler ve çoğunda parçacık fazı matrinden daha sert ve rijittir. Esas itibariyle, matris, uygulanan yükün bir kısmını oransal olarak taşıması amacıyla parçacıklara aktarır. Mekanik özelliklerin artırılması veya iyileştirilme miktarı, matris – parçacık ara yüzündeki bağın dayanımına bağlıdır.

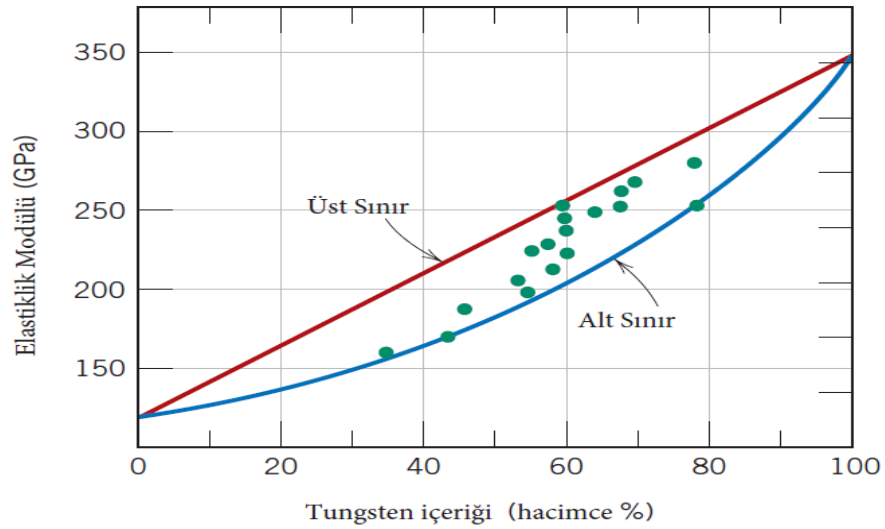
Saçınım ile dayanımı artırılmış kompozitlerde parçacıklar normalde çok daha küçük olup çapları 10 nm ile 100 nm arasındadır. Parçacık matris etkileşimi, atomsal veya moleküler seviyede dayanım artışına sebep olur. Dayanım artışı çökeltme sertleşmesi (bazı metal alaşımlarının sertlik ve dayanımı, uygun ısı işlemler sonrasında son derece küçük ikinci faz parçacıklarının matris fazı içinde uniform şekilde dağıtılması sonucu artırılabilir, Bu yapıda dağılmış haldeki küçük yeni faz parçacıkları çökelti olarak isimlendirilir ve olaya da çökeltme sertleşmesi veya yaşlandırma sertleşmesi denir.) mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Burada matris uygulanan yükün önemli bir kısmını taşıırken, küçük saçınmış parçacıklar dislokasyon hareketini yavaşlatır veya engeller. Böylece plastik şekil değişimi sınırlandırılarak, akma ve çekme dayanımı yanında sertlik artışı da sağlanmış olur [7].

Etkili bir takviyenin oluşturulabilmesi için parçacıklar küçük boyutlu olmalı ve matris içinde homojen bir şekilde dağılmalıdır. Ayrıca matris ve parçacıklarının hacim oranları da kompozitin davranışlarını etkiler. Örneğin, mekanik özellikler artan takviye parçacık oranı ile artar. İki fazlı kompozitlerin elastiklik modülünü ifade etmek için iki matematiksel ifade kullanılır. Karışım kuralı da denilen bu matematiksel ifadelerden karışımın elastiklik modülü için alt ve üst değerler bulunabilir.

$$E_k(\ddot{u}) = E_m V_m + E_p V_p \quad (1.1)$$

$$E_k(a) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (1.2)$$

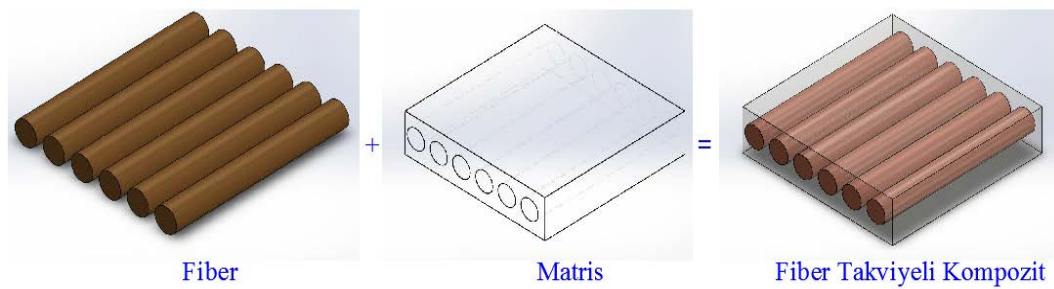
Elastiklik modülünün alt ve üst sınırının takviye parçalarıyla nasıl değiştiği bakır matris içine saçınmış tungsten parçacıklı bir kompozit için çizilen Şekil 1.2'deki grafikten görülmektedir.



Şekil 1.2. Elastiklik modülünün bakır matris içine saçınmış tungsten parçacıklı kompozit ile değişimi [7]

1.4.2 Fiber (Elyaf) Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler, yüksek dayanım değerlerinde ve hafif fiberlerin nispeten daha düşük dayanıma sahip matris malzemesi içine gömülmesiyle elde edilen kompozit yapılarıdır. Malzemelerin bu şekilde birleştirilmesindeki amaç ise özgül dayanımı ve özgül elastiklik modülü yüksek yeni malzeme elde edilmesidir. Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri Şekil 1.3’de görülmektedir.



Şekil 1.3. Fiber takviyeli kompozit ve bileşenleri

Fiberler kompozit yapıda;

- Kompozit yapıya uygulanan yükün %70’ i ile %90’ını taşırlar,

- Kompozit yapı içerisinde kendi sahip oldukları rijitlik, hafiflik, termal kararlılık, elektirik iletkenliği gibi özellikleri katarlar [3].

Matrisler ise kompozit yapıda;

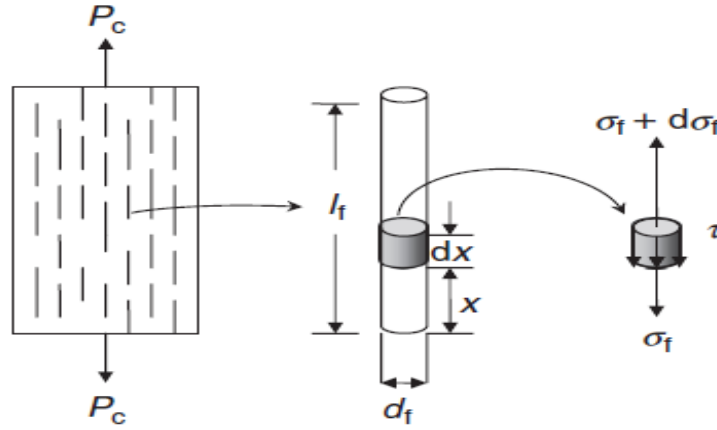
- Fiberleri bir arada tutarlar, gelen yükün ekseriyetini fiberlere devrederler.
- Fiberler arasını doldurarak fiberlerin ayrı ayrı kalmalarını sağlarlar. Bu ise çatlağın ilerlemesi durumunda yavaşlatıcı hatta durdurucu etki yaparlar.
- İyi yüzey kalitesi sağlarlar
- Fiberleri izole ederek kimyasal reaksiyona girmelerini ve aşınmalarını önlerler.
- Fiberlerde olduğu gibi süneklik, darbe dayanımı, tokluk gibi kendi özelliklerini kompozit yapıya katarlar [3].

Fiberlerin kompozit yapı içerisinde bulunma şekilleri kompozitlerin özelliklerini önemli ölçüde etkilediği gibi kompozit yapının işlenebilirliğini de etkilemektedir. Kompozit yapının özellikleri; fiberlerin sürekliliği, yerleştirilme açıları, yoğunlukları ve boyutları gibi faktörlere bağılıdır.

Fiber Uzunluğunun Kompozit Özelliklerine Etkisi

Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri hem fiberin özelliklerine bağılıdır hem de matris fazının yükün ne kadarını fibere iletebildiğine bağılıdır. Fiber takviyeli bir kompozite fiber doğrultusunda bir yük uygulandığında bu yük fiberlere matris ile fiber arasındaki kayma mekanizması aracılığı ile geçer. Kompozit malzemenin dayanım ve rijitliğinin bir şekilde artması için, fiber boyunun kritik bir alt sınırdan daha yukarıda olması gerekmektedir. Matris malzemesinin elastiklik modülü daha küçük olduğu için matrisdeki eksenel uzama fiberlerin uzamasından daha fazla olacaktır. Eğer fiberler ile matris arasında mükemmel bağ olduğu kabul edilirse fiberler ile matris malzemesi arasında eşit miktarda uzama olmasından dolayı kayma gerilmesi dağılımı oluşacaktır. Kesit alanları ile fiber arasındaki gerilme iletimi ve yakın fiberler arasındaki etkileşim ihmal edildiğinde basit kuvvet eşitliğinden normal gerilme dağılımı hesaplanabilir. Şekil 1.4 göz önüne alındığında dx fiber üzerindeki x noktasında sonsuz küçük bir eleman, x bu elamanın fiberin ucuna olan uzaklığı olmak üzere elaman üzerindeki kuvvet eşitliği;

$$\left(\frac{\pi}{4}d_f^2\right)(\sigma_f + d\sigma_f) - \left(\frac{\pi}{4}d_f^2\right)\sigma_f - (\pi d_f dx)\tau = 0 \Rightarrow \frac{d\sigma_f}{dx} = \frac{4\tau}{d_f} \quad (1.3)$$



Şekil 1.4. Fiber takviyeli kompozitlerde kritik boy hesabı için diferansiyel eleman [5]

elde edilir. Denklem (1.3)' de;

- σ_f : Fiberin bir ucuna x mesafesi kadar uzaktaki eksenel gerilme
- τ : Fiber matris ara yüzeyindeki kayma gerilmesi
- d_f : Fiber çapı

Denklemde fiber uçlarındaki gerilmeler sıfır kabul edilirse yani $x=0$ iken $\sigma_f=0$ olursa;

$$\sigma_f = \frac{4}{d_f} \int_0^x \tau dx \quad (1.4)$$

elde edilir. Denklem (1.4) de ara yüzey kayma gerilmesinin sabit olduğu farz edilip (τ_i), τ integral dışına alınırsa;

$$\sigma_f = \frac{4\tau_i}{d_f} x \quad (1.5)$$

elde edilir. Denklem (1.5) den görülebileceği gibi fiber üzerindeki normal gerilme değeri x ile doğru orantılı bir şekilde değişmektedir. Normal gerilmenin maksimum olduğu yer

ise $1/2$ değerindedir. x yerine $1/2$ yazılıp denklem yeniden düzenlenirse maksimum normal gerilmenin değeri;

$$(\sigma_f)_{\text{mak}} = 2\tau_i \frac{l_f}{d_f} \quad (1.6)$$

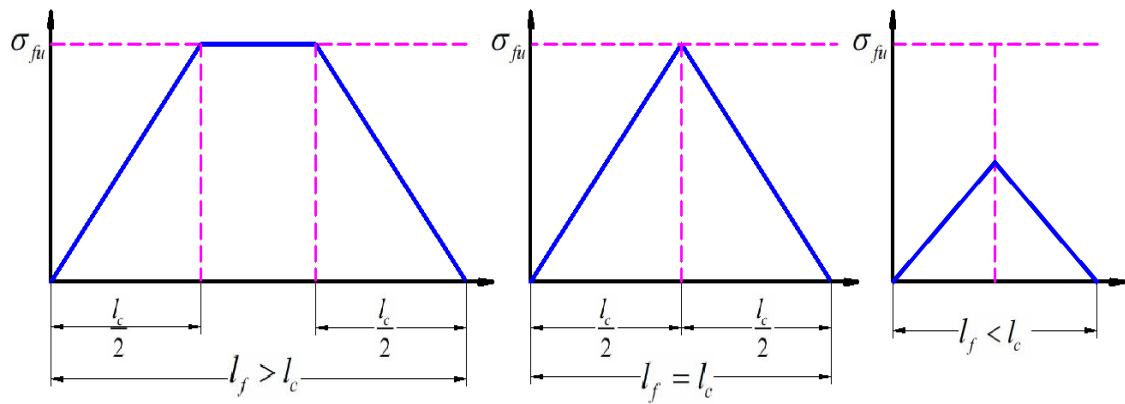
şeklinde elde edilir. Denklem (1.6) da l_f nin yalnız bırakılmasıyla kritik boy olan l_c elde edilir.

$$l_c = \frac{\sigma_{fu}}{2\tau_i} d_f \quad (1.7)$$

Denklem (1.7)' deki ;

- σ_{fu} :Fiberin maksimum çekme dayanımı
- τ_i : Fiber-elyaf ara yüzey bağı dayanımı veya matrisin kayma akma dayanımı (hangisi küçükse)
- l_c : Kritik fiber boyudur.

Gerilme değeri σ_{fu} 'ya eşit olduğunda kritik boydaki elyafa etkiyen gerilme-fiber boyu ilişkisi Şekil 1.5'deki gibi olmaktadır. [



Şekil 1.5. Fiber takviyeli kompozitlerde gerilme- fiber boyu ilişkisi [7]

Bu durumda en yüksek fiber yükü yalnızca fiberin eksenel merkezinde elde edilebilir. Fiber boyu arttıkça fiberin taşıdığı yük miktarı da artar. Fiber boyunun kritik fiber boyundan büyük olduğu durumlar ($l_f \gg l_c$) sürekli fiber takviyeli durum olarak adlandırılırken, fiber boyunun kritik boydan küçük olduğu durumlar ($l_f < l_c$) kısa fiber takviyeli durum olarak adlandırılır ve parçacık takviyeli kompozitlere benzer davranışlar gözlemlenir. Fiber boyunun kritik fiber boyundan küçük olduğu durumlarda ($l_f < l_c$) fiber taşıyabileceğinden daha az yük almış olur. Denklem 1.7'den de görülebileceği gibi aslında kritik boy fiber elyaf ara yüzey bağ dayanımı (τ_i) ile de kontrol edilebilir. Bağ kuvvetinin artmasıyla kritik boy da azaltılabilir [5, 7].

Fiber Yönünün Kompozit Özelliklerine Etkisi

Fiber takviyeli kompozit malzemeler anizotropik davranış gösterirler. Özellikle fiber boyunun kritik fiber boyundan büyük olduğu durumlarda fiberler artık sürekli kabul edilebileceği için kompozit yapı parçacık takviyeli kompozitlerde olduğu gibi izotropik yapı göstermezler. Yani sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerde malzemelerin özellikleri yöne bağlıdır. Yön olarak da özellikle fiber doğrultusunda eksenel yükleme ve fibere dik yönde yükleme durumları mekanik özellikler bakımından kompozitte farklılıklar gösterir.

1.4.2.1. Fiber Takviyeli Kompozit Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Fiber Malzemeleri

Fiber malzemeleri kompozit malzemelerde asıl yükü taşıyan, kompozit malzemelerin mukavemet ve rijitliğini belirleyen kompozit bileşenidir. En yaygın kullanılan fiber malzemeleri cam fiberler, silika fiberler, kuvars fiberler, karbon fiberler, boron fiberler, seramik fiberler, bazalt fiberler, aramid fiberler ve metalik fiberlerdir.

Cam Fiberler

Cam silika kumu, kireçtaşı ve oksit içeren malzemelerin bileşiminden oluşmaktadır. Kimyasal bileşimin farklı oranlarda ayarlanmasıyla ve farklı üretim tekniklerinin kullanılmasıyla çok farklı cam fiber yapıları elde edilebilmektedir. Ancak bu farklı cam

türleri sertlik, korozyon direnci, kimyasal tepkimelere karşı isteksizlik ve hafiflik, kolay şekil verilebilme gibi tipik cam özellikleri gösterirler. Bu özelliklere ek olarak cam ucuz malzemedir. Tüm bu özellikler camı endüstrinin vazgeçilmez malzemelerinden birisi haline getirmektedir.

Cam türleri yaklaşık aynı rijitlik değerlerine sahipken farklı mukavemet değerlerine ve çevrenin olumsuz etkilerine karşı farklı dirençlere sahiptirler. E camı düşük alkali özellikleri sebebiyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre daha iyidir. Yüksek çekme dayanımına, iyi korozyon direncine sahipken ayrıca ucuzdur. S camı cam tipleri arasında en yüksek mukavemet değerlerine sahip olsa da pahalı bir cam tipi olduğu için uygulamaları sınırlıdır. Ancak yine de karbon fiberlere hem mukavemet yönünden hem de fiyat yönünden alternatif oluşturmaktadırlar. C camı yüksek korozyon direncine sahipken D camı düşük dielektrik sabitine sahiptir. D-camı yüksek voltaj seramik yalıtkanlarında çekirdek malzemesi olarak kullanılır. A- camı alkalilere karşı dirençli iken R-camı Avrupa'da kullanılan E-camının Amerika'daki karşılığıdır.

Cam fiberler matris içerisine yerleştirilmeden önce daha yüksek dayanıma sahiptirler. E-camı fiberlerin tek başına akma dayanımı 3.5 GPa iken matris içinde bu dayanım 1.75 GPa'a kadar düşmektedir. Benzer şekilde S-camı fiberlerin akma dayanımı matris dışında 4.5 GPa iken matris içerisinde 2.1 GPa'dır. Akma dayanımlarındaki bu dikkate değer azalmalar genellikle üretim esnasında oluşan hasarlardan kaynaklanmaktadır. Cam fiberlerin çekme mukavemeti artan sıcaklıkla birlikte azalırken korozyon dirençleri de cam fiberleri oluşturan bileşenlere bağlıdır.

Silika ve Kuvars Fiberler

Silika fiberler ve Kuvars fiberler klasik cam fiberlerden bulundurdıkları silika bileşeninin miktarı nedeniyle ayrılırlar. Cam fiberlerde bulunan silika %46-%75 aralığında iken silika fiberlerde bu oran %96-%98 aralığında, kuvars fiberlerde ise %99.95-%99.97 aralığındadır. Silika ve kuvars fiberlerin rijitlik ve dayanım gibi mekanik özellikleri cam fiberlere göre daha iyi olurken, fiyatları ise cam fiberlere göre %25-%50 daha pahalıdır. Silika fiberler 900°C da uzun zaman aralıklarında görevlerini yerine getirebilirlerken Kuvars fiberler 1050°C sıcaklıklara kadar kullanılabilmektedirler. Silika ve kuvars fiberler nemden ve kimyasal ortamlardan az etkilenirlerken diğer bir özellikleri ise radyo

frekansını geçirmeleridir. Silika ve Kuvars fiberler tüm bu özelliklerinden dolayı uzay araçlarında kullanılmaktadırlar.

Karbon Fiberler

Karbon fiberler diğer bir adıyla grafit fiberler, hafiflikleri, yüksek dayanımları ve kimyasal ortamlara karşı mükemmel dirençleri nedeniyle pahalı olmalarına rağmen havacılık sanayi için üretilen kompozit malzemelerin vazgeçilmez fiberleridir. Karbon fiberlerin özelliklerini de bileşenleri belirlemektedir. Karbon fiberlerin yapısında temel iki bileşen kullanılmaktadır. Bunlar poliakrilonitril (PAN) ve zifttir. Zift fiberleri PAN fiberlerine göre daha az mukavemete sahip ve daha ucuzdur. Zift fiberlerin çekme dayanımları PAN fiberlerin yarısına eşitken, basma dayanımları ise PAN fiberlerin üçte biri kadardır. PAN fiberler yüksek performans fiberleri olarak geniş aralıkta değişen mukavemet ve rijitlik değerlerine sahiptirler. Bu nedenle de diğer fiberlere göre uzay uygulamalarında daha çok tercih edilirler. Cam fiberlerin aksine karbon fiberlerin mukavemet ve rijitlik değerleri ısı işlemleriyle değiştirilebilir.

Karbon fiberlerin en büyük avantajlarından birisi çelik ve alüminyum alaşımların yerini alarak yapıda ağırlığın azalmasını sağlamalarıdır. Örneğin, karbon fiberlerin çeşitlerinden birisi olan M50, çelik ile hemen hemen aynı rijitliğe sahipken ağırlığı çeliğin dörtte biri kadardır. Karbon fiberlerin çalışma sıcaklığı ise 315°C ile 537°C arasında değişmektedir. Karbon fiberlerde gerilme korozyonu (statik yorulma) cam fiberlere göre daha azdır. Karbon fiberlerin diğer bir özelliği ise elektriği iyi iletibilmeleridir. Karbon fiberler metallerle bir arada kullanılacakları zaman galvanik korozyonu önlemek için metallerle karbon fiberler arasında yalıtkan başka maddeler kullanılmalıdır. 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksijenin bol olduğu ortamlarda karbon fiberlerde kimyasal olarak zarar görmektedir. Karbon fiberin kullanımını kısıtlayan bir diğer sebep ise yüksek rijitlik ve kırılganlıkları nedeniyle şok dirençlerinin düşük olmasıdır.

Boron Fiberler

Tungsten telin üzerine Hidrojen ve Bortriklorürün kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle üretilen Boron fiberlerin genel özellikleri yüksek rijitlik, yüksek dayanım ve düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Boron fiberlerin en yaygın kullanıldığı alanlar ise uzay

uygulamaları ve spor ürünleridir. Boron fiberler yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmektedirler. Yüksek tokluk değerleri, kırılma dayanımları ve basma dayanımlarına sahiplerdir. Ancak kırılgan oldukları için düşük hızda darbelerden çok çabuk zarar görmektedirler.

Seramik Fiberler

Seramik fiberler Boron fiberler gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar. En sık kullanılanları silikon karbit (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) dir. SiC'in erime noktası $2830^{\circ}C$ iken Al_2O_3 'in erime noktası $2045^{\circ}C$ dir. SiC dayanımını $650^{\circ}C$ ye kadar korurken Al_2O_3 $1370^{\circ}C$ sıcaklığa kadar mukavemetini koruyabilmektedir. Al_2O_3 fiberler SiC fiberlere göre daha düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahipken daha yüksek ısı genleşmeye sahiptir.

Bazalt Fiberler

Bazalt fiberler, volkanik bazalt kayalarının eritilip kalıptan geçirilmesiyle (extrude) elde edilirler. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri cam fiberlerden daha iyi iken fiyatları da karbon fiberlerinkinden daha düşüktür. Çok iyi termal ve kimyasal kararlılık gösterirler, yüksek mukavemet ve rijitlik değerlerine sahiplerdir, iyi korozyon dirençleri vardır. Matris ile aralarında güçlü bağ oluşabilir ve radyasyondan etkilenmezler. Diğer fiber türleri gibi köklü kullanım geçmişleri yoktur. Ancak ısı uygulamaları ve yapısal uygulamalar için gelecekte kullanım alanları geniş görülmektedir.

Aramid Fiberler

Farklı amaçlar için üretilebilen aramid fiberler, düşük yoğunluklu fiberler arasında en yüksek çekme dayanımı/ağırlık oranına sahip, darbe dayanımı ve yorulma dayanımı yüksek fiberlerdir. Nomex ve Kevlar en bilinen iki çeşididir. Aramid fiberler hafifliğin ön plana çıktığı birçok alanda kullanılmaktadır. Balistik koruma amaçlı askeri kasklarda ve kurşun geçirmez yeleklerde, deniz ve hava araçları gövdelerinde, otomotiv sanayinde kullanılmaktadır. Ancak tüm bu olumlu özelliklerinin yanında aramid fiberler ultraviyole ışınlarından çabuk etkilenmektedirler.

Metalik Fiberler

Metalik fiberler, farklı ihtiyaçlar için metal malzemelerin fiber şeklinde retilmeleriyle elde edilirler. Örneğin hafifliğin gerekli olduğu uygulamalarda Alüminyum fiberler, mukavemet uygulamalarında elik fiberler ve rijitliğin önemli olduğu uygulamalarda Tungsten fiberler uygulanabilir. Elektrik ve ısı iletkenliğinin önemli olduğu durumlarda da metalik fiberlerden faydalanılabilir [8].

Matris Malzemeleri

Matris malzemeleri fiberleri bir arada tutarlar, fiberleri dış ortamlardan korurlar ve gelen yükü fiberlere ileterek, asıl yükün fiberler tarafından taşınmasını sağlarlar. Kompozit'in çalışma sıcaklığı, kimyasal direnci, aşınma dayanımı, elektrik iletkenliği, ısı iletkenliği, görünüm, maliyet, gibi kullanım şartlarının belirlenmesinde matris malzemeleri fiberlere nazaran daha etkili olmaktadır. Örneğin erime sıcaklığı 200°C olan bir matrisin içerine sıcaklığı 2830°C olan SiC konulsa dahi bu kompozitin kullanılabileceği sıcaklığın st sınırını matris malzemesi belirlemektedir. Fiberlerin maksimum yükü taşıyabilmeleri için matris malzemesinin fiberlere göre daha düşük elastiklik modülüne ve daha yüksek uzama değerine sahip olmaları gerekmektedir. Fiber takviyeli kompozitlerde matris malzemeleri olarak seramik ve metaller de kullanılsa da yaygın olarak polimer sınıfindan termoset reçineler ve termoplastik reçineler kullanılmaktadır. Termoset reçineler ilk hallerinde genelde sıvıdırlar veya düşük erime noktasına sahip katıdırlar. Termoset reçineler bir katolizrn, ısının veya her ikisinin etkisiyle katı hale geçerler ve katılaştıktan sonra sıvı hallerine dndrlemezler. Termoplastik reçineler katı haldeyken ısıtıldıklarında yumuşarlar ve kolayca şekillendirilebilirler. Termoplastikler termosetlere göre daha düşük sürünme direncine sahiptirler. Termosetlere göre kimyasal ortamlardan daha çok etkilenirler. Termoplastikler eritilip birbirleri ile karıştırılarak kullanılabılırken bu özellik termosetlerin birçoğunda görülmez. Termoplastik kompozitler termosetlere göre daha yüksek sıcaklıklarda ve basıncılarda şekillendirilebilirler. Termoplastiklerin viskoziteleri termosetlere göre daha yüksektir. Buda termoplastiklerin üretim yöntemlerini kısıtlamaktadır [3, 5, 8].

Termoset Matrisler

Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler çok yönlülükleri, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençlerinden dolayı yaygın olarak kullanılırlar. Epoksiler diğer malzemelere göre daha az büzülürler bu da yapıştırıcı olarak kullanıldıklarında tercih edilmelerini sağlar. Başka malzemelerin uygun şekilde epoksilere ilave edilmesiyle kürleşme sıcaklıkları, kürleşme hızları, ısı dayanımları iyileştirilebilir. Özellikle kırılğan yapıdaki epoksilere termoplastiklerin ilavesiyle tokluk değerleri geliştirilebilir.. 5°C ile 150°C aralığında kolayca kürleşebilirler. Epoksiler en çok bal peteği yapıların birleştirilmesinde, katmanlı yapıların birleştirilmesinde yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Plastik parçaların onarılmasında da oldukça etkilidirler. Mükemmel elektrik yalıtım özellikleri olduğundan bu yönlerinden de endüstride faydalanılmaktadır. Epoksiler, sıvı, yarı sıvı ve katı hallerde olabilirler. Sıvı faz epoksi bu çalışmada da katmanlı kompozit yapıların vakum destekli reçine infüzyonu yöntemiyle üretilmesinde de kullanılmıştır.

Fenolik Reçineler

Fenolik reçinelerin en önemli özelliği yüksek alevlenme (tutuşma) dayanımıdır. Sıcaklığın aniden düşüp yükseldiği durumlarda iyi boyutsal kararlılık gösterirler. Kimyasal dirençleri ve aşınma dirençleri yüksektir. Diğer termoset reçinelerden farklı olarak üretimleri esnasında (yoğunlaşma reaksiyonlarında) ortamda su oluşur ve çoğu zaman bu suyun ortamdan uzaklaştırılması gerekir. Elektrik yalıtkanlıkları iyidir ve yoğunlukları düşüktür. Elektronik uygulamalarda balistik uygulamalarda, ahşap yapıların birleştirilmelerinde yaygın olarak kullanılırlar. En bilineni ise bakalittir.

Vinil Reçineler

Vinilester reçineler yüksek korozyon ve kimyasal dirence sahiplerdir. Epoksi reçinelerine göre daha sünek ve tok yapıdadırlar ayrıca daha ucuzdurlar. Kimyasal dirençleri yüksektir, özellikle asitlere, alkalilere, hiporokloritlere ve peroksitlere karşı dirençlidirler. Brom içeren vinilesterler ise alev söndürücü etkiye sahiptir.

Polyester Reçineler

Polyester reçineler korozyon dirençlerinin yüksek, maliyetlerinin düşük ve kimyasal işlemlerle çok farklı görevleri yerine getirebilmeleri nedeniyle en çok kullanılan reçine çeşitlerindendir. Polyester reçineler ultraviyole etkiye sahip ortamlarda rahatlıkla

kullanılabilmektedirler. Bazı polyester reçineler aleve ve kimyasal ortamlara karşı dayanıklıdır. Ancak polyester reçinelerin çalışma sıcaklığı genellikle epoksi reçinelerin çalışma sıcaklıklarından düşüktür.

Siyanat Reçineler

Siyanat ester reçineler çok iyi mukavemet ve tokluk özelliklerine sahiptirler. Toklukları termoplastik malzemelerin ilavesi ile daha da iyileştirilebilmektedir. Nemden etkilenmeleri diğer reçinelere göre daha azdır. Siyanat esterler epoksi reçinelere göre daha kolay kürleşebilmektedir. Uzay araçlarında, mikroelektronik sistemlerde, füzelerde, radar sistemlerinde kullanılmaktadırlar.

Bizmalemid ve Poliimid Reçineler

Bizmalemid ve poliimid reçineler yüksek sıcaklık gerektiren ortamlarda özellikle de füzelerde, uzay araçlarında ve elektrik devrelerinde kullanılmaktadırlar. Camsı özelliklerini kaybedip viskoz özellikler kazanmaya başladıkları camsı geçiş sıcaklıkları polyesterler ve epoksi reçinelerden yüksektir. Ancak epoksi reçinelere göre daha düşük tokluk değerlerinin olması, üretimlerindeki zorluklar ve yüksek nem tutma özelliklerinden dolayı az tercih edilmektedirler.

Poliüretan Reçineler

Poliüretan reçineler termoset ve termoplastik özelliklerde olabilmektedirler. Termoplastik poliüretanlar doğrusal molekül bağlarına sahipken, termoset poliüretanlar çapraz bağlara sahiptirler. Poliüretan reçineler uygun formülasyonlarla farklı özelliklere sahip olabilmektedirler. Aşınma ve kimyasal dirençlerinin yüksek olması, elastik olmaları, tokluk değerlerinin, darbe dayanımlarının iyi olmasından dolayı tercih edilirler. Otomobil kaportaları ve lastikleri, mobilya parçaları en yaygın kullanıldıkları yerlerdir[3, 5, 8].

Termoplastik Matrisler

Naylon Reçineler

Poliamid diye de isimlendirilen Naylonların naylon6, naylon66, naylon 11 gibi farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan çeşitleri bulunmaktadır. Naylonların yüzey kaliteleri yüksek ve yağlama özellikleri iyidir. Ancak nem emerler ve bu da fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Cam fiber takviyeli naylon kompozitlerin darbe dayanımları çok iyidir. Bazı cam fiber takviyeli naylonların darbe dayanımı alüminyum ve magnezyum gibi metallerden bile daha iyidir.

Polipropilen Reçineler

Polipropilen düşük maliyetli, düşük yoğunluk ve birçok uygulama alanı olan bir reçinedir. Termoplastikler arasında en düşük yoğunluğa sahiptir. İyi mukavemet, rijitlik, kimyasal direnç ve yorulma dayanımı gibi özellikler sunmaktadır. Otomobil parçaları, ev eşyalarında ve makine parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Polietereterketon Reçineler

Polietereterketon yeni nesil termoplastik olarak kabul edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Tokluk değerleri epoksilerin 50-100 katı olabilirken nem absorbe etmeleri 10 kat daha düşüktür. En önemli dezavantajları ise çok pahalı olmalarıdır.

Polifenilin Sülfür Reçineler

Polifenilin Sülfür reçineler yüksek sıcaklıklarda kimyasal dirençlerini ve mukavemetlerini korurlar. Bu nedenler yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılırlar.

Metal Matrisler

Metallerin çalışma sıcaklıkları genellikle polimer malzemelerin çalışma sıcaklıklarından daha yüksektir. Akma dayanımları ve elastiklik modülleri daha yüksek olduğu için düşey (kesme) yüklemesinin ve basma yüklemesinin olduğu uygulamalarda metaller önem kazanmaktadır. Metallerin diğer bir önemli avantajı ise mukavemetlerinin ısı ve mekanik işlemlerle artırılabilmesidir. Önemli dezavantajları ise yoğunluklarının dolayısıyla da ağırlıklarının yüksek olması ve korozyona uğrayabilmeleridir. Erime noktalarının yüksek olması kompozit malzemenin üretiminden sonra avantaj olsa bile kompozit malzeme üretilmeden eritme işlemi için yüksek sıcaklıklar gerekeceğinden duruma göre dezavantaj olabilmektedir.

Yoğunluklarının düşük olmasından dolayı en yaygın kullanılan metal matris malzemeleri alüminyum ve titanyumdur. Her iki metalin de düşük yoğunluğu ve farklı özellikler gösterebilen birçok alaşımı mevcuttur. Alüminyum ve alaşımları genellikle yüksek çekme mukavemetleri ve hafiflikleri nedeniyle en çok tercih edilen metal matris malzemesidir. Karbon fiber takviyeli malzemelerde alüminyum alaşımları matris malzemesi olarak kullanılsa da, 500°C sıcaklığın üzerinde karbon alüminyumla reaksiyona girerek alüminyum karbit (Al_4C_3) oluşturmakta, mekanik özellikleri kötüleştirmektedir. Bu durumdan kurtulmak için karbon fiberler titanyum borür (TiB_2) ile kaplanmakta böylece fiberlerin alüminyum alaşımı matris tarafından ıslatılması da artırılmaktadır. Magnezyum daha da hafif olmasına rağmen oksijene karşı ilgisinden dolayı atmosferik ortamda çok çabuk korozyona uğrayabilmektedir bu da magnezyumu daha az kullanılabilir kılmaktadır. Berilyum ise yüksek çekme dayanımı ve en hafif metallerden birisi olmasına rağmen gevrekliği yüzünden kolay kırılabilir. Bu özelliğinden dolayı kullanım alanı sınırlı kalmaktadır. Nikel ve Kobalt süper alaşımları da yüksek sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları nedeniyle matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak bazı alaşımlarında alaşımı oluşturan elementler oksijenle yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girebilmektedir.

Seramik Matrisler

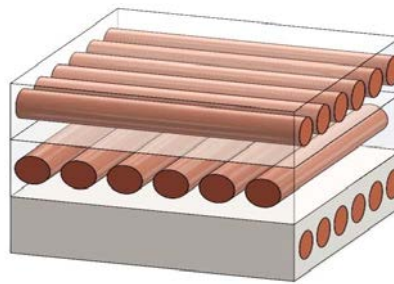
Seramik matrisler yüksek termal kararlılık, yüksek termal şok direnci, sertlik ve korozyon direnci ve düşük yoğunlukları nedeniyle tercih edilirler. Ancak genellikle çok gevrek malzemelerdir ve kırılma toklukları düşüktür. Seramikleri de kendi içinde oksit ve oksit olmayan olarak iki kısma ayrılırlar. Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ve Mullit ($Al_2O_3-SiO_2$) seramiklerin en çok kullanılanları iken Silisyum karbür (SiC), Silisyum Nitrür (Si_3N_4), boron karbür (B_4C) ve Alüminyum Nitrür (AlN) ise oksit olmayan seramiklerin en çok kullanılanlarıdır.

1.4.3 Yapısal Kompozitler

Yapısal kompozitlerde, kompozit yapıyı oluşturan bileşenlerin fiziksel, kimyasal, mekanik özelliklerinin önemli olduğu kadar geometrisi de önemlidir. Bu kompozit yapılarda geometri ile malzemenin özellikleri değişebilmektedir. Tabakalı kompozitler ve sandviç kompozitler yapısal kompozitleri oluşturmaktadır [7].

1.4.3.1 Katmanlı (Tabakalı) Kompozitler

Fiber takviyeli kompozit levhaların, kalınlıkları yönünde istenilen rijitlik ve mukavemet değerini elde etmek amacıyla aynı ya da farklı açılarda istiflenmesiyle oluşan kompozit yapılara katmanlı kompozit yapılar denir. Katmanlı kompozit yapıda aslında her katman ayrı bir kompozit malzemedir ve her katmanda ayrı fiber malzemesi kullanılarak da katmanlı kompozit yapı oluşturulabilmektedir. Şekil 1.6'da katmanlı kompozit yapı görülmektedir.



Şekil 1.6. Katmanlı kompozit yapı

Katmanlı kompozit yapılar katmanlardaki fiberlerin açı durumuna göre tek yönlü, çapraz, açılı ve simetrik şekilde sınıflandırılabilirler. Tek yönlü katmanlı yapıda her tabakadaki fiber yönü aynı olacak şekilde istiflenme yapılmaktadır. Çapraz katmanlı yapıda fiber açıları sadece 0° ve 90° olmaktadır. Açılı kompozit yapıda katmanlarda fiberlerin farklı açılarda olması gerekirken simetrik kompozit yapıda merkezi bir tabakanın altında ve üstünde kalınlık ve açı bakımından aynı kompozit yapıların bulunması gerekmektedir.

Katmanlı kompozitlerin gösterimi standartlaştırılmıştır. Bazı örnekleri Tablo 1.1' deki gibidir:

Tablo 1.1. Katmanlı kompozitlerin gösterimi

Katman Numaraları (K _i) ve Açıları														Gösterim
K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	
0	-45	90	60											[0/-45/90/60]
0	+45	90	90	+45	0									[0/45/90] _s
0	+45	90	+45	0										[0/45/90] _s
0	+45	-45	90	-45	+45	0								[0/±45/90] _s
0	90	0	0	0	0	+45	+45	0	0	0	0	90	0	[0/90/0 ₄ /45] _s
0	+45	-45	+45	-45	-45	+45	-45	+45	0					[0/(±45) ₂] _s
0	90	0	90	0	90	0	90	0						[(0/90) ₂ /0] _s

Tablo 1.1’ deki gösterimlerde katmanlardaki bütün fiberlerin aynı malzeme olduğu kabul edilmiştir. Farklı fiber malzemelerinin gösteriminde açı üzerinde fiber malzemesinin adının kısaltılmasıyla Tablo 1.2’ deki gibi gösterilebilir.

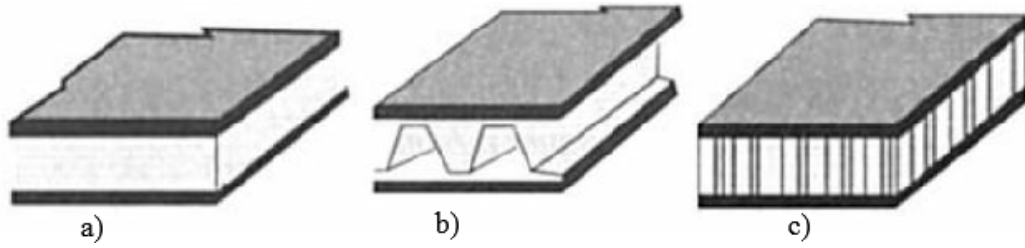
Tablo 1.2. Farklı malzeme kullanılması durumunda katmanlı kompozitlerin gösterimi

Katman Numaraları (K _i), Açılar ve Fiber Malzemesi						Gösterim
K1	K2	K3	K4	K5	K6	[0 ^{Gr} /±45 ^B] _s
0	+45	-45	-45	45	0	
Grafit	Bor	Bor	Bor	Bor	Grafit	

1.4.3.2 Sandviç Kompozitler

Sandviç kompozitler ortada hafif ve kalın bir çekirdek ile onun altında ve üstünde ince ama mukavemetli yüzey plakalarının yapıştırılmasıyla elde edilen hafif, eğilme ve burulma dayanımı yüksek kompozit yapılardır. Çekirdek ve yüzey plakalarını yapıştıran katman genelde yüzey plakalarına ve çekirdeğe göre çok ince olduğu için ihmal edilir. Ancak kalınlıkları arttıkça yapıştırıcılar da ayrı bir katman gibi davranacağı için dikkate alınıp hesaplamalara katılması gerekir.

Sandviç kompozitlerde çekirdek ve yüzey levhalarının ayrı görevleri yerlerine getirmesi gerekmektedir. Çekirdek malzemesi sandviç yapının eğilmesi durumunda dahi plakaların birbirleri üzerinde göreceli kaymasını önleyecek kadar kayma rijitliğine sahip olmalıdır. Eğer kayma gerilmeleri altında alt ve üst plakalar göreceli hareket ederse sandviç yapıdaki kompozit özelliğini kaybetmiş olur, birbiri üzerinde duran iki ayrı malzeme gibi davranır ve görevini yerine getirememiş olur. Çekirdek malzemesi basma gerilmeleri altında iki yüzey plakasının arasındaki mesafeyi koruyacak kadar ve yüzey plakalarının bölgesel olarak içeri çökmesini önleyecek kadar rijit olmalarıdır. Kompozit yapıların genel tanımında olduğu gibi sandviç yapıda da yüzey malzemeleri de çekirdek malzemesi çok farklı malzemelerden seçilip elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı, korozyona ve aşınmaya karşı direnç, titreşim sönümleme ısı iletkenlik veya yalıtkanlık, ses yalıtkanlığı, neme karşı dayanım, yorulma dayanımı gibi özelliklerinden faydalanmak amacıyla bir araya getirilebilirler. Sandviç yapılarda çekirdek ve yüzey plakalarının malzemelerinin farklı olmasının yanında çekirdek geometrisi de Şekil 1.7’deki köpük, kıvrımlı ve bal peteği gibi farklı şekillere sahip olabilmektedir.



Şekil 1.7. Sandviç kompozit örnekleri a) köpük çekirdek, b) ağ çekirdek, c) bal peteği çekirdek [9]

1.5 Literatür Özeti

Katmanlı kompozit malzemeler farklı fiber yönlendirmelerine sahip tabakaların birleşimi ile oluşmaktadır. Kullanılan fiber malzemelerinin, matris malzemelerinin, fiber açılarının, tabaka sayılarının çeşidine göre katmanlı kompozitlerin özellikleri de geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Katmanlı kompozit yapılar, genelde hafif ve mukavemetli yapılardır. Bu özellikleri nedeniyle de birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ancak bu yapılar düşük hızda darbelerden kolayca etkilenerek bazen gözle görülemeyecek şekilde hasara uğramaktadırlar. Bu nedenle de bu hasarın oluşumunun ilerlemesinin ve ne şekilde sonlanacağını bilmesi gerekmektedir.

Literatür incelemesinde katmanlı kompozit yapıların düşük hızda darbeye cevabı ile deneysel, analitik ve sayısal birçok çalışma yapıldığı ve yapılmaya devam edildiği görülmüştür. Katmanlı kompozit yapılarla ilgili çalışmaların bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Mili ve Necip [10], $[0_2/90_6/0_2]$, $[0_3/90_6/0_3]$, $[0_4/90_2/0_4]$ şeklinde üç farklı dizilime sahip cam/epoksi katmanlı kompozit plakaların düşük hızda darbe davranışını alüminyum vurucu kullanarak incelemişlerdir. Deneyler esnasında vurucunun ivmesi, vurucunun yer değiştirmesi ve darbe merkezindeki çökme değerleri ölçülerek katmanlı kompozit plakaların diziliminin ve darbe hızının kompozit plakalar üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçların doğrulanması için Hertzian temas kanunu kullanılmış ve deneysel verilerle teorik model arasında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ancak darbe hızının artmasıyla deneysel ve teorik model arasındaki uyumluluk da bir azalma olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin de sürtünme kayıplarından olduğu ilgili çalışmada açıklanmıştır.

Belingardi ve Vadori [11], karbon fiber takviyeli, iki farklı istiflenme şekline ve üç farklı kalınlığa sahip katmanlı kompozit plakalarla farklı düşük hızlarda darbe deneyleri yapmışlardır. Deneylerden elde ettikleri kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden faydalanarak plakaların enerji absorbe etme kapasitelerini araştırmışlardır.

Mitreviski et al. [12], yarı küresel, sivri uçlu (ogive) ve konik uçlu vurucular ile karbon/epoksi katmanlı kompozit plakaların darbe hasar direncini ve vurucu şeklinin etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarının sonunda; en fazla enerji emiliminin ve vurucu nüfuziyetinin konik vurucularda olduğunu, en yüksek pik kuvvet değerinin ve en az temas süresinin yarı küresel vurucularda olduğunu, hasar başlama yükünün en fazla yarı küresel uçlu sonra sivri uçlu daha sonra da konik vurucularda olduğunu göstermişlerdir.

Menna et al. [13], iki farklı kalınlıktaki cam dokuma/epoksi katmanlı kompozitle düşük hızla darbe deneyi yapmışlar ve bunu sayısal olarak LS-DYNA sonlu elemanlar programıyla da modellemişlerdir. Bu çalışmada katmanlar arasında meydana gelen delaminasyon (tabakalar arasında açılma) deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Heimbs et al. [14], karbon fiber/epoksi katmanlı kompozitleri bası ön yüklemeli ve ön yüklemesiz olarak düşük hızda darbe altında incelemişlerdir. Bu çalışmada ön yükleme düzlem içi yapılırken darbe düzlem dışı uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda emilen enerjinin ön yüklemeye maruz kalmış kompozitlerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışma LS-DYNA programında sayısal olarak modellenmiş, tabaka içi ve tabakalar arası hasar oluşumunun deneysel ve sayısal çalışma arasında oldukça benzerlik gösterdiği belirtilmiştir.

Costa et al. [15], sanki statik (quasi static) batma deneyleri altında karbon/epoksi katmanlı kompozitlerde oluşan hasar şekillerinin sırasını incelemişlerdir. Testlerden sonra C-taraması (C-scan) yöntemi ve SEM (Scanning Electron Microscopy) yöntemi ile mikro yapı incelenmiş ve yük taşıma kapasitesinin azalmasının özellikle matris kırılmalarından kaynaklandığı ve matris kırılmasının delaminasyon oluşumunu tetiklediği açıklanmıştır.

Naik ve Mishra [16], dört kenarı basit mesnetle desteklenmiş dikdörtgen şeklinde, ortotropik ve simetrik olarak istiflenmiş katmanlı kompozit yapının düşük hızda darbe

altındaki cevabını analitik olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kalınlık boyunca normal gerilme etkisini ve düzlem içi gerilmeleri dikkate almışlardır. Darbe noktasındaki temas kuvveti, yanal yer değiştirme, plaka ile vurucunun hızı ve plaka içerisindeki gerilme durumunu modal çözüm tekniği kullanarak belirlemişlerdir. Ortotropik katmanların küçük elastik şekil değişimi cevaplarına uygulanan yönetici denklemler, kayma şekil değiştirmesi, atalet momenti ve doğrusal olmayan Hertzian temas kuvvetlerinin birleştirilmiş etkilerini içermektedir. Çalışmalarında örgü kumaş kompozitlerin çapraz dizilmiş katmanlı kompozit plakalara göre daha fazla darbe dayanımına sahip olduğunu göstermişler.

Yang et al. [17], katmanlı kompozitlerin düşük hızda darbe davranışını incelemek için tümleşik çok ölçekli bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Simülasyon modeliyle yaptıkları çalışmalarda matris çatlamasının en alt tabakada meydana geldiğini ve matris çatlamasının yüzeylere ulaşmasının delaminasyonu tetiklediğini ayrıca delaminasyon olayını fiber kopması olayının izlediğini göstermişlerdir.

Aslan vd. [18], düşük hızlı darbe altında vurucunun kütlelerinin ve katmanlı kompozit yapının boyutlarının etkisini deneysel ve 3D-IMPACT sonlu elemanlar programını kullanarak sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında kuvvet-zaman grafiğinin kütlelerin değişmesi ile dikkate değer şekilde değiştiğini ve katmanlı kompozit yapının da boyutlarının değişmesi ile mekanik davranışının değiştiğini göstermişlerdir.

Khalili et al. [19], literatürden aldıkları analitik ve deneysel çalışmaları ABAQUS sonlu elemanlar programında modelleyerek ve sonuçları karşılaştırarak temel oluşturacak bir model oluşturmaya çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı vurucu kütlelerini, farklı vurucu hızlarını ve farklı geometrileri dikkate almışlardır. Benzer çalışmayı Balasubramani et al. [20] çalışmalarında ANSYS sonlu elemanlar programını kullanarak yapmışlardır. ANSYS'in kullanıldığı bu çalışmada da çeşitli parametreler kullanılarak, sınır şartlarının, katmanların kalınlığının, istiflenme şeklinin, vurucu kütlesi ve hızının sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

Mahinfalah et al. [21], yaptıkları çalışmada ortam sıcaklığının (-50 ile 150 °C arası) düşük hızda darbe cevabına etkisini araştırmışlardır. Düşük hızlı darbelerde sıcaklığın emilen enerji miktarı üzerinde çok etkisinin olmadığı, emilen enerji değerinin farklı sıcaklıklarda

hemen hemen sabit kaldığını ancak emilen enerji miktarının artmasıyla sıcaklıktan etkilenmenin arttığı bu çalışmada gösterilmiştir.

Shokrieh et al. [22], dört farklı kalınlıktaki tabakalı kompozit yapıların düşük hızda darbe davranışını ve ultrasonik tahribatsız muayene yöntemiyle de oluşan hasarları incelemişlerdir. Bu dört farklı kompozit yapı, iki farklı kalınlıktaki cam örgü/epoksi, karbon/epoksi ve cam/karbon/epoksi (hibrit kompozit) kompozitlerdir. Çalışmada düşük hızda darbeye karşı en iyi yapısal direnci karbon/epoksi kompozit yapısı gösterirken yüksek hızda darbeye karşı en iyi direnci cam/karbon/epoksi hibrit kompozit göstermiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ANSYS-LS DYNA programında modellenmiş ve deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Yao et al. [23], yaptıkları çalışmada düşük hızda darbeye maruz katmanlı kompozit yapılarda delaminasyon oluşumunu tahmin etmek için deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmada iki farklı istiflenme şekline sahip kompozit yapılar üzerine düşük hızda darbe uygulanmış ve oluşan hasarlar ultrasonik C- tarama metodu ile incelenmiştir. Delaminasyon oluşumu darbenin olduğu nokta etrafında simetrik olarak oluşurken, delaminasyonun şekli ise tabakaların dizilme açısıyla değişmiştir. Sayısal ve deneysel çalışma arasında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Shoepner ve Abrate [24], katmanlı kompozit malzemelerde düşük hızda darbe altında delaminasyon oluşturan yük değerini kendi çalışmalarında ve literatürde olan kuvvet-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden faydalanarak araştırmışlardır. Delaminasyon oluşturan yük değerinin plaka kalınlığının 3/2 kuvvetiyle değiştiğini ve darbe enerjisi değerine bakılmaksızın hasar oluştuğunda delaminasyon oluşturan yük değerinin kuvvet-zaman eğrisinden anlaşılabileceğini belirtmişlerdir.

Comanho et al. [25, 26], düşük hızda darbe altında dağınık şekilde istiflenmiş katmanlı kompozitlerin davranışını deneysel ve sayısal model oluşturarak incelemişlerdir. Darbe dinamiğini, matris çatlamasını, fiber hasarını, tabaka içinde oluşan hasarı, delaminasyon boyunca enerji dağılımını ve delaminasyon boyutlarını doğru şekilde tahmin etmişlerdir.

Aktaş vd. [27], $[0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ]$ s istiflenme şekline sahip cam/epoksi katmanlı kompozit üzerine düşük hızda darbe uygulayarak, vurucu enerjisinin, vurucu kütlelerinin, vurucu hızının; maksimum şekil değişimi, temas süresi, absorbe edilen enerji ve hasara uğrayan

bölge üzerine etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. 3D-IMPACT sonlu elamanlar kodu kullanılarak darbe deneyleri sayısal olarak modellenmiş ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Hashin [28], yaptığı çalışmada üç boyutlu gerilmelere maruz tek yönlü fiberlere sahip katmanlı kompozitlerde matris ve fiberde meydana gelen hasarı birbirinden bağımsız olarak tespit edebilen hasar modeli geliştirmiştir. Bu hasar modeli ile fiber kırılmalarının, matris hasarlarının ve delaminasyonların simülasyonunu yapılabilmektedir.

Matzenmiller et al. [29], daha sonra literatürde kendi soy isimlerinin ilk harfleriyle anılan MLT (Matzenmiller, Lubliner, Taylor) lineer olmayan sürekli hasar mekaniği (continuum damage mechanics) modelini geliştirmişlerdir. Bu temel model özellikle elastik-kırılgan fiber takviyeli kompozitlerde anizotropik hasar modelini tanımlamak için geliştirilmiştir. MLT modeli oluşan hasarlarda dinamik durumdaki mukavemet ve tokluk değerinin yüksek olması durumunu (rate effect) ve gerilme değerinin azalırken şekil değiştirmenin artması durumunu (strain softening) dikkate alabilmektedir.

Xiao et al. [30], düzlem örgü S-2 cam/SC-15 epoksi katmanlı kompozit üzerinde delme deneyleri (punch-shear) yaparak hasar ve delaminasyon oluşumunu ve ilerlemesini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalardan elde ettikleri verileri özellikle fiber kırılmalarını, matris hasarlarını ve delaminasyonları modellemek için geliştirilen MAT162 malzeme modelinde kullanmışlardır. Deneyin sayısal modelini LS-DYNA da oluşturmuşlar ve deneysel sonuçlarla uyumlu neticeler elde etmişlerdir.

Gama et al.[31], kalın tabakalı kompozitler üzerinde 50 m/s-1000 m/s aralığındaki vurucu hızlarıyla darbe deneyleri gerçekleştirmişlerdir. MAT162 malzeme modelini kullanarak deneyin üç boyutlu sonlu elemanlar modelini LS-DYNA da oluşturmuşlardır. LS-DYNA analizlerinden darbe ve nüfuziyetin sürenin kısa olduğu şok kısmından ve sürenin uzun olduğu nüfuziyet kısmından oluştuğunu belirtmişler ve bunu deneysel olarak da doğrulamışlardır.

Maio et al [32], düşük hızda darbelerin neden olduğu delaminasyonu MAT162 malzeme modeli kullanarak LS-DYNA sonlu elamanlar programında sayısal olarak ve deneysel olarak araştırmışlardır. Sonlu elamanlar modelinde katmanlar arasında fiziksel bir arayüz tanımlamadan sadece katı elaman kullanmışlardır. Özellikle çapraz katmanlı

kompozitlerde yer fıstığı şeklinde oluşan hasarı LS-DYNA sonlu elamanlar programında da gözlemleyebilmişlerdir.

Jordan et al [33], yedi ayrı hasar modunu ve hasar sonrası gerilme azalırken şekil değiştirmenin artması (strain softening) olayını modelleyebilen MAT162 malzeme modelini çalışmalarında kullanmışlardır. Bu yedi hasar modlarını modellemede gerekli olan malzeme özelliklerini belirlemek için düşük hızda darbe deneyi, nüfuziyet derinliği deneyi ve balistik deneyler yapmışlardır. Yaptıkları bu deneyleri modelleyerek MAT162 malzeme modelinde kullanacakları parametrik değerleri en uygun şekilde elde etmişlerdir. Çalışmanın sonunda elde edilen parametrik değerlerle balistik deneyleri modellemişler ve deneylerle oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Yapısal kompozitler sınıfında yer alan sandviç yapılar, dışta alt ve üst yüzey plakaları ile orta kısımda çekirdek olarak adlandırılan malzemelerin birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Sandviç yapılar genel olarak yüksek eğilme dayanımı, rijitlik/ağırlık, mukavemet/ağırlık gibi üstün özelliklere sahiptirler. Sandviç yapıların alt ve üst yüzey plakaları ile ortada kullanılan çekirdek malzemesi farklı malzemelerden seçilebilmektedir. Böylece çok farklı sandviç yapılar elde etmek mümkün olabilmektedir. Sandviç kompozitler de katmanlı kompozitlerde olduğu gibi çok geniş alanlarda kullanılmakta ve düşük hızda darbelerden önemli derecede hasar görebilmektedirler. Darbeye cevabı kullanılan alt ve üst yüzey plakalarına, çekirdek malzemesine, petek hücre yapısına, petek hücresinin duvar kalınlığına, yüksekliğine ve yapıştırıcı malzemesine bağlı olan sandviç yapıdaki kompozitlerin de düşük hızda darbeye cevabı araştırılmaktadır. Bu konu hakkında literatürde yapılan araştırmaların bir kısmı şu şekildedir:

Manes et al. [34-36], Nomex bal peteği çekirdek ve alüminyum levhaların mekanik özelliklerini belirlemek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Nomex bal peteğini, düzlemsel basma testinden elde ettikleri değerlerden ve yük-yer değiştirme grafiğinden faydalananarak sayısal olarak modellemişler ve bu sayısal model üzerinde elastiklik modülünün, akma mukavemetinin, Nomex çekirdek ile levhalar arasındaki yapıştırıcının ve hücre duvar kalınlığının etkisini araştırmışlardır. Alüminyum levhalar ve Nomex için ayrı ayrı belirlenen mekanik özellikleri montaj petek yapısında da kullanılmış ve yapılan üç nokta eğilme deneyinde sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi uyumluluk elde edilmiştir. Manes et al [37], sonraki çalışmalarında önceki çalışmalarından elde

ettikleri verilerden faydalanarak düşük hızda darbe deneyi yapmışlar ve bu deneylerde serbest düşme aparatı ve küresel çelik vurucu kullanmışlardır. Bu deneylerin sonlu elemanlar metodu ile simülasyonlarını başarı ile gerçekleştirmişlerdir. Manes et al [38], daha sonraki yaptıkları çalışmada darbe alarak plastik deformasyona uğramış alüminyum levha ve Nomex çekirdekten oluşan sandviç yapının darbe sonrası kenar basma mukavemetini, levha kalınlığının bu mukavemete etkisini ve darbe enerjisi-basma mukavemeti ilişkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında düşük hızda darbeye uğramış sandviç yapının kenar basma mukavemetinin azaldığı, levha kalınlığının artmasıyla darbe sonrası basma mukavemetinin arttığı ancak bu artmanın darbeden önceki artmaya göre daha az olduğu, darbe enerjisinin artmasıyla darbe sonrası dayanımın azaldığı ve darbe hasarının burkulma mukavemetini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Othman ve Barton [39], kesik koni şeklindeki vurucu ile bal peteği çekirdeğe sahip sandviç yapıların düşük hızda darbe altında ve sanki statik yükleme altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmalarında sandviç yapıda oluşan toplam hasarın sırasıyla; üst plakada sonra çekirdekte ve daha sonra da alt tabakada olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmaları sırasında sanki statik yükleme altında enerjinin büyük bir bölümünün (%56-77) deformasyon ve üst plakanın hasarı sırasında emildiğini ancak dinamik yükleme altında deformasyon ve üst plakanın daha az enerji (%51-60) emdiğini bununla birlikte emilen toplam enerjinin dinamik yüklemde çok daha fazla olduğunu ve bal peteği çekirdek yapının tüm enerjinin emilmesinde dikkate değer bir etkisinin olmadığını göstermişlerdir.

Lu et al. [40], alüminyum plaka ve alüminyum köpük çekirdekten oluşan sandviç yapılar üzerinde farklı vurucu şekilleri (düz, küresel ve konik) kullanarak darbe deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarında vurucu hızı, vurucu şekli, plaka kalınlığı, çekirdek kalınlığı, çekirdek yoğunluğu gibi parametrelerin balistik limit ve enerji emilimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sandviç yapının delinmesinin vurucunun hızıyla doğru orantılı olan delme enerjisiyle arttığını, kalın plaka, kalın ve yoğun çekirdeğin balistik limiti artırdığını ve kalın plakanın çekirdek ve arka plaka arasında daha fazla ayrılmaya neden olduğunu göstermişlerdir.

Wu ve Jiang [41], hücre boyutlarını, hücre sayılarını ve malzeme mukavemetlerini dikkate alarak bal peteği yapıların sanki-statik ve dinamik yükleme altında ezilme olayını

incelemişlerdir. Çalışmada sanki-statik ve darbe yükleri altında 3.2 mm'den 4.7 mm'ye kadar değişen küçük hücre boyutlarının ve düşük çekirdek yüksekliğinin enerji emmede iyi olduklarını göstermişlerdir.

Yamatisha ve Gotoh [42], alüminyum bal peteği yapıların kalınlık yönünde sanki-statik yükleme altındaki davranışlarına hücre şeklinin (dallanma açısının) ve hücre kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada vurucunun hareketiyle hücre içinde sıkışan havadan dolayı basma gerilmesinin arttığını ve sanki-statik yüklemenin vurucu hızı en az 10 m/s olmak şartıyla darbe deneyleriyle eşdeğer olduğunu göstermişlerdir. Yamatisha ve Gotoh bu çalışmalarında ayrıca bal peteği hücrelerinin küçük dallanma açılarına sahip olmalarıyla ve alüminyumun kalınlığının artmasıyla ezilme mukavemetinin artacağını açıklamışlardır.

Hong et al. [43], alüminyum bal peteği numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmalarda basma gerilmesinin etkin olduğu bileşik yükler altında ezilmeye kayma gerilmesinin etkisini araştırmışlardır. Burada basma gerilmesinin etkin olduğu bileşik yükler altında ezilme dayanımının sadece basma gerilmesinin etkin olduğu yüklere göre daha zayıf olduğunu açıklamışlardır. Deneysel çalışmalarında enerji emiliminin kayma gerilmesi/bası gerilmesi oranına bağlı olduğunu açıklamışlardır.

Petras ve Sutcliffe [44], Nomex bal peteği ve fiber takviyeli plastik levhalardan oluşan sandviç numuneler üzerinde üç nokta eğilme deneyleri yapmışlar ve bu deneysel çalışmalar sonucunda plaka ve çekirdek için kırılma modlarını tanımlamışlardır. Ayrıca kırılma modlarının plaka kalınlığı/plaka boyu oranına ve petek yoğunluğuna bağlı olduğunu açıklamışlardır.

Horrigan ve Aitken [45], metalik olmayan bal petekleri için darbe altında ezilmeyi elastik hasar modeli, sürekli hasar modeli ve elastik olmayan şekil değişimi birikimi (strain accumulation) modellerinden faydalanarak yeni bir model geliştirmişlerdir. Bu modeli LUSAS sonlu elemanlar programı içine yerleştirmişlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında Nomex sandviç yapı üzerine düşük hızlarda darbe deneyleri uygulamışlar ve sonuçları sayısal modelle karşılaştırmışlardır. Oluşan hasarın çapı ve derinliğini sayısal modelde doğru olarak tahmin etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda yumuşak cisimlerin Nomex bal peteği sandviç yapıya çarpması sırasında derin olmayan, sert cisimlerin çarpması

sırasında ise derin ve önemli hasarların oluştuğunu hem yaptıkları deneysel çalışmalarda hem de sayısal çalışmalarda göstermişlerdir.

Chawla et al. [46], bal peteği yapının ezilme mukavemeti üzerine değişik parametrelerin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneyler esnasında bal peteği yapıya küçük delikler açarak sıkışan havanın sayısal modelde oluşturacağı uyumsuz sonuçlardan kaçınmışlardır. Sonlu eleman modellerinde hücre yüzeyleri arasındaki ilişkiyi iki farklı şekilde incelemişlerdir. İlk incelemelerinde hücreleri yapışık olarak (glued) ikinci incelemelerinde ise hücreleri birleşik (merged) olarak modellemişlerdir. Hücrelerin birleşik olarak modellendiği çalışmada sonuçları daha kısa sürede ve deneysel sonuca daha yakın şekilde elde etmişlerdir. Ayrıca sonlu eleman modellerinde vurucu hızının artmasıyla basma mukavemetinin arttığını ancak ezilme mukavemetinde dikkate değer bir değişikliğin olmadığını gözlemlemişlerdir.

Johnson et al. [47], ayrıntılı mikromekanik çekirdek model ve SAC (Semi-adaptive coupling) tekniği kullanarak bal peteği çekirdekli kompozit sandviçlerin farklı hücre boyutlarının, farklı hücre kalınlıklarının ve farklı malzemelerin ezilme enerjisinin emilimi üzerine etkilerini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarının deneysel kısmında Nomex ve alüminyum bal peteği çekirdekleri ve karbon fiber/epoksi plakalardan oluşan sandviç yapıların sanki-statik basma deneyi ve kesme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Sanki-statik basma deneyiyle ezilmenin, hücre duvarlarının elastik ve hemen sonrasında plastik burkulması, hücre yüzeylerinde yapışmanın açılması, fenolik reçine tabakasının kırılması şeklinde üç farklı safhadan oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sayısal kısmında kabuk (shell) eleman tabanlı mikromekanik modelin alüminyum ve Nomex bal peteği çekirdeklerinden oluşan sandviç yapıların her ikisi için de oldukça iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Ancak bu modellerin daha geniş yapılar için sonlu eleman modelini oluşturmada (mesh işleminde) daha fazla işlemci ve zaman gereksinimini ortaya çıkaracakları için katı (solid) tabanlı homojenize çekirdek modelin mikromekanik modele göre ince mesh yapısının yerini solid elemanların almasından dolayı daha uygun olacağını açıklamışlardır.

Mines et al. [48], yaptıkları deneysel çalışmada farklı geometri ve malzeme kombinasyonlarından oluşan sandviç kompozit malzemelerin düşük hızda darbe altında delinmesini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda çekirdek yoğunluğunun

delinmenin ilerlemesinde etkili olduğunu ve hızın artmasıyla da panellerin emdiği enerjinin artacağını bunun sebebinin de yüksek hızlardaki şekil değişiminde çekirdek ve plakalarda oluşan basma gerilmesinin artışıdan kaynaklandığını açıklamışlardır.

Kenny ve Torre [49], özel olarak tasarladıkları sıradışı sandviç kompozitte, plaka olarak cam fiber takviyeli-fenolik matrisli kompozit kullanmışlar ve çekirdek yapıyı da dış yüzeylerde kullandıkları plakayı dalgalı şekilde katlayarak, polimer köpük içerine yerleştirerek elde etmişlerdir. Araştırmacılar aynı malzemeyi çekirdek olarak da köpüğün kullanıldığı klasik yapıdaki sandviç kompozit ile kendi ürettikleri kompoziti darbe deneylerine tabi tutmuşlardır. Bu çalışmalarının sonunda kendi ürettikleri kompozitin klasik yapıdaki kompozite göre darbe enerjisinin emilmesinde daha iyi performans sergilediklerini göstermişlerdir.

Kang et al. [50], iki farklı kalınlığa (10 - 20 mm) sahip Nomex çekirdek ve iki farklı plaka malzemesine sahip (karbon/epoksi-cam/epoksi katmanlı kompozit) sandviç yapı kombinasyonları üzerinde ağırlık düşürme yöntemiyle, düşük hızda darbe dayanımı üzerine çalışmalar yapmışlar ve sonuçları taramalı ses mikroskobu (SAM-scanning acoustic microscope) ile incelemişlerdir. Kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafiklerine dayanarak hasar başlangıcındaki yük ve enerji emilimi, maksimum kuvvet, çarpma süresince emilen toplam enerji, hasarda oluşan plastik enerji emilimi ve darbeye uğramış alan gibi parametreleri tanımlamışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarında sandviç yapının darbe dayanımının plaka tipinden ve çekirdek kalınlığından önemli ölçüde etkilendiğini ve darbe hasarının önemli ölçüde sandviç yapının plakalarında tabakaların ayrılması şeklinde meydana geldiğini göstermişlerdir.

Menna et al. [51], fiber takviyeli farklı kalınlıktaki plastik levha ve Nomex çekirdekten oluşan bal peteği sandviç yapının farklı vurucu çaplarıyla farklı hızlardaki darbe davranışı üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Sayısal çalışmaları sırasında LS-DYNA programını kullanmışlar ve Nomex'i solid eleman, fiber takviyeli plastik plakayı ise kabuk eleman olarak modellemişlerdir. Yaptıkları darbe deneylerini sayısal olarak modelleyebilmek için gerekli olan malzemelerin mekanik özelliklerini, yine kendi yaptıkları deneylerden elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonunda yaptıkları darbe deneyleriyle uyumlu sayısal model geliştirmişlerdir. Ancak bu sayısal modelin yüksek hızlarda ve plakaların kalın olduğu durumlarda deney sonuçlarından sapmalar

gösterdiğini ve bunun nedeninin de kompozit malzemenin bileşenlerinin şekil değiştirme hızlarının farklı olmasından, hücreler içine sıkışan havadan ve hücre yapılarının mikro atalet etkilerinden kaynaklanabileceğini açıklamışlardır.

Foo et al. [52], bal peteği şekline getirilmiş Nomex'in ve düzlemsel Nomex kağıdının mekanik özelliklerini belirlemek üzere bir çok deneysel çalışmalar yapmışlardır. Belirledikleri bu özellikleri Nomex'in basma ve çekme deneyini sayısal olarak modellemek için kullanmışlardır. Sayısal modelin Nomex'in Young modülünü belirlemede, Nomex bal peteğinin kalınlık yönündeki basmada hücre sayısının artmasıyla elastiklik modülünün azaldığını ve elastiklik modülünün bal peteğinin boyutlarına bağlı olduğunu göstermede oldukça başarılı olduğunu açıklamışlardır. Foo et al. [53], alüminyum bal peteğini sanki-statik yükleme ve düşük hızda darbe altında sayısal ve deneysel olarak, hücre boyutunun, hücre duvar kalınlığının oluşan hasara etkisini anlamak için incelemişlerdir. Çalışmalarının sonunda, darbe esnasında emilen enerjinin çekirdek yoğunluğundan bağımsız olduğunu bununla beraber daha yoğun çekirdekli kompozitlerde pik yüklerinin daha büyük ve oluşan hasar alanının daha küçük olduğunu bal peteği tarafından emilen enerjinin darbe enerjisiyle doğru orantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Foo et al. [54, 55], düşük hızda darbeye hasar başladıktan sonra sandviç yapının cevabını araştırmışlardır. İlk olarak sanki-statik yükleme altında sandviç yapının yük-yer değiştirme grafiğini deneysel ve sayısal olarak elde etmişlerdir. Bu grafikten elastik rijitlik, hasar başlangıcındaki kritik yük ve hasar sonrası rijitlik gibi üç önemli parametre değerini elde etmişlerdir. Daha sonra elde ettikleri bu parametreleri, değiştirilmiş (modifiye edilmiş) enerji-denge modeli ve momentumun korunumu kanunu birleştirerek elde ettikleri modelde kullanmışlardır. Böylece hasar başladıktan sonra sandviç yapının cevabını tahmin edebilecekleri bir model geliştirmişlerdir.

Justo et al. [56], örgü karbon/epoksi ve Nomex'den oluşan tabakalı kompozit numuneler üzerinde yüksek enerji emiliminin sürdürülebilmesi durumunda darbe sonrası parçalanmayı araştırmışlardır. Bu çalışmalarında çekme deneyi, tabakalar arası kırılma tokluğu enerji testi, darbe testi ve darbe sonrası basma testi gibi deneyler yaparak; Nomex tabakasının katmanlı yapıya ilave edilmesiyle çekme dayanımının etkilenmediği, buna rağmen tabakalar arası kırılma tokluğunun, eğilme rijitliği ile darbe sonrası basma mukavemetinin arttığı ve parçalanma miktarının azaldığı sonucuna varmışlardır.

Fatt ve Park, [57] ortotropik yüzey plakalarını ve sabit ezilme dayanımına sahip simetrik sandviç yapıları, yapının tamamen sabitlenmesi (rigidly supported), iki kenarının sabitlenmesi (two-sided clamped), basit mesnetlenmesi (simply supported) ve dört kenarının sabitlenmesi (four-sided clamped) durumlarında sandviç yapının tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli dinamik modelini oluşturarak analitik olarak incelemişlerdir. Bu dinamik modelde eş değer kütle, vurucu kütle ve şekil değişimine uğramış sandviç yapının efektif kütle temsil etmektedir. Statik yük-batma (load-indentation) analizinden elde edilen sonuçlar efektif yay kuvveti ve amortisör dayanımını bulmak için kullanılmıştır. Bu dinamik model eşdeğer tek serbestlik dereceli ve çok serbestlik dereceli dinamik modeli oluşturmak için de kullanılmış, analitik çözüm ve deneysel sonuçlar oldukça uyumlu bulunmuştur. Fatt ve Park [58] analitik çözümü yerel kırılma kriterleri ile birleştirerek darbe hasarı oluşumunu da bir diğer çalışmalarında araştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışmada elde ettikleri darbe hasar modlarının statik yükleme altındaki hasar modlarıyla benzer olduğunu ama yüzey plakalarının, çekirdeğin atalet ve yüksek şekil değiştirme etkilerinin darbe hasar kuvvetini etkilediğini açıklamışlardır. Ayrıca darbe hasar başlangıcının panelin mesnetlenme tipine, vurucunun şekline, plaka ve çekirdeğin geometrik ve malzeme özelliklerine bağlı olduğunu deneysel olarak da göstermişlerdir.

Liu et al. [59], yüzeye dik yüklemede (transverse) çekme ve basma altında farklı hücre yüksekliği, farklı reçine miktarı gibi parametreleri dikkate alarak kırılma mekanizmasını açıklamak için Nomex bal peteğinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarının sonunda; yüzeye dik yükleme halinde oluşan ilk hasarın, Nomex kağıdı ve bal peteği üretiminde kullanılan sert reçineden kaynaklandığı ve yoğunlaşma olmadan yük kaldırıldığında bal peteğinin ilk haline döneceğini; ezilme durumunda ezilme mukavemetinin artmasında sadece sıkışan havanın değil hücre duvarları arasındaki sürtünmenin de etkili olduğunu, üretimde kullanılan reçine miktarının çökme mukavemetini artırdığını ancak çökme şekil değişimini (collapse strain) değiştirmediğini, farklı yüksekliklerdeki (14 - 20 mm) Nomex bal peteğinin aynı çökme mukavemeti ve aynı çökme şekil değiştirme değerlerine sahip olduğunu, bal peteğinin çekme rijitliğinin basma rijitliğine göre daha yüksek olduğunu ve bunun sebebinin de deneylerinde kullandıkları hücre duvarlarının ince olmasından ve bununda küçük basma kuvvetleri altında burkulmaya uğramasından ötürü olabileceğini açıklamışlardır. Liu et al. ayrıca

ABAQUS programı ile modelledikleri sayısal çalışmalarıyla da buldukları bu sonuçları doğrulamışlardır.

Zinno et al.[60] , yaptıkları deneysel çalışmada fenol emprenyeli bal peteği sandviç yapıları, ortamın nemini değiştirerek, radyasyona tabi tutarak, asitik ve bazik dış kimyasal ortamlara tabi tutarak ve ortamın sıcaklığını değiştirerek deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarında, kompozit yapının bahsedilen yaşlandırma testleri sonucunda maksimum şekil değiştirme ve maksimum gerilme değerlerinin azaldığını, elastik modülünün % 15 oranında ve maksimum kesme mukavemetinin de %20 oranında azaldığını açıklamışlardır. Ayrıca yaptıkları darbe deneyleriyle enerji emiliminde sandviç yapının plakalarının çekirdeğe göre oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Castanié et al. [61], CCD (Charge Coupled Device) kameralar ile Nomex, alüminyum alaşımı ve kâğıt bal peteği yapılar kullanarak, bal peteği yapıların sanki-statik yükleme altında ezilme mekanizmalarını araştırmışlardır. Ezilme deneyi esnasında hücre duvarlarının çok çabuk burkulduğunu ve oluşan en büyük yük değerinin (pik yük değer) üç bal peteği hücresinin kesiştiği yer olan hücre kenarlarında meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Nomex, alüminyum alaşımı ve kâğıt bal peteği sandviç yapıları için benzer yük-yer değiştirme eğrisi elde edilirken farklı pik yük değerleri elde edilmiştir. Farklı pik yük değerleri elde edilmesi farklı malzemelerin kullanılmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Deney esnasında yükün büyük bir bölümü hücre kenarları tarafından alındığı için, hücre kenarlarının lineer olmayan yay sistemleri şeklinde modellendiği bir analitik model geliştirilmiştir. Castanié et al. [62] sonraki çalışmalarında elde ettikleri modelin doğruluğunu farklı vurucular için daha ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Analitik modelin ince plakalar üzerinde keskin uçlu vurucularla doğru sonuçlar vermediğini bunun sebebinin de sandviç yapının eğilmesi esnasında transvers kaymanın modelin yay elemanları üzerinde etkisinin ihmal edildiğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu kısıtlamanın üstesinden gelmek için sandviç yapıyı Mindlin plaka elemanları olarak modellemişler ve vurucu ile sandviç yapı arasına hesaplanmış statik temas yasasını, lineer olmayan yay yerleştirerek uygulamışlardır. Böylece çekirdeğinin dışında ince metal plakalar bulunan sandviç yapıların düşük hızda darbe altında dinamik yapısal davranışlarını daha iyi modelleyebilmişlerdir.

Meo et al. [63], uçaklarda kullanılan fan kaporta kapağını temsilen üretilen bal peteği sandviç plakalar üzerinde, 5-20 J (Joule) arası beş farklı enerji seviyesinde düşük hızda darbe deneyleri gerçekleştirerek hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve kırılma mekanizmalarını araştırmışlardır. Bu enerji seviyeleri kompozit sandviç üzerinde zor görülebilen darbe hasarı (BVID-Barely Visible-Impact-Damage) oluşturmuşlardır. Sandviç yapının sayısal simülasyonu LS-DYNA3D programı ile oluşturularak, darbe hasarı oluşumu ve delaminasyon başlangıcı incelenmiştir. Sayısal model ile deneysel çalışma arasında oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Özellikle sayısal model % 2.6 hata payı ile darbe esnasında oluşan çentik derinliğini ve %10.5 hata payı ile de delaminasyon alanını tahmin edebilmiştir.

Bora et al. [64], tekrarlanan darbe yükleri altında cam fiber-epoksi plakalar ve alüminyum bal peteği çekirdekten oluşan sandviç yapıyla düşük hızda darbe-yorulma ömür ilişkisini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmalarında 3 – 110 J arası farklı darbe enerjisi değerleri kullanmışlardır. Sandviç yapıda delinmenin olması için en fazla tekrarlanma sayısının 81 tekrarlanma ile 3J'lük enerji seviyesinde ve en az tekrarlanma sayısının da tek darbe ile 110J'lük enerji seviyesinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda darbe enerjisinin artmasıyla delinmenin gerçekleşmesi için gerekli tekrarlanma sayısının azalacağını belirtmişlerdir.

Güneş ve Arslan [65], yaptıkları çalışmada alüminyum bal peteği sandviç yapıların düşük hızda darbe cevabını gerçekçi sayısal model geliştirerek araştırmışlardır. Çalışmalarının deneysel kısmında ürettikleri alüminyum bal peteği sandviç yapıya düşük hızda darbe uygulamışlar ve temas kuvveti ile emilen enerjiyi ölçmüşlerdir. Ölçülen bu değerleri geliştirdikleri gerçekçi sayısal model üzerinde de doğrulamışlardır. Çalışmalarının sayısal kısmında ise geliştirdikleri gerçekçi sayısal model ile hücre yüksekliğinin ve hücre genişliğinin düşük hızda darbe cevabına etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çalışmalarının sonunda, vurucunun enerjisinin artmasıyla pik temas kuvveti ve merkezi yer değiştirmenin artacağını; hücre genişliğinin artmasıyla plastik deformasyon oluşumunun artacağını, merkezi yer değiştirmenin artacağını, merkezden kenarlara doğru burkulmanın artacağını, pik temas kuvvetinin azalacağını, temas süresinin artacağını, rijitliğin azalacağını göstermişlerdir.

Kang et al. [66], yaptıkları çalışmada Nomex bal peteği çekirdek ile katmanlı cam-epoksi kompozit plakadan ve katmanlı karbon-fiber kompozit plakadan oluşan yüzey plakaları ile üretilmiş sandviç yapıların düşük hızdaki darbe davranışını deneysel olarak ve istatistiksel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonunda cam/epoksi katmanlı sandviç yapılarda hasar oluşumunun karbon/epoksi katmanlı sandviç yapıya nazaran daha kolay olduğunu ve darbe hasarının sandviç yapının yüzey plakaları ile çekirdek kalınlığına bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Rastgele değişken değerleri ve rastgele artık mukavemet değerlerini kullanarak yaptıkları istatistiksel çalışmada da artık mukavemet değerinin hem çekirdek kalınlığından hem de sandviç yapının yüzey plakalarından etkilendiğini göstermişlerdir.

Shin et al. [67], yaptıkları deneysel çalışmada farklı çekirdek ve plaka kombinasyonlarından oluşan sandviç yapılar kullanarak sandviç yapıların düşük hızda darbe altında hasar modlarını araştırmışlardır. Bu deneysel çalışmada sandviç yapının çekirdek malzemesi olarak alüminyum köpük, alüminyum bal peteği ve balsa; plaka malzemesi olarak da dokuma kumaş/epoksi ve alüminyum kullanılmıştır. Deneyler esnasında maksimum temas kuvveti, temas süresi, pik yük altında yer değişimi ve emilen enerji gibi darbe parametreleri ölçülmüştür. Hasarın boyutu ve kalıcı batma derinliği de üç boyutlu tarayıcı ile ölçülmüştür. Darbe sonrası hasar modlarının değerlendirilmesi sandviç yapının hasara uğrama şeklinin kullanılan çekirdek malzemesi ve plakalara bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca deneylerden dokuma cam/epoksi plakalara sahip sandviç kompozitlerin metal plaka yüzeylere sahip sandviç kompozitlere göre daha iyi darbe performansı gösterdiği ve tüm sandviç yapı kombinasyonları arasında alüminyum bal peteği çekirdek ve dokuma cam-epoksi plakalardan oluşan sandviç yapının en iyi darbe performansı gösterdiği gözlemlenmiştir.

Hazizan et al. [68], yaptıkları çalışmanın deneysel kısmında alüminyum çekirdek ve cam fiber/epoksi yüzey plakalarından oluşan sandviç yapının düşük hızda darbe davranışını incelemişlerdir. Bir dizi eğilme, kayma, batma testleri yaparak şekil değiştirme hızına kompozit yüzey plakalarının eğilme modülünün etkisini ve alüminyum çekirdeğin kayma modülüne etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar kompozit yüzey plakalarının eğilme modülüne ve çekirdeğin şekil değiştirme hızına etkisinin olmadığını göstermiştir. Ayrıca Meyer batma kanunuyla sandviç yapı analiz edilmiş ve batma karakteristiklerinin sandviç yapının şekil değiştirme hızına etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışmalarının

deneysel olmayan kısmında ise sandviç yapı eğilme sırasında enerji emilimi, kayma ve temas etkilerini dâhil eden basit enerji denge modeli ile analitik olarak modellenmiştir. Enerji denge modeli ile deneysel veriler arasında oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiş, bu modelinin enerji kaybını başarılı bir şekilde tahmin ettiği ve enerji bölünmesinin büyük oranda sandviç yapı ve vurucu geometrisine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Literatür araştırmasından da görüleceği gibi, bal peteği çekirdeğe ve farklı takviye (dış yüzey) elemanlarına sahip sandviç yapılarla ilgili birçok çalışma yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmalarda amaç daha hafif, daha mukavim sandviç yapıların elde edilmesi ve düşük hızlı darbede yapının davranışının anlaşılmasıdır. Bu tez çalışmasında da amaç literatürdeki emsallerine göre daha hafif ve daha mukavim olacağı düşünülen, $[0^\circ/90^\circ]_4$ istiflenme şekline sahip cam/epoksi fiber takviyeli kompozit levhalar ile Nomex bal peteği çekirdeğin birleştirilmesiyle oluşan sandviç yapının düşük hızda darbe davranışını deneysel olarak araştırmak ve sayısal olarak modellemektir.

2.BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (Vacuum assisted resin infusion -VARI), vakumlanmış ortam içerisinde sıvı reçinenin ilerlemesi prensibine dayanmaktadır. Literatürde vakum, destekli reçine infüzyon kalıplama (Vacuum assisted infusion moulding-VARIM), vakum destekli reçine iletimiyle kalıplama (Vacuum assisted resin transfer moulding-VARTM), vakum destekli reçine püskürtme (Vacuum assisted resin injection-VARI), reçine iletimiyle kalıplama (Resin transfer moulding-RTM), Seeman kompozit reçine infüzyon kalıplama yöntemi (Seeman composite resin infusion moulding process (SCRIMP) gibi farklı isimlerle anılan yöntemler benzer prensibe dayanmaktadır. Ancak üretim aşamasındaki bazı farklılıklardan dolayı farklı isimlerle anılmaktadırlar. Örneğin vakum destekli reçine infüzyon kalıplama (VARIM) yöntemi ile vakum destekli reçine infüzyon yöntemi (VARI) arasındaki en belirgin fark kullanılan kalıptır. Vakum destekli reçine infüzyon yönteminde genelde karmaşık kalıplar kullanılmazken, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama işlemi karmaşık kalıp yapıları ile yapılmaktadır.

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle fiber oranı yüksek parçalar üretilebilmektedir. Böylece ağırlıkta azalma ve mukavemette artış sağlanabilmektedir. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere İstenilen ölçülerde yüksek yüzey kaliteli ve büyük boyutlardaki kompozitler vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle üretilebilmektedir. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle kompozit üretiminin en olumsuz yanı, üretim aşamasında vakum altında kompozitin hava alma ihtimalinin olmasıdır. Havanın viskozitesinin reçineye göre çok daha düşük olmasından dolayı hava reçinenin yerini alarak üretimi olumsuz etkilemektedir. Hava alan kompozit kullanılamaz hale

gelmektedir. Üretim aşamasında böyle bir olumsuz durumla karşılaşıldığında ise kullanılan malzemenin tamamı değerlendirilemeden atılmak durumunda kalınmaktadır. Üretim aşamasında karşılaşılabilecek diğer bir olumsuzluk ise reçinenin malzemenin her bölgesini tam olarak ıslatamamasıdır. Bu durumda da malzemenin tamamı ya da ıslanamayan bölgeler kesilip atılmakta ve pahalı atık malzemeler oluşmaktadır.



Şekil 2.1. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle 3.2x12 m boyutlarındaki kompozit yapının üretilmesi [69]

2.1.1. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi İle Katmanlı Kompozit Yapının Üretiminde Kullanılan Mazlemeler

Ayırıcı Film (Release Film): Kompozit üretiminde kalıp ile üretilecek olan katmanlı kompozitlerin arasına konulur. Ayırıcı filmler kompozitin kalıptan etkilenmesini önlerken kalıbın da üretimden sonra temiz kalmasını sağlarlar. Katmanlı kompozit üretiminde 120°C çalışma sıcaklığına sahip 25 mikron kalınlıkta ayırıcı film kullanılmıştır. Şekil 2.2’de üretim esnasında kullanılan ayırıcı film görülmektedir.



Şekil 2.2. Ayırıcı film

Cam Fiber Kumaş: Cam fiber kumaş katmanlı kompozit yapıyı oluşturan ana unsurdur. Reçine cam fiber kumaş katmanları arasından akar. Kürleşme sonucu katmanlı kompozit tek yapı halinde üretilmiş olur. Katmanlı kompozit üretiminde [0/90] iki yönlü, düzlem örgü, 450 g/cm^3 yoğunluğa sahip cam fiber kumaşlar kullanılmıştır. Şekil 2.3’de üretim esnasında kullanılan cam fiber kumaş görülmektedir.



Şekil 2.3. Cam fiber kumaş

Soyma Kumaşı (Peel Ply): Üretim esnasında kompozit içinde bulunan havanın çıkmasına yardımcı olan, reçinenin vakum altında düzgün dağılmasını sağlayan ve yüzey kalitesini iyileştiren kumaştır. Katmanlı kompozit üretiminde 120°C çalışma sıcaklığına sahip 80 gr/m^2 birim alan kütlesine sahip dokuma soyma kumaşı kullanılmıştır. Şekil 2.4’de üretim esnasında kullanılan soyma kumaşı görülmektedir.



Şekil 2.4. Soyma kumaşı

İnfüzyon filesi (Infusion mesh): Üretim esnasında reçinenin akmasına yardımcı olur. İnfüzyon filesinin yumuşak yapıda olanları tercih edilmelidir. Aksi halde üretim esnasında vakum naylonuna zarar verebilmekte ve yapının hava almasına sebep olabilmektedir. Katmanlı kompozit üretiminde 150°C çalışma sıcaklığına sahip 185 gr/m^2

birim alan kütlesine sahip infüzyon filesi kullanılmıştır. Üretim esnasında kullanılan infüzyon filesi Şekil 2.5’de görülmektedir.



Şekil 2.5. İnfüzyon filesi

Vakum Naylonu/Vakum Film: En dışta bulunan vakum ortamının oluşmasını sağlayan naylondur. Üretim esnasında 120°C çalışma sıcaklığına sahip 50 mikron kalınlıkta vakum naylonu kullanılmıştır.



Şekil 2.6. Vakum naylonu

Epoksi ve Sertleştirici: Kürleşme için gerekli reçine karışımını oluşturan kimyasallardır. Katmanlı kompozit üretimi esnasında Araldite ly 1564 epoksi ve Aradur 3487 sertleştirici kullanılmıştır.

Sızdırmazlık bandı: Sızdırmazlık bandı üretim esnasında kalıp, ayırıcı film ve vakum naylonunun yapışmasını sağlayarak hava kaçağının oluşmasını önler. Katmanlı kompozit üretiminde 150°C çalışma sıcaklığına sahip sızdırmazlık bandı kullanılmıştır. Üretim esnasında kullanılan çift yönlü yapışma sağlayan sızdırmazlık bandı Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Çift yönlü yapışma sağlayan sızdırmazlık bandı

T bağlantı borusu, Spiral Hortum ve İnfüzyon Hortumu: Reçinenin vakum ortamına alınmasını ve homojen şekilde dağılmasına yardımcı olurlar.



Şekil 2.8. T bağlantı borusu, spiral hortum ve infüzyon hortumu

2.1.2. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Yöntemi İle Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Yapının Üretim Aşamaları

- Şekil 2.9’da görüldüğü üzere altında rezistans bulunan ve alüminyum masa (kalıp) temizlenir ve üretim için hazır hale getirilir.



Şekil 2.9. Alüminyum masanın (kalıbın) temizlenmesi

- Ayırıcı film, üretilmek istenilen 800x1200 mm boyutlarındaki kompozit levhanın kenarlarından 10 mm daha büyük olacak şekilde Şekil 2.10'daki gibi kesilir ve kenarlarından sızdırmazlık bandıyla masa üzerine yapıştırılır.



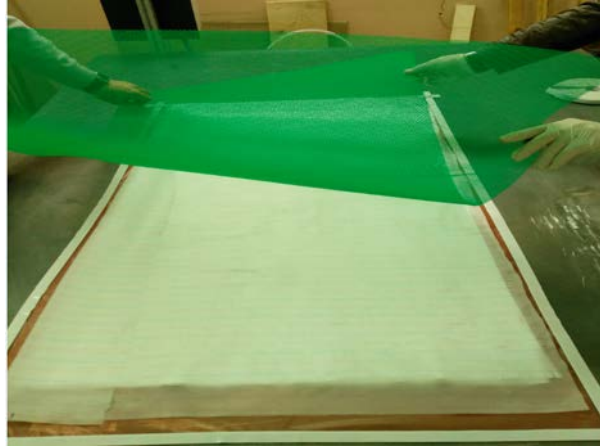
Şekil 2.10. Ayırıcı filmin alüminyum masa üzerine yapıştırılması

- 800x1200 mm boyutlarda [0/90] iki yönlü cam fiber kumaşlar kesilir ve dört katman olacak şekilde ayırıcı film üzerine Şekil 2.11'deki gibi serilir.



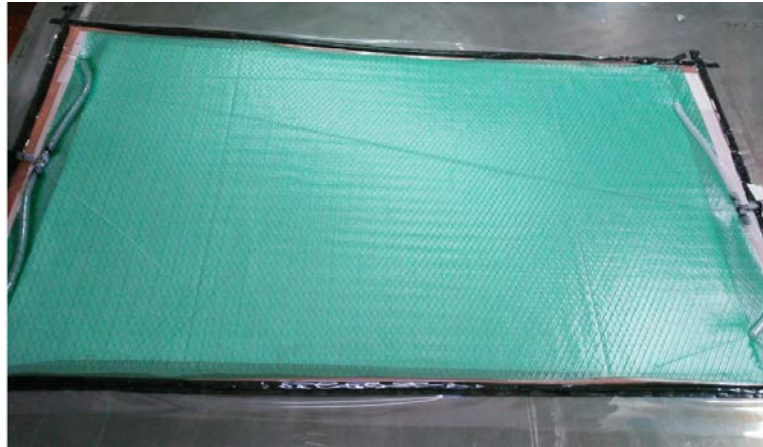
Şekil 2.11. Cam fiber kumaşın serilmesi

- Soyma Kumaşı ve infüzyon filesi cam fiber kumaşların üzerini tamamen kapatacak boyutlarda ve en alttaki ayırıcı filmin içinde kalacak şekilde kesilir. Şekil 2.12'deki gibi cam fiberlerin hemen üstüne soyma kumaşı onun üzerine de infüzyon filesi gelecek şekilde serilir.



Şekil 2.12. Soyma kumaşı ve infüzyon filesinin serilmesi

- Vakum naylonu serili olan tüm malzemeleri içine alacak boyutlarda kesilir. T bağlantı borusu, infüzyon hortumu ve spiral hortum birleştirilerek vakum naylonunun altına reçinenin ilerleme doğrultusuna yerleştirilir. En üstte vakum naylonu olacak şekilde Şekil 2.13'deki gibi vakum ortamı oluşturulur.



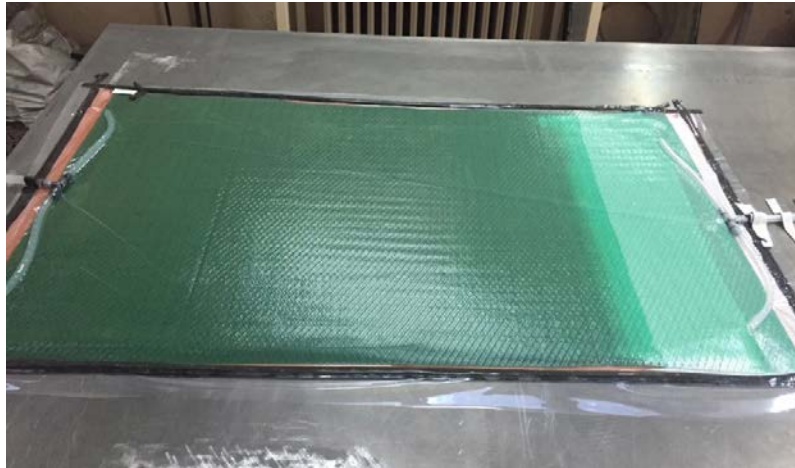
Şekil 2.13. Vakum ortamının oluşturulması

- Vakum pompası çalıştırılır ve sızdırmazlık kontrol edilir. Sızdırmazlığın sağlandığından emin olunulur.
- Sertleştirici ve epoksi istenilen miktarda bir kap içerisinde birleştirilir ve reçine hazırlanır. Reçinenin Şekil 2.14'deki gibi homojen olması için birleşim bir çubuk yardımıyla homojen görüntü elde edilene kadar karıştırılır.



Şekil 2.14. Reçinenin karıştırılması

- Vakum pompası çalıştırılır ve reçinenin vakum ortamında ilerlemesi Şekil 2.15'deki gibi gözlemlenir.



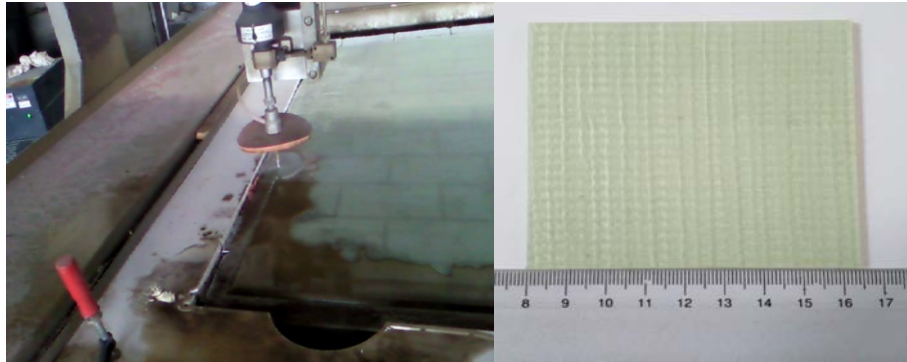
Şekil 2.15. Reçinenin vakum ortamında ilerlemesi

- Reçine vakum ortamını tamamen doldurduktan sonra alüminyum masanın altındaki rezistanslardan faydalanılarak 100°C de 2 saat süreyle vakum altında kür işlemi için beklenilir. Kür işlemi tamamlandıktan sonra en alt yüzeydeki ayırıcı film ve katmanlı kompozitin üzerindeki vakum naylonu, infüzyon filesi ve soyma kumaşı kompozitten ayrılarak Şekil 2.16'daki 800x1200 mm boyutlarında katmanlı kompozit elde edilir.



Şekil 2.16. 800x1200 mm boyutlarında üretilmiş katmanlı kompozit

- Darbe deneylerinde kullanılacak sandviç yapının boyutları 85x85 mm boyutlarındadır. Bu nedenle alt ve üst plakaları oluşturacak 800x1200 mm boyutlarındaki katmanlı kompozit levha su jeti yardımıyla 85x85 mm boyutlarında kesilir. Şekil 2.17’de su jeti yardımıyla kesme işlemi ve kesilmiş 85x85 mm boyutlarındaki yüzey plakası görülmektedir.

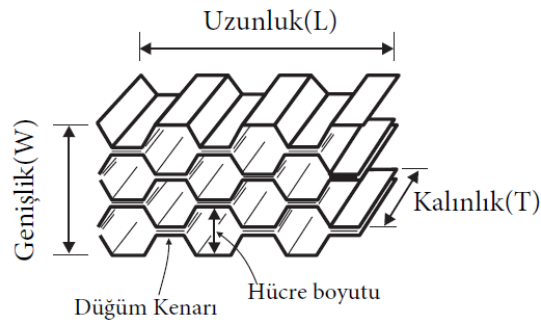


Şekil 2.17. Su jetiyle kesme işlemi ve 85x85 mm boyutlarında kesilmiş katmanlı kompozit

2.2. Bal Peteği Sandviç Kompozit Teknolojisi

Bal peteği sandviç kompozitler ortada bal peteği şeklinde çekirdek ve bu çekirdeği aralarına alan yüzey levhalarından oluşur. Bu kompozitler yüksek eğilme ve burulma dayanımlarının yanında hafif olmaları ve darbe altında enerji absorbe edebilmeleri nedeniyle birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılırlar. Bal peteği

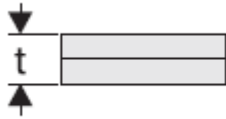
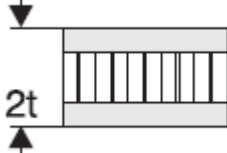
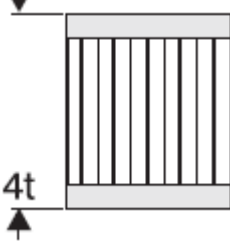
çekirdeklerin özellikleri Şekil.2.18’de görüldüğü üzere hücre kalınlığı (T) yönünde, uzunluk yönünde (L) ve genişlik (W) yönünde değişmektedir. En büyük basma ve çekme mukavemeti kalınlık (T) yönündedir. En büyük kayma mukavemeti ve kayma modülü ise uzunluk (L) yönündedir. Bal peteği çekirdek yapılarda mukavemet ve rijitlik çekirdek malzemesinin yoğunluğu ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Hücre boyutunun küçülmesiyle basma mukavemeti artmaktadır. [64]



Şekil 2.18. Bal peteği çekirdek yapısı [70]

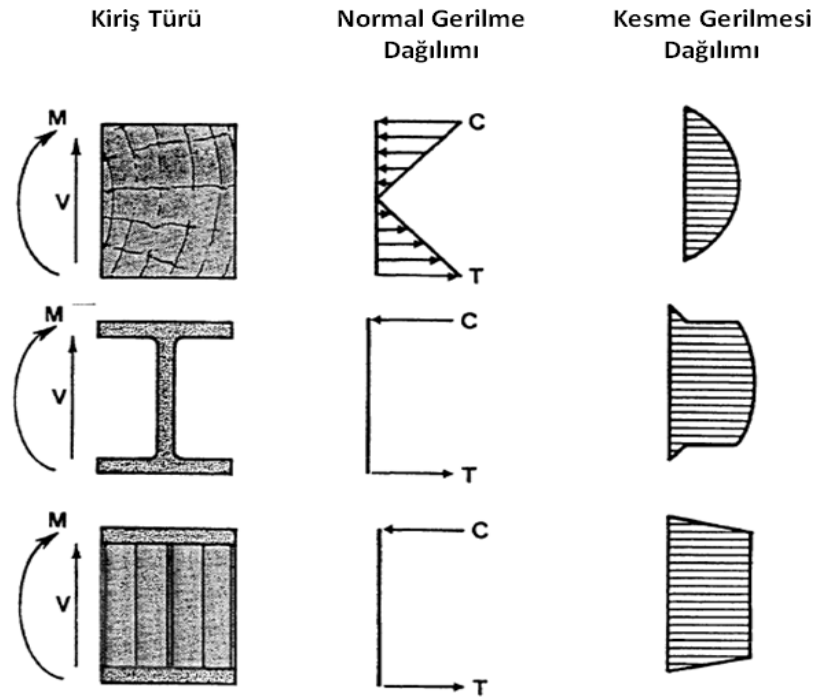
Bal peteği çekirdek kalınlığının artmasıyla da Tablo 2.1’de görüldüğü üzere sandviç yapıda rijitlik, eğilme mukavemeti büyük oranda artarken ağırlıktaki artış oldukça küçük kalmaktadır.

Tablo 2.1. Çekirdek kalınlığının artmasıyla sandviç yapıdaki değişim[65]

	Katı Malzeme	Petek Kalınlığı t	Petek Kalınlığı 3t
			
Rijitlik	1.0	7.0	37.0
Eğilme Mukavemeti	1.0	3.5	9.2
Ağırlık	1.0	1.03	1.06

Herhangi bir katı kirişe eksene dik yükleme uygulandığında cisim üzerinde en büyük çekme ve basma gerilmeleri kirişin kesit alanının en uç noktalarında en büyük değerleri

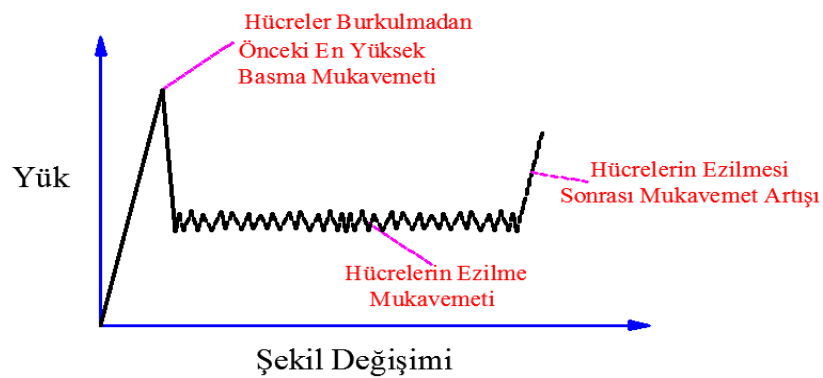
alır. Kirişin kesit alanının geometrik merkezinden geçen doğru (tarafsız eksen) bu gerilme değeri sıfır olur. Kesme gerilmesi ise kirişin kesit alanının en uç noktalarında en küçük değeri alırken geometrik merkezden geçen doğru üzerinde en büyük değeri alır. I kirişlerde ise flanş normal gerilmeleri taşıırken ağ (web) ise kesme gerilmelerini taşır. I kirişler bu özelliklerinden dolayı yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bal peteği sandviç yapılarda yükü I kirişlerde olduğu gibi taşırlar. Ancak hafifliğin ve I kirişlerde görülebilen bölgesel burkulmalardan kaçınmanın gerekli olduğu durumlarda I kirişlerden ziyade bal peteği sandviç yapılar daha yaygın olarak kullanılırlar. Bal peteği yapı hafifliğinin yanında alt ve üst yüzeyleri tamamen desteklediği için bölgesel burkulmaları da önlemektedir. Şekil 2.19'da eksen dik yükleme durumunda katı kirişte, I kirişte ve bal peteği sandviç kirişte basma (C), çekme (T) ve kayma gerilmelerinin dağılımı gösterilmiştir. Burada 'M' eğilme momentini ve 'V' kesme kuvvetini temsil etmektedir.



Şekil 2.19. Katı, I ve bal peteği çekirdeğe sahip kirişlerde gerilme dağılımları [71]

Bal peteği sandviç kompozitler yapısal uygulamalarda kullanıldıkları gibi darbe altında enerjinin emilmesi durumlarında da kullanılırlar. Darbe altında enerjinin emilmesi aslında

vurucu cismin kinetik enerjisinin darbeye uğrayan cisim içerisinde işe dönüştürülerek tüketilmesidir. Bal peteği sandviç yapılarda da bu iş bal peteği çekirdeğin ezilmesi şeklinde gerçekleşmekte ve yüksek miktarda enerji emilmektedir. Şekil 2.20’ de bal peteği yapıların yük altında ezilme davranışından da görüleceği gibi bal peteği çekirdeğe yük uygulandığında hücrelerde burkulma oluncaya kadar yük artışı meydana gelir. Hücreler burkulduktan sonra mukavemet aniden düşer ve ezilme olayı gerçekleşir. Hücreler ezilebilecekleri son noktaya geldiklerinde ise yeniden mukavemet artışı başlar.

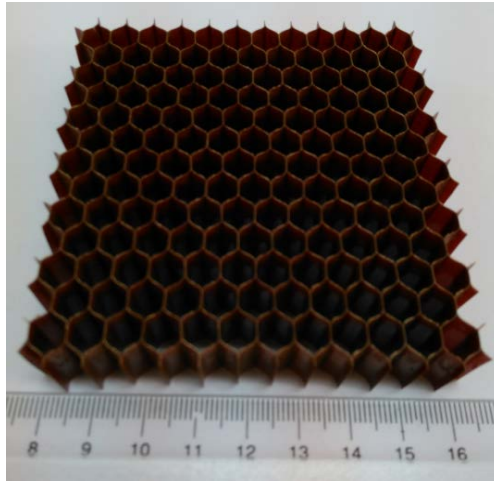


Şekil 2.20. Bal peteği çekirdeğin yük altında ezilme davranışı [71]

2.2.1. Nomex Bal Peteği Çekirdek

Metal olarak alüminyum, titanyum bal peteği çekirdekler enerji emilimi amacıyla en yaygın kullanılan çekirdek malzemeleridir. Metal olmayan Nomex ve Kevlar gibi bal peteği çekirdekler de enerji emmede iyi performans gösterebilirler de pahalı olmalarından dolayı alüminyum bal peteği kadar yaygın değildir. Nomex bal peteği çekirdek, yüksek mukavemet gerektiren uygulamaların yanında korozyon direnci, ısı yalıtımı, radyasyon yalıtımı gibi farklı ihtiyaçları aynı anda karşılanması gereken uygulamalarda kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında CORMASTER C2 ticari isimli Nomex bal peteği 1150x2400 mm boyutlarında hazır olarak alınmış, el makası yardımıyla 85x85 mm boyutlarında Şekil 2.21’deki gibi kesilmiştir. 85x85 mm boyutlarında kesilen Nomex bal peteği çekirdekler de sandviç yapıda çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır. CORMASTER C2 Nomex bal peteği 6.4 mm hücre genişliğine 18 mm hücre kalınlığına ve 50 kg/mm³ yoğunluğa sahiptir.

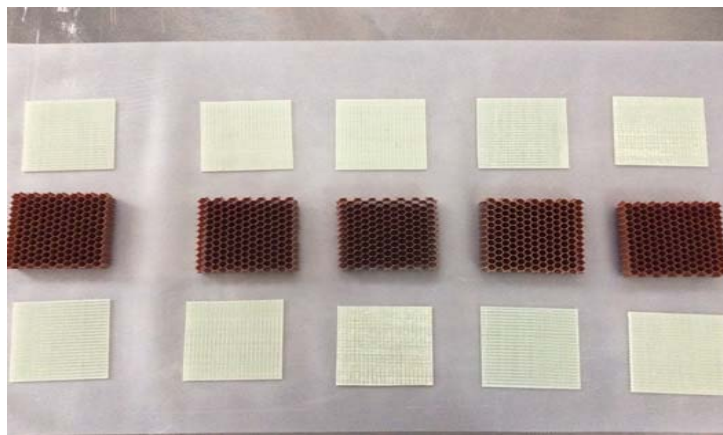


Şekil 2.21. Nomex bal peteği çekirdek

2.2.2. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Üretim Aşamaları

Daha önce yüzey plakaları üretilmiş olan cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteğinin üretim aşamaları şu şekildedir:

- 1150x2400 mm boyutlarında hazır olarak alınan Nomex bal peteği makas yardımıyla 85x85 mm boyutlarında kesilir.
- Yüzey levhalarının ve Nomex çekirdeğin yapıştırılacak yüzeylerindeki kir ve toz kalıntılarını gidermek için Etanol (C_2H_5OH) ile temizlenir ve kurumaya bırakılır. Şekil 2.22’de yüzeyleri temizlendikten sonra kurumaya bırakılan Nomex ve yüzey plakaları görülmektedir.



Şekil 2.22. Nomex bal peteği çekirdek ve yüzey plakaları

- Sonraki adımda yüzeyleri kuruyan sandviç yapı elemanlarının yapıştırılma işlemine geçilir. Yapıştırma işlemi için metallerin de yapıştırılmasında kullanılan Araldite 2015 endüstriyel yapıştırıcı kullanılmıştır. Sandviç numunelerin hazırlanmasında kullanılan yüzey plakaları düzgün yüzeyli ve süreklidir. Ancak Nomex bal peteği hücresel yapıda ve süreksizdir. Bu nedenle yapışmanın düzgün şekilde olması için Araldite 2015 yapıştırıcı düzgün ve sürekli yüzeye sahip olan yüzey plakaları üzerine bir aparat yardımıyla homejen şekilde dağıtılır. Şekil 2.23’de Araldite 2015 yapıştırıcısının plaka yüzeylerine düzgün şekilde dağıtılması görülmektedir.



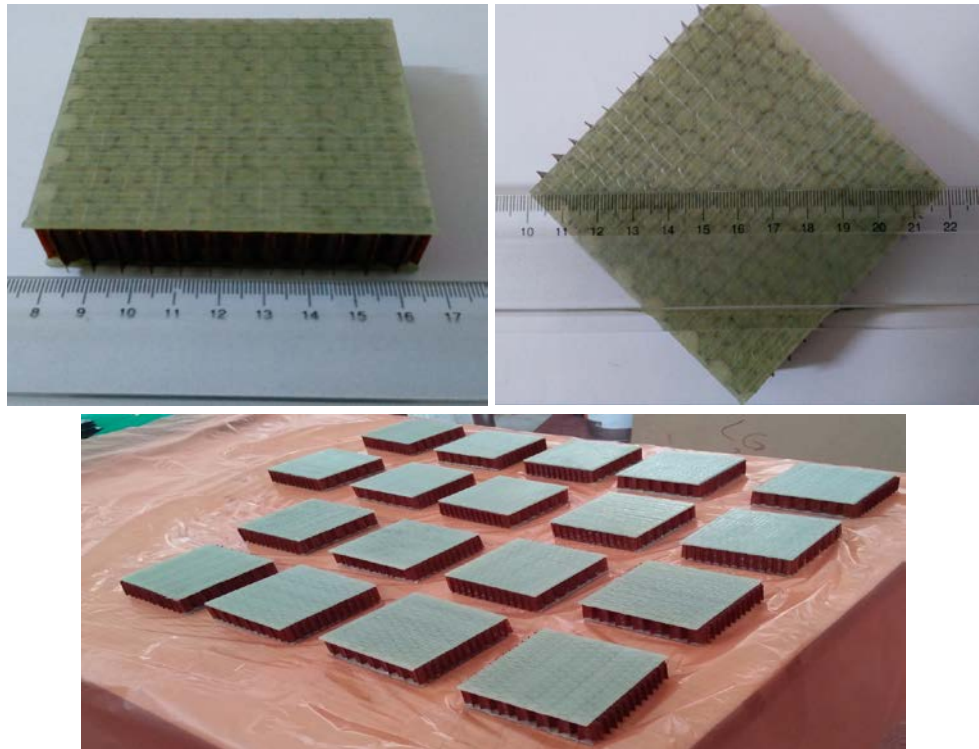
Şekil 2.23. Araldite 2015’in yüzey plakalarına dağıtılması

- Yapıştırıcılar yüzeylere düzgün şekilde dağıtıldıktan sonra Nomex bal peteği Şekil 2.24’ deki gibi alt ve üst yüzey plakaları ile birleştirilir.



Şekil 2.24. Nomex bal peteği çekirdek ve yüzey plakalarının birleştirilmesi

- Yapıştırıcının oda sıcaklığında en iyi şekilde yapışmayı gerçekleştirecek tabakayı oluşturma süresi yaklaşık 48 ile 72 saat arasındadır. Yapıştırılan numuneler 72 saatlik süre zarfında kaliteli bir yapışmanın sağlanabilmesi için üzerlerine ağırlık koymak suretiyle bası yükü altında tutulmuşlardır. Bu sürenin sonunda Nomex bal peteği sandviç yapı numuneleri düşük hızda darbe deneyi için hazır hale gelmiştir. Şekil.2.25’de darbe deneyleri için hazır hale gelen numuneler görünmektedir.

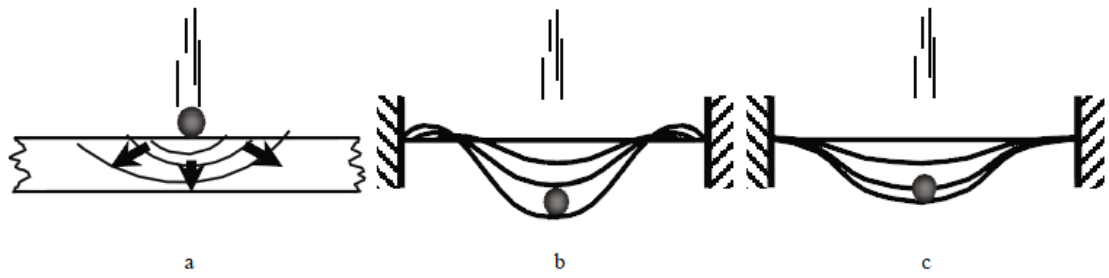


Şekil 2.25. Deneyler için hazırlanmış numuneler.

2.3. Darbe Mekanîği

Darbe mekanîği, bir çarpışma anında oluşan tepki kuvvetleri ile çarpışan cisimlerin bu tepki kuvvetlerine olan dinamik cevabını ve çarpışan cisimlerde meydana gelen değişimleri incelemektedir. Darbeler genel olarak düşük, orta, yüksek ve aşırı yüksek hızda darbe olarak sınıflandırılmaktadır. Büyük kütle darbesi olarak da bilinen düşük hızda darbe 10 m/s hıza kadar olan darbeleri kapsamaktadır. Orta hızda darbe ise hızın 10 m/s ve 50 m/s aralığında olduğu hızları kapsamaktadır. Balistik darbe olarak da bilinen yüksek hızda darbe ise hızın 50 m/s ile 2000 m/s olduğu aralıklarda gerçekleşmektedir.

Aşırı yüksek hızda darbe ise hızın 2000 m/s' den daha yüksek olduğu durumları kapsamaktadır. Şekil 2.26' da görüldüğü üzere yüksek hızda darbeye uğrayan malzemede üç boyutlu büyüyen gerilme dalgaları oluşur. Darbe olayı çok kısa sürelerde gerçekleşir ve darbeye uğrayan cismin tepkisi bölgesel olarak kalır. Ancak düşük hızlı darbe olaylarında darbe süresi yüksek hızlı darbeye göre daha uzun sürer ve darbeye uğrayan cisim bölgesellikten ziyade bir bütün olarak tepki üretir ve sınır şartları da ihmal edilemeyecek derecede önem kazanır. Ayrıca düşük hızlı darbede süre daha uzun olduğu için daha fazla elastik enerji emilimi gerçekleşir. Orta hızlı darbede ise darbe cevabı düşük hızlı darbe ve yüksek hızlı darbeden izler taşır. Darbeye uğrayan cismin cevabında eğilme ve kayma gerilmesi etkilidir. Aşırı yüksek hızlı darbede ise darbeye uğrayan cisim bir akışkan gibi davranır [1].



Şekil 2.26. Yüksek hızda darbeye uğrayan malzemede üç boyutlu büyüyen gerilme dalgaları a) yüksek hızda darbe, b) orta hızda darbe, c) düşük hızda darbe [1]

2.3.1 Düşük Hızda Darbe

Bir çekiçle çiviye vurulduğunda, çekiç yere düşürüldüğünde ya da bir futbolcu futbol topuna vurduğunda iki farklı cismin yüzeyleri kısa sürede bir etki alanı içinde bağlı hızlarla bir araya gelirler. Sonra bu cisimler arasında girişim (interference) veya nüfuziyet (interpenetrasyon) gibi etkileşimler meydana gelir. Cisimlerin bir araya gelen yüzeyleri arasında ara yüzey basıncı oluşur. Bu yüzey basıncı bölgesel deformasyonlara ve batmalara (indentation) sebep olur. Eğer cisimler deformasyona uğramazlar ise batma girişime eşit olur.

Darbenin her bir anında çarpışan iki cisim üzerinde zıt yönlerde oluşan etki veya tepkinin sonucu olan ara yüzey veya temas basıncı cisimlerin girişimlerine engel olur. Başlangıçta

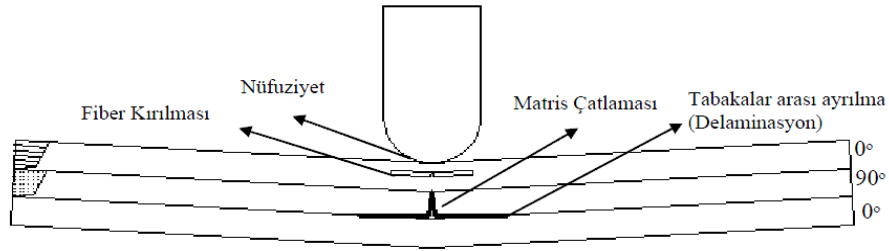
nüfuziyetin artmasıyla kuvvet de artar ve temas noktasında birbirlerine yaklaşan cisimlerin hızını azaltır. Darbe sırasında bazı anlarda temas kuvvetinin yaptığı iş birbirine yaklaşan iki cismin hızını sıfıra getirmek için yeterlidir. Sonuçta sıkışma sırasında biriktirilen enerji çarpışan cisimleri bağıl hızlarla ayrılmaya zorlar. Katı cisimler arasındaki darbe olayında çarpışma boyunca etki eden temas kuvveti, çarpışan cisimlerin ara yüzeylerinde oluşan bölgesel deformasyonların bir sonucudur.

Darbe esnasında oluşan bölgesel deformasyonlar çarpışan cisimlerin başlangıç anındaki izafi çarpma hızlarına bağlı olduğu gibi cisimlerin sertliklerine de bağlıdır. Düşük hızda meydana gelen çarpışmalarda küçük deformasyonlara sebep olan küçük temas basınçları meydana gelir. Oluşan bu deformasyonlar sadece temas alanının civarındaki bölgelerde etkilidir. Yüksek hızlarda meydana gelen darbe olaylarında temas alanının civarında plastik akmadan kaynaklanan büyük deformasyonlar meydana gelir. Bu büyük deformasyonlar krater oluşumu (cratering) ve nüfuziyet gibi belirgin özelliklerinden ötürü kolaylıkla fark edilebilir. Her durumda deformasyonlar, çarpışan cisimlerde hızın değişimine neden olan temas kuvveti ile bağlantılıdır [2].

Katmanlı kompozitler ve sandviç kompozitler düşük hızlı darbenin sebep olduğu iç hasarlara karşı oldukça duyarlıdır. Kompozit yapılarda çoğu durumda yüzeyde hasar görülmezken iç hasar kompozit yapının mukavemetini ve kullanım ömrünü azaltmaktadır. Düşük hızlı darbede oluşan hasarlar kompozitin boyutuna, rijitliğine ve sınır koşullarına çok bağlıdır.

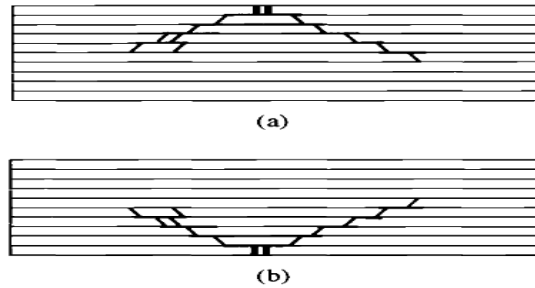
2.3.1.1 Düşük Hızda Darbe Altında Katmanlı Kompozit Yapıda Oluşan Hasar Modları

Heterojen ve anizotropik yapıya sahip fiber takviyeli katmanlı kompozit yapılar, düşük hızlarda darbeye maruz kaldıklarında farklı şekillerde hasara uğrarlar. Birçok durumda bu hasarlar şu şekildedir: 1) çekme, basma ve kayma gerilmelerinin etkisiyle fiberlere paralel yönde oluşan matris kırılmaları 2) katmanlar arasında oluşan gerilmelerden dolayı katmanlar arasında meydana gelen ayrılmalar (delaminasyon), 3) fiber kırılmaları ve burkulmaları ve 4) nüfuziyet. Hasar modlarının birbirleri arasında oluşan etkileşim farklı hasar modunun başlamasına ve yayılmasına etki eder. Bu hasar modları Şekil 2.27’de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.27. Düşük hızda darbeye altında katmanlı kompozit yapılarda oluşan hasar modları [72]

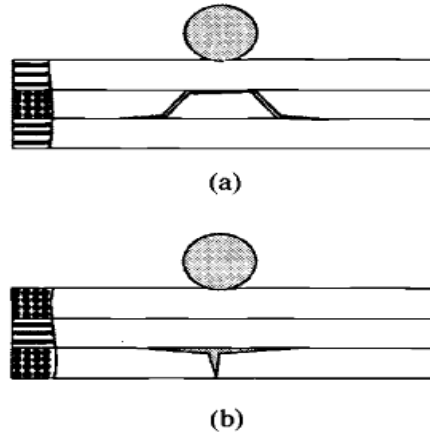
Matris Hasarı: Matris hasarı katmanlı kompozit yapının yüzey normali doğrultusunda düşük hızlı darbeye maruz kalmasıyla gerçekleşir ve birçok durumda matris çatlama, fiber ve matris arasındaki bağın kopması ve delaminasyonun başlaması şeklinde meydana gelir. Gözle zor görülebilen matris çatlamları 1-5 J enerji aralığındaki düşük hızlı darbeler altında gerçekleşir. Matris çatlama şeklinde hasara uğrama tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde meydana gelir. Şekil 2.28’de görüldüğü gibi kalın katmanlı kompozitlerde vurucunun temas ettiği en üst yüzeydeki noktalarda yüksek temas gerilmeleri nedeniyle matris çatlama başlar ve yukarıdan aşağı doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler. İnce tabakalı katmanlı kompozitlerde ise kompozit yapının arka yüzeyindeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağı oluşmasına sebep olur ve matris çatlağının ilerlemesi ters çevrilmiş bir çam ağacı görüntüsünde oluşur [1, 73].



Şekil 2.28. Matris çatlağının a) Çam ağacı şeklinde ilerlemesi
b) Ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde ilerlemesi [73]

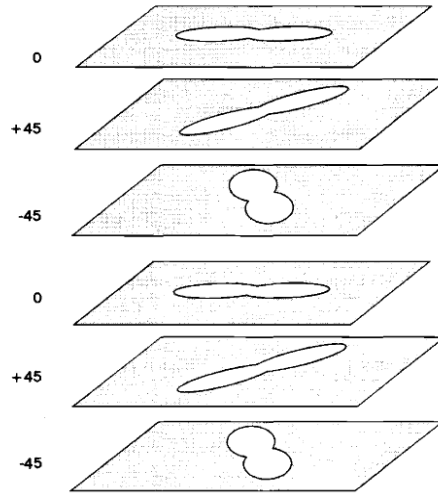
Darbe sonrası genellikle farklı şekillerde tahmin edilmesi zor matris çatlakları oluşur. Katmanlı kompozit yapılarda darbe sonrası kompozitin mekanik özelliklerinin

değişmesinde matris çatlağının çok etkisi olmadığından matris çatlaklarının belirlenmesi de çok gerekli değildir. Ancak kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyecek delaminasyon gibi önemli hasarların oluşması matris çatlaması ile başlar. Katmanlı kompozit yapıların matris hasarına uğramasında genellikle iki çeşit hasar gözlemlenir. Bunlar çekme ve kayma çatlaklarıdır. Çekme çatlakları düzlem içi normal gerilmelerin katmanın enine (transverse) kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar. Bu durum, kayma gerilmelerinin matris hasarı oluşumunda önemli rolü olduğunu göstermektedir. Şekil 2.29'da çekme ve kayma çatlakları gösterilmiştir.



Şekil 2.29. a) Çekme çatlağı ve b) Kayma Çatlağı [73]

Delaminasyon: Delaminasyon ardışık iki katman arasında meydana gelen, katmanlı kompozit yapılarda mukavemeti düşüren ve çok dikkat edilmesi gereken bir hasardır. Eğilmenin sebep olduğu gerilmeler delaminasyonun başlamasında en etkili sebeptir. Delaminasyon farklı fiber doğrultularına sahip katmanlı kompozitlerde olduğu gibi ardışık katmanlar arasındaki eğilme rijitliğinin farklı olması nedeniyle oluşur. Tabakaların arasındaki eğilme rijitliği farkı arttıkça oluşan delaminasyon alanı da artmaktadır. Örneğin ardışık iki katman arasındaki açı $0^\circ/90^\circ$ olduğunda delaminasyon alanı en büyük olur. Farklı fiber doğrultularıyla istiflenmiş bir katmanlı kompozit yapıda delaminasyon genellikle fiber doğrultusu yönünde Şekil 2.30'da olduğu gibi yer fıstığı şeklinde meydana gelir [1, 73].



Şekil 2.30. Farklı katmanlarda oluşan delaminasyon yönlenmesi [73]

Fiber Kırılması: Hasar oluşumunda fiber kırılması genellikle matris çatlamasından ve delaminasyondan sonra oluşur. Fiber kırılması bölgesel gerilmelerin yüksek olduğu ve kesme kuvvetlerinden kaynaklı batmanın etkili olduğu yerlerde yani vurucunun hemen altındaki bölgelerde ve darbeye uğramamış eğilme gerilmelerinin yüksek olduğu bölgelerde yani arka yüzeylerde meydana gelir.

Nüfuziyet: Nüfuziyet oluşan hasarların büyük ölçekli ve gözle kolayca görülebilen bir şeklidir. Fiber kırılması belirli bir büyüklüğe ulaştığında vurucunun kompozit içine tamamen girmesiyle oluşur. Darbe enerjisi nüfuziyet eşik şiddeti kompozitin kalınlığının artmasıyla hızlı bir şekilde artar. Katmanlı kompozite nüfuziyet esnasında oluşan temel enerji absorbe etme şekilleri şunlardır: kesme (shear-out), delaminasyon ve elastik eğilmedir.

2.3.1.2 Düşük Hızda Darbe İle Sandviç Kompozitlerde Oluşan Hasar Modları

Darbe sandviç kompozitlerde yüzey levhalarında, çekirdeklerde ve çekirdek yüzey levhaları arasında hasar oluşumuna sebep olur. Hasarın başlaması ve büyümesi çekirdek malzemeleri ile yüzey malzemelerine ve bunlar arasındaki ilişkiye sahiptir. Düşük hızda darbe altında sandviç yapılarda darbeye maruz üst levha, çekirdek ve bunlar arasındaki ara yüzeyde hasarlar meydana gelirken genelde alt levhada darbe meydana gelmez. Yaygın olarak görülen hasar türleri ise 1) çekirdek burkulması 2) darbenin uygulandığı üst levhada delaminasyon 3) çekirdek kırılması 4) matris kırılması ve 5) levhada fiber

kırılması şeklindedir. Üst levhadaki hasarlar katmanlı kompozit yapıda gözlemlenen matris çatlaması, fiber kırılması ve delaminasyonla aynıdır.

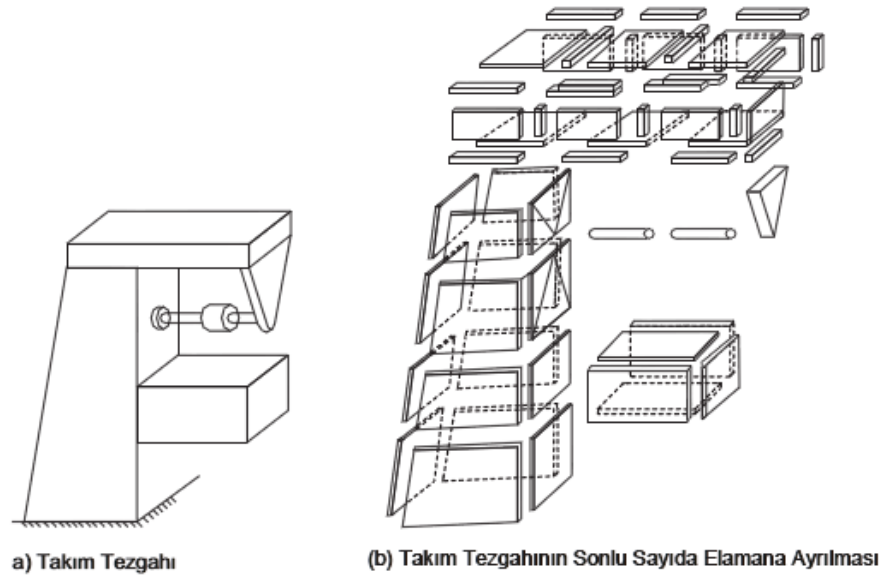
Sandviç kompozitlerde düşük hızda darbenin sebep olduğu hasar oluşumu mekanizması şu şekildedir; a) darbeye uğrayan üst yüzey levha darbeye maruz kalır. Eğer levha vurucunun batmasına direnç gösterirse, levha ile sınırlı olan yoğun hasar meydana gelir. Çekirdek ile üst levha arasında şekil değiştirmelerinin farklı olmasından dolayı ayrılmalar meydana gelir. Daha yüksek darbe enerjilerinde vurucu uç üst levhaya nüfuz ederek çekirdeğe doğru ilerler. b) çekirdek hasarı hücre ezilmesi, kesme hasarı ve yüzey tabakası ile çekirdek arasında ayrılmanın olması şeklinde meydana gelir. c) Darbeye uğramayan alt levha ise eğilmeden kaynaklanan çekme gerilmelerine maruz kalır. Üst levhada olduğu gibi çekirdek ile alt levha arasında ayrılmalar meydana gelir. Vurucu sandviç yapının tamamına nüfuz etmeden arka yüzeyde önemli delaminasyonlar meydana gelir.

Sandviç yapıda oluşacak hasar, darbe altında sandviç yapının destek durumuna (sınır şartlarına), levhaların ve çekirdeğin malzeme özelliklerine ve geometrisine, vurucunun malzeme özellikleri ve geometrisine bağlıdır [1, 73].

2.4. Sonlu Elemanlar Metodu

İnsanoğlu doğada karşılaştığı problemleri matematik diliyle yorumlayarak çözmeye çalışır. Her problem kendine ait büyüklük yardımıyla analitik olarak ifade edilerek kesin sonuçlar aranır. Ancak analitik olarak kesin sonuçlar bulmak her problemde mümkün olmamaktadır. Bu noktada çözüm yöntemi olarak sayısal yöntemler devreye girmektedir.

Sonlu elemanlar metodu da en yaygın kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde karmaşık olan problem daha basit alt problemlere ayrılarak her birisi kendi içinde çözülür. Bulunan bu çözümler birleştirilerek karmaşık olan problemin çözümü bulunur. Şekil.2.31'deki gibi bir takım tezgahının çalışması esnasında oluşacak şekil değiştirme ve gerilme gibi büyüklüklerin bulunması istendiğinde kesin sonucun bulunması hemen hemen imkansızdır. Ancak geometri Şekil 31'deki gibi sonlu sayıda elemana ayrılarak gerilme ve şekil değiştirme gibi büyüklükler yaklaşık olarak hesaplanabilir.



Şekil 2.31. Bütün bir geometrinin sonlu sayıda elemana ayrılması [74]

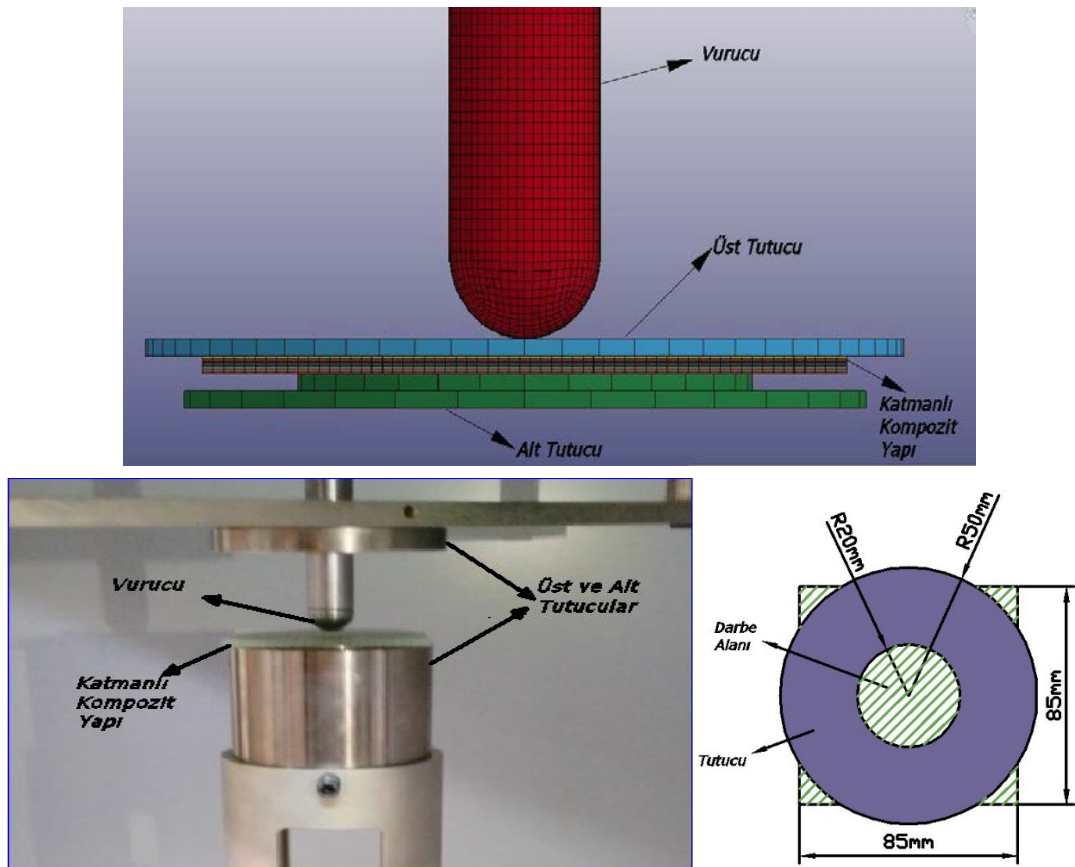
Sonlu elamanlar metodunda bütünü oluşturan elemanların fazla sayıda olması yöntemi bilgisayarsız olarak kullanmayı imkansız hale getirmektedir. Ancak günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel olarak sonlu elamanlar metodu geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Metot özellikle akışkanlar mekaniği problemlerinde, gerilme analizi hesaplamalarında, darbe analizlerinde, balistik problemlerde, yorulma analizlerinde, elektrik ve manyetik alan problemlerinde, elastisite ve plastisite problemlerinde, ısı iletimi problemlerinde bilgisayar paket programları yardımıyla kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında sonlu elamanlar modellerinin oluşturulmasında ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL-ANSYS Parametric Design Language) kullanılmıştır. APDL kullanılarak sayısal modeller parametrik olarak modellenmiştir. Oluşturulan model LS-DYNA sonlu elamanlar paket programı kullanılarak çözülmüştür. LS-DYNA, eksplisit dinamik analizler yapabilen bir sonlu elamanlar paket programıdır. Eksplisit dinamik analizler, kısa zaman aralığında gerçekleşen fiziksel durumlar, büyük deformasyonlar (large strains), kırılma (fracture) veya malzeme kopması (material failure) gibi durumlar içeren analizlerdir ve bu tür problemlerin simüle edilmesi için idealdir [75]. Sonlu elamanlar modelinin oluşturulmasında çözümün elde edilmesinde etkili olan malzeme modeli, elaman tipi ve temas algoritmaları daha sonraki bölümlerde

cam fiber takviyeli katmanlı kompozit ve cam fiber takviyeli kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapı için ayrı ayrı açıklanmıştır.

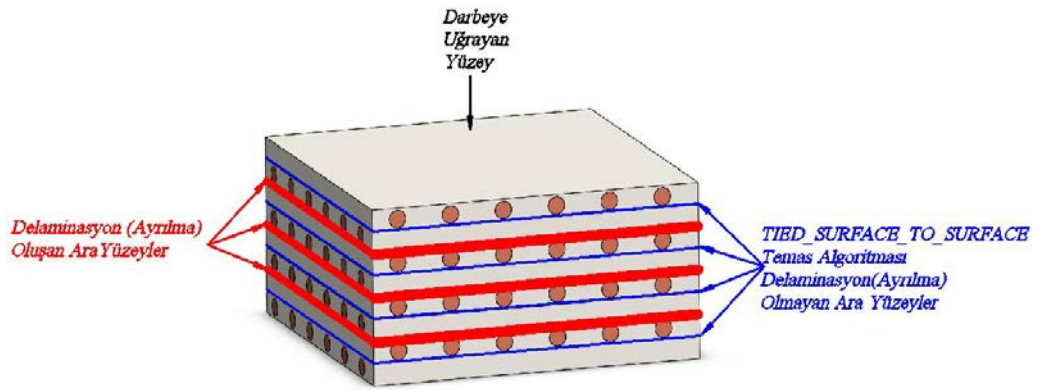
2.4.1. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakanın Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

Katmanlı kompozit plakaların modellenmesinde öncelikle ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL-ANSYS Parametric Design Language) kullanılarak macro (.mac) dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra keyword (.k) dosyası oluşturularak çözüm işlemi LS-DYNA sonlu elemanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli Şekil 2.32'deki gibi katmanlı kompozit yapı, vurucu ve tutuculardan oluşmaktadır. Tutucular ve vurucu Şekil 2.32'de görüldüğü gibi gerçek deney şartlarına uygun şekilde modellenmiştir.



Şekil 2.32. Cam fiber takviyeli katmanlı kompozitin sonlu elemanlar modeli ve gerçek deney şartları

Vurucunun çapı 20 mm ve kütlesi 5.045 kg'dır. Vurucu ve tutucular rijit malzeme olarak kabul edilmiş ve poisson oranı ile elastiklik modülü sırasıyla 0.33 ve 210 GPa olarak programa girilmiştir. Katmanlı kompozit yapı, vurucu ve tutucuların modellenmesinde 8 düğüm noktalı ve 9 serbestlik dereceli SOLID 164 tipi eleman kullanılmıştır. Katmanlı kompozit plaka üretim şekline uygun olacak şekilde $[0/90]_4$ açılarla istiflenmiş şekilde ve sekiz katmanlı olarak modellenmiştir. Bu sekiz katmanlı modelde ikişerli katmanlar arası TIED_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılarak delaminasyon olmayacak şekilde modellenirken diğer yüzeylerde delaminasyona Şekil 2.33'deki gibi izin verilmiştir.



Şekil 2.33. Katmanlı kompozitte delaminasyon yüzeyleri

Katmanlı kompozit yapının düşük hızda darbe altında hasara uğraması sırasında delaminasyon olayının sayısal modelde gözlemlenebilmesi için MAT_COMPOSITE_MSC_DMG (MAT 162) malzeme modeli kullanılmıştır. MAT 162 malzeme modeli özellikle fiberleri tek yönlü olacak şekilde istiflenmiş katmanlı kompozit malzemelerde ve örgü katmanlı kompozit malzemelerde hasar modlarının modellenmesinde kullanılmaktadır. MAT 162 malzeme modelinde üç denklem fiber hasarının farklı üç modunun belirlenmesinde kullanılmaktadır [76]. Bunlar çekme-kayma fiber modu, basma fiber modu ve ezilme modudur. Denklemler ise şu şekildedir

çekme-kayma fiber modu:

$$f_1 - r_1^2 = \left(\frac{E_a \langle \varepsilon_a \rangle}{S_{aT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{ab}^2 \varepsilon_{ab}^2 + G_{ca}^2 \varepsilon_{ca}^2}{S_{FS}^2} \right) - r_1^2 = 0 \quad (2.1)$$

basma fiber modu:

$$f_2 - r_2^2 = \left(\frac{E_a \langle \varepsilon'_a \rangle}{S_{aC}} \right)^2 - r_2^2 = 0, \rightarrow \varepsilon'_a = -\varepsilon_a - \frac{\langle -E_c \varepsilon_c - E_b \varepsilon_b \rangle}{2E_a} \quad (2.2)$$

ezilme modu:

$$f_3 - r_3^2 = \left(\frac{E_c \langle -\varepsilon_c \rangle}{S_{FC}} \right)^2 - r_3^2 = 0 \quad (2.3)$$

Bu denklemlerde S_{aT} ve S_{aC} fiber yönündeki çekme ve basma mukavemetini S_{FS} ve S_{FC} ise fiberlerin kesme ve ezilme hasarına bağlı katmanların mukavemetlerini, E elastik modülünü, G kayma modülünü temsil etmektedir. r değerleri denklemde 1 olduğunda ise ilgili hasar modu başlamaktadır. Matris hasar modları ise eksene dik yükleme doğrultusunda oluşan hasar modu, fiber doğrultusuna dik doğrultuda oluşan hasar modu ve fiber doğrultusunda paralel doğrultuda oluşan hasar modu (delaminasyon) şeklindedir. Bu matris hasar modlarının denklemleri ise şu şekildedir:

eksene dik yükleme doğrultusunda oluşan hasar modu:

$$f_4 - r_4^2 = \left(\frac{E_b \langle -\varepsilon_b \rangle}{S_{bC}} \right)^2 - r_4^2 = 0 \quad (2.4)$$

fiber doğrultusuna dik doğrultuda oluşan hasar modu

$$f_5 - r_5^2 = \left(\frac{E_b \langle \varepsilon_b \rangle}{S_{bT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{bc} \varepsilon_{bc}}{S_{bc0} + S_{SRB}} \right)^2 + \left(\frac{G_{ab} \varepsilon_{ab}}{S_{ab0} + S_{SBR}} \right)^2 - r_5^2 = 0 \quad (2.5)$$

fiber doğrultusunda paralel doğrultuda oluşan hasar modu (delaminasyon)

$$f_6 - r_6^2 = S^2 \left\{ \left(\frac{E_c \langle \varepsilon_c \rangle}{S_{cT}} \right)^2 + \left(\frac{G_{bc} \varepsilon_{bc}}{S_{bc0} + S_{SRC}} \right)^2 + \left(\frac{G_{ca} \varepsilon_{ca}}{S_{ca0} + S_{SRC}} \right)^2 \right\} - r_6^2 = 0 \quad (2.6)$$

Bu denklemlerde ise S deneylerle elde edilen sonuçlar arasında daha iyi uyum yakalamak için kullanılan skala faktörüdür. S_{ab0} , S_{bc0} , S_{ca0} sanki statik kesme mukavemeti değerleri

ve S_{bT}, S_{cT} ise eksene dik doğrultudaki (transverse) çekme dayanımı değerleridir. Eksene dik doğrultudaki şekil değişimi $\varepsilon_b < 0$ veya $\varepsilon_c < 0$ olduğu durumda hasara uğrayan alanın kapalı olduğu varsayılır ve Mohr-Coulomb teorisine göre kesme dayanımlarının basma şekil değişimlerine bağlı olduğu farz edilir.

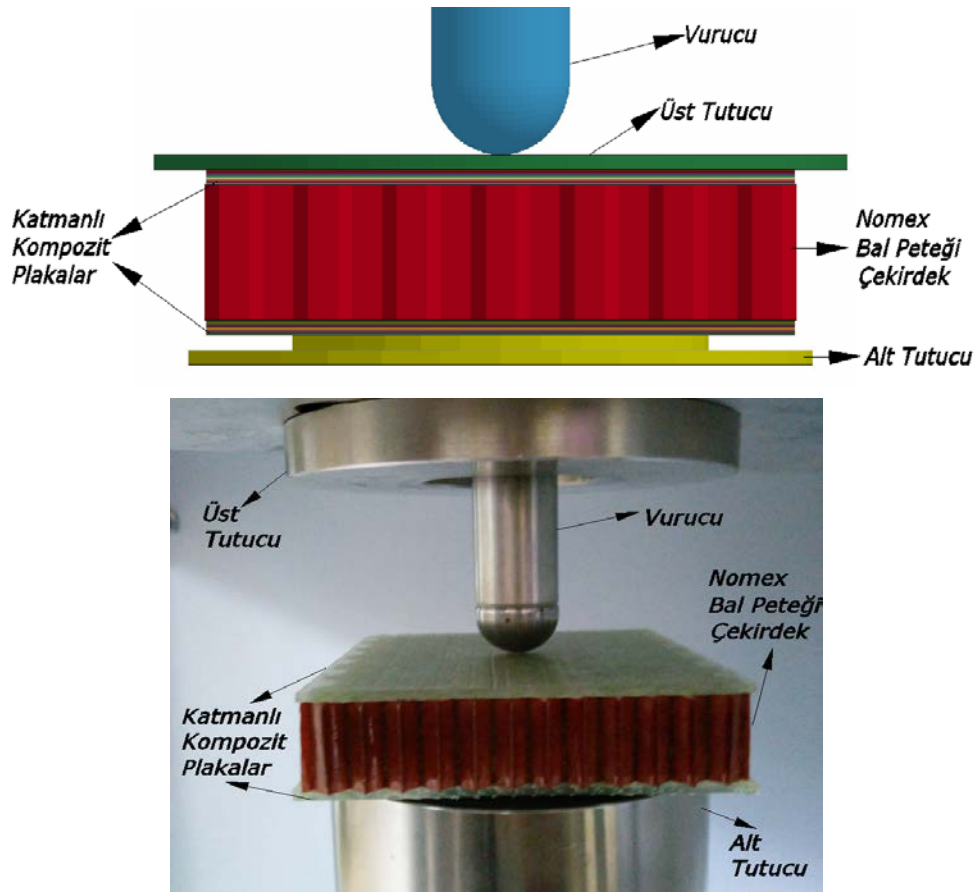
$$\begin{aligned} S_{SRB} &= E_b \tan(\varphi) \langle -\varepsilon_b \rangle \\ S_{SRC} &= E_c \tan(\varphi) \langle -\varepsilon_c \rangle \end{aligned} \quad (2.7)$$

φ malzeme sabiti iken $\tan(\varphi)$ sürtünme katsayısına benzer bir sabittir. Denklem 2.1-2.6 da r değerleri 1 olduğunda ilgili hasar modu başlar.

2.4.2. Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi

Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapının sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakanın modellenmesinde uygulanan işlem adımları izlenmiştir. Öncelikle ANSYS Parametrik Tasarım Dili kullanılarak macro (.mac) dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra keyword (.k) dosyası oluşturularak çözüm işlemi LS-DYNA sonlu elemanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Vurucu, tutucular ve cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakanın özellikleri değiştirilmemiştir. Nomex bal peteği macro dosyasında oluşturulup katmanlı kompozit plakaların arasına ilave edilmiştir. Sayısal model Şekil 2.34'den de görülebileceği gerçek deney şartlarında modellenmiştir.

Sonlu elemanlar modeli; sandviç yapı, vurucu ve tutuculardan oluşmaktadır. Vurucu tutucu ve katmanlı kompozitlerin modellenmesinde SOLID 164 tipi eleman kullanılırken Nomex bal peteği çekirdeğin modellenmesinde SHELL 163 tipi eleman kullanılmıştır. Analizlerde Nomex bal peteği çekirdek için MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmıştır. Vurucu ve tutucular rijit kabul edilip MAT_RIGID malzeme modeli ile modellenmiştir. Katmanlı kompozit plakaların modellenmesinde yine MAT_COMPOSITE_MSC_DMG (MAT 162) malzeme modeli kullanılmıştır.



Şekil 2.34. Nomex bal peteği sandviç yapının sayısal modeli ve gerçek deney şartları

Darbe analizlerinde diğer bir önemli adım ise temas modellerinin tanımlanmasıdır. Sınır şartlarını oluşturan tutucular ve katmanlı kompozit plakalar arasında CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sandviç yapıda delinme gerçekleşebileceği için vurucu ile katmanlı kompozit plakaların her bir katmanı ve Nomex bal peteği çekirdek arasında CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Sekiz katmanlı kompozit plakaların ikişerli katmanları arasında CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Nomex bal peteği ile üst plakanın en alt katmanı arasında ve alt plakanın en üst katmanı arasında CONTACT_TIEBREAK_NODES_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Darbe esnasında oluşabilecek olası diğer bütün temaslar için de CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır.

Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit malzemenin modellenmesinde kullanılan MAT_COMPOSITE_MSC_DMG (MAT 162) malzeme modeli için gerekli elastiklik modülü, poisson oranı, kayma modülü gibi malzeme özellikleri ve modelin oluşturulmasında kullanılan girdiler literatürden [76] alınmış ve bu veriler kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile mukayese edilerek sayısal veriler üzerinde literatürle uyumlu olarak bir kalibrasyon çalışması yapılmıştır. Böylece uygun sayısal veriler tespit edilmiştir. Tablo 2.2.de bu değerler verilmiştir.

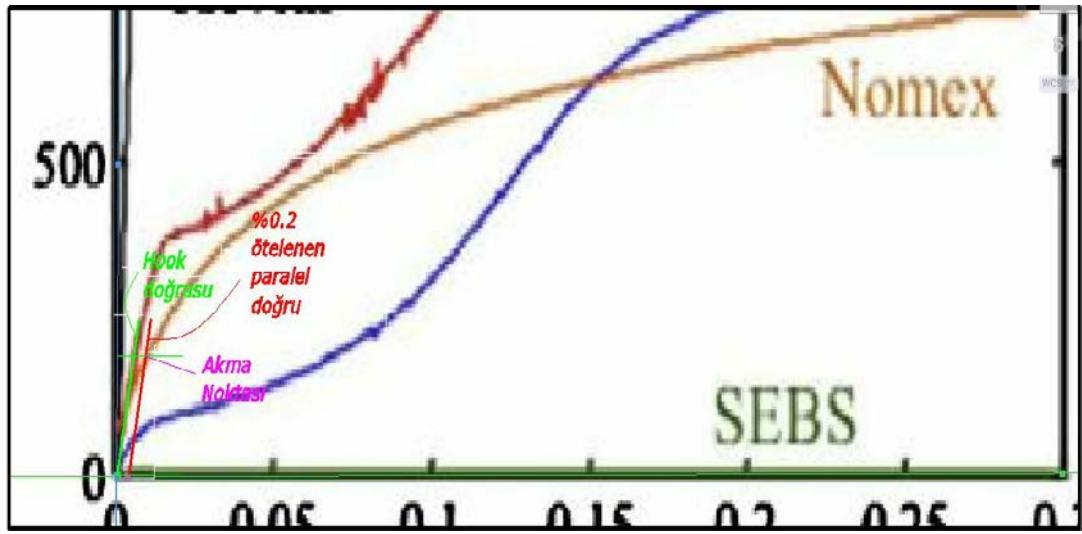
Tablo 2.2. Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit malzeme değerleri

RO (kg/m ³)	EA(GPa)	EB(GPa)	EC(GPa)	PRBA	PRCA	PRCB
2000.00	75.00	10.00	10.00	0.065	0.065	0.45
GAB(GPa)	GBC(GPa)	GCA(GPa)	SAT(MPa)	SAC(MPa)	SBT(MPa)	SBC(MPa)
5.00	4.30	5.00	1380.00	770.00	47.00	137.00
SCT(MPa)	SFC(MPa)	SFS(MPa)	SAB(MPa)	SBC(MPa)	SCA(MPa)	SFFC
47.00	850.00	250.00	76.00	38.00	76.00	0.3
AMODEL	PHIC	E_LIMT	S_DELM	OMGMX	ECRASH	EEXPN
1	10.00	4.50	1.20	0.999	0.001	4.50
AM1	AM2	AM3	AM4			
1.00	1.00	0.50	-0.20			

Sandviç yapının çekirdeğini oluşturan Nomex bal peteğinin modellenmesinde kullanılan MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli için gerekli girdi değerleri ise yine literatürden [77] elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrisinden Get Data programı yardımı ile ve üretici firmadan alınmıştır. Nomex’in gerilme -şekil değiştirme eğrisinde belirgin bir akma değeri gözlemlenememiştir. Alüminyum ve bazı plastiklerde olduğu gibi belirgin bir akma değeri göstermeyen malzemelerde akma değerinin belirlenmesi için kullanılan öteleme (offset) metodu Nomex’in akma değerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde Hook doğrusuna paralel olarak % 0.2 şekil değiştirme değerinden çizilen doğrunun gerilme şekil değiştirme eğrisini kestiği nokta akma değeri olarak alınmıştır. Alınan bu değerler Tablo 2.3 de ve yararlanılan grafik ise Şekil 2.35’de verilmiştir.

Tablo 2.3. Nomex bal peteği malzeme değerleri

RO (kg/m ³)	E(GPa)	PR	SIGY(MPa)	ETAN(GPa)	FAIL
50	75.00	0.25	219	2	0.35



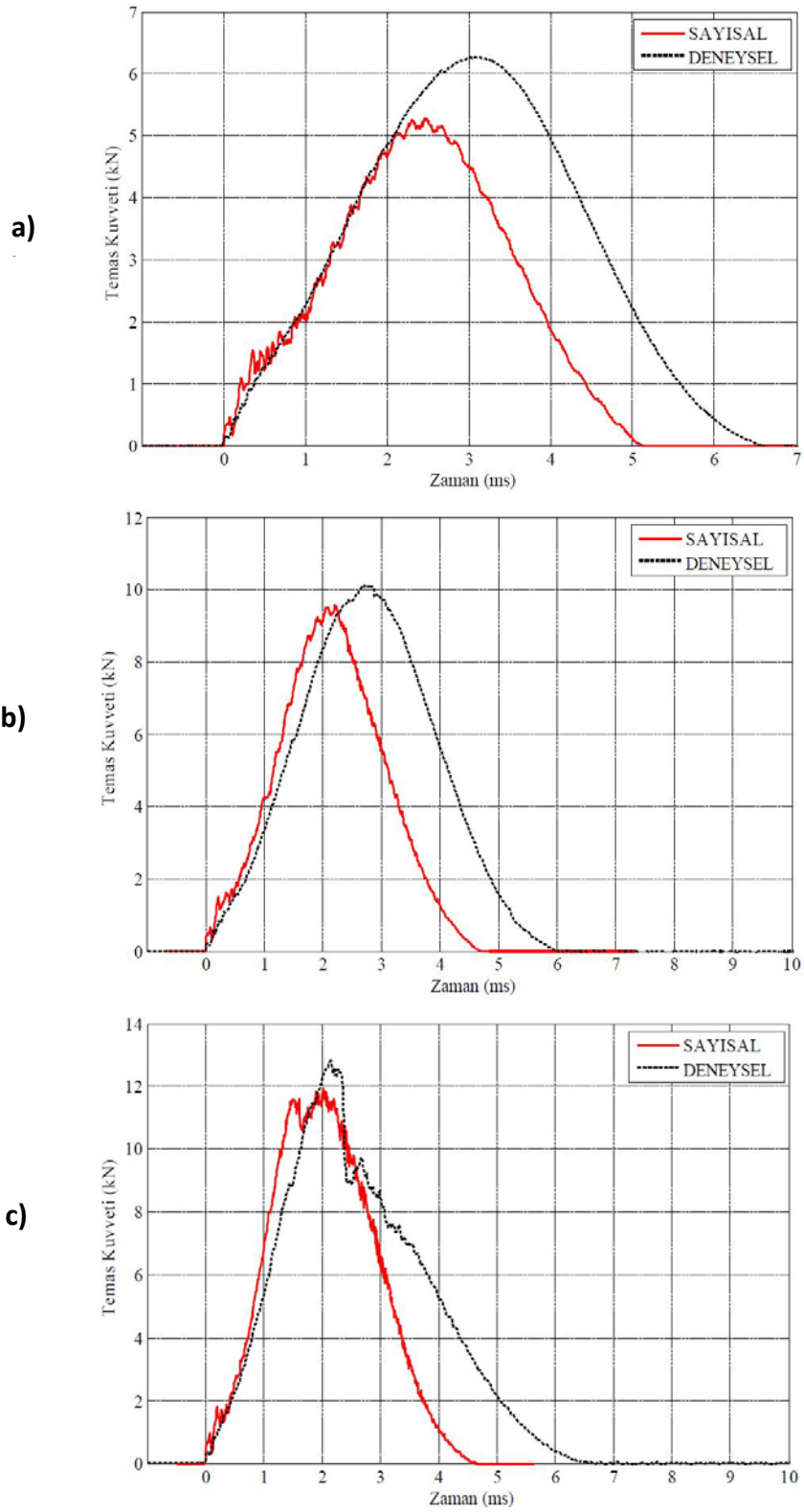
Şekil 2.35. Nomex bal peteğinin elastiklik modülü ve akma değerinin belirlenmesinde kullanılan grafik [77]

3.BÖLÜM

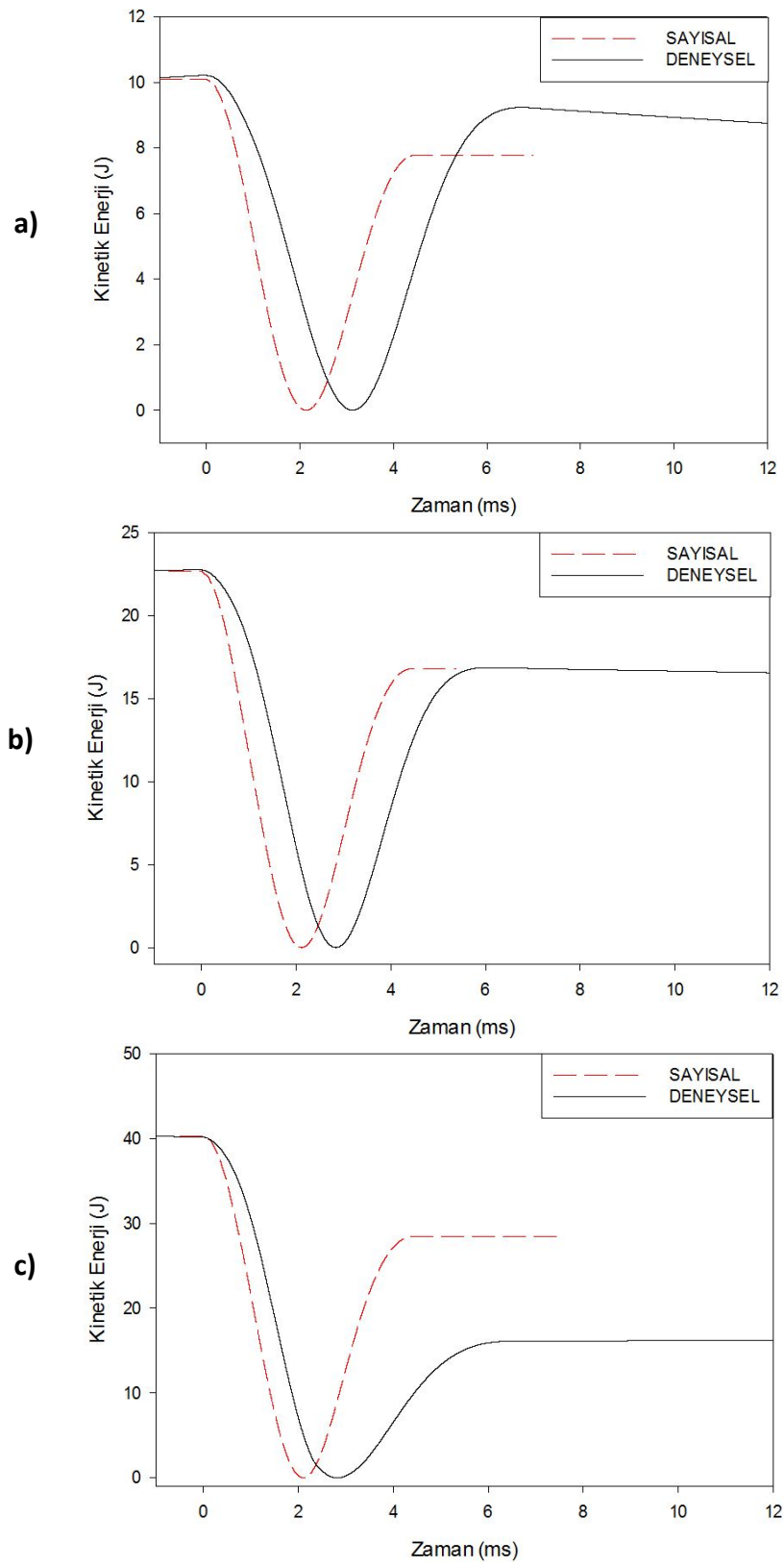
BULGULAR

3.1 Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakanın Düşük Hızda Darbe Davranışı

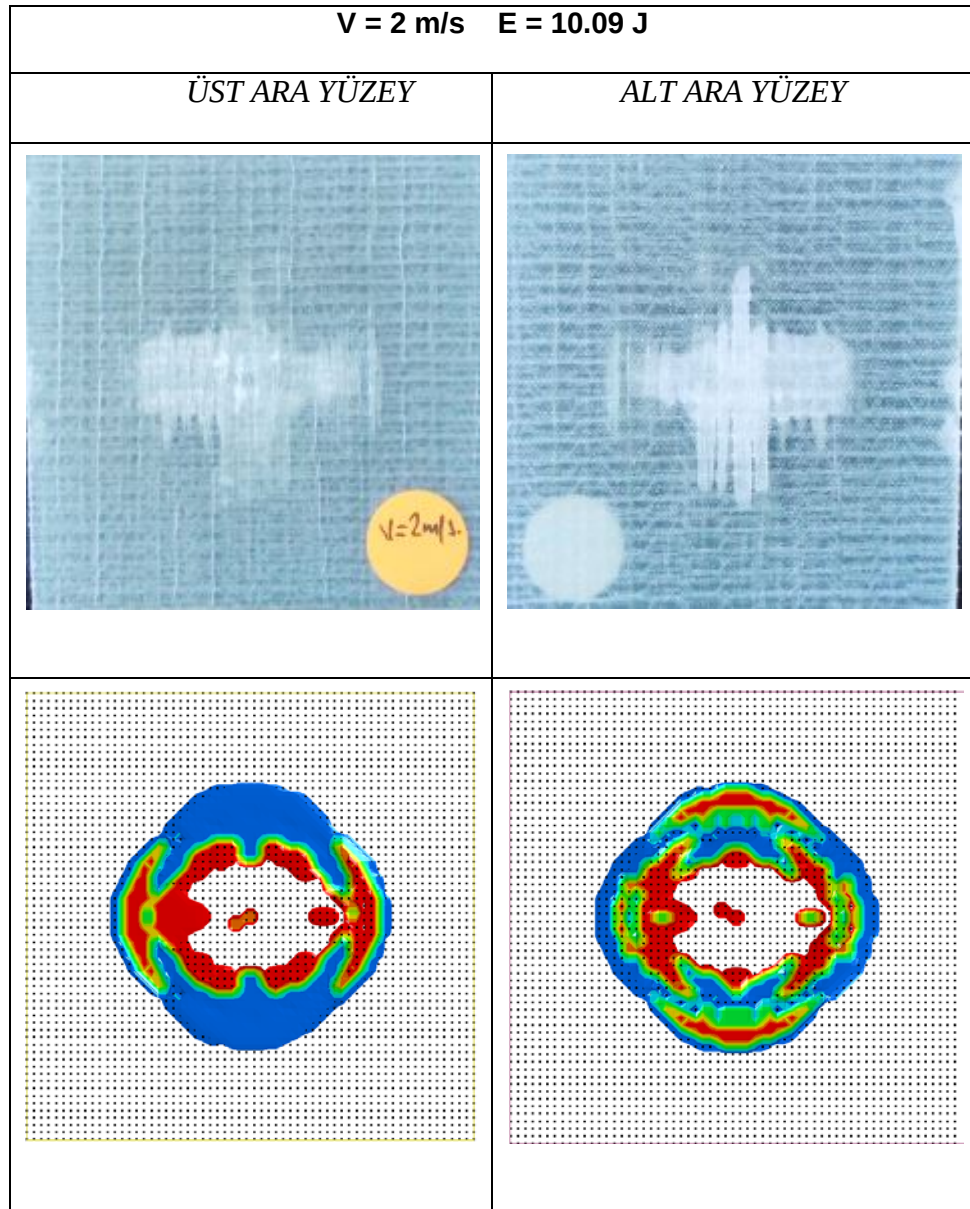
Cam fiber takviyeli $[0/90]_4$ istiflenme şekline sahip katmanlı kompozit plakanın düşük hızda darbe davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analizlerde ilerleyen hasar modeli MAT_COMPOSITE_MSC_DMG (MAT 162), darbe altında oluşan delaminasyon şeklini ve alanını belirleyebilmek için malzeme modeli olarak kullanılmıştır. Darbe enerjisinin 10.09, 22.7 ve 40.36 J olduğu durumlar için temas kuvveti-zaman eğrileri ve kinetik enerji-zaman eğrileri deneysel ve sayısal olarak elde edilmiş ve deneysel sonuçlarla sayısal sonuçlar arasında uyumluluk yakalanmıştır. Şekil 3.1’de 10.09, 22.7 ve 40.36 J darbe enerjileri için temas kuvveti- zaman grafikleri ve Şekil 3.2’de kinetik enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere darbe enerjisinin 10.09 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 5.27 kN iken deneysel sonuçlarda en büyük temas kuvveti 6.26 kN olarak elde edilmiştir. Hata payı ise %15.8 olmuştur. Sayısal ve deneysel temas süreleri arasında ise 1.46 ms fark oluşmuştur. Darbe enerjisinin 22.7 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 9.58 kN iken deneysel sonuçlarda en büyük temas kuvveti 10.11 kN olarak elde edilmiştir. Hata payı ise %5.24 olmuştur. Sayısal ve deneysel temas süreleri arasında ise 1.29 ms fark oluşmuştur. Darbe enerjisinin 40.36 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 11.94 kN iken deneysel sonuçlarda en büyük temas kuvveti 12.82 kN olarak elde edilmiştir. Hata payı ise %6.86 olmuştur. Sayısal ve deneysel temas süreleri arasında ise 2.15 ms fark oluşmuştur. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere darbe enerjisinin 10.09 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda 2.33 J’lük kısmı, deneysel sonuçlara göre ise 1.34 J’lük kısmı, darbe enerjisinin 22.7 olduğu durumda sayısal sonuçlarda 5.91 J’lük kısmı deneysel sonuçlarda 5.95 J’lük kısmı, darbe enerjisinin



Şekil 3.1. Sayısal ve deneysel temas kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması, vurucu enerjisi a) 10.09 J, b) 22.7 J, c) 40.36 J.

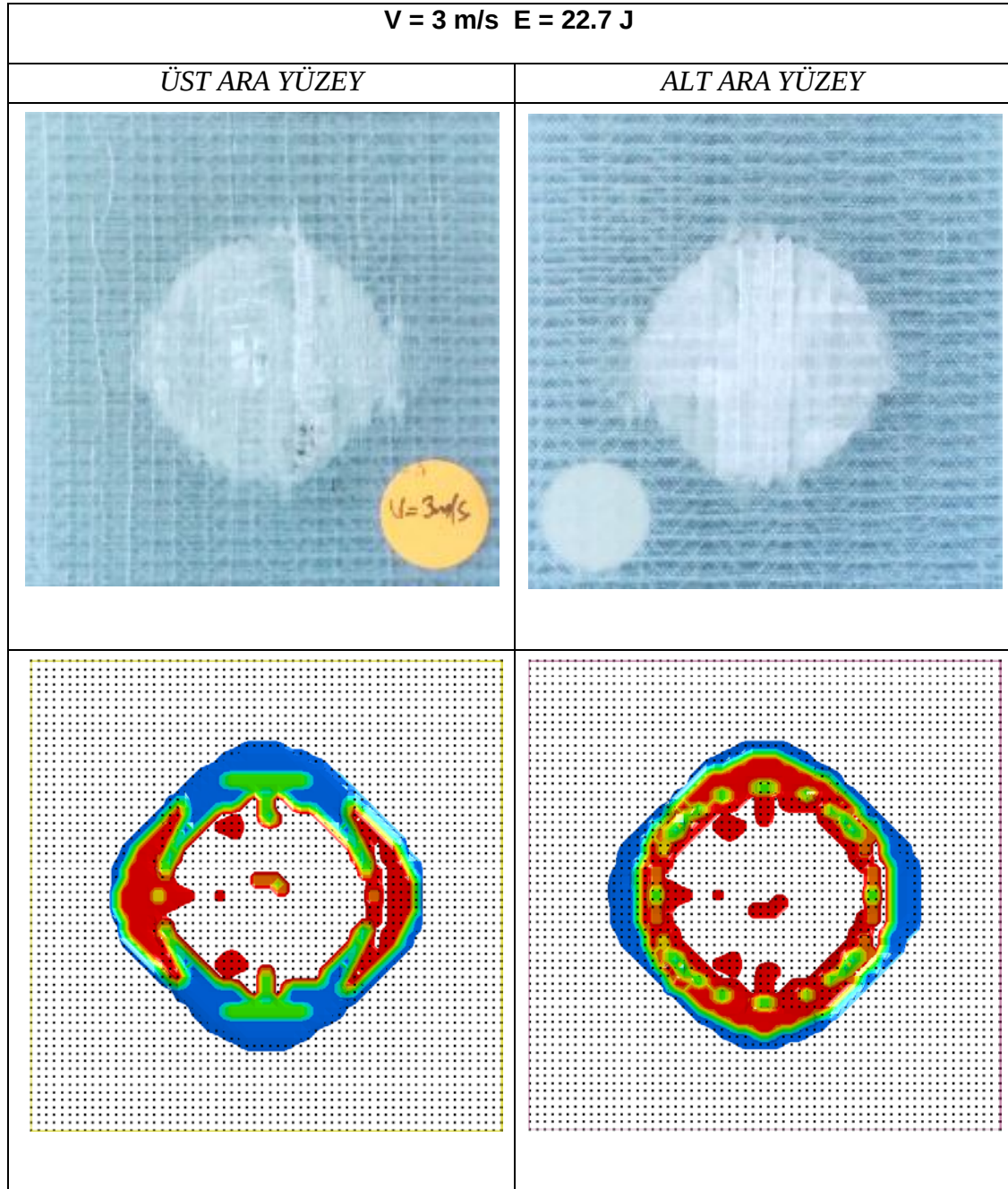


40.3 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda 11.89 J'lük kısmı deneysel sonuçlarda 23.89 J'lük kısmı emilmiştir. Hata oranları ise 10.09, 22.7 ve 40.3 J'lük enerjiler için sırasıyla %9,8 %0.7 ve % 29.7 olmuştur. Darbe hızının 2 m/s, vurucu kütesinin 5.045 kg ve darbe enerjisinin 10.09 J olduğu durumda darbe sonucu oluşan delaminasyon alanı ve şekli sayısal sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Şekil 3.3'de bu benzerlik durumu görülmektedir.



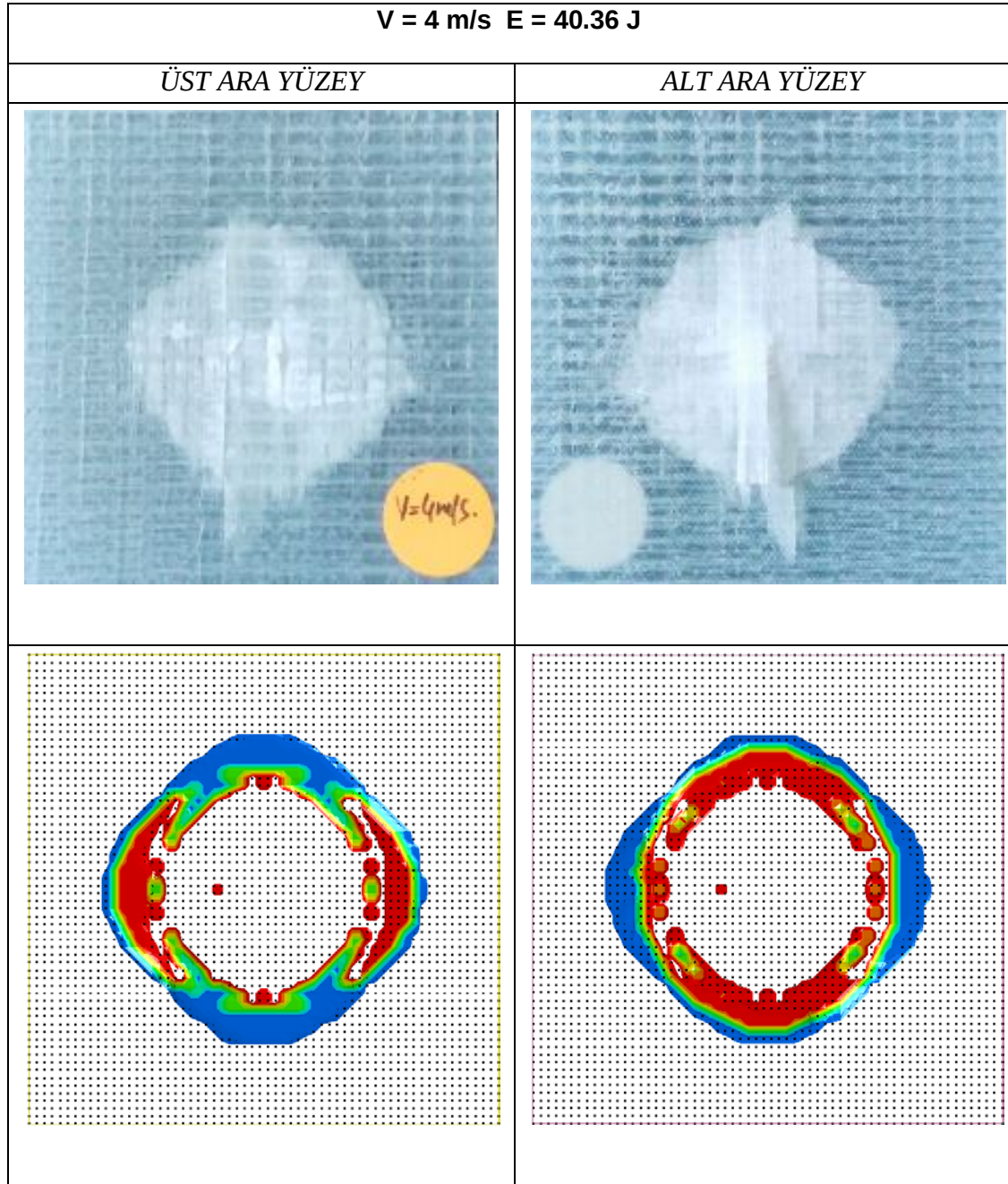
Şekil 3.3. Darbe enerjisinin 10.09 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması

Darbe hızının 3 m/s vurucu kütleinin 5.045 kg ve darbe enerjisinin 22.7 J olduğu durumda darbe sonucu oluşan delaminasyon alanı ve şekli sayısal sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Şekil 3.4’de bu benzerlik durumu görülmektedir.



Şekil 3.4. Darbe enerjisinin 22.7 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması

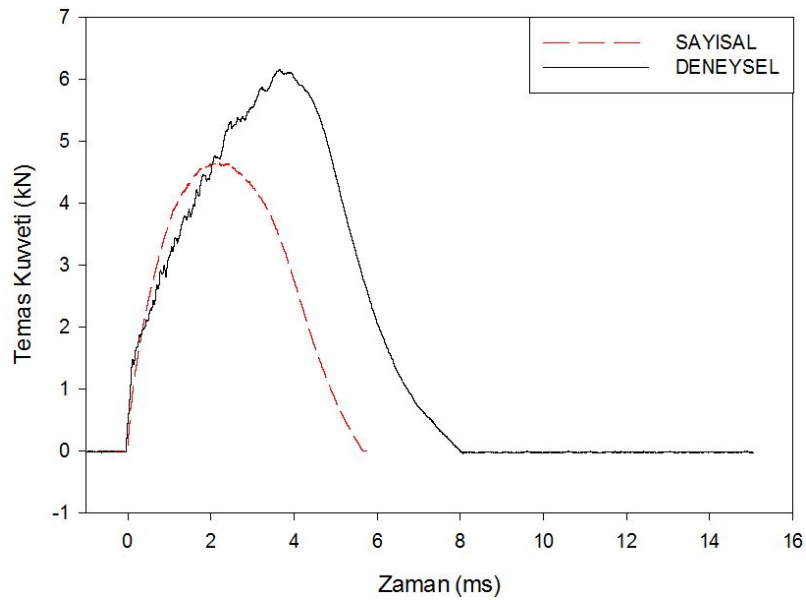
Darbe hızının 4 m/s vurucu kütleinin 5.045 kg ve darbe enerjisinin 40.36 J olduğu darbe sonucu oluşan delaminasyon alanı ve şekli sayısal sonuçlarla benzerlik göstermiştir. Şekil 3.5’de bu benzerlik durumu görülmektedir.



Şekil 3.5. Darbe enerjisinin 40.36 J olduğu durumda sayısal ve deneysel delaminasyon alanlarının ve şekillerinin karşılaştırılması

3.2 Cam Fiber Takviyeli Katmanlı Kompozit Plakalar ile Desteklenmiş Nomex Bal Peteği Sandviç Yapının Düşük Hızda Darbe Davranışı

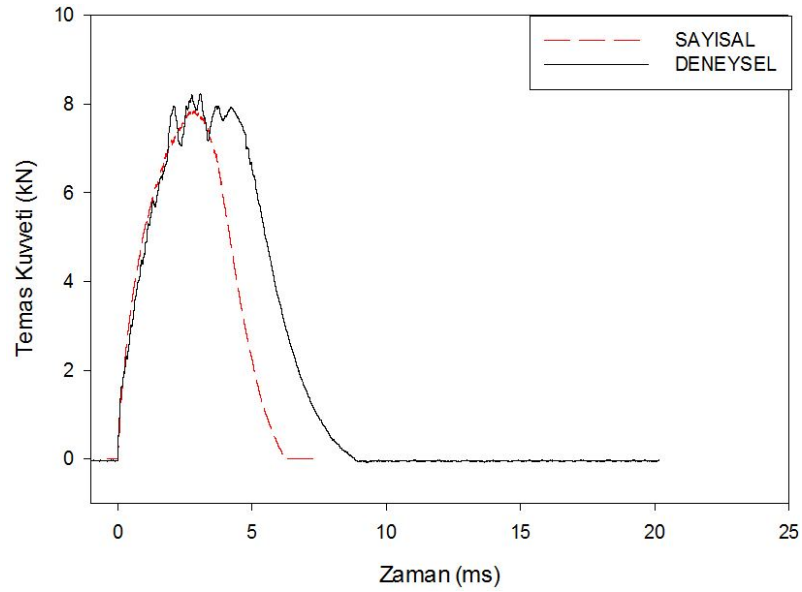
Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapının düşük hızda darbe davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Darbe altında hasar oluşturarak delaminasyonların gözlemlenebilmesi için sandviç yapıda vurucu hızları katmanlı kompozit yapıdan farklı olarak 3, 5, 7 m/s olarak uygulanmıştır. Cam fiber takviyeli katmanlı kompozit plakanın düşük hızda darbe davranışı incelenirken kullanılan MAT 162 malzeme modeli sandviç yapının plakalarının modellenmesinde de kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen verilerle çizdirilen temas kuvveti-zaman grafiklerinde ve yüzey plaklarında oluşan delaminasyon alanlarında ve şekillerinde uyumluluk yakalanmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere vurucu kütlelerinin 5.045 kg, vurucu hızının 3 m/s ve darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 4.65 kN iken deneysel sonuçlarda en büyük temas kuvveti 6.15 kN olarak elde edilmiştir. Hata payı ise %24.3 olmuştur.



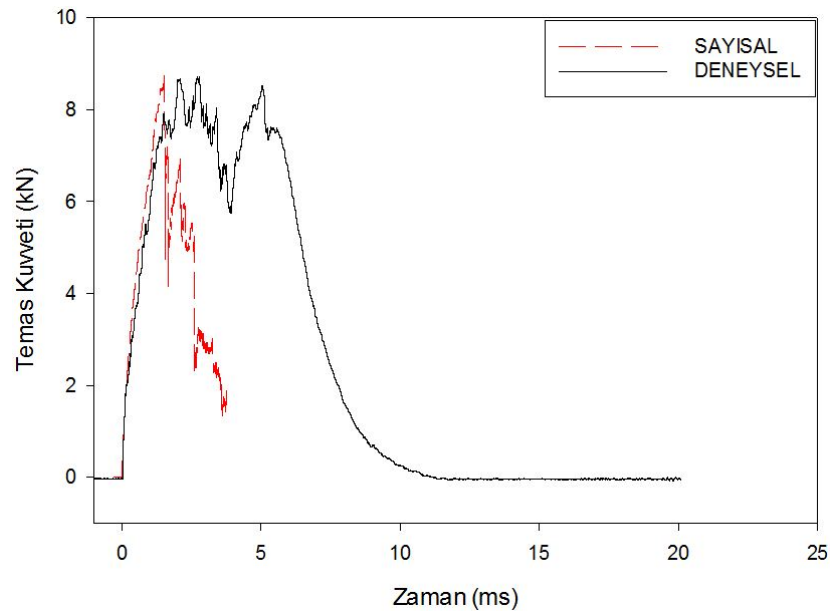
Şekil 3.6. Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için temas kuvveti- zaman grafiği

Vurucu kütlelerinin 5.045 kg, vurucu hızının 5 m/s ve darbe enerjisinin 63.06 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 7.72 kN iken deneysel sonuçlarda en büyük temas kuvveti 8.23 kN olmuştur. Hata payı %6.19 olarak elde edilmiştir. Vurucu

kütlesinin 5.045 kg, vurucu hızının 7 m/s ve darbe enerjisinin 123.60 J olduğu durumda sayısal sonuçlarda en büyük temas kuvveti 8.65 kN iken deneysel sonuçlarda bu değer 8.702 olarak elde edilmiştir. Hata payı ise % 0.5 olmuştur. Şekil 3.7’de darbe enerjisinin 63.06 J ve Şekil 3.8’de darbe enerjisinin 120.60 J olduğu durum için temas kuvveti - zaman grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Darbe enerjisinin 63.06 J olduğu durum için temas kuvvet- zaman grafiği



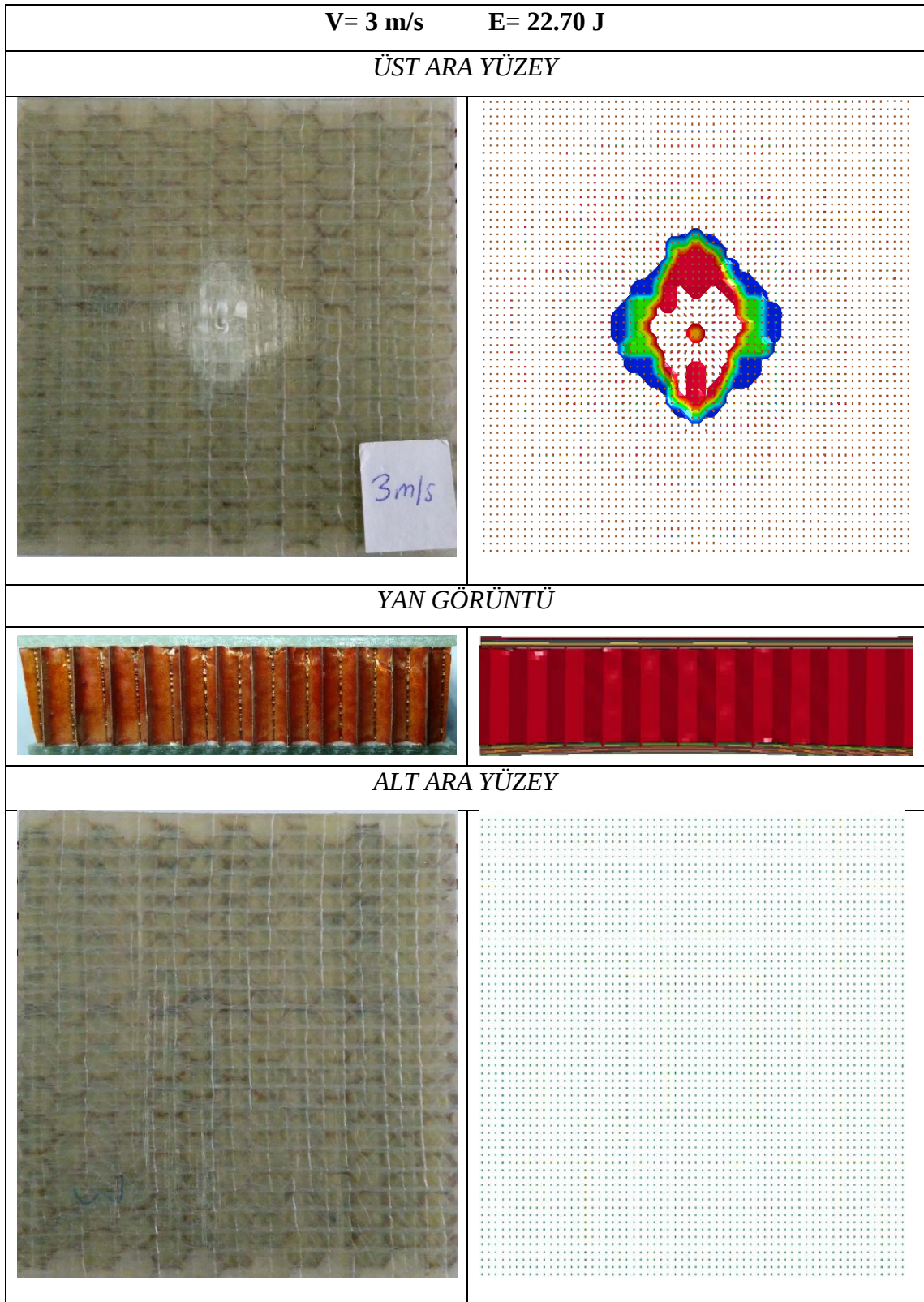
Şekil 3.8. Darbe enerjisinin 123.60 J olduğu durum için temas kuvvet- zaman grafiği

LS-DYNA sonlu elemanlar programı yardımı alt ve üst yüzey plakalarının ve Nomex bal peteği çekirdeğin absorbe edebildiği enerji değerleri ayrı ayrı gözlemlenebilmektedir. Tablo 3.1’de vurucu kütleinin 5.045 kg ve vurucu hızlarının 3 ve 5 m/s olduğu durumlar için Nomex bal peteğinin ve yüzey plakalarının absorbe ettiği enerjiler % olarak verilmiştir. Tablo 3.1’de görüldüğü üzere her iki enerji seviyesinde de Nomex bal peteği çekirdek tarafından emilen enerji miktarı en fazla olmuştur. Yine her iki enerji seviyesinde de üst yüzey plakaları tarafından emilen enerji miktarı alt yüzey plakaları tarafından emilen enerji miktarından fazla olmuştur.

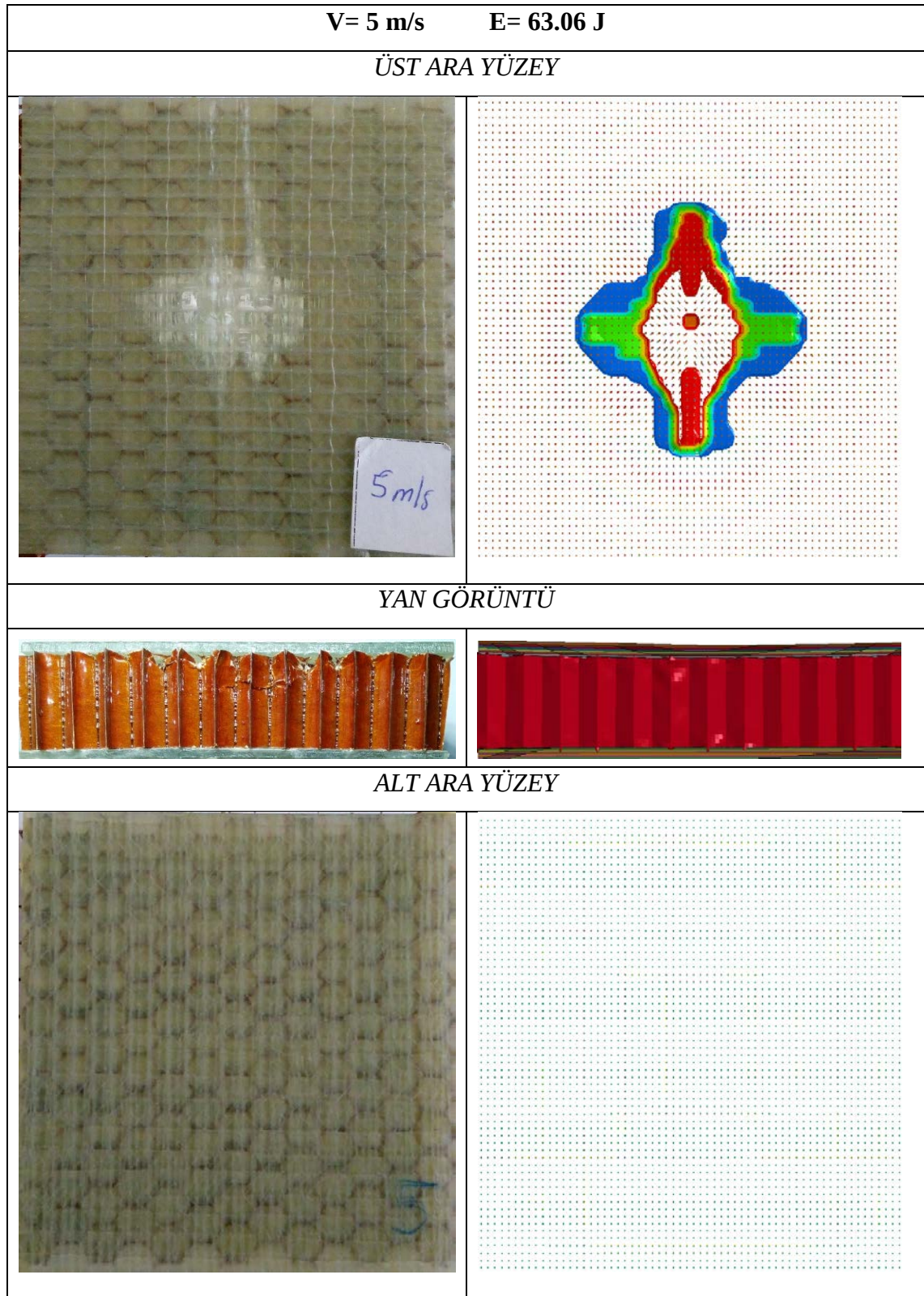
Tablo 3.1. 22.7 ve 60.3 J için sandviç yapı elamanlarının sönümlediği enerji oranları

	Darbe Enerjisi= 22.7 J	Darbe Enerjisi= 63.06 J
Darbe öncesi vurucu enerjisi	% 100	% 100
Üst plaka tarafından emilen enerji	% 18.18	% 25.87
Nomex tarafından emilen enerji	% 55.75	% 46.87
Alt plaka tarafından emilen enerji	% 6.32	% 2.15
Darbe sonrası vurucu enerjisi	% 19.77	% 25.08

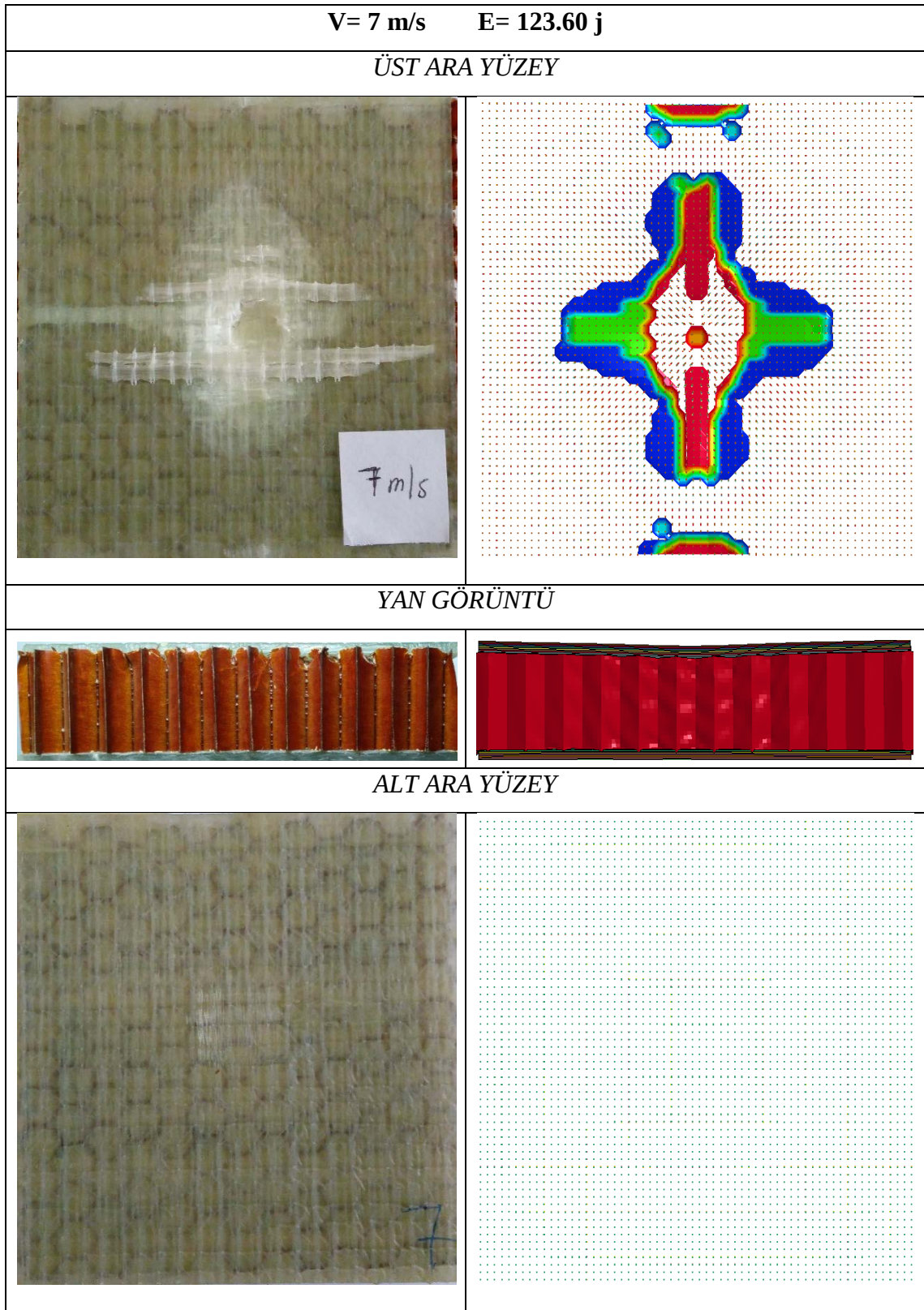
Vurucu kütleinin 5.045 kg, vurucu hızlarının 3, 5, 7 m/s ve darbe enerjilerinin 22.70, 63.06, ve 123.60 olduğu darbe deneylerinde ve bu deneylerin sayısal modellerinde katmanlı kompozit plakalarda oluşan delaminasyon alanları ile delaminasyon şekillerinde benzerlik yakalanmıştır. Ayrıca Nomex bal peteği çekirdeğin kenarlarında darbe altında meydana gelen hasar alanlarında da benzerlik yakalanmıştır. Şekil 3.9’da vurucu kütleinin 5.045 kg, vurucu hızının 3 ms/s ve darbe enerjinin 22.70 J olduğu durum için, Şekil 3.10’da vurucu kütleinin 5.045 kg, vurucu hızının 5 m/s ve darbe enerjisinin 63.06 J olduğu durum için ve Şekil 3.11’ de vurucu kütleinin 5.045 kg, vurucu hızının 7 m/s ve darbe enerjisinin 123.60 J olduğu durumlar için alt ve üst yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte meydana gelen hasarlar görülmektedir.



Şekil 3.9. Darbe enerjisinin 22.70 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü



Şekil 3.10. Darbe enerjisinin 63.06 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü



Şekil 3.11. Darbe enerjisinin 123.60 J olduğu durum için yüzey plakalarında meydana gelen delaminasyonlar ve Nomex bal peteği çekirdekte oluşan hasarın görünümü

4.BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuç ve Yorumlar

Bu çalışmada, ilk olarak [0/90]₄ şeklinde istiflenmiş E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakanın ve daha sonra E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakalar ile desteklenmiş Nomex bal peteği sandviç yapıların düşük hızda darbe davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal modellerin ANSYS Parametrik Tasarım Dili (APDL-ANSYS Parametric Design Language) kullanılarak macro (.mac) dosyası oluşturulmuştur. Daha sonra keyword (.k) dosyası oluşturularak çözüm işlemi LS-DYNA sonlu elamanlar çözücüsünde gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretilmesi ve darbe deneyleri Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- ✓ E-camı/epoksi katmanlı kompozit levhanın 800x1200 mm boyutlardaki üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretilen levhanın 85x85 mm boyutlarda kesilmesi sırasında ilk olarak giyotin kullanılmıştır. Ancak giyotin ile kesim sırasında kompozit plakaların kenarlarında küçük boyutlarda da olsa delaminasyonlar oluşmuştur. Çalışmada özellikle delaminasyon bölgeleri araştırıldığı için bu durum sakıncalı olarak değerlendirilmiş ve yeniden kompozit levha üretilmiştir. Kompozit levhanın istenilen boyutlarda kesimi su jeti yardımıyla başarılı bir şekilde yapılmıştır.
- ✓ E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakanın darbe deneyleri sırasıyla 2, 3, 4 m/s vurucu hızlarına karşılık gelen 10.09, 22.7 ve 40.36 J. darbe enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelin oluşturulmasında katmanlı kompozitlerde önemli bir hasar olan delaminasyonu araştırmak için geliştirilmiş olan MAT 162 malzeme modeli kullanılmıştır. Vurucu hızının artmasıyla temas kuvvetleri ve

- ✓ oluşan delaminasyon alanları hem deneysel sonuçlarda hem de sayısal sonuçlarda artmıştır. Özellikle delaminasyon alanı ve şekli deneysel ve sayısal sonuçlarda benzerlik göstermiştir.
- ✓ Nomex bal peteği ile üretilen kompozit levhaların birleştirilmesinde Araldite LY 1564 epoksi ve Aradur 3487 birleşimi güçlü yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapışan yüzeylerde 3, 5, 7 m/s hızlarda darbe altında ayrılmalar olabileceği deneysel çalışmalarda gözlemlenmiştir. Bu nedenle sayısal modelin oluşturulmasında Nomex bal peteği ile üst plakanın en alt katmanı arasında ve alt plakanın en üst katmanı arasında CONTACT_TIEBREAK_NODES_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır.
- ✓ Artan darbe enerjisi ile Nomex bal peteği sandviç yapının temas kuvvetlerinde ve sandviç yapının üst plakalarında oluşan delaminasyon alanlarında artış gözlemlenmiştir. Vurucu hızının 3, 5, 7 m/s olduğu deneysel ve sayısal sonuçlar incelendiğinde alt yüzey plakalarında delaminasyon oluşumunun gerçekleşmediği görülmüştür.
- ✓ Analizlerde Nomex bal peteği çekirdeğin modellenmesinde MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model yan düzlemde oluşan hasar alanını doğru bir şekilde modellese de hasarın şeklini tam olarak modellemede yetersiz kalmıştır. Nomex bal peteği çekirdek numuneleri üzerinde oluşan hasar kâğıdın yırtılması gibi oluşurken sayısal modelde bu hasar kalıcı burkulma şeklinde olmuştur. Nomex bal peteği sandviçin temas kuvveti - zaman grafiğinde vurucu hızının 7 m/s olduğu durumda temas kuvvetinde ani düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebinin de kullanılan malzeme modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.2 Öneriler

E-camı/epoksi katmanlı kompozit plakanın modellenmesinde kullanılan MAT 162 malzeme modeli katmanlı kompozitin düşük hızlı darbe davranışını başarılı olarak modelleyebilmiştir. Nomex bal peteğinin modellenmesinde kullanılan MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY malzeme modeli ise hasar şeklinin oluşmasında istenilen sonuçları verememiştir. Bundan sonraki çalışmalarda Nomex bal peteği çekirdeğin malzeme modelinin değiştirilerek ve daha doğru bir malzeme modeli ile analizlerin yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Abrate, S., 2011. Impact Engineering of Composite Structures. Springer Science & Business Media., Italy, 403 pp.
2. Stronge, W. J., 2004. Impact Mechanics. Cambridge University Press., Cambridge, United Kingdom, 280 pp.
3. Mazumdar, S., 2001. Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering. CrC press., USA, 396 pp.
4. <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>
(Erişim Tarihi : Eylöl 2015)
5. Mallick, P. K., 2007. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. CRC press., Boca Raton, 616 pp.
6. şahin, Y., 2006. Kompozit Malzemelere Giriş. Seçkin Yayıncılık., Ankara, 424 s.
7. Callister, W. D., Retwisch, D. G., 2013. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. Nobel Akademik Yayıncılık, 992 pp.
8. Barbero, E. J., 2010. Introduction to Composite Materials Design. CRC press, Boca Raton, 508 pp.
9. Gay, D., 2014. Composite Materials: Design and Applications. CRC press, Boca Raton, 635 pp.
10. Mili, F., Necib, B., 2001. Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities. **Composite structures**, **51**: (3): 237-244.
11. Belingardi, G., Vadori, R., 2003. Influence of the laminate thickness in low velocity impact behavior of composite material plate. **Composite Structures**, **61**: (1): 27-38.
12. Mitrevski, T., Marshall, I., Thomson, R., Jones, R., Whittingham, B., 2005. The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates. **Composite Structures**, **67**: (2): 139-148.
13. Menna, C., Asprone, D., Caprino, G., Lopresto, V., Prota, A., 2011. Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates. **International Journal of Impact Engineering**, **38**: (8): 677-685.

14. Heimbs, S., Heller, S., Middendorf, P., Hähnel, F., Weiße, J., 2009. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling. **International Journal of Impact Engineering**, **36**: (10): 1182-1193.
15. Wagih, A., Maimí, P., Blanco, N., Costa, J., 2016. A quasi-static indentation test to elucidate the sequence of damage events in low velocity impacts on composite laminates. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, **82**: 180-189.
16. Mishra, A., Naik, N., 2010. Failure initiation in composite structures under low-velocity impact: Analytical studies. **Composite Structures**, **92**: (2): 436-444.
17. Yang, L., Wu, Z., Gao, D., Liu, X., 2016. Microscopic damage mechanisms of fibre reinforced composite laminates subjected to low velocity impact. **Computational Materials Science**, **111**: 148-156.
18. Aslan, Z., Karakuzu, R., Okutan, B., 2003. The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. **Composite Structures**, **59**: (1): 119-127.
19. Khalili, S., Soroush, M., Davar, A., Rahmani, O., 2011. Finite element modeling of low-velocity impact on laminated composite plates and cylindrical shells. **Composite Structures**, **93**: (5): 1363-1375.
20. Balasubramani, V., Boopathy, S. R., Vasudevan, R., 2013. Numerical Analysis of Low Velocity Impact on Laminated Composite Plates. **Procedia Engineering**, **64**: 1089-1098.
21. Salehi-Khojin, A., Bashirzadeh, R., Mahinfalah, M., Nakhaei-Jazar, R., 2006. The role of temperature on impact properties of Kevlar/fiberglass composite laminates. **Composites Part B: Engineering**, **37**: (7): 593-602.
22. Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M., Lessard, L., 2006. Damage behavior of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impacts. **Composites science and technology**, **66**: (1): 61-68.
23. Long, S., Yao, X., Zhang, X., 2015. Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact. **Composite Structures**, **132**: 290-298.
24. Schoeppner, G., Abrate, S., 2000. Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, **31**: (9): 903-915.

25. Lopes, C., Camanho, P., Gürdal, Z., Maimí, P., González, E., 2009. Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations. **Composites Science and Technology**, **69**: (7): 937-947.
26. Lopes, C., Seresta, O., Coquet, Y., Gürdal, Z., Camanho, P., Thuis, B., 2009. Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part I: Experiments. **Composites Science and Technology**, **69**: (7): 926-936.
27. Karakuzu, R., Erbil, E., Aktas, M., 2010. Impact characterization of glass/epoxy composite plates: An experimental and numerical study. **Composites Part B: Engineering**, **41**: (5): 388-395.
28. Hashin, Z., 1981. Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites. **Journal of Applied Mechanics**, **48**: (4): 846-852.
29. Matzenmiller, A., Lubliner, J., Taylor, R., 1995. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. **Mechanics of materials**, **20**: (2): 125-152.
30. Xiao, J., Gama, B., Gillespie, J., 2007. Progressive damage and delamination in plain weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading. **Composite Structures**, **78**: (2): 182-196.
31. Gama, B. A., Gillespie, J. W., 2011. Finite element modeling of impact, damage evolution and penetration of thick-section composites. **International Journal of Impact Engineering**, **38**: (4): 181-197.
32. Maio, L., Monaco, E., Ricci, F., Lecce, L., 2013. Simulation of low velocity impact on composite laminates with progressive failure analysis. **Composite Structures**, **103**: 75-85.
33. Jordan, J. B., Naito, C. J., Haque, B. Z. G., 2014. Progressive damage modeling of plain weave e-glass/phenolic composites. **Composites Part B: Engineering**, **61**: 315-323.
34. Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., 2011. A numerical investigation on significant parameters influencing the flatwise compressive behaviour of a NomexTM Honeycomb. **Procedia Engineering**, **10**: 3441-3446.
35. Giglio, M., Gilioli, A., Manes, A., 2012. Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and NomexTM honeycomb core. **Computational Materials Science**, **56**: 69-78.

36. Giglio, M., Manes, A., Gilioli, A., 2012. Investigations on sandwich core properties through an experimental–numerical approach. **Composites Part B: Engineering**, **43**: (2): 361-374.
37. Manes, A., Gilioli, A., Sbarufatti, C., Giglio, M., 2013. Experimental and numerical investigations of low velocity impact on sandwich panels. **Composite Structures**, **99**: 8-18.
38. Gilioli, A., Sbarufatti, C., Manes, A., Giglio, M., 2014. Compression after impact test (CAI) on NOMEX™ honeycomb sandwich panels with thin aluminum skins. **Composites Part B: Engineering**, **67**: 313-325.
39. Othman, A., Barton, D., 2008. Failure initiation and propagation characteristics of honeycomb sandwich composites. **Composite Structures**, **85**: (2): 126-138.
40. Hou, W., Zhu, F., Lu, G., Fang, D.-N., 2010. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. **International journal of impact engineering**, **37**: (10): 1045-1055.
41. Wu, E., Jiang, W.-S., 1997. Axial crush of metallic honeycombs. **International Journal of Impact Engineering**, **19**: (5): 439-456.
42. Yamashita, M., Gotoh, M., 2005. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications—numerical simulation and experiment. **International Journal of Impact Engineering**, **32**: (1): 618-630.
43. Hong, S.-T., Pan, J., Tyan, T., Prasad, P., 2006. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads. **International Journal of Plasticity**, **22**: (1): 73-109.
44. Petras, A., Sutcliffe, M., 1999. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. **Composite Structures**, **44**: (4): 237-252.
45. Horrigan, D.P.W., Aitken R.R. Finite element analysis of impact damage to honeycomb sandwich, http://www.lusas.com/pdf/CS503_FEA_of_Impact_Damaged_Honeycomb_Panels.PDF (Erişim Tarihi: Ocak 2015)
46. Chawla, A., Mukherjee, S., Kumar, D., Nakatani, T., Ueno, M., 2003. Prediction of crushing behaviour of honeycomb structures. **International journal of crashworthiness**, **8**: (3): 229-235.
47. Aktay, L., Johnson, A. F., Kröplin, B.-H., 2008. Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. **Engineering Fracture Mechanics**, **75**: (9): 2616-2630.

48. Mines, R., Worrall, C., Gibson, A., 1998. Low velocity perforation behaviour of polymer composite sandwich panels. **International Journal of Impact Engineering**, **21**: (10): 855-879.
49. Torre, L., Kenny, J., 2000. Impact testing and simulation of composite sandwich structures for civil transportation. **Composite structures**, **50**: (3): 257-267.
50. Park, J., Ha, S., Kang, K., Kim, C., Kim, H., 2008. Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact. **Journal of materials processing technology**, **201**: (1): 425-430.
51. Menna, C., Zinno, A., Asprone, D., Prota, A., 2013. Numerical assessment of the impact behavior of honeycomb sandwich structures. **Composite Structures**, **106**: 326-339.
52. Foo, C. C., Chai, G. B., Seah, L. K., 2007. Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure. **Composite structures**, **80**: (4): 588-594.
53. Foo, C., Chai, G., Seah, L., 2006. Quasi-static and low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications**, **220**: (2): 53-66.
54. Foo, C., Chai, G., Seah, L., 2008. A model to predict low-velocity impact response and damage in sandwich composites. **Composites Science and Technology**, **68**: (6): 1348-1356.
55. Foo, C., Seah, L., Chai, G., 2011. A modified energy-balance model to predict low-velocity impact response for sandwich composites. **Composite Structures**, **93**: (5): 1385-1393.
56. Justo, J., Osuna, S., París, F., 2015. Design of composite materials with improved impact properties. **Composites Part B: Engineering**, **76**: 229-234.
57. Fatt, M. S. H., Park, K. S., 2001. Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels–Part A: Deformation. **Composite Structures**, **52**: (3): 335-351.
58. Hoo Fatt, M. S., Park, K. S., 2001. Dynamic models for low-velocity impact damage of composite sandwich panels – Part B: Damage initiation. **Composite Structures**, **52**: (3–4): 353-364.

59. Liu, L., Wang, H., Guan, Z., 2015. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading. **Composite Structures, 121:** 304-314.
60. Zinno, A., Prota, A., Di Maio, E., Bakis, C., 2011. Experimental characterization of phenolic-impregnated honeycomb sandwich structures for transportation vehicles. **Composite Structures, 93:** (11): 2910-2924.
61. Aminanda, Y., Castanié, B., Barrau, J.-J., Thevenet, P., 2005. Experimental analysis and modeling of the crushing of honeycomb cores. **Applied Composite Materials, 12:** (3-4): 213-227.
62. Castanié, B., Bouvet, C., Aminanda, Y., Barrau, J.-J., Thévenet, P., 2008. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins. **International Journal of Impact Engineering, 35:** (7): 620-634.
63. Meo, M., Vignjevic, R., Marengo, G., 2005. The response of honeycomb sandwich panels under low-velocity impact loading. **International journal of mechanical sciences, 47:** (9): 1301-1325.
64. Akatay, A., Bora, M. Ö., Çoban, O., Fidan, S., Tuna, V., 2015. The influence of low velocity repeated impacts on residual compressive properties of honeycomb sandwich structures. **Composite Structures, 125:** 425-433.
65. Gunes, R., Arslan, K., 2016. Development of numerical realistic model for predicting low-velocity impact response of aluminium honeycomb sandwich structures. **Journal of Sandwich Structures and Materials, 18:** (1): 95-112.
66. Kang, K.-W., Kim, H. S., Kim, M. S., Kim, J.-K., 2008. Strength reduction behavior of honeycomb sandwich structure subjected to low-velocity impact. **Materials Science and Engineering: A, 483:** 333-335.
67. Shin, K. B., Lee, J. Y., Cho, S. H., 2008. An experimental study of low-velocity impact responses of sandwich panels for Korean low floor bus. **Composite Structures, 84:** (3): 228-240.
68. Hazizan, M. A., Cantwell, W., 2003. The low velocity impact response of an aluminium honeycomb sandwich structure. **Composites Part B: Engineering, 34:** (8): 679-687.
69. Handbook, A., 2001. vol. 21: Composites. **ASM International,**

70. http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf (Erişim Tarihi: Nisan 2016)
71. Bitzer, T., 2012. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing. Springer Science & Business Media, 233 pp.
72. Metin, M., 2008. E-Camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Hasarının Burkulma Özelliklerine Etkisi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Konya, 97 s.
73. Abrate, S., 2005. Impact on Composite Structures. Cambridge university press, New York, 289 pp.
74. Rao, S. S., 2005. The finite element method in engineering. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 663
75. Arslan, K., 2014. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakalar ile Takviyelendirilmiş Bal Peteği Sandviç Yapıların Balistik Performanslarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120 s.,
76. Haque, B. Z. G., 2014. A progressive composite damage model for unidirectional and woven fabric composites. <http://www.ccm.udel.edu/wp-content/uploads/2014/12/MAT162-USER-MANUAL-Version-14C-2014.pdf> (Erişim Tarihi: Eylül 2015)
77. Raja, S. N., Basu, S., Limaye, A. M., Anderson, T. J., Hyland, C. M., Lin, L., Alivisatos, A. P., Ritchie, R. O., 2015. Strain-dependent dynamic mechanical properties of kevlar to failure: structural correlations and comparisons to other polymers. **Materials Today Communications**, 2: e33-e37.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Muhsin ALÇI

Uyruğu: Türkiye (TC)

Doğum Tarihi ve Yeri: 24 Eylül 1988, KAYSERİ

Tel: +90 352 207 66 66 / 32158

email: muhsinalci@erciyes.edu.tr

Yazışma Adresi: Erciyes Üniversitesi Mhendislik Fakültesi Makine Mühendisliği

Bölümü 38039 Melikgazi / Kayseri

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	ERÜ Mühendislik Fak. Makine Müh. Bölümü	2013
Lise	Nuh Mehmet Baldöktü Anadolu Lisesi	2006

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2014- Halen	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi
2013-2014	Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Güneş R., ALÇI M., Hakan M., Apalak M.K., 2016. “ Progressive Failure Analysis of Laminated Composite Plates Under Low Velocity Impact”, 17th International Conference on Machine Design and Production, July 12 – 15, 2016, Bursa, Türkiye