

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

**ALÜMİNYUM YÜZEY PLAKALI VE ARAMİD ELYAF ÇEKİRDEKLİ
SANDVIÇLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMED TALHA HIZ

Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi HASAN BALLIKAYA

MART 2025

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

**ALÜMİNYUM YÜZEY PLAKALI VE ARAMİD ELYAF ÇEKİRDEKLİ
SANDVIÇLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AHMED TALHA HIZ
(36223631001)**

Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi HASAN BALLIKAYA

MART 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan BALLIKAYA'ya, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyerim ve hayatım boyunca iyi günde ve kötü günde hep yanımda olan, benden desteklerini esirgemeyen, Babama, Anneme, Kardeşlerime ve özellikle Sevgili Eşime teşekkür ederim. Akademik çalışmalarım için onların manevi desteği, ilgisi ve teşviki olmasaydı, bu çabalarımın tamamlanması mümkün olmazdı.

Deneysel çalışmalarında katkılarından dolayı yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç.Dr. Mustafa ALBAYRAK hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tezin uygulama aşamasında FYL-2024-3592 nolu proje kapsamında vermiş oldukları maddi ve manevi destekten dolayı İnönü Üniversitesi BAP koordinasyon birimine teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “ALÜMİNYUM YÜZEY PLAKALI VE ARAMİD ELYAF ÇEKİRDEKLİ SANDVİÇLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Ahmed Talha HIZ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	iv
ONUR SÖZÜ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
2.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları	8
2.2. Kompozitlerin Malzemelerin Dezavantajları.....	9
2.3. Tabalaki Kompozitler	9
2.3.1. Sürekli tek yönlü kumaş	9
2.3.2. Dokuma kumaş	9
2.4. Fiber Malzemeler.....	10
2.4.1. Kevlar	10
2.4.2. Cam fiber	11
2.4.3. Karbon	11
2.4.4. Boron	12
2.5. Bağlayıcı Matris Malzemeler	13
2.5.1. Epoksi reçine	13
2.5.2. Polyester reçine.....	13
2.5.3. Vinilester reçine.....	13
2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	13
2.6.1. Elle yatırma yöntemi.....	14
2.6.2. Püskürtme yöntemi	14
2.6.3. Vakum torbalama yöntemi	15
2.6.4. Basınçla kalıplama yöntemi.....	15
2.6.5. Kalıba reçine enjeksiyonu yöntemi	16
2.6.6. Filament sarma yöntemi	17
2.6.7. Pultrüzyon yöntemi.....	17
2.7. Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe	18
2.7.1. Charpy ve izod darbe testleri	18
2.7.2. Ağırlık düşürme darbe testleri	19
2.8. Kompozitlerde Yüksek Hızlı Darbe	20
2.8.1. Balistik testler	21
2.8.2. Gaz tabancası testleri	21
2.8.3. Düşme kuleleri.....	22
2.9. Kompozitlerde Darbe Sonrası Oluşan Hasar Türleri.....	22
2.9.1. Matris çatlağı	23
2.9.2. Metal katman içi plastik deformasyon.....	23
2.9.3. Delaminasyon	23
2.9.4. Fiber kırılması.....	24
2.9.5. Penetrasyon.....	24
3. FİBER METAL LAMİNATLAR.....	25
3.1. FML’lerin Çeşitleri	26

3.1.1. ARALL	26
3.1.2. GLARE	27
3.1.3. CARALL	27
3.2. Fiber Metal Laminatların Mekanik Özellikleri.....	27
3.2.1. Statik özellikler	27
3.2.2. Yorulma özellikleri	29
3.2.3. Darbe direnci özellikleri	30
3.3. Fiber Metal Laminatların Avantajları ve Dezavantajları	31
3.3.1. Fiber metal laminatların avantajları	31
3.3.2. Fiber metal laminatların dezavantajları	32
4. TAGUCHİ METODU	33
4.1. Sistem Tasarımı	33
4.2. Parametre Tasarımı	33
4.3. Tolerans Tasarımı	33
4.4. Statik Sonuçlu Tasarım	33
4.5. Ortogonal Dizinler	34
4.6. Varyans Analizi	34
4.7. F Testi	35
5. MATERYAL ve METOT	36
6. BULGULAR ve TARTIŞMA	44
7. SONUÇLAR.....	75
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 ARALL VE GLARE'nin Çekme Özellikleri [52, 53]	28
Çizelge 3.2 ARALL ve GLARE'İN Basma Özellikleri [53, 54]	29
Çizelge 3.3 ARALL ve GLARE'in Kayma Özellikleri [53, 54]	29
Çizelge 3.4 FLM'lerin Avantaj ve Dezavantajları [47]	32
Çizelge 4.1 Taguchi' nin sinyal gürültü oranları.....	34
Çizelge 5. 1 Deney parametreleri ve seviyeleri.....	36
Çizelge 5.2 AA 7075 T651 alüminyum alaşımının kimyasal özellikleri	37
Çizelge 5.3 AA 7075 T651 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 5.4 Aramid Kevlar'ın mekanik özellikleri	38
Çizelge 5.5 Kompozit üretiminde kullanılan reçine ve sertleştirici özellikleri [43]	39
Çizelge 6.1 Darbe testi sonrası elde edilen sonuçları.....	44
Çizelge 6. 2 FML plakaların hasar analizi ve test sonrası numunelerin görüntüsü.....	67
Çizelge 6.3 Deney seviyeleri ve parametreler	71
Çizelge 6.4 Darbe testi sonrası elde edilen deney sonuçları ve S/N oranları.....	71
Çizelge 6.5 FML plaklar için her bir seviyedeki ortalama reaksiyon kuvveti S/N oranları	72
Çizelge 6.6 Ortalama maksimum reaksiyon kuvveti için ANOVA sonuçları	73
Çizelge 6. 7 FML plaklar için her bir seviyedeki ortalama absorbe enerjisi S/N oranları ..	74
Çizelge 6.8 Ortalama absorbe enerjisi için ANOVA sonuçları.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Ticari olarak kullanılan aramid elyaf çeşitleri	10
Şekil 2.2 Ticari olarak kullanılan cam elyaf çeşitleri	11
Şekil 2.3 Ticari olarak kullanılan karbon elyaf çeşitleri	12
Şekil 2.4 Elle yatırma(Hand lay-up) yöntemi	14
Şekil 2.5 Püskürtme(Spray-up) yöntemi	15
Şekil 2.6 Vakum torbalama(Vacuum Bagging) yöntemi	15
Şekil 2.7 Basınçla kalıplama(Compression molding) yöntemi	16
Şekil 2.8 Kalıba reçine enjeksiyonu (RTM) yöntemi.....	16
Şekil 2.9 Filament sarma (filament winding) yöntemi.....	17
Şekil 2.10 Pultrüzyon(Pultrusion process) yöntemi	17
Şekil 2.11 a) Charpy ve b) Izod darbe testi	19
Şekil 2.12 Ağırlık düşürme darbe testi cihazı	20
Şekil 2.13 Balistik test cihazı	21
Şekil 2.14 Gaz tabancası test cihazı	22
Şekil 2.15 Düşme kulesi test cihazı.....	22
Şekil 3.1 FML kompozit plaka.....	25
Şekil 5. 1 Al plakalarının a) ticari b) zımpara ile temizle işlemi görüntüsü	37
Şekil 5.2 Aramid elyaf kumaşların a) ölçüsünün belirlenmesi b) belirtilen ölçülerde kesilmesi	38
Şekil 5.3 FML üretimi için a) presleme plakası b) pres tezgâhı bağlantısı	39
Şekil 5.4 Epoksi ile FML üretim aşamaları a) Epoksi/sertleştirici karıştırma b) Elle yatırma yöntemi ile kumaşları ıslatma c) Al plakalar arasına kumaş serme işlemi d) Presleme işlemi	40
Şekil 5.5 Poliüretan köpük ile üretim aşamaları a) kullanılan poliüretan köpük b) poliüretan köpüğün serme işlemi c) rulo ile poliüretan köpük yayma işlemi d) FML presleme işlemi	41
Şekil 5.6 Deney numunelerinin üretimin tamamlanması a) 100x100mm ölçülerinin belirlenmesi b) Deney numunelerinin kesmesi c) Deney numunelerini 100x100mm ölçülerinde kesilmiş hali.....	42
Şekil 5.7 Darbe test cihazı.....	43

Şekil 6.1 Al/2AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	45
Şekil 6.2 Al/2AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	46
Şekil 6.3 Al/2AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri	47
Şekil 6.4 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	48
Şekil 6.5 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	49
Şekil 6.6 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri	50
Şekil 6.7 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	51
Şekil 6.8 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	52
Şekil 6.9 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri	53
Şekil 6.10 Al/2AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	54
Şekil 6.11 Al/2AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	55
Şekil 6.12 Al/2AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri	56
Şekil 6.13 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	57
Şekil 6.14 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	58
Şekil 6.15 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri	59
Şekil 6.16 Al/6AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri.....	60
Şekil 6.17 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri	61

Şekil 6.18 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretileen numuneler için enerji-zaman grafikleri	62
Şekil 6.19 Farklı basınçlar altında epoksi ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre reaksiyon kuvvetinin değışimi.....	63
Şekil 6.20 Farklı basınçlar altında epoksi ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre absorbe enerjisinin değışimi	63
Şekil 6.21 Farklı basınçlar altında Köpük ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre reaksiyon kuvvetinin değışimi.....	64
Şekil 6.22 Farklı basınçlar altında köpük ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre absorbe enerjisinin değışimi.	65
Şekil 6.23 Aramid tabaka sayısına göre 35 bar basınç altında epoksi ve köpük ile üretilen numunelerin reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırılması	65
Şekil 6.24 Aramid tabaka sayısına göre 35 bar basınç altında epoksi ve köpük ile üretilen numunelerin absorbe enerjisinin karşılaştırılması	66
Şekil 6.25 Ortalama maksimum reaksiyon kuvveti için S/N grafiğı.....	73
Şekil 6. 26 Ortalama absorbe enerjisi için S/N grafiğı.....	74

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

FML	: Fiber metal laminat
AF	: Aramid elyaf
Al	: Alüminyum
AA 7075	: 7075 Alüminyum alaşımı
AR	: Aramid
ARALL	: Fiber takviyeli alüminyum laminatlar
GLARE	: Cam fiber takviyeli alüminyum laminat
CARALL	: Karbon takviyeli alüminyum laminat
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
AFRP	: Aramid fiber takviyeli polimer
vd	: ve diğerleri
mm	: Milimetre
CARE	: Karbon fiber takviyeli alüminyum laminat
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme yöntemi
ms	: Milisaniye
J	: Joule
S/N	: Sinyal/Gürültü oranı
E	: Elastisite Modülü
ρ	: Yoğunluk
ν	: Poison Oranı
G	: Kayma Modülü
S	: Kayma Dayanımı
σ_c	: Çekme Dayanımı

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM YÜZEY PLAKALI VE ARAMİD ELYAF ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇLERİN DARBE DAVRANIŞLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

AHMED TALHA HIZ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

83+XIV sayfa

2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi HASAN BALLIKAYA

Bu çalışmada konvansiyonel alüminyuma alternatif olan fiber metal laminat (FML) malzemeler geliştirilmiştir. FML havacılık, uzay araçları, savunma sanayi, motor sporları, yüksek mukavemet ve enerji emilimine sahip, düşük ağırlıklı, yüksek sertlikte malzemeler gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç paneller için kullanılan kapak malzemeleri alüminyum plaka (2000 ve 7000 serisi), karbon elyaf, cam elyaf olarak sıralanabilir. Kompozit plakalar için aramid elyaflar, alüminyum köpük, çeşitli geometrilere sahip petek çekirdek malzemeleri tercih edilmektedir. Aramid elyaflar (AF), düşük yoğunluk, yüksek özgül dayanım, yüksek özgül modül ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi mükemmel kapsamlı özelliklere sahip olması nedeniyle kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılması büyük ilgi görmüştür.

Bu çalışmada 1 mm kalınlığa sahip alüminyum (AA 7075) plakalar arasına yerleştirilen aramid elyaflar ile yeni tasarlanmış FML üretimi yapılarak yüksek hızlı darbe tepkileri incelenecektir. Sandviç panellerin üretiminde Al ile aramid elyafın yapıştırma yöntemi (poliüretan köpük ve epoksi), sandviç plakaların üretim esnasında uygulanan basınç (15, 25, 35 bar) ve aramid elyaf sayısı (2, 4, 6 adet) deney parametreleri olarak belirlendi. Belirlenen deney parametrelerine göre farklı sandviç paneller üretilip ve yüksek hızlı darbe testine maruz bırakılacaktır. Yapılan testlerden elde edilen sonuçlar incelenecektir. Ayrıca hem alüminyum kapak plakanın hemde aramid çekirdeğin hasar tespiti yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Poliüretan köpük, Al 7075, Darbe, Sandviç

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOR OF SANDWICHES WITH ALUMINUM SURFACE PLATE AND ARAMID FIBER CORE

Ahmed Talha HIZ

Inonu University
Institute of Science
Department of Applied Sciences and Technology
83+XIV sayfa

2025

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Hasan BALLIKAYA

This study focuses on the development of fiber metal laminates (FMLs) as an alternative to conventional aluminum. FMLs are widely employed in applications demanding high strength, energy absorption, low weight, and high stiffness, such as aerospace, spacecraft, defense, and motorsports. Common face sheet materials for these panels include aluminum plates (2000 and 7000 series), carbon fiber, and glass fiber. For composite plies, aramid fibers, aluminum foam, and honeycomb core materials with various geometries are preferred. Aramid fibers (AFs) have attracted substantial interest as reinforcement elements in composite materials due to their excellent comprehensive properties, including low density, high specific strength, high specific modulus, and high-temperature resistance

In this study, newly designed FML production will be carried out with aramid fibers placed between 1 mm thick aluminum (AA 7075) plates and high speed impact responses will be investigated. In the production of sandwich panels, the bonding method of Al and aramid fibers (polyurethane foam and epoxy), the pressure applied during the production of sandwich plates (15, 25, 35 bar) and the number of aramid fibers (2, 4, 6 pieces) were determined as experimental parameters. According to the determined experimental parameters, different sandwich panels will be produced and subjected to high speed impact tests. The results obtained from the tests will be examined. In addition, damage detection of both the aluminum cover plate and the aramid core will be performed.

Keywords: Aramid, Polyurethane foam, Al 7075, Impact, Sandwich

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile endüstrinin birçok alanında kullanılan malzemelerin zayıf yönlerini güçlendirmek için malzemelere alaşımlar eklenerek çalışmalar yapılmıştır. Bu alaşımların başında kompozit malzemeler gelmektedir. Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerin birbirileri ile farklı yöntemlerle bir araya getirilerek daha iyi mekanik özelliklere sahip bir malzeme çeşididir. Son yıllarda kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine artan ilgi ve meraklılık bu malzemeler için çalışma sayısını artırmıştır. İkinci Dünya Savaşı sonrasında savunma sanayi endüstrisindeki askeri uygulamalar kompozitlerin ticari kullanımını önemli ölçüde artırmıştır. Kompozit malzemelerin kullanımı yapısal olarak ağırlık azalmasına olanak sağlar [1]. Kompozitler, özellikle metalik alaşımlarla karşılaştırıldığında sertlik/ağırlık oranı ve yüksek mukavemet söz konusu olduğunda, birçok avantaj sunar. Ayrıca uygulamalarda mükemmel yorulma özellikleri ve korozyon direnci sağlamaktadır. Tüm bu avantajlarıyla birlikte kompozit yapılar son yıllarda savunma sanayi, uçak ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [2–5]. Kompozit malzemelere olan ilginin artması, akademik ve ticari çalışmaları üzerine çekmiş ve zaman içerisinde geliştirilerek farklı türlerde kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır. Fiber metal laminatlar (FML), metal plakalar ile yüksek mukavemetli fiber takviyeli polimer tabakaların katmanlar halinde bağlayıcı bir malzeme ile bir araya getirilmesiyle elde edilen, hibrit kompozit malzemelerdir. FML'lerin, yüksek yorulma dayanımı, darbe enerjisini absorbe kapasitesi, korozyon direnci ve düşük yoğunluğu gibi özellikleri, bu malzemeleri ileri mühendislik uygulamaları için cazip hale getirmektedir. Bu yenilikçi malzemeler, geleneksel metal ve kompozit malzemelere göre üstün özellikleri sayesinde, savunma sanayi, havacılık, otomotiv, enerji ve inşaat gibi birçok sektörde büyük ilgi görmektedir. Özellikle havacılık endüstrisinde, uçakların güvenliği, ağırlık tasarrufu ve ömrü açısından bu tür malzemelerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. İlk olarak aramid fiber takviyeli alüminyum laminatlar (ARALL) geliştirilmiş olup, daha sonra cam fiber takviyeli alüminyum laminat (GLARE), karbon takviyeli alüminyum laminat (CARALL) ve metal alaşımları kullanılarak çeşitli FML tipleri ortaya çıkmıştır. FML'lerin, metal levhaların ince olması ve fiber takviyeli polimer tabakaların hafifliği sayesinde geleneksel metal malzemelere göre daha hafif olması, hem yakıt tüketimini azaltarak ekonomik faydalar sağlamakta hem de çevresel etkileri azaltmaktadır. Ayrıca, FML'lerin hasar toleransı yüksek olması, yapının bütünlüğünü koruyarak güvenliği artırmaktadır. Bu sayede, FML'ler özellikle yüksek performans ve güvenilirliğin ön planda olduğu uygulamalarda tercih

edilmektedir. FML'lerin üstün özelliklerinden dolayı gün geçtikçe kullanım alanı artmış ve bu alanda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Vlot, elyaf metal laminatlar (FML) üzerinde darbe çalışmaları yapmıştır. Bu çalışma sonucunda FML'nin darbeden sonraki ezik derinliği, yaklaşık olarak monolitik alüminyum alaşımınıninkine eşit olduğunu ifade etmiştir. FML'nin darbeden sonraki hasar boyutu, cam ve karbon lifli kompozit malzemelere göre önemli ölçüde daha küçük olduğunu belirtmiştir [6]. Reyes vd. sert cam elyaf takviyeli polipropilen (GFPP) bazlı yeni bir fiber/metal laminat sisteminin darbe özelliklerini araştırmışlardır. FML 'nin dinamik yüklemelere karşı mükemmel direnç gösterdiğini açıklamışlardır [7].

Cortes vd. hafif magnezyum alaşımına dayalı bir dizi fiber-metal laminat (FML) üretilmiş ve test etmişlerdir. Dokuma karbon fiber takviyeli epoksi ve tek yönlü cam fiber takviyeli polipropilen olmak üzere iki tip kompozit takviye araştırmışlardır. FML'ler üzerinde yapılan düşük hızlı darbe testleri, iki alüminyum bazlı FML'ye kıyasla mükemmel enerji emici özellikte olduğunu vurgulamışlardır [8].

Lawcock vd. karbon fiber takviyeli metal laminatların (FRML'ler) darbe özelliklerinde fiber/matris yapışmasının etkisi araştırılmıştır. Fiber/matris yapışmasındaki farklılıklar, işlenmiş veya işlenmemiş karbon fiberler kullanılarak elde etmişlerdir. İşlenmemiş numunelerin ilk kırılma için yüksek enerji ve büyük hasar bölgesi boyutları ile sonuçlar elde etmişlerdir [9].

Vlot elyaf metal laminatların (GLARE ve ARALL) darbe özelliklerini belirlemek için deneyler yapmıştır. Sonuç olarak, GLARE 3'ün test yapılan diğer numuneler ve ARALL ile karşılaştırıldığında daha üstün performans gösterdiğini ifade etmiştir [10].

Carrillo vd. FML plakalar üzerinde düşük hızlı darbe testleri yapmışlardır. Hasar alan plakalarda yüksek seviyede enerji Emilimi tespit etmişlerdir. Darbenin etkisiyle alüminyum tabakalarda incelme ve kompozit katmanlarda kırılma meydana geldiğini açıklamışlardır. Bu araştırmanın sonucunda PP arayüzünün kompozitteki katman arayüzlerinden daha sert olduğunu tespit edip, testler ile bulgular arasında uygunluk olduğunu belirtmişlerdir [11].

Abdullah vd. farklı polipropilen bazlı elyaf-metal laminatların yapısı üzerindeki yüksek hızlı darbe tepkisi araştırmışlardır. Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde düşük yoğunluklu PP/PP çekirdeğe dayalı sandviç FML'ler, çok katmanlı sistemlerden daha üstün performans göstererek, benzer bir Kevlar bazlı laminatın sergilediği özelliklerin yaklaşık iki katı olduğunu tespit etmişlerdir [12].

Park vd. yaptığı bir araştırmada aramid elyaf kompozitlerinde laminat kalınlığının darbe davranışına etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda; İnce laminatların darbe enerjisi, büyük bir yer değiştirme ve delaminasyon alanı tarafından domine edilirken, kalın laminatların darbe enerjisi maksimum yük tarafından kontrol edildiği açıklanmıştır. Düşük delaminasyon alanına rağmen, kalın kompozitler maksimum yükün artmasıyla daha yüksek darbe enerjisi sergilediğini tespit etmişlerdir [13].

Chai vd. elyaf metal laminatların düşük hızdaki darbe tepkisi yaptığı bir araştırmada FML'nin düşük hızdaki darbeye tepkisi, metal türü, elyaf, matris, istifleme sırası, metal hacim oranı, darbe geometrisi, hedef şekli, gerilme sonrası yüzde vb. gibi birçok parametreyi incelemişlerdir. Son zamanlarda, GLARE, düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve monolitik alüminyumdan daha iyi darbe direnci nedeniyle A380 için bir gövde malzemesi olarak uygulamasını belirtmişlerdir [14].

Lee vd. hibrit lamine kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmadan elde edilen bilgilere göre aynı bileşen oranına sahip iki kompozit plakanın enerji kaybı, istifleme sırasına göre farklı değerlere sahip olduğunu görmüşlerdir. Sonuç olarak bir Grafit-Kevlar-Grafit plaka düşük enerji kaybına, bir Kevlar-Grafit-Kevlar plaka ise çok daha yüksek enerji kaybına sahip olduğunu tespit etmişlerdir [15].

Ferrante vd. fiber metal laminatların düşük hızlı darbeye tepkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada bazalt lif esaslı fiber metal laminat üretip darbe testlerinden sonra alüminyum levhaların tepkisi ile karşılaştırmışlardır. Bazalt lif esaslı fiber metal laminatların tepkisinin hem çarpma boyutundan önemli ölçüde etkilendiği hem de iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlar ve alüminyum plakalarla rekabet edebileceğini kanıtlanmış olsa da alüminyum/bazalt arayüzü hakkında bazı sorunlar olduğunu gözlemlemişlerdir [16].

Moriniere vd. yaptıkları bir çalışmada Fiber metal laminat düşük hızlı darbe tepkisini incelemek üzere bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen yaklaşım tarafından tatmin edici sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmayı yaparlarken fiber metal laminatlarda istifleme dizilerinin ve plaka geometrisinin darbe davranışı üzerine önemli etkiye sahip olduğunu açıklamışlardır [17].

Wu vd. yaptıkları çalışmada güçlendirilmiş fiber metal laminatın darbe özelliği ve hasar toleransını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada GLARE5-2/1, GLARE4-3/2 ve 2024-T3 alüminyumunu farklı enerjilerde darbelere maruz bırakmışlar. Yapılan deneyler sonucunda her iki GLARE laminatının delinme enerjisi, darbe hasarı direncinin ve özgül delme enerjisinin monolitik alüminyumdan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [18].

Liu vd. çeşitli fiber metal laminatların darbe etkilerini ultrasonik ve mekanik kesitleme teknikleriyle değerlendirmişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde aramid fiber takviyeli fiber metal laminatlar(ARALL), cam fiber takviyeli fiber metal laminatlardan (GLARE) daha düşük darbe direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir [19].

Zhu vd. fiber metal laminatların düşük hızlı darbe tepkisini incelemek için deneysel ve sonlu elemanlar analizini kullanmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizinden çıkan sonuçların bir biri ile uygun olduğunu belirtmişlerdir. Alüminyum katmanların yapışma yüzeylerinin zımparalandığında, FML numunelerinin darbe dayanımını bir miktar iyileştirdiğini açıklamışlardır [20].

Lee vd. özel bir yöntemle üretilmiş yüksek sertlikte fiber metal laminatların darbe davranışını araştırmışlardır. Sonuçlar değerlendirildiğinde özel yöntemle üretilen fiber metal laminatların, geleneksel yöntemlerle üretilenlerden daha yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Özel yöntemle üretilen numunelerde darbe direncinin arttığı, malzeme ağırlığının azaldığı tespit etmişlerdir [21].

El-furjan vd. GFRP,CFRP ve AFRP kompozitlerinin çekme dayanımı ve üretim özelliklerine ilişkin çalışmaları kapsamlı bir şekilde inceleyip daha yüksek mekanik performans için çıkarımlarda bulunmuşlardır. Yapılan çıkarımlardan bazıları şu şekildedir; “Katmanlar arası mesafe ve katman kalınlığı önemlidir ve kompozit üretimi sırasında dikkate alınmalıdır.”, “Epoksi reçinenin birçok faydalı özelliği (örneğin çekme, esneklik ve sıkıştırma) vardır ve polimerik kompozit üretimi için uygun bir seçimdir. Ancak yüksek maliyetinin etkisi altında seri üretim için uygun değildir.” ve “Lif hacim oranının büyüklüğü dikkatlice ayarlanmalıdır, aksi takdirde dramatik iç kusurlara yol açabilir.” Şeklinde ifadeler kullanmışlardır [22].

Nayak vd. balistik uygulamalar için kompozitlerde doğal liflerin kullanımı üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada keten, bazalt, curaua, kenaf, aramid, jüt, hindistan cevizi lifi ve kenevirden oluşan bir dizi lifler kullanmışlardır. Bu lifler balistik zırhlarda kullanılan kevlar ile karşılaştırılmıştır. Hibrit kompozitlerin, düz doğal lif kompozitlerine kıyasla üstün özellikler sunduğu görmüşlerdir. Keten lifleri jüt ve kenevire göre daha iyi balistik direnç göstermiştir. Curaua, jüt ve hindistan cevizi lifli kompozitler, aramid kompozitlerle benzer kırılma mekanizması gösterdiğini belirtmişlerdir [23].

Karthick vd. yaptıkları bir çalışmada hedef kalınlığının ve mermi düşme açısının GFRP kompozitlerde balistik dirence etkisini sayısal olarak çalışmışlardır. 7.52mm çapındaki yarım küre burun şeklindeki mermi üzerinde sonlu elemanlar metodu ile araştırmalar yapmışlardır. Yapılan sayısal analizler literatürdeki mevcut test sonuçlarıyla yakın olduğunu

tespit etmişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlardan, hedef kalınlığının ve mermi çarpma açısının balistik direnç üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir [24].

Zhang vd. aramid elyafın yüzey ve arayüz modifikasyonu üzerine bir araştırma yapmışlardır. AF'nin yüzey modifikasyonunun amacı, yüzey kimyasal aktivitesini iyileştirmek ve yüzey pürüzlülüğünü artırmaktır; bu da lif ve matris arasında mükemmel bir kimyasal bağ ve mekanik kilitleme elde etmeyi amaçlamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda aramid elyafın yüzey modifikasyonunda farklı birleştirme yöntemlerinin arayüz özelliklerini güçlendirme eğiliminde olduğu tespit etmişlerdir [25].

Li vd. aramid elyaf ile epoksi matris arasındaki yapışma özelliğini artırmak için aramid elyaflara yüzey modifikasyonu yapıp katman katman kendiliğinden yapışma montaj tekniği kullanmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda arayüz yapışmasının büyük bir ölçüde iyileştiğini görmüşlerdir. Arayüz yapışmasının iyileşmesi sonucunda bu teknikle üretilcek kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin artacağı ön görülmüştür [26].

Chen vd. aramid liflerin modifikasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda sentezlenen aramid liflerinin mukavemeti ve arayüz yapışma özelliğinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Modifiye edilmiş bu liflerin arayüz yapışma özelliği ve lifin çekme dayanımını artırdığı için mekanik özelliklerinin daha iyi olabileceğini tespit etmişlerdir [27].

Li vd. 2013 yılında aramid liflerini amanyok plazma işlemi kullanarak modifiye etmişlerdir. Bu modifiye sonucunda aramid liflerin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirerek yapıştırıcı performansını artırmışlardır. Artan yüzey pürüzlülüğü lifler ve matrisler arasındaki kilitlenmeyi güçlendirdiği için mekanik özelliklerinde iyileşebileceğini tespit etmişlerdir [28].

Carillo vd. Al 5052-H32' den yapılmış farklı katman sayısına ve dizilime sahip iki termoplastik fiber metal laminatın darbe tepkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde katman sayısı fazla olan fiber metal laminatın, katman sayısı az olan numuneye göre daha yüksek darbe performansı, daha büyük artık yer değiştirme ve daha sert olduğunu belirtmişlerdir [29].

Osmanoğlu vd. çekirdek kalınlığının ve lif yönlenmelerinin dayanımlara olan etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda fiber lif yönlerinin 90°'den 0°'ye yaklaştıkça dayanımın arttığını görmüşlerdir. Üç nokta eğme testinin sonuçları değerlendirildiğinde eğilme dayanımı, basma dayanımı, çekirdek kayması ve yüzey gerilmesinin kalınlıkla ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir [30].

Kösedağ vd. ARALL tipi fiber metal laminatların istifleme sırası ve metal hacim oranının darbe tepkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda metal hacim oranının artmasıyla darbe dayanımında artış gözlemlenmiştir. İstifleme sırasının ve açısının darbe dayanımında kritik öneme sahip olduğunu ifade etmişlerdir [31].

Alemi-Ardakani vd. AL1050 ile üretilen farklı türdeki (ARALL, CARE ve GLARE) numuneler üzerinde düşük hızlı darbe tepkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda hasarlı bölge büyüklüğü, merkezi sapma, emilen enerji ve üretim maliyetini eşit derecede önemli bir kriter olarak ele alındığında ARALL'ın CARE ve GLARE ile karşılaştırmasında en yüksek genel darbe performansına ARALL'ın sahip olduğunu tespit etmişlerdir [32].

Sadighi vd. fiber metal laminatların darbe tepkisi üzerine inceleme yapmışlardır. Bu inceleme sonucunda GLARE daha düşük kalıcı sapma, daha küçük hasar genişliği ve yüksek enerji emilimi sayesinde ARALL ve CARALL'a göre darbe dayanımında daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Fiber metal laminatlarda alüminyum alaşımı 2024-T3'ün diğer alaşım türlerine göre daha iyi olduğunu fakat magnezyum ve titanyum gibi metal alaşımlarının kullanımı darbe dayanımında önemli faydalar sağladığını belirtmişlerdir [33].

Sharma vd. yaptıkları bir çalışmada alüminyum tabakasının fiber metal laminatların kalınlığı boyunca dağılımının düşük hızlı darbe tepkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada alüminyum 2024-T3 (0.30mm,0.40mm, 0.6mm) ve cam elyaf takviyeli epoksi kullanarak üretilen numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde numunelerin ön ve arka yüzünde kullanılan levhaların ince olması, daha düşük darbe enerjisi ve daha büyük boyutlu çatlaklara neden olduğunu ifade etmişlerdir [34].

Bikakis vd. alüminyum alaşımlarından oluşan fiber metal laminatların ve monolitik metal levhaların balistik darbe tepkisini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada 2024-T3, 2024-T351, 2024-O, 6061-T6, 7039 ve 7075-T6 alüminyum alaşımları incelenmiştir. Kullanılan panellerin balistik dirençlerinin bileşen alüminyum alaşımından önemli ölçüde etkilenebileceğini tespit etmişlerdir. Deneyler sonucunda 7075-T6 alaşımı en yüksek balistik dirence sahip olduğunu ve 2024-O alaşımının en düşük balistik dirence sahip olduğunu tespit etmişlerdir [35].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde FML kompozit plakalar üzerine bir çok araştırmalar yapılmıştır. Araştırmaların genel içeriği, çekirdek çeşitliliği (ARALL, GLARE, CARALL)[32, 33], katman sayısı[22] ve dizilimi[31], kabuk elamanı olarak kullanılan Al plakası çeşitliliği [35] olarak sıralanabilir. Birçok araştırmada matris elamanı olarak epoksi/reçine kullanılmıştır [8, 22, 26]. Kompozit malzemelerde veya FML kompozitlerde

epoksi/recine kullanımı hasar mekanizması sonucunda gevrek kırılma meydana getirmiştir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak FML kompozit üretiminde matris elamanı olarak epoksi/recine ve poliüretan köpük kullanılmıştır. Böylece kompozit yapıda darbe testleri sonucunda gevrek kırılmaların önüne geçilmiştir. Ayrıca tasarımı yapılan FML'ler ile geleneksel mühendislik malzemelerine göre daha hafif ve daha yüksek darbe dayanımı sağlanmıştır. Farklı tabaka dizilimler üzerine gerçekleştirilen darbe testleri sonucunda tasarımcılara en iyi darbe direncini sağlayacak dizilim belirlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numuneler üzerine yüksek hızlı darbe testleri gerçekleştirilerek, reaksiyon kuvveti-zaman, reaksiyon kuvveti-deplasman, enerji-zaman grafikleri elde edilmiş ve sunulmuştur. Ayrıca darbe deneyleri sonrasında elde edilen deney sonuçları ANOVA varyans analizi yöntemi ile istatistiksel olarak değerlendirilerek deney seviyelerin optimum noktalarının belirlenmesi sağlanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Modern mühendislik ve malzeme bilimi, sürekli olarak artan performans gereksinimlerini karşılayabilecek yeni nesil malzemelerin arayışındadır. Özellikle havacılık, otomotiv, inşaat ve enerji gibi sektörlerde, daha hafif, daha dayanıklı, korozyona karşı dirençli ve aynı zamanda tasarım esnekliği sunan malzemelere olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu talebi karşılayan en önemli malzeme sınıflarından biri de kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler, birbirine fiziksel ve kimyasal olarak farklı iki veya daha fazla malzemenin birbirine kimyasal veya mekanik olarak bağlanması ile oluşan ileri seviye mühendislik malzemeleridir. Kompozit malzemeler kullanılan temel malzemelerden daha üstün özelliklere sahip malzemelerdir [36]. Birleştirilen malzemelerin zayıf yönlerini düzelterek, iç yapı olarak heterojen fakat dış görünüş olarak homojen bir yapıya sahiplerdir. Homojen yapıya sahip bu malzemeler oluştukları temel malzemelerden daha üstün olması hedeflenmektedir [37]. Kompozit malzemelerdeki sinerjik kombinasyon, genellikle tek başına hiçbir bileşenin sahip olamayacağı üstün mekanik, fiziksel, kimyasal ve termal özellikler ortaya çıkarır. Örneğin, yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu, geleneksel metallerle elde edilmesi zor bir özelliktir ancak kompozit malzemelerle kolaylıkla sağlanabilir. Kompozit malzemeler genellikle iki ana bileşenden oluşur. Bu bileşenler matris malzemesi ve takviye malzemesidir. Kompozit malzemelerin özellikleri, matris ve takviye malzemelerinin özelliklerine, aralarındaki ara yüzey etkileşimlerine, takviye malzemesinin hacim oranına, yönlenmesine ve dağılımına bağlıdır. Bu parametrelerin kontrolü ile istenen özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilebilir [38]. Kompozit malzemeler çok çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Savunma sanayi, havacılık ve uzay, otomotiv, denizcilik, inşaat, spor ekipmanları, enerji sektörü ve kimya endüstrisi yaygın olarak kullanıldığı alanlardan bazılarıdır. Kompozit malzemeler, üstün özellikleri ve tasarım esneklikleri sayesinde modern mühendisliğin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Sürekli olarak geliştirilen üretim metodları ve yeni malzeme kombinasyonları ile kompozitlerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Yakın bir gelecekte, daha sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir kompozit malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

2.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozitler, özellikle lif takviyeli polimerler, aynı ağırlıktaki metallere göre çok daha yüksek mukavemete sahip olabilirler. Bu özellik, özellikle havacılık, otomotiv ve spor

ekipmanları gibi hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda büyük avantaj sağlar. Mukavemetin yanı sıra, kompozitler yüksek sertliğe de sahip olabilirler, bu da yapısal uygulamalar için önemlidir [39]. Kompozit malzemeler, özellikle polimer matrisli olanlar, korozyona karşı mükemmel direnç gösterirler. Korozyona karşı olan bu üstün dirençleri sayesinde, denizcilik, kimya endüstrisi ve dış mekan uygulamaları için önemlidir [40]. Kompozitler, tekrarlı yüklemelere karşıda iyi bir direnç gösterirler, bu da dinamik yüklemelere maruz kalan uygulamalar için kritik öneme sahiptir.

2.2. Kompozitlerin Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok avantajı olduğu gibi dezavantajları da vardır. Bu malzemelerin üretimi, genellikle geleneksel malzemelere göre daha maliyetlidir. Malzemelerin üretimi, özel ekipman ve uzmanlık gerektirebilir. Kompozit malzemelerin geri dönüştürülmesi, bileşenlerinin ayrılmasındaki zorluklar nedeniyle karmaşık bir süreçtir. Ayrıca kompozit malzemelerin özellikleri, farklı yönlerde farklılık gösterebilir. Bu, tasarımda dikkate alınması gereken bir olarak açıklanabilir.

2.3. Tabalaki Kompozitler

2.3.1. Sürekli tek yönlü kumaş

Kompozit malzemelerde üretim yapılırken, ihtiyaca olan mukavemeti elde etmek için katmanlar arası fiberler farklı yönlerde olacak şekilde de üretim yapılabilmektedir. Fiberlerin yönleri üzerinde yapılan değişimler malzemede farklı mekanik özellikler gösterebilir. Fiberler aynı yönde olacak şekilde dizilirse tek yönlü bir kompozit elde edilir. Tek yönlü kompozitler, farklı dizilişlere göre daha iyi mekanik özellikler gösterir. Fiberler kompozit üzerindeki stress yüklerinin en fazla etki gösterdiği elemandır. Fiberlerin en dirençli olduğu kuvvet yönü kendi doğrultusunda olmalıdır. Fiber yönleri değiştirilerek farklı yönlü kuvvetler için mukavemetli kompozitler üretilebilir.

2.3.2. Dokuma kumaş

Dokuma kumaşlar, çözgü ve atkı liflerinin belirli düzende bir desen veya dokuma tarzında işlenmesiyle elde edilmektedir. Bu tarz kumaşlardaki asıl amaç liflerin birbirlerini mekanik olarak desteklemesidir. Mekanik olarak kenetlenen bu lifler dokunduğu desen veya dokuma tarzına göre farklı mekanik özellikler sergiler.

Yaygın olarak kullanılan örgü tipleri; Plain, Twill ve Satin örgü tipidir. Örgü tiplerinde elyaf kıvrımı ile mekanik özellikler ters orantılıdır. Elyaf kıvrımı arttıkça, mekanik özellikler

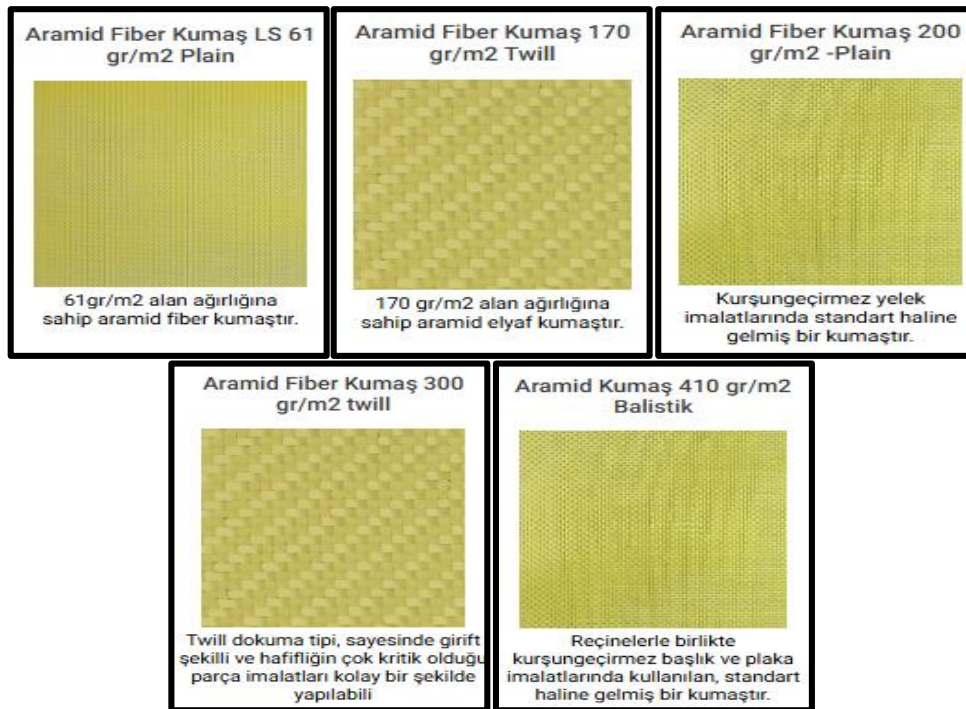
azalmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu üç örgü tipinden en fazla elyaf kıvrımına sahip Plain, diğer iki örgü tipine göre en düşük mekanik özelliklere sahiptir. Twill’de daha az elyaf kıvrımı olacak şekilde bir dokuma yapılır bu sayede mekanik özelliklerde iyileşme olur. Satin ise Twill dokuma tipinin geliştirilmiş yani elyaf kıvrımları azaltılıp, mekanik özelliklerinin artırıldığı dokumadır [41].

2.4. Fiber malzemeler

Fiber malzemeler kompozitlerde en çok yüke maruz kalan ara katman elemanlarıdır. Ticari olarak satılan ve literatürde üzerinde çalışmalar yapılmış farklı türlerde fiber malzemeler bulunmaktadır.

2.4.1. Kevlar

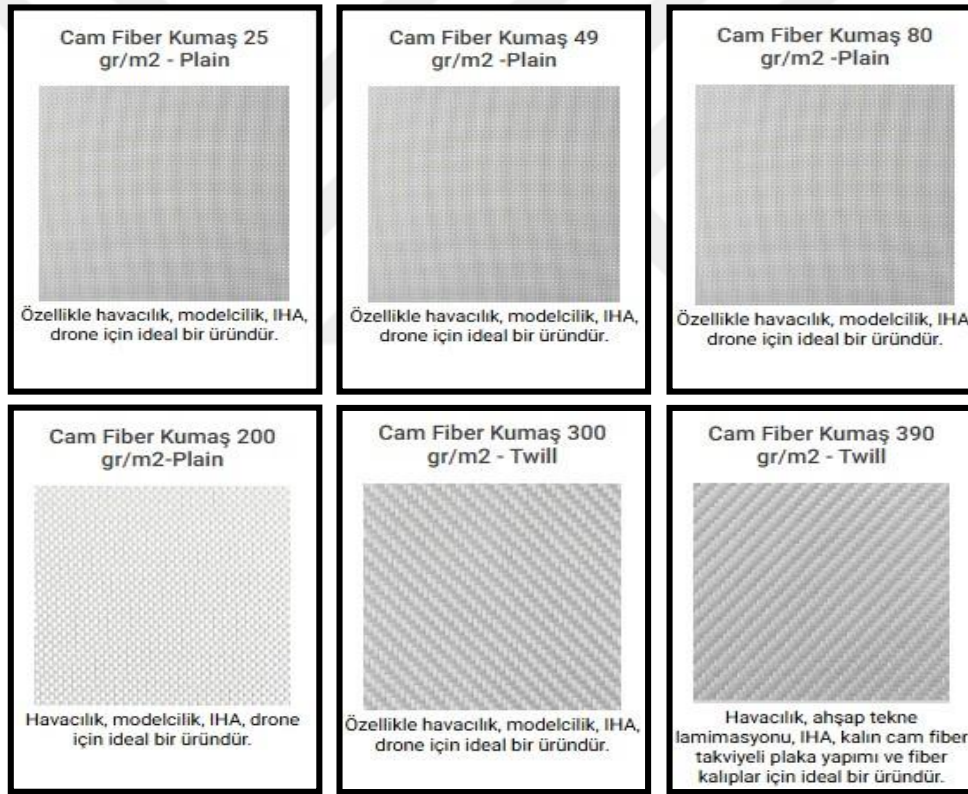
İlk olarak 1965 yılında DuPont şirketi tarafından geliştirilen kevlar, polimerlerin naylon sınıfında bulunan, aramid (aromatik poliamid) malzemesinin ticari olarak adlandırılışıdır. Aramidler savunma sanayi de özellikle balistik koruma başta olmak üzere havacılık ve uzay sektöründe de birçok uygulamada kullanılmaktadır. Aramid kullanıldığı uygulamalarda termal kararlılık ve üstün darbe dayanımı sağlarken, hafif yapısıyla ağırlık tasarrufu sağlar. Bu özellikleri sayesinde modern mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Ticari olarak kullanılan bazı aramid fiber çeşitleri Şekil 2.1’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Ticari olarak kullanılan aramid elyaf çeşitleri

2.4.2. Cam fiber

Cam fiberler, ince cam iplikçiklerinden oluşan ve genellikle kompozit malzemelerin mekanik olarak iyileştirilmesi için kullanılan, üstün mukavemet ve hafif yapısıyla ön plana çıkan malzemelerdir. Cam fiberler ucuz maliyetlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanıldığı uygulamalarda ısı ve neme karşı yüksek direnciyle tercih sebebidir. Yüksek bir çekme mukavemetine sahip olduğu için çekme yüklerine maruz kalabilecek parçalarda tercih edilebilir. Cam fiberler savunma sanayi, havacılık ve uzay, denizcilik ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılırken farklı sektörlerde de tercih edilmektedir. Cam fiberlerin kullanım alanlarına göre farklı türleri mevcuttur, elektiriksel cam, yapısal cam, kimyasal cam, dielektrik cam bunların yaygın olarak kullanılan türlerindendir. Ticari olarak kullanılan bazı cam fiber çeşitleri Şekil 2.2’ de gösterilmektedir.

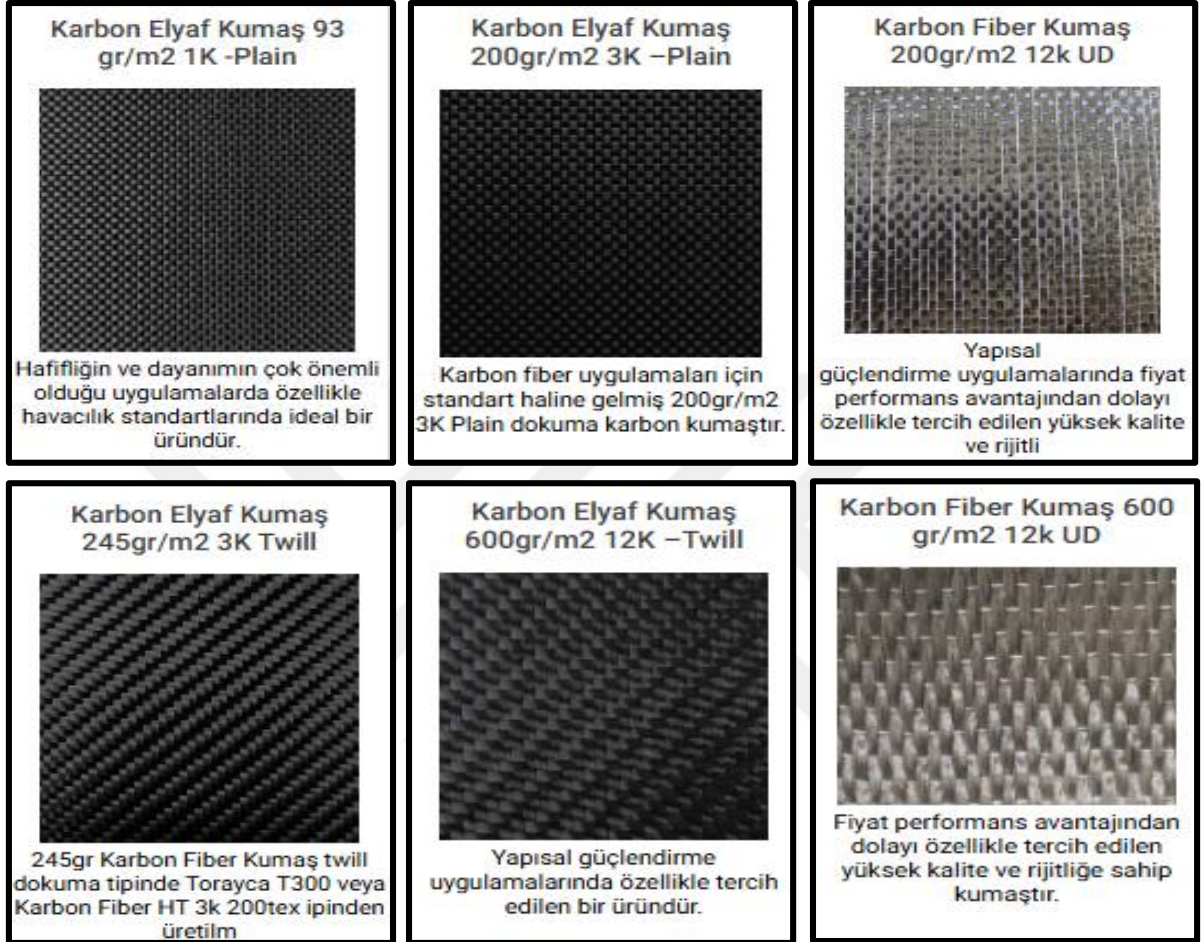


Şekil 2.2 Ticari olarak kullanılan cam elyaf çeşitleri

2.4.3. Karbon

Karbon fiberler, çelik malzemelerden 4.5 kat daha fazla ağırlık tasarrufu sağlarken, yaklaşık 3 kat daha fazla mukavemete sahiptirler. Yüksek çekme mukavemetine ve rijit bir yapıya sahiptirler. Basma dayanımları çekme dayanımlarına kıyasla daha düşüktür. Karbon fiberler, katran, naylon ve orlonun belli bir üretim aşamasından geçmesiyle oluşmaktadır. Karbon fiberler ağırlığın ve dayanımın önemli olduğu uygulamalarda yaygın olarak

kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnek olarak havacılık sektörü, uzay ve uydu sistemleri, yüksek hız gerektiren arabalar, yelkenli tekneler, spor ekipmanları, inşaat ve buna benzer birçok alanda kullanılmaktadır. Ticari olarak kullanılan bazı karbon fiber çeşitleri Şekil 2.3’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Ticari olarak kullanılan karbon elyaf çeşitleri

2.4.4. Boron

Boron fiberler, üstün çekme mukavemeti ve elastisitesi ile ön plana çıkmaktadır. Tungsten veya karbon çekirdekler üzerine kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle bor biriktirilerek ince bor fiberler elde edilir. Boron fiberler epoksi reçine veya metal matrislerle birleştirilerek kullanılırlar. Boron fiberler savunma sanayi, havacılık ve uzay, nükleer endüstri, elektronik ve enerji, sağlık sektöründe kullanılmaktadır. Üretim maliyetleri yüksek olduğu için, bazı sektörlerde maliyeti daha uygun olan malzemeler boron yerine tercih edilmektedir.

2.5. Bağlayıcı matris malzemeler

Kompozit malzemelerde katmanlar arası mekanik ve kimyasal kenetlenmeyi sağlamak için matris malzemeler kullanılmaktadır. Farklı türlerde matris malzemeler bulunmaktadır.

2.5.1. Epoksi reçine

Termoset polimer ailesine ait epoksi reçineler, genellikle iki bileşenli sistemler olarak reçine ve sertleştiricinin belli oranlarda birleştirilip kimyasal reaksiyonu sonucunda elde edilirler. Genellikle sıvı halde bulunan epoksi reçineler, yüksek viskoziteye sahip bağlayıcı bir malzemedir. Sıvı halde üstün bir yapışma özelliğine , sertleştiğinde ise yüksek mukavemet, kimyasal direnç ve elastisite modülüne sahiptirler. Epoksi reçinelerin bu üstün özelliklere rağmen kırılgan yapıları ve düşük sıcaklıklarda yapısal bozulma özellikleri bir dezavantaj sağlar. Epoksi reçineler kompozitlerde kullanılan fiberlerin aralarına dağılarak yapısal bir bütünlük sağlarlar.

2.5.2. Polyester reçine

Epoksi reçine gibi termoset ailesinden olan polyester reçineler, doymamış polyester polimerlerinin stiren monomeri içinde çözünmesiyle elde edilir. Uygun maliyeti, hafif olması ve kolay işlenebilirliği sayesinde sanayi ve inşaat sektöründe tercih edilmektedir. Bu tarz reçinelerin üretilmesinde en çok kullanılan yöntemler vakum destekli reçine infüzyonu, elle yatırma yöntemi, sarma yöntemi ve metal kalıba dökme yöntemidir.

2.5.3. Vinilester reçine

Epoksi reçinelerin vinil grupları ile modifikasyon yapılması sonucu elde edilen vinilester reçineler termoset polimerdir. Vinilester reçineler, polyester reçinelere göre daha üstün mekanik özelliklere sahipken epoksi reçinelere benzer özellikler gösterir. Epoksi reçinelere göre daha kolay işlenebilme özelliği vardır. Polyesterlere göre daha yüksek fakat epoksi reçinelere göre daha uygun üretim maliyetlerine sahiptirler. Vinilesterler elle yatırma, spreyleme ve vakum infüzyon gibi yöntemler kullanılarak kompozit üretimine uygundur.

2.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Fiber metal laminatlar, yapısal verimliliği artıran yenilikçi bir çözüm sunar ve metal ile kompozitin en iyi özelliklerini bir araya getirerek darbe direnci, yorgunluk dayanımı ve mukavemet gibi mekanik özellikleri optimize eder. Bu malzemelerin üretim yöntemi, elde edilecek nihai ürünün kalitesini ve mekanik performansını doğrudan etkiler. Fiber metal laminat üretiminde kullanılan yöntemler, malzeme seçimi ve üretim parametrelerine bağlı

olarak değişiklik gösterir ve her bir yöntem kendine özgü avantajlar ve dezavantajlar içermektedir. Fiber metal laminatların üretim metodları, farklı uygulama alanlarında yüksek performanslı yapısal bileşenlerin tasarımına olanak tanıyan stratejik bir yaklaşımdır. Aşağıda, fiber metal laminat üretiminde yaygın olarak kullanılan başlıca yöntemler açıklanmaktadır.

2.6.1. Elle yatırma yöntemi

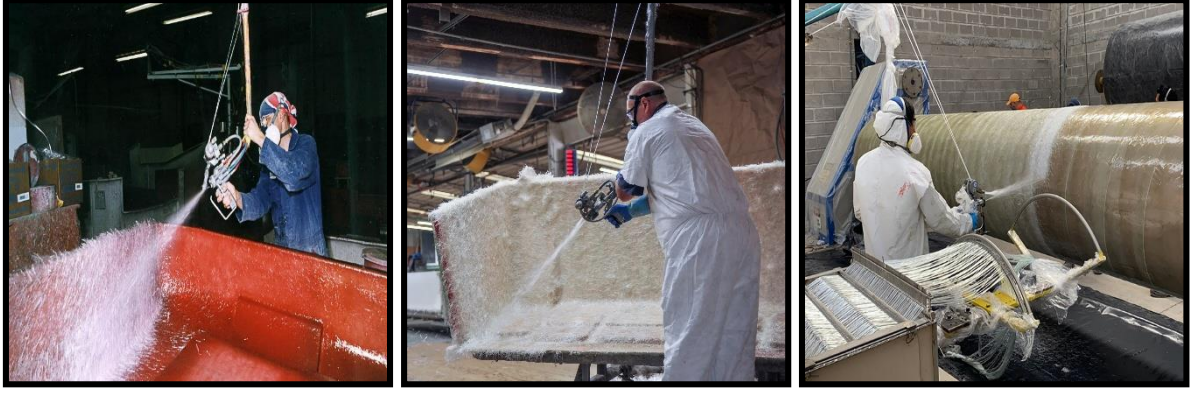
Elle yatırma (Hand lay-up) yöntemi, fiber takviyeli katmanların kalıp üzerine elle yerleştirilip rulo veya fırça ile reçine kaplanması esasına dayanır. Metal levhalar, fiber malzeme ve düşük viskoziteli reçine sırayla kalıba yerleştirilir ve rulo veya fırça ile bastırılarak katmanlar arası hava boşlukları giderilir. Bu işlem genel olarak basit geometriye sahip büyük parçaların üretilmesinde kullanılmaktadır. Reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında kurumaya bırakılarak kompozit yapının stabil hale gelmesi sağlanır. Düşük maliyetli olan bu yöntem, iş gücüne dayalı olduğu için verimliliği düşük ve üretim kalitesi operatör becerisine bağlıdır. Denizcilik, havacılık, otomotiv ve enerji sektöründe kendine yer bulmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.4 Elle yatırma(Hand lay-up) yöntemi

2.6.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme (Spray-up) yöntemi, fiber takviyeli katmanların bir kalıp üzerinde bir püskürtme tabancası yardımıyla reçine kaplanma yöntemidir. Bu yöntemde, püskürtme tabancası kesilmiş fiberleri, reçine ile birlikte aynı anda püskürterek kalıp yüzeyinde biriktirir. Süreç boyunca, reçinenin homojen bir şekilde dağıtılması ve katmanların birbirine mekanik olarak sıkıca yapışması sağlanarak yapısal bütünlük elde edilir. Üretilen katmanlar, istenilen kalınlığa ulaşana kadar tekrarlanan bir yöntemdir. Oluşan nihai ürünler mekanik özellik olarak diğer yöntemlere kıyasla daha düşük bir performansa sahiptir. Ayrıca elde edilen ürünlerdeki reçine oranı yüksek olmasından dolayı ağır ürünler elde edilir (Şekil 2.2).



Şekil 2.5 Püskürtme(Spray-up) yöntemi

2.6.3. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama (Vacuum Bagging) yöntemi, fiber malzemelerin ve metal katmanların bir kalıp içerisindeki vakumlu ortamda reçine kaplanmasıdır. Kalıba yerleştirilen fiberler ve metal tabakalar reçine ile kaplanır, reçine işlemi bittikten sonra üstü vakum torbası ile örtülür. Vakum torbasına bağlı olan vakum pompası yardımıyla içerideki hava çekilir, reçinenin homojen şekilde dağılması ve fiberlere iyi nüfuz etmesi sağlanır. Vakum sayesinde daha yoğun, boşluksuz ve yüksek mukavemetli bir ürün elde edilir. Vakum torbalama yöntemi sayesinde, yüksek kaliteli malzemelerin üretimi yapılır, uygulama süresi ve maliyeti yüksek bir yöntemdir. Havacılık ve uzay endüstrisinde üstün mekanik özelliklerin gerekli olduğu kompozit parçalarda tercih edilen bir yöntemdir (Şekil 2.3).



Şekil 2.6 Vakum torbalama(Vacuum Bagging) yöntemi

2.6.4. Basınçla kalıplama yöntemi

Basınçla kalıplama (Compression molding) yöntemi, alt ve üst kalıp arasında yerleştirilmiş fiberlerin ve reçinenin yüksek basınç altında şekillendirilmesi yöntemidir. Bu süreç boyunca uygulanan basınç, katmanların sıkışmasına, fazla reçinenin dışarı atılmasını sağlar bu sayede reçine homojen olarak dağılır. Genellikle takviye malzemesi olarak kısa fiberler kullanılır.

Kullanılan kısa takviye malzemeleri yüzünden mekanik özellikleri düşüktür. Kalıp maliyetleri yüksek fakat üretim maliyetleri düşüktür, seri üretime uygun ve hızlı bir yöntemdir. Korozyon dirençleri ve düşük ağırlıkları sayesinde savunma sanayi, havacılık ve otomotiv sektöründe tercih edilmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.7 Basınçla kalıplama(Compression molding) yöntemi

2.6.5. Kalıba reçine enjeksiyonu yöntemi

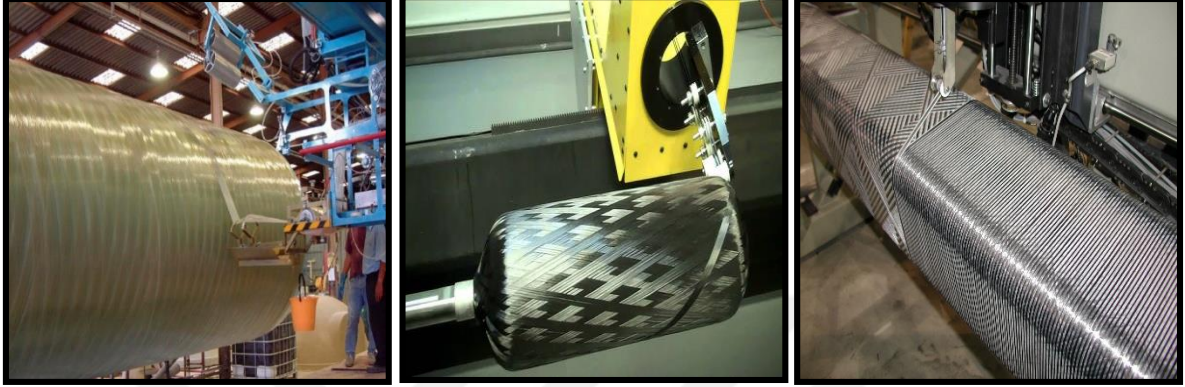
Kalıba reçine enjeksiyonu(Resin transfer molding (RTM)) yöntemi, fiber malzemelerin ve katmanların kalıp içerisine yerleştirildikten sonra kalıp içerisine basınç altında reçine enjekte edildiği bir kapalı kalıp yöntemidir. Kalıp içerisine aktarılan reçinenin akışı, uygulanan basınç değerine, fiberlerin yönüne ve enjeksiyon kanal sayısına göre farklılık gösterir. Bu yöntemde üretim süresi, reçine transferi yapıldıktan sonraki kürlenme sıcaklığına bağlıdır. Bu yöntemle üretilen nihai ürün üstün yüzey kalitesine ve mekanik özelliklere sahip olur. Kalıp maliyetleri basınçla kalıplamada olduğu gibi yüksektir. Otomotiv, sağlık gibi sektörlerde kullanılmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.8 Kalıba reçine enjeksiyonu (RTM) yöntemi

2.6.6. Filament sarma yöntemi

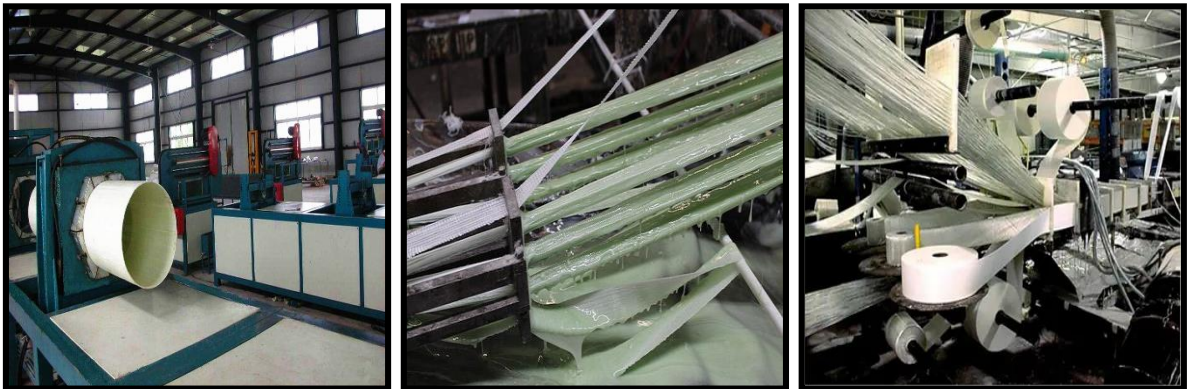
Filament sarma(Filament winding) yöntemi, reçine emdirilmiş fiberlerin dönen silindirik bir mandrel üzerine, istenilen açılarda sarılma yöntemidir. Sarma işlemi bittikten sonra oda sıcaklığında veya fırında kürleme yapılır ve içindeki mandrel çıkartılır. Bu yöntem kompozit boruların üretimi ve içi boş kompozit tank yapımlarında kullanılır (Şekil 2.6).



Şekil 2.9 Filament sarma (Filament winding) yöntemi

2.6.7. Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon (Pultrusion process) yöntemi, fiberlerin özel olarak tasarlanmış çekme aparatları ile reçine tankına daldırılıp oradan kalıplara çekilme yöntemidir. Üretim sürecinde reçine miktarı ve yoğunluğu sürekli kontrol altında tutulmaktadır. Bu yöntemle üretilen kompozitler üstün mekanik özelliklere sahiptir. Yapılan işlem otomatik sistemlerle gerçekleştirilir bu sayede kaliteli ürünler kısa zamanda üretilir. Üretim maliyetleri düşük bir yöntemdir (Şekil 2.7).



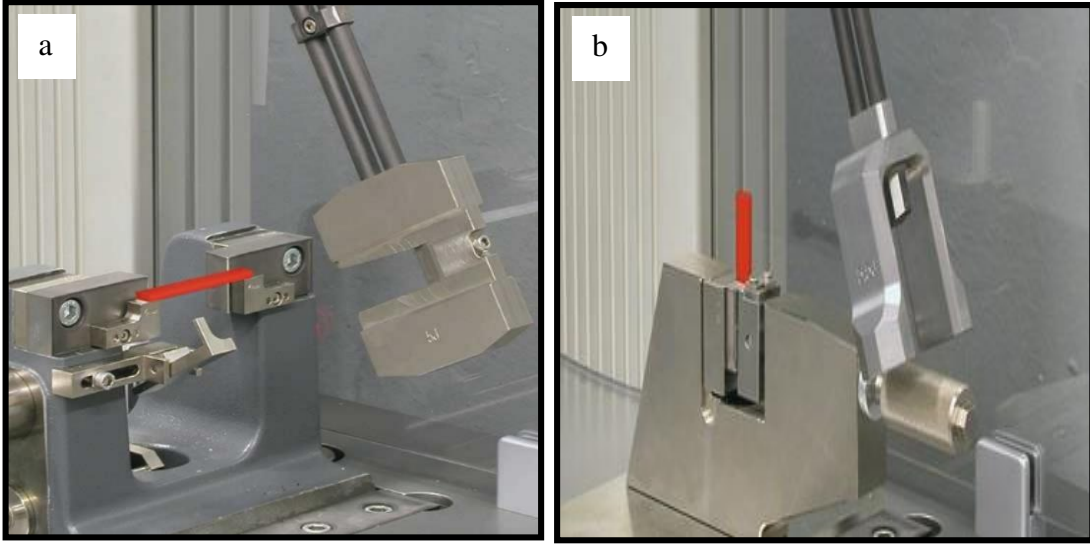
Şekil 2.10 Pultrüzyon(Pultrusion process) yöntemi

2.7. Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe

Kompozitlerde darbe direnci malzeme için kritik mekanik özelliklerinden birisidir. Savunma sanayi, uzay, havacılık ve otomotiv sektörlerinde darbe direnci tasarım yapılırken çok önemli bir kriterdir. Bu sebeple kullanılan kompozitlerin darbe direncinin bilinmesi gerekir. Kompozit malzemeler üzerinde darbe direncini tespit edebilmek için darbe testleri yapılır. Darbe testleri kendi içerisinde dört farklı hız kategorisinde sınıflandırılır. Düşük hızlı darbeler 1-10 m/s hız aralığında, orta hızlı darbeler 10-50 m/s hız aralığında, yüksek hızlı (balistik) darbeler 50-1000 m/s hız aralığında ve hiper hızlı darbeler 2000-5000 m/s hız aralığında meydana gelen darbelerdir [42]. Fiber metal laminatların kullanıldığı havacılık sektöründe düşük hızlı darbeye örnek olarak iniş veya kalkış esnasında pistten gelen yabancı bir madde, tamir ve bakım sırasında el aletinin düşük malzemeye çarpması gibi durumlardır. Bu düşük hızlı darbeler sonucunda kompozit yüzeyde fiber, matris ve deliminasyon hasarları meydana gelmektedir. Bu hasarlar kompozitin ömrünü ve mukavemetini düşürmektedir. Bu sebepten ötürü kompozit malzeme kullanılan yapıların hasar bölgeleri düzenli olarak gözlemlenmeli ve bakımları yapılmalıdır. Bu bakımların yapılabilmesi için bazı testler yapılmaktadır. Düşük hızlardaki darbelerin davranışı incelemek ve darbe dayanımını tespit etmek için kompozit malzemelerde Charpy ve Izod darbe testleri ile ağırlık düşürme darbe testleri kullanılmaktadır [43].

2.7.1. Charpy ve izod darbe testleri

Charpy ve Izod darbe testleri, malzemelerin dinamik yükleme koşulları altındaki davranışlarını karakterize etmek için kullanılan tahribatlı test yöntemleridir (Şekil 2.8). Bu testler, bir malzemenin ani bir darbe karşısında gösterdiği direnci, yani darbe tokluğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Her iki test de sarkaç prensibine dayanmakta ve numunenin kırılması için harcanan enerjiyi ölçmektedir. Test düzeneğinde belirli yükseklikten bırakılan sarkaç mesnetlenen numuneye çarptırılır. Çarpma sonucunda numune kırılır ve sarkaç belli bir yüksekliğe çıkar. Sarkacın kırmak için harcadığı enerji potansiyel enerji farkından hesaplanır. Numune geometrisi, mesnetleme koşulları ve çentik yönü gibi faktörlerdeki farklılıklar, bu testlerin farklı malzeme türleri ve uygulama alanları için daha uygun olmasını sağlar. Charpy testinde ortasında V şeklinde çentik bulunan dikdörtgen prizma yatay bağlanırken, Izod testinde dikey konumda bağlanmaktadır. Charpy testinde çentik yönü sarkaç darbesinin tersi yönünde, Izod testinde ise aynı yönde konumlandırılır.



Şekil 2.11 a) Charpy ve b) Izod darbe testi

2.7.2. Ağırlık düşürme darbe testleri

Ağırlık düşürme testi, kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe davranışlarını karakterize etmek için kullanılan temel bir deneysel tekniktir. Bu test, belirli bir kinetik enerjiye sahip bir vurucunun kompozit numuneye çarpmasıyla indüklenen hasarın incelenmesini içerir. Test parametrelerinin, vurucu kütlesi, düşürme yüksekliği, vurucu geometrisi ve numune mesnetleme koşullarının sistematik olarak değiştirilmesiyle, farklı darbe enerjileri altında oluşan hasar mekanizmaları ve malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesi detaylı bir şekilde analiz edilebilir. Test cihazı çarpışma bittikten sonra değerleri bir grafik olarak sunar. Bu grafikler belirli denklemler ve programlar yardımıyla numunenin darbe davranışının belirlenmesini sağlar. Charpy ve izod darbe testleriyle arasındaki fark, ağırlık düşürme testinde farklı geometriye sahip numuneleri, farklı tip vurucularla test ederek darbe davranışının incelenmesidir (Şekil 2.9).



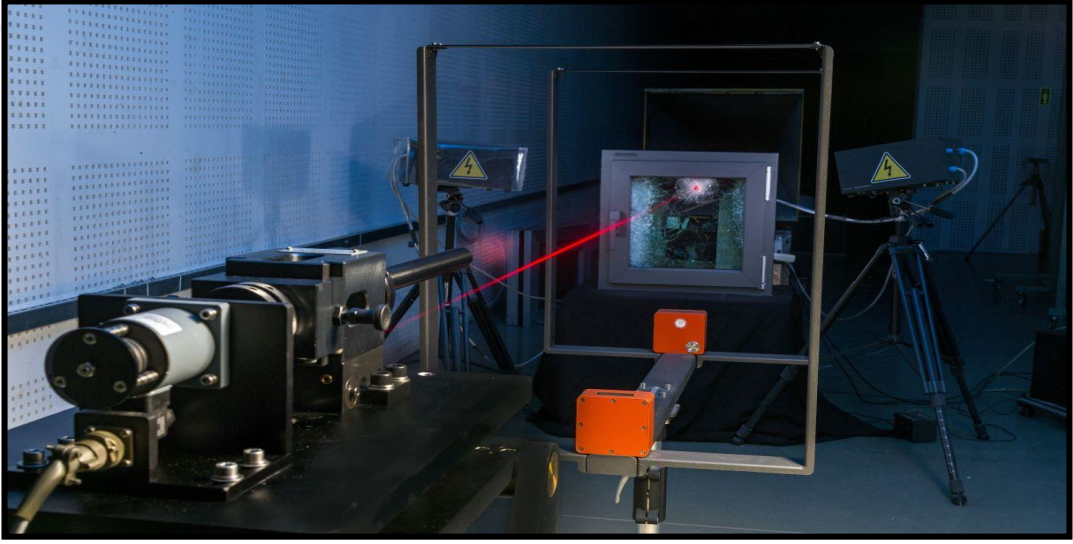
Şekil 2.12 Ağırlık düşürme darbe testi cihazı

2.8. Kompozitlerde Yüksek Hızlı Darbe

Kompozit malzemeler, hafiflik ve yüksek dayanım gibi üstün mekanik özellikleri sayesinde savunma sanayi, havacılık ve otomotiv gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılan malzemelerin mekanik dayanımını değerlendirmek amacıyla yüksek hızlı darbe testleri büyük bir öneme sahiptir. Bu testler, kompozitlerin ani yüklere karşı davranışını test ederek malzemenin darbe direncini ve hasar toleransını yorumlayabilmeyi sağlar. Yüksek hızlı darbe testleri, genellikle balistik test cihazları, gaz tabancaları veya düşme kuleleri kullanılarak gerçekleştirilir. Balistik test cihazları, belirli bir hız aralığında merminin fırlatılmasını sağlar ve çarpmanın malzeme yüzeyine etkisi incelenir. Gaz tabancaları, sıkıştırılmış gaz kullanarak küçük metal mermilerin yüksek hızlarda malzeme yüzeyine çarpmasına olanak tanır. Düşme kuleleri ise, belirli bir yükseklikten ağırlıkların serbest bırakılmasıyla malzeme yüzeyine darbe etkisi sağlar. Bu yöntemlerin her biri, farklı darbe hızları ve enerji seviyelerini test edebilmek için tasarlanmıştır. Yüksek hızlı kameralar, yük hücreleri, ivmeölçerler ve termal kameralar testler sırasında ölçüm cihazı olarak kullanılır. Yüksek hızlı kameralar, darbe anındaki deformasyonları ve hasar oluşumunu mikrosaniyeler içinde kaydeder. Yük hücreleri darbe kuvvetini ölçerken, ivmeölçerler malzemenin ivme değişimlerini ölçer. Termal kameralar ise darbe sonucunda malzemede oluşan ısı değişimlerini gözlemleyerek malzeme iç yapısındaki enerji dağılımını analiz etmemizi sağlar. Yüksek hızlı darbe testlerinin sonuçları, kompozit malzemelerin tasarım süreçlerinde önemli faktördür. Testler sonucunda elde edilen veriler, malzeme seçimi, katmanlar arası düzen ve kalınlık gibi birçok parametrenin optimizasyonunda kullanılarak daha güvenilir ve dayanıklı kompozit yapılar geliştirilmesini sağlar.

2.8.1. Balistik testler

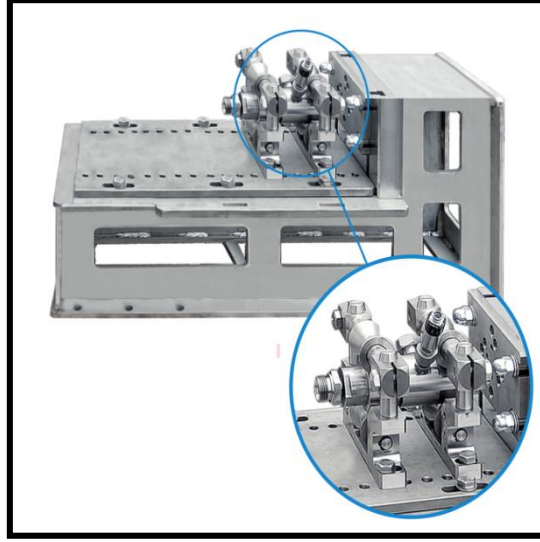
Balistik testler, farklı silahlar ve mermi çeşitleri kullanılarak malzemenin bir mesnete sabitlenip silah yardımıyla yüzeyine mermi atılmasıyla gerçekleşir. Balistik testlerde, mermi hızları genellikle 200 m/s ile 1000 m/s arasında değişir ve mermi türü olarak çelik, alüminyum veya kurşun kullanılabilir. Bu testler sonucunda, numunede oluşan mermi giriş derinliği, delinme çapı ve numunenin arka katmanlarındaki hasar detaylı bir şekilde incelenir. Balistik testlerde, farklı kalınlıklarda, farklı katman dizilimlerinde ve farklı fiber yönelimlerinde üretilmiş kompozit plakalarda test edilerek, katmanlı yapının enerji absorbe etme özellikleri incelenir. Balistik testler, özellikle savunma sanayi ve havacılık sektöründe kritik öneme sahiptir(Şekil 2.3).



Şekil 2.13 Balistik test cihazı

2.8.2. Gaz tabancası testleri

Gaz tabancası testleri, sıkıştırılmış helyum veya hidrojen, kullanarak küçük mermilerin çok yüksek hızlarda numuneye çarpmasını sağlar. Bu test yönteminde, genellikle balistik testlere göre daha küçük çaplı mermiler kullanılarak ince kompozit laminatların delinme davranışları gözlemlenir. Gaz tabancası testlerinde, mermi yüksek hızlara ulaşabildiği için malzemenin ani darbelere karşı dayanımının analiz edilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.14 Gaz tabancası test cihazı

2.8.3. Düşme kuleleri

Düşme kuleleri testlerinde, belirli bir yükseklikten ağırlıklar serbest bırakılarak kompozit malzeme üzerine darbe etkisi gözlemlenir. Bu testlerde, ağırlığın serbest düşüşü sonucunda elde edilen kinetik enerji numune ile çarpışarak darbe enerjisine dönüşür. Darbe alan numunenin yüzey deformasyonu analiz edilir. Düşme kuleleri testleri, genellikle daha düşük hızlarda, yüksek enerjili darbe ihtiyacı için kullanılır (Şekil 2.5).



Şekil 2.15 Düşme kulesi test cihazı

2.9. Kompozitlerde Darbe Sonrası Oluşan Hasar Türleri

Fiber metal laminatlar, yüksek dayanım, ağırlık tasarrufu ve yorulma direnci gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan hibrit kompozit malzemelerdir. Ancak bu malzemeler, düşük hızlı

darbelere maruz kaldıklarında çeşitli hasar türleri meydana gelmektedir. Düşük hızlı darbe etkisi, genellikle bakım ve onarım süreçlerinde kritik bir faktör olup, bu tip darbelere karşı geliştirilecek tasarımlar, malzeme performansının optimize edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Fiber metal laminatlarda darbe enerjisinin büyüklüğüne bağlı olarak hasarlar belli bir sıralama ile oluşmaktadır. Fiber metal laminatlarda sırasıyla, matris hasarı, delaminasyon, fiber kopması ve penetrasyon hasarları oluşmaktadır. Bu hasarlara ek olarak metal tabaka içi plastik deformasyon, göçme (indentation), yüzey hasarları ve ayıklama (peeling) hasarlarında farklı darbe türlerine göre açığa çıkmaktadır.

2.9.1. Matris çatlağı

Darbe enerjisi, kompozit yapıların matris yapısında mikro veya makro çatlaklar oluşturabilir. Bu tarz çatlaklar, genellikle fiberlerden bağımsız olarak gerçekleşir ve malzemenin yük transfer kapasitesini zayıflatır. Kompozit yapılarda darbe sonrasında çekme çatlağı ve kayma çatlağı olarak iki tür matris çatlağı gözlemlenebilir. Çekme çatlakları darbe uygulanan katman yüzeyinde oluşan düzlem içi normal gerilmeler, katmanın enine kayma dayanımını aştığında oluşur. Kayma çatlaklarının oluşma şekli ise, darbe uygulanan katmanın orta düzleminde belirli bir açıda oluşur ve enine kayma gerilmelerinin bu tür kayma çatlaklarının oluşumunda etkisi fazladır [43].

2.9.2. Metal katman içi plastik deformasyon

Kompozit malzemelerde plastik deformasyon, enerjinin büyük bir kısmını absorbe eder fakat yapısal olarak zarar görebilir. Metal tabaka içi plastik deformasyon, metal tabakanın darbe enerjisine karşı gösterdiği elastik deformasyon sınırını aşarak kalıcı şekilde yapısal bozukluğu meydana getirir. Darbe sonrası oluşan plastik deformasyonun artmasıyla, katmanların stabilitesi olumsuz etkilenecek delaminasyonun başlamasına sebebiyet verir.

2.9.3. Delaminasyon

Delaminasyon (tabakalar arası ayrılma), darbe enerjisinin etkisiyle metal katman ile kompozit katmanları arasındaki bağın kopmasıyla meydana gelir. Delaminasyonun başlaması, matris çatlağının devamı söz konusudur. Delaminasyon, genellikle darbenin temas noktasında yoğunlaşır ve malzemenin yük taşıma kapasitesinde önemli azalmalara ve kullanım ömründe azalmaya sebep olur. Katmanlar arası eğilme rijitliği farkı ve eğilme kaynaklı kayma kuvvetleri delaminasyon oluşumu için en kritik faktördür. Katman kalınlığı, katmanların dizilim sırası, kullanılan katmanların malzeme farklılıkları delaminasyon

hasarlarında önemli rol oynar. Bu hasar türü, darbe enerjisinin katmanlar boyunca yayılmasını engelleyerek yapısal bütünlüğe zarar verir.

2.9.4. Fiber kırılması

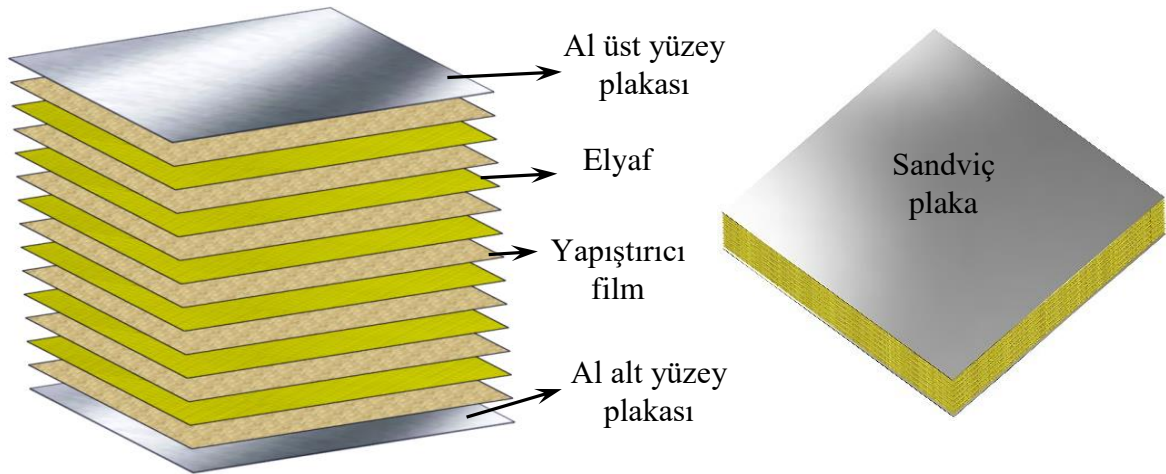
Fiber kırılmalarının gerçekleşmesi için yüksek darbe enerjisi gereklidir. Bu kırılmalar, matris çatlağının ve delaminasyonun ilerlemesi ile meydana gelir. Fiber kırılmalarının gerçekleşmesi malzemede kalıcı hasarın meydana geldiği gösterir. Darbe sonrası oluşan fiber kırılmalar, malzemenin yük taşıma kapasitesinde önemli kayıplara neden olur.

2.9.5. Penetrasyon

Penetrasyon (tam geçirgen hasar) hasarları, vurucunun darbe enerjisinin kritik seviyelere ulaştığı durumlarda fiber metal laminatlar tamamen delinerek katmanların ciddi şekilde ayrılmasıyla oluşan hasar türüdür. Penetrasyon sonucunda, malzeme kalıcı olarak hasar görür, yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde azalır ve hasar gören malzemeler acil müdahale ihtiyacı duyar. Kompozit malzemeyi oluşturan birçok faktör penetrasyon hasarının oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir.

3. FİBER METAL LAMİNATLAR

FML, son yıllarda özellikle savunma ve uçak sanayisinde sıklıkla araştırma ve geliştirme konusu olup birçok alanda üretimi yapıp kullanılmıştır. Ayrıca FML, gelişmiş metal alaşımlılarının elyaf takviyeli kompozitlerle birleştirilmesinden meydana gelen hibrit kompozit grubudur [44]. Bu birleştirmeden meydana gelen FML hem metal alaşımlarının hem de elyaf malzemenin mekanik özelliklerine göre gelişmiş bir ürün oluşturmıştır. 1950 yılında, Fokker Aerostructures bu gelişmiş lamine yapıların, tek katmanlı malzemelere göre malzemelerde meydana gelen hızlı yorulma çatlağını çok iyi bir şekilde önlediğini bulmuştur. İkinci Dünya Savaşı'ndan önce, araştırmalara bir süre ara verilmiş, 1970'lerde ilk fiziksel testler FML kompozitlerle gerçekleştirilmiştir. Deneylerle geçen yıllardan sonra, 1980'lerin başında Aramid Takviyeli Alüminyum Levha (ARALL) adı verilen kompozit malzeme Delft Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir [45]. 1950'den 1980'lere kadar yapılan çalışmalar etkisini 1980'lerden sonra göstermeye başlamıştır. Delft Teknoloji Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda aramid elyaf, alüminyum 7000 serisi ve epoksi kullanılarak günümüzde kullanılan FML' nin başarıya ulaşmasında önemli rol oynamıştır [1]. FML düşük yoğunlukta, yüksek yorulma ve hasar dayanımına olan ihtiyaçtan dolayı geliştirilmiştir. FML takviyeli plastik tabaka ve metal tabakaların birleşiminden meydana gelen bir kompozit yapıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 FML kompozit plaka

Şekil 3.1'de FML içyapısında ki malzeme diziliminin genel bir örneği gösterilmiştir. FML dizilimindeki katman sayısı kullanım alanına ve ihtiyaç duyulan dayanıma göre değişiklik gösterebilir.

3.1. FML'lerin Çeşitleri

FML'ler, kullanılan çekirdek malzemesi cinsine göre ARALL (Aramid Reinforced Aluminum Laminates), CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminates), GLARE (Glass Reinforced Aluminum Laminates) gibi isimlerle adlandırılmaktadır [46].

3.1.1. ARALL

Geleneksel monolitik malzemelerin sınırlamalarının üstesinden gelmek amacıyla geliştirilen ARALL, metalik ve kompozit malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getiren hibrit bir yapıya sahiptir. Bu malzeme, ince alüminyum levhaların (genellikle yüksek mukavemetli 2024 veya 7075 serisi alaşımlarının) arasına yüksek mukavemetli aramid liflerin yapısal epoksi reçine yapıştırıcı ile hassas bir şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulur. Aramid fiberler ve alüminyum plakaların birleştirilmesiyle oluşan ARALL, 1970'li yıllarda Fokker F-27 kanat alt kaplama panellerini ve Boeing C-17 uçağının kargo kapısını geliştirilmek istenmesiyle ortaya çıkmıştır. ARALL hafif yapısıyla ağırlık tasarrufu sağlarken, yüksek yorulma direnci ve yüksek young modülüyle uzun kullanım ömrü sunar. Bu üstün özelliklerine rağmen nem direnci düşüktür ve basma, bükülme ve burulma kuvvetlerine karşı dayanımı zayıftır [47, 48]. ARALL geliştirildikten sonra ilk kez Fokker F-27 üzerinde kullanılmıştır. Geliştirilen bu yeni malzeme F-27 uçağında yaklaşık %30 ağırlık kazancı sağlarken, kullanılan bir önceki malzemeye göre daha uzun ömür sağlanmıştır [49]. ARALL üstün yorulma direnci, yüksek young modülü gibi avantajlara sahip olsa da birçok dezavantajı vardır. Özellikle malzeme üzerinde çentik veya delik olması durumunda mekanik özelliklerde büyük ölçüde azalma olmakta, fiberlerin tek yönlü dizilimi çok yönlü kuvvete karşı dezavantaj sunmakta ve bazı durumlarda fiber kırılmalar meydana gelmektedir [49]. ARALL'da aramid fiber katmanlar ve reçine arasında bağlanma zayıflığı bulunmaktadır. Bu zayıflık mukavemette azalmaya sebep olmaktadır veya istenilen mukavemeti yakalamak için fazla fiber katman kullanımı gerekmektedir [48]. Düşük maliyetli oluşu, kolay işlenebilirliği, şekillendirme ve mekanik sabitleme kabiliyetleri gibi özellikleriyle alüminyum alaşımının üstün özelliklerini korumaktadır. ARALL, savunma sanayi, havacılık, balistik uygulamalar gibi birçok alanda kullanılmıştır, en çok kullanıldıkları alan ise ortaya çıkmalarının sebebi olan uçakların kargo kapılarıdır.

3.1.2. GLARE

1987 yılında ARALL'ın mekanik özelliklerindeki bazı parametre yetersizlikleri nedeniyle, havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere cam elyaf takviyeli alüminyum fiber metal laminatlar geliştirilmiş ve AKZO firması tarafından patentlenmiştir. GLARE 1991 yılında geliştirilerek ticarileşmiştir. GLARE ARALL'a kıyasla daha üstün çekme ve basma mukavemetine sahiptir, nem tutma oranı daha düşüktür, darbe direnci daha yüksektir ve arayüz reçine yapışma oranı daha iyi olduğu için çift yönlü fiber dizilimi kullanılabilir fakat ARALL'a göre daha ağır bir malzemedir [47].

GLARE'in fiber yönündeki özgül sertliği ve dayanımı, metal katmanlarda kullanılan yüksek dayanımlı alüminyum alaşımı üzerinde artırılmıştır; bu da yapısal tasarımlarında önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlar. Ayrıca, fiber köprüleme sayesinde çekme gerilmesi yüklemeleri altında alüminyum alaşım katmanlarda oluşan çatlakların ilerlemesi ve kopmaları engellenir, böylece malzemenin dayanımı artmış olur [50].

3.1.3. CARALL

ARALL laminatlarda basma direnci düşük olduğu için geliştirilmek istenmiştir. Bu geliştirme çalışmalarında karbon fiberde ARALL üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar umut verici olduğu için CARALL adıyla fiber metal laminatların arasına katılmıştır [44]. ARALL'a göre daha sert olan CARALL daha iyi çatlak köprülemeye sahip olduğu için düşük çatlak büyüme oranına sahiptir [51]. CARALL'ın en büyük dezavantajı karbon fiberler ve alüminyum plaka arasında galvanik korozyon oluşumudur. Galvanik korozyon yüzünden kullanım alanları ARALL'a göre daha azdır [44].

3.2. Fiber Metal Laminatların Mekanik Özellikleri

Fiber metal laminatlar'ın kullanım alanları ve üzerinde yapılan çalışmaların etkisiyle son on yıldır mekanik özelliklerine olan çalışma ilgiside artmıştır. Darbe, kesme, sıkıştırma ve gerilim testleri fiber metal laminatların mekanik özelliklerini incelemek için yapılan temel testlerdir [51].

3.2.1. Statik özellikler

Fiber metal laminatların statik özelliklerini ölçebilmek için ASTM D3039 standartlarında bulunan yöntemlere göre testler yapılmaktadır [47]. Fiber metal laminatların statik özellikleri literatürdeki yapılan testlerin sonuçlarındada görüldüğü gibi fiberlerin dizilimi,

yönleri, mekanik yapıştırıcı özellikleri, fiber katman sayısı ve kullanılan alüminyum türüne bağlı olduğunu görülmüştür [51].

Savunma sanayi ve havacılıkta kullanılan fiber metal laminatlar, normalde kullanılan alüminyumlara göre yüksek yorulma direnci avantajı sunarken, birçok fiber metal laminatların statik özellikleri kullanılan alüminyuma eşdeğer veya alüminyumdan yüksek bir değere sahiptir. Statik özellikleri yüksek fiber metal laminatların savunma sanayi ve havacılıkta yekpare olarak alüminyum yerine kullanılması ağırlık olarak kazanç sağlar. Alüminyum yerine GLARE kullanıldığı zaman basma yüklerine sahip panellerde, panale uygulanan kuvvetin büyüklüğüne göre %3-13 arasında ağırlıkta kazanç sağladığı görülmüştür [49]. GLARE VE ARALL fiber metal laminatlarının Çekme statik özellikleri Tablo 3.1’de [52, 53], Basma statik özellikleri Tablo 3.2’ de [53, 54] ve Kayma statik özellikleri Tablo 3.3’ de [53, 54] verilmiştir.

Çizelge 3.1 ARALL VE GLARE’nin çekme özellikleri [52, 53]

FML	YÖN	Azami Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Elastik Modülü (GPa)	Azami Gerini (%)
ARALL 1	L	800	641	67,6	-
	LT	386	331	48,3	-
ARALL 2	L	717	366	66	2,5
	LT	317	228	53	12,7
ARALL 3	L	821	607	66	2,2
	LT	373	331	49	8,6
ARALL 4	L	731	373	64,1	-
	LT	338	317	49	-
GLARE 2	L	1213	393	66	4,7
	LT	317	228	50	10,8
GLARE 3	L	745	303	58	4,7
	LT	745	303	58	4,7
GLARE 4	L	1027	352	57	4,7
	LT	607	285	50	4,7
GLARE 5	L	683	-	70	-
	LT	683	-	70	-

Çizelge 3.2 ARALL ve GLARE'İN basma Özellikleri [53, 54]

FML	Yön	Basma Akma Mukavemeti (MPa)	Basma Elastik Modülü (GPa)
ARALL 1	L	372	70
	LT	393	52
ARALL 2	L	262	67
	LT	234	52
ARALL 3	L	345	66
	LT	365	50
GLARE 1	L	424	67
	LT	403	51
GLARE 2	L	414	67
	LT	236	52
GLARE 3	L	309	60
	LT	306	60
GLARE 4	L	365	60
	LT	285	54

Çizelge 3.3 ARALL ve GLARE'in kayma Özellikleri [53, 54]

FML	Yön	Kayma Akma Mukavemeti (MPa)	Kayma Elastik Modülü (GPa)
ARALL 2	L-LT	111	17
	LT-L	111	16
ARALL 3	L-LT	117	17
	LT-L	117	16
GLARE 2	L	112-122	13,6-16,1
	LT	112-122	13,6-16,1
GLARE 3	L	115-125	16,4-18,4
	LT	115-125	16,4-18,4
GLARE 4	L	100-111	13,4-15,6
	LT	100-111	13,4-15,6

3.2.2. Yorulma özellikleri

Fiber metal laminatların mekanik özelliklerinden yorulma direncinin değeri, fiber metal laminatın kullanılacağı bölge için kritik önem taşımaktadır. Savunma sanayi ve sivil havacılıkta kullanılan uçaklarda, basınçlı gövde kabuklarında ve alt kanat kabuğu gibi yorulma direncinin yüksek istenildiği durumlarda fiber metal laminatların kullanılması birçok avantaj sağlamaktadır. Fiber metal laminatların üretimi ve şekillendirilmesi esnasında kullanılan bazı yöntemlerde metal katmanda yorulma çatlakları başlar ve metal katman üzerinde ilerlemeye devam eder [55]. Oluşan çatlak metal katmanda ilerlerken köprüleme etkisiyle fiber katman bu ilerlemeye engel olur. Fiber köprüleme etkisi fiber metal laminatlarda yorulma direncinin yüksek olmasında önemli bir rolü vardır [55, 56]. (Fiber metal laminatlarda bulunan bu fiber köprüleme özellikle GLARE'de en çok kendisini gösterir. Fiber köprüleme özelliği sayesinde fiber metal laminatların çatlak ilerle hızı yekpare alüminyuma göre 10-100 kat daha yavaş olur [56]. Fiber metal laminatlarda yorulma

direncinin yüksek olması, savunma sanayi ve sivil havacılıkta tercih edilmesini sağlamaktadır.

3.2.3. Darbe direnci özellikleri

Fiber metal laminatların darbe davranışı kullanılan metal ve fiber/epoksi malzemelerinin cinsi, fiber elyafların dizilimi, darbe uygulayan cismin şekli, darbenin uygulandığı cismin şekli, darbe uygulanan bölge vb. parametrelere bağlıdır [57]. Uçaklarda birçok etkenden dolayı yüksek hızlı ($>10\text{m/s}$) ve düşük hızlı ($<10\text{m/s}$) darbeler meydana gelmektedir. Yüksek hızlı darbelere örnek verecek olursak; dolu yağışları, kuş çarpması, pistte bulunan yabancı maddeler vb. Düşük hızlı darbelere; bakım kazaları, pist araçlarının çarpması gibi olayları örnek verebiliriz. Yapılan deneysel bir araştırmada Boeing 747 gövdesindeki hasarların tespit edip bu hasarların türünü belirlemişlerdir. Tamirin %57,6'sinin yorulma çatlaklarından kaynaklı hasar, %29,4'ünün korozyondan kaynaklı hasar ve %13'ünün darbe hasarı olduğunu tespit etmişlerdir [58]. Tespit edilen bu sonuçlar analiz edildiğinde darbe direncinin uçakların tasarımında önemli bir etken olduğu görülmüştür. Bu sebepten ötürü fiber metal laminatların uçaklarda kullanımı için darbe direncinin yüksek olması önem arz etmektedir. Yekpare metallere uygulanan düşük hızlı darbelerde metalin sünekliğinin yüksek olmasından dolayı darbe enerjisini absorbe edilir. Aynı durumda kompozitler daha kırılğan yapılarından kaynaklı olarak daha az enerji absorbesi görülür. Fiber metal laminatlar ise kompozit ve metalin birleşimi olduğu için kompozit malzemenin düşük darbe davranışını ve metal malzemenin yüksek darbe enerjisi absorbe yeteneğini birleştirmiş olur [14]. Fiber metal laminatlarda bulunan metal tabaka, darbe esnasında darbe şiddetinin fiber/epoksi elyaflara aktarılmasında engelleyici rol oynar. Darbe gören metal tabaka ise delaminasyonun artmasını engeller. Bu sayede darbeden oluşan hasar sadece darbe bölgesinde kalır. Fiber metal laminatların bu özelliği darbe direnci gereken uygulamalar için tercih edilebilir malzeme konumuna getirir [17]. Yapılan deneyler sonucunda aynı ağırlıktaki yekpare alüminyuma göre fiber metal laminatların balistik direçlerinin %15 daha fazla olduğu tespit edilmiştir [59]. Darbe sırasında ARALL ve CARALL'ın fiber/epoksi elyaf hasarından, GLARE'nin ise laninatların diziliminden kaynaklı fiber/epoksi elyaf ve Al hasarından zarar gördüğü yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [6]. ARALL, CARALL VE GLARE'nin literatürde bulunan çalışmalardaki darbe davranış sonuçları incelendiğinde, kalıcı hasarın sırasıyla CARALL, GLARE ve ARALL olduğu görülmüştür. Ayrıca bu incelemelerde darbe bölgesindeki hasar genişliğinin en küçük olduğu GLARE olarak tespit edilmiştir [33, 60].

Yapılan teslerde ve araştırmalarda da görüldüğü gibi fiber metal laminatlar yekpare metallere göre darbe direnci bakımında birçok avantajı bulunmaktadır.

3.3. Fiber Metal Laminatların Avantajları ve Dezavantajları

Fiber metal laminatlar, metal ve fiber lif takviyeli kompozitlerin birleşimi olduğundan iki grubun birçok avantajını bir araya getirerek yekpare metallere veya geleneksel kompozitlere göre daha fazla avantajı vardır [61].

3.3.1. Fiber metal laminatların avantajları

- 1) Yorulma Direnci: Fiber metal laminatlarda özellikle GLARE’de bulunan fiber köprüleme özelliğı sayesinde çatlak ilerleme hızı yavaş olur. FML’ler yekpare alüminyumlara göre daha iyi bir yorulma direnci özelliklerine sahiptir [56].
- 2) Mukavemet: Yüksek mukavet özelliğine sahip metal laminatlar ile yüksek mukavemete sahip liflerin birleşimi olan fiber metal laminatlar, bu hibrit yapısı sayesinde yüksek mukavemetli hale gelir.
- 3) Kırılma Tokluğu: Yapılan araştırmalar göre, fiber metal laminatlar bileşen alaşımlarına kıyasla daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir [47].
- 4) Darbe Direnci: Yekpare metallere uygulanan düşük hızlı darbelerde metalin sünekliğinin yüksek olmasından dolayı darbe enerjisini absorbe edilir. Aynı durumda kompozitler daha kırılğan yapılarından kaynaklı olarak daha az enerji absorbesi görülür. Fiber metal laminatlar ise kompozit ve metalin birleşimi olduğu için kompozit malzemenin düşük darbe davranışını ve metal malzemenin yüksek darbe enerjisi absorbe yeteneğini birleştirmiş olur [14].
- 5) Düşük Yoğunluk ve Ağırlık Tasarrufu: Fiber metal laminatlar, aynı özelliklere sahip yekpare metallere kıyasla daha iyi bir ağırlık tasarrufu sağlar [62].
- 6) Nem ve Korozyon Direnci: Dış katmanda bulunan alüminyumün nem emilim direnci ve korozyona dayanımı özelliğı sayesinde, polimer kompozitlere kıyasla nem emilimi daha yavaştır. Bu özellikler fiber metal laminatlara iyi bir nem ve korozyon direnci sağlar [1].
- 7) Yangın Direnci: Fiber metal laminatlarda ara katmanlarda bulunan fiber malzemelerin yüksek erime noktası, yekpare alüminyumlara göre daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliğı sayesinde oluşan yangın iç tabakalara geçmemektedir. Bu yüksek yangın direnci fiber metal laminatların yolcu uçaklarında kullanımı için tercih sebebi yapıyor [63].

GLARE-3 üzerinde yapılan bir çalışmada, GLARE-3'ün 1100 °C'deki bir alevin 15 dakikada bile iç katmanlarına ulaşmadığı, alev ile temas yüzeylerinin en fazla 300 °C olduğu ölçülmüştür.

- 8) Bakım Maliyeti: Yüksek yorulma direnci, darbe dayanımı ve yüksek mukavemet özellikleri sebebiyle, fiber metal laminatlar daha az onarım gerektirir ve bu da bakım maliyetlerini azaltır [9].

3.3.2. Fiber metal laminatların dezavantajları

Fiber metal laminatların en büyük dezavantajı, kompozit katmanlardaki bağlayıcı reçinenin sertleşme süresine bağlı olarak uzun üretim sürecidir [5]. Artan üretim süreci yüzünden üretimde verimsizliğe ve üretim maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. Dezavantajlar kullanılan fiber metal laminatın türüne ve kullanım yerine göre farklılıklar gösterebilir. Fiber metal laminat türüne bağlı olarak bazı avantaj dezavantajlar Tablo 3.4' de verilmiştir.

Çizelge 3.4 FLM'lerin Avantaj ve Dezavantajları [47]

Fiber	Avantaj	Dezavantaj	FML
Aramid Elyaf	Üstün tokluk	Eğilme, burkulma, basma yükü ve enine çekmede zayıf	ARALL
	Çekme ve eğilme yüklerinde üstün yorulma direnci	Nem tutma	
	Yüksek elastik modülü	Kompozit matrisler gibi diğer bileşenlerle güçlü bağlar oluşturmaz	
Cam Elyaf	Ağırlık Tasarrufu		GLARE
	Yüksek çekme dayanımı	Ağırlık	
	Yüksek uzama dayanımı Nem direnci	Düşük rijitlik	

4. TAGUCHİ METODU

Taguchi metodu, ortogonal deney dizilerini kullanarak elde edilen sonuç değişkeni (yanıt) üzerinde etkili olan ve kontrol edilemeyen girdi parametre ve seviyelerinin etkisini en aza indiren, kontrol edilebilen faktörlerin etkisini ise deneysel çalışmaya en çok etkili hale getiren istatistiksel deney tasarım tekniğidir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ortogonal dizinler parametrelerin seviyelerini teker teker değiştirmek yerine eş zamanlı ve aynı anda birden fazla seviyeyi değiştirmeyi önermektedir.

4.1. Sistem Tasarımı

Taguchi metodunu kullanmak için ilk yapılacak işlemlerden biri sistem tasarımıdır. Bir ürünün son aşamasında üründen beklenen fonksiyonları sağlayabilmek için en uygun tasarım belirlenir.

Sistem tasarımının esas amacı üretimi yapılan ürünün yapım esnasında minimum maliyet ile üretimi gerçekleştirip sonuca varmaktır. Bu nedenle teknolojideki gelişmeleri ve bilimsel çalışmalardan son derece faydalanılmalıdır.

4.2. Parametre Tasarımı

Taguchi yönteminde elde edilecek olan ürünün kalitesini maksimum seviyeye çıkarmak için parametre tasarımı belirlemek önceliktir. Bir ürün için parametre tasarımı seçilirken o ürüne ait özelliklerin değişkenleri bilinmelidir.

4.3. Tolerans Tasarımı

Parametrelerin tasarımında maliyeti düşük, geniş alanda değişen etkenler veya faktörler kullanılabilir. Varyasyonu üretici tarafından uygun olan değere düşürmek için tolerans tasarımı uygulanır. Tolerans tasarımının temelinde üç çeşit kalite değişkeni vardır.

Bunlar;

- En büyük en iyi,
- En küçük en iyi,
- Hedef değer en iyi'dir

4.4. Statik Sonuçlu Tasarım

Taguchi metodunun iki önemli amacı vardır. Bu amaçlar;

- Kaliteyi istenilen hedef değere mümkün olduğunca en yakın değere yaklaştırmak,

- Elde edilen değerin varyansı yani hedef değerden sapmayıda oldukça minimize etmektir.

Taguchi S/N (Signal/ Noise) oranlarını geliştirdiğinden dolayı deney sonuçları ile arasındaki farklılığı minimize etmiştir. Deney sonucuna göre istenilen S/N oranları Çizelge 4. 1’ de verilmiştir

Çizelge 4.1 Taguchi’ nin sinyal gürültü oranları

Seçim	Amaç	Sonuç
En Büyük En İyi		
$S/N = -10(\log(\sum \frac{1}{Y^2})/n))$	Sonucun maximize edilmesi	Pozitif
Hedef Değer En İyi		
$S/N = -10(\log(s^2))$	Sadece standart sapmanın azaltılması	Pozitif, sıfır ya da negatif
Hedef Değer En İyi		
$S/N = 10(\log(Y^2)/s^2)$	Standart sapmanın ve ortalamasının belli bir hedef değerinde olması	Ortalama sıfır olduğu zaman standart sapma da sıfır
En Küçük En İyi		
$S/N = -10(\log(\sum Y^2)/n))$	Sonucun minimize edilmesi	Pozitif

4.5. Ortogonal Dizinler

Üreticiler tarafından kullanılan ortogonal düzenin en önemli özelliği, üretimde kullanılan faktörlerin en az sayıda test ile değerlendirilmesine olanak sağlamasıdır. Bilinen geleneksel deney yöntemlerinden farklı olarak her bir faktör seviyelerini teker teker değiştirmek yerine birden fazla parametreyi aynı anda değiştirmeyi benimsemiştir. Bir deneysel çalışmada tam faktöriyel tasarım gereği 2^k adet deneyin yapılması gerekir. Bu deney yönteminde parametrelere ait seviyelerin biri değiştirilirken diğeri seviye değerleri sabit tutularak deney yapılır. Ancak Taguchi uzun çalışmalar sonucu kendisine ait olan standart deney planlarını geliştirdi. Bu gelişimin ardından elde ettiği standart deney planlarının temelinde aynı anda eş zamanlı olarak birkaç parametrenin seviyelerini aynı anda değiştirerek deney sayısında üreticiye zaman ve maliyet açısından çok kıymetli olacak bir oranda düşüş sağlamıştır.

4.6. Varyans Analizi

Varyans analizi (ANOVA), iki veya daha fazla grubun ortalamaları arasındaki farkı değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir testtir. ANOVA, özünde gruplar arasında aritmetik ortalamaları aynı anda karşılaştırmanıza olanak tanır. ANOVA testi, aralarında bir

ilişki olup olmadığını belirlemek için ikiden fazla grubu aynı anda karşılaştırmanıza olanak tanır. ANOVA formülünün sonucu, F istatistiği veya F oranı, örnekler arasındaki ve örnekler içindeki değişkenliği değerlendirmek için çeşitli veri gruplarını analiz etmenize olanak tanır.

4.7. F Testi

F istatistiği, gruplar arasındaki varyansın gruplar içindeki varyansa bölünmesiyle hesaplanır. F kritik değeri , F istatistiğinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılan belirli bir değerdir. Genel olarak, F istatistiği F kritik değerinden büyükse, o zaman sıfır hipotezini reddedebilirsiniz; bu, grup varyansları arasında anlamlı bir fark olduğu anlamına gelir.



5. MATERYAL ve METOT

Bu tez çalışmasında yüksek darbe direncine sahip Fiber Metal Laminantların (FML) üretilmesi ve yüksek hızlı darbe direncine karşı davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deney tasarım planı Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak L_{18} ortogonal dizine göre belirlenmiştir. Üretilen sandviç plakaların tasarımı yapılırken en dışta kabuk olarak 1mm kalınlığa sahip AA7075 T651 serisi alüminyum plakalar kullanılmıştır. Kabuk alüminyum plakaların arasına çekirdek malzemesi olarak aramid elyaf kullanılmıştır. Kabuk ve çekirdek malzemelerin birleştirilmesi amacıyla epoksi reçine ve poliüretan köpük tercih edilmiştir. Üretilen numunelere ait deney parametreleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Alüminyum plaklarda çözeltiye alma işlemi yapıldığı, gerilim dalgalanması ve suni yaşlandırma işlemlerinden geçtiği için T651 kalite malzeme seçilmiştir. Kullanılan alüminyum plakalara ait kimyasal özellikler ve mekanik özellikler Tablo 5.2’de ve Tablo 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney No	Parametreler			
	Matris Malzemesi	Basınç (bar)	Aramid Sayısı (Adet)	Dizilim Modeli
1	Epoksi	15	2	AL/2AR/AL
2	Epoksi	15	4	AL/4AR/AL
3	Epoksi	15	6	AL/6AR/AL
4	Epoksi	25	2	AL/2AR/AL
5	Epoksi	25	4	AL/4AR/AL
6	Epoksi	25	6	AL/6AR/AL
7	Epoksi	35	2	AL/2AR/AL
8	Epoksi	35	4	AL/4AR/AL
9	Epoksi	35	6	AL/6AR/AL
10	Köpük	15	2	AL/2AR/AL
11	Köpük	15	4	AL/4AR/AL
12	Köpük	15	6	AL/6AR/AL
13	Köpük	25	2	AL/2AR/AL
14	Köpük	25	4	AL/4AR/AL
15	Köpük	25	6	AL/6AR/AL
16	Köpük	35	2	AL/2AR/AL
17	Köpük	35	4	AL/4AR/AL
18	Köpük	35	6	AL/6AR/AL

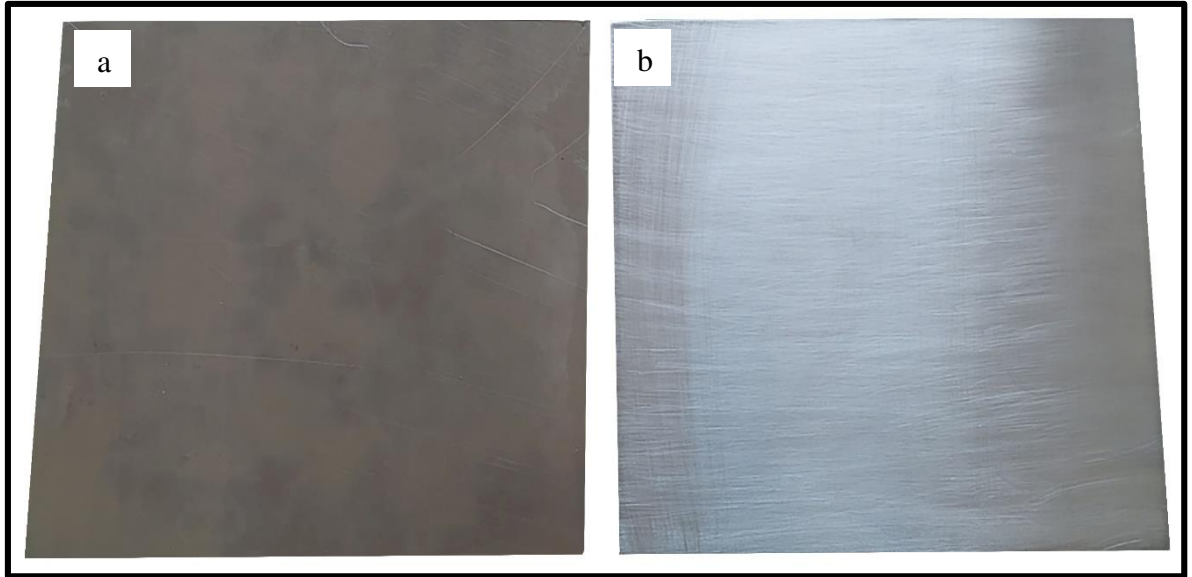
Çizelge 5.2 AA 7075 T651 alüminyum alaşıminın kimyasal özellikleri

Element	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Ti	Mn	Cr	Al
AA 7075	5.6	2.5	1.6	0.4	0.5	0.2	0.3	0.23	Kalan

Çizelge 5.3 AA 7075 T651 alüminyum alaşıminın mekanik özellikleri

Özellik	Seviye	Birimi
Elastisite Modülü (E)	71	GPa
Yoğunluk (ρ)	2.81	gr/cm ³
Poison oranı (ν)	0.306	
Kesme Modülü (G)	27.5	GPa
Akma Mukavemeti (R_e)	450	MPa
Çekme Dayanımı (σ_c)	550	MPa
Sertlik	150	HB
Uzama (%)	9.7	

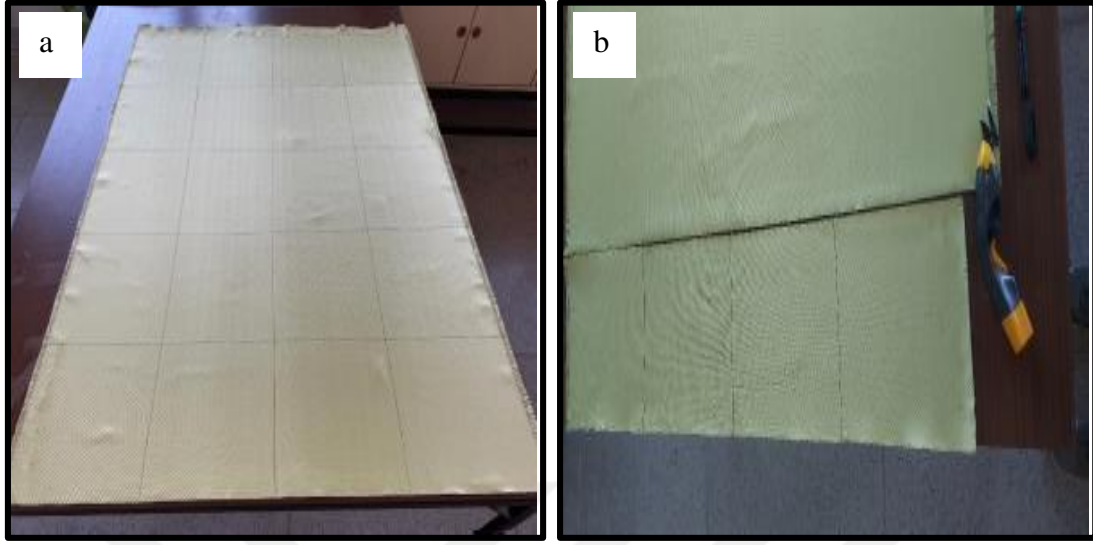
Üretim gerçekleştirilirken ilk olarak, alüminyum plaklar 240mmx240mm ölçülerinde giyotin makas ile kesilmiştir. Sonrasında Al plakaların yüzeyinde oluşan ve yapışmayı engelleyecek kir, kalıntı ve oksit tabakalarından arındırmak amacıyla plaka yüzeyleri 180 mesh ölçüsüne sahip zımpara ile zımparalanarak temizlenmiş alkol ile yıkanıp kurutulmuştur [20] (Şekil 5.1).



Şekil 5. 1 Al plakalarının a) ticari b) zımpara ile temizle işlemi görüntüsü

Üretimde kullanılan aramid elyaflar Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. İstanbul/Türkiye firmasından temin edilmiştir ve 0.25 mm kalınlığındadır. Kumaşlar 170 gr/m² alansal ağırlığa ve twill 2x2 örgü tipine sahiptir. Aramid elyafa ait mekanik özellikleri

Tablo 5.4’de verilmiştir. Rulo şeklinde temin edilen aramid elyaflar düzgün bir masa üzerine serilerek 250mmx250mm ölçülerinde özel kesme makası ile kesilmiştir (Şekil 5.2).

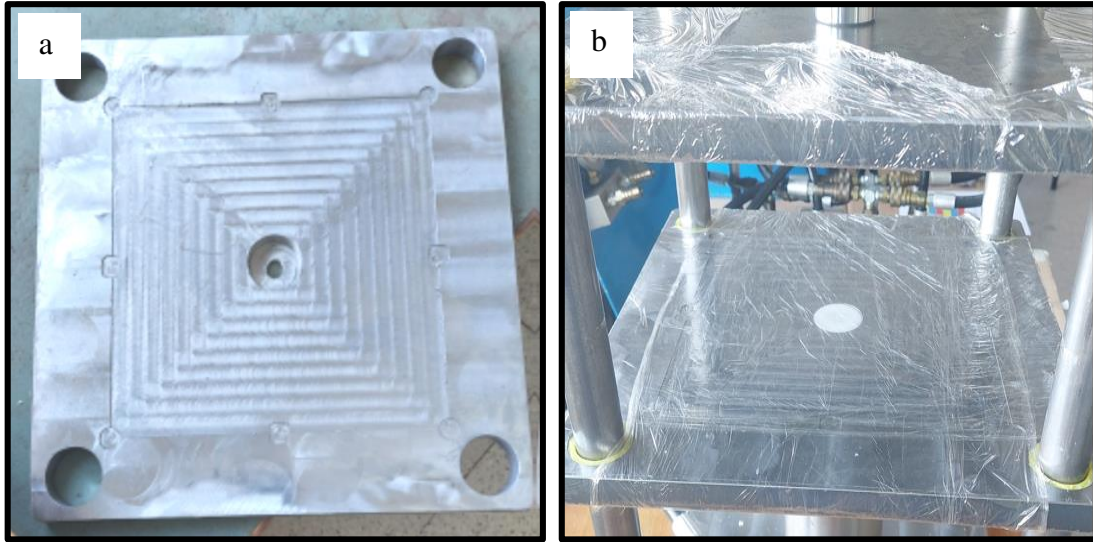


Şekil 5.2 Aramid elyaf kumaşların a) ölçüsünün belirlenmesi b) belirtilen ölçülerde kesilmesi

Çizelge 5.4 Aramid kevlar’ın mekanik özellikleri

Özellik	Seviye	Birimi
Elastisite Modülü (E)	19087	MPa
Yoğunluk (ρ)	1.2	gr/cm ³
Poison oranı (ν)	0.38	
Kayma Modülü (G)	2585	MPa
Kayma Dayanımı (S)	53	MPa
Basma Dayanımı	64	MPa
Çekme Dayanımı (σ_c)	357	MPa
Uzama (%)	0.019	

FML üretiminde gerekli basınç pres tezgâhı ile sağlanmıştır. Pres tezgahında, üretilen kompozitlerin düzgün bir şekilde sıkıştırılabilmesi için özel kalıplara ihtiyaç duyulmuştur. Bunun için 3 eksenli CNC freze tezgahında Ck45 malzemesinden özel olarak kalıplar imal edilmiştir. Üretilen kalıpların pres tezgahına montajı sağlanarak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.3).

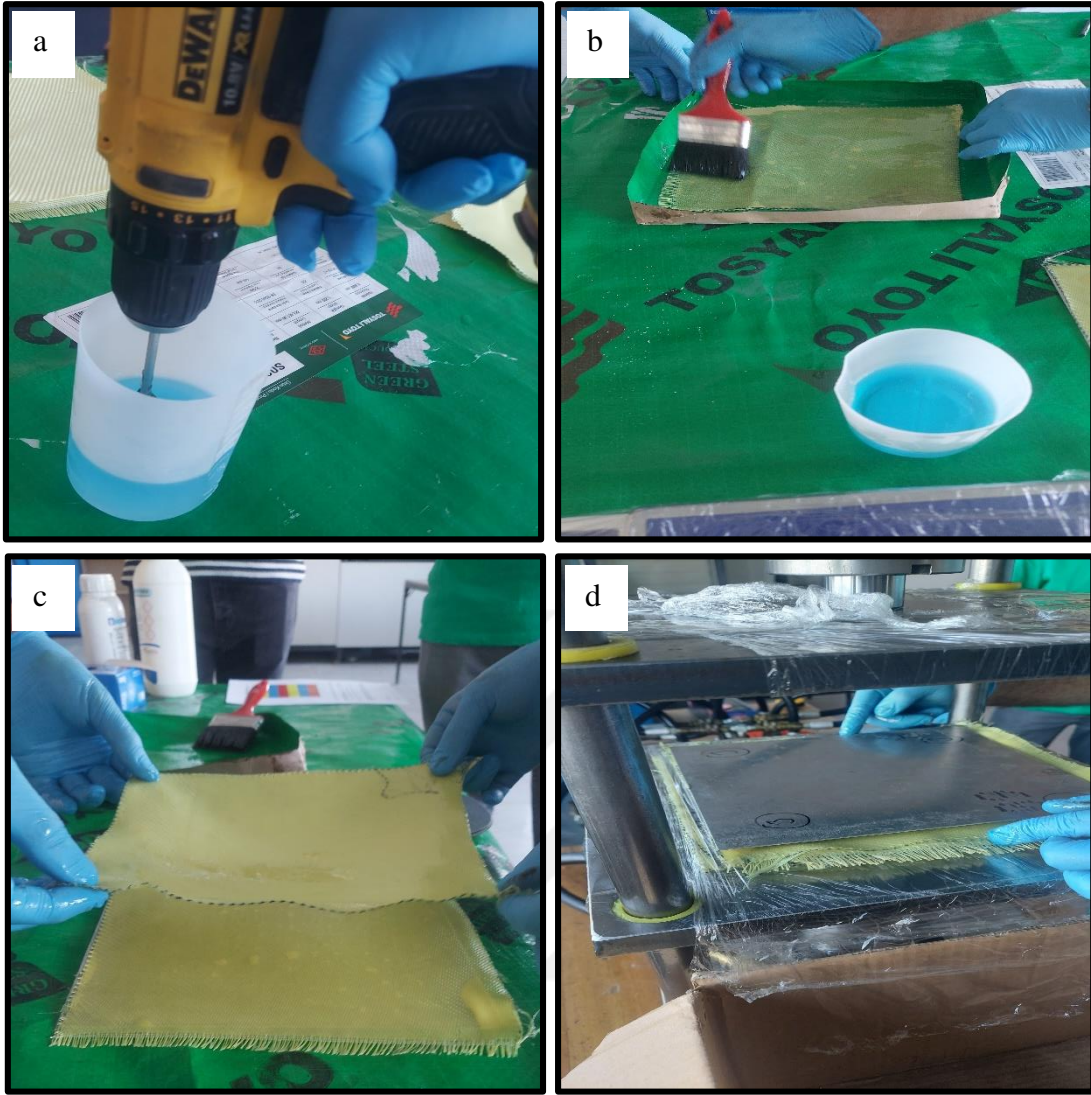


Şekil 5.3 FML üretimi için a) presleme plakası b) pres tezgâhı bağlantısı

Aramid elyaf ve Al plakalarından FML üretimi için (Deney 1-9) epoksi reçine kullanılmıştır. Çekirdek malzemesi olarak kullanılan tabakalı aramid elyaflar el ile üretim yöntemi ile üretilmiştir. Burada kullanılan epoksi reçine, ağırlıkça 100/20 oranında *LR160* epoksi reçine ve *LH160* sertleştirici karışımından elde oluşmaktadır. Epoksi reçine ve sertleştirici özellikleri Tablo 5.5’de verilmiştir. Kumaşların ıslatılması için hazırlanan epoksi/sertleştirici karışım oranları hassas terazi ile belirlenmiştir. Elde edilen karışım karıştırıcı çubuğu ile 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Epoksi/sertleştirici karışımı kumaşlar üzerine dökülerek kumaşların emdirilmesi sağlanmıştır. Daha sonra ıslak kumaşlar pres tezgahının çeneleri arasına yerleştirilmiştir. Gerekli basınç ayarı yapıldıktan sonra presleme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4). Pres altında üretilen FML plakalar daha sonra kürlleme işlemi için 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir.

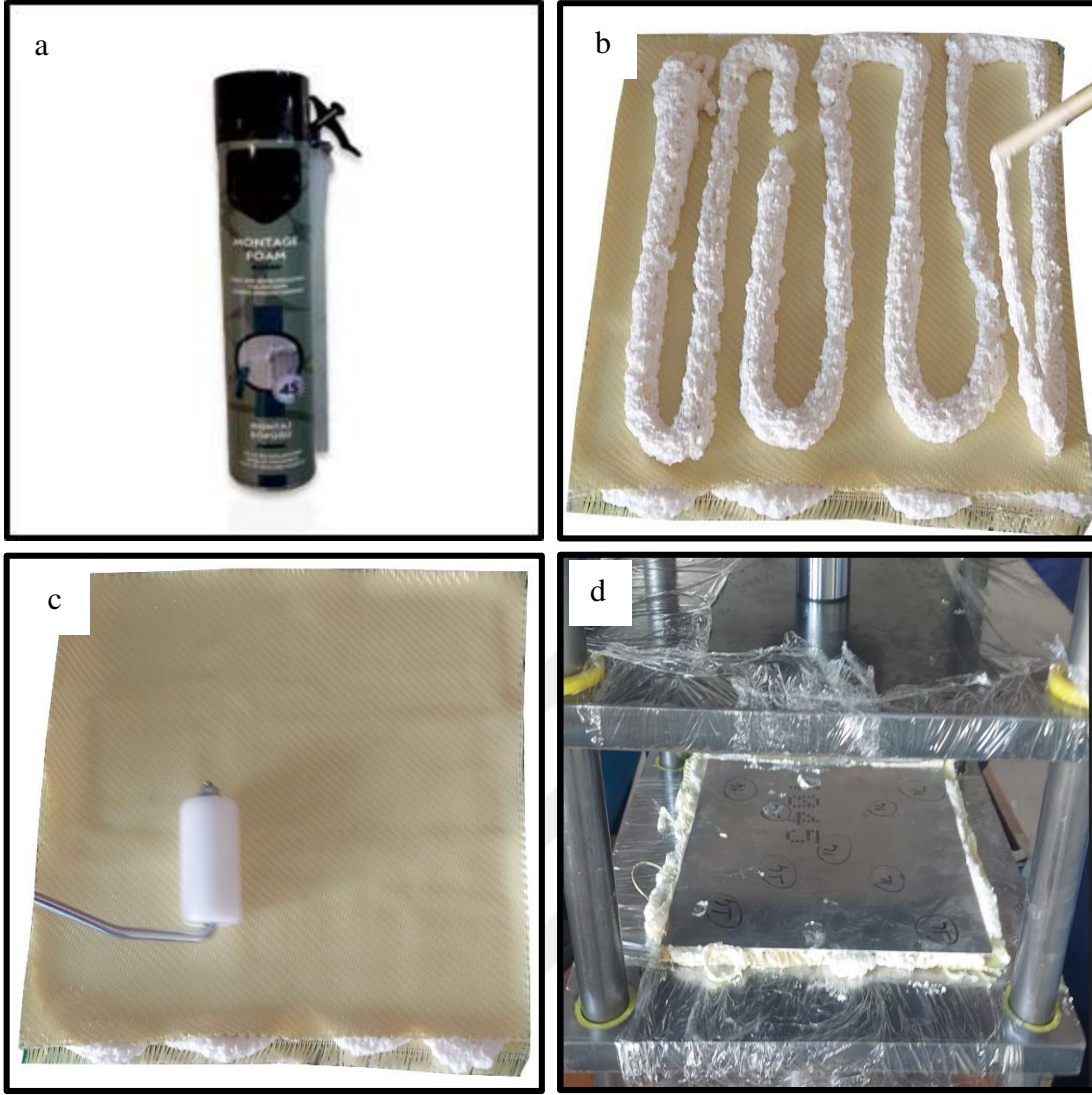
Çizelge 5.5 Kompozit üretiminde kullanılan reçine ve sertleştirici özellikleri [43]

Özellikler	Birim	LR160	LH160
Viskozite (25°C)	mPas	700-900	10-50
Yoğunluk (25°C)	g/cm ³	1.13-1.17	0.96-1
Ağırlıkça karışım oranı	-	100	25



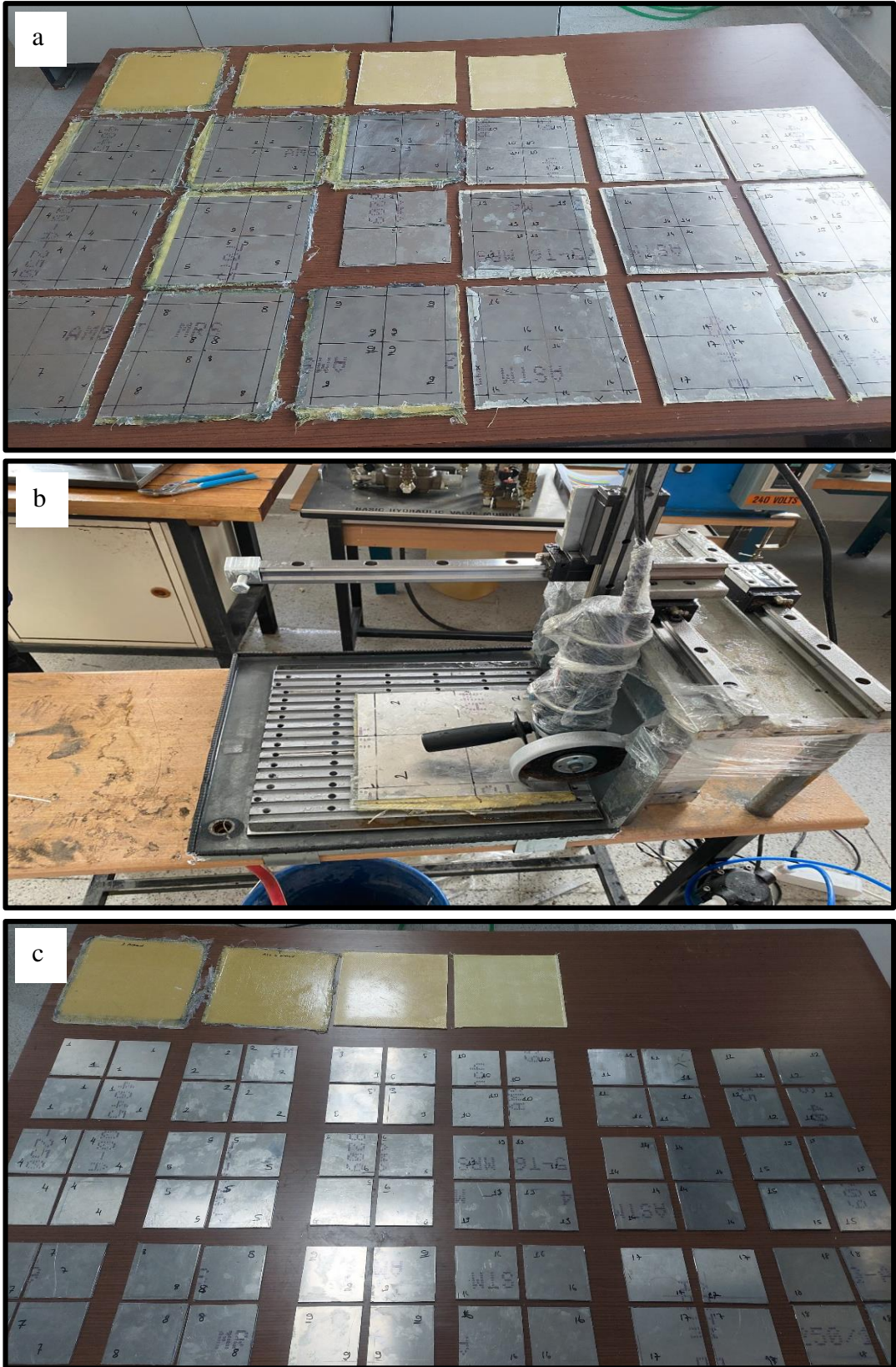
Şekil 5.4 Epoksi ile FML üretim aşamaları a) Epoksi/sertleştirici karıştırma b) Elle yatırma yöntemi ile kumaşları ıslatma c) Al plakalar arasına kumaş serme işlemi d) Presleme işlemi

Al ve çekirdek malzemesi aramid elyaf kullanılarak üretilen FML plakalar (Deney10-18) için yapıştırma malzemesi olarak poliüretan köpük kullanılmıştır. Bu yöntemde hem Al/aramid kumaş arasına hemde aramid/aramid kumaş arasına yeteri kadar poliüretan köpük uygulanmış ve fazla köpük miktarı rulo yardımı ile dışarıya atılmıştır. Bu numuneler daha sonra presleme işlemine tabi tutulup poliüretan köpüğün donması için 24 saat süre zarfında pres altında bekletilmiştir (Şekil 5.5).



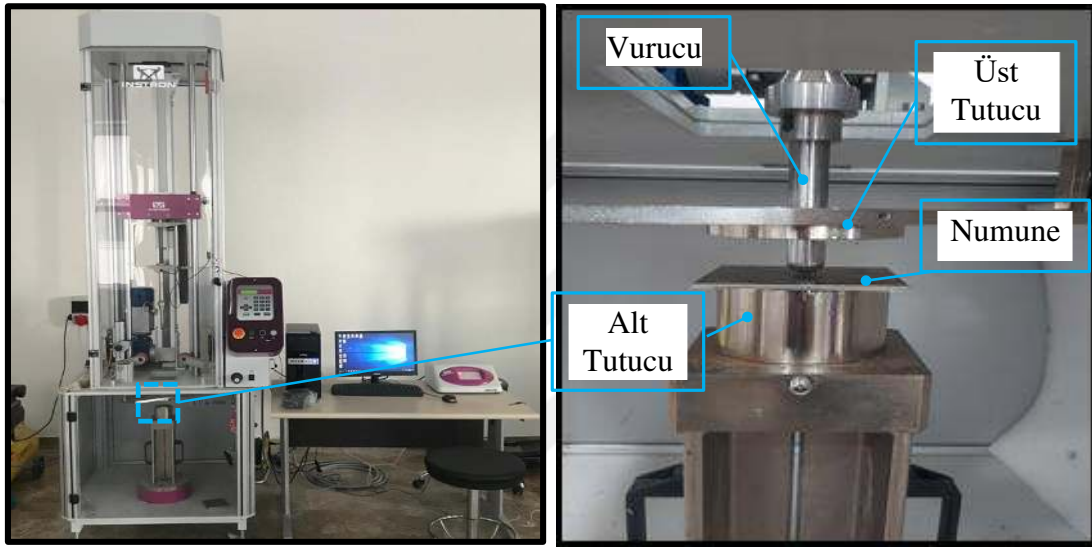
Şekil 5.5 Poliüretan köpük ile üretim aşamaları a) kullanılan poliüretan köpük b) poliüretan köpüğün serme işlemi c) rulo ile poliüretan köpük yayma işlemi d) FML presleme işlemi

Elde edilen deney numunelerinin orta noktaları referans alınarak 100x100mm ölçüleri belirlenmiştir (Şekil 5.6a). Deney numunelerini kesmek için özel olarak tasarlanan sulu kesme tezgahı üretilmiştir. Daha sonra ise özel olarak tasarlanan sulu kesme tezgahında numuneler 100x100mm ölçülerinde kesilmiş ve darbe testi için hazırlanmıştır (Şekil 5.6b). Her bir deney numunesinden toplam 2 adet olacak şekilde üretim tamamlanmıştır (Şekil 5.6c).



Şekil 5.6 Deney numunelerinin üretimin tamamlanması a) 100x100mm ölçülerinin belirlenmesi b) Deney numunelerinin kesmesi c) Deney numunelerini 100x100mm ölçülerinde kesilmiş hali

FML üretimi tamamlanan numunelere yüksek hızlı darbe testi uygulanmıştır. Deneyde kullanılan vurucu yarı küresel geometriye sahip olup 20 mm çapında ve 15.5 kg ağırlığındadır. 100 J darbe enerjisi altında vurucunun çarpma anında hızı 3.58 m/s olarak ölçülmüştür. Deneyler 800 J kapasiteli *Instron Ceast 9350* test cihazında iki kez tekrarlanmıştır. Darbe test cihazının uygun çarpma hızını ve enerjisini tespit edebilmek için Deney 6 ve Deney 15 numunelerinden birer tane deneme numunesi üretilmiştir. Ayrıca yüksek hızlı darbe testi sadece Al plakaya, epoksi ve poliüretan köpük ile birleştirilen 2 katman aramid kumaşa, yine epoksi ve poliüretan köpük ile birleştirilen bir tarafı Al+4 katman aramid elyafa uygulanmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Darbe test cihazı

6. BULGULAR ve TARTIŞMA

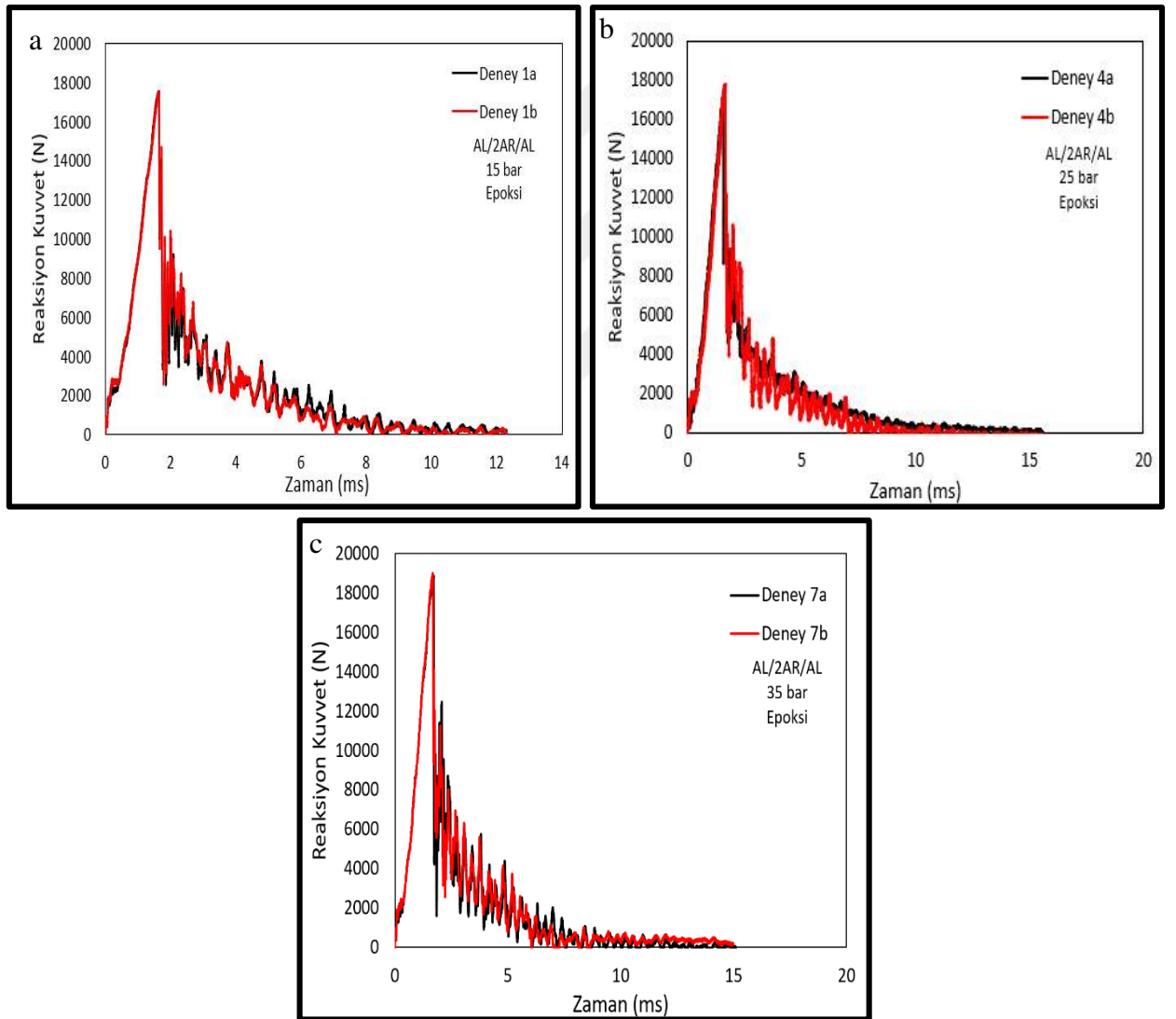
Bu çalışmada epoksi/reçine ve poliüretan köpük kullanılarak FML kompozit plaklar tasarlanmıştır. FML plakaların üretiminde farklı çekirdek dizilimine sahip kompozit plaklar 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilmiştir. Tabaka diziliminin, matris malzemesinin ve üretim basıncının FML kompozit plakların darbe dayanımı ve hasar davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her bir deney için aynı şartlarda iki adet deney numunesi teste tabi tutulmuş ve grafiklerde “a”, “b” olarak belirtilmiştir. Darbe deneyi sonucunda elde edilen maksimum kuvvet ve absorbe enerji değerleri çizelge 6.1’de verilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçlarına Anova varyans analizi uygulanarak her bir parametrenin etkisi incelenip % olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 6.1 Darbe testi sonrası elde edilen sonuçları

Deney No	Parametreler				Sonuçlar			
	Matris Malzemesi	Basınç (bar)	Aramid Sayısı (Adet)	Dizilim Modeli	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Absorbe Enerjisi (J)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Ağırlığı (gr)
1	Epoksi	15	2	AL/2AR/AL	17512	81,2	2,56	63
2	Epoksi	15	4	AL/4AR/AL	19005	85,19	3,04	71
3	Epoksi	15	6	AL/6AR/AL	19779	92,65	3,53	76
4	Epoksi	25	2	AL/2AR/AL	17743	83,12	2,57	65
5	Epoksi	25	4	AL/4AR/AL	19210	87,92	3,01	72
6	Epoksi	25	6	AL/6AR/AL	20809	94,1	3,49	75
7	Epoksi	35	2	AL/2AR/AL	18382	85,69	2,52	65
8	Epoksi	35	4	AL/4AR/AL	19723	94,89	2,99	70
9	Epoksi	35	6	AL/6AR/AL	21990	96,2	3,46	77
10	Köpük	15	2	AL/2AR/AL	19069	86,87	3,09	65
11	Köpük	15	4	AL/4AR/AL	19941	96	3,77	74
12	Köpük	15	6	AL/6AR/AL	21763	98	4,34	81
13	Köpük	25	2	AL/2AR/AL	19132	89,65	3,15	69
14	Köpük	25	4	AL/4AR/AL	20837	97,97	3,83	77
15	Köpük	25	6	AL/6AR/AL	21965	99,6	4,60	81
16	Köpük	35	2	AL/2AR/AL	21099	91,15	3,42	68
17	Köpük	35	4	AL/4AR/AL	22617	98,7	3,72	75
18	Köpük	35	6	AL/6AR/AL	24111	99,9	4,39	82

Şekil 6.1’de AL/2AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Şekil 6.1a incelendiğinde maksimum kuvvet 17612 N olarak elde edilmiştir. Vurucunun kompozit plakaya teması ile birlikte

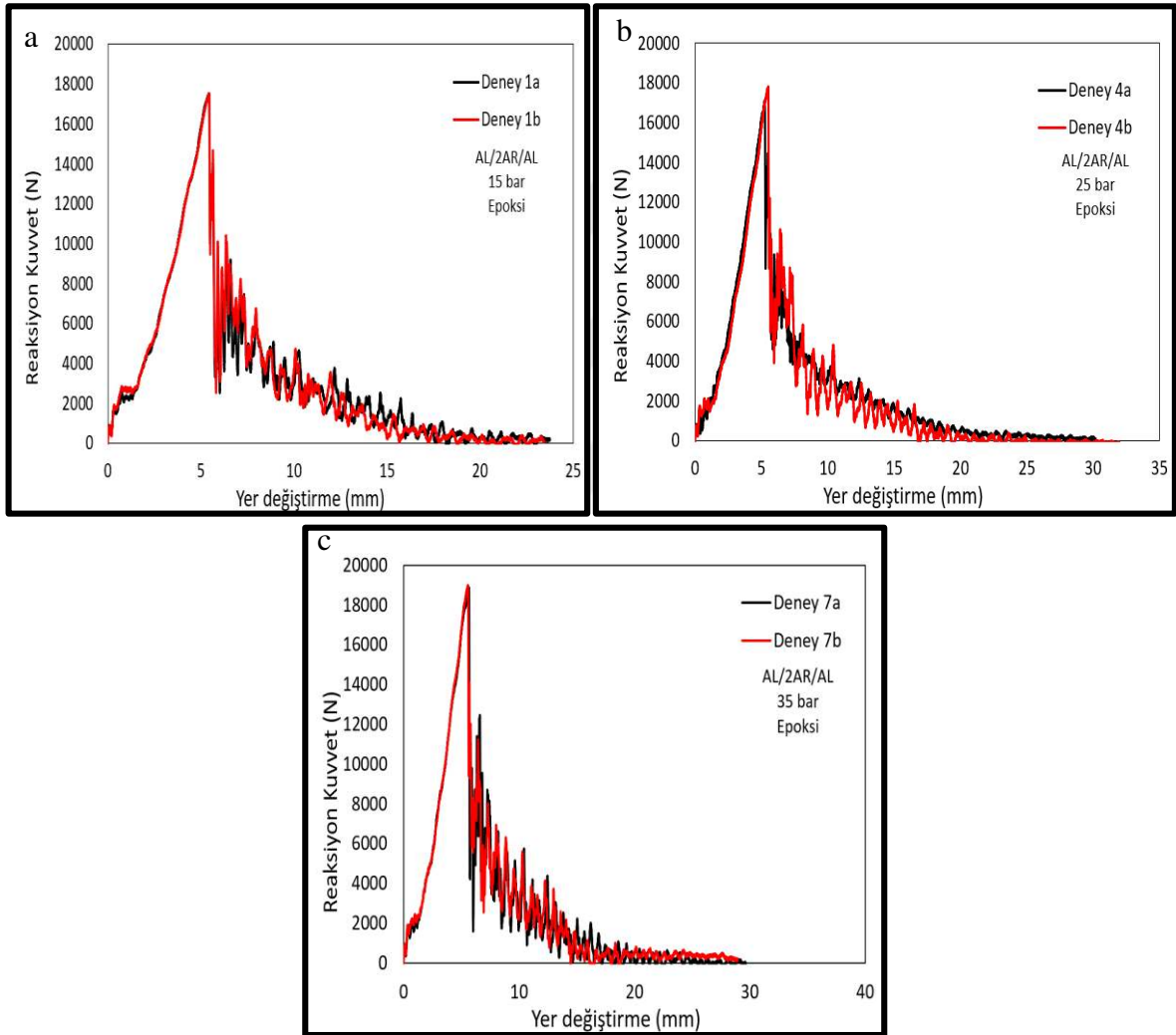
reaksiyon kuvveti artmaya başlamıştır. Uygulanan kuvvet 3073 N'a ulaştığında 0.203 ms'de vurucunun ilk temas yüzeyi olan alüminyum plaka hasara uğramış sonrasında ve asıl yükü taşıyan aramid ile temas sağlamıştır ve FML plaka maksimum hasar yüküne ulaşmıştır. Şekil 6.1b ve Şekil 6.1c'de sırasıyla 25 bar ve 35 bar basınç altında üretilen AL/2AR/AL dizilimine sahip FML plakaların kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde ortalama maksimum kuvvetin 17743 N ve 18382 N olduğu görülmüştür. Çekirdek malzemesi olarak kullanılan aramid elyafın asıl yükü taşıdığı görülmüş ve maksimum hasar yüküne ulaştıktan sonra ani düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Her üç grafikte de vurucu, plakaya temasından sonra yaklaşık 15 ms sonra darbe deneyi sonlanmıştır.



Şekil 6.1 Al/2AR/Al-Epoxy modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 6.2'de farklı basınçlar altında üretilen numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, her üç numune modelinde de vurucu numuneye

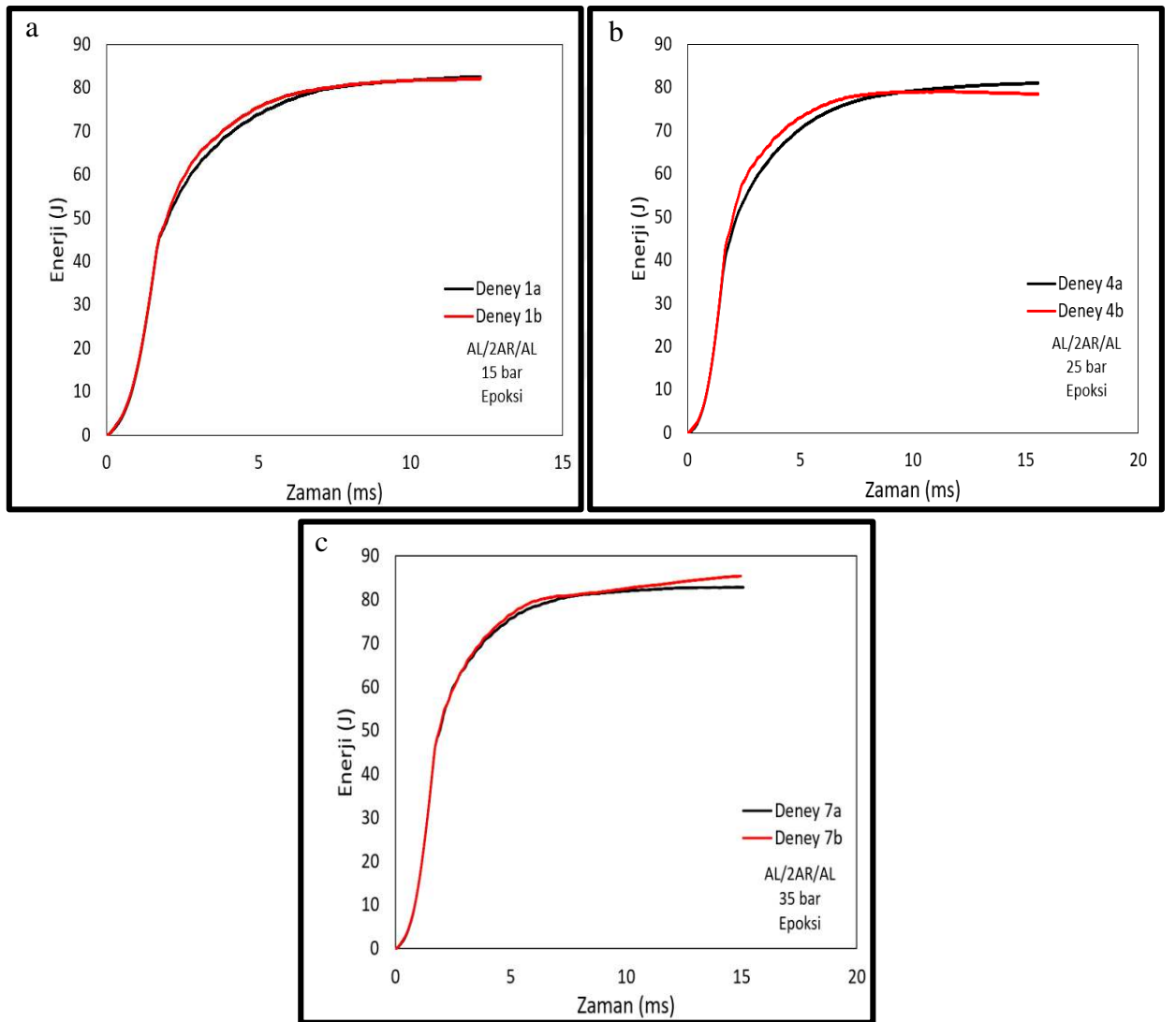
çarptıktan sonra numune üzerinden geri sekme (rebunding) yapmamış ve tamamen hasar uğratarak numuneyi delmiştir (perforation). Reaksiyon kuvvetinin 0 (sıfır) değerine düştüğü noktada deplasman değeri 0 (sıfır) noktasına geri gelmemiştir. Bunun sebebi vurucunun uyguladığı kuvvetin malzemenin dayanımını aşarak numuneyi delmesidir. Ayrıca grafikler incelendiğinde eğrilerin ilk lineer yükseliş kısmı, hasar görmemiş plakanın sertliğini temsil etmektedir. Eğrilerin ikinci kısmı, elastik toparlanma ile boşaltma aşamasını göstermektedir [64]. Ayrıca bazı kalıcı deformasyonlar da gözlemlenebilmektedir. Bu durumda darbe enerjisinin bir kısmı, kompozit plaka içinde iç hasar oluşmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 6.2 Al/2AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Şekil 6.3’de enerji-zaman grafiği üzerinde Al/2AR/Al dizilimi için üretim basıncının etkisi incelenmiştir. 100 J darbe enerjisi altında uygulanan darbe testi için numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 81.2 J, 83.12 J ve 85.69 J olarak belirlenmiştir. Vurucu FML kompozit plakaya ilk temas anında maksimum kinetik enerjiye sahiptir.

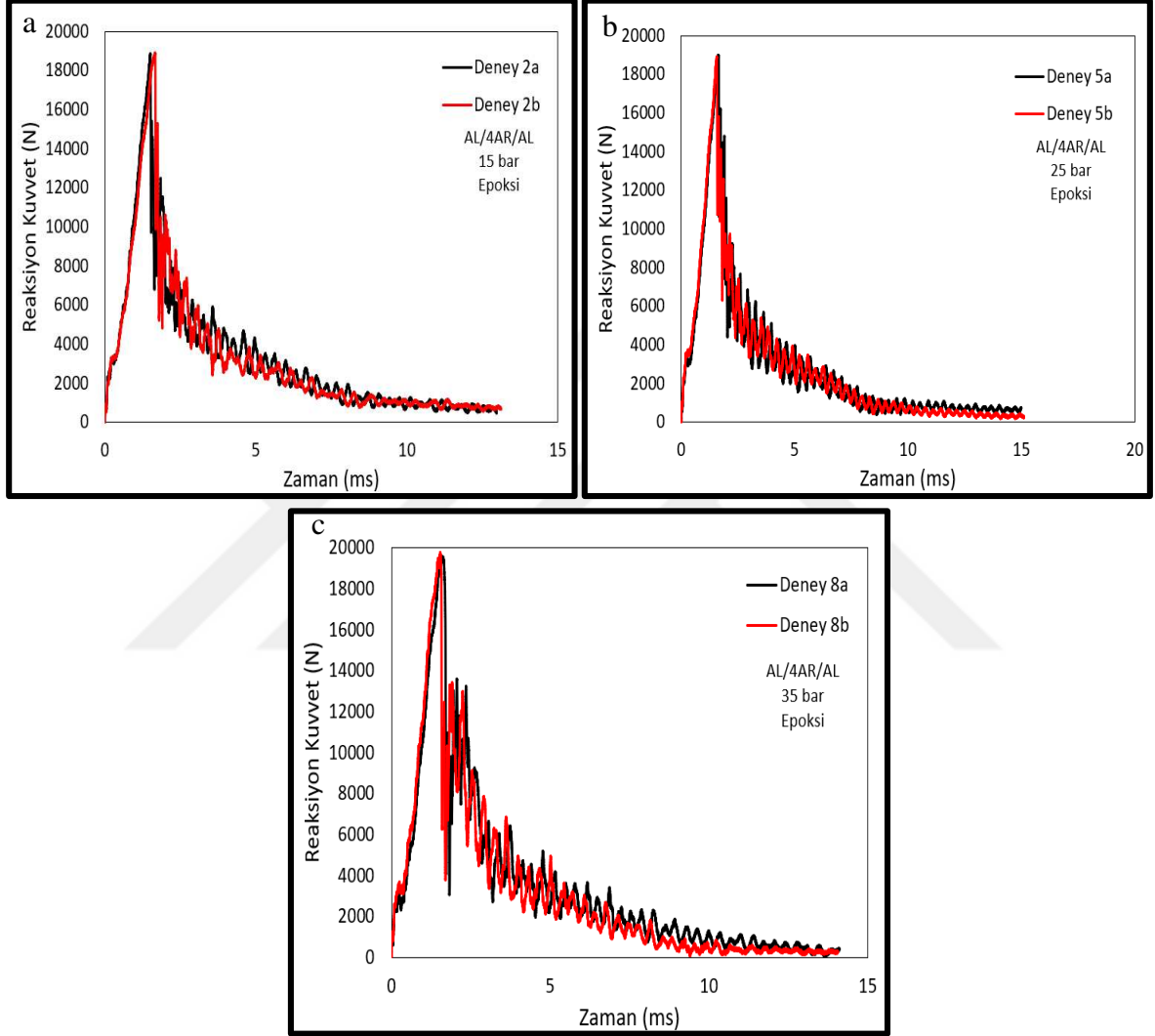
Vurucu FML plakaya teması ile birlikte sahip olduğu kinetik enerjiyi plakaya aktarmaktadır. FML plaka bu enerjinin bir kısmını elastik enerji olarak geri verir, kalan kısmını ise absorbe eder [64]. Ancak grafiklerde de görüldüğü üzere 15, 25 ve 35 bar üretim basıncına sahip numunelerin tamamen delindiği, vurucunun aktardığı kinetik enerjiyi FML plaka elastik enerji olarak geri vermediği ve vurucunun sahip olduğu kinetik enerjinin tamamını plakaya aktardığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla darbe testleri sonrasında penetrasyona uğrayan numunelerde, darbe enerjisi ile absorbe enerjisi birbiri ile aynı olarak elde edilir. Cihaz tarafından sağlanan 100 J darbe enerjinesine ulaşmadan numunelerin hasara uğradığı grafiklerden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.3 Al/2AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.4'te AL/4AR/AL dizilimine sahip FML plakaların kuvvet-zaman grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde maksimum kuvvetler, aramid tabaka sayısının artması

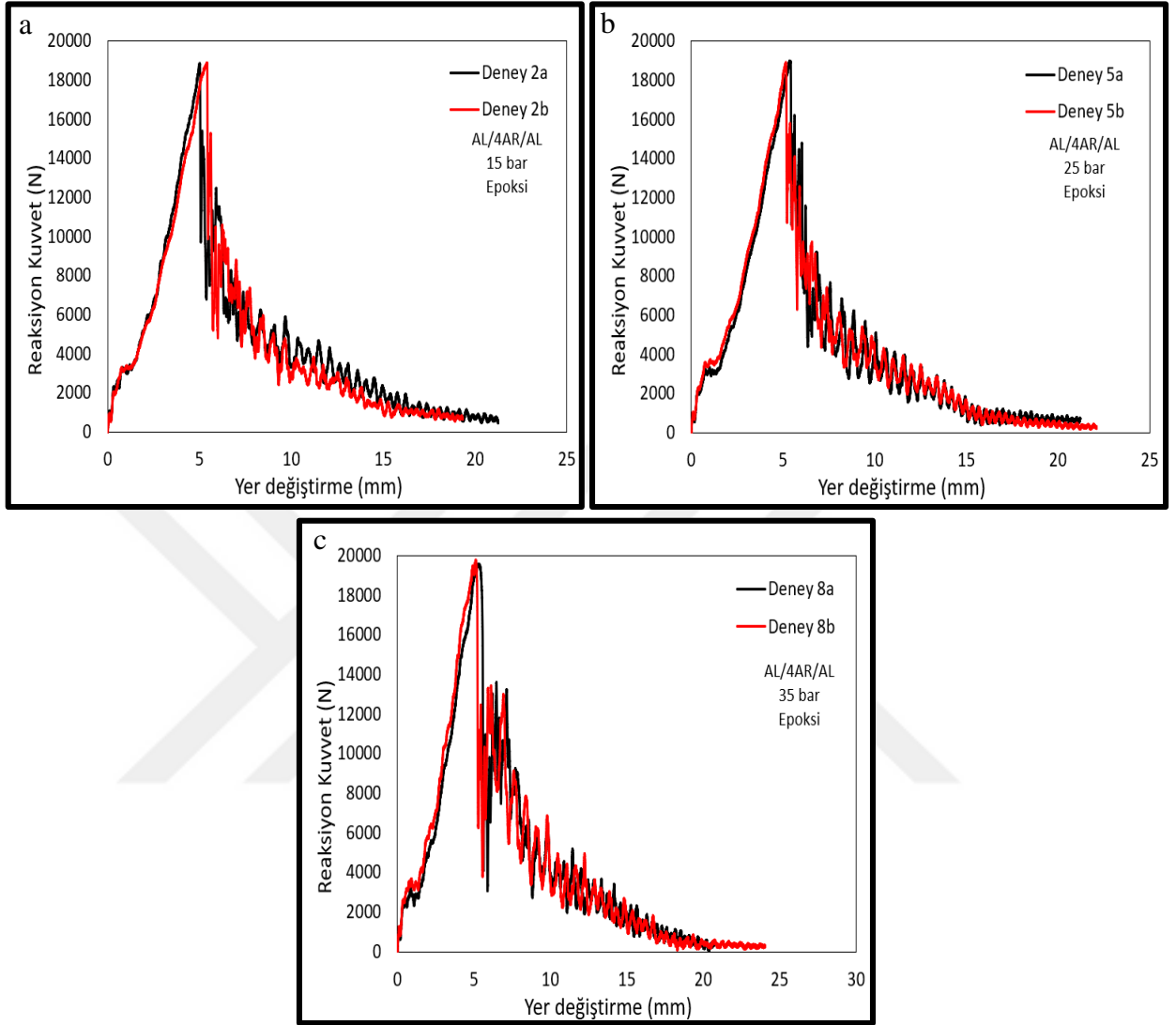
ile artmış ve 15, 25 ve 35 bar numuneleri için sırasıyla 19005 N, 19210 N ve 19723 N olarak elde edilmiştir. Her üç deney numunesi için elde edilen grafikler bir biri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere deney sonlandığında kuvvet 0 (sıfır) noktasına düşmemiştir. Bunun sebebi vurucu plakayı deldikten sonra temas halinde olmasıdır. Dolayısıyla temas kuvveti cihaz tarafından okunmaktadır.



Şekil 6.4 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

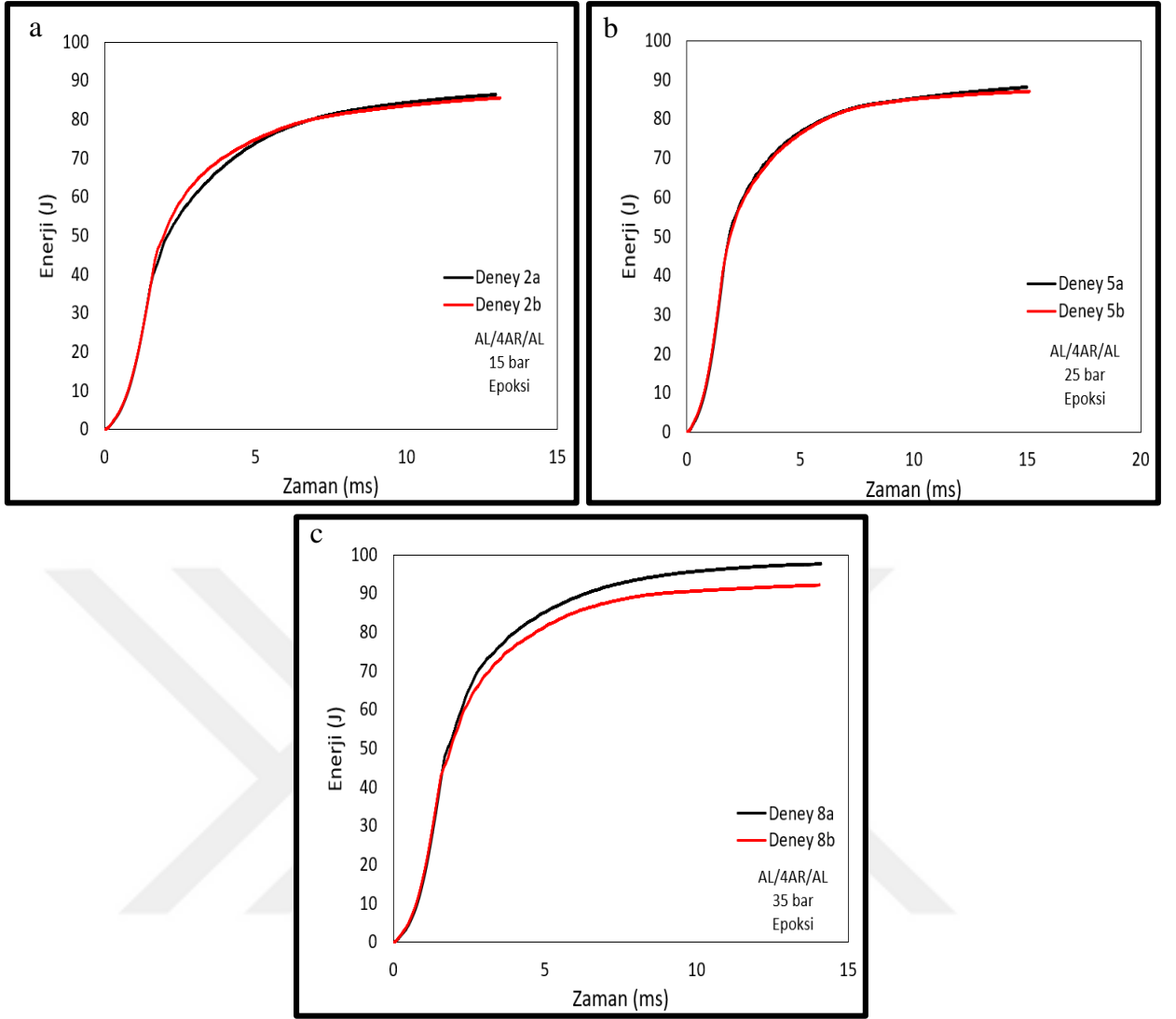
Şekil 6.5'te reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri incelendiğinde özellikle elastik bölgede her üç numuneninde benzer davranış sergilediği görülmüştür. Bu durum numunelerin birbirine yakın standartlarda üretildiğini göstermektedir. Vurucu FML plakaya çarptıktan sonra plakayı hasara uğratarak delmiş ve yaklaşık 20 mm kadar hareketini devam ettirmiştir. Darbe mekanizminde kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan numunenin absorbe enerjisini vermektedir. 35 bar basınç altında üretilen numune için verilen

Şekil 6.5c incelendiğinde grafik altında kalan bu alanın daha büyük olduğu ve daha fazla enerji absorbe ettiği kanısına varılmıştır.



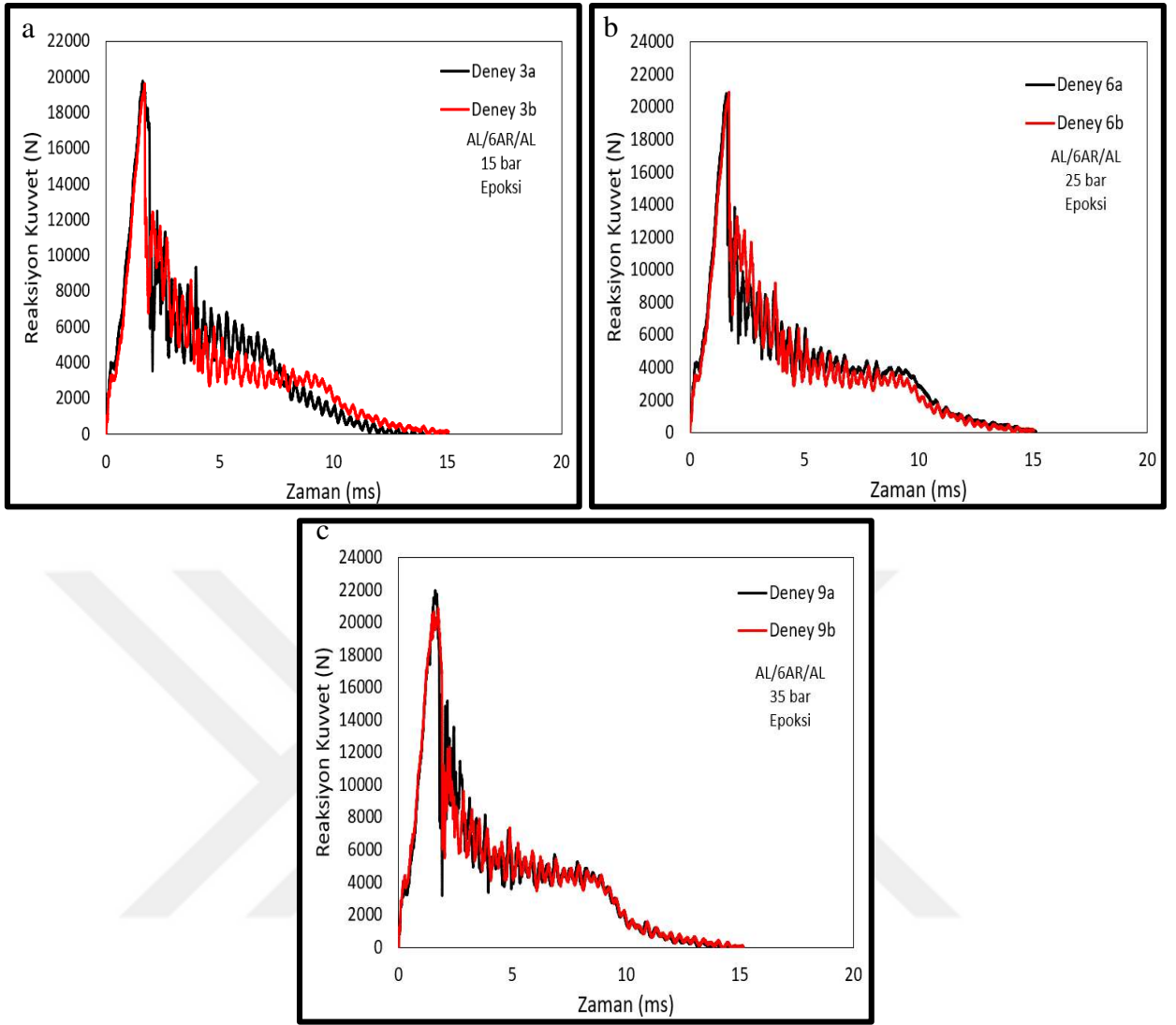
Şekil 6.5 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

Şekil 6.6'da enerji-zaman grafiği üzerinde Al/4AR/Al dizilimi için basıncın etkisi incelenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak aramid tabaka sayısı 4'e çıkarılmasına rağmen FML plaka 100J darbe enerjisi altında deformasyona uğrayarak delinmiştir. Numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 85.19 J, 87.92 J ve 94.89 J olarak belirlenmiştir.



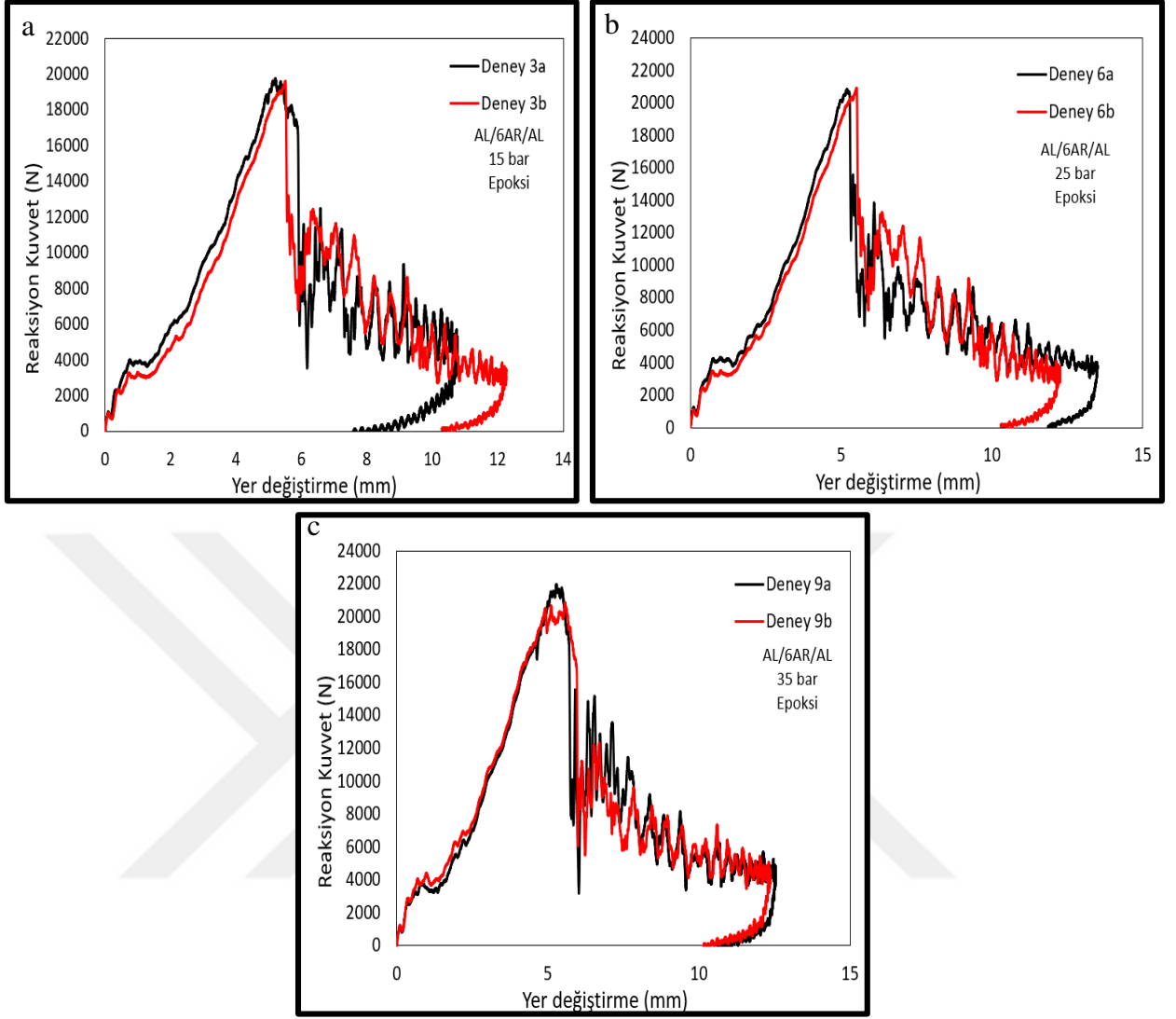
Şekil 6.6 Al/4AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.7’de AL/6AR/AL dizilimine sahip FML plakaların reaksiyon kuvvet-zaman grafikleri verilmiştir. Temas ile birlikte yükselen kuvvet-zaman grafiğinde, kuvvetlerin maksimum noktaya ulaştıktan sonra grafiklerde meydana gelen ani kuvvet düşüşü, aramid fiber kompozitinin kırılma hasar davranışı nedeniyle, eğilme sertliğinin azalmasından ve delaminasyon hasar eşiğine ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Sonrasında devam eden küçük kuvvet düşüşleri çatlak büyümesini göstermektedir[64].



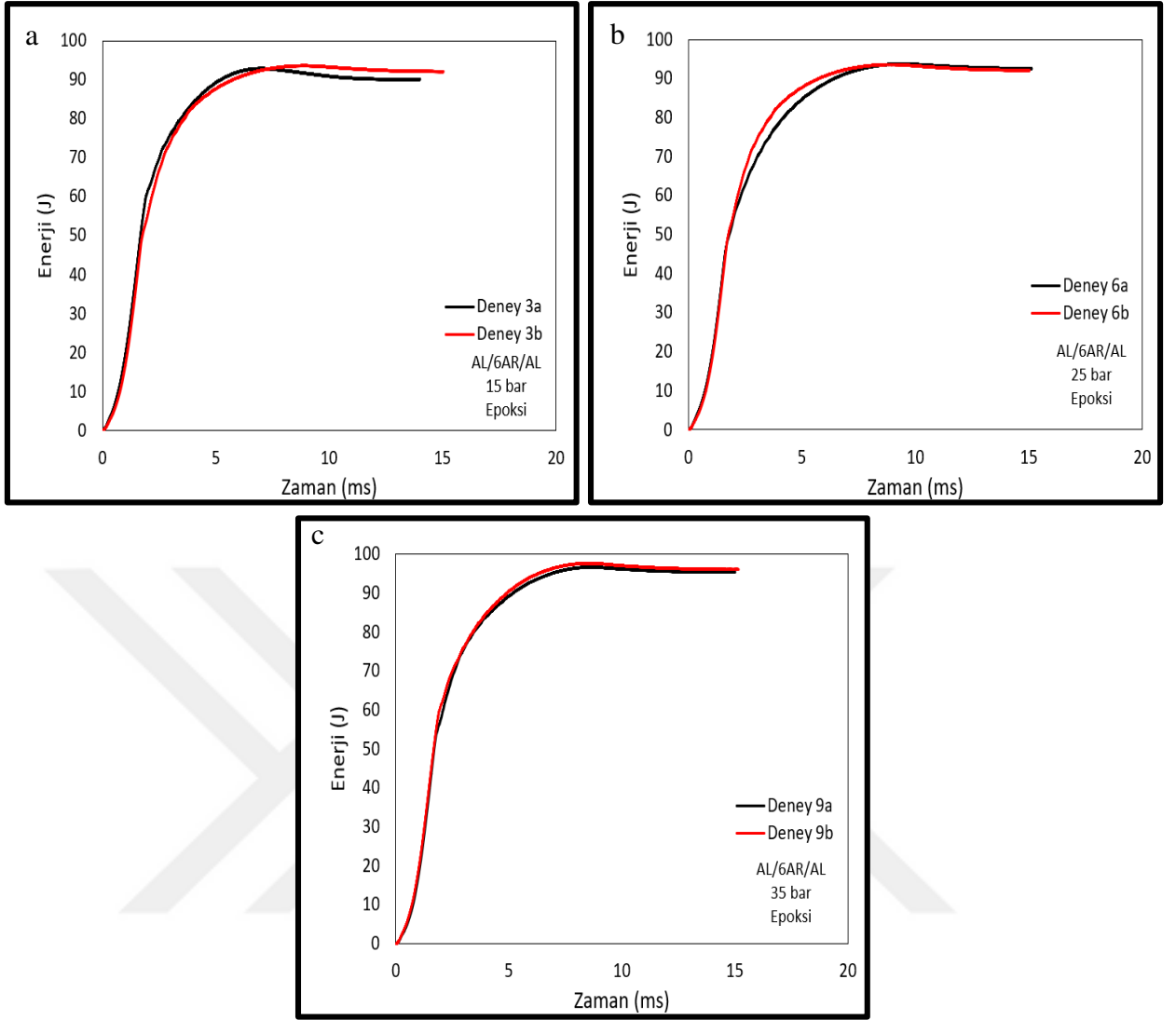
Şekil 6.7 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 6.8’de AL/6AR/AL dizilimine sahip FML plakaların reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Numunelerin maksimum kuvvetleri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 19779 N, 20809 N, ve 21990 N olarak belirlenmiştir. Çekirdek malzemesi olarak 6 tabaka aramid kullanıldığında FML plaka vurucuya daha fazla direnç göstermiştir. Darbe sırasında vurucu numuneyi delip geçememiş ve saplanmıştır. Darbe mekanizminde bu durum nüfuz etme (Penetration) olarak ifade edilmektedir [43, 65]. Grafiklerde kompozit plakanın direnç göstererek vurucuyu bir miktar geri ittiği görülmüştür.



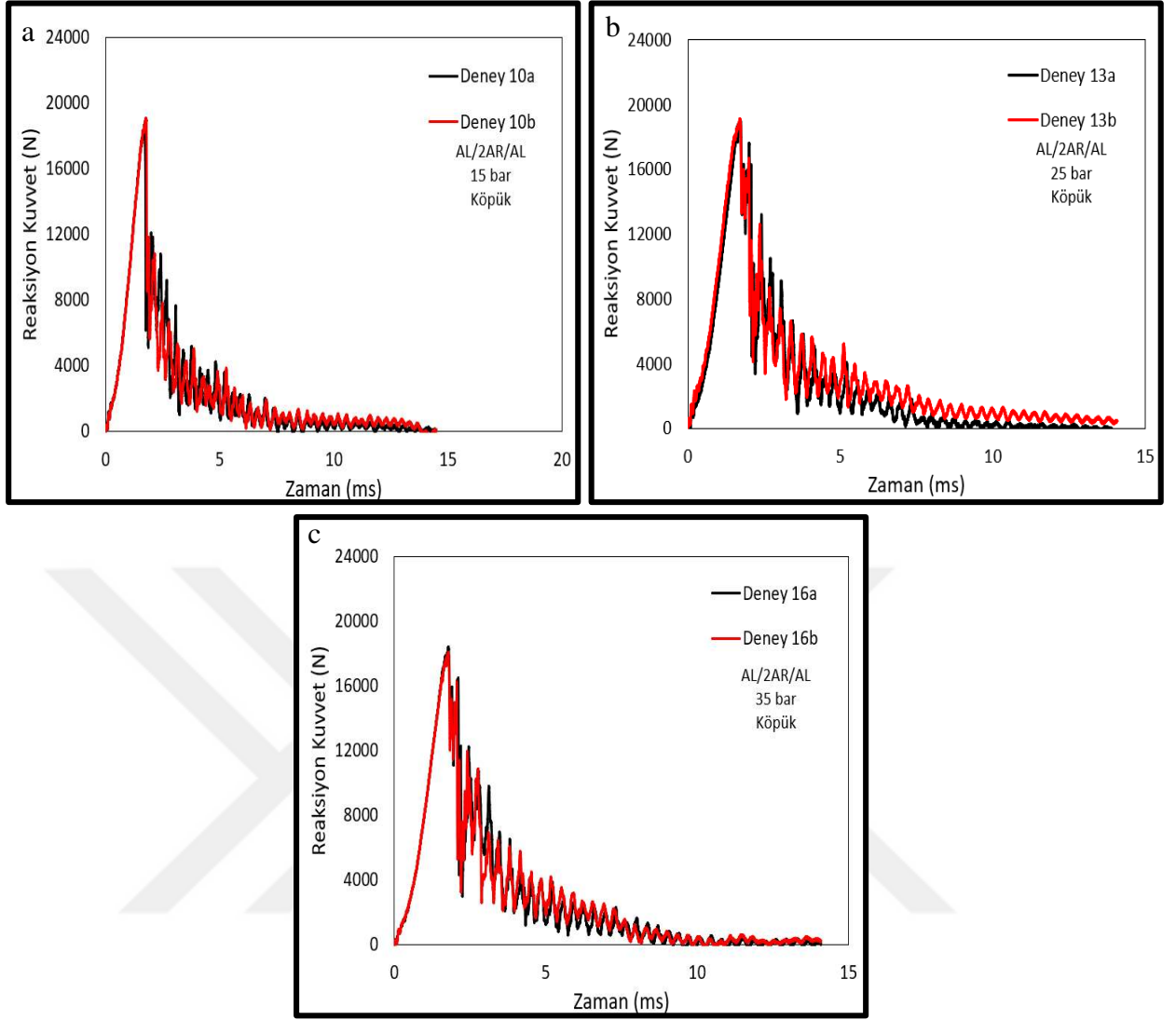
şekil 6.8 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basıncı altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

şekil 6.9’da Al/6AR/Al dizilimi için farklı üretim basıncıları için enerji-zamana grafikleri sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde enerji artıp maksimum noktaya ulaştıktan sonra bir miktar düşmüş ve sabit olarak devam etmiştir. Bunun sebebi, FML plakanın darbe enerjisini bir miktar elastik enerji olarak geri vermiş ve sabit kalan kısımda enerjiyi absorbe etmiştir. 100J darbe enerjisi altında uygulanan darbe testi için numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 92.65 J, 94.1 J ve 96.2 J olarak belirlenmiştir.



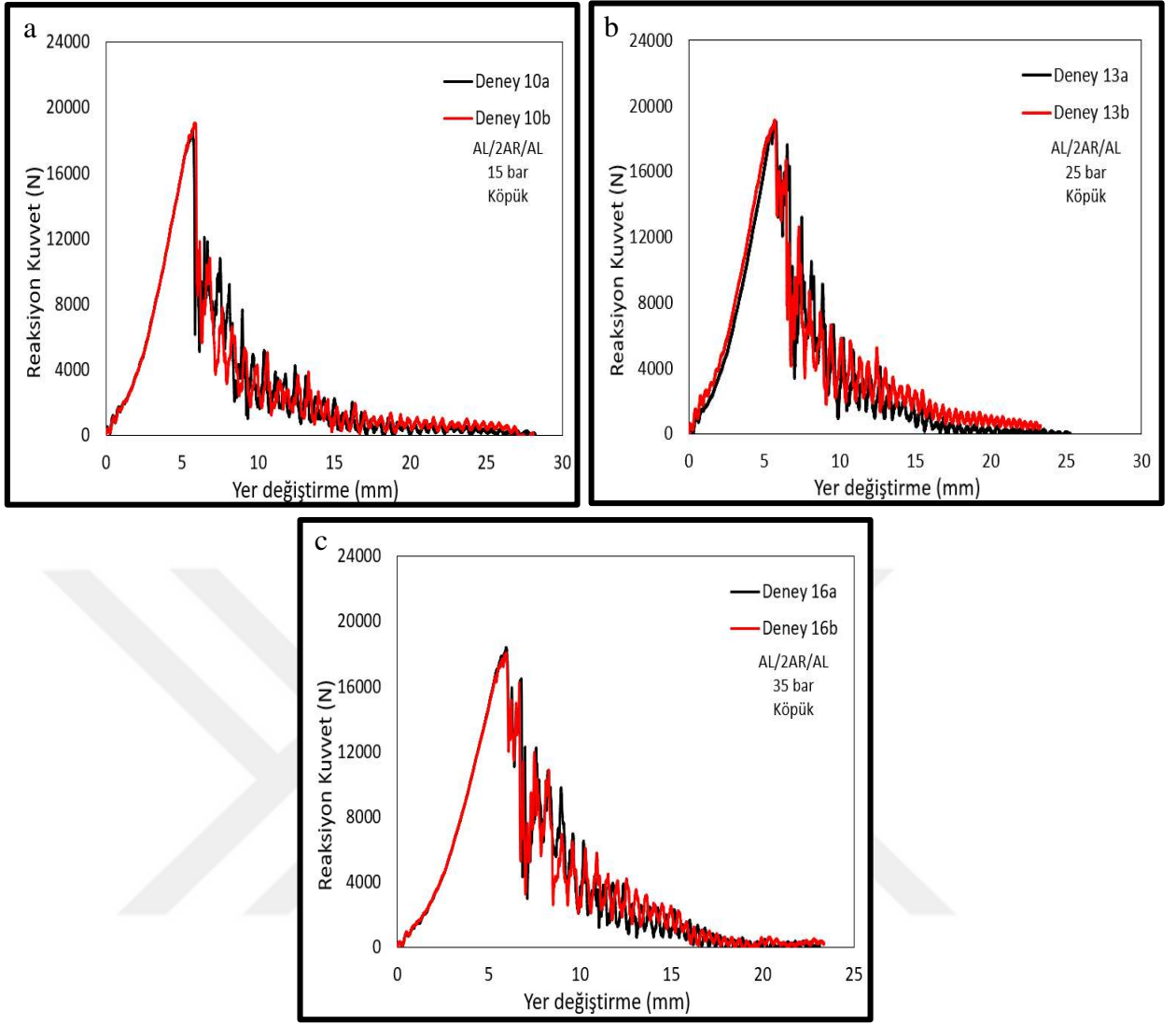
Şekil 6.9 Al/6AR/Al-Epoksi modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.10'da AL/2AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Elde edilen darbe testi sonuçlarına göre maksimum kuvvetler sırasıyla 19069 N, 19132 N ve 21099 N olarak elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde darbe testi deney süresi ortalama 13 ms olarak gerçekleşmiştir.



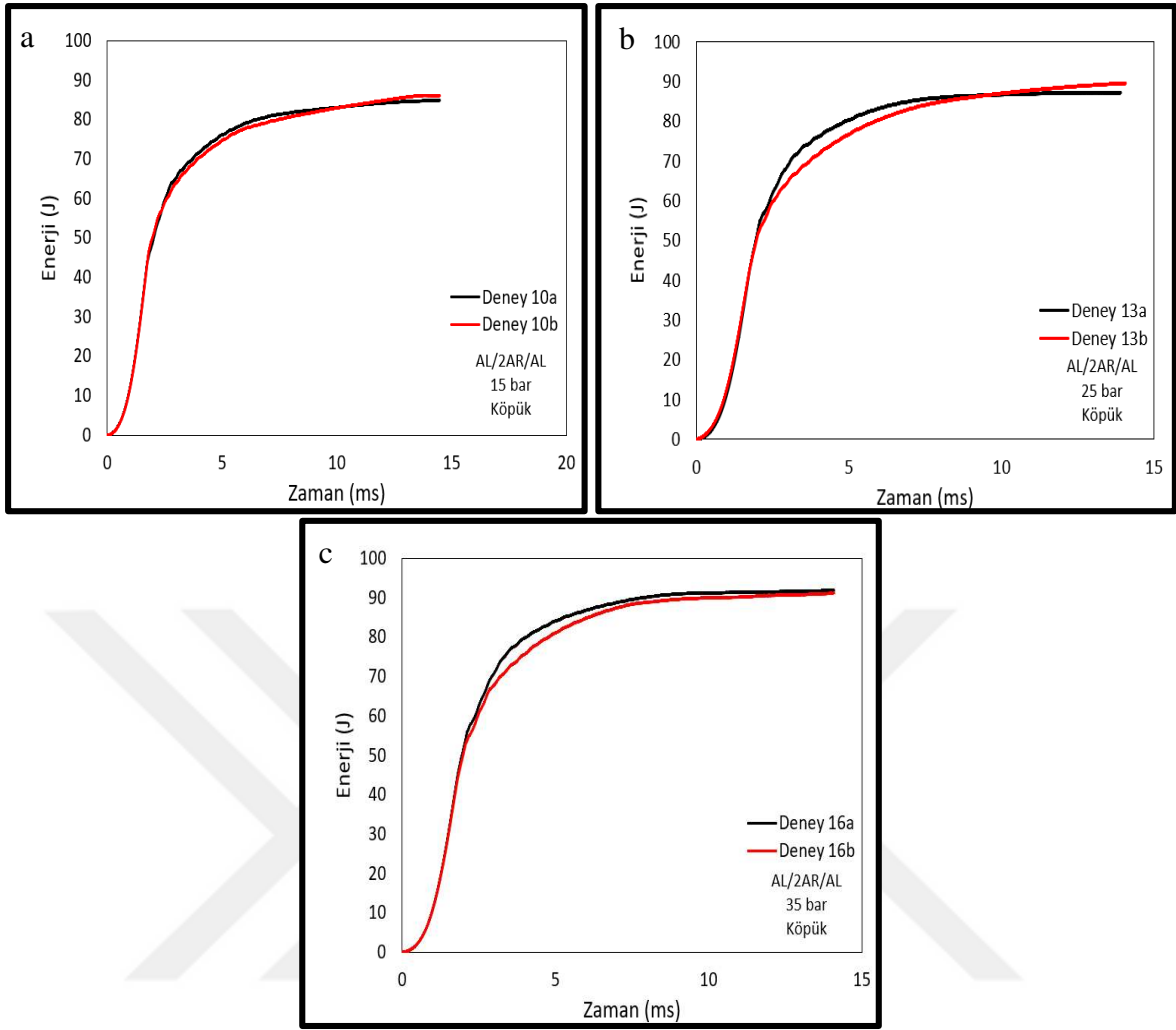
Şekil 6.10 Al/2AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 6.11’de AL/2AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin reaksiyon kuvveti-yerdeğiştirme grafiği verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 15 bar basınç altında elde edilen numunede vurucu yer değiştirmesi 27 mm olarak gözlemlenirken 25 bar için 25 mm ve 35 bar için ise yaklaşık olarak 23 mm yer değiştirme mesafesi gözlemlenmiştir.



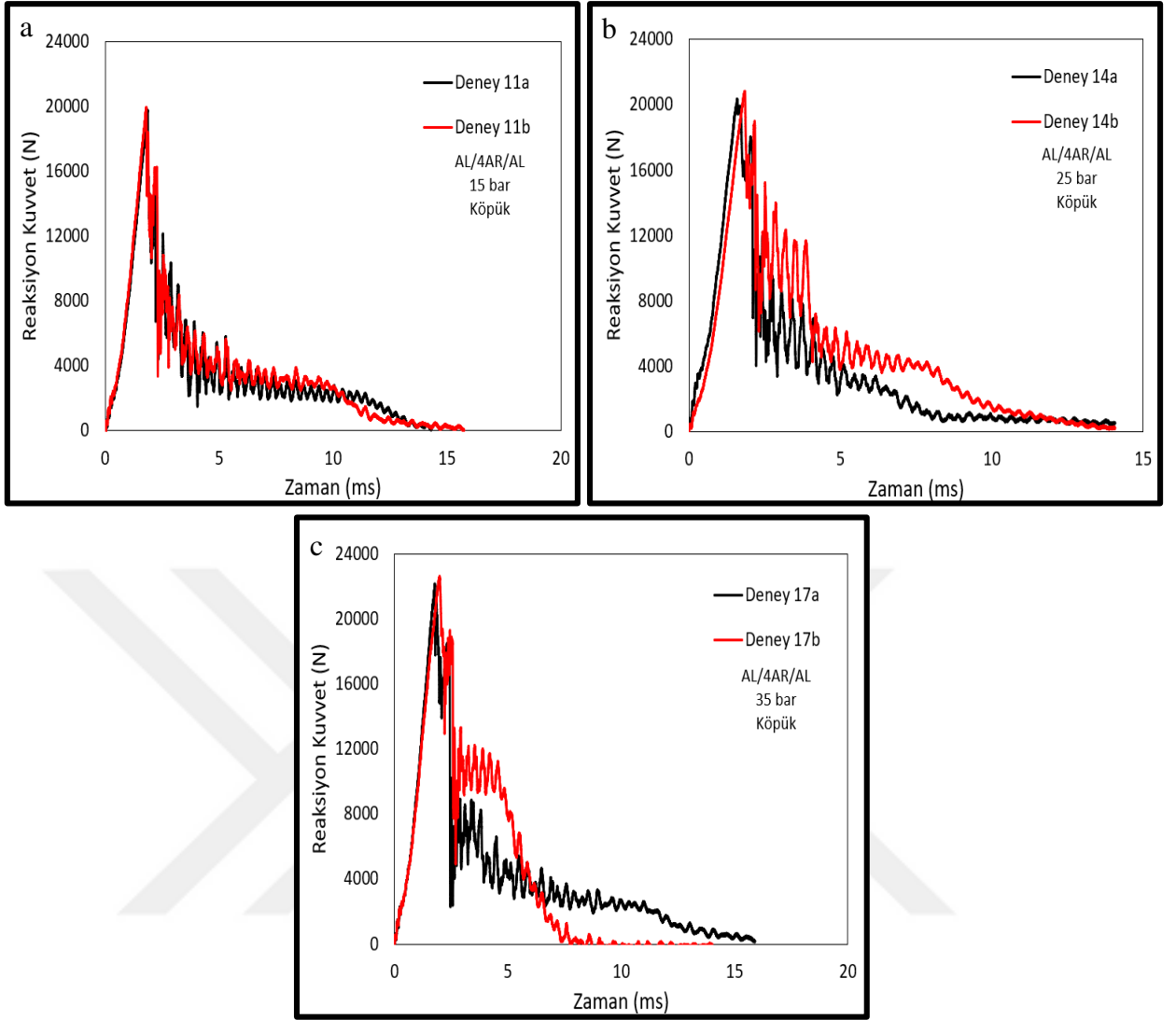
şekil 6.11 Al/2AR/Al-Köpek modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

şekil 6.12’de Al/2AR/Al dizilimi için farklı üretim basınçları için enerji-zamana grafikleri sunulmuştur. 100 J darbe enerjisi altında uygulanan darbe testi için numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 86.87 J, 89.65 J ve 91.15 J olarak belirlenmiştir. Tüm deney numunelerinde maksimum darbe enerjisi malzeme elastik sınırı üzerinde olduğundan dolayı numuneler plastik deformasyona uğrayıp hasar alarak delinmiştir.



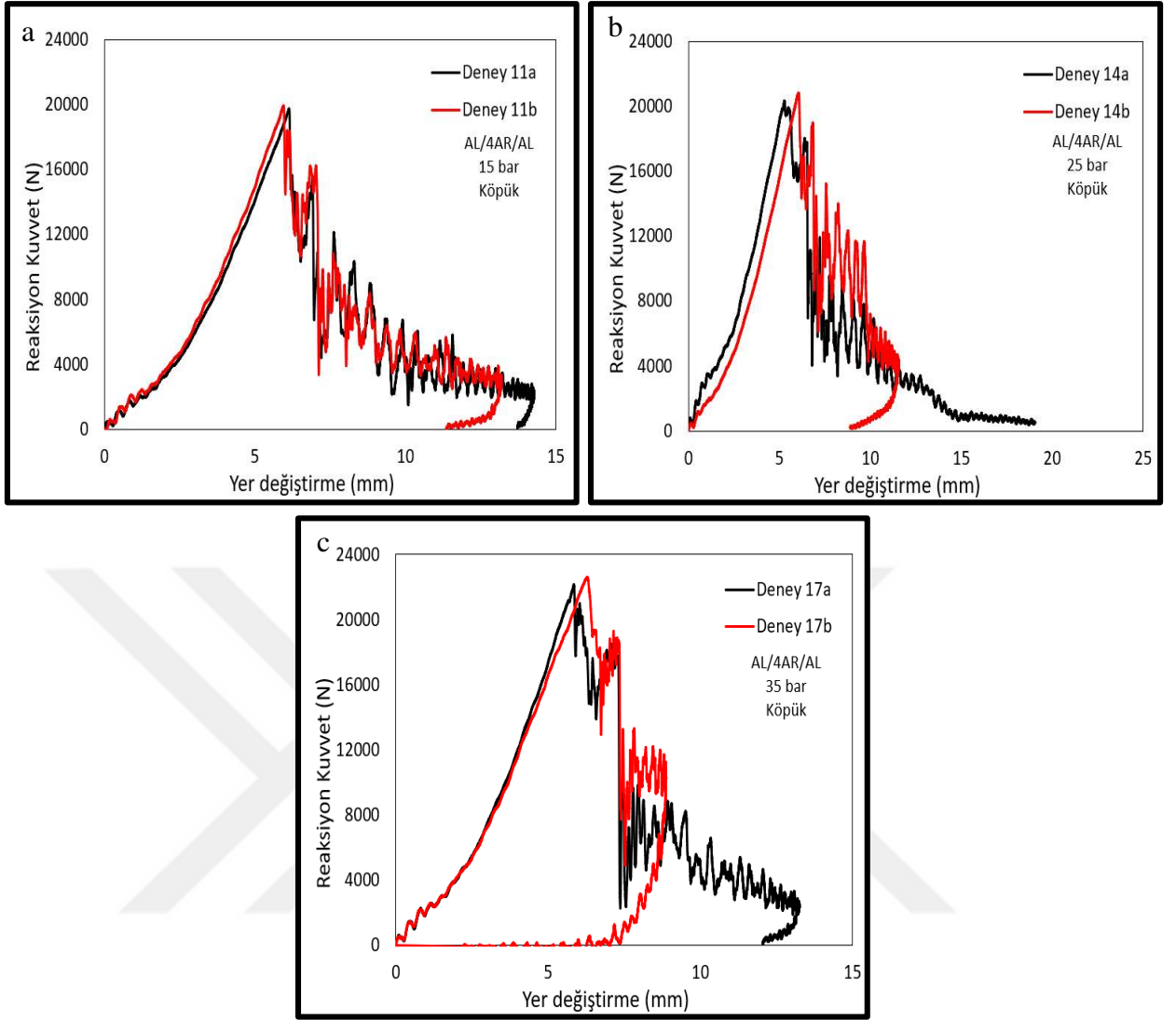
Şekil 6.12 Al/2AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.13'te AL/4AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Elde edilen darbe testi sonuçlarına göre maksimum kuvvetler sırasıyla 19941 N, 20837 N ve 22617 N olarak elde edilmiştir. Grafikler incelendiğinde Al plakalar ve aramid kumaş arasında yapıştırma elamanı olarak kullanılan köpük malzemesi yüksek basınç altında katmanlar malzemeler arasında çok ince bir film tabakası olarak kalmıştır. Ayrıca epoksinin aksine kumaşlara emilim sağlamamıştır. Fiber hacim oranı yüksek bir çekirdek malzemesi elde edilmiştir. Vurucu Al plakayı delip geçtikten sonra epoksiye göre daha sünek bir çekirdek yapısı tarafından karşılanmıştır. Grafiklerde de görüldüğü üzere maksimum hasar yüküne ulaştıktan sonra ikinci bir kuvvet yükselmesi meydana gelmiştir.



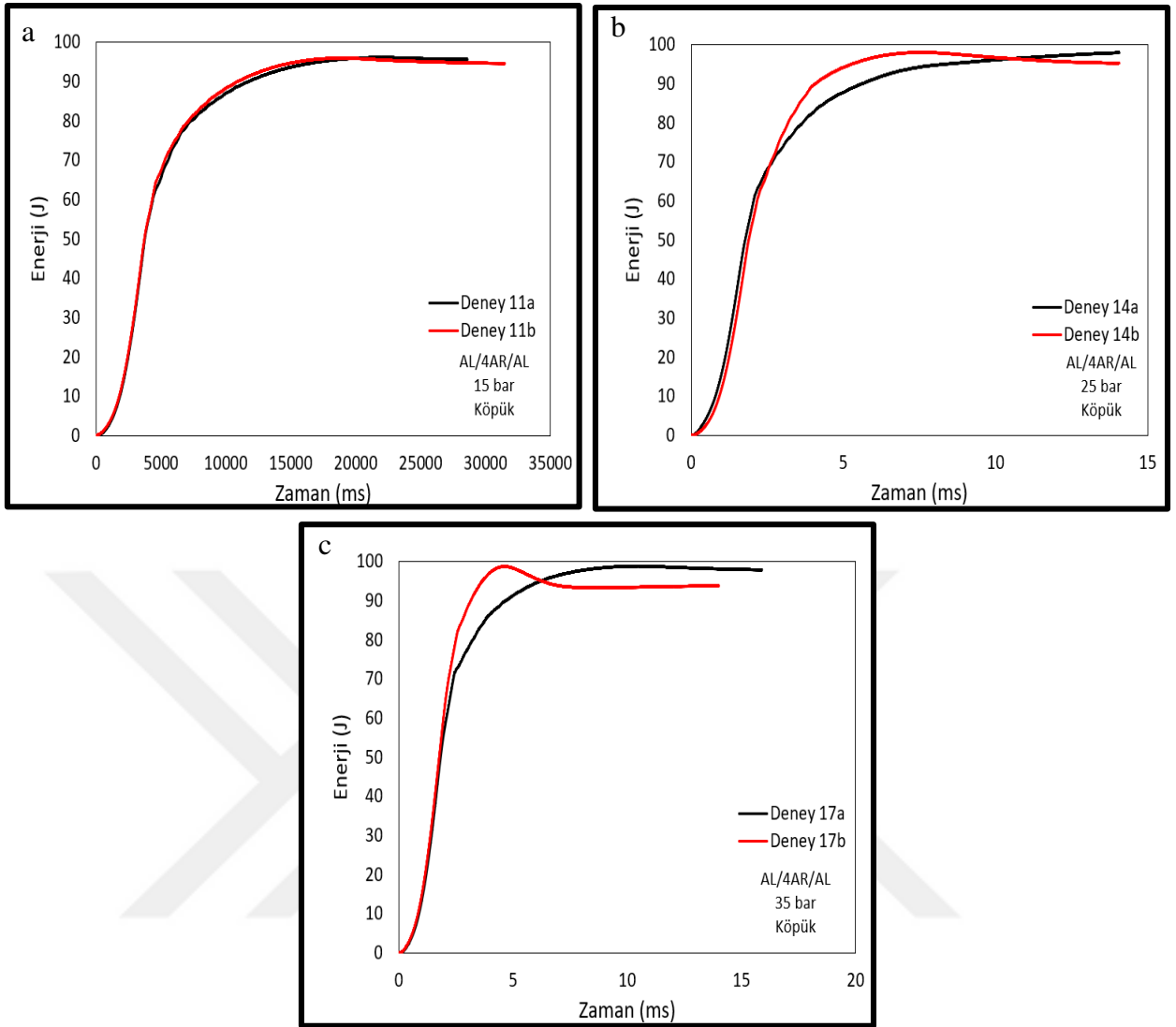
Şekil 6.13 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 6.14'te AL/4AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin reaksiyon kuvveti-yerdeğiştirme grafiği verilmiştir. Özellikle 35 bar basınç altında, 4 tabaka aramid elyaf ile alüminyum plakalar arasında kalan köpük miktarı azalmış ve neredeyse kuru kumaşın direnci ile karşılaşmıştır. Bu yüzden FML plakayı delememiştir. Grafikten görüldüğü üzere vurucu başlangıç konumuna geri dönmüştür.



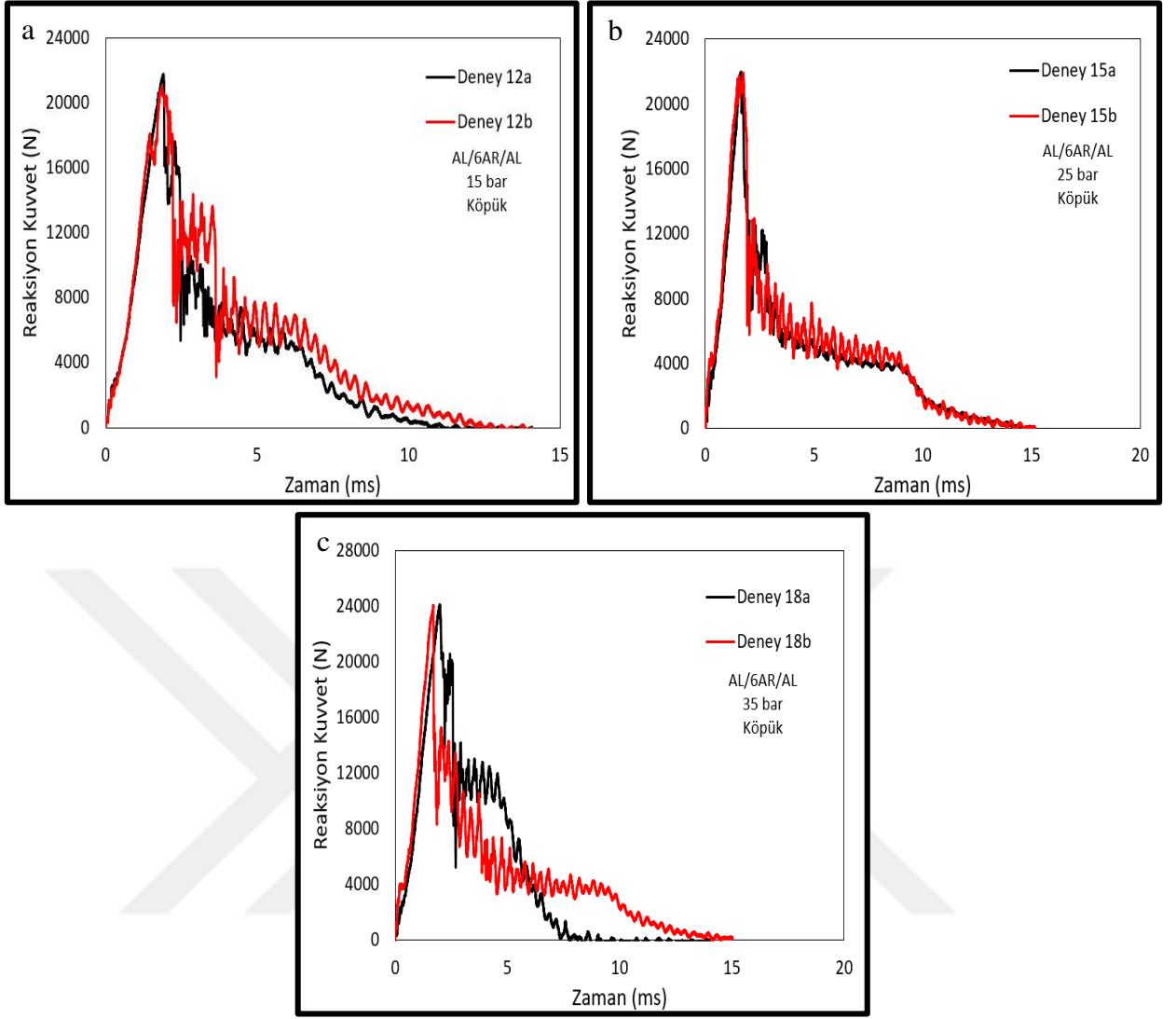
şekil 6.14 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

şekil 6.15'te Al/4AR/Al dizilimi için farklı üretim basınçları için enerji-zamana grafikleri sunulmuştur. 100 J darbe enerjisi altında uygulanan darbe testi için numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 96 J, 97.97 J ve 98.7 J olarak belirlenmiştir. 15 ve 25 bar basınç altında üretilen numunelerin darbe yükü altında tamamen delindiği gözlemlenmiştir. Ancak 35 bar basınç altında üretilen numune 100 J darbe enerjisine ulaştıktan sonra 1.3 J kadar elastik enerji sağlamış ve geri kalan enerjiyi absorbe etmiştir.



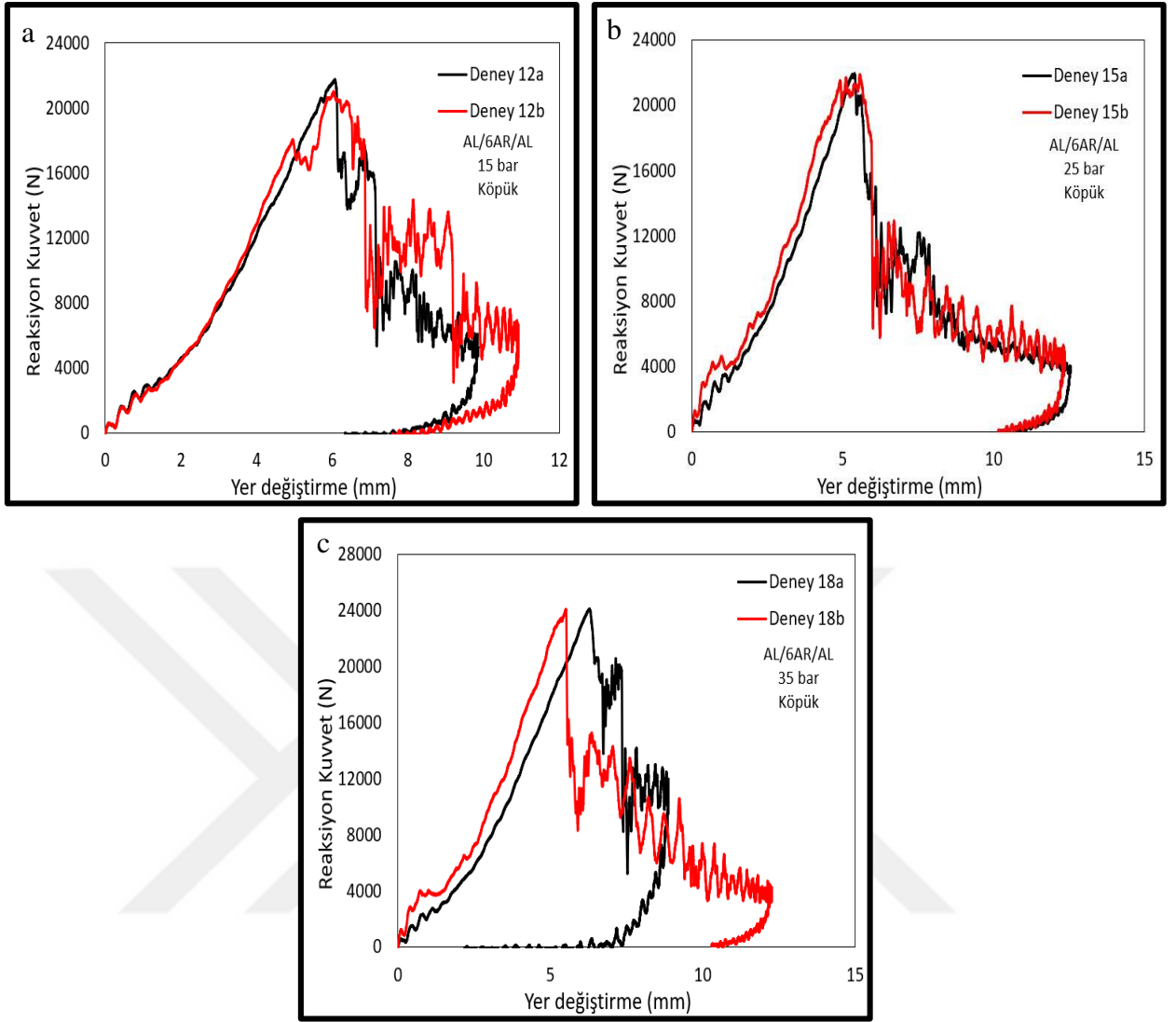
Şekil 6.15 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.16’da AL/6AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Elde edilen darbe testi sonuçlarına göre maksimum kuvvetler sırası ile 21763 N, 21965 N ve 24111 N olarak elde edilmiştir. 15 bar basınç altında üretilen numunede işlem süresi yaklaşık 12 ms olarak belirlenirken 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerde vurucu temas süresi 15ms olarak belirlenmiştir.



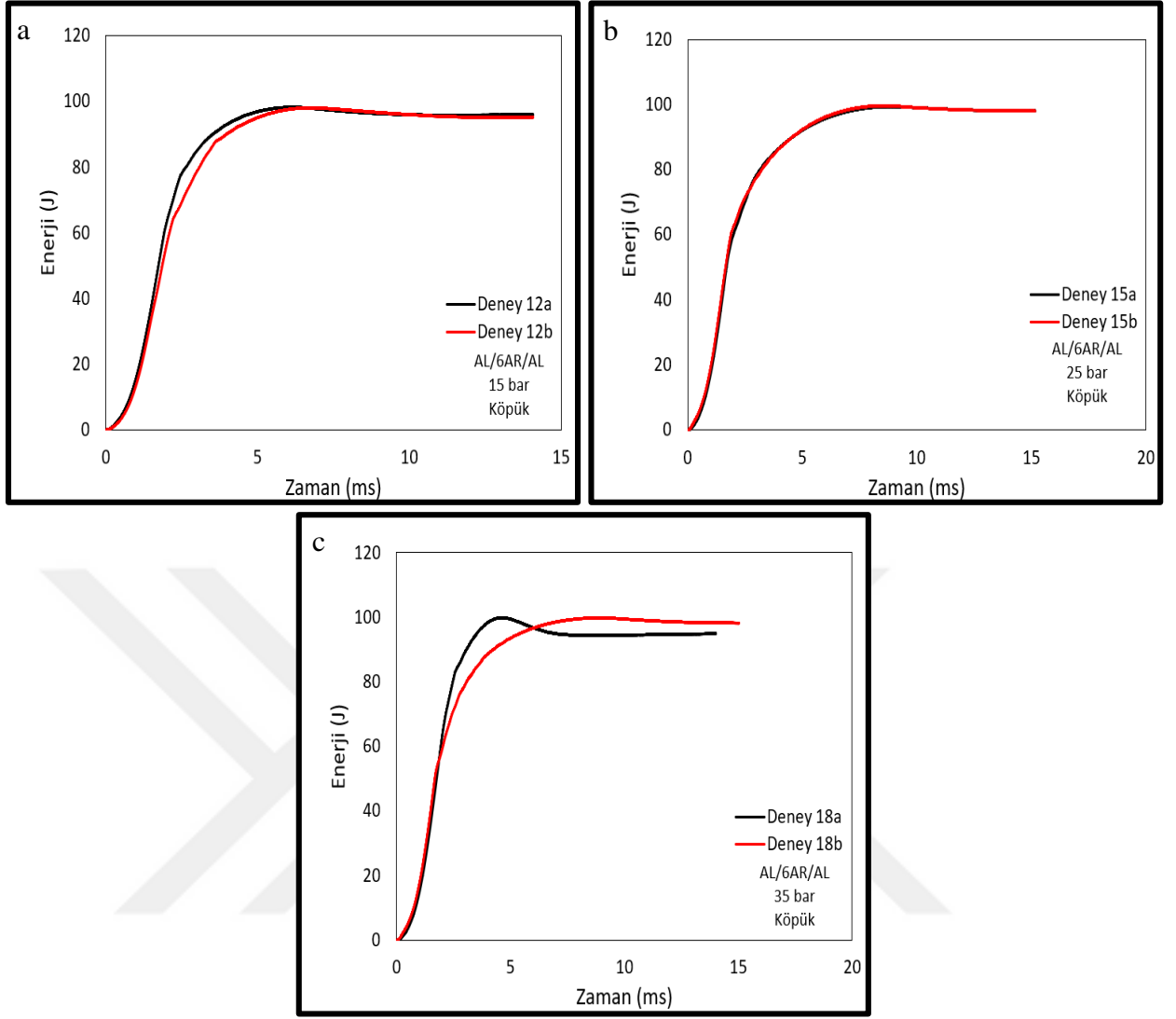
Şekil 6.16 Al/6AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-zaman grafikleri

Şekil 6.17’de AL/6AR/AL dizilimine sahip FML plakaların 15, 25 ve 35 bar basınç altında üretilen numunelerin reaksiyon kuvveti-yerdeğiştirme grafiği verilmiştir. 6 tabaka aramid kumaş kullanılması ile çekirdek yapının önemi ön plana çıkmıştır. Epoksi ile birleştirilen FML kompozite göre daha esnek bir kompozit yapı elde edilmiştir. Bu nedenle epoksinin en büyük dezavantajı olan gevrek kırılma görülmemiştir. Yüksek basınçta (35 bar) üretilen numunede delinme gözlemlenmemiştir.



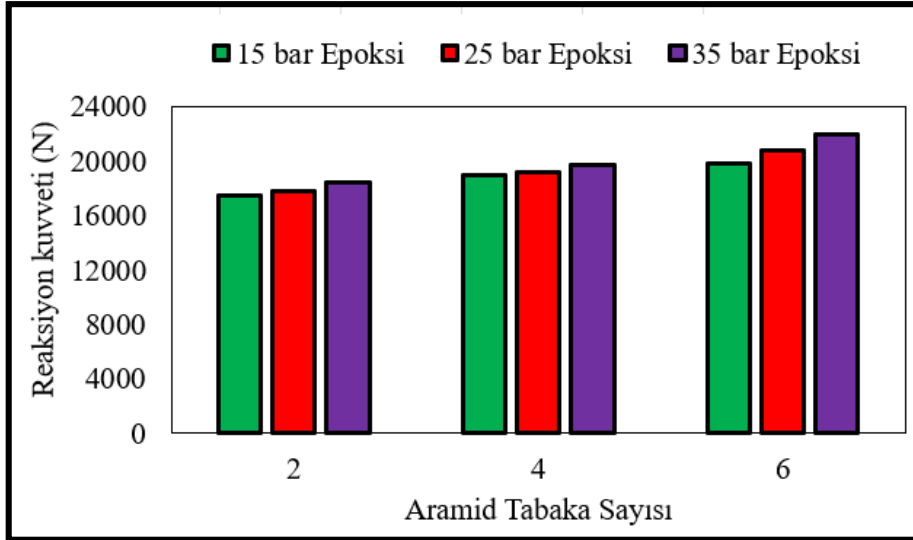
şekil 6.17 Al/4AR/Al-Köpek modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için reaksiyon kuvveti-yer değiştirme grafikleri

şekil 6.18’de Al/6AR/Al dizilimi için farklı üretim basınçları için enerji-zamana grafikleri sunulmuştur. 100 J darbe enerjisi altında uygulanan darbe testi için numunelerin absorbe enerjileri 15, 25 ve 35 bar için sırasıyla 98 J, 99.67 J ve 99.9 J olarak belirlenmiştir. Elde edilen tüm deney numunelerinde vurucunun sahip olduğu darbe enerjisi (100 J) plakaya aktarılmıştır. Sadece 35 bar basınç altında üretilen numunede bir miktar geri esneme meydana gelmiştir.



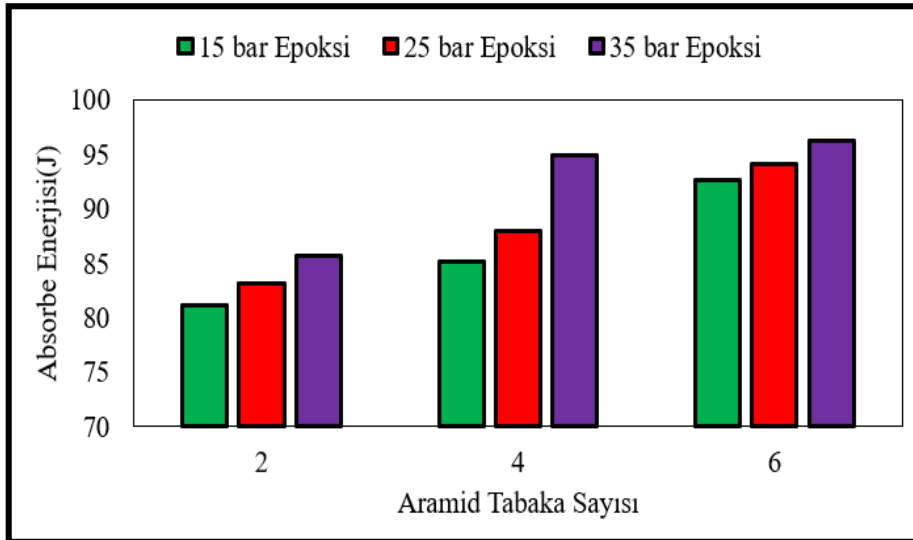
Şekil 6.18 Al/4AR/Al-Köpük modeli için a) 15 bar b) 25 bar c) 35 bar basınç altında üretilen numuneler için enerji-zaman grafikleri

Şekil 6.19'daki grafik incelendiğinde üretim basıncı arttıkça FML plakaların reaksiyon kuvvetlerinin kısmi olarak arttığı görülmüştür. Reaksiyon kuvvetindeki en büyük artış 6 aramid çekirdek tabakaya sahip numunelerde görülmüştür. Burada üretim basıncının 15 bar üretim basıncından 35 bar basınca yükselmesi ile reaksiyon kuvvetinin yaklaşık olarak %11.18 arttığı gözlemlenmiştir. Bu kuvvet artışı, çekirdek olarak kullanılan aramid kumaş sayısının fazla olduğu numunelerde yüksek basınç altında ihtiyaç fazlası olan matris miktarının atılarak yüksek fiber hacim oranına sahip kompozit yapıların elde edilmesi ile ilgilidir. Çekirdek katman sayısının 2'den 6'ya çıkarılması halinde maksimum reaksiyon kuvvet artışı 35 bar basınçta üretilen numunelerde görülmüş ve bu artış miktarı %19.62 olarak elde edilmiştir.



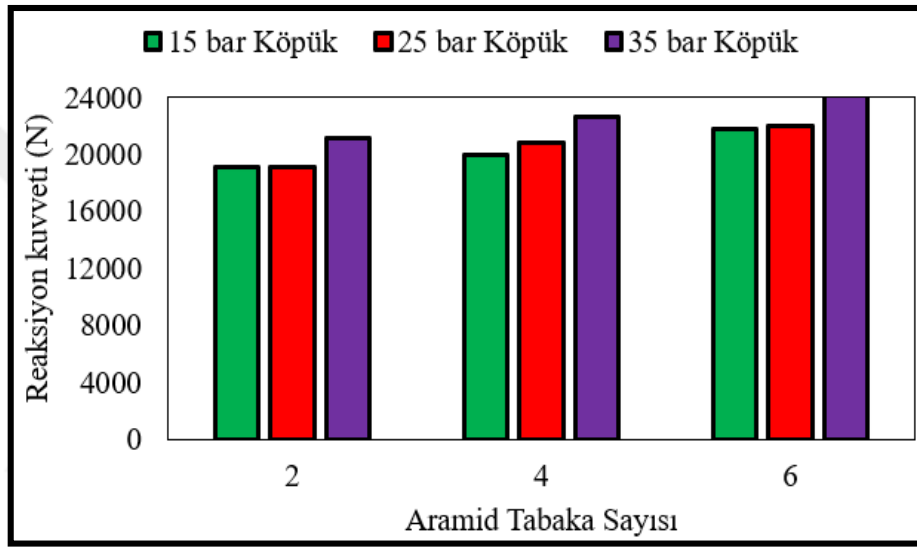
Şekil 6.19 Farklı basınçlar altında epoksi ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre reaksiyon kuvvetinin değişimi

Şekil 6.20’de farklı üretim basınçları altında üretilen 2, 4 ve 6 aramid tabaka sayısına sahip numunelerin darbe absorbe enerjileri karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde FML yapıda asıl yükü taşıyan aramid tabaka sayısının artması ile yapının darbe absorbe enerjisinin arttığı görülmektedir. 35 bar basınç altında üretilen numunelerde aramid sayısının 2’den 4’e çıkartılması ile absorbe enerjisinin maksimum %10.74 arttığı belirlenmiştir. Aramid sayısının 2’den 6’ya çıkartılması durumunda ise maksimum absorbe enerjisinin %12.27 arttığı belirlenmiştir. FML üretiminde kullanılan basınç 15 bar’dan 35 bar’a yükseltilmesi halinde maksimum absorbe enerjisinin 4 aramid tabakalı numunelerde %11.39 iyileşme sağladığı görülmüştür.



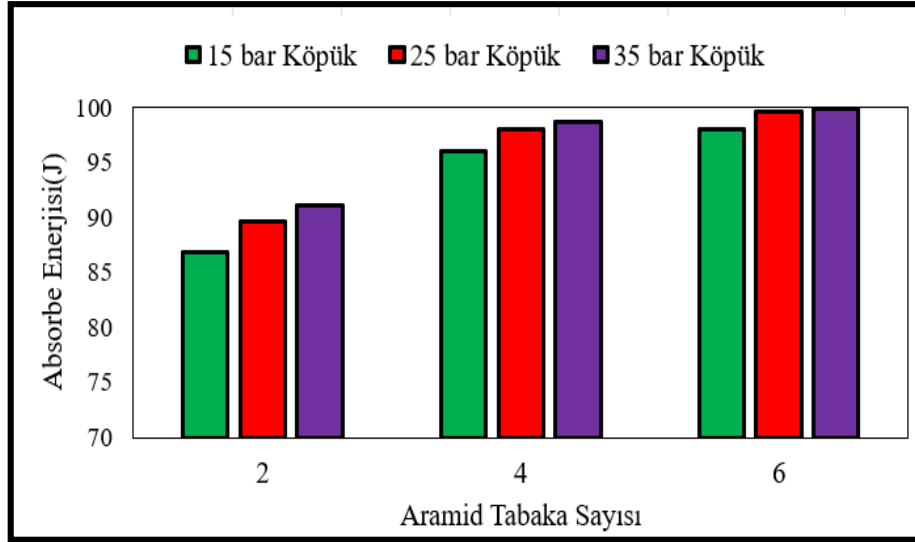
Şekil 6.20 Farklı basınçlar altında epoksi ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre absorbe enerjisinin değişimi

Şekil 6.21’de farklı üretim basınçları altında köpük yapıştırma elamanı kullanılarak üretilen FML plaklarda çekirdek tabaka sayısının reaksiyon kuvveti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yüksek basınç etkisi epoksida olduğu gibi köpük ile birleştirmede ön plana çıkmıştır. Kullanılan köpük yüksek basınç altında hem kumaştan sıyrılmış hem de epoksi gibi kumaşı ıslatamamıştır. Dolayısıyla üretim basıncı arttıkça çekirdek malzemesi neredeyse saf kumaşın darbe dayanımına yaklaşmış ve yapının darbe direncini artırmıştır. 35 bar basınç altında aramid tabaka sayısı 2 olan numunelerde maksimum reaksiyon kuvveti 21099 N olarak elde edilmiştir. Aynı basınç altında tabaka sayısının 4’e ve 6’ya çıkarılması ile maksimum reaksiyon kuvvetleri sırasıyla 22617 N ve 24111 N olarak elde edilmiştir.



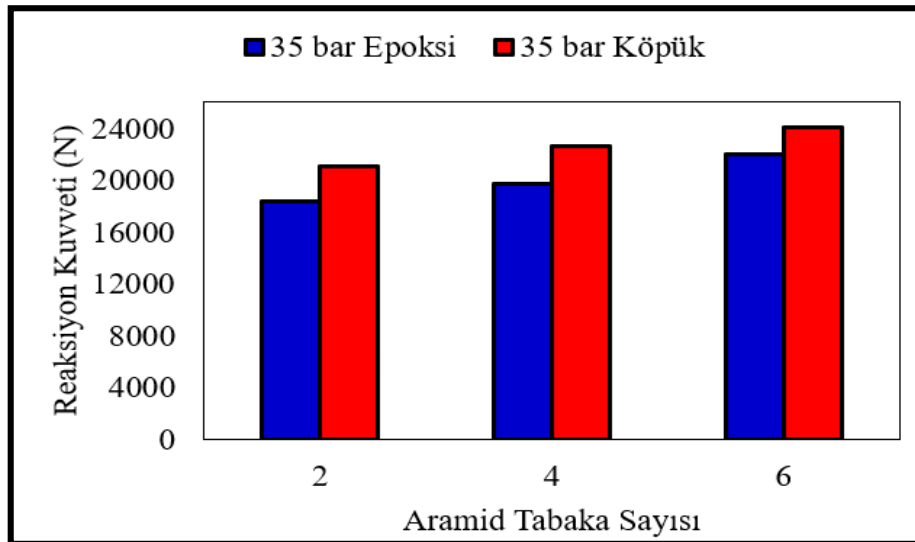
Şekil 6.21 Farklı basınçlar altında Köpük ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre reaksiyon kuvvetinin değişimi

Şekil 6.22’de köpük ile birleştirilmiş farklı aramid tabaka sayılarına sahip sandviç yapıda farklı üretim basınçlarının ve aramid tabaka sayılarının darbe absorbe enerjileri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bağlayıcı matris malzemesi olarak köpük kullanılan FML plaklarda üretim basıncının etkisi belirgin değildir. Darbe absorbesindeki en büyük artış 2 aramid ara tabaka sahip FML yapıda %4.93 olarak elde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi aramid kumaşlar arasında köpük miktarının düşük basınçlarda (15 ve 25 bar) bile eser miktarda kalmasıdır.



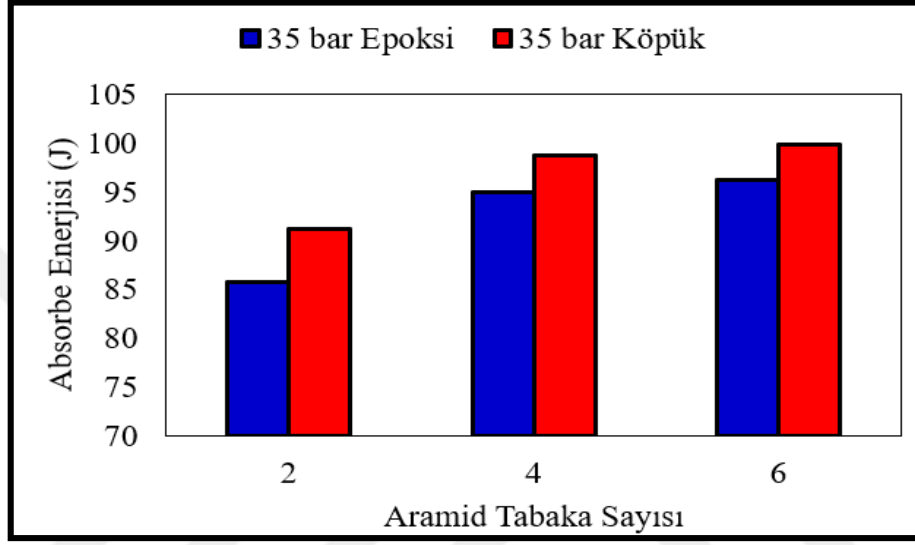
Şekil 6.22 Farklı basınçlar altında köpük ile üretilen FML için aramid tabaka sayısına göre absorbe enerjisinin değişimi.

Şekil 6.23’de FML yapıda alüminyum ve aramid kumaşlar arasında epoksi veya köpük kullanılmasının reaksiyon kuvveti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde tüm numunelerde köpük ile yapıştırma sağlanan FML plakaların epoksi kullanılarak üretilen FML plak numunelere göre reaksiyon kuvvetleri daha yüksek çıkmıştır. Bunun en önemli nedeni köpük malzemesinin epoksi malzemesine göre FML plakaya daha fazla esneklik kazandırmasıdır. Darbe testi uygulamalarında vurucunun FML plaklara çarması ile epoksi numunelerde gevrek kırılma meydana gelirken köpük ile üretilen numunelerde daha sünek kırılmalar meydana gelmiştir.



Şekil 6.23 Aramid tabaka sayısına göre 35 bar basınç altında epoksi ve köpük ile üretilen numunelerin reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırılması

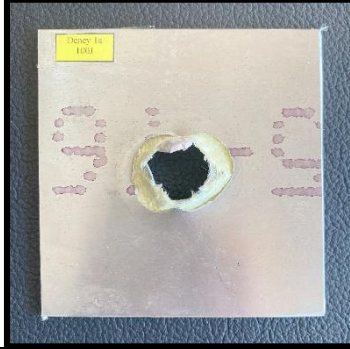
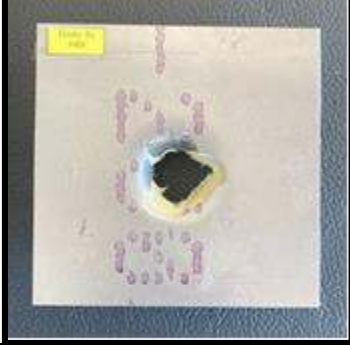
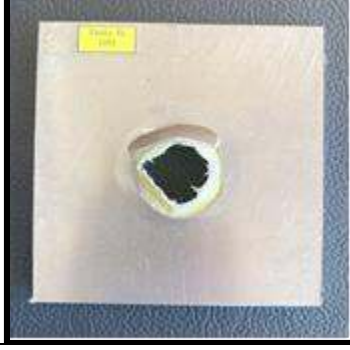
Şekil 6.24 köpük ve epoksi ile üretilen numunelerin darbe testi sonrası elde edilen absorbe enerjileri kıyaslanmıştır. Grafikler incelendiğinde matris malzemesi olarak köpük kullanılan numunelerin absorbe enerjilerinin epoksi kullanılan numunelerden daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Bağlayıcı köpük malzemesinin epoksiye göre daha sünek olması nedeni ile köpük yapının darbe direncini arttırmıştır. Elde edilen deney verilerine göre darbe absorbe enerjisindeki maksimum iyileşme Al/2AR/Al dizilimine sahip modelde meydana gelmiş ve yaklaşık %6.38 iyileşme meydana gelmiştir.

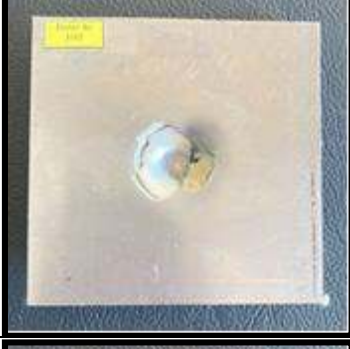


Şekil 6.24 Aramid tabaka sayısına göre 35 bar basınç altında epoksi ve köpük ile üretilen numunelerin absorbe enerjisinin karşılaştırılması

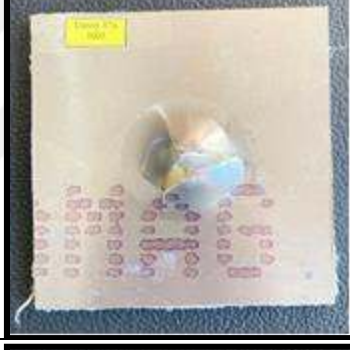
Matris elemanı olarak epoksi ve köpük kullanılarak üretilen FML plakaların hasar analizi tespit edilmiştir (Çizelge 6.2). Bazı deney numunelerinde 100 J darbe etkisinde Delinme (Perforation) görülmüştür. Bu hasar tipi genellikle hem epoksi ve hemde köpük ile üretilen 2 aramid sayısını sahip numunelerde görülmektedir. Ayrıca sadece epoksi ile üretilen numunelerde 4 aramid sayısı olan numunelerde de görülmektedir. Çizelge 6.2 incelendiğinde bir diğer hasar türü nüfuz etme (Penetration) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu hasar türü epoksi için sadece 6 aramid sayısı olan numunelerde meydana gelirken köpük kullanılan numunelerde ise 4 ve 6 aramid sayısı olan numunelerde görülmüştür.

Çizelge 6. 2 FML plakaların hasar analizi ve test sonrası numunelerin görüntüsü

Deney No	Dizilim	Vurucu temas yüzeyi	Arka yüzey	Hasar tipi
1	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)
2	AL/4AR/AL			Delinme (Perforation)
3	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
4	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)

5	AL/4AR/AL			Delinme (Perforation)
6	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
7	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)
8	AL/4AR/AL			Delinme (Perforation)
9	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)

10	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)
11	AL/4AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
12	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
13	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)
14	AL/4AR/AL			Delinme (Perforation)

15	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
16	AL/2AR/AL			Delinme (Perforation)
17	AL/4AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)
18	AL/6AR/AL			Nüfuz Etme (Penetration)

Deneyisel çalışmaların sonunda elde edilen ürün kalitesini etkileyen parametreler ve seviyeleri doğru bir şekilde seçilmelidir. Ürünlerin kalitesi ile ilgili araştırmanın en büyük kısmı varyans ile ilgili olduğundan dolayı, elde edilen deney sonuçlarının analizi ve sonuçların uygun olup olmadığını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) istatistiksel metotları kullanılmaktadır.

Çizelge 6.2’de S/N oranlarının belirlenmesinde kullanılan deney parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeler verilmiştir.

Çizelge 6.3 Deney seviyeleri ve parametreler

Sembol	Parametreler	Seviyeler		
		I	II	III
A	Matris Malzemesi	Epoksi	Köpük	-
B	Basınç	15	25	35
C	Aramid Sayısı	2	4	6

Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak epoksi/reçine ve poliüretan köpük kullanılarak FML kompozit plaklar üzerindeki yüksek hızlı darbe üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen ortalama maksimum reaksiyon kuvveti ve ortalama absorbe enerjisi sonuçları S/N oranları Çizelge 6.4'te gösterilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler en büyük en iyi performans karakteristiğine göre S/N oranları hesaplanmıştır.

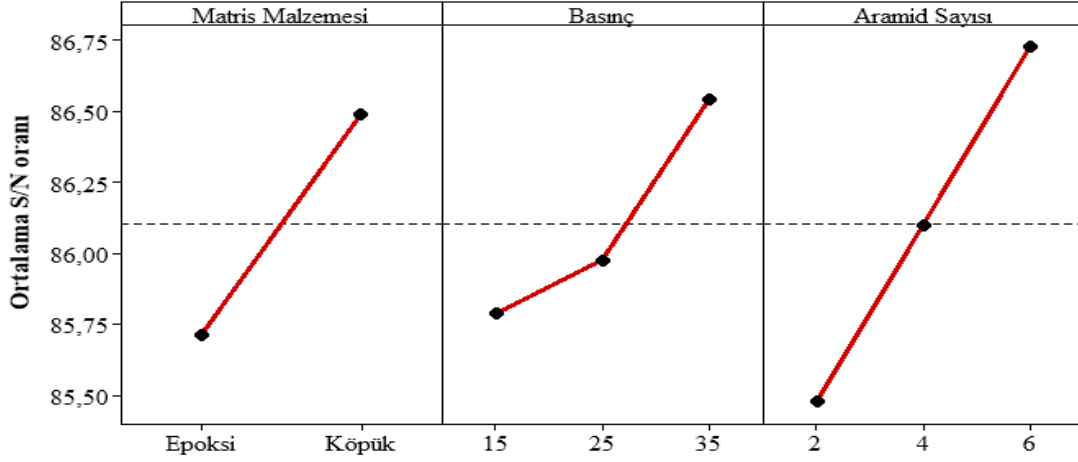
Çizelge 6.4 Darbe testi sonrası elde edilen deney sonuçları ve S/N oranları

Deney No	Parametreler				Sonuçlar			
	Matris Malzemesi	Basınç (bar)	Aramid Sayısı (Adet)	Dizilim Modeli	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Maksimum Kuvvet (N) S/N oranı	Ortalama Absorbe Enerjisi (J)	Absorbe Enerjisi (J) S/N oranı
1	Epoksi	15	2	AL/2AR/AL	17512	84,867	81,2	38,191
2	Epoksi	15	4	AL/4AR/AL	19005	85,577	85,19	38,608
3	Epoksi	15	6	AL/6AR/AL	19779	85,924	92,65	39,337
4	Epoksi	25	2	AL/2AR/AL	17743	84,981	83,12	38,394
5	Epoksi	25	4	AL/4AR/AL	19210	85,671	87,92	38,882
6	Epoksi	25	6	AL/6AR/AL	20809	86,365	94,1	39,472
7	Epoksi	35	2	AL/2AR/AL	18382	85,288	85,69	38,659
8	Epoksi	35	4	AL/4AR/AL	19723	85,899	94,89	39,544
9	Epoksi	35	6	AL/6AR/AL	21990	86,845	96,2	39,664
10	Köpük	15	2	AL/2AR/AL	19069	85,607	86,87	38,777
11	Köpük	15	4	AL/4AR/AL	19941	85,995	96	39,645
12	Köpük	15	6	AL/6AR/AL	21763	86,754	98	39,825
13	Köpük	25	2	AL/2AR/AL	19132	85,635	89,65	39,051
14	Köpük	25	4	AL/4AR/AL	20837	86,377	97,97	39,822
15	Köpük	25	6	AL/6AR/AL	21965	86,835	99,6	39,965
16	Köpük	35	2	AL/2AR/AL	21099	86,485	91,15	39,195
17	Köpük	35	4	AL/4AR/AL	22617	87,089	98,7	39,886
18	Köpük	35	6	AL/6AR/AL	24111	87,644	99,9	39,991

Parametre seviyelerine göre ortalama maksimum reaksiyon kuvveti S/N oranları Çizelge 6.4'te verilmiştir. Parametrelerin FML plakların üretiminde kullanılan ortalama maksimum reaksiyon kuvveti üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışma parametrelerinin en iyi seviye sahip olanları “a” indisi olarak gösterilmiştir. Çizelge 6.4’deki verilere bağlı olarak oluşturulan Şekil 6.25’deki grafikler incelendiğinde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Matris malzemesi S/N oranı grafiği incelendiğinde köpük kullanılan numunelerde epoksi kullanılan numunelere göre maksimum reaksiyon kuvvetinde ciddi bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum köpüğün en büyük avantajı olan esneklik yapısından kaynaklanmaktadır. Basınç parametresi grafiğinde ilk iki seviye ortalama çizgisinin altında kalırken parametrenin üçüncü seviyesi ortalama çizgisinin çok üzerinde bir noktadadır. Basınç seviyesindeki artışa bağlı olarak maksimum reaksiyon kuvvetinde artış görülmüştür. Buna bağlı olarak hem epoksi hemde köpük kullanılan numunelerde matris malzemesinin optimum miktarda kalması, gelen yükün doğrudan çekirdek malzemesine iletilmesi ile ilişkilidir. Aramid sayısı parametresi, seviye artışına bağlı olarak reaksiyon kuvvetinde artış meydana gelmiştir. Numunelerde kullanılan aramid sayısına bağlı olarak numunelerin kalınlığı ve mukavemeti artmıştır [66]. Bu nedenle vurucu kuvveti daha kalın numunelerde daha yüksek kuvvetler uygulamıştır. Parametre ve seviyelerin ortalama maksimum reaksiyon kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde en iyi parametre ve seviye A2B3C3 olarak belirlenmiştir. Yapılan ANOVA analizleri % 95 güvenilirlik aralığında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6.5 FML plaklar için her bir seviyedeki ortalama reaksiyon kuvveti S/N oranları

Sembol	Deney Parametreleri	Seviye I	Seviye II	Seviye III
A	Matris Malzemesi	85,713	86,491 ^a	
B	Basınç	85,787	85,977	86,542 ^a
C	Aramid Sayısı	85,477	86,101	86,728 ^a



S/N: En büyük en iyi

Şekil 6.25 Ortalama maksimum reaksiyon kuvveti için S/N grafiği

Çizelge 6.5'te ANOVA varyans analizine göre bütün parametrelerin reaksiyon kuvveti üzerine etkili olduğu görülmektedir. Aramid sayısı parametresinin ortalama maksimum reaksiyon kuvveti üzerinde %48.226 gibi bir değerle en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Matris malzemesi parametresinin %28.056 ve üretim basıncının ise %18.620 civarında etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu deneysel tasarım için ortalama maksimum reaksiyon kuvveti için yapılan ANOVA analizine göre %5.098 gibi küçük bir hata oranı tespit edilmiştir.

Çizelge 6.6 Ortalama maksimum reaksiyon kuvveti için ANOVA sonuçları

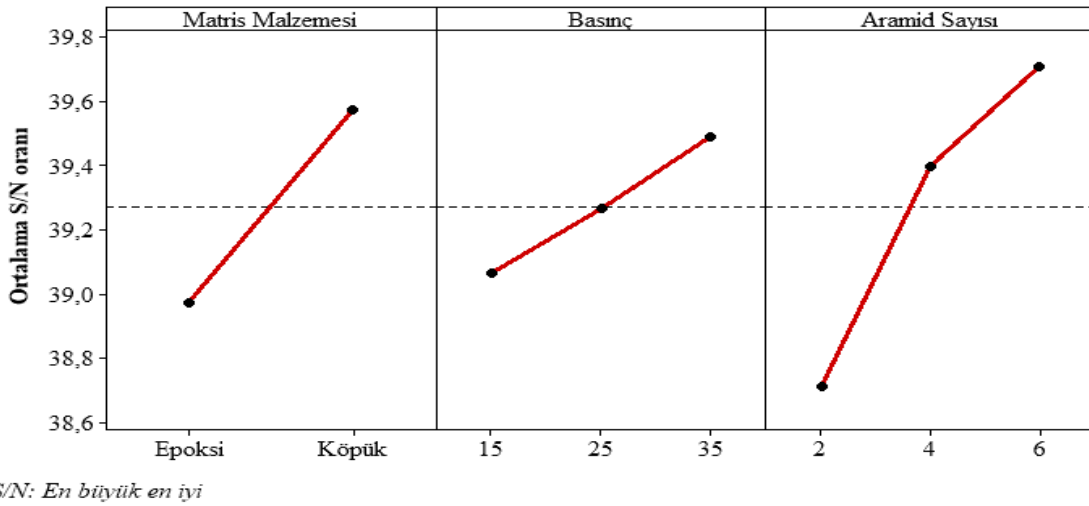
Parametreler	Serbestlik dereceleri	Toplam kareler	Varyans	F değeri	(%) dağılım
Matris Malzemesi	1	2,72576	2.7258	94.5540	28.056
Basınç	2	1,84755	0.9238	32.0448	18.620
Aramid Sayısı	2	4,69351	2.3468	81.4064	48.226
Hata	12	0.346	0.029		5.098
Toplam		9.613			100

Ortalama absorbe enerjisine göre parametre seviyelerinin S/N oranları Çizelge 6.6'da verilmiştir. Deneysel çalışma parametrelerinin en iyi seviye sahip olanları "a" indisi olarak gösterilmiştir. Çizelge 6.6'daki verilere bağlı olarak oluşturulan Şekil 6.26'daki grafikler incelendiğinde bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Matris malzemesi S/N oranı grafiği incelendiğinde köpük kullanılan numunelerde epoksi kullanılan numunelere göre ortalama absorbe enerjisi bir artış olduğu görülmektedir. Matris malzemesi olarak kullanılan köpük epoksi gibi gevrek kırılma göstermediğinden dolayı daha iyi enerji absorbesi yapmıştır. Basınç parametresi grafiğinde ilk seviye ortalama çizgisinin altında kalırken ikinci seviye ortalama çizgisi üzerinde ve parametrenin üçüncü seviyesi ortalama

çizgisinin üzerinde bir noktadadır. Basınç seviyesindeki artışa bağlı olarak ortalama absorbe enerjisi artmıştır. Aramid sayısı parametresi ise seviye artışına bağlı olarak ortalama absorbe enerjisinde artış meydana gelmiştir. Parametre ve seviyelerin ortalama maksimum reaksiyon kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde en iyi parametre ve seviye A2B3C3 olarak belirlenmiştir. Yapılan ANOVA analizleri % 95 güvenilirlik aralığında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 6. 7 FML plaklar için her bir seviyedeki ortalama absorbe enerjisi S/N oranları

Sembol	Deney Parametreleri	Seviye I	Seviye II	Seviye III
A	Matris Malzemesi	38,972	39,573 ^a	
B	Basınç	39,064	39,264	39,490 ^a
C	Aramid Sayısı	38,711	39,398	39,709 ^a



Şekil 6. 26 Ortalama absorbe enerjisi için S/N grafiği

Çizelge 6.7’de ANOVA varyans analizine göre aramid sayısı parametresinin ortalama absorbe enerjisi üzerinde %54.512 gibi bir değerde en büyük etkiye sahip olduğu görülmektedir. Matris malzemesi parametresinin %28.552 ve üretim basıncının ise %8.823 civarında etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu deneysel tasarım için ortalama absorbe enerjisi için yapılan ANOVA analizine göre %7.713 hata oranı tespit edilmiştir.

Çizelge 6.8 Ortalama absorbe enerjisi için ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik dereceleri	Toplam kareler	Varyans	F değeri	(%) dağılım
Matris Malzemesi	1	1.62493	1.6249	63.9306	28.552
Basınç	2	0.54513	0.2726	10.72364	8.823
Aramid Sayısı	2	3.12706	1.5635	61.51487	54.912
Hata	12	0.305	0.025		7.713
Toplam		5.602			100

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada matris malzemesi olarak epoksi ve köpük kullanılan FML olaklar presleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretim aşamasında Taguchi L_{18} deney tasarımı kullanılmıştır. Elde edilen FML plakların darbe tepkileri, yüksek hızlı darbe etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen verilere Anova analizi uygulanmış parametre ve seviyelerinin etkileri incelenmiştir.

Darbe testlerinden ve Anova analizinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Matris malzemesi değişimi ile FML plaklarda görünen hem ortalama reaksiyon kuvveti hemde absorbe enerjisi köpük malzeme ile üretilen plakalarda daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- FML plakaların üretim basınçları 15 bar'dan 35 bar'a çıkarılması durumunda ortalama reaksiyon kuvvetinin %11.18 olarak arttığı belirlenmiştir.
- Çekirdek sayısının 2'den 6'ya çıkarıldığında maksimum kuvvet artışı 35 bar basınç altında meydana gelerek %19.62 lik bir artış meydana gelmiştir.
- 35 bar basınç altında üretilen numunlerde aramid sayısının 2'den 6'ya çıkarılması durumunda absorbe enerjisi değerinde %10.74'lük bir artış açığa çıkmıştır.
- Matris malzemesi olarak kullanılan köpük ile üretilen FML plakalarda 35 bar basınç altında aramid sayısındaki 2'den 6'ya çıkması halinde reaksiyon kuvvetleri sırası ile 21099 N, 22617 N ve 24111 N olarak elde edilmiştir.
- Köpük kullanılan FML plakalarda basıncın etkisinin hem reaksiyon kuvvetinde hemde absorbe enerjisinde çok fazla olmadığı gözlemlenmiştir.
- Deney parametrelerinin reaksiyon kuvveti üzerindeki etkileri, aramid sayısının %48.226, matris malzemesinin %28.056 ve üretim basıncının ise %18.620 etkili olduğu görülmüştür. Parametre ve seviyelerin ortalama maksimum reaksiyon kuvveti üzerindeki etkisi incelendiğinde en iyi parametre ve seviye A2B3C3 olarak belirlenmiştir.
- Deney parametrelerinin absorbe enerjisi üzerindeki etkileri, aramid sayısının %54.512, matris malzemesinin %28.552 ve üretim basıncının ise %8.823 etkili olduğu görülmüştür. Parametre ve seviyelerin ortalama absorbe enerjisi üzerindeki etkisi incelendiğinde en iyi parametre ve seviye A2B3C3 olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Botelho EC, Silva RA, Pardini LC, Rezende MC.** (2006). A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures. *Mater Res.*, 9, 247-256. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392006000300002>
- [2] **Bernhardt S, Ramulu M, Kobayashi AS** (2007). Low-Velocity Impact Response Characterization of a Hybrid Titanium Composite Laminate. *J Eng Mater Technol.*, 129, 220-226. <https://doi.org/10.1115/1.2400272>
- [3] **Reyes Villanueva G, Cantwell WJ** (2004). The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures. *Compos Sci Technol* 64, 35–54. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00197-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00197-0)
- [4] **Alderliesten RC, Benedictus R.** (2008) Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures. *J Aircr* 45, 1182–1189. <https://doi.org/10.2514/1.33946>
- [5] **Cortés P, Cantwell WJ.** (2006) The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre–metal laminates. *Compos Sci Technol* 66, 2306–2316. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.031>
- [6] **Vlot A.** (1996) Impact loading on fibre metal laminates. *Int J Impact Eng* 18, 291–307. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(96\)89050-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(96)89050-6)
- [7] **Reyes V. G, Cantwell WJ.** (2000) The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene. *Compos Sci Technol* 60, 1085–1094. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00002-6)
- [8] **Cortés P, Cantwell WJ.** (2005) The fracture properties of a fibre–metal laminate based on magnesium alloy. *Compos Part B Eng* 37, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.06.002>
- [9] **Lawcock G., Ye L, Mai Y., Sun C.** (1998) Effects of fibre/matrix adhesion on carbon-fibre-reinforced metal laminates—II. impact behaviour. *Compos Sci Technol* 57, 1621–1628. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(97\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(97)00094-8)
- [10] **Vlot A** (1993) Impact properties of Fibre Metal Laminates. *Compos Eng* 3, 911–927. [https://doi.org/10.1016/0961-9526\(93\)90001-Z](https://doi.org/10.1016/0961-9526(93)90001-Z)
- [11] **Carrillo JG, Cantwell WJ.** (2009) Mechanical properties of a novel fiber–metal laminate based on a polypropylene composite. *Mech Mater* 41, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2009.03.002>
- [12] **ABDULLAH M, CANTWELL W.** (2006) The impact resistance of polypropylene-based fibre–metal laminates. *Compos Sci Technol* 66, 1682–1693. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.008>
- [13] **Park R, Jang J.** (2003) Effect of laminate thickness on impact behavior of aramid fiber/vinylester composites. *Polym Test* 22, 939–946. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(03\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(03)00044-8)
- [14] **Chai GB, Manikandan P.** (2014) Low velocity impact response of fibre-metal laminates – A review. *Compos Struct* 107, 363–381. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.003>

- [15] **Lee Y-S, Kang K-H, Park O.** (1997) Response of hybrid laminated composite plates under low-velocity impact. *Comput Struct* 65, 965–974. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(95\)00298-7](https://doi.org/10.1016/0045-7949(95)00298-7)
- [16] **Ferrante L, Sarasini F, Tirillò J, et al.** (2016) Low velocity impact response of basalt-aluminium fibre metal laminates. *Mater Des* 98, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.002>
- [17] **Morinière FD, Alderliesten RC, Sadighi M, Benedictus R.** (2013) An integrated study on the low-velocity impact response of the GLARE fibre-metal laminate. *Compos Struct* 100, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.016>
- [18] **Wu G, Yang J-M, Hahn HT** (2007) The impact properties and damage tolerance and of bi-directionally reinforced fiber metal laminates. *J Mater Sci* 42, 948–957. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0014-y>
- [19] **Liu Y, Liaw B** (2010) Effects of Constituents and Lay-up Configuration on Drop-Weight Tests of Fiber-Metal Laminates. *Appl Compos Mater* 17, 43–62. <https://doi.org/10.1007/s10443-009-9119-1>
- [20] **Zhu S, Chai GB.** (2012) Low-velocity impact response of fibre–metal laminates – Experimental and finite element analysis. *Compos Sci Technol* 72, 1793–1802. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.07.016>
- [21] **Lee D-W, Park B-J, Park S-Y, et al.** (2018) Fabrication of high-stiffness fiber-metal laminates and study of their behavior under low-velocity impact loadings. *Compos Struct* 189, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.044>
- [22] **Al-Furjan MSH, Shan L, Shen X, et al.** (2022) A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced rolymer composites. *J Mater Res Technol* 19, 2930–2959. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>
- [23] **Nayak SY, Sultan MTH, Shenoy SB, et al.** (2022) Potential of Natural Fibers in Composites for Ballistic Applications – A Review. *J Nat Fibers* 19, 1648–1658. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1787919>
- [24] **Karthick P, Ramajeyathilagam K.** (2021) Numerical study of influence of target thickness and projectile incidence angle on ballistic resistance of the GFRP composites. *Mater Today Proc* 47, 992–999. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.459>
- [25] **Zhang B, Jia L, Tian M, et al.** (2021) Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review. *Eur Polym J* 147, 110352. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110352>
- [26] **Li Z, Liu B, Kong H, et al.** (2018) Layer-by-Layer Self-Assembly Strategy for Surface Modification of Aramid Fibers to Enhance Interfacial Adhesion to Epoxy Resin. *Polymers (Basel)* 10, 820. <https://doi.org/10.3390/polym10080820>
- [27] **Chen J, Zhu Y, Ni Q, et al.** (2014) Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating. *Appl Surf Sci* 321, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.196>
- [28] **Li S, Han K, Rong H, et al.** (2014) Surface modification of aramid fibers via ammonia-plasma treatment. *J Appl Polym Sci* 131, 40250. <https://doi.org/10.1002/app.40250>

- [29] **Carrillo JG, Gonzalez-Canche NG, Flores-Johnson EA, Cortes P.** (2019) Low velocity impact response of fibre metal laminates based on aramid fibre reinforced polypropylene. *Compos Struct* 220, 708–716. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.04.018>
- [30] **Osmanoğlu S, Selver E, İmal M.** (2020) Sandviç kompozitlerde çekirdek kalınlığının ve karbon lif yönlenmelerinin basma ve eğilme dayanımlarına etkisi. *Konya J Eng Sci* 8, 223–236. <https://doi.org/10.36306/konjes.745739>
- [31] **Kosedag E, Aydin M, Ekici R.** (2022) Effect of stacking sequence and metal volume fraction on the ballistic impact behaviors of <scp>ARALL</scp> fiber-metal laminates: An experimental study. *Polym Compos* 43, 1536–1545. <https://doi.org/10.1002/pc.26474>
- [32] **Mohammad Alemi-Ardakani, Akbar Afaghi-Khatibi et al.** Low-velocity impact behavior of aluminum-fiber/epoxy laminates: a comprehensive experimental study. *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences Canada* 1-10
- [33] **Sadighi M, Alderliesten RC, Benedictus R.** (2012) Impact resistance of fiber-metal laminates: A review. *Int J Impact Eng* 49, 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.05.006>
- [34] **Sharma AP, Khan SH, Kitey R, Parameswaran V.** (2018) Effect of through thickness metal layer distribution on the low velocity impact response of fiber metal laminates. *Polym Test* 65, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.12.001>
- [35] **Bikakis GSE, Dimou CD, Sideridis EP.** (2017) Ballistic impact response of fiber–metal laminates and monolithic metal plates consisting of different aluminum alloys. *Aerosp Sci Technol* 69, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.06.028>
- [36] **Jacoby M.** (2004) Composite materials. *Chemical & Engineering News Archive*. 82, <https://doi.org/10.1021/cen-v082n035.p034>
- [37] **Sönmez M.** (2009) Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: türkiye’den dört örnek firma üzerine bir inceleme. İstanbul Teknik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi
- [38] **Kaufmann E.** (1990) Advertisers in this issue. *MRS Bull* 13, 72–72. <https://doi.org/10.1557/S088376940006379X>
- [39] **AYAD A. AL-MASHHADANI** (2017) Vıscioelastic behaviour of thermosets - thermoplastic polymer composite. University Of Turkish Aernautical Association Institute Of Science And Technology Yüksek lisans tezi.
- [40] **Kaw AK** (2005) Mechanics of Composite Materials. *CRC Press*
- [41] **İÇTEN BM** (2006) Damage in Laminated Composite Plates Subjected To Low-Velocity Impact Dokuz Eylül Üniversitesi Doktora tezi
- [42] **Selver E, Potluri P, Hogg P, Soutis C.** (2016) Impact damage tolerance of thermoset composites reinforced with hybrid commingled yarns. *Compos Part B Eng* 91:522–538. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.035>
- [43] **Albayrak M.** (2022) Eğri Yüzeylere Sahip Kauçuk Takviyeli Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Araştırılması. Fırat Üniversitesi Doktora Tezi

- [44] **Das R, Chanda A, Brechou J, Banerjee A.** (2016) Impact behaviour of fibre–metal laminates. In: *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures*. 491-542 <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100080-9.00017-8>
- [45] **David N V., Gao X-L, Zheng JQ.** (2009) Ballistic Resistant Body Armor: Contemporary and Prospective Materials and Related Protection Mechanisms. *Appl Mech Rev* 62:.. <https://doi.org/10.1115/1.3124644>
- [46] **Alderhesten R, Rans C, Benedictus R.** (2008) The applicability of magnesium based Fibre Metal Laminates in aerospace structures. *Compos Sci Technol* 68, 2983–2993. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.017>
- [47] **Sinmazçelik T, Avcu E, Bora MÖ, Çoban O.** (2011) A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Mater Des* 32, 3671–3685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011>
- [48] **Linganiso LZ, Anandjiwala RD.** (2016) Fibre-reinforced laminates in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. 101–127 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00004-3>
- [49] **Gülcan O, Tekkanat K, Çetinkaya B.** (2019) A Review on Fiber Metal Laminates and Their Usage in Aerospace. *Mühendis ve Makina* 60, 262–288. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.677991>
- [50] **Kawai M** (2002) Two-stress level fatigue of unidirectional fiber–metal hybrid composite: GLARE 2. *Int J Fatigue* 24, 567–580. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00108-6)
- [51] **Vlot, Ad and JWG.** (2011) Fibre metal laminates: an introduction. *Springer Science & Business Media*,
- [52] **Straznický P V., Laliberté JF, Poon C, Fahr A.** (2000) Applications of fiber-metal laminates. *Polym Compos* 21, 558–567. <https://doi.org/10.1002/pc.10211>
- [53] **Alderliesten R.** (2017) *Fatigue and Fracture of Fibre Metal Laminates*. Springer International Publishing, Cham
- [54] **Wu G, Yang J-M.** (2005) The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures. *JOM* 57, 72–79. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4>
- [55] **Alderliesten, R.C., Hagenbeek, M., Homan JJ et al.** (2003) Fatigue and Damage Tolerance of Glare. *Appl Compos Mater* 10, 223–242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1025537818644>
- [56] **Bieniaś J, Jakubczak P, Surowska B.** (2017) Properties and characterization of fiber metal laminates. *Hybrid Polymer Composite Materials*, 253–277 <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00011-1>
- [57] **Morinière FD, Alderliesten RC, Benedictus R.** (2014) Modelling of impact damage and dynamics in fibre-metal laminates – A review. *Int J Impact Eng* 67, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.01.004>
- [58] **Vogelgesang L., Vlot A** (2000) Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. *J Mater Process Technol* 103, 1–5. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8)

- [59] **Hoo Fatt MS, Lin C, Revilock DM, Hopkins DA.** (2003) Ballistic impact of GLARETM fiber-metal laminates. *Compos Struct* 61, 73–88. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00036-9)
- [60] **Sadighi M, Pärnänen T, Alderliesten RC, et al.** (2012) Experimental and Numerical Investigation of Metal Type and Thickness Effects on the Impact Resistance of Fiber Metal Laminates. *Appl Compos Mater* 19, 545–559. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9235-6>
- [61] **Chang P-Y, Yeh P-C, Yang J-M.** (2008) Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. *Mater Sci Eng A* 496, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.07.041>
- [62] **Asundi A, Choi AYN.** (1997) Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. *J Mater Process Technol* 63, 384–394. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02652-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02652-0)
- [63] **Vlot A, Vogelesang LB, De Vries TJ.** (1999) Towards application of fibre metal laminates in large aircraft. *Aircr Eng Aerosp Technol* 71, 558–570. <https://doi.org/10.1108/00022669910303711>
- [64] **García-Moreno I, Caminero M, Rodríguez G, López-Cela J.** (2019) Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers* 11, 160. <https://doi.org/10.3390/polym11010160>
- [65] **Icten BM, Atas C, Aktas M, Karakuzu R** (2009) Low temperature effect on impact response of quasi-isotropic glass/epoxy laminated plates. *Compos Struct* 91, 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.05.010>
- [66] **Önal T, Temiz Ş.** (2020) Balsa Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Derg.* <https://doi.org/10.31202/ecjse.797049>

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Ahmed Talha HIZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-Halen Isıtma-Soğutma ve Havalandırma sistemleri firmasında Makine Mühendisi olarak çalışıyorum.