

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

**3B YAZDIRILMIŞ POLİMER LEVHALAR KULLANILARAK ÜRETİLEN
POLİMER METAL LAMİNAT KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Muhammed Safa KAMER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

MART 2023

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

**3B YAZDIRILMIŞ POLİMER LEVHALAR KULLANILARAK ÜRETİLEN
POLİMER METAL LAMİNAT KOMPOZİTLERİN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Muhammed Safa KAMER
(23617180203)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

MART 2023

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedен beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. şemsettin TEMİZ'e,

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen anne ve babama, eşim Kübra KAMER'e ve ailemizin neőe kaynağı çocuklarım Sevde, Mustafa Emir ve Abdullah Eymen'e,

Bu tez alıőması İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (FDK-2020-2351) numaralı proje kapsamında desteklenmiőtir. Proje kapsamında vermiőt oldukları finansal desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi BAP birimine

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “3B Yazdırılmış Polimer Levhalar Kullanılarak Üretilen Polimer Metal Laminat Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” 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 olduğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Muhammed Safa KAMER



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER	15
2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri	15
2.1.1 Polimerizasyon	17
2.1.1.1 Stereolitografi (SLA).....	17
2.1.1.2 Polimer jet yöntemi (Polyjet & Multijet - PJ).....	18
2.1.1.3 Dijital ışık yöntemi (Digital Light Processing - DLP).....	19
2.1.2 Sinterleme ve ergitme.....	20
2.1.2.1 Lazerle sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS).....	20
2.1.2.2 Lazer ile ergitme (Selective Laser Melting - SLM).....	21
2.1.2.3 Elektron demeti ile ergitme (Electron Beam Melting - EBM).....	21
2.1.3 Katman laminasyonu ile üretim (Layer Laminated Manufacturing - LLM).....	22
2.1.3.1 Lamine nesne üretimi (Laminated Object Manufacturing - LOM).....	22
2.1.4 Toz bağlayıcı püskürtme ile üretim.....	23
2.1.4.1 Ekstrüzyon - eriyik yığıma modelleme (EYM).....	24
2.2 Alüminyum Malzemeler.....	25
2.2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	26
2.2.1.1 1xxx serisi alaşımlar.....	26
2.2.1.2 2xxx serisi alaşımlar.....	27
2.2.1.3 3xxx serisi alaşımlar.....	27
2.2.1.4 4xxx serisi alaşımlar.....	27
2.2.1.5 5xxx serisi alaşımlar.....	27
2.2.1.6 6xxx serisi alaşımlar.....	28
2.2.1.7 7xxx serisi alaşımları.....	28
2.2.1.8 8xxx serisi alaşımları.....	28
2.3 Kompozit Malzemeler	28
2.3.1 Matris türüne göre sınıflandırma	30
2.3.1.1 Polimer matris kompozitler (PMK).....	30
2.3.1.2 Metal matris kompozitler (MMK).....	31
2.3.1.3 Seramik matris kompozitler (SMK).....	32
2.3.1.4 Karbon-karbon kompozitler (KKK).....	33
2.3.2 Takviye türüne göre sınıflandırma	34
2.3.2.1 Elyaf (Fiber) takviyeli kompozitler.....	34
2.3.2.2 Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler	35
2.3.2.3 Tabakalı kompozitler.....	36
2.3.2.4 Hibrit (Karma) kompozitler	37
2.4 Yapıştırıcılar	38
2.4.1 Yapışma işlemi	39

2.4.1.1	Adezyon kuvveti	39
2.4.1.2	Kohezyon kuvveti	40
2.4.2	Yapışma teorileri	40
2.4.2.1	Mekanik tutunma teorisi.....	40
2.4.2.2	Elektrostatik teorisi	41
2.4.2.3	Adsorpsiyon teorisi	41
2.4.2.4	Difüzyon teorisi.....	41
2.4.3	Yapıştırıcı çeşitleri.....	42
2.4.3.1	Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar.....	42
2.4.3.2	Formları açısından yapıştırıcılar	42
2.4.4	Yapıştırıcıların kırılma enerjilerinin belirlenmesi	43
2.4.4.1	Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I).....	44
2.4.4.2	Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II)	44
2.4.4.3	Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III).....	44
3.	MATERYAL VE METOT	45
3.1	Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kalıp Seti	46
3.2	Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Mekanik Pres	50
3.3	Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Levhaların Hazırlanması.....	53
3.3.1	Polimer levhaların hazırlanması	53
3.3.2	Metal levhaların hazırlanması	58
3.4	Yapıştırma, Presleme ve Fırınlama İşlemleri	61
3.4.1	Yapıştırma işlemi.....	61
3.4.2	Presleme işlemi.....	69
3.4.3	Fırınlama işlemi.....	71
3.5	CNC Freze ile Kesme İşlemleri.....	74
3.6	Kütle, Boyut ve Sertlik Ölçümlerinin Yapılması	80
3.7	Çekme Testlerinin Yapılması	81
3.8	Eğilme Testlerinin Yapılması	84
3.9	Düşük Hızlı Serbest Düşme Darbe Testlerinin Yapılması	87
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	92
4.1	Çekme Testlerinden Elde Edilen Bulgular	92
4.1.1	P, P + CNC, P P P P P kombinasyonu	92
4.1.2	M, M M M M M kombinasyonu	96
4.1.3	M P M P M kombinasyonu	98
4.1.4	P M P M P kombinasyonu.....	99
4.1.5	M P P P M kombinasyonu.....	100
4.1.6	P P M P P kombinasyonu	101
4.1.7	Çekme testi genel değerlendirmeleri	103
4.2	Eğilme Testlerinden Elde Edilen Bulgular	109
4.2.1	P, P + CNC, P P P P P kombinasyonu	109
4.2.2	M M M M M kombinasyonu.....	112
4.2.3	M P M P M kombinasyonu	113
4.2.4	P M P M P kombinasyonu.....	114
4.2.5	M P P P M kombinasyonu.....	116
4.2.6	P P M P P kombinasyonu	117
4.2.7	Eğilme testi genel değerlendirmeleri.....	118
4.3	DHSD Darbe Testlerinden Elde Edilen Bulgular.....	123
4.3.1	P, P P P P P kombinasyonu	124
4.3.2	M, M M M M M kombinasyonu	132
4.3.3	M P M P M kombinasyonu	137

4.3.4 PMPMP kombinasyonu	141
4.3.5 MPPPM kombinasyonu	145
4.3.6 PPMPP kombinasyonu	149
4.3.7 DHSD darbe testi genel değerlendirmeleri	152
5. SONUÇLAR.....	166
KAYNAKLAR.....	172
ÖZGEÇMİŞ	179



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 : Test numunelerinin üretilmesinde kullanılan kombinasyonlar.....	45
Çizelge 3.2 : Mekanik pres yük hesaplamaları	51
Çizelge 3.3 : 3B yazıcı ile polimer levha üretiminde kullanılan parametreler.....	54
Çizelge 3.4 : CNC freze ile kesme işlemlerinde kullanılan parametreler	74
Çizelge 3.5 : DHSD darbe testlerinde kullanılan düşürme kütlesi ve darbe enerjisi bilgileri	91
Çizelge 4.1 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin mekanik özellikleri	109
Çizelge 4.2 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin eğilme dayanımı değerleri	123
Çizelge 4.3 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin DHSD darbe testlerinden elde edilen veriler.....	165



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 : Charles HULL tarafından üretilen ilk 3B yazıcı.....	16
Şekil 2.2 : Stereolitografi (SLA) 3B yazıcı şematik görüntüsü	18
Şekil 2.3 : Polimer jet yöntemi (PJ) 3B yazıcı şematik görüntüsü.....	19
Şekil 2.4 : Dijital ışık yöntemi (DLP) 3B yazıcı şematik görüntüsü	19
Şekil 2.5 : Lazerle sinterleme (SLS) 3B yazıcı şematik görüntüsü.....	20
Şekil 2.6 : Lazer ile ergitme (SLM) 3B yazıcı şematik görüntüsü.....	21
Şekil 2.7 : Elektron demeti ile ergitme (EBM) 3B yazıcı şematik görüntüsü.....	22
Şekil 2.8 : Lamine nesne üretimi (LOM) 3B yazıcı şematik görüntüsü	23
Şekil 2.9 : Toz bağlayıcılı püskürtme ile üretim 3B yazıcı şematik görüntüsü	24
Şekil 2.10 : Eriyik yığıma modelleme (EYM) 3B yazıcı şematik görüntüsü	25
Şekil 2.11 : Boeing 787’de kullanılan malzeme oranları.....	29
Şekil 2.12 : Polimer matrisli kompozitler	31
Şekil 2.13 : Metal matrisli kompozitler	32
Şekil 2.14 : Seramik matrisli kompozitler	33
Şekil 2.15 : Karbon-karbon kompozitler.....	34
Şekil 2.16 : Fiber takviyeli kompozitler.....	35
Şekil 2.17 : Partikül takviyeli kompozitler	36
Şekil 2.18 : Tabakalı kompozitler	37
Şekil 2.19 : Hibrit (karma) kompozitler.....	38
Şekil 2.20 : Adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin şematik gösterimi.....	39
Şekil 2.21 : Kırılma mekaniğinde çatlak açma modları.....	43
Şekil 3.1 : Kalıp seti demonte görüntüsü	46
Şekil 3.2 : Üst kalıbın CNC freze ile işlenmesi	47
Şekil 3.3 : Alt kalıp üzerindeki çelik kolonlar	48
Şekil 3.4 : CNC freze ile ara plakaların imalatı	49
Şekil 3.5 : Ara plakaların işleme adımları sonrasındaki görüntüleri.....	49
Şekil 3.6 : Mekanik presin boştaki görüntüsü.....	50
Şekil 3.7 : Dijital terazi ile kuvvet kolu kütlelerinin belirlenmesi.....	51
Şekil 3.8 : Yük kovası ve içerisindeki kütleler	52
Şekil 3.9 : Ultimaker S5 3B yazıcı.....	53
Şekil 3.10 : 3B yazdırılmış levha üretiminde kullanılan filamentler	54
Şekil 3.11 : Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan polimer levhalar	55
Şekil 3.12 : Polimer levhaların saklama kaplarında muhafaza edilmesi.....	56
Şekil 3.13 : 5mm kalınlıktaki 3B yazdırılmış levhalar P kombinasyonu.....	57
Şekil 3.14 : 5mm kalınlıktaki 3B yazdırılmış levhalar P+CNC kombinasyonu	58
Şekil 3.15 : Metal levhaların temizlenmesinde kullanılan saf aseton görüntüleri	59
Şekil 3.16 : Metal levhaların saklama kabında muhafaza edilmesi	60
Şekil 3.17 : Çivili ahşap plakalar üzerinde ara plakaların kurutulması.....	61
Şekil 3.18 : Kalıp ayırıcı sıvı PVA ve gres yağı sürülmüş olan alt kalıp görüntüsü.....	62
Şekil 3.19 : Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan metal ve polimer levhalar	63
Şekil 3.20 : Yapıştırma işleminde kullanılacak olan metal/polimer levhalar	64
Şekil 3.21 : 200ml Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı	64
Şekil 3.22 : 200ml Araldite uygulama tabancası	65
Şekil 3.23 : Epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbı	66
Şekil 3.24 : Epoksi yapıştırıcı uygulama aşamaları	67
Şekil 3.25 : Epoksi yapıştırıcı uygulanan levhaların kalıplama aşamaları.....	69

Şekil 3.26 : Mekanik presin yükteki görüntüsü	70
Şekil 3.27 : Kalıp setinin yükteki görüntüsü	71
Şekil 3.28 : Fırın içerisine yerleştirilen kalıp ve tabakalı kompozit malzeme görüntüleri .	72
Şekil 3.29 : Kapalı fırın ve program saati görüntüsü	73
Şekil 3.30 : Tabakalı kompozit malzemelerin bir kısmının fırınlama sonrası görüntüleri .	74
Şekil 3.31 : Hattech CNC freze tezgahı	75
Şekil 3.32 : CNC freze kesme şablonu ve kaba kesme görüntüsü	76
Şekil 3.33 : CNC freze ile eğilme test numunesi kesme aşamaları.....	78
Şekil 3.34 : CNC freze ile çekme test numunesi kesme aşamaları	79
Şekil 3.35 : Hassas terazi (a) ve Portatif sertlik ölçüm cihazı (b).....	80
Şekil 3.36 : Mekanik kumpas (a) ve Dijital kumpas (b).....	81
Şekil 3.37 : Çekme test numunesi boyutları	82
Şekil 3.38 : Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazı – Çekme testi	82
Şekil 3.39 : Üretilen çekme test numunelerinin bir kısmının çekme testi öncesindeki görüntüleri	83
Şekil 3.40 : Test için hazırlanmış çekme test numuneleri ve çekme testi görüntüsü.....	84
Şekil 3.41 : Eğilme test numunesi boyutları	84
Şekil 3.42 : Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazı – Eğilme testi	85
Şekil 3.43 : Üretilen eğilme test numunelerinin bir kısmının eğilme testi öncesindeki görüntüleri	86
Şekil 3.44 : Eğilme testi destek aralığının ayarlanması ve test numunesinin merkezlenmesi	87
Şekil 3.45 : DHSD Darbe test numunesi boyutları	88
Şekil 3.46 : Instron Ceast 9350 DHSD darbe test cihazı	88
Şekil 3.47 : Düşürme kütleleri ve test bölgesi	89
Şekil 3.48 : Merkezleme şablonları ile test numunelerinin yerleştirilmesi.....	90
Şekil 3.49 : Üretilen DHSD darbe test numunelerinin bir kısmının darbe testi öncesindeki görüntüleri	91
Şekil 4.1 : Filament gerilme – uzama grafiği.....	93
Şekil 4.2 : P kombinasyonu gerilme – uzama grafiği	94
Şekil 4.3 : P+CNC kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.....	95
Şekil 4.4 : P+PMP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği	96
Şekil 4.5 : M kombinasyonu gerilme – uzama grafiği	97
Şekil 4.6 : MMMMM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.....	98
Şekil 4.7 : MPMPM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği	99
Şekil 4.8 : PMPMP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.....	100
Şekil 4.9 : MPPPM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.....	101
Şekil 4.10 : PPMPP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği	103
Şekil 4.11 : Polimer çekme test numuneleri karşılaştırma grafiği	103
Şekil 4.12 : P ve P+CNC kombinasyonları yan yüzey görüntüleri.....	105
Şekil 4.13 : Metal çekme test numuneleri karşılaştırma grafiği	106
Şekil 4.14 : PML çekme test numuneleri karşılaştırma grafiği.....	107
Şekil 4.15 : P kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği	110
Şekil 4.16 : P+CNC kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.....	111
Şekil 4.17 : P+PMP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.....	112
Şekil 4.18 : MMMMM kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği	113
Şekil 4.19 : MPMPM kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.....	113
Şekil 4.20 : MPMPM kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri	114
Şekil 4.21 : PMPMP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği	114
Şekil 4.22 : PMPMP kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri	115

Şekil 4.23 : MPPPM kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği	116
Şekil 4.24 : MPPPM kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri	117
Şekil 4.25 : PPMPP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği	117
Şekil 4.26 : PPMPP kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri.....	118
Şekil 4.27 : Polimer eğilme test numuneleri karşılaştırma grafiği.....	119
Şekil 4.28 : Polimer/Metal eğilme test numuneleri karşılaştırma grafiği	120
Şekil 4.29 : Eğilme dayanımı değerlerinin çeşitli büyüklüklere oranı	122
Şekil 4.30 : P kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri	124
Şekil 4.31 : P kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.....	127
Şekil 4.32 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri	128
Şekil 4.33 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri	131
Şekil 4.34 : M kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri	132
Şekil 4.35 : MMMMM kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.....	134
Şekil 4.36 : M ve MMMMM kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri	136
Şekil 4.37 : MPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri	137
Şekil 4.38 : MPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri	140
Şekil 4.39 : PMPMP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.....	141
Şekil 4.40 : PMPMP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri	144
Şekil 4.41 : MPPPM kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.....	145
Şekil 4.42 : MPPPM kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri	148
Şekil 4.43 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri	149
Şekil 4.44 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.....	152
Şekil 4.45 : Polimer DHSD darbe test numuneleri kuvvet – yer değiştirme grafikleri	154
Şekil 4.46 : Polimer DHSD darbe test numuneleri enerji – zaman grafikleri.....	155
Şekil 4.47 : Metal DHSD darbe test numuneleri karşılaştırma grafikleri.....	156
Şekil 4.48 : PML DHSD darbe test numuneleri kuvvet – yer değiştirme grafikleri.....	157
Şekil 4.49 : PML DHSD darbe test numuneleri enerji – zaman grafikleri	159
Şekil 4.50 : Polimer DHSD darbe test numuneleri maksimum temas kuvveti grafiği	160
Şekil 4.51 : Polimer DHSD darbe test numuneleri absorbe edilen enerji grafiği	160
Şekil 4.52 : Polimer DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği	161
Şekil 4.53 : PML DHSD darbe test numuneleri maksimum temas kuvveti grafiği.....	162
Şekil 4.54 : PML DHSD darbe test numuneleri absorbe edilen enerji grafiği.....	163
Şekil 4.55 : ABS polimer levha içeren PML DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği	163
Şekil 4.56 : PLA polimer levha içeren PML DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği	164

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A	: Yüzey alanı (m ²)
E	: Elastisite modülü (GPa)
F	: Kuvvet (N)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
m	: Kütle (kg)
P	: Basınç (Pa)
ρ	: Yoğunluk (g/cm ³)
σ_c	: Çekme mukavemeti (MPa)
3B	: 3 boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
CAM	: Computer Aided Manufacturing
DHSD	: Düşük Hızlı Serbest Düşme
DLP	: Digital Light Processing
EBM	: Electron Beam Melting
EYM	: Eriyik Yığılma Modelleme
FDM	: Fused Deposition Modelling
FML	: Fiber Metal Laminat
KKK	: Karbon-Karbon Kompozit
LLM	: Layer Laminated Manufacturing
LOM	: Laminated Object Manufacturing
M	: Metal
MMK	: Metal Matris Kompozit
MMMMM	: Metal / Metal / Metal / Metal / Metal
MPMPM	: Metal / Polimer / Metal / Polimer / Metal
MPPPM	: Metal / Polimer / Polimer / Polimer / Metal
P	: Polimer
PC	: Polikarbonat
PETG	: Polietilen Tereftalat Glikol
PJ	: Polimer Jet
PLA	: Polilaktik Asit
PMK	: Polimer Matris Kompozit
PML	: Polimer Metal Laminat

PMPMP	: Polimer / Metal / Polimer / Metal / Polimer
PPMPP	: Polimer / Polimer / Metal / Polimer / Polimer
PVA	: Polivinil Alkol
SEM	: Sürekli Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Selective Laser Melting
SLS	: Selective Laser Sintering
SMK	: Seramik Matris Kompozit
UV	: Ultraviyole



ÖZET

Doktora Tezi

3B YAZDIRILMIŞ POLİMER LEVHALAR KULLANILARAK ÜRETİLEN POLİMER METAL LAMİNAT KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MUHAMMED SAFA KAMER

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

180+XIII sayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Günümüzde 3 boyutlu yazıcılar giderek yaygınlaşmakta olup, geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaya aday olarak gösterilmektedir. 3B yazıcı teknolojisi sayesinde, herhangi bir kalıba gerek kalmadan üretim yapılabilir. Eklemeli imalatta birçok 3B yazdırma teknolojileri geliştirilmiş olup, bunlardan en yaygın kullanılanı Eriyik Yığıma Modelleme yöntemiyle çalışan 3B yazıcılarıdır. Bu yöntemdeki eklemeli imalatta katman katman üretim yapıldığı ve katmanlar arası herhangi bir ilave bağlayıcı kullanılmadığından, üretilen ürünler her ekseninde aynı mekanik özellikleri göstermemekte olup, geleneksel yöntemlerle üretilen ürünlere nazaran bir miktar daha düşük mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 1mm kalınlığında levhalar üretilmiş olup, bu levhalardan beşer tanesi üst üste yerleştirilerek birbirine yapıştırılmıştır. Buna ek olarak 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 1mm kalınlığında üretilmiş olan levhaların arasına farklı kombinasyonlarda 1mm kalınlığındaki Al 2024-T3 alüminyum levhalar yerleştirilerek üst üste beş tabaka olacak şekilde birbirine yapıştırılmış olup, Polimer Metal Laminat kompozit malzemeler üretilmiştir. Böylece 3B yazdırılmış polimerlerin mukavemetinin artırılması ve aynı zamanda alüminyum metal levhaların hafifletilmesi amaçlanmıştır. Tabakaların birbirine yapıştırılmasında Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Farklı özelliklerdeki polimer ve metal malzemelerin bir araya getirilerek kompozit malzeme oluşturulmasıyla, malzemelerin tek başlarına sağlayamadığı mekanik özelliklere sahip olmaları hedeflenmiştir. Bu amaçla üretilen malzemelerin boyutları, kütleleri ve sertlikleri ölçülmüş olup, çekme, eğilme ve düşük hızlı serbest düşme darbe test davranışları incelenmiştir. Yerleşim şekillerinin farklı olmasına rağmen aynı sayıda polimer ve metal levha içeren PMPMP ve MPPPM kombinasyonları arasından MPPPM kombinasyonunun daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu ve darbe testlerinde daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, Eklemeli imalat, Polimer metal laminat kompozit

ABSTRACT

Phd. Thesis

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER METAL LAMINATE COMPOSITES MANUFACTURED USING 3D PRINTED POLYMER SHEETS

Muhammed Safa KAMER

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

180+XIII pages

2023

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

Today, 3D printers are becoming more and more widespread and are shown as candidates to replace traditional production methods. Thanks to the 3D printer technology, production can be made without the need for any molds. Many 3D printing technologies have been developed in additive manufacturing, and the most widely used of these are 3D printers working with the Fused Deposition Modelling method. Since the additive manufacturing in this method is produced layer by layer and no additional binder is used between the layers, the products produced do not show the same mechanical properties in every axis, and they have slightly lower strength values compared to the products produced by traditional methods. In this study, 1mm thick sheets were produced using ABS and PLA filaments with a 3D printer, and five of these sheets were glued to each other by placing them on top of each other. In addition, Polymer Metal Laminate composite materials were produced by placing 1mm thick Al 2024-T3 aluminum sheets in different combinations between 1mm thick sheets produced with a 3D printer using ABS and PLA filaments and gluing them together five times on top of each other. Thus, it is aimed to increase the strength of 3D-printed polymers and at the same time to lighten aluminum metal sheets. Araldite 2015-1 two-component epoxy adhesive was used to bond the layers together. By combining polymer and metal materials with different properties to create composite materials, it is aimed to have mechanical properties that materials cannot provide alone. For this purpose, the dimensions, masses and hardness of the materials produced were measured, and their tensile, flexural and low velocity drop weight impact test behaviors were examined. Despite the different layouts, it was determined that among the PMPMP and MPPPM combinations containing the same number of polymers and metal sheets, the MPPPM combination had higher flexural strength and gave better results in impact tests.

Keywords: 3D printing, Additive manufacturing, Polymer metal laminate composite

1. GİRİŞ

Günümüzde 3 boyutlu (3B) yazıcılar giderek yaygınlaşmakta olup, geleneksel üretim yöntemlerinin yerini almaya aday olarak gösterilmektedir. 3B yazıcı teknolojisi sayesinde, herhangi bir kalıba gerek kalmadan üretim yapılabilir. Ayrıca bu teknoloji ile üretilen ürünün dış görüntüsü değiştirilmeden, ürünün hafifletilmesi amacıyla ürünün iç kısmındaki dolgunun yoğunluğu ve deseni değiştirilerek üretim yapılabilir. Bu sayede geleneksel yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan geometrilerdeki tasarımlar herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmaksızın üretilmektedir.

Eklemeli imalatta birçok 3B yazdırma teknolojileri geliştirilmiş olup, bunlardan en yaygın kullanılanı Eriyik Yığıma Modelleme (EYM) yöntemiyle çalışan 3B yazıcılarıdır. Bu yöntemde, farklı çaplardaki polimer filamentler filament besleme motoru ile 3B yazıcının baskı kafasına doğru gönderilmektedir. Bu sayede filament 3B yazıcının baskı kafası içerisindeki nozula ulaşmaktadır. Baskı kafası içerisindeki nozula ulaşan filament, çevresindeki ısıtıcı rezistanslar sayesinde ısıtılmış olan nozul içerisinde ergimektedir. Nozul içerisinde ergiyen polimer, filament besleme motoru tarafından hala nozul içerisine gönderilmekte olan filamentin etkisiyle nozulun çıkışına doğru gönderilmekte olup, nozul çıkış çapı boyutlarında nozulu terk etmektedir. Bu şekilde baskı kafasının X ve Y eksenlerindeki hareketlerinin de etkisiyle nozuldan çıkan ergimiş polimer, 3B yazıcının baskı tablası üzerinde CAM programı tarafından belirlenen geometriyi oluşturmak üzere yığınlar oluşturmaktadır. Baskı tablası üzerine bırakılan ergimiş polimer, baskı kafasının o bölgeden uzaklaşmasıyla hızlı bir şekilde soğuyarak katılaşmaktadır. Bu şekilde polimer malzeme katmanlar halinde üst üste yığılarak belirlenen geometri oluşturulmaktadır.

EYM yöntemiyle çalışan 3B yazıcılarla üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu yöntemdeki eklemeli imalatta katman katman üretim yapıldığı ve katmanlar arası herhangi bir ilave bağlayıcı kullanılmadığından, üretilen ürünler her ekseninde aynı mekanik özellikleri göstermemekte olup, geleneksel yöntemlerle üretilen ürünlere nazaran da bir miktar daha düşük mukavemet değerlerine sahip olmaktadır. Bu tür dezavantajların ortadan kaldırılmasına yönelik çalışmalar hala sürdürülmektedir.

Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak üretilen ürünlerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 1mm kalınlığında levhalar üretilmiş olup, bu levhalardan beşer tanesi üst üste yerleştirilerek birbirine yapıştırılmıştır. Buna ek olarak 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 1mm kalınlığında üretilmiş olan levhaların arasına farklı kombinasyonlarda 1mm kalınlığındaki alüminyum levhalar (Al 2024-T3) yerleştirilerek üst üste beş tabaka olacak şekilde birbirine yapıştırılmış olup, Polimer Metal Laminat (PML) kompozit malzemeler üretilmiştir. Böylece 3B yazdırılmış polimerlerin mukavemetinin artırılması ve aynı zamanda alüminyum metal levhaların hafifletilmesi amaçlanmıştır. Tabakaların birbirine yapıştırılmasında Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Farklı özelliklerdeki malzemelerin (polimer, metal) bir araya getirilerek kompozit malzeme oluşturulmasıyla, malzemelerin tek başlarına sağlayamadığı mekanik özelliklere sahip olmaları hedeflenmiştir. Bu amaçla üretilen malzemelerin boyutları, kütleleri ve sertlikleri ölçülmüş olup, çekme, eğilme ve düşük hızlı serbest düşme (DHSD) darbe test davranışları incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Tez çalışmasının konusu olan 3B yazıcılarla ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı burada özetlenmiştir. Gurralla ve diğ. EYM yöntemiyle çalışan 3B yazıcı ile üretilen parçaların filamentler arasındaki bağın imal edilen parçaların mukavemetine olan katkısını hem matematiksel hem de deneysel yolla araştırmışlardır. Teorik maksimum çekme yükünü, katman yüksekliği bilgisinden ve filamentler arasındaki tahmin edilen ortalama nihai boyun boyutundan belirlemişlerdir. Deneysel maksimum çekme yükünü, iki farklı imalat yönü için çekme testi yaparak elde etmişlerdir. Kırılma yüzeyinin teorik ve deneysel nihai çekme yükü ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotomikrografları arasındaki uyum, EYM parçasının gücünün esas olarak katman içi bağ, katmanlar arası bağ ve filamanlar arasındaki boyun büyümesinden kaynaklandığını belirlemişlerdir. Ayrıca, filamentler için mevcut olan toplam süre ve ısının sadece boyunları büyütme için yeterli olduğunu, ancak tamamen birleşmek için yeterli olmadığını tespit etmişlerdir [1]. Yaman ve diğ. yapılandırılmış, homojen olmayan bir içyapıya sahip yapay ağların 3B baskıları hakkında rapor hazırlamışlardır. 3B yazıcı ile üretilen ürün öncelikle CAM (Computer Aided Manufacturing) programında dilimlere ayrılır. 3B yazıcı bu dilimleri üreterek gerçek tasarım üretilmiş olur. Nesnelere 3B yazıcı ile üretirken yazıcının

biriktirdiği dilimlerin çoğu topolojik olarak aynıdır ve yalnızca içyapıda yerel olarak değişir. Dilimleme algoritması bu tutarlılıktan yararlanır ve malzeme bırakmayan yazıcı kafası hareketlerini en aza indirir. Hareket sayısı baskı süresini ve yazdırılan ürünün kalitesini doğrudan etkilediğinden, malzeme bırakmayan yazıcı kafası hareketlerinin ve hızlı seyahatlerin ortadan kaldırılması çalışmalarının amacı olmuştur. Böylece aynı zamanda G-kodu dosya boyutlarının da azalmasını hedeflemişlerdir [2]. Aliheidari ve diğ. EYM ile 3B baskılı malzemelerin kırılma direncini ve katmanlar arası yapışmasını karakterize etmek için kırılma mekaniğine dayalı bir metodoloji geliştirmişlerdir. Çift konsol giriş numuneleri, üç farklı nozul sıcaklığında katmanların ara yüzünde bir ön çatlak seti olacak şekilde yazdırmışlardır. Ürettikleri numunelere Mod-I yüklemesi uygulamışlardır. Çatlak başlangıcındaki kritik yükü tespit etmek için yük yer değiştirme eğrilerini, çatlak ucunun optik görselleştirilmesi ile senkronize etmişlerdir. Kırılma direnci ölçümlerinin çok iyi bir tekrarlanabilirlik sergilediğini belirlemişler ve daha yüksek sıcaklıklarda yazdırılan numunelerin katmanlar arası yapışmasının, dolu ABS'nin kırılma direncine yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca EYM baskılı malzemelerin genel kırılma direncini ve katmanlar arası yapışmasını ölçmek için kırılma mekaniğine dayalı bir metodolojinin uygulanabileceğini ortaya koymuşlardır [3]. Chacón ve diğ. düşük maliyetli bir 3B yazıcı ile üretilen PLA numunelerinin mekanik performansı üzerindeki yapı yönü, katman kalınlığı ve ilerleme hızının etkisini incelemişlerdir. Yazdırılan numunelerin mekanik tepkisini belirlemek için çekme ve üç nokta eğilme testleri uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre katman katman işlem nedeniyle, 3B yazdırılan numunelerin anizotropik davranış sergilediğini tespit etmişlerdir. Düşey yönlendirmenin en düşük mekanik özelliklere, uzun kenar ve uzun yüzey üzerinde yönlendirmenin en yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip olduğunu belirlemişlerdir. Katman yüksekliği ve ilerleme hızı arttıkça sünekliğin azaldığını tespit etmişlerdir [4]. Adamo ve diğ. deri altı implantasyon için tasarlanan 3B baskılı hücre kapsülleme cihazının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma hem deneysel testler hem de sayısal simülasyonlar içermektedir. Deneysel mekanik testleri, sonlu elemanlar analizinde kullanılmak üzere yapısal malzeme modeli üzerinde yapılan kalibrasyon ile başlatmışlardır. Ayrıca, hücre kapsülleme sisteminin yapısal sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlar ve nümerik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Numune üzerindeki çekme testinin sayısal simülasyonunun, tek eksenli yükleme durumunda sayısal modeli doğruladığını belirlemişlerdir [5]. Solmaz ve diğ. altıgen bal peteği içyapısına sahip kompozit plakaların bası yükü altındaki davranışını incelemişlerdir. Kompozit yapının iç desenleri ABS ve PLA malzemelerinden olmak üzere üç farklı hücre boyutu ve yüksekliğine

sahip olacak şekilde 3B yazıcı ile üretmişlerdir. Üretilen içyapıları, polyester / cam fiberden üretilen yüzey örtü tabakaları ile örtülerek, kompozit sandviç paneller üretmişlerdir. Üretilen sandviç numuneleri aksel basma deneyine maruz bırakmışlardır. En yüksek dayanım değerlerinin 7 mm hücre boyutu ve 25 mm hücre yüksekliğine sahip numunelerde olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca PLA malzeme ile üretilen yapıların ABS malzeme ile üretilen yapılara göre daha iyi mekanik özellikler sergilediğini tespit etmişlerdir [6]. Uzun ve diğ. eklemeli imalat yöntemi ile yeni tip eğrisel diş profiline sahip dişli çark üretimi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında öncelikle mevcut dişli tiplerinin mevcut üretim yöntemleri ile imal edilmesini incelemişlerdir. Mevcut imalat yöntemlerinde karşılaşılan zorlukları ortadan kaldıran CNC imalat yöntemine ek olarak, üç boyutlu yazıcılar kullanılarak eğrisel dişli çarkların imalatını yapmışlar ve alternatif bir imalat yöntemi olarak önermişlerdir [7]. Akhoundi ve Behraves EYM 3B yazıcı ile imal edilen parçalar için dolgu deseninin parçaların çekme ve eğilme mukavemetine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Üç farklı dolgu tipi ve üç farklı dolgu yoğunluğunu çalışmalarının değişken imalat parametreleri olarak belirlemişlerdir. Malzeme birikme yönünün yükleme yönü ile aynı eksende hizalanması nedeni ile eş merkezli desenin, tüm dolgu yüzdelerinde istenilen çekme ve eğilme mukavemet özelliklerini sağladığını belirlenmişlerdir. SEM görüntüleri, hem eş merkezli hem de Hilbert eğri desenleri için düşük sayıda küçük boşlukların olduğunu, ancak Petek desenli numunede büyük boşlukların olduğunu ortaya koymuştur. Bu durumu, eş merkezli ve Hilbert eğri desenlerinin daha yüksek mukavemete sahip olmasının nedeni olarak açıklamışlardır [8]. Aloyaydi ve diğ. düşük hızlı darbe testi ve sıkıştırma testi yaparak dolgu modellerinin 3B baskılı numunelerin mekanik tepkisi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Test numunelerini PLA malzeme kullanarak, dört farklı dolgu modeli üçgen, ızgara, çeyrek kübik ve üç-altıgen olmak üzere EYM yöntemi ile yazdırmışlardır. PLA gözenekli parçaların penetrasyon enerji seviyesini, enerji emme kapasitesini, rijitliği ve mukavemetini belirlemek için darbe testleri yapmışlardır. Darbe testleri ile hız-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde etmişlerdir. Üçgen desenin kesme yönünde daha fazla temas alanına sahip olması nedeniyle darbe testinde emilen en yüksek enerjiyi ürettiğini belirlemişlerdir. Izgara deseni, yükleme yönü boyunca çarpma dik hizalanan daha fazla katman nedeniyle en yüksek sıkıştırma mukavemetine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [9]. Aziz ve diğ. yüzey dokusunun 3B baskılı PLA malzemenin sürtünme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. EYM tekniği kullanarak PLA polimerinin yüzeyine dairesel dokuları 3B olarak yazdırmışlardır. Deneyleri, kuru ve yağlanmış koşullar altında, tekstür boyutunu değiştirerek gerçekleştirmişlerdir. Kuru kayma koşullarında hem

yüksek hem de düşük hızlarda T2 dokusu için sürtünme katsayısının minimum olduğunu belirlemişlerdir. Yağlanmış koşullar altında, düşük hız için T3 dokusunun en düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu, yüksek hızda T1 dokusunun ise minimum sürtünme katsayısı ile sonuçlandığı tespit etmişlerdir [10]. Uzun ve diğ. EYM 3B yazıcı ile üretilen takviyesiz ve takviyeli (%20 bakır ve %20 karbon-fiber) PLA kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Üretilen takviyesiz ve takviyeli numuneleri çekme ve üç nokta eğilme testlerine tabi tutmuşlardır. Takviyesiz PLA malzemesinden üretilen numunelerin hem çekme hem de eğilme mukavemetinin takviyeli numunelerden daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [11]. Isaac ve diğ. üç farklı yazdırma açısı için 3B yazıcı ile üretilen numunelerin dinamik kırılma davranışlarını stres dalgası yükleme koşulları altında incelemişlerdir. Dinamik deneyleri, modifiye edilmiş bir Hopkinson basınç çubuğu aparatı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Düzlem içi yer değiştirmelerin tam alan ölçümünü, stres dalgası yüklemesine maruz kalan V-çentikli numunelerin dijital görüntü korelasyonu ve ultra yüksek hızlı fotoğrafçılığı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Makro ölçekli elastik izotropiye rağmen, statik ve dinamik yükleme koşulları altında üç mimaride farklı başarısızlık modlarıyla belirgin çatlak başlangıcı ve büyüme davranışları olduğunu gözlemlemişlerdir [12]. Kamer ve diğ. farklı malzeme ve imalat parametrelerine sahip 3B yazıcı ile üretilen çekme numunelerinin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde malzeme rengini ve dolgu desen tipini değişken parametre olarak ele almışlardır. ABS malzeme için üç farklı renk, PLA malzemesi için ise dört farklı renk ve beş farklı dolgu deseni için çekme numuneleri üretmişler ve üretilen numunelere çekme testleri uygulamışlardır. Gerek ABS gerekse de PLA malzemesinden üretilen numuneler için malzeme renginin çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını, en yüksek çekme dayanımının Concentric dolgu deseni ile üretilen numunelerde olduğunu tespit etmişlerdir [13]. Kamer ve Temiz 3B yazıcı ile ABS ve PLA malzemeler kullanarak farklı tabla ve nozul sıcaklarında üretilen çekme test numunelerinin çekme dayanımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerini de belirlemişlerdir. Hem ABS hem de PLA malzemesi için tabla sıcaklığı değişiminin, gerek çekme mukavemeti gerekse yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını belirlemişlerdir. ABS ve PLA malzemeler için nozul sıcaklığının düşmesi ile çekme dayanımlarının da düştüğünü tespit etmişlerdir [14]. Kamer ve diğ. EYM 3B yazıcı ile ABS ve PLA malzemeler kullanılarak farklı yazdırma parametreleri için üretilen eğilme test numunelerinin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Numune üretimlerinde, farklı nozul ve tabla sıcaklıkları ile dolgu desenini değişken

parametre olarak araştırmışlardır. Üretilen test numunelerine üç nokta eğilme testleri uygulamışlardır. PLA malzemesinin eğilme dayanımının ABS malzemeye göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. PLA malzeme ile üretilen numunelerin nozul sıcaklığının düşmesi ile eğilme mukavemetinin de büyük ölçüde düştüğünü tespit etmişlerdir. Hem ABS hem de PLA malzeme ile üretilen numunelerde dolgu deseni değişiminin eğilme dayanımı üzerinde büyük ölçüde etkili olduğunu belirlemişlerdir [15]. Tezel ve diğ. EYM ile farklı malzemelerden, farklı imalat parametrelerine sahip 3B yazıcı ile üretilen darbe test numunelerinin darbe dayanımlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde baskı yönü ve katman yüksekliğini değişken üretim parametreleri olarak ele almışlardır. Test numunelerinin üretiminde akrilonitril bütadien stiren (ABS), polilaktik asit (PLA), glikol modifiyeli polietilen tereftalat (PET-G) ve polikarbonat (PC) gibi farklı malzemeler kullanışlardır. Darbe testi ve kırılma yüzeyi incelemeleri sonucunda tabaka kalınlığındaki değişimden en çok etkilenen malzemelerin sırasıyla PC, PET-G, ABS ve PLA malzemeleri olduğunu belirlemişlerdir. En yüksek darbe mukavemetinin 0,3 mm katman yüksekliği ile üretilen PC malzemedede olduğunu, PLA malzeme ile üretilen numunelerin düşük darbe mukavemeti sergilediğini belirlemişlerdir [16]. Dogan ve Kamer, polimer cıvata üretimi için yeni bir imalat prosedürü önermişlerdir. Ayrıca önerilen yöntem ile üretilen cıvatalar için baskı yönünün çekme ve kesme dayanımı üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. EYM yöntemi ile 3B yazıcıda PLA malzeme kullanarak farklı baskı yönlerine sahip (0°-45°-90°) şaft üretimleri gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri şaftları tasarlanan özel pafta kolu ile diş açma işlemine tabi tutmuşlardır. Üretilen farklı üretim açlarına sahip cıvatalara çekme ve kesme testleri uygulamışlardır. Cıvataların çekme ve kesme dayanımlarında baskı yönünün büyük etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. 0° imalat açısı ile üretilen cıvataların mukavemetinin en yüksek, 45° ile üretilen cıvataların ise en düşük olduğunu tespit etmişlerdir [17]. Kamer ve diğ. EYM yöntemi ile 3B yazıcıda üretilen çekme test numunelerinde yazdırma hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada Ultimaker 2 Extended 3b yazıcı ile farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme kullanılarak çekme test numuneleri üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin kütle, sertlik ve yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşler, porozite değerlerini hesaplamışlar ve üretilen numunelere çekme testi uygulamışlardır. Çekme testinden sonra taramalı elektron mikroskobu ile numunelerin kopma bölgelerinden görüntüler almışlardır. PLA malzeme ile üretilen numunelerin çekme dayanımlarının, ABS malzeme ile üretilen numunelerin de kopma uzaması değerlerinin daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [18]. Kamer ve diğ. farklı 3B yazdırma hızlarında EYM yöntemi ile üretilen çekme test

numunelerinin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. İki farklı 3B yazıcıda tabla ısıtması kullanılmadan yedi farklı baskı hızında PLA malzeme ile çekme test numuneleri üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin kütle, sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve porozite değerlerini belirlemişlerdir. Ayrıca, numunelerin kopma yüzeylerini, taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kullanılarak analiz etmişlerdir. Baskı hızındaki artışın her iki 3B yazıcı ile üretilen numunelerin kütlesini, üst yüzey sertliğini ve çekme mukavemetini azalttığını ve aritmetik ortalama pürüzlülük ve porozite değerlerini artırdığını tespit etmişlerdir [19].

Tez çalışmasının konusu olan PML tabakalı kompozit malzemelerle ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı burada özetlenmiştir. Christke ve diğ. yapısal malzemeleri yangından korumak için mekanik performansı ısı yalıtımıyla birleştiren yeni bir yüzey bariyer sistemi geliştirmişlerdir. İki farklı kalınlıkta PML kompozit malzemenin yangına karşı koruma etkilerini hem alüminyum hem de karbon fiber takviyeli plastik yüzeyler için araştırmışlardır. Yangına maruz kalma testlerinde, alt tabaka sıcaklıklarının düştüğünü ve yük altında hasara uğrama süresinin önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir. Sunulan korumanın, seramik fiber mat veya şişen kaplamalar gibi geleneksel yangından korunma malzemelerine eşdeğer veya bunlardan üstün olduğunu tespit etmişlerdir. PML'nin avantajını, yangın olmayan koşullarda, hasara veya su emmeye eğilimli olmadan yapının görünümüne ve yük taşıma kabiliyetine katkıda bulunması olarak belirlemişlerdir [20]. Mohagheghian ve diğ. polietilen/alüminyum alaşımlı çift katmanlı plakaların yarı statik ve darbeli yükleme koşulları altındaki performansını, birbirinden farklı üç burun şekli için (küt, yarım küre, konik) incelemişlerdir. Polietilen tabakanın konumu, kalınlığı ve malzeme özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. Eşit kütleye sahip metal ve polimer tabakalardan oluşan iki tabakalı plakalar için delinme direncinin hassasiyetinin büyük ölçüde darbe burnunun şekline ve tabakaların oryantasyonuna bağlı olduğunu belirlemişlerdir. İki katmanlı yapının en büyük faydasının küt burun şeklinde, yüksek gerinim hızlarında yüksek derecede gerinim sertleşmesini koruyan bir polietilen ve metal katmandaki hata modunu değiştirmeye yetecek bir polimer kalınlığı oluşturması olduğunu tespit etmişlerdir [21]. Davarpanah ve Malhotra yapışkanla birleştirilmiş PML levhaların tek nokta artımlı biçimlendirilmesi sırasında artımlı derinlik, metal kalınlığı ve polimer kalınlığının şekillendirilebilirliği ve hata modlarını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Daha yüksek polimer kalınlığının daha yüksek şekillendirilebilirlik ile sonuçlandığını göstermişler, ancak bu avantajın metal yırtılması ve parçalanmasının meydana gelmesiyle

sınırlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Daha ince metal saclı laminatlarda sadece iki hata tipi; delaminasyon ve metal yırtılmasının meydana geldiğini belirlemişlerdir. Kalın metal levhali laminatlarda yukarıdaki hata tiplerine ek olarak polimerin aşınmasını da gözlemlemişlerdir [22]. Noori ve diğ. tek eksenli olarak deforme olmuş polimer lamine sacların metalik malzeme ile yapışan polimer arasındaki ara yüzey delaminasyonunun değerlendirilmesi için kesme zımbalmasına dayalı deneysel bir yöntem geliştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, ara yüzey delaminasyonunun deformasyon miktarına ve yapışan polimer malzemenin tipine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Ek olarak, yapışık polimer ve metalik malzeme arasındaki arayüzde deformasyon kaynaklı delaminasyonun bir geciktirme işlemi olduğunu ve üç parametrelili Voigt reolojik modeli ile karakterize edilebileceği göstermişlerdir. Voigt modelinin, yükün kaldırılmasından hemen sonra meydana gelen saf elastik delaminasyon miktarını tahmin edebileceğini ortaya koymuşlardır [23]. Liu ve Chen zayıf yapışmaya sahip yeni bir polimer kaplı sac laminat (PSML) tipinin deformasyon mekanizmasını ve hataya dayanıklılık özelliklerini araştırmışlardır. Katman düzenlemeleri, takım burnu boyutları, ara yüzey bağlantısı ve her katmanın mekanik özellikleri gibi faktörlerin PSML sisteminin mekanik performansı üzerindeki etkilerini, farklı yükleme koşulları için analitik ve/veya deneysel yaklaşımlarla analiz etmişlerdir. Geliştirdikleri analitik modelin, delme enerjisinin değişim eğilimlerini doğru bir şekilde tahmin edebildiğini ortaya koymuşlardır. Dinamik artımlı deformasyon yükleri altında, hata modları arasında tek katmanlı kırılma, iki katmanlı kırılma, delaminasyon ve bunların karışık durumunu gözlemlemişlerdir. PA kaplamaların zayıf bir bağ ile metal plakaya uygulanmasının, mevcut metalik malzemelerin mekanik performansını iyileştirmek için pratik bir çözüm sağlayabileceğini tespit etmişlerdir [24]. Naik ve diğ. yüksek arayüz mukavemetli metal-polimer-metal sandviç paneller üretmek için tel örgü ara katmanları kullanmışlardır. Metal levhaları önceden belirlenmiş noktalarda tel ağına birleştirmek için punta kaynağı kullanılırken, polimeri tel ağına birleştirmek için vakumlu sıcak presleme kullanmışlardır. Fabrikasyon sandviç paneller için soyulma mukavemetinin, literatürde bildirilen yapışkan bağlantılardan yaklaşık 3 kat daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, arayüz mukavemetinin kaynak ve mekanik kitleme ile elde edildiğinden, nem varlığında bozulmadığını tespit etmişlerdir. Tek eksenli çekme testlerini, tek tek katmanların ve fabrikasyon sandviç panellerin mukavemetini ve uzamasını karakterize etmek için kullanmışlardır. Ara yüz gücünü, soyulma ve çift türlü kesme testleri kullanılarak karakterize etmişlerdir. Geliştirilen sandviç panellerin şekillendirilebilirliğini göstermek için V-bükme ve germe şekillendirme deneyleri kullanmışlardır. Önerilen yeni yöntemin metallerin

polimerlere birleştirilmesi için yapıştırıcıların kullanımına bir alternatif olduğunu göstermişlerdir [25]. Park ve diğ. çelik/polimer/çelik lamine levhaları, iki adet yüksek mukavemetli çelik levha arasına üç tip yapışkanın tabaka yerleştirilmesiyle imal etmişlerdir. Lamine levhaların V-kalıp bükme testleri ni gerçekleştirmişler ve delaminasyon davranışlarını incelemişlerdir. Yapıştırıcı tabakaların mekanik davranışlarını araştırmak için her bir yapıştırıcı tabaka için normal ve kayma yönleri boyunca delaminasyon testleri yapmışlardır. Delaminasyon testlerinin sonuçlarına dayalı olarak, ölçülen yük-yer değiştirme eğrilerini açıkça tanımlayan karma mod çift doğrusal kohezif bölge modeli için kohezif özellikleri karakterize etmek için arayüz elemanları ile yinelemeli bir sonlu eleman simülasyonu kullanılarak ters parametre karakterizasyonunu başarıyla gerçekleştirmişlerdir. Levhaların delaminasyon davranışlarının eklenen yapıştırıcı tipine bağlı olduğunu göstermişlerdir [26].

Tez çalışmasının konusu olan Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı burada özetlenmiştir. Campos ve diğ. yapıştırıcıyla birleştirilmiş alüminyum bağlantıların yorulma davranışını karakterize etmeyi amaçlayan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Al 6061-T651 alüminyum alaşımlı substrat ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturdukları çift konsollu kiriş numuneleri ve end notch flexure numuneleri, mod I ve mod II yorulma çatlakları ilerleme oranlarını değerlendirmek için kullanmışlardır. Yorulma çatlakları büyüme oranlarının yanı sıra, yapışkan bağlantıların yarı-statik kırılma davranışlarını da her iki yükleme koşulu için karakterize etmişlerdir. Uyumluluk kalibrasyon eğrilerinin değerlendirilmesi için bağlantıların sayısal sonlu elemanlar modellerini oluşturmuşlardır. Bu sayede çok karmaşık olan deneysel doğrudan yorulma çatlakları büyümesi ölçümlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmışlardır. Yorulma çatlakları büyüme davranışı ile ilgili olarak, mod II yüklemesi altında daha yüksek bir yorulma çatlakları büyüme direncini doğrulamışlardır. Ayrıca deneysel yorulma çatlakları büyüme verileri ile yorulma çatlakları yayılma rejimleri I ve II'yi açıklayan değiştirilmiş Paris yasası arasında iyi bir uyum sağlamışlardır [27]. Na ve diğ. sıcaklığın yapıştırıcıyla bağlanmış bazalt fiber takviyeli polimer – alüminyum bağlantılarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini farklı sıcaklıklarda yapışkan hacim numunelerini test ederek incelemişlerdir. Araldite 2015'in -40°C, -10°C, 25°C, 50°C ve 80°C'de elastisite modülü, akma mukavemet değeri ve akma gerinimini ölçmüşlerdir. Farklı mafsallı için, sıcaklığın kırılma mukavemeti ve hasar modu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, Araldite 2015'in mekanik özellikleri sıcaklığa duyarlı olduğunu ve artan sıcaklıkla,

yapıştırıcının daha sünek hale gelmekle birlikte, elastisite modülü ve çekme mukavemeti azalırken, akma geriniminin arttığını belirlemişlerdir [28]. Jairaja ve Naik farklı tip yapıştırılan malzemeler arasındaki tek bindirmeli bağlantının tekli ve çiftli yapışkan bağ gücünü deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada karbon fiber takviyeli polimer ve alüminyum malzemeleri Araldite-2015 sünek ve AV138 kırılğan yapıştırıcılar arasında tekli yapışkan bağlı ile bağlamışlardır. Ayrıca çiftli yapışma durumunda bindirme uçlarında yüksek kayma ve sıyrıma mukavemeti nedeniyle sünek adeziv Araldite-2015, adeziv bölgenin ortasında ise farklı boyutlarda kırılğan adeziv AV138 kullanmışlardır. Bağ kuvveti ve karşılık gelen başarısızlık modellerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca gerçekleştirilen deneyleri sonlu elemanlar analizi, ABAQUS yazılımı kullanılarak modellemişlerdir. Deneysel ve sayısal çalışmaların karşılaştırmasını yapmışlar ve sayısal değerlerin sonuçlarının deneysel değerlerle yakından örtüşüğünü tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmalardan, ikili yapıştırıcı kullanımının bağ kuvvetini artırmaya yardımcı olduğunu belirlemişlerdir [29]. Wang ve diğ. karbon fiber takviyeli polimer plakalar ve çelik plakalar arasındaki bağlı arayüzlerin yorulma davranışı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Toplamda 20 adet kesmeye zorlanan bağlantıyı sabit ve yorulma yükleri altında test etmişlerdir. Yük oranı, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı tipinin yorulma ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kohezyon kırılmasının tüm numuneler için baskın olan hata modu olduğunu belirlemişlerdir. Yük çevrim sayısının artmasıyla birlikte hasarın yüklü uça başlamakta ve kademeli olarak serbest uca doğru ilerlemekte olduğunu tespit etmişlerdir. Yorulma ömrünün, yük oranının artmasıyla önemli ölçüde azaldığını belirlemişlerdir. Yük oranı aynı olduğunda, artan yapıştırıcı kalınlığı ile yorulma ömrü azaldığını tespit etmişlerdir [30]. Zamani ve diğ. cam elyaf takviyeli plastikler ile alüminyum malzemedan üretilen parçaları tek bindirmeli bağlantı olacak şekilde Araldite 2015 yapıştırıcısı kullanarak yapıştırmışlardır. Üretilen bağlantıların yorulma ömrünü ve çatlak başlangıçlarını dört noktalı eğilme deneylerini inceleyerek belirlemişlerdir. Yük oranı ve maksimum yorulma yükünün eğilme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, sabit bir maksimum yorulma yükü için bağlantının yorulma ömrünün, yük oranı değerlerinin yükseltilmesiyle arttığını belirlemişlerdir [31]. Ramalho ve diğ. 2021 anizotropik malzemedan, kompozit alt tabakalardan ve alt tabakaları yapıştıran izotropik bir malzemedan oluşan çok malzemeli bir yapıya, ağırsız bir yöntem olan doğal komşular radyal nokta enterpolasyon yöntemini (NNRPIM) uygulayarak dayanım tahminleri yapmışlardır. Çalışmadaki mukavemet tahminleri sürekli ortamlar mekaniği temelli bir kriter olan kritik boyuna gerinimi kullanılarak yapmışlardır. NNRPIM'in bu tür problemlerde geçerliliğini,

yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılarak kanıtlamışlar ve her iki sayısal yöntem için stres dağılımlarının benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Kritik boyuna gerinim kriterinin kırılma Araldite AV138 için doğru olduğunu kanıtlamışlar, ancak bu çalışmada kullanılan sünek yapıştırıcılar olan Araldite 2015 ve Sikaforce 7888'e uygulandığında, kritik boyuna gerinim kriterinin bazı sınırlamalar gösterdiğini tespit etmişlerdir [32].

Tez çalışmasının konusu olan kompozit malzeme frezeleme ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı burada özetlenmiştir. Wang ve diğ. kesme parametreleri ile kesme sıcaklığı, kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi yanıt yüzey metodolojisi ile araştırmışlardır. Deneyleri takım-iş parçası termokupl tekniği kullanılarak tasarlamışlardır. Camsı geçiş sıcaklığının etkisini dikkate alarak, kesme kuvveti ve kesme sıcaklığının karbon fiber takviyeli plastiğin yüzey kalitesi üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Deney sonuçları, karbon fiber takviyeli plastiğin frezeleme işleminde kesme kuvvetini etkileyen ana parametrenin ilerleme hızı olduğunu gösterirken, kesme sıcaklığını etkileyen ana parametrenin mil hızı olduğunu belirlemişlerdir. Kesme sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığını aştığında, matrisin liflere yeterli desteği sağlayamadığını ve kompozit malzemenin işleme kalitesinin zayıfladığını tespit etmişlerdir [33]. Halim ve diğ. karbon fiber takviyeli plastikler için takım aşınması, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve işleme sıcaklığı açısından ultrasonik destekli frezelemeyi geleneksel frezeleme ile karşılaştırmışlardır. Ultrasonik ve geleneksel frezeleme işlemleri için sabit takım (500m/dk) ve besleme hızında (0,8m/dk) üç yivli çok kristalli elmas takım kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Ultrasonik destekli frezeleme işlemi için genlik ve frekansı sırasıyla 5µm ve 39000Hz'de sabitlemişlerdir. Ultrasonik destekli frezeleme işleminin uygulanmasının, kuvvetlerin %20'ye kadar ve sıcaklıkların %15'e kadar azalmasına neden olduğunu, ancak yüzey pürüzlülüğünün ise %5'e kadar artırdığını belirlemişlerdir [34]. Zhu ve diğ. taş-plastik kompozitin elmas kesicilerle helisel frezelenmesi sırasında takım geometrisinin ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve sıcaklık üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Dört faktörü (helisel açı, iş mili hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği) yanıt yüzeyi yöntemi kullanarak değerlendirmişlerdir. Kompozit helisel frezeleme sırasında kesme kuvvetleri ve sıcaklıktaki değişiklikleri doğru bir şekilde tahmin etmek için matematiksel modeller geliştirmişlerdir. Ardından, varyans analizi ile her bir faktörün ve iki faktörlü etkileşimlerin önemli katkılarına belirlemişler ve yanıt yüzeyi metodolojisi kullanılarak kesme kuvvetleri ve sıcaklığın eğilimlerini incelemişlerdir. Düşük kesme

kuvvetleri ve sıcaklık açısından optimum koşulların, helis açısı 70° , kesme hızı 51,3m/s, dış başına ilerleme 0,24mm ve kesme derinliği 0,5mm olduğunu tespit etmişlerdir [35]. Kim ve diğ. liflerin talaşlı imalatla büküldüğü karbon fiber takviyeli plastikteki matrisin kayma gerinim enerjisi ile yüzey kalitesi arasındaki ilişkiyi açıklayan bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada freze takımı-iş parçası teması sırasında elyafın bükülmesinden kaynaklanan polimer matrisin kayma gerinim enerjisini, elyaflar ve kesici kenar arasındaki geometrik ilişki ile hesaplamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, matristeki kayma gerilmesi enerjisinin, işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü ile baskın bir şekilde orantılı olduğunu belirlemişlerdir [36]. Usca ve diğ. Al/TiN kaplı karbür takımlar kullanarak Cu-B-CrC kompozitleri freze işlemine tabi tutulurken işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca, işleme parametrelerinin yanı sıra işlenmiş takviyeli numuneleri imal etmek için kullanılan toz miktarlarının farklı ağırlık oranlarının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, talaş morfolojisi ve kesme sıcaklıkları gibi çıktı parametreleri üzerindeki etkisini de incelemişlerdir. Çalışma sonucunda takviye oranının işlenebilirlik üzerinde baskın etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. Kesme hızı değişikliklerinin işlenebilirlik özelliklerinde önemli bir rol oynadığını, yani artan değerlerin yan yüzey aşınmasını ve kesme sıcaklıklarını artırdığını ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığını tespit etmişlerdir [37]. Wu ve diğ. 2022 elmas takımlarla Ahşap-plastik kompozit (WPC) işlemede kesme parametrelerinin ve takım parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İlerleme hızı 5m/dk olarak sabitlendiğinde iş mili hızı, kesme derinliği ve takım sarmal açısı olmak üzere üç faktörü değerlendirmek için çoklu doğrusal regresyon modeli ve yanıt yüzeyi yöntemi kullanmışlardır. Sonuç olarak, üç faktörün artmasıyla kesme kuvvetinin arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca yüzey kalitesinin sadece iş mili hızının artmasıyla iyileştiğini tespit etmişlerdir [38].

Tez çalışmasının konusu olan DHSD darbe testi ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı burada özetlenmiştir. Pierson ve Vaziri lamine kompozit plakaların darbe tepkisi için analitik bir model oluşturmuşlardır. Özel ortotropik laminatların küçük sapma elastik tepkisi için geçerli olan türetilen denklemler, kayma deformasyonu, döner atalet ve doğrusal olmayan Hertzian temas yasasının birleşik etkilerini içermektedir. Önerilen analitik modelin kıyaslanması için literatürde bulunan diğer analitik çözümler ile bir darbe problemi çözmüşler ve önerilen yöntemin daha hızlı yakınsadığı tespit etmişlerdir [39]. Mathivanan ve Jerald dokuma cam elyafı epoksi matris kompozit laminatların düşük hızlı darbe tepkisine ilişkin deneysel bir araştırma yürütmüşlerdir. Darbe testlerini farklı

darbe hızlarına maruz kalan laminatta gözlemlenen hasarların tipini ve kapsamını karakterize etmek için gerçekleştirmişlerdir. Laminatların 3J ila 15J arasında değişen enerji seviyelerinde düşük hız darbesine tepkisini araştırmışlardır. 4,429m/s'lik darbe hızında, laminatların açıkça hasara uğradığını belirlemişlerdir. Laminatların, laminatın çatlaması ve delinmesi olmak üzere iki tip hasar modu sergilediğini tespit etmişlerdir [40]. Sarvestani ve diğ. meta-sandviç yapılar olarak adlandırılan yeni bir hafif ve 3D yazdırılabilir mimari sahip sandviç yapılar oluşturmuşlardır. Çekirdek olarak mekanik metalmalzemelerden yapılmış bu hafif sandviç yapılar, yüksek rijitlik-ağırlık oranı ve yüksek enerji emme kabiliyeti gibi birçok avantaj göstermektedir. Çalışmada, yarı statik eğilme ve düşük hızlı darbe testleri altında 3B baskılı meta-sandviçlerin yapısal dayanıklılığını değerlendirmek için sonlu elemanlar simülasyonu ve deneysel testler uygulamışlardır. Kübik, sekizli ve Isomax hücreli çekirdeklerden yapılmış 3D baskılı polimerik meta-sandviç yapıların hasar mekanizmasını, enerji emilimini ve çoklu vuruş kapasitesini özel olarak araştırmışlardır. 3D baskılı meta-sandviç kirişler üzerinde üç noktalı eğilme ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Çekirdek topolojisi ve geometrik parametrelerin, meta-sandviç yapıların hasar mekanizması ve enerji emilimi üzerinde önemli etkilerinin olduğunu belirlemişlerdir [41]. Topkaya ve Solmaz bal peteği sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe yüklerine karşı davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, bal peteği sandviç kompozitlerin neredeyse tüm tasarım parametreleri incelenmiştir. Sonuç olarak, bal peteğinin çekirdek kalınlığının kompozitin mukavemeti üzerinde bir etkisinin olmadığını ve numunenin darbe davranışını en çok etkileyen parametrenin ön yüzey kalınlığı olduğunu belirlemişlerdir [42]. Önal ve Temiz çekirdeğinde farklı kalınlıklardaki balsa odunları, alt ve üst yüzeylerinde ise tabakalı cam elyaf/epoksi kompozit malzemeler kullanılan sandviç yapılar üretmişlerdir. Ürettikleri sandviç yapıların dış yüzey tabaka sayısının ve çekirdek kalınlığının sandviç yapının DHSB darbe test davranışları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sandviç yapının dış yüzey tabaka sayısının artmasıyla absorbe edilen enerji miktarının azaldığını, temas kuvvetinin arttığını belirlemişlerdir. Sandviç yapının çekirdek kalınlığının artmasıyla da absorbe edilen enerji miktarının arttığını tespit etmişlerdir [43]. Albayrak ve diğ. yamayla onarılan katmanlı kompozit levhaların darbe davranışını düşük hızlı darbe yükleri altında sayısal olarak incelemişlerdir. Farklı geometrik kombinasyonlarda tasarlanan kompozit plakaları çeşitli yapıştırıcılar kullanarak yamalarla onarmışlardır. Bu kompozitlerin darbe davranışlarını, tamir edilen kompozit plakalar üzerine farklı hızlarda vurucular düşürerek incelemişlerdir. 3B modelleme ve çözüm için ANSYS-Ls-Dyna sonlu elemanlar paket programını kullanmışlardır. Gerçekleştirdikleri nümerik çalışma

sonucunda, altıgen yama tipinin diğer yama geometrilerine göre daha iyi performans gösterdiğini belirlemişlerdir [44]. Corona ve diğ. 12,7mm kalınlığında, Al 7075-T651 alüminyum alaşımlı levhaların yarım küre burunlu ve 12,7mm çapında silindirik bir zımba ile delinmesini incelemişlerdir. Çarpma sırasında eşik delme enerjisini, delme modunu ve delme ivmesini belirlemek için 16 delme deneyi yapmışlardır. Zımbayı 139kg'lık bir kütle üzerine monte etmişler ve farklı darbe hızlarıyla plakaların üzerine düşürmüşlerdir. Kütle tüm deneylerde aynı olduğundan çarpma hızını değişken parametre olarak seçmişlerdir. Zımba ivmesinin zaman geçmişlerinin, simülasyon ve test arasında iyi bir şekilde uyduğunu belirlemişlerdir [45]. Firouzsaları ve diğ. keten elyaf takviyeli polimer (FFRP) boruların sabit uzunluk-çap oranına sahip olduğu, kalınlık ve çap bakımından değişkenlik gösteren 99 boru üretmişlerdir. Çap, kalınlık ve girinti ucu şeklinin boruların sertliği, delinme yükü, deformasyonu ve hasar mekanizması üzerindeki etkisini belirlemek için konik burun, yarım küre burun ve kama uçlu uçlar kullanarak FFRP borular üzerinde girinti ve delinme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. FFRP borular, cam elyafı ile güçlendirilmiş polimer borulara kıyasla benzer rijitlik ve delinme yükü göstermesine rağmen daha küçük boru hasarı alanı gözlemlenmiştir [46]. Saylık ve Temiz farklı darbe enerji seviyeleri ile düşük hızlı darbe testine tabi tutulan hibrit kompozit, cam-epoksi kompozit karbon-epoksi kompozit ve cam/karbon-epoksinin darbe davranışlarını deneysel olarak araştırılmışlardır. Her bir kompozit tipini 10J, 20J, 30J ve 40J darbe enerjisi değerleri ile test etmişler ve darbe davranışlarını incelemişlerdir. Çarpma enerjisinin artmasıyla maksimum kuvvet ve çökme değerlerinin de arttığını belirlemişlerdir. Karbon-epoksi kompozit numunelerin en yüksek darbe dayanımına sahip olduğunu, hibrit kompozit numunelerin cam-epoksi kompozitlere kıyasla daha iyi darbe direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [47].

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Eklemeli İmalat Yöntemleri

Günümüz teknolojisinde 3B yazıcılar, bilgisayar destekli programların kullanılmasıyla dijital olarak elde edilen modelleri plastik, metal vb. malzemeleri baskı esnasında eritip kullanarak 2 boyutlu bir düzlemde her bir katmanı üst üste gelecek şekilde ince tabakalar oluşturarak 3B bir nesne meydana getiren yazıcılardır. Her sektörde ürün geliştirme sürecini kısaltmaya yönelik yeni üretim teknolojileri olanaklarının artmaya devam ettiği görülmektedir. Günümüz üretim dünyasında firmaların rekabetçi kalabilmeleri için ürünün pazara sürüm sürecini kısaltması önem arz etmektedir. Yeni bir ürün tasarlama ve geliştirme süreçlerinde meydana gelebilecek problemlerin başlangıçta öngörülmesi ve oluşan problemlere ait çözüm yollarının hızlı bir şekilde belirlenmesi 3B yazıcı teknolojileri ile mümkün olabilmektedir. Bilgisayar ortamında oluşturulan tasarımların seri üretime geçmeden önce prototiplerinin hazırlanarak gerekli testlerin yapılması üretim sürecinde karşılaşılabilecek problemlerin çözüm sürecini kısaltmaktadır. Her sektörde ürün geliştirme sürecini kısaltmaya yönelik yeni üretim teknolojileri olanaklarının artmaya devam ettiği gözlenmektedir [48].

Üç boyutlu yazıcının başlangıcı 1970'lerin sonlarında, ilk defa bir katı maddenin yazdırılma işlemi de 1982 yılında Hideo KODAMA tarafından yapılmıştır. 3D Systems Corp.'un kurucusu Charles HULL tarafından ilk 3B yazıcı 1984 yılında üretilmiştir (Şekil 2.1). O yıllardaki teknolojiyle 3B yazıcılar boyutsal anlamda çok büyük ve maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle ağırlıklı olarak prototip üretiminde kullanılmıştır. 1988 yılında ilk renkli baskıları üreten yazıcılar için Selective Laser Sintering (SLS) ve Fused Deposition Modelling (FDM) teknolojileri keşfedilmiştir. 3B yazıcıların pazara girmesi 1995 yılında gerçekleşmiştir. İlk yüksek çözünürlüğe sahip ürünleri üreten 3B yazıcıyı 1996 yılında Z Corporation tasarlamıştır. 21. yüzyılda teknolojinin gelişmesiyle üretim maliyetlerinin düşmesi nedeniyle yaygın bir pazar haline gelmiştir. 2007 yılında Regrap adıyla ilk açık kaynak kodlarına sahip yazıcılar piyasaya çıkmıştır. Açık kodlar ile üç boyutlu yazıcılar gelişmeye başlamıştır. 2008 yılında Object Geometries şirketi aynı anda farklı malzemeler kullanarak ürün üretebilen Connex500 modelini geliştirmiştir. 2009 yılından itibaren başlangıçta sadece sanayi ağırlıklı kullanılan 3B yazıcılar Makerbot ve 3D Systems şirketlerinin geliştirmiş olduğu Cubify gibi modellerle artık evlerde de kullanılmaya başlanmıştır. 3B yazıcı teknolojisi tıp, uzay ve havacılık, kalıpcılık, otomotiv, dişçilik, askeri

donanım, mimari, kişisel araç gereç, heykeltçilik, kuyumculuk ve eğitim alanına kadar pek çok farklı alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu teknoloji ile yapılan akademik çalışmaların genelde ürün geliştirme, canlı doku ve organ baskısı gibi uzmanlık alanları, kişiye özel cerrahi cihazlar, yüz ve bacak protezleri, işitme yardımcıları, diş alanında dental uygulamalar, ortopedik implantlar ve diş hizalayıcılar gibi değişik alanlarda olduğu görülmektedir. Şaşırtıcı kullanım alanlarından bir diğeri ise yiyecek sektörüdür. Üç boyutlu yazıcılarda çok çeşitli türlerde sıvı, plastik, filament vb. hammaddeler kullanılmaktadır [49].



Şekil 2.1 : Charles HULL tarafından üretilen ilk 3B yazıcı [50].

Eklemeli imalat teknolojisi, 3B verileri kullanarak malzemenin katman katman birbiri ardına eklenmesiyle, karmaşık geometrili fiziksel parçaların hızlı bir şekilde imalatının gerçekleştirilmesidir [48]. 3B yazıcılarda kullanılan hammaddeler, PLA, ABS, PVA, PETG, Reçine gibi malzemeler, kullanılan metotlar; SLA, FDM, SLS, 3DP, Polyjet gibi yazdırma yöntemleri, kullanılan çeşitler; Kartezyen, Delta, Polar, Scara gibi çalışma prensibine sahiptir [51].

3B yazıcı teknolojilerinde birçok çeşit olsa da en yaygın yedi tür vardır. Tüm baskı teknolojileri, katmanlar adı verilen ayrı dilimler halinde parçalar ile oluşturulur [52].

- Fused Filament Fabrication (FFF, ayrıca Fused Deposition Modeling diye de biliniyor)
- Continuous Filament Fabrication (CFF)
- Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM, ayrıca Bound Powder Deposition diye de biliniyor)

- Selective Laser Sintering/Melting (SLS/SLM, ayrıca DMLS for metal diye de biliniyor)
- Direct Light Processing (DLP)
- Stereolithography (SLA)
- Binder Jetting

Eklemeli imalat teknolojisinde üretim için izlenmesi gereken adımlar, kesin ve sıralı olmamakla birlikte, genel olarak aşağıdaki gibi listelenebilir [53].

- Parçanın CAD tasarımının yapılması
- CAD modelinin STL dosya tipine dönüştürülmesi
- Üretim öncesi işlemlerin yapılması, girdi dosyasının oluşturulması ve oluşturulan dosyaların üretim için makineye aktarılması
- Katman kalınlığının belirlenmesi, malzeme seçilmesi ve parametrelerin belirlenmesi gibi makine ayarlarının yapılması
- Üretimin yapılması
- Parçanın tabladan ayrılması
- Üretim sonrası işlemlerin yapılması (destek yapılarının temizlenmesi, sıcak izostatik presleme vb.)
- Üretilen parçanın kullanılması

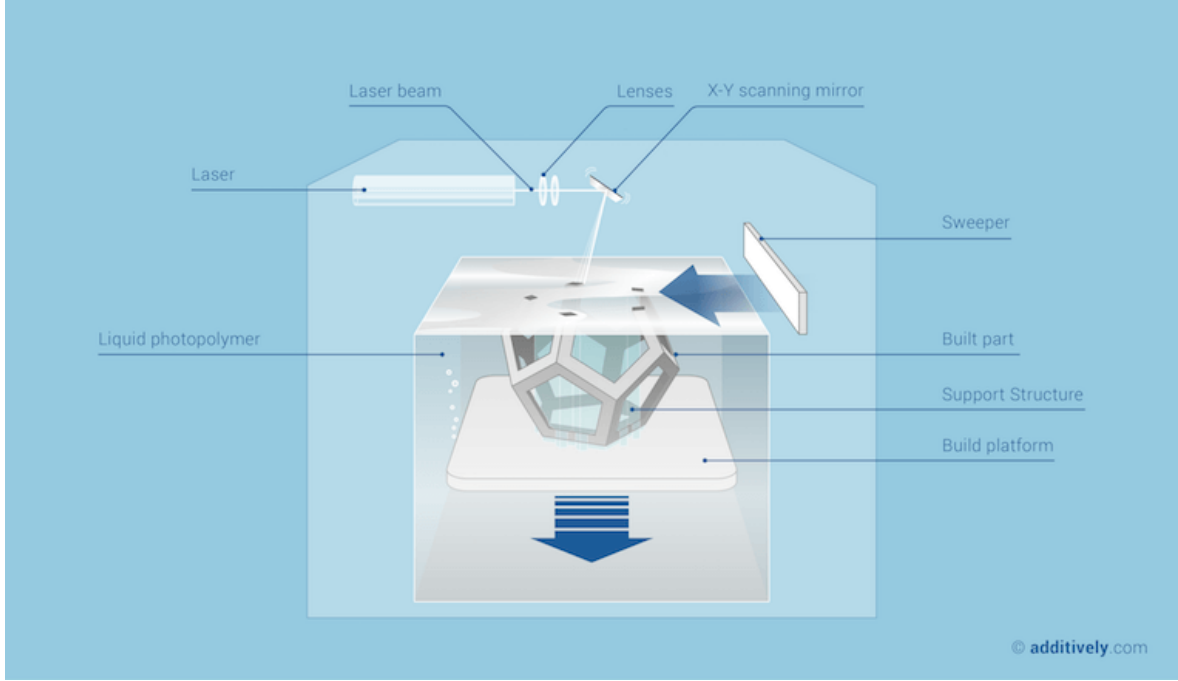
2.1.1 Polimerizasyon

Katı tabakanın elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Sıvı monomer reçinenin ultraviyole (UV) ışınlar yardımıyla kürleştirilmesi sonucunda kontur ve katman oluşturmaya dayalı bir metottur. Fotopolimerizasyon olarak da adlandırılır. Bazı polimerizasyon yöntemlerinde bölgesel kürleşme oluşturulur. Yeşil parça tamamıyla kürleşme gerçekleştirilmeden ek kürleşme yöntemlerine ihtiyaç duyar. Ek kürleşme yöntemi ön kürleşme fırınlarında UV ışınlarının gönderilmesi ile gerçekleştirilir. [54]

2.1.1.1 Stereolitografi (SLA)

Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının noktasal bir morötesi lazer ışını yardımıyla belirli bölgelerinin kürleştirilmesi işlemine Stereolitografi adı verilmektedir. En eski 3B yazıcı teknolojisi olduğu söylenebilir. Ancak günümüzde kullanımı hala devam etmektedir. Bu teknolojiye akışkan fotopolimer yani özel bir plastik hammadde çeşidi işlenerek katı bir forma dönüştürülmekte ve böylece baskı elde

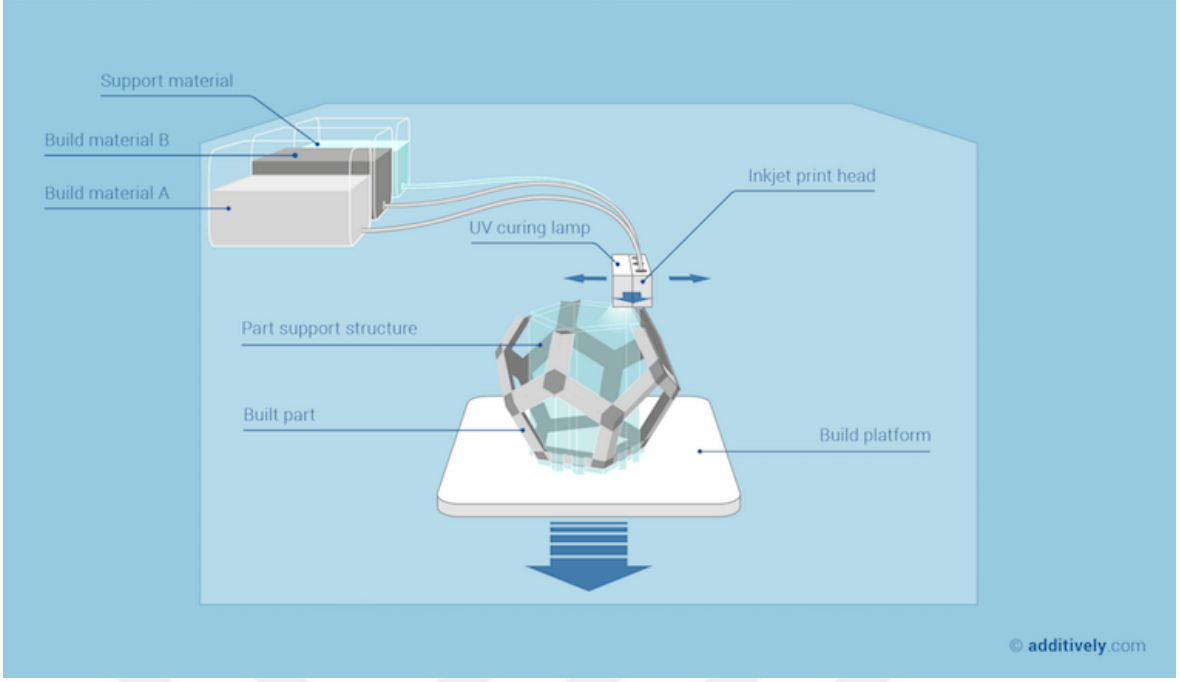
edilmektedir. Bilgisayarla kontrol edilen tarama sistemi parça geometrisine göre lazer ışını reçine tabakası üzerinde gezdirerek ilk katman oluşturulmaktadır. Parçanın bulunduğu platform katman aralığı kadar aşağı indirilmekte olup, bir kanatçık yardımı ile bir kat sıvı fotopolimer ilk katmanın üzerine sıvanmaktadır. Kürleştirme işlemi diğer katmanlar için de sırasıyla devam etmekte olup, tasarlanan parçanın imal edilmesi sağlanmaktadır. Üretim işlemi tamamlandıktan sonra parça reçine havuzundan çıkarılmaktadır. [48,55]



Şekil 2.2 : Stereolitografi (SLA) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.1.2 Polimer jet yöntemi (Polyjet & Multijet - PJ)

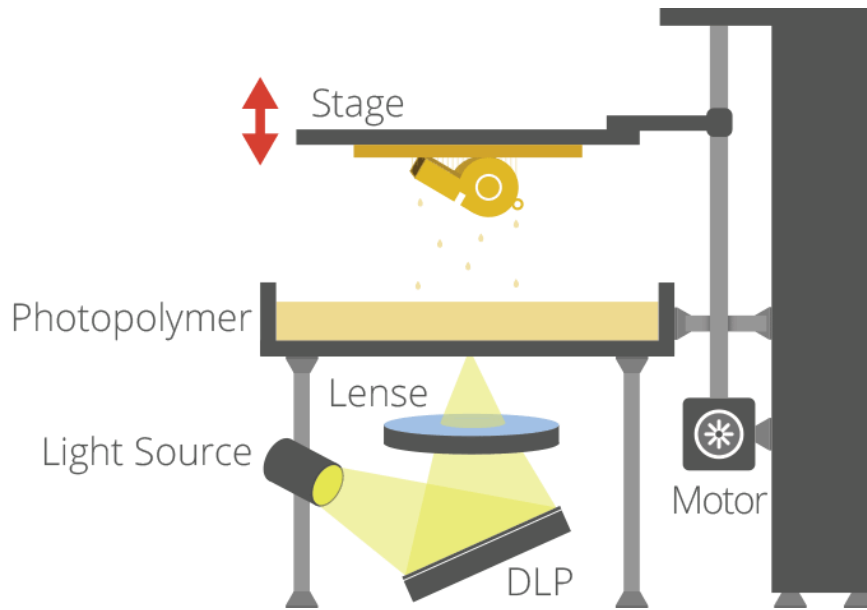
Çok düzgün yüzeylerin kısa sürede elde edildiği bu yöntemde kürlenebilir polimer malzeme nozuldan geçirilmekte olup, platform üzerinde istenilen geometriye UV ışınlarının yansıtılması ile anlık kürleşme sağlanarak ilk katman oluşturulmaktadır. Platform Z ekseninde hareket ederek bir sonraki katmanın oluşturulması için gerekli yüksekliği sağlamaktadır. Diğer katmanlar da benzer şekildeki işlemlerin tekrarlanmasıyla tasarlanan parça imal edilmiş olmaktadır. Baskı kafalarının yarısı parçayı oluşturan malzemeyi püskürtmekte olup, diğer yarısı da destek malzemesini püskürtmektedir. Bu yöntemle elastik malzemeler ve ısı atımı için soğutucu plakalar ABS benzeri malzemeler kullanılarak imal edilebilmektedir. Üç farklı renge sahip sarf malzeme ile renklerin farklı oranlarda karıştırılması sonucunda geniş renk skalası oluşturulabilmektedir. [48,54]



Şekil 2.3 : Polimer jet yöntemi (PJ) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.1.3 Dijital ışık yöntemi (Digital Light Processing - DLP)

Enerji kaynağı olarak, anlık katılaşmayı sağlayan dijital ışıkların kullanıldığı bir yöntemdir. Makinenin alt gövdesi üzerine yerleştirilmiş projektöre sahiptir. Projeksiyonun üzerinde cam hazne içerisindeki reçine yer almaktadır. Alt platform ışığı geçirebilmesi amacıyla şeffaf olarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde katmanlar platformun yukarı ve aşağı hareket ettirilmesi sonucunda oluşturulmaktadır. Daha çok küçük parçaların imal edilmesinde tercih edilmektedir. [48,54]



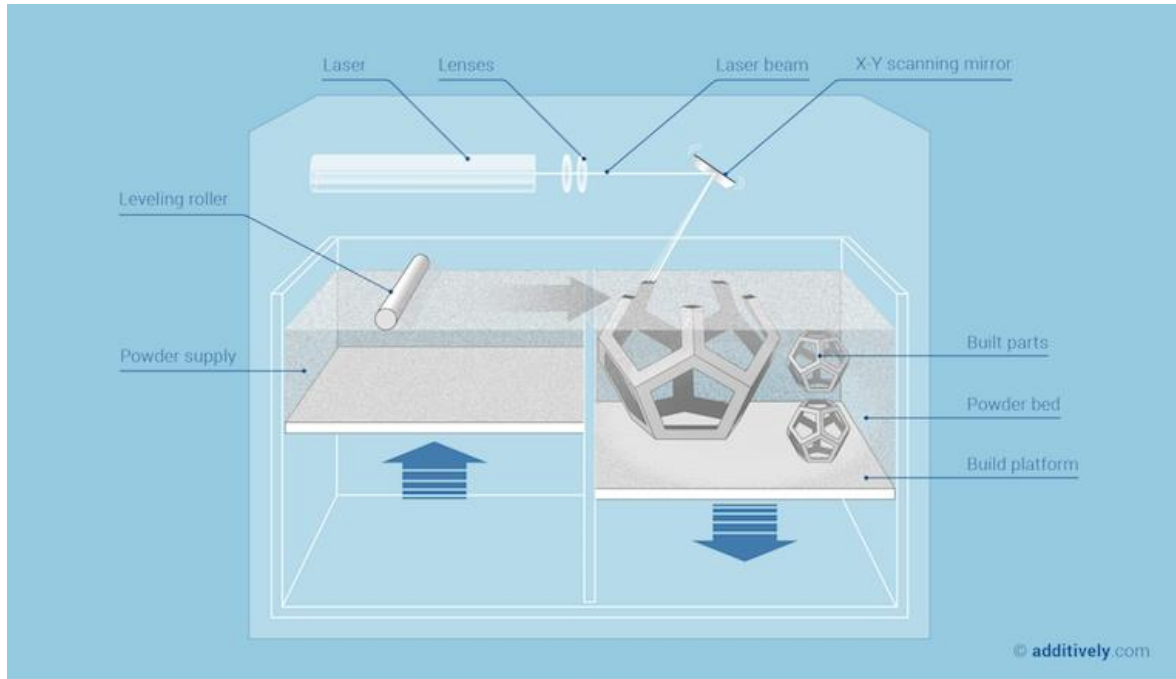
Şekil 2.4 : Dijital ışık yöntemi (DLP) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.2 Sinterleme ve ergitme

Malzemenin ergitilmesi, kontrol edilmesi ve katılaştırılmasına dayanan bir hızlı prototipleme yöntemidir. Bu teknoloji 1980'li yıllarda Carl Deckard ve Joe Beaman tarafından geliştirilmiştir. [48]

2.1.2.1 Lazerle sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS)

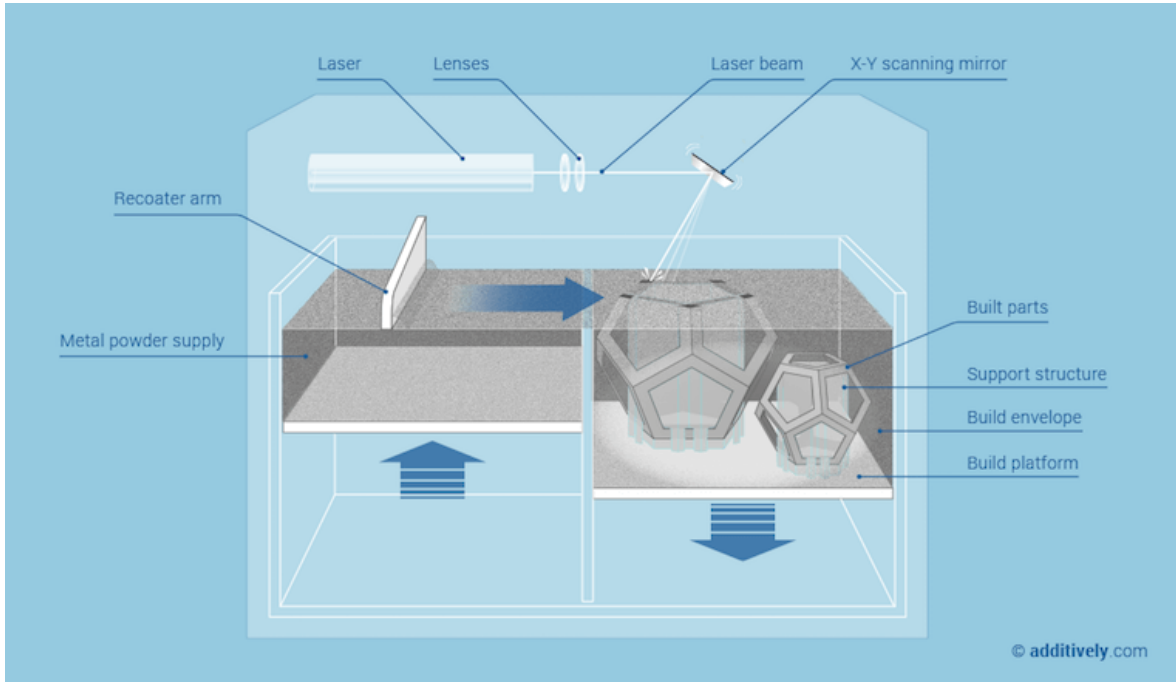
Parça imalatında toz malzemenin ve kaynak olarak lazer demetinin kullanıldığı üretim yöntemidir. Toz malzemeyle doldurulmuş olan bir havuz içerisinde yazdırma tablası bulunmaktadır. Tablanın aşağı yukarı hareketi etmesiyle katmanların oluşturulacağı hacim sağlanmaktadır. Tabla aşağı inmesiyle tabla üzerinde kalan toz malzemeye lazer uygulanmakta olup, hızlı bir şekilde ergime sağlanmaktadır. İlk katmanın ergime ve katılma süreçlerinden sonra platform aşağı indirilmektedir. İlk katman üzerine bir silindir yardımıyla bir sonraki katmanın üretilmesi için toz malzeme serilmektedir. Lazer kaynağından gelen ışın yardımıyla yeni katmanın katılaştırılması sağlanmakta olup, aynı zamanda önceki katmana da bağlanmış olmaktadır. Tasarlanan parçanın son katmanı imal edilene kadar benzer işlemler tekrarlanmaktadır. Bu yöntem sadece polimer malzemelere değil, aynı zamanda alüminyum, paslanmaz çelik, titanyum, nikel alaşımı, kobalt, krom, seramik ve poliamid gibi malzemelere de uygulanabilmektedir. [48]



Şekil 2.5 : Lazerle sinterleme (SLS) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.2.2 Lazer ile ergitme (Selective Laser Melting - SLM)

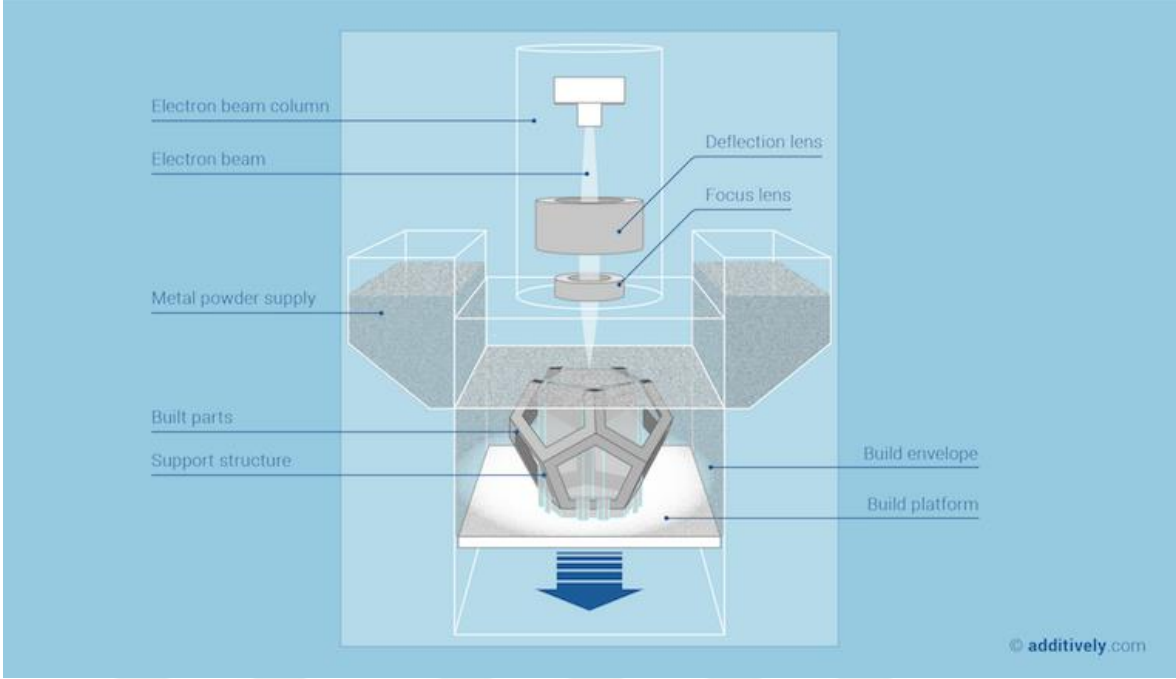
Tam yoğunluklu malzeme üretiminde kullanılan SLM metodu, toz parçacıklarının eriyip birbirine tutunmasıyla üretimin gerçekleştirildiği, tam ergime yapılarak saf metal parçaların imal edilebildiği bir 3B yazdırma yöntemidir. Yanıcı ve tutuşucu gazların oluşumu engellenmesi amacıyla içeriden gaz tahliyesi yapılmakta veya Ti ve Mg gibi koruyucu malzemeler eklenmektedir. Üretim hassasiyetleri düşüktür. [48]



Şekil 2.6 : Lazer ile ergitme (SLM) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.2.3 Elektron demeti ile ergitme (Electron Beam Melting - EBM)

Bu yöntem maliyet, ağırlık ve zamandan tasarruf edilmesini sağlayan alışılmamış üretim yöntemlerinden biridir. Elektronların kaynak olarak kullanıldığı bu yöntemde, yüksek hıza sahip elektronlar metal tozun üzerine gönderilmektedir. Bu noktada kinetik enerji aniden termal enerjiye dönüşmektedir. Sıcaklık artışının ergitme sıcaklığının üzerine çıkması, titanyum tozunun ergimesine neden olmaktadır. Bu yöntemle çalışan makineler, kontrol paneli ve turbo moleküler pompa ile tahliyeyi sağlayan işlem çemberlerine sahiptirler. [54]



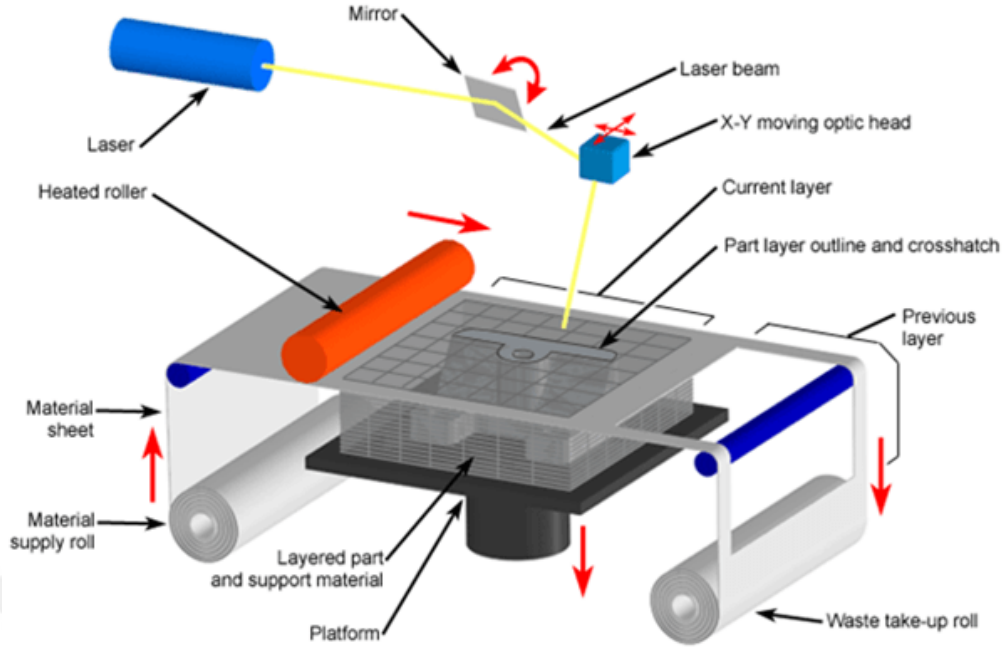
Şekil 2.7 : Elektron demeti ile ergitme (EBM) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.3 Katman laminasyonu ile üretim (Layer Laminated Manufacturing - LLM)

Folyo veya sac halindeki kağıt, plastik, metal veya seramik malzemelerin yapıştırıcı, ultrasonik veya kaynak işlemleri kullanılarak birleştirilmesi ve lazer, bıçak veya freze ile istenilen geometriye kesilmesi sonucunda gerçekleştirilen eklemeli imalat yöntemidir. Masif ve büyük parçaların işlenme sürelerinin kısa olması en büyük avantajıdır. [54]

2.1.3.1 Lamine nesne üretimi (Laminated Object Manufacturing - LOM)

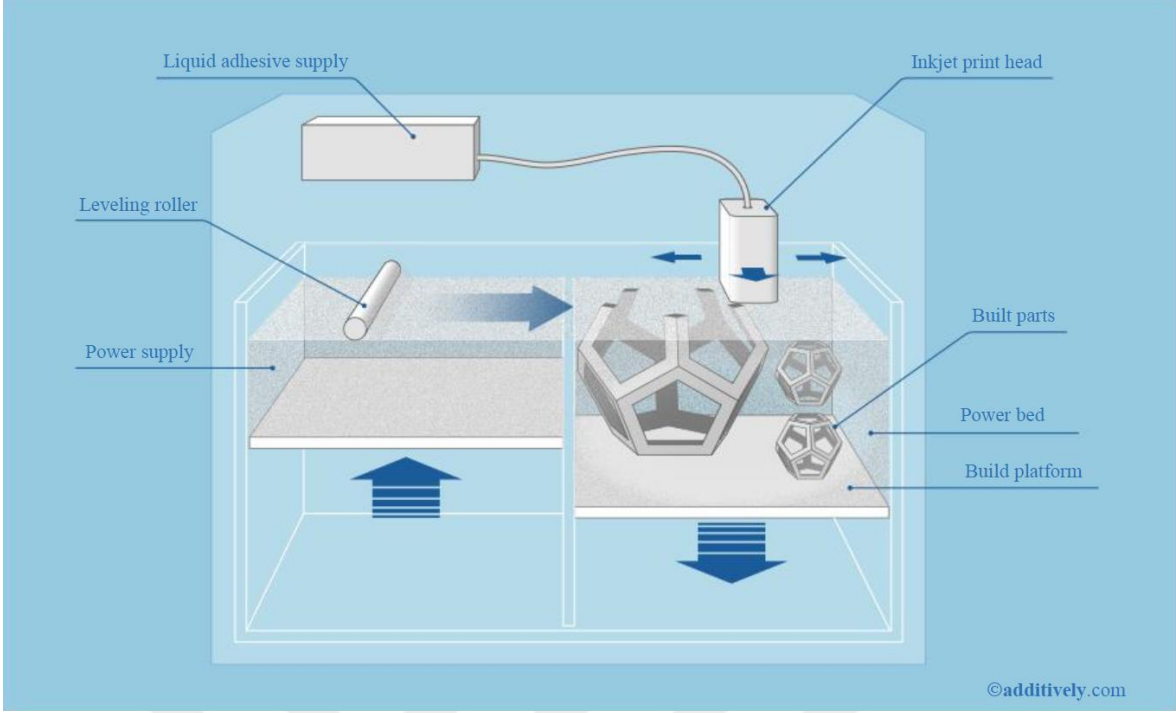
Bilinen en eski LLM yöntemlerindedir. 0,2 mm kalınlığa sahip malzemelerin birbirine yapıştırıcı ile bağlanmasıyla üretim başlatılmaktadır. Isı ile aktif hale gelen bir yapıştırıcı seçilmektedir. Tablanın Z eksenine doğrultusunda hareket etmesiyle pozisyonlama sağlanmaktadır. Yapıştırılmış katmanda kontur kesim işleminde lazer kullanılmaktadır. İşlenen parça tabla üzerinde konumlandırılmakta olup, merdanelerin ısıtılmasıyla yapıştırıcı aktif hale getirilmektedir. Kaynaktan gönderilen lazer sayesinde malzemenin kalınlığına göre istenilen şekilde kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Lazerle kesim işleminin gerçekleştirilmesi sonucunda parçanın konturu oluşturulmaktadır. Üretim işleminden sonra parça fazla malzemedan ve destek malzemesinden arındırılmakta olup, nihai parça imal edilmiş olmaktadır. [54]



Şekil 2.8 : Lamine nesne üretimi (LOM) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.1.4 Toz bağlayıcı püskürtme ile üretim

Baskı tablası üzerine 50 µm boyutlu toz partikülleri serilmekte olup, bu toz partiküllerine istenilen konumlarda olacak şekilde çok ağızlı bir nozuldaki bağlayıcı yapıştırıcı püskürtülerek, toz partiküllerinin birbirine bağlanması sağlanmaktadır. Böylece ilk katman üretilmiş olmaktadır. Sonrasında ilk katmanın üzerine bir merdane yardımıyla bir sonraki katmanın üretilmesi amacıyla toz serilmekte olup, benzer işlemlerin tekrarlanmasıyla bütün katmanlar imal edilmekte ve böylece tasarlanan parça elde edilmektedir. Bu yöntemde üretilen katmanların altında katılmış destekler kullanılmayıp, her katmanda katılaştırılmayan toz partikülleri, bir sonraki katmana destek olmaktadır. Böylece nihai parça herhangi bir katı desteğe gerek kalmadan üretilmekte olup, parçayı çevreleyen ve aynı zamanda destek görevi gören toz partikülleri fırça, vakum temizleyici vb. gereçlerle temizlenmektedir. [48]

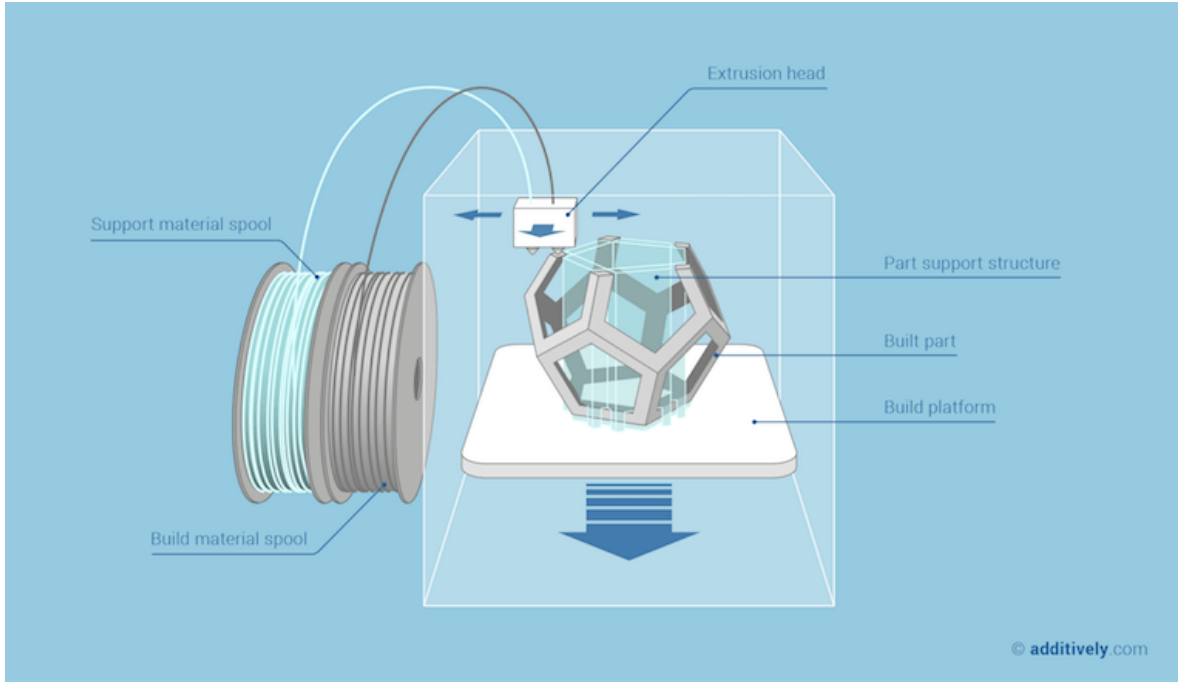


Şekil 2.9 : Toz bağlayıcılı püskürtme ile üretim 3B yazıcı şematik görüntüsü [56].

2.1.4.1 Ekstrüzyon - eriyik yağma modelleme (EYM)

Eklemeli imalatla en yaygın olarak kullanılan 3B yazdırma yöntemidir. Bu yöntemde 1,75mm veya 2,85mm çapında makara halindeki termoplastik filamentler hammadde olarak kullanılmaktadır. 3B yazıcıya beslenen filament, besleme motoru yardımıyla baskı kafasına doğru itilir. Baskı kafası içerisindeki önceden ısıtılmış nozulun haznesine ulaşan filament, bu bölgede ergiyerek yarı ergimiş hale gelmektedir. Yarı ergimiş haldeki termoplastik malzeme, filament besleme motorunun nozul içerisinde hala filament beslemesi neticesinde nozulun çıkış kısmına itilerek nozulu terk etmektedir. Baskı kafasının baskı tablası üzerinde belirlenen koordinatlardaki hareketleri gerçekleştirilmesi esnasında, nozuldan çıkan yarı ergimiş termoplastik baskı kafasının izlediği yollara serilmektedir. Nozuldan çıkan yarı ergimiş termoplastik, baskı kafasının kendisinden uzaklaşmasıyla ve baskı kafası içerisindeki soğutma fanlarının da etkisiyle soğuyarak katılaşmaktadır. Böylece ilk katman üretilmiş olmaktadır. İlk katman üretiminden sonra baskı tablasının ikinci katman kalınlığı kadar Z ekseninde aşağı hareket etmesiyle ikinci katman üretimi başlamaktadır. Bütün katmanlar için benzer işlemler gerçekleştirilerek tasarlanan parça üretilmiş olmaktadır. Bu yöntemde tasarlanan parçaların üretiminde destek malzemesi olarak ya kullanılan termoplastiğin kendisi ya da ikinci bir baskı kafası içerisine yerleştirilmiş olan suda çözünen filamentler kullanılmaktadır. Buna göre tasarlanan parça üretimi yapıldıktan sonra destek malzemeleri uygun yöntemle parçadan uzaklaştırılmakta ve nihai ürün elde edilmiş

olmaktadır. EYM 3B yazıcılarda birçok filament malzemesi kullanılmakta olup, bunlardan en yaygın olanları ABS, PLA, PC, PETG, NAYLON, PVA malzemeleridir.



Şekil 2.10 : Eriyik yığıma modelleme (EYM) 3B yazıcı şematik görüntüsü [54].

2.2 Alüminyum Malzemeler

Tabiatta en çok bulunan elementlerden biri olan alüminyum, mühendislik yapılarında çelikten sonra en çok kullanılan metal türüdür. Sünek bir yapıya sahip olan alüminyum malzemelerin yoğunluğu genel olarak $2,71 \text{ g/cm}^3$ seviyelerindedir. Alüminyum alaşımlarının bir kısmının akma mukavemeti 500MPa değerinin üzerine çıkabilmektedir. Bu tür alüminyum alaşımları hafiflik ve mukavemetin aynı anda istenildiği uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Düşük yoğunluk ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı gıda, havacılık, inşaat, otomotiv, tıp, uzay ve savunma sanayi vb. birçok alanında kullanılmaktadırlar. [57]

Alüminyum alaşımlarının diğer metallere göre üstün oldukları özellikler şu şekilde sıralanabilir: [57]

- Hafif olmaları,
- Hafif olmalarına rağmen alaşımlı alüminyumların yüksek mukavemetli olmaları,
- Geri dönüştürülebilir olmaları,
- Korozyon dirençlerinin yüksek olması,
- İşlenebilme ve şekillendirilebilme kabiliyetlerinin yüksek olması,

- Elektrik ve ısı iletimlerinin yüksek olması.

Yüksek kimyasal etkileşime sahip olan alüminyumun oksijene karşı ilgisi oldukça fazladır. Hava ile temas etmesi sonucunda, oksijen ile birleşerek alüminyum oksit (Al_2O_3) meydana gelir. Böylece alüminyum malzemenin yüzeyi alüminyum oksit tabakası ile kaplanmış olur. Bu örtü tabakasının SEM ile yapılan incelemelerinde sık ve gözeneksiz bir yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bu örtü tabakası sahip olduğu yapı sayesinde alüminyum malzemedeki oksitlenmenin daha fazla ilerlemesini engellemekte olup, alüminyum malzemenin bu özelliğinden dolayı korozyona karşı direnci de artmaktadır. [58]

2.2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri, içerisinde bulundurduğu alaşım elementlerine ve alüminyum malzemenin mikro yapısına göre değişiklik göstermektedir. Alüminyum malzemeye eklenen başlıca alaşım elementleri bakır, çinko, magnezyum, mangan ve silisyumdur. Dövme ve döküm alaşımları olarak 2 gruba ayrılan alüminyum alaşımlarının büyük bir bölümüne ısıtma işlemi uygulanabilmektedir. Plastik deformasyon kabiliyeti oldukça yüksek olan dövme alüminyum alaşımlarına kolayca şekil verilebilmektedir. Genellikle sürekli döküm yöntemiyle blok olarak üretilen alüminyum alaşımlarına, sonrasında homojenleştirme tavlama, haddeleme veya ekstrüzyon işlemleri uygulanarak nihai ürüne dönüştürülmektedirler. Genellikle içerisinde bulundurduğu alaşım elementlerine ve katkı oranlarına, ayrıca ısıtma işlemi uygulanabilme durumuna göre dövme alüminyum alaşımları sınıflandırılmaktadırlar. [57,58]

Genellikle Al xxxx-Tx veya AA xxxx-Tx şeklinde numaralandırılan alüminyum alaşımlarında, ilk 4 hane (xxxx) alüminyum alaşımında bulunan elementlerin içeriği ile ilgili bilgiler verirken, son 2 hane (Tx) de alüminyum alaşımına uygulanan ısıtma işlemi hakkında bilgi vermektedir.

2.2.1.1 1xxx serisi alaşımlar

Genelde saf alüminyum serisi olarak bilinen bu alaşım grubunun en az %99 alüminyum içeriğine sahip olması beklenir. Isıtma işlemi uygulanmamış alüminyum serisi olup, elektrik ve kimya sanayisinde kullanılmaktadırlar. [57,58]

2.2.1.2 2xxx serisi alaşımlar

Temel alaşım elementi bakır olan alüminyum alaşımlarıdır. İçeriğinde %4,5 Cu ve %1,5 Mg bulunan ve bu grup içerisinde mekanik mukavemeti en yüksek olan alüminyum alaşımı Al 2024 alaşımıdır. Magnezyum başta olmak üzere diğer alaşım elementlerini de bulundurabilen 2xxx serisi, hafiflik ve yüksek mukavemetin ihtiyaç olduğu dişli ve bağlantı elemanlarında, süspansiyon parçalarında, voltaj yükselticilerinde, otomotiv, vagon, uçak, mühimmat sanayisinde, perçinler ve vida mekanizmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. [57,58]

2.2.1.3 3xxx serisi alaşımlar

Temel alaşım elementi mangan olan alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşım grubuna mangan ilave edilmesiyle, çekme mukavemetinde artış, yüksek süneklik ve iyi korozyon direnci özellikleri elde edilmektedir. 1xxx serisi alaşımlara göre %20 daha fazla mukavemet değerlerine sahip olup, içlerinde en çok kullanılanı Al 3003 alüminyum alaşımıdır. Boru gıda kutuları, yağ ve sıvı tankları vb. üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. [57,58]

2.2.1.4 4xxx serisi alaşımlar

Temel alaşım elementi silisyum olan alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyuma yeterli miktarda silisyumun ilave edilmesiyle oluşturulan alüminyum alaşımının gevrekleşmesine müsaade edilmeden ergime derecesi azaltılmış olmaktadır. Bu özellikleri sayesinde 4xxx serisi alüminyum alaşımları, alüminyum birleştirme işlemlerinde lehim ve kaynak teli olarak kullanılabilirler. Ayrıca termal genleşme katsayısı düşük, korozyon dayanımı ve aşınma direnci yüksek olan 4xxx serisi alüminyum alaşımları, otomotiv parçası üretiminde, kaynak gerektiren yapılarda ve levha üretiminde kullanılmaktadırlar. [57,58]

2.2.1.5 5xxx serisi alaşımlar

Temel alaşım elementi magnezyum olan alüminyum alaşımlarıdır. Alaşım içerisindeki magnezyum oranının artırılmasıyla mukavemet ve sertlik değerlerinin arttığı, süneklik özelliğinin azaldığı alüminyum alaşımlarıdır. Özellikle deniz koşullarındaki iyi korozyon direnci özelliğinden dolayı, deniz ortamında çalışması gereken yapıların, gemi ve bot vb. yapıların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. [57,58]

2.2.1.6 6xxx serisi alaşımlar

Temel alaşım elementi olarak magnezyum ve silisyumun bir arada bulunduğu alüminyum alaşımlarıdır. Bu alaşım serisi ısıl işlem uygulanabilen ve içerisinde magnezyum silikat (Mg_2Si) oluşturabilecek oranlarda magnezyum ve silisyum içeren alüminyum alaşımlarıdır. Orta dayanımlı, işlenebilen, Şekil verilebilen, kaynak yapılabilen ve korozyona karşı dirençli olan bu alaşımlar, ekstrüzyon ile imal edilen parçalarda, ulaşım sanayisinde, köprülerde, mimari uygulamalarda ve kaynak gerektiren yapılarda kullanılabilmektedirler. [57,58]

2.2.1.7 7xxx serisi alaşımları

Temel alaşım elementi çinko olan alüminyum alaşımlarıdır. Alaşımlara %5 oranında çinko ilave edilmesiyle yüksek çekme dayanımı değerleri elde edilir. Bu alaşımlara bir miktar magnezyum ilave edilmesiyle ısıl işlem uygulanabilir hale getirilebilirler. Alüminyum alaşımları içerisinde en yüksek mukavemet değerlerinin elde edildiği 7xxx serisi alüminyum alaşımları, uçak parçası, kamyon kasası, tavan vinci, roket ve savunma sanayi gibi yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. [57,58]

2.2.1.8 8xxx serisi alaşımları

Temel alaşım elementi lityum olan alüminyum alaşımlarıdır. Bu serideki alaşımlara gerektiğinde bir miktar kalay ilavesi de yapılabilmekte olup, tokluğu ve yorulma direnci yüksek alüminyum alaşımları elde edilebilmektedir. Üretim maliyetlerinin diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek olduğu 8xxx serisi alüminyum alaşımları, uzay ve uçak sanayi yapı malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. [57]

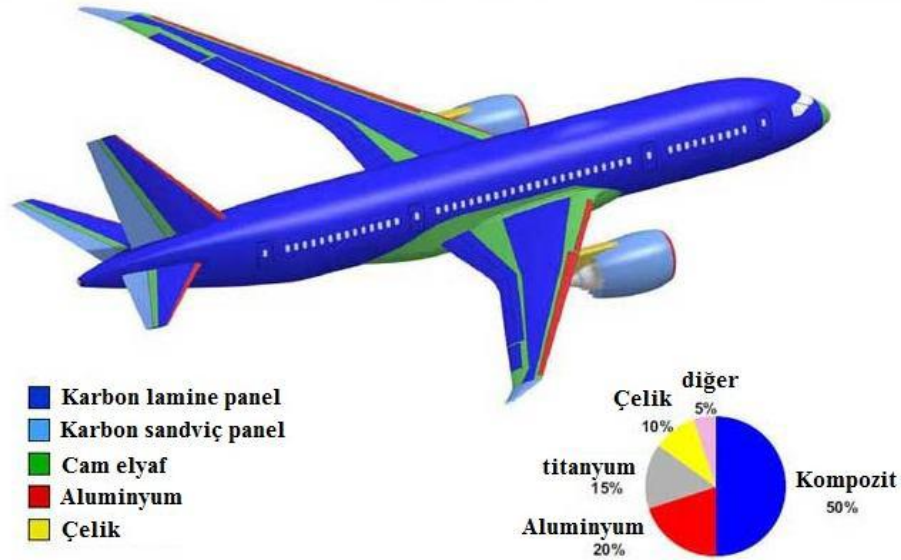
2.3 Kompozit Malzemeler

Makroskobik düzeyde bir araya getirilmiş olan ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşan yapı malzemeleri “Kompozit malzemeler” olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzeme bileşenlerinden biri matris, diğerisi ise takviye fazıdır. Takviye fazı fiber, pul veya parçacık Şeklinde olabilmektedir. Matris ise genellikle sünek malzemelerden oluşmaktadır. Kompozit malzemelere örnek olarak fiberle takviye edilmiş olan epoksi, elik çubuklarla takviye edilmiş olan beton verilebilir. [59]

Kompozit malzemelerin ilk olarak inşaat sektöründe kullanıldıkları bilinmektedir. İnşaat sektöründe ilk kullanılan yapı malzemesi, çamurun saman ile karıştırılmasından elde

edilen kompozit malzemedir. 1500'lü yıllarda Mısırlıların evlerinde bambu ile takviye edilmiş çamur duvarların olduğu, 1800'lü yıllarda da dövme kılıçlarda tabakalı metallerin kullanıldığı belirlenmiştir. 1950'li yıllarda ise kompozit malzemeler otomotiv sektöründe otomobil gövde malzemesi olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Yapısal uygulamalarda alüminyum ve çelik yerine kompozit malzemelerin kullanılmasıyla daha iyi performans elde edilmiş olup, böylece kompozit malzemelerin kullanımı hızlı bir şekilde artış göstermiştir. [60]

Kompozit malzemelerin kullanım alanları günümüzde oldukça geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Bunlardan bir kısmı; deniz araçları, elektronik eşyalar, mobilya, medikal araç-gereçler, otomobiller, rüzgar türbinleri, spor ekipmanları, uçaklar ve uzay araçları olarak sıralanabilir. Kompozit malzemelerin birçok alanda olduğu gibi uçak ve uzay endüstrilerinde kullanılmasının temel sebebi kütlelerin hafifletilmesidir. Kompozit malzemelerin kullanılmasıyla yaklaşık olarak %25~30 aralığında kütlelerin hafifletilmesi mümkün olmaktadır. Günümüz uçaklarında kompozit malzeme kullanım oranı bazı uygulamalarda %50 ve üzeri seviyelere ulaşmaktadır. Şekil 2.11'de bununla ilgili bir örnek teşkil etmesi açısından Boeing 787'de kullanılan malzemeler ve oranları gösterilmiştir. [60]



Şekil 2.11 : Boeing 787'de kullanılan malzeme oranları [60].

Otomotiv sektöründe genbel olarak şase, gövde panelleri ve diğer yapısal ekipmanlarda düşük ve orta karbonlu çelik malzemeler kullanılmakta olup, kütlelerin hafifletilmesi amacıyla bu parçaların yerine kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmaktadır. Kompozit malzemeler kütlelerin hafifletilmesinin yanında ayrıca, ses

yalıtımı, titreşimlerin azaltılması, koronyon direnci, üretim ve kalıp maliyetlerinin düşürülmesi gibi avantajlar da sağlamaktadırlar. Bunların dışında can yeleşği, hız botları, yolcu gemileri vb. deniz ekipman ve araçlarında da hafiflik ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadırlar. [60]

2.3.1 Matris türüne göre sınıflandırma

Matris, kompozit malzemelerin temel elemanlarından biri olup, takviye malzemesine göre üstlendiği görevler farklılık göstermektedir. Partikül takviyeli kompozit malzemelerde matris, parçacıkları bir arada tutarak yapı bütünlüğünü sağlamaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde ise matris, fiberlerin en uygun sıralamayla dizilmesini sağlayarak, kompozit malzemeye uygulanmış olan yükün homojen bir şekilde fiberlere iletilmesini sağlamaktadır. Elyaf (fiber) takviyeli kompozit malzemelerde yükün çok düşük bir kısmı matris üzerindeyken, yükün çoğunluğu fiberler tarafından taşınmaktadır. Kompozit yapının genel olarak rijitliğini sağlayan matris, sünek ve homojen bir yapıda olup, fiber elemanlardan daha düşük elastisite modülü değerlerine sahiptir. [61]

Matrisin bir diğer temel görevi ise, takviye elemanlarını kimyasal reaksiyonlar, mekanik aşınmalar vb. çevresel etkenlerden korumaktır. Diğer bir görevi de, fiber malzemelerde iyi bir ıslanma meydana getirmek ve böylece fiber lifleri arasındaki mesafeyi korumaktır. Böylece herhangi bir fiber elemanda meydana gelebilecek çatlağın diğer diğer fiberlere aktarılmasını önlemekte olup, olası bir kırılmanın ilerlemesini durdurmaktadır. Ayrıca elyafların gevrek yapısına plastiklik ve süneklik özellikleri ilave ederek kompozit yapının bütünlüğünün kritik gerilme değerlerine kadar korunmasını sağlamaktadır. [61]

Kompozit malzemelerde ortam şartları ve kullanım yerine göre matris malzeme seçimi yapılmakta olup, kompozit malzemeler matris türüne göre aşağıda belirtilen şekilde sınıflandırılabilir. [61]

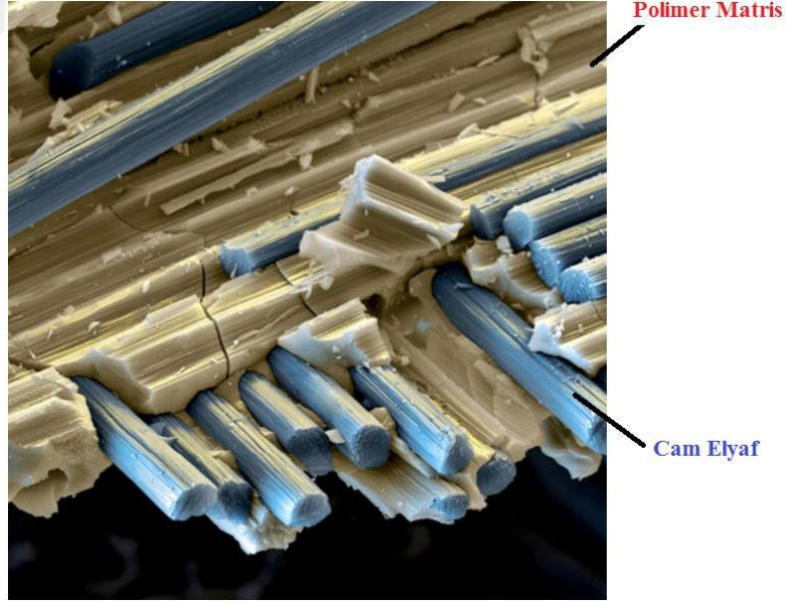
- Polimer matris kompozitler (PMK)
- Metal matris kompozitler (MMK)
- Seramik matris kompozitler (SMK)
- Karbon-Karbon kompozitler (KKK)

2.3.1.1 Polimer matris kompozitler (PMK)

Monomer adı verilen küçük molekül yapıların bir araya gelmesiyle elde edilen zincirlerin oluşturduğu sentetik yapı polimer malzeme olarak adlandırılmaktadır. Polimerler

amorf bir yapıya sahip olup, kolay işlenebilir ve düşük maliyetli olmasından dolayı kompozit malzemelerin büyük çoğunluğunda matris malzeme elemanı olarak kullanılmaktadırlar. Karmaşık geometrilerde dahi kolay üretilebilir olması, yüksek korozyon direnci, yüksek dayanım/kütle oranı, düşük ısı ve elektrik iletkenliği vb. özellikleri polimer matris kompozitlerin başta sağlık sektörü olmak üzere, deniz taşıtları, otomotiv sanayisi, inşaat ve yapı sektörü gibi birçok alanda kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Polimer matris kompozitlerin düşük çalışma sıcaklığına, yük altında visko-elastik özellik göstermesine ve düşük elastisite modülüne sahip olmalarından dolayı kullanım alanlarının sınırlandırıldığı bilinmektedir. [61]

Polimer matris kompozitleri; termoset, termoplastik ve kauçuk olmak üzere 3 gruba ayırmak mümkündür. Polyester ve epoksi reçineler, diğer polimer matris kompozit malzemelere göre daha çok tercih edilmektedir. Polimer matris kompozit malzemelerde genel olarak cam fiber, bor fiber, karbon fiber ve kevlar fiber takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Şekil 2.12). Elle sıvama, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon, pultrüzyon, sıvı akış tekniği, tel sarma ve takviyeli reaksiyon yöntemleri yaygın olarak kullanılan polimer matrisli kompozit malzeme üretim yöntemleridir. [60]

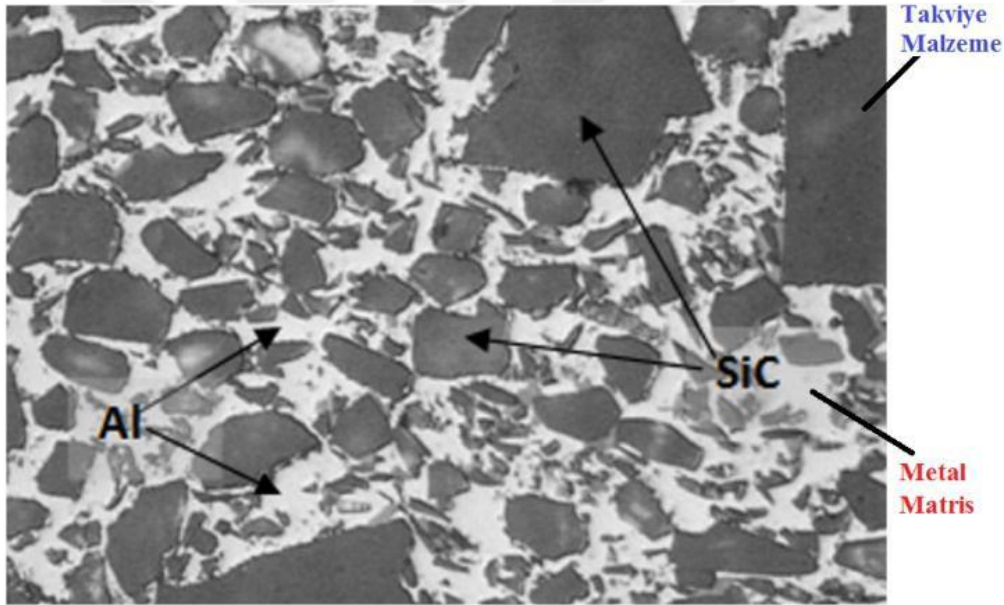


Şekil 2.12 : Polimer matrisli kompozitler [60].

2.3.1.2 Metal matris kompozitler (MMK)

Başta yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere belirli fiziksel ve mekanik özellikleri elde etmek için metal ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozit yapılardır. Genel olarak çalışma sıcaklıkları 200-800°C aralığında değişmektedir.

Takviye elemanlarına göre sürekli, süreksiz ve partikül takviyeli metal matrisli kompozitler kullanılmaktadır. Nispeten düşük erime sıcaklıkları sayesinde fiberlere zarar vermemesi ve düşük yoğunluklu olması vb. özelliklerinden ötürü alüminyum, bakır ve alaşımları, demir, magnezyum ve titanyum en çok tercih edilen metal matris malzemeleridir. Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerde alümina, bor, grafit, karbon ve silisyum karbür en çok kullanılan takviye elemanlarıdır. Partikül takviyeli ve süreksiz fiber takviyeli kompozit malzemelerde ise alümina, bor karbür, silisyum karbür ve titanyum karbür en çok kullanılan takviye malzemeleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.13). Yüksek elastisite modülü, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek mekanik performans, yüksek özgül modül, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal kararlılık, tekrar üretilebilirlik, yüksek süneklik ve tokluk metal matris kompozit malzemelerin öne çıkan özellikleridir. Metal matris kompozit malzemeler bu özellikleri sayesinde askeri alanlar, ulaşım sektörü, uzay ve havacılık endüstrileri gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir. [61]



Şekil 2.13 : Metal matrisli kompozitler [60].

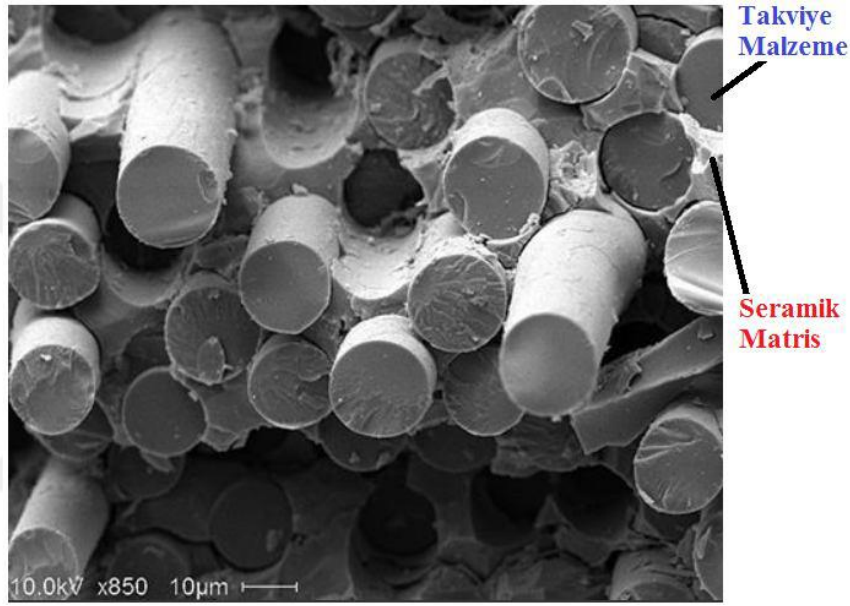
Metal matrisli kompozit malzemeler, polimer matrisli kompozit malzemelerle kıyaslandığında üstün mekanik özelliklere, üstün rijitliğe, yüksek sıcaklık dayanımına, yüksek kayma ve basma dayanımına sahiptirler. Nem alma özellikleri yok denecek kadar azdır, alev almazlar ve radyasyona karşı dayanımları yüksektir. [60]

2.3.1.3 Seramik matris kompozitler (SMK)

Seramik matrisli kompozit malzemeler (Şekil 2.14), polimer ve metal matrisli kompozit malzemelerin yetersiz kaldığı yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir.

Yüksek çalışma sıcaklığının yanı sıra yüksek aşınma direnci, kimyasal kararlılık, yüksek korozyon direnci, sertlik ve düşük yoğunluk vb. özelliklere sahiptirler. Seramik malzemeler yüksek basma dayanımına sahip olmalarına karşın, çekme dayanımı düşük, darbeli yüklemelerde başarısız ve gevrek bir yapı sergilemektedirler. Bu dezavantajların azaltılması amacıyla karbon ve silisyum karbür gibi malzemelerin fiberde kullanılması yapının kırılma tokluğunu artırmaktadır. [61]

Seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle otomobil motor parçaları, gaz türbini bıçakları gibi yüksek sıcaklığın olduğu sistemlerde kullanılırlar. [60]

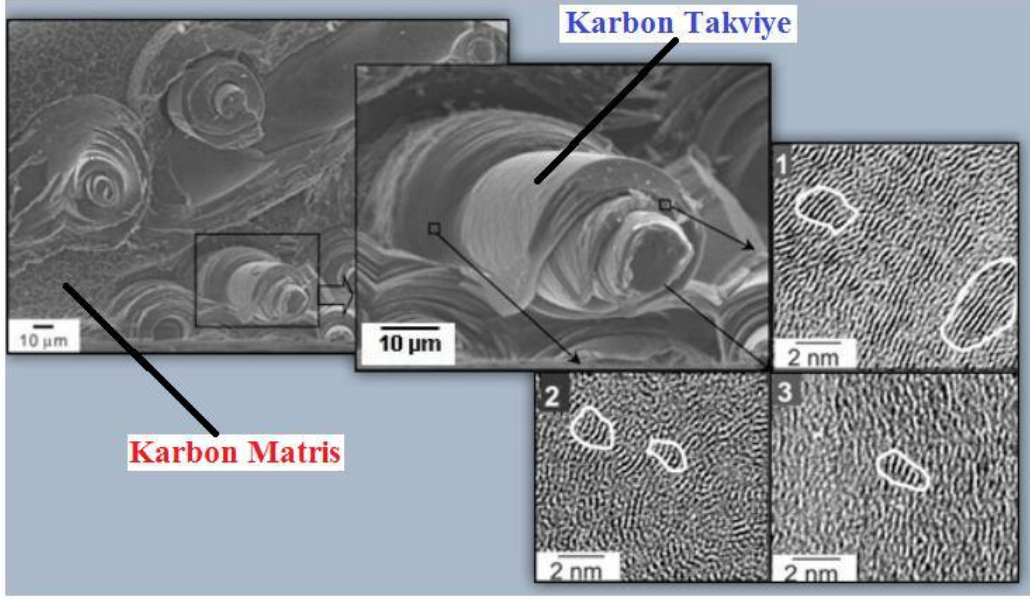


Şekil 2.14 : Seramik matrisli kompozitler [60].

2.3.1.4 Karbon-karbon kompozitler (KKK)

Karbon-karbon kompozit malzemeler (Şekil 2.15), Hem matris hem de takviye elemanında karbonun kullanıldığı çok yüksek sıcaklıklarda yüksek boyutsal ve mekanik kararlılık gösteren kompozit malzemelerdir. 3315°C sıcaklıktaki ortamlarda dahi kullanılabilen bu kompozitler; yüksek çekme ve basma mukavemeti, yüksek çatlama dayanıklılığı, termal şok direnci, düşük termal genleşme, düşük yoğunluk, yüksek yorulma ömrü ve boyutsal kararlılık gibi özellikleri sayesinde uzay araçları burun kısmı ve uçak frenleri gibi spesifik öneme sahip parçalarda kullanılmaktadır. [61]

Karbon-karbon kompozit malzemeler, toksik olmayan ortamda yaklaşık 3000°C'ye kadar stabil olmalarına rağmen, bir yüzey kaplama işlemine tabi tutulmamış ya da kimyasal olarak modifiye edilmemişlerse, oksijen buluna ortamlarda 400~500°C'de bozulabilmektedirler. [60]



Şekil 2.15 : Karbon-karbon kompozitler [60].

2.3.2 Takviye türüne göre sınıflandırma

Matris içerisinde yer alan ve kompozit malzemeye istenilen özelliklerin kazandırılması amacıyla kullanılan malzemeler takviye elemanı olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzeme içerisindeki temel görevi yapı mukavemetini artırmak olan takviye elemanları, kompozit malzemeye uygulanan yükün yaklaşık olarak %90'ını taşımaktadırlar. Takviye elemanlarının kompozit yapı içerisinde kullanılmasıyla yapıya darbe dayanımı, yüksek elastik modül, elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı, rijitlik, sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek yorulma ömrü vb. özellikler kazandırılmaktadır. [61]

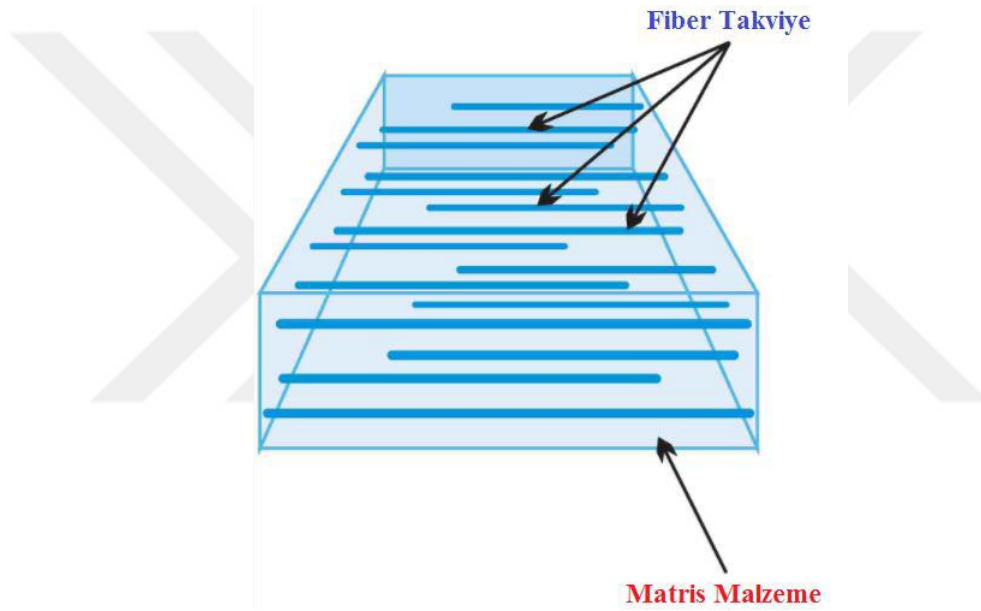
Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının çoğunluğu lifli bir forma sahip olup, bu lifler kompozit yapının kütlelerini düşürmenin yanında, yapının dayanımını da önemli derecede artırmaktadır. Kompozit malzemeler içerisinde kullanılan takviye türüne göre aşağıda belirtilen şekilde sınıflandırılabilir. [61]

- Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler
- Parçacık (partikül) takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Hibrit (Karma) kompozitler

2.3.2.1 Elyaf (Fiber) takviyeli kompozitler

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin bir kısmı kütsel formda düşük mekanik performans ve gevrek bir yapı sergiledikleri nedeniyle tercih edilmemelerine

rağmen, bu malzemeler arasından bor, cam, karbon ve silisyum karbür gibi malzemelerin kütleli formdaki kusurları, bu malzemelerin lif haline getirilerek kompozit malzemeler içerisinde kullanılmasıyla ortadan kaldırılabilmektedir. Lifli forma dönüştürülen malzemeler, kütleli formlarının aksine olmalarının yanında rijitliğe ve yüksek mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde (Şekil 2.16) fiberler; çekme, darbe, eğilme dayanımları ve yorulma ömrü gibi mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin performanslarının; fiber çapına, doğru malzeme seçimine, fiber uzunluğuna, fiber-matris hacim oranına, oryantasyon açısına ve matris ile arasında oluşan bağın gücüne bağlı olarak değişmekte olduğu bilinmektedir. [61]

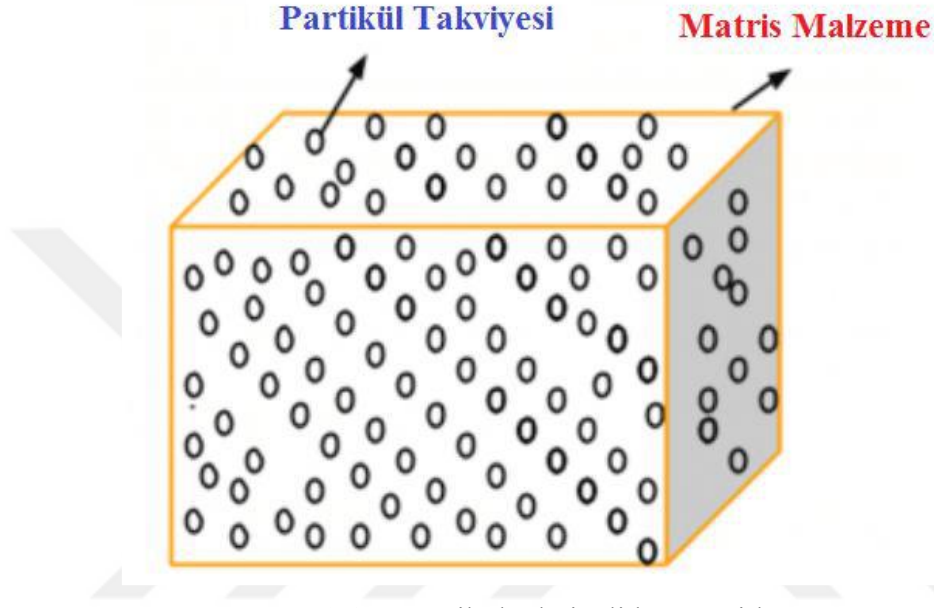


Şekil 2.16 : Fiber takviyeli kompozitler [60].

2.3.2.2 Parçacık (Partikül) takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler (Şekil 2.17), matris içerisinde yayılmış mikro veya makro boyutlu partiküllerin olduğu yapılardır. Büyük boyutlu parçacıklar mekanik olarak, mikro boyutlu parçacıklar da atomik veya moleküler bağlarla matrise bağlanmaktadır. Bu tür kompozit yapılarda takviye elemanları kompozit malzemenin mukavemetini arttırmaktan çok yapıya; aşınma direnci, elektrik iletkenliği, rijitlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler kazandırmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde yükün %90'lık bölümü takviye elemanı tarafından taşınmaktayken, parçacık takviyeli kompozit malzemelerde bu oran %50 civarında olup, matris ve takviye elemanının yükü eşit oranlarda paylaştığı söylenebilir. Büyük partikül takviyeli kompozit malzemelere çimento

agrega ile takviyelenmiş olan beton, mikro boyuttaki partikül takviyeli kompozit malzemelere de silisyum oksit ve alüminyum oksitten oluşan seramik ve metal matrisli kompozit malzemeler örnek olarak gösterilebilir. Partikül takviyeli kompozit malzemeler izotropik özellik göstermekte olup, partiküllerin yapı içerisinde homojen karışmaması ve matris tarafından iyi ıslatılmaması halinde kompozit malzeme performansını olumsuz yönde etkileyen durumlar ortaya çıkabilmektedir. [61]

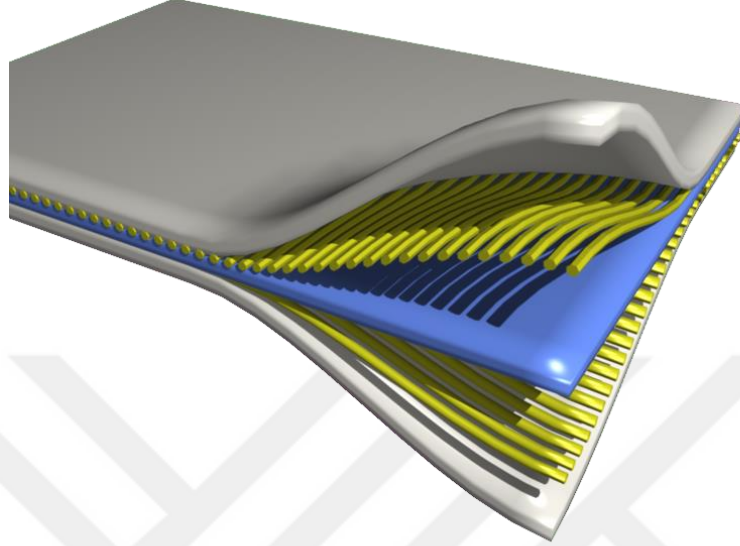


Şekil 2.17 : Partikül takviyeli kompozitler [60].

2.3.2.3 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler (Şekil 2.18), ihtiyaç duyulan fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin yapıya kazandırılması amacıyla, aynı veya farklı malzeme türlerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozitlerdir. Metal veya ahşap malzemelere kaplama yapılmasıyla korozyon ve aşınma dirençlerinin artırılması, masif ahşap uygulamalarda zaman içerisinde şekil bozulmalarını engellemek amacıyla masif panellerin kullanılması, farklı metallerin bir araya getirilmesiyle ısı ve elektrik iletkenliğinin değiştirilmesi tabakalı kompozit malzeme uygulamalarına örnek olarak gösterilebilir. Sandviç yapılar ve laminatlar en çok tercih edilen tabakalı kompozit malzeme türlerindedir. Laminatlar, lamina adı verilen tek eksenli fiberlerle takviyelendirilmiş olan levhaların bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Laminaların farklı şekillerde yerleştirilmesi ile kompozit malzemenin farklı doğrultulardaki mukavemetini artırmak mümkündür. Böylece kompozit yapı içerisinde istenilen özelliğe uygun şekilde fiberlerin yerleştirilmesiyle yapının çekme, basma, darbe, eğilme dayanımı gibi özellikleri iyileştirilebilir. Hafif ve düşük mukavemetli

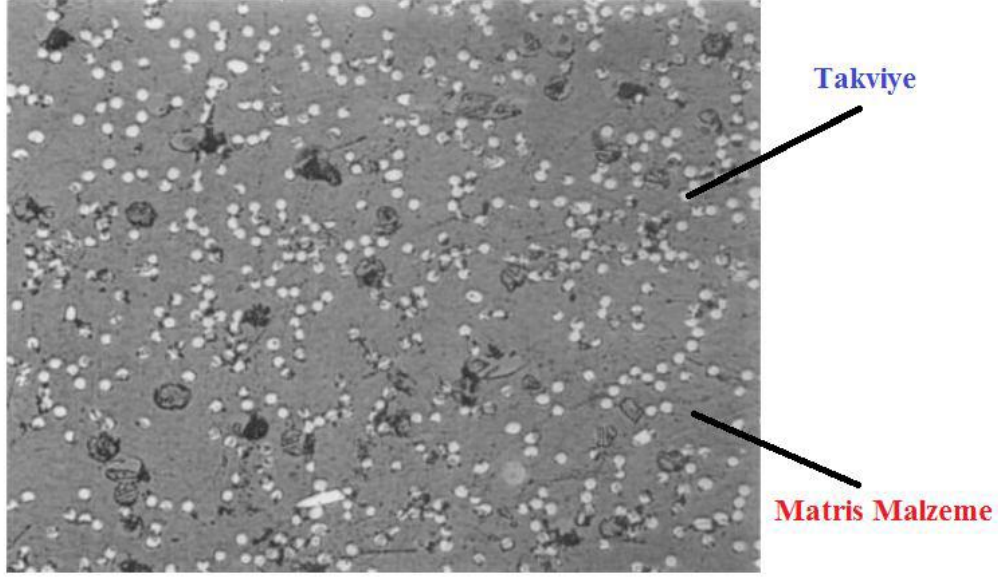
bir yapının alt ve üst yüzeylerinin rijit ve yüksek mukavemetli malzemelerle desteklenmesi ile oluşan yapı sandviç yapı olarak adlandırılmakta olup, bu yapı sayesinde kompozit malzemeye akustik sönümlenme, enerji sönümlenme, yüksek eğilme direnci ve yüksek dayanım/kütle oranı gibi özellikler kazandırılmış olmaktadır. [61]



Şekil 2.18 : Tabakalı kompozitler [62].

2.3.2.4 Hibrit (Karma) kompozitler

Hibrit kompozit malzemeler (Şekil 2.19), matris içerisinde birden fazla takviye çeşidinin birlikte kullanıldığı kompozit yapılardır. Bu yapının amacı, kompozit malzeme içerisinde tek bir takviye çeşidinin kullanılmasıyla elde edilemeyen fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin, farklı takviye çeşitlerinin bir arada kullanılmasıyla elde edilebilmesini sağlamaktır. Hibrit kompozit malzemelere grafit ve kevlar elyaflarının aynı matris içerisinde kullanılması örnek olarak gösterilebilir. Bu yapıda bulunan kevlar fiberler kompozit malzemenin tokluğunu artırırken, yapıda bulunan grafit ise kompozit malzemenin basma dayanımını artırmaktadır. [61]



Şekil 2.19 : Hibrit (karma) kompozitler [60].

2.4 Yapıştırıcılar

Yapıştırma işlemi genel olarak, aynı veya farklı iki tür malzemenin birbirinden ayrılmayacak şekilde metalik olmayan başka bir malzeme ile birleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Bu iki materyalin birleşiminde kullanılan ara malzeme ise yapıştırıcı olarak adlandırılır. Yapıştırıcı ASTM tarafından, “yüzey teması ile materyalleri bir arada tutabilen madde” olarak ifade edilmektedir. Yapıştırıcı ayrıca, “yüzeyle uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik materyal” olarak da tanımlanabilir. [63,64]

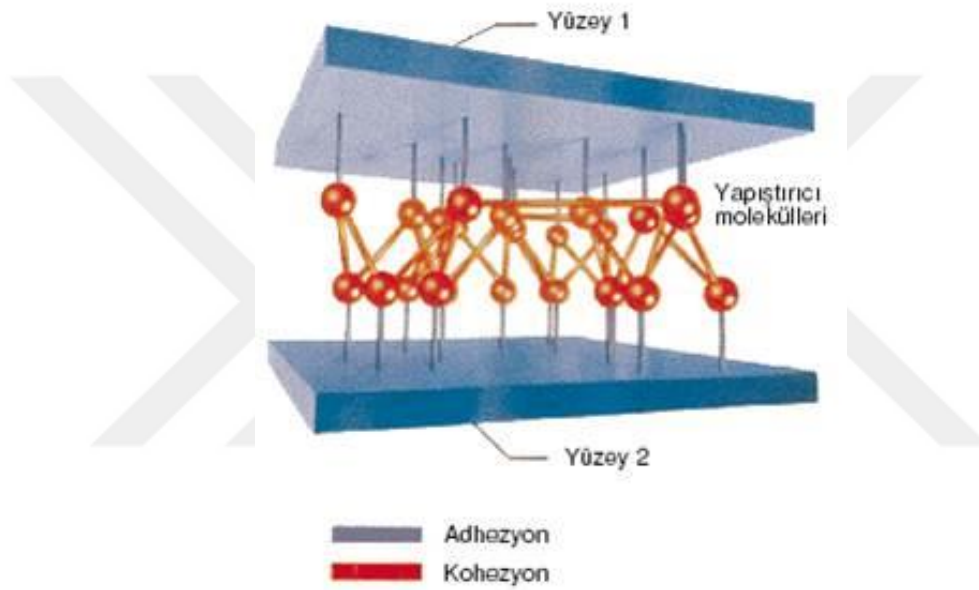
Yapıştırıcılar; katı, sıvı, bant ve macun gibi birçok şekilde olabilmektedirler. Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemleri yapısal ve yapısal olmayan yapıştırma olarak ikiye ayrılmaktadır. Yapının sürekliliğini kaybetmeden, yük taşıyabilen yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi yapısal yapıştırma olarak adlandırılmakta olup, bu yöntemdeki birleştirme işlemlerinde yapısal yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Yapışan parçalar arasında yükleri iletmekte kullanılan yapıştırıcılar yapısal yapıştırıcılar olarak ifade edilmekte olup, bu tür yapıştırıcılar genellikle gemcilik, otomotiv ve uzay sanayi başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. [63]

Yapıştırıcılar kullanım öncesinde sıvı, macun, toz ve film gibi çeşitli formlarda olabilmektedirler. İyi bir yapışma için yapıştırıcı kalınlığının 0,05mm ile 0,15mm arasında olması gerekmektedir. Yapıştırma işleminden önce yüzeylerin kir, toz vb. etkenlerden arındırılarak temizlenmiş ve kuru yüzeyler olması, yapıştırma işleminin kalitesini artıracak

en önemli etkenlerdendir. Yapıştırıcının kuruma sürecinde bir miktar kalınlıkta azalma olacağından, bu durumun tasarım ve imalat sürecinde dikkate alınması gerekmektedir. [63]

2.4.1 Yapışma işlemi

Yapışma; iki yüzeyin atomlar iyonlar ve moleküller arası etkileşiminden oluşmakta olan çekim kuvvetlerinin etkisiyle bir arada tutulması olarak ifade edilebilir. Yapışma, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasında meydana gelen adezyon kuvvetlerinin ve yapıştırıcının kendi içindeki kohezyon kuvvetlerinin etkisiyle oluşan kimyasal ve fiziksel bir hadisedir (Şekil 2.20). [63,65]



Şekil 2.20 : Adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin şematik gösterimi [66].

2.4.1.1 Adezyon kuvveti

Yapıştırılan malzemelerin temas yüzeyleri ile yapıştırıcı arasında oluşan yapışma kuvvetleri adezyon kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Ara yüzey kuvvetlerinin etkisiyle iki yüzeyin bir arada tutulması da adezyon olayı olarak adlandırılmaktadır. Mekanik olarak işlenmiş olan yüzey üzerindeki pürüzlere yapıştırıcının tam olarak temas edememesi halinde, moleküller arası kuvvetler oldukça azalır. Bu durumun engellenebilmesi için yüzey üzerindeki pürüzlere yapıştırıcının tam olarak nüfuz ederek tüm yüzeyi ıslatması sağlanmalıdır. Yapıştırma kuvvetinin hem yüzeyin yapışma özelliklerine hem de yüzeyin ıslatılmasına bağlı olduğu söylenebilir. Islatma hadisesi belirli bir yüzey gerilimi için yapıştırıcının viskozitesine ve yapıştırıcının sürüldüğü yüzeyin yüzey gerilimine bağlıdır. Ayrıca yüzey üzerinde kir, toz vb. bulunması da ıslatmayı olumsuz etkileyeceğinden,

yapıştırma işleminden önce yapıştırma uygulanacak olan yüzeylerin bu tür istenmeyen kalıntılardan arındırılmış ve kurutulmuş olması adezyon kuvvetlerini artırmada önemli rol oynayacaktır. [63]

2.4.1.2 Kohezyon kuvveti

Yapıştırıcı moleküllerinin kendi aralarında oluşan, yapıştırıcıyı bir bütün halinde tutan kuvvetler kohezyon kuvveti olarak adlandırılmaktadır. Yapıştırıcıyı oluşturan kütle bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal kuvvetlerin etkisiyle bir arada tutulması da kohezyon olayı olarak adlandırılmaktadır. Bu olayın yapıştırıcının kürleşmesi sırasında bir takım zincirleme reaksiyonlar sonucunda meydana geldiği bilinmektedir. Bir zincirin kuvvetinin en zayıf halkası tarafından belirlendiği kuralına göre, yapıştırma işleminde adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin yaklaşık olarak eşit olmaları gerektiği sonucuna varılabilir. [63]

2.4.2 Yapışma teorileri

Bilim insanları bugüne kadar yapışma mekanizmasını açıklayabilmek için makroskobik, mikroskobik ve moleküler seviyelerdeki kavramları esas alan birçok teori ortaya koymuşlardır. Yapışma mekanizmasının bütün yönlerinin bu teorilerden herhangi birinin tek başına açıklayabilmesi mümkün olmayıp, yapışma bağlantısının herhangi bir özelliğini bu teorilerden bir ya da birkaçının kullanılmasıyla açıklamak mümkündür. Bu teorilerden en temel olan dördü aşağıda açıklanmıştır. [63]

2.4.2.1 Mekanik tutunma teorisi

Sıvı yapıştırıcının bir katı yüzeye uygulanmasıyla, yapıştırıcı yüzeyin gözeneklerine girecek ve mekanik tutunma gerçekleşerek, iyi bir yapışma meydana gelmiş olacaktır. Mekanik tutunma, yapıştırıcının malzeme yüzeyinden ayrılmasını önlemektedir. Yapıştırıcının mekanik tutunma ile yapışmasını artıran bazı alüminyum malzemelerin yüzey işlemlerinin, aslında yüzeyde üzerindeki gözenekleri arttırdığı belirlenmiştir. Malzeme yüzeylerini pürüzlendirme ve yüzey üzerindeki kir, toz vb. kalıntıları temizleme işlemleri yüzey alanını artıracığından, yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayılması ve yüzeyi yeterince ıslatması sağlanmaktadır. Bununla birlikte, literatürde iyi bir yapışmanın pürüzsüz malzeme yüzeylerinin kullanılmasıyla da elde edildiği çalışmalar bulunmaktadır. [67]

2.4.2.2 Elektrostatik teorisi

Literatürde yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki elektron transferinin, yapışmanın oluşmasını sağlayan bir çekim şarjı ürettiğini ileri süren çalışmalar bulunkatadır. Bu çalışmalarda, yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki bağ, kapasitöre benzetilmiştir. Kapasitörün plaklarının kaldırılmasıyla, kapasitörün şarjı boşacak ve kapasitör deşarj oluncaya dek artan bir potansiyel meydana gelecektir. Bu en fazla tartışılan teorilerden biri olup, birçok araştırmacı mekanizmada oluşan kuvvetlerin büyüklüğü konusunda aynı fikirde değildir. Literatürdeki bir başka çalışmada hesaplanan elektrostatik kuvvetleri, Van der Waals kuvvetleriyle karşılaştırılmış ve metal-yapıştırma bağlantısındaki yapışma işi deneysel olarak ölçülmüştür. Elektrostatik kuvvetlerin yapışmaya olan katkısının, Van der Waals kuvvetlerinin yanında çok düşük kaldığı, ölçülen yapışma işinin de elektrostatik ve Van der Waals kuvvetlerin toplamından daha büyük olduğu sonucu çıkarılmıştır. [67]

2.4.2.3 Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon teorisi, esas malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temasın sağlanmış olması şartıyla, ara yüzeyde moleküller arası ve atomlar arası kuvvetlerin oluşması sonucunda yapışmanın meydana geldiğini ileri sürmektedir. Bu teori Sharpe ve Schornhorn tarafından geliştirilmiş olup, yapıştırıcı biliminde halen en fazla kabul edilen teori olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapıştırıcı-esas malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak, a) İyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler, b) Van der Waals kuvvetleri, dipole-dipole, indüklenmiş dipole dipole, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetler olarak iki kategoride gruplanabilir. Bağlantı mukavemetinin teorik ve deneysel değerleri arasında büyük bir farkın ortaya koyulmasına rağmen yine de yapıştırma bağlantısının yeterince yüksek mukavemete sahip olmasının sebebinin ikincil bağ kuvvetleri olduğu belirlenmiştir. [67]

2.4.2.4 Difüzyon teorisi

Bu teori, mekanik tutunma teorisine bir miktar benzese de difüzyon teorisi moleküler seviyelerdedir. Voyutski tarafından geliştirilmiş olan difüzyon teorisi, iki polimer malzemenin birbiri içine difüze olmasıyla yapışma meydana geldiğini ifade etmektedir. Bu teori, malzeme moleküllerinin arasında kimyasal uyumluluk gerektirdiğinden, uzun zincirli moleküler yapıda olan polimer malzemelerde sınırlı şekillerde geçerli olmaktadır. [64,67]

2.4.3 Yapıştırıcı çeşitleri

Yapıştırıcıları özelliklerine göre, kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar, formları açısından yapıştırıcılar olmak üzere 2 gruba ayrılmaktadırlar [63].

2.4.3.1 Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

Bu tipteki yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar, fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar olmak üzere 2 grupta incelenebilir. Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar; en güçlü yapıştırıcı grubunda yer almakta olup, bu yapıştırıcılar yapısal yapıştırıcılar olarak da adlandırılmaktadırlar. Günümüzde kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı türleri aşağıda sıralanmıştır. [63]

- Epoksiler
- Anaerobikler
- Poliüretanlar
- Sertleştirilmiş akrilikler
- Modifiye edilmiş fenolikler
- Siyanoakrilikler
- Silikonlar
- Sıcak eriyikler
- Kauçuk yapıştırıcılar
- PVA'lar (Polyvinyl Acetates)
- Basınç gerektirmeyen yapıştırıcılar

2.4.3.2 Formları açısından yapıştırıcılar

Bu tipteki modern yapıştırıcılar, toz, sıvı ve macun vb. formlarda olabilmektedirler. Bu yapıştırıcıları kullanım yerlerine göre aşağıdaki verildiği şekilde gruplara ayırmak mümkündür. [63]

- Macun tip yapıştırıcılar
- Film tip yapıştırıcılar
- Düşük viskoziteli yapıştırıcılar
- Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
- Reçineler
- Köpükler

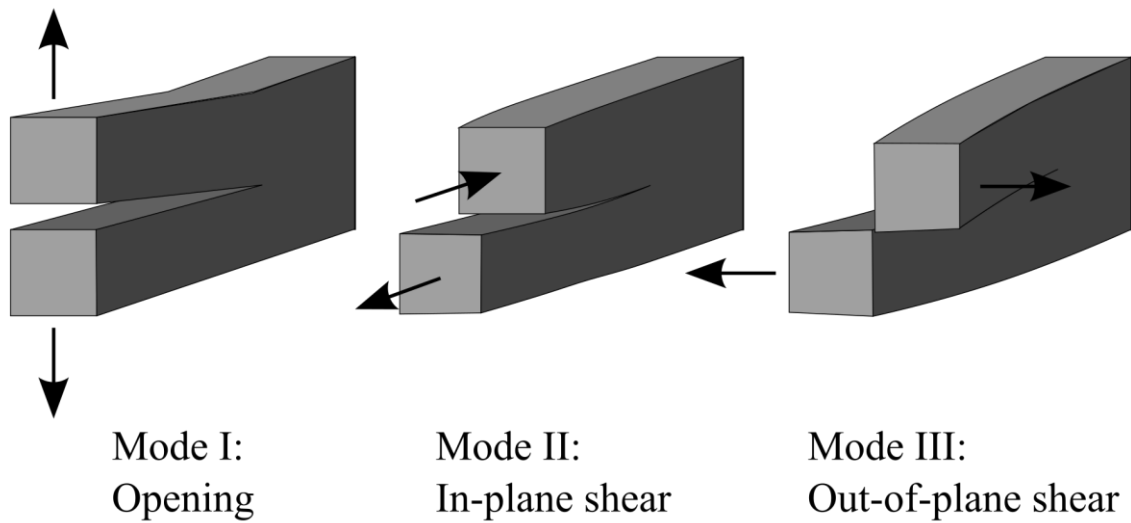
2.4.4 Yapıştırıcıların kırılma enerjilerinin belirlenmesi

Gerilme altındaki bir malzemenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması olayı kırılma olarak adlandırılmaktadır. Katı cisimlerin kırılması olayı genellikle katı cisim içerisindeki yer değişimi süreksizlik yüzeylerinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Yer değiştirme olayının, yer değişim yüzeyine dikey olarak oluşması durumu, çatlak veya bir çekme çatlakı olarak adlandırılmakta olup, yer değişim yüzeyine teğetsel olarak oluşması durumu ise, çukuk, kayma bandı veya kayma çatlakı olarak adlandırılmaktadır. [64]

Kırılma mekaniği, büyük ölçüde tam kırılmayla tespit edilen hasarları incelemektedir. Bu alandaki ilk başarılı çalışma 1921 yılında Griffith tarafından yapılmış olup, camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişini gözlemlemiştir. Griffith, oldukça basit bir enerji dengesi sunmuş olup, hali hazırda oluşmuş bir çatlakın nasıl yayıldığı ile ilgili bir formül geliştirmiştir. Buna göre sistemdeki elastik şekil değiştirme enerjisi, çatlak ilerledikçe azalma eğiliminde olup, bu enerji, kırılma yüzeyinin ortaya çıkması için gereken enerjidir. [64]

Malzemenin mevcut kırılma enerjisi, malzemenin yükleme koşullarına bağlı olarak üç şekilde belirlenmektedir (Şekil 2.21).

- Mod-I – Çekme Modu (Açılma modu)
- Mod-II – Kesme Modu (Düzlem içi kayma modu)
- Mod-III – Yırtma Modu (Düzlem dışı kayma modu)



Şekil 2.21 : Kırılma mekaniğinde çatlak açma modları [68].

Bu modların bir kısmı aynı anda meydana gelebilmekte olup, bunun sonucu olarak "karışık mod" çatlakları oluşabilmektedir [64] .

2.4.4.1 Çatlak açılma deformasyon tipi (Mod-I)

Mod-I geriliminin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olacak şekilde düşey doğrultuda etki göstermektedir. Bu noktada çatlağın şekline göre değişkenlik gösteren boyutsuz şekil düzeltme faktörü belirlenmektedir. [64]

2.4.4.2 Çatlak kayma deformasyon tipi (Mod-II)

Mod-II geriliminin kayma bileşeni, yatayda malzeme uzunluğuna paralel olacak şekilde çatlaklara etki etmektedir. Kuvvetin çatlağa paralel olması nedeniyle, bir kuvvet çatlağın üst yarısını geri iterken, diğer kuvvet çatlağın alt yarısını aynı hat boyunca ileri doğru çekmektedir. Bu durumun sonucu olarak kayan kesme çatlakları oluşmaktadır. [64]

2.4.4.3 Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mod-III)

Mod-III geriliminin kayma bileşeni, çatlağın uç kenarına veya ön kısmına paralel olarak yatayda hareket etmektedir. Kuvvetin yatayda her iki yönde birbirine zıt olarak çekildiği ve çatlağın ön-arka yönde olduğu deformasyon tipi olup, bu tipteki deformasyon malzemenin ayrılarak orijinal düzleminin dışına çıkmasına ve düzlemsel olmayan makaslamanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Çatlağın büyümesi için kuvvetlerin ters yönde hareket etmesi gerekmekte olup, kuvvetler aynı anda sola ve sağa itilmekte ve aynı etkiyi üretmektedirler. [64]

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, polimer ve metal levhalar farklı kombinasyonlarda yapıştırılarak tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir. Polimer levhalar EYM yöntemiyle üretim yapan 3B yazıcı ile üretilmiş olup, metal levhalar 1mm kalınlığındaki Al 2024-T3 malzemeden kesilerek hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış olan levhalar farklı kombinasyonlarda üst üste 5 tabaka olacak şekilde yerleştirilmiş olup, tabakalar arasında Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı sürülerek tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin boyutları, kütleleri ve sertlikleri ölçülmüş olup, çekme, eğilme ve DHSD darbe test davranışları incelenmiştir. Test numunelerinin üretilmesinde kullanılan tüm kombinasyonlar ve bu kombinasyonların numune kodları her test için Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Test numunelerinin üretilmesinde kullanılan kombinasyonlar.

No	Kombinasyon	Malzeme	Tabaka Kalınlığı (mm)	Tabaka Sayısı	Numune Kodları		
					Çekme	Eğilme	S. D. Darbe
1	Polimer (P)	ABS	5	1	20 - 1~4	21 - 1~4	33 - 1~12
2	P	PLA	5	1	17 - 1~4	16 - 1~4	34 - 1~12
3	P + CNC	ABS	5	1	19 - 1~4	22 - 1~4	-
4	P + CNC	PLA	5	1	18 - 1~4	15 - 1~4	-
5	PPPPP	ABS	1	5	13 - 1~4	14 - 1~4	35 - 1~12
6	PPPPP	PLA	1	5	12 - 1~8	11 - 1~4	36 - 1~12
7	Metal (M)	Al 2024-T3 Paralel	1	1	23 - 1~4	-	46 - 1~12
	M	Al 2024-T3 Dik	1	1	24 - 1~4	-	
8	MMMMM	Al 2024-T3	1	5	9 - 1~4	10 - 1~8	37 - 1~12
9	MPMPM	Al 2024-T3 / ABS	1	5	3 - 1~4	4 - 1~4	38 - 1~12
10	MPMPM	Al 2024-T3 / PLA	1	5	1 - 1~4	2 - 1~4	39 - 1~12
11	PMPMP	ABS / Al 2024-T3	1	5	7 - 1~4	8 - 1~4	40 - 1~12
12	PMPMP	PLA / Al 2024-T3	1	5	5 - 1~4	6 - 1~4	41 - 1~12
13	MPPPM	Al 2024-T3 / ABS	1	5	25 - 1~4	26 - 1~4	42 - 1~12
14	MPPPM	Al 2024-T3 / PLA	1	5	27 - 1~4	28 - 1~4	43 - 1~12
15	PPMPP	ABS / Al 2024-T3	1	5	29 - 1~4	30 - 1~4	44 - 1~12
16	PPMPP	PLA / Al 2024-T3	1	5	31 - 1~4	32 - 1~4	45 - 1~12

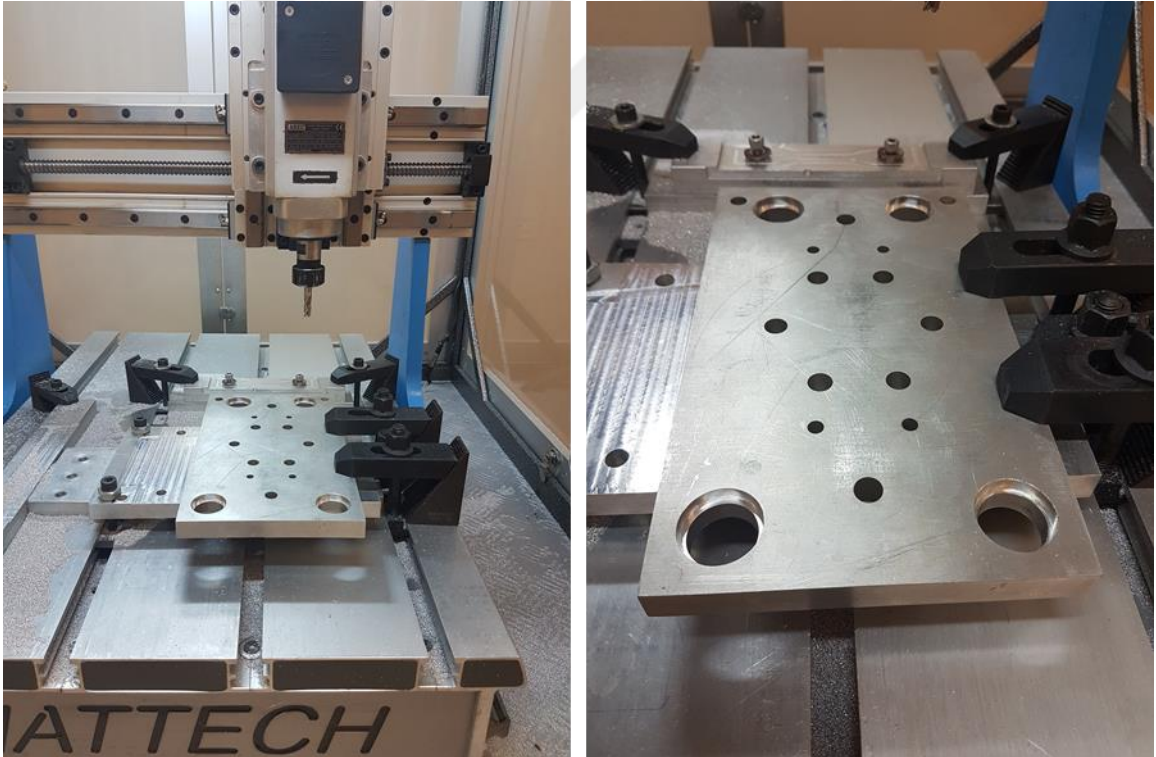
3.1 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Kalıp Seti

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılmak üzere kalıp seti tasarımı ve imalatı yapılmıştır (Şekil 3.1). İmalatı yapılan kalıp seti; alt kalıp (2 adet yapılmıştır), üst kalıp, üst baskı plakası ve üst baskı bloklarından oluşmaktadır. Alt kalıptan 2 adet imal edilmiştir. Böylece alt kalıplardan biri ile mekanik preste kompozit malzeme üretim ve presleme işlemi (22 saat) yapılırken, diğer kalıp mekanik presten çıkarılmış olmaktadır. Mekanik presten çıkarılan alt kalıp, içerisindeki kompozit malzemenin kurlaşması için fırınlama işlemine tabi tutulmaktadır. Fırınlama sonrasında içerisindeki kompozit malzemeler çıkarılan alt kalıbın üzerindeki kalıntılar (yapıştırıcı, kalıp ayırıcı PVA vb.) spatula ve su ile temizlenerek kurumaya bırakılmaktadır. Kuruma işleminden sonra alt kalıbın kompozit malzeme üretiminde yapıştırıcı ile temas edebilecek tüm yüzeylerine 1 kat kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülerek en az 30dk bekletilerek kalıp ayırıcının kuruması sağlanmaktadır. Bu sayede alt kalıplardan birinin mekanik preste kompozit malzeme üretimi ve presleme işlemi sürerken, diğer alt kalıp tekrar kompozit malzeme üretimine hazır hale getirilmektedir. Böylece mekanik presin hiç aralık vermeden, gerektiğinde her gün kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.1 : Kalıp seti demonte görüntüsü.

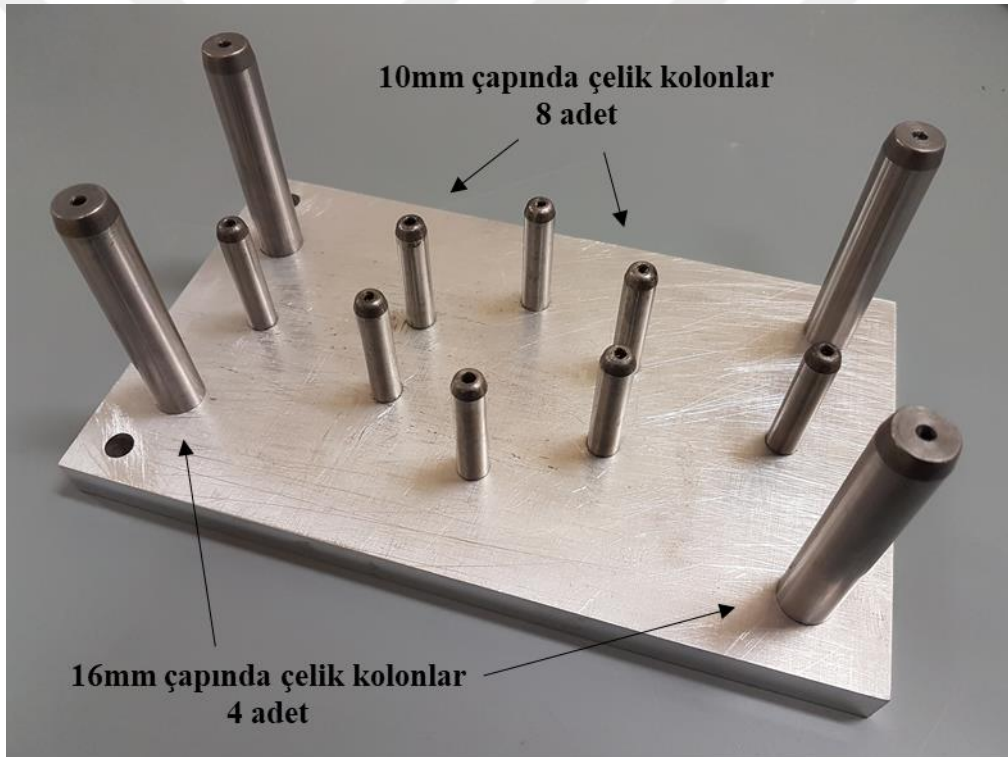
İlgili standartlar doğrultusunda çekme ve eğilme test numunelerinin boy ve genişlikleri aynı olacak şekilde ayarlanmış olup, CNC freze ile kesme payı da eklendikten sonra $23 \times 168 \text{mm}^2$ yüzey alanına sahip kompozit malzeme üretim boyutları belirlenmiştir. Kompozit malzeme üretiminde bu yüzey alanına uygulanacak basıncın sağlanabilmesi için mekanik presin yük kovaşına eklenecek yük miktarı hesaplanmış olup, çekme, eğilme ve DHSD darbe test numunelerinin üretimi sırasında bu yük hiç değiştirilmemiştir. Bunu sağlayabilmek için DHSD darbe test cihazının alt tabla ölçüleri ve ilgili standart göz önünde bulundurularak çekme ve eğilme test numuneleri üretimi için belirlenen $23 \times 168 \text{mm}^2$ yüzey alanı değerinin karekökü alınarak kare şeklindeki yüzey alanına sahip DHSD darbe test numunelerinin bir kenarının uzunluğu belirlenmiştir. Bu uzunluk en yakın tamsayıya yuvarlanmış olup, DHSD darbe test numuneleri için $62 \times 62 \text{mm}^2$ yüzey alanına sahip kompozit malzeme üretim boyutları belirlenmiştir. Belirlenen boyutlar kullanılarak tasarımı yapılan kalıp seti parçaları üzerindeki işlemlere göre torna, freze, tel erozyon, taşlama ve CNC freze tezgahlarında işlenerek kullanıma hazırlanmıştır. Bu işlemlerden bir kısmının görüntüleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Üst kalıbın CNC freze ile işlenmesi.

Üst kalıp ve üst baskı plakası faturalı merkezleme burçları ile merkezlenerek 4 adet paslanmaz krom cıvata ile birbirine sabitlenmiş olup, tüm kompozit malzeme üretim süreçlerinde bu şekilde kullanılmışlardır. Ayrıca üst baskı plakasına 2 adet kulp takılarak,

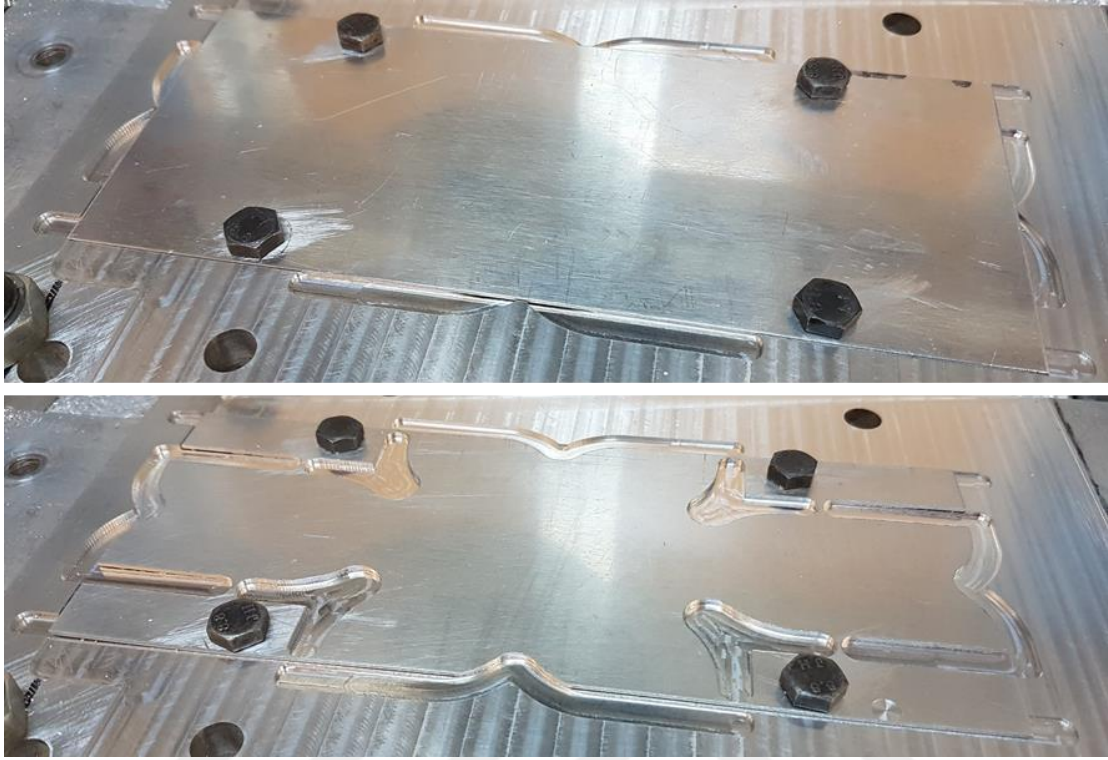
üst kalıp ve üst baskı plakasının birlikte taşınması kolaylaştırılmıştır. Yapıştırıcı ile direkt olarak temas halinde olabilecek üst kalıp ve alt kalıplar alüminyum malzemelerden imal edilmiştir. Böylece her kullanımdan sonra su ile temizlenmesi gereken kalıpların paslanma ve korozyona uğramasının önüne geçilmiştir. Alt kalıp ve üst kalıbın birbirlerine merkezlenebilmeleri için alt kalıplara dörder adet 16mm çapında çelik kolonlar, üst kalıba da bu kolonlara göre 4 adet faturalı burç yerleştirilmiştir. Tabakalı kompozit üretim, yapıştırma ve presleme esnasında tabakaların birbiri arasında kaymasını engellemek için alt kalıplara sekizer adet 10mm çapında çelik kolonlar yerleştirilmiştir. Alt kalıplara yerleştirilen çelik kolonlar gerektiğinde 23x168mm² boyutlarındaki yüzey alanına sahip çekme ve eğilme test numunelerini, gerektiğinde de 62x62mm² boyutlarındaki DHSD darbe test numunelerini üretebilecek şekilde konumlandırılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : Alt kalıp üzerindeki çelik kolonlar.

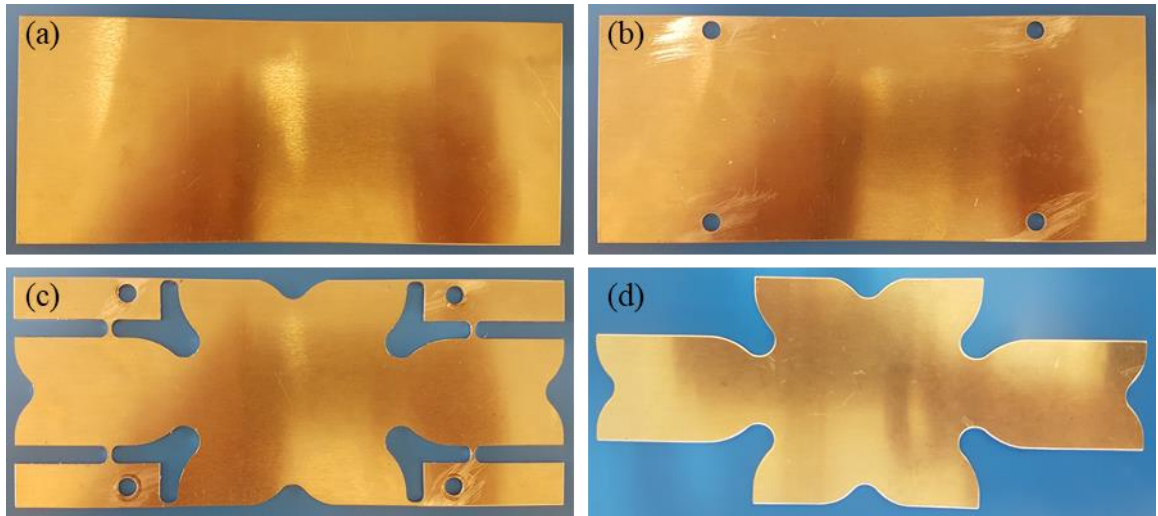
Her defasında dörder adet tabakalı kompozit test numunesi üretilmiş olup, presleme işlemindeki yüzey alanını ve dolayısıyla da presleme yükünü artırmamak için kompozit malzemeler üst üste gelecek şekilde kalıp tasarımı yapılmıştır. Üst üste yerleştirilerek üretilen tabakalı kompozit malzemelerin birbirlerine ya da üst ve alt kalıplara yapışmasını engellemek için her üretimde 5 adet olacak şekilde 1mm kalınlığında alüminyum ara plakalar kullanılmıştır. Alt kalıplar içerisindeki 10mm çapındaki kolonların pozisyonları da

gözetilerek ara plakaların tasarımı yapılmış olup, CNC freze ile imalatı yapılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : CNC freze ile ara plakaların imalatı.

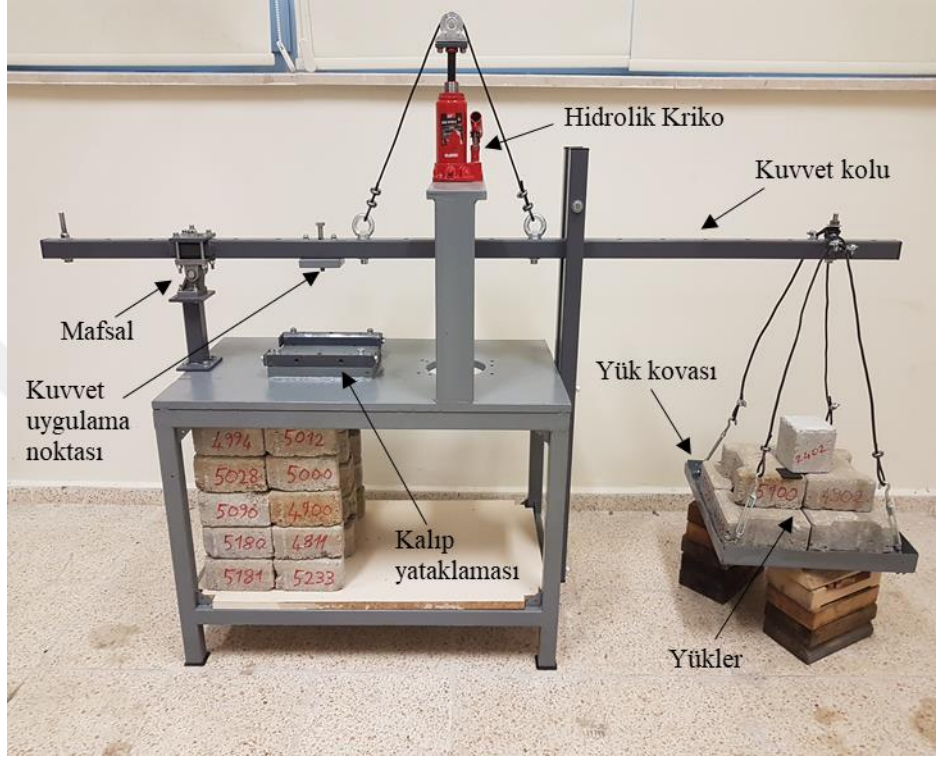
CNC freze ile imalatı yapılan ara plakaların işleme adımları sonrasındaki görüntüleri Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Tabakalı kompozit malzeme üretiminden önce ara plakalara üst ve alt kalıplarda da olduğu gibi 1 kat kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülerek, en az 30dk kurumaya bırakılmaktadır. Ara plakalar alt kalıp üzerine, farklı tabakalı kompozit malzemelerin arasına ve üst kalıp altına gelecek şekilde yerleştirilerek kompozit malzeme üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.5 : Ara plakaların işleme adımları sonrasındaki görüntüleri.

3.2 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Mekanik Pres

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılmak üzere mekanik pres tasarımı yapılmış olup, bu presin imalatı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Mekanik presin boştaki görüntüsü.

İmalatı yapılan mekanik pres, yük kovasına yerleştirilen kütleli kuvvet uygulama noktasında 5 katına çıkaracak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik pres imalatı tamamlandıktan sonra tabakalı kompozit malzeme üretiminde, kompozit malzemelerin üzerine 0,5MPa basınç uygulanabilmesi için yük kovasına yerleştirilmesi gereken kütle hesaplanmıştır. Bunun için öncelikle kuvvet uygulama noktasından uygulanması gereken kuvvet ve bu kuvvete karşılık gelen kütle değerleri Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır olup, hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

$$P = \frac{F}{A} \quad 3.1$$

$$F = m \cdot g \quad 3.2$$

Bu aşamadan sonra tabakalı kompozit malzemelerin üzerine direkt olarak etki edecek olan diğer elemanların (üst kalıp, üst baskı plakası, burçlar ve bağlantı elemanları, üst baskı blokları) kütleleri de ölçülmüş olup, dijital teraziden ölçülerek kaydedilen değere eklenmiştir. Elde edilen yeni kütle değeri Çizelge 3.2’de verilen kuvvet uygulama noktasındaki hesaplanan kütle değerinden çıkarılmıştır. Bu şekilde hesaplanan kütle değeri 5’e bölünmüş olup, yük kovasının ve içerisine yerleştirilmesi gereken malzemelerin toplam kütlesi yük kovası ve üzerindeki bağlantı elemanlarının da ayrıca tartıldıktan sonra belirlenmiştir. Bu şekilde hesaplanarak belirlenen kütleler (32,4kg) yük kovasına yerleştirilerek mekanik presin kuvvet koluna asılmıştır (Şekil 3.8). Son durumda mekanik presin kuvvet uygulama noktasında tabakalı kompozit malzemelerin üzerine 203,52kg’lık bir yük uygulayacağı hesaplanmıştır. Normalde tabakalı kompozit malzemeler üzerine 0,5MPa basıncın etki edebilmesi için kuvvet uygulama noktasından Çizelge 3.2’de belirtildiği gibi 197kg’lık yük uygulanması gerekmektedir. Fakat kuvvet kolunun yükün etkisiyle bir miktar sehim yaparak düşey kuvvetlerin bir miktar yatay bileşenlere ayrılmasından, mafsal bağlantı elemanından ve alt kalıp ve üst kalıbın merkezlemesini sağlayan 4 adet kolon-burç ikilisinden kaynaklanan sürtünme vb. kayıplar da eklenerek, kuvvet uygulama noktasında tabakalı kompozit malzemelerin üzerine toplamda 203,52kg’lık yük uygulanmıştır.



Şekil 3.8 : Yük kovası ve içerisindeki kütleler.

3.3 Kompozit Malzeme Üretiminde Kullanılan Levhaların Hazırlanması

3.3.1 Polimer levhaların hazırlanması

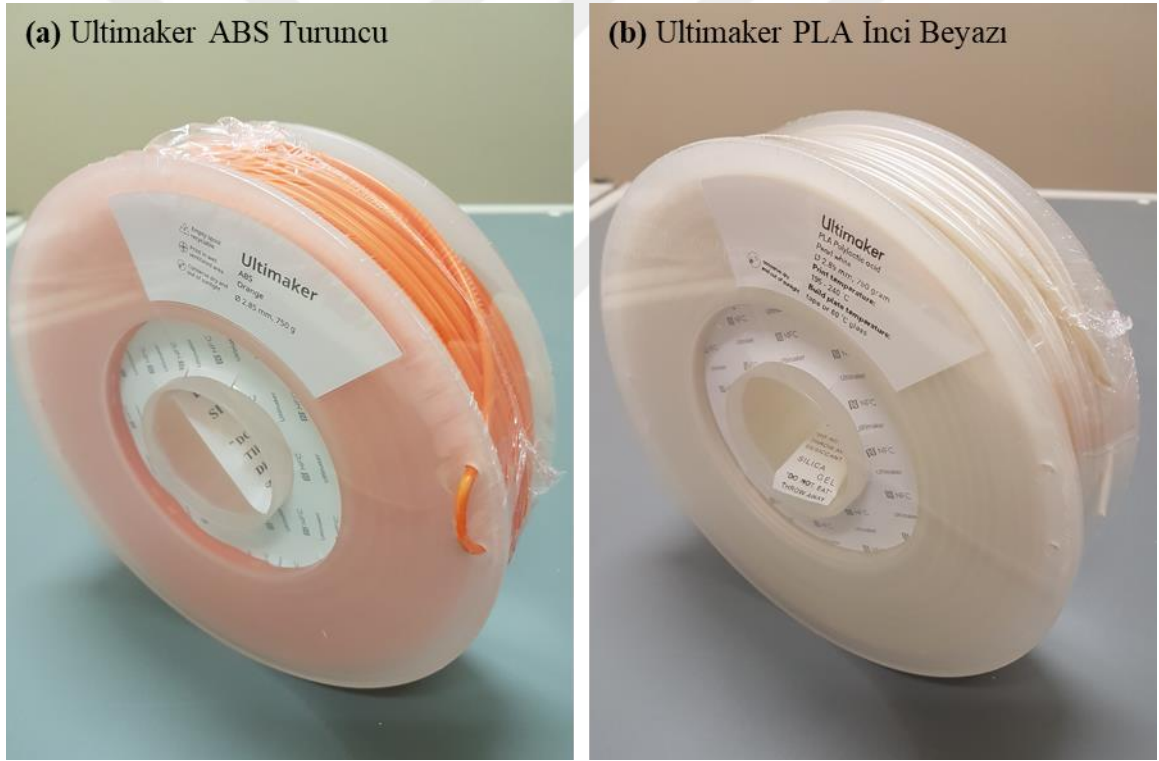


Şekil 3.9 : Ultimaker S5 3B yazıcı.

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan polimer levhalar Ultimaker S5 3B yazıcıda (Şekil 3.9) Çizelge 3.3’de verilen parametrelerle Ultimaker ABS Turuncu ve Ultimaker PLA İnci Beyazı filamentler (Şekil 3.10) kullanılarak üretilmiştir [69-71]. Çekme ve eğilme test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan 3B yazdırılmış levhalar 23x168x1mm boyutlarında, DHSD darbe test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan 3B yazdırılmış levhalar 62x62x1mm boyutlarında üretilmiştir. Her parametre için tek seferde 10 adet levha yazdırılmış olup, bu parametrelerden birer görüntü Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Bu şekilde üretilen polimer levhaların belli aralıklarla kütleleri ölçülmüş olup, kütleli olarak olağan dışı bir farklılık gösteren 3B yazdırılmış levhalar tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılmamıştır.

Çizelge 3.3 : 3B yazıcı ile polimer levha üretiminde kullanılan parametreler.

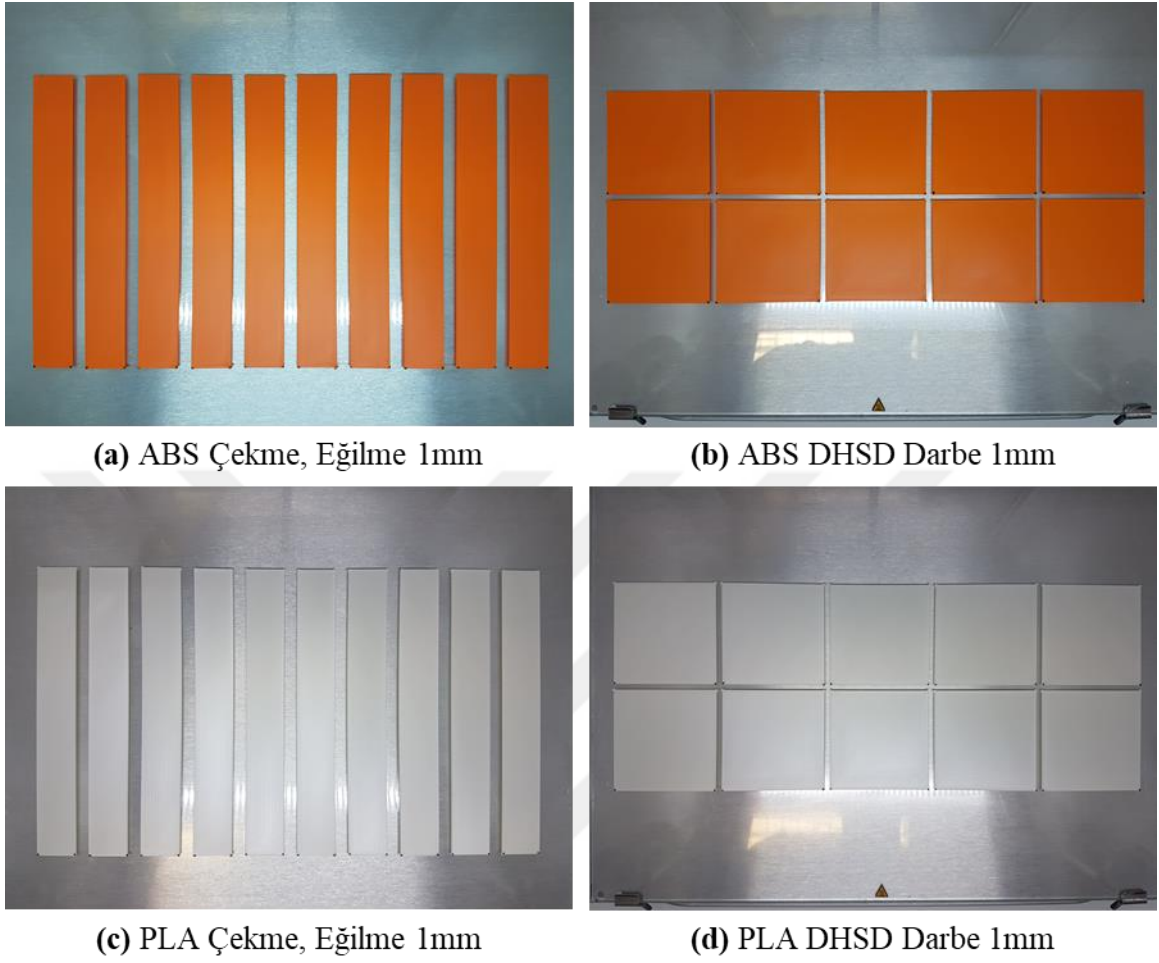
3B Yazıcı	Ultimaker S5	
CAM Programı	Cura v4.13.1	
Malzeme	Ultimaker ABS Turuncu	Ultimaker PLA İnci Beyazı
Nozul Sıcaklığı	240°C	210°C
Tabla Sıcaklığı	85°C	60°C
Hazne Sıcaklığı	36°C	28°C
Yazdırma Hızı	60mm/s	
Boşta Gezme Hızı	150mm/s	
Nozul Çapı	0,4mm	
Katman Kalınlığı	0,2mm	
Hat Geniştirliği	0,4mm	
Duvar Kalınlığı	0mm	
Üst/Alt Kalınlık	1mm veya 5mm (Üretilecek levha kalınlığı girilmiştir)	
Dolgu Yoğunluğu	% 100	
Dolgu Deseni	Zig Zag	



Şekil 3.10 : 3B yazdırılmış levha üretiminde kullanılan filamentler.

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi 3B yazdırılmış levhalar 3B yazıcıdan çıkarılmadan önce levhaların alt kenarlarındaki her iki köşeye asetat kalemle birer nokta işareti yapılmıştır. Bu işaretler sayesinde tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan 3B yazdırılmış levhalar kalıba yerleştirilirken, tüm levhaların işaretlenmiş olan kenarları kalıp içerisinde üste ve sağ tarafa gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Böylece tabakalı kompozit malzeme üretiminde

3B yazdırılmış levhaların kalıp içerisindeki konumlandırma şekline göre kaynaklanabilecek üretim düzensizliği, hata ve sapmalarının önüne geçilmiştir.



Şekil 3.11 : Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan polimer levhalar.

3B yazdırılmış polimer levhalar üzerindeki 3B yazdırmadan kaynaklanan kalıntılar falçata ile kesilerek temizlenmiştir. Bu aşamadan sonraki tüm işlemlerde 3B yazdırılmış polimer levhalara çıplak elle dokunulmamış olup, bu işlemler pudrasız nitril eldivenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen tüm 3B yazdırılmış polimer levhalar 10'arlı gruplar halinde bulaşık deterjanı eklenmiş su ve süngerle öncelikle yıkanarak temizlenmiş, sonrasında su ile durulanmış olup, kağıt havlu ile silinerek en az 12 saat kurumaya bırakılmıştır. 3B yazdırılmış polimer levhalar kuruma işleminden sonra tabakalı kompozit malzeme üretiminde gerektiğinde kullanılmak üzere içerisine nem alıcı silikajel torbaları yerleştirilmiş olan sızdırmaz kapaklı saklama kaplarında muhafaza edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 : Polimer levhaların saklama kaplarında muhafaza edilmesi.

P kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki polimer levhalar Ultimaker S5 3B yazıcıda Çizelge 3.3’de verilen parametrelerle Ultimaker ABS Turuncu ve Ultimaker PLA İnci Beyazı filamentler kullanılarak üretilmiştir. Çekme ve eğilme testleri uygulanacak olan P kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki polimer levhalar ilgili standartların geometrilerinde tasarlanmış olup, dış ölçüleri 20x165x5mm boyutlarında üretilmiştir. DHSD darbe testleri uygulanacak olan P kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki polimer levhalar ilgili standart geometrisinde tasarlanmış olup, dış ölçüleri 62x62x5mm boyutlarında üretilmiştir. Çekme ve eğilme test numuneleri her bir parametre için tek seferde 4 adet, DHSD darbe test numuneleri her bir parametre için tek seferde 12 adet olacak şekilde 3B yazdırılmış olup, bu levhaların görüntüleri Şekil 3.13’de gösterilmiştir. P kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki 3B yazdırılmış polimer levhaların ilgili testler öncesinde kütle, boyut ve sertlikleri ölçülmüş olup, bu levhalara başka herhangi bir CNC freze ile kesme, yapıştırma vb. işlem uygulanmamıştır.



(a) ABS Çekme 5mm



(b) PLA Çekme 5mm



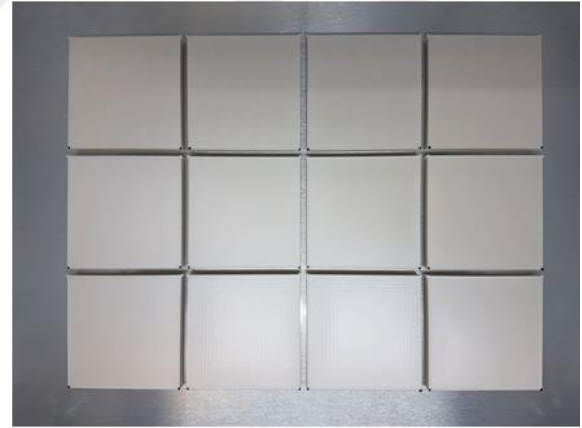
(c) ABS Eğilme 5mm



(d) PLA Eğilme 5mm



(e) ABS DHSD Darbe 5mm

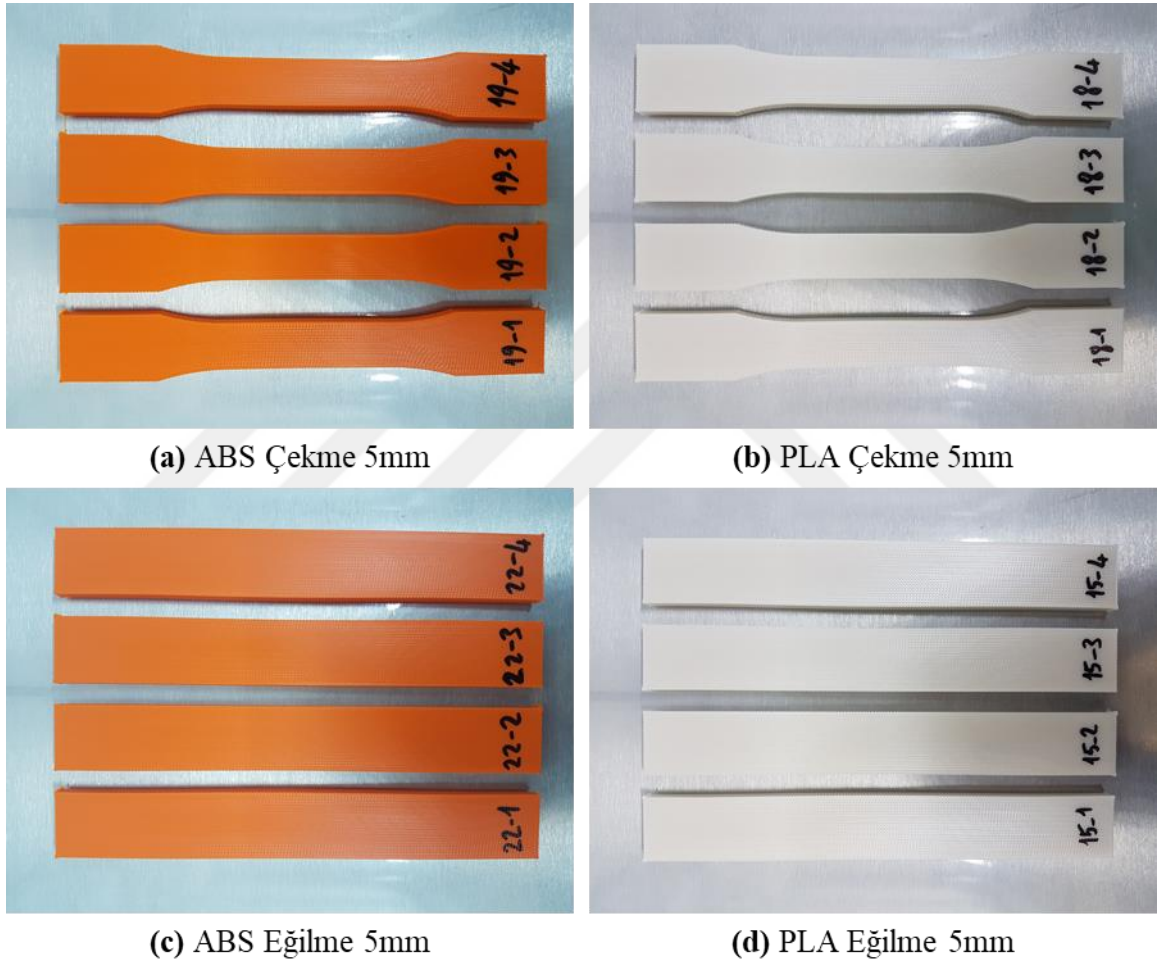


(f) PLA DHSD Darbe 5mm

Şekil 3.13 : 5mm kalınlıktaki 3B yazdırılmış levhalar P kombinasyonu.

P+CNC kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki polimer levhalar Ultimaker S5 3B yazıcıda Çizelge 3.3’de verilen parametrelerle Ultimaker ABS Turuncu ve Ultimaker PLA İnci Beyazı filamentler kullanılarak üretilmiştir. Çekme ve eğilme testleri uygulanacak olan P+CNC kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki polimer levhalar ilgili standartların geometrilerinde tasarlanmış olup, dış ölçüleri X ve Y eksenlerinde CNC freze ile kesme payı eklenerek her 2 ekseninde de 1,5mm genişletilerek 23x168x5mm boyutlarında üretilmiştir. X

ve Y eksenlerinde CNC freze ile kesme işleminin DHSD darbe testlerinde herhangi bir etkisinin olmayacağı ve kesilecek kenarların test bölgesi dışında kalacağı düşünüldüğünden, bu kombinasyonda ayrıca DHSD darbe testi için polimer levha üretimi yapılmamıştır. Çekme ve eğilme test numuneleri her bir parametre için tek seferde 4 adet olacak şekilde 3B yazdırılmış olup, bu levhaların görüntüleri Şekil 3.14’de gösterilmiştir. P+CNC kombinasyonunda 5mm kalınlığındaki 3B yazdırılmış polimer levhaların X ve Y eksenindeki tüm kenarları CNC freze ile kesilmiş olup, kesme işleminden sonra çekme ve eğilme testlerinden önce test numunelerinin kütle, boyut ve sertlikleri ölçülmüştür.



Şekil 3.14 : 5mm kalınlıktaki 3B yazdırılmış levhalar P+CNC kombinasyonu.

3.3.2 Metal levhaların hazırlanması

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde 1mm kalınlığında Al 2024-T3 alüminyum haddelenmiş metal levhalar kullanılmıştır [72]. Al 2024-T3 alüminyum metal levhalar 600x600x1mm boyutlarında tabakalar halinde tedarik edilmiştir. Çekme ve eğilme test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan metal levhalar 23x168x1mm boyutlarında, DHSD darbe test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan metal levhalar

62x62x1mm boyutlarında giyotin makas ile kesilerek hazırlanmıştır. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılacak olan metal levhalar, haddeleme doğrultusu metal levhaların uzun kenarlarına paralel olacak şekilde kesilmiştir. Haddeleme yoluyla imal edilmiş levhalarda gözle görülemeyecek kadar da olsa, haddeleme doğrultusunda hadde sarıcısından kaynaklanan bombe (tümsek, kavis) meydana gelmektedir. Giyotin ile kesilerek hazırlanan metal levhaların haddeleme bombelerinin tepe noktaları, yapıştırma işlemi öncesinde metal levhaların düzlemsel bir yüzey üzerinde kontrole edilmesiyle tespit edilmiştir. Bu sayede tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan metal levhalar kalıba yerleştirilirken, tüm levhaların haddeleme bombelerinin tepe noktaları kalıp içerisinde üst tarafa gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Böylece tabakalı kompozit malzeme üretiminde metal levhaların kalıp içerisindeki konumlandırma şeklinden kaynaklanabilecek üretim düzensizliği, hata ve sapmalarının önüne geçilmiştir.



(a) Çekme, Eğilme

(b) DHSD Darbe

Şekil 3.15 : Metal levhaların temizlenmesinde kullanılan saf aseton görüntüleri.

Giyotin makas ile kesme işlemi sırasında metal levhaların yan yüzeylerinde oluşan kesme işleminden kaynaklanan çapaklar, ince dişli bir ege kullanılarak temizlenmiştir. Bu aşamadan sonraki tüm işlemlerde metal levhalara çıplak elle dokunulmamış olup, bu işlemler pudrasız nitril eldivenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan tüm metal levhalar 10'arlı gruplar halinde öncelikle sudan geçirilerek üzerindeki toz partiküllerinden arındırılmış olup, bulaşık deterjanı eklenmiş su ve süngerle yıkanarak temizlenmiş, sonrasında su ile durulanmıştır. Durulama işleminden sonra metal levhalar üzerindeki boya, yağ vb. kalıntılardan arındırılmak için saf asetonda bekletilmiştir. Asetonda bekletme işlemi metal levhaların 10'arlı gruplar halinde kirli durumdan temiz duruma geçene kadar 3 farklı saf aseton banyosunda en az 5'er dakika bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15). Bu yöntemle her metal levha en az 15 dakika boyunca saf aseton banyosunda bekletilerek

arındırılmıştır. Metal levhalar saf aseton banyosunda bekletildikten sonra kağıt havlu ile silinerek en az 12 saat kurumaya bırakılmıştır. Metal levhalar kuruma işleminden sonra tabakalı kompozit malzeme üretiminde gerektiğinde kullanılmak üzere içerisine nem alıcı silikajel torbaları yerleştirilmiş olan sızdırmaz kapaklı saklama kabında muhafaza edilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 : Metal levhaların saklama kabında muhafaza edilmesi.

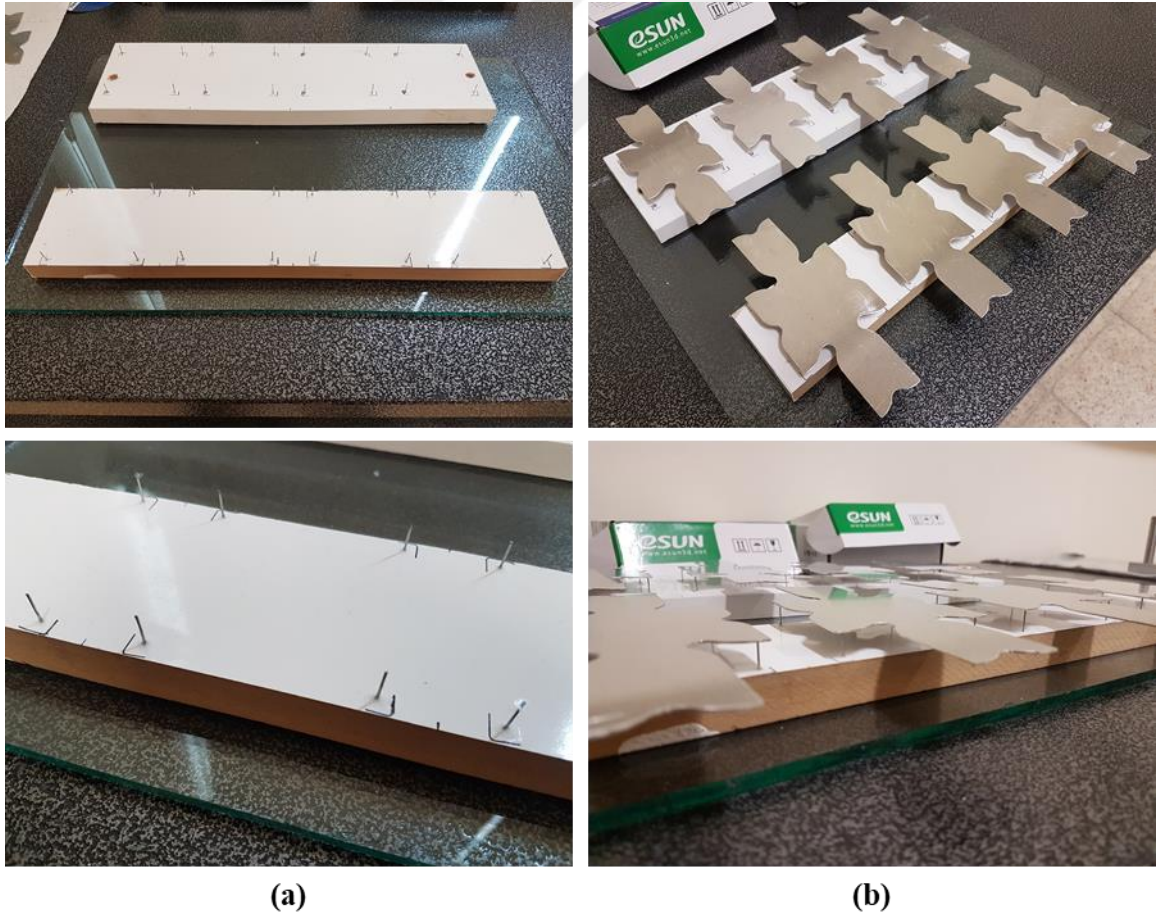
M kombinasyonunda çekme test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan metal levhalar 20x165x1mm boyutlarında, DHSD darbe test numunelerinin hazırlanmasında kullanılacak olan metal levhalar 62x62x1mm boyutlarında giyotin makas ile kesilerek hazırlanmıştır. M kombinasyonundaki çekme test numuneleri metal levhaların uzun kenarları haddeme doğrultusuna paralel ve dik olacak şekilde 2 farklı kombinasyonda dörder adet olacak şekilde kesilmiştir. M kombinasyonunda 1mm kalınlığındaki metal levhalarının kemik bölgeleri CNC freze ile kesilerek çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan çekme ve DHSD darbe test numunelerinin yan yüzeylerinde oluşan kesme işleminden kaynaklanan çapaklar, ince dişli bir eğe kullanılarak temizlenmiş olup, çekme ve DHSD darbe testlerinden önce test numunelerinin kütle, boyut ve sertlikleri ölçülmüştür. M kombinasyonunda 1mm kalınlıktaki metal levhanın eğilme davranışının, 5mm kalınlıktaki tabakalı kompozit malzemelerin eğilme davranışlarıyla kıyaslanmasının sağlıklı olmayacağı

düşünüldüğünden, bu kombinasyonda ayrıca eğilme testi için metal levha üretimi yapılmamıştır.

3.4 Yapıştırma, Presleme ve Fırınlama İşlemleri

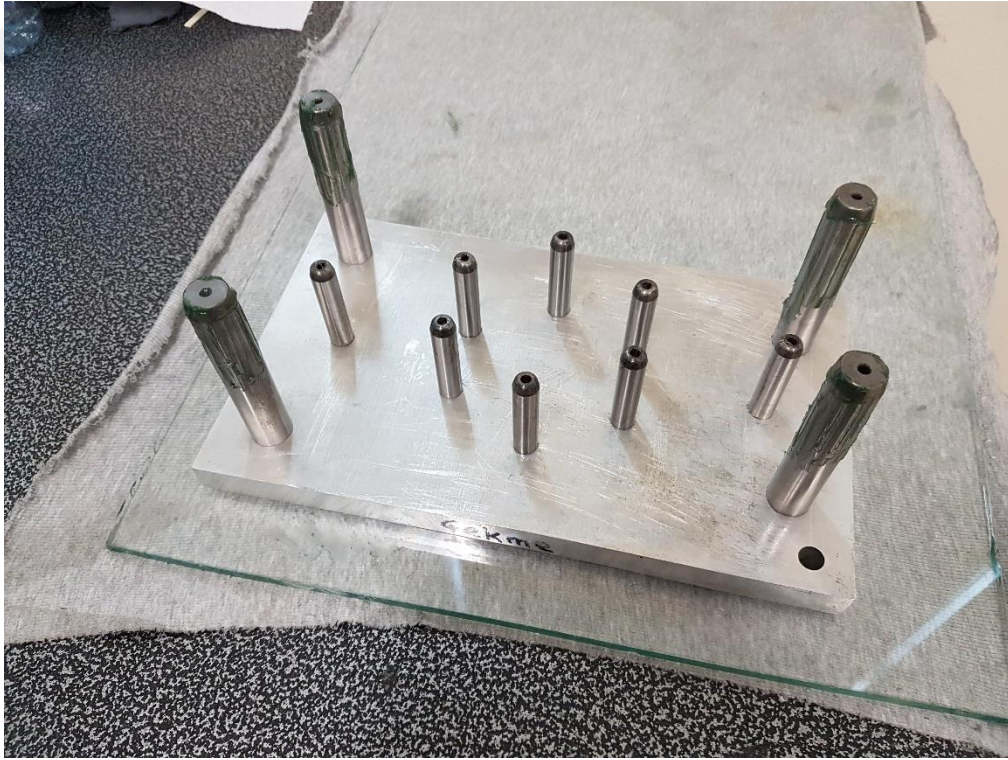
3.4.1 Yapıştırma işlemi

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde yapıştırma işlemine başlamadan önce tabakalı kompozit malzemelerin kalıba ya da birbirlerine yapışmasını engellemek için tasarlanan ara plakaların alt, üst ve yan yüzeylerine ince telli boya fırçası ile 1 kat Polivaks marka kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş olup, en az 30 dakika kurumaya bırakılmıştır [73]. Tüm yüzeylerine kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş olan ara plakaların kuruma işlemi sırasında çalışma masası ile temas yüzeyini en aza indirebilmek için 1mm çapında çelik teller kullanılarak her bir ara plakaya 4 tane çelik tel temas edecek şekilde çivili ahşap plakalar imal edilmiştir (Şekil 3.17a). Kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş olan ara plakalar Şekil 3.17b’de gösterildiği gibi çivili ahşap plakalar üzerine yerleştirilerek kurumaya bırakılmıştır.



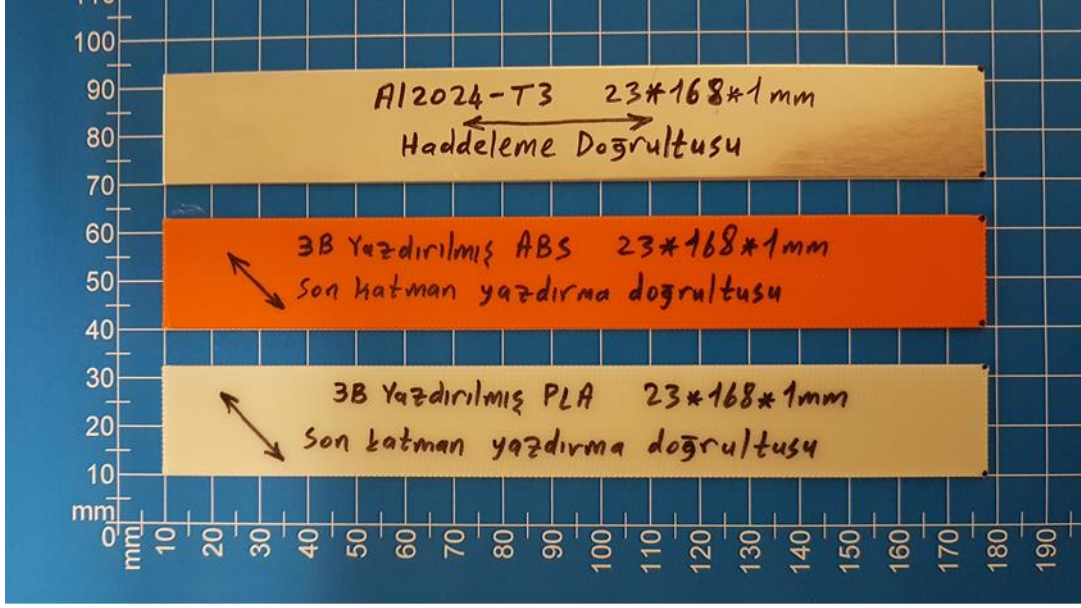
Şekil 3.17 : Çivili ahşap plakalar üzerinde ara plakaların kurutulması.

Yapıştırma işlemine başlamadan önce alt kalıbın üst yüzeyine ve alt kalıbın üst kısmında bulunan 8 adet 10mm çapındaki çelik kolonlara ve üst kalıbın alt yüzeyine ince telli boya fırçası ile 1 kat kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş olup, en az 30 dakika kurumaya bırakılmıştır. Ayrıca alt kalıbın üst kısmında bulunan 4 adet 16mm çapındaki çelik kolonlara ve üst kalıp-üst baskı plakası ikilisinin içerisinde bulunan 4 adet faturalı merkezleme burçlarının iç yüzeylerine gres yağı sürülmüştür. Böylece presleme esnasında 16mm çapındaki çelik kolonların faturalı merkezleme burçları içerisindeki kayma hareketinin sürtünme miktarı azaltılmaya çalışılmıştır. Kalıp ayırıcı sıvı PVA ve gres yağı sürülmüş olan alt kalıp görüntüsü Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Bu aşamadan sonraki tüm işlemler pudrasız nitril eldivenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

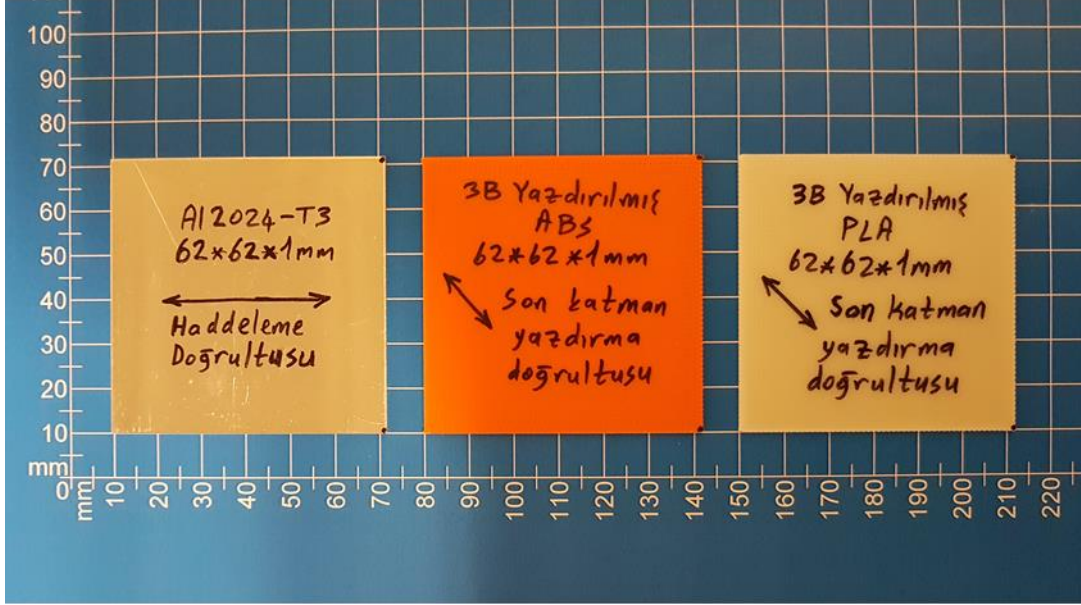


Şekil 3.18 : Kalıp ayırıcı sıvı PVA ve gres yağı sürülmüş olan alt kalıp görüntüsü.

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan metal ve polimer levhaların görüntüleri Şekil 3.19’de gösterilmiştir. Çekme ve eğilme test numunelerinin üretilmesinde Şekil 3.19a’da gösterilen levhalar, DHSD darbe test numunelerinin üretilmesinde Şekil 3.19b’de gösterilen levhalar Çizelge 3.1’de verilen kombinasyonlarda aralarına Huntsman marka Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı sürülerek tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir [74].



(a) Çekme, Eğilme



(b) DHS Darbe

Şekil 3.19 : Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan metal ve polimer levhalar.

Üretilen tabakalı kompozit malzeme kombinasyonuna göre saklama kaplarında bekletilen metal ve/veya polimer levhalar çalışma masası üzerine kombinasyondaki sıraya ve kalıba yerleştirilme şekline göre dizilerek hazırlanmıştır (Şekil 3.20). Her yapıştırma işleminde 4 adet tabakalı kompozit malzeme üretilmekte olup, buna göre çalışma masası üzerine 4 set metal ve/veya polimer levha dizilmektedir.



Şekil 3.20 : Yapıştırma işleminde kullanılacak olan metal/polimer levhalar.

Yapıştırma işlemlerinde kullanılmak üzere 200ml tüpler halinde Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı tedarik edilmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 : 200ml Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı.

200ml tüp halindeki Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcının kullanılabilmesi için uygulama tabancasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için alüminyum dökümden imal edilmiş bir silikon tabancası tedarik edilmiştir. Bu silikon tabancasının 200ml Araldite uygulama tabancasına dönüştürülmesi için gerekli tasarımlar yapılarak, 3B yazıcı ile imal edilmiştir. Tasarlanarak imal edilen 3B yazdırılmış parçalar, gerekli bağlantı elemanları kullanılarak silikon tabancasına monte edilmiş olup, böylece silikon tabancası 200ml Araldite uygulama tabancasına dönüştürülmüştür (Şekil 3.22). Tüm yapıştırma işlemlerinde bu uygulama tabancası kullanılmıştır. Yapıştırma işleminde kullanılacak olan epoksi yapıştırıcı kütlesi önceden belirlenmiş olup, belirlenen kütleyle 1,25'lik bir emniyet katsayısı (karıştırma kabı, spatula, kalıp vb. yüzeylere bulaşarak oluşacak kayıplar için) eklenerek kullanılacak olan epoksi yapıştırıcı hassas terazi ile tartılarak hazırlanmaktadır. Kullanılacak olan Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı cam karıştırma kabı içerisinde bir spatula yardımıyla 3 dakika karıştırılarak, yapıştırıcı ve sertleştirici bileşenlerin birbiri arasında homojen bir şekilde yayılması sağlanmıştır.



Şekil 3.22 : 200ml Araldite uygulama tabancası.

Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcının metal/polimer levhalar üzerine homojen bir kalınlıkta uygulanabilmesi için bir uygulama kalıbı hazırlanmıştır. Presleme ve fırınlama işlemlerinden sonra üretilen tabakalı kompozit malzeme tabakalarının arasında 0,05~0,1mm kalınlık aralığında epoksi yapıştırıcının kalması hedeflenmiştir. Presleme

işlemi sırasında bir miktar epoksi yapıştırıcının dışarı taşacağı da düşünülerek her metal/polimer levha üzerine 0,2mm kalınlıkta epoksi yapıştırıcı uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla metal/polimer levhaların da 1mm olduğu düşünülerek toplamda 1,2mm derinliğe sahip epoksi uygulama kalıbı hazırlanmıştır. 15mm kalınlıkta bir alüminyum plaka CNC freze ile işlenerek, plakanın bir tarafına çekme ve eğilme levhalarına epoksi yapıştırıcının uygulanabilmesi için 24x169mm boyutlarında ve 1,2mm derinliğinde (Şekil 3.23a), diğer tarafına DHSD darbe levhalarına epoksi yapıştırıcının uygulanabilmesi için 63x63mm boyutlarında ve 1,2mm derinliğinde (Şekil 3.23b) kanal açılarak epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbı hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbı, üretilecek test numunesi tipine göre ilgili yüzeyi üste gelecek şekilde çalışma masasına sabitlenerek kullanılmıştır.



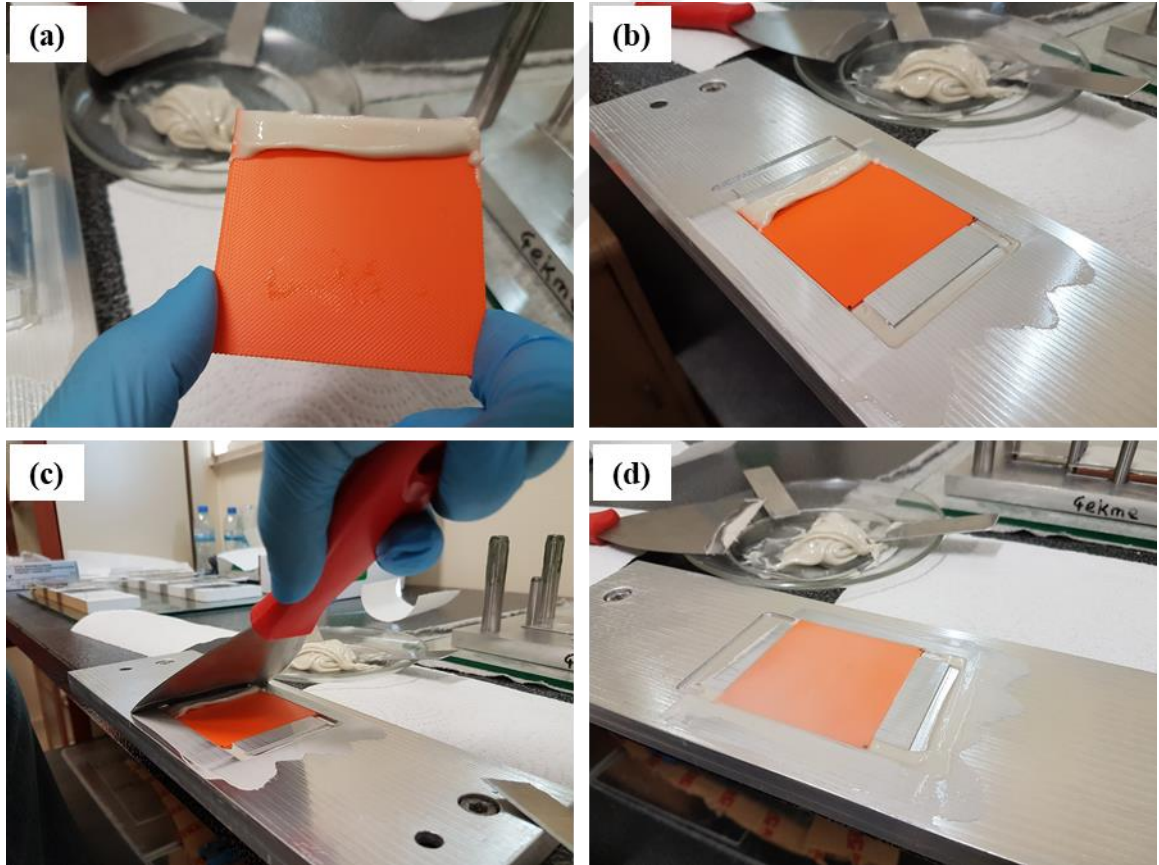
(a) Çekme, Eğilme



(b) DHSD Darbe

Şekil 3.23 : Epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbı.

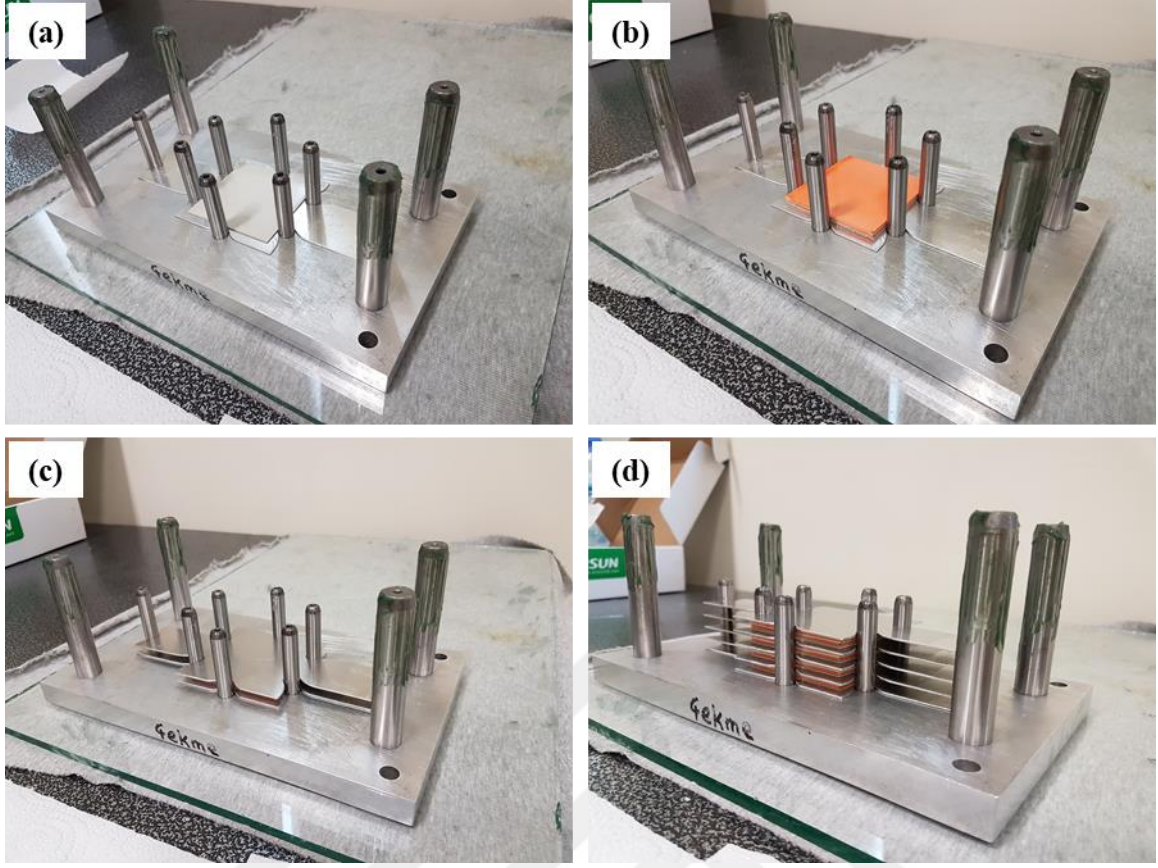
Metal/polimer levhalara epoksi yapıştırıcı uygulama aşamalarının görüntüleri Şekil 3.24’de gösterilmiştir. Öncelikle yapıştırıcı uygulanacak olan levha üzerine sol kenara yakın olacak şekilde, karıştırılarak hazırlanmış olan Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı küçük bir spatula ile yeterli miktarda sürülmüştür (Şekil 3.24a). Üzerine epoksi yapıştırıcı sürülen levha epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbına yerleştirilmiştir (Şekil 3.24b). Sonrasında levhanın genişliğinden daha büyük bir spatula ile spatula sağ tarafa eğik olacak şekilde kalıba bastırılarak levha üzerinde soldan sağa doğru hareket ettirilmiştir (Şekil 3.24c). Böylece levha üzerinde sol kenara yakın olarak sürülmüş olan epoksi yapıştırıcının levhanın üst yüzeyinin tamamına homojen bir kalınlıkta (0,2mm) uygulanması sağlanmıştır (Şekil 3.24d). Farklı kombinasyonlardaki tabakalı kompozit malzeme üretim sürecinin tamamında metal/polimer levhalar üzerine homojen kalınlıkta epoksi yapıştırıcı uygulaması, üretilecek malzemenin test tipine göre epoksi yapıştırıcı uygulama kalıbının ilgili yüzeyi kullanılarak yukarıda belirtilen yöntemin tekrarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.24 : Epoksi yapıştırıcı uygulama aşamaları.

Kalıp ayırıcı sıvı PVA ve gres yağı sürülmüş olan alt kalıp üst yüzeyine öncelikle kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş bir ara plaka yerleştirilmiştir. Sonrasında yukarıda belirtilen yöntemle üst yüzeyine epoksi yapıştırıcı uygulanan metal veya polimer levha bu ara plaka

üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.25a). Bu şekilde ilgili kombinasyondaki 1 adet tabakalı kompozit malzeme için gerekli olan tüm metal ve/veya polimer levhaların üst yüzeylerine sırayla benzer şekilde epoksi yapıştırıcı uygulanmış olup, bu levhalar ilgili kombinasyonun gerektirdiği sırayla alt kalıp içerisinde üst üste yerleştirilmiştir (Şekil 3.25b). Belirtilen yöntemde üretilen tabakalı kompozit malzemenin son tabakasında bulunan metal veya polimer levha üzerine epoksi yapıştırıcı uygulanmamıştır. Bu yöntemle ilgili kombinasyondaki 1 adet tabakalı kompozit malzeme için gerekli olan tüm metal ve/veya polimer levhalar üst üste yerleştirildikten sonra bunların üzerine bir ara plaka yerleştirilmiştir (Şekil 3.25c). Benzer şekilde tek seferde alt kalıp içerisinde ilgili kombinasyondaki 4 adet tabakalı kompozit malzeme üretilecek şekilde metal/polimer levhalar yerleştirilmiş olup, tabakalı kompozit malzemelerin kalıplara ya da birbirlerine yapışmasını engellemek için tabakalı kompozit malzemelerin altına, aralarına ve üstüne birer adet olacak şekilde toplamda 5 adet ara plaka kalıp içerisine sırası geldiğinde yerleştirilmiştir (Şekil 3.25d). Belirtilen yöntemle ilgili kombinasyondaki 4 adet tabakalı kompozit malzeme üretilecek şekilde metal/polimer levhalar üzerine homojen kalınlıkta epoksi yapıştırıcı uygulanması, bu levhaların ve ara plakaların alt kalıp içerisine yerleştirilme işlemleri 1 set olarak düşünüldüğünde, toplamda 10~12 dakika sürmektedir. Farklı kombinasyonlardaki tabakalı kompozit malzeme üretim sürecinin tamamında üzerine homojen kalınlıkta epoksi yapıştırıcı uygulanan metal/polimer levhaların ve kalıp ayırıcı sıvı PVA sürülmüş ara plakaların alt kalıp içerisine yerleştirilmesi işlemleri yukarıda belirtilen yöntemin tekrarlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan alt kalıp içerisindeki 1 set tabakalı kompozit malzeme, 22 saat süreyle 0,5MPa basınç altında bekletilmek üzere mekanik prese gönderilmiştir.



Şekil 3.25 : Epoksi yapıştırıcı uygulanan levhaların kalıplama aşamaları.

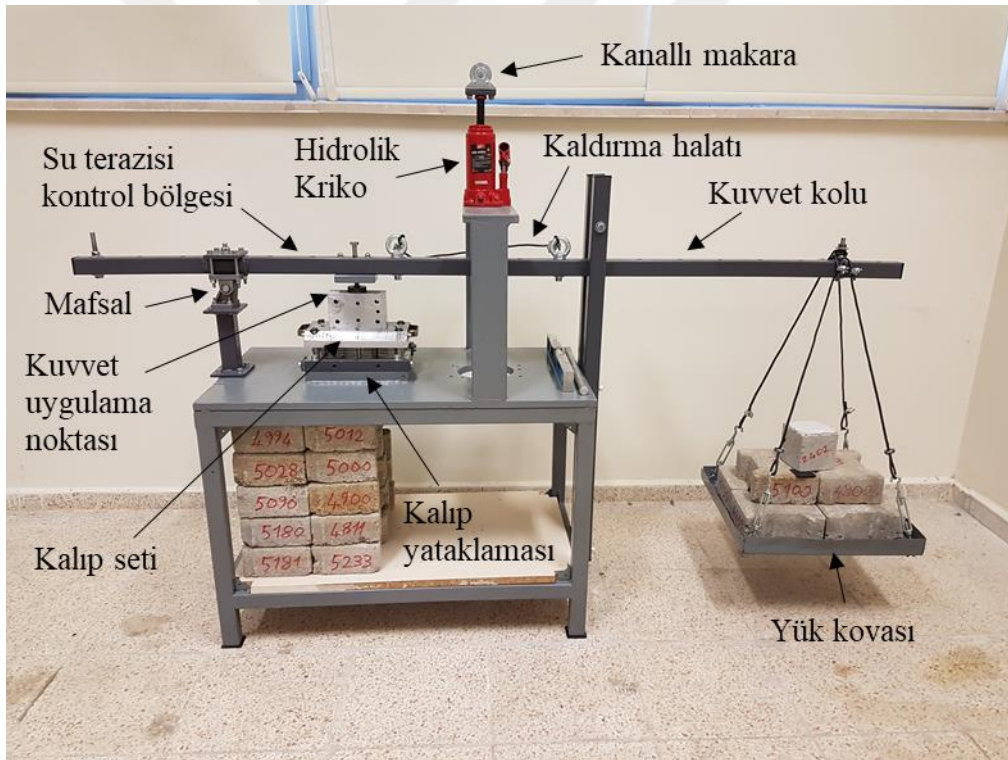
3.4.2 Presleme işlemi

Hazırlanan alt kalıp içerisindeki 1 set tabakalı kompozit malzeme, 22 saat süreyle 0,5MPa basınç altında bekletilmek üzere mekanik prese gönderilmiştir. Mekanik pres boş haldeyken (Şekil 3.6) kaldırma halatı kanallı makara içerisine yerleştirilmiş olup, hidrolik kriko yardımıyla kuvvet kolu yukarı doğru kaldırılmıştır. Şekil 3.6’da yük kovanının altına yerleştirilmiş olan ahşap plakalar kovanın altından alınmıştır. Hazırlanan alt kalıp mekanik pres içerisindeki kalıp yataklamasına yerleştirilmiştir. Alt kalıbın üzerine üst kalıp-üst baskı plakası ikilisi yerleştirilmiş olup, üst baskı plakası üzerine de üst baskı blokları yerleştirilerek kalıp seti oluşturulmuştur.

Kuvvet uygulama noktasındaki M12 civatanın üst baskı bloklarıyla temas eden uç kısmı küre şekline getirilmiştir. Üst baskı bloklarının üzerine bir miktar gres yağı sürülmüştür. Mekanik pres yükteyken kuvvet kolunda bir miktar sehim meydana gelecektir. Bu sehimin etkisiyle yük kovanından kuvvet uygulama noktasına iletilmesi gereken düşey kuvvetin bir kısmı yatay bileşenlere dönüşecektir. Kuvvet uygulama noktasındaki M12 civatanın üst baskı bloklarıyla temas eden uç kısmı küre şekline getirilmesi ve üst baskı bloklarının üzerine bir miktar gres yağı sürülmesiyle civatanın gerektiğinde az miktarda da

olsa üst baskı bloğu üzerinde kaymasının sağlanması amaçlanmıştır. Böylece yatay bileşenler dönüşen kuvvetin kalıp seti üzerinde herhangi bir etkisinin olmaması sağlanmıştır.

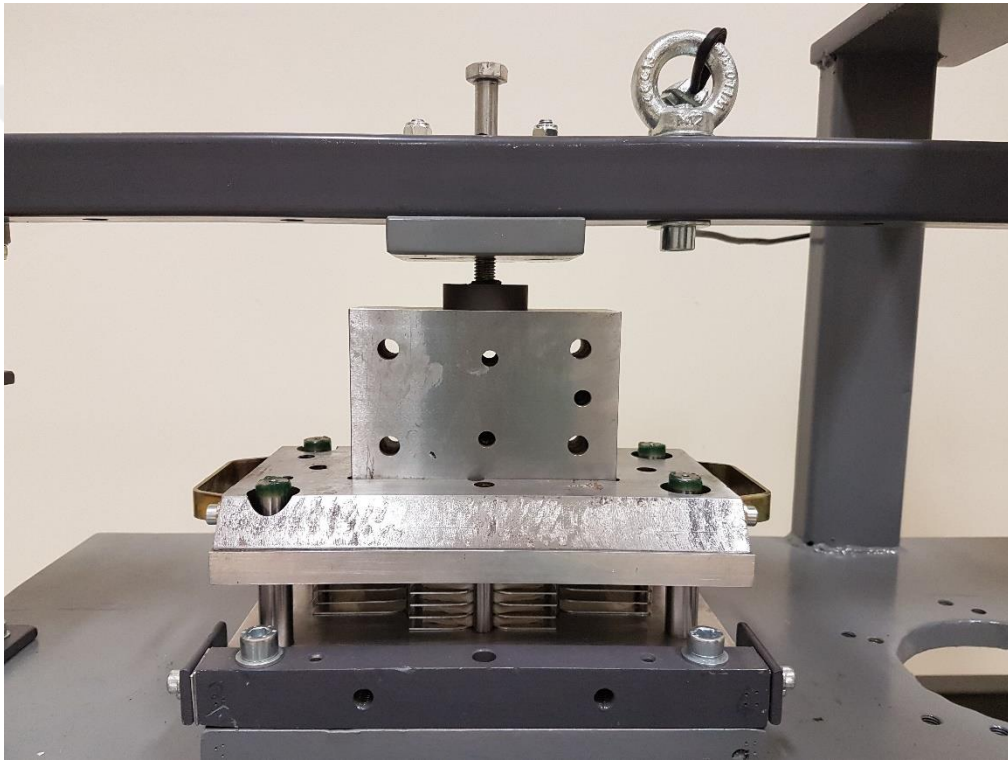
Hidrolik kriko yardımıyla kuvvet kolu ve yük kovası aşağı doğru indirilmiş olup, kuvvet uygulama noktasındaki M12 civatanın üst baskı bloklarıyla temas etmesi sağlanmıştır. Hidrolik kriko ve kaldırma halatından dolayı herhangi bir yük kaybının yaşanmaması için hidrolik kriko tamamen aşağı indirilmiş olup, kanallı makara içerisinden kaldırma halatı çıkarılmıştır. Mafsal ile kuvvet uygulama noktası arasına su terazisi yerleştirilmiş olup, M12 civata bir miktar döndürülerek su terazisi kontrol bölgesinin yatayda terazili olması sağlanmıştır. Sonrasında su terazisi bu bölgeden kaldırılmıştır. Son durumda mekanik preste daha önceden hesaplanmış olan yükün kalıp seti içerisindeki tabakalı kompozit malzemelere iletilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.26). Kalıp seti içerisindeki tabakalı kompozit malzemeler mekanik preste oda sıcaklığında (25°C) 0,5MPa basınç altında 22 saat bekletilmiştir.



Şekil 3.26 : Mekanik presin yükteki görüntüsü.

Mekanik pres tarafından kalıp seti içerisindeki tabakalı kompozit malzemelere yavaş yavaş yük uygulanmıştır. Yükün kalıp setine tamamen uygulanmasından sonra kalıp seti içerisindeki tabakalı kompozit malzeme tabakalarının arasından epoksi yapıştırıcıların bir kısmının dışarı taşıdığı gözlenmiştir (Şekil 3.27). Bu durum yükün kalıp setine uygulanmasıyla başlamış olup, kısa bir süre boyunca yapıştırıcının dışarı taşması devam

etmiştir. 22 saatin sonunda tabakalı kompozit malzeme tabakaları arasındaki epoksi yapıştırıcı bir miktar kürleşmiş olup, yukarıda belirtilen mekanik preste kalıplama işlemleri tam tersi sırayla gerçekleştirilerek önce kalıp seti, sonrasında da alt kalıp mekanik presten çıkarılmıştır. Mekanik presten çıkarılan alt kalıpta bulunan 16mm çapındaki çelik kolonların üzerindeki gres yağı kalıntıları kağıt havluyla silinerek temizlenmiştir. Böylece bu gres yağı kalıntılarının fırınlama işlemi sırasında katılaşmasının ve yanmasının önüne geçilmiştir. Bu aşamadan sonra alt kalıp, içerisindeki tabakalı kompozit malzemeler ve ara plakalarla birlikte epoksi yapıştırıcının kürleşme süresinin kısaltılması amacıyla fırınlama işlemine gönderilmiştir.



Şekil 3.27 : Kalıp setinin yükteki görüntüsü.

3.4.3 Fırınlama işlemi

Alt kalıp, içerisindeki tabakalı kompozit malzemeler ve ara plakalarla birlikte epoksi yapıştırıcının kürleşme süresinin kısaltılması amacıyla 80°C’de 3 saat süreyle fırınlanmıştır. Alt kalıp, içerisindeki tabakalı kompozit malzemeler ve ara plakalarla birlikte başlangıçta oda sıcaklığında olan fırının içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.28). Sonrasında fırının kapağı kapatılmış olup, fırın üzerindeki program saatinden 80°C sıcaklık ve 180 dakika (3 saat) süre değerleri girilmiştir (Şekil 3.29).



Şekil 3.28 : Fırın içerisine yerleştirilen kalıp ve tabakalı kompozit malzeme görüntüleri.

Fırında ısıtma başlatıldıktan sonra fırın içerisi program saatinde ayarlanan sıcaklık değerine ulaşana kadar zaman saatinde geri sayım başlamamaktadır. Fırın ayarlana sıcaklık değerine ulaştığında zaman saati de ayarlanan süreden geri saymaya başlamaktadır. Fırın içerisinde homojen bir sıcaklık değerinin elde edilebilmesi için fırının kapalı devre fan sistemi, ısıtıcı rezistanslardan sıcak havayı alarak fırının içerisinde göndermektedir. Zaman saatinde geri sayım süresi sona erdiğinde fırının program saati ısıtıcı rezistansı ve fanı otomatik olarak kapatarak devreden çıkarmaktadır. Fırınlama süresi sona eren tabakalı kompozit malzemelerin kapalı fırın içerisinde soğuması sağlanmış olup, fırın içerisi oda sıcaklık değerine ulaştığında fırının kapağı açılarak alt kalıp içerisindeki tabakalı kompozit malzemelerle birlikte fırından çıkarılmıştır.

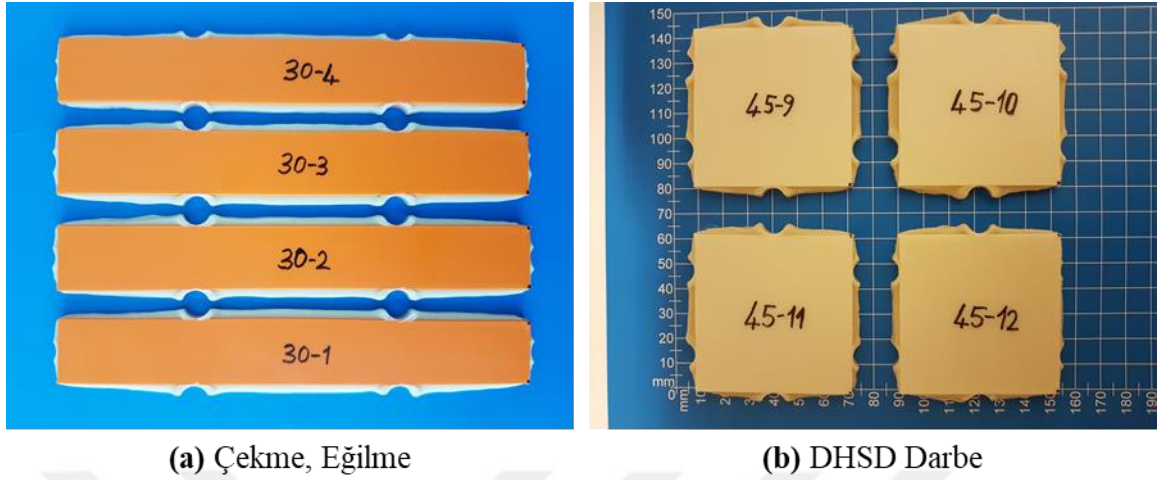


Şekil 3.29 : Kapalı fırın ve program saati görüntüsü.

Fırlama işlemi tamamlandıktan sonra fırından çıkarılan alt kalıp içerisindeki ara plakalar ve tabakalı kompozit malzemeler sırayla kalıptan çıkarılmıştır. Böylece 1 set tabakalı kompozit malzeme yapıştırma, presleme ve fırlama işlemi tamamlanmıştır. Bu işlemden sonra alt kalıp, üst kalıp ve ara plakalar üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları falçata ile temizlenmiş olup, yine bu ekipmanlar üzerindeki kurumuş PVA kalıntıları su ile ıslatılmış kağıt havlu ile en az 3 defa silinerek temizlenmiştir. Sonrasında alt kalıp, üst kalıp ve ara plakalar bir sonraki yapıştırma işlemlerinde tekrar kullanılmak üzere kurumaya bırakılmıştır.

Fırlama işlemi tamamlanarak kalıptan çıkarılan tabakalı kompozit malzemelerin yan kenarlarında her 3 eksen doğrultusunda da epoksi yapıştırıcının dışa taşarak kürleştiği belirlenmiştir. Tabakalı kompozit malzemelerin yan kenarlarından dışa taşarak kürleşen epoksi yapıştırıcının, tabakalı kompozit malzemenin kalınlık eksenini doğrultusuna doğru taşan kısımları falçata ile kesilerek temizlenmiştir. Bu şekilde üretilen tabakalı kompozit malzemelerin bir kısmının görüntüsü Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Bu aşamadan sonra ilgili standart geometrilerinin elde edilebilmesi için çekme ve eğilme test numunesi olarak üretilen tabakalı kompozit malzemeler CNC freze ile kesilmeye gönderilmiştir. DHSD darbe test numunesi olarak üretilen tabakalı kompozit malzemelerin yan kenarlarından taşan epoksi yapıştırıcının DHSD darbe testlerinde herhangi bir etkisinin olmayacağı düşünüldüğünden,

bu test numunelerine CNC freze ile kesme işlemi uygulanmamış olup, numuneler kütle ve boyut ölçümlerine gönderilmiştir.



Şekil 3.30 : Tabakalı kompozit malzemelerin bir kısmının fırınlama sonrası görüntüleri.

3.5 CNC Freze ile Kesme İşlemleri

Çekme ve eğilme testleri uygulanmak üzere üretilen tabakalı kompozit malzemeler, yan kenarlarından dışarı taşan epoksi yapıştırıcının kesilmesi ve aynı zamanda test numunelerinin ilgili standartların boyutlarına getirilmesi amacıyla CNC freze ile kesilmiştir. Ayrıca P+CNC kombinasyonundaki çekme ve eğilme test numuneleri ve M kombinasyonundaki çekme test numuneleri de CNC freze ile kesilerek ilgili standart boyutlarına getirilmiştir. CNC freze ile kesme işlemlerinde Çizelge 3.4’de belirtilen parametreler kullanılmış olup, kesme işlemleri Şekil 3.31’de gösterilen Hattech CNC freze tezgahında yapılmıştır.

Çizelge 3.4 : CNC freze ile kesme işlemlerinde kullanılan parametreler.

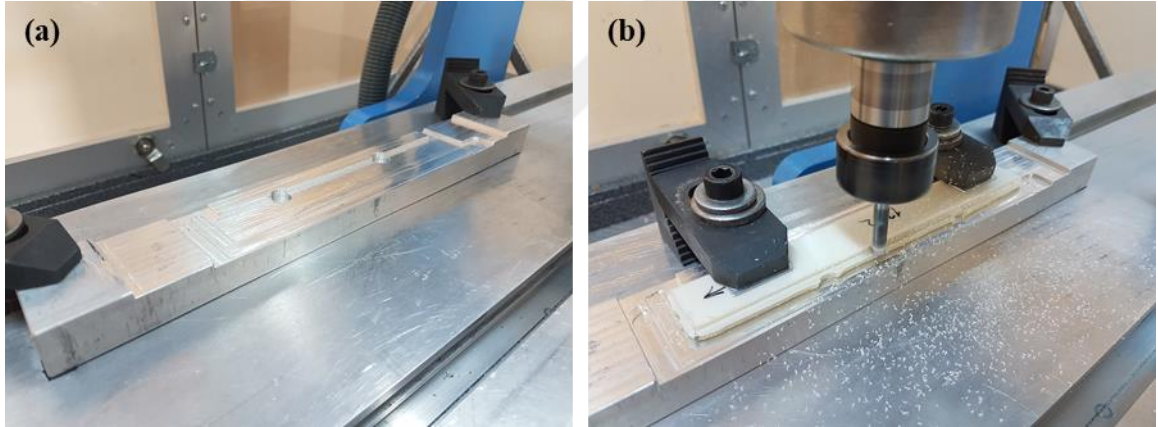
CNC Freze Tezgahı	Hattech 3 Eksen CNC Freze
Eksen Hareketleri	X400mm / Y400mm / Z200mm
CAM Programı	SolidCAM 2015
Eksen Hızları	200mm/dk
Boşta Gezme Hızı	2000mm/dk
Spindle Hızı	3500rpm
Kesme Çakısı	Ø6mm – 4 ağızlı – düz uçlu
Son Paso Miktarı	0,3mm
Son Paso Sayısı	2
Son Paso Kesme Yönü	Tırmanma (Climb)



Şekil 3.31 : Hattech CNC freze tezgahı.

İlgili kombinasyonlardaki çekme ve eğilme test numunelerinin yan kenarlarının CNC freze ile seri bir şekilde kesilebilmesi amacıyla CNC freze tezgahı üzerine bir alüminyum blok sabitlenmiştir. Çekme ve eğilme numunelerinin kesme işlemi için CNC frezeze yerleştirilmesinden sonra her defasında kesilecek malzemeleri eksenlere paralelleme ve sıfırlama işleminin yapılması yerine, tezgah üzerine sabitlenen alüminyum blok üzerinde gerekli işlemler yapılarak çekme ve eğilme test numunelerinin kesilme işlemlerinin her aşamasında sıfırlama ve paralelleme kolaylığı sağlayacak bir kesme şablonu oluşturulmuştur (Şekil 3.32a). Bu kesme şablonu tüm çekme ve eğilme test numunelerinin CNC freze ile kesme işlemleri tamamlanana kadar tezgah üzerindeki sabitlendiği yerden çıkarılmamıştır. Bu kesme şablonu sayesinde CNC freze tezgahı gün içerisinde ilk çalıştırıldığında X, Y ve Z eksenlerinin şablonun ilgili köşesinde birer defa sıfırlaması yapılmakta olup, tezgah kapatılana kadar bir daha sıfırlama işleminin yapılmasına gerek kalmamıştır. Bu yöntemle test numunelerinin CNC freze ile kesilmesindeki toplam işlem süresi oldukça kısaltılmıştır. İlgili tüm test numuneleri bu kesme şablonu üzerine sabitlenerek kesilmiş olup, CNC freze

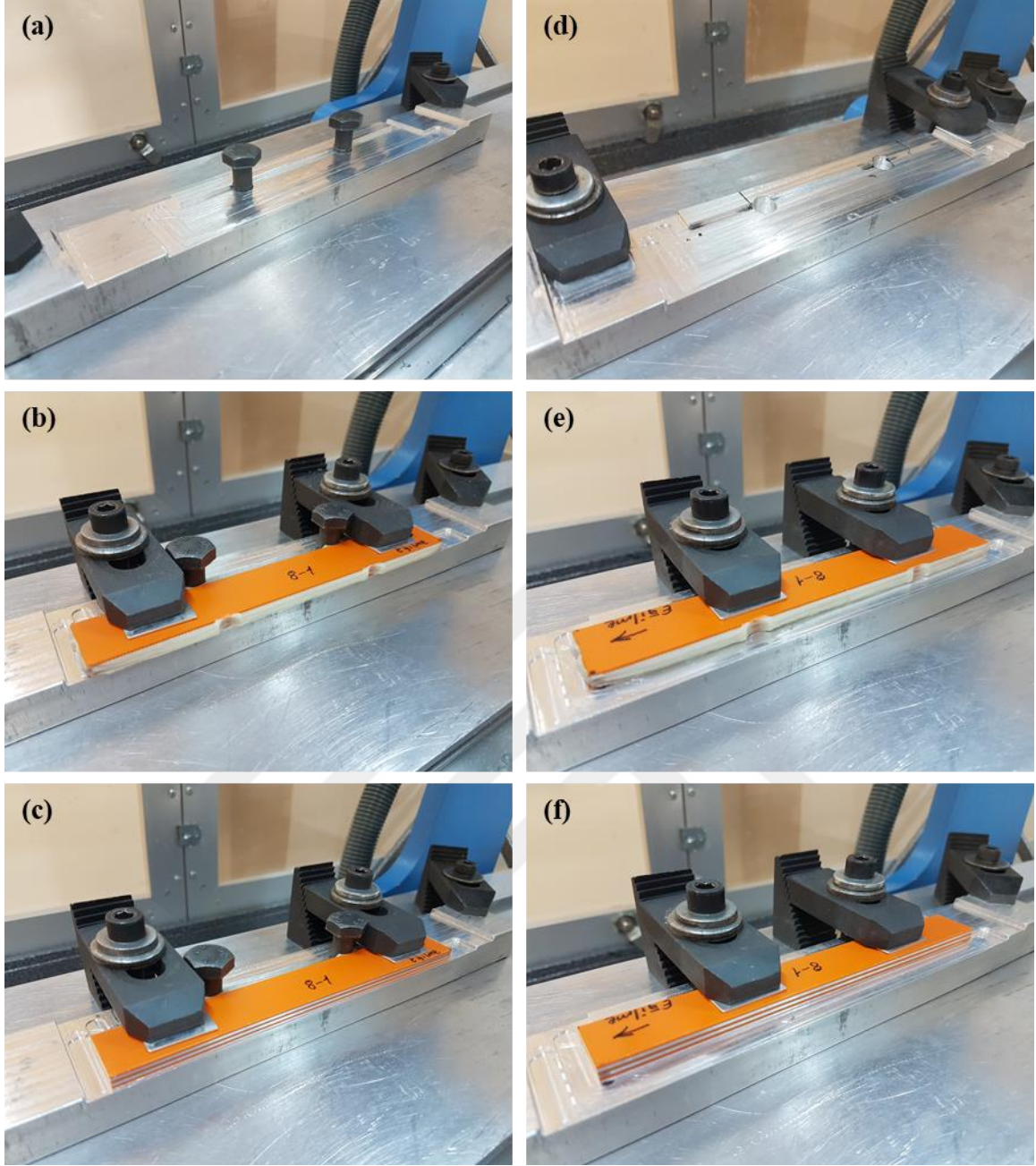
ile kesme işlemlerinde CAM programından elde edilen G kodlarının oluşturulmasında bu kesme şablonu da dikkate alınmıştır. CNC freze ile yan kenarların kesilmesi işlemlerinde öncelikle kaba kesme ve hemen arkasından son paso (temizleme) kesme olmak üzere 2 kesme yöntemi kullanılmıştır. Kaba kesme işlemi, kesilecek malzemenin yan kenarlarında son paso miktarı (0,3mm) kadar pay bırakıldıktan sonra kalan kesilecek kısım X ve Y eksenlerinde tam paso, Z ekseninde 0,25mm'lik pasolar halinde kesilecek şekilde programlama yapılmıştır. Kaba kesme işleminden bir görüntü Şekil 3.32b'de gösterilmiştir. Kaba kesme işleminden sonraki temizleme işlemi, X ve Y eksenlerinde bırakılan son paso miktarı (0,3mm) kadar tam paso, Z ekseninde de toplam kalınlık miktarı kadar tam paso verilerek "tırmanma (climb)" kesme yöntemiyle kesilmiş olup, bu işlem 2 kez tekrarlanarak yan yüzeylerin çok daha temiz çıkması sağlanmıştır. CNC freze ile kesme işlemlerinde kaba kesme işleminde belirli aralıklarla, son paso kesme işleminde sürekli olacak şekilde freze ile kesme noktasına kompresör yardımıyla hava üflenmiştir. Böylece hem kesme çakısının aşırı ısınması hem de kesme sırasında oluşan talaşın bölgeden uzaklaştırılmasıyla talaşın kesilen malzeme üzerine yapışması engellenmiştir.



Şekil 3.32 : CNC freze kesme şablonu ve kaba kesme görüntüsü.

Fırınlama işleminden sonra ilgili standart geometrilerinde yan kenarlarının kesilmesi için CNC frezeye gönderilen tabakalı kompozit malzemelerin frezedeki ilk kesim aşamalarında tezgahın X ve Y eksenlerine ilgili kenarlarının paralelliğinin sağlanabilmesi için kesme şablonu üzerinde önceden açılan deliklere 10mm çapında 2 adet referans civata şaftı yerleştirilmiştir (Şekil 3.33a). Bu civata şaftları anahtar başlı 2 adet M10 civatanın dişli kısımların kesilmesiyle elde edilmiştir. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan alt kalıp içerisindeki 10mm çapındaki çelik kolonların, tabakalı kompozit malzemenin uzun kenarına denk gelen 2 tanesinin epoksi yapıştırıcının dışa taşması sırasında tabakalı kompozit malzeme üzerinde oluşturduğu silindirik boşluklar, kesme şablonu üzerine

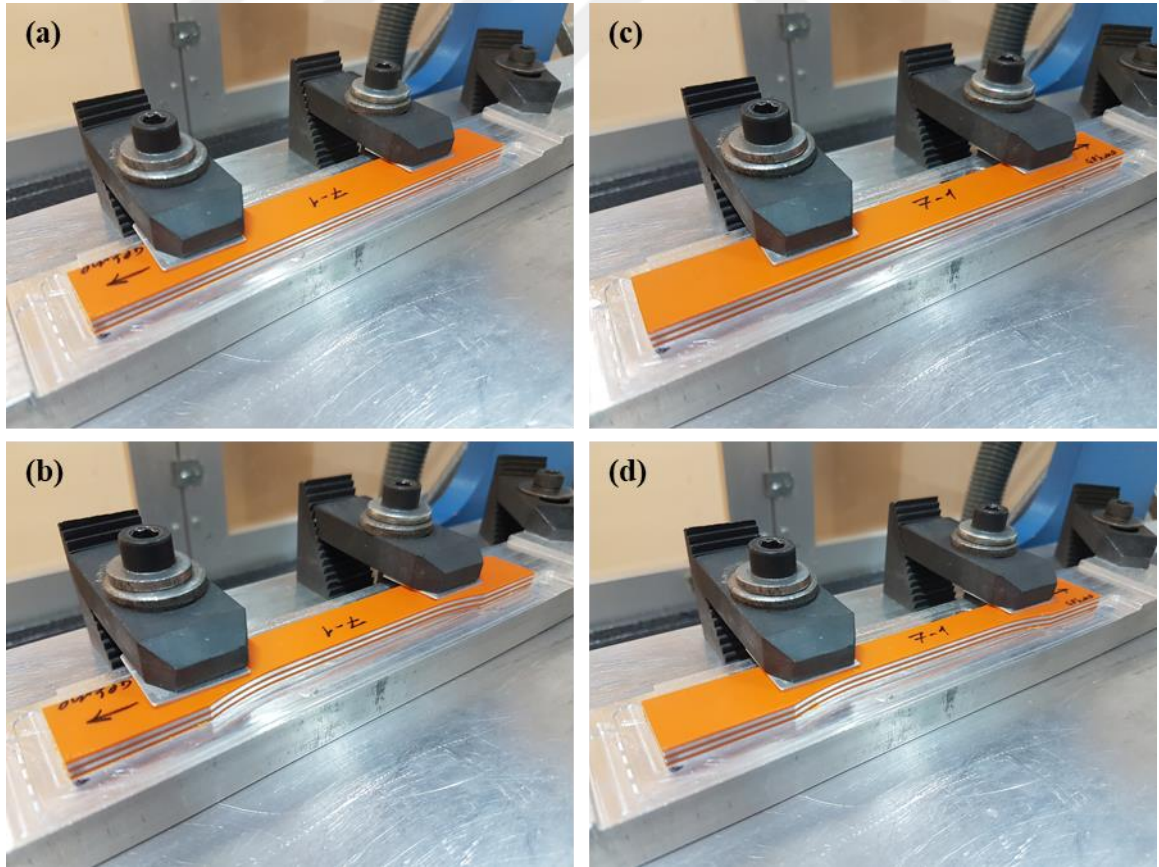
yerleştirilen referans cıvata şaftlarına denk gelecek şekilde test numunesi kesme şablonu üzerine yerleştirilmiştir. Sonrasında 2 adet sabitleme pabucuyla üzerine bastırılarak, tabakalı kompozit malzemenin CNC freze ile kesilmesi sırasında hareket etmesi engellenmiştir (şekil 3.33b). Bu şekilde CNC freze üzerine sabitlenen eğilme test numunesinin ön ve sol yan yüzeyleri CNC freze ile kesilmiştir (şekil 3.33c). İlk kesme işleminden sonra eğilme test numunesi kesme şablonu üzerinden alınmış olup, referans cıvata şaftları da kesme şablonundan çıkarılmıştır (şekil 3.33d). CNC freze ile ilk kesme işlemi uygulanan eğilme test numunesi, kesme işlemi uygulanan yan yüzeylerinin kesişimindeki köşe noktası kesme şablonunun sağ arka köşesine gelecek şekilde kesme şablonu üzerine yerleştirilmiş olup, 2 adet sabitleme pabucuyla üzerine bastırılarak, tabakalı kompozit malzemenin CNC freze ile kesilmesi sırasında hareket etmesi engellenmiştir (şekil 3.33e). Bu şekilde CNC freze üzerine sabitlenen eğilme test numunesinin bu yerleşimdeki ön ve sol yan yüzeyleri CNC freze ile kesilmiştir (şekil 3.33f). İkinci kesme işleminden sonra eğilme test numunesi kesme şablonu üzerinden alınmış olup, CNC freze ile kesme sırasında oluşan çapaklar numuneye uygulanacak testleri engellemeyecek şekilde hafifçe falçata ve eğe yardımıyla test numunesinden uzaklaştırılmıştır. Böylece bir eğilme test numunesinin üretim süreci tamamlanmıştır. CNC freze ile kesilen tüm eğilme test numunelerine aynı işlemler uygulanmış olup, numuneler kütle ve boyut ölçümlerine gönderilmiştir.



Şekil 3.33 : CNC freze ile eğilme test numunesi kesme aşamaları.

Fırınlama işleminden sonra ilgili standart geometrilerinde yan kenarlarının kesilmesi için CNC frezeyle gönderilen çekme test numunelerinin ilk iki kesme aşaması yukarıda anlatılan eğilme test numunelerinin kesme aşamalarıyla birebir aynı olup, bu aşamalar burada ayrıca tekrarlanmamıştır. Eğilme test numunesi kesme işlemlerinden farklı olarak, çekme test numuneleri ikinci kesme işleminden sonra kesme şablonu üzerinden çıkarılmamış olup (Şekil 3.34a), bu numunelere üçüncü bir kesme işlemi uygulanmıştır. Üçüncü kesme işleminde çekme test numunesinin ilgili standart geometrisindeki kemik formu oluşturması için ön yüzeyi CNC freze ile kesilmiştir. Böylece çekme test numunesinin bir yarısında ilgili standart geometrisindeki kemik form oluşturulmuştur (Şekil 3.34b).

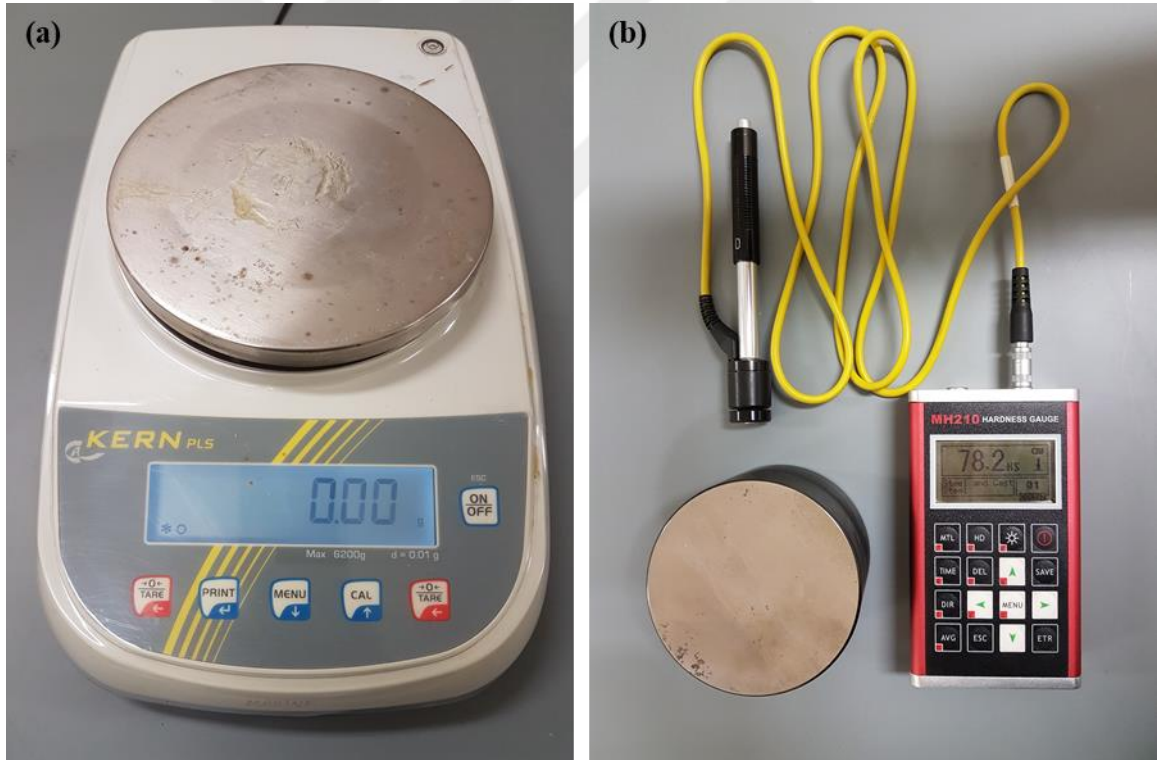
Üçüncü kesme işleminden sonra çekme test numunesi kesme şablonu üzerinden alınmış olup, çekme test numunesinin kemik form oluşturulan kenarı arka tarafta kalacak şekilde dördüncü kesme işlemi uygulanmak üzere tekrar kesme şablonu üzerine yerleştirilmiştir. Çekme test numunesi, kesme işlemi uygulanan yan yüzeylerinin kesişimindeki köşe noktası kesme şablonunun sağ arka köşesine gelecek şekilde kesme şablonu üzerine yerleştirilmiş olup, 2 adet sabitleme pabucuyla üzerine bastırılarak, tabakalı kompozit malzemenin CNC freze ile kesilmesi sırasında hareket etmesi engellenmiştir (Şekil 3.34c). Bu şekilde CNC freze üzerine sabitlenen çekme test numunesinin bu yerleşimdeki ön yüzeyi ilgili standart geometrisindeki kemik formu oluşturması için CNC freze ile kesilmiştir. Böylece çekme test numunesinin her iki tarafında da ilgili standart geometrisindeki kemik form oluşturulmuştur (Şekil 3.34d). Dördüncü kesme işleminden sonra çekme test numunesi kesme şablonu üzerinden alınmış olup, CNC freze ile kesme sırasında oluşan çapaklar numuneye uygulanacak testleri engellemeyecek şekilde hafifçe falçata ve eğe yardımıyla test numunesinden uzaklaştırılmıştır. Böylece bir çekme test numunesinin üretim süreci tamamlanmıştır. CNC freze ile kesilen tüm çekme test numunelerine aynı işlemler uygulanmış olup, numuneler kütle, boyut ve sertlik ölçümlerine gönderilmiştir.



Şekil 3.34 : CNC freze ile çekme test numunesi kesme aşamaları.

3.6 Kütle, Boyut ve Sertlik Ölçümlerinin Yapılması

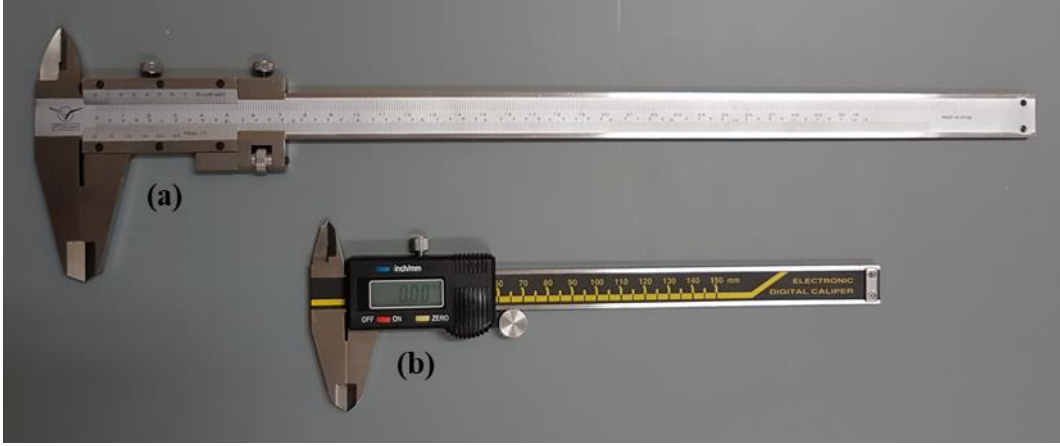
Üretim işlemleri tamamlanan çekme, eğilme ve DHSD darbe test numunelerinin ilgili testlerin öncesinde kütle, boyut ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Test numunelerinin kütlelerinin ölçülmesinde 0,01g hassasiyete sahip KERN PLS 6200-2A hassas terazi kullanılmıştır (Şekil 3.35a). Test numunelerinin sertlik değerlerinin ölçülmesinde MITECH MH210 portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.35b). Sertlik ölçümleri test numunelerinin üst yüzeylerinden D probu ile yapılmış olup, her numunenin 5 farklı bölgesinden ölçümler alınarak ortalama değerler belirlenmiştir. Sertlik ölçümlerinin büyük bir bölümü Shore sertlik birimine göre yapılmış olup, M ve MMMMM kombinasyonundaki numunelerin sertlik değerleri Shore skalasının dışında kaldığından, bu kombinasyondaki ölçümler Vickers sertlik birimine göre yapılmıştır. 786HLD sertliğe sahip, 90mm çapında ve 56mm yüksekliğindeki çelik blok üzerine test numuneleri yerleştirilerek sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.35b).



Şekil 3.35 : Hassas terazi (a) ve Portatif sertlik ölçüm cihazı (b).

Test numunelerinin boyutlarının ölçülmesinde 0-300mm ölçüm aralığına ve 0,02mm hassasiyete sahip mekanik kumpas (Şekil 3.36a) ile 0-150mm ölçüm aralığına ve 0,01mm hassasiyete sahip dijital kumpas kullanılmıştır (Şekil 3.36b). Çekme ve eğilme test numunelerinin boylarının ölçülmesinde mekanik kumpas kullanılmış olup, her numuneden

tek boy ölçümü alınmıştır. Çekme ve eğilme test numunelerinin genişlik ve kalınlık ölçümlerinde dijital kumpas kullanılmıştır. Çekme test numunelerinin çekme bölgelerinden 3 kalınlık ölçümü, 3 genişlik ölçümü ve kemik bölgelerinden de 2 genişlik ölçümü alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Eğilme test numunelerinden 3 kalınlık ölçümü ve 3 genişlik ölçümü alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. DHSD darbe test numunelerinin tüm boyut ölçümlerinde dijital kumpas kullanılmıştır. DHSD darbe test numunelerinin boy ve genişlik ölçümleri test numuneleri üzerindeki silindirik boşluklardan (alt kalıp içerisindeki 10mm çapındaki çelik kolonların epoksi yapıştırıcısının dışa taşması sırasında tabakalı kompozit malzeme üzerinde oluşturduğu silindirik boşluklar) alınmıştır. Boy ölçümleri tek bölgeden yapılmış olup, genişlik ölçümleri 2 farklı bölgeden, kalınlık ölçümleri ise 4 farklı bölgeden alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.



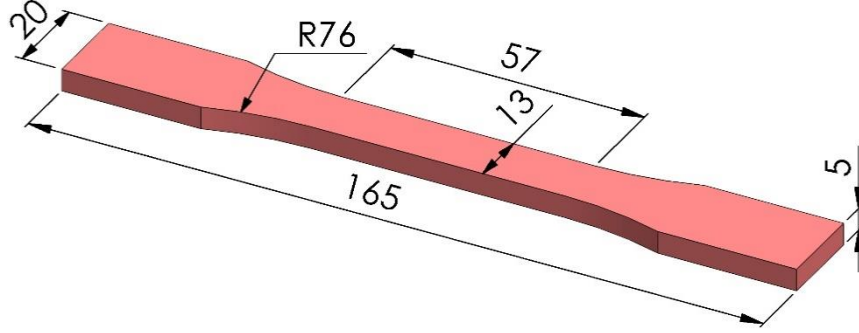
Şekil 3.36 : Mekanik kumpas (a) ve Dijital kumpas (b).

Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan metal ve polimer levhaların kalınlık ölçümleri dijital kumpas kullanılarak belirli aralıklarla alınmış olup, ortalama değerler hesaplanmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerin üretim sonrası kalınlıklarından, her farklı kombinasyon için kullanılan levha kalınlıklarının toplamının farkı alınmış olup, elde edilen değerlerin dörde (tabakalı kompozit malzeme toplam levha sayısının 1 eksiği) bölünmesiyle üretilen tabakalı kompozit malzemelerdeki tabakalar arasında kalan epoksi yapıştırıcının kalınlığı hesaplanmıştır.

3.7 Çekme Testlerinin Yapılması

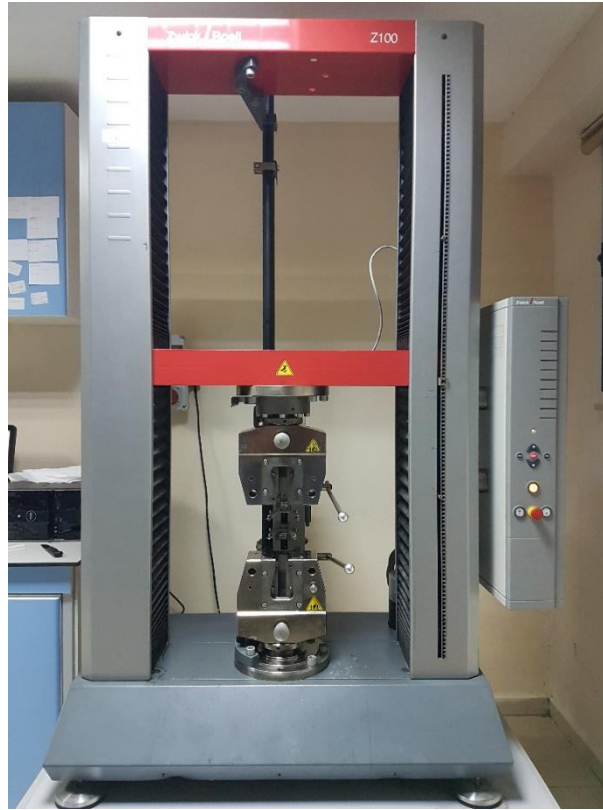
Çekme testleri ASTM D638-14 standardı dikkate alınarak yapılmış olup, test numuneleri bu standart içerisinde Tip-I boyutlarında üretilmiştir (Şekil 3.37) [75]. Çekme test numunelerinde Tip-I standardından farklı olarak, test numunelerinin çekme çenesi

içerisinde kalan kemik kısımlarının genişliği 20mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece çekme test numunelerinin dış boyutlarının eğilme test numunelerinin dış boyutlarıyla aynı olması sağlanmıştır. Bu sayede tabakalı kompozit malzeme üretiminde çekme ve eğilme test numuneleri için aynı kalıpların kullanılabilmesi sağlanmıştır.



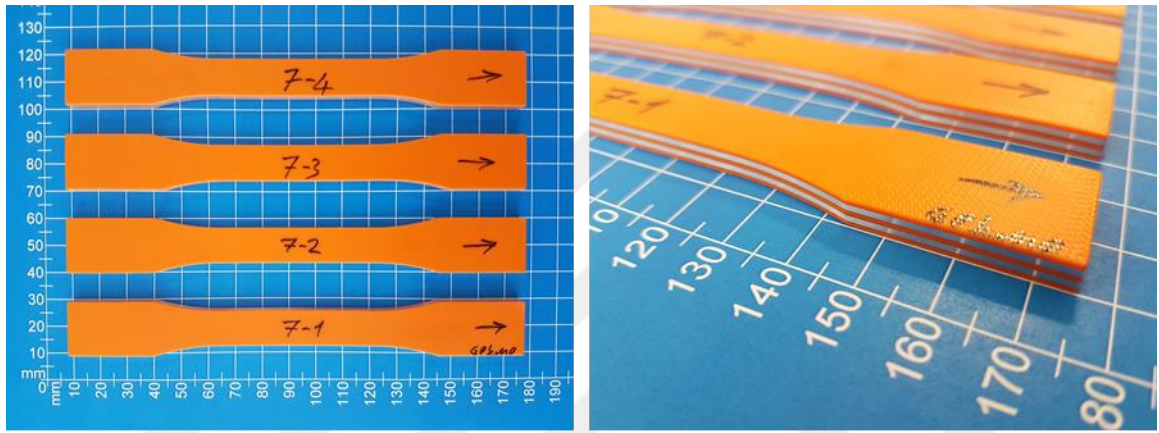
Şekil 3.37 : Çekme test numunesi boyutları.

Çekme testleri Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazıyla, uzun mesafeli, makine gövdesi üzerinde kızaklı, ataçlı ekstansometre kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.38). Çekme testleri 5mm/dk hızda yapılmış olup, ekstansometre aralığı 50mm olarak ayarlanmıştır.

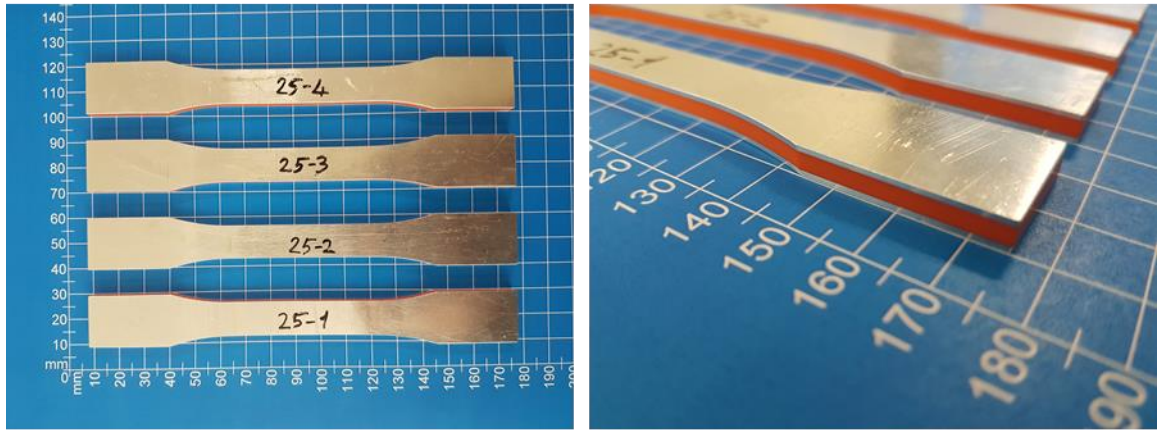


Şekil 3.38 : Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazı – Çekme testi.

Çizelge 3.1’de verilen her bir kombinasyon için dörder adet olacak şekilde çekme test numuneleri üretilmiştir. Üretilen çekme test numunelerinin bir kısmının çekme testi öncesindeki görüntüleri Şekil 3.39’da gösterilmiştir. Üretilen çekme test numunelerinin çekme test cihazında kolaylıkla merkezlenebilmesini sağlamak amacıyla çekme test numunelerinin üzerine 3B yazıcı ile üretilmiş bir şablon kullanılarak referans merkezleme çizgileri çizilmiştir. referans merkezleme çizgileri çizilmiş olan 1 set çekme test numunesi ve 3B yazıcı ile üretilmiş şablon görüntüleri Şekil 3.40a’da gösterilmiştir. Şekil 3.40b’de çekme test cihazına yerleştirilmiş bir test numunesinin çekme testi başlangıcından hemen sonraki görüntüsü verilmiştir.



(a) ABS/Al 2024-T3 7-1~4

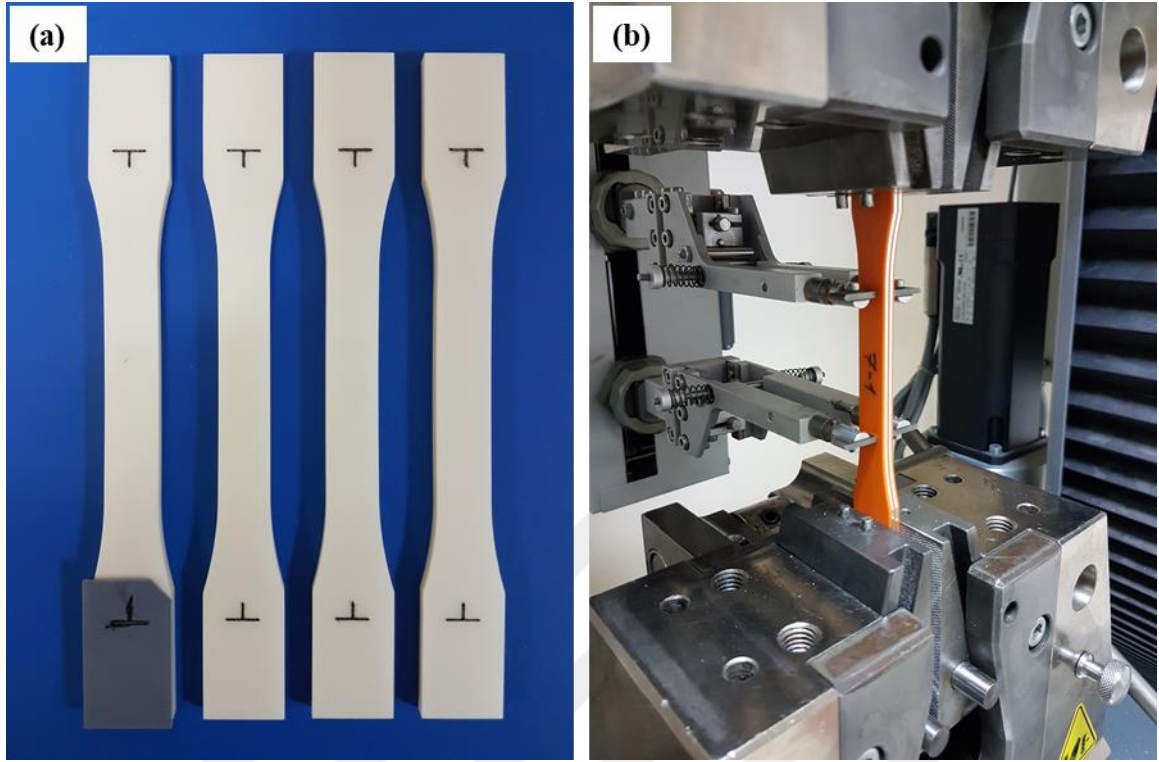


(b) Al 2024-T3/ABS 25-1~4

Şekil 3.39 : Üretilen çekme test numunelerinin bir kısmının çekme testi öncesindeki görüntüleri.

Çizelge 3.1’de verilen kombinasyonların haricinde ayrıca 3B yazıcıda polimer levha üretiminde kullanılan Ultimaker ABS Turuncu 2,85mm ve Ultimaker PLA İnci Beyazı 2,85mm filamentlerden de dörder adet kesilerek, bu filamentlere çekme testi uygulanmıştır. Bu sayede 3B yazdırmada kullanılan filamentlerin, yazdırma öncesindeki çekme testi

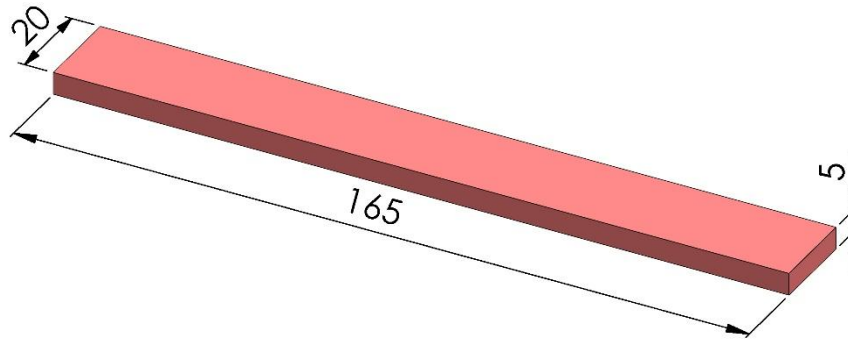
davranışları incelenmiştir. Filamentlerin çekme testlerinde de aynı standart kullanılmış olup, çekme testleri 5mm/dk hızda, ekstansometre aralığı 50mm ayarlanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.40 : Test için hazırlanmış çekme test numuneleri ve çekme testi görüntüsü.

3.8 Eğilme Testlerinin Yapılması

Eğilme testleri ASTM D790-17 standardı dikkate alınarak yapılmış olup, test numuneleri Şekil 3.41’de belirtilen boyutlarda üretilmiştir [76].



Şekil 3.41 : Eğilme test numunesi boyutları.

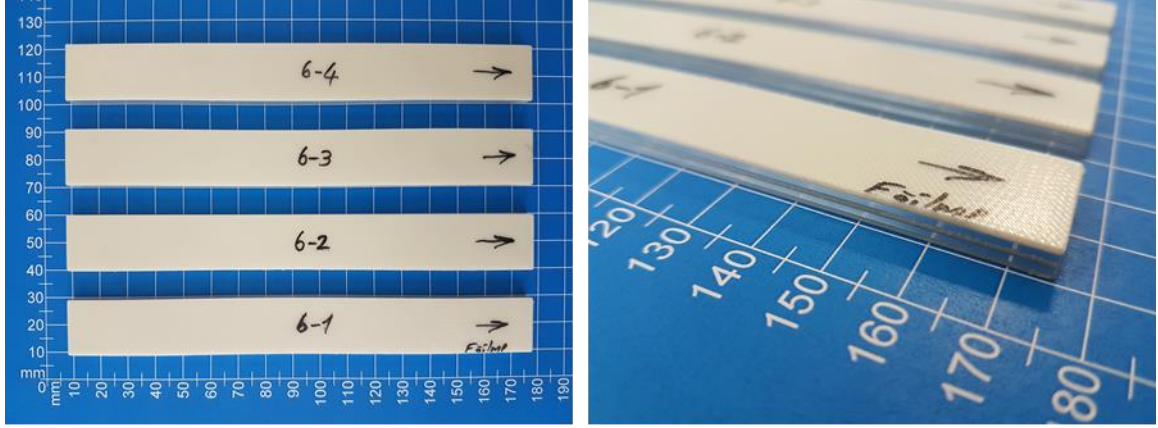
Eğilme testleri Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazıyla yapılmıştır (Şekil 3.42). Eğilme testleri 2mm/dk hızda, 20mm çapındaki 3 nokta yerleşim tipindeki destekler

kullanılarak yapılmış olup, destek aralığı 80mm olarak ayarlanmıştır. 80mm destek aralığının her defasında aynı şekilde ayarlanabilmesi için 3B yazıcı ile üretilmiş bir aralık şablonu kullanılmıştır (Şekil 3.44a). Aralık şablonu kullanılarak destek aralığı ayarlanmış olup, destekler sabitlendikten sonra aralık şablonu test cihazından çıkarılmıştır (Şekil 3.44b).

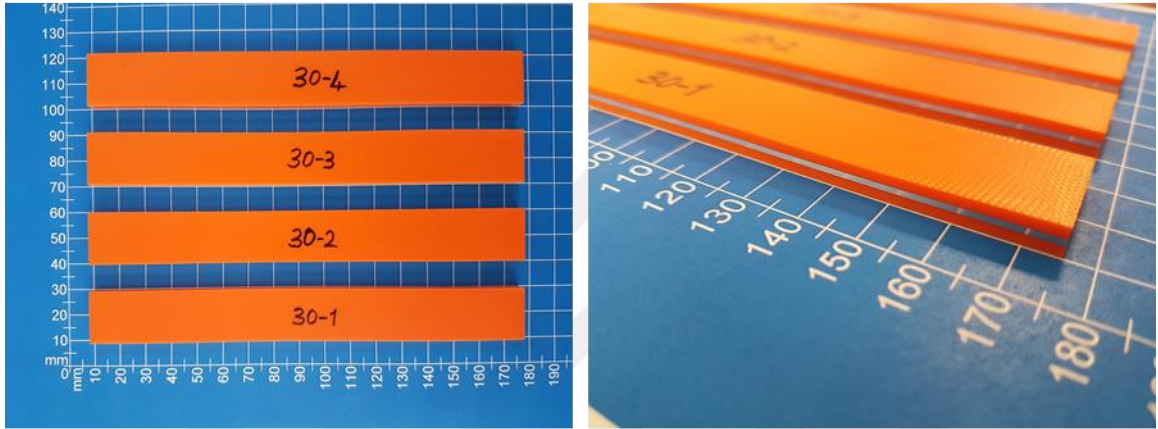


Şekil 3.42 : Zwick/Roell Z100 malzeme test cihazı – Eğilme testi.

Çizelge 3.1’de verilen her bir kombinasyon için dörder adet olacak şekilde eğilme test numuneleri üretilmiştir. Üretilen eğilme test numunelerinin bir kısmının eğilme testi öncesindeki görüntüleri Şekil 3.43’de gösterilmiştir. Üretilen eğilme test numunelerinin eğilme test cihazında kolaylıkla merkezlenebilmesini sağlamak amacıyla 3B yazıcı ile eğilme numunesi merkezleme şablonu üretilmiştir. Öncelikle eğilme numunesi merkezleme şablonu test cihazına yerleştirilmekte olup, eğilme test numunesinin ilgili yan yüzeyleri merkezleme şablonuna temas edecek şekilde test cihazına yerleştirilmektedir (Şekil 3.44c). Sonrasında eğilme test numunesini hareket ettirmeden, merkezleme şablonu test cihazından çıkarılmıştır (Şekil 3.44d).

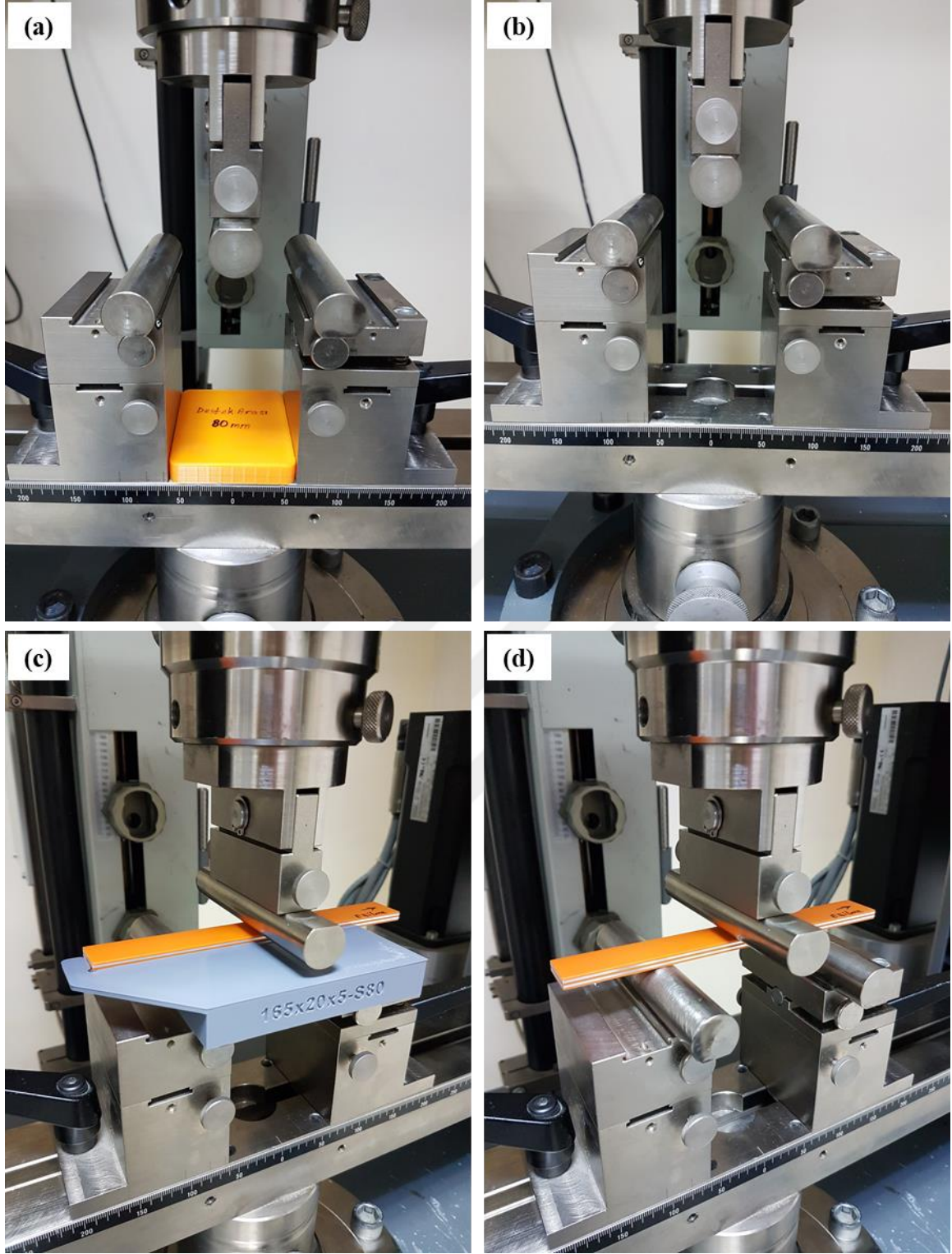


(a) PLA/Al 2024-T3 6-1~4



(b) ABS/Al 2024-T3 30-1~4

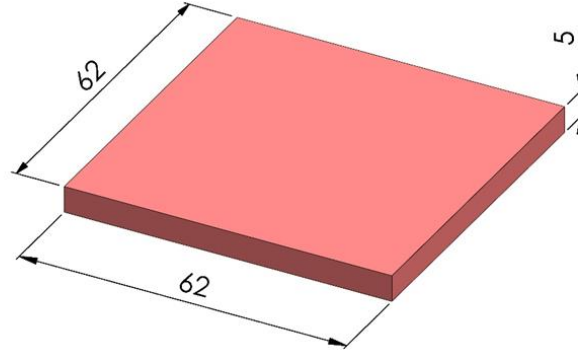
Şekil 3.43 : Üretilen eğilme test numunelerinin bir kısmının eğilme testi öncesindeki görüntüleri.



Şekil 3.44 : Eğilme testi destek aralığının ayarlanması ve test numunesinin merkezlenmesi.

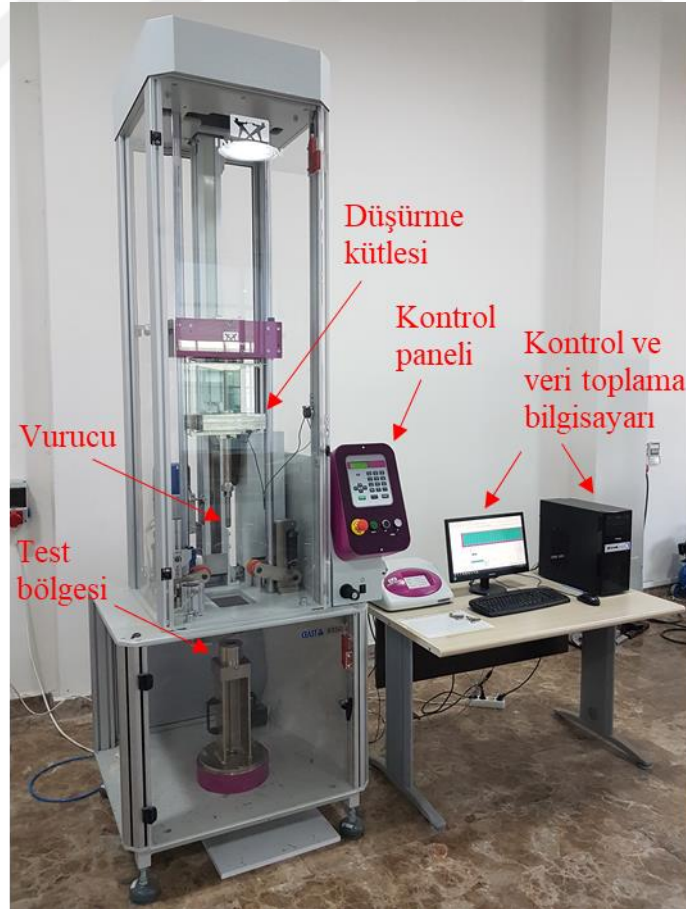
3.9 Düşük Hızlı Serbest Düşme Darbe Testlerinin Yapılması

DHSD darbe testleri ASTM D7136-15 standardı dikkate alınarak yapılmış olup, test numuneleri darbe test cihazının alt tabla üst çapından daha büyük olacak şekilde 62x62x5mm boyutlarında üretilmiştir (Şekil 3.45) [77].

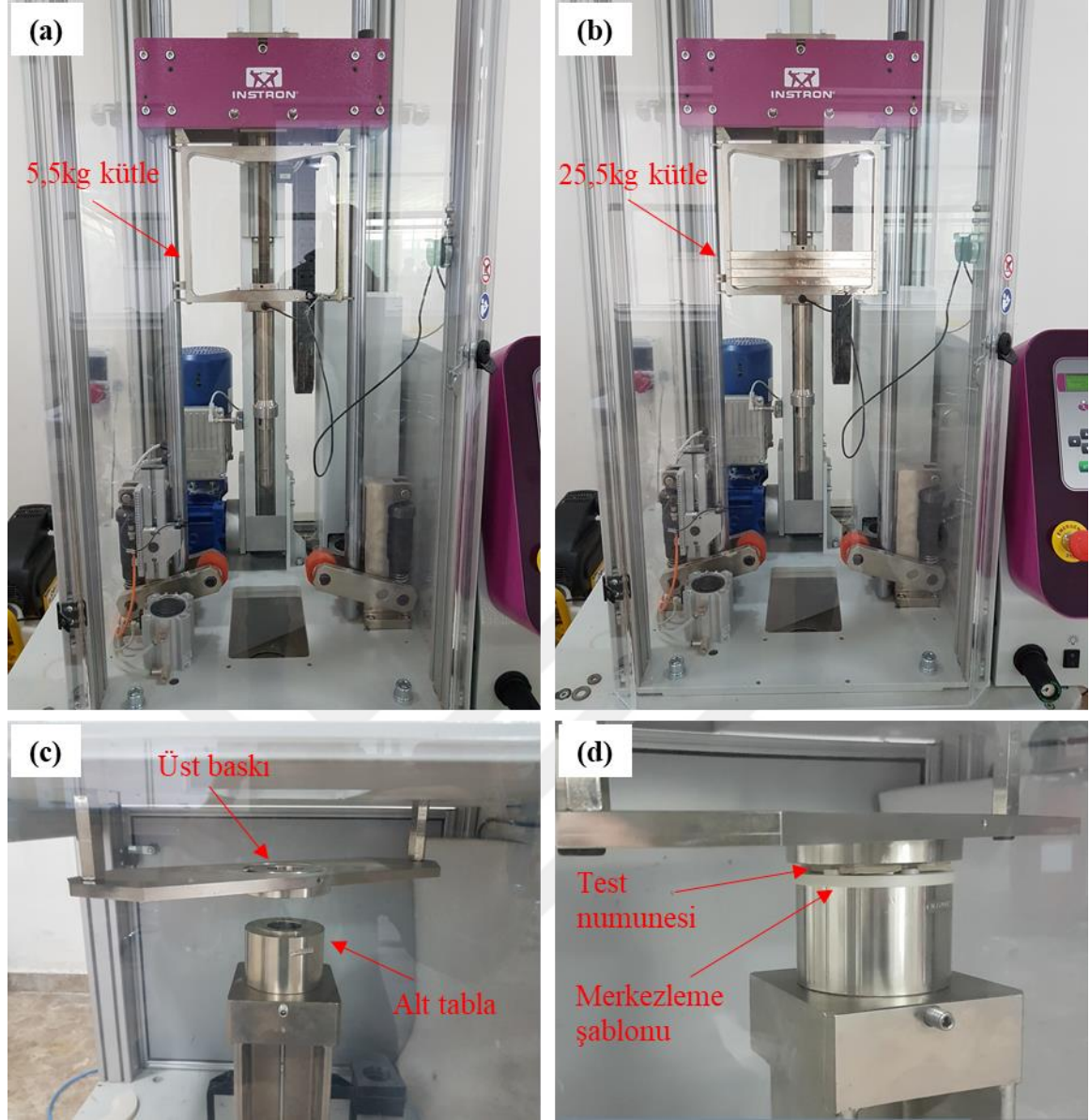


Şekil 3.45 : DHSD Darbe test numunesi boyutları.

DHSD darbe testleri Instron Ceast 9350 malzeme test cihazıyla yapılmıştır (Şekil 3.46). Belirtilen darbe test cihazı kütle düşürme yöntemine göre çalışmakta olup, testler sırasında 5,5kg (Şekil 3.47a) ve 25,5kg (Şekil 3.47b) olmak üzere 2 farklı kütle kullanılmıştır. Tüm testlerde üst baskı pnömatik pistonlarının basıncı 3bar olarak ayarlanmış olup, testlerde 20mm çapında küresel uçlu vurucu kullanılmıştır.



Şekil 3.46 : Instron Ceast 9350 DHSD darbe test cihazı.

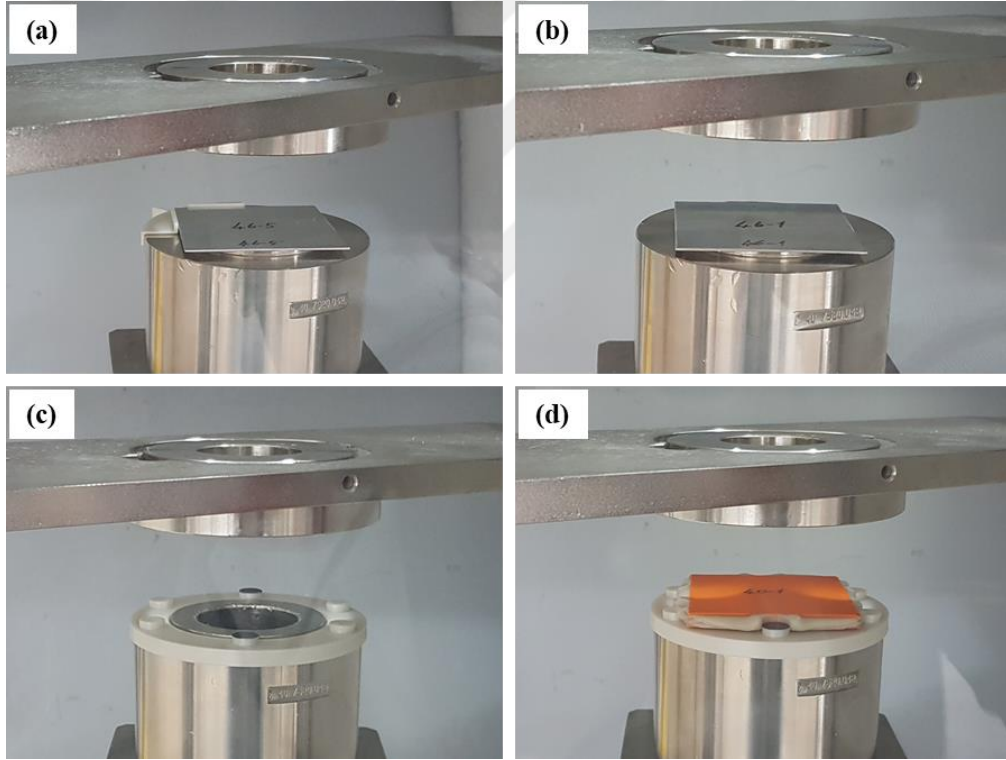


Şekil 3.47 : Düşürme kütleleri ve test bölgesi.

Testlerde kullanılan DHSD darbe test cihazının test bölgesinin görüntüsü Şekil 3.47c'de gösterilmiştir. Şekilde görülen alt tablanın üst kısmına test numuneleri yerleştirilerek, üst baskının numune üzerine bastırılmasıyla testler gerçekleştirilmektedir. Test numunelerinin yerleştirildiği alta tabla silindirik yapıda olup, iç çapı 40mm, dış çapı 60mm boyutlarındadır. Test numunelerinin üzerine bastırılan üst baskı da silindirik yapıda olup, iç çapı 40mm, dış çapı 100mm boyutlarındadır. DHSD darbe testinin hemen öncesinde üst baskının test numunesi üzerine baskı uyguladığı haldeki bir görüntü Şekil 3.47d'de gösterilmiştir.

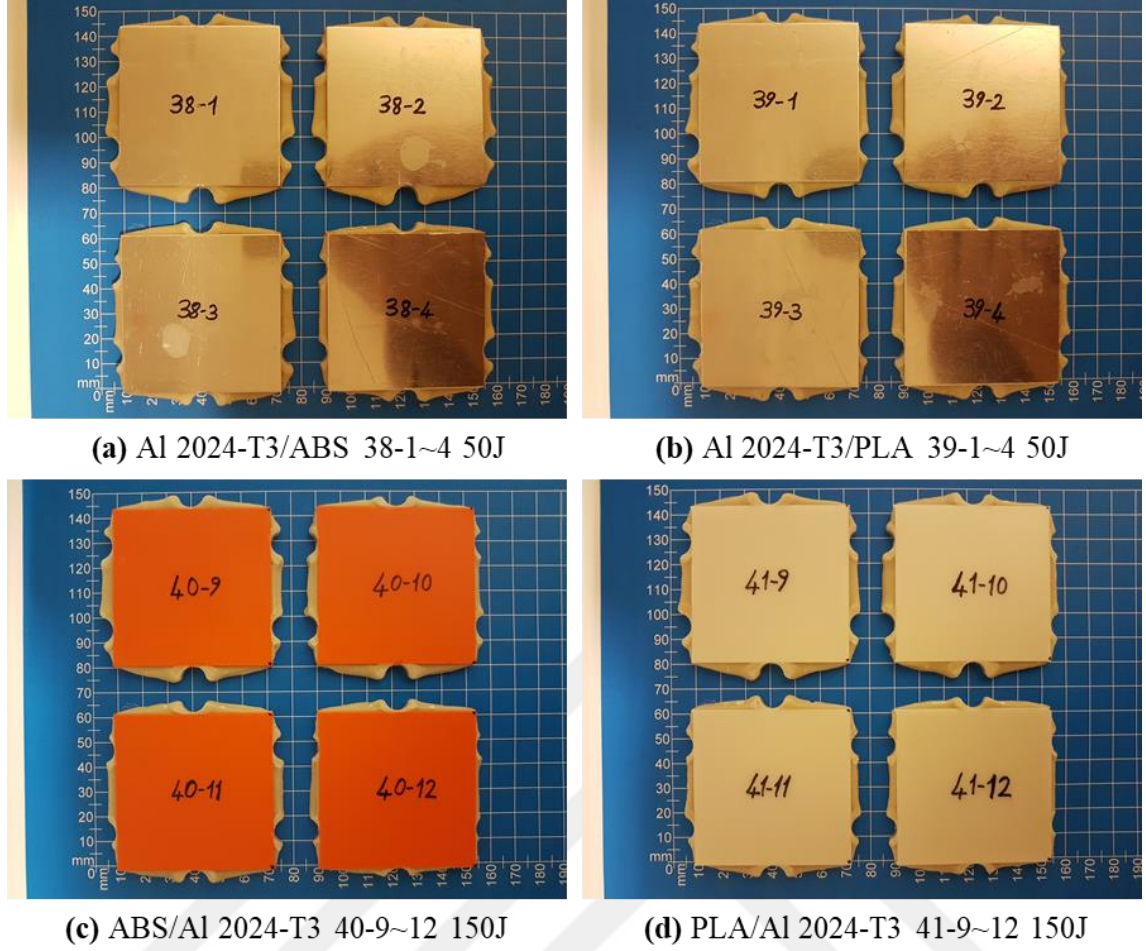
Üretilen DHSD darbe test numunelerinin darbe test cihazının alt tablası üzerine kolaylıkla merkezlenebilmesini sağlamak amacıyla 3B yazıcı ile merkezleme şablonları

üretlmifltir. 1mm kalınlıktaki test numuneleri için farklı, 5mm kalınlıktaki test numuneleri için farklı geometrilerde olacak Şekilde 2 farklı merkezleme Şablonu üretlmifltir. 1mm merkezleme Şablonu ile 1mm kalınlığındaki test numuneleri alt tabla üzerine yerleştirilerek merkezlenmektedir (Şekil 3.48a). Sonrasında darbe test numunesini hareket ettirmeden, merkezleme Şablonu test cihazından çıkarılmış olup, üst baskı test numunesi üzerine bastırılarak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.48b). 5mm kalınlığındaki test numunelerinin darbe testlerinde 5mm merkezleme Şablonu alt tabla üzerine tatlı sıkı bir toleransla yerleştirilerek sabitlenmiştir (Şekil 3.48c). Sonrasında darbe test numunesi merkezleme Şablonu içerisine yerleştirilmiş olup, merkezleme Şablonu yerinden çıkarılmadan üst baskı test numunesi üzerine bastırılarak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.48d). Şekil 3.48’de merkezleme Şablonları ve test numunelerinin alt tabla üzerindeki yerleŐiminin daha iyi görülebilmesi için üst baskı bastırılmadan önceki görüntüler gösterilmiştir.



Şekil 3.48 : Merkezleme Şablonları ile test numunelerinin yerleştirilmesi.

Çizelge 3.1’de verilen her bir kombinasyon için 3 farklı darbe enerjisinde testler gerçekleŐtirilmiŐ olup, her farklı enerji için 4 adet olmak üzere her kombinasyonda onikiŐer adet olacak Şekilde DHSD darbe test numuneleri üretlmifltir. Üretilen DHSD darbe test numunelerinin bir kısmının darbe testi öncesindeki görüntüleri Şekil 3.49’da gösterilmiştir. DHSD darbe testlerinde kullanılan düşürme kütlesi ve darbe enerjisi bilgileri izelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.49 : Üretilen DHSD darbe test numunelerinin bir kısmının darbe testi öncesindeki görüntüleri.

Çizelge 3.5 : DHSD darbe testlerinde kullanılan düşürme kütlesi ve darbe enerjisi bilgileri.

No	Kombinasyon	Malzeme	Numune Kodu	Düşürme Kütlesi (kg)	Uygulanan Darbe Enerjisi (J)		
					1~4*	5~8*	9~12*
1	Polimer (P)	ABS	33	5,5	5	10	15
2	P	PLA	34	5,5	5	10	15
3	P + CNC	ABS	Bu kombinasyonda darbe testi yapılmamıştır				
4	P + CNC	PLA	Bu kombinasyonda darbe testi yapılmamıştır				
5	PPPPP	ABS	35	5,5	5	10	15
6	PPPPP	PLA	36	5,5	5	10	15
7	Metal (M)	Al 2024-T3	46	25,5	25	50	75
8	MMMMM	Al 2024-T3	37	25,5	50	100	150
9	MPMPM	Al 2024-T3 / ABS	38	25,5	50	100	150
10	MPMPM	Al 2024-T3 / PLA	39	25,5	50	100	150
11	PMPMP	ABS / Al 2024-T3	40	25,5	50	100	150
12	PMPMP	PLA / Al 2024-T3	41	25,5	50	100	150
13	MPPPM	Al 2024-T3 / ABS	42	25,5	50	100	150
14	MPPPM	Al 2024-T3 / PLA	43	25,5	50	100	150
15	PPMPP	ABS / Al 2024-T3	44	25,5	50	100	150
16	PPMPP	PLA / Al 2024-T3	45	25,5	50	100	150

* ... numaralı test numuneleri

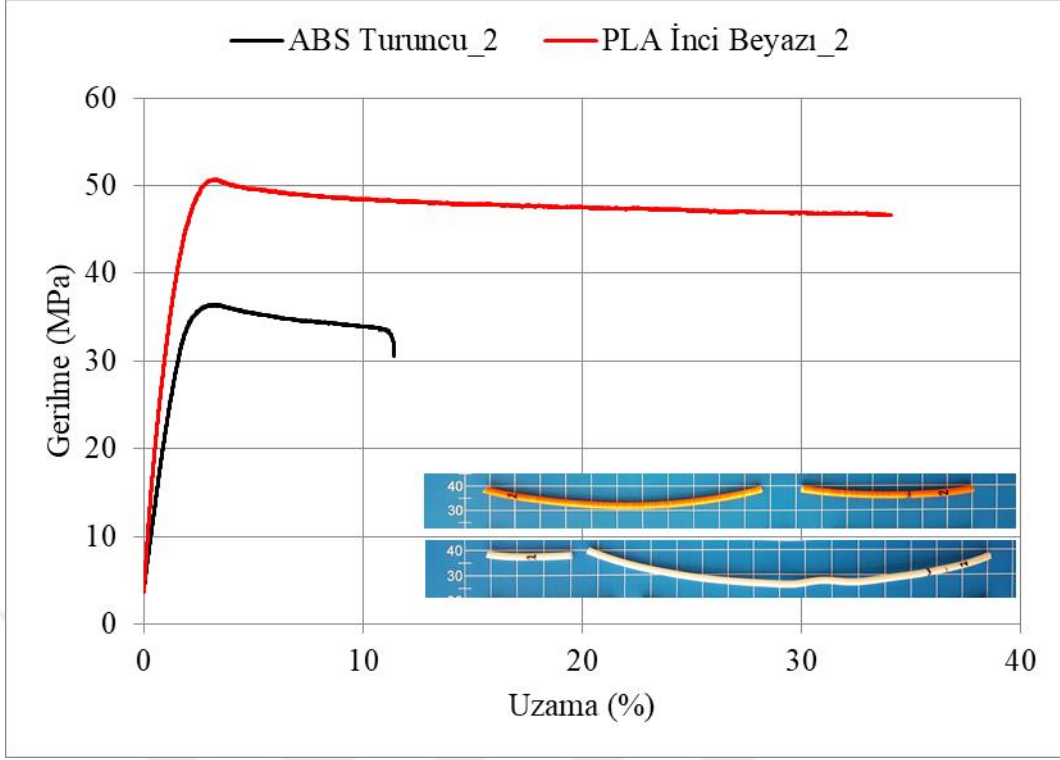
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Çekme Testlerinden Elde Edilen Bulgular

Çekme testlerinde her bir kombinasyon için 4 adet test numunesi üretilmiş olup, Çizelge 3.1’de belirtilen kombinasyonlara ek olarak, 3B yazdırılmış levhaların üretiminde kullanılan 2,85mm çapındaki Ultimaker ABS Turuncu ve Ultimaker PLA İnci Beyazı filamentlerden de dörder adet kesilerek çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testlerinde her bir parametre için 4 farklı numuneden elde edilen eğriler aynı grafik üzerinde birleştirilmiş olup, bunlar arasından her parametre için birer eğri seçilmiştir. Eğrilerin seçilmesinde varsa çakışan en az 2 eğriden birinin seçilmesine, çakışma yoksa birbirine en yakın eğrilerden birinin seçilmesine ya da ortalama olarak gösterilebilecek bir eğrinin seçilmesine dikkat edilmiştir. Bu şekilde seçilerek gruplandırılmış olan eğrileri ve bu eğrilerin ait olduğu çekme test numunelerinin çekme testi sonrasındaki görüntülerini içeren grafikler alt bölümlerde verilmiştir.

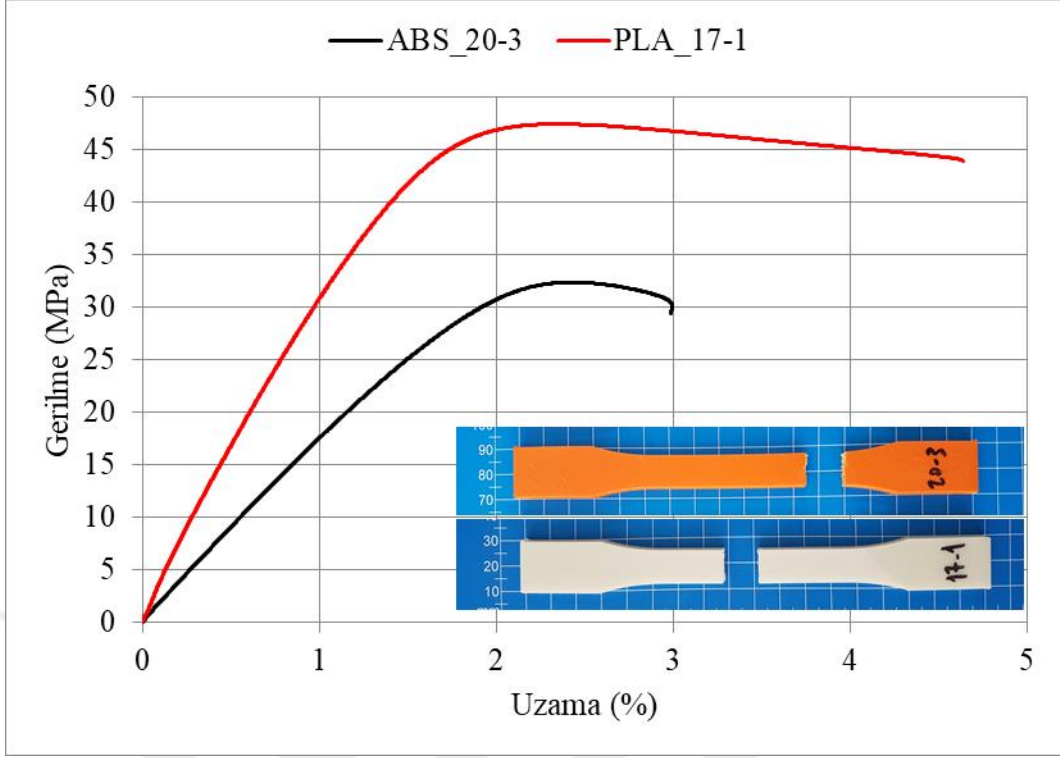
4.1.1 P, P + CNC, PPPPP kombinasyonu

3B yazdırılmış polimer levha üretiminde kullanılan filamentlerin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA filamentin çekme dayanımının ABS filamentten yaklaşık olarak 1,38 kat daha fazla olduğu ve ayrıca PLA filamentin kopma uzamasının da ABS filamentten yaklaşık 2,83 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yine grafik incelendiğinde 3B yazdırmada kullanılan PLA filamentin tokluğunun ve dolayısıyla da sünekliğinin ABS filamentten bir hayli yüksek olduğu söylenebilir. Tokluk terimi, bir malzemenin kendisine uygulanan yük karşısında deforme olana kadar absorbe ettiği toplam enerji miktarı olarak tanımlanabilir. Bir malzemeye ait gerilme – uzama eğrisinin altında kalan alan o malzemenin tokluğuna eşittir. Bir malzemenin kendisine uygulanan yükün etkisiyle elastik şekildeğişimi sırasında depoladığı enerjiye de rezilyans denir. Bir malzemeye ait gerilme – uzama eğrisinde elastik bölgenin altında kalan alan o malzemenin rezilyansına eşittir. Bu durumda PLA filamentin rezilyansının da ABS filamentten daha yüksek olduğu söylenebilir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, PLA filamentin elastisite modülünün ABS filamentten daha fazla olduğu görülmektedir.



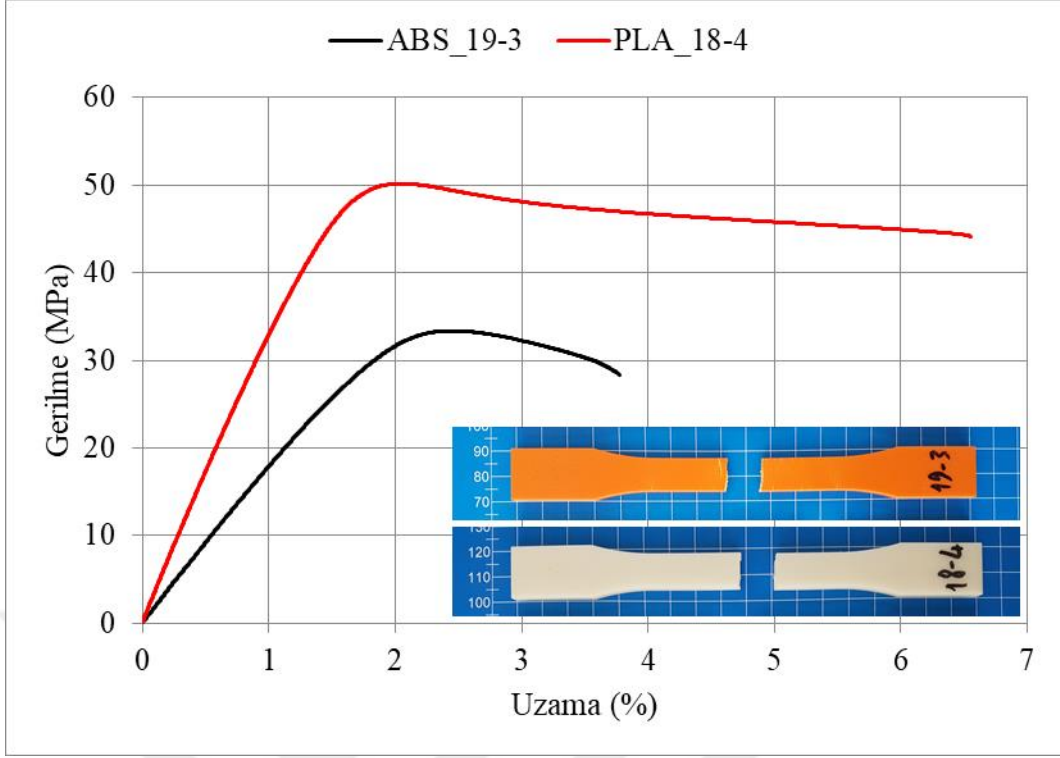
Şekil 4.1 : Filament gerilme – uzama grafiği.

P kombinasyonundaki 3B yazdırılmış numunelerin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin çekme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık olarak 1,45 kat daha fazla olduğu ve ayrıca PLA test numunesinin kopma uzamasının da ABS test numunesinden yaklaşık 1,57 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yine grafik incelendiğinde 3B yazdırılmış PLA test numunesinin tokluğunun ve dolayısıyla da sünekliğinin ABS test numunesinden bir hayli yüksek olduğu söylenebilir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, PLA test numunesinin elastisite modülünün ABS test numunesinden daha fazla olduğu görülmektedir. Son olarak filament çekme testi sonuçları (Şekil 4.1) ile 3B yazdırılmış polimer test numunelerinin çekme testi sonuçları (Şekil 4.2) kıyaslandığında, her iki polimer malzemede de 3B yazdırma sonrasında çekme dayanımlarında çok fazla bir değişiklik olmazken, kopma uzamalarının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak 3B yazdırma işlemi sonrasında polimer malzemenin sünekliğinin bir hayli azaldığı söylenebilir.



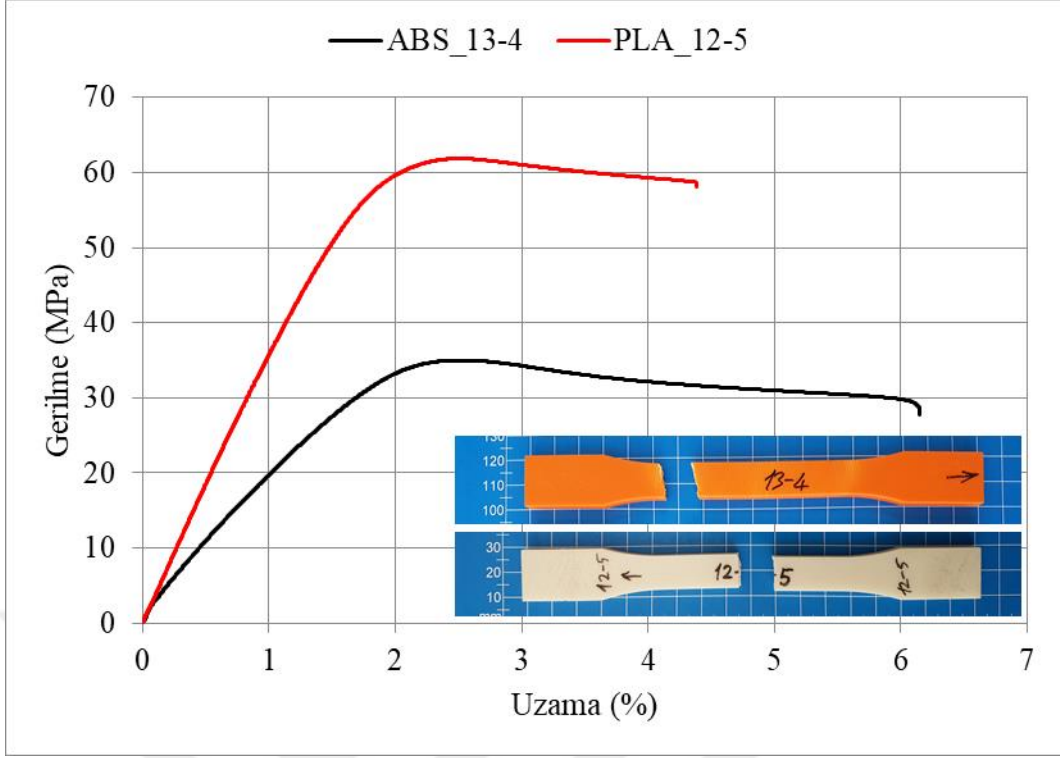
Şekil 4.2 : P kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

P+CNC kombinasyonundaki 3B yazdırılmış ve sonrasında yan kenarları CNC freze ile kesilmiş numunelerin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin çekme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık olarak 1,47 kat daha fazla olduğu ve ayrıca PLA test numunesinin kopma uzamasının da ABS test numunesinden yaklaşık 1,74 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yine grafik incelendiğinde PLA test numunesinin tokluğunun ve dolayısıyla da sünekliliğinin ABS test numunesinden bir hayli yüksek olduğu söylenebilir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, PLA test numunesinin elastisite modülünün ABS test numunesinden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 : P+CNC kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

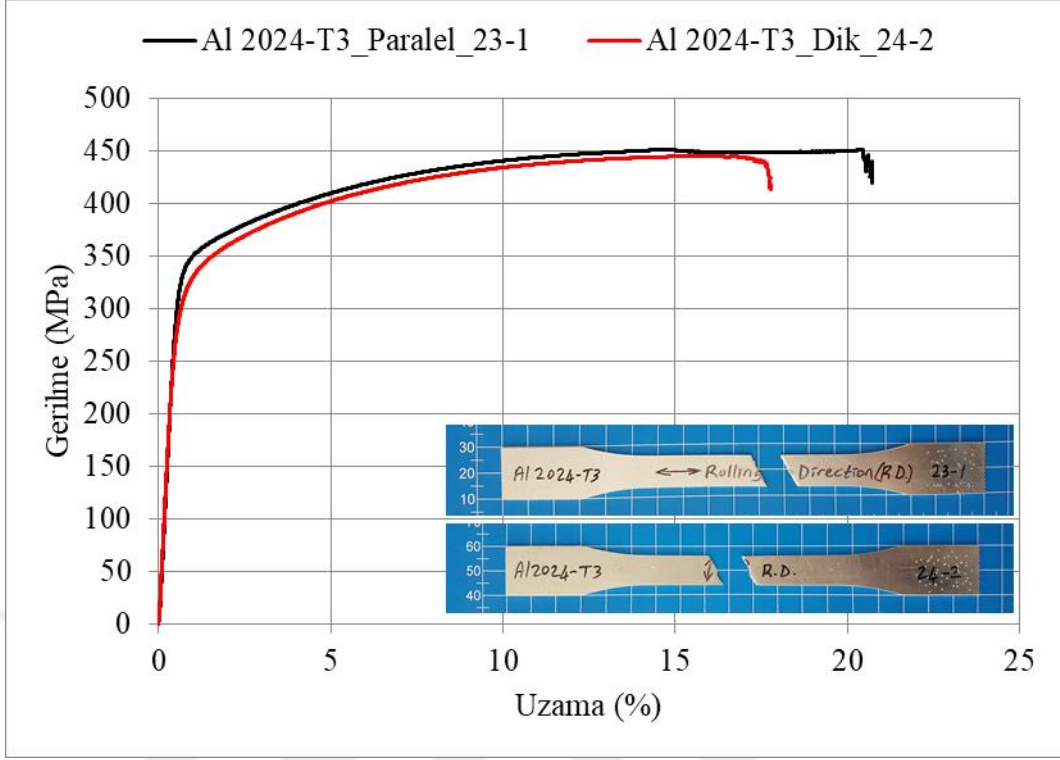
PPPPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.4’de gösterilmiştir. PPPPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki 3B yazdırılmış polimer levhaların 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. PPPPP kombinasyonunda 3B yazdırılmış PLA levhalar kullanılarak üretilen test numunelerinde ilk üretilen 4 test numunesinin (PPPPP_PLA_12-1~4) test sonuçları incelendiğinde, bu test numuneleri arasında üretimden kaynaklanabileceği değerlendirilen tutarsızlıkların olduğu gözlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak belirtilen test numunelerinden 4 adet daha üretilmiş olup (PPPPP_PLA_12-5~8), bu numunelerin test sonuçlarının birbiri arasında daha tutarlı oldukları, ayrıca bunların çekme dayanımlarının da hatalı olarak üretildikleri değerlendirilen test numunelerinden yaklaşık 8MPa daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bundan sonraki değerlendirmelerde son üretilen 4 test numunesi ile ilgili veriler dikkate alınmıştır. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin çekme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık olarak 1,77 kat daha fazla olduğu ve ayrıca ABS test numunesinin kopma uzamasının ise PLA test numunesinden yaklaşık 1,41 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, PLA test numunesinin elastisite modülünün ABS test numunesinden daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4 : P PPPP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

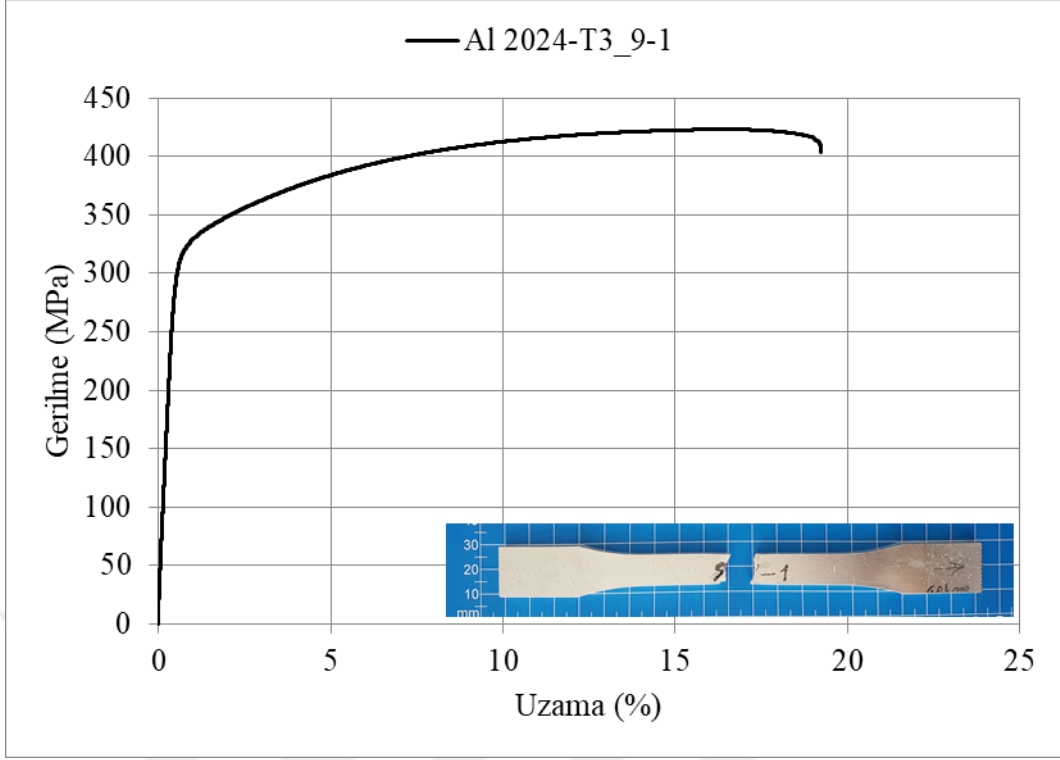
4.1.2 M, M M M M M kombinasyonu

M kombinasyonundaki 1mm kalınlığa sahip Al 2024-T3 test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.5’de gösterilmiştir. M kombinasyonundaki 1mm kalınlığa sahip Al 2024-T3 lehvadan haddeleme doğrultusu çekme testi doğrultusuna paralel (Al 2024-T3 Paralel) ve dik (Al 2024-T3 Dik) olacak şekilde 2 farklı durumda yan kenarları CNC freze ile kesilerek test numuneleri elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde Al 2024-T3 Paralel test numunesinin çekme dayanımının Al 2024-T3 Dik test numunesinden ihmal edilebilecek seviyede de olsa bir miktar fazla olduğu ve ayrıca Al 2024-T3 Paralel test numunesinin kopma uzamasının da Al 2024-T3 Dik test numunesinden yaklaşık 1,2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Böylece haddeleme doğrultusunun malzemenin çekme testi davranışları üzerinde az da olsa etkisinin olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, her iki durumdaki test numunesinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.5 : M kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

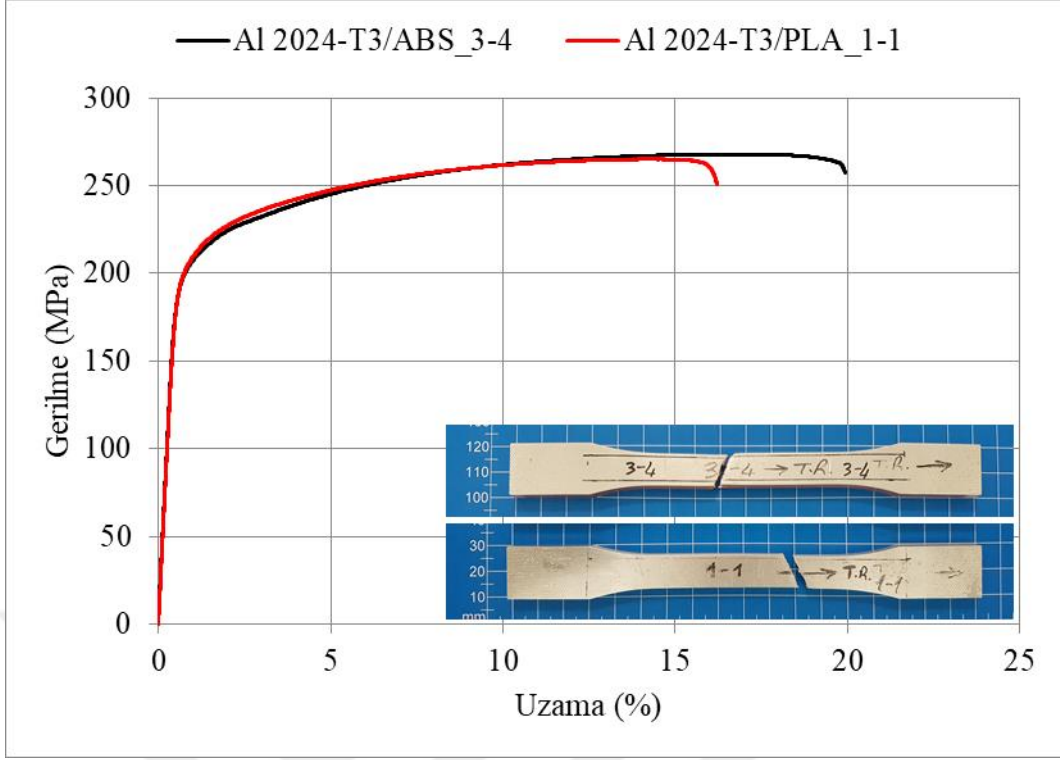
MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.6’da gösterilmiştir. MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki Al 2024-T3 levhaların 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. Grafik incelendiğinde MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin çekme dayanımının yaklaşık 425MPa, kopma uzamasının da yaklaşık %19 mertebelerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.6 : MMMMM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

4.1.3 MPMPM kombinasyonu

MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.7’de gösterilmiştir. MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki metal (Al 2024-T3) ve polimer (3B yazdırılmış ABS veya PLA) levhaların belirtilen kombinasyonda 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. Grafik incelendiğinde MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde ABS polimer levha kullanılan test numunesinin çekme dayanımının PLA polimer levha kullanılan test numunesinden ihmal edilebilecek seviyede de olsa bir miktar fazla olduğu ve ayrıca ABS polimer levha kullanılan test numunesinin kopma uzamasının da PLA polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,2 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, her iki farklı polimer levha kullanılan test numunesinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

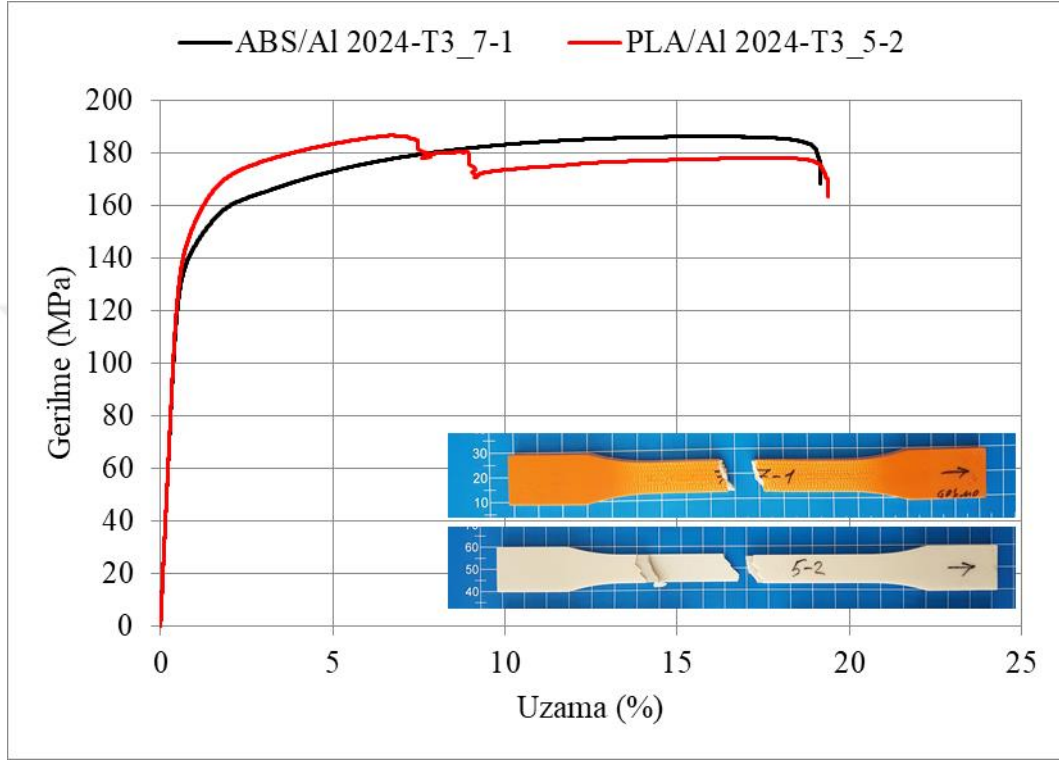


Şekil 4.7 : MPMPM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

4.1.4 PMPMP kombinasyonu

PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir. PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki metal (Al 2024-T3) ve polimer (3B yazdırılmış ABS veya PLA) levhaların belirtilen kombinasyonda 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. Grafik incelendiğinde PMPMP kombinasyonundaki her iki farklı polimer lehva kullanılan tabakalı kompozit test numunelerinin çekme dayanımı, kopma uzaması ve elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yine grafikteki eğriden ve deforme olmuş numune görüntülerinden de anlaşılacağı gibi PLA polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi sırasında plastik bölgede tabakalı kompozit malzemenin her iki dış kısmında bulunan polimer levhadan biri artık daha fazla uzama göstermeyerek kopmuş ve eğride bir miktar düşmeye neden olmuştur. Bu kopmaya kadar plastik bölge içerisinde ABS polimer levha kullanılan test numunesinden bir miktar daha fazla çekme dayanımı gösteren PLA polimer levha kullanılan test numunesi, bu düşmeyle birlikte ABS polimer levha kullanılan test numunesinin eğrisiyle neredeyse çakışmış olup, bir süre bu şekilde ilerledikten sonra diğer dış kısımda bulunan polimer levha da artık daha fazla uzama göstermeyerek kopmuş ve

eğride öncekiyle neredeyse aynı miktarda düşmeye neden olmuştur. Kalan 3 tabakanın uzaması bir süre daha devam ettikten sonra her 3 tabaka da aynı anda kopmuş olup, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi bu şekilde tamamlanmıştır. ABS polimer levha kullanılan test numunesinin çekme testinde böyle bir durum söz konusu olmamış olup, tüm metal ve polimer tabakalar birlikte uzayarak, birlikte kopmuşlardır.

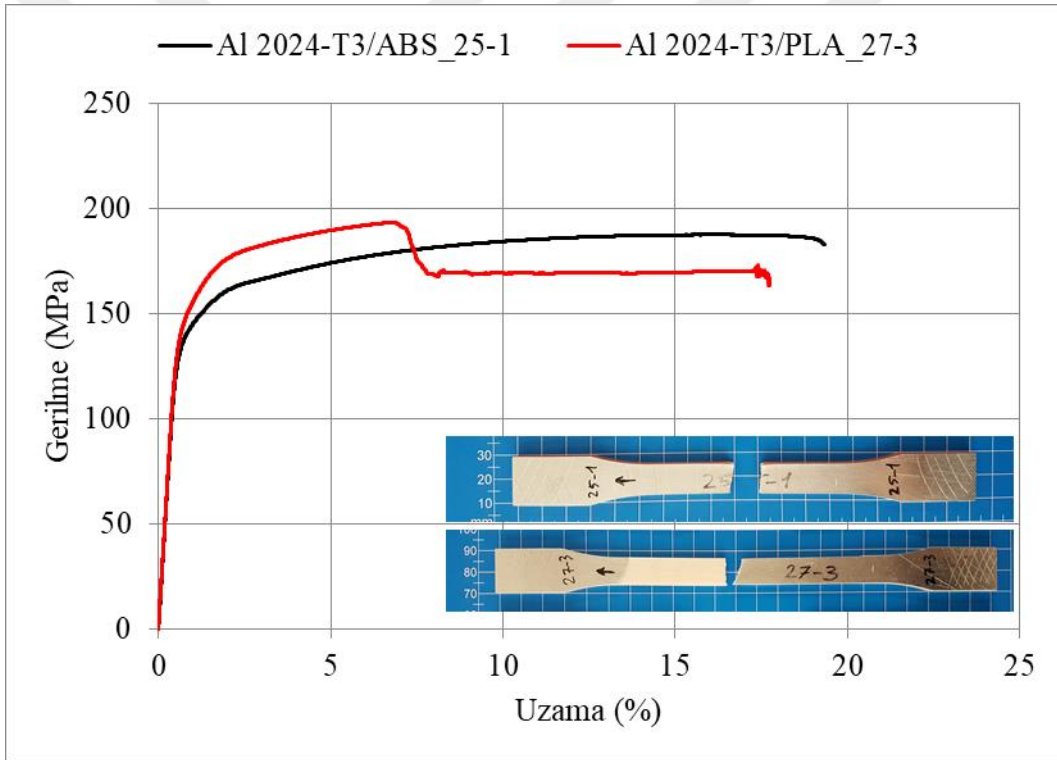


Şekil 4.8 : PMPMP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

4.1.5 MPPPM kombinasyonu

MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.9’da gösterilmiştir. MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki metal (Al 2024-T3) ve polimer (3B yazdırılmış ABS veya PLA) levhaların belirtilen kombinasyonda 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. Grafik incelendiğinde MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin, ABS polimer levha kullanılan test numunesine göre çekme dayanımının bir miktar fazla, kopma uzamasının da bir miktar düşük olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, her iki farklı polimer levha kullanılan test numunesinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yine grafikteki eğriden ve deforme olmuş numune görüntülerinden de anlaşılacağı gibi PLA

polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi sırasında plastik bölgede tabakalı kompozit malzemenin iç kısmında bulunan polimer levhaların tümü artık daha fazla uzama göstermeyerek aynı anda kopmuş ve eğride bir miktar düşmeye neden olmuştur. Bu kopmaya kadar plastik bölge içerisinde ABS polimer levha kullanılan test numunesinden bir miktar daha fazla çekme dayanımı gösteren PLA polimer levha kullanılan test numunesi, bu düşmeyle birlikte ABS polimer levha kullanılan test numunesinin eğrisinin altına düşmüştür. Böylece her iki dış kısımda bulunan metal levhaların uzaması bir süre daha devam ettikten sonra aynı anda kopmuş olup, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi bu şekilde tamamlanmıştır. ABS polimer levha kullanılan test numunesinin çekme testinde böyle bir durum söz konusu olmamış olup, tüm metal ve polimer tabakalar birlikte uzayarak, birlikte kopmuşlardır.

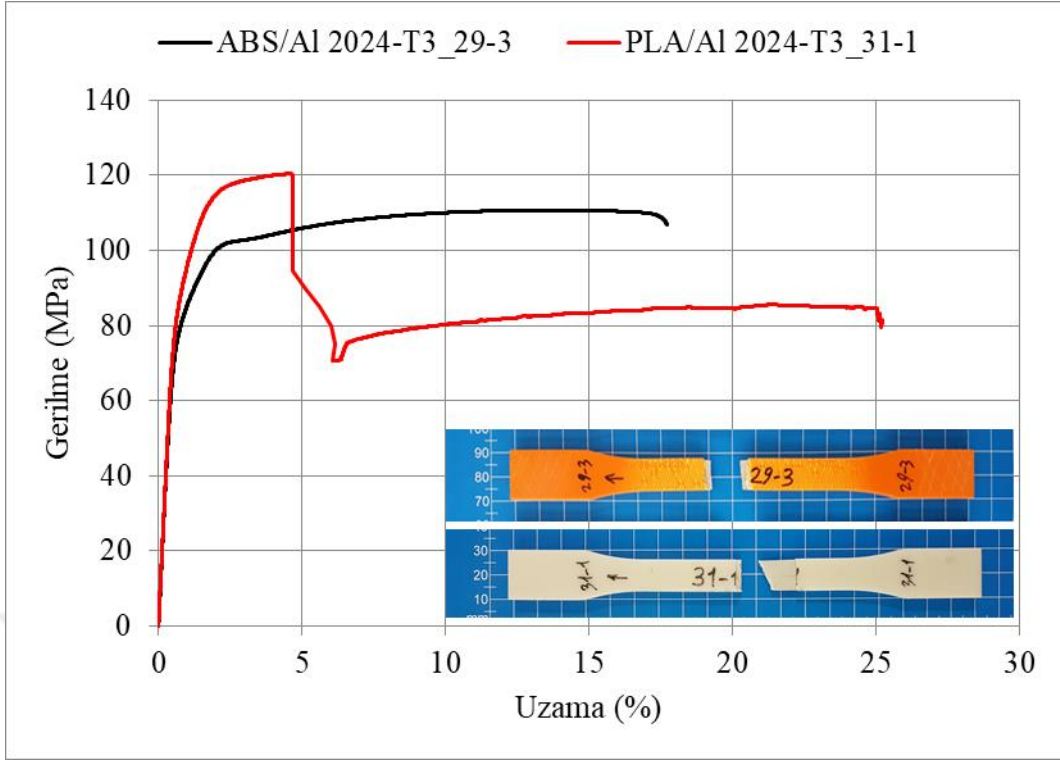


Şekil 4.9 : MPPPM kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

4.1.6 PPMPP kombinasyonu

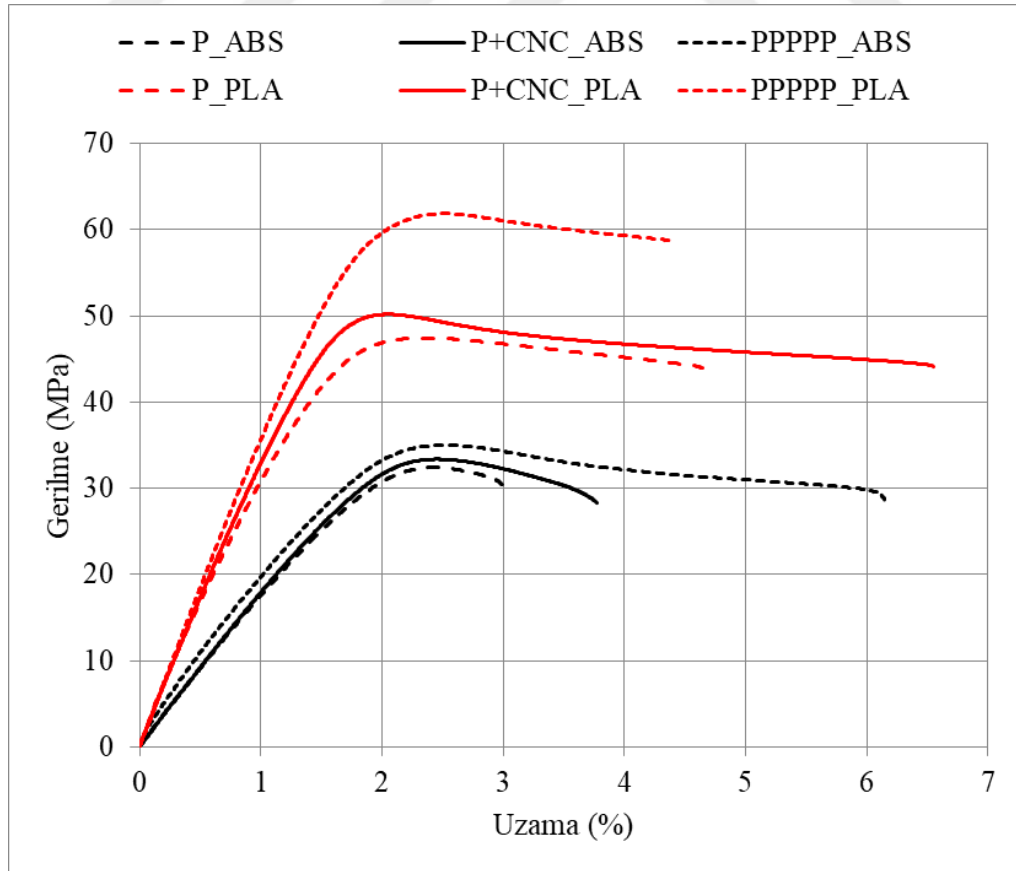
PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemeler aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanan 1mm kalınlığındaki metal (Al 2024-T3) ve polimer (3B yazdırılmış ABS veya PLA) levhaların belirtilen kombinasyonda 5 kat üst üste yerleştirilerek yapıştırılmasıyla elde edilmiş olup, yan kenarları CNC freze ile kesilmiştir. Grafik incelendiğinde PPMPP

kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin, ABS polimer levha kullanılan test numunesine göre çekme dayanımının yaklaşık 1,1kat, kopma uzamasının da yaklaşık 1,43 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, her iki farklı polimer levha kullanılan test numunesinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Yine grafikteki eğriden ve deforme olmuş numune görüntülerinden de anlaşılacağı gibi PLA polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi sırasında plastik bölgede tabakalı kompozit malzemenin her iki dış kısmında bulunan polimer levhaların tümü artık daha fazla uzama göstermeyerek çok kısa bir süre arayla kopmuş ve eğride bir miktar düşmeye neden olmuştur. Bu kopmaya kadar plastik bölge içerisinde ABS polimer levha kullanılan test numunesinden bir miktar daha fazla çekme dayanımı gösteren PLA polimer levha kullanılan test numunesi, bu düşmeyle birlikte ABS polimer levha kullanılan test numunesinin eğrisinin altına düşmüştür. Böylece orta tabakada bulunan tek metal levhanın uzaması bir süre daha devam ettikten sonra kopmuş olup, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde çekme testi bu şekilde tamamlanmıştır. ABS polimer levha kullanılan test numunesinin çekme testinde böyle bir durum söz konusu olmamış olup, tüm metal ve polimer tabakalar birlikte uzayarak, birlikte kopmuşlardır. PLA polimer levha kullanılan test numunesinde plastik bölgede polimer levhaların kopmasından sonraki düşüş ve sonrasındaki uzama bölgesi incelendiğinde, bu kısımdaki çekme dayanımının yaklaşık olarak 85MPa olduğu görülmektedir. Oysaki bu kısımda tabakalı kompozit malzeme içerisinde kopmamış olan sadece 1 tabaka Al 2024-T3 metal levha kalmış olup, bunun da çekme dayanımının 450MPa mertebelerinde olması gerekmektedir. Bu farkın nedeni şu şekilde açıklanabilir. Her ne kadar bu kısımda tek bir metal levha kalmış gibi görünse de çekme test cihazının programı şu anki kuvvet değerini test başlangıcında girilen kesit alanına bölerek bir gerilme değeri hesaplamaktadır. Oysaki başlangıç kesit alanı şu anda çekme testi devam eden kesit alanının yaklaşık 5,39 katı kadardır. Bu katsayı şu andaki gerilme (85MPa) değeriyle çarpıldığında, Al 2024-T3 metal levhanın çekme dayanımına (450MPa) yakın bir sonuç elde edilmiş olacaktır. Bu durumun yukarıdaki diğer alt bölümlerde verilen benzer şekilde düşmelerin görüldüğü eğrilere sahip çekme testleri için de geçerli olduğu söylenebilir.



Şekil 4.10 : PPMPP kombinasyonu gerilme – uzama grafiği.

4.1.7 Çekme testi genel değerlendirmeleri



Şekil 4.11 : Polimer çekme test numuneleri karşılaştırma grafiği.

Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama eğrileri Şekil 4.11’deki grafikte bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 3B yazdırılmış test numunelerinin CNC freze ile yan kenarlarının kesilmesi sonucunda hem ABS hem de PLA malzemeler kullanılan test numunelerinin kopma uzamasının bir hayli arttığı, çekme dayanımının da az da olsa arttığı görülmektedir. Sadece 3B yazdırılarak çekme testi uygulanan numunelerde yan yüzeylerde bulunan nozul dönüş hareketinden kaynaklanan girintilerin (Şekil 4.12a, b) malzemede çentik etkisi oluşturduğu, bu nedenle test numunelerinin çekme testlerinde gerçek uzama değerlerine ulaşmadan koptuğu belirlenmiştir. 3B yazdırılan test numunelerinin yan yüzeylerinin CNC freze ile kesilmesi sonucunda çentik etkisi oluşturan girintiler ortadan kaldırılmış olup, çok daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 4.12c, d). Bu sayede test numunelerinin gerçek kopma uzaması değerlerine kadar uzadıktan sonra koptuğu ve kopmaların çoğunun da CNC freze ile kesilmemiş numunelere göre daha düzenli ve orta bölgeden ekstansometre arasından gerçekleştiği belirlenmiştir. PPPPP kombinasyonundaki test numuneleri incelendiğinde, ABS malzeme kullanılan test numunesinin P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre kopma uzamasında yine bir hayli artışın olduğu, çekme dayanımında da yine az bir artışın olduğu söylenebilir. PPPPP kombinasyonundaki PLA malzeme kullanılan test numunesi incelendiğinde, P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre çekme dayanımında bir hayli artışın olduğu, buna zıt bir şekilde kopma uzamasında da bir hayli azalmanın olduğu görülmektedir. 3B yazdırılmış polimer levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak üst üste yerleştirilmesiyle tabakalı kompozit malzeme oluşturulmasının, ABS ve PLA test numunelerinin her ikisinde de çekme dayanımını artırdığı gözlenirken, ABS test numunelerinde sünekliğin de arttığı, PLA test numunelerinde sünekliğin azaldığı belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, P, P+CNC, PPPPP kombinasyonlarında ABS ve PLA test numunelerinin her ikisinde de elastisite modülünün belirtilen sırayla giderek arttığı söylenebilir.



(a) P_ABS_20-1~4



(b) P_PLA_17-1~4



(c) P+CNC_ABS_19-1~4

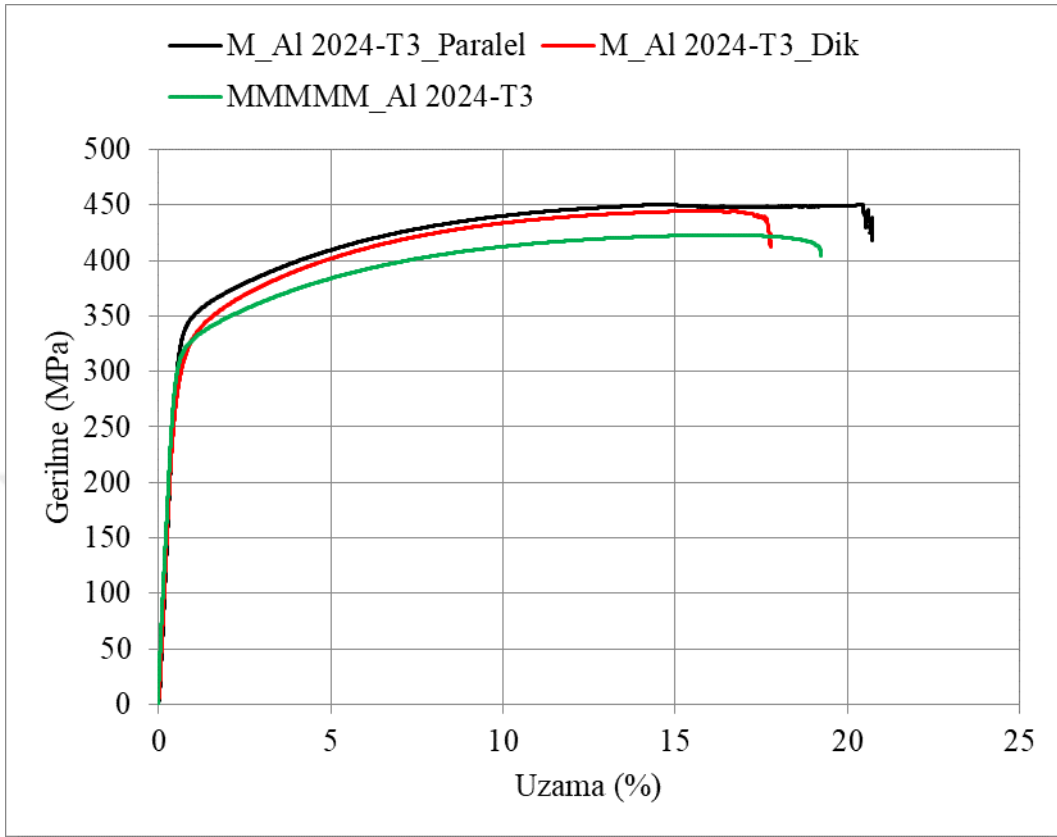


(d) P+CNC_PLA_18-1~4

Şekil 4.12 : P ve P+CNC kombinasyonları yan yüzey görüntüleri.

Sadece metal levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama eğrileri Şekil 4.13’deki grafikte bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, Al 2024-T3 metal levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin, M kombinasyonundaki Al 2024-T3 Paralel test numunesine göre çekme dayanımında ve kopma uzamasında bir miktar azalmanın olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin içerisindeki Al 2024-T3 metal malzemeden oldukça düşük çekme dayanımına (30MPa) sahip Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı olduğu söylenebilir. MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin çekme kesit alanındaki Al 2024-T3 metal malzeme ve Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı oranları, malzemelerin çekme dayanımlarıyla çarpılarak elde edilen sonuçlar toplandığında, grafikte verilen MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin çekme dayanımına oldukça yakın bir değer elde edildiği belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin

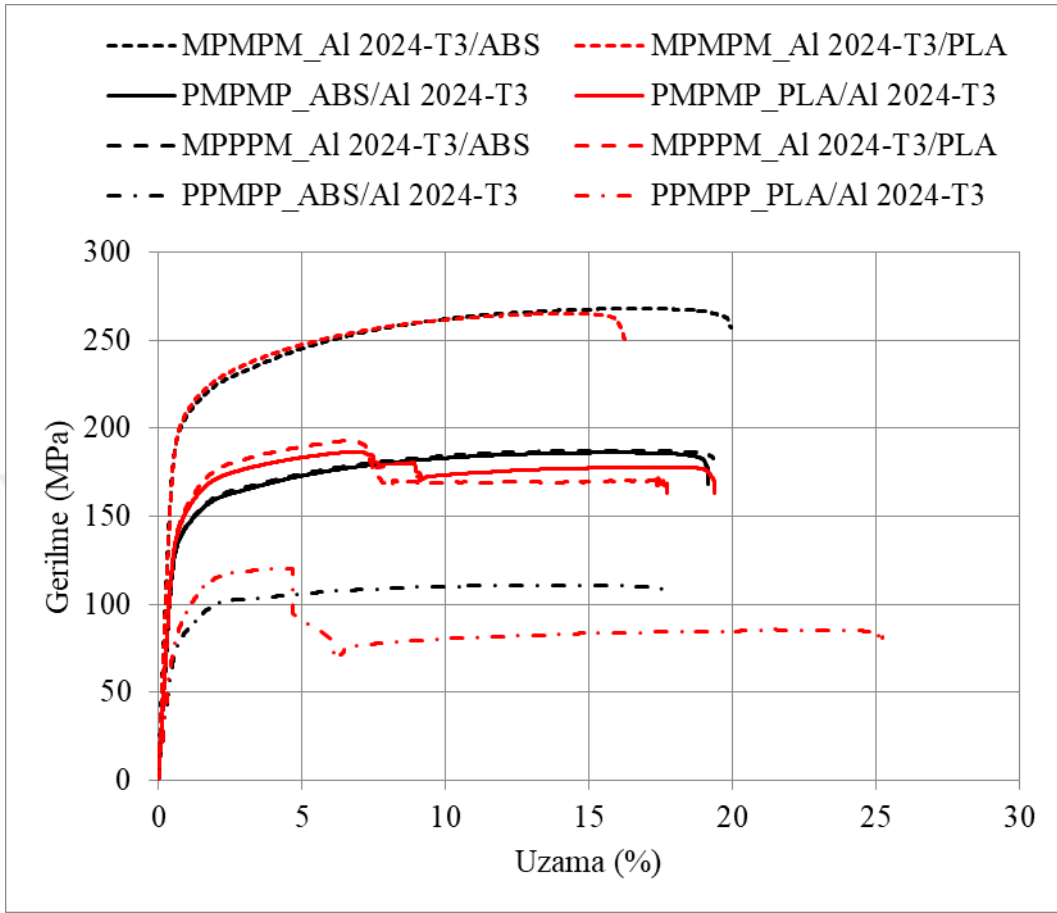
eğimi incelendiğinde, tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



şekil 4.13 : Metal ekme test numuneleri karşılaştırma grafiği.

Polimer ve metal levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak farklı kombinasyonlarda üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan PML tabakalı kompozit malzemelere ait tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen gerilme – uzama eğrileri şekil 4.14'deki grafikte bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, beklendiği üzere kombinasyon içerisindeki Al 2024-T3 metal tabaka sayısı azaldıkça üretilen tabakalı kompozit test numunesinin çekme dayanımının da azaldığı görülmektedir. PMPMP ve MPPPM kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerde her ne kadar kombinasyon farklı olsa da her 2 kombinasyonda da 2 tabaka metal ve 3 tabaka polimer levha bulunmakta olup, bu kombinasyonlardaki test numunelerinin çekme testlerinden elde edilen eğrilerin ABS veya PLA polimer levha kullanım durumuna bağlı olacak şekilde kendi aralarında neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Grafikteki kombinasyonlar arasından PPMPP_PLA/Al 2024-T3 kombinasyonundaki test numunesinin en yüksek kopma uzamasına sahip kombinasyon olduğu belirlenmiştir. Grafikte elastik bölgelerin eğimi incelendiğinde, tüm

kombinasyonlardaki test numunelerinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14 : PML çekme test numuneleri karşılaştırma grafiği.

Üretilen tüm kombinasyonlardaki malzemelerin mekanik özelliklerinden bir kısmı Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgede verilen özellikler arasında sertlik, yoğunluk, elastisite modülü, çekme mukavemeti, özgül modül ve özgül mukavemet değerleri yer almaktadır. Çizelgede verilen değerler, her kombinasyondaki 4 farklı çekme test numunesinin ilgili özelliklerinin ölçülmesi, hesaplanması ve ortalamasının alınmasıyla elde edilen ortalama değerlerdir.

Özgül modül, malzemenin mekanik avantajını belirlemek için Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanır. Özgül mukavemet ise malzeme mukavemetinin malzeme yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır (Denklem 4.2). Kompozit malzemelerde bu iki değer yüksektir. Örneğin tek yönlü bir grafit/epoksi kompozitin mukavemeti çelikten aynı olabilir ama özgül mukavemeti çelikten 3 kat fazladır. Bu iki değerlerin önemi bu gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. [59]

$$\text{Özgül Modül} = \frac{E}{\rho} \quad 4.1$$

$$\text{Özgül Mukavemet} = \frac{\sigma_c}{\rho} \quad 4.2$$

Çizelgede verilen polimer malzeme sertlik değerleri incelendiğinde, P PPPP kombinasyonunda sertlik değerlerinin P ve P+CNC kombinasyonlarına göre her iki polimer malzemede de yaklaşık 3,5HS arttığı görülmektedir. Bunun aksine M MMMM kombinasyonunda sertlik değeri M kombinasyonuna göre 16 HV azalmıştır. Ayrıca PML kompozit malzeme kombinasyonlarında ise üst yüzeylerinde polimer malzeme olan kombinasyonların sertlik değerlerinin, üst yüzeylerinde metal malzeme olan kombinasyonların sertlik değerlerinden daha yüksek oldukları belirlenmiştir. Çizelgede verilen polimer malzeme yoğunluk değerleri incelendiğinde, en yüksek yoğunluğun P PPPP_PLA kombinasyonunda olduğu, en düşük yoğunluğun da P_ABS kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir. PML kompozit malzeme kombinasyonlarında ise en yüksek sertlik değerinin PPMPP_PLA/Al 2024-T3 kombinasyonunda olduğu, en düşük sertlik değerinin de MPMPM_Al 2024-T3/PLA kombinasyonunda olduğu görülmektedir.

Çizelgede verilen kombinasyonlardaki malzemelerin yoğunluklarının artmasıyla, genel olarak malzemelerin elastisite modülü, çekme mukavemeti, özgül modül ve özgül mukavemet değerlerinin de benzer şekilde artış gösterdiği belirlenmiştir. Polimer malzemeler arasından en yüksek mukavemet değerlerine sahip olan kombinasyonun P PPPP_PLA kombinasyonu olduğu, en düşük mukavemet değerlerine sahip olan kombinasyonun da P_ABS kombinasyonu olduğu görülmektedir. PML kompozit malzeme kombinasyonlarında ise en yüksek mukavemet değerlerinin MPMPM_Al 2024-T3/ABS kombinasyonunda olduğu, en düşük mukavemet değerlerinin de PPMPP_ABS/Al 2024-T3 kombinasyonunda olduğu görülmektedir. MPMPM, PMPMP ve MPPPM kombinasyonlarında yukarıda belirtilen durumdan farklı olarak, ABS polimer levha kullanılan kombinasyonların yoğunluklarının PLA polimer levha kullanılan kombinasyonlardan daha düşük olmasına rağmen, ABS polimer levha kullanılan kombinasyonların mukavemet değerlerinin PLA polimer levha kullanılan kombinasyonlardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin mekanik özellikleri.

No	Kombinasyon	Üst Yüzey Sertliği	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Özgül Modül (GPa.cm ³ /g)	Özgül Mukavemet (MPa.cm ³ /g)
1	P_ABS	66,5HS	1,08	1,83	32,48	1,69	30,13
2	P_PLA	72,6HS	1,19	3,48	48,02	2,93	40,51
3	P + CNC_ABS	67,4HS	1,10	1,98	33,66	1,80	30,56
4	P + CNC_PLA	73,3HS	1,22	3,60	49,69	2,96	40,84
5	PPPPP_ABS	70,3HS	1,13	2,21	35,17	1,96	31,17
6	PPPPP_PLA	76,7HS	1,25	3,87	62,00	3,09	49,61
7	M_AI 2024-T3 Paralel	179HV	2,88	65,29	451,89	22,71	157,17
8	MMMMM_AI 2024-T3	163HV	2,71	63,21	422,55	23,28	155,65
9	MPMPM_AI 2024-T3/ABS	44,1HS	2,08	38,40	268,31	18,46	129,00
10	MPMPM_AI 2024-T3/PLA	42,4HS	2,10	38,34	265,86	18,25	126,52
11	PMPMP_ABS/AI 2024-T3	58,0HS	1,76	26,68	186,31	15,14	105,70
12	PMPMP_PLA/AI 2024-T3	66,2HS	1,83	27,46	186,27	15,02	101,84
13	MPPPM_AI 2024-T3/ABS	50,0HS	1,77	26,65	187,95	15,02	105,91
14	MPPPM_AI 2024-T3/PLA	46,0HS	1,84	27,67	192,99	15,02	104,75
15	PPMPP_ABS/AI 2024-T3	65,7HS	1,45	15,55	109,82	10,70	75,59
16	PPMPP_PLA/AI 2024-T3	72,0HS	1,54	17,02	121,88	11,08	79,36

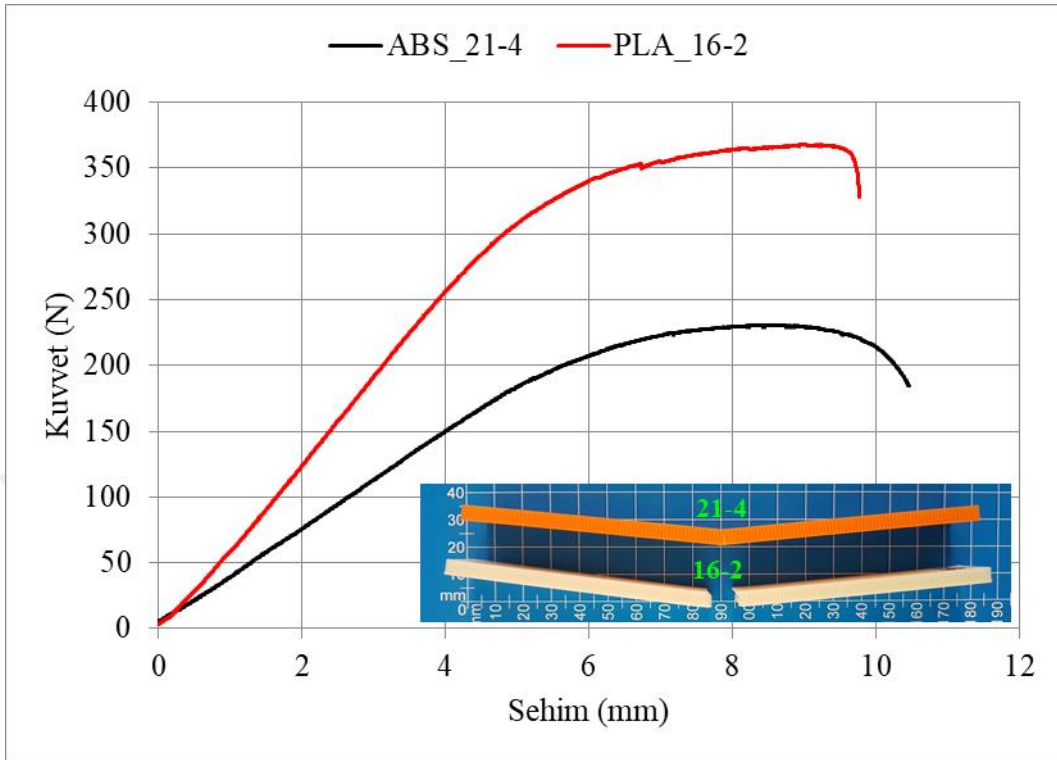
4.2 Eğilme Testlerinden Elde Edilen Bulgular

Eğilme testlerinde her bir kombinasyon için 4 adet test numunesi üretilmiştir. Eğilme testlerinde her bir parametre için 4 farklı numuneden elde edilen eğriler aynı grafik üzerinde birleştirilmiş olup, bunlar arasından her parametre için birer eğri seçilmiştir. Eğrilerin seçilmesinde varsa çakışan en az 2 eğriden birinin seçilmesine, çakışma yoksa birbirine en yakın eğrilerden birinin seçilmesine ya da ortalama olarak gösterilebilecek bir eğrinin seçilmesine dikkat edilmiştir. Bu şekilde seçilerek gruplandırılmış olan eğrileri ve bu eğrilerin ait olduğu eğilme test numunelerinin eğilme testi sonrasındaki görüntülerini içeren grafikler alt bölümlerde verilmiştir.

4.2.1 P, P + CNC, P P P P P kombinasyonu

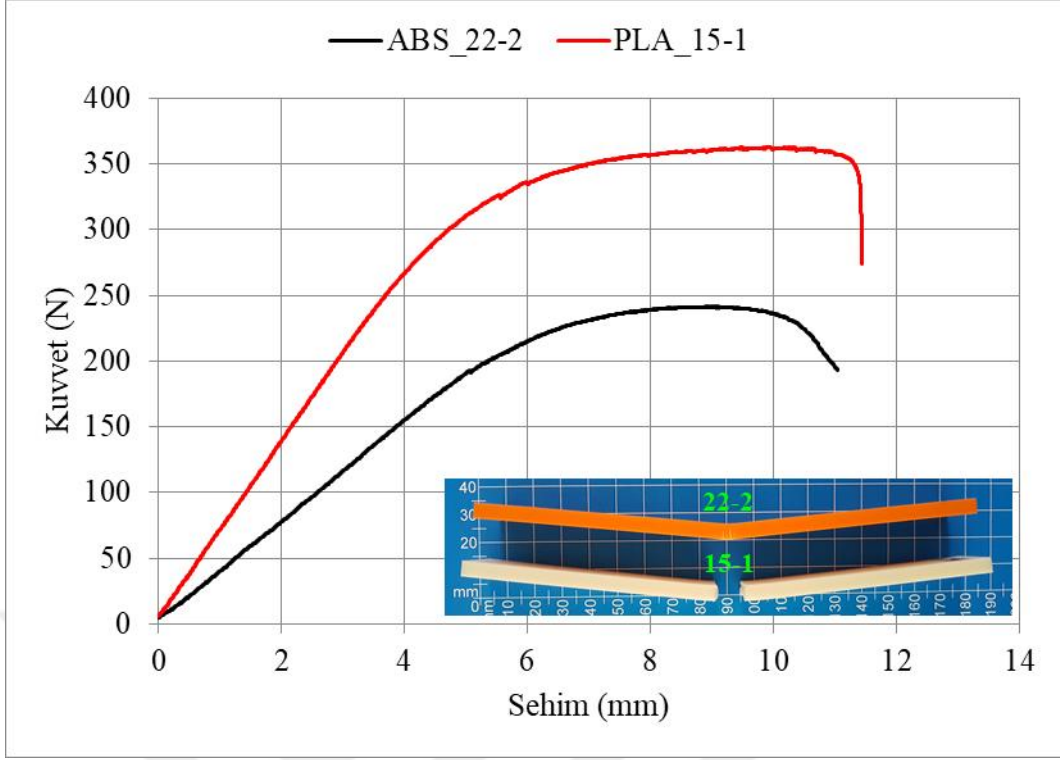
P kombinasyonundaki 3B yazdırılmış numunelerin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin eğilme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık 1,6 kat daha fazla olduğu ve hasar durumundaki sehim değerlerinin de birbirine yakın olmakla birlikte, ABS test numunesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda ABS test

numunesinin alt yüzeyinin orta kısmında bir miktar ayrılma meydana gelmiş olup, PLA test numunesinin ise orta kısımdan koparak ikiye ayrıldığı gözlenmiştir.



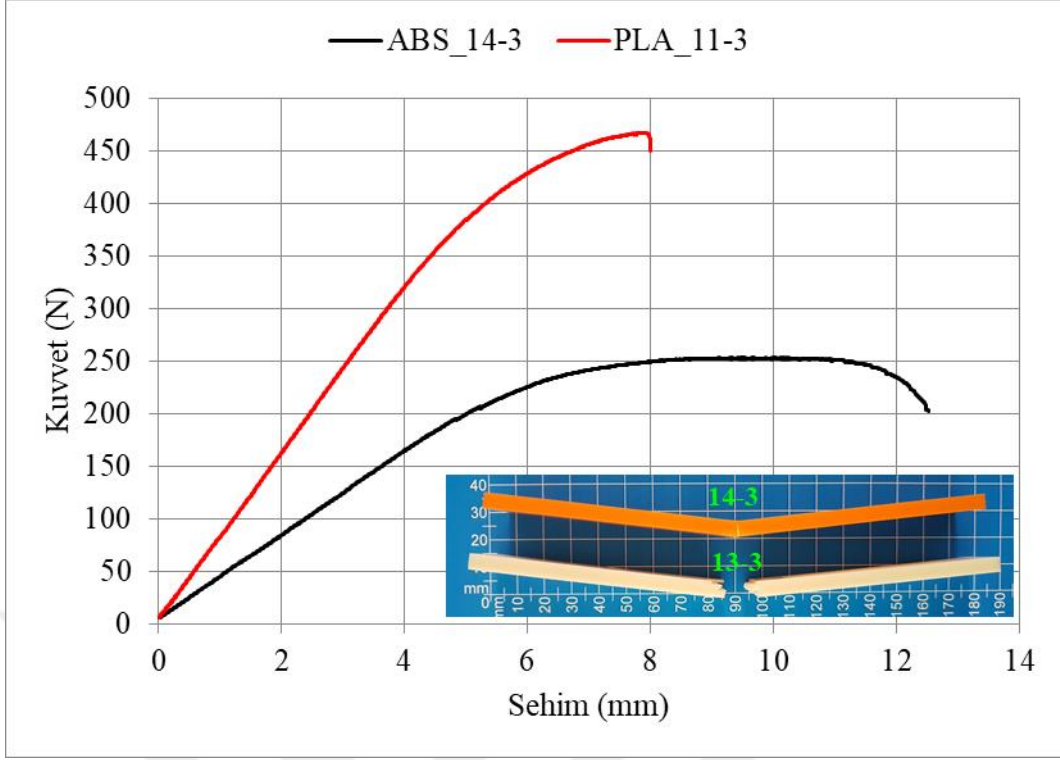
Şekil 4.15 : P kombinasyonu kuvvet – sehım grafiği.

P+CNC kombinasyonundaki 3B yazdırılmış ve sonrasında yan kenarları CNC freze ile kesilmiş numunelerin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehım grafiği Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin eğilme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık 1,5 kat daha fazla olduğu ve hasar durumundaki sehım değerlerinin de birbirine yakın olmakla birlikte, PLA test numunesinde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda ABS test numunesinin alt yüzeyinin orta kısmında bir miktar ayrılma meydana gelmiş olup, PLA test numunesinin ise orta kısımdan koparak ikiye ayrıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.16 : P+CNC kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

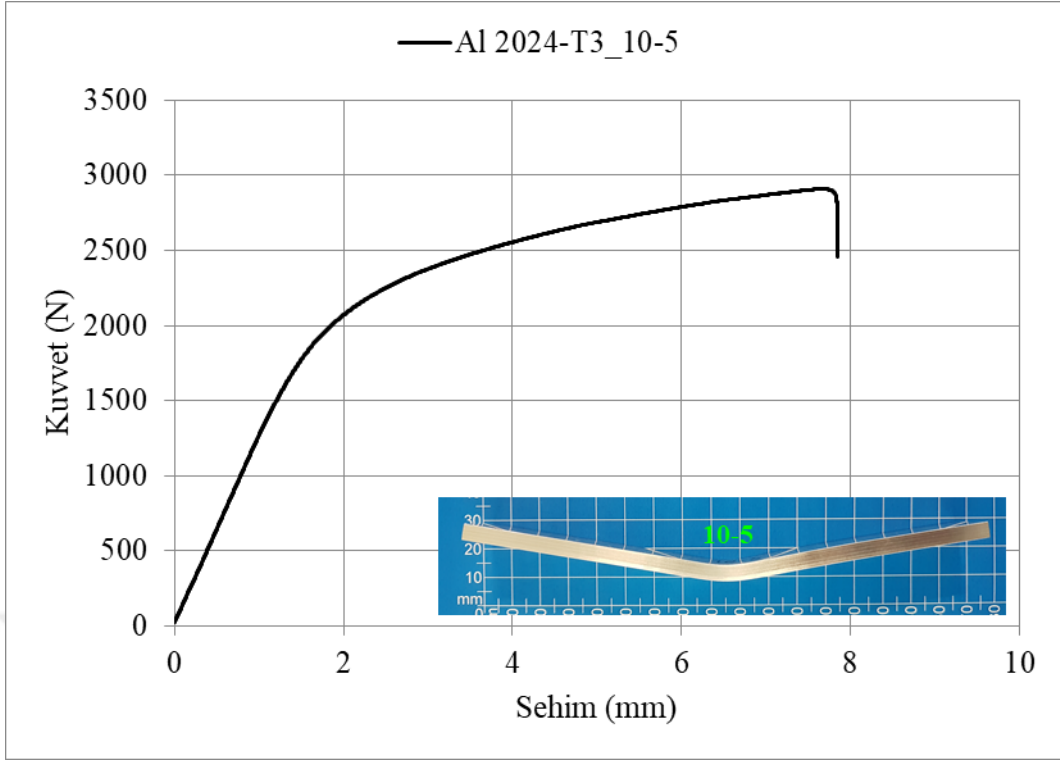
PPPPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PLA test numunesinin eğilme dayanımının ABS test numunesinden yaklaşık 1,9 kat daha fazla olduğu ve ayrıca ABS test numunesinin hasar durumundaki sehim değerlerinin de PLA test numunesinden yaklaşık 1,56 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda ABS test numunesinin alt yüzeyinin orta kısmında bir miktar ayrılma meydana gelmiş olup, PLA test numunesinin ise orta kısımdan koparak ikiye ayrıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.17 : PPPPP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

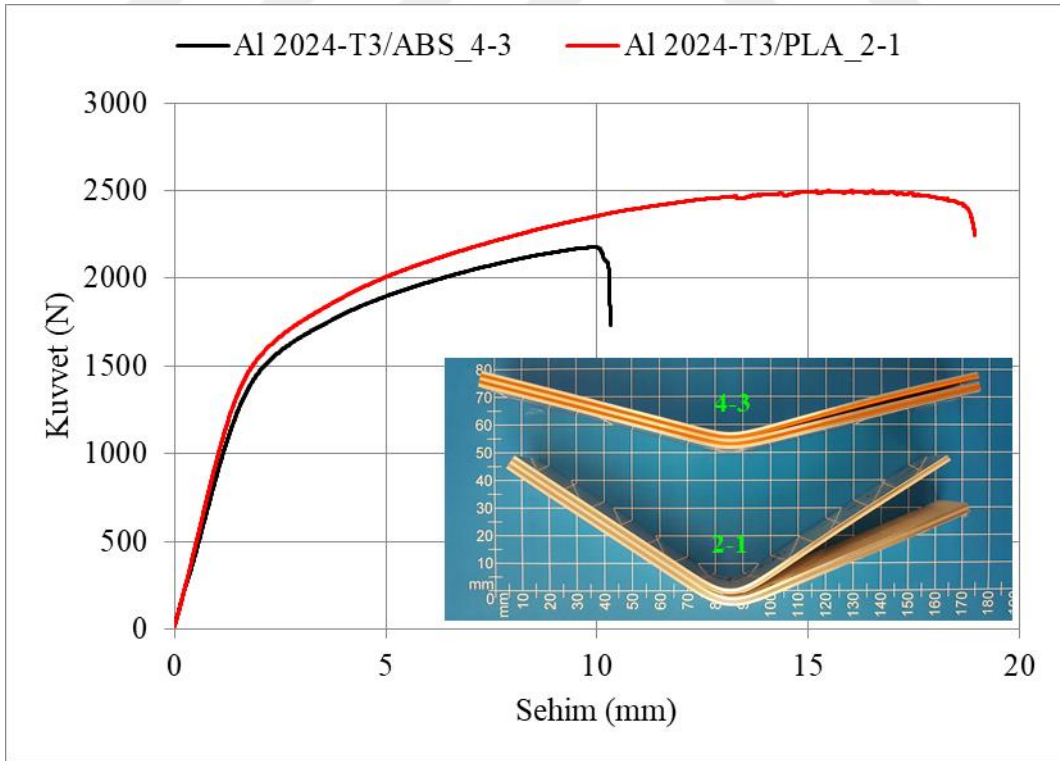
4.2.2 MMMMM kombinasyonu

MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.18’de gösterilmiştir. MMMMM kombinasyonunda Al 2024-T3 metal levhalar kullanılarak üretilen test numunelerinde ilk üretilen 4 test numunesinin (MMMMM_Al 2024-T3_10-1~4) test sonuçları incelendiğinde, bu test numuneleri arasında üretimden kaynaklanabileceği değerlendirilen tutarsızlıkların olduğu gözlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak belirtilen test numunelerinden 4 adet daha üretilmiş olup (MMMMM_Al 2024-T3_10-5~8), bu numunelerin test sonuçlarının birbiri arasında daha tutarlı oldukları, ayrıca bunların eğilme dayanımlarının ve hasar durumundaki sehim değerlerinin de hatalı olarak üretildikleri değerlendirilen test numunelerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bundan sonraki değerlendirmelerde son üretilen 4 test numunesi ile ilgili veriler dikkate alınmıştır. Grafik incelendiğinde MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin eğilme dayanımının yaklaşık 2850N, hasar durumundaki sehim değerlerinin de yaklaşık 7,85mm mertebelerinde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.18 : M4MM4M kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

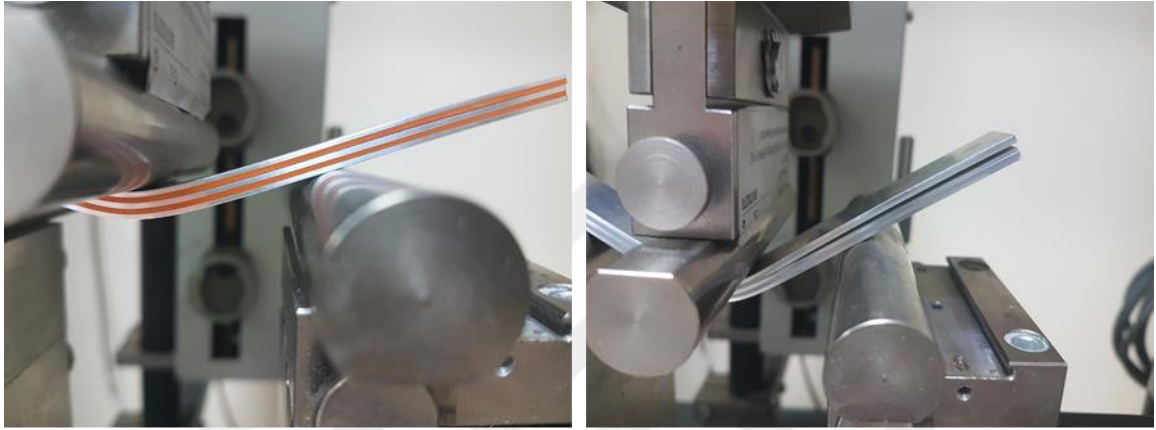
4.2.3 MPMPM kombinasyonu



Şekil 4.19 : MPMPM kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.19’de gösterilmiştir. Grafik

incelendiğinde MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin eğilme dayanımının ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,15 kat daha fazla olduğu ve ayrıca PLA polimer levha kullanılan test numunesinin hasar durumundaki sehim değerlerinin de ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,83 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda her iki polimer levhanın kullanıldığı test numunelerinde de MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemelerde 3. ve 4. katlar arasında tabakalar arası ayrılmanın meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.20).

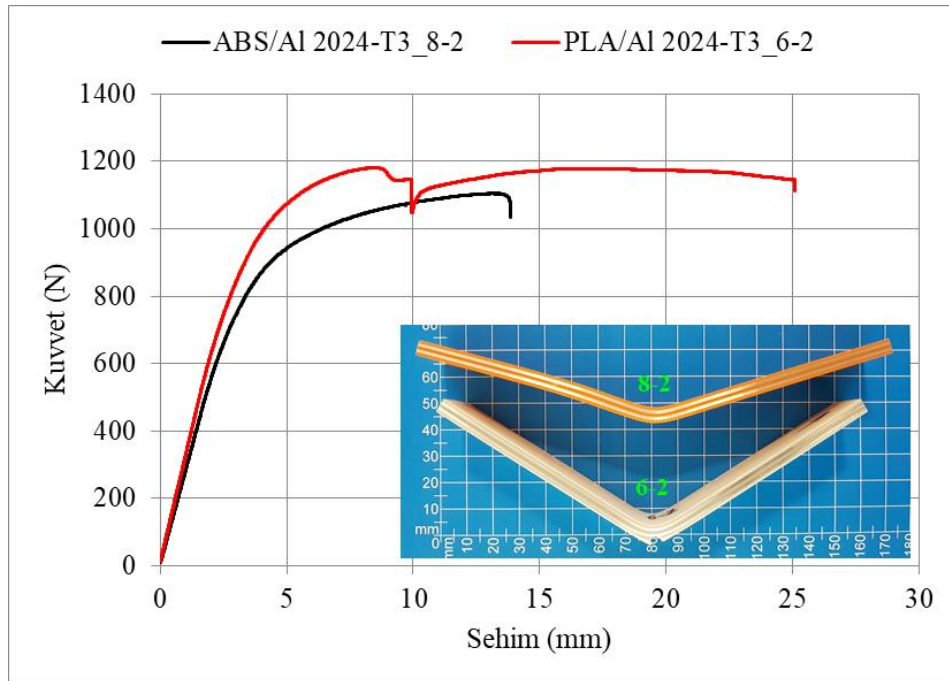


(a) Al 2024-T3/ABS_4-3

(b) Al 2024-T3/PLA_2-1

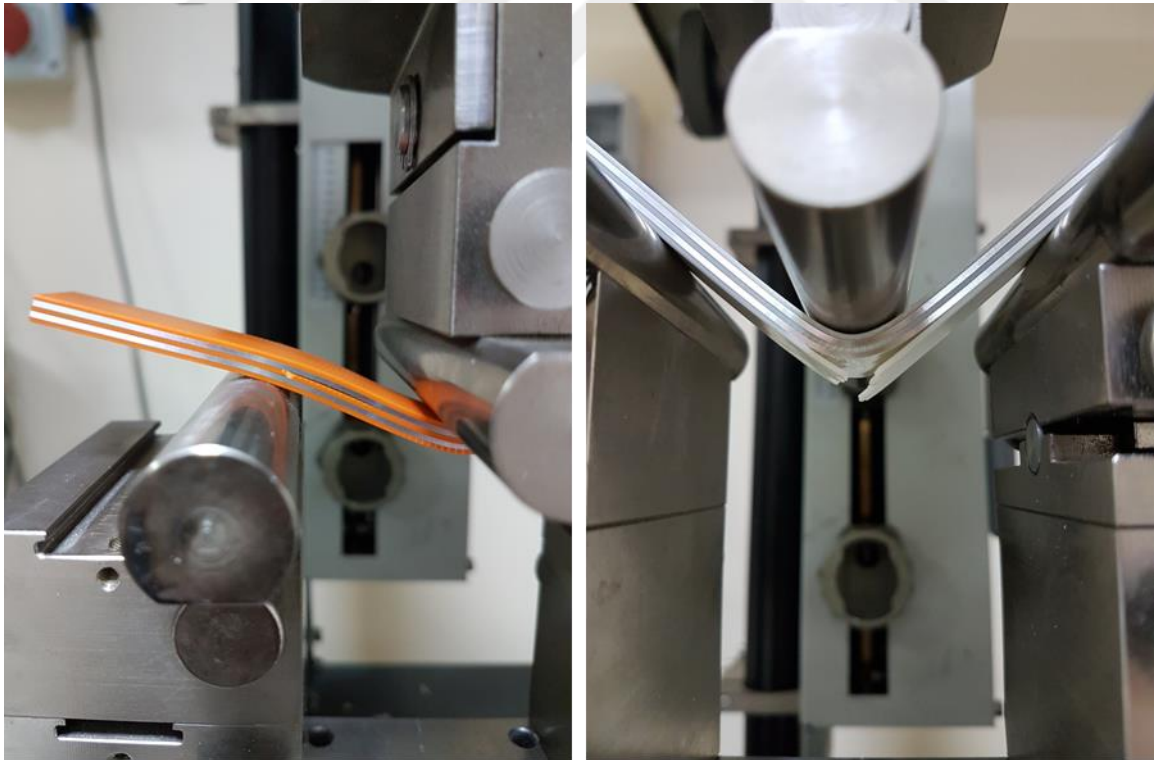
Şekil 4.20 : MPMPM kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri.

4.2.4 PMPMP kombinasyonu



Şekil 4.21 : PMPMP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinde eğilme testi sırasında plastik bölgede tabakalı kompozit malzemenin alt kısmında bulunan polimer levha kopmuş ve eğride bir miktar düşmeye neden olmuştur. Kalan 4 tabakanın eğilme testi bir süre daha devam ettikten sonra 25mm sehimde test sonlandırılmış olup, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde eğilme testi bu şekilde tamamlanmıştır. PLA polimer levha kullanılan test numunesinin ilk hasara uğradığı noktaya kadar olan veriler değerlendirildiğinde, eğilme dayanımının ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,07 kat daha fazla olduğu ve ayrıca ABS polimer levha kullanılan test numunesinin hasar durumundaki sehim değerlerinin de PLA polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,51 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemelerde ABS polimer levha kullanılan test numunesinin 3. ve 4. katlar arasında tabakalar arası ayrılmanın meydana geldiği (Şekil 4.22a), ABS polimer levha kullanılan test numunesinin de alt tabakasının tam orta kısımdan koptuğu gözlenmiştir (Şekil 4.22b).

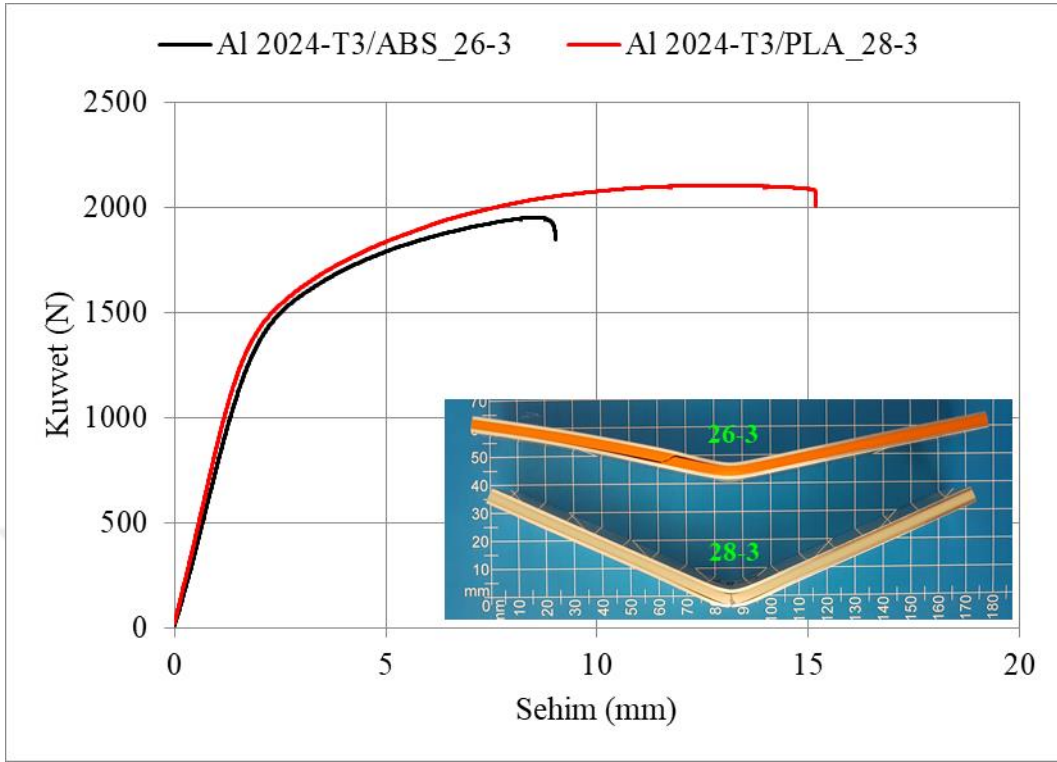


(a) ABS/Al 2024-T3_8-2

(b) PLA/Al 2024-T3_6-2

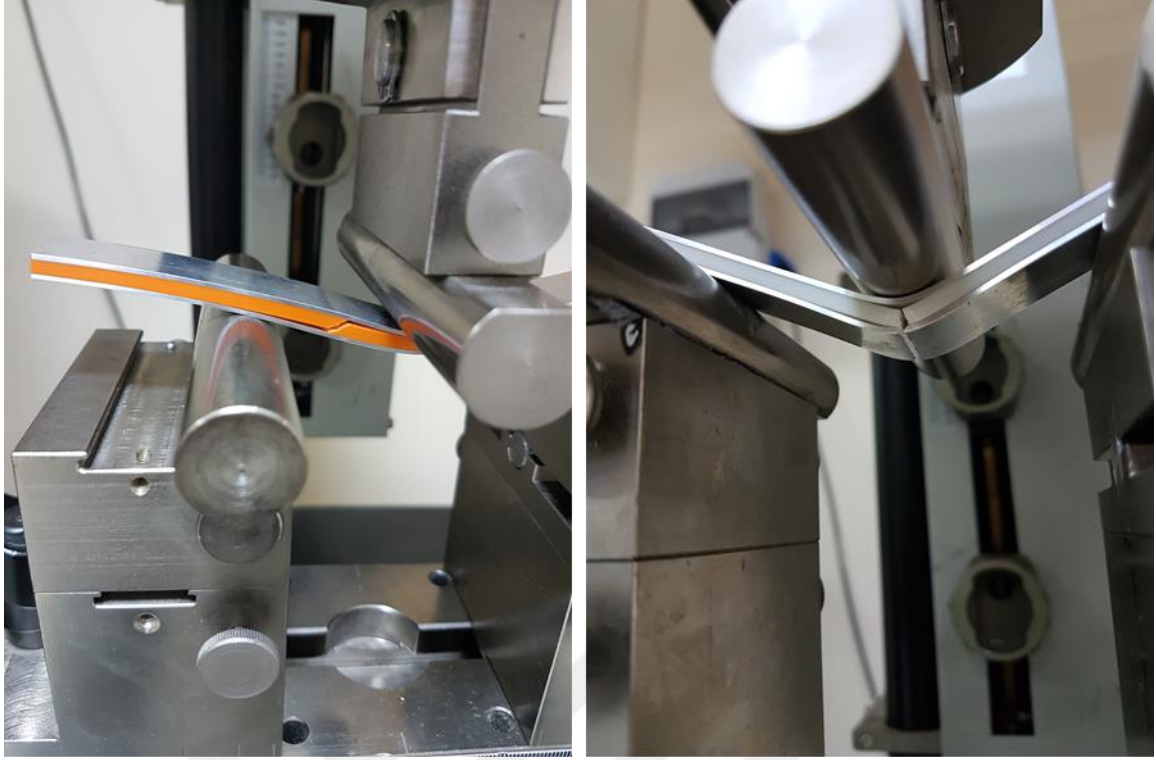
Şekil 4.22 : PMPMP kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri.

4.2.5 MPPPM kombinasyonu



Şekil 4.23 : MPPPM kombinasyonu kuvvet – sehım grafiği.

MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehım grafiği Şekil 4.23’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin eğilme dayanımının ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,08 kat daha fazla olduğu ve ayrıca PLA polimer levha kullanılan test numunesinin hasar durumundaki sehım değerlerinin de ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,69 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemelerde ABS polimer levha kullanılan test numunesinin 1. ve 2. katlar arasında ve 4. ve 5. katlar arasında aynı anda tabakalar arası ayrılmaların meydana geldiği, bunun etkisiyle de iç kısımda bulunan 3 tabaka polimer levhanın koptuğu belirlenmiştir (Şekil 4.24a). Diğer yandan MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemelerde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin alt kısmında bulunan 4 tabakanın aynı anda koptuğu, bunun etkisiyle 1. ve 2. katlar arasında ve 4. ve 5. katlar arasında aynı anda tabakalar arası ayrılmaların meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.24b).

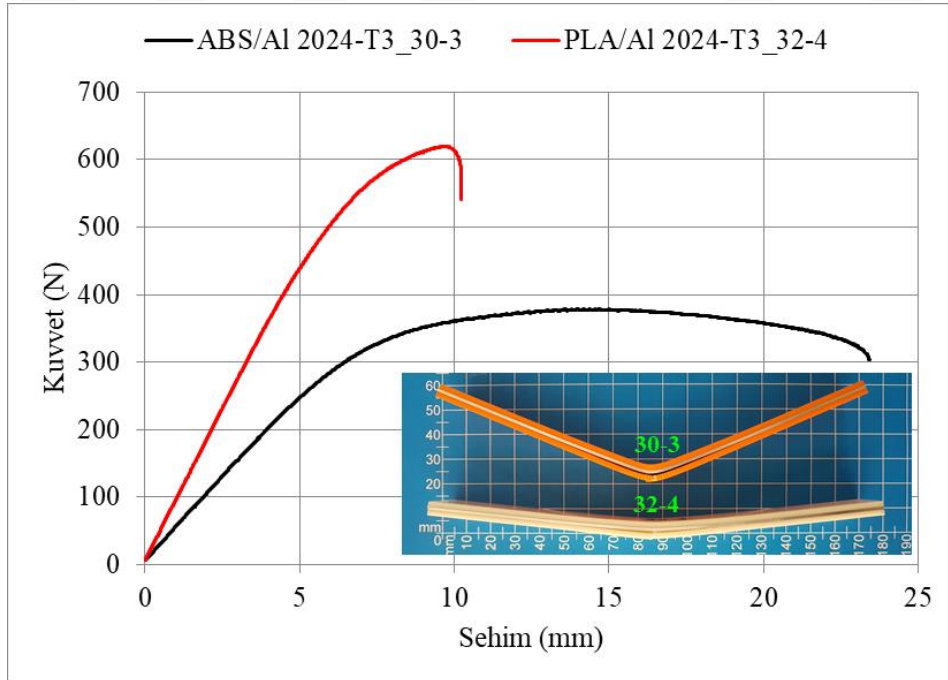


(a) Al 2024-T3/ABS_26-3

(b) Al 2024-T3/PLA_28-3

Şekil 4.24 : MPPPM kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri.

4.2.6 PPMPP kombinasyonu



Şekil 4.25 : PPMPP kombinasyonu kuvvet – sehim grafiği.

PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim grafiği Şekil 4.25’de gösterilmiştir. Grafik

incelendiğinde PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisinde PLA polimer levha kullanılan test numunesinin eğilme dayanımının ABS polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 1,63 kat daha fazla olduğu ve ayrıca ABS polimer levha kullanılan test numunesinin hasar durumundaki sehim değerlerinin de PLA polimer levha kullanılan test numunesinden yaklaşık 2,3 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir. Eğilme testi sonucunda PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzemelerde her iki polimer levhanın kullanıldığı test numunelerinde de alt kısımda bulunan 2 polimer tabakanın aynı anda koptuğu, bunun etkisiyle 2. ve 3. katlar arasında tabakalar arası ayrılmaların meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.26).



(a) ABS/Al 2024-T3_30-3

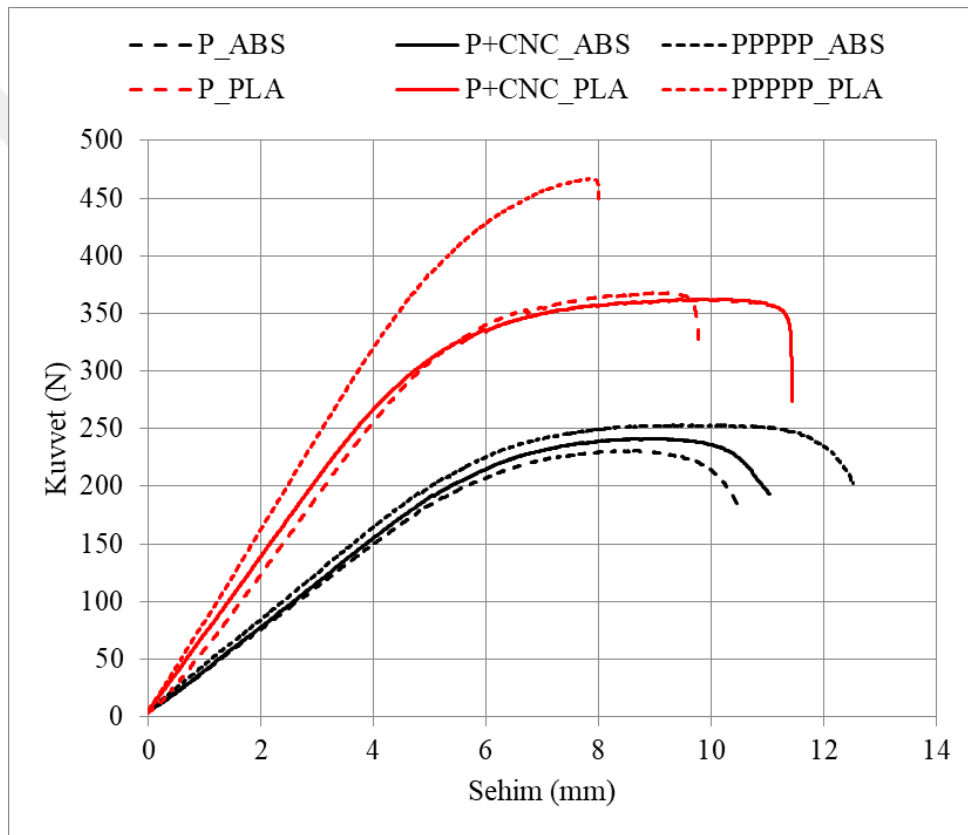
(b) PLA/Al 2024-T3_32-4

Şekil 4.26 : PPMPP kombinasyonu eğilme testi hasar görüntüleri.

4.2.7 Eğilme testi genel değerlendirmeleri

Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim eğrileri Şekil 4.27'deki grafikte bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 3B yazdırılmış test numunelerinin CNC freze ile yan kenarlarının kesilmesi sonucunda ABS polimer levha kullanılan test numunesinde eğilme dayanımı ve hasar durumundaki sehim değerinde bir miktar artış olduğu, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde ise eğilme dayanımında ihmal edilebilecek kadar azalmanın, hasar durumundaki sehim değerinde de yaklaşık 1,67mm artışın olduğu görülmektedir.

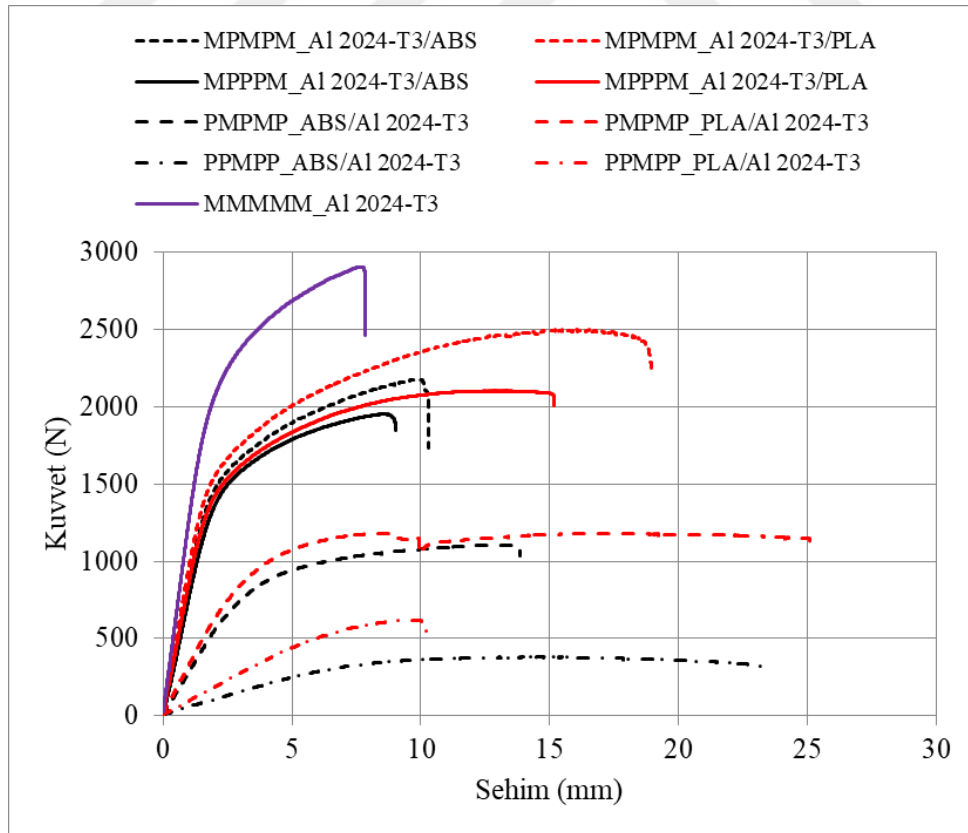
PPPPP kombinasyonundaki ABS malzeme kullanılan test numunesi incelendiğinde, P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre eğilme dayanımında bir miktar, hasar durumundaki sehim değerinde de yaklaşık 1,5mm artışın olduğu belirlenmiştir. PPLPP kombinasyonundaki PLA malzeme kullanılan test numunesinde ise P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre eğilme dayanımında yaklaşık 105N artışın olduğu, hasar durumundaki sehim değerinde de 2,43mm azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, 3B yazdırılmış PLA levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak üst üste yapıştırılmasının, test numunesinin eğilme dayanımı üzerinde ciddi oranda (yaklaşık 1,29 kat) artışa neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.27 : Polimer eğilme test numuneleri karşılaştırma grafiği.

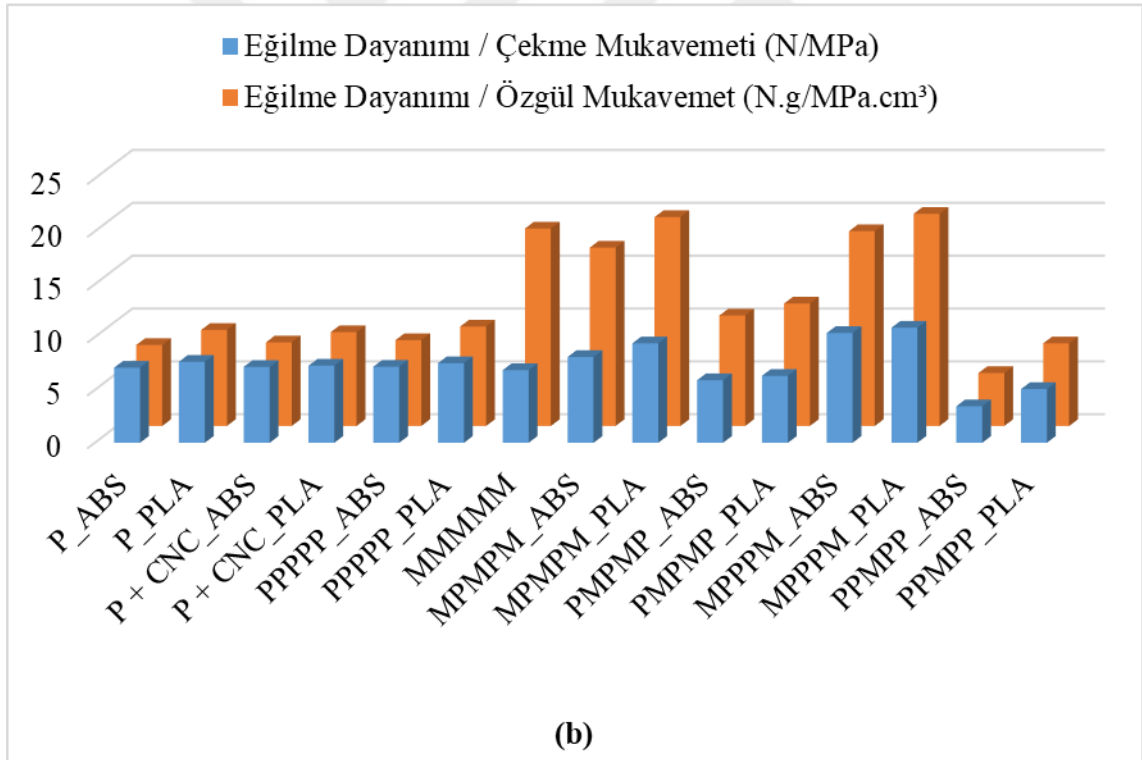
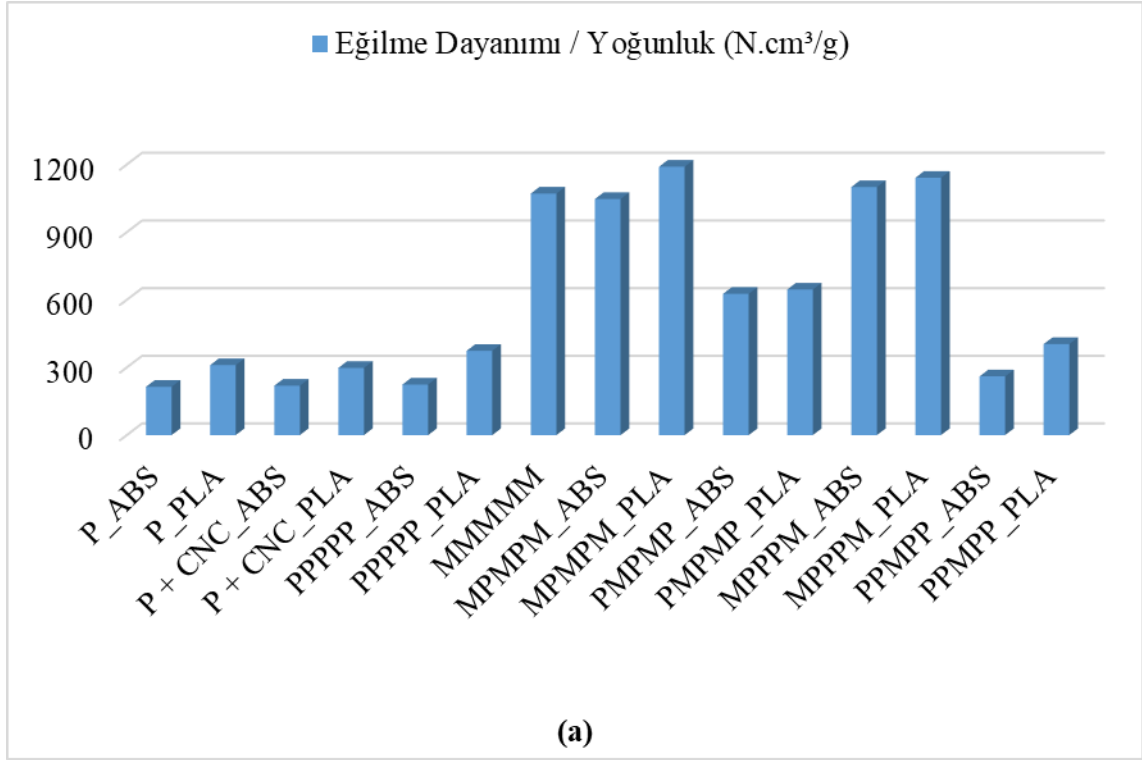
Polimer ve metal levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak farklı kombinasyonlarda üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan tabakalı kompozit malzemelere ait tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen kuvvet – sehim eğrileri Şekil 4.28'deki grafikte bir arada gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, beklendiği üzere kombinasyon içerisindeki Al 2024-T3 metal tabaka sayısı azaldıkça üretilen tabakalı kompozit test numunesinin eğilme dayanımının da azaldığı görülmektedir. MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisindeki tabakalardan bir kısmının

polimer tabaka ile değiştirilmesiyle üretilen PML tabakalı kompozit malzemelerin hasar durumundaki sehim değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Grafikteki kombinasyonlar arasından hasar durumundaki sehim değeri en yüksek olanların, ABS polimer levha kullanılan test numunelerinde PPMPP_ABS/A1 2024-T3 kombinasyonu, PLA polimer levha kullanılan test numunelerinde ise MPMPM_A1 2024-T3/PLA kombinasyonu olduğu belirlenmiştir. PMPMP ve MPPPM kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerde her ne kadar kombinasyon farklı olsa da her 2 kombinasyonda da 2 tabaka metal ve 3 tabaka polimer levha bulunmakta olup, bu kombinasyonlardaki test numunelerinin eğilme testlerinden elde edilen eğriler incelendiğinde her iki polimer malzemenin kullanım durumunda da MPPPM kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarının, PMPMP kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarından yaklaşık 1,78 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Her ne kadar belirtilen PMPMP ve MPPPM yerleşim şekillerine ait Çizelge 4.1’de verilen 4 farklı kombinasyonun (çizelgede No 11~14 arası) elastisite modülü, çekme mukavemeti, özgül modül ve özgül mukavemet değerleri birbirine çok yakın olsa da MPPPM yerleşim şeklindeki kombinasyonların eğilme dayanımı açısından daha elverişli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.28 : Polimer/Metal eğilme test numuneleri karşılaştırma grafiği.

Şekil 4.29'de eğilme testi uygulanan test numunelerinin eğilme dayanımları ilgili kombinasyonların yoğunluk, çekme mukavemeti ve özgül mukavemet değerlerine bölünerek elde edilen oranlar grafik halinde gösterilmiştir. Şekil 4.29a'da gösterilen eğilme dayanımı – yoğunluk oranları incelendiğinde, en yüksek oranlara sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPMPM_PLA > MPPPM_PLA > MPPPM_ABS > M MMMM > MPMPM_ABS kombinasyonları olduğu görülmektedir. Her ne kadar M MMMM kombinasyonu en yüksek yoğunluk değerine sahip olsa da eğilme dayanımı – yoğunluk oranı dikkate alındığında belirtilen kombinasyonlar arasında dördüncü sırada yer aldığı ve MPMPM_PLA kombinasyonunun en yüksek eğilme dayanımı – yoğunluk oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.29b'de eğilme testi uygulanan test numunelerinin eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranları ve eğilme dayanımı – özgül mukavemet oranları gösterilmiştir. Şekil 4.29b'de gösterilen eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranları incelendiğinde, en yüksek oranlara sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPPPM_PLA > MPPPM_ABS > MPMPM_PLA > MPMPM_ABS > P_PLA kombinasyonları olduğu görülmektedir. Her ne kadar M MMMM kombinasyonu en yüksek çekme mukavemeti değerine sahip olsa da eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranı dikkate alındığında belirtilen kombinasyonlar arasında ilk beşe dahi giremediği ve MPPPM_PLA kombinasyonunun en yüksek eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.29b'de gösterilen eğilme dayanımı – özgül mukavemet oranları incelendiğinde, en yüksek oranlara sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPPPM_PLA > MPMPM_PLA > M MMMM > MPPPM_ABS > MPMPM_ABS kombinasyonları olduğu görülmektedir. Her ne kadar M MMMM kombinasyonu en yüksek özgül mukavemet değerine sahip olsa da eğilme dayanımı – özgül mukavemet oranı dikkate alındığında belirtilen kombinasyonlar arasında üçüncü sırada yer aldığı ve MPPPM_PLA kombinasyonunun en yüksek eğilme dayanımı – özgül mukavemet oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Eğilme dayanımı – yoğunluk ve eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranlarının malzemelerin mekanik özelliklerinin kıyaslanmasında kullanıldığı benzer çalışmalar literatürde yer almaktadır [78,79].



Şekil 4.29 : Eğilme dayanımı değerlerinin çeşitli büyüklüklere oranı.

Şekil 4.29'deki grafiklerin oluşturulmasında kullanılan, farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin eğilme dayanımları ve eğilme dayanımlarının çeşitli büyüklüklere oranı ile ilgili sayısal bilgiler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

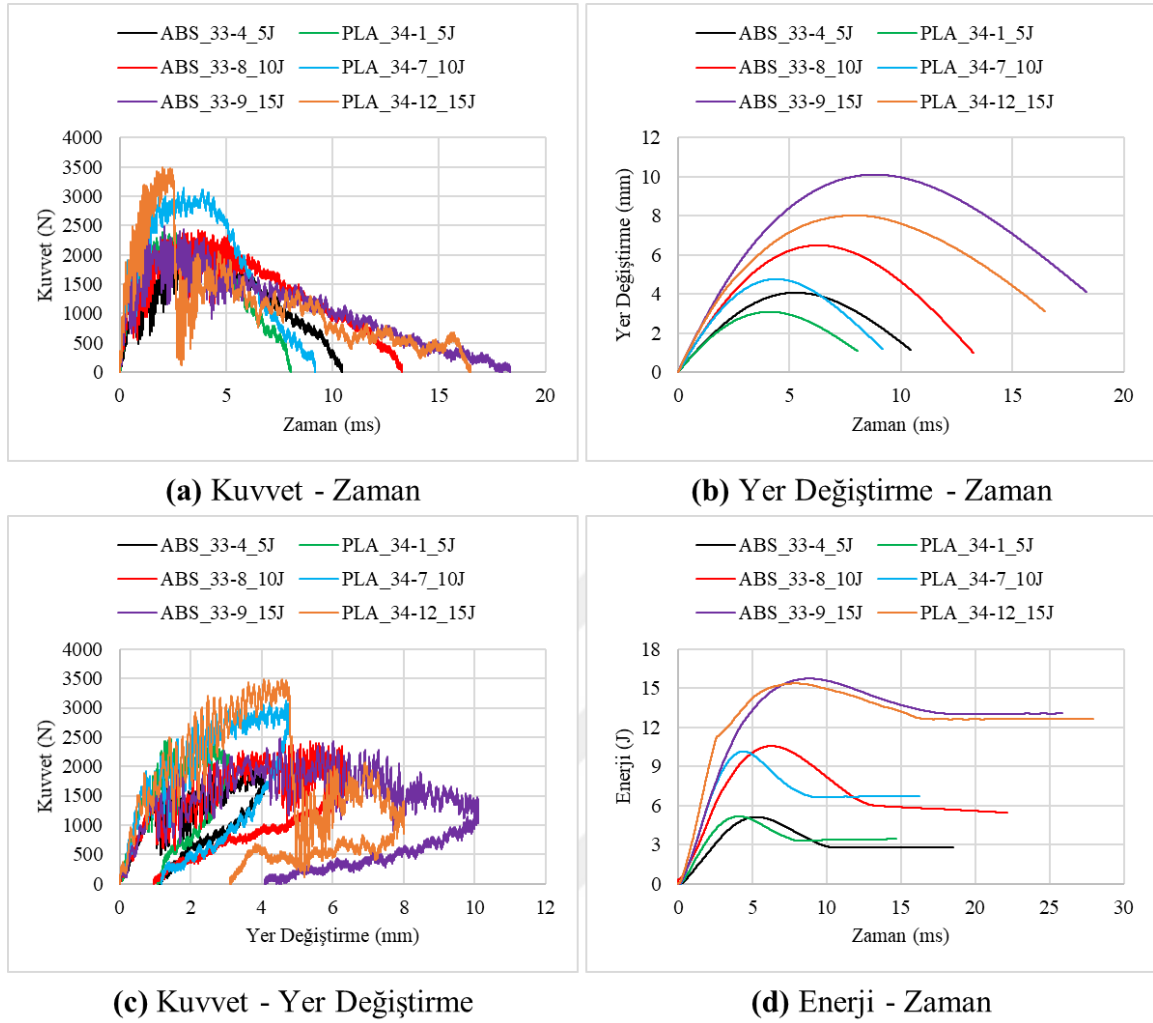
Çizelge 4.2 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin eğilme dayanımı değerleri.

No	Kombinasyon	Eğilme Dayanımı (N)	Eğilme Dayanımı	Eğilme Dayanımı	Eğilme Dayanımı
			Yoğunluk	Çekme Mukavemeti	Özgül Mukavemet
1	P_ABS	230,99	214,29	7,11	7,67
2	P_PLA	368,03	310,48	7,66	9,09
3	P + CNC_ABS	241,54	219,27	7,18	7,90
4	P + CNC_PLA	362,65	298,07	7,30	8,88
5	PPPPP_ABS	253,11	224,34	7,20	8,12
6	PPPPP_PLA	466,96	373,64	7,53	9,41
7	MMMMM	2907,31	1070,93	6,88	18,68
8	MPMPM_ABS	2177,22	1046,81	8,11	16,88
9	MPMPM_PLA	2500,96	1190,21	9,41	19,77
10	PMPMP_ABS	1104,60	626,66	5,93	10,45
11	PMPMP_PLA	1180,62	645,44	6,34	11,59
12	MPPPM_ABS	1951,99	1099,98	10,39	18,43
13	MPPPM_PLA	2102,53	1141,18	10,89	20,07
14	PPMPP_ABS	378,61	260,61	3,45	5,01
15	PPMPP_PLA	619,83	403,63	5,09	7,81

4.3 DHSD Darbe Testlerinden Elde Edilen Bulgular

DHSD darbe testlerinde her kombinasyon 3 farklı darbe enerjisiyle test edilmiş olup, kombinasyon içerisindeki her farklı enerji için dörder numune test edilecek şekilde toplamda her kombinasyon için 12 adet test numunesi üretilmiştir. DHSD darbe testlerinde kullanılan kombinasyonlar ve bu kombinasyonlara ait düşürme kütlesi ve darbe enerjisi bilgileri Çizelge 3.5’de verilmiştir. DHSD darbe testlerinde her bir parametre için 4 farklı numunedan elde edilen eğriler aynı grafik üzerinde birleştirilmiş olup, bunlar arasından her parametre için birer eğri seçilmiştir. Eğrilerin seçilmesinde varsa çakışan en az 2 eğriden birinin seçilmesine, çakışma yoksa birbirine en yakın eğrilerden birinin seçilmesine ya da ortalama olarak gösterilebilecek bir eğrinin seçilmesine dikkat edilmiştir. Bu şekilde seçilerek gruplandırılmış olan eğrileri ve bu eğrilerin ait olduğu DHSD darbe test numunelerinin darbe testi sonrasındaki görüntülerini içeren şekiller alt bölümlerde verilmiştir.

4.3.1 P, P PPPP kombinasyonu



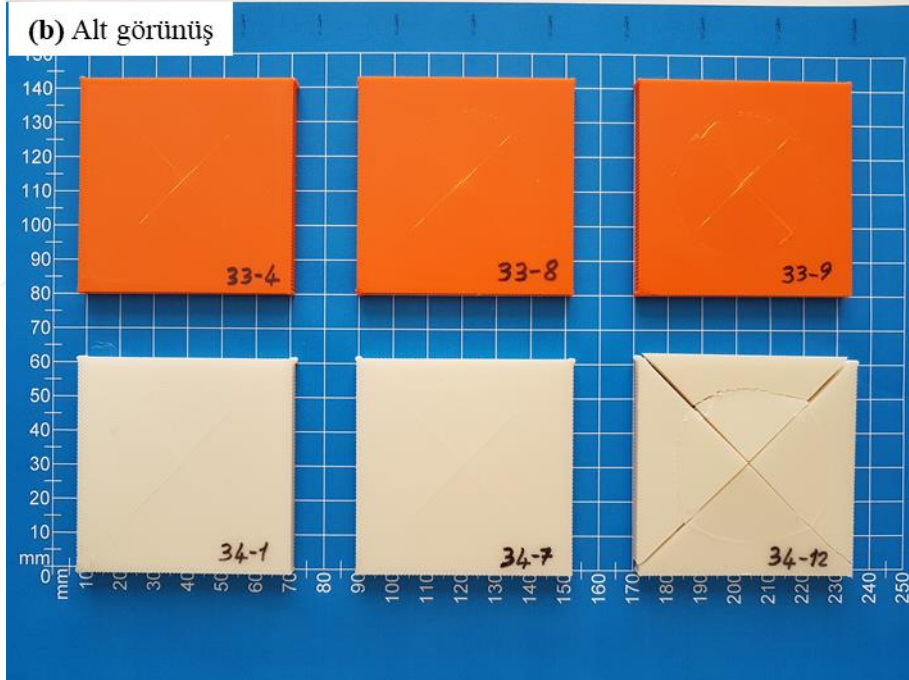
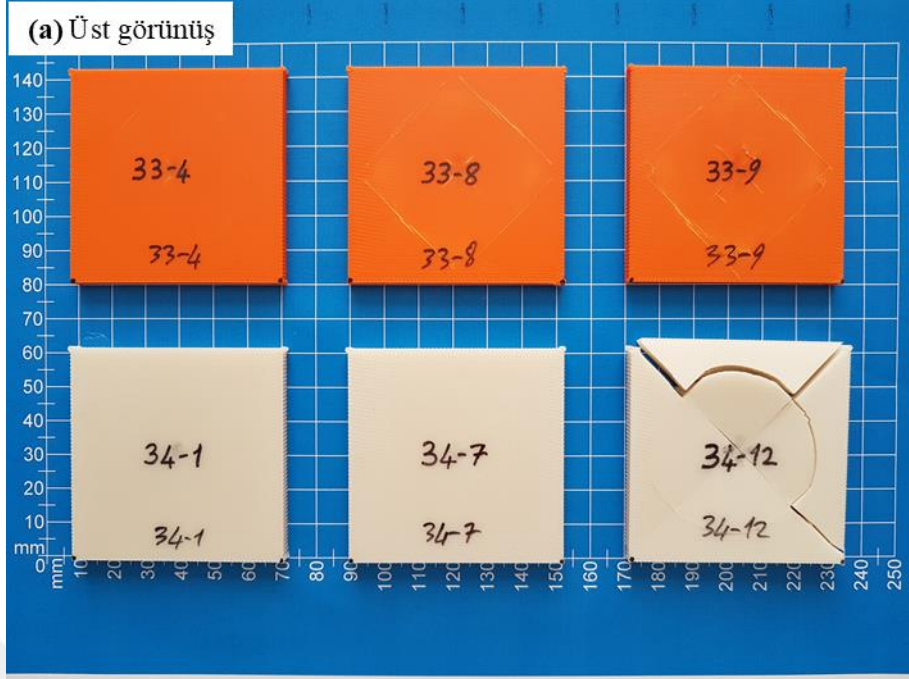
Şekil 4.30 : P kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

P kombinasyonundaki 3B yazdırılmış test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.30a'da tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.30a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrileri incelendiğinde, P_PLA kombinasyonundaki test numunelerinin maksimum temas kuvveti değerlerinin, P_ABS kombinasyonundaki test numunelerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. P_PLA_34-12_15J kombinasyonundaki test numunesinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrisinde, temas kuvvetinin belli bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra aniden azaldığı ve bir miktar düşüştüğü sonra test numunesinin tekrar yük

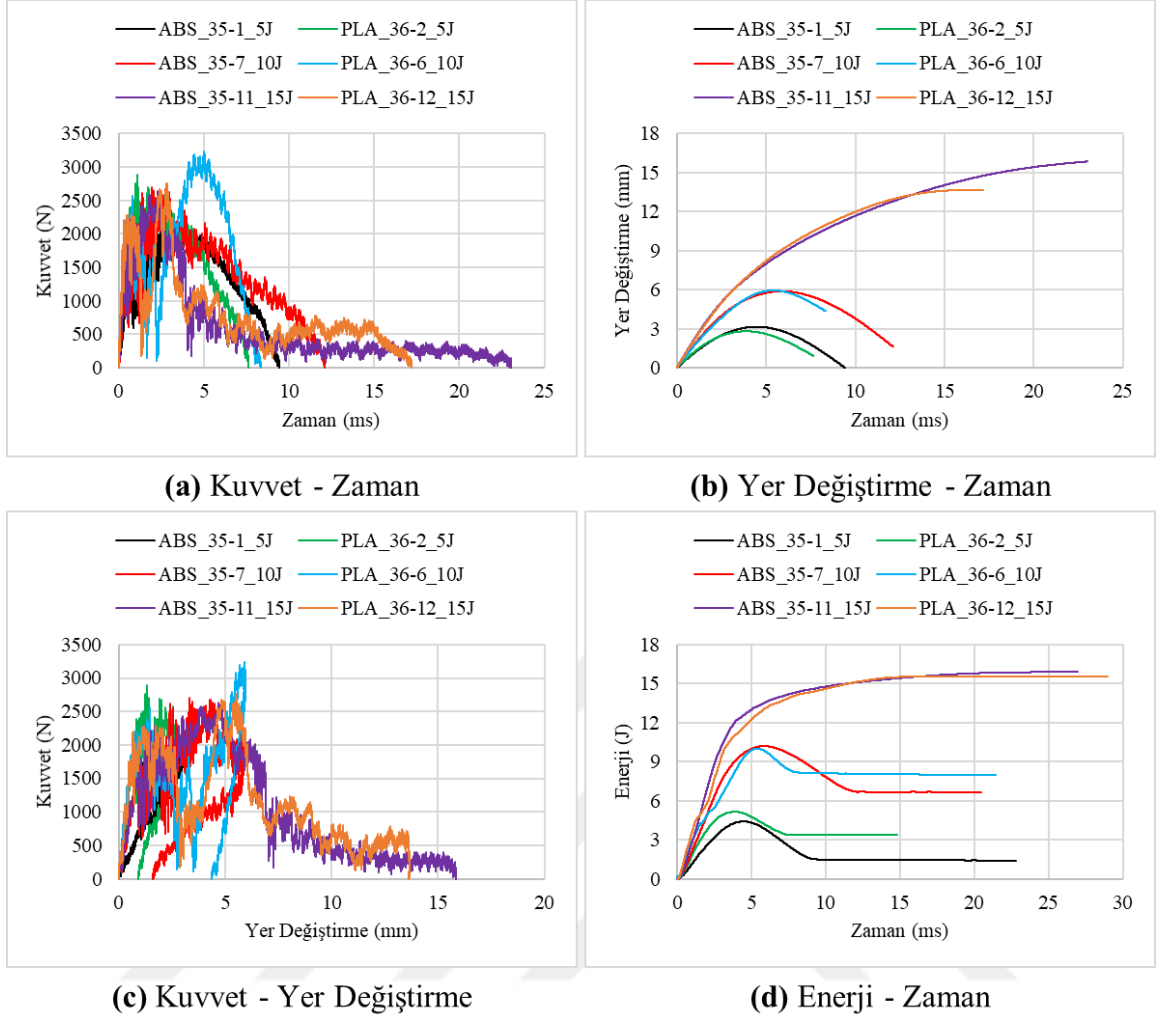
taşımaya başladığı görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşüşe, test numunesinde bu noktada oluşan çatlak vb. hasarın yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.30b’de P kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme (çökme) miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.30b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. P kombinasyonundaki tüm test numunelerinde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değiştirme – zaman eğrileri incelendiğinde, P_ABS kombinasyonundaki test numunelerinin maksimum yer değiştirme değerlerinin, P_PLA kombinasyonundaki test numunelerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.30c’de P kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.30c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, maksimum temas kuvveti en yüksek olanın P_PLA kombinasyonu olduğu, maksimum yer değiştirme miktarı en yüksek olanın da P_ABS kombinasyonu olduğu belirlenmiştir. Şekilde görülen eğrilerin çoğunda temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen P_ABS_33-9_15J ve P_PLA_34-12_15J kombinasyonlarındaki test numunelerinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – yer değiştirme eğrileri farklı davranışlar sergilemiştir. P_ABS_33-9_15J kombinasyonundaki test numunesinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – yer değiştirme eğrisinde, temas kuvvetinin maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaya başladığı ve buna rağmen yer değiştirme miktarının bir süre daha artmaya devam ettiği, belirli bir noktadan sonra yer değiştirme miktarının da azalarak test numunesinde elastik olarak bir miktar geriye dönüş gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunesinin darbe testi sırasında maksimum temas kuvveti değerinde bir miktar çatlak/kırılma vb. hasarın oluştuğu, bu nedenle yer değiştirme

miktarının hala artmasına rağmen temas kuvvetinin bu noktadan sonra azalmaya başladığı, fakat buna rağmen test numunesinin darbe testi sırasında tamamen delinme hasarına uğramadığı söylenebilir. P_PLA_34-12_15J kombinasyonundaki test numunesinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – yer değiştirme eğrisinde, belirli bir temas kuvveti değerinde eğride bir miktar düşüşün meydana geldiği ve bu düşüşe test numunesinde oluşan çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarının neden olduğu belirlenmiştir. Sonrasında bu test numunesi de bir miktar daha yük taşıdıktan sonra elastik olarak bir miktar geriye dönüş gerçekleşmiş olup, darbe testi bu şekilde sonlanmıştır. Bu şekilde davranış sergileyen test numunesinin darbe testi sırasında tamamen delinme hasarına uğramadığı söylenebilir. Şekil 4.30d’de P kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.30d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar (her testin darbe enerjisine kadar) bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaşıldıktan sonra test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar (elastik enerji/iade edilen enerji kadar) azaldığı ve belirli bir enerji değerinde (absorbe edilen enerji değerinde) eğrilerin sonlandığı görülmektedir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen enerji – zaman eğrileri incelendiğinde, 5J ve 10J darbe enerjilerinde P_ABS kombinasyonundaki test numunelerinin, P_PLA kombinasyonundaki test numunelerinden daha az enerji absorbe ettikleri belirlenmiştir. Fakat 15J darbe enerjisinde her iki kombinasyondaki test numunelerinin de diğer darbe enerjisi testlerine göre nispeten birbirine yakın davranışlar sergilediği söylenebilir.

P kombinasyonundaki 3B yazdırılmış test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.31’da gösterilmiştir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının da arttığı görülmektedir. P_PLA_34-12_15J kombinasyonundaki test numunesinin üst ve alt kısımlarında çatlak/kırılma vb. hasarlarının oluştuğu, oluşan hasarların genellikle 3B yazdırma desen doğrultularına paralel olarak gerçekleştiği, çember şeklindeki çatlağın da DHSD darbe test cihazının alt tabla iç çapından kaynaklandığı belirlenmiştir. Şekil 4.31’da verilen görseller, Şekil 4.30’da verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.31 : P kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.



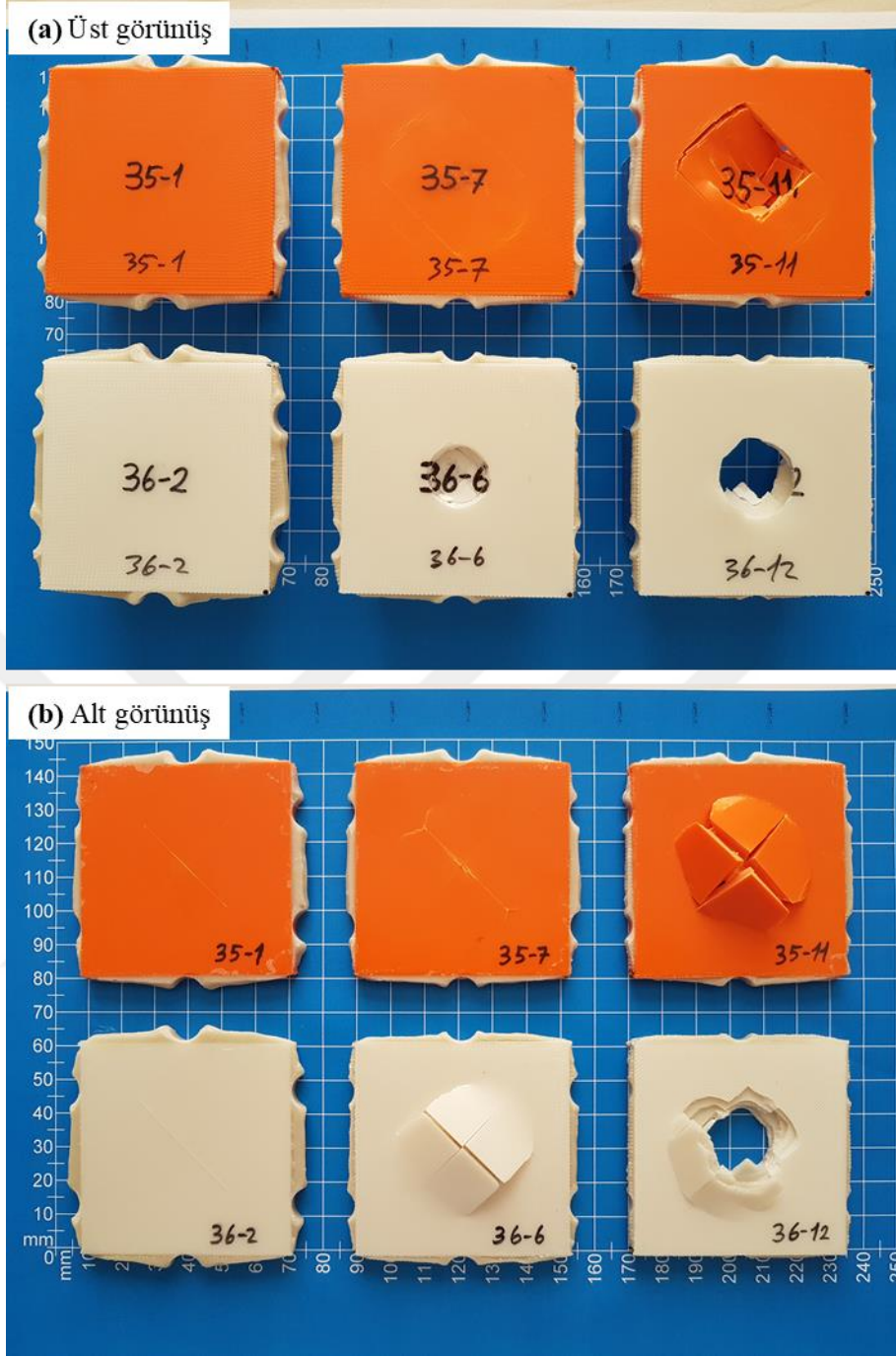
şekil 4.32 : P4444 kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

P4444 kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler şekil 4.32’de gösterilmiştir. şekil 4.32a’da tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. şekil 4.32a incelendiğinde 5J ve 10J darbe enerjileri ile yapılan testlerde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görölmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrileri incelendiğinde, P4444_PLA kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin maksimum temas kuvveti değerlerinin, P4444_ABS kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. P4444 yerleşim düzeninde ABS_35-11_15J kombinasyonundaki test numunesinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrisinde, temas kuvvetinin belli bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra iki noktada aniden azaldığı görölmektedir. P4444 yerleşim düzeninde PLA_36-6_10J kombinasyonundaki test

numunesinin 10J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrisinde, temas kuvvetinin belli bir noktaya ulaştıktan sonra üç noktada aniden azaldığı ve bir miktar düşüşten sonra test numunesinin tekrar yük taşımaya başladığı görülmektedir. PTPPP yerleşim düzeninde PLA_36-12_15J kombinasyonundaki test numunesinin 15J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrisinde, temas kuvvetinin belli bir noktaya ulaştıktan sonra aniden azaldığı ve bir miktar düşüşten sonra test numunesinin tekrar yük taşımaya başladığı görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşürlere, test numunelerinde bu noktalarda oluşan çatlak, göçük, delinme vb. hasarların yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.32b’de PTPPP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değıştirme miktarının zamana göre değışim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.32b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değıştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. PTPPP kombinasyonundaki 5J ve 10J darbe enerjisinde test edilen numunelerde yer değıştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değıştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değıştirme – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. PTPPP yerleşim düzeninde 15J darbe enerjisinde test edilen kombinasyonların yer değıştirme – zaman eğrileri belirli bir noktaya kadar benzer şekilde ilerlemiş olup, yer değıştirme miktarlarında herhangi bir azalma olmadan eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testinde tam delinmeye yakın hasarın oluştuğu söylenebilir. Şekil 4.32c’de PTPPP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değıştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.32c incelendiğinde 5J ve 10J darbe enerjileri ile yapılan testlerde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değıştirme miktarının da arttığı görülmektedir. Şekilde görülen eğrilerin çoğunda temas kuvveti maksimum yer değıştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değıştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değıştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değıştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen PTPPP_ABS_35-11_15J, PTPPP_PLA_36-6_10J ve PTPPP_PLA_36-12_15J kombinasyonlarındaki test numunelerinin kuvvet – yer değıştirme eğrileri farklı davranışlar sergilemiştir. Belirtilen kombinasyonlara ait değerdirmeler Şekil 4.32a ve Şekil 4.32b’de

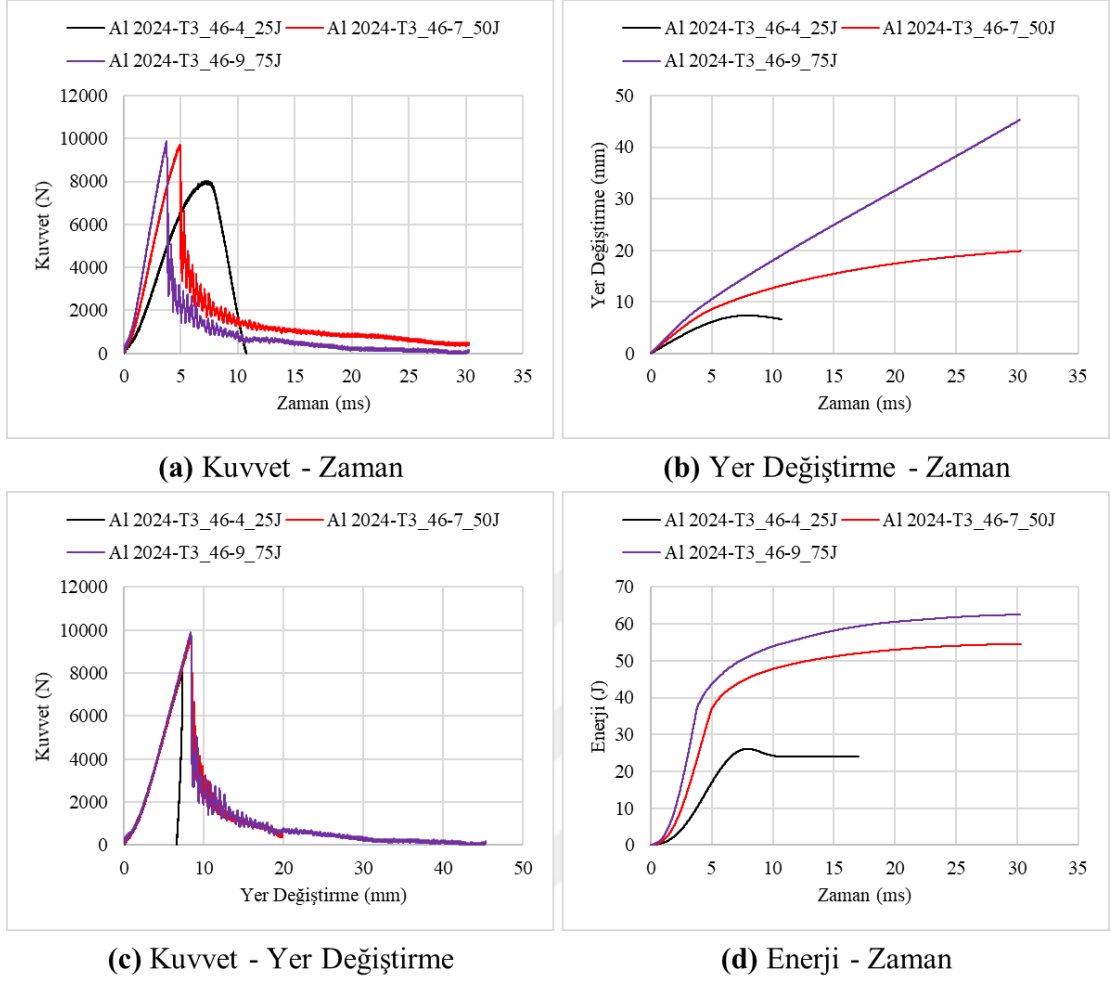
detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Şekil 4.32d'de PPPPP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.32d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra 5J ve 10J darbe enerjilerinde test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir. Fakat 15J darbe enerjisi ile test edilen numunelere ait eğrilerde herhangi bir düşüşün olmadığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında tam delinmeye yakın hasarın oluştuğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen enerji – zaman eğrileri incelendiğinde, 5J ve 10J darbe enerjilerinde PPPPP_ABS kombinasyonundaki test numunelerinin, PPPPP_PLA kombinasyonundaki test numunelerinden daha az enerji absorbe ettikleri belirlenmiştir. Fakat 15J darbe enerjisinde her iki kombinasyondaki test numunelerinin de diğer darbe enerjisi testlerine göre nispeten birbirine yakın davranışlar sergilediği söylenebilir.

PPPPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.33'de gösterilmiştir. Farklı polimer malzemeler kullanılarak üretilen darbe test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının da arttığı görülmektedir. PPPPP_ABS_35-11_15J ve PPPPP_PLA_36-6_10J kombinasyonlarındaki test numunelerinin üst kısımlarında göçük ve alt kısımlarında çatlak/kırılma vb. hasarlarının oluştuğu, oluşan çatlak/kırılma vb. hasarların genellikle 3B yazdırma desen doğrultularına paralel olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. PPPPP_PLA_36-12_15J kombinasyonundaki test numunesinde tam delinmeye yakın hasarın oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 4.33'de verilen görseller, Şekil 4.32'de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.33 : PPPPP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.

4.3.2 M, MMMMM kombinasyonu



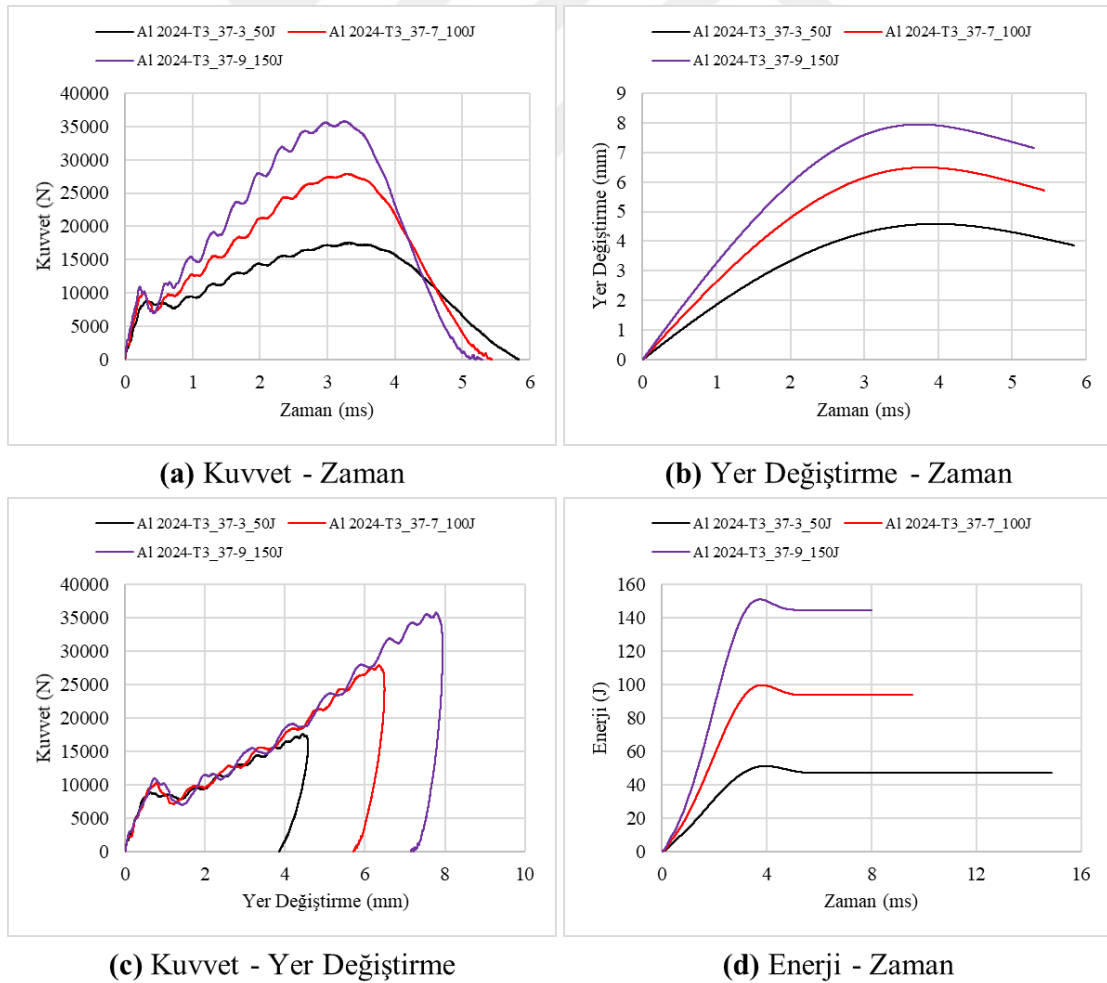
Şekil 4.34 : M kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

M kombinasyonundaki Al 2024-T3 test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.34’de gösterilmiştir. Şekil 4.34a’da tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.34a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı, 50J ve 75J enerjilerindeki darbe testlerinde maksimum temas kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. M kombinasyonunda 50J ve 75J darbe enerjileri ile test edilen test numunelerinin kuvvet – zaman eğrilerinde, temas kuvvetinin lineer bir şekilde belli bir maksimum noktaya ulaştığı, sonra aniden azaldığı ve bu eğrilerin 25J eğrilerine kıyasla daha keskin tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşümlere ve tepe noktasındaki keskin dönüşlere, test numunelerinde oluşan çatlak, delinme vb. hasarların yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.34b’de M kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre

değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.34b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. M kombinasyonundaki 25J darbe enerjisinde test edilen numunelerde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrinin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. M yerleşim düzeninde 50J ve 75J darbe enerjilerinde test edilen kombinasyonların yer değiştirme – zaman eğrileri belirli bir noktaya kadar benzer şekilde ilerlemiş olup, sonrasında yer değiştirme miktarında neredeyse lineer bir şekilde hızlı bir artış görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testinde tam delinmenin olduğu söylenebilir. Şekil 4.34c’de M kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.34c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı, 50J ve 75J enerjilerindeki darbe testlerinde maksimum temas kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Şekilde görülen 25J darbe enerjisinde test edilen numuneye ait eğrinin temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunesinin elastik olarak bir miktar geriye dönmesiyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin delinme vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen M kombinasyonunda 50J ve 75J darbe enerjileri ile test edilen test numunelerinin kuvvet – yer değiştirme eğrilerinde, belirli bir temas kuvveti değerinde eğrilerde bir miktar ani düşüşün meydana geldiği ve sonrasında eğrilerin yer değiştirme miktarı artarken kuvvet değerlerinin azaldığı bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında delinme hasarının meydana geldiği söylenebilir. Şekil 4.34d’de M kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.34d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra 25J darbe enerjisinde test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrinin sonlandığı görülmektedir. Fakat 50J ve 75J darbe enerjisi ile test edilen numunelere ait eğrilerde herhangi bir düşüşün olmadığı ve 75J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonda belirlenen darbe enerjisine ulaşmadan eğrinin sonlandığı belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında

delinme hasarının meydana geldiği, 50J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonda test numunesinin verilen darbe enerjisinin tamamını absorbe ettiği, 75J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonda ise delinme sırasında darbe enerjisinin büyük kısmını test numunesinin absorbe ettiği, kalan kısmını da test cihazındaki vurucu kütesinin hareketini sınırlayıcı düzeneğin absorbe ettiği söylenebilir.

M kombinasyonundaki Al 2024-T3 test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.36’de (46 numaralı numuneler) gösterilmiştir. M kombinasyonundaki test numunelerinde darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının giderek delinme hasarına dönüştüğü görülmektedir. M_Al 2024-T3_46-4_25J kombinasyonundaki test numunesinde bir miktar çökmenin olduğu, M_Al 2024-T3_46-7_50J ve M_Al 2024-T3_46-9_75J kombinasyonlarındaki test numunelerinde delinme hasarlarının olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.36’de verilen görseller (46 numaralı numuneler), Şekil 4.34’de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.

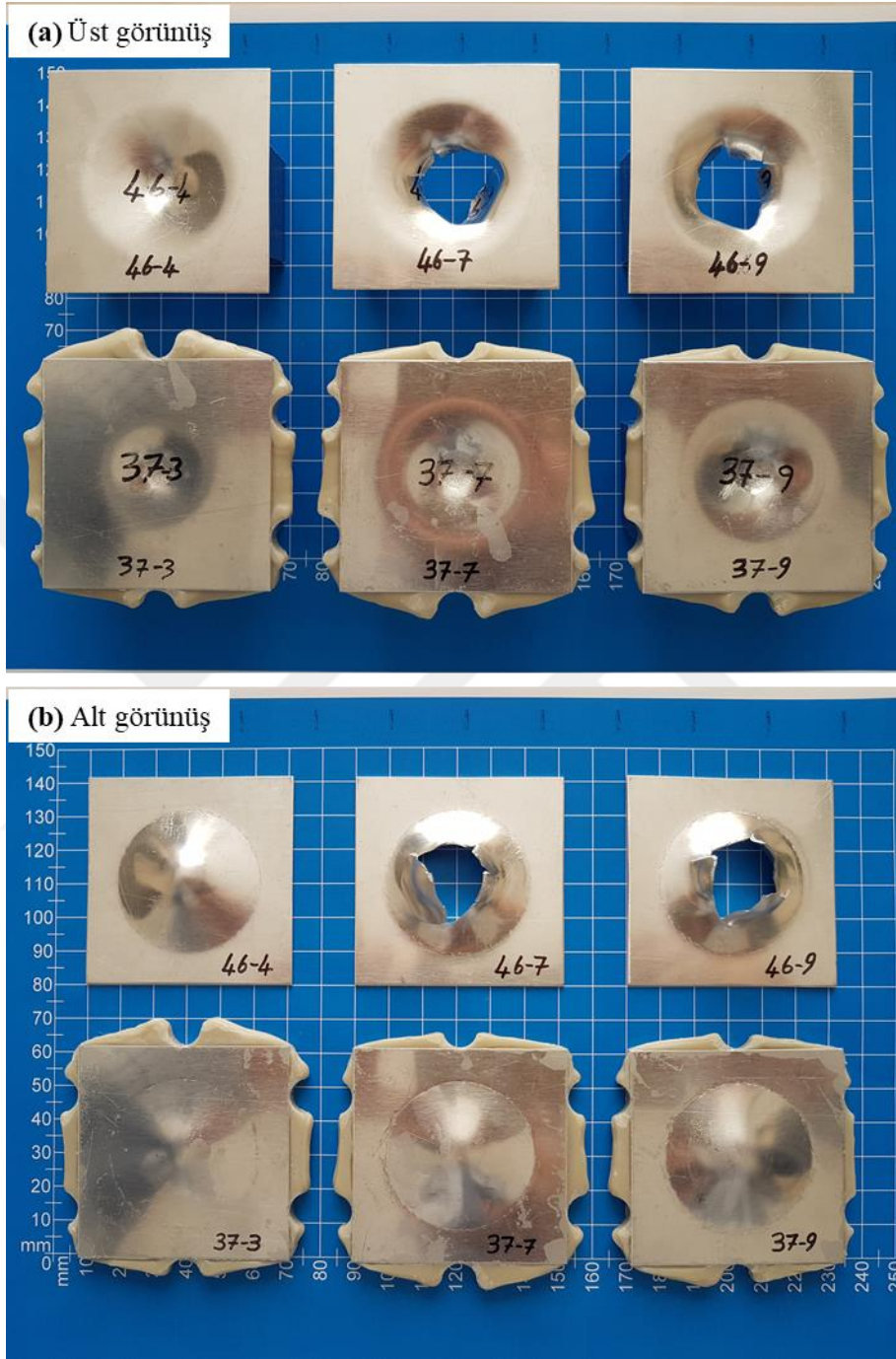


Şekil 4.35 : MMMMM kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.35’de gösterilmiştir. Şekil 4.35a’da MMMMM kombinasyonundaki tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.35a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Şekil 4.35b’de MMMMM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.35b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. MMMMM kombinasyonundaki tüm test numunelerinde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. Şekil 4.35c’de MMMMM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.35c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. Şekilde görülen eğrilerin tamamında temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Şekil 4.35d’de MMMMM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.35d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir.

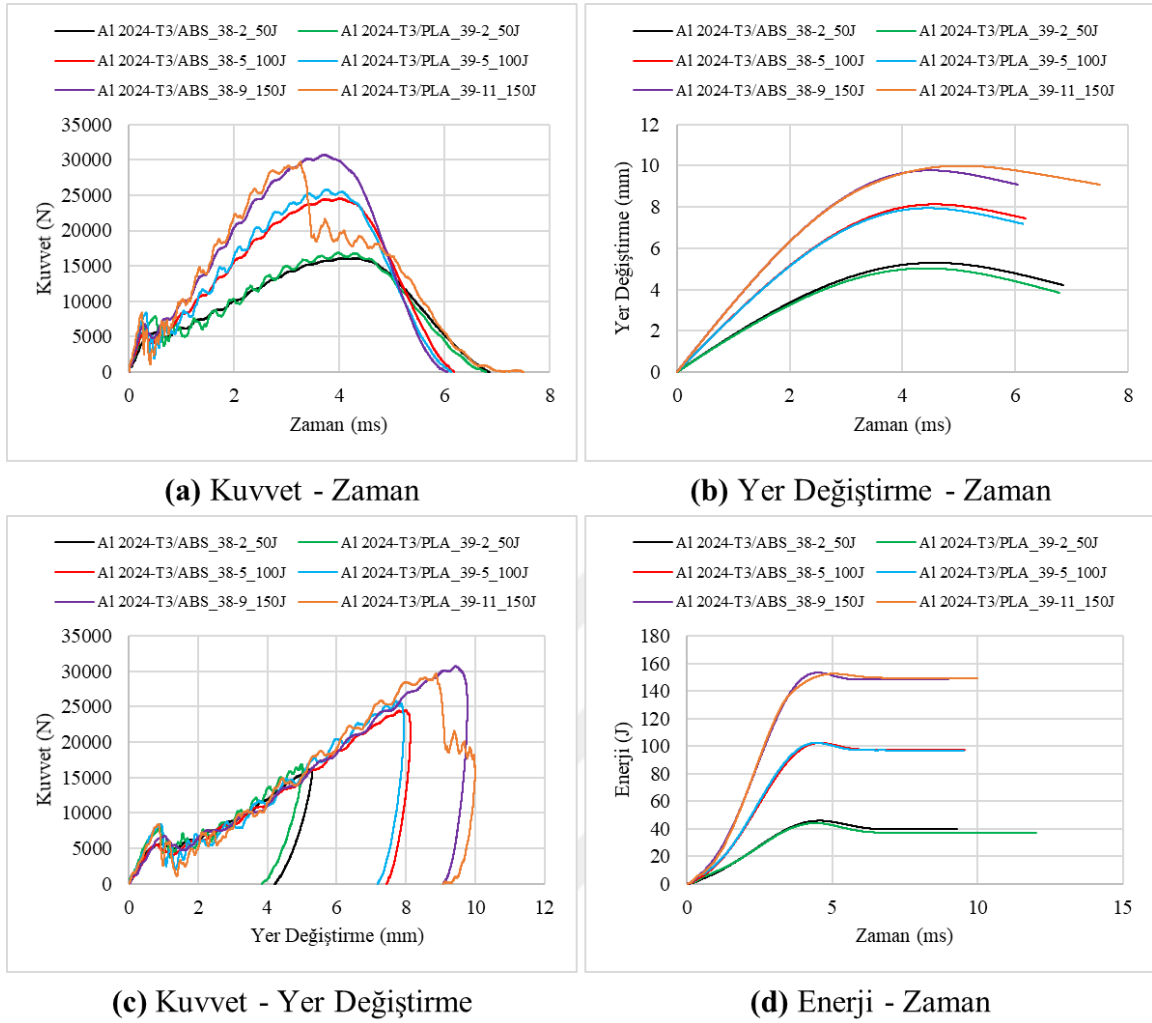
MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.36’de (37 numaralı numuneler) gösterilmiştir. MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinde darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının da arttığı, numunelerde herhangi bir çatlak, delinme vb. hasarın oluşmadığı görülmektedir. Şekil 4.36’de verilen görseller (37

numaralı numuneler), Şekil 4.35’de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.36 : M ve MMMMM kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.

4.3.3 MPMPM kombinasyonu



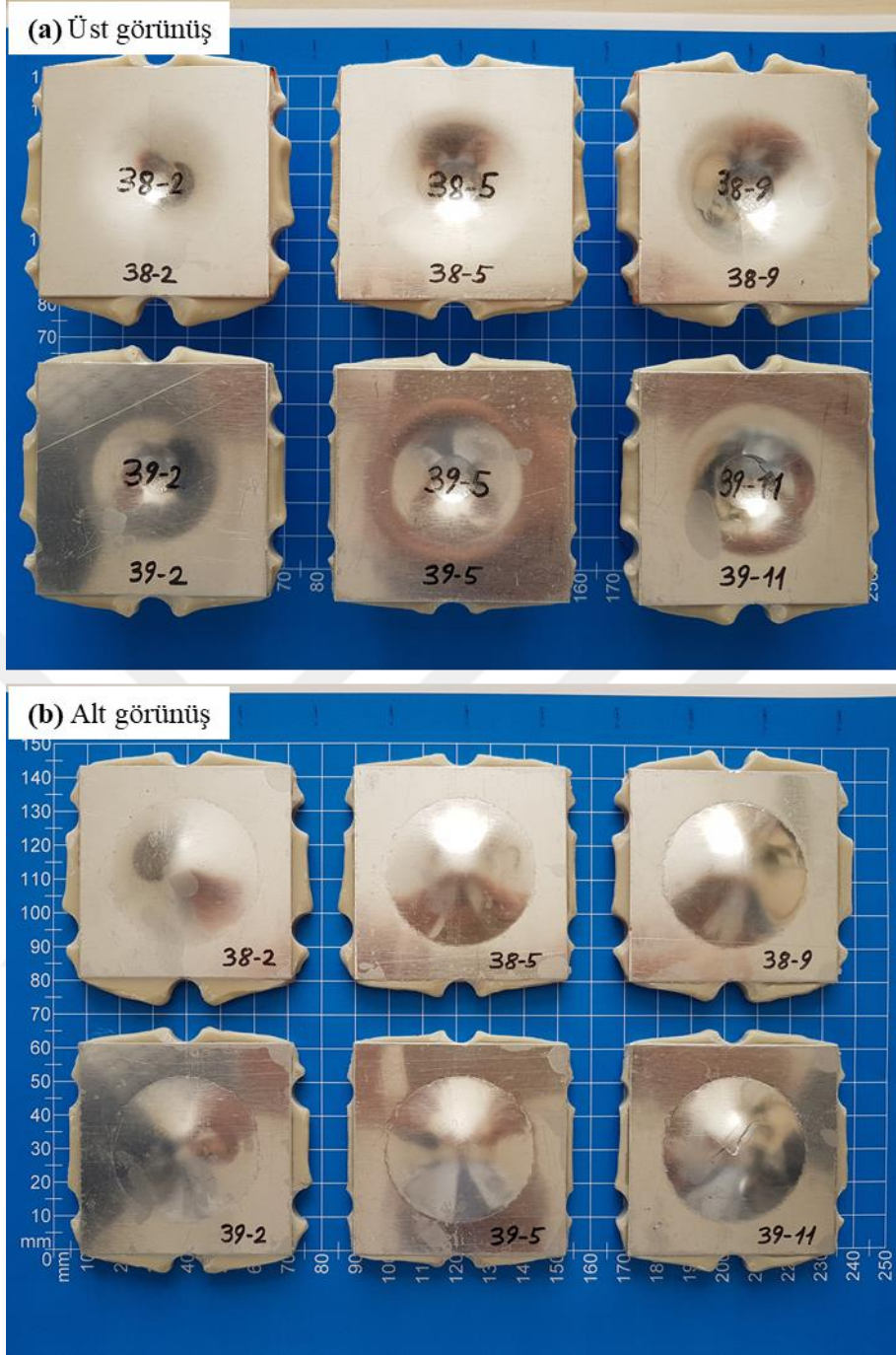
Şekil 4.37 : MPMPM kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.37'de gösterilmiştir. Şekil 4.37a'da MPMPM kombinasyonundaki tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.37a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. MPMPM yerleşim düzeninde A1 2024-T3/PLA_39-11_150J kombinasyonundaki test numunesinin 150J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrisinde, temas kuvvetinin belli bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra aniden azaldığı ve bir miktar düşüştüğü sonra test numunesinin tekrar yük taşımaya başladığı görülmektedir. Temas

kuvvetindeki bu ani düşüğe, test numunesinde bu noktada oluşan çatlak vb. hasarın yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.37b’de MPMPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.37b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. MPMPM kombinasyonundaki tüm test numunelerinde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değiştirme – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Sadece MPMPM yerleşim düzeninde Al 2024-T3/PLA_39-11_150J kombinasyonundaki test numunesinde 150J darbe enerjisinde bir miktar çatlak vb. hasar oluştuğundan, bu numuneye ait yer değiştirme – zaman eğrisi belirli bir noktadan sonra farklı bir davranış sergilemiştir. Şekil 4.37c’de MPMPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.37c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Şekilde görülen eğrilerin çoğunda temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen MPMPM yerleşim düzeninde Al 2024-T3/PLA_39-11_150J kombinasyonundaki test numunesinin 150J darbe enerjisindeki kuvvet – yer değiştirme eğrisinde benzer bir davranış görülmemiş olup, belirli bir temas kuvveti değerinde eğride bir miktar düşüşün meydana geldiği ve bu düşüğe test numunesinde oluşan çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarının neden olduğu belirlenmiştir. Sonrasında bu test numunesi de bir miktar daha yük taşıdıktan sonra elastik olarak bir miktar geriye dönüş gerçekleşmiş olup, darbe testi bu şekilde sonlanmıştır. Bu şekilde davranış sergileyen test numunesinin darbe testi sırasında tamamen delinme hasarına uğramadığı söylenebilir. Şekil 4.37d’de MPMPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin

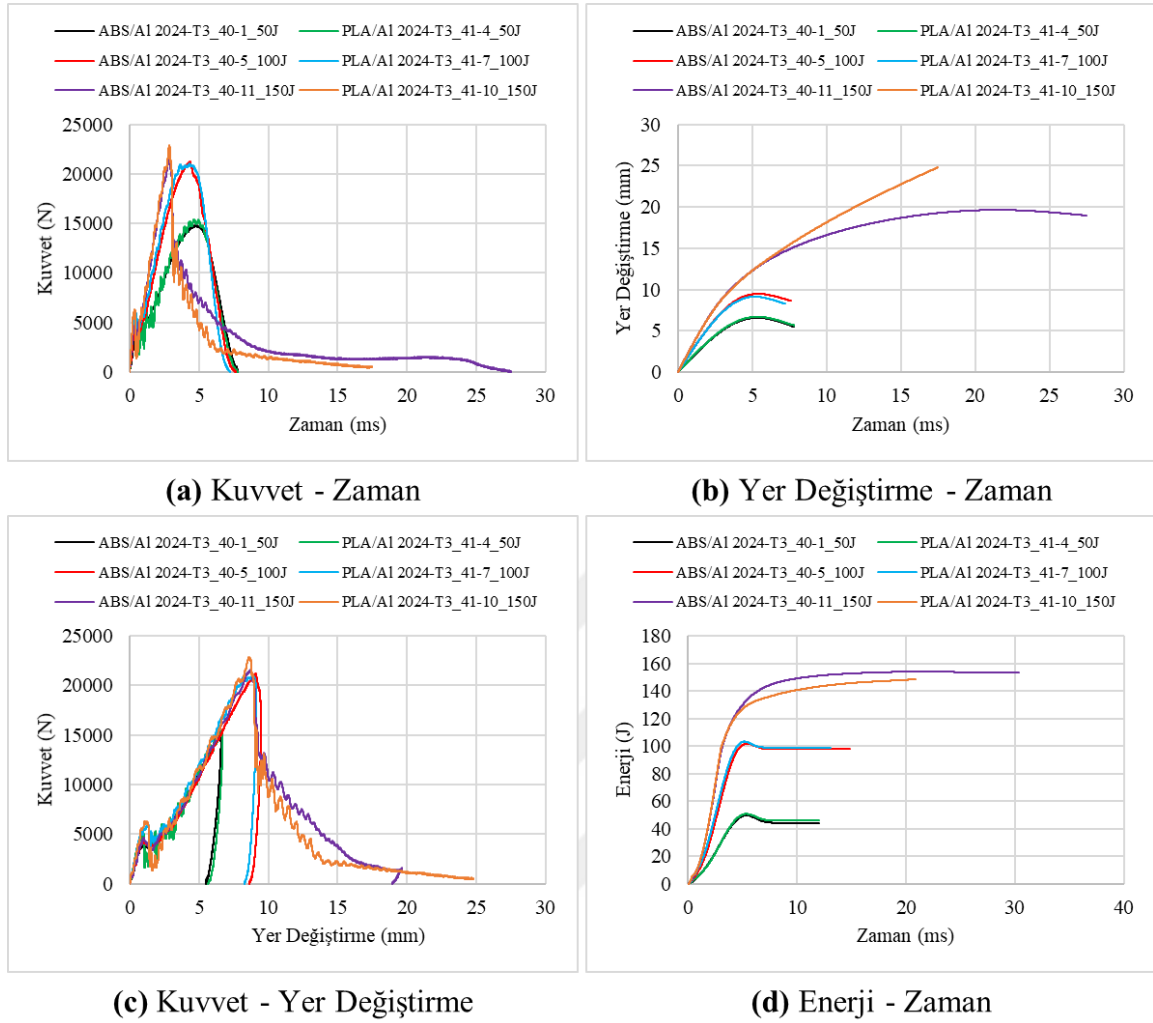
zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.37d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir.

MPMPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.38’da gösterilmiştir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının da arttığı görülmektedir. MPMPM yerleşim düzeninde Al 2024-T3/PLA_39-11_150J kombinasyonundaki test numunesinin üst ve alt kısımlarında bulunan Al 2024-T3 tabakalarda bir miktar çatlak hasarlarının oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 4.38’da verilen görseller, Şekil 4.37’de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.38 : MPMPM kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.

4.3.4 PMPMP kombinasyonu



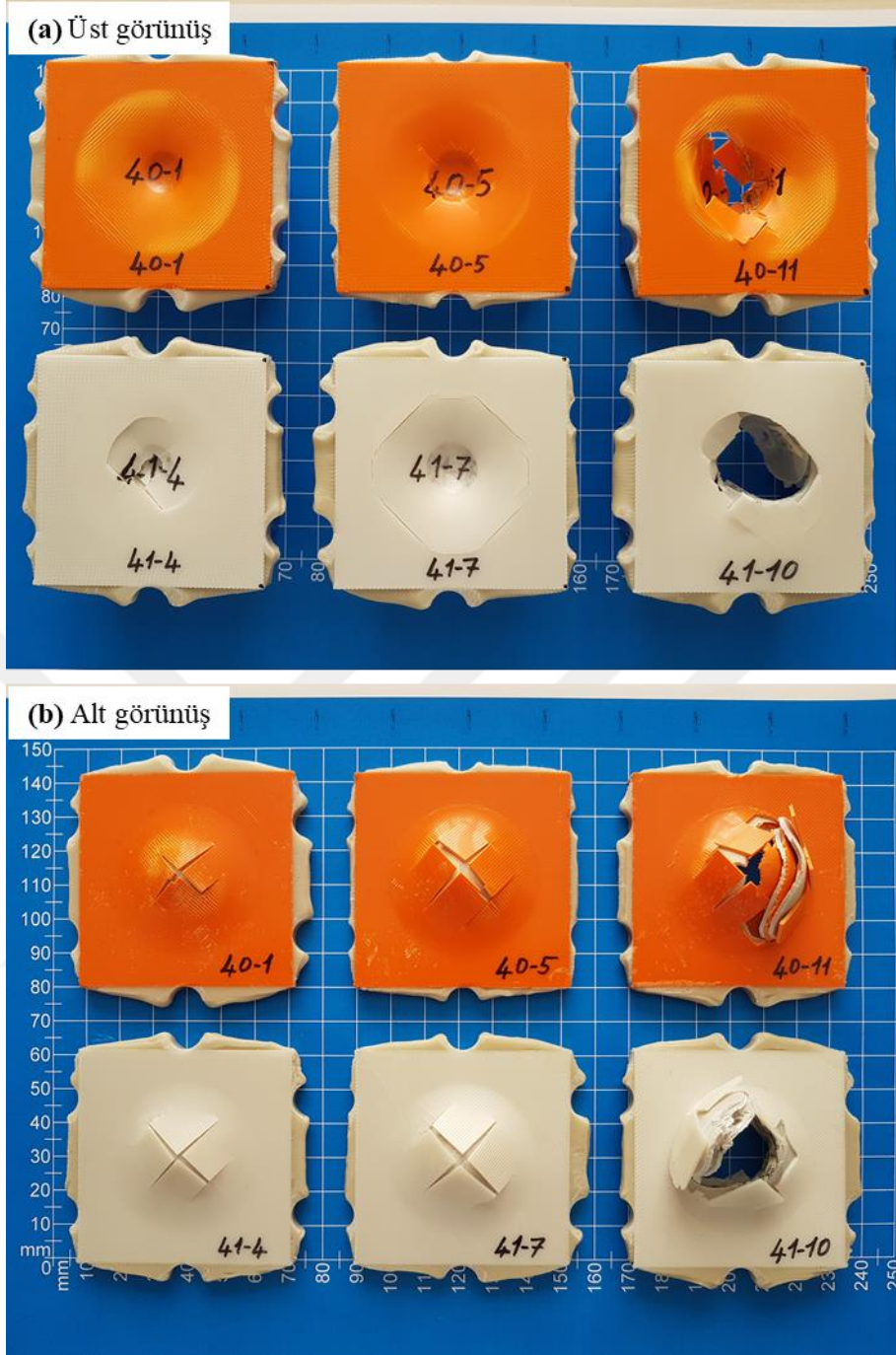
Şekil 4.39 : PMPMP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.39’de gösterilmiştir. Şekil 4.39a’da PMPMP kombinasyonundaki tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.39a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. PMPMP yerleşim düzeninde ABS/AI 2024-T3_40-11_150J ve PLA/AI 2024-T3_41-10_150J kombinasyonlarındaki test numunelerinin 150J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrilerinin, temas kuvvetinin neredeyse lineer bir şekilde belli bir maksimum noktaya ulaştığı, sonra aniden azaldığı ve bu eğrilerin 50J ve 100J eğrilerine

kıyasla daha keskin tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşümlere ve tepe noktasındaki keskin dönüşlere, test numunelerinde oluşan çatlak, delinme vb. hasarların yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.39b’de PMPMP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.39b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. PMPMP kombinasyonundaki 50J ve 100J enerjilerinde test edilen numunelerde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran 50J ve 100J enerjilerinde test edilen tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değiştirme – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. PMPMP yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisinde test edilen kombinasyonların yer değiştirme – zaman eğrileri belirli bir noktaya kadar benzer şekilde ilerlemişlerdir. Sonrasında ABS/Al 2024-T3_40-11_150J kombinasyonundaki test numunesine ait eğrinin diğer eğriden ayrılarak bir miktar daha yer değiştirme miktarında artış gösterdikten sonra bir miktar azalma göstererek eğrinin bu şekilde sonlandığı görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunesinin darbe testinde delinme oluştuktan sonra test numunesinin hasara uğrayan kısımdaki elastik davranış sergileyebilecek bir parçasının, vurucu kütlelerini bir miktar geriye hareket ettirdiği söylenebilir. PMPMP yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisinde test edilen diğer PLA/Al 2024-T3_41-10_150J kombinasyonuna ait yer değiştirme – zaman eğrisinde diğer kombinasyondaki eğriden ayrıldıktan sonra yer değiştirme miktarında lineer bir şekilde hızlı bir artış görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunesinde darbe testinde tam delinmenin olduğu söylenebilir. Şekil 4.39c’de PMPMP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.39c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Şekilde görülen 50J ve 100J enerjilerinde test edilen numunelere ait eğrilerin temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır.

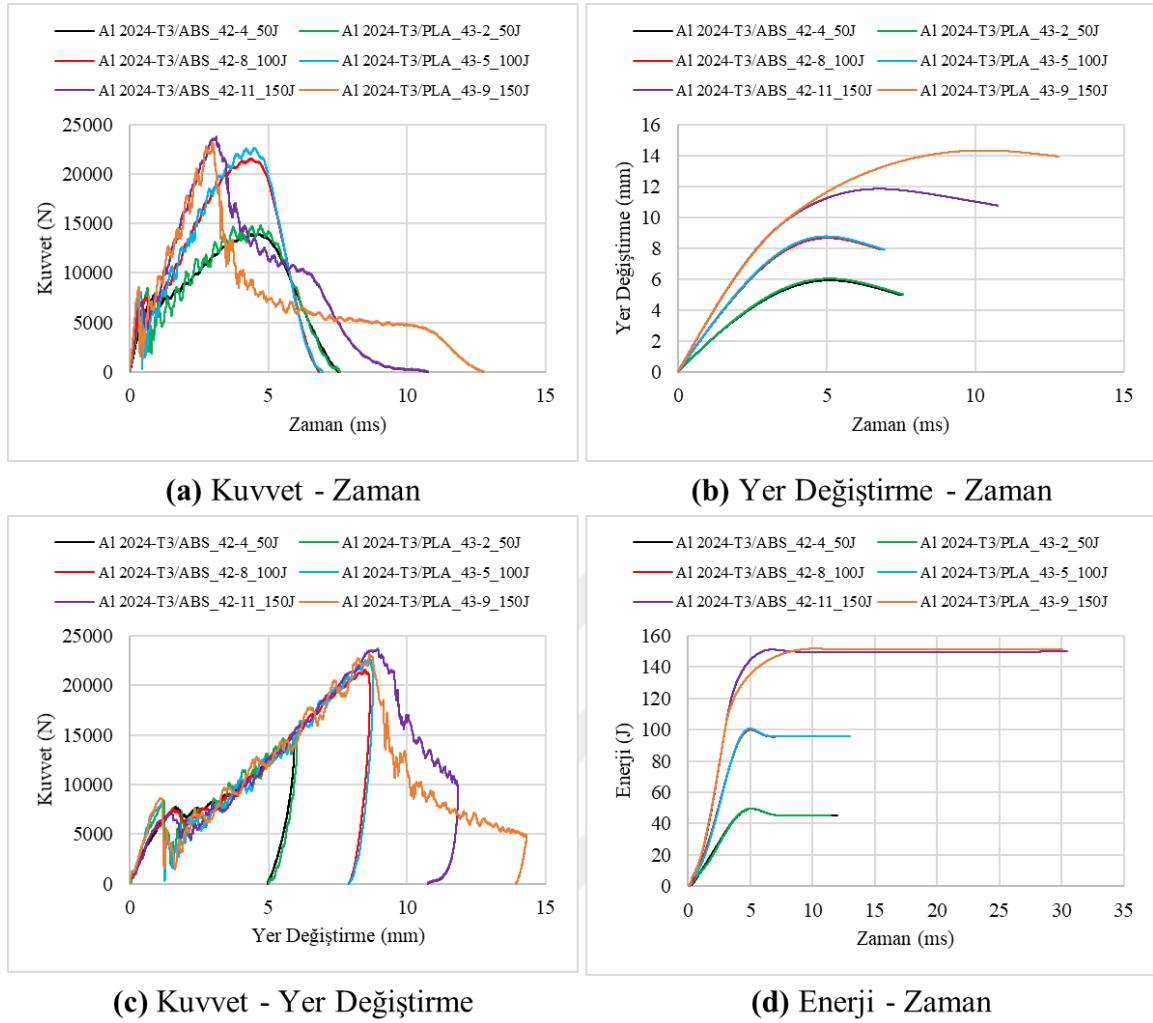
Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen PMPMP yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonlardaki test numunelerinin kuvvet – yer değiştirme eğrilerinde, belirli bir temas kuvveti değerinde eğrilerde bir miktar ani düşüşün meydana geldiği ve sonrasında eğrilerin yer değiştirme miktarı artarken kuvvet değerlerinin azaldığı bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında delinme hasarının meydana geldiği söylenebilir. ABS/AI 2024-T3_40-11_150J kombinasyonundaki test numunesine ait eğrinin son kısmında yer değiştirme miktarında biraz azalmanın olduğu görülmektedir. şekil 4.39d’de PMPMP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. şekil 4.39d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra 50J ve 100J darbe enerjilerinde test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir. Fakat 150J darbe enerjisi ile test edilen numunelere ait eğrilerde herhangi bir düşüşün olmadığı, bu numunelerin verilen darbe enerjisinin tamamını absorbe ettiği belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında delinme hasarının meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca içerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir.

PMPMP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri şekil 4.40’de gösterilmiştir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan okme miktarının da arttığı, bu artışın giderek delinme hasarına dönüştüğü görülmektedir. PMPMP yerleşim düzeninde ABS/AI 2024-T3_40-1_50J kombinasyonundaki test numunesinin st yüzeyinin haricinde geriye kalan tüm test numunelerinin st ve alt kısımlarında bulunan polimer tabakalarda çatlak hasarlarının oluştuğu, 150J darbe enerjisi ile test edilen numunelerde delinme hasarlarının oluştuğu belirlenmiştir. şekil 4.40’de verilen görseller, şekil 4.39’de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



Şekil 4.40 : PMPMP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.

4.3.5 MPPPM kombinasyonu



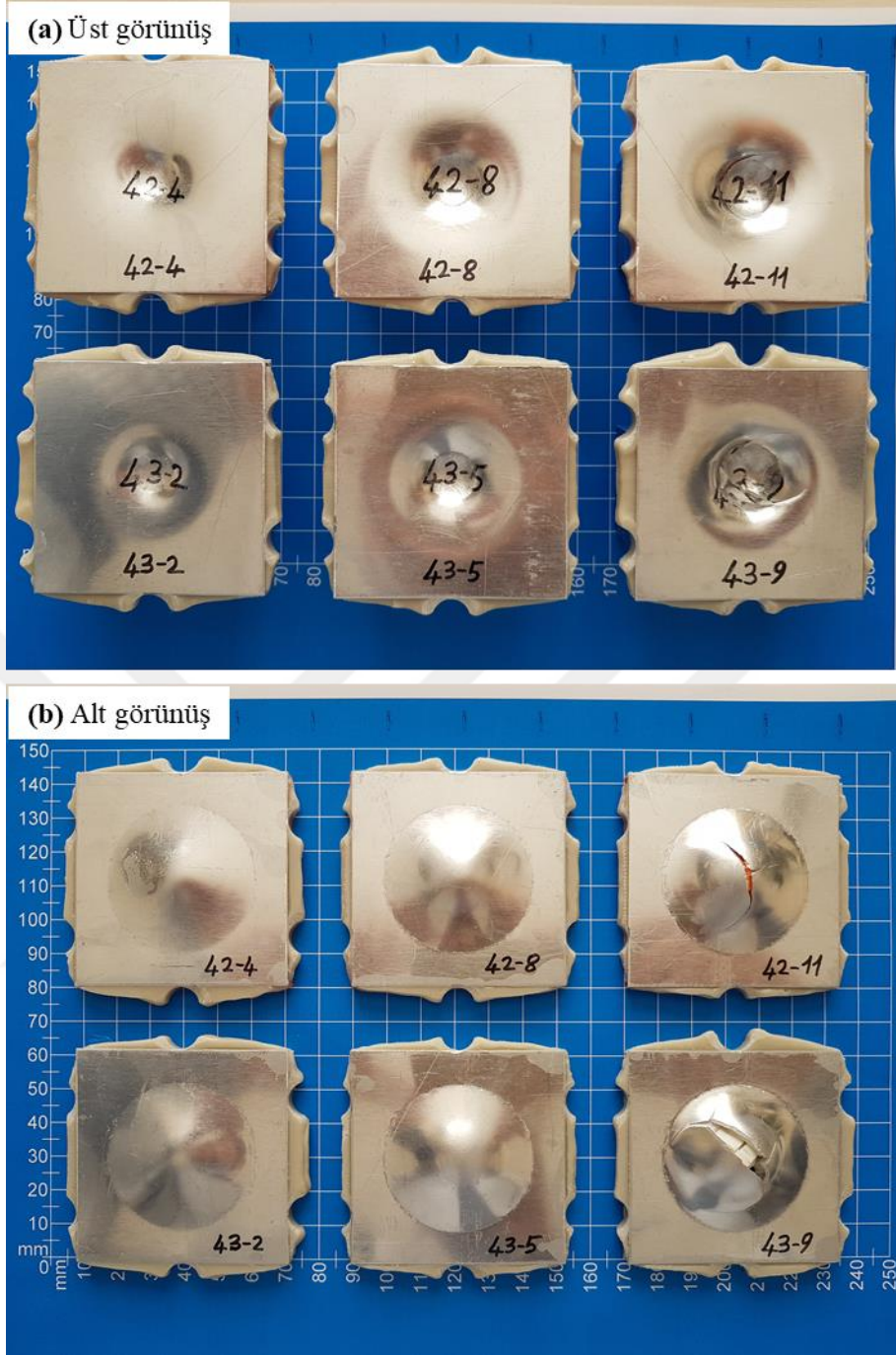
Şekil 4.41 : MPPPM kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.41’da gösterilmiştir. Şekil 4.41a’da MPPPM kombinasyonundaki tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.41a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. MPPPM yerleşim düzeninde A1 2024-T3/ABS_41-11_150J ve A1 2024-T3/PLA_43-9_150J kombinasyonlarındaki test numunelerinin 150J darbe enerjisindeki kuvvet – zaman eğrilerinin, temas kuvvetinin neredeyse lineer bir şekilde belli bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra aniden azaldığı ve bir miktar düşüştüğü sonra test

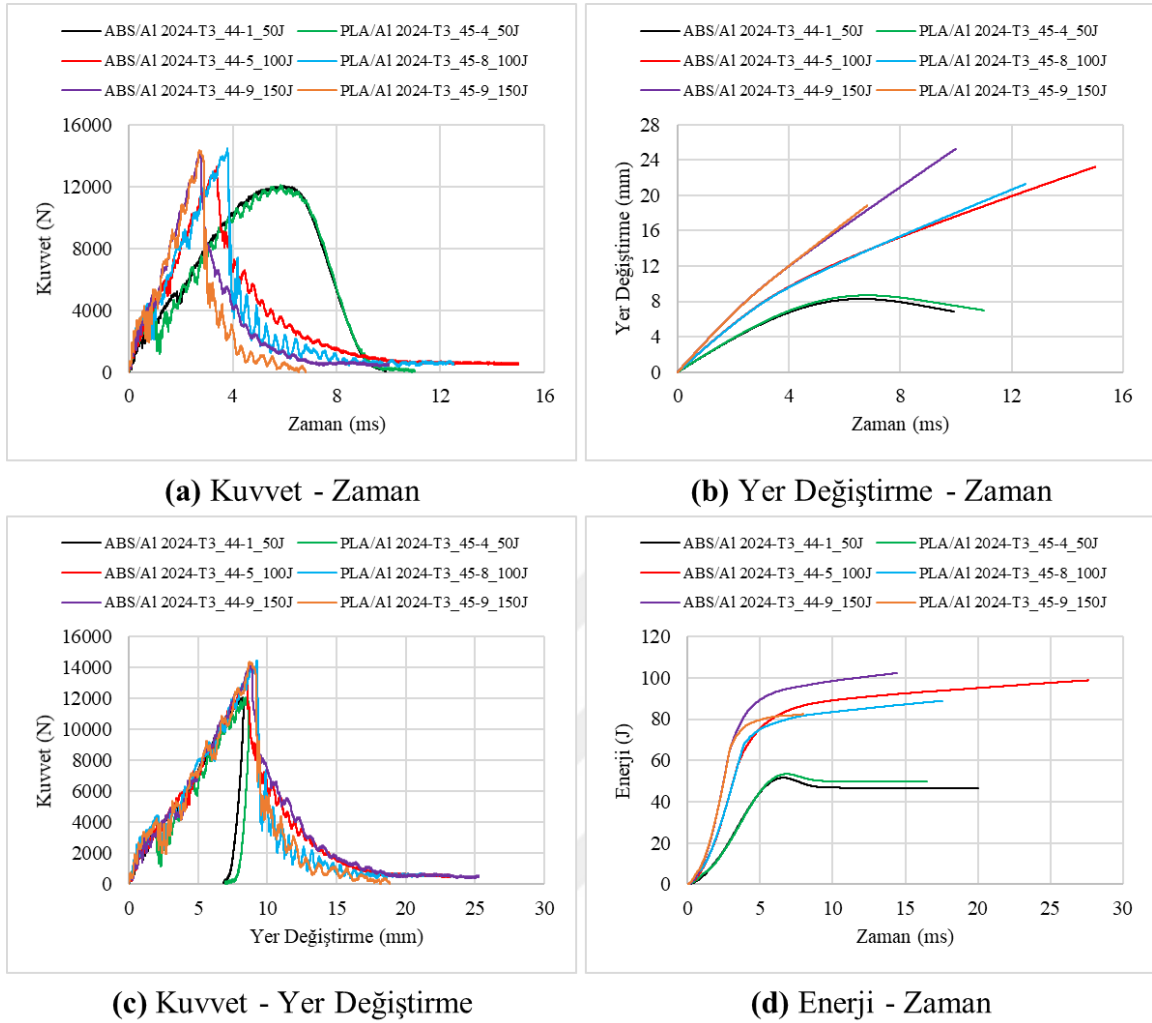
numunesinin tekrar yük taşımaya başladığı, ayrıca bu eğrilerin 50J ve 100J eğrilerine kıyasla daha keskin tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşümlere ve tepe noktasındaki keskin dönüşlere, test numunelerinde oluşan çatlak, delinme vb. hasarların yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.41b’de MPPPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.41b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. MPPPM kombinasyonundaki 50J ve 100J enerjilerinde test edilen numunelerde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran 50J ve 100J enerjilerinde test edilen tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değiştirme – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. MPPPM yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisinde test edilen kombinasyonların yer değiştirme – zaman eğrileri belirli bir noktaya kadar benzer şekilde ilerlemişlerdir. Sonrasında her iki eğri birbirinden ayrılmış olup, bir miktar daha yer değiştirme miktarında artış gösterdikten sonra bir miktar azalma göstererek eğrilerin bu şekilde sonlandığı görülmektedir. MPPPM yerleşim düzeninde Al 2024-T3/PLA_43-9_150J kombinasyonundaki test numunesinin maksimum yer değiştirme miktarın daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde bir miktar çatlak vb. hasar oluştuğundan, bu numunelere ait yer değiştirme – zaman eğrileri belirli bir noktadan sonra farklı davranışlar sergilemişlerdir. Şekil 4.41c’de MPPPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.41c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Şekilde görülen 50J ve 100J enerjilerinde test edilen numunelere ait eğrilerin temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen MPPPM

yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonlardaki test numunelerinin kuvvet – yer değiştirme eğrilerinde, temas kuvvetinin belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra eğrilerde bir miktar düşüşün meydana geldiği ve sonrasında eğrilerin yer değiştirme miktarı artarken kuvvet değerlerinin azaldığı bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu kombinasyonlara ait eğrilerin son kısımlarında yer değiştirme miktarlarında biraz azalmanın olduğu belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında çatlak vb. bir ayrılma/kopma hasarının meydana geldiği söylenebilir. Şekil 4.41d’de MPPPM kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.41d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra 50J ve 100J darbe enerjilerinde test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir. Fakat 150J darbe enerjisi ile test edilen numunelere ait eğrilerde ihmal edilebilecek kadar az düşüşün olduğu, bu numunelerin verilen darbe enerjisinin neredeyse tamamını absorbe ettiği belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında çatlak, delinme vb. hasarların meydana geldiği söylenebilir. Ayrıca içerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir.

MPPPM kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.42’de gösterilmiştir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının da arttığı, bu artışın giderek çatlak vb. ayrılma/kopma hasarına dönüştüğü görülmektedir. MPPPM yerleşim düzeninde 150J darbe enerjisi ile test edilen kombinasyonlardaki test numunelerinin üst ve alt kısımlarında bulunan Al 2024-T3 tabakalarda çatlak hasarlarının oluştuğu, iç kısımlarda bulunan polimer levhalarda da kırılmaların meydana geldiği, Al 2024-T3/PLA_43-9_150J kombinasyonundaki test numunesindeki çatlak/kırılma vb. hasarın daha fazla olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.42’de verilen görseller, Şekil 4.41’de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



4.3.6 PPMPP kombinasyonu



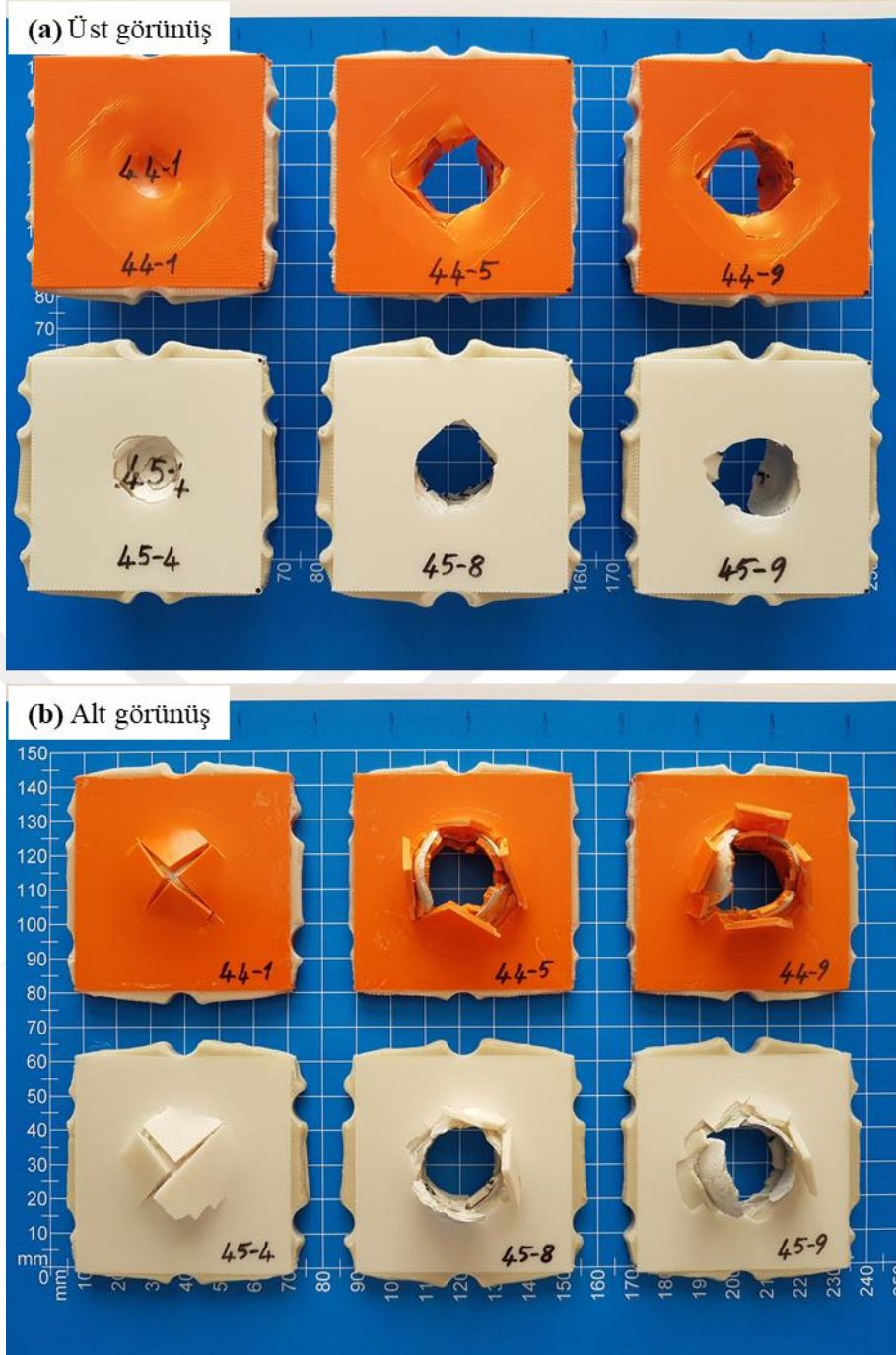
Şekil 4.43 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi grafikleri.

PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen grafikler Şekil 4.43’de gösterilmiştir. Şekil 4.43a’da PPMPP kombinasyonundaki tüm test numuneleri için kuvvetin sıfırdan başlayıp arttığı ve bir maksimum noktaya ulaştıktan sonra azalarak tekrar sıfıra ulaşana kadar geçen süredeki kuvvetin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.43a incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerine etki eden temas kuvvetinin de arttığı, 100J ve 150J enerjilerindeki darbe testlerinde maksimum temas kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. PPMPP yerleşim düzeninde 100J ve 150J darbe enerjilerine sahip kombinasyonlardaki test numunelerinin kuvvet – zaman eğrilerinde, temas kuvvetinin neredeyse lineer bir şekilde belli bir maksimum noktaya ulaştığı, sonra aniden

azaldığı ve bu eğrilerin 50J eğrilerine kıyasla daha keskin tepe noktalarına sahip olduğu görülmektedir. Temas kuvvetindeki bu ani düşümlere ve tepe noktasındaki keskin dönüşlere, test numunelerinde oluşan çatlak, delinme vb. hasarların yol açtığı söylenebilir. Şekil 4.43b’de PPMPP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait yer değiştirme miktarının zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.43b incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerindeki yer değiştirme miktarlarının da arttığı görülmektedir. PPMPP kombinasyonundaki 50J darbe enerjisinde test edilen numunelerde yer değiştirme miktarının belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve eğrilerin bu şekilde sonlandığı belirlenmiştir. Yer değiştirme miktarlarındaki bu azalmaya test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmelerinin neden olduğu söylenebilir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen yer değiştirme – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. PPMPP yerleşim düzeninde 100J ve 150J darbe enerjilerinde test edilen kombinasyonların yer değiştirme – zaman eğrileri belirli bir noktaya kadar benzer şekilde ilerlemiş olup, sonrasında yer değiştirme miktarında lineer bir şekilde hızlı bir artış görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testinde tam delinmenin olduğu söylenebilir. Şekil 4.43c’de PPMPP kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait kuvvet – yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.43c incelendiğinde darbe enerjisinin artmasıyla test numunelerinde oluşan temas kuvvetinin ve yer değiştirme miktarının da arttığı görülmektedir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin aynı enerji değerlerine karşılık gelen kuvvet – yer değiştirme eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. Şekilde görülen 50J darbe enerjisinde test edilen numunelere ait eğrilerin temas kuvveti maksimum yer değiştirme noktasına kadar sürekli olarak artmakta olup, maksimum yer değiştirme miktarına ulaştıktan sonra test numunelerinin elastik olarak bir miktar geriye dönmeleriyle birlikte yer değiştirme miktarı bir miktar azalmakta ve temas kuvveti de sıfıra ulaşmaktadır. Kuvvet – yer değiştirme eğrisinin bu şekilde davranış sergilediği test numunelerinde, numunenin delinme vb. bir ayrılma/kopma hasarına uğramadan darbe testinin tamamlandığı söylenebilir. Ancak şekilde verilen PPMPP yerleşim düzeninde 100J ve 150J darbe enerjileri ile test edilen kombinasyonlardaki test numunelerinin kuvvet – yer değiştirme eğrilerinde, belirli bir temas kuvveti değerinde eğrilerde bir miktar ani düşüşün meydana geldiği ve sonrasında eğrilerin yer değiştirme miktarı artarken kuvvet değerlerinin azaldığı bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında delinme hasarının meydana geldiği söylenebilir. Şekil 4.43d’de PPMPP

kombinasyonundaki tüm test numunelerine ait darbe enerjilerinin zamana göre değişim eğrileri gösterilmiştir. Şekil 4.43d incelendiğinde darbe enerjilerinin her test için belirlenen değere kadar bir süre arttığı, belirlenen maksimum değere ulaştıktan sonra 50J darbe enerjisinde test numunesinin elastik olarak geriye dönmesiyle bir miktar azaldığı ve belirli bir enerji değerinde eğrilerin sonlandığı görülmektedir. Fakat 100J ve 150J darbe enerjisi ile test edilen numunelere ait eğrilerde herhangi bir düşüşün olmadığı ve bu kombinasyonların büyük kısmında eğrilerin belirlenen darbe enerjisine ulaşmadan eğrilerin sonlandığı belirlenmiştir. Bu şekilde davranış sergileyen test numunelerinde darbe testi sırasında delinme hasarının meydana geldiği, delinme sırasında darbe enerjisinin büyük kısmını test numunelerinin absorbe ettiği, kalan kısmını da test cihazındaki vurucu kütesinin hareketini sınırlayıcı düzeneğin absorbe ettiği söylenebilir. Ayrıca içerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin 50J darbe enerjisine karşılık gelen enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir.

PPMPP kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testi sonrasındaki hasar görüntüleri Şekil 4.44'de gösterilmiştir. İçerisinde ABS ve PLA polimer levha bulunduran tabakalı kompozit test numunelerinin her ikisinde de darbe enerjisinin artmasıyla numunelerde oluşan çökme miktarının giderek delinme hasarına dönüştüğü görülmektedir. PPMPP yerleşim düzeninde ABS/Al 2024-T3_44-1_50J kombinasyonundaki test numunesinin üst yüzeyinin haricinde geriye kalan tüm test numunelerinin üst ve alt kısımlarında bulunan polimer tabakalarda çatlak hasarlarının oluştuğu, 100J ve 150J darbe enerjileri ile test edilen numunelerde delinme hasarlarının oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 4.44'de verilen görseller, Şekil 4.43'de verilen grafiklerle ilgili yukarıda yapılan değerlendirmeleri doğrulamaktadır.



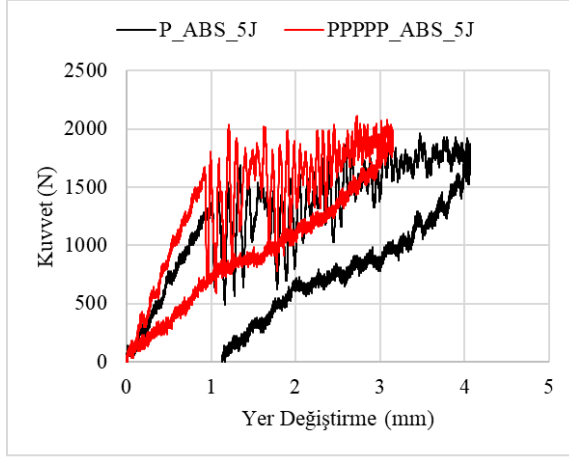
Şekil 4.44 : PPMPP kombinasyonu DHSD darbe testi hasar görüntüleri.

4.3.7 DHSD darbe testi genel değerlendirmeleri

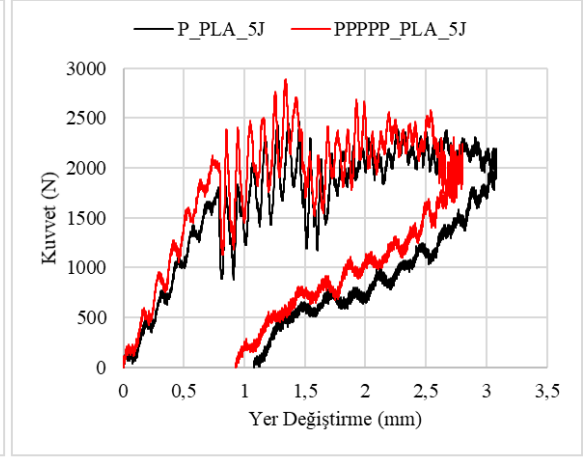
Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafikleri Şekil 4.45’de bir arada gösterilmiştir. Şekildeki ABS polimer levha kullanılan testlerden elde edilen grafikler incelendiğinde (Şekil 4.45a, b, c), 5J ve 10J darbe enerjilerinde PPMPP kombinasyonunun temas kuvveti üzerinde çok fazla etkisi olmazken P kombinasyonuna göre maksimum yer değiştirme miktarının daha düşük olduğu, 15J darbe enerjisinde ise PPMPP

kombinasyonundaki test numunesi P kombinasyonundaki test numunesinin maksimum yer deęiřtirme deęerine ulařmadan temas kuvvetinde ani dūřuřlerin oluřtuęu gōr÷lmektedir. Őekildeki PLA polimer levha kullanılan testlerden elde edilen grafikler incelendięinde (Őekil 4.45d, e ,f), 5J darbe enerjisinde PPPPP kombinasyonunun temas kuvveti ve yer deęiřtirme üzerinde çok fazla etkisi olmazken, 10J ve 15J darbe enerjilerinde PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerinin ulařtıęı maksimum temas kuvveti ve maksimum yer deęiřtirme deęerlerine ulařmadan temas kuvvetinde ani dūřuřlerin oluřtuęu gōr÷lmektedir. ABS ve PLA polimer levha kullanılan PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerine gōre daha sert ve gevrek bir davranıř sergiledięi belirlenmiřtir. İlgili kombinasyonlara ait izelge 4.1’de verilen sertlik deęerleri de bu sonuçlarla uyum saęlamaktadır.

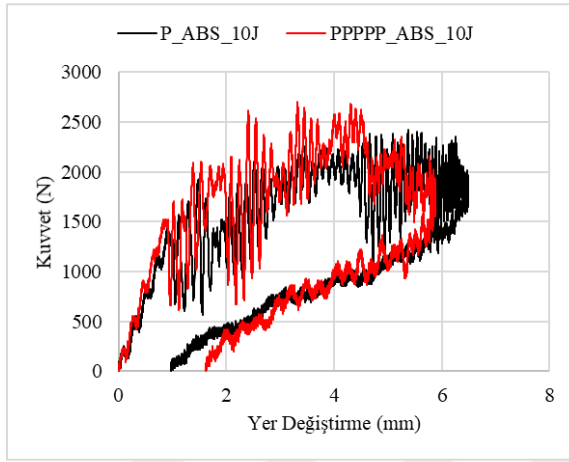
Sadece polimer levha içeren t÷m kombinasyonlardaki test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen enerji – zaman grafikleri Őekil 4.46’de bir arada gōsterilmiřtir. Őekildeki ABS polimer levha kullanılan testlerden elde edilen grafikler incelendiğinde (Őekil 4.46a, b, c), 5J darbe enerjisinde PPPPP kombinasyonunun P kombinasyonuna gōre absorbe ettiği enerji miktarının daha dūř÷k olduğu, 10J darbe enerjisinde eğrilerin neredeyse birbiriyle çakışık olmasıyla birlikte, P kombinasyonunun absorbe edilen enerji miktarının daha dūř÷k olduğu, 15J darbe enerjisinde ise P kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin bir kısmı geri iade edilirken, PPPPP kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin tamamının absorbe edildiği gōr÷lmektedir. Őekildeki PLA polimer levha kullanılan testlerden elde edilen grafikler incelendiğinde (Őekil 4.46d, e, f), 5J darbe enerjisinde eğrilerin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu, 10J darbe enerjisinde eğrilerin kısmen benzer davranışlar sergilemekle birlikte, P kombinasyonunun absorbe edilen enerji miktarının daha dūř÷k olduğu, 15J darbe enerjisinde ise P kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin bir kısmı geri iade edilirken, PPPPP kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin tamamının absorbe edildiği gōr÷lmektedir. ABS ve PLA polimer levha kullanılan PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerine gōre genel olarak verilen darbe enerjisini daha az geri iade ettiği, darbe enerjisinin çoğunluğunu absorbe ettiği belirlenmiştir. Bu Őekilde davranış sergileyen PPPPP kombinasyonunun, içerisinde kullanılan polimer malzemenin elastik Őekil değiştirme kabiliyetini azalttığı sōylenebilir. İlgili kombinasyonlara ait izelge 4.1’de verilen elastisite mod÷l÷ değerleri de bu sonuçlarla uyum sağlamaktadır.



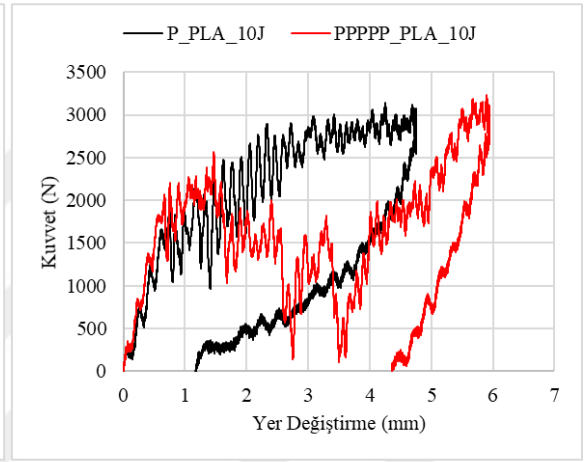
(a) ABS_5J



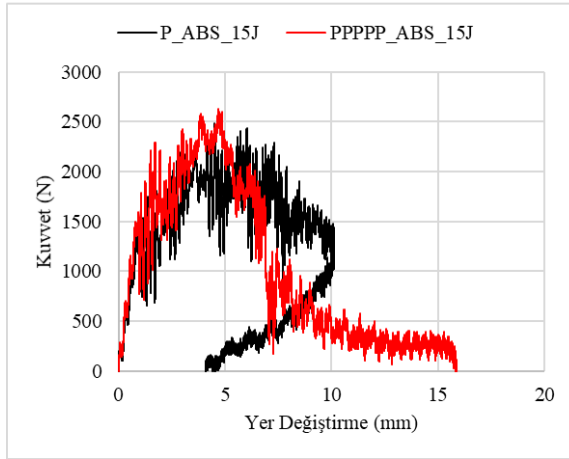
(d) PLA_5J



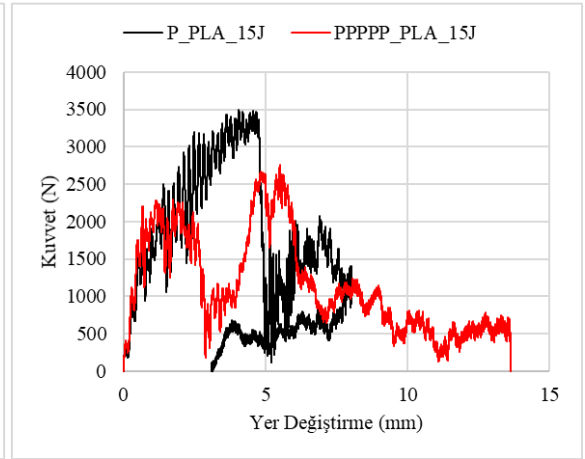
(b) ABS_10J



(e) PLA_10J

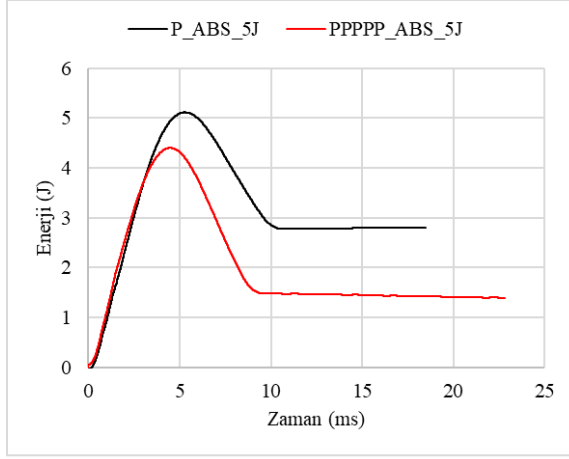


(c) ABS_15J

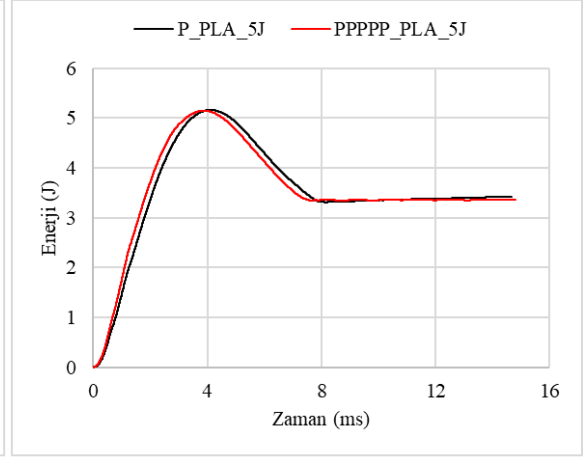


(f) PLA_15J

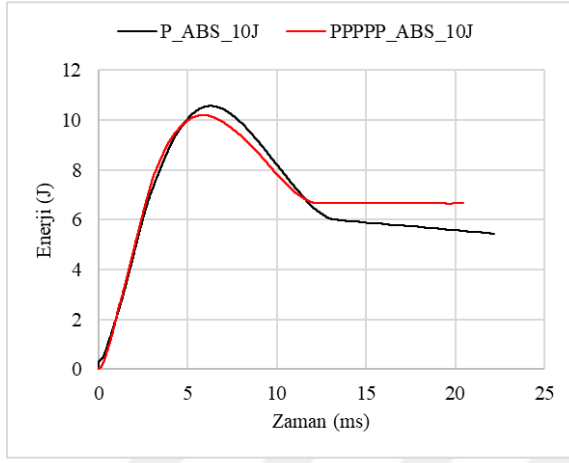
Şekil 4.45 : Polimer DHSD darbe test numuneleri kuvvet – yer değiştirme grafikleri.



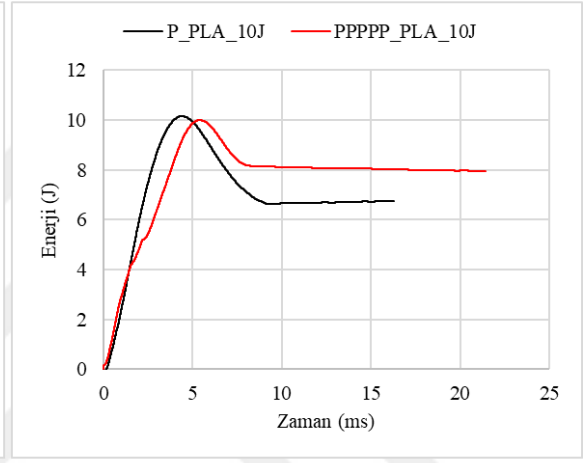
(a) ABS_5J



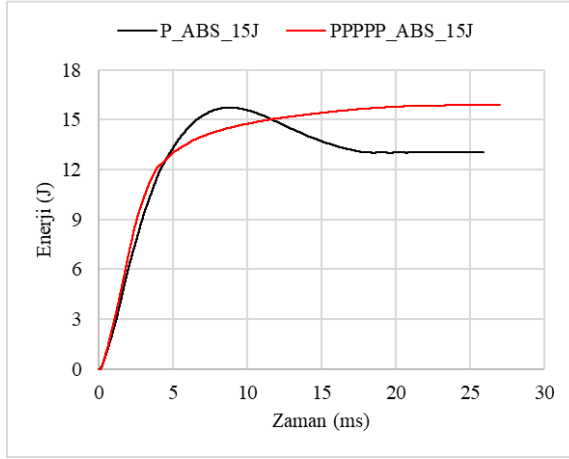
(d) PLA_5J



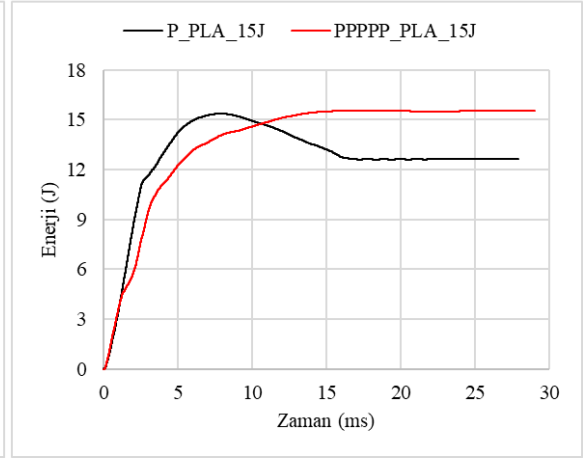
(b) ABS_10J



(e) PLA_10J

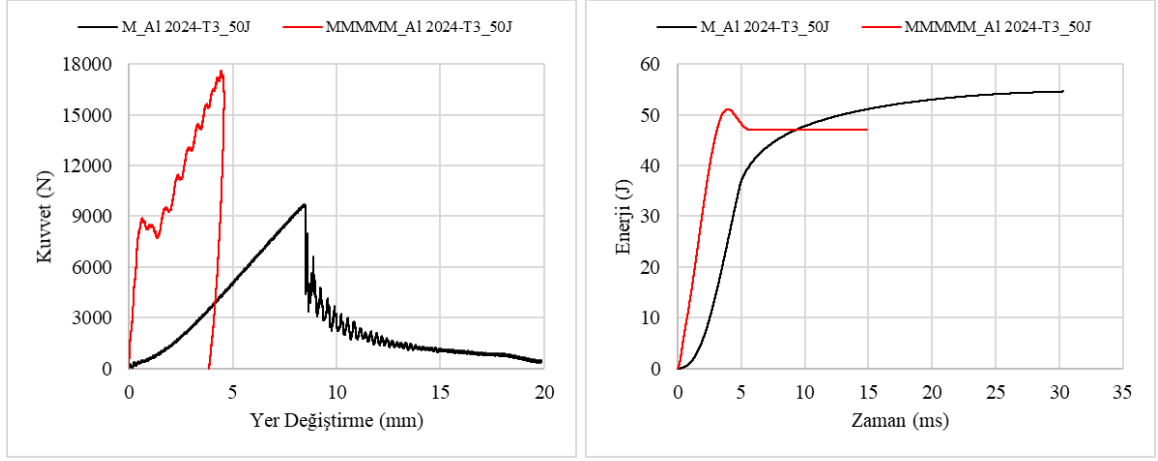


(c) ABS_15J



(f) PLA_15J

Şekil 4.46 : Polimer DHSD darbe test numuneleri enerji – zaman grafikleri.



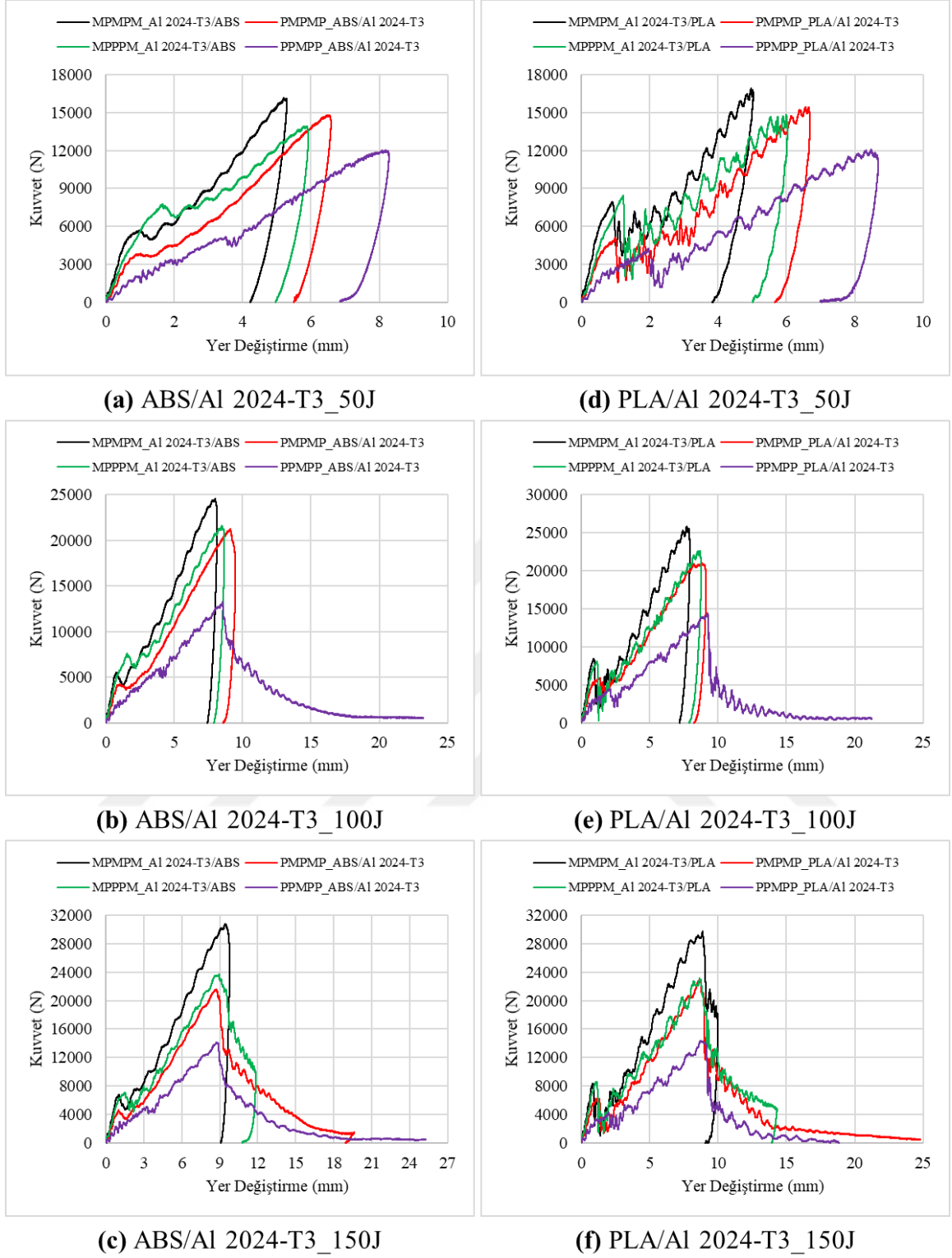
(a) Kuvvet - Yer Değişirme

(b) Enerji - Zaman

Şekil 4.47 : Metal DHSD darbe test numuneleri karşılaştırma grafikleri.

Sadece metal levha içeren kombinasyonlardaki 50J darbe enerjisine sahip test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen kuvvet – yer değişikliği ve enerji – zaman grafikleri Şekil 4.47’de bir arada gösterilmiştir. Şekil 4.47a incelendiğinde, 5 tabaka Al 2024-T3 metal levha kullanılan MMMMM kombinasyonunun maksimum temas kuvvetinin, 1 tabaka Al 2024-T3 metal levha kullanılan M kombinasyonunun maksimum temas kuvvetinden yaklaşık 1,81 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.47b incelendiğinde, MMMMM kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin bir kısmı geri iade edilirken, M kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin tamamının absorbe edildiği görülmektedir.

Polimer ve metal levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen kuvvet – yer değişikliği grafikleri Şekil 4.48’de bir arada gösterilmiştir. Şekil 4.48 incelendiğinde, her iki polimer levha kullanılan tüm enerji değerlerinde maksimum temas kuvveti en yüksek ve maksimum yer değişikliği miktarı en düşük olan kombinasyonun MPMPM kombinasyonu olduğu, maksimum temas kuvveti en düşük ve maksimum yer değişikliği miktarı en yüksek olan kombinasyonun PPMPP kombinasyonu olduğu, PMPMP ve MPPPM kombinasyonlarının da 50J ve 100J darbe enerjilerinde nispeten birbirine yakın davranışlar sergilediği, 150J darbe enerjisinde ise maksimum temas kuvvetlerinin birbirine yakın olmasıyla birlikte, MPPPM kombinasyonunun maksimum yer değişikliği miktarının daha düşük olduğu, PMPMP kombinasyonunda ise çatlak, delinme vb. hasarın oluşabileceği bir davranış sergilediği görülmektedir. Yerleşim şekillerinin farklı olmasına rağmen aynı sayıda polimer ve metal levha içeren PMPMP ve MPPPM kombinasyonları arasında MPPPM kombinasyonunun DHSD darbe testlerindeki tüm darbe enerjilerinde daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

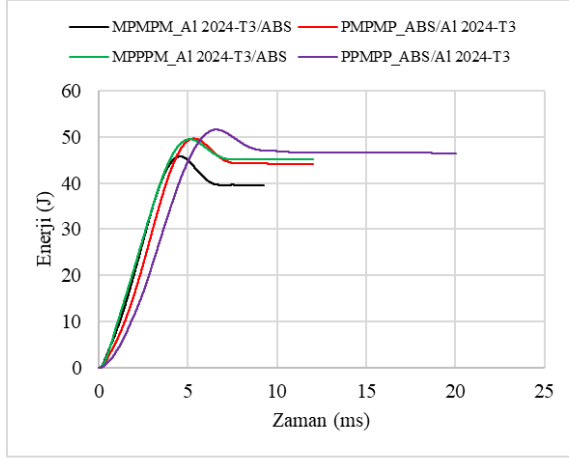


Şekil 4.48 : PML DHSD darbe test numuneleri kuvvet – yer değiştirme grafikleri.

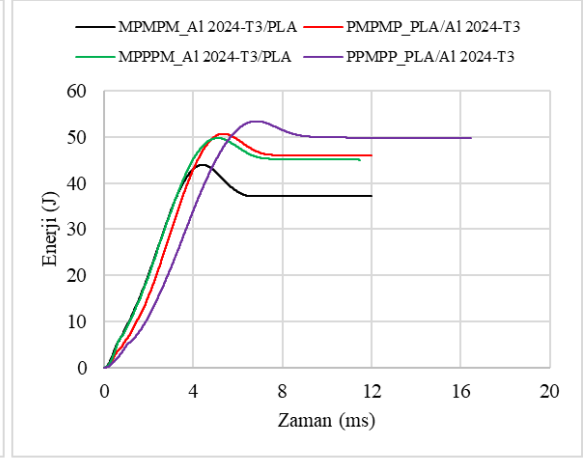
Polimer ve metal levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen enerji – zaman grafikleri Şekil 4.49’de bir arada gösterilmiştir. Şekil 4.49 incelendiğinde, her iki polimer levha kullanılan tüm enerji değerlerinde MPMPM, PMPMP ve MPPPM kombinasyonlarının nispeten benzer

davranışlar sergilediği görülmektedir. 50J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyon arasından MPMPM kombinasyonu en az absorbe edilen enerji değerine sahipken diğer 2 kombinasyon aynı absorbe edilen enerji değerlerine sahiptir. 100J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyonun enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu söylenebilir. 150J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyonun enerji – zaman eğrileri de nispeten farklı davranışlar sergilemekle birlikte, genel olarak hepsinin absorbe edilen enerji miktarlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.49 incelendiğinde, her iki polimer levha kullanılan PPMPP kombinasyonunda 50J darbe enerjisindeki eğrilerin diğer kombinasyonlardan daha fazla enerji absorbe ettikleri görülmektedir. PPMPP kombinasyonunda 100J darbe enerjisinde ABS polimer levha kullanılan kombinasyonun diğer kombinasyonlarla yakın absorbe edilen enerji değerine sahip olduğu, PLA polimer levha kullanılan kombinasyonun diğer kombinasyonlardan daha düşük absorbe edilen enerji değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Her iki polimer levha kullanılan PPMPP kombinasyonunda 150J darbe enerjisindeki eğrilerde ise grafiğin verilen enerji değerine kadar ulaşmadığı, diğer kombinasyonlardan çok daha düşük enerjinin absorbe edildiği malzemelerin delinmiş olabileceği bir davranış sergilediği görülmektedir.

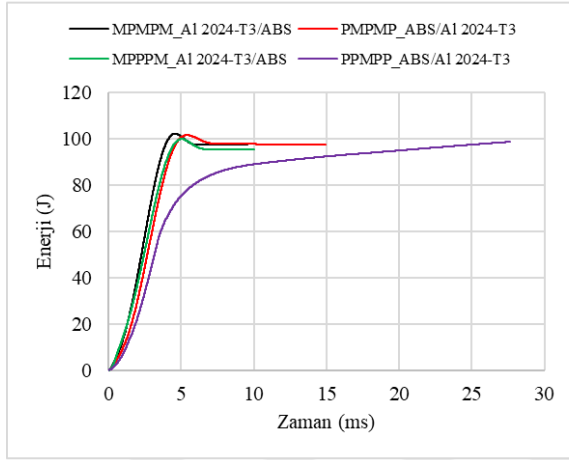
Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen maksimum temas kuvveti değerleri kullanılarak Şekil 4.50’da gösterilen grafik oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde en yüksek temas kuvvetinin P_PLA_15J kombinasyonunda, en düşük temas kuvvetinin de P_ABS_5J kombinasyonunda olduğu görülmektedir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek temas kuvveti değerlerinin, 5J ve 10J darbe enerjileri için PPLPP_PLA kombinasyonunda, 15J darbe enerjisi için de P_PLA kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir.



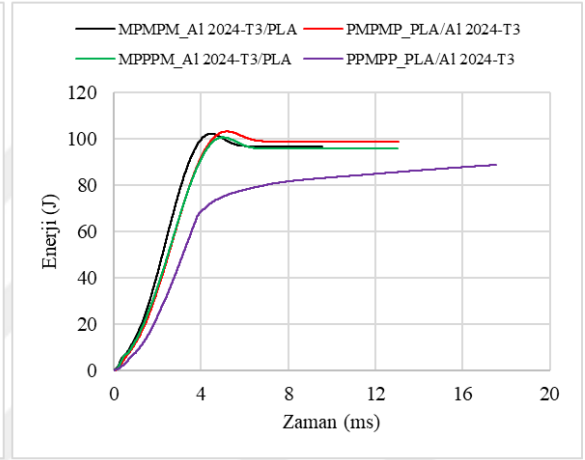
(a) ABS/AI 2024-T3_50J



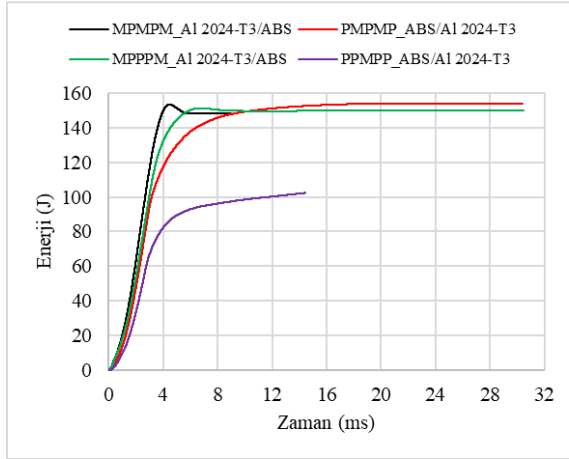
(d) PLA/AI 2024-T3_50J



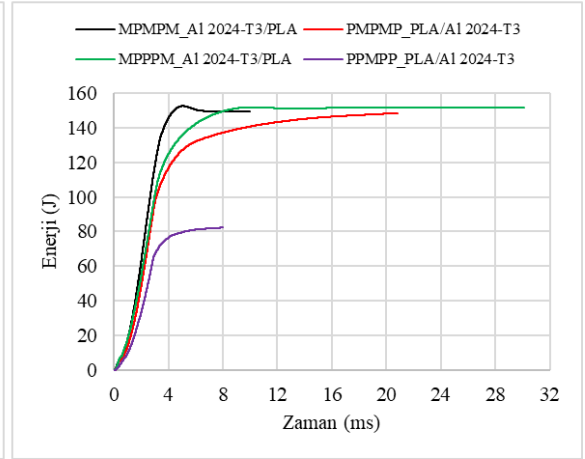
(b) ABS/AI 2024-T3_100J



(e) PLA/AI 2024-T3_100J

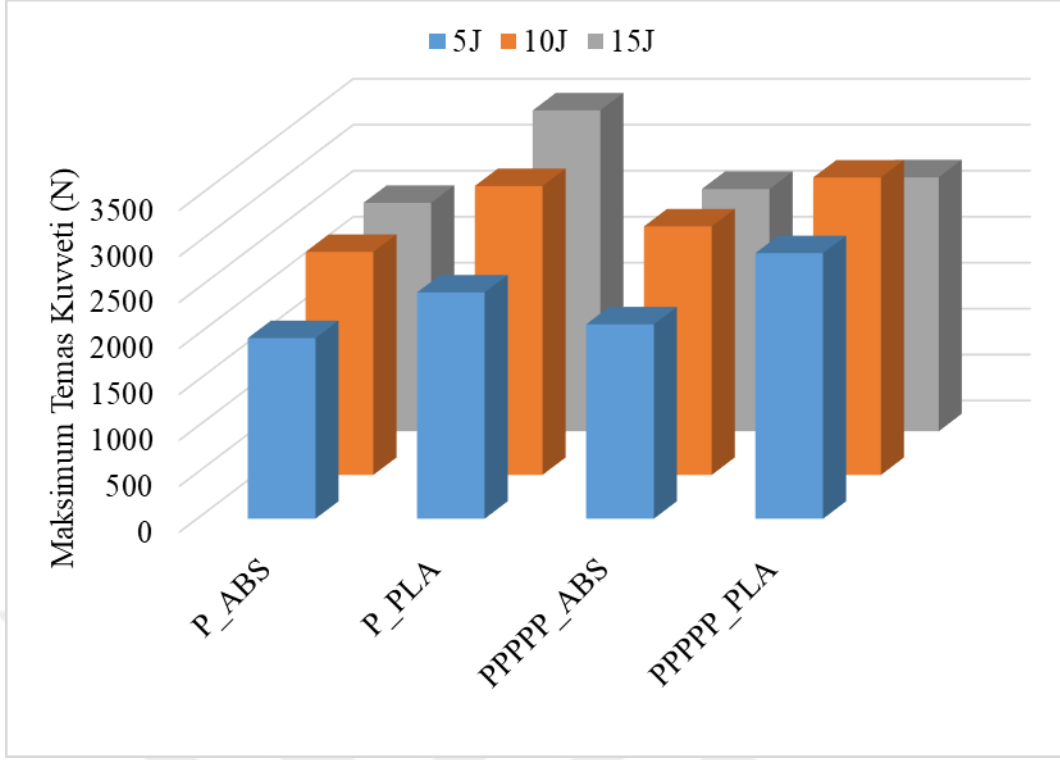


(c) ABS/AI 2024-T3_150J

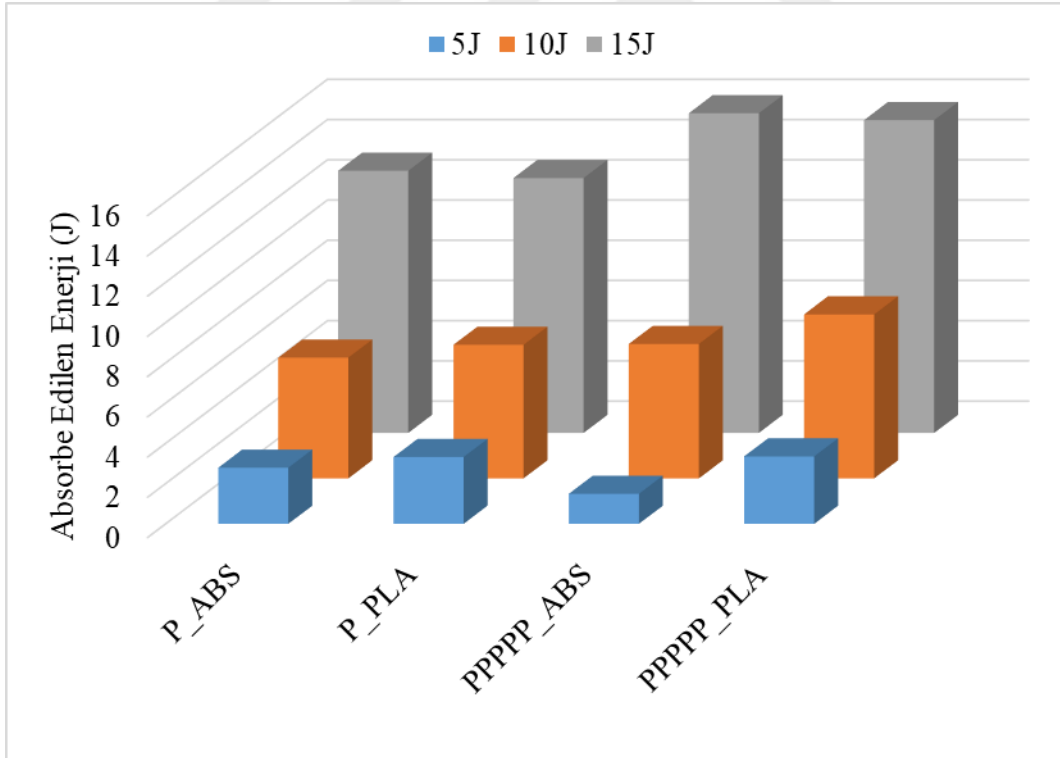


(f) PLA/AI 2024-T3_150J

Şekil 4.49 : PML DHSD darbe test numuneleri enerji – zaman grafikleri.



Şekil 4.50 : Polimer DHSD darbe test numuneleri maksimum temas kuvveti grafiği.

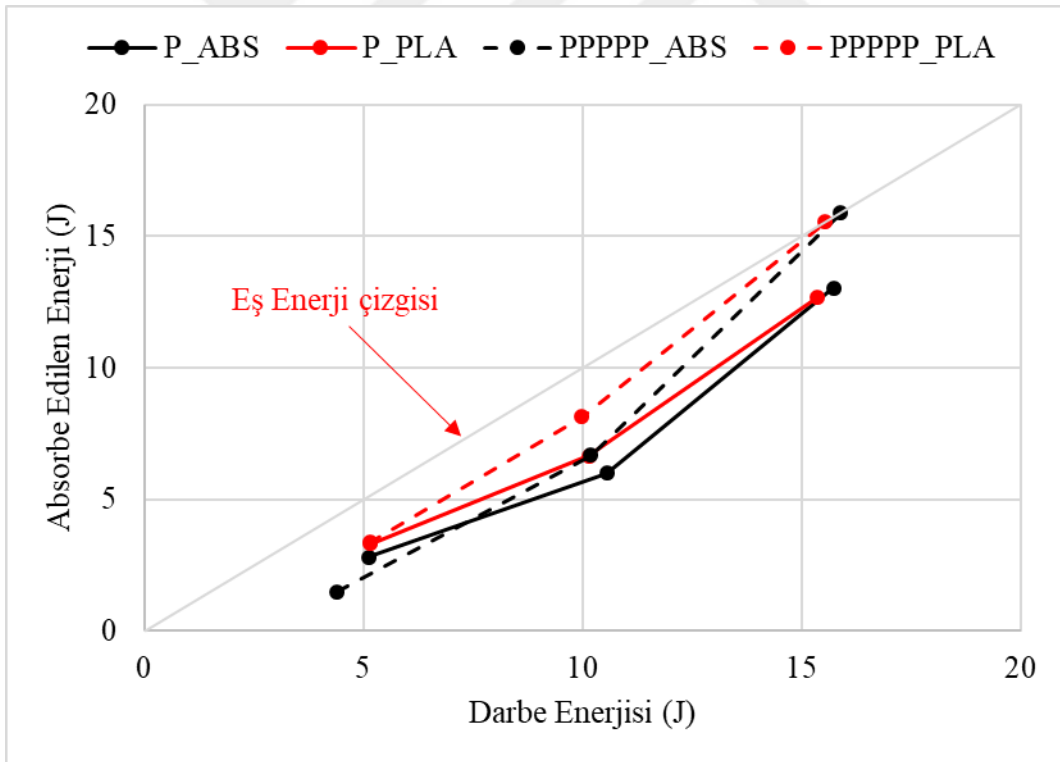


Şekil 4.51 : Polimer DHSD darbe test numuneleri absorbe edilen enerji grafiği.

Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen enerji değerleri kullanılarak Şekil 4.51'de gösterilen grafik oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde en yüksek ve en düşük absorbe

edilen enerji değerlerinin P_P_P_P_ABS kombinasyonunda olduğu görülmektedir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek absorbe edilen enerji değerlerinin, 5J ve 10J darbe enerjileri için P_P_P_P_PLA kombinasyonunda, 15J darbe enerjisi için de P_P_P_P_ABS kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir.

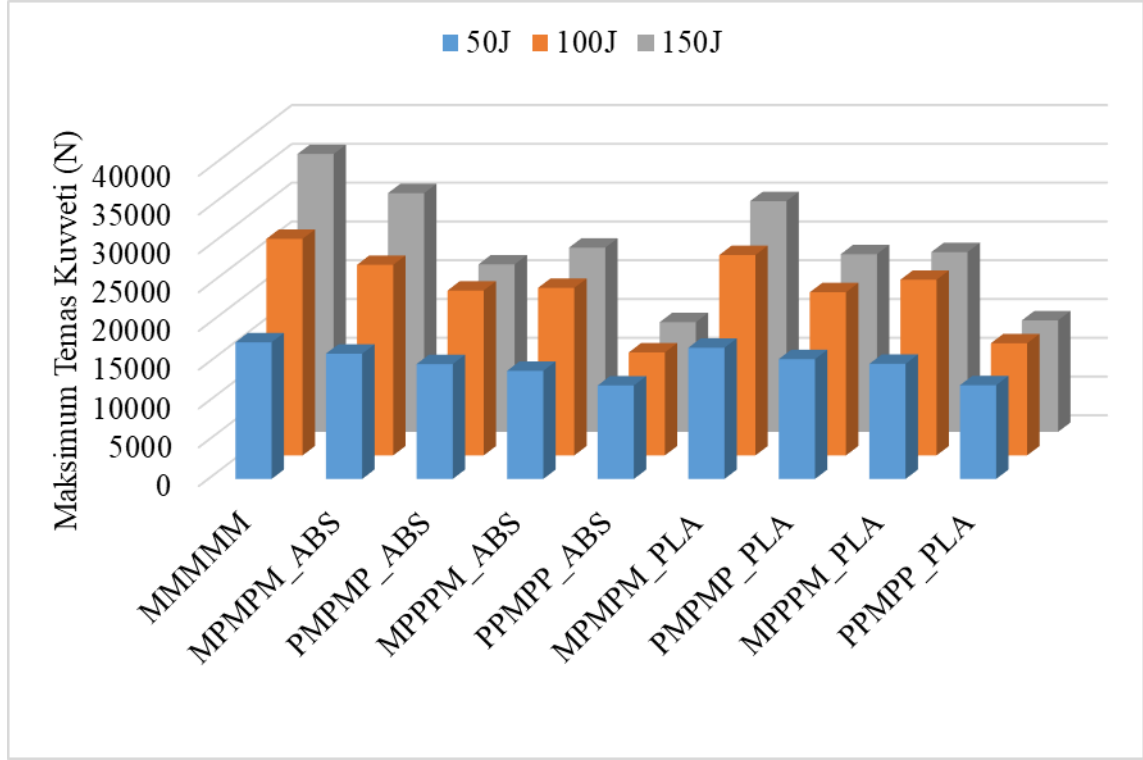
Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi değerleri kullanılarak Şekil 4.52’de gösterilen eş enerji grafiği oluşturulmuştur. Eş enerji grafiğinde absorbe edilen enerjinin darbe enerjisine oranının 1 olduğu ve grafik alanını ikiye bölen çizgiye Eş Enerji çizgisi denir [43,47,61]. Eş enerji grafiğinde verilen noktaların eş enerji çizgisiyle çakışması, darbe test numunesinin o enerji değerindeki testin sonucunda delinme hasarının oluşması ve verilen darbe enerjisinin tamamını absorbe ettiği anlamına gelmektedir. Şekil 4.52 incelendiğinde, P_P_P_P_ABS_15J ve P_P_P_P_PLA_15J kombinasyonlarının eş enerji çizgisiyle çakıştığı, dolayısıyla bu kombinasyonlardaki test numunelerinin delinme hasarına uğramış olabileceği söylenebilir.



Şekil 4.52 : Polimer DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği.

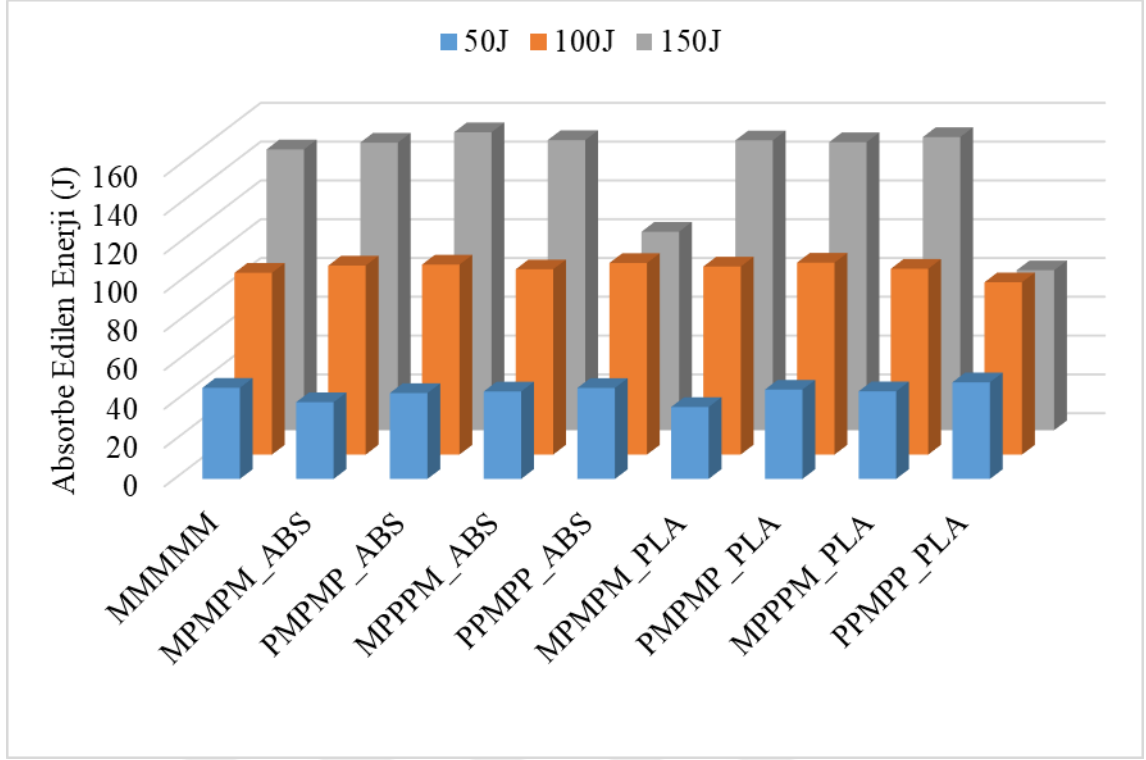
Polimer ve metal levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen maksimum temas kuvveti değerleri kullanılarak Şekil 4.53’de gösterilen grafik oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde en

yüksek temas kuvvetinin MPMPM_PLA_150J kombinasyonunda, en düşük temas kuvvetinin de PPMPP_ABS_50J kombinasyonunda olduğu görülmektedir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek temas kuvveti değerlerinin, 50J ve 100J darbe enerjileri için MPMPM_PLA kombinasyonunda, 150J darbe enerjisi için de MPMPM_ABS kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir. Grafikte verilen MMMMM kombinasyonu bu değerlendirmelere dahil edilmemiştir.

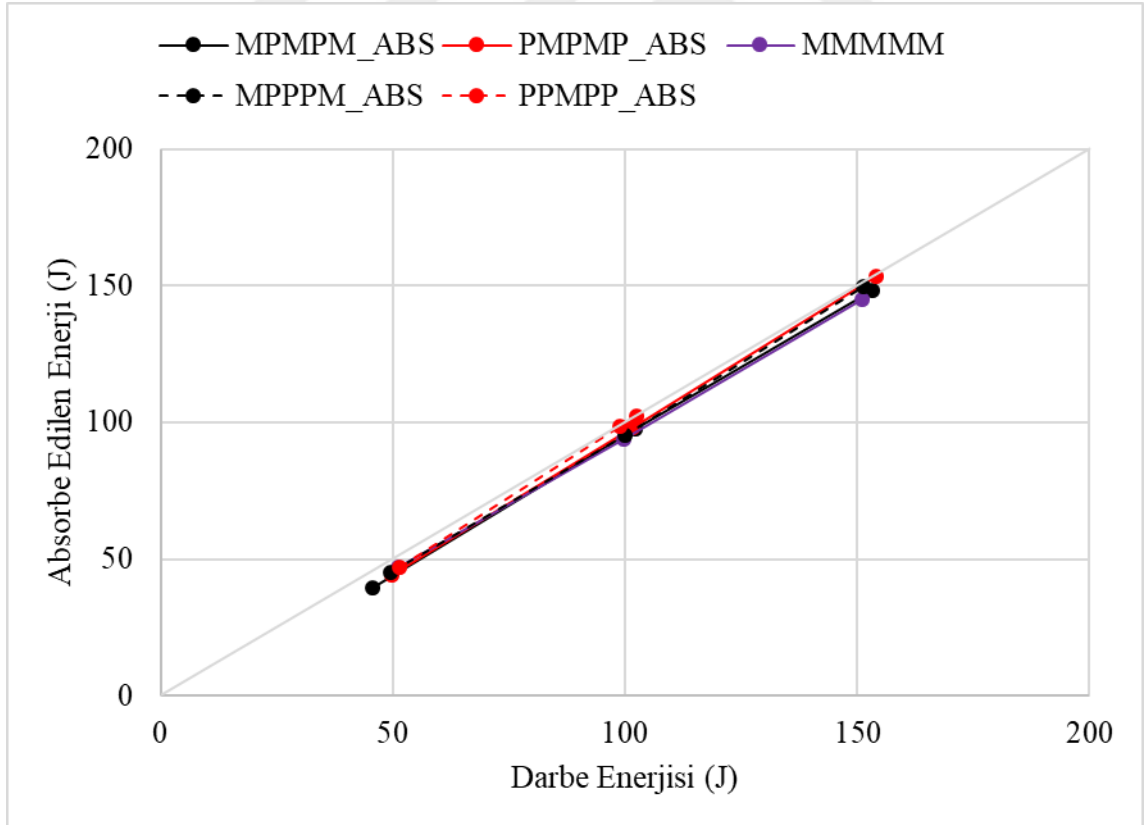


Şekil 4.53 : PML DHSD darbe test numuneleri maksimum temas kuvveti grafiği.

Polimer ve metal levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen enerji değerleri kullanılarak Şekil 4.54'de gösterilen grafik oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde en yüksek absorbe edilen enerji değerinin PMPMP_ABS_150J kombinasyonunda, en düşük absorbe edilen enerji değerinin de MPMPM_PLA_50J kombinasyonunda olduğu görülmektedir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek absorbe edilen enerji değerlerinin, 50J darbe enerjisi için PPMPP_PLA kombinasyonunda, 100J darbe enerjisi için PMPMP_PLA kombinasyonunda, 150J darbe enerjisi için de PMPMP_ABS kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.54 : PML DHSD darbe test numuneleri absorbe edilen enerji grafiği.

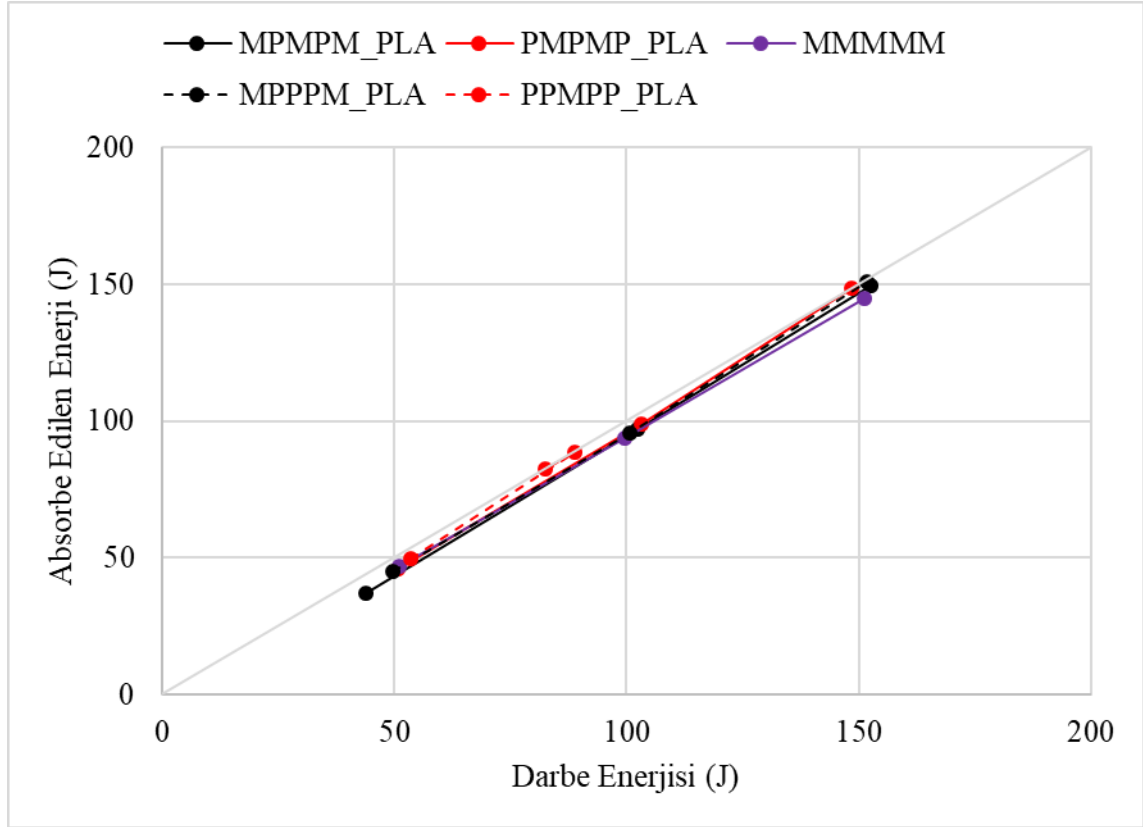


Şekil 4.55 : ABS polimer levha içeren PML DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği.

ABS polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi

değerleri kullanılarak Şekil 4.55’de gösterilen eş enerji grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.55 incelendiğinde, PMPMP_ABS_150J, PPMPP_ABS_100J ve PPMPP_ABS_150J kombinasyonlarının eş enerji çizgisiyle çakıştığı, dolayısıyla bu kombinasyonlardaki test numunelerinin delinme hasarına uğramış olabileceği söylenebilir.

PLA polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin DHSD darbe testlerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi değerleri kullanılarak Şekil 4.56’de gösterilen eş enerji grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.56 incelendiğinde, PMPMP_PLA_150J, PPMPP_PLA_100J ve PPMPP_PLA_150J kombinasyonlarının eş enerji çizgisiyle çakıştığı, dolayısıyla bu kombinasyonlardaki test numunelerinin delinme hasarına uğramış olabileceği söylenebilir.



Şekil 4.56 : PLA polimer levha içeren PML DHSD darbe test numuneleri eş enerji grafiği.

Yukarıdaki sütun grafiklerin oluşturulmasında kullanılan, farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin DHSD darbe testlerinden elde edilen veriler Çizelge 4.3’de vermiştir.

Çizelge 4.3 : Farklı kombinasyonlarda üretilen malzemelerin DHSD darbe testlerinden elde edilen veriler.

No	Kombinasyon	Numune No	Darbe Enerjisi (J)		Absore Edilen Enerji (J)	Maksimum Temas Kuvveti (N)	Yer Değiştirme (mm)	
			Verilen	Hesaplanan			Maksimum	Ölçülen
1	P ABS	33-4	5	5,12	2,79	1964,51	4,06	0,13
2		33-8	10	10,56	6,00	2426,74	6,49	0,19
3		33-9	15	15,74	13,03	2484,52	10,10	0,44
4	P PLA	34-1	5	5,16	3,32	2461,41	3,08	0,13
5		34-7	10	10,15	6,64	3143,21	4,76	0,21
6		34-12	15	15,36	12,67	3489,89	8,02	1,33
7	PPPPP ABS	35-1	5	4,40	1,49	2114,73	3,15	0,06
8		35-7	10	10,19	6,68	2704,08	5,88	0,41
9		35-11	15	15,89	15,89	2634,75	15,85	7,79
10	PPPPP PLA	36-2	5	5,15	3,35	2888,98	2,81	0,21
11		36-6	10	9,99	8,15	3235,66	5,94	3,92
12		36-12	15	15,55	15,55	2761,86	13,65	-
13	M AI 2024-T3	46-4	25	26,10	23,99	8031,36	7,36	6,32
14		46-7	50	54,61	54,61	9706,97	19,86	-
15		46-9	75	62,52	62,52	9903,42	45,35	-
16	MMMMM AI 2024-T3	37-3	50	51,13	46,98	17611,22	4,58	2,89
17		37-7	100	99,74	93,72	27907,54	6,49	4,75
18		37-9	150	151,09	144,79	35811,78	7,94	5,96
19	MPMPM AI 2024-T3/ABS	38-2	50	45,75	39,58	16143,62	5,29	4,20
20		38-5	100	102,29	97,45	24556,32	8,13	6,28
21		38-9	150	153,30	148,26	30761,85	9,77	7,88
22	MPMPM AI 2024-T3/PLA	39-2	50	43,96	37,11	16906,31	5,03	4,03
23		39-5	100	102,24	96,93	25827,47	7,94	6,22
24		39-11	150	152,48	149,43	29733,37	9,99	8,35
25	PMPMP ABS/AI 2024-T3	40-1	50	49,63	44,26	14803,13	6,59	5,21
26		40-5	100	101,68	97,92	21251,33	9,48	7,03
27		40-11	150	154,04	153,58	21586,45	19,64	20,17
28	PMPMP PLA/AI 2024-T3	41-4	50	50,66	46,04	15438,70	6,70	5,32
29		41-7	100	103,26	98,94	21031,77	9,13	7,01
30		41-10	150	148,46	148,46	22903,83	24,81	-
31	MPPPM AI 2024-T3/ABS	42-4	50	49,47	45,08	13936,44	5,93	4,43
32		42-8	100	100,00	95,51	21598,01	8,66	7,13
33		42-11	150	151,22	149,55	23747,41	11,84	10,02
34	MPPPM AI 2024-T3/PLA	43-2	50	49,74	45,21	14837,80	6,04	4,56
35		43-5	100	100,73	95,78	22638,04	8,77	7,22
36		43-9	150	151,84	151,12	23169,61	14,32	12,40
37	PPMPP ABS/AI 2024-T3	44-1	50	51,55	46,93	12041,26	8,28	5,72
38		44-5	100	98,77	98,77	13266,19	23,21	-
39		44-9	150	102,34	102,34	14132,89	25,28	-
40	PPMPP PLA/AI 2024-T3	45-4	50	53,39	49,83	12075,93	8,68	7,75
41		45-8	100	88,82	88,82	14456,45	21,27	-
42		45-9	150	82,45	82,45	14364,00	18,85	-

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, polimer ve metal levhalar farklı kombinasyonlarda yapıştırılarak tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir. Polimer levhalar EYM yöntemiyle üretim yapan 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak üretilmiş olup, metal levhalar 1mm kalınlıktaki Al 2024-T3 malzemedan kesilerek hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanmış olan levhalar farklı kombinasyonlarda üst üste 5 tabaka olacak şekilde yerleştirilmiş olup, tabakalar arasında Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı sürülerek PML tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin boyutları, kütleleri ve sertlikleri ölçülmüş olup, çekme, eğilme ve DHSD darbe test davranışları incelenmiştir.

Çekme testlerinden elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- 3B yazdırılmış test numunelerinin CNC freze ile yan kenarlarının kesilmesi sonucunda hem ABS hem de PLA malzemeler kullanılan test numunelerinin kopma uzamasının bir hayli arttığı, çekme dayanımının da az da olsa arttığı belirlenmiştir. 3B yazdırılan test numunelerinin yan yüzeylerinin CNC freze ile kesilmesi sonucunda çentik etkisi oluşturan girintiler ortadan kaldırılmış olup, test numunelerinin gerçek kopma uzaması değerlerine kadar uzadıktan sonra koptuğu ve kopmaların çoğunun da CNC freze ile kesilmemiş numunelere göre daha düzenli ve orta bölgeden ekstansometre arasından gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- 3B yazdırılmış polimer levhalar kullanılarak P+P+P+P+P kombinasyonunda tabakalı kompozit malzeme oluşturulmasının, ABS ve PLA test numunelerinin her ikisinde de çekme dayanımını artırdığı, ABS test numunelerinde sünekliğin de arttığı, PLA test numunelerinde sünekliğin azaldığı belirlenmiştir.
- P, P+CNC, P+P+P+P+P kombinasyonlarında ABS ve PLA test numunelerinin her ikisinde de elastisite modülünün belirtilen sırayla giderek arttığı tespit edilmiştir.
- Al 2024-T3 metal levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan M+M+M+M+M kombinasyonundaki tabakalı kompozit test numunesinin, M kombinasyonundaki Al 2024-T3 Paralel test numunesine göre çekme dayanımında ve kopma uzamasında bir miktar azalmanın olduğu belirlenmiştir.
- Polimer ve metal levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak farklı kombinasyonlarda üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulan PML tabakalı kompozit test numunelerinin, beklendiği üzere kombinasyon içerisindeki Al 2024-T3 metal tabaka sayısı azaldıkça üretilen tabakalı kompozit test numunesinin çekme dayanımının da

azaldığı tespit edilmiştir. Tüm kombinasyonlar arasından PPMPP_PLA/AI 2024-T3 kombinasyonundaki test numunesinin en yüksek kopma uzamasına sahip kombinasyon olduğu belirlenmiştir. Tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin elastisite modüllerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

- PPMPP kombinasyonundaki test numunelerinin sertlik değerlerinin P ve P+CNC kombinasyonlarına göre her iki polimer malzemede de daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun aksine MMMMM kombinasyonundaki sertlik değerinin M kombinasyonuna göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca PML kompozit malzeme kombinasyonlarında ise üst yüzeylerinde polimer malzeme olan kombinasyonların sertlik değerlerinin, üst yüzeylerinde metal malzeme olan kombinasyonların sertlik değerlerinden daha yüksek oldukları belirlenmiştir.
- Çalışmada kullanılan kombinasyonlardaki malzemelerin yoğunluklarının artmasıyla, genel olarak malzemelerin elastisite modülü, çekme mukavemeti, özgül modül ve özgül mukavemet değerlerinin de benzer şekilde artış gösterdiği tespit edilmiştir.
- Polimer malzemeler arasından en yüksek mukavemet değerlerine sahip olan kombinasyonun PPMPP_PLA kombinasyonu olduğu, en düşük mukavemet değerlerine sahip olan kombinasyonun da P_ABS kombinasyonu olduğu belirlenmiştir. PML kompozit malzeme kombinasyonlarında ise en yüksek mukavemet değerlerinin MPMPM_AI 2024-T3/ABS kombinasyonunda olduğu, en düşük mukavemet değerlerinin de PPMPP_ABS/AI 2024-T3 kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir.

Eğilme testlerinden elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- 3B yazdırılmış test numunelerinin CNC freze ile yan kenarlarının kesilmesi sonucunda ABS polimer levha kullanılan test numunesinde eğilme dayanımı ve hasar durumundaki sehim değerinde bir miktar artış olduğu, PLA polimer levha kullanılan test numunesinde ise eğilme dayanımı ve hasar durumundaki sehim değerinde bir miktar azalmanın olduğu belirlenmiştir.
- PPMPP kombinasyonundaki ABS malzeme kullanılan test numunesinin, P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre eğilme dayanımında ve hasar durumundaki sehim değerinde bir miktar artışın olduğu belirlenmiştir. PPMPP kombinasyonundaki PLA malzeme kullanılan test numunesinde ise P+CNC kombinasyonundaki test numunesine göre eğilme dayanımında artışın olduğu, hasar durumundaki sehim değerinde de azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, 3B yazdırılmış PLA

levhaların aralarına epoksi yapıştırıcı uygulanarak üst üste yapıştırılmasının, test numunesinin eğilme dayanımı üzerinde ciddi oranda artışa neden olduğu belirlenmiştir.

- PML tabakalı kompozit malzemelere ait tüm kombinasyonlardaki test numunelerinde, beklendiği üzere kombinasyon içerisindeki Al 2024-T3 metal tabaka sayısı azaldıkça üretilen tabakalı kompozit test numunesinin eğilme dayanımının da azaldığı tespit edilmiştir.
- MMMMM kombinasyonundaki tabakalı kompozit malzeme içerisindeki tabakalardan bir kısmının polimer tabaka ile değiştirilmesiyle üretilen PML tabakalı kompozit malzemelerin hasar durumundaki sehim değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. PML tabakalı kompozit malzeme kombinasyonları arasından hasar durumundaki sehim değeri en yüksek olanların, ABS polimer levha kullanılan test numunelerinde PPMPP_ABS/Al 2024-T3 kombinasyonu, PLA polimer levha kullanılan test numunelerinde ise MPMPM_Al 2024-T3/PLA kombinasyonu olduğu tespit edilmiştir.
- PMPMP ve MPPPM kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerde her ne kadar kombinasyon farklı olsa da her 2 kombinasyonda da 2 tabaka metal ve 3 tabaka polimer levha bulunmakta olup, bu kombinasyonlardaki test numunelerinde her iki polimer malzemenin kullanım durumunda da MPPPM kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarının, PMPMP kombinasyonundaki PML tabakalı kompozit malzemelerin eğilme dayanımlarından yaklaşık 1,78 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek eğilme dayanımı – yoğunluk oranına sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPMPM_PLA > MPPPM_PLA > MPPPM_ABS > MMMMM > MPMPM_ABS kombinasyonları olduğu, en yüksek eğilme dayanımı – çekme mukavemeti oranına sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPPPM_PLA > MPPPM_ABS > MPMPM_PLA > MPMPM_ABS > P_PLA kombinasyonları olduğu, en yüksek eğilme dayanımı – özgül mukavemet oranına sahip 5 kombinasyonun büyükten küçüğe doğru sırasıyla MPPPM_PLA > MPMPM_PLA > MMMMM > MPPPM_ABS > MPMPM_ABS kombinasyonları olduğu tespit edilmiştir.

DHSD darbe testlerinden elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- ABS polimer levha kullanılan test numunelerinde, 5J ve 10J darbe enerjilerinde PPMPP kombinasyonunun temas kuvveti üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı, P kombinasyonuna göre maksimum yer değiştirme miktarının daha düşük olduğu, 15J darbe enerjisinde ise PPMPP kombinasyonundaki test numunesi P kombinasyonundaki

test numunesinin maksimum yer deęiřtirme deęerine ulařmadan temas kuvvetinde ani dūřuřlerin olduęu belirlenmiřtir. ABS polimer levha kullanılan test numunelerinde, 5J darbe enerjisinde PPPPP kombinasyonunun P kombinasyonuna gōre absorbe ettięi enerji miktarının daha dūřuk olduęu, 10J darbe enerjisinde eęrilerin neredeyse birbiriyle çakıřık olmasıyla birlikte, P kombinasyonunun absorbe edilen enerji miktarının daha dūřuk olduęu, 15J darbe enerjisinde ise P kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin bir kısmı geri iade edilirken, PPPPP kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin tamamının absorbe edildięi tespit edilmiřtir.

- PLA polimer levha kullanılan test numunelerinde, 5J darbe enerjisinde PPPPP kombinasyonunun temas kuvveti ve yer değiştirme üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı, 10J ve 15J darbe enerjilerinde PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerinin ulaştığı maksimum temas kuvveti ve maksimum yer değiştirme değerlerine ulaşmadan temas kuvvetinde ani dūřuřlerin olduğu belirlenmiştir. PLA polimer levha kullanılan test numunelerinde, 5J darbe enerjisinde eğrilerin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu, 10J darbe enerjisinde eğrilerin kısmen benzer davranışlar sergilemekle birlikte, P kombinasyonunun absorbe edilen enerji miktarının daha dūřuk olduğu, 15J darbe enerjisinde ise P kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin bir kısmı geri iade edilirken, PPPPP kombinasyonunda verilen darbe enerjisinin tamamının absorbe edildiği tespit edilmiştir.
- ABS ve PLA polimer levha kullanılan PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerine gōre daha sert ve gevrek bir davranış sergilediği belirlenmiştir. ABS ve PLA polimer levha kullanılan PPPPP kombinasyonundaki test numunelerinin, P kombinasyonundaki test numunelerine gōre genel olarak verilen darbe enerjisini daha az geri iade ettiği, darbe enerjisinin çoğunluğunu absorbe ettiği tespit edilmiştir.
- Tūm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin her iki polimer levha kullanılan tūm enerji deęerlerinde maksimum temas kuvveti en yūsek ve maksimum yer deęiřtirme miktarı en dūřuk olan kombinasyonun MPMPM kombinasyonu olduęu, maksimum temas kuvveti en dūřuk ve maksimum yer deęiřtirme miktarı en yūsek olan kombinasyonun PPMPP kombinasyonu olduęu, PMPMP ve MPPPM kombinasyonlarının da 50J ve 100J darbe enerjilerinde nispeten birbirine yakın davranıřlar sergiledięi, 150J darbe enerjisinde ise maksimum temas kuvvetlerinin birbirine yakın olmasıyla birlikte, MPPPM kombinasyonunun maksimum yer deęiřtirme miktarının daha dūřuk olduęu belirlenmiřtir. Yerleřim Őekillerinin farklı olmasına

rağmen aynı sayıda polimer ve metal levha içeren PMPMP ve MPPPM kombinasyonları arasından MPPPM kombinasyonunun DHSD darbe testlerindeki tüm darbe enerjilerinde daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

- Tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinin her iki polimer levha kullanılan tüm enerji değerlerinde MPMPM, PMPMP ve MPPPM kombinasyonlarından, 50J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyon arasından MPMPM kombinasyonu en az absorbe edilen enerji değerine sahipken, diğer 2 kombinasyon aynı absorbe edilen enerji değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. 100J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyonun enerji – zaman eğrilerinin neredeyse birbiriyle çakışık olduğu belirlenmiştir. 150J darbe enerjisinde belirtilen 3 kombinasyonun enerji – zaman eğrileri de nispeten farklı davranışlar sergilemekle birlikte, genel olarak hepsinin absorbe edilen enerji miktarlarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.
- Her iki polimer levha kullanılan PPMPP kombinasyonunda 50J darbe enerjisindeki test numunelerinin diğer PML tabakalı kompozit malzeme kombinasyonlarından daha fazla enerji absorbe ettikleri belirlenmiştir. PPMPP kombinasyonunda 100J darbe enerjisinde ABS polimer levha kullanılan kombinasyonun diğer PML tabakalı kompozit malzeme kombinasyonlarıyla yakın absorbe edilen enerji değerine sahip olduğu, PLA polimer levha kullanılan kombinasyonun diğer PML tabakalı kompozit malzeme kombinasyonlarından daha düşük absorbe edilen enerji değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Her iki polimer levha kullanılan PPMPP kombinasyonunda 150J darbe enerjisinde enerji zaman grafiğinin verilen enerji değerine kadar ulaşmadığı, diğer PML tabakalı kompozit malzeme kombinasyonlarından çok daha düşük enerjinin absorbe edildiği belirlenmiştir.
- Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinde en yüksek temas kuvvetinin P_PLA_15J kombinasyonunda, en düşük temas kuvvetinin de P_ABS_5J kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek temas kuvveti değerlerinin, 5J ve 10J darbe enerjileri için PPLPP_PLA kombinasyonunda, 15J darbe enerjisi için de P_PLA kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir.
- Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinde en yüksek ve en düşük absorbe edilen enerji değerlerinin PPLPP_ABS kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek absorbe edilen enerji

değerlerinin, 5J ve 10J darbe enerjileri için PPMPP_PLA kombinasyonunda, 15J darbe enerjisi için de PPMPP_ABS kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir.

- Sadece polimer levha içeren tüm kombinasyonlardaki test numunelerinde PPMPP_ABS_15J ve PPMPP_PLA_15J kombinasyonlarının eş enerji çizgisiyle çakıştığı, bu numunelerde delinme hasarının olduğu belirlenmiştir.
- Tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinde en yüksek temas kuvvetinin MPMPP_PLA_150J kombinasyonunda, en düşük temas kuvvetinin de PPMPP_ABS_50J kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek temas kuvveti değerlerinin, 50J ve 100J darbe enerjileri için MPMPP_PLA kombinasyonunda, 150J darbe enerjisi için de MPMPP_ABS kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinde en yüksek absorbe edilen enerji değerinin PMPMP_ABS_150J kombinasyonunda, en düşük absorbe edilen enerji değerinin de MPMPP_PLA_50J kombinasyonunda olduğu belirlenmiştir. Aynı darbe enerjileri içerisinde en yüksek absorbe edilen enerji değerlerinin, 50J darbe enerjisi için PPMPP_PLA kombinasyonunda, 100J darbe enerjisi için PMPMP_PLA kombinasyonunda, 150J darbe enerjisi için de PMPMP_ABS kombinasyonunda olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm kombinasyonlardaki PML tabakalı kompozit test numunelerinde PMPMP_ABS_150J, PMPMP_PLA_150J, PPMPP_ABS_100J, PPMPP_PLA_100J, PPMPP_ABS_150J ve PPMPP_PLA_150J kombinasyonlarının eş enerji çizgisiyle çakıştığı, bu numunelerde delinme hasarının olduğu belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gurralla, P. K., & Regalla, S. P.** (2014). Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 141–149. <https://doi.org/10.1080/17452759.2014.913400>
- [2] **Yaman, U., Butt, N., Sacks, E., & Hoffmann, C.** (2016). Slice coherence in a query-based architecture for 3D heterogeneous printing. *Computer Aided Design*, 75–76, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.02.005>
- [3] **Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S.** (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. *Polymer Testing*, 60, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.03.016>
- [4] **Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J.** (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- [5] **Adamo, F., Farina, M., Thekkedath, U. R., Grattoni, A., & Sesana, R.** (2018). Mechanical characterization and numerical simulation of a subcutaneous implantable 3D printed cell encapsulation system. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 82, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.03.023>
- [6] **Solmaz, M. Y., & Çelik, E.** (2018). Investigation of Compression Test Performances of Honeycomb Sandwich Composites Produced by 3D Printing Method. *Science and Engineering Journal of Firat University*, 30(1), 277–286.
- [7] **Uzun, M., Gür, Y., & Usca, Ü. A.** (2018). Manufacturing of new type curvilinear tooth profiled involute gears using 3D printing. *Journal of Balıkesir University Institute of Science and Technology*, 20(1), 278–286. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.398462>
- [8] **Akhoundi, B., & Behraves, A. H.** (2019). Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products. *Experimental Mechanics*, 59, 883–897. <https://doi.org/10.1007/s11340-018-00467-y>
- [9] **Aloyaydi, B., Sivasankaran, S., & Mustafa, A.** (2020). Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polymer Testing*, 87, 106557. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106557>
- [10] **Aziz, R., Ul Haq, M. I., & Raina, A.** (2020). Effect of surface texturing on friction behaviour of 3D printed polylactic acid (PLA). *Polymer Testing*, 85, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106434>
- [11] **Uzun, M., & Erdoğan, Y. E.** (2020). Investigation of the Effect of Using Unreinforced and Reinforced PLA in Production by Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties. *Iğdir University Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2800–2808. <https://doi.org/10.21597/jist.799230>
- [12] **Isaac, J. P., Dondeti, S., & Tippur, H. V.** (2021). Fracture behavior of additively printed ABS: Effects of print architecture and loading rate. *International*

- [13] **Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., & Kaya, A.** (2021). 3 Boyutlu Yazıcı İle Farklı Renklerde Ve Farklı Dolgu Desenlerinde Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 26(3), 829–848. <https://doi.org/10.17482/uumfd.887786>
- [14] **Kamer, M. S., & Temiz, Ş.** (2021). 3 Boyutlu Yazıcıda ABS Ve PLA Filamentler İle Farklı Tabla Ve Nozul Sıcaklıkları Kullanılarak Üretilen Çekme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 24(4), 341–358. <https://doi.org/10.17780/ksujes.997195>
- [15] **Kamer, M. S., Doğan, O., Temiz, Ş., & Yaykaşlı, H.** (2021). 3 Boyutlu Yazıcı ile Farklı Yazdırma Parametreleri Kullanılarak Üretilen Eğme Test Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 835–846. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1005909>
- [16] **Tezel, T., Ozenc, M., & Kovan, V.** (2021). Impact properties of 3D-printed engineering polymers. *Materials Today Communications*, 26, 102161. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102161>
- [17] **Doğan, O., & Kamer, M. S.** (2022). A Novel Production Method of Polymer Bolts and the Effects of the Printing Orientation on Tensile and Shear Strength of the 3D Printed Bolts. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(2), 519–529. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1146505>
- [18] **Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., & Akay, O. E.** (2022). Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(3), 1197–1211. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.961981>
- [19] **Kamer, M. S., Temiz, S., Yaykasli, H., Kaya, A., & Akay, O. E.** (2022). Effect Of Printing Speed On FDM 3D-Printed PLA Samples Produced Using Different Two Printers. *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, 6(3), 438–448. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1088805>
- [20] **Christke, S., Gibson, A. G., Grigoriou, K., & Mouritz, A. P.** (2016). Multi-layer polymer metal laminates for the fire protection of lightweight structures. *Materials and Design*, 97, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.105>
- [21] **Mohagheghian, I., McShane, G. J., & Stronge, W. J.** (2016). Impact perforation of polymer-metal laminates: Projectile nose shape sensitivity. *International Journal of Solids and Structures*, 88–89, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.01.010>
- [22] **Davarpanah, M. A., & Malhotra, R.** (2018). Formability and failure modes in Single Point Incremental Forming of Metal-Polymer Laminates. *Procedia Manufacturing*, 26, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.042>

- [23] **Noori, H., Jain, M., Nielsen, K., & Brandys, F.** (2018). Delamination in deformed polymer laminated sheet metals. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85(June), 219–224. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.06.014>
- [24] **Liu, Z., & Chen, H.** (2020). Deformation mechanism and failure-tolerant characteristics of polymer-coated sheet metal laminates subjected to different loading conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3907–3923. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.017>
- [25] **Naik, R. K., Panda, S. K., & Racherla, V.** (2020). A new method for joining metal and polymer sheets in sandwich panels for highly improved interface strength. *Composite Structures*, 251, 112661. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112661>
- [26] **Park, H., Kim, S. J., Lee, J., Kim, J. H., & Kim, D.** (2020). Delamination behavior analysis of steel/polymer/steel high-strength laminated sheets in a V-die bending test. *International Journal of Mechanical Sciences*, 173, 105430. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105430>
- [27] **Campos, A. A. M. A., De Jesus, A. M. P., Correia, J. A. F. O., & Morais, J. J. L.** (2016). Fatigue crack growth behavior of bonded aluminum joints. *Procedia Engineering*, 160, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.890>
- [28] **Na, J., Mu, W., Qin, G., Tan, W., & Pu, L.** (2018). Effect of temperature on the mechanical properties of adhesively bonded basalt FRP-aluminum alloy joints in the automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 85, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.027>
- [29] **Jairaja, R., & Naik, G. N.** (2019). Single and dual adhesive bond strength analysis of single lap joint between dissimilar adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 92, 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.016>
- [30] **Wang, H. T., Wu, G., Pang, Y. Y., Shi, J. W., & Zakari, H. M.** (2019). Experimental study on the bond behavior between CFRP plates and steel substrates under fatigue loading. *Composites Part B: Engineering*, 176, 107266. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107266>
- [31] **Zamani, P., Jaamialahmadi, A., da Silva, L. F. M., & Farhangdoost, K.** (2019). An investigation on fatigue life evaluation and crack initiation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending. *Composite Structures*, 229, 111433. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111433>
- [32] **Ramalho, L. D. C., Sánchez-Arce, I. J., Campilho, R. D. S. G., & Belinha, J.** (2021). Strength prediction of composite single lap joints using the radial point interpolation method. *Composite Structures*, 259, 113228. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113228>
- [33] **Wang, H., Sun, J., Li, J., Lu, L., & Li, N.** (2016). Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 1517–1525. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7479-2>
- [34] **Halim, N. F. H. A., Ascroft, H., & Barnes, S.** (2017). Analysis of Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness and Machining Temperature During Finishing

Operation of Ultrasonic Assisted Milling (UAM) of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP). *Procedia Engineering*, 184, 185–191. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.04.084>

- [35] **Zhu, Z., Buck, D., Guo, X., Cao, P., & Wang, J.** (2020). Cutting performance in the helical milling of stone-plastic composite with diamond tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 31, 119–129. <https://doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2020.10.005>
- [36] **Kim, G., Song, K., Jun, M. B.-G., Jeong, Y. H., Kim, T.-G., & Min, B.-K.** (2022). Effect of fiber bending induced matrix shear behavior on machined surface quality in carbon fiber reinforced plastic milling. *Composite Structures*, 287, 115343. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115343>
- [37] **Usca, Ü. A., Uzun, M., Şap, S., Kuntoğlu, M., Giasin, K., Pimenov, D. Y., & Wojciechowski, S.** (2022). Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu–B–CrC based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1243–1259. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.12.063>
- [38] **Wu, Z., Zhang, F., Hu, Y., Zhu, Z., & Guo, X.** (2022). Study on helical milling performance of wood-plastic composites. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 37, 143–154. <https://doi.org/10.1016/J.CIRPJ.2022.01.003>
- [39] **Pierson, M. O., & Vaziri, R.** (1996). Analytical solution for low-velocity impact response of composite plates. *AIAA Journal*, 34(8), 1633–1640. <https://doi.org/10.2514/3.13282>
- [40] **Mathivanan, N. R., & Jerald, J.** (2010). Experimental Investigation of Woven E-Glass Epoxy Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impact at Different Energy Levels. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 09(07), 643–652. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2010.97046>
- [41] **Yazdani Sarvestani, H., Akbarzadeh, A. H., Mirbolghasemi, A., & Hermenean, K.** (2018). 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials and Design*, 160, 179–193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.061>
- [42] **Topkaya, T., & Solmaz, M. Y.** (2018). Investigation of low velocity impact behaviors of honeycomb sandwich composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(7), 3161–3167. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0619-5>
- [43] **Önal, T., & Temiz, Ş.** (2021). Balsa Çekirdekli Sandviç Kompozitlerin Darbe Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 333–345. <https://doi.org/10.31202/ecjse.797049>
- [44] **Albayrak, M., Gür, M., & Kaman, M. O.** (2022). Effect of repair parameters on composite plates under low velocity impact. *European Mechanical Science*, 6(1), 58–67. <https://doi.org/10.26701/ems.1020033>
- [45] **Corona, E., Spletzer, M., Lester, B. T., & Fietek, C. J.** (2022). International Journal of Solids and Structures Validation of material models for puncture of 7075-T651 aluminum plate. *International Journal of Solids and Structures*, 257, 111893. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111893>

- [46] **Firouzsaları, S. E., Dizhur, D., Jayaraman, K., Chouw, N., & Ingham, J.** (2022). Indentation and puncture response characteristics of flax fibre-reinforced polymer pipes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 159, 106996. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106996>
- [47] **Saylık, A., & Temiz, Ş.** (2022). Low-speed impact behavior of fiber-reinforced polymer-based glass, carbon, and glass / carbon hybrid composites. *Materials Testing*, 64(6), 820–831. <https://doi.org/10.1515/mt-2021-2179>
- [48] **Sönmez, S., Kesen, U., & Dalgiç, C.** (2018). 3 Boyutlu Yazıcılar. 6. Uluslararası MatbaTeknolojileri Sempozyumu, November, 471–481.
- [49] **Coşkun, M.** (2019). 3 Boyutlu Yazıcıda Üretilmiş Parçalara Uygulanan Isıl İşlemlerin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu*.
- [50] **You Can Now See the First Ever 3D Printer.** (t.y.). Erişim: 03 Ocak 2023, <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>
- [51] **Balat, İ.** (2019). 3D Yazıcı Çeşitleri ve Şekilleri Nelerdir? *Kerteriz*. <https://kerteriz.net/3d-yazici-cesitleri-ve-sekilleri-nelerdir/>
- [52] **Çapar, Y.** (t.y.). 3B Yazıcı Türleri. Erişim: 11 Aralık 2022, <https://yasincapar.com/tr/3b-yazici-turleri/>
- [53] **Günaydın, A. C.** (2022). Eklemeli İmalat Prosesinde Yapı Oryantasyonunun Çok Amaçlı Optimizasyonu [Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa]. <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- [54] **3D Yazıcı (3D Printer) Nasıl Çalışır? - Katmanlı Üretim Yöntemleri.** (t.y.). *ArtıBoyut*. Erişim: 03 Ocak 2023, <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/63-3d-yazici-nasil-calisir-katmanli-uretim-yontemleri>
- [55] **3D Yazıcı Nedir, Ne Amaçla Kullanılır?** (t.y.). *N2 Mobil*. Erişim: 03 Ocak 2023, <https://n2mobil.com.tr/Blog-25-2127-3d-yazici-nedir-ne-amacla-kullanilir>
- [56] **Parupelli, S. K., & Desai, S.** (2019). A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential. *American Journal of Applied Sciences*, 16(8), 244–272. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2019.244.272>
- [57] **Saylık, A.** (2016). Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş Çentikli Alüminyum Levhalarda Gerilme Analizi. *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ*.
- [58] **Çetkin, E.** (2018). TIG, MIG ve FSW Yöntemleri Kullanılarak Birleştirilen AA7075/AA5182 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman*.
- [59] **Kaw, A. K.** (2014). *Kompozit Malzeme Mekaniği* (1. baskı). Eflatun Basım Dağıtım Yayıncılık Dan. Yat. ve Tic. Ltd. Şti.
- [60] **Sarıkaya, E.** (2019). Doğal Fiber Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Tespiti. *Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli*.
- [61] **Önal, T.** (2020). Kompozit Balsa Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*.

- [62] **Composite material.** (t.y.). Erişim: 05 Ocak 2023, https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_material#Particle_Reinforcement
- [63] **Saraç, İ.** (2018). Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında Epoksi Yapıştırıcı İçerisinde Nanopartikül Kullanılmasının Bağlantının Statik Ve Yorulma Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- [64] **Koca, Ü.** (2022). Yapıştırıcı İle Konik Ve Eliptik Birleştirilen Bağlantıların Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [65] **Solmaz, M. Y.** (2008). Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [66] **Yapıştırma Teknolojisi.** (t.y.). Erişim: 04 Ocak 2023, <https://www.metaluzmani.com/yapistirma-teknolojisi/>
- [67] **Çitil, Ş.** (2012). Ortası Boş ve ara Elemanlı Çift Takviyeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [68] **Fracture mechanics.** (t.y.). Wikipedia. Erişim: 04 Ocak 2023, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics#:~:text=Mode I – Opening mode \(a,parallel to the crack front\).](https://en.wikipedia.org/wiki/Fracture_mechanics#:~:text=Mode I – Opening mode (a,parallel to the crack front).)
- [69] **Ultimaker ABS.** (t.y.). Erişim: 11 Aralık 2022, <https://ultimaker.com/materials/abs>
- [70] **Ultimaker PLA.** (t.y.). Erişim: 11 Aralık 2022, <https://ultimaker.com/materials/pla>
- [71] **Ultimaker S5.** (t.y.). Erişim: 11 Aralık 2022, <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5>
- [72] **Al 2024-T3.** (t.y.). Erişim: 12 Aralık 2022, <https://www.seykoc.com.tr/icerik/2024?dil=tr>
- [73] **Kalıp Ayırıcı Sıvı PVA.** (t.y.). Erişim: 01 Aralık 2022, <https://www.kompozitshop.com/kalip-ayirici-sivi-pva>
- [74] **Araldite 2015-1.** (t.y.). Erişim: 01 Aralık 2022, <https://www.huntsman.com/products/araldite2000/araldite-2015-1>
- [75] **ASTM D638-14.** (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, 1–17. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- [76] **ASTM D790-17.** (2017). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, 1–12. <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- [77] **ASTM D7136/D7136M-15.** (2015). Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. ASTM International, 1–16. https://doi.org/10.1520/D7136_D7136M-15
- [78] **Biolzi, L., Cattaneo, S., & Rosati, G.** (2001). Flexural/tensile strength ratio in rock-like materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(3), 217–233. <https://doi.org/10.1007/s006030170010>
- [79] **Dresch, A. B., Venturini, J., & Bergmann, C. P.** (2021). Improving the flexural-strength-to-density ratio in alumina ceramics with the addition of silicon



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Muhammed Safa KAMER

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2004, Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
- **Doktora** : 2023, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2004-2005 Simya Hidrolik Limited Şirketinde proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2005-2008 Eritay Mühendislik Limited Şirketinde şirket müdürü olarak çalıştı.
- 2009-2009 İlma Mühendislik Limited Şirketinde proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2009-2013 Gemciler Güven Metal Anonim Şirketinde proje mühendisi olarak çalıştı.
- 2013-2018 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Uzman olarak çalıştı.
- 2018-2023 Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşli, H., Kaya, A., & Akay, O. E.** (2022). Comparison of mechanical properties of tensile test specimens produced with ABS and PLA material at different printing speeds in 3D printer. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (3), 1197–1211. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.961981>
- **Kamer, M. S., Temiz, S., Yaykasli, H., Kaya, A., & Akay, O. E.** (2022). Effect Of Printing Speed On FDM 3D-Printed PLA Samples Produced Using Different Two Printers. *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, 6(3), 438–448. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1088805>
- **Kamer, M. S., & Temiz, Ş.** (2022). Investigation of The Tensile Test Behavior of Layered Composite Materials Manufactured Using Aluminum, ABS and PLA Plates.

Ankara International Congress on Scientific Research-VII, (pp. 1126-1137). Ankara, Türkiye, December 2-4.

- **Kamer, M. S., & Temiz, Ş.** (2022). Investigation of The Flexural Test Behavior of Layered Composite Materials Manufactured Using Aluminum, ABS and PLA Plates. Ankara International Congress on Scientific Research-VII, (pp. 1138-1148). Ankara, Türkiye, December 2-4.

