



**ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM MATRİSLİ
PREPREG TAKVİYELİ LAMİNE KOMPOZİT
MALZEME ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mustafa Yunus AŞKIN

**2020
DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Yunus TÜREN**

**ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM MATRİSLİ PREPREG TAKVİYELİ
LAMİNE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Mustafa Yunus AŞKIN

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Yunus TÜREN**

**KARABÜK
Haziran 2020**

Mustafa Yunus AŞKIN tarafından hazırlanan ‘‘ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM MATRİSLİ PREPREG TAKVİYELİ LAMİNE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ’’ başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yunus TÜREN
Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 16/06/2020

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Mustafa ACARER (SÜ)
Üye : Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Mehmet ÜNAL (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Yunus TÜREN (KBÜ)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yüksel AKINAY (YYÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mustafa Yunus AŞKIN

ÖZET

Doktora Tezi

ALÜMİNYUM VE MAGNEZYUM MATRİSLİ PREPREG TAKVİYELİ LAMİNE KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mustafa Yunus AŞKIN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yunus TÜREN

Haziran 2020, 162 sayfa

Bu çalışmada, metal matris elemanı olarak 0,8 mm kalınlığında 2024-T3 alüminyum levha ve AZ31 magnezyum levhalar kullanılmıştır. Metal matris elemanlarının arasına takviye fazı olarak karbon ve aramid fiber kullanılmıştır. Karbon ve aramid fiberler epoksi reçine ve polieter eter keton (PEEK) ile işlem görerek lamine kompozit malzeme üretiminde kullanılmıştır. Lamine kompozit malzemeler 3/2 istif sırasına göre (Metal/Prepreg/Metal/Prepreg/Metal) istiflendikten sonra sıcak pres cihazında üretilmiştir. Kompozit malzemeler üretildikten sonra mekanik özelliklerin tayini için çekme, üç nokta eğme ve darbe testleri uygulanmıştır. Üç nokta eğme testinden elde edilen verilerle üretilen kompozit malzemelerin tabakalar arası kesme dayanımları (TAKD) hesaplanmıştır. Ayrıca üretim sonrası ara yüzey özelliklerinin belirlenebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM), mekanik testler sonrası

oluşan hasar mekanizmalarının tespiti için optik mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir

Fiber metal lamine kompozit (FML) üretiminde en önemli kavramlardan biri olan arayüzey özelliklerini optimize etmek kompozitlerin nihai özellikleri açısından çok kritiktir. Bu çalışmada metal levhaların yüzeyleri zımparalama ve shot peening işlemleriyle pürüzlendirilmiştir. Shot peening işlemi görmüş levhalarla üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinde genel olarak bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca epoksi reçineye nanopartikül ilavesiyle de (GNP ve KNT) metal ve polimerik tabakalar arasındaki yapışma kabiliyeti geliştirilmeye çalışılmıştır. Hibrit olarak üretilen (2024-T3/Prepreg/AZ31/Prepreg/2024-T3) FML grubunda ise magnezyum metalinin sağladığı yaklaşık % 15 oranındaki ağırlıktan kazancın nihai mekanik özelliklerle ilişkisi incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Fiber metal kompozitler, Lamine kompozitler, Tabakalı kompozitler, FML, Prepregler, PEEK, Termoplastik Kompozitler.

Bilim Kodu : 91512

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF PREPREG REINFORCED LAMINATED COMPOSITE MATERIALS WITH ALUMINUM AND MAGNESIUM MATRIX

Mustafa Yunus AŞKIN

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Metallurgical and Material Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Yunus TÜREN

June 2020, 162 pages

In this study, 0,8 mm thickness 2024-T3 aluminum plate and AZ31 magnesium plate were used as metal matrix element. Carbon and aramid fiber were used as the reinforcing phase between the metallic matrix elements. Carbon and aramid fibers were treated with epoxy resin and polyether ether ketone (PEEK) to produce laminated composite materials. Laminated composite materials are produced in hot press device after stacking in 3/2 stack order (Metal / Prepreg / Metal / Prepreg / Metal). After the composite materials were produced, tensile, three-point bending, and impact tests were applied to determine the mechanical properties. The interlaminar shear strength (ILSS) of composite materials produced by the data obtained from the three-point bending test was calculated. In addition, scanning electron microscopy (SEM) was performed to determine the interfacial properties after production, and optical microscope analyzes

were performed to determine the damage mechanisms that occurred after mechanical tests.

Optimizing the interface properties, one of the most important concepts in FML production, is critical to the final properties of composites. In this study, the surfaces of metal sheets were roughened by sanding and shot peening processes. An overall improvement in the mechanical properties of composites produced with shot peening treated plates has been observed. In addition, by adding nanoparticle to the epoxy resin (GNP and CNT), the adhesion ability between the metal and polymeric layers was tried to be improved. In the FML group produced as hybrid (2024-T3 / Prepreg / AZ31 / Prepreg / 2024-T3), the relationship of the weight gain of approximately 15 % by magnesium metal to the final mechanical properties was investigated.

Key Word : Fiber Metal Composites, Laminated Composites, Layered Composites, FML, Prepregs, PEEK, Thermoplastic Composites.

Science Code : 91512

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Yunus TÜREN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin yürütülmesinde çok katkı sağlayan, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü'ne çok teşekkür ederim.

Tezimin yürütülmesi esnasında yardımlarını esirgemeyen Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ndeki değerli çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca sevgili aileme, eşim Rümeyza AŞKIN' a ve kızım Miray AŞKIN' a maddi, manevi hiçbir yardımı esirgemedi her şartta yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
KOMPOZİT MALZEMELER VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	5
2.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	7
2.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler	9
BÖLÜM 3	13
FİBER METAL LAMİNE (FML) KOMPOZİTLER.....	13
3.1. FML KOMPOZİTLERİN TARİHÇESİ	14
3.2. FML KOMPOZİTLERİN SINIFLANDIRILMASI	16
3.3. FML KOMPOZİTLERİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI.....	17
3.4. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	19
3.4.1. Otoklavla Üretim Yöntemi	20
3.4.2. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	21
3.4.3. Sıcak Presleme Yöntemi.....	23
3.5. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ	24

	<u>Sayfa</u>
3.5.1. Mekanik Yüzey İşlemleri	24
3.5.2. Kimyasal Yüzey İşlemleri	25
3.5.3. Elektrokimyasal Yüzey İşlemleri	25
3.5.3. Bağlayıcı Ajanlarla Yüzey İşlemleri	26
3.5.4. Kuru Yüzey İşlemleri	28
3.6. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ.....	29
3.6.1. 2024-T3 Alüminyum Alaşımı ve Özellikleri.....	29
3.6.2. AZ31 Magnezyum Alaşımı ve Özellikleri	31
3.6.3. Karbon Fiber ve Özellikleri	33
3.6.4. Aramid Fiber ve Özellikleri.....	35
3.6.5. Polietereterketon (PEEK) ve Özellikleri	38
3.6.6. Epoksi Reçine ve Özellikleri	40
 BÖLÜM 4	 43
FML KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL UYGULAMALARI.....	43
4.1. FML KOMPOZİT ÜRETİMİNDE GRAFEN NANOPARTİKÜL KULLANIMI	45
4.1.1. Grafen Nanopartikülün Özellikleri.....	46
4.2. FML KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KNT KULLANIMI	48
4.2.1. KNT'lerin Özellikleri	49
 BÖLÜM 5	 52
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
5.1. FML ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER.....	52
5.1.1. 2024-T3 Alüminyum Levha	52
5.1.2. AZ31 Magnezyum Levha	53
5.1.3. Tek Yönlü Karbon Fiber (UD-Unidirectional).....	53
5.1.4. Dokuma Karbon Fiber Kumaş.....	54
5.1.5. Dokuma Aramid Fiber Kumaş	55
5.1.6. Laminasyon Epoksi Reçine Seti	55
5.1.7. PEEK Emprenye Edilmiş Tek Yönlü Karbon Fiber Prepreg	56
5.1.8. PEEK Emprenye Edilmiş Dokuma Karbon Fiber Prepreg.....	57

	<u>Sayfa</u>
5.1.9. PEEK Emprenye Edilmiş Dokuma Aramid Fiber Prepreg.....	58
5.2. FML KOMPOZİTLER'İN ÜRETİMİ	58
5.2.1. Metal Levhaların Yüzey Hazırlıkları.....	60
5.2.2. Shot Peening İşlemi	61
5.2.3. Laminasyon Öncesi Takviye Elemanlarının Hazırlanması	61
5.2.4. Laminasyon İşlemi.....	63
5.2.5. Three Roll Mill Yöntemiyle Nano Takviye.....	65
5.3. FML KOMPOZİTLERİN KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI.....	66
5.3.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	67
5.3.2. Çekme Testi	67
5.3.3. 3 Nokta Eğme Testi	68
5.3.4. Kesme Dayanımı Testi	69
5.3.5. Darbe Testi.....	69
5.3.6. SEM Analizi	70
5.3.7. Optik Analiz.....	71
BÖLÜM 6	72
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	72
6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI.....	72
6.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	72
6.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARI	87
6.4. DARBE TESTİ SONUÇLARI.....	95
6.4.1. Oda Sıcaklığındaki Darbe Testi Sonuçları	96
6.4.2. -65 °C Sıcaklıktaki Darbe Testi Sonuçları	105
6.5. KESME DAYANIMI TEST SONUÇLARI	113
6.6. SEM VE DİJİTAL MİKROSKOP ANALİZİ SONUÇLARI.....	120
6.6.1. Yüzey Pürüzlendirme İşlemlerinin Mikroskop Görüntüleri.....	120
6.6.2. Arayüzey SEM Görüntüleri.....	121
6.6.3. Çekme Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri	127
6.6.4. Eğme Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri.....	132
6.6.5. Darbe Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri	136

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 7	144
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	144
KAYNAKLAR	148
ÖZGEÇMİŞ	162

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Boeing 787 yolcu uçağı gövdesinde kompozit malzeme kullanımının sembolik gösterimi.	5
Şekil 2.2.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	6
Şekil 2.3.	Matrise takviye edilen fiber formlarının şekilsel gösterimi	8
Şekil 2.4.	Karbon fiber takviyeli kompozit malzemedan üretilmiş bir gemi pervanesi.	8
Şekil 2.5.	İri parçacıklı kompozit malzemelere örnek olarak WC-Co kaynaşık karbürün sembolik gösterimi.	10
Şekil 2.6.	Dispersiyonla dayanımı artırılmış Al/Al ₂ O ₃ kompozitin 10.000 büyütmedeki mikroyapı görüntüsü	10
Şekil 2.7.	Lamine kompozit üretimi için fiber takviyeli polimerik kompozitlerin istiflenmesi	12
Şekil 2.8.	Bal peteği çekirdekli sandviç panelin yapısını gösteren şematik diyagram	12
Şekil 3.1.	Fiber metal lamine kompozitin sembolik gösterimi	14
Şekil 3.2.	Fiber metal lamine kompozitlerde gerilim köprüleme mekanizması	15
Şekil 3.3.	FML' lerin sınıflandırılması.	17
Şekil 3.4.	Bir otoklav sisteminin şematik gösterimi.	21
Şekil 3.5.	Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi	22
Şekil 3.6.	Sıcak presle üretim yönteminin şematik gösterimi.	23
Şekil 3.7.	Silanlama işleminin adhezif mekanizmadaki işlevinin sembolik gösterimi.	27
Şekil 3.8.	İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminin sembolik gösterimi	31
Şekil 3.9.	Karbon fiber üretim aşamalarının sembolik gösterimi	34
Şekil 3.10.	Aramid fiberin üretim prosesinin sembolik gösterimi	37
Şekil 3.11.	Termoplastik reçinelerin yapısının sembolik gösterimi	39
Şekil 3.12.	PEEK polimerinin kimyasal yapısı	39
Şekil 4.1.	Grafen levhalardan oluşan grafitin yapısı	47
Şekil 4.2.	Tek duvarlı ve çok duvarlı KNT' lerin gösterimi	50
Şekil 5.1.	FML üretiminde kullanılan 2024-T3 alüminyum levhanın görüntüsü.	52
Şekil 5.2.	FML üretiminde kullanılan AZ31 magnezyum levha görüntüsü.	53
Şekil 5.3.	Tek yönlü karbon fiber kumaş görüntüsü.	54

Sayfa

Şekil 5.4. Twill dokuma karbon fiber kumaş görüntüsü.	54
Şekil 5.5. Plain dokuma aramid fiber kumaş görüntüsü.....	55
Şekil 5.6. Laminasyon işlemi için kullanılan epoksi seti.	56
Şekil 5.7. PEEK emprenye edilmiş tek yönlü karbon fiber prepreg görüntüsü.	57
Şekil 5.8. PEEK emprenye edilmiş dokuma karbon fiber prepreg görüntüsü.....	57
Şekil 5.9. PEEK emprenye edilmiş dokuma aramid fiber prepreg görüntüsü.....	58
Şekil 5.10. FML' lerin genel üretim kademeleri.....	60
Şekil 5.11. Metal plakaların yüzey işlemleri.....	61
Şekil 5.12. Laminasyon işlemi için kesilen PEEK emprenyeli dokuma karbon fiber prepreg.	62
Şekil 5.13. El yatırması yöntemiyle fiberlere reçine yedirme işlemi.	62
Şekil 5.14. Epoksili FML' lerin kurlenme rejimine ait grafik.	64
Şekil 5.15. PEEK' li FML' lerin kurlenme rejimine ait grafik.	64
Şekil 5.16. Bir FML istifinin sembolik gösterimi.	64
Şekil 5.17. FML' lerin üretildiği sıcak pres cihazı.....	65
Şekil 5.18. Üretilen numunelerin görüntüsü.	65
Şekil 5.19. Three roll mill cihazı ile epoksi reçineye nano takviye işlemi.	66
Şekil 5.20. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.	67
Şekil 5.21. Çekme testine ait görseller a) Numunelerin çekme testlerinin yapıldığı cihaz, b) Çekme numunelerinin hazırlanması işlemi, c) Numunenin çekme testi esnasındaki görüntüsü.	68
Şekil 5.22. Eğme testi uygulanan numunelerin görüntüleri.....	69
Şekil 5.23. Darbe testinin yapıldığı doğrultuların sembolik gösterimi.	70
Şekil 5.24. Darbe testinde kullanılan cihazlar.....	70
Şekil 5.25. Taramalı elektron mikroskobu.....	71
Şekil 5.26. NIKON Shuttle Pix portatif dijital stereo mikroskop.	71
Şekil 6.1. FML üretiminde kullanılan AZ31, 2024-T3 ve bu levhaların çift yüzeyi shot peening işlemine tabi tutulmuş olanların çekme testi sonuçları.	73
Şekil 6.2. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.....	74
Şekil 6.3. 2024-T3 ve shot peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.....	75
Şekil 6.4. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.....	76

Şekil 6.5. PEEK takviyeli kompozitlerde kısmi delaminasyon bölgeleri, A. PEEK+TYKF takviyeli FML arayüzeyi, B. PEEK+DKF takviyeli FML arayüzeyi.	76
Şekil 6.6. 2024-T3 ve shot peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.	77
Şekil 6.7. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.	77
Şekil 6.8. AZ31 ve shot peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.	78
Şekil 6.9. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.	79
Şekil 6.10. AZ31 ve shot peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.	80
Şekil 6.11. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.	81
Şekil 6.12. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.	81
Şekil 6.13. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.	83
Şekil 6.14. Nanopartikül takviyeli FML' lerin delaminasyon sonrası metal tabakalarının arayüzey görüntüsü.	83
Şekil 6.15. Nanopartikül takviyeli epoksi matriste çatlak morfolojisi [179].	84
Şekil 6.16. 2024-T3, TYKF ve epoksi reçine kombinasyonu ile üretilen FML' lerin özgül çekme dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafik.	87
Şekil 6.17. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.	88
Şekil 6.18. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.	89
Şekil 6.19. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.	90
Şekil 6.20. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar ve PEEK emprenyeli farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.	90
Şekil 6.21. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.	91
Şekil 6.22. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.	92

Şekil 6.23. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.	92
Şekil 6.24. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar ve PEEK takviyeli farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.	93
Şekil 6.25. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.....	94
Şekil 6.26. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.	94
Şekil 6.27. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.	95
Şekil 6.28. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	97
Şekil 6.29. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	98
Şekil 6.30. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	99
Şekil 6.31. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.....	100
Şekil 6.32. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	100
Şekil 6.33. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	101
Şekil 6.34. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	102
Şekil 6.35. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.....	102
Şekil 6.36. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	103
Şekil 6.37. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	104
Şekil 6.38. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.	105
Şekil 6.39. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	106
Şekil 6.40. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	107

Şekil 6.41. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	108
Şekil 6.42. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.....	109
Şekil 6.43. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	109
Şekil 6.44. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	110
Şekil 6.45. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	111
Şekil 6.46. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.....	111
Şekil 6.47. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.....	112
Şekil 6.48. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	112
Şekil 6.49. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.	113
Şekil 6.50. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	114
Şekil 6.51. 2024-T3, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.	115
Şekil 6.52. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	115
Şekil 6.53. 2024-T3, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.	116
Şekil 6.54. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	116
Şekil 6.55. AZ31, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.	117
Şekil 6.56. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	117
Şekil 6.57. AZ31, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.	118
Şekil 6.58. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	119
Şekil 6.59. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.	119

Şekil 6.60. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.	120
Şekil 6.61. a) Shot Peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum, b) 120' lik zımparayla işlem görmüş 2024-T3 alüminyum, c) Shot Peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum, d) 120' lik zımparayla işlem görmüş AZ31 magnezyum yüzeylerinin 200 X büyütmedeki dijital mikroskop görüntüleri.	121
Şekil 6.62. 2024-T3 alüminyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.	122
Şekil 6.63. 2024-T3 (shot peening) alüminyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri....	123
Şekil 6.64. AZ31 magnezyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.	124
Şekil 6.65. AZ31 (shot peening) magnezyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri....	125
Şekil 6.66. Hibrit FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.	126
Şekil 6.67. Nanopartikül ilaveli reçinelerle üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.	126
Şekil 6.68. DKF ve PEEK takviyeli FML' de nüfuziyet problemi.	127
Şekil 6.69. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	128
Şekil 6.70. TYKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	128
Şekil 6.71. DKF ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	129
Şekil 6.72. DKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	130
Şekil 6.73. Aramid fiber ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	130
Şekil 6.74. Aramid fiber ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	131
Şekil 6.75. Nanopartikül ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	131
Şekil 6.76. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	132
Şekil 6.77. TYKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	133
Şekil 6.78. DKF ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.	133

Şekil 6.79. DKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.....	134
Şekil 6.80. Aramid fiber ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.....	135
Şekil 6.81. Aramid fiber ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.....	135
Şekil 6.82. Nanopartikül ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.....	136
Şekil 6.83. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.....	137
Şekil 6.84. PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.....	138
Şekil 6.85. Epoksi reçine ve DKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.....	139
Şekil 6.86. PEEK ve DKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.	140
Şekil 6.87. Epoksi reçine ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.....	141
Şekil 6.88. PEEK ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.....	142
Şekil 6.89. Nanopartikül ilaveli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.	143

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. 2024-T3 ve diğer kondüsyonlardaki alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri	30
Çizelge 3.2. AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal kompozisyonu	33
Çizelge 3.3. AZ31 magnezyum alaşımının mekanik özellikleri	33
Çizelge 3.4. Karbon fiberlerin sınıflandırılması	35
Çizelge 3.5. Aramid fiberlerin mekanik özellikleri	36
Çizelge 3.6. PEEK polimerinin özellikleri	40
Çizelge 3.7. Çeşitli termoset reçinelerin mekanik özellikleri	41
Çizelge 5.1. Üretilen numune kombinasyonlarının şematik gösterimi	59
Çizelge 6.1. Yüzey püzüzlülük ölçüm sonuçları	72
Çizelge 6.2. Üretilen FML' lerin kalınlık, MHF, yoğunluk ve ÖÇD değerleri	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

WC	: wolfram karbür
Mg	: magnezyum
Al	: alüminyum
N_m	: FML' deki metal katman sayısı
t_m	: metal plaka kalınlığı
t_{FML}	: FML'nin kalınlığı
ρ_{FML}	: FML'nin yoğunluğu
ρ_{metal}	: metalin yoğunluğu
$\rho_{kompozit}$: kompozitin yoğunluğu
$\sigma_{ÖÇD}$: özgül çekme dayanımı
σ_{FML}	: FML' nin çekme dayanımı
$\sigma_{eğme}$: FML' nin eğme dayanımı

KISALTMALAR

FML	: Fiber Metal Laminate (Fiber Metal Lamine Kompozit)	
ARALL	: Aramid Reinforced Aluminum Laminate (Aramid Takviye Alüminyum Laminat)	Edilmiş
CARALL	: Carbon Fiber Reinforced Aluminum Laminate (Karbon Fiber Edilmiş Alüminyum Laminat)	Takviye
GLARE	: Glass Fiber Reinforced Aluminum Laminate (Cam Fiber Edilmiş Alüminyum Laminat)	Takviye
SAP	: Sintered Aluminum Powder (Sinterlenmiş Alüminyum Tozu)	
IACS	: International Annealed Copper Standart	
TYKF	: Tek Yönlü Karbon Fiber	
DKF	: Dokuma Karbon Fiber	

SP	: Shot Peening
TAKD	: Tabakalar Arası Kesme Dayanımı
TAKT	: Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu
TAKM	: Tabakalar Arası Kırılma Mukavemeti
ÖÇD	: Özgül Çekme Dayanımı
MHF	: Metalik Hacim Fraksiyonu
KNT	: Karbon Nanotüp
GNP	: Grafen Nano Plaka
KNF	: Karbon Nano Fiber

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişen dünyada ekonomik ve teknolojik açıdan üretilen uçakların, uzay araçlarının, otomobillerin vb. ağırlıklarını azaltmak bunun paralelinde de yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını azaltmak temel hedeflerden birisidir. Özellikle havacılık sektöründe faydalı ağırlığın, hız ve menzilin artırılması çok ciddi ihtiyaçlar olduğu kadar, olumlu gelişmelerde elde edilmeye çalışılan çalışma konularıdır. Havacılık başta olmak üzere uzay ve otomotiv sektörünün çıktıları olan araçlarda hedeflenen toplam performans artışı beraberinde ise daha dayanıklı, uzun ömürlü ve güvenli araçlar üretme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedendir ki bu kadar iyi özelliği sağlayabilecek ender malzemelerden olan kompozit malzemeler bahsi geçen endüstrilerin vazgeçilmezi konumuna gelmiştir.

Savunma, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde değerlendirilecek ileri malzemelerin ortaya çıkmasıyla beraber, malzeme bilimi de bu ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte multidisiplinel, süreç odaklı bir alana dönüşmeye başlamıştır. Bu çerçevede polimerik ve kompozit malzemeler başta olmak üzere, akıllı ve işlevsel malzemeler, nanoteknoloji ürünü malzemeler gibi önümüzdeki yıllarda önemli çekim alanları oluşturacak ileri malzeme alanları, ülkemiz için de önemli fırsat alanları olmuşlardır.

TÜBİTAK'ın 2003 yılında yapmış olduğu "VİZYON 2023: Bilim ve Teknoloji Stratejileri Projesi" kapsamında gerçekleştirilen panellerden "Savunma Havacılık ve Uzay Sanayi Paneli" raporu çerçevesinde kompozit malzeme teknolojileri stratejik malzeme teknolojileri faaliyet konusu altında tanımlanmıştır. Uzmanların yaptıkları değerlendirmeler neticesinde ülkemizin geleceğine yönelik belirledikleri toplam 45 teknolojik faaliyet konusundan üçü doğrudan kompozit malzeme teknolojisi ile bağlantılıdır. Mukavemet/maliyet oranı olarak metalik malzemelerden üstün kompozitlerin yaygınlaşması, insansız hava araçlarının ağırlıklarını azaltıp

performans, menzil ve faydalı yük değerlerinde artış sağlayacak organik, metal, seramik-matris ve termo-yapısal kompozit malzemelerin geliştirilmesi gibi ifadelerle ülkemizin faydasına yönelik bu tip çalışmalara ihtiyaç olduğu açıkça ortaya konmuştur [1].

Kompozit malzemelerin bir alt grubu olan fiber metal lamine kompozitler halihazırda havacılık ve uzay sanayinde yoğun şekilde kullanılan yapısal malzemelerdir. Alüminyum matrisli ve fiber takviyeli kompozitler (ARALL, CARALL, GLARE) ticari olarak üretilmekte ve sektörde kullanılmaktadır. Fakat alternatif metal alaşımlarıyla veya farklı fiber takviyelerle lamine kompozit malzeme üretimi hala gelişmeye açık bir alan olarak cazibesini korumaktadır.

Fiber metal lamine kompozitler havacılık, savunma ve uzay endüstrisi için eşsiz malzemelerdir. Fakat bu malzemelerin tamamı yurt dışında üretilen ve ülkemizin ithal ettiği pahalı malzemelerdir. Bu malzemelerin ülkemizde üretilebilir hale gelmesi için bu konuda araştırma ve çalışmalar yapmak bizlerin temel görevidir. Bu sebeple bu konu bir bilimsel araştırma konusu olarak belirlenmiştir. Özverili bir akademik araştırma ve çalışma neticesinde üretilecek, geliştirilecek bu malzemelerin gerek bilimsel çalışmalarımıza gerekse de ülke menfaatine ciddi katkılar sağlayacağı kaçınılmazdır.

Çünkü TÜBİTAK'ın gerçekleştirdiği "VİZYON:2023 Bilim ve Teknoloji Stratejileri Projesi" kapsamında milli ve yerli olarak bu tip ürünlerin ve ileri teknoloji malzemelerin ülkemiz olanaklarıyla üretilmesi ve yine milli projelerde kullanılması hedeflenmektedir. Bu çalışma neticesinde bu hedefe az da olsa katkı sağlamış olabilmek bizlere mutluluk verecektir.

Hazırlanan bu çalışmanın, "Giriş" bölümünde çalışmanın özeti ve bu çalışmaya neden ihtiyaç duyulduğu anlatılmaya çalışılmıştır. İkinci bölümde, bu çalışmada üretilen fiber metal lamine kompozitleri de içine alan kompozit malzemeler ve özellikleri geniş bir literatür taramasıyla anlatılmıştır. Üçüncü bölümde fiber metal lamine kompozitler detaylı bir biçimde tanıtılmıştır. Literatür taramasının yapıldığı son bölüm olan

dördüncü bölümde ise fiber metal lamine kompozitlerde nanopartikül ilavesine yönelik çalışmalar anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, çalışmanın amacının belirlenmesinin yanında, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, FML kompozitlerin üretim yöntemi ve kompozitlere uygulanan mekanik testler hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde, üretilen kompozit malzemelere uygulanan mekanik testlerden elde edilen veriler, kolay değerlendirilebilmesi için grafik olarak çizilmiş ve elde edilen grafikler değerlendirilmiştir. Ayrıca, optik mikroskop ve SEM çalışmaları sonucu elde edilen görüntüler yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, daha önceden yapılmış benzer çalışmalarla sebep-sonuç ilişkisi çerçevesinde kıyaslanmıştır.

Deneysel çalışmaların nihai sonuçlarının açıklandığı yedinci ve son bölümde, deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular, deneysel çalışmanın amacına uygun bir biçimde yorumlanarak sonuçlandırılmıştır.

Bütün bu bilgiler ışığında, bu çalışmada alüminyum ve magnezyum levhalar hem tek başına hem de birbirleri ile kombine edilerek matris elemanı olarak kullanılmıştır. Çeşitli tipte takviye fazları (karbon fiber/epoksi, aramid fiber/epoksi, karbon fiber/PEEK prepreg, aramid fiber/PEEK prepreg) Al, Mg ve Al/Mg metal matris kombinasyonları ile bir araya getirilerek fiber metal lamine kompozit malzemeler üretilmiştir. Daha sonra üretilen malzemelerin özelliklerinin incelenmesi için çeşitli testler gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 2

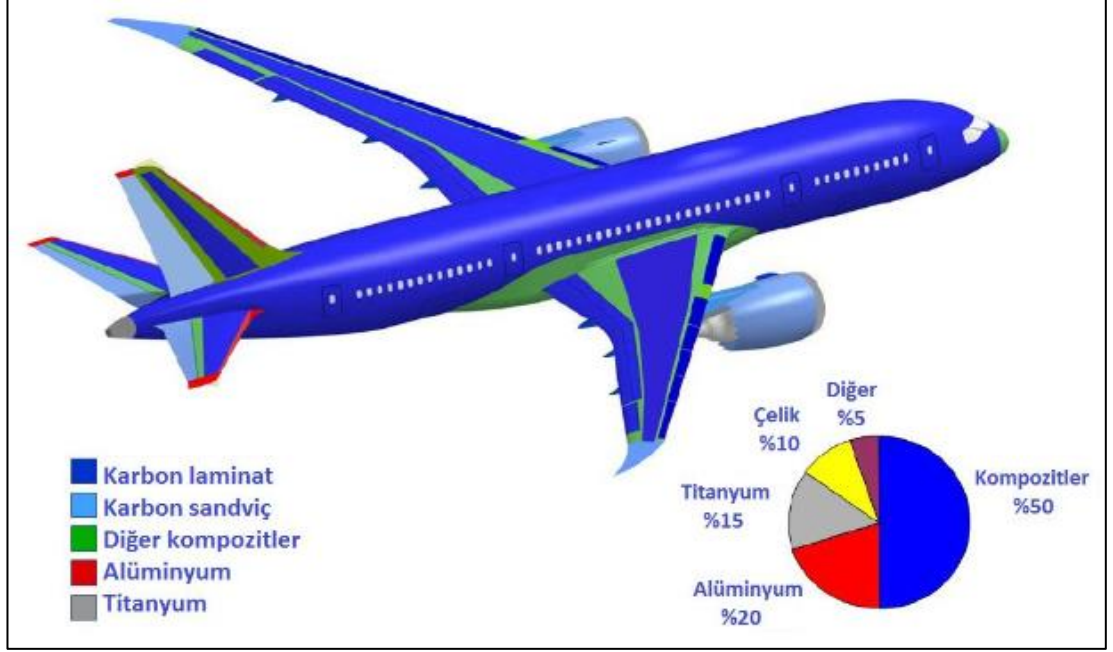
KOMPOZİT MALZEMELER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Teknolojik ve sektörel gereksinimler çerçevesinde özellikle havacılık, uzay ve otomobil sektörlerinde artan teknik ve yapısal ihtiyaçlara paralel olarak malzeme bilimi birçok bölüme (metaller, polimerler, seramikler, kompozitler, nanokompozitler vb.) ayrılmak durumunda kalmıştır. Kompozit malzemeler ise bu gruplar içerisinde gelişmeye çok açık ve uygulama alanı çok geniş olan bir alan olarak hala cazibesini korumaktadır. Havacılık, uzay ve otomotiv gibi önemli endüstri kolları kompozit malzeme alanıyla yakından ilgilenmekte ve kendi bünyelerinde uygulamaya yönelik çalışmalarını tüm hızıyla sürdürmektedir [2].

Birbiri içerisinde çözünmeyen, birden çok bileşenin (metal, polimer, seramik vb.) kombine edildiği ve her bileşenin üstün özelliklerinden faydalanmayı amaçlayarak üretilen malzemelere genel olarak kompozit malzemeler denilmektedir. Kompozit malzemeler, bütün bileşenleri birarada tutan ve tesir eden yükü takviye fazlarına ileten matris ile dışarıdan uygulanan yükü taşıyan takviye malzemelerinden oluşur. Özgül mukavemet (dayanım/ağırlık) çerçevesinde değerlendirildiğinde metalik malzemelere göre oldukça hafif olan kompozit malzemeler sahip oldukları iyi derecede mekanik özelliklerle birçok sektörde yapısal malzeme olarak kullanılmakta ve ilerlemekte olan gelişmelerle birlikte kullanım alanının genişleyeceği çok açıktır [3,4].

Kompozit malzemeler, son zamanlarda çeşitli uzmanların çalışma alanı ve ilgi odağı olmuştur. Özellikle, 2. Dünya Savaşı'ndan sonra havacılık endüstrisindeki askeri uygulamalar kompozitlerin ticari kullanımına olanak sağlamıştır. Kompozit alanındaki yeni gelişmeler yapısal tasarımlarda önemli derecede ağırlık azalmasına imkân tanımıştır. Kompozit malzemeler, metal alaşımlarına kıyasla, özellikle yüksek mukavemet ve özgül mukavemetin (sağlamlık/ağırlık) söz konusu olduğu durumlarda birçok avantaj sağlamaktadır. Buna ek olarak, yapısal uygulamalarda mükemmel

yorulma özellikleri ve korozyon direnci sağlarlar. Bütün bu avantajlarla birlikte, kompozit yapılar son yıllarda havacılık endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır [5–7]. Şekil 2.1.' de kompozit malzemelerin bir yolcu uçağının gövdesinde kullanıldığı bölgeler sembolik olarak görülmektedir.



Şekil 2.1. Boeing 787 yolcu uçağı gövdesinde kompozit malzeme kullanımının sembolik gösterimi [8].

2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeleri oluşturan matris ve takviye fazları birer bileşen olarak yapıda bulunmaktadır. Çeşitlilik açısından çok farklı kombinasyonlara sahip olabilen bu bileşenler sistemi, kompozit malzeme tasarlarken optimum kombinasyonlar geliştirilmesini ve kullanım amacına özel kompozitler üretilmesine olanak sağlarlar. Kompozit malzemeleri meydana getiren matris ve takviye bileşenlerinin tipine göre de kompozit malzemeleri sınıflandırmak mümkündür [9,10].

Kompozit malzemeleri sınıflandırmanın ilk yöntemi matris tipine göre sınıflandırmaktır. Matris tipine göre kompozitler;

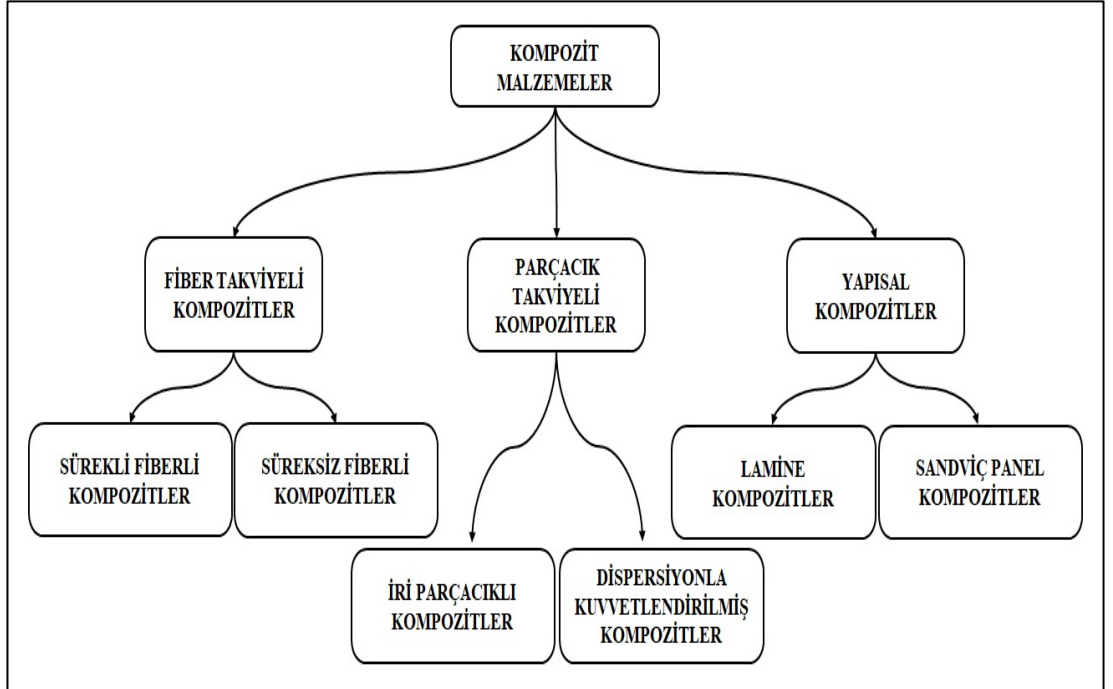
- Metal matrisli kompozitler
- Seramik matrisli kompozitler
- Polimer matrisli kompozitler

Olarak üç ana gruba ayrılmaktadır.

Takviye tipine göre kompozit malzemeler ise;

- Fiber takviyeli kompozitler
- Parçacık takviyeli kompozitler
- Yapısal kompozitler

Olarak üç temel gruba ayrılmaktadır [11,12]. Bu çalışmada yapısal kompozitler sınıfına ait fiber metal lamine kompozitler konusu esas alındığı için takviye tipine göre kompozit malzemeler daha detaylı olarak açıklanacaktır. Şekil 2.2.' de kompozit malzemelerin takviye tipine göre sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

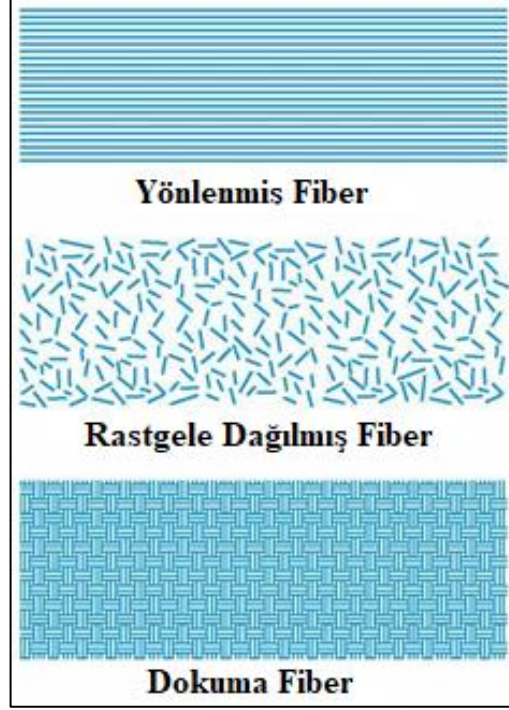
2.1.1. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler takviye elemanı olarak çeşitli fiberlerin (sürekli veya süreksiz olarak) kullanıldığı bir kompozit grubudur. Matrisin nispeten zayıf çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerini iyileştirmek için fiber takviye etmek kompozit malzemeler açısından son derece önemlidir. Matris ve fiber oranının optimum seviyede dizayn edilmesi durumunda kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ciddi oranda artmaktadır. Fakat fiber oranı belirli bir seviyenin üzerine çıktığında matrisin fiberleri birarada rijit bir şekilde tutma kabiliyeti azalacağı için istenen özellikleri sağlamak zor olacaktır [13–15].

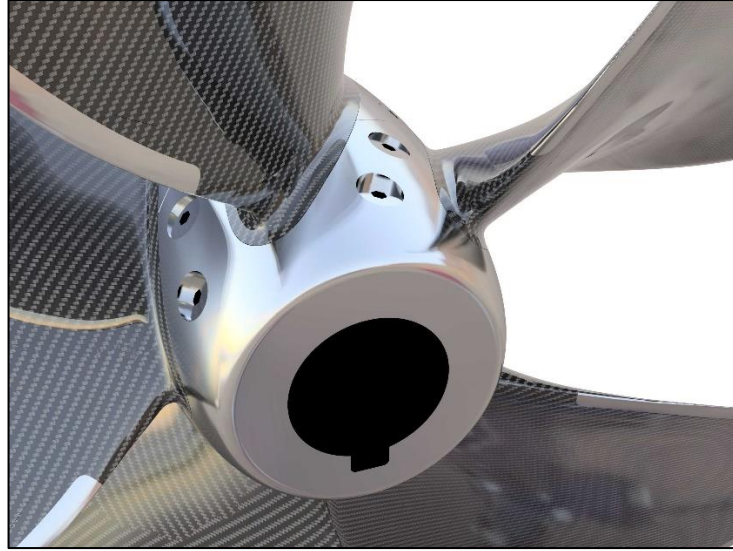
Matris içerisine takviye edilen fiberlerin fiziksel özellikleri de (çap, uzunluk vb.) kompozit malzemelerin performanslarını çok etkilemektedir. Örneğin kullanılan fiber demetlerinin çapı ne kadar ince olursa matris fazıyla olan arayüzey etkileşimi görece daha fazla olacak ve dayanımda doğru orantılı olarak artacaktır. Kompozit malzeme tasarımında fiber takviyesi çok önemli parametrelerden biridir. Çünkü matris içerisine takviye edilen fiberlerin her demeti birer çatlak önleyici görevi görürler. Kompozit malzemenin herhangi bir yerinde başlayan çatlak matris içerisinde ilerlerken fiber demetleriyle karşılaştığında ilerleyemez veya yön değiştirir. Ayrıca kompozit malzemeye dışarıdan etkiyen yüklere karşı koyan ve taşıyıcı vazifesi üstlenen yine matris içerisindeki fiber demetleridir. Fiberlerin matris içerisindeki yönelimi kompozit malzemeye etki eden yükün yönüne göre malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Fiber yönüne dik doğrultularda dayanım düşük beklenirken paralel doğrultuda daha yüksek olacaktır. Dolayısıyla kompozit malzeme dizaynında fiberlerin yönelimi, çeşidi, matris fazıyla uyumu gibi parametreler birlikte değerlendirildiğinde optimum çekme, eğilme, darbe, yorulma ve korozyon direnci özelliklerini elde etmek mümkündür [13,16,17]. Şekil 2.3.' te matrise takviye edilen fiberlerin çeşitli formları görülmektedir.

Fiber takviyesiyle özgül dayanım açısından birçok monolitik metalik malzemeyle eşdeğer hatta bazı yönlerden üstün özellikler kazanan kompozit malzemeler birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. Başta havacılık sektörü olmak üzere, otomotiv, uzay ve spor endüstrisi kompozit malzemelerin yoğun olarak kullanıldığı sektörlerin

başında gelmektedir [18]. Şekil 2.4’ te karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilmiş bir gemi pervanesi görülmektedir.



Şekil 2.3. Matrise takviye edilen fiber formlarının şekilsel gösterimi [19].



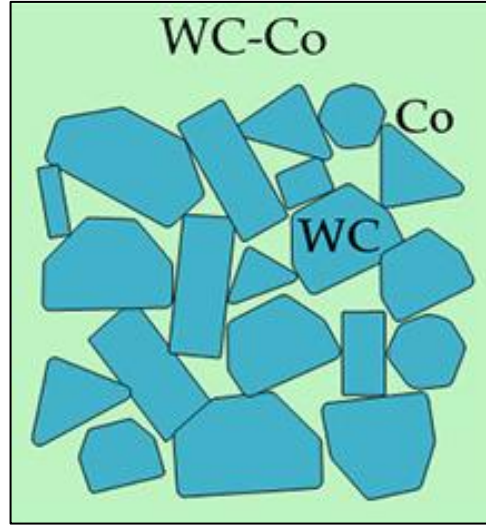
Şekil 2.4. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeden üretilmiş bir gemi pervanesi [20].

2.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

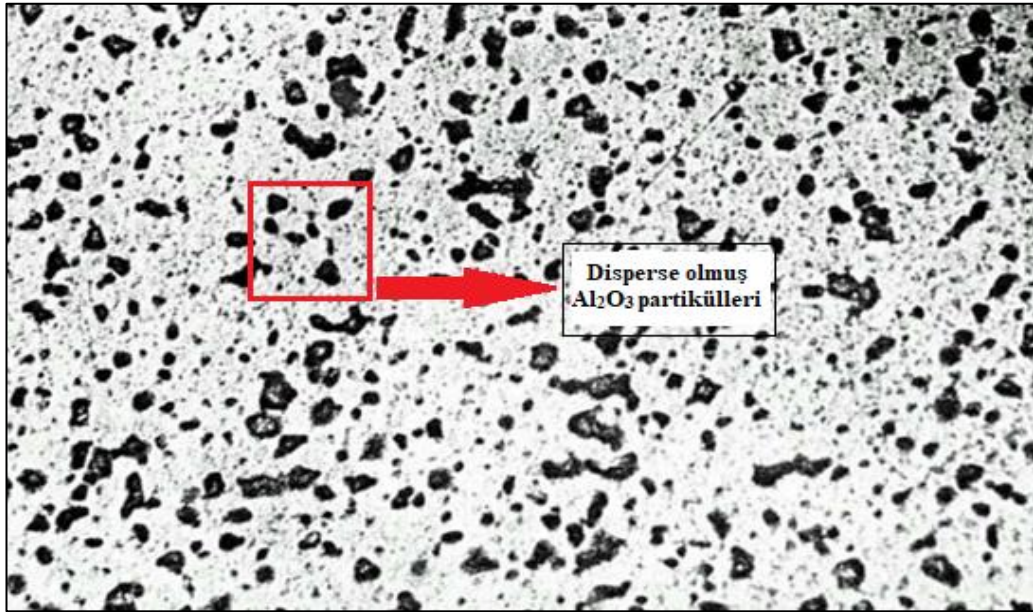
Parçacık takviyeli kompozit malzemeler birbirinden kimyasal olarak farklı matris ve matristen daha sert bir takviye fazının fiziksel olarak biraraya gelmesiyle elde edilirler. Metal, seramik veya polimer bir matris içerisinde seramik partiküllerinin, whiskerlerin ya da kırılmış elyaf gibi takviye fazlarının bulunduğu bir kompozit grubudur. Çimento matris içerisine takviye edilmiş agregaların oluşturduğu beton, partikül takviyeli kompozitlerin en temel örneklerinden biridir. Matrise parçacık takviyesinin asıl amacı dayanım artışı sağlamanın dışında elektriksel, termal, tribolojik özelliklerde iyileştirme elde edebilmektir [13,17].

Parçacık takviyeli kompozitleri iri parçacıklı kompozitler ve dispersiyonla sertleştirilmiş kompozitler olarak alt gruplara ayırmak mümkündür. İri parçacıklı kompozitlerde matris ve takviye fazı etkileşimi makro boyuttadır. Takviye fazlarının boyutu 1-50 μ aralığında değişebilir. Takviye fazının hacimce konsantrasyonu ise % 15-40 aralığındadır. Kesici takımlarda kullanılan TiC veya WC takviye edilmiş Co ve Ni alaşımlarından oluşan sermetler bu kompozit grubuna bir örnek olarak verilebilir. Şekil 2.5' te WC-Co kaynaşık karbürün sembolik hali görülmektedir. Dispersiyonla sertleştirilmiş kompozit malzemelerde sert ve inert takviye fazı matris içerisinde üniform olarak dağılmıştır. Takviye fazının boyutu 0.1 μ m veya bu değerden daha küçüktür. Takviye fazının hacimce konsantrasyonu ise % 15-40 aralığındadır. Dispersiyonla sertleştirilmiş kompozit malzemeler genellikle toz metalurjisi yoluyla metalik bir matris içerisinde takviye fazının homojen olarak disperse edilmesi yoluyla üretilirler. % 14 Al₂O₃ takviyeli Al-SAP (Sintered Aluminum Powder) kompozit bu gruba bir örnek olarak verilebilir [21,22]. Şekil 2.6' da Al-SAP kompozitin mikroyapı görüntüsü görülmektedir.

Parçacık takviyeli kompozit malzeme üretiminde matris ve takviye fazının uyumu fazlasıyla önem arz etmektedir. Matris ve takviye fazı arasında istenen arayüzey özellikleri elde edilemezse takviye fazı nihai kompozit malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Bu sebeple takviye edilecek fazlara yüzey işlemi uygulamak veya matrisin ıslatma kabiliyetini çeşitli yöntemlerle geliştirmek birçok bilimsel çalışmaya ve sektörel uygulamaya konu olmuştur [13,23].



Şekil 2.5. İri parçacıklı kompozit malzemelere örnek olarak WC-Co kaynaşık karbürün sembolik gösterimi [24].



Şekil 2.6. Dispersiyonla dayanımı artırılmış Al/Al₂O₃ kompozitin 10.000 büyütmedeki mikroyapı görüntüsü [25].

2.1.3. Yapısal Kompozit Malzemeler

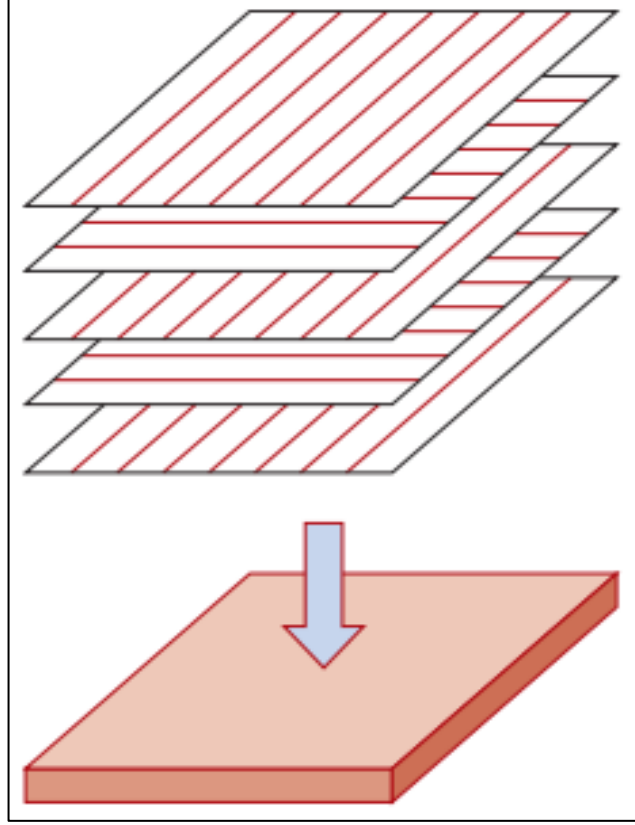
Yapısal kompozit malzemeler genellikle monolitik ve homojen bir dış katman ve kompozit malzemeden oluşan iç katmanlardan meydana gelen kompleks malzemelerdir. Bu kompozit malzeme grubunda nihai kompozit malzemenin özellikleri bileşenlerin özelliklerine bağlı olmanın dışında her bileşenin geometrik

dizaynında bağıdır. Yapısal kompozit malzemeleri genel olarak lamine kompozitler ve sandviç kompozitler olarak iki temel gruba ayırmak mümkündür [26].

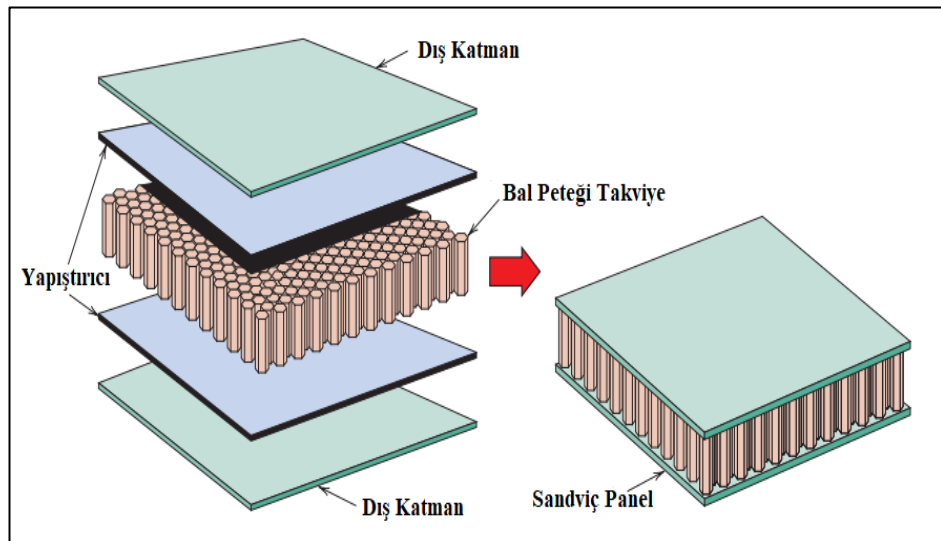
Lamine kompozit malzemeler, iki boyutlu ahşap, metal ya da fiber takviyeli polimerik levha veya panellerin üst üste istiflenmesiyle üretilen bir kompozit malzeme grubudur. Levha veya paneller mukavemet artışı istenen yöne bağlı olarak istiflenerek laminasyon işlemiyle biraraya getirilir. Bazı yönlerden dezavantajları bulunan farklı malzemelerin üstün özelliklerinin kombine edilerek birçok yönden avantajlı malzemeler üretme fikrinin bir ürünü olarak bu malzemeler ortaya çıkmıştır. İnşaat, havacılık, otomobil, spor ve uzay endüstrileri gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılan malzemeler haline gelmişlerdir. İnce ahşap plakaların farklı doğrultularda biraraya getirilmesiyle oluşan kontraplak, polimer bir matris içerisine takviye edilmiş fiberlerden oluşan prepreglerin istiflenmesiyle oluşan tabakalı kompozitler ve yekpare metal levhaların arasına takviye edilen fiber dolgulu polimerik kompozitlerden oluşan fiber metal lamine kompozitler bu kompozit grubunun en temel örnekleridir [26–28]. Şekil 2.7. ve Şekil 2.8’ de tabakalı kompozitler ile bal peteği çekirdekli sandviç panelin sembolize edilmiş halleri görülmektedir.

Bir yapısal kompozit sınıfı olarak kabul edilen sandviç paneller, hafif kirişler veya nispeten yüksek sertlik ve mukavemete sahip paneller olarak tasarlanan malzemelerdir. Bir sandviç panel iki dış tabaka arasında dış katmanlardan daha kalın aramid ya da alüminyumdan yapılmış bir çekirdek kısmın birbirlerine yapıştırılmasıyla elde edilir. Dış tabakalar nispeten sert ve güçlü bir malzemedir, tipik olarak alüminyum alaşımlarından, elyaf takviyeli plastiklerden, titanyum, çelik veya kontrplaktan yapılır; yapıya yüksek sertlik ve mukavemet kazandırır ve yüklemeye kaynaklanan gerilme ve basınç gerilmelerine dayanacak kadar kalın olmalıdırlar. Çekirdek malzeme hafiftir ve düşük elastisite modülüne sahiptir. Çekirdek malzemeler tipik olarak üç kategoriye ayrılır: bunlar sert polimerik köpükler (yani fenolikler, epoksi, poliüretanlar), ahşap (balsa ağacı vb.) ve bal peteği şeklindeki yapılardır. Yapısal olarak, çekirdek kısmı bazı özelliklere sahip olmalıdır. Her şeyden önce, dış katmanlar için sürekli destek sağlayacak dayanıma sahip olmalıdır. Ek olarak, enine kesme gerilmelerine dayanacak yeterli kesme mukavemetine sahip olmalı ve ayrıca

yüksek kesme dayanımı sağlayacak (panelin bükülmesine karşı koymak için) kadar kalın olmalıdır [26–28].



Şekil 2.7. Lamine kompozit üretimi için fiber takviyeli polimerik kompozitlerin istiflenmesi [26].



Şekil 2.8. Bal peteği çekirdekli sandviç panelin yapısını gösteren şematik diyagram [26].

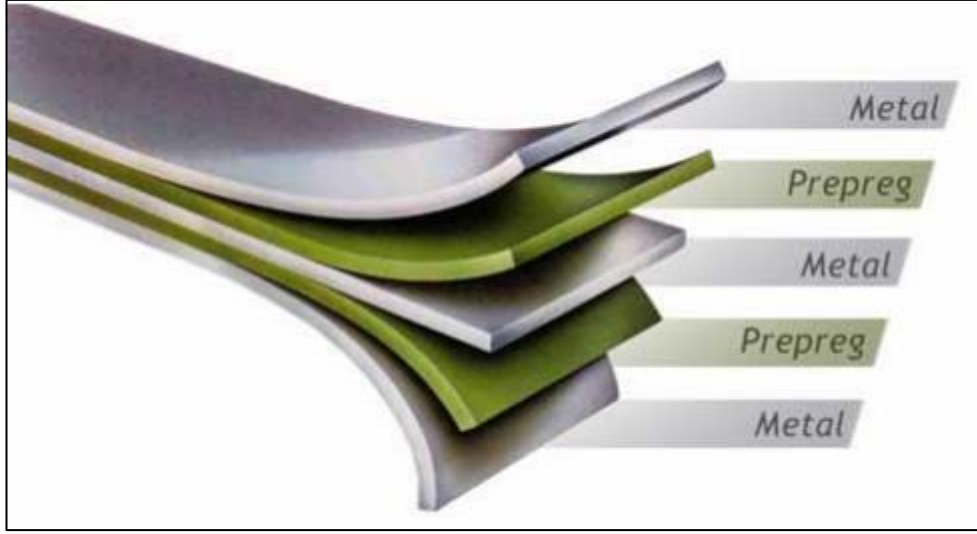
BÖLÜM 3

FİBER METAL LAMİNE (FML) KOMPOZİTLER

Yapısal bileşenlerin ağırlığının azaltılması farklı endüstriyel sektörlerin temel amacıdır. Bu temel amaç ise birincil yapısal bileşenler için fiber kompozitlerin uygulama alanlarının artmasına yol açmıştır. Bu hedefi amaçlayan yeni ve hafif bir malzeme grubu olan fiber / metal lamine kompozitler (FML) geliştirilmiştir. Yapısal kompozit malzemeler grubunun bir alt grubu olan tabakalı kompozit malzemeler sınıfına dahil edebileceğimiz fiber metal lamine kompozitler, mevcut yapısal malzemelere kıyasla performansı için yaygın olarak araştırılan bir malzeme grubudur [29–31].

Endüstriyel ve yapısal uygulamaların çoğunda malzeme seçimindeki önemli parametreler özgül dayanım, ağırlık ve maliyettir. Fiber Metal Lamine kompozitler (FML), fiberle güçlendirilmiş plastik bir katmanı sandviçleyen metal katmanların kombinasyonundan oluşan hibrit bir kompozit yapı ailesidir. Genellikle kullanılmakta olan metal alüminyum, magnezyum veya titanyumdur. Elyaf takviyeli tabaka ise cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf takviyeli kompozittir. FML' ler, geleneksel kompozit lamineye kıyasla yüksek korozyon direnci, olağanüstü mukavemet / ağırlık oranı gibi mükemmel mekanik özellikler sağlarlar [32,33]. Şekil 3.1.' de fiber metal lamine kompozit sembolik olarak görülmektedir.

Fiber Metal Lamine Kompozitler halihazırda havacılık ve uzay sanayinde yoğun şekilde kullanılan malzemelerdir. Alüminyum matrisli ve fiber takviyeli kompozitler (ARALL, CARALL, GLARE) ticari olarak üretilmekte ve sektörde kullanılmaktadır. Fakat alternatif metal alaşımlarıyla veya farklı fiber takviyelerle lamine kompozit malzeme üretimi hala gelişmeye açık bir alan olarak cazibesini korumaktadır.



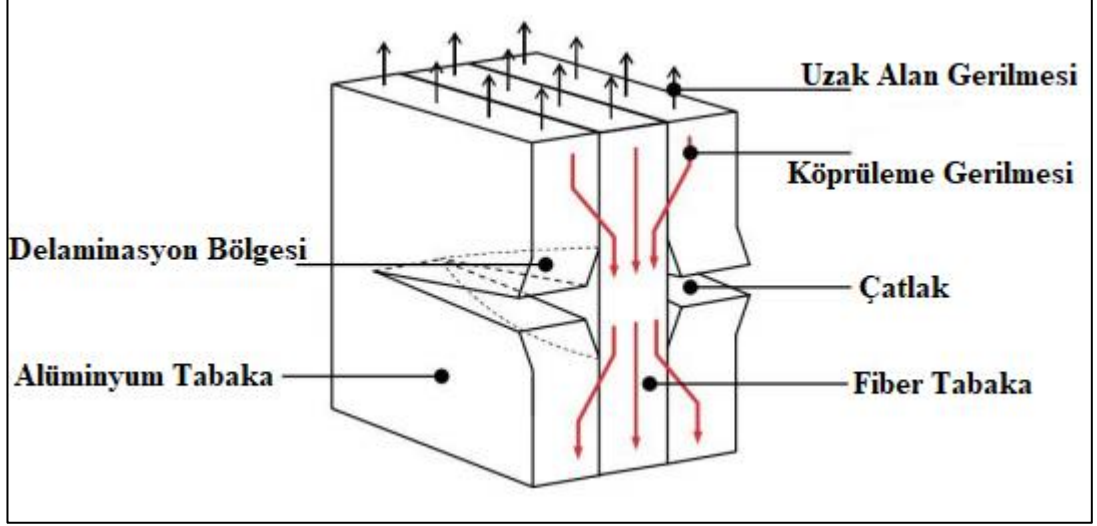
Şekil 3.1. Fiber metal lamine kompozitin sembolik gösterimi [30].

3.1. FML KOMPOZİTLERİN TARİHÇESİ

1970' lerden bu yana, havacılık yapılarındaki geleneksel alüminyum alaşımlarının yerini alabilecek daha hafif malzemeler ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Optimal bir yapısal tasarım için yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek elastisite modülünü geliştirilmiş tokluk, korozyon direnci ve yorulma özellikleri ile birleştiren yeni bir malzemeye ihtiyaç duyulmaktaydı [34,35].

1978 yılında, Ulusal Havacılık ve Uzay Laboratuvarı ve Hollanda Delft Teknoloji Üniversitesi'nde alüminyum alaşımlarının yorulma performansını artırmak için araştırmalar yapılmaktaydı. Lamine edilmiş plakaların yorulma davranışının iyileştirilmesi adhezif tabakalara yüksek mukavemetli bir aramid elyaf ilave edilerek elde edilmiştir. Yine adhezif bir şekilde bağlanarak lamine olarak üretilen kompozitlerde yekpare levhalara göre çatlak ilerleme oranının azaldığı tespit edilmiştir. Lamine kompozit malzemelerin her bir adhezif katmanının çatlak ilerlemesi açısından bölücü özelliği göstererek önemli avantajlar sağladığı tespit edilmiştir. Bu mekanizmanın şematik gösterimi Şekil 3.2.' de görülmektedir. Tüm bu çalışmalar sonucunda Hollanda Delft Teknoloji Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Fakültesi'nde ilk fiber metal lamine kompozit malzeme olan ARALL' ı tanıttılar. 1984 yılında, iki uluslararası patent kabul edildi ve bu malzeme yeterince güven kazandıktan

sonra Alcoa Company tarafından dört farklı tipte standart ARALL' ın pilot üretimine başlandı [36,37].



Şekil 3.2. Fiber metal lamine kompozitlerde gerilim köprüleme mekanizması [30].

Daha sonra yine Delft Teknoloji Üniversitesi'nde ARALL' a göre peklığı daha yüksek olan ve karbon fiber içeren CARALL üzerine çalışmalar başlamıştır. Fakat son araştırmalar, CARALL laminatlarının uçuş simülasyonu yorulma testleri sırasında yüksek gerilme seviyelerinde lif yetmezliği olduğunu ve bu da kötü yorulma performansı sergilediklerini göstermiştir. Karbon fiberlerin sınırlı kopma uzaması değerlerine sahip olmasının (% 0,5 – 2) bir dezavantaj olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, monolitik alüminyum alaşımına kıyasla çentik davranışına karşı daha duyarlıdır. Ayrıca nem ortamında karbon fiberler ve alüminyum levha arasındaki galvanik korozyon sorunu nedeniyle CARALL ile ilgili daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir [34,38].

1990' da ARALL laminatlarını iyileştirmeye yönelik bir girişim olarak aramid fiberlerin yerine yüksek dayanıma sahip cam elyafların kullanıldığı ve GLARE ismi verilen yeni bir lamine kompozit çeşidi başarıyla geliştirilmiştir. AKZO ve ALCOA ortak girişimi 1991 yılında GLARE üretmek ve ticarileştirmek için faaliyete geçmiştir [5,37].

3.2. FML KOMPOZİTLERİN SINIFLANDIRILMASI

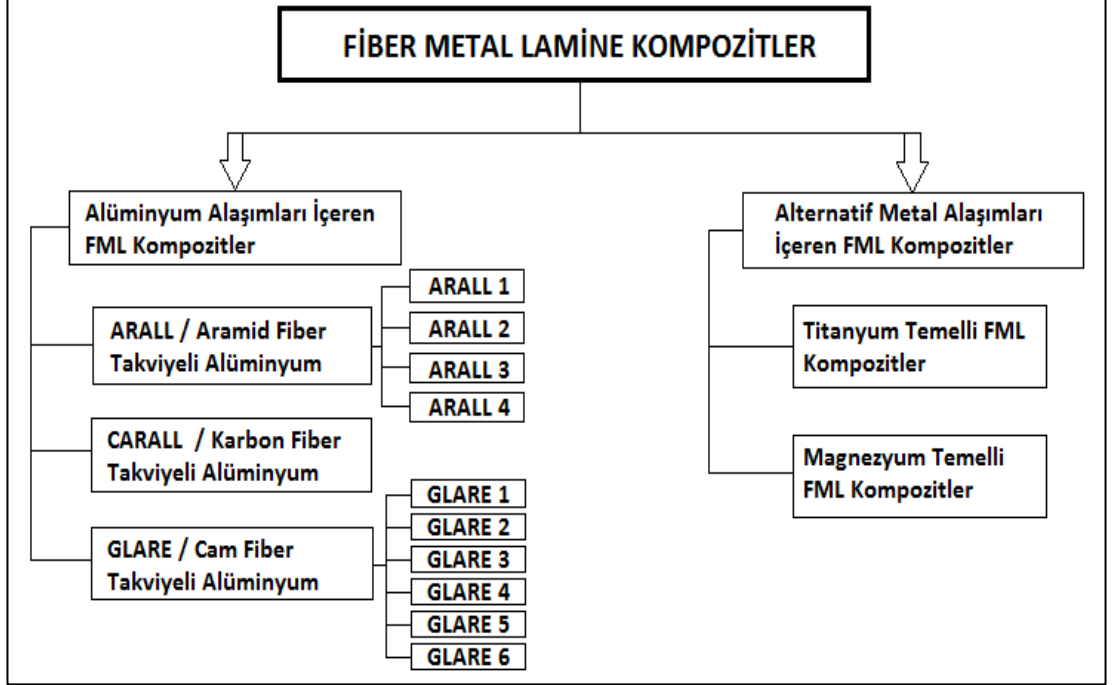
FML'ler üzerine yapılan çok sayıda araştırma faaliyeti birçok farklı lamine kompozit malzeme türünün doğuşuna sebep olmuştur. Takviyelerin yerleşimine bağlı olarak bir FML iki tipte olabilir: Tek Yönlü Hibrit Laminat ve Çapraz Döşeli Hibrit Laminatlar. Çapraz döşeli laminatlar darbe ve hasar direnci açısından nispeten daha iyidir. Tek yönlü laminatlarda fiberler 0° veya 90° yönlerinde bulunurken, çapraz döşeli laminatlarda fiberler tekstil kumaşlarına benzer şekilde bükülmüş halde bulunurlar [39,40].

Laminat olarak kullanılan malzemeye bağlı olarak FML aşağıdaki tiplerde olabilir: Titanyum bazlı FML, Magnezyum bazlı FML ve Alüminyum bazlı FML. CARALL, GLARE ve ARALL, alüminyum esaslı laminat sınıflarıdır. Dört tip ARALL ve altı tip GLARE vardır, bunların her biri aynı şeyi üretmek için kullanılan alüminyum tiplerine bağlı olarak belirli özelliklere sahiptir. Laminat olarak seçilen malzemeler, yüksek mukavemet, akma mukavemeti, darbe direnci gibi üstün mekanik özelliklerinden ödün vermeden FML'nin ağırlığında azalmaya katkıda bulunacak şekilde seçilmektedir. Magnezyumun darbe direnci ve sertlik gibi bazı mekanik özellikleri alüminyum ve titanyumdan daha düşüktür bu nedenle yüksek mukavemet gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilir. Alüminyum ise iyi özgül dayanım, yorulma ve korozyon direnci gibi avantajlara sahiptir [41–45].

Kullanılan takviye türlerine göre FML türleri şöyledir: aramid takviyeli laminat (ARALL), karbon fiber takviyeli laminat (CARALL) ve cam fiber takviyeli laminat (GLARE). Aramid son derece hafiftir ve mükemmel süneklik ve tokluk özelliklerine sahiptir, ancak maliyetinin yüksek olması, uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Cam ve karbon fiber, nispeten daha düşük maliyetleri ve üstün mekanik özellikleri sayesinde daha çok tercih edilirler [41].

FML'ler yapıyı oluşturan metal ve kompozit plakaların döşenme şekline göre de sınıflandırılabilir. 2/1, 3/2 gibi sembolik gösterimler FML'leri sınıflandırırken sıklıkla kullanılmaktadır. Semboldeki ilk rakam metal plaka sayısını, ikinci rakam ise metal

plakalar arasına yerleşen kompozit plaka sayısını temsil eder [46–48]. Şekil 3.3.' te FML'lerin genel kabul görmüş sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 3.3. FML'lerin sınıflandırılması.

3.3. FML KOMPOZİTLERİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

FML'lerin avantajları şunlardır;

- FML'ler yapılarında bulunan fiberlerin kompozitin herhangi bir yerinde başlayabilecek bir çatlakın ilerlemesini kısıtladıkları ve köprüleme görevi gördükleri için yüksek yorulma direncine sahiptirler [49,50].
- FML'ler yüksek yük taşıma dayanımına sahip monolitik metal plakalar ve yüksek dayanıma ve sertliğe sahip fiberler sayesinde yüksek dayanıma sahip yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır [49,51].
- FML'ler kendi yapılarında bulunan metal alaşımlarından daha iyi kırılma tokluğuna ve daha düşük yorulma çatlak ilerleme özelliklerine sahiptir [52].
- FML'ler konvansiyonel alüminyum alaşımlarıyla kıyaslandığında daha iyi darbe direncine sahiptirler. FML'lerdeki darbe deformasyonunun testipi ve

incelemesinin kolay olması onarım işlemleri açısından diğer kompozit malzemelere göre avantaj sağlar [47,53].

- FML' ler yapısındaki metal levhaların içerisindeki kesme deformasyonları ve fiberlerde meydana gelen bölgesel deformasyonların etkisiyle yüksek enerji absorblama yeteneği kazanır [7,54].
- Epoksi bazlı polimer matrisi ve düşük yoğunluklu alüminyum levhalar sayesinde, FML' ler diğer malzemelere kıyasla ağırlık tasarrufu sağlayan bir yapısal malzemedir [37].
- Alüminyum dış katmanların bariyer etkisi nedeniyle, nispeten sert koşullar altında bile, polimer kompozitlere kıyasla FML kompozitlerde nem emilimi daha yavaştır. Ayrıca FML' lerin içindeki çeşitli alüminyum katmanlar arasındaki pregreg katmanları nem bariyerleri olarak işlev görebilir [5,50].
- Yukarıda belirtildiği gibi, FML 'lerin mükemmel nem direnci ve polimer bazlı fiber laminatların yüksek korozyon direnci, FML' lere mükemmel korozyon direnci sağlar [37,47,50,55].
- FML' ler mükemmel nem ve korozyon direncine sahiptir, çevresel koşulların bir sonucu olarak FML' lerin bozulması, metalik yapılara veya kompozit yapılara kıyasla önemli ölçüde daha düşüktür [49].
- FML' deki fiberlerin yüksek erime noktasına sahip olması (örneğin GLARE laminatlarındaki cam elyaflar 1100 °C' ye dayanabilir) yangının iç katmanlara nüfuz etmesini önler. Bu nedenle, FML' lerin yangına dayanıklılığı, fiber erime noktalarına bağlı olarak monolitik alüminyum alaşımlarından çok daha iyidir. FML' ler uçakta gövde malzemesi olarak kullanılmaktadır. İyi yangın direnci ile FML' ler, uçakları olası bir yangın durumunda güvenli bir şekilde tahliye etmek için yolculara yeterli zamanı sağlar [47,56].
- FML' ler, mevcut metalik yapılara göre önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlar. Ayrıca, bir bileşeni oluşturmak için gereken parçaların sayısı, aynı metal alaşım bileşenini oluşturmak için gereken parçaların sayısından çok daha az olabilir. Bu tip durumlarda ciddi oranda iş gücü tasarrufuna yol açabilir [34].
- FML' lerin iyi yorulma dirençleri nedeniyle, FML' ler için daha az onarım ve daha uzun bakım süreleri yeterlidir. Bu avantajlar FML' lerin bakım maliyetlerini azaltır [37].

FML' lerin dezavantajları ise şunlardır:

- Kompozit katmanlarda matrisi sertleştirmek için gereken uzun işlem döngüsü, epoksi esaslı fiber metal laminatlarla ilişkili en büyük dezavantajdır. Bu uzun kurlenme süresi, tüm üretimin döngü süresini artırır ve verimliliği azaltır [7,49,51].
- Üretim yönteminin kompleks oluşu ve üretimde kullanılan malzemelerin pahalı olması nihai kompozit malzemenin maliyetini artırır [57,58].
- Geri dönüştürülebilirlikleri monolitik metal malzemelere göre daha zordur [59,60].
- Şekillendirilebilirlikleri ve kaynak kabiliyetleri monolitik metal malzemelere göre daha zayıftır [61,62].

3.4. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

FML' ler geleneksel kompozit teknikleri kullanılarak imal edilir. Alüminyum tabakalar önce temizlenir ve epoksi ile güçlü bir bağ oluşturmak için yüzey işlemleri uygulanır. Yüzey işlemleri için başlangıçta kromik asit eloksal prosedürü kullanılıyordu, ancak ilgili bileşiklerin toksisitesi nedeniyle çevreye duyarlı daha farklı teknikler kullanılmaya başlandı. Alüminyum ve fiber / epoksi katmanları daha sonra istenen konfigürasyonda serilir ve epoksi için standart kür döngüsü kullanılarak bir ortamda kurlenir [63–65].

Kompozitleri imal etmek için kullanılan imalat teknikleri, ürünün nihai performansında, bileşenlerin seçimi kadar önemlidir.

FML' leri üretmek için kullanılan en yaygın işlem otoklav prosesidir. FML kompozitlerin toplam üretimi aşağıdaki önemli adımları içerir;

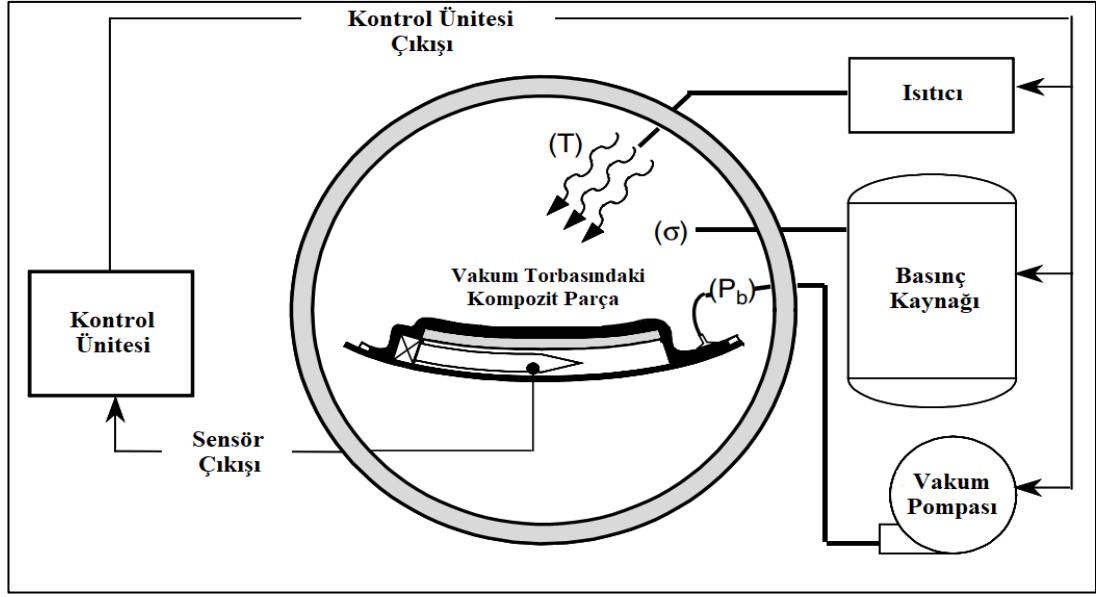
- Metal levhaların adhezif malzemeyle olan bağını iyileştirmek için bir yüzey işlemleri.
- El yatırma yöntemiyle reçineyi fiberlere yedirmek. (Prepreg kullanılıyorsa bu işlem zaten emprenye işlemleriyle önceden gerçekleştirilmiştir.)

- Sıkıştırma kalıplama makinesi veya vakum torbalama teknikleriyle eşit basınç uygulanması.
- Bundan sonra, akış konsolidasyonu prosesi de dahil olmak üzere kimyasal sertleştirme reaksiyonlarıyla beraber fiber / metal tabakalar arasındaki bağ da meydana gelir.
- Son adım genellikle ultrason, röntgen, görsel teknikler ve mekanik testlerle yapılan muayeneden oluşur [29,34,66–68].

3.4.1. Otoklavla Üretim Yöntemi

Otoklav kürlenme, havacılık endüstrisinde yüksek kaliteli laminatlar üretmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Otoklav yöntemi genellikle büyük ebatlı kompozit malzemelerin imalinde kullanılan bir yöntem olmakla beraber minimum porozite ve yüksek ürün kalitesi elde etmeye yarayan bir üretim yöntemidir. Otoklav silindirik bir şekle sahip, sıcaklık ve basınç üretebilen metal bir kaptır. Elektriksel kaynaklarla indirekt ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Bu sistemde parça üzerine izostatik gaz basıncı etki ettiğinden kompleks geometriye sahip parçaları üretmek mümkündür. Otoklavda kürlenecek parça hareketli bir ray sistemi ile otoklav içerisine yerleştirilebilir [69,70].

FML kompoziti oluşturan yüzey işlemi uygulanmış metal levhalar ve reçine emdirilmiş fiberler (el yatırması yöntemiyle veya prepreg olarak) önceden tasarlanan istif sırasıyla biraraya getirilir. Biraraya getirilen, istiflenmiş metal ve kompozit plakalar bir vakum torbasının içerisine yerleştirilir. Hareketli sehpa üzerine yerleştirilen istiflenmiş malzeme otoklavın içerisine sürülerek sızdırmaz kapak kapatılır. Bu işlemlerden sonra kürlenme aşamasına geçiş için vakum yapılır ve kürlenme işlemi için gerekli sıcaklığa çıkılır. Otoklav içerisindeki parçaya basınç uygulanırken sıcaklık artmaya devam eder. Kürlenme işleminin sonuna kadar sıcaklık ve basınç sabit tutulurak 2-3 saat beklenir. Sonrasında ısıtma durdurularak oda sıcaklığında ihtiyaca göre basıncı kesmeden birkaç saat daha kürlenmenin devam etmesi için beklenir. Ve sonrasında kürlenmiş kompozit malzeme otoklavın içerisinden alınır [69,70]. Şekil 3.4.' te bir otoklav sisteminin şematik hali görülmektedir.



Şekil 3.4. Bir otoklav sisteminin şematik gösterimi [71].

3.4.2. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

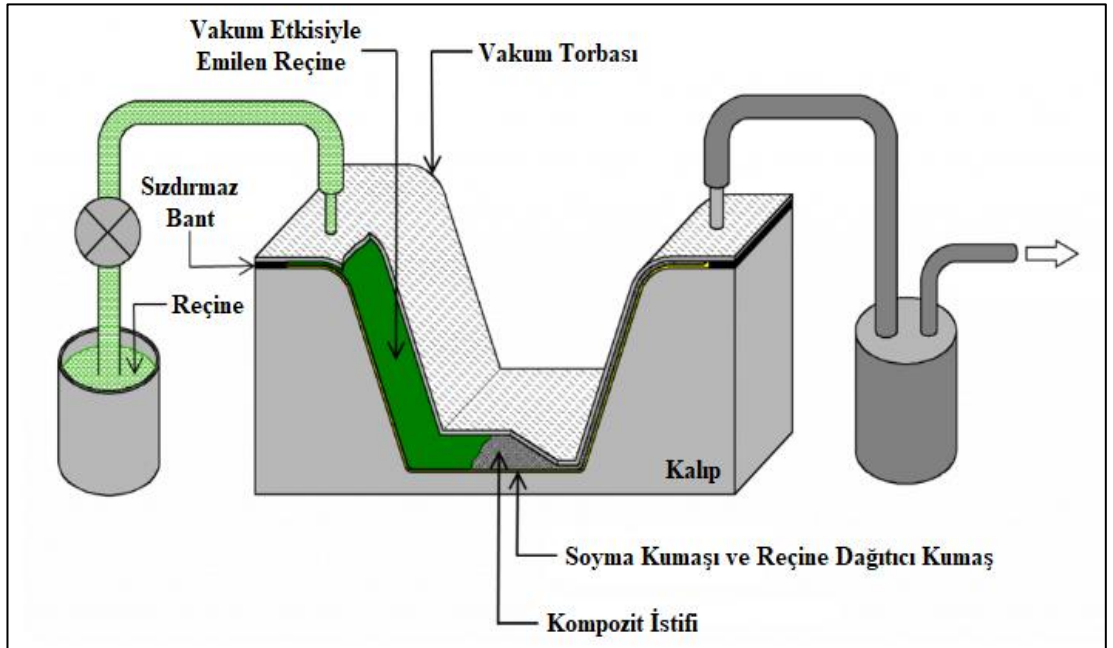
Reçine transfer kalıplama yöntemi havacılık, denizcilik, parça imalatı, demiryolları ve otomotiv gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bir kompozit üretim yöntemidir. Reçine infüzyon işlemi, kalıbın altındaki preformu kalıbın çıkışından emilen negatif basınçla ıslatan dinamik bir reçine akış işlemidir. Kullanılan sarf malzemelerinin neden olduğu kirlilik ve kalıp içinde kalabilen hava boşlukları, nihai ürünün optimum ıslatma özelliklerinin yanında mekanik özelliklerini de ciddi şekilde etkiler. Reçine akışı üstten görülebilmesine rağmen, işçilik ve kurulum planlama sırasında reçinenin enine ve düzlem içi akışının optimize edilmesi gerekmektedir [69,72].

Otoklav yöntemiyle kompozit üretiminde nihai parçada minimum seviyede porozite oluşur ve mükemmel yakın mekanik performanslar elde edilebilir. Fakat bunun yanısıra uzun süren ve pahalı bir üretim yöntemidir. Dolayısıyla otoklav işleminin alternatifi olabilen üretim yöntemlerinden biri reçine transfer kalıplama işlemidir. Porozite içeriğinin azaltılması ve preformun ıslatma özelliklerinin iyileştirilmesi konusunda çalışmalar hala devam etmektedir [69,72].

Metal bir kalıp üzerinde istiflenen metal ve kompozit plakalar vakum torbası içerisinde diğer vakum ekipmanları ile birlikte vakum pompası yardımıyla vakumlanır. Daha sonra sertleştirici ile karıştırılmış reçine tank içerisinde vakumlanmış preforma emdirilir. Vakum torbasının diğer ucundan reçine çıkışı başladığında işlem sonlandırılır. Daha sonra fırında veya oda sıcaklığında kürleme işlemi gerçekleştirilerek kompozit üretimi tamamlanır [69,72]. Şekil 3.5.' te reçine transfer kalıplama yönteminin şematik hali görülmektedir.

Reçine infüzyon işlemi sırasında kullanılan sarf malzemeleri aşağıdaki gibidir;

- Reçine
- Sertleştirici
- Sızdırmazlık Bandı
- Vakum Torbası
- Kalıp Ayırıcı Macun
- Soyma Kumaşı
- Vakum Battanisi
- Vakum Pompası

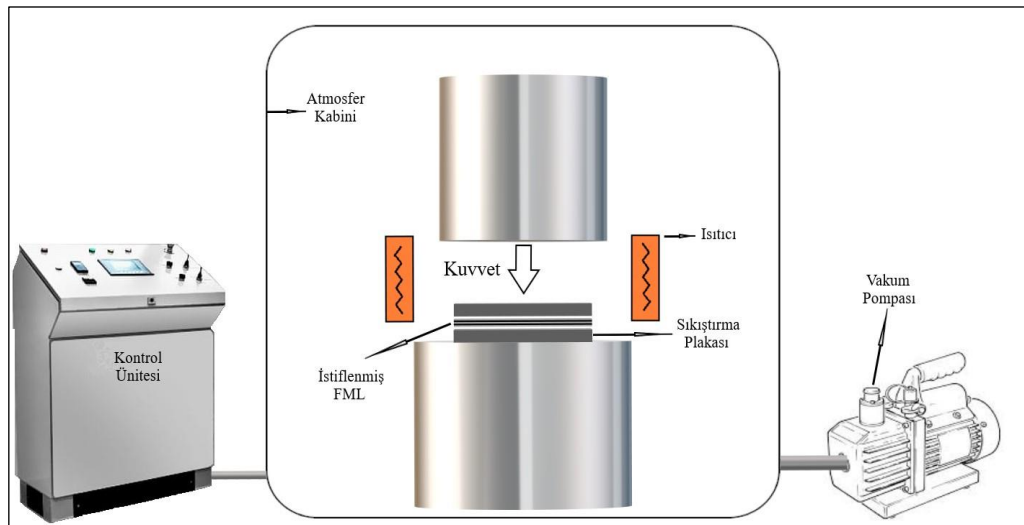


3.4.3. Sıcak Presleme Yöntemi

Sıcak presle kompozit malzeme üretim yöntemi diğer yöntemlere alternatif hızlı ve pratik bir yöntemdir. Bu yöntemde genellikle sabit bir alt tabla üzerinde hareketli ve yük uygulayabilen bir koç bulunur. Isıtıcı elemanlar eğer varsa atmosfer kabini içinde içerisini ayarlanan sıcaklık değerlerine ısıtır. Atmosfer kabini mevcut değilse alt ve üst koç içerisinde bulunabilen rezistanslar ısı iletimi yoluyla arada preslenen kompozit malzemeyi ısıtır. Atmosfer kabini olan sıcak presleme sistemlerinde vakum pompası yardımıyla vakum tesiriyle porozite giderimi nihai parçanın kalitesini olumlu etkiler. Bu üretim yönteminde düz numuneler üretmenin yanında uygun kalıp tasarımı yapılırsa kompleks geometrilere sahip parçalar da üretmek mümkündür [74].

Otoklavla daha büyük parçalar üretmek mümkündür. Sıcak presle kompozit üretiminde ise pres cihazlarının elverdiği ölçülerde kompozit parçalar üretilebilir. Boyutsal açıdan kısıtlamalara sahip olsada bu yöntem hızlı ve maliyet açısından uygun olduğu için alternatif bir üretim yöntemi olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada 1200 °C' ye kadar çıkabilen ve 25 ton basınç uygulayabilen atmosfer kabini bir sıcak pres cihazı kullanılmıştır. İstiflenen kompozit malzemeler metal sıkıştırma plakaları arasında belirlenen sıcaklık ve basınç değerlerinde kürlenmiştir. Şekil 3.6.' da bu çalışmada kullanılan sıcak pres cihazının şematik hali görülmektedir.



Şekil 3.6. Sıcak presle üretim yönteminin şematik gösterimi.

3.5. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE UYGULANAN YÜZEY İŞLEMLERİ

FML kompozitlerin üretimindeki önemli bir parametre olan metal yüzeylerin modifikasyonu için uygulanan tüm işlemler şu şekilde gruplandırılabilir:

- Mekanik işlemler.
- Kimyasal işlemler.
- Elektrokimyasal işlemler.
- Bağlayıcı ajan işlemleri.
- Kuru yüzey işlemleri.

FML üretirken metal veya fiberlere yüzey işlemi gerçekleştirmeden önce yağ ve kir giderme işlemi yapmak önemlidir. Çünkü yüzeyde bulunması muhtemel yağ veya kir kimyasal bağlanma mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Yağ giderme aşaması genellikle trikloretilen, perkloretilen veya diklorometan gibi klorlu çözücüler veya alternatif olarak metil etil keton, metanol, izobütanol, toluen, etanol veya aseton gibi çözücülerle gerçekleştirilir [75–77].

3.5.1. Mekanik Yüzey İşlemleri

Yüzey hazırlama işlemleri çerçevesinde bir ön hazırlık adımı olarak yüzeyde makro seviyede pürüzlülük elde etmek, istenmeyen oksit tabakasını kaldırmak veya farklı bir yüzey dokusu elde etmek için mekanik aşındırma işlemi uygulanır. Bu işlem genellikle farklı grit ebatlarındaki zımpara kağıtlarıyla el ile veya mekanik olarak gerçekleştirilir. Mekanik yüzey işlemi yüzeyin ıslatma özelliklerini iyileştirme, yüzey topoğrafyasını değiştirme gibi fizikokimyasal değişikliklere sebep olur [78,79].

Mekanik yüzey işlemleri, genellikle yağ giderme ve devamında gelen aşındırma yöntemlerini içerir. Alümina, silis kumu veya cam partikülleri kullanılarak kumlama ile bir ön işleme tabi tutulan, zımpara kağıdıyla zımparalanan ya da shot peening gibi mekanik işlemlerle metal levha yüzeyinin topoğrafyası 'tepe ve vadi' tipi bir morfoloji ile değiştirilir. Kum püskürtme veya diğer mekanik aşındırma yöntemleri, yapıştırma

seviyelerinde ciddi bir artış sağlamaktadır. Bu konuda birçok çalışma mevcuttur ve çoğu da mekanik yüzey işlemlerinin metalin yüzey aktivasyonunda gelişim sağlayarak ıslatma kabiliyetini artırdığını ve yapışma özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur [76,79–82].

Bu çalışmada mekanik yüzey işlemlerinden biri olan shot peening (parçacık püskürtme ile dövme) işlemi kullanılarak Al ve Mg levhalara laminasyon öncesi yüzey işlemi uygulanmıştır.

3.5.2. Kimyasal Yüzey İşlemleri

FML üretiminde metal yüzeylerine uygulanan kimyasal yüzey işlemleri asitle dağlama temeline dayanır. Bu işlem, metal levhaların bir sülfürik asit ve potasyum dikromat çözeltisine daldırılmasını içerir. Tipik olarak, kimyasal yüzey işlemleri yağ giderme, alkali temizleme ve elektrokimyasal işlem arasında bir ara üretim aşamasıdır [78,79,83]. Farklı kromik-sülfürik asit işlemleri vardır ve bileşenlerin konsantrasyonu, uygulanan sıcaklık ve daldırma süresine göre farklılık gösterirler. Orijinal dağlama, düşük kromat konsantrasyonları ve kısa işlem süreleri içeren sülfokromat temelli asitlerle dağlama olarak bilinir. Otomotiv ve havacılık endüstrileri bu yöntemi yapıştırmadan önce tek başına bir yüzey işlemi veya eloksal yapışma işleminden önce bir ön işlem olarak kullanmaktadır. Avrupa Birliği'nin hurdaya ayrılan araçların veya yeni üretilecek araçların kromat içeriği ile ilgili getirdiği kısıtlamalar akademik çalışmaları da daha çevreci kimyasallar ile yüzey işlemi yapma konusunda yönlendirmiştir. Bu çerçevede fosforik asit ile yüzey işleme veya alternatif, çevreye daha az zarar veren kimyasal maddelerle yüzey işleme çalışmaları hala güncelliğini korumaktadır [84–87].

3.5.3. Elektrokimyasal Yüzey İşlemleri

FML üretiminde kullanılan metal plakaların yüzeyleri alkali çözeltiler veya organik çözücüler içinde yağdan arındırıldığında ve daha sonra sulu kromik-sülfürik asit çözeltileri içinde aşındırıldığında metal ve yapışkan arasında daha iyi yapışma elde edilir. Fakat bu ön yüzey işleminden sonra metal yüzeyinde meydana gelebilecek

herhangi bir korozyon bölgesi delaminasyona sebep olabilmektedir. Kromik-sülfürik asit dağlama işleminden sonra alüminyum yüzeyin yapıştırılmadan önce anodize edilmesi durumunda korozyon duyarlılığının azaldığı yapılan akademik çalışmalarla kanıtlanmıştır [88].

Elektrokimyasal yüzey işlemi belirli bir sıcaklıkta asidik bir çözeltili içerisinden doğru ya da alternatif akım geçirilmesi ile çözeltiliye daldırılan metal yüzeyinde ince bir oksit filmi oluşturma temeline dayanmaktadır.

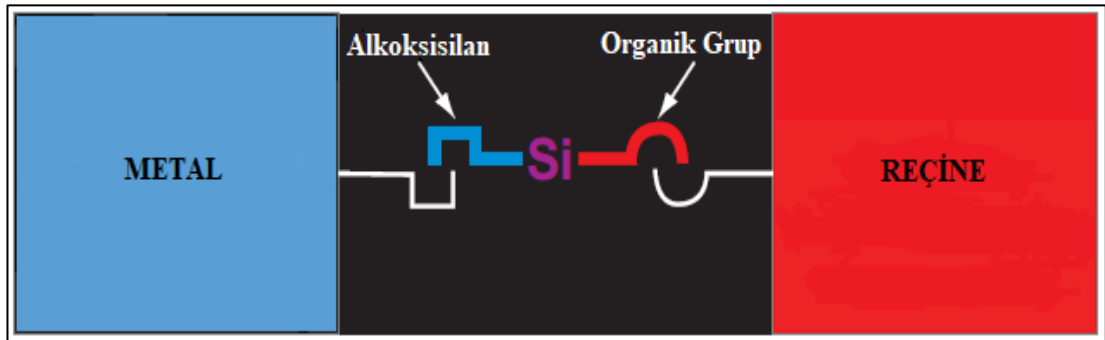
Adhezif bir şekilde yapıştırılmış alüminyum bağlantılarda optimum dayanıklılık elde etmek için, havacılık endüstrisinde anodizasyon işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Anodizasyon, uygulandığı metal yüzeyinde yüksek derecede mikro pürüzlülük ve hidrasyona karşı oldukça dirençli ince bir oksit filmi oluşturur [75]. Kromik asit, fosforik asit ve sülfürik asit anodizasyonu, hava taşıtı bileşenleri gibi kritik uygulamalarda yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının yapısal olarak adhezif bağlanmasında bir stabilizasyon işlemi olarak yaygın şekilde uygulanır [89]. Tüm doğru akım ya da alternatif akım anodizasyon prosedürleri, yağdan arındırma, kurum giderme ve deoksidasyon aşamalarını içeren karmaşık ve çok aşamalı işlemlerdir. Elektrokimyasal yüzey işlemleri ile ilgili akademik çalışmalar ve gelişmeler tüm hızıyla sürmektedir. evre duyarlılığı açısından borik asit vb. asitlerin kullanımı ya da farklı parametrelerin uygulanmasıyla bu yüzey işlemleri havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok sektörde yoğun bir şekilde kullanılmaya devam etmektedir [90–92].

3.5.3. Bağlayıcı Ajanlarla Yüzey İşlemleri

FML üretiminde metal veya fiber yüzeylerine uygulanabilen adhezif etkileşime olumlu katkı sağlayan silanlama ya da sol-jel gibi evre dostu bağlayıcı ajan teknikleri yakın zamanda popöler yüzey işlemleri arasına girmiştir [93].

Silan kaplamalar, alüminyum ve alaşımları, bakır, demir-elik, çinko ve magnezyum içeren alaşımlar gibi çeşitli metallerde kullanım için çevresel olarak sağlam, çok metalli yüzey ön işlemleridir [94]. Yapısal malzeme olarak kullanılan FML'lerin

arayüzey etkileşimini arttırmak için c-glisidoksipropiltrimetoksisilan gibi silanlar kullanılmaktadır. Arayüzey etkileşiminin artışı ise, metal (oksit) ile silan arasında stabil, kovalent bağların oluşmasına ve metal ile polimer arasında gerilim transferini kolaylaştıran bir ara modül veren ara faz oluşumu olasılığına bağlanmıştır [95,96]. Silanlama işlemi tek başına bir yüzey işlemi olarak veya daha karmaşık bir ön yüzey işleminin parçası olarak uygulanabilmektedir [81,97]. Fedel ve arkadaşları. [93], su bazlı silan yüzey işlemlerinin galvanizli çelik üzerindeki etkisini incelemiştir. İşlem öncesi biriktirme için üç farklı silan kullanmışlardır (glisidoksipropiltrimetoksisilan, tetraetoksisilan ve metiltrietoksisilan). Elektrokimyasal testler silan tabakasının sadece inorganik substrat ve organik kaplama arasında bir bağlayıcı ajan olarak işlev görmediğini, aynı zamanda su ve oksijene karşı iyi bir bariyer etkisi sağladığını göstermiştir. Rider ve Arnott [81], yaptıkları çalışmada silan tabakasının adhezif olarak yapıştırılmış bağlantıların hidrolitik stabilitesini desteklediğini ve kama testlerinde dayanım artışına sebep olduğunu açıklamışlardır. Silanlama işlemi sembolik olarak Şekil 3.7.' de görülmektedir.



Şekil 3.7. Silanlama işleminin adhezif mekanizmadaki işlevinin sembolik gösterimi [98].

Sol-jel' ler, genellikle elektronik, optik ve koruyucu kaplamalar olarak uygulanan, başta silanlar olmak üzere alkoksit öncüllerinin hidroliz / yoğunlaşma reaksiyonları ile oluşturulan organik-inorganik polimerlerdir. Bu kaplamalar kimyasal kararlılık, fiziksel dayanım ve çizilme direnci gibi önemli özelliklere sahiptir. Sol-jel işleminin uygulandığı yüzeyler, iyi termal ve elektriksel özelliklere sahip olurken, metallere uygulanış amacı ise oksidasyon, korozyon ve aşınmaya karşı daha dirençli olan nano-yapılandırılmış inorganik filmler oluşturmaktır [99]. Örnek olarak, Boegel EPII sol-jel

maddesi seyreltik bir sulu epoksi-silan ve zirkonyum alkoksitten oluşur. Bu karışım, metalik yüzeye uygulanan epoksi-silan ile birleştirilmiş ince bir inorganik zirkonyum oksit filmi oluşturmaktadır [100,101]. Bu işlemde zirkonyum, kovalent bir kimyasal bağ üretmek için metalik yüzeye reaksiyona girerken, epoksi-silan yapıştırıcı ile bağlanmak için reaktif bir organik grup sunmaktadır [98,100].

3.5.4. Kuru Yüzey İşlemleri

FML üretiminde metal levhalara uygulanan kimyasal yüzey işlemlerinin çevresel zararlarından kaçınmak için yapılan çalışmalar sonucunda bazı kuru yüzey işlem teknikleri geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları; lazerle yüzeyde tekstür oluşturma [100,102–104], plazma sprej kaplama [81,105–109] ve iyon demeti destekli biriktirme (ion-beam enhanced deposition) [110,111] işlemleridir.

Park ve arkadaşları [78], yaptıkları çalışmada alüminyum bir substratın morfolojisini ve mikro yapısını değiştirmek için lazerle tekstür oluşturma işlemini kullanmış ve bunun sonucunda da bağlanma mukavemetinin ve mekanik dayanımının arttığını belirtmişlerdir. İyon demeti destekli biriktirme işlemi, vakum altında yüksek enerjili argon iyonlarının püskürtüldüğü yüzeyi temizleyen ve değiştiren bir işlemdir. Bu işlemde önce kum püskürtme gibi bir yüzey aktivasyon adımı gereklidir. Bu işlemin uygulandığı numunelerde iyi bağlanma kuvvetleri elde edilmiş ve fosforik asit anodizasyonu ile karşılaştırıldığında kama dayanıklılığında iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir [110].

Plazma sprej kaplama işlemi, çevresel etki açısından geleneksel süreçlere bir alternatiftir. Plazma, elektronlar, iyonlar, atomlar, moleküller ve radikaller gibi yüklü ve nötr parçacıklar içeren iyonize bir gazdır. Soğuk ve sıcak olarak iki çeşit plazma vardır. Soğuk bir plazmanın çalışma basıncı genellikle düşük sıcaklıklarda (<773 K) kimyasal reaktif türlerin üretimine izin veren atmosferik basınçtan daha düşüktür. Sıcak plazma basıncı atmosferik basınçtan yüksek olduğu için sıcaklık 10^4 - 10^5 K arasındadır [89]. Soğuk plazma işlemi alüminyum yüzeyleri aktive etmek için etkili, temiz ve ekonomik bir alternatiftir [109]. Davis ve arkadaşları [105], yapmış oldukları çalışmada 60Al-Si/40 poliesterin (ağırlıkça) plazma sprej kaplama ile spesifik

uygulamalar için tasarlanabileceğini ve fosforik asit anodizasyonu işlemine eşdeğer bir performans sağlayarak alüminyum substratların yapıştırma işlemine daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. De Iorio ve arkadaşları [112] yapısal bağlantılarda yüzeysel adhezyonu arttırmak amacıyla polimerik malzemelerin (polioksifenilen-poliamid, polikarbonat-ABS) ve Al 6061 alaşımının yüzey özelliklerini değiştirmek için soğuk plazma işlemlerini incelemişler ve bu yöntemin başarılı bir alternatif yüzey işlemi olarak kullanılabilmesi sonucuna ulaşmışlardır.

3.6. FML KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada üretilen FML' lerde metal matris elemanı olarak 0,8 mm kalınlığında 2024-T3 alüminyum ve 0,8 mm kalınlığında AZ31 magnezyum levhalar kullanılmıştır. Metal matris elemanlarının arasına takviye fazı olarak karbon ve aramid fiber kullanılmıştır. Karbon ve aramid fiberler epoksi reçine ve polietereketon (PEEK) ile işlem görerek lamine kompozit malzeme üretiminde kullanılmıştır.

3.6.1. 2024-T3 Alüminyum Alaşımı ve Özellikleri

Havacılık ve uzay endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan Al-Cu-Mg alaşımları, öncelikle güvenceli kırılma tokluğu, geliştirilmiş kısa enine özellikler, nispeten yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci, vb. gerektiren uçak gövdesi imalat uygulamaları için geliştirilmiştir [113,114]. Örneğin, Al-Cu-Mg alaşım grubunun en yaygın olarak kullanılan serisi 2024-T3 alüminyum levhaların birincil kullanımı uçak yapıları, özellikle sürekli gerilmelere maruz kalan kanat ve gövde yapıları içindir. Alaşımın mükemmel özellikleri, sürünme yaşlanması işlemi sırasındaki çökeltilere bağlıdır [115,116].

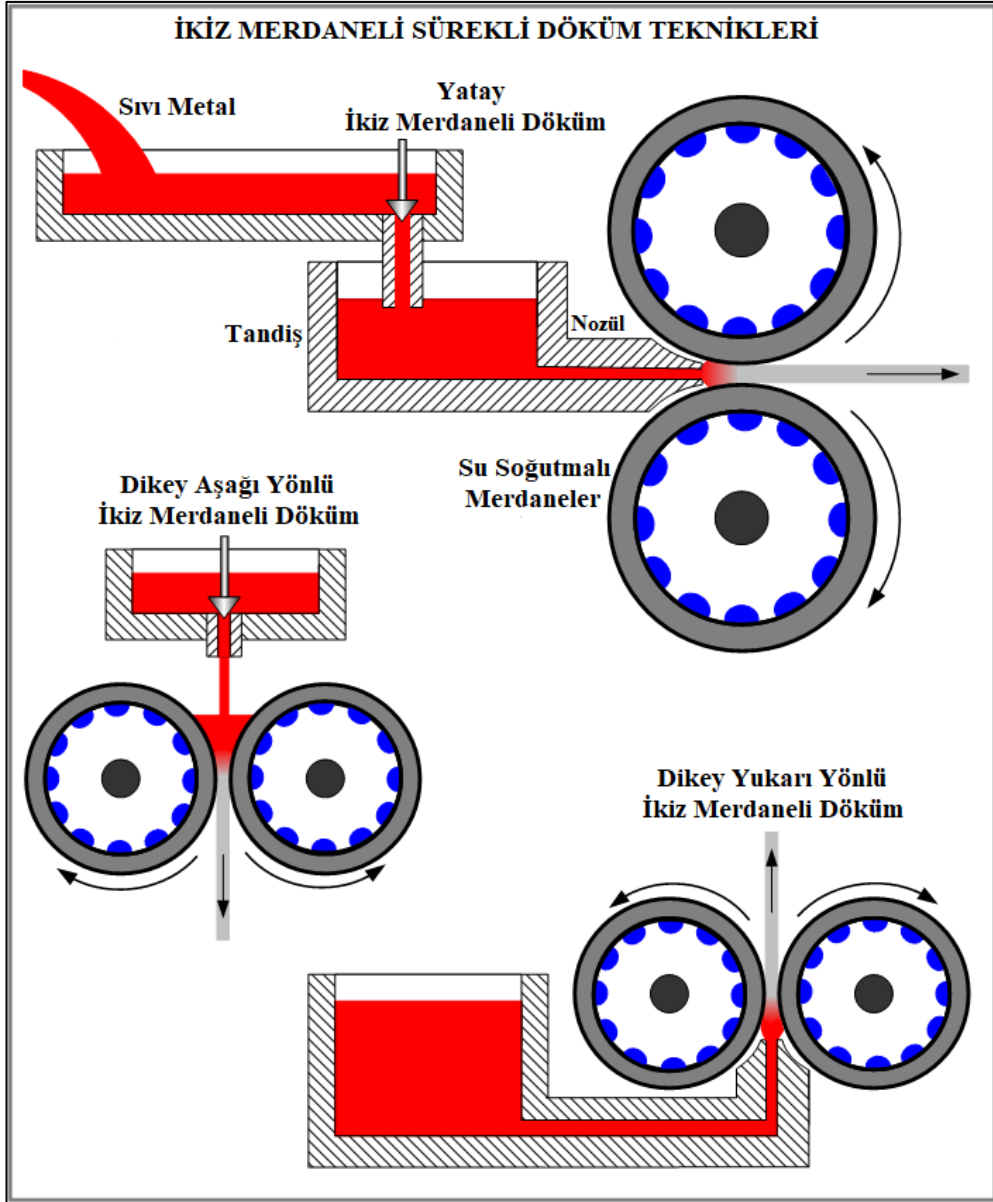
2024 alüminyum alaşımı, birincil alaşım elemanı olarak bakır içeren bir alüminyum alaşımıdır. Yüksek özgül mukavemet ve iyi yorulma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Sadece sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilir ve ortalama işlenebilirliğe sahiptir. Zayıf korozyon direnci nedeniyle, genellikle koruma için alüminyum veya Al 1Zn ile kaplanır, ancak bu işlem yorulma mukavemetini azaltabilmektedir. Eski

terminoloji sistemlerinde, 2XXX serisi alaşımlar duralumin olarak biliniyordu ve bu alaşım 24ST olarak adlandırılıyordu. 2024 alüminyum alaşımı yaygın olarak ekstrüde edilir ve ayrıca levha ve plaka formlarında da bulunur. 2024 alüminyum alaşımı, 2,78 g/cm³ yoğunluğa, %30 IACS elektriksel iletkenliğe, 73 GPa Young Modülü değerine sahiptir ve 500 °C 'de erimeye başlar [4]. 2024 alüminyum alaşımının bileşimi kabaca % 4,3-4,5 bakır, % 0,5-0,6 manganez, % 1,3-1,5 magnezyum ve yüzde yarıdan daha az silikon, çinko, nikel, krom, kurşun ve bizmut içerir [117–119]. Çizelge 3.1.' de T3 ve diğer kondüsyonlardaki 2024 alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.1. 2024-T3 ve diğer kondüsyonlardaki alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [120].

Isıl İşlem Koşulu	R _{p0.2} (Akma Dayanımı) [N/mm ²]	R _m (Çekme Dayanımı) [N/mm ²]	A (Kopma Uzaması) [%]	Sertlik HB	Sertlik HV
O	75	185	20	55	60
T3	340	475	18	120	125
T4	330	460	20	120	125
T6	345	427	5	125	130
T8	450	485	6	130	140

Bu çalışmada ALUSEM Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.' den temin edilen 0,8 mm kalınlığında 2024-T3 alüminyum levha kullanılmıştır. 2024-T3 alüminyum levhalar ikiz merdaneli döküm tekniğiyle üretilmektedir. Bu teknikte sıvı metal iki hadde merdanesi arasından hızlı bir şekilde soğutularak ve ezilerek geçerek direk levha formuna dönüşmektedir. Bu tekniğe ait sembolik gösterim Şekil 3.8.' de görülmektedir.



Şekil 3.8. İkiz merdaneli sürekli döküm yönteminin sembolik gösterimi [121].

3.6.2. AZ31 Magnezyum Alaşımı ve Özellikleri

Magnezyum, periyodik tablonun ikinci ana grubunu oluşturan alkalin toprak metallerine aittir. On sekizinci yüzyılda keşfedilmiş ve adını Türkiye’de bulunan Manisa (Magnesia) bölgesinden almıştır. Bu gümüş-beyazımsı metal, yer kabuğunda % 2,7 oranında ve doğada sekizinci en çok bulunan elementtir. Yüksek reaktivitesi nedeniyle, magnezyum doğada element şeklinde değil, sadece kaya yapıları, deniz

suyu ve göl salamuralarında yaygın olarak dağılmış kimyasal kompleksler şeklinde bulunur [122,123].

Magnezyum yapısal metaller içerisinde sahip olduğu $1,74 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluk değeri ile diğer birçok yapısal metale oranla en hafif olan metaldir. Hacimsel olarak kıyaslandığında aynı hacimdeki alüminyuma göre yaklaşık %35, çeliğe göre yaklaşık %80 daha hafiftir. Yapısal bir metal olarak hafif olması, özgül dayanımının iyi olması gibi olumlu özellikleri magnezyum metalini savunma, uzay, havacılık ve otomotiv gibi birçok endüstri kolunda kullanılabilir hale getirmiştir. Bu durumun arka planında ise bahsi geçen endüstrilerde ortak amaç olan ağırlık ve emisyon değerlerini düşürüp faydalı ağırlık ve toplam performansı artırma gayesi yatmaktadır [124,125].

Magnezyumun doğal avantajları arasında düşük yoğunluğu, yüksek özgül mukavemeti, yüksek sertliği, iyi elektriksel iletkenliği, iyi ısı iletimi ve iyi titreşim sönümleme kabiliyeti yer almaktadır. Kolay işlenebilme, döküm kolaylığı, kolay şekillendirilebilme ve üstün geri dönüşüm özellikleri sayesinde, magnezyum büyük hacimli uygulamalar için çok çekici bir malzeme olarak görülür. Son yıllarda magnezyuma olan ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bu da birincil magnezyum metali üretmenin daha verimli yollarını ve yeni alaşımları araştırmak, uygulama alanlarını genişletmek için akademik araştırmaları ve endüstriyel denemeleri teşvik etmiştir [122,123].

Magnezyum sahip olduğu doğal avantajlar kadar dezavantajlara da sahip bir metaldir. Düşük elastik modüle sahip olması, sahip olduğu sıkı paket hegzagonal kristal yapısından dolayı düşük soğuk işlenebilirlik ve tokluk değerine sahip olması, yüksek sıcaklık değerlerinde düşük mukavemet ve sürünme dayanımına sahip olması, yüksek reaktivitesinden dolayı korozyon direncinin kötü olması bu dezavantajlara örnek gösterilebilir [123].

Magnezyum metalinin ticari olarak üretilen ve çeşitli sektörlerde kullanılan birçok alaşımı vardır. Sahip olduğu alaşım elementinin ismine ve oranına göre her alaşım farklı şekilde isimlendirilir. Bu çalışmada AZ31 alaşımı levha formunda kullanılmıştır.

Kullanılan AZ31 levhanın kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.2.' de mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3.' te görülmektedir.

Örnek olarak bu çalışmada kullanılan AZ31 alaşımının açıklaması aşağıda gösterilmektedir.

- A → Al' yi yani oran olarak en fazla olan alaşım elementini simgeler.
- Z → Zn' yi yani ikinci olarak en çok kullanılan alaşım elementini simgeler.
- 3 → Al oranının % 2,5-3,5 aralığında olduğunu simgeler.
- 1 → Zn oranının % 0,7-1,3 aralığında olduğunu simgeler [124,126].

Çizelge 3.2. AZ31 magnezyum alaşımının kimyasal kompozisyonu [125].

Element	Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mn	Mg
% Ağırlık Oranı	3.069	1.133	0.019	0.001	0.131	0.486	Geri kalan

Çizelge 3.3. AZ31 magnezyum alaşımının mekanik özellikleri.

Alaşım	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% Uzama	Sertlik (HB)
AZ31	175-180	280-285	16-17	50-55

3.6.3. Karbon Fiber ve Özellikleri

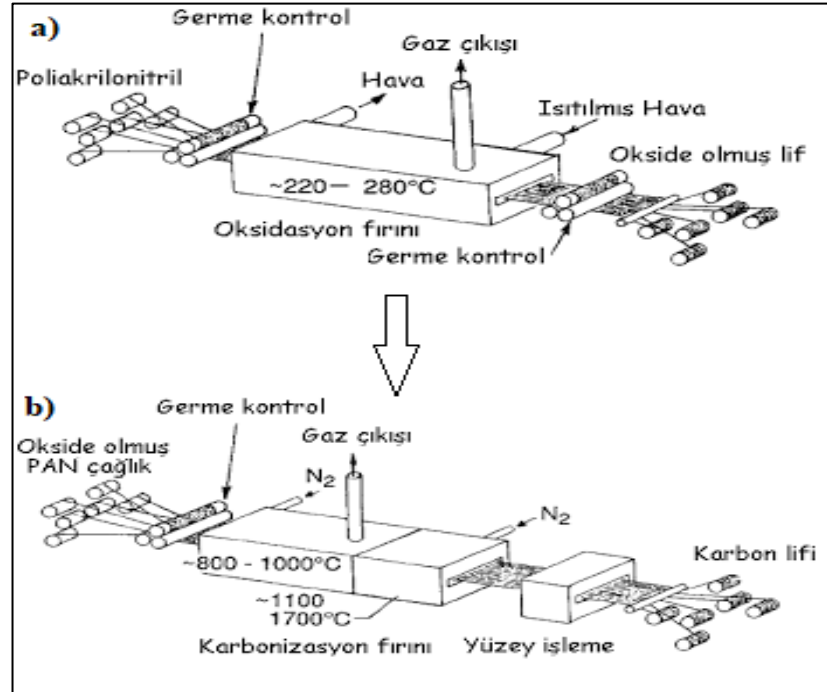
Karbon fiberler, karbon atomlarının birbirlerine uzun bir zincir şeklinde bağlanması ile oluşur. Oluşan karbon lifleri 5-10 μ çapında olmakla birlikte son derece sert, güçlü ve hafiftir ve birçok yapıda mükemmel yapı malzemeleri olarak kullanılır. Karbon fiber malzeme, iplik, tek yönlü, dokuma ve şerit formunda olmak üzere çeşitli formlarda bulunur ve bunlar da kompozit parçalar oluşturmak için kullanılırlar. Karbon fiber parçanın mekanik özellikleri çeliğe ve ağırlığı ise plastiğe yakındır. Bu nedenle, karbon fiberden üretilen bir parçanın mukavemet / ağırlık oranı (ve ayrıca sertlik / ağırlık oranı), çelik veya plastikten çok daha yüksektir [127].

Karbon fiberlerin yoğunluğu yaklaşık $2,27 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Epoksi reçine ile mükemmel uyum göstermesi sebebiyle kompozit malzeme üretiminde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Karbon fiberler zift, PAN ve rayon bazlı olmak üzere 3 gruba ayrılmaktadır. Zift ve rayon bazlı karbon fiberler mekanik özellikler açısından PAN bazlı karbon fiberlere göre daha zayıftır. Karbon fiberlerin üretim aşamaları aşağıdaki gibidir:

Oksidasyon: Bu işlemden elyafın yapısındaki hidrojen kurtulmak için elyaflar $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılır.

Karbonizasyon: Bu işlemden inert atmosferde elyaflar yüksek sıcaklıklara (yaklaşık $3000 \text{ }^\circ\text{C}$) çıkarılarak tamamen karbonlaşması sağlanır.

Yüzey İyileştirme: Üretilen karbon fiberlerin yüzeylerinin temizlenmesi ve kompozit üretimine uygun hale gelmesi için elektrolitik banyoda muamele görmesi işlemidir [17]. Bu aşamalar sembolik olarak Şekil 3.9.'da görülmektedir.



Şekil 3.9. Karbon fiber üretim aşamalarının sembolik gösterimi [127].

Nihai ısıtım işlem sıcaklığına bağlı olarak karbon fiberler farklı bir sınıflandırmaya tabi tutulabilir, bu sınıflandırma Çizelge 3.4.' te görölmektedir.

Çizelge 3.4. Karbon fiberlerin sınıflandırılması [127].

Modüllerine göre	Ultra Yüksek Modüllü (UHM)	Modülleri 820 GPa civarındadır. Örn: Thornel-Type P-120
	Yüksek Modüllü (HM)	Modülleri 300-500 GPa ve mukavemet/modül değeri $5-7 \cdot 10^{-3}$ 'dür. Örn: Toray firmasının ürettiği M50
	Orta Modüllü (IO)	Modülleri 300 GPa'a kadar ve mukavemet/modül oranı $5-7 \cdot 10^{-2}$ 'dir. Örn: Poliakrilonitril esaslı olan M30
	Düşük Modüllü (LM)	Modül değeri 100 GPa civarında ve izotropik yapıdadır.
Mukavemetlerine göre	Çok Yüksek Mukavemetli (UHS)	Mukavemetleri 5 GPa ve Mukavemet/sertlik değeri $2-3 \cdot 10^{-2}$ 'dir. Örn: Poliakrilonitril esaslı T1000 lifi
	Yüksek Mukavemetli (HS)	Mukavemetleri 3 GPa ve Mukavemet/sertlik değeri $1,5-2 \cdot 10^{-2}$ 'dir.
Son işlem sıcaklığına göre	Tip 1	Son işlem sıcaklığı 2000°C 'dir. Yüksek modüllü liflerdir.
	Tip 2	Son işlem sıcaklığı 1500°C 'dir. Yüksek mukavemetli liflerdir.
	Tip 3	Son işlem sıcaklığı 1000°C 'dir. Düşük modül ve mukavemetli liflerdir.

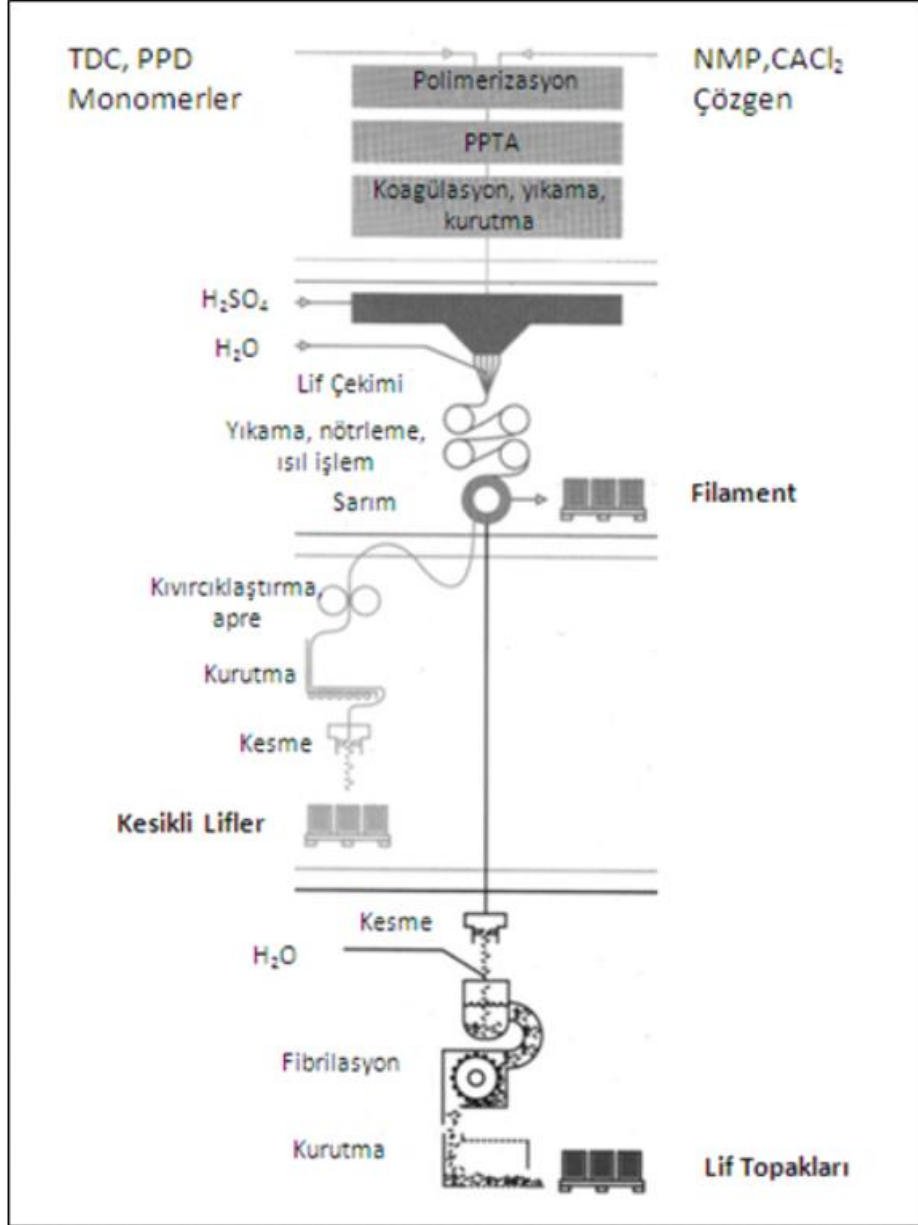
3.6.4. Aramid Fiber ve Özellikleri

Aramid fiber, Dupont firmasının ürettiği “Kevlar” ticari ismiyle ve Japon Teijin firmasının ürettiği “Twaron” ticari ismiyle anılan aromatik bir poliamiddir. Naylon malzeme grubuna ait olan aramid fiberin kimyasal bileşimi “poli para fenilen terepitemid” tir. Özellikle havacılık ve askeri endüstriler olmak üzere çeşitli uygulamalara uygun özelliklere sahip birçok farklı kalitede aramid fiber çeşidi bulunmaktadır. 1960' lı yıllarda meta-aramid ve sonrasında para-aramid olarak 2 farklı çeşit aramid türü geliştirilmiştir. Para-aramidler üstün mekanik özellikleri sayesinde birçok farklı uygulamada meta-aramidlerin yerini almıştır. Aramid fiberlerin mekanik özellikleri Çizelge 3.5.' te görölmektedir [128–131].

Çizelge 3.5. Aramid fiberlerin mekanik özellikleri [131].

Ticari İsmi	Nomex	Teijinconex		Kevlar		Twaron		Technora
Polimer	MPDI	MPDI		PPTA		PPTA		ODA/PPTA
Lif türü	430	Std	HT	K-29	K-49	Std	HM	std
Yoğunluk (g/cm ³)	1.38	1.38	1.38	1.44	1.44	1.44	1.45	1.39
Mukavemet (Gpa)	0.59	0.61-0.68	0.73-0.86	2.9	3	2.9	2.9	3.4
Uzama (%)	31	35-45	20-30	3.6	2.4	3.6	2.5	4.6
Modül (Gpa)	11.5	7.9-9.8	11.6-12.1	71	112	70	110	72

Aramid fiber, polimerik bir çözültüden eğilerek üretilen sentetik bir lifdir. Aramid fiberi oluşturan polimer genellikle amin grubu ile bir karboksilik asit halid grubu arasındaki kimyasal reaksiyon ile elde edilir. Aramid fiberlerin üretim süreci sembolik olarak Şekil 3.10.' da görülmektedir [131].



Şekil 3.10. Aramid fiberin üretim prosesinin sembolik gösterimi [131].

Aramid fiber, kendisini birçok farklı alanda önemli bir malzeme haline getiren bir dizi faydalı mekanik özelliğe sahiptir. Bunlardan bazıları şunlardır;

- Düşük yoğunluk
- Yüksek mukavemet
- İyi darbe dayanımı
- İyi aşınma direnci
- İyi kimyasal dayanım

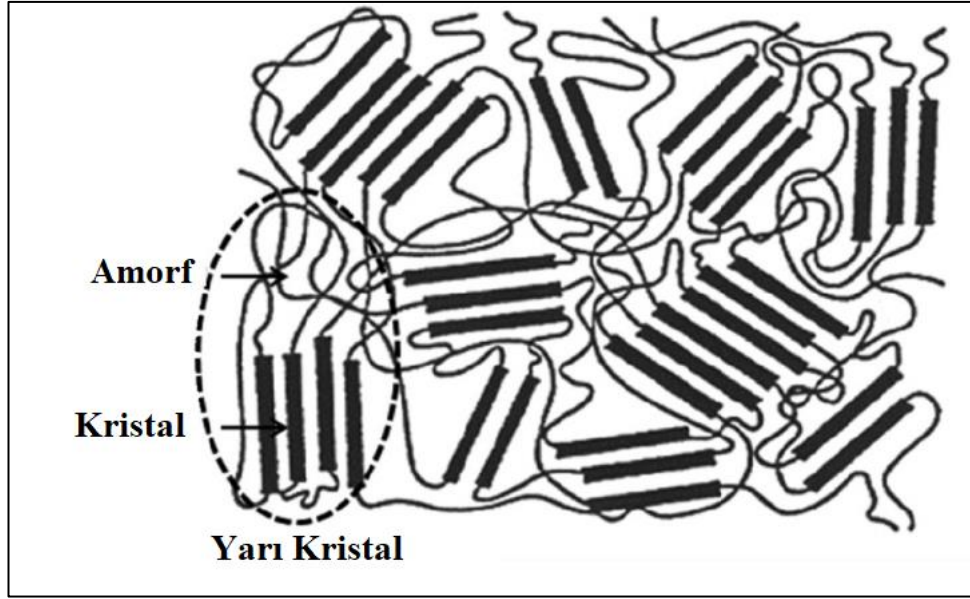
- Termal bozulmaya karşı dayanım
- E-cam elyaflara benzer basma dayanımı [128–130].

Aramid fiberler birçok farklı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları aşağıda listelenmiştir. Genellikle polimer matrisli kompozitlerin üretiminde elyaf takviyesi olarak kullanılırlar.

- Kurşun geçirmez yelekler gibi balistik koruyucu uygulamalar.
- Motosiklet sürücüleri ya da avcılar için koruyucu giysi üretimi.
- Yelkenli, yat vb. üretimi.
- Endüstriyel ve otomotiv uygulamaları için kayış ve hortum üretimi.
- Uçak gövde parçaları üretimi.
- Tekne gövdeleri
- Fiber optik ve elektromekanik kablo üretimi.
- Debriyaj plakaları ve fren balataları gibi sürtünme balataları üretimi.
- Yüksek sıcaklık ve basınç uygulamaları için conta üretimi.
- Yapıştırıcılar ve sızdırmazlık ürünleri üretimi [128–130].

3.6.5. Polietereterketon (PEEK) ve Özellikleri

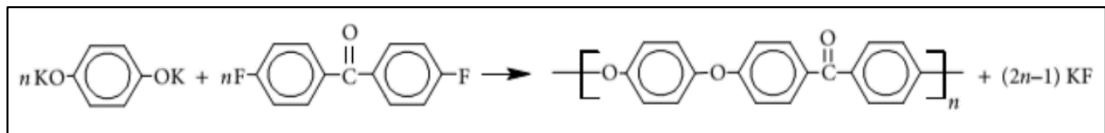
Termoplastik reçineler, ısıtıldığında yumuşayan ve soğutulduğunda tekrar sertleşen, termoset reçinelerden genel olarak daha sünek ve sert olan, dolgu ve takviye malzemesi olmaksızın yapısal veya yapısal olmayan uygulamalar için uygun malzemelerdir. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve soğutularak katılaştırılabilirler. Bu durumda onların tekrar tekrar biçimlendirilebilmelerini sağlar. Termoplastik moleküller çapraz bağlanmaz ve bu nedenle esnek ve yeniden düzenlenebilirlerdir. Termoplastikler, Şekil 3.11.' de gösterildiği gibi amorf veya yarı kristal olabilirler [132].



Şekil 3.11. Termoplastik reçinelerin yapısının sembolik gösterimi [132].

Günümüzde termoplastik reçinelerin kompozit malzeme üretimindeki kullanımı yaygınlaşmaktadır. Çünkü termoplastik reçinelerin kullanımı esnasında termoset reçinelerde olduğu gibi insan sağlığını tehdit eden salınımlar oluşmaz. Çevreye duyarlı malzemeler olması ve imalat açısından sahip oldukları kolaylıklarla birlikte kullanım alanlarının giderek yaygınlaşacağı gayet açıktır [132].

Termoplastik malzemelerin en yaygın olarak üretilen ve bilinenleri; polietilen, polipropilen, polyester, naylon, polikarbonat, polieterimid, poli (fenilen sülfür) ve polietereterketon (PEEK)' dir [132]. Kimyasal olarak tekrar eden bir keton ve iki eter grubundan oluşan polieter eter keton (PEEK) polimeri sadece karbon, hidrojen ve oksijen atomları bulunduran yapısı sayesinde tam aromatik, yüksek kararlılıkta, lineer bir yapıya sahiptir [133]. PEEK' in kimyasal yapısı Şekil 3.12' de görülmektedir.



Şekil 3.12. PEEK polimerinin kimyasal yapısı [133].

PEEK, termal, kimyasal ve yanma özelliklerinin performans için kritik olduğu uygulamalar için mükemmel özelliklere sahip olan yarı kristalin, yüksek sıcaklıklara dayanıklı (260 °C' ye kadar) bir termoplastiktir. Çizelge 3.6.' da PEEK'in özellikleri görülmektedir. Aynı zamanda, PEEK alev maruz kaldığında çok az duman veya toksik gaz yayar. Bu malzeme sağlam, güçlü ve serttir ve üstün sürtünme direncine sahiptir. Ayrıca radyasyona ve çok çeşitli solventlere karşı dayanıklıdır. Hidrolize karşı direnci ile PEEK, 250 °C' den yüksek sıcaklıklarda otoklav ve sterilizasyon ekipmanı ile kullanılan kaynar suya ve aşırı ısıtılmış buhara dayanabilir. PEEK reçineleri, takviyesiz, yüzde 30 cam elyaf takviyeli, yüzde 30 karbon fiber takviyeli olarak mevcuttur. Uygulamaları arasında otomotiv, denizcilik, nükleer, petrol, elektronik, medikal ve havacılık endüstrileri bulunmaktadır [132].

Çizelge 3.6. PEEK polimerinin özellikleri [133].

Özgül ağırlık	1,26-1,32 g/cm ³
Başlangıç modülü	3,6 GPa
Kopma mukavemeti	90-100 MPa
Kopma anındaki uzaması	% 50
Nem geri kazanımı	% 0,1
Dielektrik kuvveti	190 kV/cm
Özdirenç	5.10 ¹⁶ ohm.cm
Isı sığası	134 kJ/kgC°
Isıl iletkenliği	0,25 W/m/C°
Isıl genleşme katsayısı	72-85 10 ⁻⁶ (C°) ⁻¹

3.6.6. Epoksi Reçine ve Özellikleri

Epoksi reçineler termoset polimer ailesine ait bir polimer grubudur. Termoset polimerler termoplastik polimerlerin aksine sıcaklık ve kimyasal reaksiyon etkisiyle sertleştikten sonra tekrar eski hallerine dönemezler. Termosetler, monomerlerin biraraya gelerek polimerleri oluşturduğu bir dizi kimyasal reaksiyon sonucunda oluşurlar. Bu sebeple termoset reçineler genellikle reçine ve sertleştirici olarak birden fazla bileşen içerirler. Termoset reçineler özgül dayanım, kimyasallara karşı direnç ve düşük maliyet açısından kompozit üretiminde en yaygın kullanılan reçinelerdir. Fakat gevrek olmaları, uygulama esnasındaki toksik salınımları ve uzun kür süreleri bu reçinelerin dezavantajları olarak görülebilir. Epoksi, polyester ve fenolik reçineler

olarak çeşitli endüstrilerde kullanılan ticari birçok termoset reçine tipi mevcuttur [17,134]. Bu reçine tiplerinin mekanik özellikleri Çizelge 3.7.' de görülmektedir.

Epoksi reçineler, çok iyi elektriksel özellikleri, kimyasal dirençleri, iyi mukavemetleri ve düşük nem emilimi ile kullanışlı malzemelerdir. Korozyona karşı mükemmel direnç sağlayan (çözücüler, alkaliler ve bazı asitler), yüksek mukavemet / ağırlık oranına, boyutsal kararlılığa ve yapışma özelliklerine sahip çok yönlü reçinelerdir. Epiklorhidrinin bisfenol A ile yoğunlaştırılmasıyla üretilen lineer polimerlerdir. Diğer formülasyonlar glisidil esterler (vakum emdirme, laminasyon ve döküm için), novolak reçinelerin glisidil eterleri ve bromlu reçinelerdir. Herhangi bir uçucu monomer bileşeni içermemeleri nedeniyle polyeşter ve vinil esterlerden farklıdır. Bileşenlerin oranları değiştirilerek farklı reçineler üretilebilir [134,135].

Çizelge 3.7. Çeşitli termoset reçinelerin mekanik özellikleri [136].

Reçine Tipi	Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Elastik Modül E (MPa)	Kesme Modülü G (MPa)	Poisson Oranı ν	Çekme Muk. (MPa)	Uzama (%)	Termal Genleşme Katsayısı (°C ⁻¹)
Epoksi	1.2	4500	1600	0.4	130	2 (100°C) 6 (200°C)	6 - 20
Fenolik	1.3	3000	1100	0.4	70	2.5	-
Polyester	1.2	4000	1400	0.4	80	2.5	2.4

Reçinelerin viskozitesi nispeten yüksektir, böylece genellikle 50-100 °C arasındaki sıcaklıklarda kalıplanırlar veya viskoziteyi oda sıcaklığında laminasyonun mümkün olduğu bir noktaya indirmek için bir çözücü içinde çözülürler. Katalizör, sertleştirici veya hızlandırıcı olarak da adlandırılan sertleştirme ajanları, katalitik etki ile veya doğrudan reçine ile reaksiyona girerek kullanılır [134,135].

Doğru katkı maddeleri ile epoksi reçineleri ısıya (bazıları 290 °C' ye kadar) ve elektrik iletim özelliklerine karşı olağanüstü direnç gösterebilir. Sıvı veya katı formda olabilirler ve oda sıcaklığında ısı yardımı ile sertleşecek şekilde formüle edilebilirler [134,135].

Isı etkisiyle sertleştirme, maksimum performans gerektiren durumlarda daha yaygındır. Epoksiler diğer termoset reçinelerinden daha yavaş kürlenir. Soğuk kür tipleri de mevcuttur, ancak 60-120 °C' de kürlendiklerinde performansları genellikle daha iyidir. Epoksiler havacılık ve savunma, kimyasal tesis ve yüksek performanslı otomotiv uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar [134,135].

BÖLÜM 4

FML KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL UYGULAMALARI

Elyaf takviyeli polimerlerin ve metal plakalarla kombine olarak üretildikleri FML'lerin, mükemmel mekanik özelliklere sahip oldukları birçok endüstri kolunda kritik yapısal parça olarak kullanılabilirliği ve bilimsel çalışmalarla kanıtlanmış bir gerçekliktir. Bununla birlikte, üretimlerinde kullanılan polimer tipine bağlı olarak, bazı kısıtlamalara da sahiptirler. Genel olarak, yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan iki polimer grubu arasında, termoset reçineler nispeten daha sert ve daha güçlüdür ve termoplastik muadillerinden daha düşük maliyetlidir. Bununla birlikte, termosetler termoplastiklerden daha kırılmandır ve çatlamaya eğilimleri daha fazladır. FML üretiminde termoset reçine kullanılması durumunda, meydana gelen laminatlar, tabakalar arası ayrılmaya karşı daha hassas olmaktadır. Her iki tip polimere nanoparçacık ilavesinin, yukarıda belirtilen sorunların üstesinden gelmek için uygun ve etkili bir yöntem olduğu yapılan bilimsel çalışmalarla gösterilmiştir. Özellikle, nanoparçacıkların, termoset reçinelerin kırılma tokluğunu etkili bir şekilde iyileştirdiği ve lamine kompozitlerin ve bu tür takviyeli reçinelerin oluşturduğu fiber-metal laminatların düzlem dışı özelliklerini arttırdığı gösterilmiştir [136–138].

FML'lerin servis koşullarında sahip olduğu en kritik dezavantaj delaminasyon problemi. Bu problem üretim esnasında bileşenlerde kalabilecek kontaminasyonlardan veya metal ve kompozit plakaların farklı poisson oranlarına sahip olmasından dolayı yüksek yüklerde ya da çevrimli yüklerde delaminasyona eğilimli olmalarından kaynaklanabilir [137,138].

Tabakalar arası kesme gerilmeleri, FML'lerde delaminasyonun ana nedenidir. Bu nedenle, tabakalar arası kesme mukavemeti (TAKD), tabakalar arası kırılma tokluğu (TAKT) ve tabakalar arası kırılma mukavemeti (TAKM) iyileştirmelerinin tümü, delaminasyonların başlamasını ve yayılmasını azaltmaya yardımcı olacak etkenlerdir.

Polimer reçinelerinin tabakalar arası özelliklerini arttırmak için en etkili araçlardan biri, bu reçinelere nanopartiküllerin dahil edilmesidir. Termoset ve termoplastik reçinelere kendilerine göre nispeten daha sert ve mukavemeti daha yüksek olan nanoparçacıklar takviye edildiğinde reçinelerin düşük sertlik ve kırılma tokluğu özelliklerini geliştirmenin yanısıra substratlara yapışma özelliklerini de geliştirmektedir [139,140].

Nanoparçacıklar (NP), boyutlarından en az biri 100 nm' den küçük olan mikroskopik parçacıklardır. NP' ler farklı kompozisyonlar, şekiller, boyutlar ve en boy oranlarında olabilirler. Birincil rolleri, içerisinde buldukları kütleli malzemelerin atomik veya moleküler yapıları içinde bir köprü görevi görmektir. Kütleli malzemeler söz konusu olduğunda, fiziksel özellikleri boyutlarından bağımsız olarak sabit kabul edilir. Bununla birlikte, nano ölçekli parçacıklar daha büyük özgül yüzey alanına, daha yüksek yüzey enerjisine ve azaltılmış sayıda yapısal kusurlara sahiptir, bu da bunların kütleli durumlarındaki özelliklerine kıyasla gelişmiş özellikler sergilemelerini sağlar. Dahası, boyut etkisinin yanı sıra, özellikleri büyük ölçüde atom konfigürasyonuna, özellikle de çevredeki materyaller ile etkileşimlerine bağlıdır [141–143].

Malzemelerin nano ölçekli formlarında, makro ölçekli formlarına kıyasla sergilenen daha üstün mekanik özellikleri nedeniyle, farklı malzemelerden üretilen çeşitli NP türleri bulunmaktadır. En yaygın türlerden biri karbon bazlı NP' lerdir. Şekillerine dayanarak, karbon nano takviyeler üç farklı grupta sınıflandırılır; bunlar: (i) sıfır boyutlu veya küresel takviye maddeleri; (ii) tek boyutlu veya silindirik parçacıklar; ve (iii) iki boyutlu parçacıklardır. Bu üç grubun her biri için örnekler sırasıyla: (i) nanoelmaslar (NE' ler); (ii) karbon nanotüpler (KNT' ler) ve karbon nanofiberler (KNF' ler); ve (iii) grafen nanoplateletler (GNP). Bilimsel birçok çalışma, polimerlere karbon bazlı NP' lerin (KNT' ler, KNF' ler ve GNP' ler) dahil edilmesinin kütleli polimerlerin çeşitli özelliklerini (örn., mekanik, elektriksel ve termal) geliştirdiğini ortaya koymuştur [144–146].

4.1. FML KOMPOZİT ÜRETİMİNDE GRAFEN NANOPARTİKÜL KULLANIMI

Kompozit malzemelerde nanoparçacık kullanımı bu parçacıkların sahip olduğu eşsiz özelliklerden faydalanma amacına dayanmaktadır. İki boyutlu bir kafes içinde düzenlenmiş sp²-melezi karbon atomlarından oluşan tek tabakalı grafen, olağanüstü termal, mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle son yıllarda büyük ilgi gören bir malzeme haline gelmiştir. Bu malzemenin en umut vaat eden uygulamalarından biri, nano ölçekli dolgu maddelerini içeren polimer matrisli nano kompozitlerdir. Pul şeklinde tabakalaşmış silikat dolgulara sahip nanokompozitler 1950 gibi erken bir zamanda araştırılmıştır. Ancak nanokompozitlere olan akademik ve endüstriyel ilgi, Toyota Motor Şirketi ' ndeki araştırmacıların bir Naylon-6 matrisine dolgu maddesi olarak montmorillonit kullanarak büyük mekanik özellik artışı sağlamalarını takiben yaklaşık kırk yıl sonra gelmiştir. Polimer nanokompozitler, sonuç olarak daha düşük bileşen ağırlığına sahip olmakla beraber, konvansiyonel takviye malzemeleriyle üretilen polimer matrisli kompozitlere göre daha üstün mekanik özellikler sergileyebilmektedir [147–150].

Polimer matrisli kompozitlerde NP kullanımına ilginin artması ve elde edilen olumlu veriler neticesinde FML üretiminde de nano takviye üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan bu araştırmalar neticesinde konvansiyonel olarak üretilip kullanılan FML' lerin sahip oldukları dezavantajları NP takviyesiyle gidermeye yönelik olumlu neticeler elde edilmiştir. Örneğin FML' lerde TAKD delaminasyon direncini ve bağlanma mukavemetini yöneten en etkili parametrelerden biridir. İncelenen yayınlarda NP 'ler diğer mekanik özellikleri bozmadan TAKD' de ciddi seviyede artış sağladığı görülmüştür [136].

Shen ve arkadaşları [151], grafen oksit (GO) nanopartiküllerini Cam Fiber / Epoksi tabakalı kompozitlerine takviye ettiler ve oda sıcaklığında TAKD' de % 32,7 ve kriyojenik sıcaklıkta (77 K) TAKD' de % 32,1 artış elde ettiler. Qin ve arkadaşları [152] yüksek yoğunlukta GNP ile kaplanmış karbon fiberle üretilen FML' de TAKD' nin % 19 arttığını gösterdi.

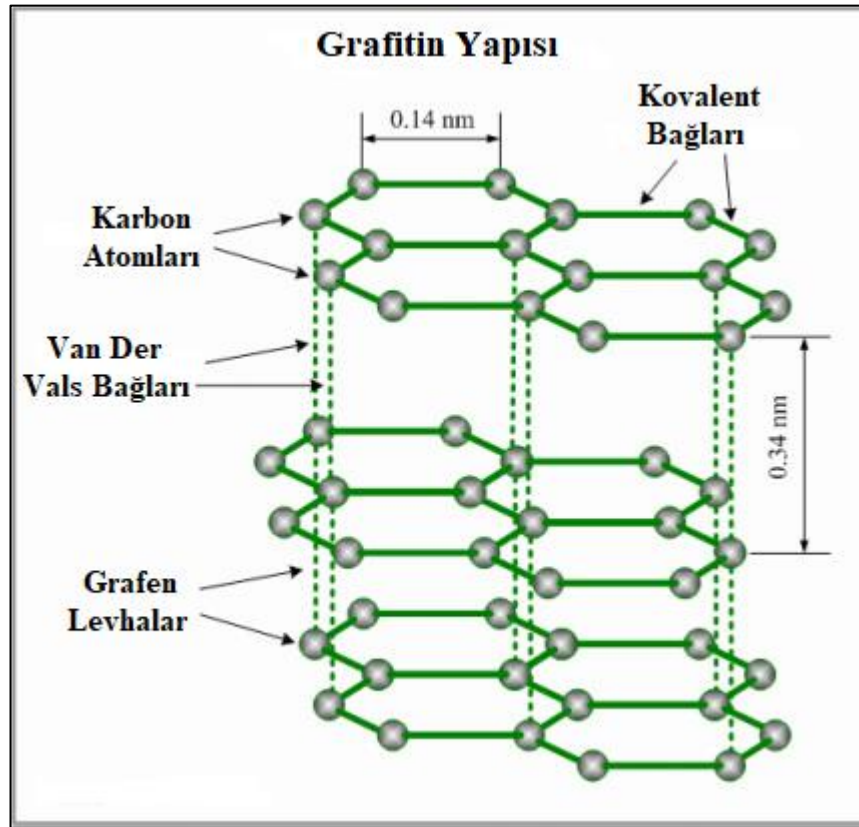
FML' lerde tabakalar arası kırılma tokluğu (TAKT) ve tabakalar arası kırılma mukavemeti (TAKM)'de üzerinde çalışılan ve geliştirilmeye çalışılan parametrelerdir. Bu konuda birçok akademik çalışma mevcuttur. Örneğin, Rafiee ve arkadaşları [153] ağırlıkça % 0,1 gibi az miktarda GNP kullanarak epoksi nanokompozitlerin mod I TAKT'inde % 53 artış ve mod I TAKM'sinde % 126 artış gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada yine Rafiee ve diğerleri [154] nanokile kıyasla mod I kırılma tokluğunun etkili bir artırıcısı olarak GNP' nin üstünlüğünü göstermişlerdir.

Grafen nanopartiküllerin, kompozitlerin yorulma özelliklerine etkileride bazı araştırmalara konu olmuştur. Örneğin, Rafiee ve diğ. [153], yorulma yüklemesi altında çatlak yayılımını azaltmak için KNT ve GNP' nin performanslarını karşılaştırmıştır. Epoksi reçineye ağırlıkça % 0,1 GNP ilavesinin, yüksek stres yoğunluğu faktöründe ($0,6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) test edildiğinde, çatlak ilerleme hızında iki kat azalmaya yol açtığını göstermişlerdir. Fakat, aynı stres yoğunluk faktörü ile test edilen KNT ile güçlendirilmiş epoksi numunelerinde performansta iyileşme olduğuna dair herhangi bir kanıt görülmemiştir. Bir başka çalışmada Yavari ve arkadaşları [155] Cam Fiber/Epoksi kompozit üretiminde cam fiberleri ağırlıkça % 0,2 oranında spreylendirme ile GNP kaplamışlardır. Eğmeli yorulma şartları altında GNP takviyeli kompozitlerin yorulma ömrünün 1200 kat arttığını tespit etmişlerdir. Yazarlar bu yüksek gelişmeyi, tabakalar arası çatlak yayılımının baskılanmasına ve fiber / matris arayüzünün delaminasyon / burkulmasına bağlamışlardır.

4.1.1. Grafen Nanopartikülün Özellikleri

Grafen, sp² bağlı karbon atomlarının iki boyutlu düzlemsel tabakasından oluşan tek katmanlı aromatik bir yapıdır. Ayrıca hidrojen atomlarından sıyrılan benzen halkalarından meydana geldiği de söylenebilir. Grafenin yapısı içindeki karbon-karbon bağı (sp²) uzunluğu yaklaşık 0,142 nm' dir. Ayrıca, grafen tabakalarından oluşan grafitin katmanlar arası mesafesi ise 0,335 nm' dir. Şekil 4.1. grafenin yapısını göstermektedir. 2004 yılında Andre Geim ve Kostya Novoselov tarafından grafenin keşfedilmesinden beri, bu malzeme dikkat çekici ve benzersiz özellikleri nedeniyle akademik ve endüstriyel çevrelerce büyük ilgi görmüştür. Grafen, geniş bir spesifik yüzey alanına ($2630 \text{ m}^2/\text{gr}$), yüksek Young modülüne (yaklaşık 1 TPa), yüksek çekme

mukavemetine (yaklaşık 130 GPa) yüksek dahili şarj hareketliliğine ($200000 \text{ cm}^2/\text{V.s}$), yüksek termal iletkenliğe (5000 W/m.K), önemli derecede optik geçirgenliğe (% 97,7) ve elektron limitinden bağımsız bir elektriksel iletkenliğe sahiptir. Grafen, şeffaf iletken elektrotlar, piller, süper kapasitörler, grafen temelli elektronik aygıtlar, yakıt hücreleri, güneş pilleri, membranlar, transistörler, biyosensörler, moleküler gaz sensörleri ve kompozit malzemeler gibi çeşitli uygulamalar için mükemmel bir temel malzeme adayıdır [156–159].



Şekil 4.1. Grafen levhalardan oluşan grafitin yapısı [160].

Grafeni sentezlemek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemler yukarıdan aşağıya yöntemler ve aşağıdan yukarıya yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Grafen, mikromekanik ayrılma olan yukarıdan aşağıya yöntemlerden biri ile ilk defa üretilmiştir. Diğer temel yukarıdan aşağıya yöntemler, Hummer yöntemi, Tour yöntemi, grafen oksidin kimyasal ve termal indirgenmesi, sonokimyasal sıvı faz katman kaldırma, mikrodalga ve elektrokimyasal yöntemle grafitten katman kaldırma

yöntemleridir. CVD (kimyasal buhar biriktirme) ve SiC termal ayrışması, aşağıdan yukarıya ana yöntemlerdir [156–159].

Grafit, yukarıdan aşağıya yöntemlerde sıklıkla kullanılan bir malzemedir; ve bu yöntemdeki ana zorluk grafitin yapısındaki π tabakalarının (5,9 kJ/mol karbon) güçlü kohezyon enerjisinin üstesinden gelmektir. Üretilen grafen genellikle tek tabaka, iki tabaka veya çoklu tabakalardan oluşur. Çoklu tabaka yapısındaki grafenler genellikle pullar gibi düzensiz yapılara sahiptirler. Bu pullar düz veya katlanmış şekilde olmakla beraber enerji depolama ve enerji dönüşüm uygulamalarına uygun malzemelerdir [156–159].

4.2. FML KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KNT KULLANIMI

Kompozit malzeme üzerine yapılan çalışmalarda, grafen nanopartikül kullanımının yanısıra KNT kullanımı da yaygın şekilde çalışılan konular arasındadır. Polimer matrisli kompozitlerde reçine katkısı olarak, fiber takviyelere kaplama uygulamalarında, FML üretiminde polimerik tabakalara takviye olarak birçok çalışmaya ve uygulamaya konu olan KNT kullanımının elde edilen verilerle bahsi geçen kompozit malzemelerin birçok özelliğinde iyileşme sağladığı ortaya konulmuştur.

TAKD üzerine yapılan birçok çalışmada KNT'lerin tabakalar arası kesme dayanımına olumlu etkisi olduğu açıkça gösterilmiştir. Chandrasekaran ve arkadaşları [161] basma yönünde kesme test yöntemini kullanarak ağırlıkça % 0,5 KNT takviyesinin karbon fiber / epoksi kompozitlerin TAKD' sine etkisi üzerine bir araştırma yürütmüşlerdir. Fonksiyonelleştirilmemiş NP'ler için TAKD' de % 41' lik bir artış gözlenirken, fonksiyonelleştirilen NP'lerde % 61' lik bir iyileşme elde etmişlerdir. Ayrıca NP'lerin matrisin kırılma tokluğu ve kompozitlerin genel performansları üzerindeki etkisini de karşılaştırarak, meydana gelen iyileşmelerin fiberler ve NP'ler arasındaki kimyasal kilitlenmeden kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Bir başka çalışmada ise, Liu ve arkadaşları [162], cam fiber / epoksi laminatlarının TAKD özelliklerini geliştirmek için hem KNT hem de N-butil glisidil eter (BGE) adlı reaktif alifatik bir seyreltici kullanıldığında farklı sonuçlar gözlemlemişlerdir. KNT'lerin çatlak köprüleme olayı

ile matrisin özelliklerini geliştirdiği kanıtlanırken, BGE matris / cam fiber arayüzey yapışmasını arttırmıştır. Kombine mekanizmalar kompozitlerin TAKD' sinde % 25' lik bir iyileşme sağlamıştır.

FML' ler özelinde tabakalı kompozit malzemelerin TAKT ve TAKM değerlerini geliştirmeye yönelik KNT kullanımı yoğun çalışılan konular arasındadır. Örneğin, Eskizeybek ve arkadaşları [163], fiberlerin bir epoksi reçine ile emprenye edilmesinden önce, laminat oluşturmak için kullanılan karbon fiberler üzerine KNT' lerin sprej yöntemiyle kaplanmasıyla mod I TAKT' de % 100 oranında etkileyici bir iyileşme elde etmeyi başarmışlardır. Sprej kaplama ile elde edilen üstün yüzey adhezyonunun, ortaya çıkan yüksek TAKT' nin nedeni olduğu gösterilmiştir. Başka bir akademik çalışmada, Siegfried ve arkadaşları [164] KNT eklenmiş karbon fiber / epoksi kompozit numunelerin, modifiye edilmemiş örneklere kıyasla gelişmiş TAKM' leri nedeniyle yük altında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

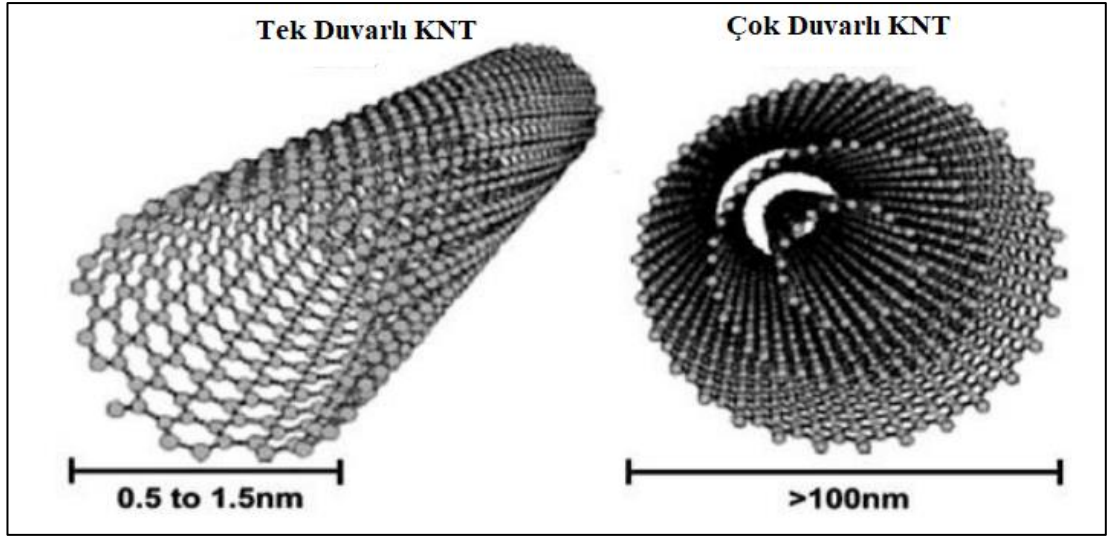
Yorulma performansına KNT ilavesinin etkisi, grafen takviyesinde olduğu gibi iyileştirmelerin elde edildiği ve merakla araştırılan çalışma alanlarından birisidir. Örneğin, Zhang ve arkadaşları [165], epoksi reçineye ağırlıkça % 0,25 kadar KNT ekleyerek epoksi reçinelerin yorulma dayanımında 20 kat artış elde etmişlerdir. Ayrıca, uzunluk / çap oranı daha yüksek olan KNT' lerin daha iyi performans gösterdiğini vurgulamışlardır.

4.2.1. KNT'lerin Özellikleri

Karbon nanotüpler, altıgen bağlı grafitik karbon atomlarından oluşmakla beraber tek tek katmanlı grafen plakaların rulo şeklide sarılmış bir hali olarak tanımlanabilir. KNT' lerin 1 nm kadar küçük çapları ve birkaç santimetreyi bulan uzunlukları vardır, bu da yapının yüksek en boy oranına sahip olduğu anlamına gelir. Duvar sayısına göre, tek ve çok duvarlı karbon nanotüpler olarak sınıflandırılırlar [166].

Her ne kadar çeşitli karbon kafesleri çalışılsa da, Iijima ilk kez tübüler karbon yapıları gözlemlendiğinde tarih 1991 senesiydi. Bu çalışmaya konu olan nanotüpler, bitişik kabuk ayırma değeri $\sim 0,34$ nm, çapları ~ 1 nm olan ve büyük uzunluk / çap oranına

sahip onlarca grafitik kabuktan (çok duvarlı karbon nanotüpler) (MWCNT 'ler) oluşuyordu. İki yıl sonra Iijima ve arkadaşları tek duvarlı karbon nanotüpleri (SWCNT' ler) sentezledi. Günümüzde MWCNT' ler ve SWCNT' ler esas olarak üç teknikle üretilmektedir: ark deşarjı, lazer ablasyonu ve katalitik büyüme. Sentezlenen nanotüp numuneleri, Raman, elektronik ve optik spektroskopiler vasıtasıyla karakterize edilir. Önemli bilgiler mekanik, elektriksel ve termal ölçümlerle elde edilir. Deneysel veriler, teorik modeller ve bilgisayar simülasyonlarının sonuçları ile karşılaştırılarak tartışılır [167–169]. Tek ve çok duvarlı KNT' ler Şekil 4.2.' de görülmektedir.



Şekil 4.2. Tek duvarlı ve çok duvarlı KNT' lerin gösterimi [166].

Karbon nanotüpler, ayrı karbon atomları arasında sp^2 bağlarına sahip olduklarından, çelik ve kevlar' dan daha yüksek gerilme mukavemetine (~ 100 GPa) sahiplerdir. Bu bağ, elmasta bulunan sp^3 bağından bile daha güçlüdür. Teorik olarak, SWCNT' lerin çelikten yüzlerce kat daha güçlü bir gerilme mukavemeti olabilir [170].

Karbon nanotüplerin bir başka şaşırtıcı özelliği de esneklikleridir. Yüksek basma kuvveti altında büyük aksenal basınç kuvvetlerine maruz kaldığında, nanotüp zarar görmeden her iki ucu birbirine değecek kadar bükülüp eski haline geri dönebilir. Fakat nanotüpün yapısındaki bazı kusurlar, örneğin atomik boşluk kusurları vb. mekanik özellikleri zayıflatabilir [171].

Hem tek hem de çok duvarlı nanotüplerdeki esneklik, elastik modül ile belirlenir. Çok duvarlı nanotüplerin (MWNT) elastik modülü geçirimli elektron mikroskopları (TEM) ile analiz edilir. TEM kullanan bilim adamları, tüplerin her iki ucundaki termal titreşimleri ölçer ve inceler. KNT'ler yaklaşık 1-1,25 TPa elastik modül değerine sahiplerdir. KNT'lerdeki atomik bağların mukavemetinin bir sonucu olarak, nanotüpler sadece yüksek sıcaklıklara dayanmakla kalmaz, aynı zamanda çok iyi termal iletkenlik (2000 W/m/K) özellikleri de sergilerler. KNT'ler 750 °C'ye ve vakum altında 2800 °C'ye kadar dayanabilirler. Tüplerin ve dış ortamın sıcaklığı karbon nanotüplerin termal iletkenliğini etkileyebilir [172].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. FML ÜRETİMİNDE KULLANILAN MALZEMELER

5.1.1. 2024-T3 Alüminyum Levha

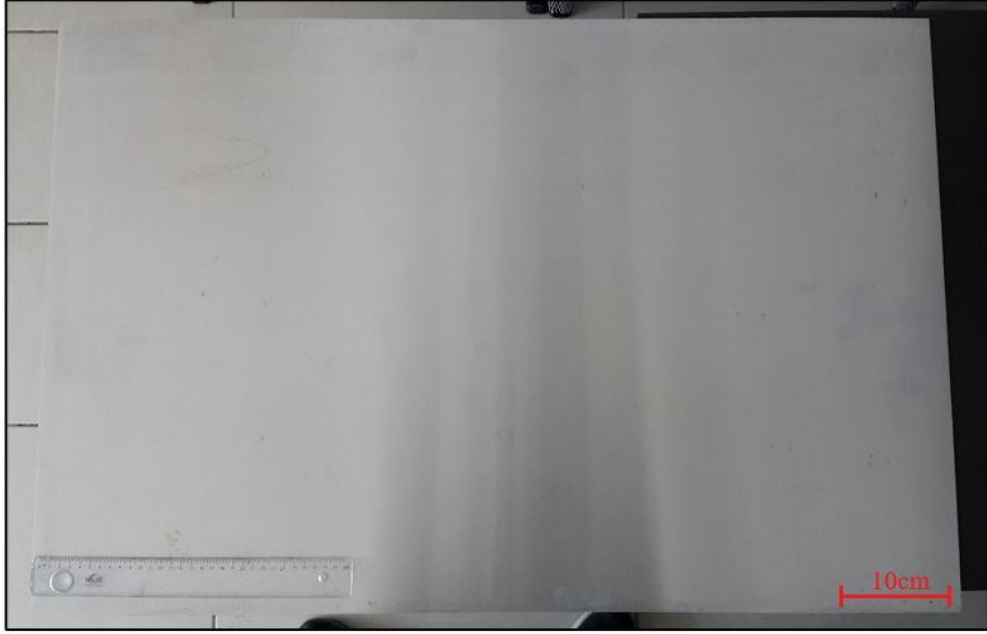
Bu çalışmada kullanılan 0,8 mm kalınlığındaki 2024-T3 kalite alüminyum levha ALUSEM Metal Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. 1200x3600 mm ebatlarında temin edilen alüminyum levha üretim yapılacak ebatlara (10x10 cm) uygun şekilde kesilerek kullanılmıştır. Numune üretimlerinde kullanılan alüminyum levha Şekil 5.1.' de görülmektedir.



Şekil 5.1. FML üretiminde kullanılan 2024-T3 alüminyum levhanın görüntüsü.

5.1.2. AZ31 Magnezyum Levha

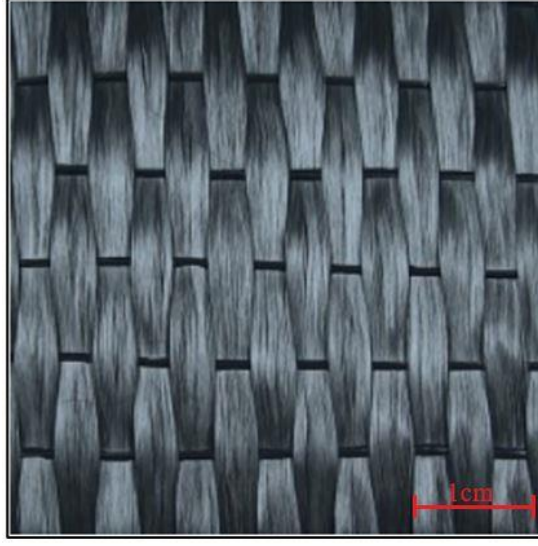
AZ31 kalite magnezyum levhalar Magnesium Turkey firmasından temin edilmiştir. 0,8 mm kalınlığında ve 600x900 mm ebatlarında temin edilen magnezyum levhalar üretim yapılacak ebatlara (10x10 cm) uygun olarak kesilip kullanılmıştır. Şekil 5.2.'de bu çalışmada kullanılan AZ31 kalite magnezyum levha görülmektedir.



Şekil 5.2. FML üretiminde kullanılan AZ31 magnezyum levha görüntüsü.

5.1.3. Tek Yönlü Karbon Fiber (UD-Unidirectional)

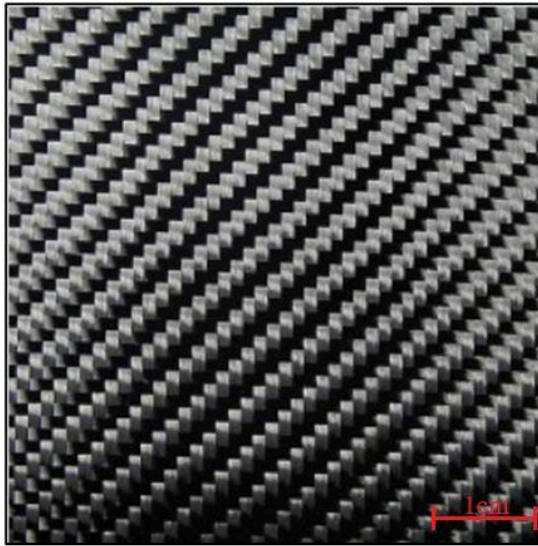
FML üretiminde kullanılan tek yönlü karbon fiber Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. Torayca T700SC 12k karbon elyaf ipten üretilmiş, yüksek performans, tek yönde rijitlik ve mukavemetin gerektiği uygulamalarda kullanılan, 300 gr/m² fiber yoğunluğuna sahip tek yönlü karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan tek yönlü karbon fiber Şekil 5.3.'te görülmektedir.



Şekil 5.3. Tek yönlü karbon fiber kumaş görüntüsü.

5.1.4. Dokuma Karbon Fiber Kumaş

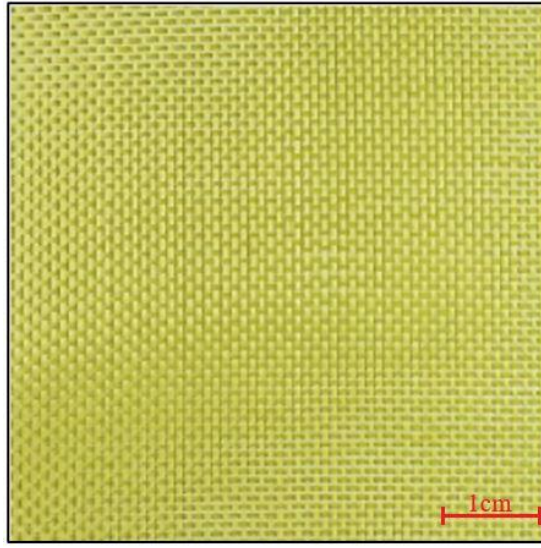
Dokuma karbon fiber kumaş Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. Torayca T300 karbon fiber 3k 200 tex ipten üretilmiş, 245 gr/m^2 fiber yoğunluğuna sahip, otomotiv, havacılık ve birçok uygulamada takviye olarak kullanılan twill dokuma bu kumaş türü kullanılmıştır. Şekil 5.4.' te twill dokuma karbon fiber kumaş görülmektedir.



Şekil 5.4. Twill dokuma karbon fiber kumaş görüntüsü.

5.1.5. Dokuma Aramid Fiber Kumaş

Aramid fiber kumaş Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. Kevlar49 para-aramid liflerinden dokunmuş, yüksek performanslı kompozit parça imalatında kullanılan, loom-state (LS, kaplamasız) 61 gr/m² alan ağırlığına sahip plain dokuma aramid fiber kumaş kullanılmıştır. Kullanılan aramid fiber kumaşa ait görsel Şekil 5.5.' te görülmektedir.



Şekil 5.5. Plain dokuma aramid fiber kumaş görüntüsü.

5.1.6. Laminasyon Epoksi Reçine Seti

Termoset reçine olarak laminasyon epoksi seti Dost Kimya End. Ham. San. ve Tic. Ltd. Şti.' den temin edilmiştir. HEXION firmasının üretimi olan MGS L326 / H265 kodlu laminasyon reçinesi (Şekil 5.6.) kullanılmıştır. Ayrıca nanopartikül takviyeli FML üretiminde kullanılmak üzere MGS L326 epoksi reçineye % 1 oranında grafen ve % 0,5 oranında KNT ilavesi yapılmıştır.



Şekil 5.6. Laminasyon işlemi için kullanılan epoksi seti.

5.1.7. PEEK Emprenye Edilmiş Tek Yönlü Karbon Fiber Prepreg

Milli Savunma Bakanlığı, TUSAŞ ve Mir-Arge A.Ş.’nin ortak gerçekleştirdikleri KOZA Projesi kapsamında yerli havacılık endüstrisinde kullanılmak üzere termoplastik matrisli prepreg üretimi için pilot üretim tesisi Yıldız Teknik Üniversitesi Teknopark’ ta kurulmuştur. Bu çalışmada termoplastik reçine emprenye edilmiş fiberler kullanma fikri oluşunca Mir-Arge A.Ş. yetkilileri ile iletişime geçilmiş ve olumlu dönüş alınmıştır. Tezimizde kullandığımız PEEK (Polieter Eter Keton) emprenye edilmiş karbon fiber ve aramid fiber prepregleri Mir-Arge A.Ş. firması yerli olarak tesislerinde üreterek tarafımıza göndermiştir.

Tek yönlü karbon fiber kumaş Tenax-E HTS45 E23 marka ve 194 gr/m^2 alan ağırlığına sahiptir. Mir-Arge A.Ş.’ nin pilot tesislerinde bu kumaşa PEEK emprenye edilerek prepreg haline getirilip laminasyona hazır hale gelmiştir. Üretilen prepreg 412 gr/m^2 alan ağırlığına % 52 fiber hacim fraksiyonuna sahiptir. Bu prepregler Şekil 5.7.’ de görülmektedir.



Şekil 5.7. PEEK emprenye edilmiş tek yönlü karbon fiber prepreg görüntüsü.

5.1.8. PEEK Emprenye Edilmiş Dokuma Karbon Fiber Prepreg

PEEK emprenye edilmiş dokuma karbon fiber kumaş prepregler Mir-Arge A.Ş. pilot tesislerinde üretilerek tarafımıza gönderilmiştir. Dokuma karbon fiber kumaş 5 Harness Satin dokuma tipinde, 3K iplerden dokunmuş, 285 gr/m² alan ağırlığına sahip bir kumaştır. Bu kumaştan üretilen PEEK emprenyeli prepreg (Şekil 5.8) ise % 55 fiber hacim fraksiyonuna ve 587 gr/m² alan ağırlığına sahiptir.



Şekil 5.8. PEEK emprenye edilmiş dokuma karbon fiber prepreg görüntüsü.

5.1.9. PEEK Emprenye Edilmiş Dokuma Aramid Fiber Prepreg

PEEK emprenye edilmiş dokuma aramid fiber kumaş prepregler de Mir-Arge A.Ş. pilot tesislerinde üretilerek tarafımıza gönderilmiştir. Dokuma aramid fiber kumaş plain dokuma tipinde, Kevlar49 para-aramid iplerden dokunmuş, 61 gr/m² alan ağırlığına sahip bir kumaştır. Bu kumaştan üretilen PEEK emprenyeli prepreg (Şekil 5.9) ise % 58 fiber hacim fraksiyonuna ve 146 gr/m² alan ağırlığına sahiptir.






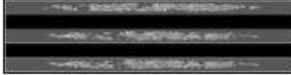


Şekil 5.9. PEEK emprenye edilmiş dokuma aramid fiber prepreg görüntüsü.

5.2. FML KOMPOZİTLER'İN ÜRETİMİ

Bu çalışmada toplamda 6 grup ve ilk 5 grupta 6 farklı takviye kısmı son bir grupta ise 2 farklı takviye kısmı olmak üzere 32 farklı numune tipi üretilmiştir. 6 farklı numune grubunu 2024-T3 alüminyum plaka, AZ31 magnezyum plaka, 2024-T3 alüminyum plakanın shot peening ile işlenmiş hali, AZ31 plakanın shot peening ile işlenmiş hali, 2024-T3 ve AZ31 levhaların shot peening ile işlem görmüş hallerinin her ikisinin birden kullanıldığı hibrit yapı ve epoksi reçineye ağırlıkça % 1 GNP ilavesiyle % 0,5 KNT ilavesinin yapıldığı kombinasyonlar oluşturmaktadır. Bu 6 farklı grubun herbirinde takviye kısmını PEEK' e ek olarak dokuma karbon fiber, tek yönlü karbon fiber ve dokuma aramid fiber oluşturmaktadır. Yine takviye kısmı epoksi reçine ile birlikte dokuma karbon fiber, tek yönlü karbon fiber ve dokuma aramid fiberden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen farklı üretim tipleri şematik

olarak Çizelge 5.1.' de görülmektedir. FML üretim prosesinin genel şeması ise Şekil 5.10.' da görülmektedir.

Çizelge 5.1. Üretilen numune kombinasyonlarının şematik gösterimi.

BU ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÜRETİLEN NUMUNE TİPLERİ						
1. GRUP (2024-T3)						
 <p>*3 Kat 2024-T3 Alüminyum Levha 0.8 mm *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı →</p>	PEEK			EPOKSİ		
	Karbon Fiber		Aramid	Karbon Fiber		Aramid
	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma
2. GRUP (2024-T3 SHOT PEENING)						
 <p>*3 Kat 2024-T3 Alüminyum Levha 0.8 mm *Metal Levhalar Shot Peening işlemi gördü *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı →</p>	PEEK			EPOKSİ		
	Karbon Fiber		Aramid	Karbon Fiber		Aramid
	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma
3. GRUP (AZ31)						
 <p>*3 Kat AZ31 Magnezyum Levha 0.8 mm *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı →</p>	PEEK			EPOKSİ		
	Karbon Fiber		Aramid	Karbon Fiber		Aramid
	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma
4. GRUP (AZ31 SHOT PEENING)						
 <p>*3 Kat AZ31 magnezyum Levha 0.8 mm *Metal Levhalar Shot Peening işlemi gördü *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı →</p>	PEEK			EPOKSİ		
	Karbon Fiber		Aramid	Karbon Fiber		Aramid
	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma
5. GRUP (2024/AZ31/2024 SHOT PEENING) HİBRİT						
 <p>*En Dış 2 Kat 2024-T3, Orta Kat AZ31 *Metal Levhalar Shot Peening işlemi gördü *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı →</p>	PEEK			EPOKSİ		
	Karbon Fiber		Aramid	Karbon Fiber		Aramid
	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma	Tek Yönlü	Dokuma	Dokuma
6. GRUP (NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ ÜRETİMLER)						
 <p>*3 Kat 2024-T3 Alüminyum Levha 0.8 mm *Aralarda 2 Kat Takviye Fazı *Epoksi Reçineye Nanopartikül ilavesi →</p>	EPOKSİ + %1 GNP			EPOKSİ + %0,5 KNT		
	Karbon Fiber			Karbon Fiber		
	Tek Yönlü			Tek Yönlü		



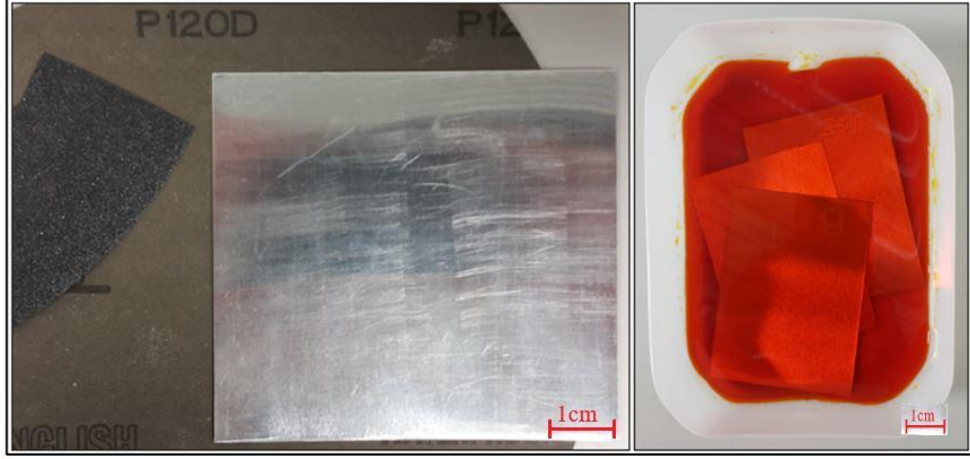
Şekil 5.10. FML'lerin genel üretim kademeleri.

2024-T3 alüminyum ve AZ31 magnezyum levhalar spiral yardımıyla 10x10 cm ebatlarında kesildikten sonra takviye elemanı olan fiberler ve prepreglerde el yatırma işlemi ve laminasyon işlemi öncesi 10x10 cm ebatlarında makas yardımıyla kesilmişlerdir. Bu işlemden sonraki aşamalar aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.

5.2.1. Metal Levhaların Yüzey Hazırlıkları

Bu çalışmada 0,8 mm kalınlığında 2024-T3 alüminyum ve AZ31 magnezyum levhalar kullanılmıştır. Laminasyon işleminden önce metal levhalara bazı yüzey işlemleri uygulamak gerekmektedir. Çünkü yüzeyde kalması muhtemel yağ, kir vb. kalıntılar giderilmezse laminasyon işlemi sırasında problemlere neden olabilmektedir. FML'lerin laminasyon işleminden önce metal plakaların yüzeyleri, yüzey pürüzlülüğünü artırmak ve adhezif yapışma mekanizmasını artırmak amacıyla 120' lik zımpara ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımpara işleminden sonra alüminyum ve magnezyum levhalar sırasıyla saf su ve etanol ile yıkanarak kurutulmuştur. Bu işlemlerden sonra alüminyum ve magnezyum levhaların yüzeylerinde kalması

muhtemel yağ ve kir gibi kalıntıları gidermek amacıyla % 7' lik kromik asit çözeltisinde 30 dakika bekletme işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından sırasıyla saf su ve etanol ile levhalar yıkanarak tekrardan kurutulmuştur. Bu işlemler Şekil 5.11.' de görülmektedir.



Şekil 5.11. Metal plakaların yüzey işlemleri.

5.2.2. Shot Peening İşlemi

Ayrıca, bu çalışmada kullanılan alüminyum ve magnezyum levhaların epoksi reçine ve PEEK reçineyle ara yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla metal levhalara shot peening işlemi uygulama kararı alınmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde Eskişehir 1. Hava İkmal ve Bakım Komutanlığı'nda size:6 cam tozuyla 30 psi basınç, 10 sn süre, ve 0,18 mm intensity parametreleri ile metal levhalara shot peening işlemi uygulanmıştır. FML' nin en dış 2 katmanını oluşturan metal levhaların iç yüzeylerine, orta katmanını oluşturan levhaların ise her iki yüzeyine bu işlem uygulanmıştır.

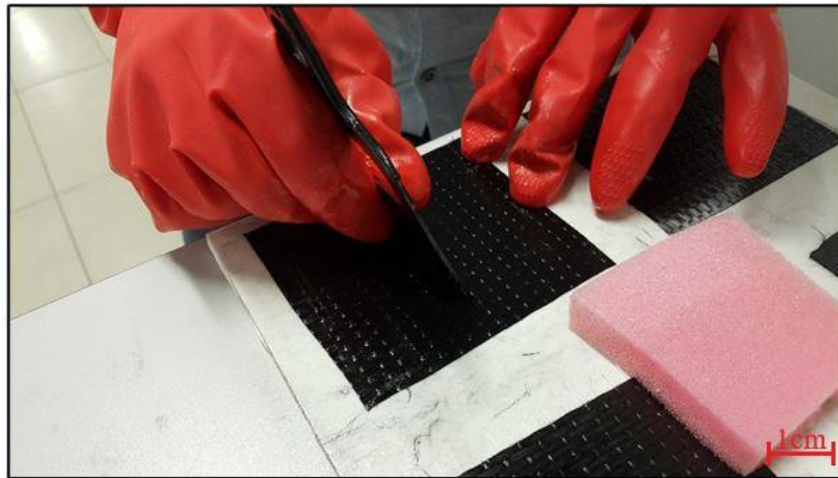
5.2.3. Laminasyon Öncesi Takviye Elemanlarının Hazırlanması

Takviye kısmını oluşturan fiber yapılar reçine tipine göre genel anlamda 2 farklı tür olarak kullanılmıştır. PEEK emprenye edilmiş karbon fiber ve aramid fiber kumaşlar prepreg olarak temin edildiği için bu prepregler laminasyon işleminden önce makas yardımıyla 10x10 cm ebatlarında kesme işleminden (Şekil 5.12.) başka bir işleme tabi tutulmamışlardır. Epoksi reçine ile kombine edilerek kullanılan karbon fiber ve aramid

fiber kumaşlar prepreg olarak temin edilemediği için el yatırma yöntemiyle reçine muamele edilip laminasyona hazır hale getirilmişlerdir. El yatırma işleminden önce 10x10 cm ölçülerinde makas yardımıyla kesilmişlerdir. Daha sonra MGS- L326 epoksi reçine ve MGS- H265 sertleştirici ağırlıkça 100:25 oranında tartılarak bir kabın içerisinde mekanik karıştırıcı ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan epoksi reçine laminasyon için gerekli ölçülerde kesilen fiberlere el yatırması yöntemiyle (Şekil 5.13.) yedirildikten sonra fiberler laminasyona hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.12. Laminasyon işlemi için kesilen PEEK emprenyeli dokuma karbon fiber prepreg.



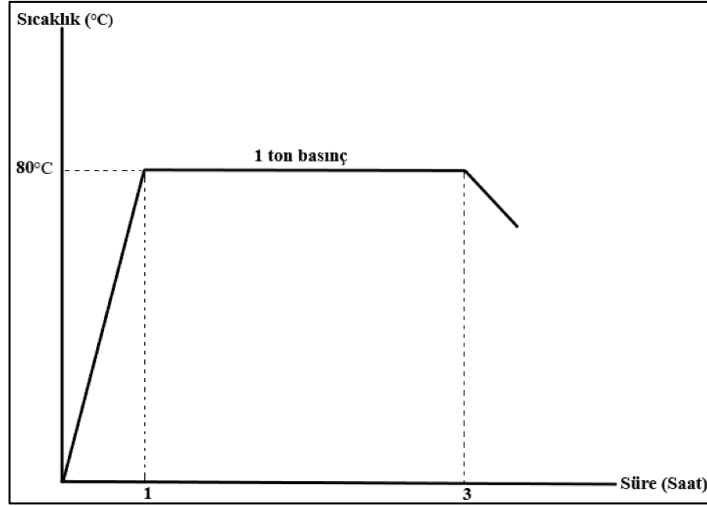
Şekil 5.13. El yatırması yöntemiyle fiberlere reçine yedirme işlemi.

5.2.4. Laminasyon İşlemi

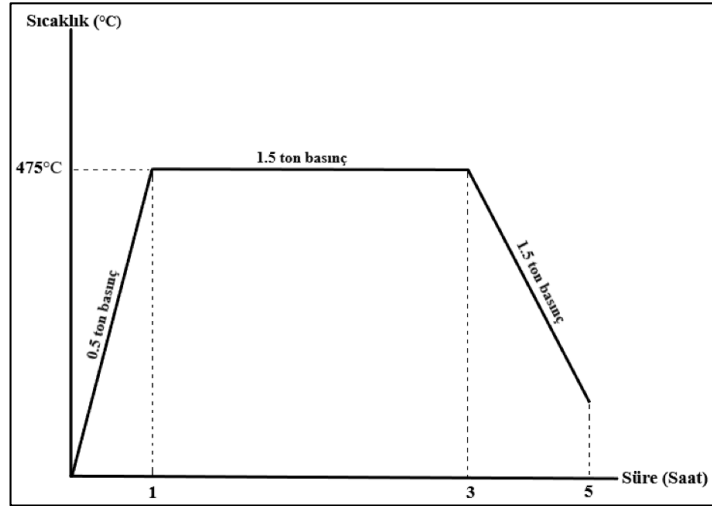
Laminasyon işlemi için gerekli bütün hazırlıklar tamamlandıktan sonra bu çalışmadaki genel numune üretim istif sırası (Çizelge 5.1.' de gösterilen) 3/2 yani metal/fiber/metal/fiber/metal olacak şekilde sıcak presleme cihazının koçları arasında kalacak sıkıştırma aparatının üzerine soyma kumaşı serilerek ilk kat metal plaka (2024-T3 veya AZ31) yerleştirilmiştir. Daha sonra el yatırması yöntemiyle epoksi reçine yedirilmiş fiber kumaşlar veya PEEK emprenyeli prepregler serilmiştir. Bu istifin üzerine ikinci kat metal plaka yerleştirilerek onunda üzerine epoksi reçine yedirilmiş fiber kumaşlar veya PEEK emprenyeli prepregler serilmiştir. Son kat metal plaka da yerleştirilmiş ve üzerine sırasıyla soyma kumaşı ve sıkıştırma aparatı kapatılarak istif laminasyon işlemine hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan bir istifin sembolik gösterimi Şekil 5.16.' da, bu çalışmada üretilen numuneler ise Şekil 5.18.' de görülmektedir.

Üretilen nihai kompozitlerde kalınlık yönünden homojenlik sağlayabilmek açısından takviye elemanı olarak kullanılan fiberlerin kat sayısı farklı kullanılmıştır. Tek yönlü karbon fiber ve epoksi kombinasyonu her katmanda 2'şer kat, dokuma karbon fiber ve epoksi kombinasyonu 2'şer kat, dokuma aramid fiber + epoksi 5'er kat, tek yönlü karbon fiber + PEEK 5'er kat, dokuma karbon fiber + PEEK 2'şer kat, dokuma aramid fiber + PEEK 5'er kat olacak şekilde istiflenmiştir. Ayrıca tek yönlü fiberler metal levhaların hadde yönüne paralel olacak şekilde istiflenmiştir.

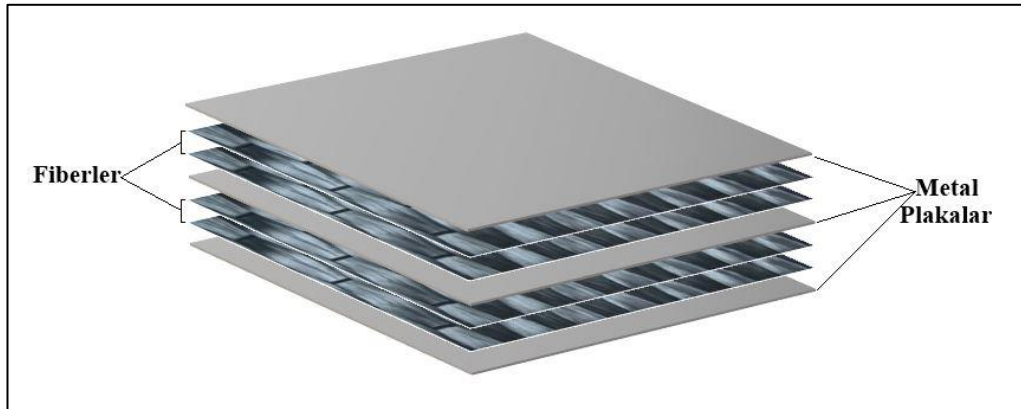
Hazırlanan FML istifleri, sıcak presleme cihazında (Şekil 5.17.) epoksi reçineli olanlar için 80 °C sıcaklıkta ve 1 ton basınç altında 3 saat süreyle kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Epoksi reçineli FML' lerin kürlenme rejimine ait grafik Şekil 5.14.' te görülmektedir. 3 saatin ardından sıcak presleme cihazından alınan malzemeler 24 saat süreyle de oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. PEEK reçineli FML istifleri ise 475 °C sıcaklıkta ve 1.5 ton basınç altında 3 saat süreyle kürleme işlemine tabi tutulmuştur. PEEK reçineli FML' lerin kürlenme rejimine ait grafik ise Şekil 5.15.' te görülmektedir.



Şekil 5.14. Epoksili FML' lerin kurlenme rejimine ait grafik.



Şekil 5.15. PEEK' li FML' lerin kurlenme rejimine ait grafik.



Şekil 5.16. Bir FML istifinin sembolik gösterimi.



Şekil 5.17. FML' lerin üretildiği sıcak pres cihazı.



Şekil 5.18. Üretilen numunelerin görüntüsü.

5.2.5. Three Roll Mill Yöntemiyle Nano Takviye

Epoksi reçinenin laminasyon kabiliyetini artırmak amacıyla yapılan literatür araştırmaları neticesinde reçineye nano partikül takviyesi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemle üretilen nanopartikül takviyeli epoksi reçineler ile daha sonra yapılacak

araştırmalara ışık tutması açısından sadece 2024-T3 alüminyum metal levha kullanılarak üretimler yapılmıştır. Nanografi firmasına gönderilen epoksi reçine içerisine three roll mill cihazında % 1 oranında grafen ve % 0,5 oranında KNT ilave edilmiştir. Bu işleme ait görsel Şekil 5.19.' da görölmektedir.



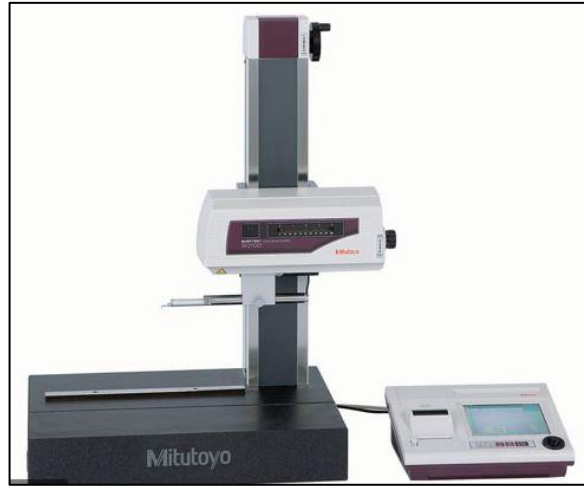
Şekil 5.19. Three roll mill cihazı ile epoksi reçineye nano takviye işlemleri.

5.3. FML KOMPOZİTLERİN KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Bu çalışma kapsamında üretilen FML'lerin mekanik özelliklerinin tespiti ve karşılaştırılması için birtakım test ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu test ve analizlerin tamamı Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) bünyesinde bulunan cihazlarda gerçekleştirilmiştir. Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin yüzeylere etkisini belirlemek için yüzey pürüzlülük ölçümü yapılmış, üretilen numunelere ise çekme, üç nokta eğme, kesme dayanımı ve darbe testleri uygulanmıştır. Yine numunelerin tabakalararası özelliklerinin testler öncesi ve sonrası değerlendirilmesi açısından SEM ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır.

5.3.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

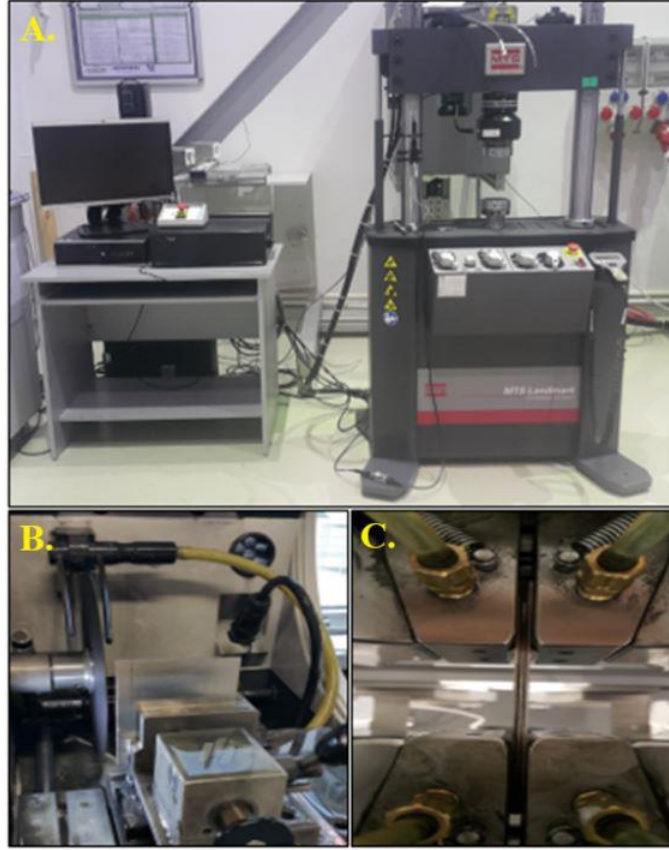
Alüminyum ve magnezyum levhaların yüzeyleri, laminasyondan önce 120' lik zımpara kâğıdı ile zımparalanarak ve shot peening işlemleriyle pürüzlendirme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerden sonra, alüminyum ve magnezyum levhaların yüzey pürüzlülükleri (ortalama R_a değerleri) Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile 2 μm çaplı bir prob kullanılarak ISO 4287-1997 standardına göre ölçülmüştür. Bu cihaza ait görsel Şekil 5.20.' de görülmektedir.



Şekil 5.20. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.

5.3.2. Çekme Testi

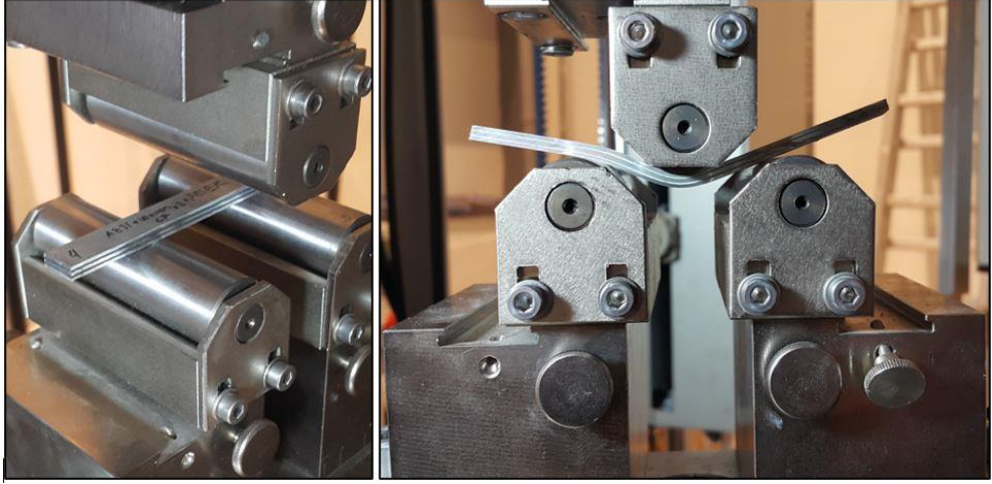
Üretilen lamine kompozitlerin mekanik özelliklerinin tayin edilebilmesi için çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi ASTM D3039' a göre Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi' nde bulunan MTS marka 100 kN' luk çekme cihazında 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Her lamine kompozit plakasından 1x10 cm ebatlarında 3 adet çekme numunesi çıkarılarak testler gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numuneleri hassas kesme cihazında ana plakadan kesilerek elde edilmiştir. Bu işlemlere ait görsel Şekil 5.21.' de görülmektedir.



Şekil 5.21. Çekme testine ait görseller. a) Numunelerin çekme testlerinin yapıldığı cihaz, b) Çekme numunelerinin hazırlanması işlemi, c) Numunenin çekme testi esnasındaki görüntüsü.

5.3.3. 3 Nokta Eğme Testi

Üretilen lamine kompozitlerin eğme dayanımı özelliklerinin tayin edilebilmesi için üç nokta eğme testi uygulanmıştır. 3 nokta eğme testi ASTM D7264' e göre Demir Çelik Enstitüsü bünyesindeki ZWICK marka 60 tonluk elektromekanik test cihazında 1 mm/dk eğme hızında mesnetler arası mesafe 20 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her lamine kompozit plakasından 1x10 cm ebatlarında 3 adet eğme numunesi çıkarılarak testler gerçekleştirilmiştir. Eğme testi numuneleri hassas kesme cihazında ana plakadan kesilerek elde edilmiştir. 3 nokta eğme testine ait görseller Şekil 5.22.' de görülmektedir.



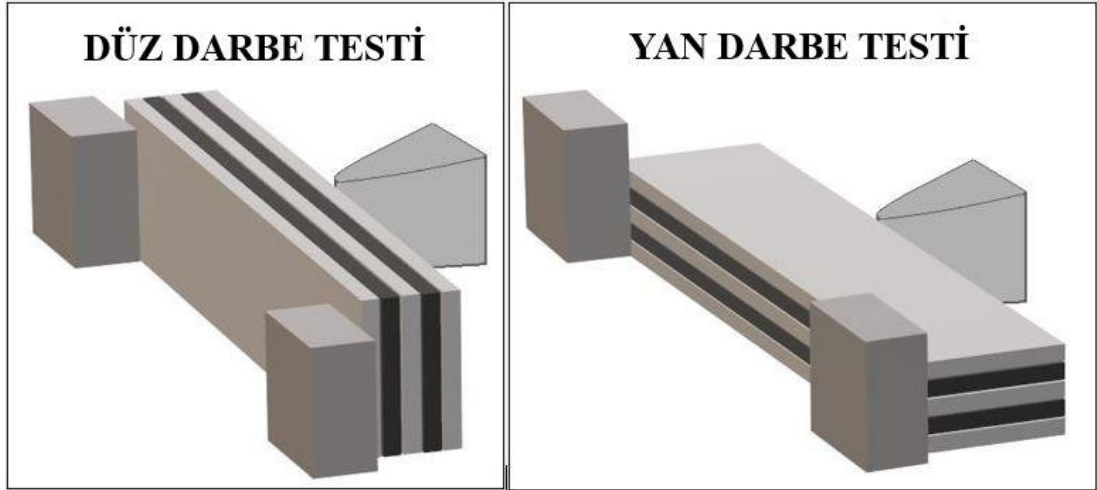
Şekil 5.22. Eğme testi uygulanan numunelerin görüntüleri.

5.3.4. Kesme Dayanımı Testi

Üretilen FML'lerin tabakalar arası kesme dayanımlarının tayin edilebilmesi için short beam shear metoduyla 3 nokta eğme testinden elde edilen verilerle tabakalar arası kesme dayanımları (TAKD) hesaplanmıştır. Kesme dayanımı testi ASTM D2344' e göre Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bulunan ZWICK marka 60 tonluk elektromekanik test cihazında 1 mm/dk eğme hızında gerçekleştirilmiştir.

5.3.5. Darbe Testi

Bu çalışma kapsamında üretilen FML'lerin oda sıcaklığında ve -65 °C sıcaklıktaki darbe dayanımlarını tayin etmek için belirtilen sıcaklıklarda ASTM E23' e göre Charpy darbe testi uygulanmıştır. Her grup için 55x10 mm ebatlarında 3'er adet darbe test numunesi kullanılmıştır. Darbe testi Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bulunan ZWICK marka 450 J darbe test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testleri için Huber marka soğutmalı sirkülatör kullanılmıştır. Darbe testleri numunelere düz (flatwise) ve yan (edgewise) olmak üzere ve iki farklı doğrultuda uygulanmıştır. Darbe testinin uygulandığı farklı iki doğrultu Şekil 5.23.' te, cihazlara ait görseller ise Şekil 5.24.' te görülmektedir.



Şekil 5.23. Darbe testinin yapıldığı doğrultuların sembolik gösterimi.



Şekil 5.24. Darbe testinde kullanılan cihazlar.

5.3.6. SEM Analizi

Üretilen numunelerin üretim sonrası arayüzey özelliklerinin incelenmesi için Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi' nde bulunan Carl Zeiss marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Bu cihaza ait görsel Şekil 5.25.' te görülmektedir.



Şekil 5.25. Taramalı elektron mikroskobu.

5.3.7. Optik Analiz

Üretilen numunelerin uygulanan testler sonrası arayüzey özelliklerinin incelenmesi için Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde bulunan NIKON marka shuttle pix portatif dijital stereo mikroskop kullanılmıştır. Bu cihaza ait görsel Şekil 5.26.' da görülmektedir.



Şekil 5.26. NIKON Shuttle Pix portatif dijital stereo mikroskop.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ SONUÇLARI

2024-T3 ve AZ31 levhaların orjinal yüzeyleri, 120' lik zımpara ile işlem görmüş halleri ve shot peening işleminden sonraki yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşmak amacıyla ölçümler yapılmış ve ortalama R_a (μm) değerleri hesaplanmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 6.1.' de görülmektedir. 2024-T3 alüminyum levhada shot peening işlemi zımparalama işlemine göre ortalama R_a değerinde yaklaşık iki kat daha fazla artış sağlamıştır. AZ31 magnezyum levhada ise shot peening işlemi ortalama R_a değerinde zımparalamaya göre yaklaşık 2,5 kat daha fazla artış sağlamıştır. Literatürden elde edilen verilere göre, metal yüzeyleri için optimum değer $R_a = 1,5 - 2,5 \mu\text{m}$ arasında olması gerektiği belirtilmektedir [173]. Elde ettiğimiz R_a değerleri literatürde belirtilen değerlerle uygunluk göstermektedir.

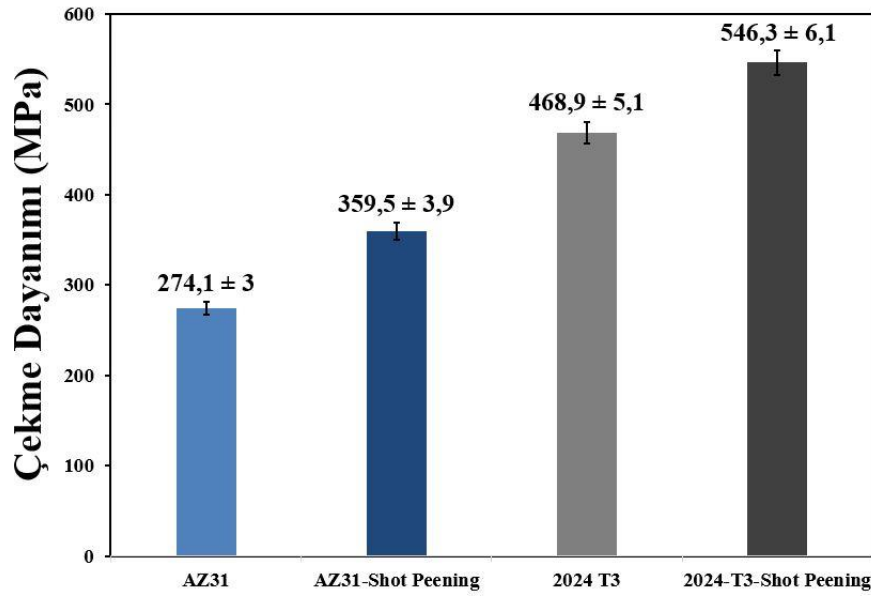
Çizelge 6.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

	2024-T3			AZ31		
	Orijinal Yüzey	Zımpara	Shot Peening	Orijinal Yüzey	Zımpara	Shot Peening
Ort. R_a (μm)	$0,35 \pm 0,04$	$2,35 \pm 0,2$	$3,89 \pm 0,4$	$0,58 \pm 0,06$	$1,88 \pm 0,1$	$3,58 \pm 0,3$

6.2. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Üretilen kompozitlerin ve metal levhaların çekme testleri 1 mm/dk çekme hızında ASTM D3039 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çekme testi sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır. Şekil 6.1.' de 2024-T3 ve AZ31 magnezyum levhalara uygulanan shot peening işleminin doğal bir sonucu olarak metal levhalarda oluşan deformasyon sertleşmesinin ve metal levha yüzeylerinde oluşan kalıcı basma

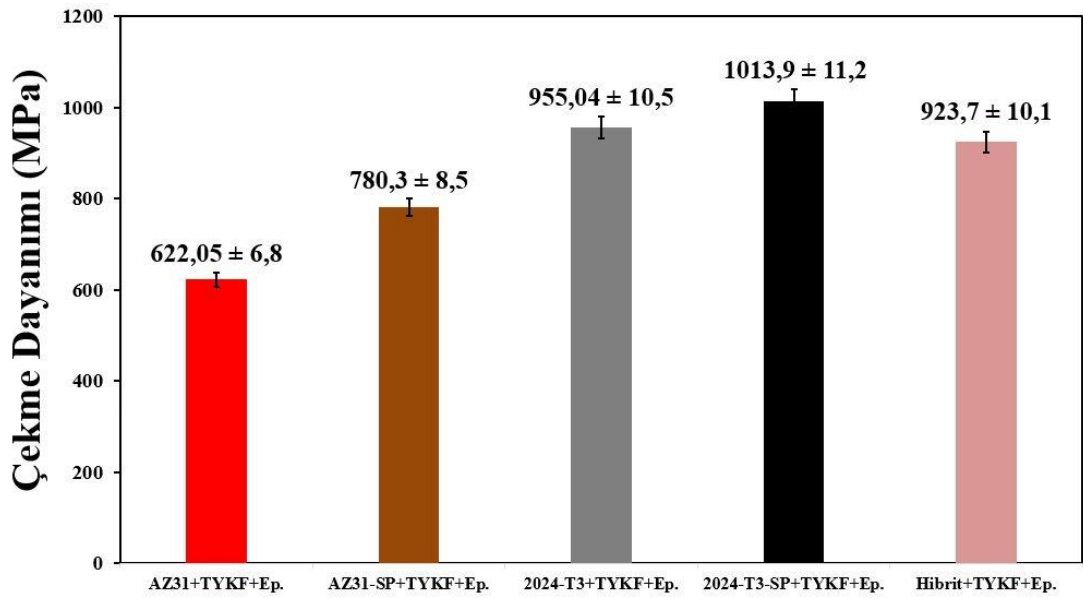
gerilmesinin etkisiyle AZ31 magnezyum levhada yaklaşık % 30, 2024-T3 alüminyum levhada ise % 16 oranında çekme mukavemetinde artış gözlemlenmiştir. Fattal ve arkadaşları (2020) yapmış oldukları çalışmada 2024-T3 alüminyuma shot peening işlemi uygulamış ve çekme dayanımında yaklaşık % 5,36 artış gözlemlemişlerdir [174]. Jamalian ve arkadaşlarının (2019) yaptıkları çalışmada ise AZ31 magnezyum alaşımının mekanik özelliklerinde shot peening işlemiyle elde ettikleri iyileşmenin bu çalışmada elde edilen verilerle uyduğu görülmektedir [175].



Şekil 6.1. FML üretiminde kullanılan AZ31, 2024-T3 ve bu levhaların çift yüzeyi shot peening işlemine tabi tutulmuş olanların çekme testi sonuçları.

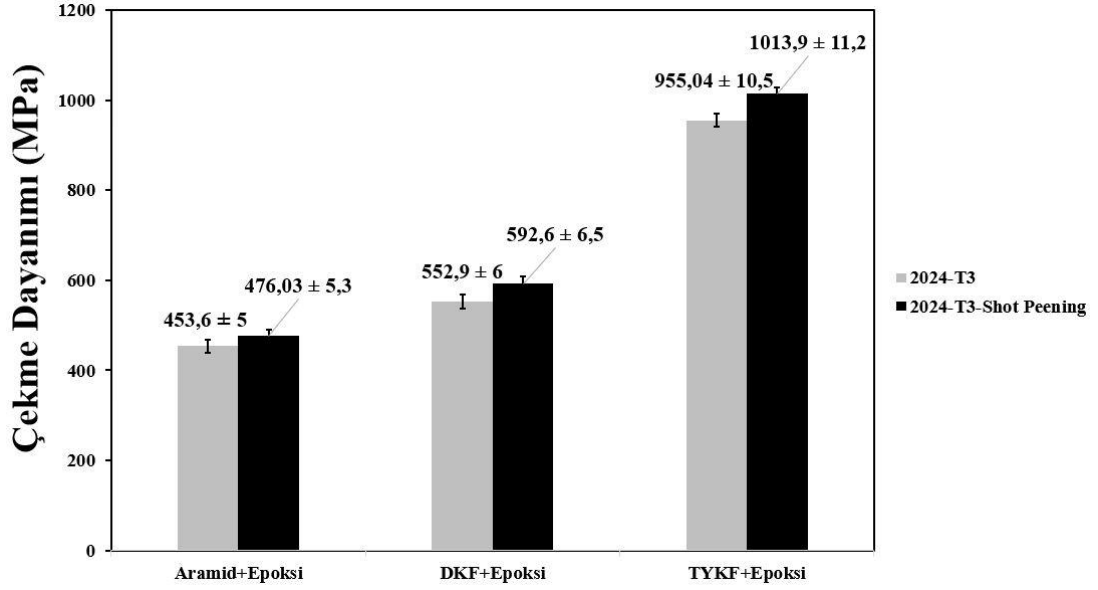
Şekil 6.2.' de tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi reçine takviyesiyle üretilmiş FML' lerin çekme mukavemetleri görülmektedir. $1013,9 \pm 11,2$ MPa çekme mukavemeti değeri ile en yüksek değer shot peening ile işlem görmüş 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen kompozite aittir. Grafik incelendiğinde shot peening işleminin AZ31 magnezyum levhalarla üretilen kompozitlerde yaklaşık % 25 oranında, 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen kompozitlerde ise % 6 oranında bir artış sağladığı tespit edilmiştir. 2024-T3/TYKF-Epoksi/AZ31/TYKF-Epoksi/2024-T3 istif kombinasyonu ile üretilen hibrit kompozitin çekme dayanımı ise 2024-T3 levhalarla üretilen kompozitlerin çekme dayanımı değerlerine çok yakındır. 2 alüminyum levha arasında 1 adet eş kalınlıkta magnezyum levha kullanımı toplam kompozit ağırlığında yaklaşık % 15 hafifleme sağlarken çekme dayanımında kayda

değer bir düşüş görülmemiştir. Shot peening işlemi FML' lerin metal kısımlarında meydana gelen deformasyon sertleşmesiyle beraber metallerin çekme dayanımında artış sağlamanın yanısıra metallerin yüzey pürüzlülüklerini ciddi seviyede geliştirdiği için mekanik kilitlenme (mechanical interlocking) mekanizması sayesinde adhezif bağlanmayı artırmaktadır. Wan ve arkadaşları (2015) yapmış oldukları çalışmada alüminyum levha yüzeylerini çelik bilya ile dövme işleminde sonra ürettikleri FML' lerin mekanik özelliklerinde artış sağlamışlardır [176]. Bulduğumuz sonuçlar literatür ile de uyum göstermektedir.



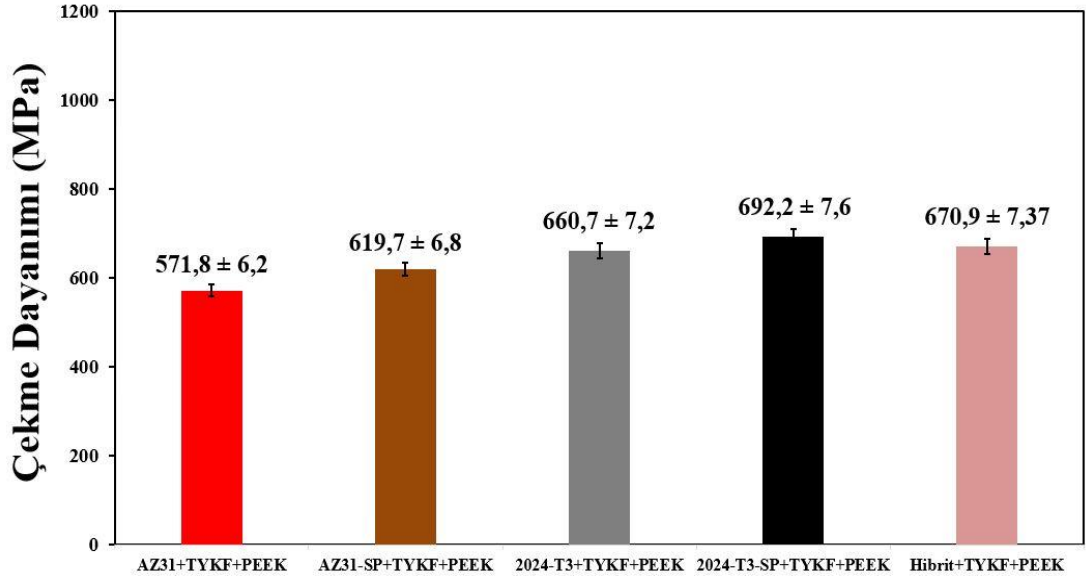
Şekil 6.2. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levhaların arasına takviye edilen epoksi reçineye eşlik eden farklı fiber türlerinin ve shot peening işleminin çekme dayanımına etkisi Şekil 6.3.' te verilen grafikte görülmektedir. Çekme testi sonuçlarına göre aramid fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı değerleri en düşük, dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerin ikinci sırada, tek yönlü karbon fiber takviyeli FML' lerin ise en yüksek seviyededir. Dokuma formunda olan aramid ve karbon fiber takviyelerde bütün fiberler çekme doğrultusunda yönlendirmediği için çekme dayanımı değerleri tek yönlü karbon fiber takviyeli FML' lere göre sırasıyla yaklaşık % 55 ve % 45 daha düşüktür. Tek yönlü karbon fiber takviyeli kompozitlerde fiber doğrultuları çekme yönünde olduğu için çekme dayanımı maksimum seviyededir.

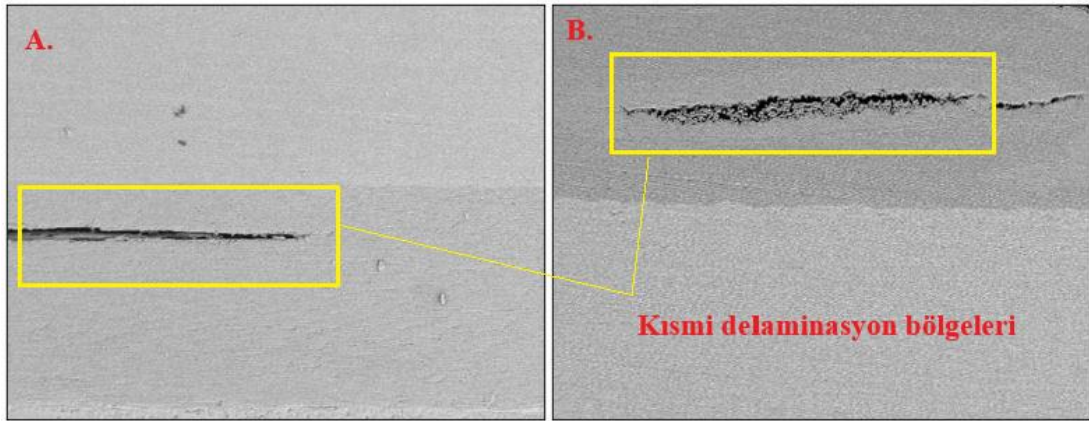


Şekil 6.3. 2024-T3 ve shot peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML'lerin çekme testi sonuçları.

Şekil 6.4.'teki grafikte PEEK ve TYKF takviyeli FML'lerin çekme dayanımı değerleri görülmektedir. $692,15 \pm 7,6$ MPa çekme mukavemeti değeri ile en yüksek değer shot peening ile işlem görmüş 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen kompozite aittir. PEEK ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML'ler epoksi reçine ve TYKF takviyesiyle üretilen kompozitlerin çekme dayanımı değerlerinden genel olarak daha düşük kalmıştır. Fakat bu kompozitlerde de shot peening (SP) işleminin çekme mukavemetini artırıcı etkisi görülmektedir. AZ31'li kompozitlerde % 8, 2024-T3'lü kompozitlerde % 4 oranında shot peening etkisiyle çekme dayanımında artış sağlanmıştır. PEEK ve TYKF takviyesiyle üretilen hibrit FML ise $670,9 \pm 7,37$ MPa çekme mukavemeti değeri ile serideki en yüksek ikinci değere sahiptir. Jen ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada AZ31, PEEK ve tek yönlü karbon fiberle ürettikleri FML'lerin mekanik özelliklerini incelemişler ve 434.59 ile 622.85 MPa aralığında değerler elde etmişlerdir [177]. Bulmuş olduğumuz sonuçlar genel olarak literatürle uyum sağlamaktadır. Fakat 450 °C sıcaklıkta yapılan üretim sonrası termal genleşme farklarının etkisiyle numunelerde kısmi delaminasyonların (Şekil 6.5.) gözlenmesinden dolayı epoksi ile üretilen FML'lere kıyasla çekme dayanımı değerlerinin düşük kaldığı düşünülmektedir.

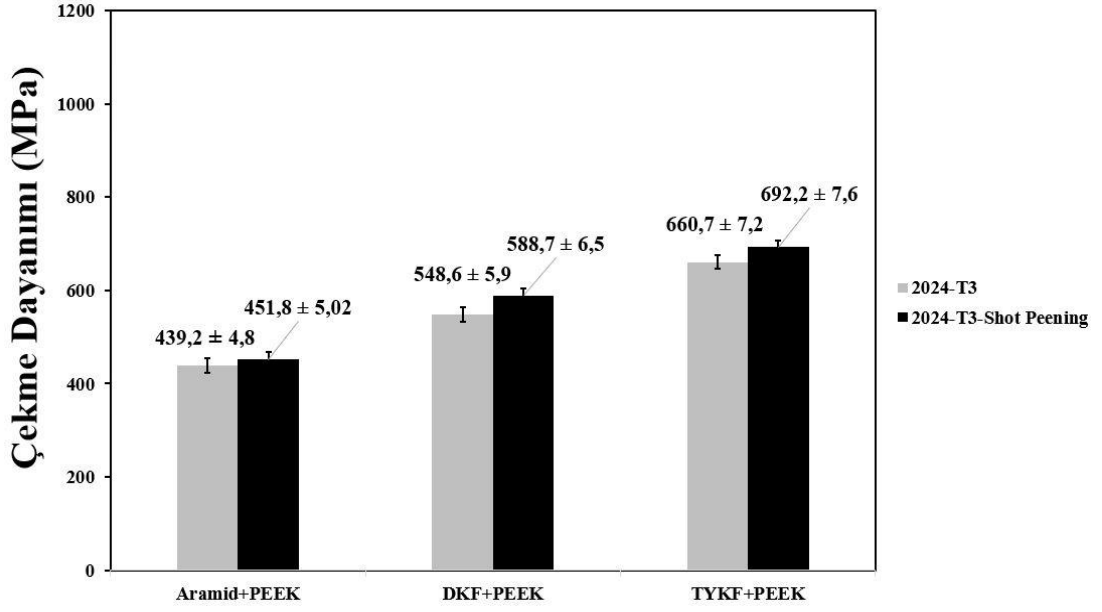


Şekil 6.4. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML'lerin çekme testi sonuçları.



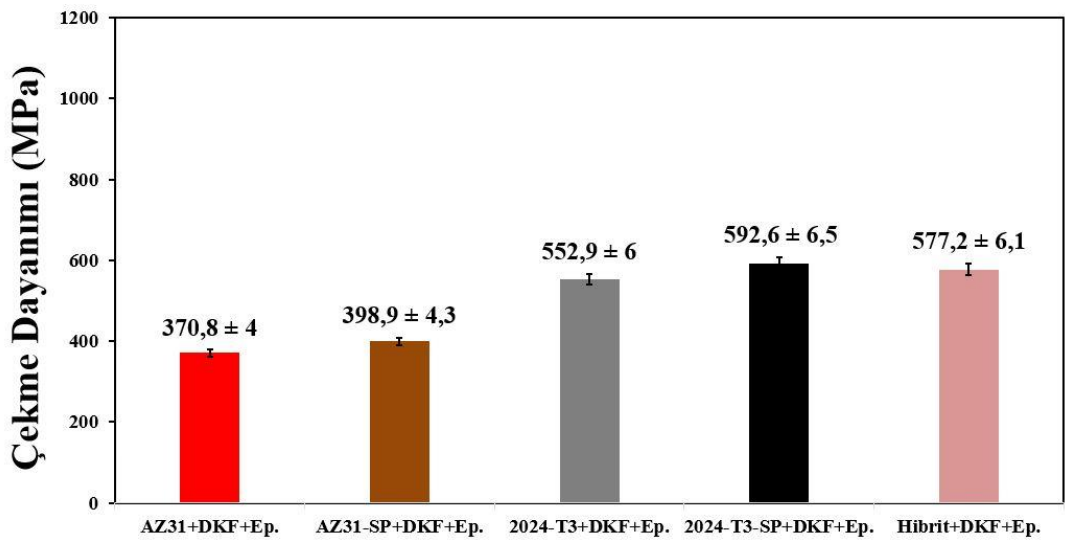
Şekil 6.5. PEEK takviyeli kompozitlerde kısmi delaminasyon bölgeleri, A. PEEK+TYKF takviyeli FML arayüzeyi, B. PEEK+DKF takviyeli FML arayüzeyi.

2024-T3 alüminyum levhaların, PEEK emprenyeli farklı fiber türleri ile kombine edilerek üretilen FML'lerin çekme dayanımı değerleri Şekil 6.6.'da görülmektedir. Fiber formlarının dokuma ve tek yönlü olmasının çekme dayanımı trendine etkisi epoksi reçineli karşılıklarıyla (Şekil 6.3.) paralellik göstermektedir. Aramid fiber takviyeli ve DKF takviyeli kompozitin TYKF takviyeli kompozite göre çekme dayanımlarının sırasıyla % 50 ve % 20 oranında daha düşük olduğu görülmektedir.



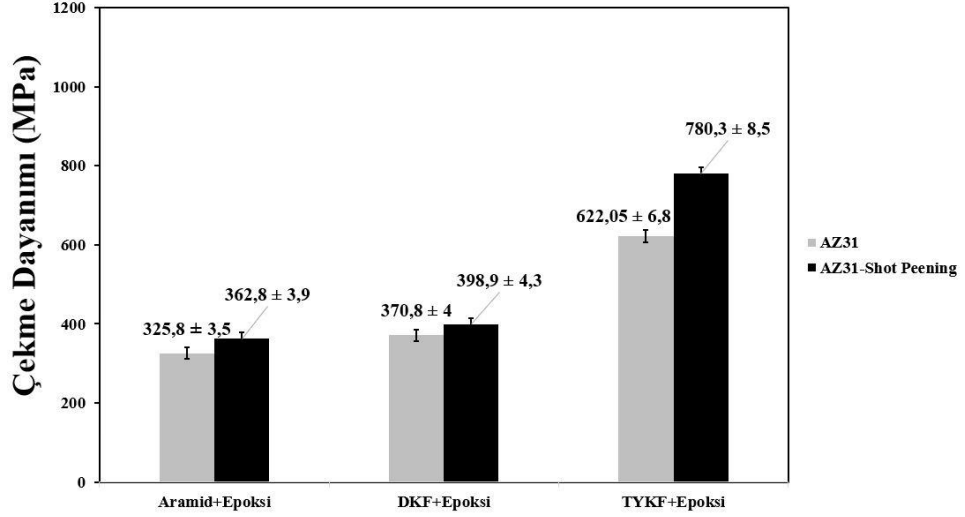
Şekil 6.6. 2024-T3 ve shot peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.

DKF ve epoksi reçine takviyesiyle üretilmiş FML' lerin çekme mukavemetleri Şekil 6.7.' de görülmektedir. $592,6 \pm 6,5$ MPa çekme mukavemeti değeri ile en yüksek değer shot peening ile işlem görmüş 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen kompozite aittir. Shot peening işlemi her iki metal ile üretilen FML' lerin çekme dayanımında yaklaşık % 8 oranında artış sağlamıştır.



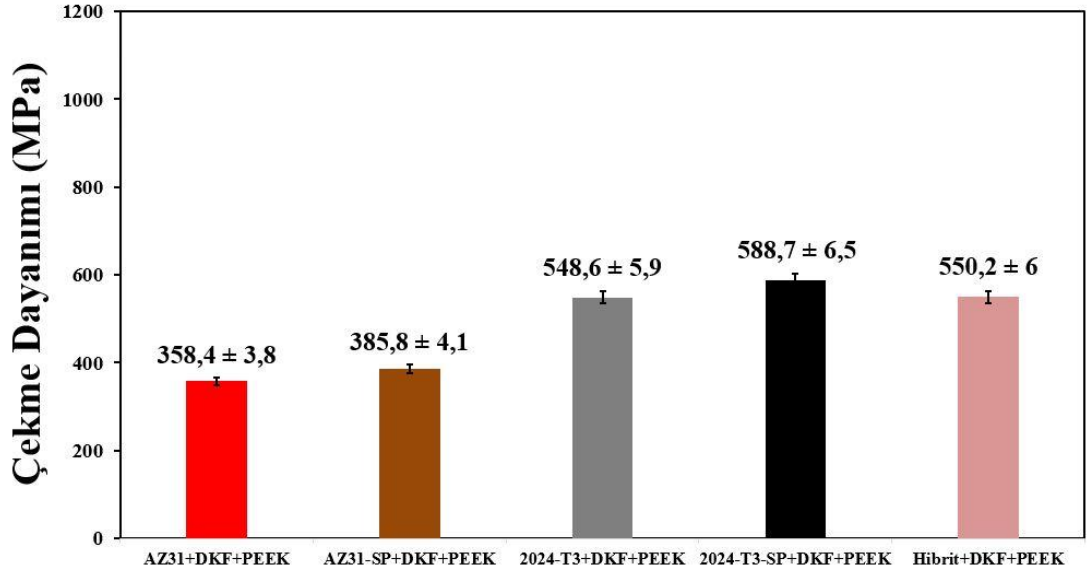
Şekil 6.7. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.

AZ31 magnezyum levhaların arasına takviye edilen epoksi reçine ile farklı fiber türlerinin ve shot peening işleminin çekme dayanımına etkisi Şekil 6.8.' de verilen grafikte görülmektedir. AZ31' in shot peening işlemi görmüş halleri ve TYKF ile üretilen FML $780,3 \pm 8,5$ MPa değeri ile en yüksek değere sahiptir. Ve shot peening işleminin yaklaşık % 27 oranında çekme dayanımı artışı sağladığı görülmektedir.



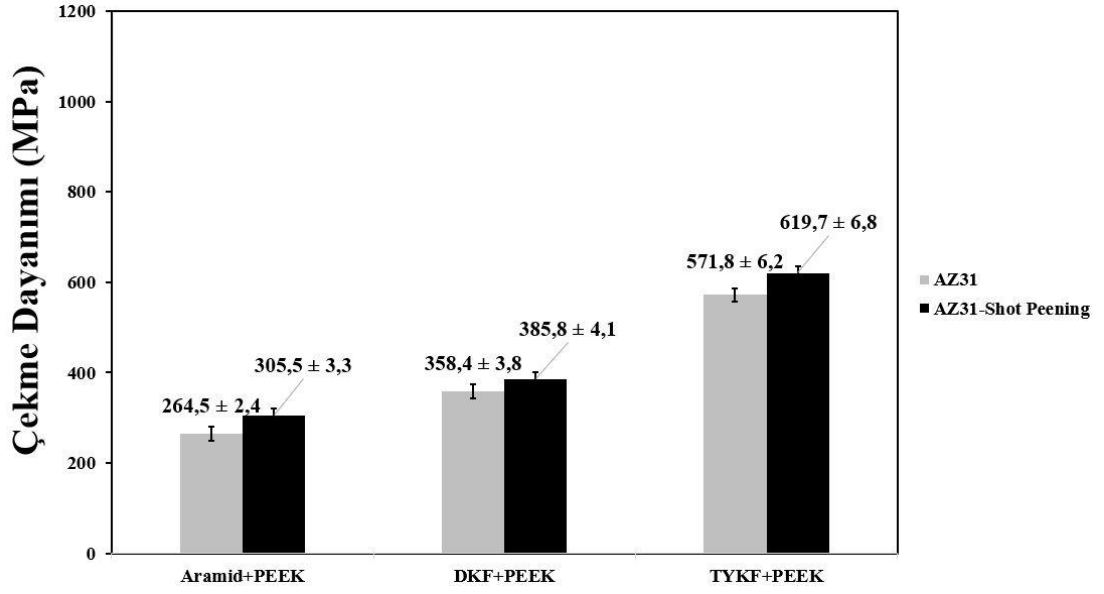
Şekil 6.8. AZ31 ve shot peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.

PEEK ve DKF takviyeli FML' lerin çekme dayanımı değerleri Şekil 6.9.' daki grafikte görülmektedir. $588,7 \pm 6,5$ MPa çekme mukavemeti değeri ile en yüksek değer shot peening ile işlem görmüş 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen kompozite aittir. Shot peening işleminin etkisiyle AZ31' li kompozitlerde % 10, 2024-T3' lü kompozitlerde % 7 oranında çekme dayanımında artış sağlanmıştır. Hibrit FML ise 550 ± 6 MPa çekme dayanımı değeriyle yine en yüksek ikinci değere sahiptir. Fakat bu grupta epoksi reçine takviyeli karşılığıyla kıyaslandığında (Şekil 6.7.) çekme dayanımı değerlerinin kısmi delaminasyon etkisiyle daha düşük kaldığı görülmektedir.



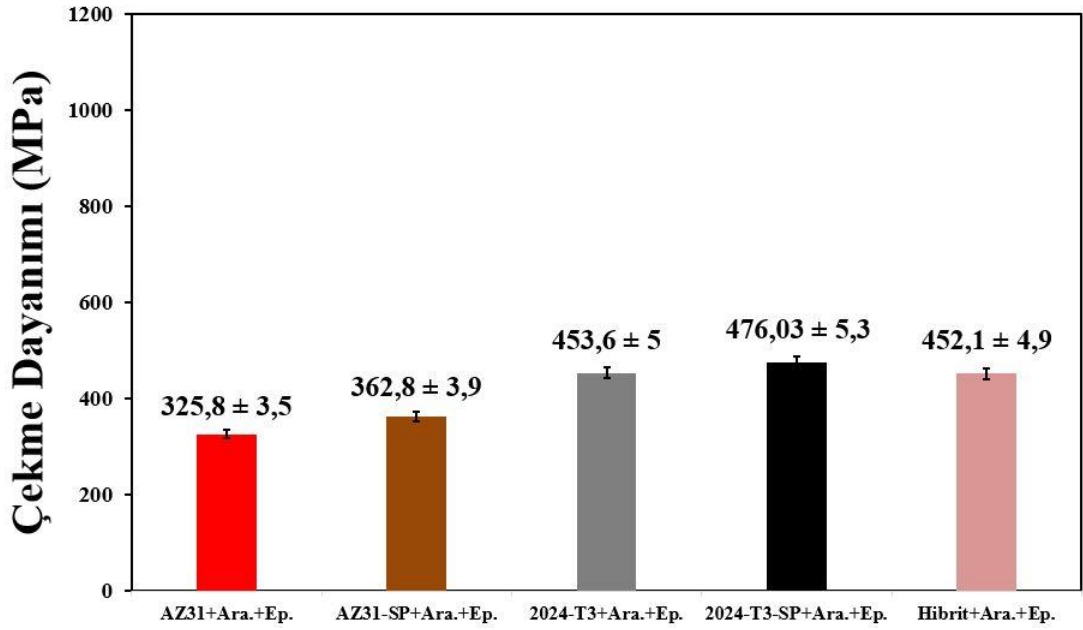
Şekil 6.9. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin çekme testi sonuçları.

AZ31 metalinin shot peening etkisi ve PEEK emprenyeli fiber türlerinin farklılaşması ile çekme dayanımının nasıl değiştiğine ilişkin grafik Şekil 6.10.' da görülmektedir. 619,7 ± 6,8 MPa çekme dayanımı değeri ile en yüksek değer shot peening işlemi görmüş levha, PEEK ve TYKF bileşenleriyle üretilen FML' ye ait iken en düşük değer 264,5 ± 2,4 MPa ile AZ31, PEEK ve aramid fiber takviyeli FML' ye aittir. Aramid takviyeli kompozitin çekme dayanımının AZ31 metalinin çekme dayanımının altında olması 450 °C olan üretim sıcaklığının aramidin yapısını bozmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Para-aramid liflerinin 390 °C üzerinde oksidasyona uğramaya başladığı ve bu liflerin 450 °C üzerinde dekompozisyona uğradığı bilgisine literatürden ulaşılmıştır [178].



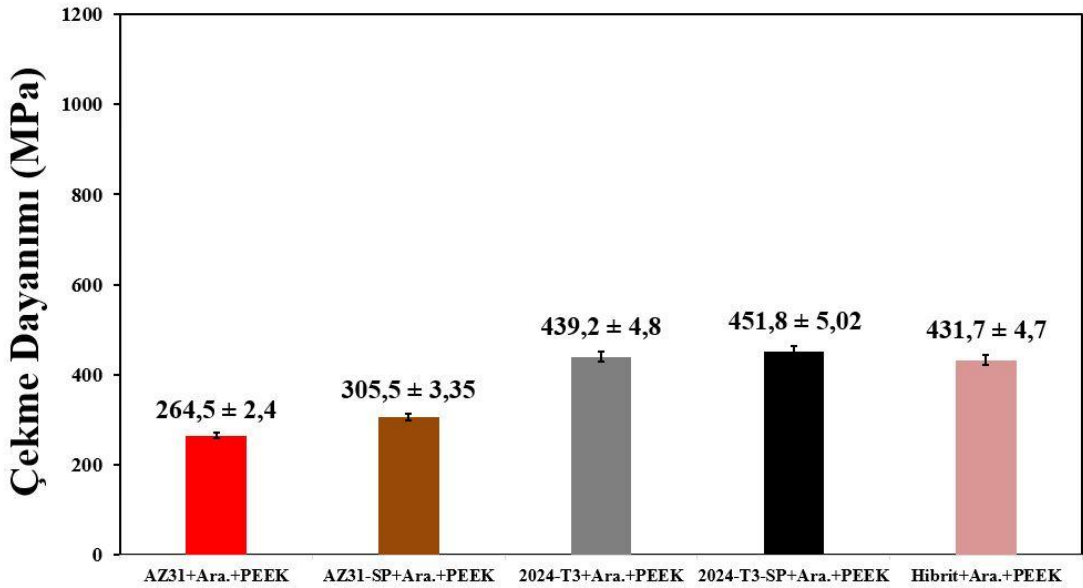
Şekil 6.10. AZ31 ve shot peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.

AZ31 metal levhaların arasına epoksi reçine ve farklı tür fiberlerin takviyesi ile üretilen kompozitlerin çekme dayanımları grafik halinde Şekil 6.11.' de görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı değeri $476,03 \pm 5,3$ MPa ile 2024-T3 (shot peening) ile üretilen kompozite aittir. Aramid fiber takviyeli FML' lerin çekme dayanımları karbon esaslı olanlara göre düşük gibi görünsede darbe testine maruz kaldığında spesifik esneklik özelliklerinin getirdiği avantajla öne çıkan özelliklere sahip olmaktadır.



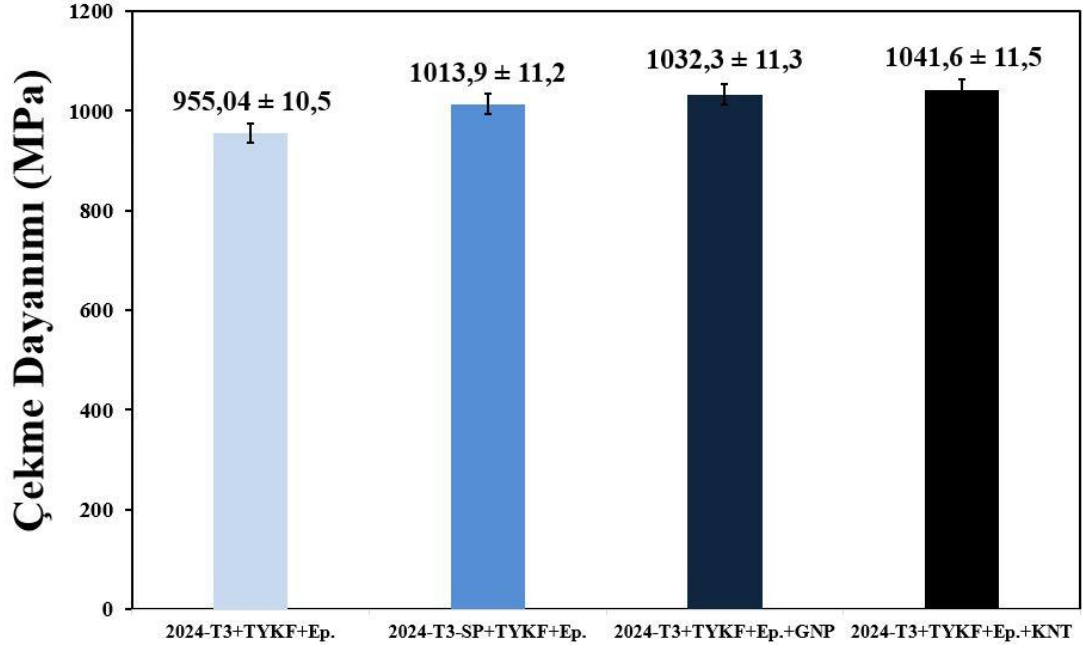
Şekil 6.11. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML'lerin çekme testi sonuçları.

PEEK emprenyeli aramid, DKF ve TYKF ile üretilen FML'lerin çekme dayanımı grafiği Şekil 6.12.'de görülmektedir. En yüksek değer $451,8 \pm 5,02$ MPa ile 2024-T3 (shot peening) ile üretilen FML'ye aittir. Yüksek üretim sıcaklığının aramidin oksidasyonuna sebep olması ve FML'lerin çekme dayanımlarının epoksi reçineli karşılıklarına kıyasla daha düşük kaldığı bu grafikte açıkça anlaşılmaktadır.



Şekil 6.12. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML'lerin çekme testi sonuçları.

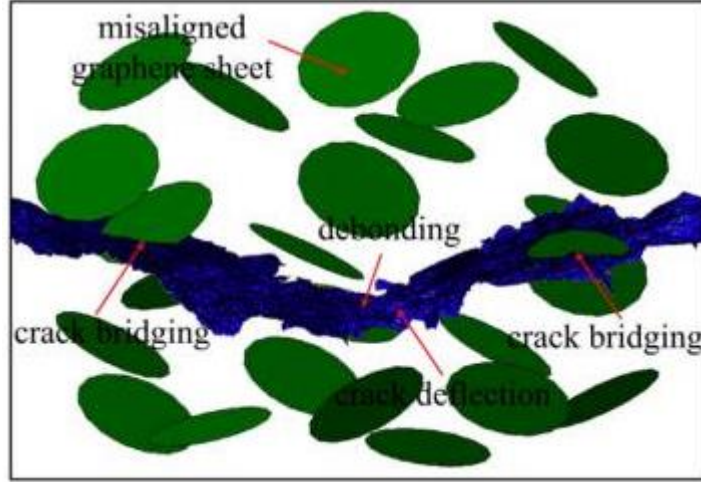
Epoksi reçine içerisine three roll mill cihazıyla % 1 GNP ve % 0,5 KNT ilave edildikten sonra bu reçineler, TYKF ve 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen FML'lerin çekme dayanımı değerleri Şekil 6.13.'te görülmektedir. Epoksi matrise eklene nano partikül takviyeler eğer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabilsen matris içerisinde oluşmaya başlayan bir çatlağın ilerlemesini çatlak köprüleme (crack bridging) olarak tabir edilen mekanizmayla yavaşlatabilir ve bu sayede adhezif özelliklerde iyileşme sağlayabilir [179]. Dolayısıyla bu çalışmada nano partikül takviyesiyle malzemenin çekme dayanımında meydana gelen artış bu duruma bağlanabilir. Bu mekanizma sembolik olarak Şekil 6.15.'te görülmektedir. % 1 GNP ilaveli reçineyle üretilen FML' nin çekme dayanımının saf reçineyle üretilene göre % 8 artışla $1032 \pm 11,3$ MPa, % 0,5 KNT ilaveli reçineyle üretilen FML' nin çekme dayanımının ise % 9 artışla $1041,6 \pm 11,5$ MPa olduğu görülmektedir. Şekil 6.14.'te ise FML'lerin delaminasyon sonrası metal yüzeyleri görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde nanopartikül ilaveli kompozitlerde adhezif mekanizmanın geliştiği ve fiber kalıntılarının olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda çekme dayanımındaki artışı kanıtlar niteliktedir. Sydlık ve arkadaşları (2013), yapmış oldukları çalışmada epoksi reçineye % 1 oranında karbon nano tüp (epCNT2) ilavesinin çekme dayanımında yaklaşık % 50 oranında iyileştirme sağladığını gözlemlemişlerdir [180]. Rafiee ve arkadaşları (2009), epoksiye ağırlıkça % 0,1 GNP ilavesinin Young modülünü % 31, çekme mukavemetini % 40 ve mod I kırılma tokluğunu yaklaşık % 53 artırdığını tespit etmişlerdir [153].



Şekil 6.13. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin çekme testi sonuçları.



Şekil 6.14. Nanopartikül takviyeli FML' lerin delaminasyon sonrası metal tabakalarının arayüzey görüntüsü.



Şekil 6.15. Nanopartikül takviyeli epoksi matriste çatlak morfolojisi [179].

6.2.1. Metalik Hacim Fraksiyonu (MHF), Yoğunluk ve Özgül Dayanım Hesaplama

Üretilen bütün FML'lerin metalik hacim fraksiyonları (MHF) aşağıdaki (6.1) numaralı formüle göre hesaplanmıştır. Hesaplanan MHF değerleri Çizelge 6.2' de görülmektedir. Numune kalınlıkları kalibrasyonlu dijital kumpasla ölçülmüştür.

$$MHF = (N_m \cdot t_m) / t_{FML} \quad (6.1)$$

N_m : Metal Levha Sayısı

t_m : Metal Levha Kalınlığı

t_{FML} : FML'nin toplam kalınlığı

Numunelerin yoğunlukları (6.2) numaralı formüle göre teorik olarak hesaplanmıştır. Karbon Fiber + Epoksi kompozit yoğunluğu $1,6 \text{ gr/cm}^3$, Karbon Fiber + PEEK kompozit yoğunluğu $1,55 \text{ gr/cm}^3$, Aramid Fiber + Epoksi kompozit yoğunluğu $1,34 \text{ gr/cm}^3$, Aramid Fiber + PEEK kompozit yoğunluğu $1,38 \text{ gr/cm}^3$ olarak hesaba katılmıştır [181]. Bütün numunelere ait yoğunluk değerleri Çizelge 6.2.' de görülmektedir.

$$\rho_{FML} = MHF \cdot \rho_{metal} + (1-MHF) \cdot \rho_{kompozit} \quad (6.2)$$

ρ_{FML} : FML'nin yoğunluğu

ρ_{metal} : Metalin yoğunluğu

$\rho_{kompozit}$: Kompozitin yoğunluğu

Üretilmiş olan FML'lerin özgül çekme dayanımları (6.3) numaralı formülle hesaplanmıştır. Bütün numunelere ait özgül çekme dayanımı (ÖÇD) değerleri Çizelge 6.2.' de görülmektedir.

$$\sigma_{\text{ÖÇD}} = \sigma_{FML} / \rho_{FML} \quad (6.3)$$

$\sigma_{\text{ÖÇD}}$: Özgül Çekme Dayanımı

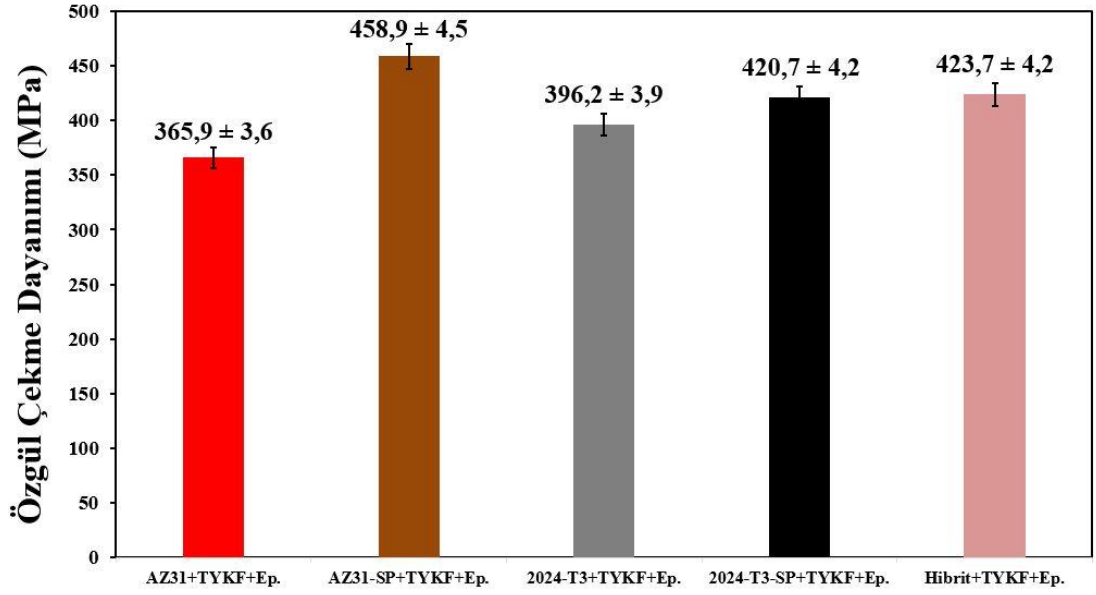
σ_{FML} : FML'nin çekme dayanımı

ρ_{FML} : FML'nin yoğunluğu

Şekil 6.16.' da 2024-T3, TYKF ve epoksi reçine kombinasyonu ile üretilen FML'lerin özgül çekme dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafik yer almaktadır. Çekme mukavemeti açısından en yüksek değerler bu gruba ait olduğu için ÖÇD kıyaslaması bu grup üzerinden yapılmıştır. 2024-T3 ile üretilen FML'ler en yüksek çekme dayanımına sahip olsalar da yoğunluk kavramı devreye girdiğinde AZ31 ile üretilen FML'ler magnezyumun düşük yoğunluğu nedeniyle ÖÇD açısından ön plana çıkmaktadır. $458,9 \pm 4,5$ MPa ÖÇD değeri ile AZ31 ile üretilen FML 2024-T3 matrisli FML'nin önüne geçmektedir. Ayrıca hibrit FML'nin yapısında bulunan magnezyum levhanın sağladığı % 15'lik ağırlık kazancının etkisiyle $423,7 \pm 4,2$ MPa ÖÇD değeri ile 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen FML'den yüksek bir değere sahiptir.

Çizelge 6.2. Üretilen FML' lerin kalınlık, MHF, yoğunluk ve ÖÇD değerleri.

FML TİPİ	Kalınlık (t, mm)	Metalik Hacim Fraksiyonu (MHF)	Yoğunluk (ρ , gr/cm ³)	Özgül Çekme Dayanımı $\sigma_{ÖÇD}$ (MPa.cm ³ /gr)
AZ31+TYKF+Ep.	3,73	0,64	1,7	365,9
AZ31-SP+TYKF+Ep.	3,71	0,64	1,7	458,9
2024-T3+TYKF+Ep.	3,45	0,69	2,41	396,2
2024-T3-SP+TYKF+Ep.	3,43	0,69	2,41	420,7
Hibrit+TYKF+Ep.	3,45	0,69	2,18	423,7
AZ31+TYKF+PEEK	3,86	0,62	1,68	340,4
AZ31-SP+TYKF+PEEK	3,84	0,62	1,68	368,9
2024-T3+TYKF+PEEK	3,6	0,66	2,36	279,9
2024-T3-SP+TYKF+PEEK	3,58	0,67	2,37	292,1
Hibrit+TYKF+PEEK	3,84	0,62	2,1	319,5
AZ31+DKF+Ep.	3,56	0,67	1,71	216,8
AZ31-SP+DKF+Ep.	3,54	0,67	1,71	233,3
2024-T3+DKF+Ep.	3,26	0,73	2,46	224,8
2024-T3-SP+DKF+Ep.	3,24	0,73	2,46	240,9
Hibrit+DKF+Ep.	3,27	0,73	2,21	261,2
AZ31+DKF+PEEK	3,66	0,65	1,69	212,1
AZ31-SP+DKF+PEEK	3,64	0,65	1,69	228,3
2024-T3+DKF+PEEK	3,56	0,67	2,37	231,5
2024-T3-SP+DKF+PEEK	3,54	0,67	2,37	248,4
Hibrit+DKF+PEEK	3,86	0,62	2,1	262,1
AZ31+Ara.+Ep.	3,44	0,69	1,63	199,8
AZ31-SP+Ara.+Ep.	3,42	0,7	1,64	221,2
2024-T3+Ara.+Ep.	3,11	0,77	2,44	185,9
2024-T3-SP+Ara.+Ep.	3,09	0,77	2,44	195,1
Hibrit+Ara.+Ep.	3,2	0,75	2,15	210,3
AZ31+Ara.+PEEK	3,25	0,73	1,66	159,3
AZ31-SP+Ara.+PEEK	3,23	0,73	1,66	184,1
2024-T3+Ara.+PEEK	3	0,8	2,5	175,7
2024-T3-SP+Ara.+PEEK	2,98	0,8	2,5	180,7
Hibrit+Ara.+PEEK	3,4	0,7	2,13	202,6
2024-T3+TYKF+Ep.+GNP	3,45	0,69	2,41	428,3
2024-T3+TYKF+Ep.+KNT	3,45	0,69	2,41	432,2



Şekil 6.16. 2024-T3, TYKF ve epoksi reçine kombinasyonu ile üretilen FML' lerin özgül çekme dayanımlarının karşılaştırılmasına ait grafik.

6.3. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ SONUÇLARI

Bu çalışma kapsamında üretilen bütün FML' lerin üç nokta eğme testleri ZWICK 600 kN elektromekanik test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her gruptan 10x100 mm boyutlarında 3 adet numuneye 2 mm/dk eğme hızıyla test uygulanmıştır. Eğme dayanımları (6.4) numaralı eşitliğe göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_{eğme} = 3F_{max}.L / 2b.d^2 \quad (6.4)$$

$\sigma_{eğme}$: eğme dayanımı, (MPa),

F_{max} : Hasara neden olan maksimum kuvvet yük, (N),

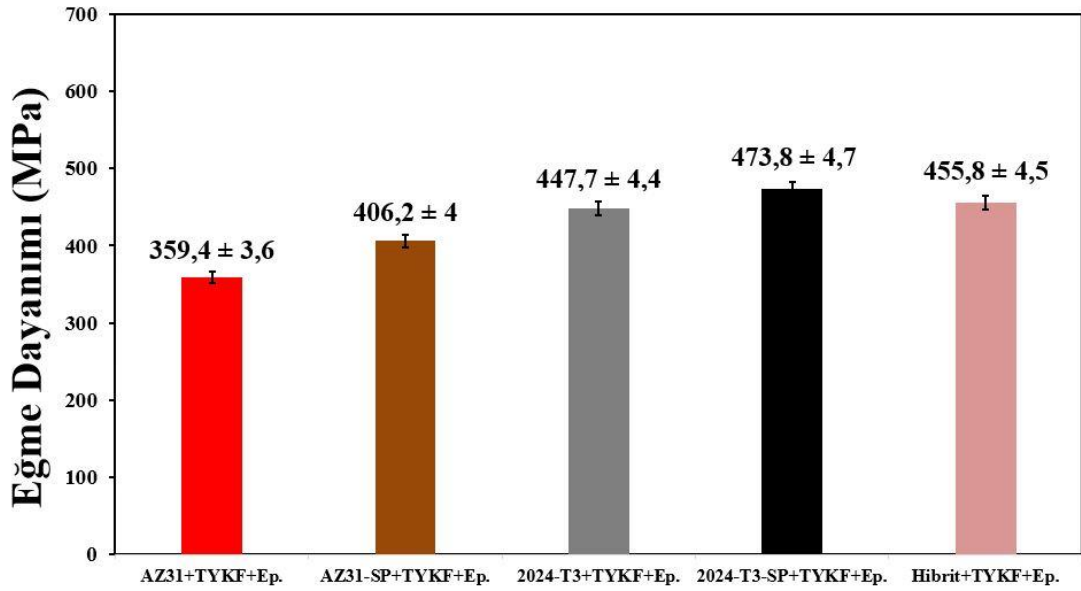
L : Mesnetler arasındaki mesafe, (mm),

b : Deney numunesinin genişliği, (mm),

d : Deney numunesinin kalınlığı, (mm).

Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin eğme dayanımları grafik halinde Şekil 6.17.'de görülmektedir. 473,8 ± 4,7 MPa ile en yüksek eğme dayanımı değerine 2024-T3 (shot peening) ile üretilen kompozit sahiptir. Çekme dayanımı değerlerine paralel olarak hibrit FML düşük yoğunluğuna oranla 455,8 ± 4,5 MPa eğme dayanımı ile

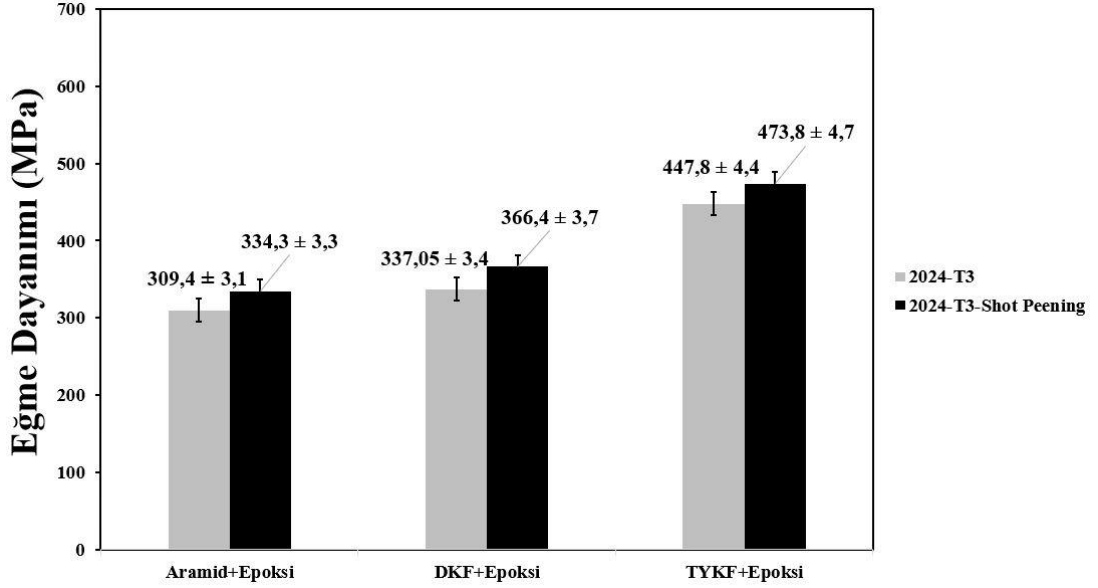
ikinci en yüksek değere sahiptir. Çekme dayanımı değerlerinde epoksi reçine ile üretilen FML' lerin değerleri PEEK' e kıyasla daha yüksek olmakla beraber eğme grafikleri incelendiğinde PEEK emprenyeli prepregler ile üretilen kompozitlerin eğme dayanımları daha yüksektir. PEEK' in, epoksi reçineye kıyasla daha yüksek elastik modül değerine ve daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı bu malzeme ile üretilen FML' lerin eğme dayanımları daha yüksektir. Açıkçası, PEEK matrisin epoksiye göre sahip olduğu yüksek elastik özellikler ve tokluk, lifler arasındaki çatlak büyümesine karşı çok daha yüksek bir dirence yol açar, bu sebeple eğme yüküne karşı kompozitin gösterdiği karşı mukavemet artmış olmaktadır [182]. Literatürden ulaşılmış olduğumuz bilgiler bu çalışmadaki verileri doğrular niteliktedir.



Şekil 6.17. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.

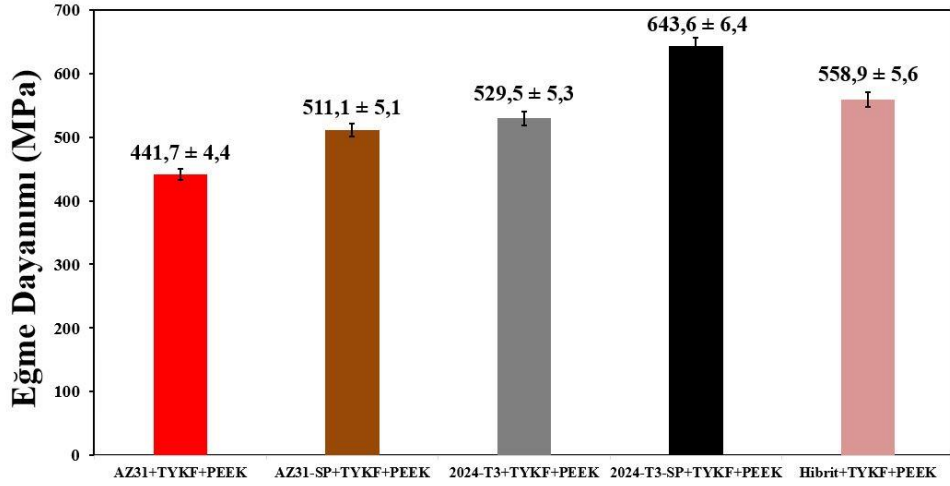
2024-T3 alüminyum levha ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin eğme dayanımına shot peening işleminin ve farklı fiber türlerinin etkisi Şekil 6.18.' de görülmektedir. TYKF ile üretilen kompozitte fiberlerin tamamının yönelimi eğme doğrultusunda olduğu için en yüksek eğme dayanımı değerine bu kompozitler sahiptir. Tek yönde mukavemetin arandığı durumlarda bu öne çıkan bir özellik olabilir. Fakat her yönde eşit ve homojen mukavemetin arandığı durumlarda dokuma fiber takviyeli kompozitler daha uygun bir seçenek olacaktır. DKF ile üretilen FML' nin eğme dayanımı, aramid fiber ile üretilene göre yaklaşık % 10 daha yüksek bir eğme

dayanımına sahiptir. Ayrıca shot peening işleminin eğme dayanımını da artırıcı bir etkisi olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Bütün gruplarda yaklaşık % 10' luk bir artış sağlamıştır.



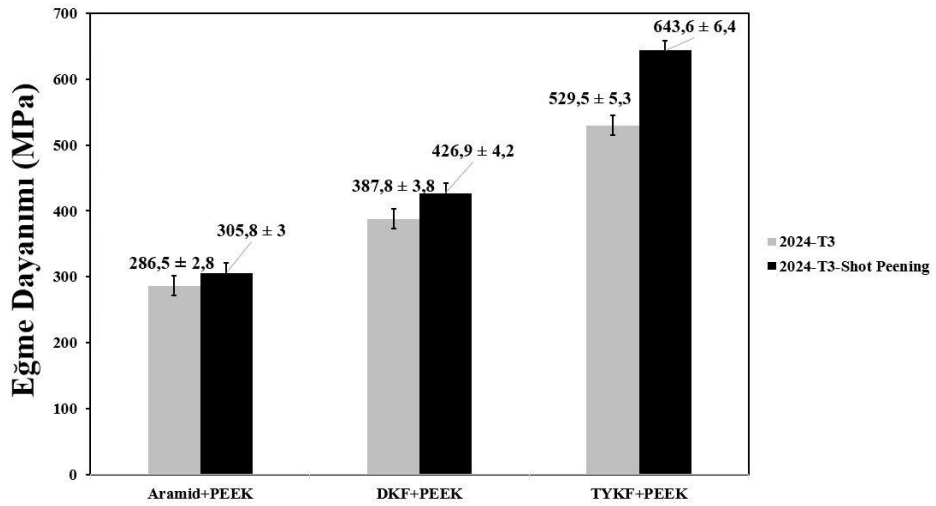
Şekil 6.18. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.

PEEK takviyeli fiberler ile üretilen FML' lerin eğme dayanımı değerleri Şekil 6.19' da görülmektedir. 633,6 ± 6,4 MPa ile en yüksek değer 2024-T3 (shot peening) ile üretilen kompozite aittir. Shot peening işlemi AZ31' li kompozitte % 15, 2024-T3' lü kompozitte ise % 21' lik bir eğme dayanımı artışı sağlamıştır. PEEK takviyeli fiberlerle üretilen FML' lerin eğme dayanımı değerleri optimum sonuçlara ulaşılmasına neden olmuştur. Bu durumun temelinde yatan sebep rijit ve kırılğan epoksi matrise göre PEEK' in sahip olduğu üstün tokluk ve mekanik özelliklerdir. PEEK' in tabakalar arası kesme gerilmelerine karşı koyabilme yeteneği eğme dayanımı özelliklerini de olumlu yönde etkilemiştir.



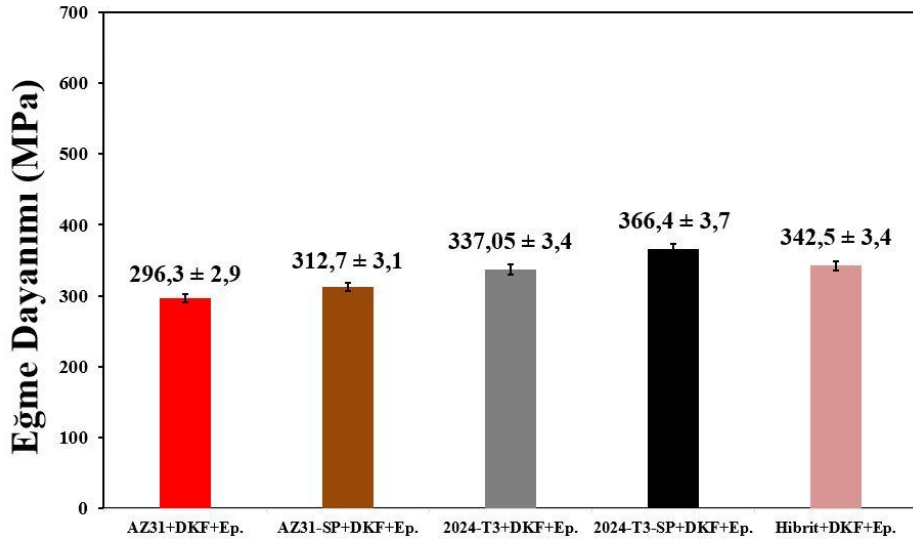
Şekil 6.19. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levhaların PEEK emprenye edilmiş farklı fiber türleri ile kombine edilerek üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları ve metale shot peening işleminin bu duruma etkisi Şekil 6.20.' de görülmektedir. Bütün gruplarda olduğu gibi yine en yüksek değere $643,6 \pm 6,4$ MPa ile 2024-T3 (shot peening) matrisli FML sahiptir. Yüksek üretim sıcaklığının eğme dayanımı özellikleri açısından da aramid takviyeli kompoziti olumsuz etkilediği görülmüştür.



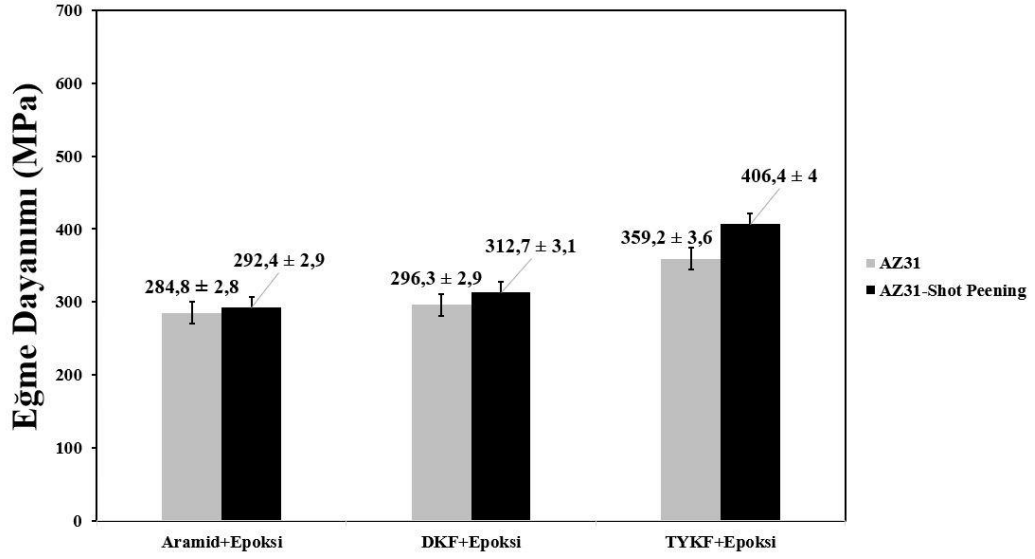
Şekil 6.20. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar ve PEEK emprenyeli farklı fiberler ile (aramid, dcf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.

DKF ve epoksi reçine takviyesiyle üretilen kompozitlerde eğme dayanımı değerlerinin değişimi bu çalışmadaki genel trende uygun olarak Şekil 6.21.' de görülmektedir. AZ31 ile üretilen kompozitlerle 2024-T3 ile üretilen kompozitler arasında yaklaşık % 13' lük bir fark vardır. Fakat bu durum kompozitin nihai yoğunluğu ve özgül dayanım açısından değerlendirildiğinde, servis koşullarında mekanik özelliklerden bir miktar feragat edip ağırlıktan elde edilen kazanç toplam fayda olarak magnezyum ile üretilen kompozitleri bir adım öne geçirme potansiyelini doğurabilir.



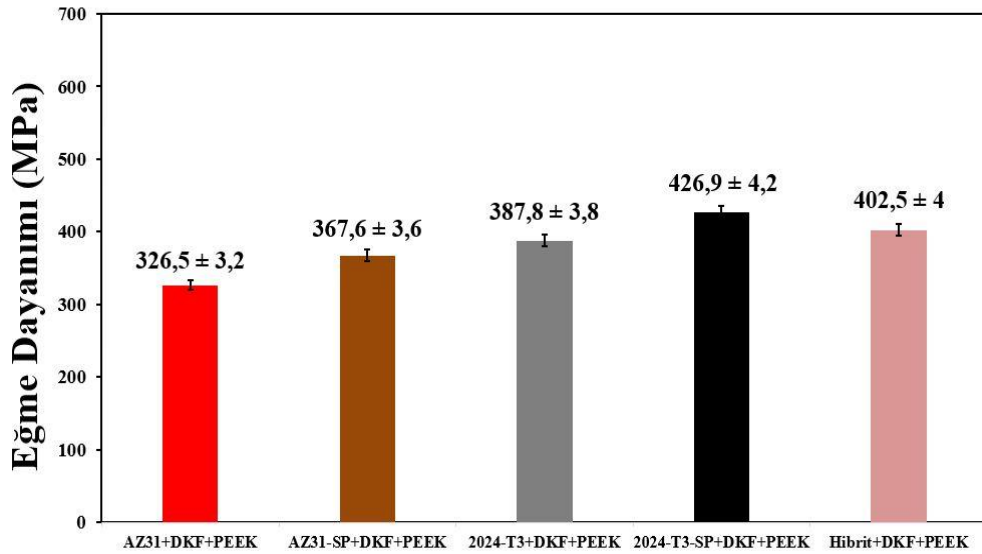
Şekil 6.21. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.

Epoksi reçine takviyesi ve farklı fiber türleri ile üretilen AZ31 matrisli FML' lerin eğme dayanımına shot peening işleminin de etkisini gösteren grafik Şekil 6.22.' de görülmektedir. En yüksek değer ($406,4 \pm 4$ MPa) TYKF ile üretilen AZ31 (shot peening) matrisli kompozite aitken, dokuma tipinde fiberler içerisinde en yüksek eğme dayanımı değeri $312,7 \pm 3,1$ MPa ile DKF ile üretilen kompozite aittir.



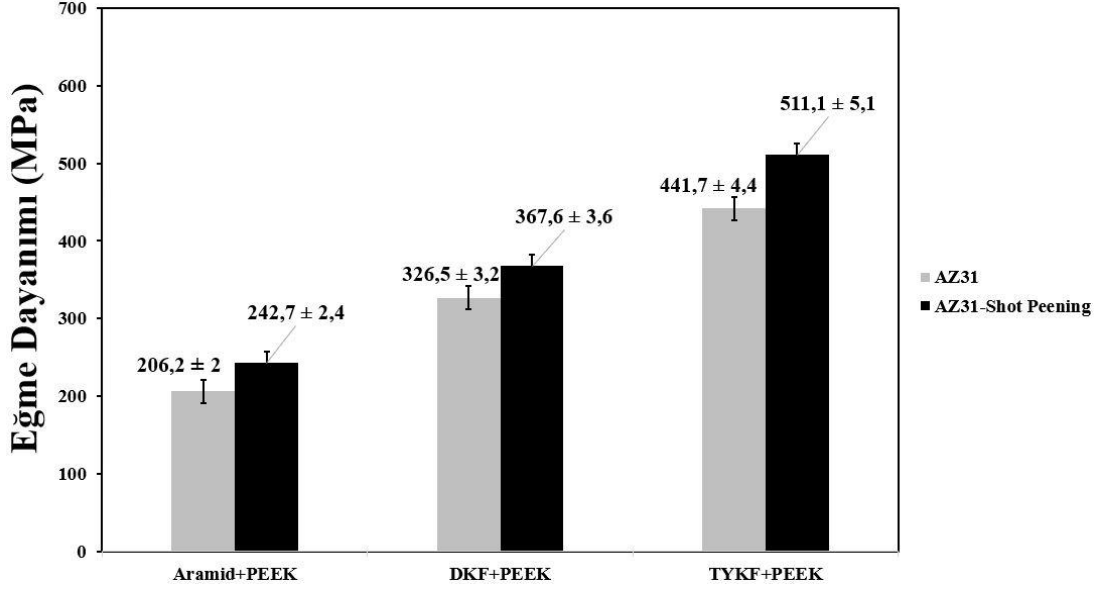
Şekil 6.22. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.

PEEK ve DKF kombinasyonunun AZ31 ve 2024-T3 matrislerde eğme dayanımı değerlerine ait grafik Şekil 6.23.' te görülmektedir. TYKF takviyeli grupta görüldüğü gibi bu grupta da PEEK takviyesinin eğme dayanımı üzerindeki olumlu etkisi açıkça görülmektedir. $426,9 \pm 4,2$ MPa eğme dayanımı değeri ile 2024-T3 (shot peening) matrisli FML en yüksek dayanıma sahiptir.



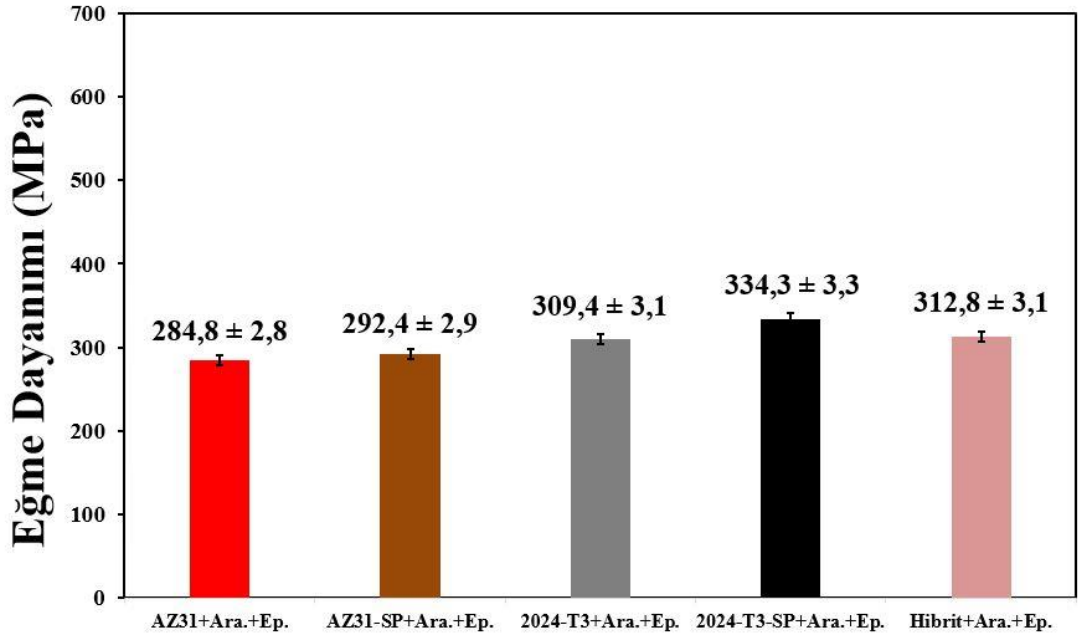
Şekil 6.23. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin eğme testi sonuçları.

AZ31 magnezyum levhaların PEEK emprenye edilmiş fiberler ile kombinasyonunda oluşan FML'lerin eğme dayanımına shot peening işleminin olumlu etkisi Şekil 6.24.'te açıkça görülmektedir. $511,1 \pm 5,1$ MPa eğme dayanımı değeri ile en yüksek değer shot peening ile işlenmiş alüminyum levhayla yapılan üretime aittir.

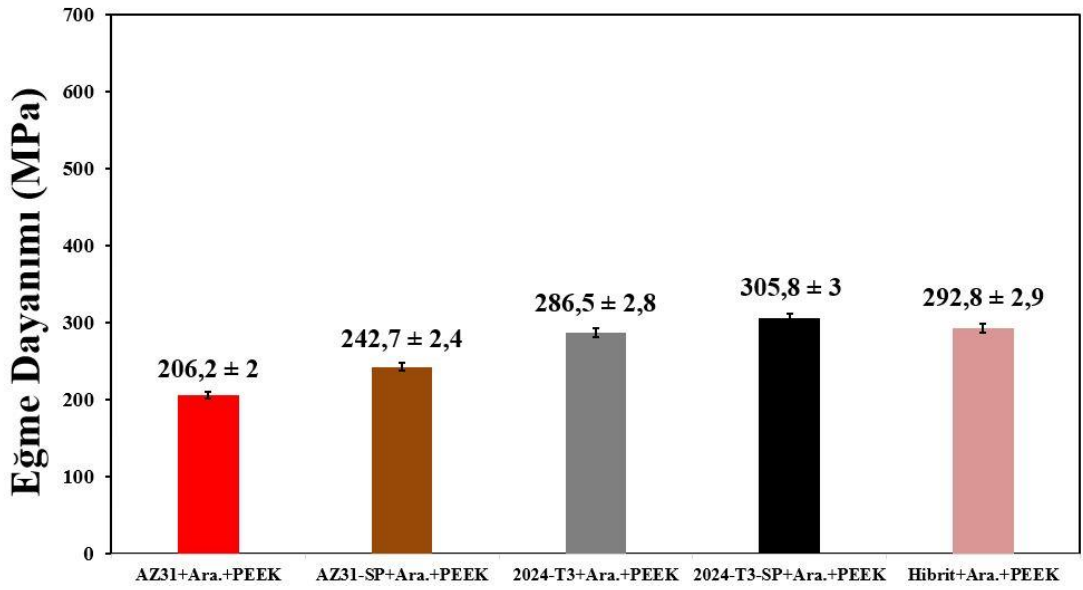


Şekil 6.24. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar ve PEEK takviyeli farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML'lerin eğme testi sonuçları.

Eğme testi sonuçları incelendiğinde en düşük değerlerin aramid fiber takviyesi ile yapılan numune gruplarına ait olduğu görülmektedir. Aramid fiber yapısı gereği genellikle kişisel koruyucu giysilerde ve balistik uygulamalarda kullanılmaktadır. Eksenel yüklemelere maruz kalan bölgelerde karbon fiberden beklenen performansı almak zordur. Fakat sahip olduğu spesifik özelliklerin neticesi olarak özellikle çarpma ve darbe kuvvetlerine maruz kaldıklarında üstün performans sergilemektedirler. Şekil 6.25. ve Şekil 6.26.'da epoksi ve PEEK takviyeli aramid fiberlerle üretilen FML'lerin eğme dayanımları grafik halinde görülmektedir. Yüksek sıcaklıkta yapılan üretimin aramid üzerindeki olumsuz etkisi bu iki grafikten de net olarak anlaşılmaktadır.

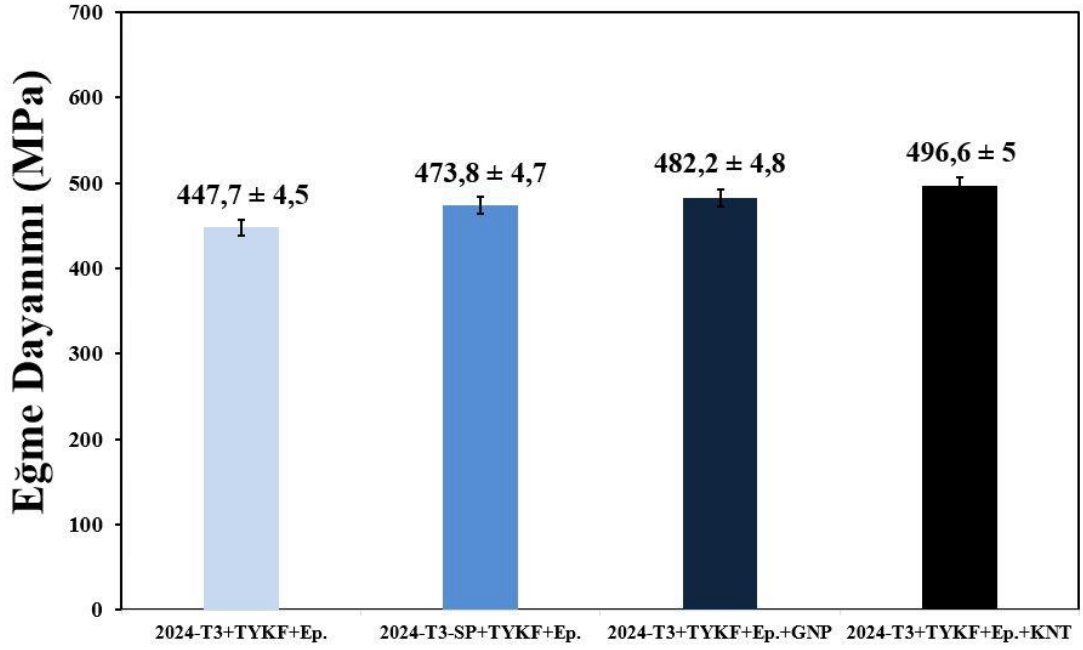


Şekil 6.25. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML'lerin eğme testi sonuçları.



Şekil 6.26. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML'lerin eğme testi sonuçları.

% 1 GNP ve % 0,5 KNT ilaveli epoksi reçinelerle üretilen FML' lerin eğme dayanımlarındaki artış çekme dayanımı özellikleri ile paralel şekilde artış göstermiştir. Şekil 6.27.' de görüldüğü gibi % 1 GNP ilavesi eğme dayanımında % 2' lik bir artış % 0,5 KNT ilavesi ise % 5' lik bir artış sağlamıştır. Epoksi reçine içerisindeki nanopartiküllerden kaynaklanan çatlak köprüleme mekanizması buradaki artışında sebebi olarak gösterilebilir.



Şekil 6.27. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin eğme testi sonuçları.

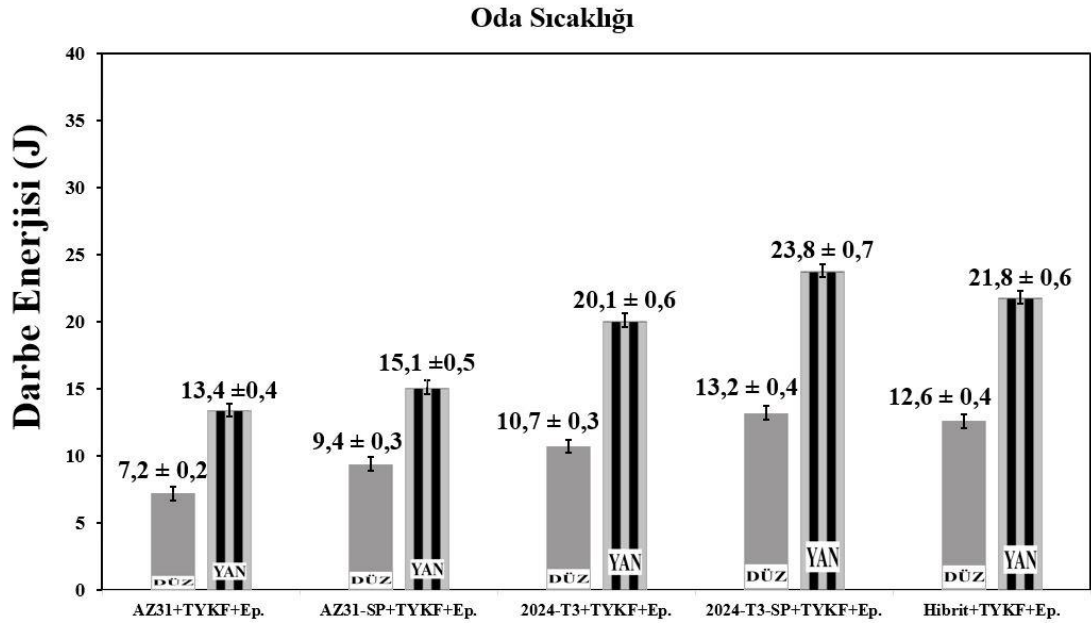
6.4. DARBE TESTİ SONUÇLARI

Üretilen FML' lerin alacakları herhangi bir darbe karşısındaki davranışlarını tespit etmek amacıyla ASTM E23 standardına göre 5,23 m/sn hızla Charpy darbe testi uygulanmıştır. Darbe testi FML' lere düz (flatwise) ve yan (edgewise) doğrultuda (Şekil 5.23.) olmak üzere iki farklı yönde uygulanmıştır. Bu kompozitler genellikle hava taşıtlarında kullanıldıkları için farklı ortam şartlarına maruz kalabilmektedirler. Bu sebeple oda sıcaklığı haricinde -65 °C sıcaklıkta da darbe testi yapılmıştır.

6.4.1. Oda Sıcaklığındaki Darbe Testi Sonuçları

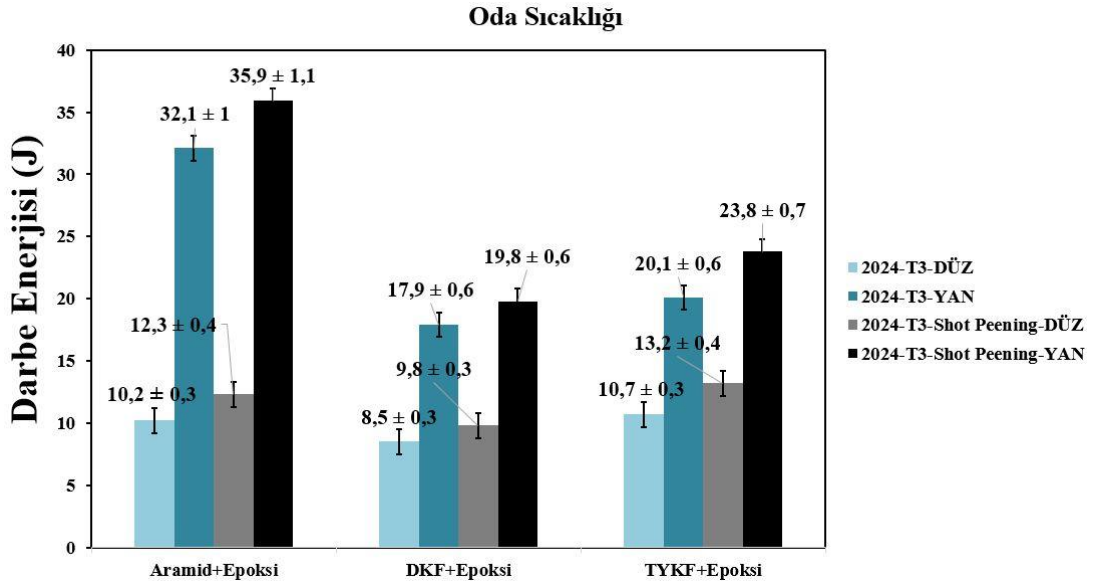
FML' lerin darbe mukavemeti, malzemelerde deformasyon veya kopma meydana gelene kadar darbe yüklemesine maruz bırakıldığında malzemelerin darbe enerjisini emme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Elastik-plastik deformasyon yoluyla enerjiyi emen metalik alaşımlarla karşılaştırıldığında, FML' lerin yapısında bulunan kompozit çekirdek, darbe enerjisini emmek için fiber ayrılması, lif kırığı ve lif çekme gibi çeşitli kırılma mekanizmaları sergiler [183]. Darbe testi esnasında yüksek hızdaki gerilme nedeniyle, hasar mekanizmalarının sırasını tanımlamak zordur, ancak test sonrası numunenin kırık yüzey görüntüleri değerlendirilerek fikir yürütmek mümkün olabilmektedir.

Epoksi ve TYKF takviyeli FML' lerin düz ve yan doğrultuda darbe enerjileri Şekil 6.28.' de görülmektedir. Shot peening işlemi mekanik kilitlenme mekanizması sayesinde darbe enerjisine de olumlu yönde etki etmiştir. Yan doğrultudaki darbe enerjisi bütün numunelerde yaklaşık % 40-50 aralığında daha yüksektir. TYKF ve epoksi takviyeli FML' lerin içerisinde en yüksek darbe enerjisi $13,2 \pm 0,4$ J (Düz), $23,8 \pm 0,7$ J (Yan) ile 2024-T3(shot peening) ile üretilen kompozite aitken en düşük değer ise $7,2 \pm 0,2$ J (Düz), $13,2 \pm 0,4$ J (Yan) ile AZ31 ile üretilen kompozite aittir. Düz yönde yapılan darbe testlerinde metal ve kompozit tabaka arasında delaminasyon, kompozit tabakada matris çatlağı, fiber kırılması mekanizmaları (Şekil 6.83) etkili olmuştur. Yan doğrultudaki darbe testlerinde metallerin plastik deformasyonu, metal ve kompozit tabaka arasında delaminasyon, fiber kırılmaları, kompozit tabakada matris hasarı mekanizmaları absorbe edilen darbe enerjisinde etkili temel mekanizmalar olarak göze çarpmaktadır.



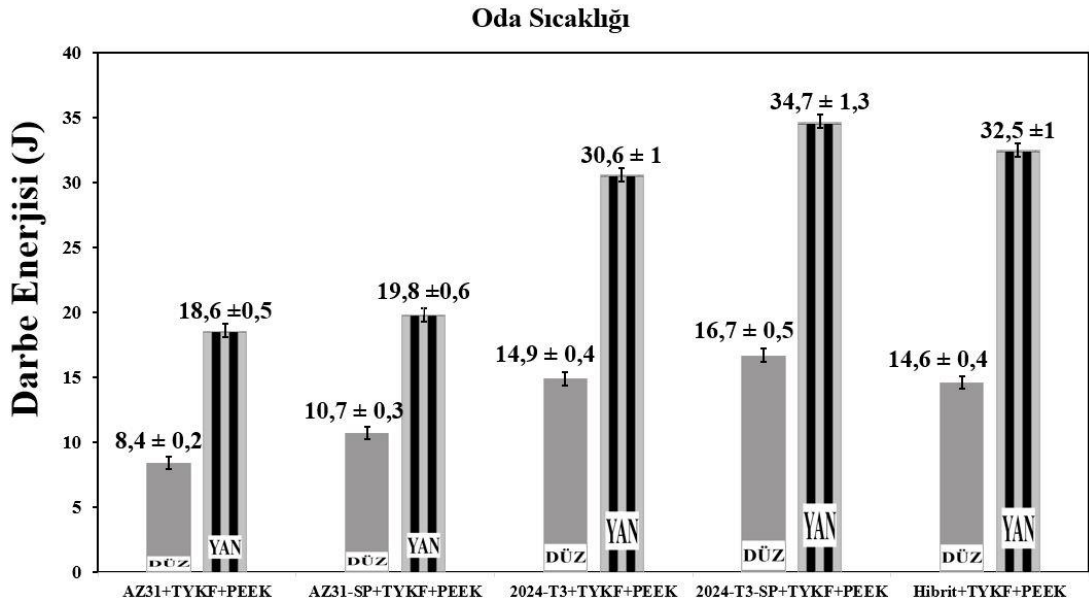
Şekil 6.28. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levha, epoksi reçine ve farklı fiber türlerinin kombinasyonu ile üretilen FML' lerin darbe enerjilerine shot peening işleminde etkisinin görüldüğü grafik Şekil 6.29.' da görülmektedir. Grafikte anlaşılacağı üzere DKF ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe enerjileri birbirine yakın değerlere sahipken aramid fiber takviyeli FML, aramidin kendine özgü avantajları sayesinde yan doğrultuda üstün bir performans sergilemiştir. Aramid lifleri çok sık dokunduğu için onlara dışarıdan bir kuvvet etki ettiğinde sık dokunmuş o lifleri ayırmak için gereken kuvvet çok fazla olduğundan ve aramid lifleri yükün dağılımını yapı içerisinde kusursuz gerçekleştirdiğinden darbe enerjisi çok yüksek olmaktadır. Şekil 6.87.' de darbe sonrası yüzey görüntüleri de incelendiğinde aramid fiberin özellikle 2024-T3 alüminyum ile kombinasyonunda darbe kuvvetinin etkisiyle kırılma olmadan kompozitin ne kadar fazla şekil değiştirdiğini görmek mümkündür.



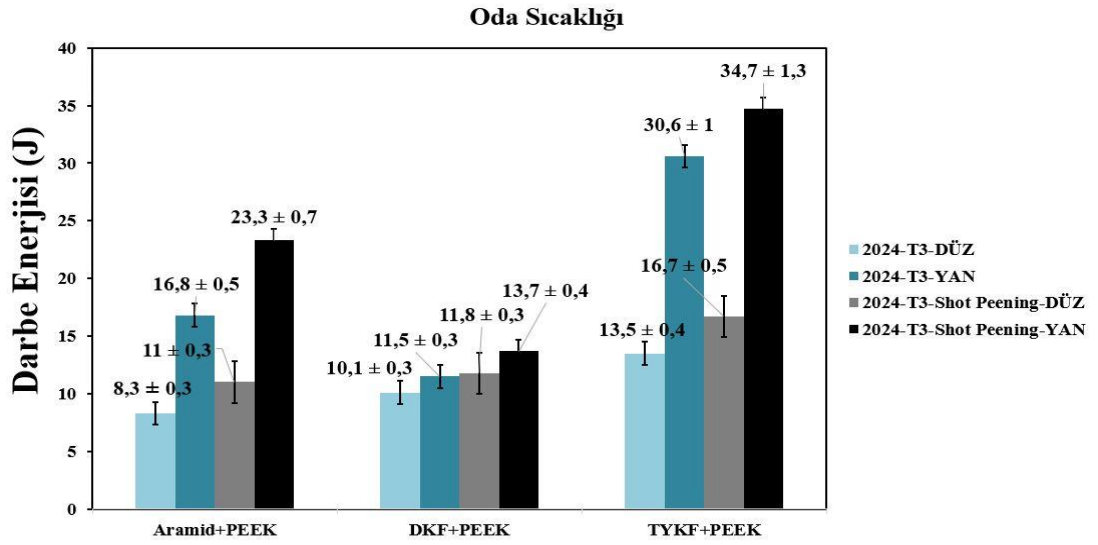
Şekil 6.29. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

Şekil 6.30' da PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonuçları görülmektedir. En yüksek değer $16,7 \pm 0,5$ J (Düz) ve $34,7 \pm 1,3$ J (Yan) ile 2024-T3 (shot peening) levhalar ile üretilen kompozite aittir. Epoksi reçine ile üretilen karşılıklarıyla kıyaslandığında PEEK' in sağladığı tokluk ve kesme gerilmelerine karşı dayanımdan dolayı TYKF takviyeli kompozitlerin darbe enerjilerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat aramid fiberden beklenen yüksek performans yüksek üretim sıcaklığının getirdiği dezavantajdan dolayı elde edilememiştir. DKF takviyeli kompozitlerde de deney sonrası görüntüler incelendiğinde fiber ayrılma ve kompozit metal levha arası delaminasyon mekanizmalarının çalışmamış olmasından dolayı darbe enerjilerinin beklenenden düşük kaldığı görülmüştür.



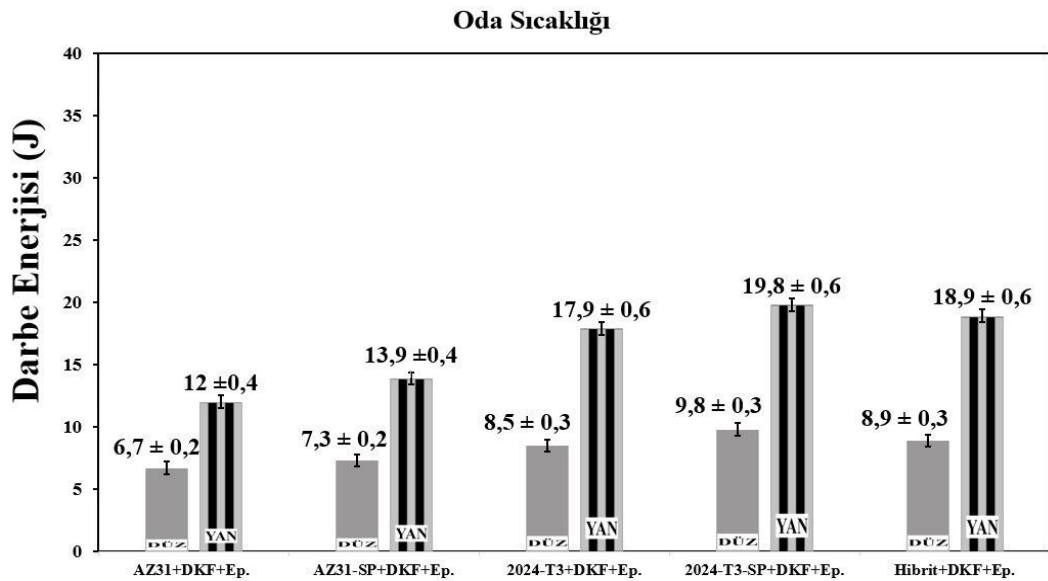
Şekil 6.30. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levha, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin darbe testi sonuçları ve shot peening işleminin etkisi Şekil 6.31.' de görülmektedir. Bu grupta en yüksek darbe enerjisi $16,7 \pm 0,5$ J (Düz) ve $34,7 \pm 1,3$ J (Yan) ile 2024-T3 (shot peening) levhalar ile üretilen kompozite aittir. Aramid fiber epoksi ile kombinasyonunda yüksek darbe enerjisi değerlerine ulaşmasına rağmen PEEK' li üretim sıcaklığının yüksekliğinden ötürü dekompozisyon sıcaklığına çok yakın çalışıldığı için beklenen performansı sergileyememiştir. Benzer bir durum DKF ve PEEK kombinasyonu ile üretilen FML' lerde de mevcuttur. DKF ve PEEK takviyesi ile üretilen kompozitlerde düz yönde PEEK' in olumlu etkisi sebebiyle darbe enerjisinde epoksi reçineli karşılığına göre artış sağlanırken yan doğrultuda yapılan darbe testlerinde kompozit çekirdek içerisinde fiber ayrılmalarının gerçekleşmemesi (Şekil 6.85.) ve PEEK' in kesme dayanımının yüksek oluşu sebebiyle delaminasyon mekanizmasında çalışamamasından ötürü darbe enerjisi düşük kalmıştır.



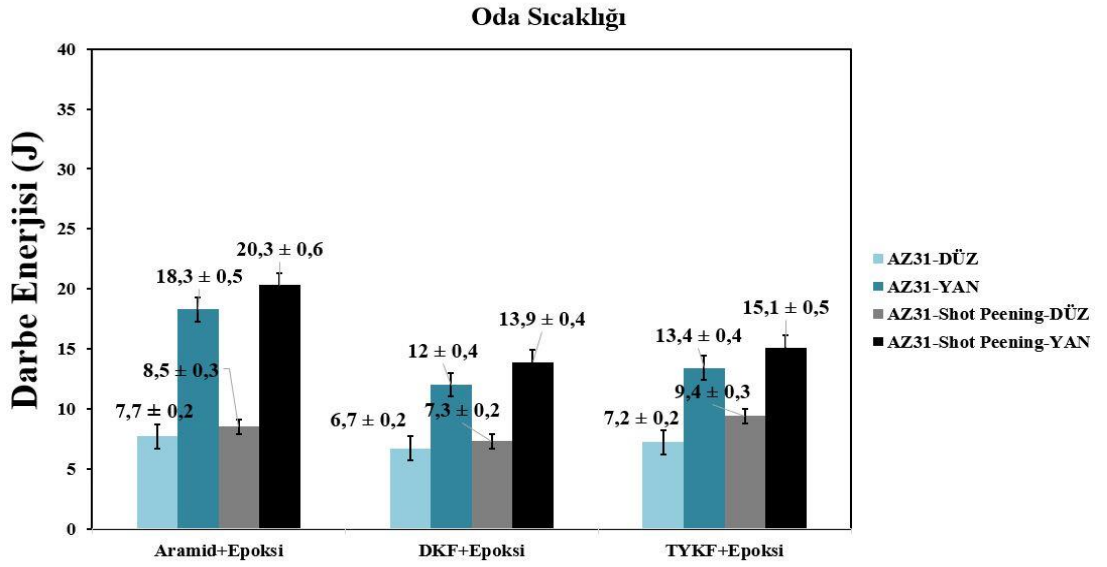
Şekil 6.31. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

Epoksi reçine ve DKF ile üretilen FML' ler TYKF ile üretilenlere yakın darbe enerjisi (Şekil 6.32.) değerlerine sahiptir. TYKF takviyeli kompozitlerde fiber yönlenmesinin getirdiği avantaj neticesinde enerji absorblama kapasitesi artmaktadır. Bu grupta en yüksek darbe enerjisi $9,8 \pm 0,3$ J (Düz), $19,8 \pm 0,6$ J (Yan) değeriyle 2024-T3 (shot peening) ile üretilen kompozitlere aitken en düşük değer ise $6,7 \pm 0,2$ J (Düz), $12 \pm 0,4$ J (Yan) değeriyle AZ31 levhalarla üretilen FML' ye aittir.



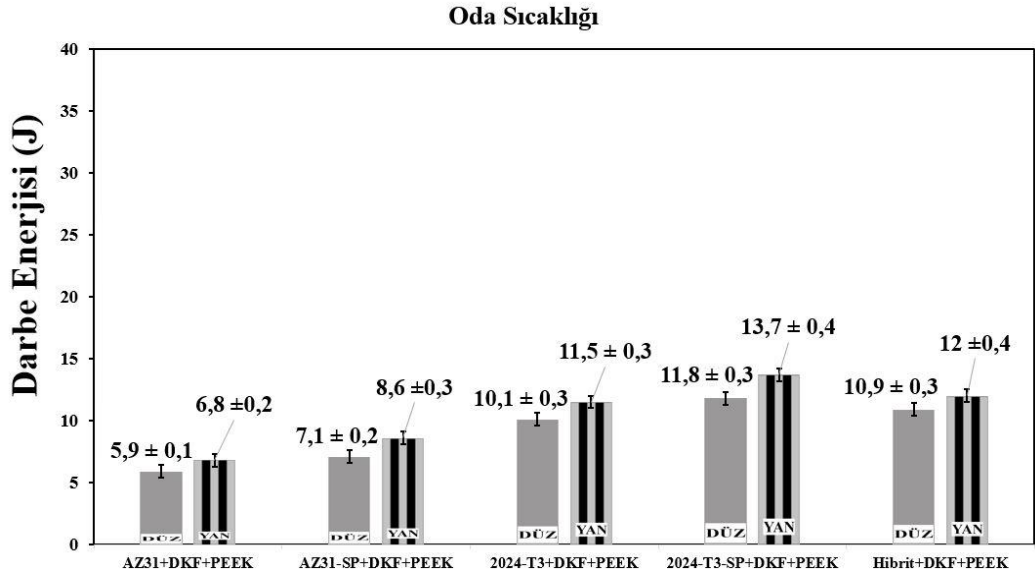
Şekil 6.32. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

AZ31 magnezyum levha, epoksi reçine ve farklı fiber türlerinin biraraya getirilmesiyle üretilen FML'lerin darbe testi sonuçları ve shot peening işleminin etkisi Şekil 6.33.'te görülmektedir. Genel eğilime uygun şekilde aramid fiber takviyeli kompozitin darbe enerjisi özellikle yan doğrultuda % 35-45 daha yüksektir. AZ31 levhanın getirdiği hafiflik ve aramid fiberin yapıya kazandırdığı darbe mukavemeti spesifik açıdan bu kompoziti çok avantajlı kılmaktadır. Shot peening işleminin genel olarak darbe enerjisinde yaklaşık % 10' luk bir artış sağladığı da görülmektedir.



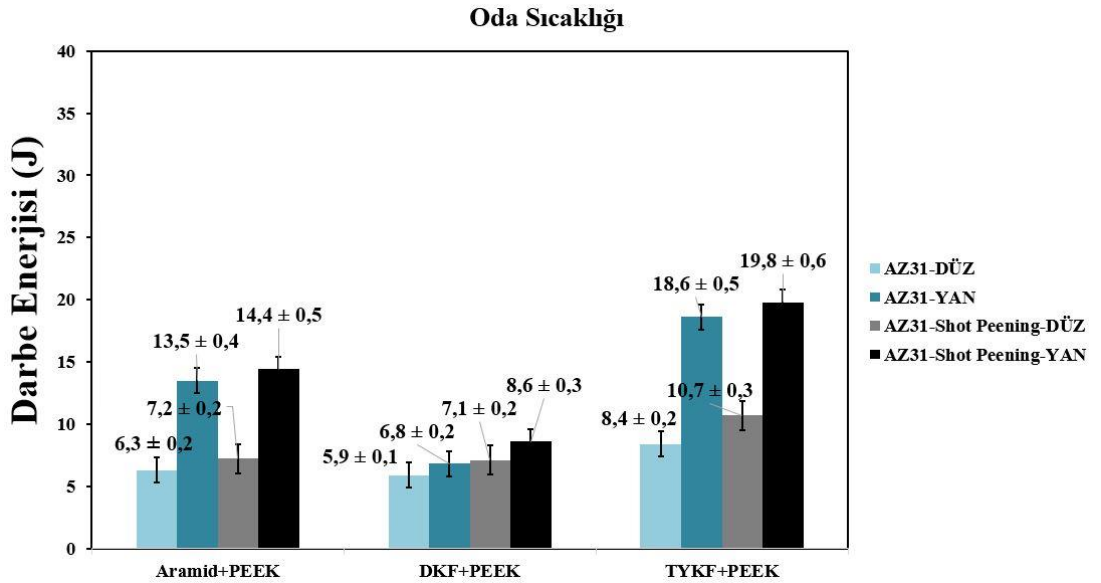
Şekil 6.33. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML'lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

DKF ve PEEK takviyesi ile üretilen FML'lerin darbe testi sonuçları Şekil 6.34.'te görülmektedir. Darbe testi sonrası optik mikroskop görüntüleri de (Şekil 6.86.) incelendiğinde kompozitlere etki eden darbe kuvvetinin FML içerisinde dağılımının yetersiz olduğu dolayısıyla da enerji absorblama kapasitesinin düşük kaldığı anlaşılmaktadır. PEEK' in en önemli avantajlarından biri olan yüksek kesme dayanımı bu grupta darbe testi esnasında delaminasyona büyük ölçüde engel olduğu için darbe enerjisinin düşük kalışının ana sebebi olduğu düşünülmektedir. PEEK ve DKF kombinasyonu ile yapılan üretimlerde genel olarak yaşanan kısmi nüfuziyet ve delaminasyon problemlerinden kaynaklanan boşluklar darbe testi esnasında çentik etkisi yaparak darbe enerjisinin epoksi reçineli karşılığına göre daha düşük kalmasının bir diğer sebebi olabileceği düşünülmektedir.



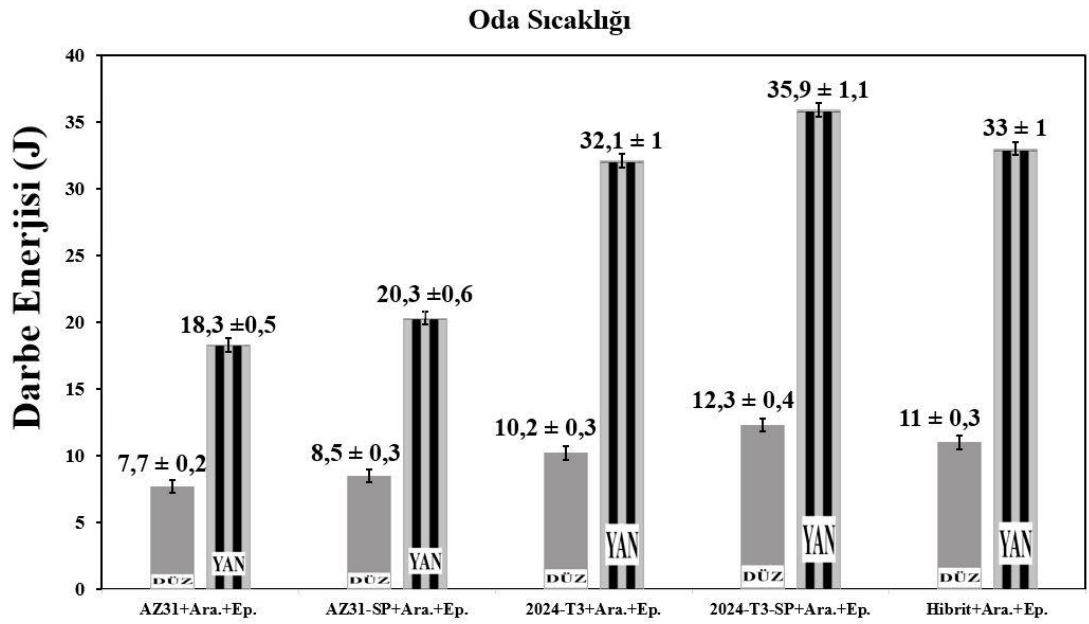
Şekil 6.34. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

AZ31 magnezyum levha, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin darbe testi sonuçları Şekil 6.35.' te görülmektedir. TYKF ile üretilen kompozit shot peening işleminde etkisiyle $10,7 \pm 0,3$ J (Düz) ve $19,8 \pm 0,6$ J (Yan) değerleriyle en yüksek darbe enerjisine sahiptir. Diğer fiber türlerinde yukarıdaki kısımlarda da bahsedilen problemler sebebiyle beklenen değerler elde edilememiştir.

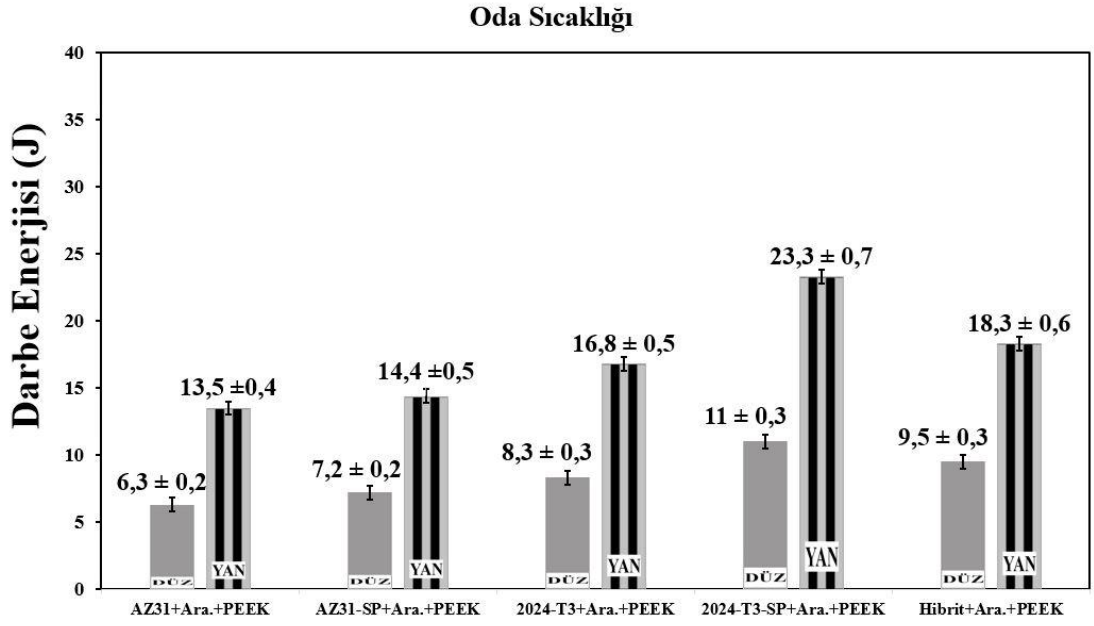


Şekil 6.35. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

Darbe testi sonuçları incelendiğinde bütün numuneler içerisinde shot peening işleminin de katkısıyla $12,3 \pm 0,4$ J (Düz) ve $35,9 \pm 1,1$ J (Yan) değerleri ile en yüksek darbe enerjisine sahip olan FML aramid fiber takviyeli 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalarla üretilen kompozite ait olduğu görülmektedir. Şekil 6.36. ve Şekil 6.37.'deki sonuçlar kıyaslandığında yukarıdaki kısımlarda yer yer bahsi geçen PEEK emprenyeli aramid fiberle yapılan üretimin aramid fiberin dekompozisyon sıcaklığına çok yakın olması sonuçlardan açıkça anlaşılmaktadır. Fakat bu olumsuz durum karşısında bile DKF ve PEEK kombinasyonu ile üretilen kompozitlerle kıyaslandığında daha üstün darbe özellikleri sergilediği açıkça görülmektedir. Şekil 6.34. ve Şekil 6.35.'te epoksi ve PEEK takviyeli aramid fiberlerle üretilen FML'lerin darbe enerjileri grafik halinde görülmektedir.

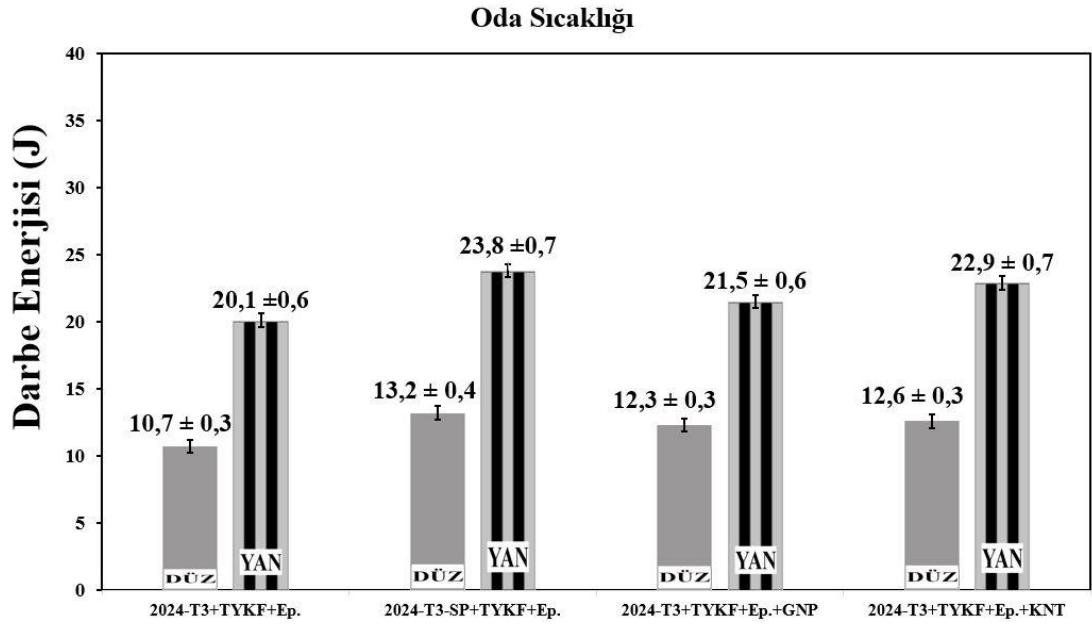


Şekil 6.36. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML'lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.



Şekil 6.37. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

Şekil 6.38.' de % 1 GNP ve % 0,5 KNT ilave edilmiş epoksi reçineler, TYKF ve 2024-T3 alüminyum levha ile üretilen FML' lerin darbe testi sonuçları görülmektedir. Epoksi reçineye nanopartikül ilavesinin darbe enerjisine etkisinin olumlu yönde olduğu görülmektedir. Shot peening işleminin etkisi reçineye nanopartikül ilavesinin etkisinden biraz daha fazladır. Epoksi reçine içerisine takviye edilen nanopartiküllerin darbe kuvvetinin etkisiyle matriste oluşan çatlakları köprüleme vazifesi gördüğü için ve oluşan gerilmelerin matris içerisinde dağılımına katkı sağladığı için darbe enerjisini artırdığı düşünülmektedir. % 1 GNP ilavesi yan doğrultuda darbe enerjisini % 7, % 0,5 KNT ilavesi ise % 14 oranında artırmıştır.

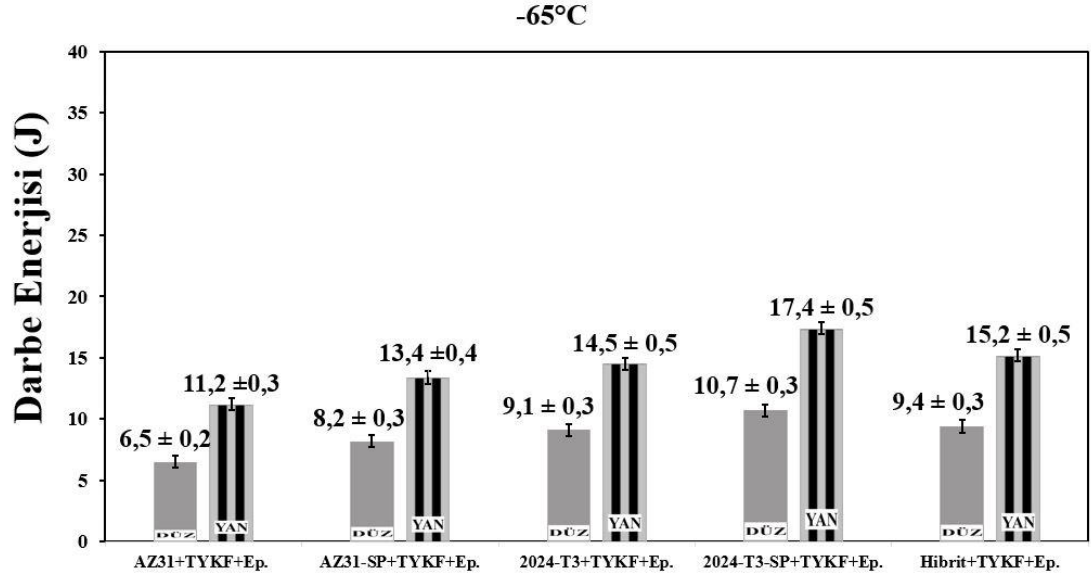


Şekil 6.38. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML'lerin oda sıcaklığındaki darbe testi sonuçları.

6.4.2. -65 °C Sıcaklıktaki Darbe Testi Sonuçları

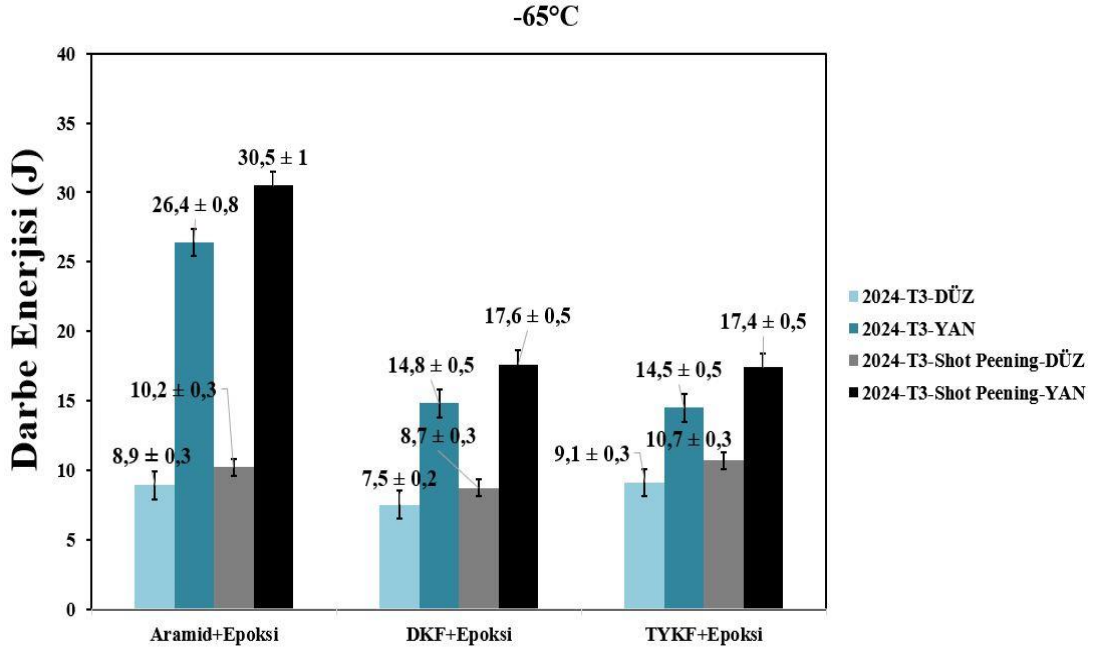
FML'ler genellikle hava taşıtlarında yapısal eleman olarak kullanılan kompozitlerdir. Hava araçlarının iç bölgelerinde kullanıldıkları gibi atmosferle temas eden dış kısımlarında da kullanılabilirler. Uçaklar troposfer tabakasında yüksek irtifada uçarken hava sıcaklığı sıfırın altındadır. Dolayısıyla FML'ler de sıfırın altındaki sıcaklıklara maruz kalabilmektedirler. Bu koşullarda darbe enerjilerindeki değişimi tespit edebilmek amacıyla üretilen FML'ler soğutmalı sirkülatörde -65 °C' de bir saat bekletildikten sonra darbe testleri oda sıcaklığındaki yönlerde yapılmıştır.

Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML'lerin darbe testi sonuçları Şekil 6.39' da görülmektedir. Oda sıcaklığındaki sonuçlara göre genel eğilimde bir değişiklik görülmemektedir. Fakat -65 °C' de yapılan test sonuçlarına göre özellikle 2024-T3 alüminyum levha ile üretilen kompozitlerin darbe enerjilerinde oda sıcaklığına göre yaklaşık % 25-30 aralığında bir düşüş görülmektedir.



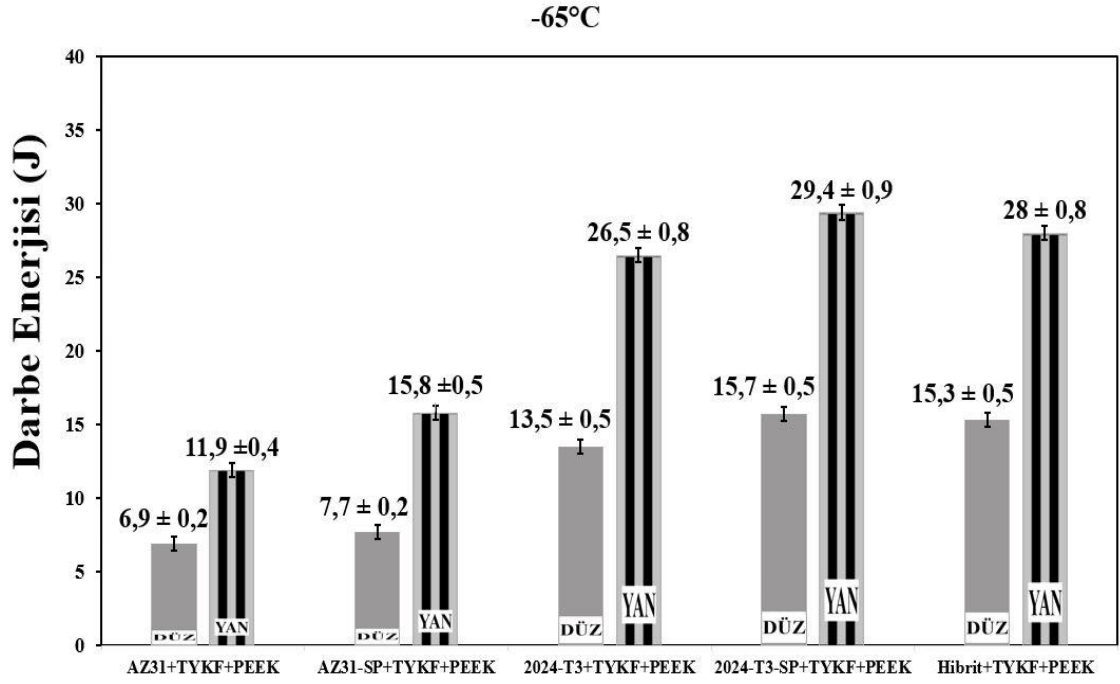
Şekil 6.39. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

Şekil 6.40' ta 2024-T3, epoksi reçine ve farklı fiber türlerinin kombinasyonu ile üretilen FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları görülmektedir. Yine en yüksek değere $10,2 \pm 0,3$ J (Düz) ve $30,5 \pm 1$ J (Yan) darbe enerjileriyle aramid fiber takviyeli kompozit sahiptir. Bu grupta da oda sıcaklığına kıyasla darbe enerjisinde aramid fiber takviyeli kompozit % 15, DKF takviyeli kompozit % 11 ve TYKF takviyeli kompozit ise % 27 düşüş yaşamıştır.



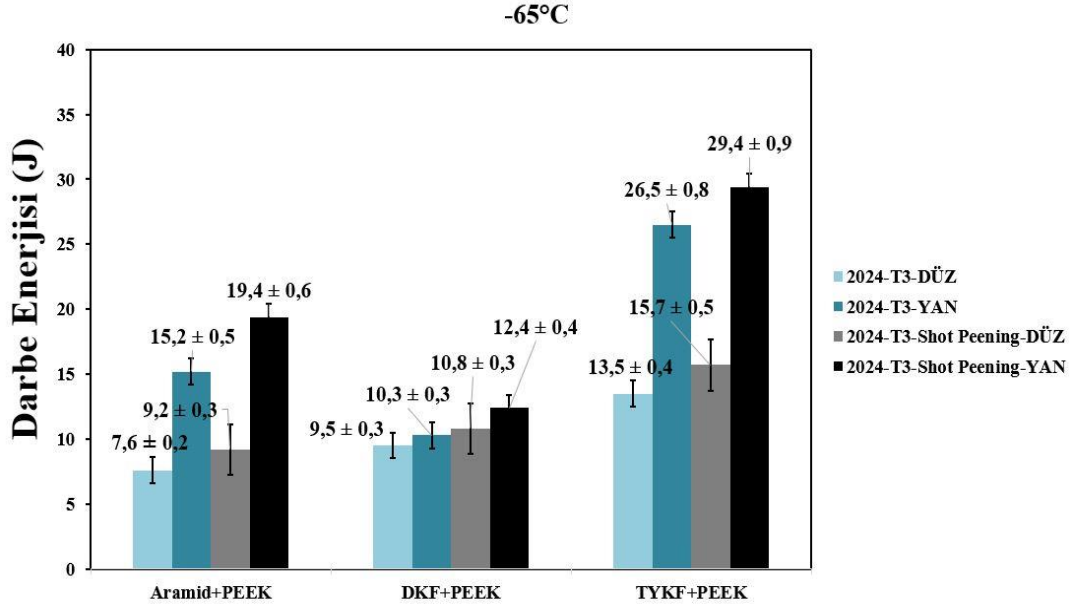
Şekil 6.40. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levha, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin darbe testi sonuçları ve shot peening işleminin etkisi Şekil 6.41.' de görülmektedir. Bu grupta en yüksek darbe enerjisi $15,7 \pm 0,5$ J (Düz) ve $29,4 \pm 0,9$ J (Yan) ile 2024-T3 (shot peening) levhalar ile üretilen kompozite aittir. Epoksi reçineli karşılığıyla kıyaslandığında darbe enerjisindeki düşüş oranı PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerde daha düşüktür. Oda sıcaklığındaki darbe enerjisi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında % 11-13 aralığında genel olarak bir düşüş görülmektedir.



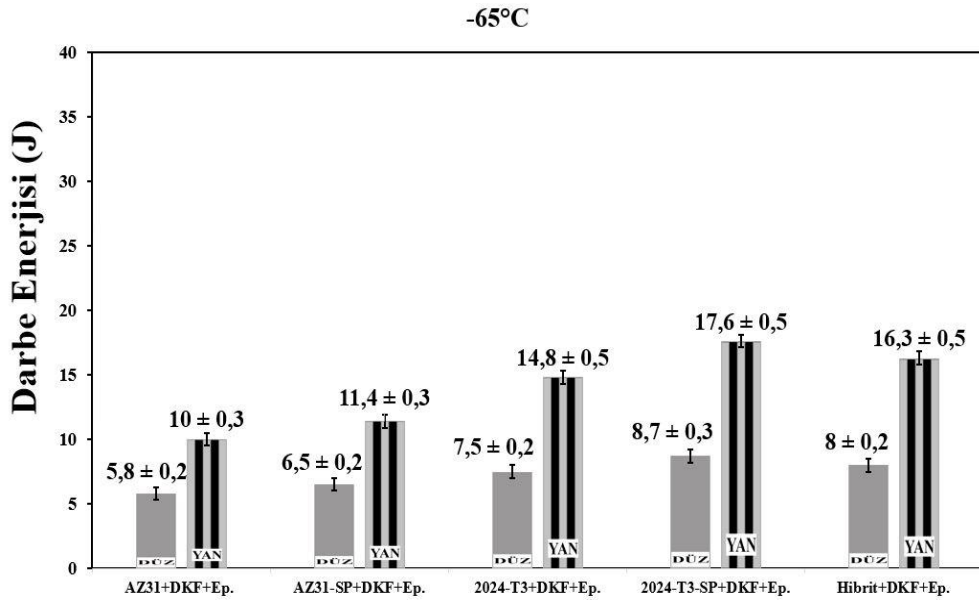
Şekil 6.41. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

2024-T3 alüminyum levha, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları ve shot peening'in etkisi Şekil 6.42.'de görülmektedir. Bu grupta en yüksek darbe enerjisi $15,7 \pm 0,5$ J (Düz) ve $29,4 \pm 0,9$ J (Yan) ile 2024-T3 (shot peening) levhalar ile üretilen kompozite aittir. Aramid fiber ve DKF ile ilgili yukarıdaki kısımlarda bahsi geçen olumsuzluklara darbe testinin sıfırın altında yapılmasının etkisi de eklenince aramid fiber takviyeli kompozitte yaklaşık % 35, DKF takviyeli kompozitte ise % 30 oranında bir düşüş yaşanmıştır.



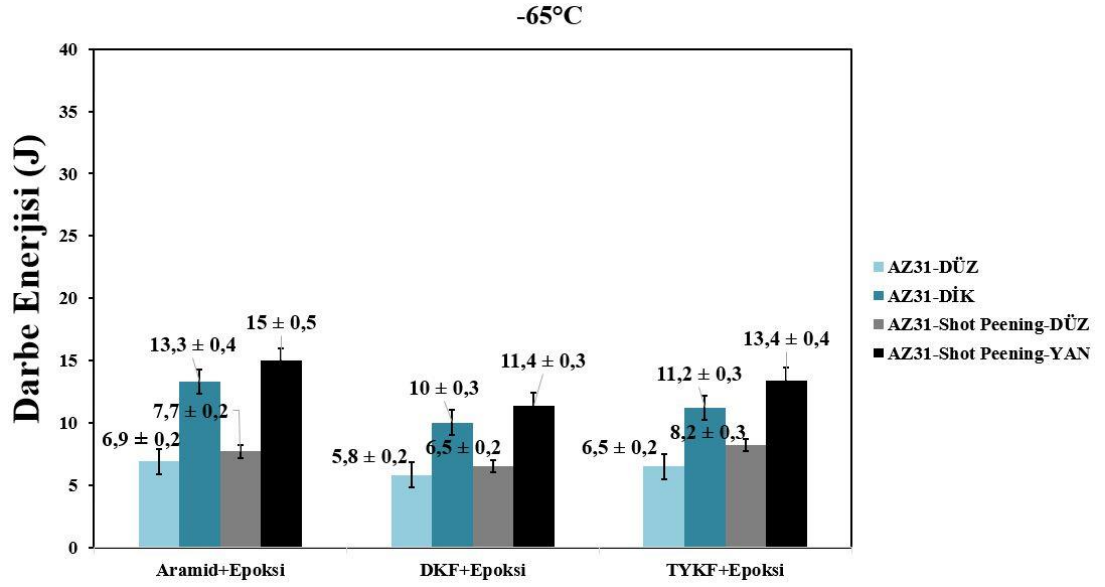
Şekil 6.42. 2024-T3, 2024-T3 (shot peening) alüminyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

Şekil 6.43.' te epoksi reçine ve DKF takviyesiyle üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları görülmektedir. Oda sıcaklığındaki sonuçlarla karşılaştırıldığında genel olarak % 15 civarında darbe enerjisinde bir düşüş görülmektedir.



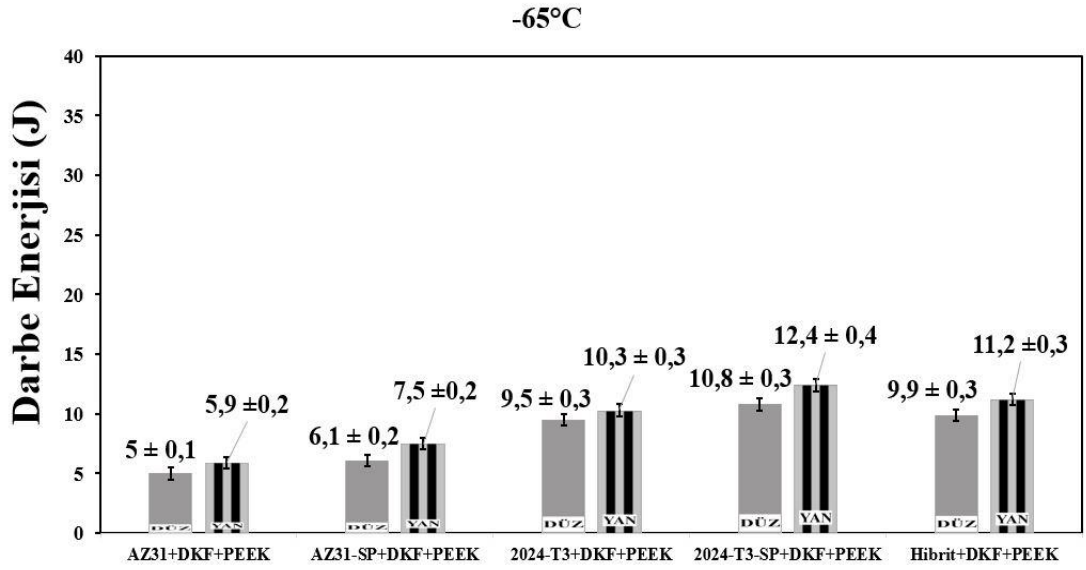
Şekil 6.43. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

AZ31 magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiber türlerinin kombinasyonu ile üretilen FML'lerin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki darbe testi sonuçları Şekil 6.44.'te görülmektedir. En yüksek değer $7,7 \pm 0,2\text{ J}$ (Düz) ve $15 \pm 0,5\text{ J}$ (Yan) ile epoksi ve aramid takviyesiyle üretilen AZ31 (shot peening)'li kompozitlere aittir. Bu grupta da düşük sıcaklığın etkisiyle darbe enerjisinde yaklaşık % 15 oranında düşüş yaşanmıştır.



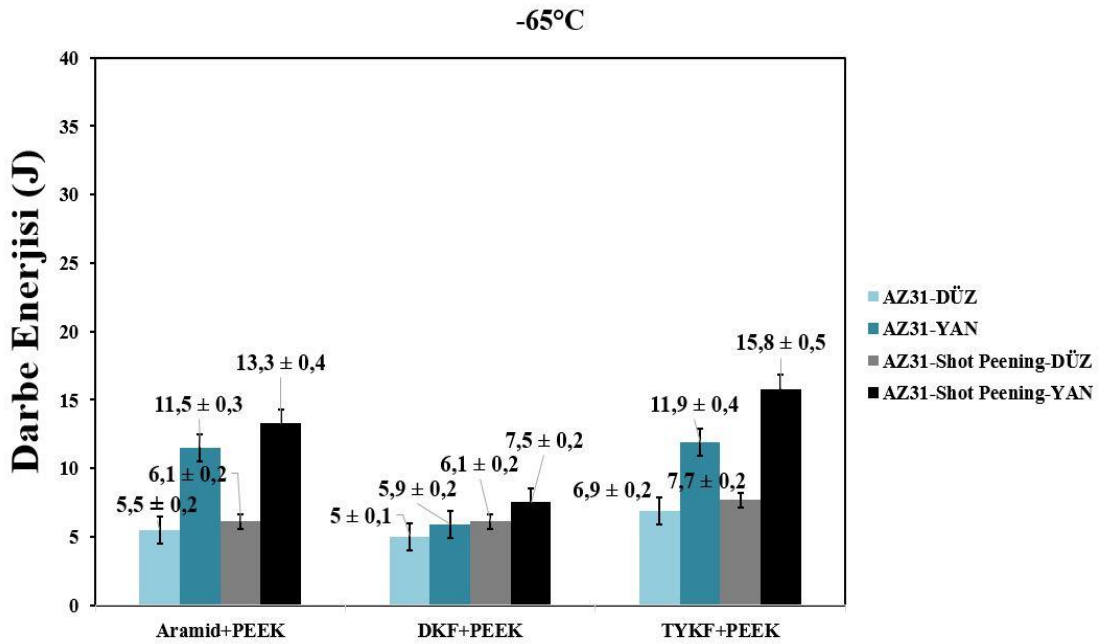
Şekil 6.44. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, epoksi reçine ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML'lerin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

PEEK ve DKF takviyeli kompozitlerin $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki darbe testi sonuçları Şekil 6.45.'te görülmektedir. Bu grupta genel olarak görülen yukarıdaki kısımlarda bahsi geçen problem düşen sıcaklığında etkisiyle daha belirgin hale gelerek düz ve yan doğrultuda genel eğilimde oluşan büyük farkı bile kapatacak seviyeye gelmiştir.



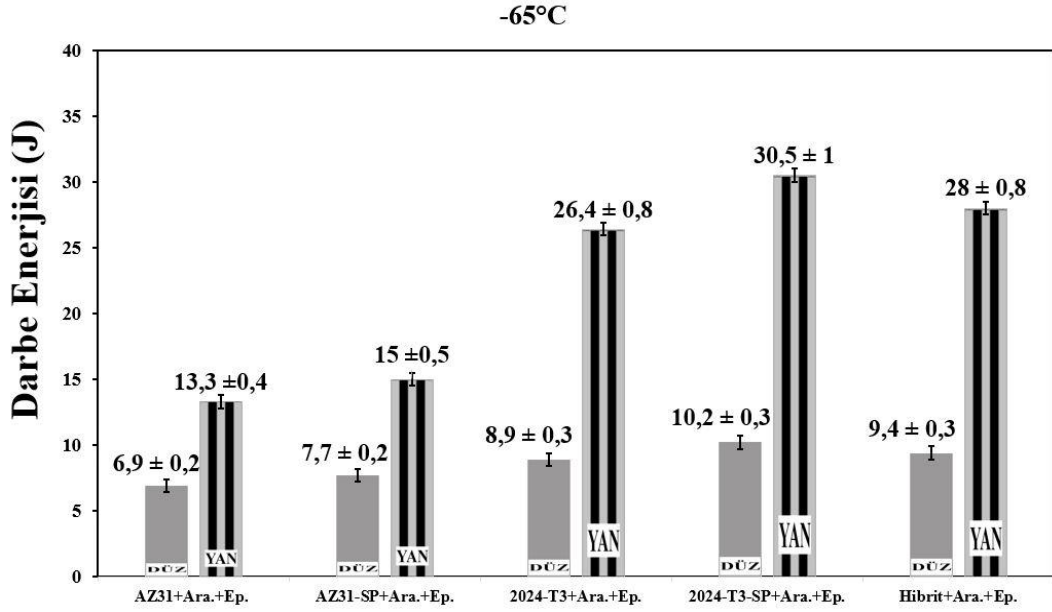
Şekil 6.45. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

AZ31, PEEK ve farklı fiber türlerinin biraraya gelerek oluşturduğu FML türlerinin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları Şekil 6.46.' da görülmektedir. En yüksek darbe enerjisi değeri $7,7 \pm 0,2$ J (Düz) ve $15,8 \pm 0,5$ J (Yan) ile TYKF takviyeli ve 2024-T3 (shot peening)' li FML' ye aittir.

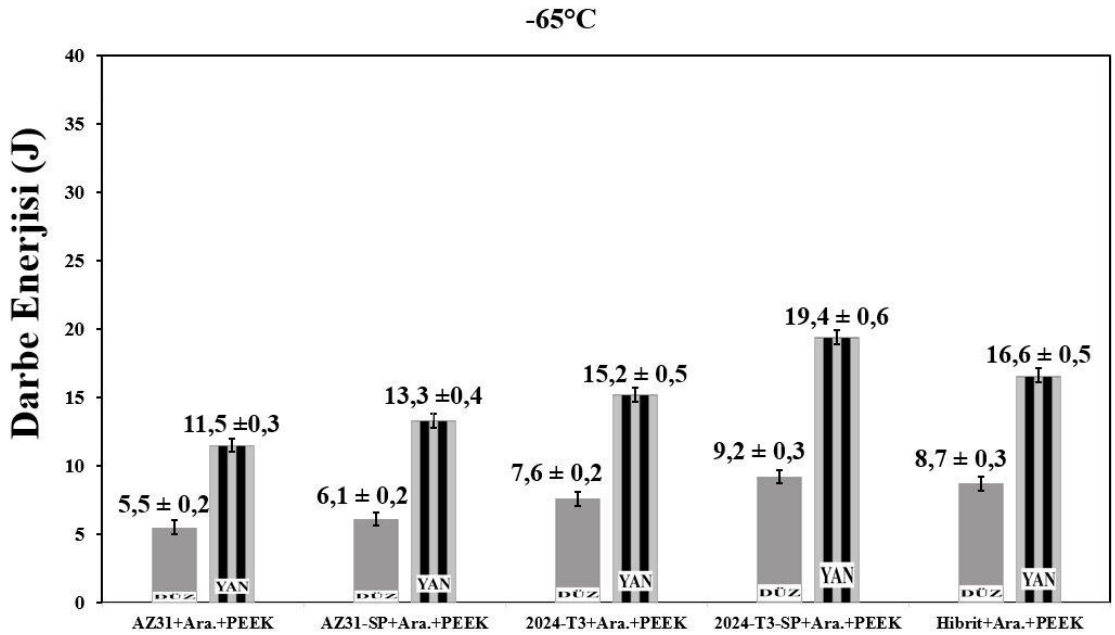


Şekil 6.46. AZ31 ve AZ31 (shot peening) magnezyum levhalar, PEEK ve farklı fiberler ile (aramid, dkf ve tykf) üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

Şekil 6.47. ve Şekil 6.48.' de aramid fiberin epoksi reçine ve PEEK ile kombinasyonu ile üretilen kompozitlerin düşük sıcaklık darbe testi sonuçları görülmektedir. Bütün gruplarda olduğu gibi bu serilerde de düşük sıcaklıkla beraber negatif yönde değişim gösteren darbe enerjisi sonuçları elde edilmiştir.

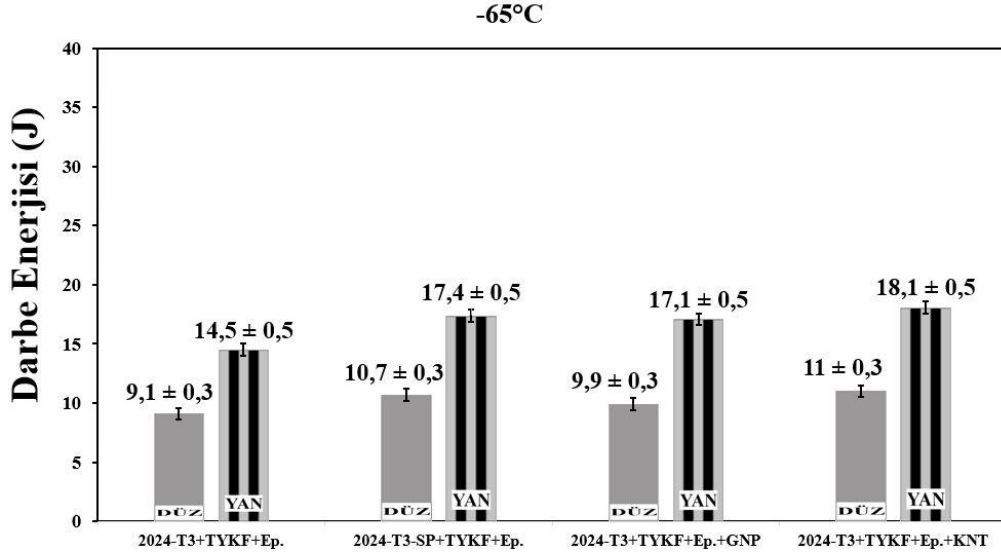


Şekil 6.47. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.



Şekil 6.48. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML'lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

Nanopartikül takviyeli epoksi reçinelerle üretilen FML' lerin düşük sıcaklık darbe enerjisi sonuçları (Şekil 6.49.) incelendiğinde oda sıcaklığına göre yaklaşık % 25 oranında bir düşüş yaşandığı görülmektedir.



Şekil 6.49. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML' lerin -65 °C sıcaklıktaki darbe testi sonuçları.

6.5. KESME DAYANIMI TEST SONUÇLARI

FML' lerde delaminasyon en büyük arıza türlerinden biridir. Delaminasyona sebep olan ilk sıradaki etkenlerden biri ise tabakalar arası kesme gerilmeleridir. Arayüzeyde laminatlar arası kayma gerilmesinin varlığı, eğer TAKD' yi aşarsa ve dolayısıyla yapısal bileşenin mukavemetini azaltırsa, laminasyonun başarısızlığına yol açar. Bu sebeple tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kesme dayanımını tespit etmek son derece önemlidir. Bu çalışma kapsamında üretilen FML' lerin tabakalar arası kesme dayanımları (TAKD) üç nokta eğme testinden elde edilen veriler kullanılarak (6.5) numaralı formüle göre hesaplanmıştır.

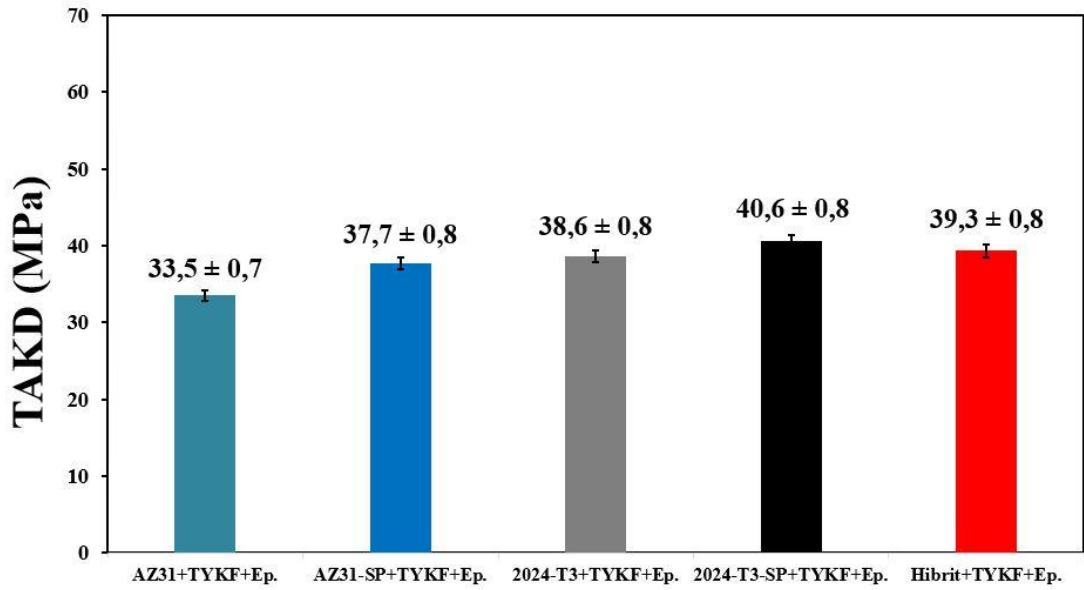
$$TAKD = (3F_{max}) / 4wt \quad (6.5)$$

F_{max} : Hasara sebep olan maksimum kuvvet (N)

W : Genişlik (mm)

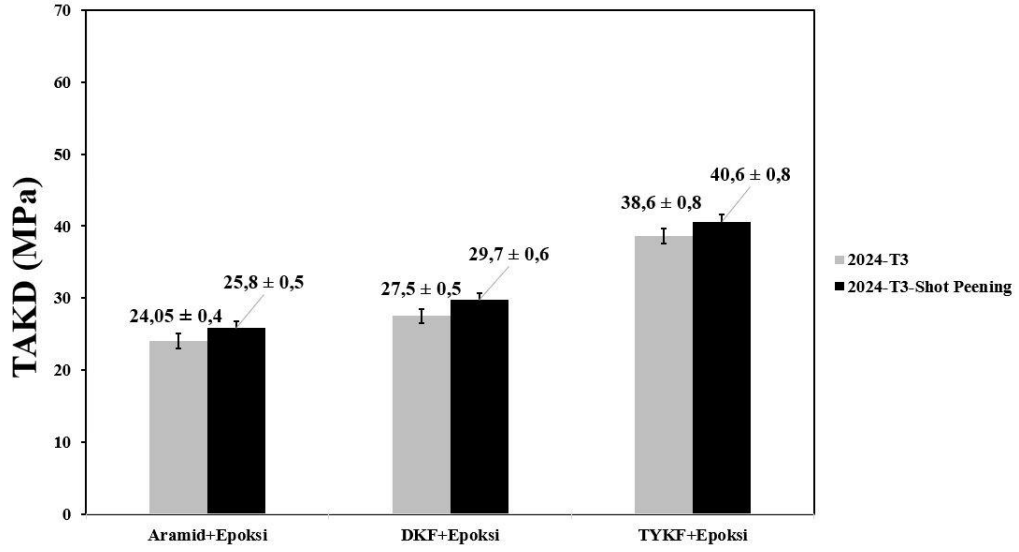
T : Kalınlık (mm)

Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları Şekil 6.50.' de görülmektedir. En yüksek TAKD değeri $40,6 \pm 0,8$ MPa değeri ile 2024-T3 (Shot peening) ile üretilen kompozite aittir. Shot peening işlemi AZ31 ile üretilen FML' lerde TAKD' yi % 12, 2024-T3 ile üretilen FML' lerde ise % 5 oranında artırmıştır. Shot peening işlemiyle metal yüzeylerinde oluşan çukurcuklar (Şekil 6.61.) epoksi reçinenin yüzeye olan nüfuziyetini artırarak kesme gerilmelerine karşı dirençte olan artışı sağlamakta çok ciddi rol oynamaktadır.



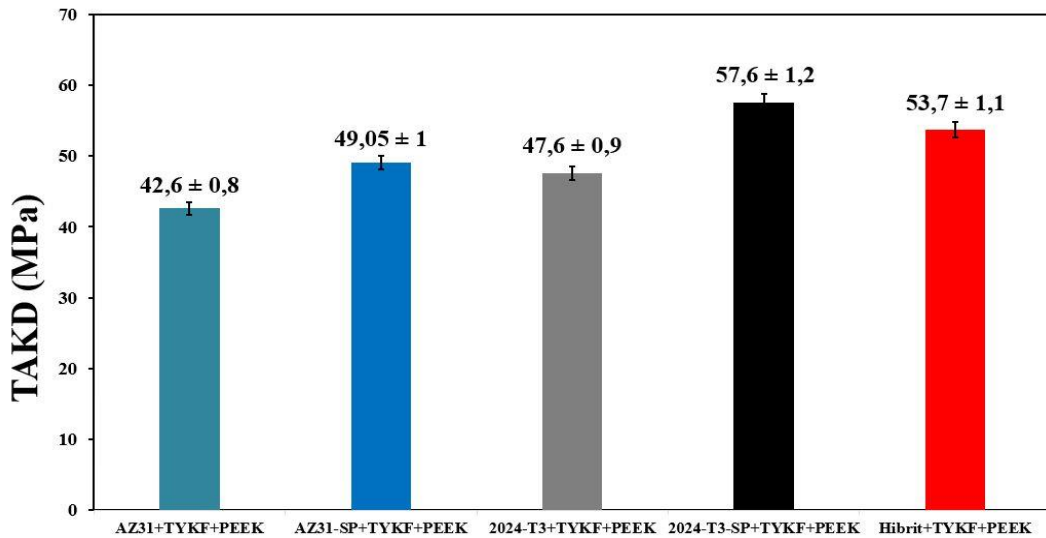
Şekil 6.50. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.

Şekil 6.51.' de ise 2024-T3, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları yer almaktadır. Genel eğilime bakıldığında shot peening işleminin TAKD' yi % 5-10 arasında artırdığı görülmektedir. Ayrıca TYKF ile üretilen FML' nin TAKD' sinin en yüksek olması, TYKF ile epoksi reçinenin arayüzey uyumunun diğer fiber türlerine göre daha üstün olmasına bağlanabilir. Dokuma fiberlerde çözgü ve atkı iplikleri tekrar eden periyotlarla üst üste bindiği için bu durum mikro boyutta epoksinin nüfuziyet problemine sebep olabilmektedir.



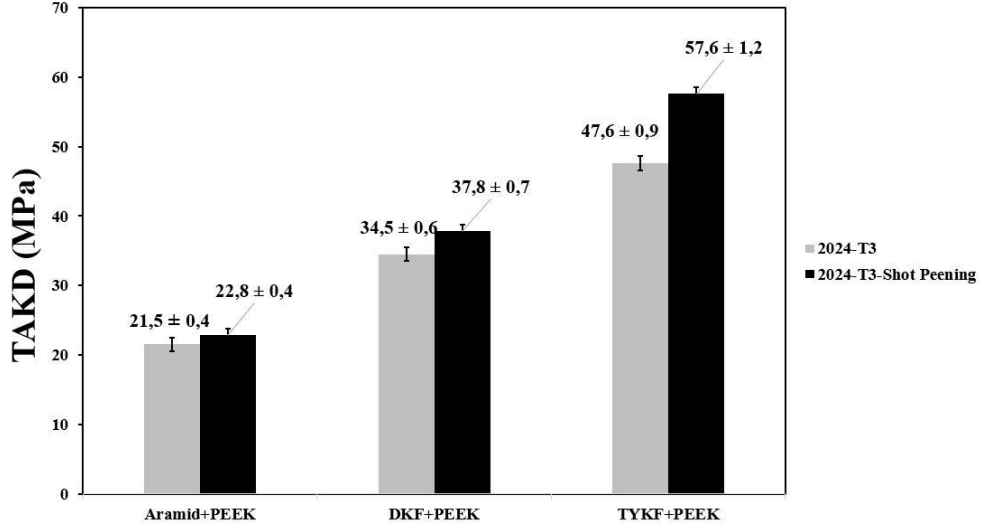
Şekil 6.51. 2024-T3, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML'lerin TAKD sonuçları.

PEEK ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML'lerin TAKD sonuçları Şekil 6.52.'de yer almaktadır. Bu grubun sonuçları incelendiğinde $57,6 \pm 1,2$ MPa değeriyle en yüksek TAKD'nin yine 2024-T3 (Shot peening) ile üretilen kompozite ait olduğu görülmektedir. Fakat bu grubun tamamı epoksi reçineli karşılıkları ile kıyaslandığında % 25-45 aralığında TAKD'lerde artış olduğu görülmektedir. PEEK'in kayma gerilmelerine direnç gösterme açısından epoksi reçineye göre üstün olması ve sünekliliği bu sonuca ulaşılmasının temel sebebidir.



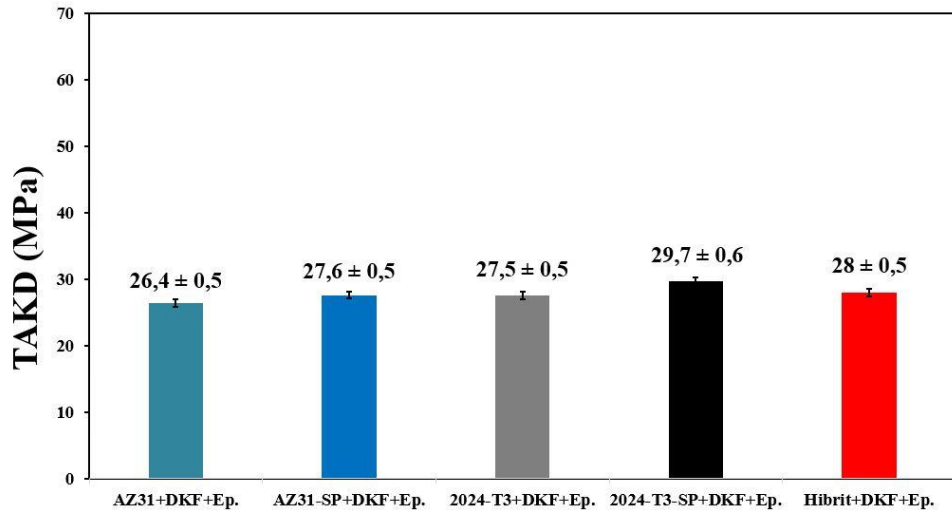
Şekil 6.52. Tek yönlü karbon fiber (TYKF) ve PEEK takviyeli FML'lerin TAKD sonuçları.

Şekil 6.53.' te 2024-T3, PEEK ve farklı fiber türlerinin TAKD sonuçları görülmektedir. TYKF ve dokuma fiberler arasındaki bariz fark bu grupta da görülmekle beraber üretim sıcaklığının aramid fibere etkisi ve dokuma fiberlerin yapısal dezavantajları bu durumun temel sebeplerindedir.



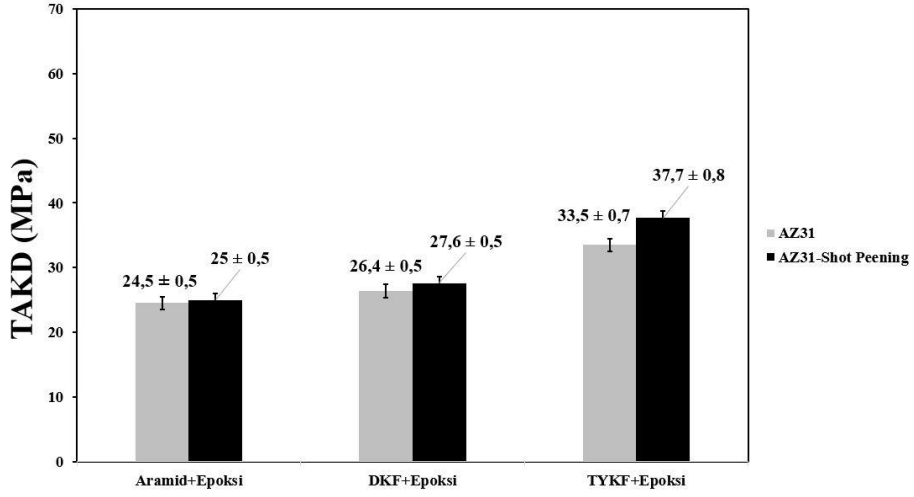
Şekil 6.53. 2024-T3, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.

DKF ve epoksi reçine takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları Şekil 6.54.' te görülmektedir. En yüksek değer $29,7 \pm 0,6$ MPa ile 2024-T3 (shot peening) ile üretilen numuneye aitken en düşük değer $26,4 \pm 0,5$ MPa ile AZ31 ile üretilen FML' ye aittir.



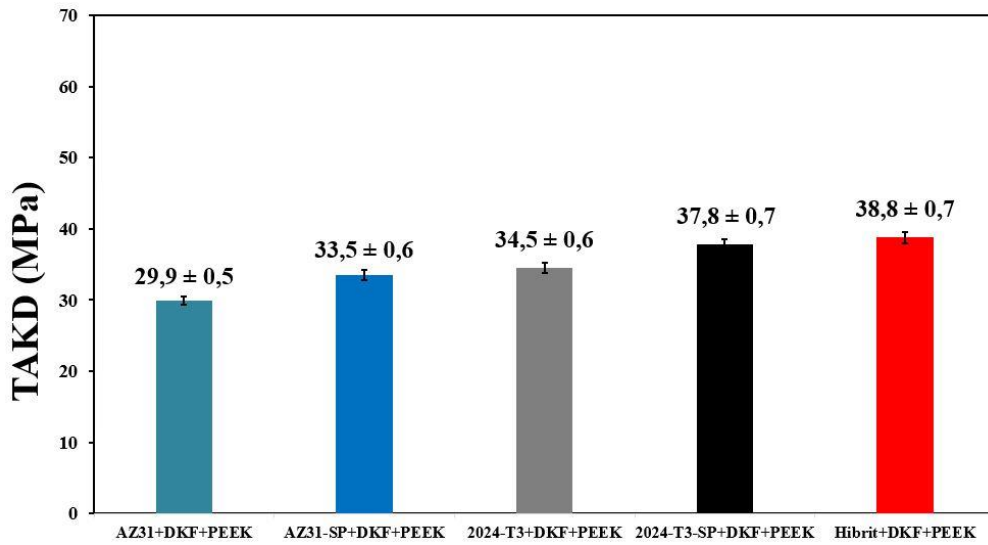
Şekil 6.54. Dokuma karbon fiber (DKF) ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.

Şekil 6.55.' te AZ31, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları yer almaktadır. Genel eğilime uygun şekilde aramid fiberden TYKF takviyeli kompozite doğru artan TAKD değerlerini görmek mümkündür.



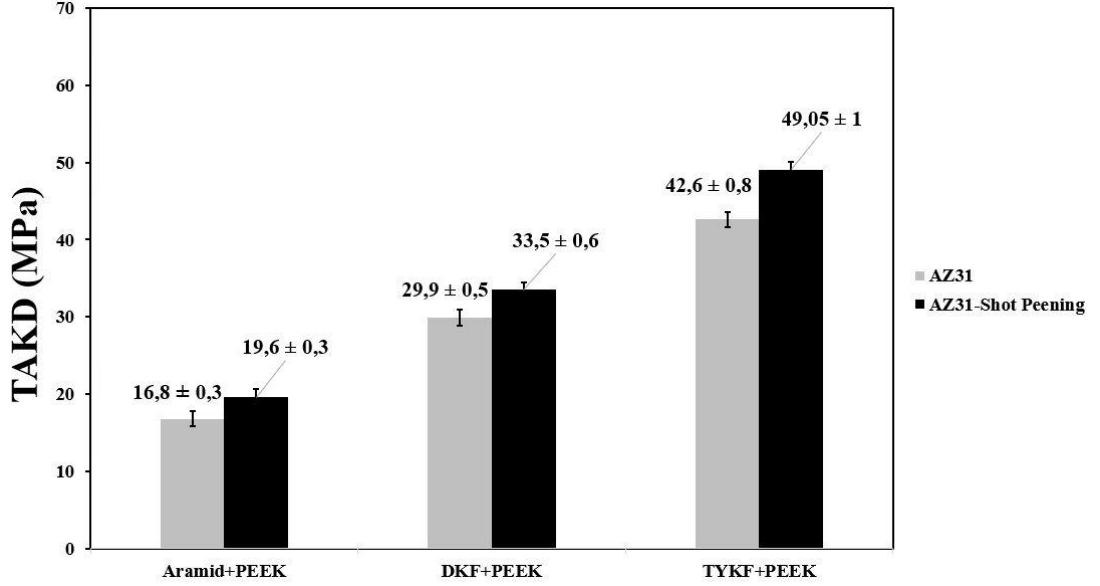
Şekil 6.55. AZ31, epoksi reçine ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.

DKF ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları Şekil 6.56.' da görülmektedir. En yüksek değer $38,8 \pm 0,7$ MPa ile hibrit FML' ye aitken en düşük değer $29,9 \pm 0,5$ MPa ile AZ31 ile üretilen FML' ye aittir. PEEK etkisiyle artan TAKD bu seride de öne çıkmaktadır.



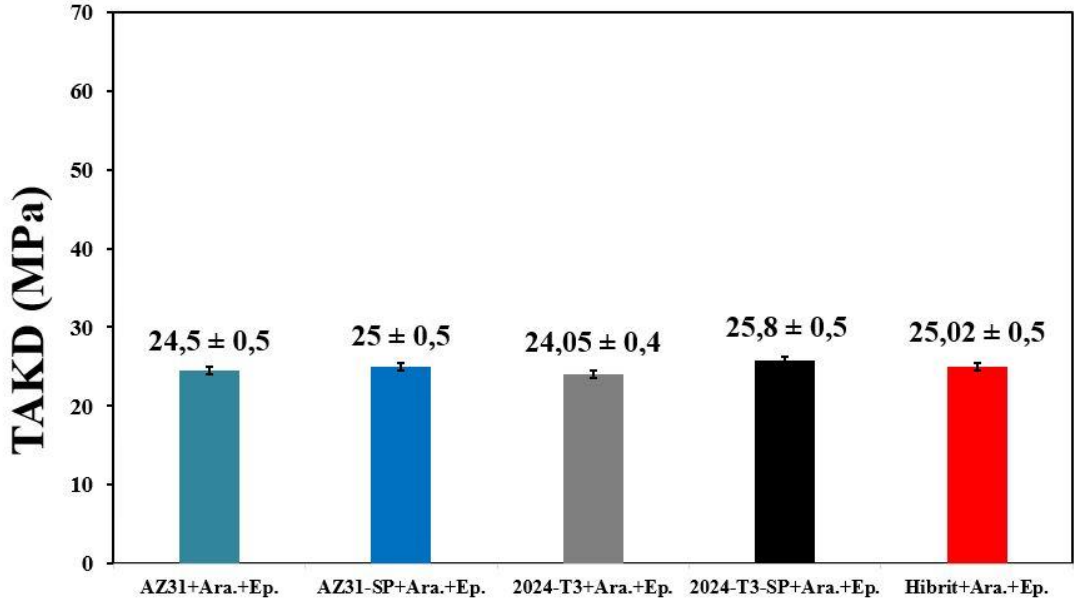
Şekil 6.56. Dokuma karbon fiber (DKF) ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.

Şekil 6.57.' de AZ31, PEEK ve farklı fiber türleri ile üretilen FML' lerin TAKD sonuçları görülmektedir. En yüksek değer $49,05 \pm 1$ MPa ile TYKF takviyeli shot peening işlemi görmüş alüminyum levha ile üretilen FML' ye ait iken en düşük değer ise $16,8 \pm 0,3$ MPa ile AZ31 ile üretilen FML' ye aittir.

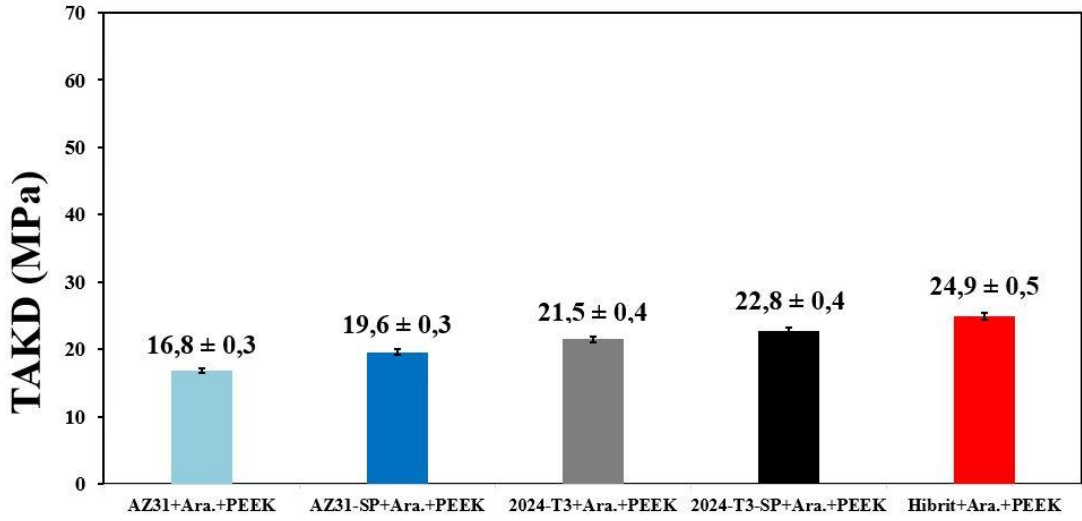


Şekil 6.57. AZ31, PEEK ve farklı fiber türleriyle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları.

Şekil 6.58. ve Şekil 6.59.' da aramid fiber + epoksi reçine ve aramid fiber + PEEK kombinasyonları ile üretilen FML' lerin TAKD sonuçları yer almaktadır. PEEK ve aramid fiber takviyeli kompozitlerde genel mekanik özelliklerdeki düşük kalış seyri TAKD değerlerinde de görülmektedir. Epoksi reçineli seride sonuçlar birbirine paralellik gösterse de PEEK' li seride hibrit kompozite doğru bir artış eğilimi gözlenmektedir. Hibrit kompozit ağırlık/dayanım açısından değerlendirildiğinde burada ve diğer mekanik özellikler açısından avantaj sağlayacak bir konumda görünmektedir.

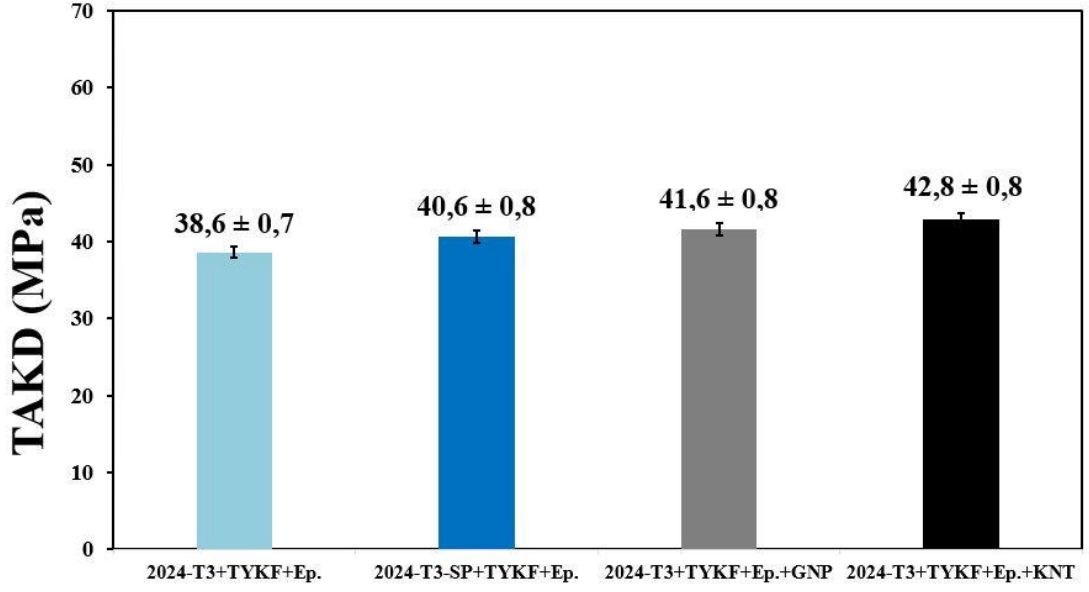


Şekil 6.58. Aramid fiber ve epoksi takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.



Şekil 6.59. Aramid fiber ve PEEK takviyeli FML' lerin TAKD sonuçları.

Nanopartikül ilave edilmiş epoksi reçinelerle üretilen FML' lerin TAKD sonuçları Şekil 6.60.' ta görülmektedir. Shot peening işlemi TAKD' yi % 5, GNP ilavesi % 7, KNT ilavesi ise % 11 oranında artırmıştır. Epoksi reçine içerisine ilave edilen ve matriste rastgele dağılan GNP ve KNT' ler kayma gerilmelerinin önünde engel teşkil ederek hem ilerlemelerini yavaşlatmakta hem de gerilmeleri köprüleme vazifesi görerek TAKD' de artış sağlanmasına sebep olmaktadır.



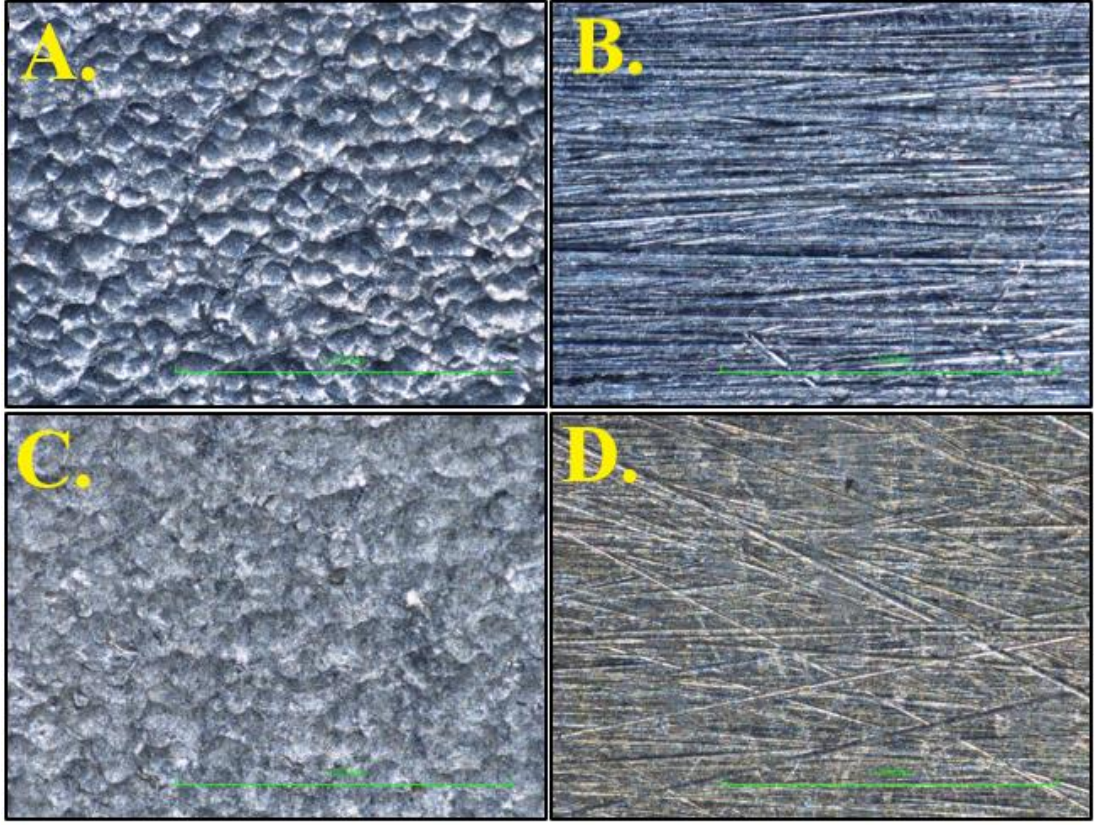
Şekil 6.60. Epoksiye GNP ve KNT takviyesi ile üretilen FML'lerin TAKD sonuçları.

6.6. SEM VE DİJİTAL MİKROSKOP ANALİZİ SONUÇLARI

FML'ler üretildikten sonra metal ve kompozit kısımlar arasındaki arayüzey etkileşimini görmek ve yapıdaki olası hataları (delaminasyon vb.) tespit etmek amacıyla bütün numunelerin yan kesitlerinde SEM görüntüleri alınmıştır. Uygulanan mekanik testler sonrası hasar mekanizmalarını tespit etmek ve hasara uğramış arayüzeyleri incelemek amacıyla dijital mikroskopla görüntüler alınmıştır.

6.6.1. Yüzey Pürüzlendirme İşlemlerinin Mikroskop Görüntüleri

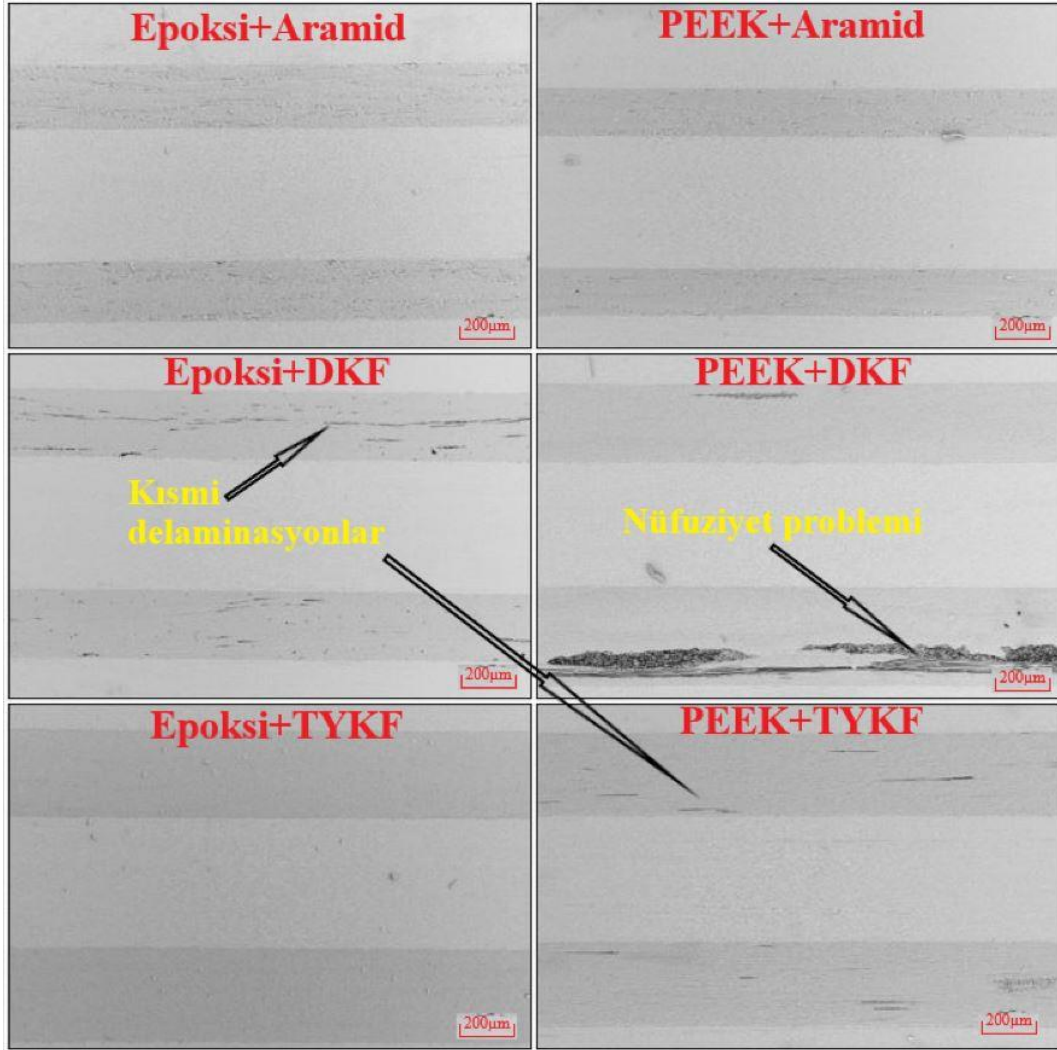
FML üretiminde kullanılan 2024-T3 alüminyum ve AZ31 magnezyum levhaların yüzeylerini laminasyon işleminde başarılı hale getirmek için zımparalama ve shot peening işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerden sonra metal levhaların yüzey görüntüleri Şekil 6.61.'de görülmektedir.



Şekil 6.61. a) Shot Peening işlemi görmüş 2024-T3 alüminyum, b) 120' lik zımparayla işlem görmüş 2024-T3 alüminyum, c) Shot Peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum, d) 120' lik zımparayla işlem görmüş AZ31 magnezyum yüzeylerinin 200 X büyütmedeki dijital mikroskop görüntüleri.

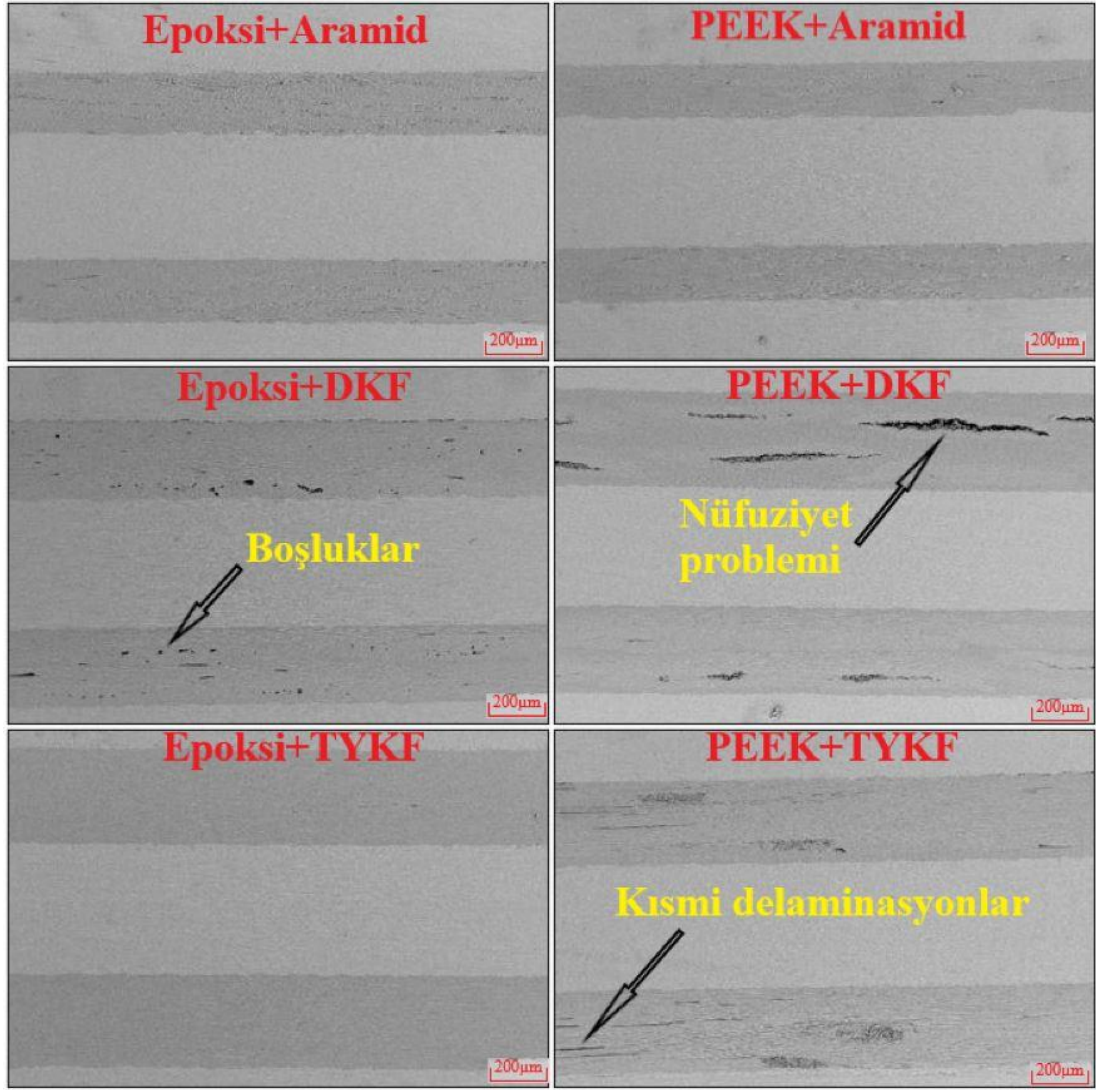
6.6.2. Arayüzey SEM Görüntüleri

2024-T3 ve bütün takviye grupları ile üretilen numunelerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri Şekil 6.62.' de görülmektedir. Genel olarak görüntüler incelendiğinde metal ve kompozit katmanlar arasında laminasyon işleminin başarılı olduğu görünmektedir. Fakat DKF ve PEEK kombinasyonu ile üretilen FML' de termoplastik reçinenin nüfuziyet problemi mevcuttur. Epoksi+DKF ve PEEK+TYKF takviyeli FML' lerde ise kısmi delaminasyonlar gözlenmiştir. Özellikle PEEK takviyeli kompozitlerde meydana gelen delaminasyon ve nüfuziyet sorunları beklenen performansı gösterememelerinin temel sebebidir.



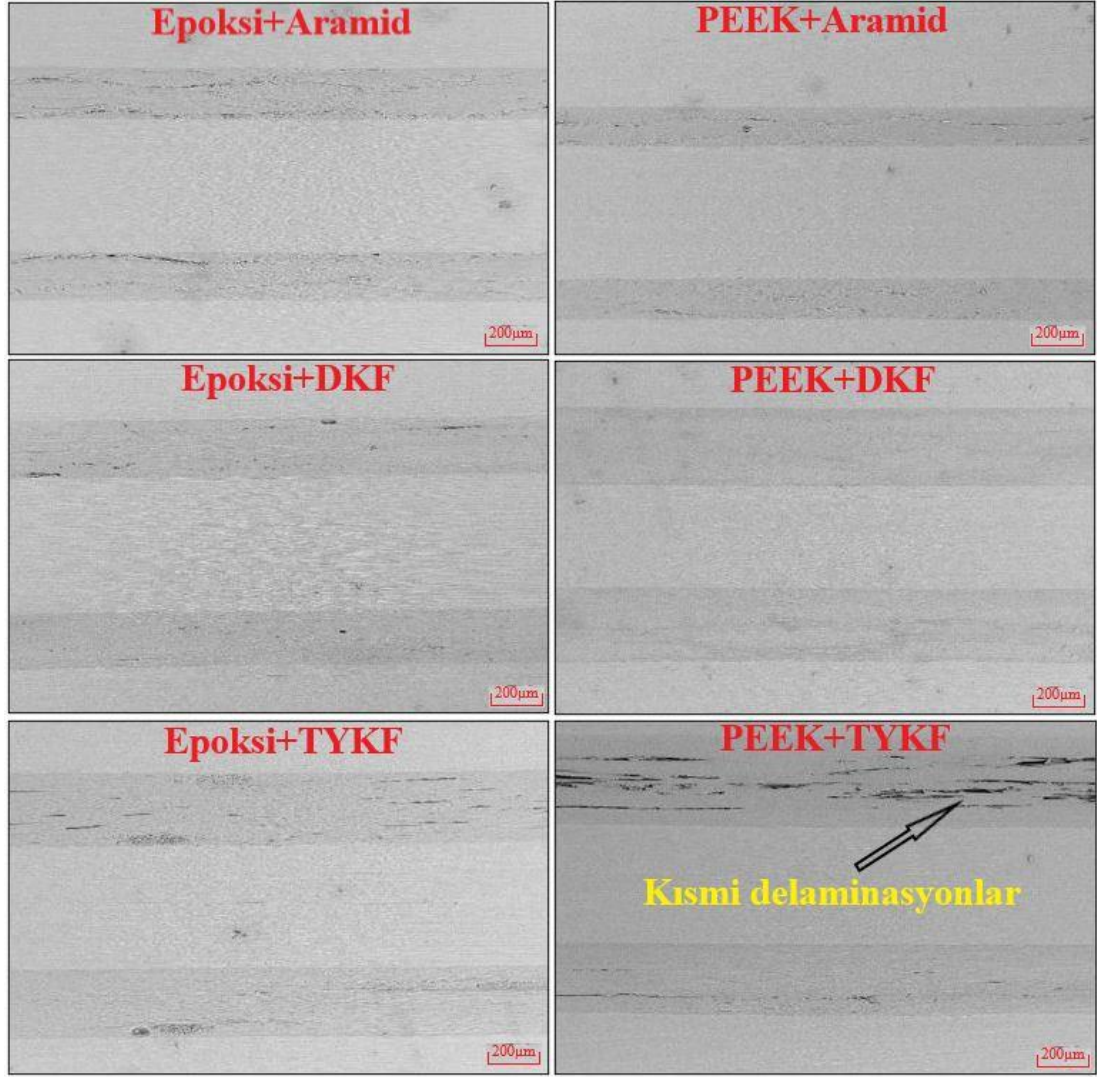
Şekil 6.62. 2024-T3 alüminyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML'lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

2024-T3 (shot peening) ve bütün takviye elemanları ile üretilen kompozitlerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri Şekil 6.63.' te görülmektedir. Metal ve kompozit katmanlar arasında laminasyon işleminin başarılı olduğu fakat bir önceki seride bahsi geçen sorunların mevcut olduğu görülmektedir.



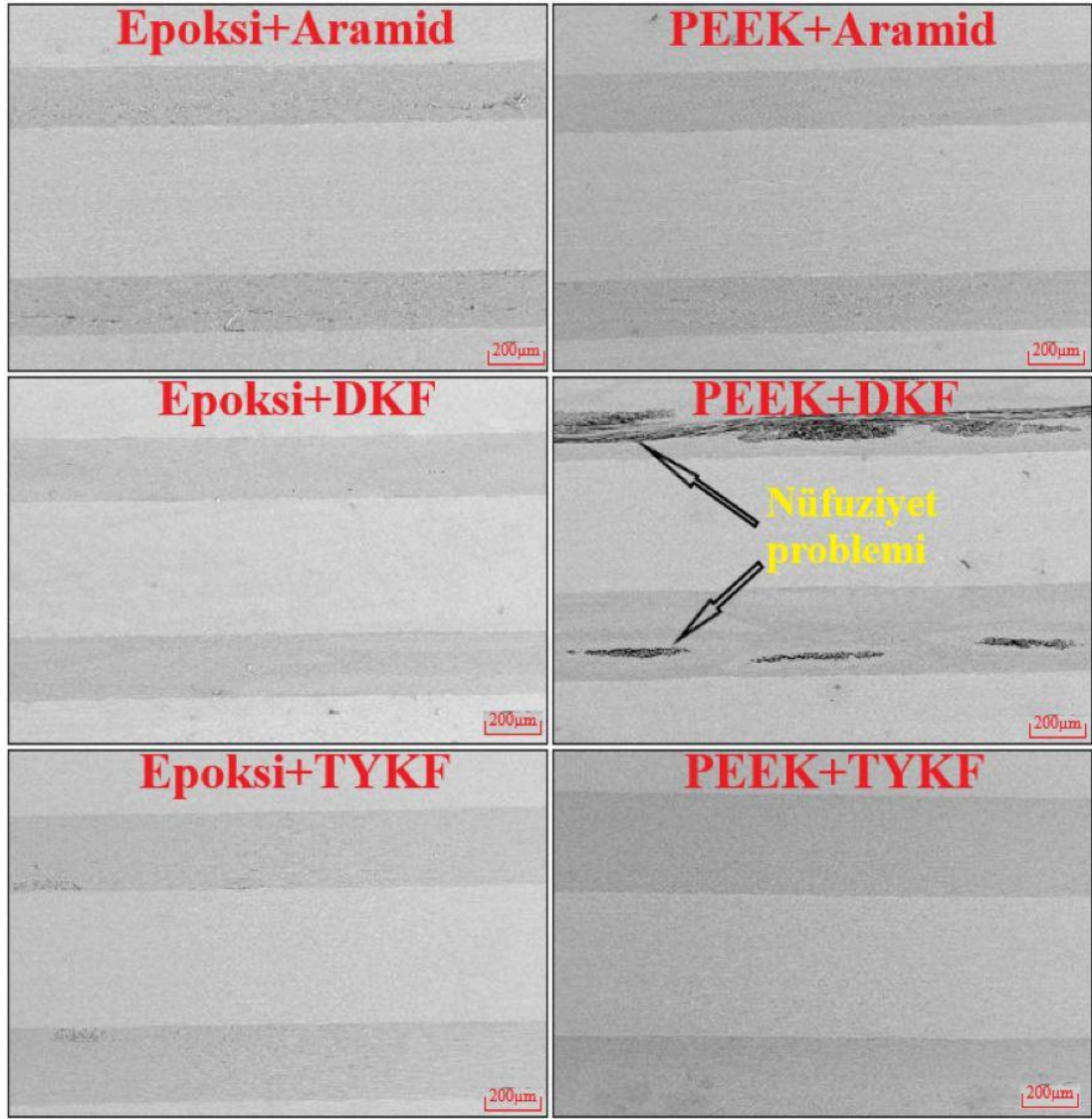
Şekil 6.63. 2024-T3 (shot peening) alüminyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML'lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

AZ31 magnezyum levha, epoksi reçine, PEEK ve diğer bütün fiber türleriyle üretilen kompozitlerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri Şekil 6.64.'te yer almaktadır. Metal ve kompozit katmanları arasında laminasyonda herhangi bir sorun görülmemiştir. Fakat PEEK ve TYKF takviyeli FML' de termal genişleme farkının etkisiyle kısmi delaminasyonlar burada da tespit edilmiştir.



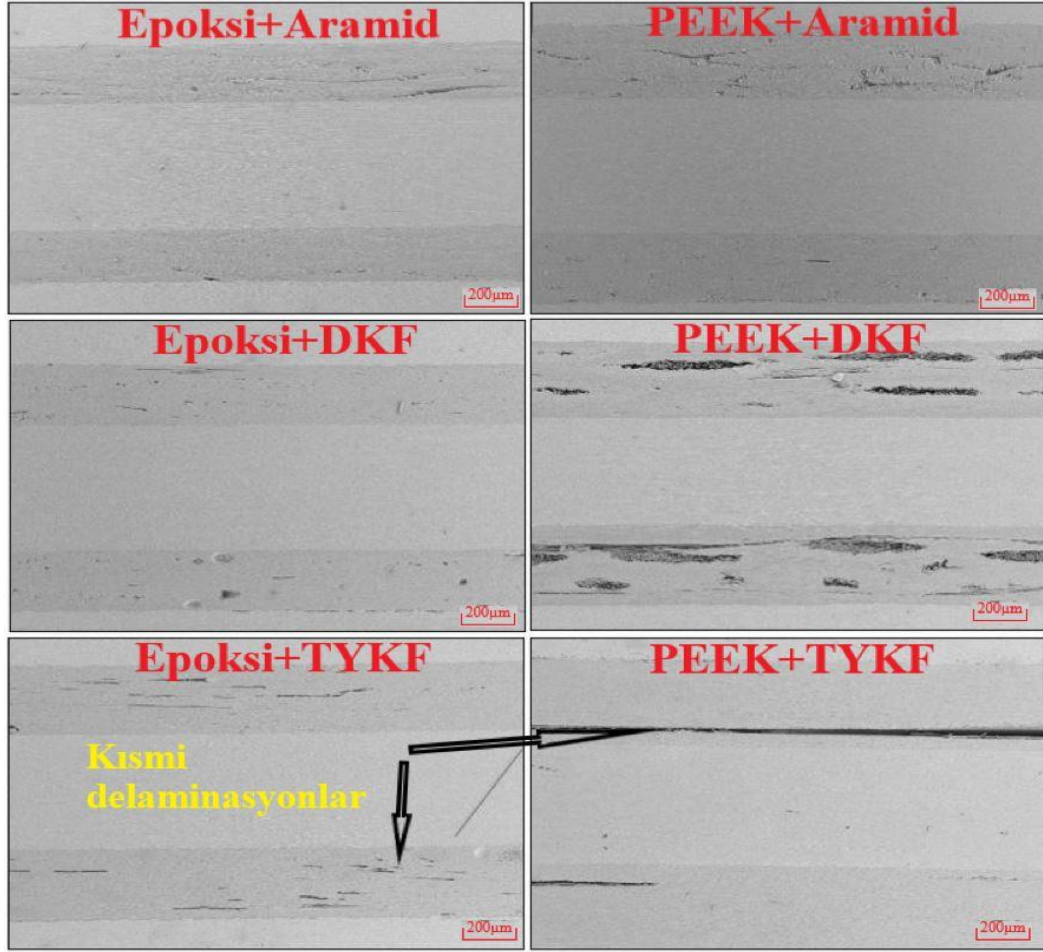
Şekil 6.64. AZ31 magnezyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

Shot peening işlemi görmüş AZ31 magnezyum levhalar ve diğer bütün takviye elemanlarının biraraya getirilmesiyle üretilen FML' lerin arayüzey görüntüleri Şekil 6.65.' te görülmektedir. DKF ve PEEK takviyeli kompozitteki nüfuziyet probleminin dışında bütün FML' lerin üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.



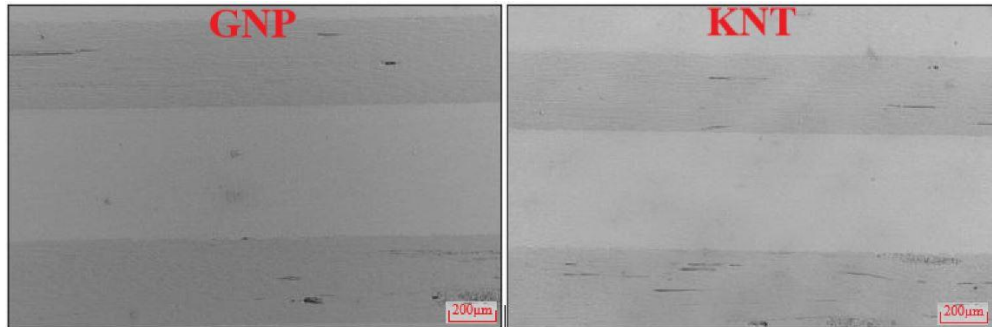
Şekil 6.65. AZ31 (shot peening) magnezyum levha ve diğer takviye elemanları ile üretilen FML'lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

Hibrit FML'lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri Şekil 6.66.'da yer almaktadır. Nüfuziyet ve kısmi delaminasyon problemlerinin yer yer görüldüğü tespit edilmiştir. Fakat genel manada metal ve kompozit katmanların laminasyonu başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.



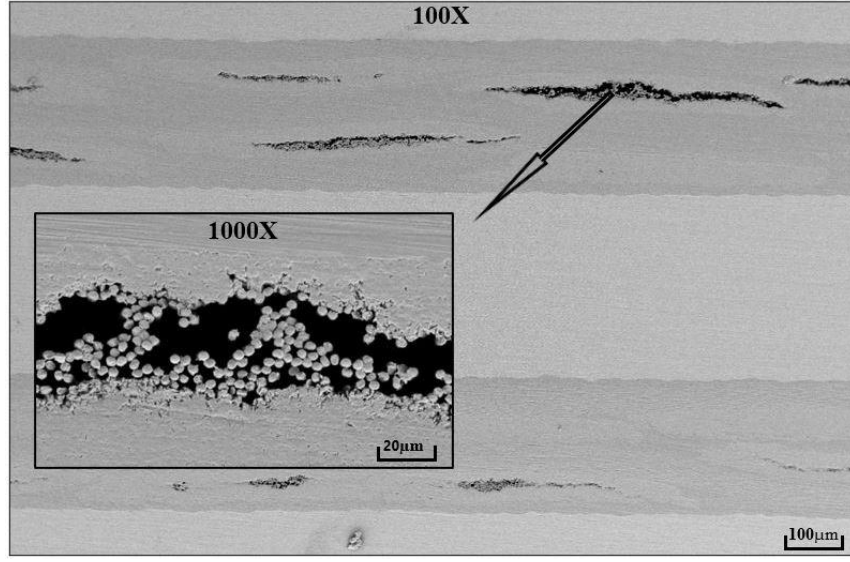
Şekil 6.66. Hibrit FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

Nanopartikül ilaveli FML' lerin arayüzey görüntüleri Şekil 6.67' de görülmektedir. Mekanik özelliklere nanopartiküllerin olumlu etkisi yapılan testlerle tespit edilmiştir. Epoksi reçineye GNP ve KNT ilavesinin adhezif özellikleri geliştirdiği ve laminasyona olumlu yönde katkı sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.67. Nanopartikül ilaveli reçinelerle üretilen FML' lerin 100 X büyütmedeki arayüzey SEM görüntüleri.

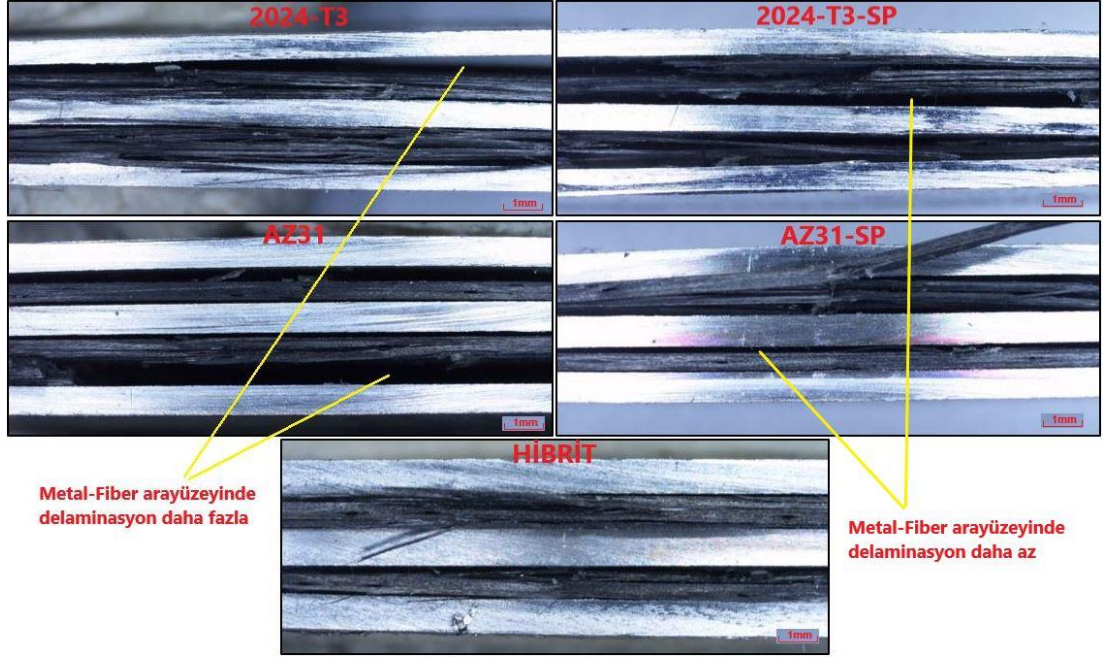
Şekil 6.68.' de DKF ve PEEK taviyesiyle üretilen FML' de yaşanan, PEEK' in dokuma karbon fiberin çözgü ve atkı ipliklerinin üst üste bindiği bölgelerdeki nüfuziyet probleminin 100 X ve 1000 X büyütmedeki görüntüleri mevcuttur. Bu problem kısmi delaminasyonlara sebebiyet verdiği için ilgili takviye elemanları ile üretilen FML' lerde mekanik özelliklerde düşüşe sebep olmaktadır.



Şekil 6.68. DKF ve PEEK takviyeli FML' de nüfuziyet problemi.

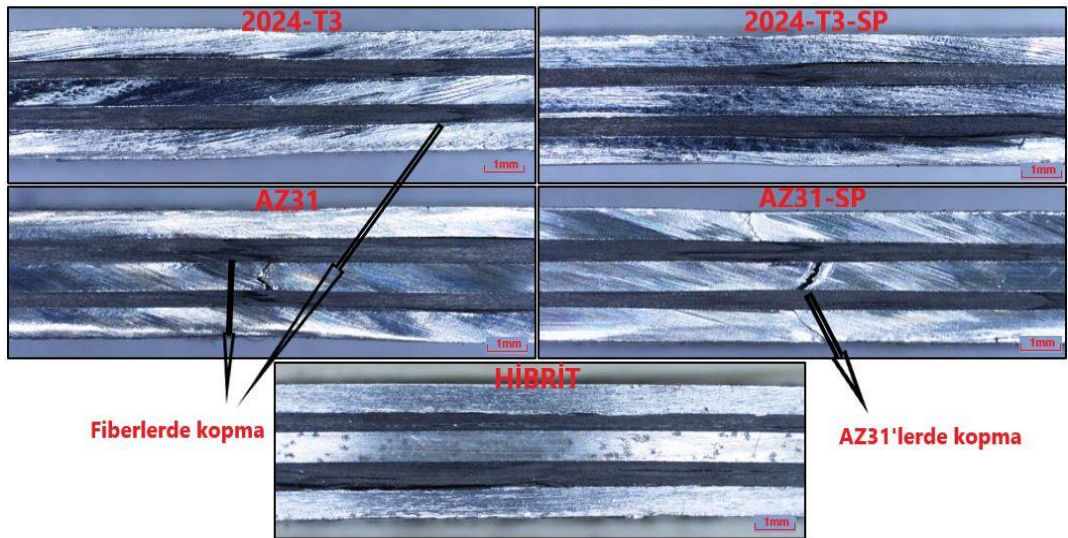
6.6.3. Çekme Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri

Mekanik kilitlenme mekanizmasının metal fiber arayüzündeki etkisi mekanik özelliklere doğrudan pozitif etki yapmaktadır. Şekil 6.69.' da dijital mikroskopla çekme testi sonrası numunelerin hasarlı bölgelerinden alınan görüntülerde shot peening işlemine maruz kalmış metallerle üretilen FML' lerde metal fiber arayüzlerinde çekme testi sonrası meydana gelen delaminasyon miktarının zımpalama işlemiyle üretilen numunelerden çok daha az olduğu görülmektedir. Aynı durum hibrit FML içinde geçerlidir.



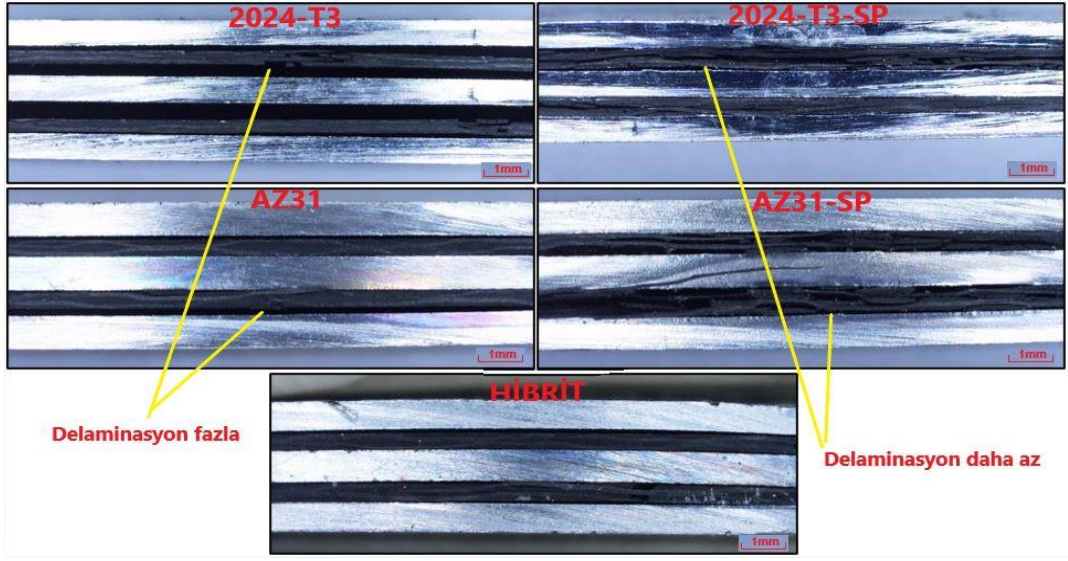
Şekil 6.69. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.70.' te PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerin çekme testi sonrası hasarlı bölgelerinden alınan dijital mikroskop görüntüleri yer almaktadır. PEEK' in kesme gerilmelerine karşı epoksi reçineye göre daha dayanıklı olması sebebiyle FML' nin kompozit katmanında fiber ayrılması daha az görülmüştür. Numunelerin tümünde çekme testi sonrası delaminasyon miktarı epoksi reçineli karşılıklarına göre daha azdır.



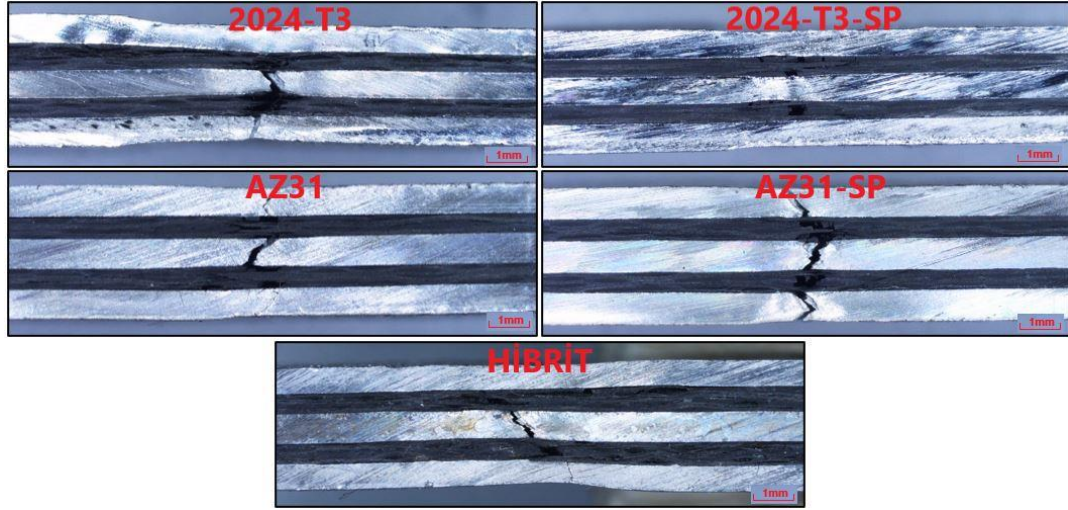
Şekil 6.70. TYKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Epoksi reçine ve DKF takviyeli FML'lerin çekme testi sonrası arayüzey görüntüleri Şekil 6.71.'de görülmektedir. Bu grupta da shot peening işleminin etkisiyle zımpara yüzey işlemlili numunelerde delaminasyon miktarı fazla iken diğerlerinde belirgin şekilde az olduğu görülmektedir. Ayrıca zımpara yüzey işlemi görmüş numunelerde hasar modunun metal ve kompozit tabaka arasında yani adhezif olduğu görülürken shot peening işlemi görmüş metal levhalarla üretilen FML'lerde hasar modunu genel itibariyle kohezif olduğu tespit edilmiştir.



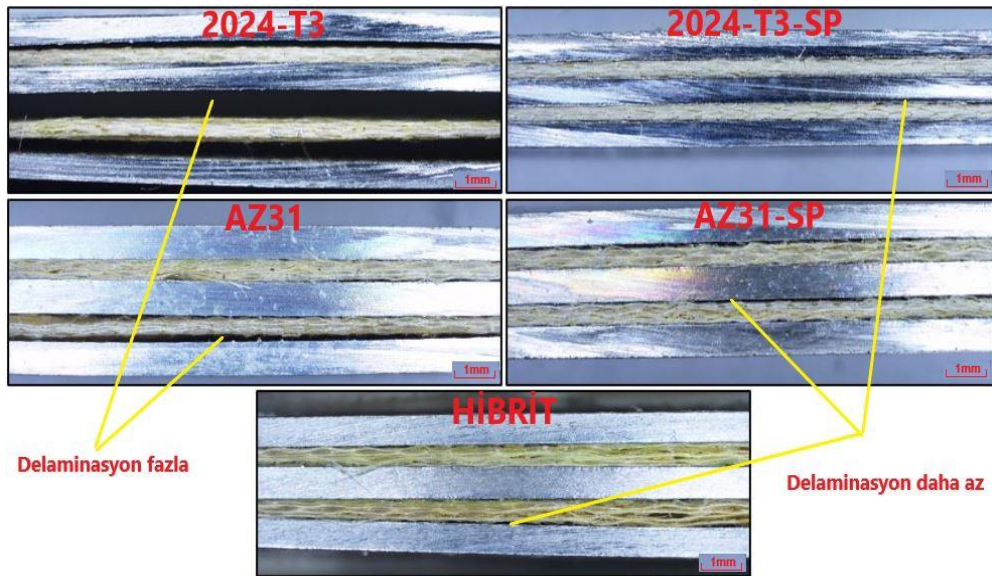
Şekil 6.71. DKF ve epoksi reçine ile üretilen FML'lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.72.'de DKF ve PEEK takviye elemanları ile üretilen FML'lerin çekme testi sonrası arayüzey görüntüleri yer almaktadır. PEEK'in sünek olması ve kesme gerilmelerine karşı dayanımının iyi olması adhezif özellikleri geliştirmektedir. Bu sebeple FML çekme testi esnasında bütün bir malzeme gibi davranmaktadır. Epoksi reçine ile üretilen FML'lerde metal hasarı genellikle gözlenmezken bu numunelerde metal katmanlarda da kopmalar meydana gelmiştir.

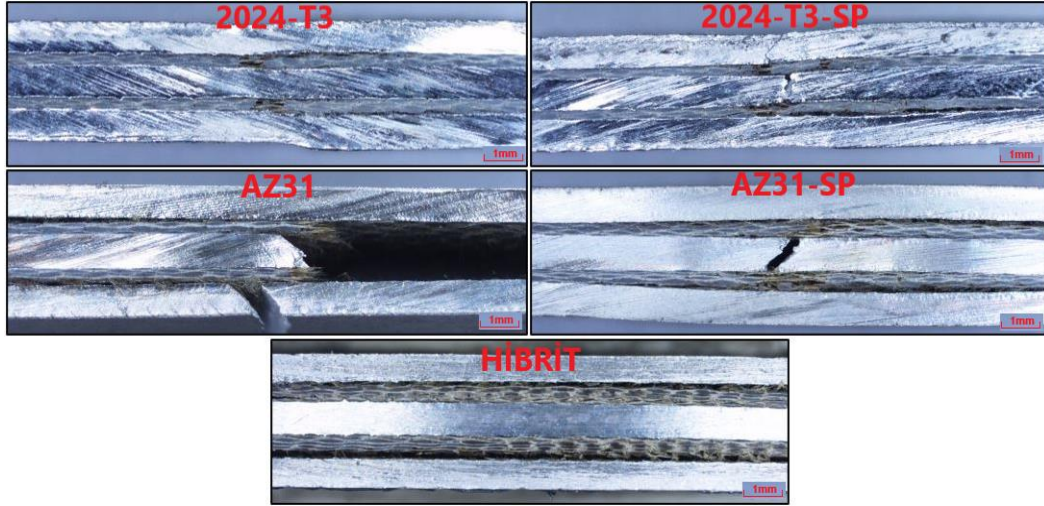


Şekil 6.72. DKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.73. ve Şekil 6.74.' te aramid fiber, epoksi reçine ve PEEK kombinasyonları ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası arayüzey görüntüleri yer almaktadır. Diğer numune gruplarında olduğu gibi epoksi reçine ve PEEK arasındaki farklılıklardan kaynaklı durumlar bu iki grupta da mevcuttur. Epoksi reçine ile üretilen FML' lerde çekme testi sonrası özellikle zımpara işlemine maruz kalmış numunelerde delaminasyon hasarı ciddi oranda varken PEEK ile üretilen numunelerde minimum seviyededir. Ayrıca PEEK ile üretilen kompozitlerde metal hasarı da gözlenmiştir.

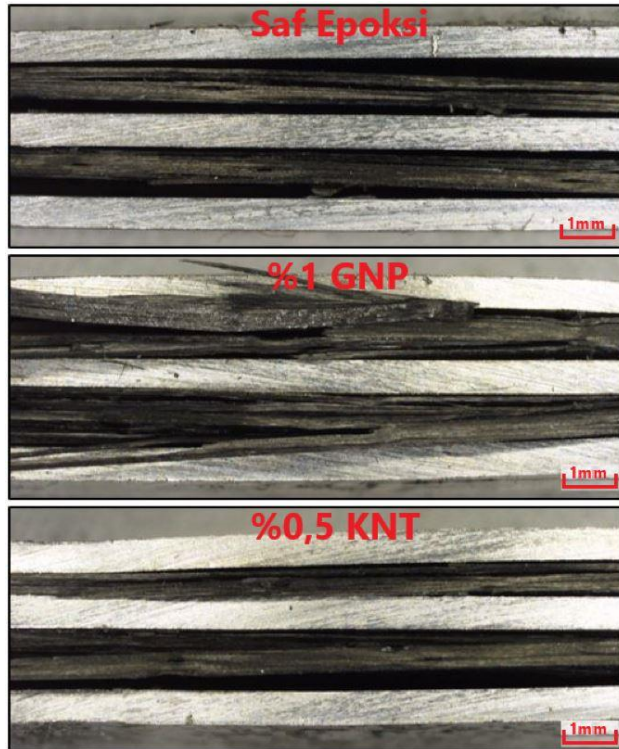


Şekil 6.73. Aramid fiber ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.



Şekil 6.74. Aramid fiber ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

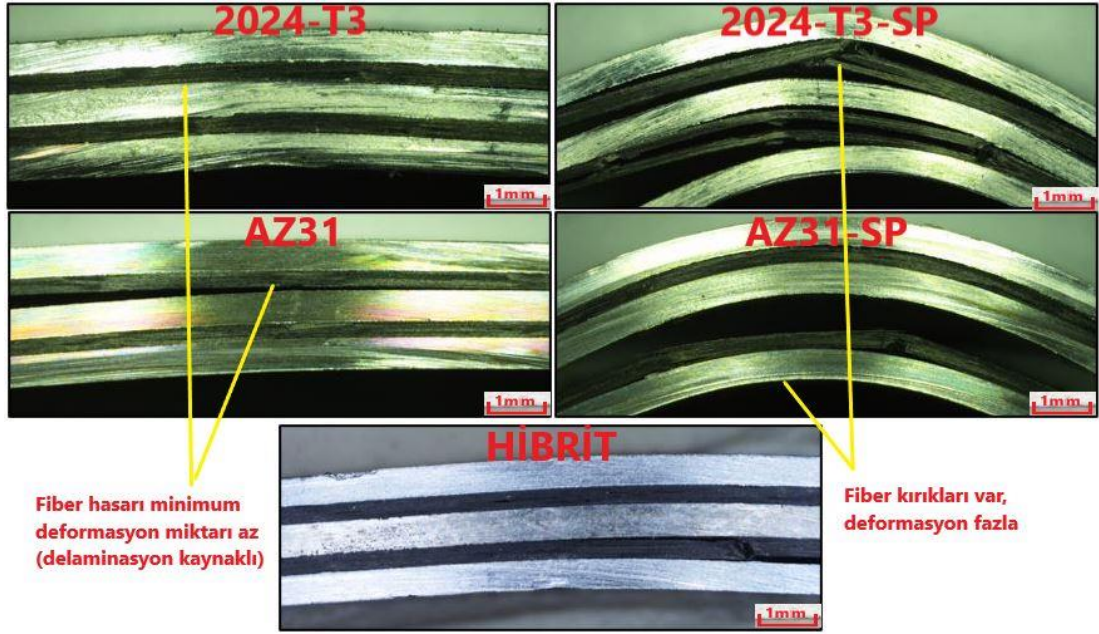
% 1 GNP ve % 0,5 KNT ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası arayüzey görüntüleri Şekil 6.75.' te görülmektedir. Nanopartikül ilavesinin adhezif özelliklere olumlu katkısı çekme testi sonrası delaminasyon miktarları arasındaki farktan da açıkça tespit edilmektedir.



Şekil 6.75. Nanopartikül ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

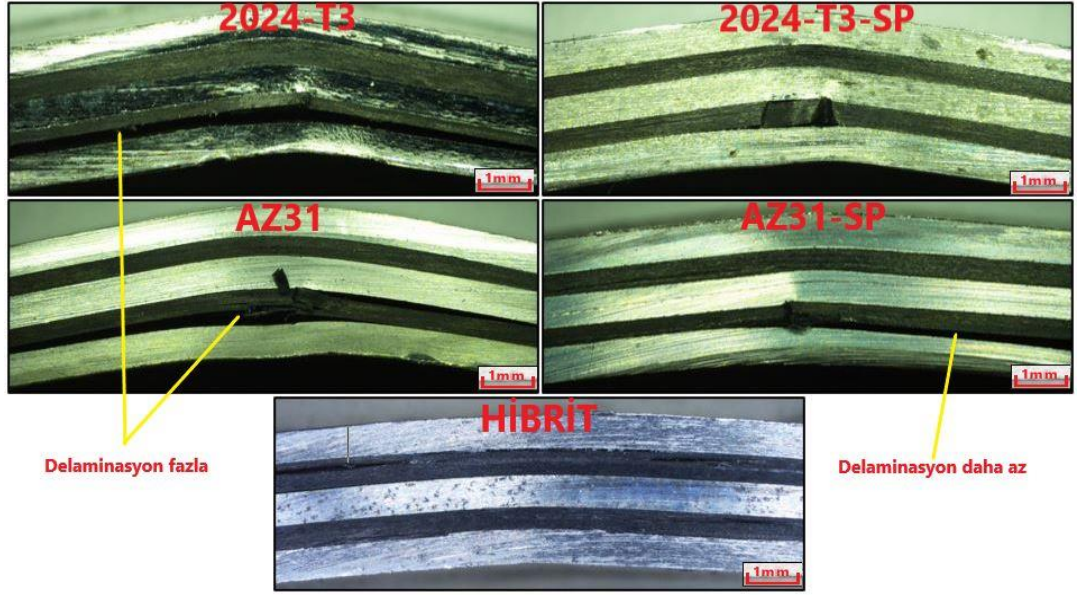
6.6.4. Eğme Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri

TYKF ve epoksi reçine takviyesi ile üretilen FML'lerin eğme testi sonrası hasarlı bölgelerinin arayüzey görüntüleri Şekil 6.76.'da görülmektedir. Zımpara yüzey işlemi gören metallere üretilen FML'lerde adhezif özellikler daha zayıf olduğu için metal ve kompozit katman arasında delaminasyon daha erken gerçekleşmiş, fiber hasarı minimum seviyede gözlenmiştir ve bu nedenle deformasyon miktarı azdır. Fakat shot peening yüzey işlemi görmüş metallere üretilen FML'lerde arayüzeydeki bağ daha kuvvetli olduğu için deformasyon miktarı ve fiber hasarı daha fazla meydana gelmiştir. Bu durumların etkisiyle shot peening işlemi görmüş FML'lerde eğme dayanımı daha üst seviyededir.



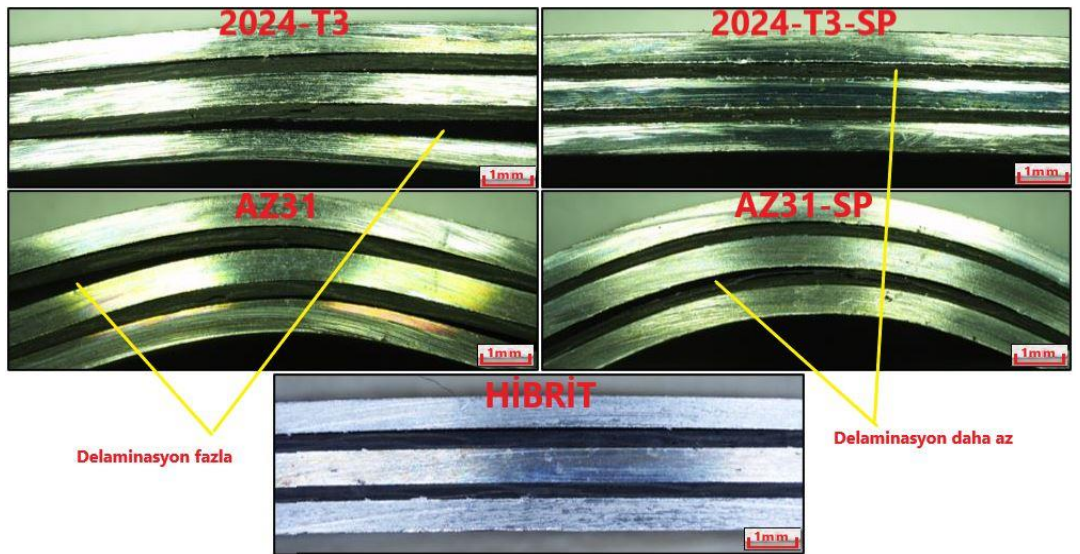
Şekil 6.76. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML'lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.77.'de PEEK ve TYKF takviyeli FML'lerin eğme testi sonrası hasarlı bölgelerinden alınan dijital mikroskop görüntüleri yer almaktadır. PEEK'in kesme gerilmelerine karşı epoksi reçineye göre daha dayanıklı olması sebebiyle FML'nin kompozit katmanında fiber hasarı daha az görülmüştür. Shot peening işleminin delaminasyon açısından olumlu etkisi bu grupta da görülmektedir.



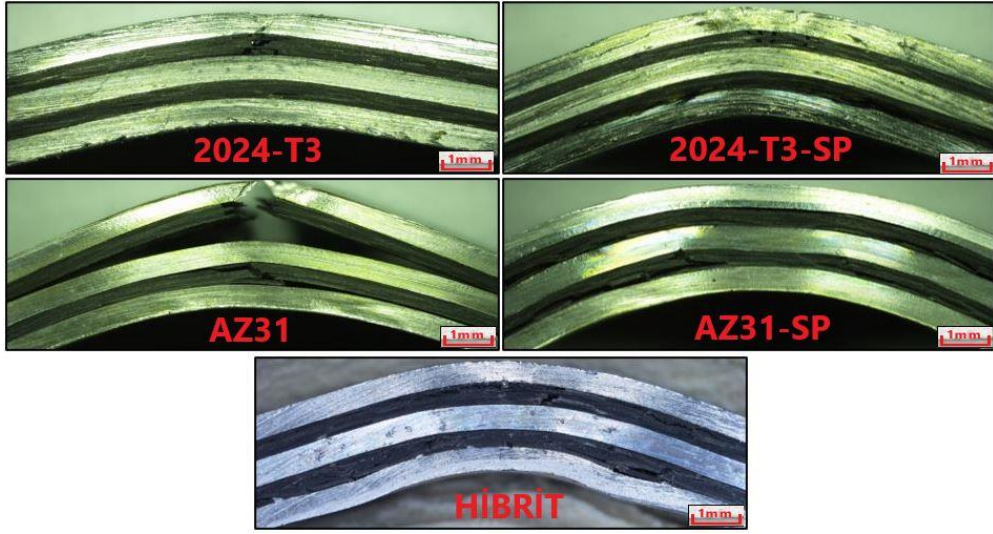
Şekil 6.77. TYKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Epoksi reçine ve DKF takviyeli FML' lerin eğme testi sonrası arayüzey görüntüleri Şekil 6.78.' de görülmektedir. Bu grupta da shot peening işleminin etkisiyle zımpara yüzey işlemlili numunelerde delaminasyon miktarı fazla iken diğerlerinde belirgin şekilde az olduğu görülmektedir. Ayrıca zımpara yüzey işlemlili numunelere göre shot peening işlemlili görmüş metal levhalarla üretilen FML' lerde deformasyon miktarının daha fazla olduğu gözlenmiştir.



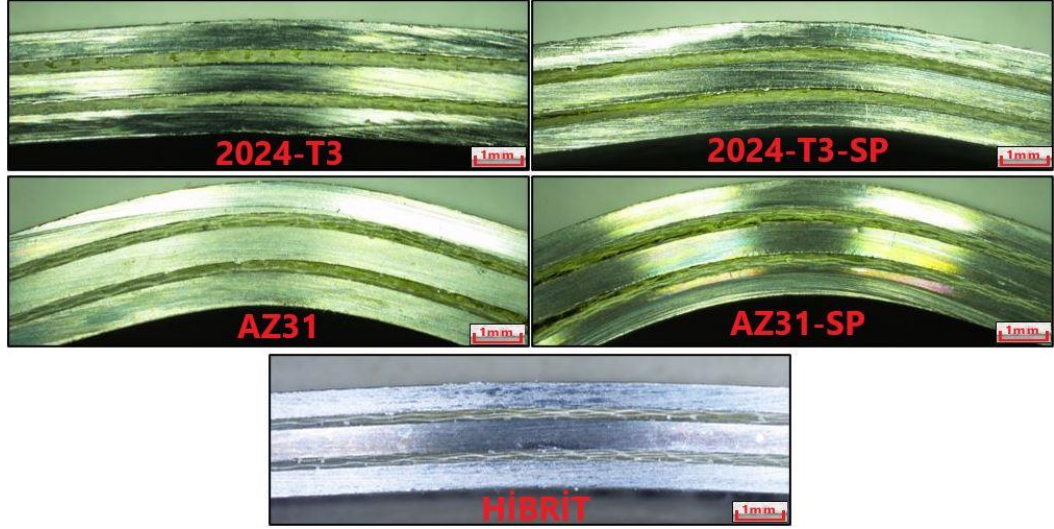
Şekil 6.78. DKF ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.79.' da DKF ve PEEK takviye elemanları ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası arayüzey görüntüleri yer almaktadır. Bu grup epoksi reçine ile üretilen karşılıkları ile karşılaştırıldığında deformasyon miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Hatta epoksi reçine ile üretilen FML' lerde metal hasarı gözlenmezken bu grupta özellikle en dış katmanı oluşturan metallerde hasar gözlenmiştir. Bu sebeplerden ötürü PEEK takviyeli FML' lerin eğme dayanımı epoksi reçineye kıyasla daha üstündür.

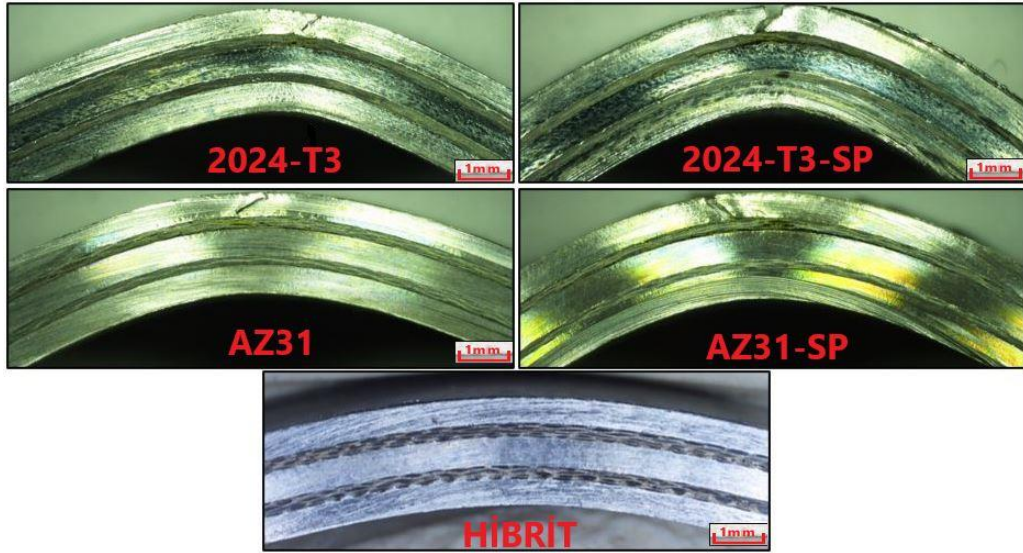


Şekil 6.79. DKF ve PEEK ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

Şekil 6.80. ve Şekil 6.81.' de aramid fiber, epoksi reçine ve PEEK kombinasyonları ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası arayüzey görüntüleri yer almaktadır. Diğer numune gruplarında olduğu gibi epoksi reçine ve PEEK arasındaki farklılıklardan kaynaklı durumlar bu iki grupta da mevcuttur. Ayrıca PEEK ile üretilen kompozitlerde deformasyon derinliği fazla olduğu için metal hasarı da gözlenmiştir.



Şekil 6.80. Aramid fiber ve epoksi reçine ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.



Şekil 6.81. Aramid fiber ve PEEK ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

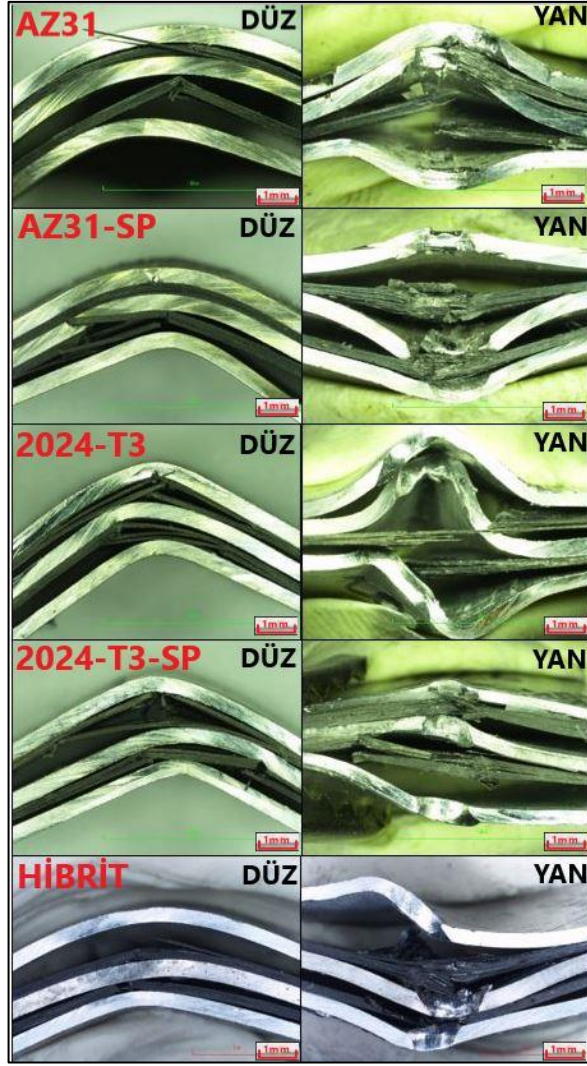
% 1 GNP ve % 0,5 KNT ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin çekme testi sonrası arayüzey görüntüleri Şekil 6.82.' de görülmektedir. Nanopartikül ilavesinin adhezif özelliklere olumlu katkısı eğme testi sonrası deformasyon miktarları arasındaki farktan da açıkça tespit edilmektedir.



Şekil 6.82. Nanopartikül ilaveli epoksi reçineler ile üretilen FML' lerin eğme testi sonrası 20 X büyütmedeki arayüzey görüntüleri.

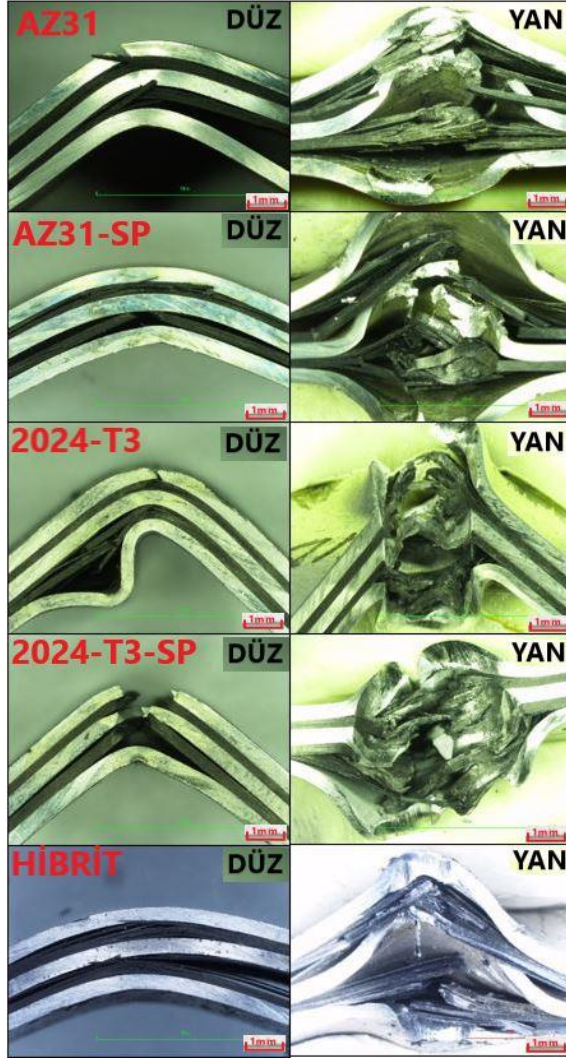
6.6.5. Darbe Testi Sonrası Dijital Mikroskop Görüntüleri

TYKF ve epoksi reçine takviyesi ile üretilen FML' lerin oda sıcaklığında gerçekleştirilen darbe testi sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 6.83.' te görülmektedir. Bu grupta epoksi reçinenin rijit ve kırılgan yapısından kaynaklı olarak darbe kuvvetinin etkisiyle özellikle yan doğrultuda metal kompozit katmanlar delaminasyona uğramıştır. Delaminasyonu takiben fiber kırılmaları ve ayrılmaları da gerçekleşmiştir. Fakat delaminasyonun hızlı gerçekleşmesi yapının bütün olarak korunup fiberlerin yükü üstlenme kapasitesini azaltmış olduğu düşünülmektedir.



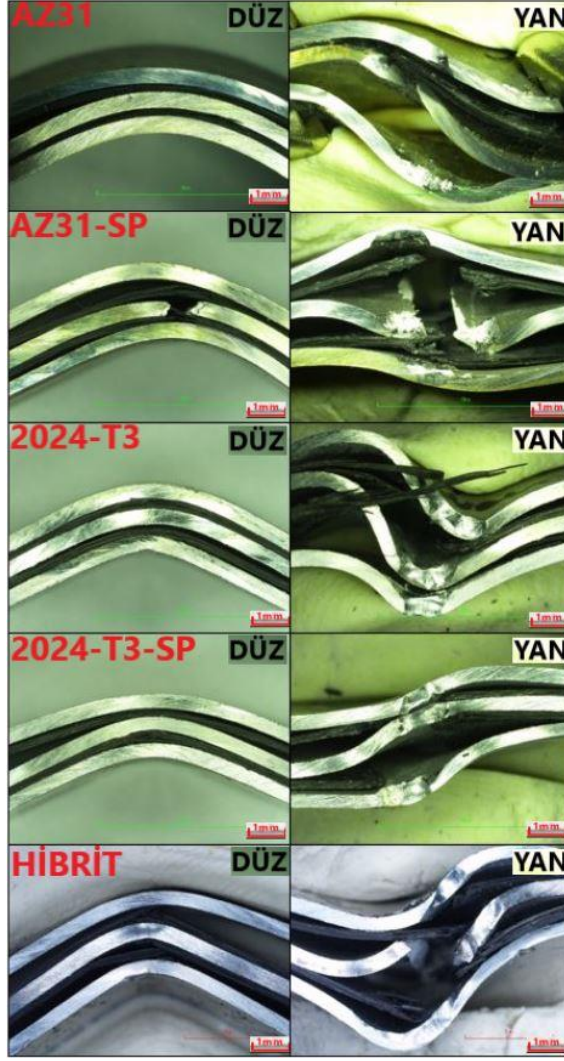
Şekil 6.83. Epoksi reçine ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

TYKF ve PEEK takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 6.84.' te görülmektedir. PEEK polimerinin üstün süneklik ve tokluk özelliklerine sahip olması darbe testindeki performansına yansımıştır. Epoksi reçine ile üretilen karşılıkları darbe kuvvetinin tesiri ile dağılırken PEEK ile üretilen FML' ler güçlü adhezif bağlanmanın etkisi, PEEK' in sünekliği ve tokluğu sayesinde daha fazla enerji absorblama kabiliyetine erişmişlerdir. Görüntüler de incelendiğinde fiberler yapıyla bir bütün halinde hareket etmiş ve darbe kuvvetini homojen bir şekilde dağıtmışlardır.



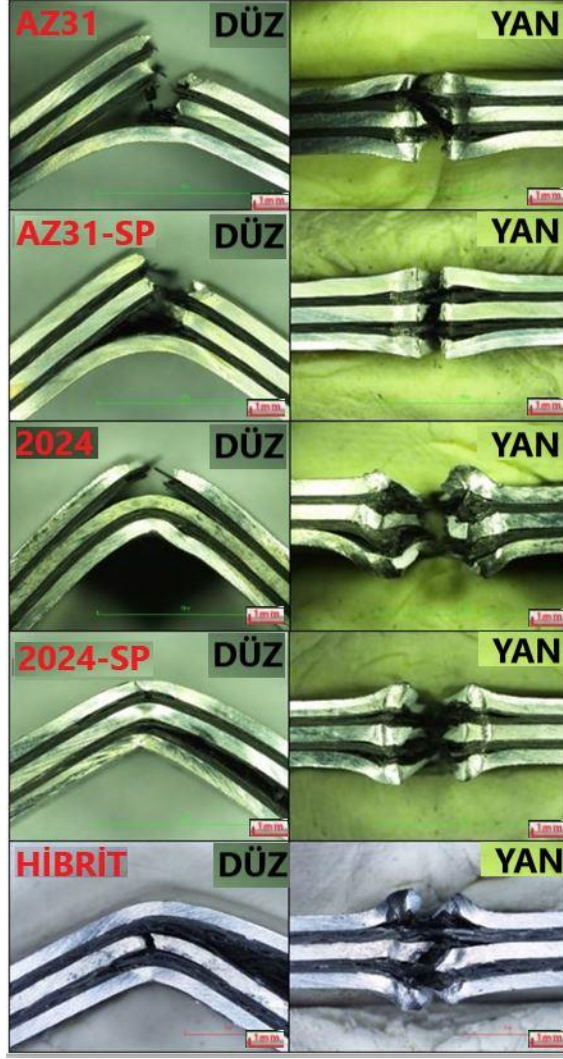
Şekil 6.84. PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

Şekil 6.85.' te epoksi reçine ve DKF taviye elemanları ile üretilen FML' lerin darbe testinden sonraki hasarlı görüntüleri yer almaktadır. Bu grupta da epoksi reçinenin kırılkan yapısı nedeniyle FML' ler yan doğrultuda uygulanan darbe testi sonrası bütünlüğünü koruyamamıştır. Fakat kuvvet etki ettiği esnada fiberler, PEEK takviyeli karşılığına kıyasla yükü dağıtma etkisini gösterebilmişlerdir. Bu durum sonuçlardan da anlaşılmaktadır.



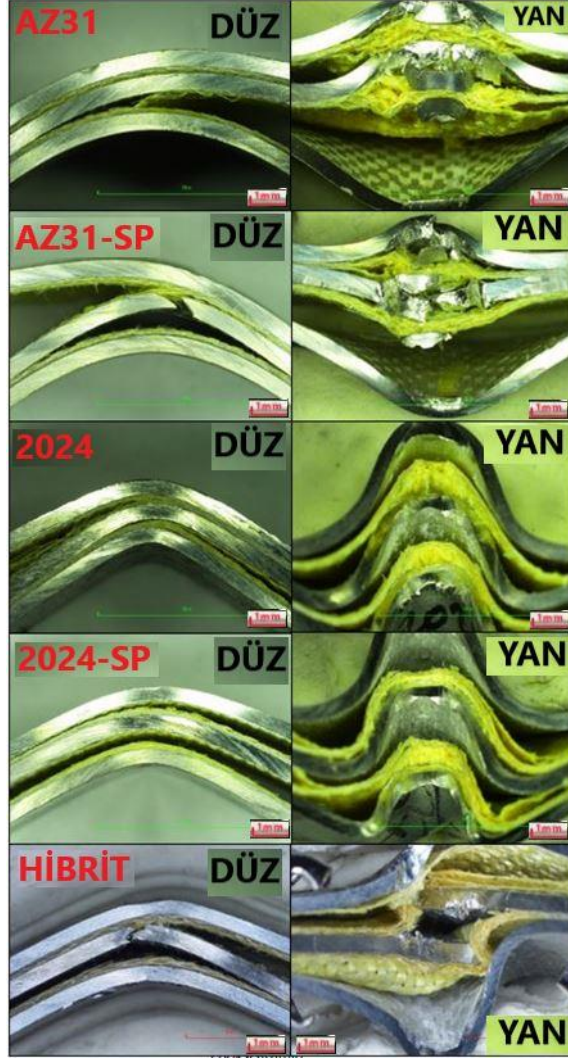
Şekil 6.85. Epoksi reçine ve DKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

DKF ve PEEK takviyeli FML' lerin hasarlı görüntüleri de (Şekil 6.86.) incelendiğinde darbe kuvvetinin özellikle yan doğrultuda FML içerisinde dağılımının yetersiz olduğu dolayısıyla da enerji absorblama kapasitesinin düşük kaldığı anlaşılmaktadır. PEEK' in en önemli avantajlarından biri olan yüksek kesme dayanımı bu grupta darbe testi esnasında delaminasyona büyük ölçüde engel olduğu için darbe enerjisinin düşük kalmasının temel sebebidir. PEEK ve DKF kombinasyonu ile yapılan üretimlerde genel olarak yaşanan kısmi nüfuziyet ve delaminasyon problemlerinden kaynaklanan boşluklar darbe testi esnasında çentik etkisi yaparak darbe enerjisinin epoksi reçineli karşılığına göre daha düşük kalmasının bir diğer sebebi olabileceği düşünülmektedir.



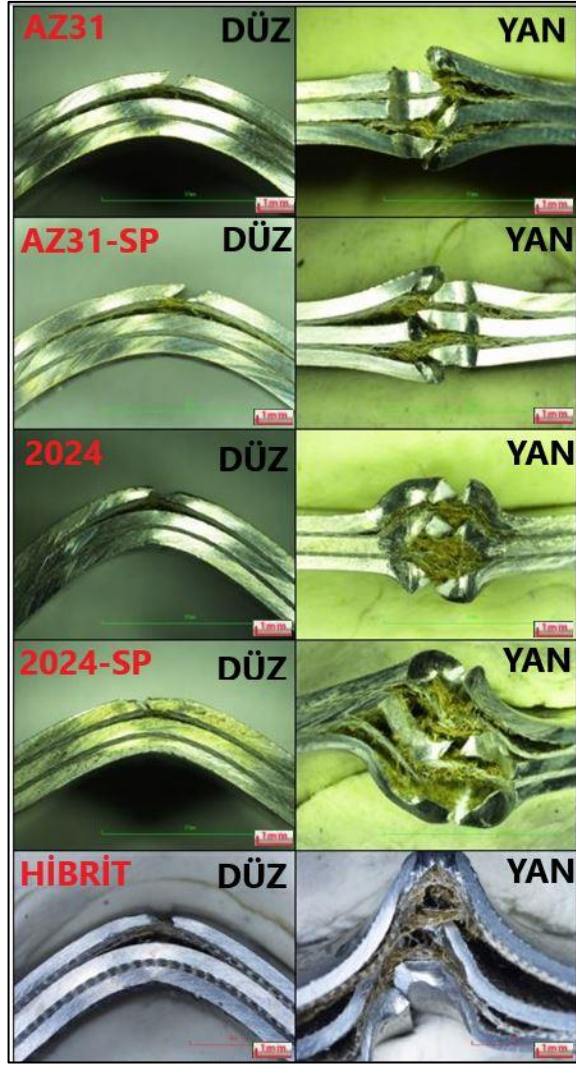
Şekil 6.86. PEEK ve DKF takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

Epoksi ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası hasarlı görüntüleri Şekil 6.87.' de görülmektedir. Aramid fiber takviyeli FML' ler aramidin kendine özgü avantajları sayesinde yan doğrultuda üstün bir performans sergilemiştir. Aramid lifleri çok sık dokunduğu için onlara dışarıdan bir kuvvet etki ettiğinde sık dokunmuş o lifleri ayırmak için gereken kuvvet çok fazla olduğundan ve aramid lifleri yükün dağılımını yapı içerisinde kusursuz gerçekleştirdiğinden darbe enerjisi çok yüksek olmaktadır. Darbe sonrası yüzey görüntüleri de incelendiğinde aramid fiberin özellikle 2024-T3 alüminyum ile kombinasyonunda darbe kuvvetinin etkisiyle kırılma olmadan kompozitin ne kadar fazla şekil değiştirdiğini görmek mümkündür.



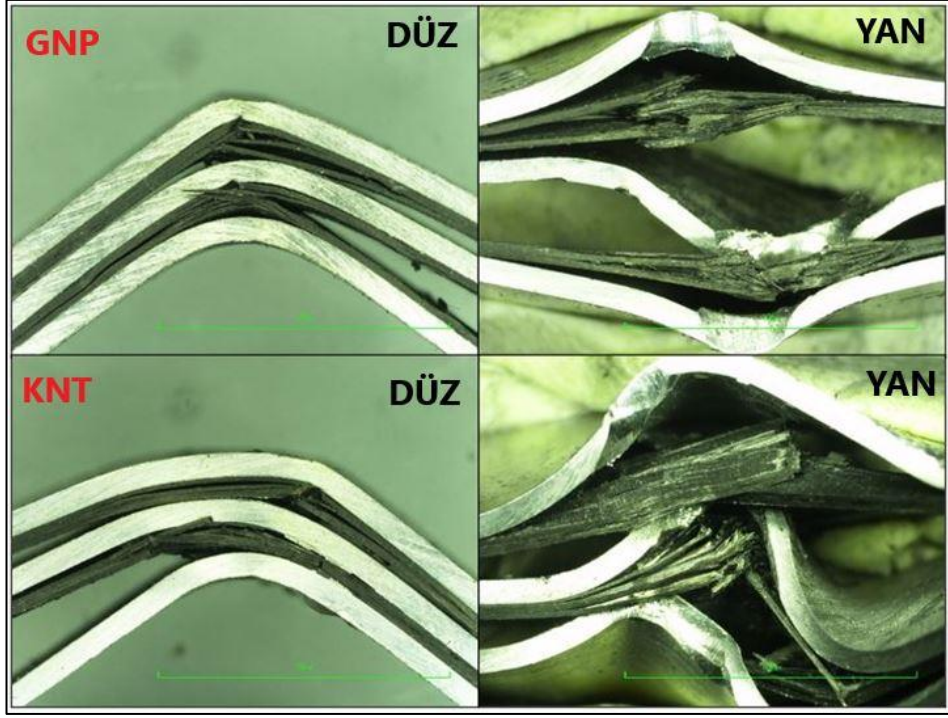
Şekil 6.87. Epoksi reçine ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

Şekil 6.88.' de PEEK ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe hasarı sonrası yüzey görüntüleri yer almaktadır. Daha önceki kısımlarda da sıkça bahsedildiği gibi yüksek üretim sıcaklığının para-aramid liflerinin yapısını bozması sebebiyle epoksi karışılığının gösterdiği performans bu grupta gözlenememiştir. Deformasyon miktarının düşüklüğü de bu durumun bir kanıtı niteliğindedir.



Şekil 6.88. PEEK ve aramid fiber takviyeli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

Nanopartikül ilave edilmiş epoksi reçinelerle üretilen FML' lerin hasarlı görüntüleri Şekil 6.89.' da görülmektedir. Diğer mekanik özelliklerin gelişmesinde etkili olan çatlak örtme mekanizmasının darbe testinde de etkili olduğu bu sayede darbe enerjisinde de iyileşme sağlandığı düşünülmektedir.



Şekil 6.89. Nanopartükül ilaveli FML' lerin darbe testi sonrası 20 X büyütmedeki hasarlı görüntüleri.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında 0,8 mm kalınlığında 2024-T3 alüminyum ve AZ31 magnezyum levhaların arasına epoksi reçine ve PEEK matrisli aramid fiber ile karbon fiberler takviye edilerek 3/2 istif sırasına sahip FML'ler üretilmiştir. Metal levhaların adhezif özelliklerini geliştirmek açısından yüzeylerine zımparalama ve shot peening işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca epoksi reçine içerisine % 1 oranında GNP ve % 0,5 oranında KNT ilave edilerek TYKF ve 2024-T3 alüminyum levha bileşenleri ile FML'ler üretilmiştir. Metal levhaların yüzey pürüzlendirme işlemlerinden sonra ortalama R_a değerleri ölçülmüş, ayrıca üretilen bütün numunelere çekme, üç nokta eğme, oda sıcaklığında ve $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de darbe testleri uygulanmıştır. Üç nokta eğme testinin verilerinden faydalanarak bütün numunelerin TAKD değerleri hesaplanmıştır. FML'lerin laminasyon işlemi sonrası arayüzey özelliklerinin tespiti için SEM incelemesi yapılmıştır. Uygulanan testler sonrası metal ve kompozit katmanların arayüzey etkileşimlerini incelemek ve hasar mekanizmalarını tespit edebilmek amacıyla da dijital mikroskop ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan bütün bu çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Metal levhaların adhezif özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan zımparalama ve shot peening işlemleri yüzeyleri laminasyon için yeterli seviyelerde pürüzlü hale getirmiştir. Shot peening işleminin bu konuda zımparalama işlemine göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir.
- Metallere uygulanan shot peening işleminin etkisiyle her iki yüzeyi de işlem gören AZ31 magnezyum levhanın çekme dayanımı % 30, 2024-T3 alüminyum levhanın çekme dayanımı ise % 15 artış göstermiştir. Bu mukavemet artışının temel sebebinin shot peening işleminin etkisiyle metallerde gerçekleşen deformasyon sertleşmesi ve yüzeylerde oluşan kalıcı basma gerilmeleri olduğu düşünülmektedir.

- Yapılan çekme testleri neticesinde elde edilen verilere göre 2024-T3 alüminyum levha, % 0,5 KNT ilaveli epoksi reçine ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML $1041,6 \pm 11,5$ MPa değeri ile en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Takiben $1032,3 \pm 11,3$ MPa çekme dayanımı değeri ile 2024-T3 alüminyum levha, %1 GNP ilaveli epoksi reçine ve TYKF ile üretilen FML ve $1013,9 \pm 11,2$ MPa çekme dayanımı değeri ile shot peening işlemi görmüş alüminyum levhalar, epoksi reçine ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML gelmektedir.
- Yapılan eğme testleri neticesinin sonuçlarına göre en yüksek eğme dayanımına sahip olan $643,6 \pm 6,4$ MPa eğme dayanımı değeri ile 2024-T3 alüminyum levha, PEEK ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML' dir. PEEK' in epoksi reçineye göre daha üstün süneklik ve tokluk özelliklerine sahip olması ayrıca FML üzerine etkiyen kuvvetin etkisiyle tabakalar arası oluşan kesme gerilmelerine karşı gösterdiği direncin daha fazla oluşu eğme dayanımındaki üstün performansın sebebi olduğu düşünülmektedir.
- Üretilen FML' lere düz ve yan doğrultuda uygulanan darbe testlerinin sonuçları incelendiğinde en yüksek darbe enerjisine sahip olan $12,3 \pm 0,4$ J (Düz), $35,9 \pm 1,3$ J (Yan) değerleri ile 2024-T3 alüminyum (shot peening), epoksi reçine ve aramid fiber bileşenleri ile üretilen FML' dir. Takiben en yüksek performansı $16,7 \pm 0,5$ J (Düz), $34,7 \pm 1,1$ J (Yan) değerleri ile 2024-T3 alüminyum (shot peening), PEEK ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML göstermiştir. Aramid fiberler sahip olduğu eşsiz özellikler sayesinde özellikle savunma endüstrisinde kişisel koruyucu ekipmanların vazgeçilmez malzemesidir. Sahip olduğu liflerin sıklığı, birbirinden ayrılmalarının zorluğu ve esneklikleri sayesinde maruz kaldıkları ani kuvvetlere mükemmel direnç göstermektedirler. Bu çalışmada da darbe testlerinde özellikle yan doğrultuda en iyi performansı bu grubun göstermesinin temel sebebi budur. PEEK ve TYKF takviyeli FML' lerde, PEEK' in sünekliği, tokluğu, yüksek elastik modülü ve tüm fiberlerin doğrultularının aynı yönde olmasının getirdiği avantajlarla üstün darbe özellikleri sergilemiştir.
- Numunelere uygulanan üç nokta eğme testinden elde edilen verilerle FML' lerin TAKD değerleri hesaplanmış ve en yüksek değere $57,6 \pm 1,2$ MPa değeri ile 2024-T3 alüminyum (shot peening), PEEK ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML' nin sahip olduğu görülmüştür. Tabakalar arası kesme gerilmeleri FML' lerde meydana gelen delaminasyon başta olmak üzere birçok hasarın temel

sebeplerinden birisidir. PEEK' in bu gerilmelere karşı direncinin fazla olması TAKD değerinin bu gruptaki FML' lerden daha üstün olmasının temel sebebi olduğu düşünülmektedir.

- Bütün deneysel veriler incelendiğinde shot peening işleminin genel olarak bütün mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği görülmektedir. FML' lerin metal kısımlarının mekanik özelliklerini geliştirmesinin yanısıra metal yüzey topoğrafyasında oluşturduğu çukurcuklar sayesinde mekanik kilitleme mekanizmasının aktif olmasına da sebep olarak mekanik özellikleri artırmıştır. FML' lerde metal yüzeylerinin adhezif özelliklerini geliştirmek için birçok işlem uygulanmaktadır. Bu işlemlerin çoğu kimyasal maddelerle gerçekleştirilen ve dolaylı da olsa çevresel açıdan negatif özelliklere sahip işlemlerdir. Yapılan literatür araştırması neticesinde FML üretiminde metal yüzey işlemi olarak shot peening prosesinin kullanımının çok sınırlı olduğu görülmüştür. Çevreci, daha az maliyetli ve hızlı bir işlem olması açısından bu işlem FML üretiminde kullanılmış ve olumlu sonuçları değerlendirilmiştir.
- Havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan FML' ler (ARALL, CARALL, GLARE) epoksi reçine ve farklı fiber türlerinin kombinasyonu ile üretilen kompozit malzemelerdir. Termoplastik reçinelerle alternatif FML' ler geliştirme fikri literatürdeki cazibesini korumaktadır. Bu çalışmada PEEK emprenye edilmiş aramid fiber, DKF ve TYKF ile FML' ler üretilerek özellikleri incelenmiştir. Yüksek üretim sıcaklığından kaynaklanan termal genleşme farklarının etkisiyle kompozit tabakaları arasında kısmi delaminasyonların meydana geldiği gözlenmiş ve bu sebeple çekme özellikleri açısından beklenen mukavemet değerleri elde edilememiştir. Fakat PEEK' in sahip olduğu üstün özelliklerin etkisiyle eğme, darbe ve TAKD özelliklerinde epoksi reçineye göre oldukça üstün bir performans sergilediği görülmüştür. PEEK içeren prepreglerle üretilen FML' lerin üretim şartları optimize edilebilirse daha üstün mekanik özelliklere sahip kompozitler üretilebileceği düşünülmektedir. PEEK emprenyeli aramid fiberin FML üretiminde kullanılması durumunda üretim sıcaklığının çok kritik bir konu olduğu da bu çalışma neticesinde tespit edilmiştir.
- Savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde kullanılan malzemelerden beklenen en önemli kriterlerden biri hafif olmasıdır. Bu çalışmada da daha hafif FML' ler

üretme fikrinden yola çıkarak alüminyuma alternatif olarak AZ31 magnezyum levha kullanma fikri doğmuştur. Üretilen FML' lere uygulanan testlerin sonuçları irdelendiğinde AZ31 magnezyum levhalarla üretilen FML' ler 2024-T3 alüminyum levhalarla üretilen FML' ler kadar yüksek mekanik özelliklere sahip değildir. Fakat özgül dayanım kavramı açısından değerlendirildiğinde shot peening işlemi görmüş AZ31 levha, epoksi reçine ve TYKF kombinasyonu ile üretilen FML $458,9 \pm 4,5$ MPa değeri ile en yüksek ÖÇD' ye sahiptir. Yine bu çalışmada en dış katmanları 2024-T3 alüminyum orta katmanı AZ31 magnezyum levhadan oluşan hibrit FML' ler üretilmiştir. Orta katmanda magnezyum levha kullanma fikri toplam FML ağırlığından yaklaşık % 15 oranında kazanç sağlanmasına sebep olmuştur. Fakat ağırlıktaki düşüğe göre mekanik özelliklerde kayda değer bir kayıp yaşanmamıştır. Hatta bütün deney verileri incelendiğinde neredeyse bütün gruplarda hibrit FML' ler en yüksek ikinci değere sahiptir.

- Özetle havacılık endüstrisi ülkemiz açısından gelişmekte olan ve önümüzdeki yıllarda gelişim hızının artacağı bir alandır. FML' lerin yoğun bir şekilde kullanıldığı bu endüstriye yönelik çalışmalar yapmak biz araştırmacıların temel görevidir. Yerli havacılık endüstrimize katkı sağlayabilmesi açısından bu çalışmaların geliştirilmesi ve uygulamaya dönüşebilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. YILMAZ, U. and EVCİ, C., "Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği", (2015).
2. Onaran, K., Bilimi, M., and Basım, Y., "Bilim Teknik Yayınevi", *İstanbul*, (2000).
3. SÖNMEZ, M., " POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ENDÜSTRİ ÜRÜNLERİ TASARIMINDA ÖNEMİ VE GELECEĞİ: TÜRKİYE'DEN DÖRT ÖRNEK FİRMA ÜZERİNE BİR İNCELEME", İTÜ, 2009.
4. Baltacı, A., Sarikanat, M., and Yildiz, H., "Static stability of laminated composite circular plates with holes using shear deformation theory", *Finite Elements In Analysis And Design*, 43 (11): 839–846 (2007).
5. Botelho, E. C., Silva, R. A., Pardini, L. C., and Rezende, M. C., "A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures", *Materials Research*, 9 (3): 247–256 (2006).
6. Bernhardt, S., Ramulu, M., and Kobayashi, A. S., "Low-velocity impact response characterization of a hybrid titanium composite laminate", (2007).
7. Cortés, P. and Cantwell, W. J., "The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre–metal laminates", *Composites Science And Technology*, 66 (13): 2306–2316 (2006).
8. "A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightning Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation", https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S217591462019000100200&script=sci_arttext (2020).
9. Saleh, H. E.-D. M. and Koller, M., "Characterizations of Some Composite Materials", *BoD – Books On Demand*, 166 (2019).
10. Hahn, H. T. and Tsai, S. W., "Introduction to Composite Materials", *CRC Press*, 486 (1980).
11. Kaya, A.İ., "Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü", (Doktora tezi), Isparta, (1995).
12. Mazumdar, S., "Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering", *CRC Press*, 417 (2001).
13. Asi, D., "MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI", 174 .

14. Şahin, Y., "Kompozit Malzemelere Giriş", *Gazi Kitabevi*, (2000).
15. Jo, H. S. and Lee, G. W., "Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Silica-Reinforced Epoxy Composites by Using Experiment and Empirical Model", *Materials Today: Proceedings*, 4 (5, Part 2): 6178–6187 (2017).
16. Sudheer, M., Hemanth, K., Raju, K., and Bhat, T., "Enhanced Mechanical and Wear Performance of Epoxy/glass Composites with PTW/Graphite Hybrid Fillers", *Procedia Materials Science*, 6: 975–987 (2014).
17. DEMİREL, A., "KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU" Gazi Üniversitesi, 2007.
18. Hussain, M., Nakahira, A., and Niihara, K., "Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced epoxy composites by Al₂O₃ filler dispersion", *Materials Letters*, 26 (3): 185–191 (1996).
19. Ulcay, Y., Akyol, M., and Gemci, R., "POLİMER ESASLI LİF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ARABİRİM MUKAVEMETİ ÜZERİNE FARKLI KÜR METOTLARININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ", 24 .
20. <https://www.fiberdyne1.com/project/carbon-fiber-marine-propeller/>
21. DeArmitt, C. and Rothon, R., "Particulate fillers, selection and use in polymer composites", *Encyclopedia Of Polymers And Composites (Springer-Verlag Heidelberg, Berlin, 2015)*, 1–19 (2016).
22. ELLIS, R. B., "DISPERSION STRENGTHENING OF METALS", *American Scientist*, 52 (4): 476–487 (1964).
23. Gupta, N., Singh Brar, B., and Woldesenbet, E., "Effect of filler addition on the compressive and impact properties of glass fibre reinforced epoxy", *Bulletin Of Materials Science*, 24 (2): 219–223 (2001).
24. García, J., Collado Ciprés, V., Blomqvist, A., and Kaplan, B., "Cemented carbide microstructures: a review", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 80: 40–68 (2019).
25. "Download Citation of 2th A M M E '2 003 Essence of Polyphase Sintering of Metal Matrix Composites and Their Properties", https://www.researchgate.net/publication/323535066_2th_A_M_M_E_'2_003_Essence_of_polyphase_sintering_of_metal_matrix_composites_and_their_properties (2020).
26. Askeland, D. R. and Wright, W. J., "Science and Engineering of Materials, SI Edition", *Cengage Learning*, 898 (2015).
27. Chung, D. D. L., "Structural composite materials tailored for damping", *Journal Of Alloys And Compounds*, 355 (1): 216–223 (2003).

28. Maekawa, Z., Hamada, H., and Goto, A., "Material design of high-damping and high-strength composite", *Transactions Of The Japan Society Of Mechanical Engineers (C), Japan*, 60 (571): 831–836 (1994).
29. Salve, A., Kulkarni, R., and Mache, A., "A review: Fiber metal laminates (FML's)—Manufacturing, test methods and numerical modeling", *International Journal Of Engineering Technology And Sciences (IJETS)*, 6 (1): 71–84 (2016).
30. "Download Citation of Tensile Strength and Thermal Residual Stress of CARALL and UACS/AL Laminates", https://www.researchgate.net/publication/327249687_Tensile_strength_and_thermal_residual_stress_of_CARALL_and_UACSAL_laminates (2020).
31. Thomas, J., "The A380 programme — the big task for Europe's aerospace industry", *Air & Space Europe*, 3 (3): 35–39 (2001).
32. Marissen, R. and Vogelesang, L. B., "Development of a new hybrid material: Aramid reinforced aluminium laminate (ARALL)", (1981).
33. Sadighi, M., Alderliesten, R. C., and Benedictus, R., "Impact resistance of fiber-metal laminates: A review", *International Journal Of Impact Engineering*, 49: 77–90 (2012).
34. Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., and Çoban, O., "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods", *Materials & Design*, 32 (7): 3671–3685 (2011).
35. Remmers, J. J. C. and De Borst, R., "Delamination buckling of fibre–metal laminates", *Composites Science And Technology*, 61 (15): 2207–2213 (2001).
36. Villanueva, G. R. and Cantwell, W. J., "The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures", *Composites Science And Technology*, 64 (1): 35–54 (2004).
37. Asundi, A. and Choi, A. Y. N., "Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft", *Journal Of Materials Processing Technology*, 63 (1): 384–394 (1997).
38. Rc, A., "DELAMINATION GROWTH RATE AT LOW AND ELEVATED TEMPERATURES IN GLARE", 7 .
39. Logesh, K., Raja, V. K. B., and Nair, V. H., "REVIEW ON MANUFACTURING OF FIBRE METAL LAMINATES AND ITS CHARACTERIZATION TECHNIQUES", 18 .
40. Park, S. Y., Choi, W. J., Choi, H. S., and Kwon, H., "Effects of surface pre-treatment and void content on GLARE laminate process characteristics", *Journal Of Materials Processing Technology*, 210 (8): 1008–1016 (2010).

41. Afaghi-Khatibi, A., Lawcock, G., Ye, L., and Mai, Y.-W., "On the fracture mechanical behaviour of fibre reinforced metal laminates (FRMLs)", *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering*, 185 (2): 173–190 (2000).
42. Logesh, K., Raja, V. K. B., and Sasidhar, P., "An experiment about Morphological Structure of Mg-Al Layered Double Hydroxide Using Field Emission Scanning Electron Microscopy with EDAX Analysis", 5 (2015).
43. Lukaszewicz, D. H.-J. A., Ward, C., and Potter, K. D., "The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future", *Composites Part B: Engineering*, 43 (3): 997–1009 (2012).
44. Wu, W., Abliz, D., Jiang, B., Ziegmann, G., and Meiners, D., "A novel process for cost effective manufacturing of fiber metal laminate with textile reinforced pCBT composites and aluminum alloy", *Composite Structures*, 108: 172–180 (2014).
45. Internet: Dilip Raja, N., Velu, R., Selvamani, S. T., and Palani Kumar, K., "The Comparative Analysis of Mechanical Properties on MMC (AA6061 + SiCp 10% Wt) before and after Age Hardening", *IAMM.766-767.276* (2020).
46. Abouhamzeh, M., Sinke, J., and Benedictus, R., "Investigation of curing effects on distortion of fibre metal laminates", *Composite Structures*, 122: 546–552 (2015).
47. Vogelesang, L. B. and Vlot, A., "Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures", *Journal Of Materials Processing Technology*, 103 (1): 1–5 (2000).
48. Sinke, J., "Manufacturing of GLARE Parts and Structures", *Applied Composite Materials*, 10 (4): 293–305 (2003).
49. Alderliesten, R. C. and Benedictus, R., "Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures", *Journal Of Aircraft*, 45 (4): 1182–1189 (2008).
50. Vlot, A., "Impact loading on fibre metal laminates", *International Journal Of Impact Engineering*, 18 (3): 291–307 (1996).
51. Beumler, T., Pellenkoff, F., Tillich, A., Wohlers, W., and Smart, C., "Airbus costumer benefit from fiber metal laminates", *Airbus Deutschland GmbH*, 1: 1–18 (2006).
52. Castrodeza, E. M., Bastian, F. L., and Perez Ipiña, J. E., "Critical fracture toughness, JC and $\delta 5C$, of unidirectional fibre–metal laminates", *Thin-Walled Structures*, 41 (12): 1089–1101 (2003).
53. Vogelesang, L. B., Gunnink, J. W., Roebroeks, G., and Muller, R. P. G., "Towards the supportable and durable aircraft fuselage structure", *Chameleon Press Ltd, Estimation, Enhancement And Control Of Aircraft Fatigue Performance. ICAF 95(UK)*, 1: 257–271 (1995).

54. "Fracture properties of a fiber-metal laminates based on magnesium alloy - ProQuest",
<https://search.proquest.com/openview/c671fce4f5f1488ff34718cade7fdfe9/1?cbl=2043599&pq-origsite=gscholar> (2020).
55. Alderliesten, R., "On the Development of Hybrid Material Concepts for Aircraft Structures", *Recent Patents On Engineering*, 3 (1): 25–38 (2009).
56. Roebroeks, G. H. J. J., "Fibre-metal laminates: Recent developments and applications", *International Journal Of Fatigue*, 16 (1): 33–42 (1994).
57. Wilk, M. S. and Śliwa, R. E., "The Influence of Features of Aluminium Alloys 2024, 6061 and 7075 on the Properties of GLARE-Type Composites", *Archives Of Metallurgy And Materials*, Vol. 60, iss. 4: (2015).
58. Snoo, D. and Henry, R., "Assessing Composite and Fibre Metal Laminate Materials for Automotive Applications Through Impact and Quasi-Static Indentation Testing", Text, *Carleton University*, (2015).
59. Internet: Yang, Y. X., Zhu, G. L., and Xiao, Y. P., "Recycling of Fiber-Metal Laminates", *JAMR.295-297.2329* (2020).
60. Dalmijn, W.L., Vogelesang, L.B., and Tempelman, E., "Sustainable Transport and Advanced Materials", (1999).
61. Kalyanasundaram, S., DharMalingam, S., Venkatesan, S., and Sexton, A., "Effect of process parameters during forming of self reinforced – PP based Fiber Metal Laminate", *Composite Structures*, 97: 332–337 (2013).
62. Bied-Charreton, A. D., "Friction Stir Welding effects of defects in Glare", (2016).
63. Cook, J., "Processing and properties of high temperature metal/fiber-reinforced-thermoplastic laminates", *NAVAL AIR WARFARE CENTER AIRCRAFT DIV WARMINSTER PA AIR VEHICLE AND CREW ...*, (1993).
64. Verbruggen, M. L. C. E., "Bondline corrosion properties of Arrall in a saltspray environment - final results", *Delft University Of Technology, Department Of Aerospace Engineering, Memorandum M-495*, (1983).
65. "New Fokker material concept points to lighter, fatigue-free airframes.", *Aircraft Engineering And Aerospace Technology*, 60 (4): 10–12 (1988).
66. "Advanced Composites Manufacturing1 - PDF Free Download",
<https://kundoc.com/pdf-advanced-composites-manufacturing1.html> (2020).
67. Vlot, A. and Gunnink, J. W., "Fibre Metal Laminates: An Introduction", *Springer Science & Business Media*, 509 (2011).
68. Reyes V., G. and Cantwell, W. J., "The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene", *Composites Science And Technology*, 60 (7): 1085–1094 (2000).

69. Yıldırım, B., "Sandviç Kompozitler Ve Mimarlıkta Kullanım Olanakları", Thesis, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1998).
70. "7.9: Curing | Engineering360", <https://www.globalspec.com/reference/37444/203279/7-9-curing> (2020).
71. Advani, S. G. and Hsiao, K.-T., "Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)", *Elsevier*, 512 (2012).
72. Daloğlu, G., "MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY", 123 .
73. "Resin Transfer Moulding Processes - CSIR - NAL", <https://www.nal.res.in/en/techniques/resin-transfer-moulding-processes> (2020).
74. Kim, H. H., Lee, M. S., and Kang, C. G., "The Fabrication of a Hybrid Material Using the Technique of Hot-Press Molding", *Materials And Manufacturing Processes*, 28 (8): 892–898 (2013).
75. Davis, M. and Bond, D., "Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 19 (2): 91–105 (1999).
76. Critchlow, G. W., Yendall, K. A., Bahrani, D., Quinn, A., and Andrews, F., "Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 26 (6): 419–453 (2006).
77. Berg, J. C., "Chapter 1 - Semi-empirical strategies for predicting adhesion", Adhesion Science and Engineering, *Elsevier Science B.V.*, Amsterdam, 1–73 (2002).
78. Park, S. Y., Choi, W. J., Choi, H. S., Kwon, H., and Kim, S. H., "Recent Trends in Surface Treatment Technologies for Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008)", *The Journal Of Adhesion*, 86 (2): 192–221 (2010).
79. Harris, A. F. and Beevers, A., "The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 19 (6): 445–452 (1999).
80. Liu, J., Chaudhury, M. K., Berry, D. H., Seebergh, J. E., Osborne, J. H., and Blohowiak, K. Y., "Effect of Surface Morphology on Crack Growth at a Sol-Gel Reinforced Epoxy/Aluminum Interface", *The Journal Of Adhesion*, 82 (5): 487–516 (2006).
81. Rider, A. N. and Arnott, D. R., "Boiling water and silane pre-treatment of aluminium alloys for durable adhesive bonding", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 20 (3): 209–220 (2000).

82. Rider, A. N., Olsson-Jacques, C. L., and Arnott, D. R., "Influence of adherend surface preparation on bond durability", *Surface And Interface Analysis*, 27 (12): 1055–1063 (1999).
83. Critchlow, G. W. and Brewis, D. M., "Review of surface pretreatments for aluminium alloys", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 16 (4): 255–275 (1996).
84. Cognard, P., "Handbook of Adhesives and Sealants: Basic Concepts and High Tech Bonding", *Elsevier*, 511 (2005).
85. Bjørgum, A., Lapique, F., Walmsley, J., and Redford, K., "Anodising as pre-treatment for structural bonding", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 23 (5): 401–412 (2003).
86. Sander, K. and Wirts, D. M., "Authors:", (2001).
87. Digby, R. P. and Packham, D. E., "Pretreatment of aluminium: topography, surface chemistry and adhesive bond durability", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 15 (2): 61–71 (1995).
88. Sheasby, P. G. and Pinner, R., "The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys", *ASM International*, (2001).
89. Carrino, L., Napolitano, G., and Sorrentino, L., "Wettability improving of 2024 aluminium alloy by oxygen cold plasma treatment", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 31 (5–6): 465–473 (2006).
90. Minford, J. D., "Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data", *CRC Press*, 806 (1993).
91. Lunder, O., Olsen, B., and Nisancioglu, K., "Pre-treatment of AA6060 aluminium alloy for adhesive bonding", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 22 (2): 143–150 (2002).
92. Domingues, L., Fernandes, J. C. S., Da Cunha Belo, M., Ferreira, M. G. S., and Guerra-Rosa, L., "Anodising of Al 2024-T3 in a modified sulphuric acid/boric acid bath for aeronautical applications", *Corrosion Science*, 45 (1): 149–160 (2003).
93. Fedel, M., Olivier, M., Poelman, M., Deflorian, F., Rossi, S., and Druart, M.-E., "Corrosion protection properties of silane pre-treated powder coated galvanized steel", *Progress In Organic Coatings*, 66 (2): 118–128 (2009).
94. Zucchi, F., Frignani, A., Grassi, V., Balbo, A., and TrabANELLI, G., "Organo-silane coatings for AZ31 magnesium alloy corrosion protection", *Materials Chemistry And Physics*, 110 (2): 263–268 (2008).

95. Abel, M.-L., Digby, R. P., Fletcher, I. W., and Watts, J. F., "Evidence of specific interaction between γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane and oxidized aluminium using high-mass resolution ToF-SIMS[†]", *Surface And Interface Analysis*, 29 (2): 115–125 (2000).
96. Hobbs, P. M. and Kinloch, A. J., "The Computational Molecular Modelling of Organosilane Primers", *The Journal Of Adhesion*, 66 (1–4): 203–228 (1998).
97. Crook, R. A., Sinclair, J. W., Poulter, L. W., and Schulte, K. J., "An Environmentally-Friendly Process for Bonding Aluminum Using Aqueous Metasilicate Sol-Gel and Silane Adhesion Promoters", *The Journal Of Adhesion*, 68 (3–4): 315–329 (1998).
98. Materne, T., de Buyl, F., and Witucki, G. L., "Organosilane technology in coating applications: review and perspectives", *Dow Corning*, 16: (2012).
99. Varma, P. C. R., Colreavy, J., Cassidy, J., Oubaha, M., Duffy, B., and McDonagh, C., "Effect of organic chelates on the performance of hybrid sol-gel coated AA 2024-T3 aluminium alloys", *Progress In Organic Coatings*, 66 (4): 406–411 (2009).
100. Mazza, J. J., "Sol-gel technology for low-voc, nonchromated adhesive bonding applications serdp; project pp-1113, task 1", *AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH MATERIALS AND MANUFACTURING ...*, (2004).
101. VOAST, P. V., "Critical Materials & Processes Bonded Joints Issues", *FAA Bonded Structures Workshop, 2004*, (2004).
102. Critchlow, G. W., Brewis, D. M., Emmony, D. C., and Cottam, C. A., "Initial investigation into the effectiveness of CO₂-laser treatment of aluminium for adhesive bonding", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 15 (4): 233–236 (1995).
103. Spadaro, C., Dispenza, C., and Sunseri, C., "The influence of the nature of the surface oxide on the adhesive fracture energy of aluminium-bonded joints as measured by T-peel tests", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 28 (4): 211–221 (2008).
104. Wong, R. C. P., Hoult, A. P., Kim, J. K., and Yu, T. X., "Improvement of adhesive bonding in aluminium alloys using a laser surface texturing process", *Journal Of Materials Processing Technology*, 63 (1): 579–584 (1997).
105. Davis, G. D., Groff, G. B., and Zatorski, R. A., "Plasma Spray Coatings as Treatments for Aluminum, Titanium and Steel Adherends", *Surface And Interface Analysis*, 25 (5): 366–373 (1997).
106. Fernandes, J. C. S., Ferreira, M. G. S., Haddow, D. B., Goruppa, A., Short, R., and Dixon, D. G., "Plasma-polymerised coatings used as pre-treatment for aluminium alloys", *Surface And Coatings Technology*, 154 (1): 8–13 (2002).

107. Alexander, M. R., Zhou, X., Thompson, G. E., Duc, T. M., McAlpine, E., and Tielsch, B. J., "Functionalized plasma polymer coatings for improved durability of aluminium–epoxy adhesive joints: fractography", *Surface And Interface Analysis*, 30 (1): 16–20 (2000).
108. Anagreh, N., Dorn, L., and Bilke-Krause, C., "Low-pressure plasma pretreatment of polyphenylene sulfide (PPS) surfaces for adhesive bonding", *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 28 (1): 16–22 (2008).
109. Polini, W. and Sorrentino, L., "Improving the wettability of 2024 aluminium alloy by means of cold plasma treatment", *Applied Surface Science*, 214 (1): 232–242 (2003).
110. "Environmentally Compliant Surface Treatments of Materials for Aerospace Applications: Papers Presented at the 83rd Meeting of the AGARD Structures and Materials Panel, Held in Florence, Italy, 4-5 September 1996 = Les Techniques de Traitement de Surface Conformes à La Réglementation Sur La Protection de l'environnement Pour Les Matériaux Destinés Aux Applications Aérospatiales", *AGARD*, Neuilly-Sur-Seine, 190 (1997).
111. Vega, L. F., Robare, K. M., Holtz, M. A., and Grassi, J. R., "Method for surface treating aluminum products", (2000).
112. De Iorio, I., Leone, C., Nele, L., and Tagliaferri, V., "Plasma treatments of polymeric materials and Al alloy for adhesive bonding", *Journal Of Materials Processing Technology*, 68 (2): 179–183 (1997).
113. Lin, Y. C., Xia, Y.-C., Jiang, Y.-Q., Zhou, H.-M., and Li, L.-T., "Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep aging", *Materials Science And Engineering: A*, 565: 420–429 (2013).
114. Roy, M. J., Maijer, D. M., and Dancoine, L., "Constitutive behavior of as-cast A356", *Materials Science And Engineering: A*, 548: 195–205 (2012).
115. Marceau, R. K. W., Qiu, C., Ringer, S. P., and Hutchinson, C. R., "A study of the composition dependence of the rapid hardening phenomenon in Al–Cu–Mg alloys using diffusion couples", *Materials Science And Engineering: A*, 546: 153–161 (2012).
116. Kloc, L., Spigarelli, S., Cerri, E., Evangelista, E., and Langdon, T. G., "Creep behavior of an aluminum 2024 alloy produced by powder metallurgy", *Acta Materialia*, 45 (2): 529–540 (1997).
117. Alcoa 2024 data sheet Archived 2006-08-27 at the Wayback Machine (pdf), accessed October 13, 2006
118. Johnson, S. B., "The United States Air Force and the Culture of Innovation 1945-1965", *Diane Publishing Co.*, 32 (2002).
119. Avallone, E. A., "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers", *The McGraw-Hill Companies, Inc.*, (2007).

120. Aydin, H. and Bayram, A., "FARKLI ISIL İŞLEM KOŞULLARINDAKİ 2024 ALUMİNYUM ALAŞIMLARININ KOROZYON SONRASI MEKANİK ÖZELLİKLERİNDEKİ KAYBIN BELİRLENMESİ", 10 (2010).
121. "Continuous Casting in Traveling Mold [SubsTech]", https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=continuous_casting_in_traveling_mold (2020).
122. Czerwinski, F., "Magnesium Alloys: Design, Processing and Properties", *BoD – Books On Demand*, 542 (2011).
123. Turan, M. E., "MAGNEZYUM MATRİSLİ NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU", 146 .
124. Yildirim, H., "FIRAT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ", 69
125. Çelik, İ., "Yüzey İşlemi Uygulanmış AZ31 Mg Alaşımının Yapısal Özelliklerinin ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 136–142 (2019).
126. Altay, M., "Az91 Magnezyum Alaşımının Mikro Ark Oksidasyon İşleminde Elektriksel Parametrelerin Etkisi", Thesis, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
127. Bhatt, P. and Goe, A., "Carbon Fibres: Production, Properties and Potential Use", *Material Science Research India*, 14 (1): 52–57 (2017).
128. "Aramid Fibre (Kevlar / Twaron) – Properties and Applications", <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1384> (2020).
129. "Para-Aramid (1) Kevlar 49 ve Twaron Elyafları - Üsküdar Mühendishanesi", <http://uskudar.biz/malzeme-bilgisi/para-aramid-1-kevlar-49-ve-twaron.html> (2020).
130. "Eskitmeye Tabi Tutulan Kompozit Başlıkların Balistik Testlerinin Yapılması ve Analizi", <http://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/2353#sthash.35y330pE.dpbs> (2020).
131. <http://www.tekniktekstiller.com/articles/aramid-lifleri/>
132. Park, S.-J. and Seo, M.-K., "Chapter 6 - Element and Processing", *Interface Science and Technology*, *Elsevier*, 431–499 (2011).
133. Kalayci, E., AviNç, O., and Yavaş, A., "Polyether Ether Ketone (Peek) Fibers", *Cumhuriyet Science Journal*, 38 (2): 168–168 (2017).
134. "Epoxy Resins", <https://netcomposites.com/guide/resin-systems/epoxy-resins/> (2020).

135. "Epoxy Resins – an Introduction", <https://www.materialstoday.com/composite-processing/features/epoxy-resins-an-introduction/> (2020).
136. De Cicco, D., Asaee, Z., and Taheri, F., "Use of Nanoparticles for Enhancing the Interlaminar Properties of Fiber-Reinforced Composites and Adhesively Bonded Joints—A Review", *Nanomaterials*, 7 (11): 360 (2017).
137. Pipes, R. B., "The Place for Thermoplastic Composites in Structural Components: Report of the Committee on Thermoplastic Composites as Structural Components", *National Research Council National Materials Advisory Board*, (1987).
138. Kim, J.-K. and Mai, Y.-W., "Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites", *Elsevier*, 416 (1998).
139. Oehlers, D. J., Liu, I. S. T., and Seracino, R., "Shear deformation debonding of adhesively bonded plates", *Proceedings Of The Institution Of Civil Engineers - Structures And Buildings*, 158 (1): 77–84 (2005).
140. Abot, J. L., Song, Y., Schulz, M. J., and Shanov, V. N., "Novel carbon nanotube array-reinforced laminated composite materials with higher interlaminar elastic properties", *Composites Science And Technology*, 68 (13): 2755–2760 (2008).
141. "Chemical Sensors: Fundamentals of Sensing Materials Volume 2: Nanostructured Materials | Momentum Press", <http://www.momentumpress.net/node/257> (2020).
142. Alishahi, E., Shadlou, S., Doagou-R, S., and Ayatollahi, M. R., "Effects of Carbon Nanoreinforcements of Different Shapes on the Mechanical Properties of Epoxy-Based Nanocomposites", *Macromolecular Materials And Engineering*, 298 (6): 670–678 (2013).
143. Ayatollahi, M. R., Shadlou, S., Shokrieh, M. M., and Chitsazzadeh, M., "Effect of multi-walled carbon nanotube aspect ratio on mechanical and electrical properties of epoxy-based nanocomposites", *Polymer Testing*, 30 (5): 548–556 (2011).
144. Choi, Y. K., Sugimoto, K. I., Song, S. M., and Endo, M., "Mechanical and thermal properties of vapor-grown carbon nanofiber and polycarbonate composite sheets", *Materials Letters*, 59 (27): 3514–3520 (2005).
145. Gao, J., Li, W., Shi, H., Hu, M., and Li, R. K. Y., "Preparation, morphology, and mechanical properties of carbon nanotube anchored polymer nanofiber composite", *Composites Science And Technology*, 92: 95–102 (2014).
146. Yu, C., Choi, K., Yin, L., and Grunlan, J. C., "Light-Weight Flexible Carbon Nanotube Based Organic Composites with Large Thermoelectric Power Factors", *ACS Nano*, 5 (10): 7885–7892 (2011).

147. Potts, J. R., Dreyer, D. R., Bielawski, C. W., and Ruoff, R. S., "Graphene-based polymer nanocomposites", *Polymer*, 52 (1): 5–25 (2011).
148. Carter, L. W., Hendricks, J. G., and Bolley, D. S., "United States Patent No. 2531396", *Assigned To National Lead Company*, (1950).
149. Usuki, A., Kojima, Y., Kawasumi, M., Okada, A., Fukushima, Y., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Synthesis of nylon 6-clay hybrid", *Journal Of Materials Research*, 8: 1179–1184 (1993).
150. Winey KI, Vaia RA. MRS Bull 2007;32:314e9.
151. Shen, X.-J., Meng, L.-X., Yan, Z.-Y., Sun, C.-J., Ji, Y.-H., Xiao, H.-M., and Fu, S.-Y., "Improved cryogenic interlaminar shear strength of glass fabric/epoxy composites by graphene oxide", *Composites Part B: Engineering*, 73: 126–131 (2015).
152. Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T., and Yu, J., "Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber–matrix interphase", *Composites Part B: Engineering*, 69: 335–341 (2015).
153. Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z., and Koratkar, N., "Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content", *ACS Nano*, 3 (12): 3884–3890 (2009).
154. Rafiee, M. A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.-Z., and Koratkar, N., "Fracture and Fatigue in Graphene Nanocomposites", *Small*, 6 (2): 179–183 (2010).
155. Yavari, F., Rafiee, M. A., Rafiee, J., Yu, Z.-Z., and Koratkar, N., "Dramatic Increase in Fatigue Life in Hierarchical Graphene Composites", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2 (10): 2738–2743 (2010).
156. Kurt, V., "A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY", 111 .
157. Castro Neto, A. H., Guinea, F., Peres, N. M. R., Novoselov, K. S., and Geim, A. K., "The electronic properties of graphene", *Reviews Of Modern Physics*, 81: 109–162 (2009).
158. Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S., and Lee, J. H., "Recent advances in graphene based polymer composites", *Progress In Polymer Science*, 35 (11): 1350–1375 (2010).
159. Chen, D., Tang, L., and Li, J., "Graphene-based materials in electrochemistry", *Chemical Society Reviews*, 39 (8): 3157–3180 (2010).
160. "Graphite [SubsTech]", <https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=graphite> (2020).

161. Chandrasekaran, V. C. S., Advani, S. G., and Santare, M. H., "Influence of resin properties on interlaminar shear strength of glass/epoxy/MWNT hybrid composites", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 42 (8): 1007–1016 (2011).
162. Liu, Y., Yang, J.-P., Xiao, H.-M., Qu, C.-B., Feng, Q.-P., Fu, S.-Y., and Shindo, Y., "Role of matrix modification on interlaminar shear strength of glass fibre/epoxy composites", *Composites Part B: Engineering*, 43 (1): 95–98 (2012).
163. Eskizeybek, V., Avci, A., and Gülce, A., "The Mode I interlaminar fracture toughness of chemically carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composite structures", *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 63: 94–102 (2014).
164. Siegfried, M., Tola, C., Claes, M., Lomov, S. V., Verpoest, I., and Gorbatiikh, L., "Impact and residual after impact properties of carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes", *Composite Structures*, 111: 488–496 (2014).
165. Zhang, W., Picu, R. C., and Koratkar, N., "The effect of carbon nanotube dimensions and dispersion on the fatigue behavior of epoxy nanocomposites", *Nanotechnology*, 19 (28): 285709 (2008).
166. Bahçeli, G., "INVESTIGATION OF THERMAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF CARBON NANOTUBE REINFORCED ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE COMPOSITES UNDER CRYOGENIC CONDITIONS", 103 (2019).
167. Popov, V. N., "Materials Science and Engineering", *Carbon Nanotubes: Properties And Application*, 43: 61–102 (2004).
168. Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, 354 (6348): 56–58 (1991).
169. Iijima, S. and Ichihashi, T., "Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter", *Nature*, 363 (6430): 603–605 (1993).
170. Eatemadi, A., Daraee, H., Karimkhanloo, H., Kouhi, M., Zarghami, N., Akbarzadeh, A., Abasi, M., Hanifehpour, Y., and Joo, S. W., "Carbon nanotubes: properties, synthesis, purification, and medical applications", *Nanoscale Research Letters*, 9 (1): 393 (2014).
171. Chico, L., Crespi, V. H., Benedict, L. X., Louie, S. G., and Cohen, M. L., "Pure Carbon Nanoscale Devices: Nanotube Heterojunctions", *Physical Review Letters*, 76 (6): 971–974 (1996).
172. Ajayan, P. M. and Ebbesen, T. W., "Nanometre-size tubes of carbon", *Reports On Progress In Physics*, 60 (10): 1025–1062 (1997).

173. Şekercioğlu, T. and Özenç, M., "Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi", *Investigation Of Surface Preparation Methods For Bonding Of Metals.*, (627): 43–50 (2012).
174. Fattal, D. S. A.-, Rabii, S. A. A. A.-, and Sudani, I. M. A.-, "Study the effect of shot peening with anodizing process on the mechanical properties and fatigue life of aluminum alloy 2024-T3", *Advances In Natural And Applied Sciences*, 10 (15): 43–52 (2016).
175. Jamalian, M. and Field, D. P., "Effects of shot peening parameters on gradient microstructure and mechanical properties of TRC AZ31", *Materials Characterization*, 148: 9–16 (2019).
176. Wan, Y., Wang, Z.-Q., Zhou, L.-M., and Chang, M.-Z., "Tensile Test Performance of Fibre Reinforced SMATed Aluminium Laminates", *Atlantis Press*, 943–947 (2014).
177. Jen, M.-H. R., Tseng, Y. C., and Li, P. Y., "Fatigue Response of Hybrid Magnesium/Carbon-Fiber/Peek Nanocomposite Laminates at Elevated Temperature", *実験力学*, 7 (Special_Issue): s56–s60 (2007).
178. Perepelkin, K. E., Andreeva, I. V., Pakshver, E. A., and Morgoeva, I. Yu., "Thermal Characteristics of Para-Aramid Fibres", *Fibre Chemistry*, 35 (4): 265–269 (2003).
179. Dai, G. and Mishnaevsky, L., "Graphene reinforced nanocomposites: 3D simulation of damage and fracture", *Computational Materials Science*, 95: 684–692 (2014).
180. Sydlik, S. A., Lee, J.-H., Walish, J. J., Thomas, E. L., and Swager, T. M., "Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives", *MIT Web Domain*, (2013).
181. Jacobs, O., Friedrich, K., Marom, G., Schulte, K., and Wagner, H. D., "Fretting wear performance of glass-, carbon-, and aramid-fibre/epoxy and peek composites", *Wear*, 135 (2): 207–216 (1990).
182. Hamada, H., Coppola, J. C., Hull, D., Maekawa, Z., and Sato, H., "Comparison of energy absorption of carbon/epoxy and carbon/PEEK composite tubes", *Composites*, 23 (4): 245–252 (1992).
183. Malingam, S. D., Jumaat, F. A., Ng, L. F., Subramaniam, K., and Ghani, A. F. A., "Tensile and impact properties of cost-effective hybrid fiber metal laminate sandwich structures", *Advances In Polymer Technology*, 37 (7): 2385–2393 (2018).

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yunus AŞKIN, 1986 yılında Malatya’ da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Malatya Fen Lisesi’nden 2004 yılında mezun oldu. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılının Şubat ayında Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü’nde Mühendis olarak göreve başladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimini 2015 yılında tamamlamıştır. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda başlamış olduğu doktora öğrenimine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Demir Çelik Enstitüsü
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK
Tel : (507) 403 62 26
E-posta : m.yunusaskin@gmail.com