

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FİBER LAZER TEKNİĞİ KULLANILARAK FİBER METAL
TABAKALI KOMPOZİTLERİN METAL/PREPREG KUMAŞ
ARAYÜZEY DAYANIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

RİDVAN AKSÜT

KOCAELİ 2021

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİBER LAZER TEKNİĞİ KULLANILARAK FİBER METAL
TABAKALI KOMPOZİTLERİN METAL/PREPREG KUMAŞ
ARAYÜZEY DAYANIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Rıdvan AKSÜT

Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA
Danışman, Kocaeli ÜNİVERSİTESİ

Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya ÜNİVERSİTESİ

Dr. Öğr. Üyesi Ersin Asım GÜVEN
Jüri Üyesi, Kocaeli ÜNİVERSİTESİ

Tezin Savunulduğu Tarih: 16.12.2021

Etik Beyan ve Araştırma Fonu Desteği

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında,

- Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Kocaeli Üniversitesi BAP birimi tarafından FHD-2021-2424 no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
(İmza)
Rıdvan AKSÜT

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımını bana ait olacaktır.

Tezin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
(İmza)
Rıdvan AKSÜT

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında havacılık sektöründe kullanılan Fiber Metal Tabakalı Kompozitler'in (FMTK) üretiminde, tabakalar arası birleşmeyi arttırmak için metal malzeme yüzeyine uygulanan geleneksel mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerine alternatif oluşturabilecek fiber lazer ile yüzey işleme yönteminin sonuçları incelenmiştir.

Öncelikle tezimin başlangıcından son aşamasına kadar bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA'ya, malzeme tedariki ve üretim işlemlerini gerçekleştiren KOMPOZİTSAN (İzmir) firması yöneticileri ve çalışanlarına, tüm eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Kasım – 2021

Rıdvan AKSÜT



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Kompozitlerin Tarihçesi	5
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.2.1. Matris Tipine Göre Kompozit Malzemeler	7
2.2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	7
2.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).....	8
2.2.1.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK).....	9
2.2.2. Takviye Tipine Göre Kompozit Malzemeler	10
2.3. Fiber Metal Tabakalı Kompozit (FMTK) Malzemeler.....	11
2.3.1. Aramid Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (ARALL).....	13
2.3.2. Cam Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (GLARE).....	15
2.3.3. Karbon Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (CARALL).....	17
2.4. Havacılıkta FMTK Malzemelerin Kullanım Örnekleri	17
2.5. FMTK Malzemelerde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Yüzey İşlemleri	19
2.5.1. Kimyasal Yüzey İşlemleri	21
2.5.2. Mekanik yüzey işlemleri	23
2.5.3. Yeni Nesil Yüzey İşlemi Lazer	24
2.6. Eğilme Yüklemelerinin FMTK Malzeme Ara Yüzeyine Etkisi	27
2.7. Tezin Önemi ve Amacı	28
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI	30
3.1. Farklı Fiber Oryantasyonunun FMTK Malzemelerinin Ara Yüzey Dayanımına Etkisi	30
3.2. Farklı Kimyasal Ve Mekanik İşlemlerin FMTK Malzemelerinin Ara yüzey Dayanımına Etkisi	37
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	45
4.1. Malzemeler	45
4.2. AA 6061-T4 Alüminyum Malzeme Yüzeylerine Uygulanan Ön Yüzey İşlemleri	46
4.2.1. AA 6061-T4 Alüminyum malzemelerin fiber lazer ile ön yüzey işlemleri.....	46
4.2.2. AA 6061-T4 Alüminyum Malzemelerin Kimyasal ve Mekanik Yöntemlerle Ön Yüzey İşlemleri.....	48
4.3. FMTK Malzemelerin Sıcak Pres Tekniği İle Üretimi	50
4.4. Üç Nokta Eğilme Testi	51
4.5. İşlenen Yüzeylerin Optik Mikroskop İle İncelenmesi	52

4.6. Kontak Açısı Ölçümü	53
4.7. Profilometre Ölçümü	53
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	54
5.1. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Yüzeyinde Temas Açısı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	54
5.2. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemenin Yüzey, Kesit ve Yüzey Topografyası Görünümlerinin Değerlendirilmesi	56
5.3. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemelerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	59
5.4. Tekrarlı Lazer Geçiş Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemelerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları	62
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR.....	68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	75
ÖZGEÇMİŞ.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Fiber Metal Tabakalı Kompozitin Görünüşü(Linganiso ve Anandjiwala 2016)	12
Şekil 2.2.	ARALL ile üretilen F-27 Paneli (Gülcan ve diğ., 2019).....	14
Şekil 2.3.	GLARE 1'den üretilen uçak kanat gövde bağlantı kulağı (Gülcan ve diğ., 2019).....	16
Şekil 2.4.	Airbus A380 uçağındaki kompozit kullanımı (Zarei ve diğ., 2016).....	18
Şekil 2.5.	GLARE kompozitinden üretilen üst gövde panelleri (Marsh, 2004).....	19
Şekil 2.6.	Yapıştırma işleminde kohezif ve adhezif kuvvetler (Rudawska, 2019).....	19
Şekil 2.7.	Kumlama ve lazer yönteminin karşılaştırılması (Steen, 1991).....	26
Şekil 2.8.	Bir uçağın uçuş sırasında bozulmamış şekli (sürekli çizgi) ve deforme şekli (noktalı çizgi) (Jansson., 2012).....	27
Şekil 3.1.	4 / 3 Konfigürasyonlu, farklı fiber oryantasyonuna sahip FMTK malzemelerinin üç nokta eğilme testi sonrası elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri (Mahesh ve Senthil., 2013)	30
Şekil 3.2.	FMTK otoklav üretim süreci ve FMTK konfigürasyonu (Ostapiuk ve diğ., 2017).....	32
Şekil 3.3.	FMTK'ların [0 °], [± 45 °], [0 ° / 90 °] ve [90 ° / 0 °] katman konfigürasyonlarındaki cam ve karbon liflerine dayalı gerilim-yer değiştirme eğrileri (Ostapiuk ve diğ., 2017).....	32
Şekil 3.4.	Kısa kiriş eğilme testinden elde edilen kayma gerilmesi/yer değiştirme eğrileri (Bellini., 2020)	33
Şekil 3.5.	Tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinin grafiksel gösterimi (Bellini ve diğ., 2019).....	34
Şekil 3.6.	Farklı termal çevrime maruz bırakılmış FMTK malzemelerin üç nokta eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri (Kubit ve diğ., 2019).....	35
Şekil 3.7.	Üç farklı GLARE esaslı FMTK malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımı değerlerine L/h oranının etkisi (Liu ve diğ., 2016).....	36
Şekil 3.8.	Farklı ortamda yüzeyi işlenmiş AA 2024-T3 içeren 2/1 dizilimli FMTK malzemelerin eğilme dayanımı değerleri (Aghamohammadi ve diğ., 2018).....	37
Şekil 3.9.	10 dakika süresince metal yüzeyine uygulanan SAA işlemi sonrası yüzeyde oluşan mikro ölçekli çukurcuklar (Aghamohammadi ve diğ., 2018).....	38
Şekil 3.10.	2024-T3 alüminyum yüzeyine CNC tezgahında oluşturulan nano/mikro düz yada eğri kanca mikro kitleme geometrileri (Nong ve diğ., 2018).....	42
Şekil 3.11.	Vakum torbalama tekniği ile üretim öncesi Paslanmaz Çelik malzemede mekanik yolla oluşturulan mikro çıkıntılar ve bağlantı türleri (Smith., 2016).....	44
Şekil 4.1.	Farklı metaller için lazerlerin soğurma spektrumu.....	46

Şekil 4.2.	Alüminyum malzemelerin yüzey işleminde kullanılacak 50 W gücünde Fiber Lazer	47
Şekil 4.3.	Yüzeyleri farklı fiber lazer parametreleri ile işlenmiş alüminyum sac plakalar (a - yüzeyi fiber lazer ile işlenmemiş alüminyum sac plaka b - yüzeyi farklı parametreler ile işlenmiş alüminyum sac plaka).....	48
Şekil 4.4.	Zımparalanmış ve İşlemsiz Alüminyum sac plakanın teknik resim görüntüsü	48
Şekil 4.5.	FPL - Dağlama çözeltisinde 60 °C sıcaklığında 10 dk ve 20 dk sürelerde bekletilen sac plakanın teknik resim görüntüsü	49
Şekil 4.6.	(a) FMTK dizilimi (b) sıcak pres makinası.....	50
Şekil 4.7.	Olympus BX51 model optik mikroskop	52
Şekil 4.8.	Kontak açısı ölçüm cihazı	53
Şekil 5.1.	Zımparalama, FPL - Dağlama ve farklı Lazer parametreleriyle işlenmiş AA 6061-T4 yüzeyinden alınmış temas açısı görüntüleri	54
Şekil 5.2.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin yüzey görünüşleri	56
Şekil 5.3.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin kesit görünüşleri	57
Şekil 5.4.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin yüzey topografyası görüntüleri	58
Şekil 5.5.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme dayanımı grafiği.....	61
Şekil 5.6.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme modülü grafiği.....	62
Şekil 5.7.	Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin kesit görünüşleri	63
Şekil 5.8.	Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme dayanımı grafiği	64
Şekil 5.9.	Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme modülü değerleri	65

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Metal Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanı (Pastuszak, 2013).....	7
Tablo 2.2.	Termoset ve Termoplastik Matrislerin Genel Özelliklerinin Karşılaştırılması (U.S. Congress, 1988).....	10
Tablo 2.3.	Kompozitlerin matris ve takviye fazına göre sınıflandırılması (İbrahim ve diğ., 2015).....	11
Tablo 2.4.	Fiber metal tabakalı kompozitlerin sınıflandırılması (Sinmazçelik ve diğ., 2011).....	13
Tablo 2.5.	ARALL ve GLARE ticari ürün formları (Krishnakumar, 1994).....	15
Tablo 2.6.	GLARE Kompozitin Sınıflandırılması (Botelho ve diğ., 2006).....	16
Tablo 2.7.	Alüminyum Alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri (Kwakernaak ve diğ., 2012).....	21
Tablo 2.8.	Lazer yüzey işleme üzerine yapılan literatür çalışmaları	26
Tablo 3.1.	4 / 3 konfigürasyonlu farklı fiber oryantasyonuna sahip FMTK malzemelerinin üç nokta eğilme testi sonrası elde edilen eğilme özellikleri (Mahesh ve Senthil., 2013).....	31
Tablo 3.2.	AA 2024-T3 malzemesine uygulanan yüzey işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri (Laban ve Mahdi., 2017)	39
Tablo 3.3.	Farklı yüzey işleme teknikleri ile yüzeyi işlenmiş AA 2024-T3 yapılandırılmış S-cam fiber epoksi kompozitin çift konsol kiriş testi sonuçları (Laban ve Mahdi., 2017).....	40
Tablo 3.4.	2024-T3 alüminyum alaşımına uygulanan işlemler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlükleri (Ra), temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri (Park ve diğ., 2010).....	41
Tablo 4.1.	AA6061-T4 malzemesinin spesifik özellikleri (URL-5)	45
Tablo 4.2.	S2 Cam elyafın spesifik özellikleri (URL-6)	45
Tablo 4.3.	Alüminyum yüzeyine uygulanan Fiber Lazer parametreleri	47
Tablo 5.1.	Zımparalama, FPL - Dağlama ve farklı Lazer parametreleriyle işlenmiş AA 6061-T4 yüzeyinden alınmış temas açısı değerleri.....	55
Tablo 5.2.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin Ra değerleri.....	59
Tablo 5.3.	Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları	59
Tablo 5.4.	Farklı geçiş işlemlerine tabi tutulmuş numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	: Numune genişliği (mm)
d	: Numune kalınlığı (mm)
D	: Maksimum sapma miktarını (mm)
E _B	: Bükmedeki elastik modülü (MPa)
G	: Geçişli lazer yüzey işlemi
L	: Destek aralığı (mm)
L	: Lazer yüzey işlemi
m	: Yük-yer değiştirme eğrisindeki tanjant sapma eğimini (N/mm)
P	: Yük-yerdeğiştirme grafiğindeki belirli bir yükü (N)
R _a	: Yüzey pürüzlülüğü (µm)
ε _f	: Dış yüzeydeki gerinimi (mm/mm)
σ _f	: Eğilme gerilmesini (MPa)

Kısaltmalar

ARALL	: Aramid Reinforced Aluminum Laminate (Aramid Fiber Takviyeli Alüminyum Laminant)
AKF	: Aktif Karbon Fiber
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
CARALL	: Carbon Reinforced Aluminum Laminate (Karbon Fiber Takviyeli Alüminyum Laminant)
CSA	: Chromic and Sulphuric Acid Etching (CSA – Dağlama)
CAA	: Chromic Acid Anodising (Kromik Asit Eloksal)
CAE	: Chromic-Sulphuric Acid (Kromik-Sülfürik Asit)
CFRP	: Carbon Fiber-Reinforced Polymer (Karbo Fiber Katkılı Polimer)
ÇKKN	: Çok Katmanlı Karbon Nanotüpler
DCB	: Double Cantilever Beam (Çift Konsol Kiriş Testi)
FMTK	: Fiber Metal Tabakalı Kompozit
FTP	: Fiber Takviyeli Polimer
FPL	: Forest products laboratory Etching (FPL - Dağlama)
GLARE	: Glass Reinforced Aluminum Laminate (Cam Fiber Takviyeli Alüminyum Laminant)
GA	: Genel Amaçlı
GFRP	: Glass Fiber-Reinforced Polymer (Cam Fiber-Katkılı Polimer)
HAMAG	: Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı
ILSS	: Interlaminar Shear Strength (Tabakalararası Kayma Dayanımı)
KK	: Keçe Kumaş
LYİ	: Lazer Yüzey İşleme
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
MA	: Mekanik Aşındırma
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
PAA	: Phosphoric Acid Anodising (Fosforik Asit Eloksal)

PSA : Phosphoric-Sulphuric Acid Anodising (Fosforik-Sülfürük Asit Eloksal)
P2 : Sulfo-Ferric Acid (Sülfo-Ferrik Asit)
SMK : Seramik Matrisli Kompozitler
SAA : Sulphuric Acid Anodising (Sülfürük Asit Eloksal)
VARTM : Vacuum Assited Resin Transfer Molding
YP : Yüksek Performanslı



FİBER LAZER TEKNİĞİ KULLANILARAK FİBER METAL TABAKALI KOMPOZİTLERİN METAL/PREPREG KUMAŞ ARAYÜZEY DAYANIMININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada 0.8 mm kalınlığındaki AA 6061-T4 malzemelerinin yüzeyleri, Zımparalama, FPL – Dağlama, Lazer parametreleri ile yüzey işleme (farklı güç, hız ve frekans) ve tekrarlı Lazer parametreleriyle yüzey işleme yöntemleri kullanılarak işlenmiştir. Yüzeyi işlenen metaller arasına reçine emdirilmiş S-2 cam kumaş (prepreg) konularak, havacılıkta kullanımı yaygın olan 2 / 1 dizilimli dört Fiber Metal Tabakalı Kompozit (FMTK) numune üretilmiştir. Yapılan çalışmalar ile metal ve prepreg arasındaki yapışmayı arttırmak için, metal yüzeyinin işleminde kullanılan geleneksel mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerine alternatif bir yöntem olan Fiber Lazer Yüzey İşleme (LYİ) yönteminin literatüre kazandırılması amaçlanmıştır. Dört FMTK Sıcak Pres Tekniği ile üretilip, Üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak 80 kHz frekansta 30 – 50 W güçte 800 – 1600 mm /s tarama hızında LYİ parametreleriyle $376 \pm 0,6$ MPa Eğilme Dayanımı ve 68 ± 1.5 MPa Eğilme Modülü değerleri elde edilmiştir. Lazer etkisini arttırmak için AA 6061-T4 malzemesine 80 kHz frekans 50 W güç ve 1600 mm /s tarama hızında beş tekrara kadar LYİ yöntemi uygulanmış ve üç geçişte 392,87 MPa Eğilme Dayanımı ve 71,24 MPa Eğilme Modülü değerleri elde edilmiştir. Lazer Yüzey İşleme yönteminin diğer Zımparalama, FPL – Dağlama yöntemlerine göre üstünlükleri realist ve objektif bir yaklaşım ile ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Eğilme Özellikleri, FMTK, Fiber Lazer Teknik, Metal / Prepreg Kumaş Arayüzü, Tekrarlı Lazer Tekstüre.

IMPROVEMENT OF METAL/PREPREG FABRIC INTERFACE STRENGTH OF FIBER METAL LAYER COMPOSITES USING FIBER LASER TECHNIQUE

ABSTRACT

In this study, the surfaces of 0.8 mm thick AA 6061-T4 materials were processed using Sanding, FPL – Etching, Surface treatment with Laser parameters (different power, speed and frequency) and surface treatment with repetitive Laser parameters. By placing resin-impregnated S-2 glass fabric (prepreg) between the surface treated metals, four Fiber Metal Layered Composite (FMTK) samples, which are commonly used in aviation, in 2/1 array were produced. In order to increase the adhesion between the metal and the prepreg, it is aimed to bring the Fiber Laser Surface Treatment (LYI) method, which is an alternative method to the traditional mechanical and chemical surface treatments used in the processing of the metal surface, to the literature. It is produced with four FMTK Hot Press Techniques and subjected to three-point bending test. As a result, 376 ± 0.6 MPa Flexural Strength and 68 ± 1.5 MPa Flexural Modulus values were obtained with LY parameters at 30 – 50 W power at 800 – 1600 mm/s scanning speed at 80 kHz frequency. In order to increase the laser effect, LCI method was applied to AA 6061-T4 material with 80 kHz frequency, 50 W power and 1600 mm/s scanning speed for up to five repetitions and 392.87 MPa Flexural Strength and 71.24 MPa Flexural Modulus values were obtained in three passes. The advantages of the Laser Surface Processing method over other Sanding, FPL - Etching methods have been demonstrated with a realistic and objective approach.

Keywords : Flexural Properties, FML, Fiber Laser Technique, Metal / Prepreg Fabric Interface, Repeated Laser Texturing.

1. GİRİŞ

Genel itibariyle malzemeler; metal, seramik ve organik malzemeler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu üç sınıf malzemenin kendilerine göre bazı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak, bu malzemelerden iki veya daha fazlasının üstün özelliklerini tek bir malzemede toplanması amacıyla makro düzeyde birleştirilerek üretilen yeni malzeme kompozit malzemedir (Kaya, 2016).

Tarihsel süreç içerisinde, kompozit malzemelerden ilk olarak evlerin yapımında saman takviyeli kerpiç bloklar şeklinde faydalanılmıştır. Günümüzde ise geleneksel malzemelerin mekanik, termal yada tribolojik açıdan yetersiz olduğu durumlar için kompozit malzemelerden yapısal malzeme olarak faydalanılmaktadır. Amerika’da 1930’lu yıllarda cam elyafın bulunması ile modern kompozitin üretimi başlamış ve Cam Elyaf Takviyeli Kompozit (Glass Reinforced Aluminum Laminate – GLARE) malzemeler dünya pazarında yerini almıştır. Kompozit malzemeler malzeme bilimi açısından değerlendirildiğinde nispeten yeni ve ileri teknolojik malzemeler olarak görülmektedir (Kaya, 2016).

Kompozit malzemeler temel olarak geleneksel malzemelerin aşağıda kısaca belirtilen bazı mekanik, termal ve fiziksel özelliklerinin bir veya birkaçını iyileştirmek amacıyla üretilmektedir. Bunlar;

- Mukavemet,
- Spesifik dayanım,
- Korozyon dayanımı,
- Termal dayanım,
- Darbe Dayanımı,
- Yorulma Dayanımı,
- Elektrik iletkenliği,
- Akustik iletkenlik,
- Yoğunluk,
- Sönümlenme özelliği
- Estetik görünüm (Kaya, 2016), (Sapuan, 2017).

Kompozit malzemeler günümüzde mutfak gereçleri gibi tüketim mallarından yüksek teknolojilere sahip uçak yapısal parçalarına kadar birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin tekne yapımı, demiryolu endüstrisi, enerji sektörü, araba ve uçak endüstrisi, tıbbi cihazlar ve telekomünikasyon endüstrilerinde kullanılmasındaki temel ihtiyaç, yüksek spesifik dayanım ile birlikte akıllı yapıların üretilmesine imkan sağlamasıdır. Kompozit malzemelerde kullanılan ana takviye malzemeleri cam, karbon ve aramid kumaşlardır. Kumaşları oluşturan fiberleri bir arada tutan matris malzemeleri ise genellikle polimerik bazlı olan termoplastik ve termoset malzemelerdir. Bununla birlikte, son yıllarda özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren yerlerde (gaz türbinli motor yüksek basınç kompresör hattı, türbin kademeleri) metal ve seramik matrisli kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Sapuan, 2017).

Fiber Metal Tabakalı Kompozit (FMTK) malzemeler, 21. yüzyıl başından itibaren Delft Teknoloji Üniversitesi'nde geliştirilen yapısal kompozitlerdir (Ishak ve diğ., 2018). FMTK malzemeler 0.3-0.5 mm sac metal levhalar ile reçine emdirilmiş cam, karbon ve aramid kumaşların üst üste istiflenmesi şeklinde oluşturulurlar. Daha sonra sıcak presleme, otoklav veya vakum torbalama yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilir (Campoli ve diğ., 2009). Bu malzemeler hafiflik, üstün mukavemet özellikleri, yorulma direnci, darbe direnci, yüksek statik mukavemet, çentik mukavemeti vb. özellikleriyle, polimer matrisli kompozit ve metal malzemelerin üstün özelliklerini tek bir malzemede birleştirirler (Sinmazçelik ve diğ., 2011), (Ebrahim Moussavi-Torshizi ve diğ., 2010). FMTK malzemeler 2/1 dizilimli, 3/2 dizilimli vb. yerleşimlerine göre adlandırılırlar. Buradaki dizilim de ilk rakam metal kat sayısını ikinci rakam ise metallerin arasına girecek reçine emdirilmiş kumaşı belirtmektedir. FMTK 'ler havacılık ve uzay sektöründe örneğin; Airbus A380 uçağının üst gövde kaplamasında, yatay ve dikey stabilizerin hücum bölgelerinde, helikopterlerin pervane kanatlarında, motor kanallarında kullanım imkanı bulmuştur (Yi, 2015), (URL-1). FMTK teknolojisinde kullanılabilen bileşenlerin artan kullanılabilirliği, bu malzemelerin otomotiv ve makine endüstrisinde de kullanımına imkan sağlaması beklenmektedir (Jakupczak ve diğ., 2016).

FMTK malzemeler yeni nesil sandviç kompozit grubunda yer almaktadır. Bu malzemeler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, havacılık sektöründe

kaçınılmaz olan türbülans olayları sonucu malzemeye gelen değişken yüklemelerin, uçak kanatlarının havada ve yere inerken yaptığı salınımlarının oluşturduğu eğilme yüklemelerinin ve uçağın yerdeki manavralarının yarattığı kuvvetlerin oluşturduğu gerilmeler nedeniyle, FMTK malzemeler de daha çok eğilme yüklemeleri nedeni ile tabakalararası dayanım ve yorulma dayanımı özelliklerinin geliştirilmesinin amaçlandığı görülmektedir. Özellikle metal ve reçine emdirilmiş kumaş arayüzünde iyi bir yapışmanın sağlanması için metal yüzeyine mekanik olarak zımparalama, kum püskürtme ve/veya kimyasal olarak da FPL- Dağlama (Forest products laboratory Etching), Sülfirik Asit Eloksal (Sulphuric Acid Anodising – SAA) vb. yüzey işlemlerinin uygulanmasıyla, metal/reçine emdirilmiş kumaş (prepreg) ara yüzeyinin iyileştirildiği ve bu sayede FMTK malzemesinin tabakalararası dayanım değerlerinin istenilen değerlere ulaştığı belirtilmiştir. Fakat bu uygulanan yüzey işlemlerinin de çeşitli dezavantajları bulunmaktadır. Mekanik yüzey işlemlerinde işçi faktörü, kontrolsüz yüzey pürüzlülüğü oluşturmak ve yüzeyin iyi temizlenmemesi nedeniyle istenmeyen partiküllerin yapıda kaldığı görülmektedir. Kimyasal yüzey işlemlerindeyse malzeme yüzeyinde istenen yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal uyumu sağlamalarının yanında asit ortamında çalışmanın çevreye ve insan sağlığına zararlı olması, maliyetli işlem olması ve laboratuvar ortamına ihtiyaç duyulması gerekmektedir.

Yukarıdaki yöntemlerin yanında son günlerde üzerinde çalışma yapılan bir başka yöntem ise Lazer Yüzey İşleme(LYİ) yöntemidir. LYİ yöntemi farklı endüstrilerinde zaten kullanılan bir yöntemdir. Günümüzde alüminyum malzemelerinin yüzey temizliği, yüzey eritme vb. işlemlerinde kullanılmaktadır (Ezzat ve diğ., 2018). Alüminyum alaşımlarının yüzeyine uygulanan LYİ parametreleri, yapışma için yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirebileceğini kanıtlamıştır (Langer ve diğ., 2012). LYİ yöntemiyle neredeyse tüm malzemelerde, lazerin gücüne bağlı olarak istenilen yüzey pürüzlülükleri kontrollü olarak oluşturulabilir. Literatür araştırmalarında, havacılık sektöründe genellikle mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerinin uygulandığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında, daha önce FMTK malzemelerin üretimi öncesi kullanılmayan Fiber Lazer ile metal malzeme yüzeyinde kontrollü yüzey pürüzlülükleri ve oksit tabakası ile mevcut mekanik yada kimyasal yüzey işlemleri uygulamadan metal/prepreg ara yüzey uyumu sağlanarak FMTK

malzemelerin eğilme modülü ve eğilme dayanımı mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, FMTK malzemede kullanılan alüminyum sac metal malzemenin yüzeyi, optimum LYİ parametreleriyle üretim öncesi işlenip, metal/reçine emdirilmiş kumaş arayüzünde yapışma/kilitlenme özelliğinin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Üretim öncesi işlemlerin tamamlanmasından sonra üretim aşamasına geçilmiştir. FMTK üretiminde kapalı kalıplama ve açık kalıplama yöntemleri kullanılmaktadır. Sıcak pres ve vakum torbalama yöntemleri kapalı kalıplama yöntemidir (Frank, 2020). Otoklav yöntemi ise açık kalıplama yöntemidir (Ouarhim ve diğ., 2019). Vakum torbalama yönteminde kat kat dizilen prepreg ve metal sac malzemesi, dış ortamdan ayrılmış bir vakum torbasına yerleştirilir. Torba içerisinde vakum oluşturularak, malzeme boşlukları ortadan kaldırılıp, reçine ve sertleştirici malzemelerin nüfuz etmesi sağlanır. Yöntemin avantajı, laminer bir reçine akışına izin vererek var olan boşlukları azaltmak ve böylece kompozitin erken hasarlanmasını engellemektir (Frank, 2020). Vakum torbalama yöntemi yüksek teknolojiye sahip malzeme eldesinde tercih edilir (Bere, 2014). Sıcak pres yöntemi yüksek hacimli üretime izin veren bir yöntemdir. Bu yöntemde metal kalıpların monte edildiği pres, malzemeye belirli süre basınç ve sıcaklık uygulanacak şekilde kapatılır. Bu şekilde karmaşık parçalar da üretilebilir (Frank, 2020). Otoklav yönteminde ise parça vakum altındaki plastik torbaya yerleştirilir ve içerisindeki hava ve uçucu ürünler giderilir. Daha sonra otoklav tankında inert gazların ısı ve basıncı uygulanarak sertleştirme ve kütleme işlemleri gerçekleştirilir. Yöntem pahalıdır ve yüksek kaliteli havacılık ürünlerini üretmek için kullanılır (Ouarhim ve diğ., 2019).

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozitlerin Tarihçesi

İki farklı malzemeyi birleştirerek üstün özellikli malzeme üretme fikri yakın zamanda oluşmadı. İnsanlar yüzyıllarca daha mukavemetli ve daha hafif malzeme üretmek için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kompozit kullanımı M.Ö. 1500'lü yıllara kadar gitmektedir. Mısır ve mezopotamya uygarlıkları saman ve çamuru karıştırarak dayanıklı binalar yapmışlardır. Saman daha birçok yapıda da takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. M.S. 1200'lü yıllarda Moğallar ilk kompozit yayı üretmişlerdir. Bu yay ahşap, kemik ve hayvan tutkalı birleşiminden oluşmaktadır. Bu üçlü yapı huş ağacı kabuğu ile sarılmıştır. Bu yaylar güçlü ve hassas yapısı ile Cengiz Han'a savaşlarda askeri üstünlük sağlamıştır. Bu kompozit yay, barutun bulunmasına kadar dünyadaki en güçlü silah olmuştur (Upadhyaya, 2014).

Modern kompozitin üretimi plastik malzemenin üretilmesiyle başlamıştır. Bu zamana kadar bitkilerden ve hayvanlardan elde edilen doğal reçineler, tutkal ve bağlayıcılar kullanılmıştır. 1900'lü yılların başında üretilen vinil, polistiren, fenolik ve polye ester plastikler, doğal rakiplerine göre daha iyi performans göstermiştir. Fakat tek başlarına yeterli güçte değillerdi. Bu sebep ile farklı malzemeler ile kombinasyon yoluna gidilmiş ve 1935 yılında Owens Corning, fiberglas olan ilk cam elyafı tanıtmıştır. Fiberglas malzemesi plastik bir polimer ile birleştiğinde çok güçlü ve hafif bir yapı oluşturmuştur. Böylece günümüzdeki Fiber Takviyeli Polimer (FTP) endüstrisi doğmuştur (Nagavally, 2017).

İkinci Dünya Savaşı sırasında askeri uygulamalarda Polimer Matris Kompozit (PMK) kullanımı, savaştan sonra bu malzemelerin özellikle deniz endüstrisinde kullanımını arttırmıştır. Birleşik Bilim ve Teknoloji, 1950'lerde ABD ve Avrupa da gelişmiştir. 1970'lerde Kompozit Endüstrisi büyümüştür. Bu dönemlerde DuPont aramid elyafını Kevlar adıyla piyasaya çıkarmıştır. Karbon fiber üretimi de aynı döneme rastlamaktadır (Balasubramanian, 2017). 1982 de ALCOA firması Aramid Takviyeli Alüminyum Laminant (Aramid Reinforced Aluminum Laminate- ARALL) kompozitini ilk ticari ürün olarak ticaretleştirmiştir. Bu malzeme ARALL 1 ve ARALL 2 olarak standartlaştırılmıştır. Aramid ve alüminyumun, epoksi reçine kullanılarak birleştirilmesi ile oluşturulan FMTK, ilk tabakalı kompozit olarak Delft

Teknoloji Üniversitesi'nde üretilmiştir. 1987'de AKZO, GLARE malzemesine patent başvurusu yapmış ve GZZ15'i üretmek için ALCOA firmasıyla 1991'de ortaklık kurmuştur (Botelho ve diğ., 2006). Bu elyaflar ile birçok mukavemetli ve hafif kompozitler üretilmiştir. Nerdeyse birçok geleneksel malzemenin yerine artık kompozit malzeme kullanılmaktadır. Özellikle uçak, otomobil ve denizcilik sektörlerinde kompozit malzeme kullanımı çok yaygındır (Balasubramanian, 2017).

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Doğada bulunan, ana malzemeler olan, metal, seramik ve polimerlerin farklı varyasyonlar ile karıştırılması çok çeşitli fırsatlar sağlayabilir. İnsanlar binlerce yıldır bu yöntemi kullanarak farklı çeşit de malzemeler üretmişlerdir. İnsanlar da bu yöntemleri doğayı gözlemleyerek görmüşlerdir.

Doğada yük taşıması gereken tüm doğal; ahşap, kemik, kas aslında bir birleşik malzemedir oluşuyor. Örneğin; Ahşap malzemesi, lignin adı verilen zayıf bir madde tarafından birarada tutulan uzun selüloz tamponlardan(polimer) oluşmuş bir kompozittir. Burada ahşap malzemesi, kompozite gelen yükü tutmak için takviye fazı olarak davranır. Bu sebep ile takviye malzemeler tipik olarak daha güçlü ve daha sert malzemelerden seçilirler. Lignin maddesi ise ahşap malzemeyi bir arada tutan matris fazı olarak kullanılır. Matrisin amacı donatıları birbirine bağlamak, donatılara yük aktarmak, donatıları korumak ve tam potansiyelde çalışmalarını sağlamaktır.

Uygun bir matris ve takviye fazı seçilerek, gereksinimleri karşılayabilecek bir kompozit üretimi yapılabilir. Kompozit malzemeler, yüksek sertlik ve yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci ve korozyon direncine sahip malzemelerdir. Kompozit malzemeleri matris türüne göre üç sınıfa ayırabiliriz. Bunlar;

- Metal Matris'li Kompozit'ler (MMK)
- Seramik Matris'li Kompozit'ler (SMK)
- Polimer Matris'li Kompozit'ler (PMK) (Haghshenas, 2015).

2.2.1. Matris Tipine Göre Kompozit Malzemeler

2.2.1.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal Matris Kompozit'ler (MMK) de matris olarak metal veya metal alaşımları kullanılırken, takviye olarak ise metal veya seramik malzeme kullanılır (Pastuszak, 2013). MMK'lerin tasarımında dikkat edilecek ana faktörler şunlardır;

- (a) Matris seçimi
- (b) Takviye türü
- (c) Proses tipi
- (d) Isıl işlem prosedürü

Matris malzemesi ve takviye türü seçimi son uygulamaya göre belirlenir. Örneğin; yüksek sıcaklık türü uygulamalarda nikel esaslı malzemeler seçilirken, titanyum ve magnezyum esaslı malzemeler hafiflik istenilen yerlerde düşünülmektedir. Benzer şekilde son ürün maliyeti, istenilen mikro yapı, üretim hacmi vb. faktörler sebebi ile farklı ürünlerde farklı işleme yöntemleri tercih edilmektedir (Gupta, 2018). MMK'lerde en önemli özellikleri olarak sayılabilecek yüksek özgül mukavemet ve sertlik vb. özelliklerinin yanı sıra elektronik cihazlarda termal genleşme, yüksek elektriksel ve termal iletkenliği azaltması için kullanılmaktadır. Tablo 2.1'de bazı MMK örnekleri hakkında bilgi verebiliriz (Pastuszak, 2013);

Tablo 2.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanı (Pastuszak, 2013)

Matris	Takviye	Kullanım Alanı
Alüminyum (Al)	Karbon (C)	fiber takviyeli kompozit türüdür. Döngüsel termal stres ve homojen olmayan sıcaklık alanlarında kullanıldığında minimum etki sağlamaktadır. Bu sebep ile anten desteklerinde, aynalarda ve optik cihazlarda kullanılır.
Alüminyum (Al)	Alüminyum oksit (Al ₂ O ₃)	Lif takviyeli kompozit türüdür. Genellikle güç iletim hatları, pervaneler, torpidolar vb. yerlerde kullanılır. Yüksek sertlik, mukavemet ve düşük termal genleşme katsayısı sebebi ile platform ve uzay yapılarında da kullanımı mevcuttur.

Tablo 2.1. (Devam) Metal Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanı

Alüminyum (Al)	Silisyum karbür (SiC)	Silisyum karbür, fiberlerin tungstenin çekirdeği üzerine depolandığı fiber takviyeli kompozit türüdür. Al-Al ₂ O ₃ kompozitleri ile aynı uygulamalarda kullanılırlar.
Magnezyum ve alaşımları (Mg)	Boron (B)	Liflerin bor tungsten üzerine bırakıldığı fiber takviyeli kompozit türüdür. korozyona dayanıklı değildir. Fakat çok düşük bir yoğunluğa sahiptirler.
Nikel (ve alaşımları) - tungsten, alüminyum oksit, molibden, kömür (Ni-W, Al ₂ O ₃ , Mo, C)		Yüksek sıcaklıklarda korozyona ve oksidasyona karşı dirençlidirler. Isıya dayanıklı malzemeler olarak bilinirler. Uçak motorlarında, gaz türbünlerinde kullanılırlar.

2.2.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Seramik Matrisli Kompozit'ler (SMK), takviye malzemesinin, matris olarak kullanılan seramik malzemesi içerisine karıştırıldığı kompozitler grubudur. Takviye malzemesi, sürekli fazdaki seramik matris içerisinde dağılmış fazdadır. Dağılmış takviye malzemesi olarak elyaf, partikül veya whisker kullanılır (Longbiao, 2020). Sürekli fiber takviyeli SMK'ler, seramik matrislere fiberleri dahil ederek seramiklerin yüksek sıcaklıktaki mukavemetlerinden yararlanırken, seramiklerin kırılğan matrisini de fiber malzeme ile iyileştirir. Bu şekilde yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen, aynı zamanda kırılma direnci yüksek, SMK üretilmiş olmaktadır. Günümüzde seramik matris kompozitlerin en çok bilinenleri şunlardır;

- Silikon nitrür matrisi: Si₃N₄-TiN, Si₃N₄-SiC
- Alüminyum oksit matrisi: Al₂O₃-SiC, Al₂O₃-ZrO₂, Al₂O₃-SiC-ZrO₂, Al₂O₃-SiC
- Silikon karbür matrisi: SiC-SiC, SiC-MeB₂, SiC-TiB₂ (Pastuszak, 2013), (Longbiao, 2020).

SMK'ler üstün özellikleri ile günümüzde kesici aletler, diş protezleri, nükleer enerji ve askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Yaklaşık 30 yıldır havacılık ve uzay alanında seramik malzemelerden faydalanılmaktadır. Örneğin; SiC bazlı SMK'lerden üretilen türbin motorları artık ağırlık ve soğutma gereksinimlerini azaltmanın yanında 1200 °C sıcaklığa kadar dayanabilmektedir. 2016 yılında LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion) uçak jet motorları en yaygın olarak SMK malzeme kullanan ilk

ürün olmuştur. Şu ana kadar LEAP jet motorları Airbus A320 Neo Ailesi, Boeing 737 MAX ve COMAC C919 uçak üreticileri tarafından uçaklarında kullanılmıştır. SMK'ler yüksek sıcaklık mukavemeti geliştirilmiş, kırılma tokluğu, termal şok direnci vb. yapısal malzeme özelliklerine ulaşmamızda kullanılacak ve geliştirilecek üstün özellikli malzeme gruplarıdır. Seramik kompozit sistemlerinin geliştirilmesinde önemli araştırmalar yapılmakta, uygun maliyetli üretim prosesleri üzerinde çalışmalar sürmektedir (Low, 2018).

2.2.1.3. Polimer matrisli kompozitler (PMK)

Polimer Matris Kompozit'ler (PMK) organik bir polimer matris ile bağlanan, çeşitli uzunluklardaki fiberlerden oluşurlar. Takviye, SMK'de kırılma tokluğunu arttırmak için kullanılırken, PMK'de takviye, yüksek mukavemet ve sertlik sağlamak için kullanılır. PMK'lerde matrisin görevi, darbe hasarı, delemantasyon, su emme, kimyasal saldırı ve yüksek sıcaklıkta sünme vb. yapının bozulmasına sebep olacak tüm işlemlere karşı dirençli olmaktır. Ticari PMK'lerin matris fazını, termoset ve termoplastik olarak sınıflandırabiliriz.

Termoset esaslı polimer matrisler, ısı ve basınç altında bir defa şekillendikten sonra bir daha şekillendirilemeyen polimer yapılarıdır. polyesterler, vinilesterler, epoksiler, bismaleimidler ve poliamidler termoset polimerler grubundadır. Bu reçinelerin başlangıçtaki viskozitesi düşüktür. Termoset reçine polimerleri birbirleriyle çapraz bağlanarak, tüm matrisi üç boyutlu bir ağda saran kimyasal reaksiyonlardan geçer. Bu işleme kür adı verilir. Bu üç boyutlu çapraz bağlı yapıları nedeniyle sıcaklık direnci, boyut kararlılığı ve çözücülere karşı direnç vb. özelliklere sahip olma eğilimindedirler. Son zamanlarda dayanıklılık ve çalışma sıcaklığını arttırmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Termoplastik esaslı polimer matrisler, polyesterler, polieterimid, poliamid, polifenilen sülfür, polieter-eterketon ve sıvı kristal polimerler bu gruba dahildirler. Mühendislik Plastikleri olarak da adlandırılırlar. Termoplastikler 260 °C ile 370 °C de şekillendirildikten sonra şekilsiz, yarı kristal veya kristalimsi bir yapıya soğutulurlar. Termoset reçinelerinin aksine, termoplastikler tekrar tekrar şekillendirilebilirler. Termoplastikler yüksek sıcaklık mukavemeti ve kimyasal kararlılık açısından termoset malzemelerden daha kötü özellikte olmalarına rağmen, çatlamaya ve darbe hasarına

daha dirençlidirler. Termoplastikler, otomatik ve yüksek hacimli endüstriler için çekici malzemelerdir. Şu anda, cam ve karbon/grafit gibi süreksiz elyaf takviyeler ile kullanılmaktadırlar. Aynı zamanda sürekli elyaflarla güçlendirilmiş termoplastikler için büyük potansiyel vardır. İleriki zamanlarda termoplastikler, yeni nesil avcı uçaklarında, epoksiler yerine tercih edilebilir. Tablo 2.2’de termoset ve termoplastik malzemelerinin özelliklerinin kıyaslaması verilmiştir (U.S. Congress, 1988).

Tablo 2.2. Termoset ve Termoplastik Matrislerin Genel Özelliklerinin Karşılaştırılması (U.S. Congress, 1988)

Resin type	Process temperature	Process time	Use temperature	Solvent resistance	Toughness
Thermoset	Low	High	High	High	Low
Toughened thermoset	↑	↓	↑	↑	↓
Lightly crosslinked thermoplastic	High	Low	Low	Low	High

SOURCE: Darrel R. Tenney, NASA Langley Research Center.

PMK’ler; havacılık sektöründe, ticari havayollarında ve askeri uçak endüstrisinde, uzay mekiği ve uydu sistemlerinde kullanılmaktadır. Denizcilikte, tekne gövdelerinde tercih edilirken, otomatik de gövde panelleri, yaprak yaylar, tahrik mili, tamponlar, yarış arabası gövdeleri vb. yerlerde oldukça fazla kullanılmaktadır (Divya ve diğ., 2016).

2.2.2. Takviye Tipine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye malzemelerini, geometrilerine göre üç grupta toplayabiliriz. Bu takviyeler şunlardır;

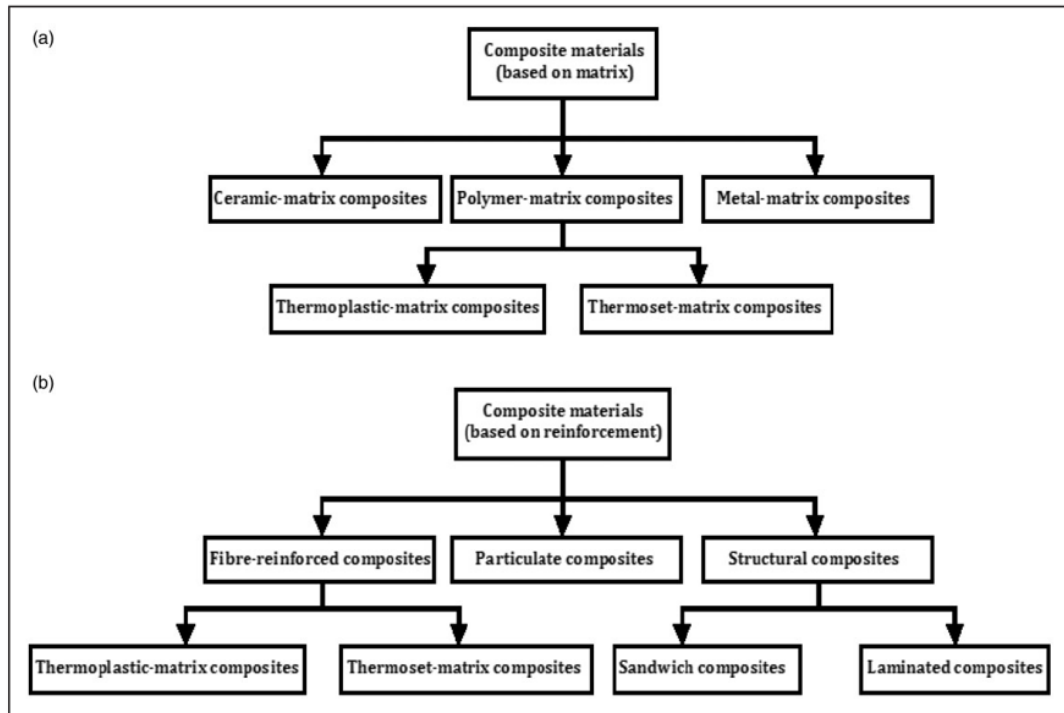
Elyaf (lif) takviyeli kompozitler : Elyaf(lif) takviyeli kompozit olarak cam, karbon, aramid vb. sentetik malzemelerinin sürekli(uzun) veya süreksiz(kısa) olarak, matris içinde düzenli veya düzensiz dağılmasıyla oluşur. Epoksi, alüminyum, kalsiyum alümino silikat, polimer ve karbon genellikle matris malzemesi olarak tercih edilir. sentetik takviyeler yerine doğal elyaf kullanımı da günümüzde oldukça popülerlik kazanmıştır. Bu sentetik ve doğal takviyeler, kompozit malzemeye yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direnci vb. özellikler kazandırmaktadır.

Parçacık (partikül) takviyeler : Matris içerisinde rastgele dağılmış, farklı boyut ve şekillerde takviyelerden oluşan kompozit malzemelerdir. Bu kompozitler, takviyelerin

rastgele olması dolayısıyla yarı-homojen veya yarı-izotropik olarak kabul edilir. Lif takviyeli olanlara göre daha az mukavemetlidirler. Fakat düşük maliyetli üretim ve şekil kolaylığına sahip olması bu tür kompozitlerin avantajlarıdır. Kullanım alanları olarak oyuncaklar, cep telefonu kılıfları, kasklar, otomotiv endüstrisindeki gövde panelleri, tamponlar vb. ürünleri verebiliriz (Qinghua Qin ve Jianqiao Ye, 2015), (Rajak ve diğ., 2019).

Tabakalı takviyeler : Sac kalıplama kompoziti olarak adlandırılan üst üste binmiş tabakaların oluşturduğu kompozit türüdür. uzun elyafların, termoset veya termoplastik polimer reçineler ile emdirilmesiyle oluşan yüksek mukavemetli kalıplama kompozitleridir. Büyük yapısal bileşenler için yüksek mukavemet / ağırlık oranları sayesinde tercih edilmektedirler (Rajak ve diğ., 2019).

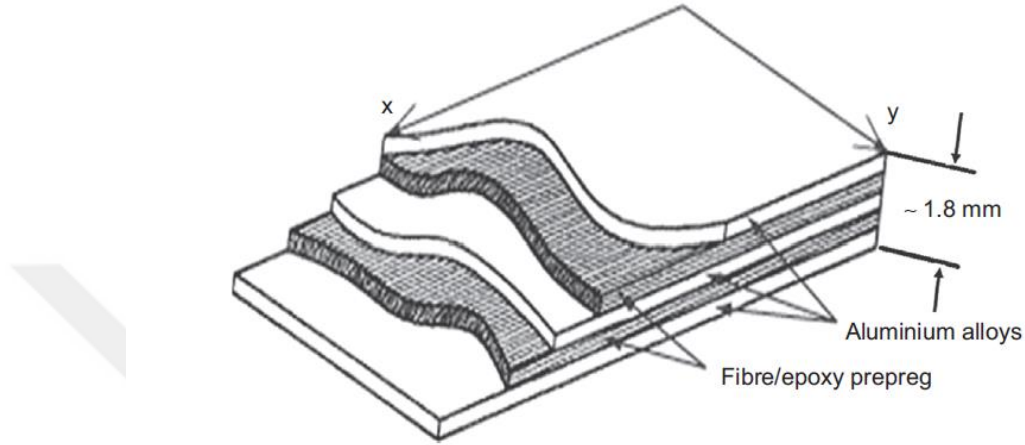
Tablo 2.3. Kompozitlerin matris ve takviye fazına göre sınıflandırılması (İbrahim ve diğ., 2015)



2.3. Fiber Metal Tabakalı Kompozit (FMTK) Malzemeler

Bir kompozit malzeme iki ayrı fazdan oluşur. Bu fazlar takviye ve matris fazıdır. Matris fazı içerisinde sürekli, süreksiz veya dağılmış olarak takviye fazı bulunur. Matris fazı kompozite iyi kesme özelliği ve düşük yoğunluk sağlarken, takviye fazı da

kompozite yüksek güç, yüksek sertlik, düşük yoğunluk sağlar. Bu şekilde oluşturulan kompozit malzeme yüksek güçte, yüksek sertlikte, iyi kesme özelliğine sahip ve düşük yoğunlukta olur. Yani takviye ve matrisin üstün özellikleri, tek bir kompozit malzemede birleştirilmiş olur. Şekil 2.1’de FMTK malzemesinin yapısını gösteren bir resim görülmektedir.



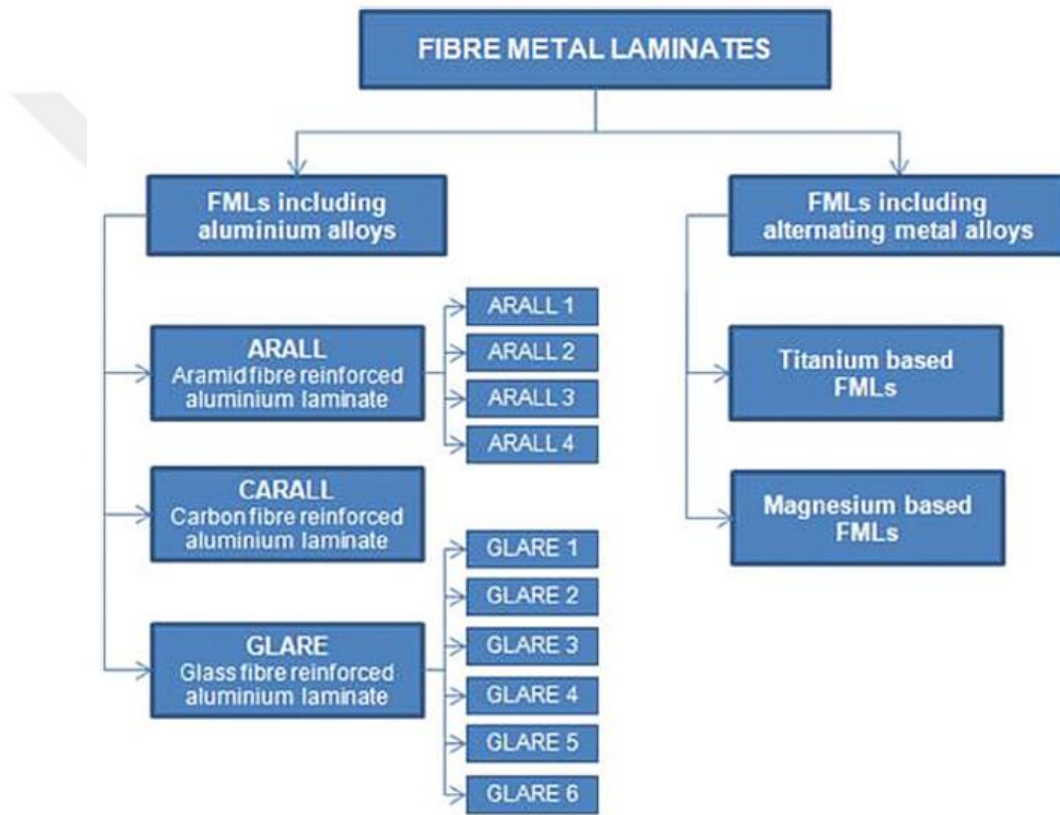
Şekil 2.1. Fiber Metal Tabakalı Kompozitin Görünüşü(Linganiso ve Anandjiwala 2016)

Temel de ana kompozit malzemeler üç sınıfta toplanmaktadır. Bunlar; Metal Matrisli Kompozitler (MMK), Seramik Matrisli Kompozitler (SMK) ve Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)’dir. Gelişen şartlar ve istekler, her zaman daha üstün özellikli malzeme elde etme sürecini devam ettirmektedir. Bu neden ile yeni bir ileri kompozit malzemeler sınıfı oluşturulmuştur. Bu sınıfta da ana kompozit malzemelerin birleştirilmesi yoluna gidilmiştir. Böylece sünek alüminyum alaşımlarıyla yüksek mukavemetli fiber katkı polimer kompozitlerin, üst üste tabakalar halinde dizilmesi ve birleştirilmesiyle FMTK malzemeler üretilmiştir. FMTK malzeme, MMK ve PMK malzemelerini birleştiren üstün özellikli malzeme grubudur. Tabakalı kompozitler üst üste dizilmiş kompozitlerin oluşturduğu hibrid kompozit grubudur.

Tabakalı kompozitler de genellikle cam, karbon ve aramid fiberler takviye malzemesi olarak kullanılır. Özellikle GLARE ve ARALL kompozit malzemeleri geniş ilgi çekmektedir (Ebrahim Moussavi-Torshizi ve diğ., 2010), (Sohel Rana ve Raul Fanguero). Bunun yanında, metal olarak da genellikle alüminyum, titanyum, magnezyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Bu metaller izotropiktir. Yüksek taşıma mukavemetine, darbe direncine ve onarım kolaylığına sahiptirler. Metallerin sahip

olduğu yorulma ve korozyon özelliklerindeki eksiklikler, kompozitin mukavemet, darbe dayanımı ve tamir edilebilirliği ile aşılabılır. Genellikle FMTK malzemelerde GLARE veya ARALL ile metal olarak alüminyum alaşımları kombinasyonu kullanılmaktadır. Tablo 2.4’de FMTK malzemelerinin genel tablosu gösterilmektedir. Piyasada en çok GLARE ve ARALL esaslı FMTK malzemeleri bilinmektedir (Sinmazçelik ve diğ., 2011).

Tablo 2.4. Fiber metal tabakalı kompozitlerin sınıflandırılması (Sinmazçelik ve diğ., 2011)



2.3.1. Aramid Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (ARALL)

Reçine emdirilmiş aramid fiberler (prepreg) ile ince alüminyum levhaların üst üste bindirilmesinden oluşurlar. Laminantların özelliklerini elyaf-reçine sistemi, alüminyum alaşımı özellikleri, istiflenme varyasyonları, elyaf oryantasyonları, yüzey hazırlama teknikleri ve kür sonrası işlemler belirlemektedir. Mümkün olan birkaç farklı kombinasyondan dört tip ticari ARALL esaslı FMTK malzemeleri standartlaştırılmış ve bu kompozitler Tablo 2.4’de gösterilmektedir. Sertleştirilmiş durumda ARALL esaslı FMTK artık basınç gerilmelerine sahiptir. Bu gerilmeler

aramid liflerinin, presleme sırasında zayıf davranış göstermelerine sebep olmaktadır. Bu nedenle artık gerilmeler, laminant kürlendikten sonra plastik olarak gerilerek giderilir. Bu işleme post germe işlemi denir.

ARALL 1 ve ARALL 3 yüksek sıkıştırma yükleri için geliştirilmiş %0.4 kür sonrası esnemeye üretilmektedir. ARALL 1’de yüksek mukavemetli T6 temperlenmiş 7075 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır. ARALL 3’te ise AA 7475-T761 malzemesi, temperli, güçte hafif düşmeye karşı, tokluk ve pul pul dökülme direncinde artışa sahip geliştirilmiş versiyonudur. ARALL 2, hasar toleransı ve daha fazla şekillendirilebilirlik, daha az mukavemete karşı daha sünek olan 2024-T3 alaşımına sahip olan kompozittir. ARALL 4 yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen bir kompozittir. AA 2024-T8 temperli ve 175 °C sertleştirme sıcaklığına sahiptir.



Şekil 2.2. ARALL ile üretilen F-27 Paneli (Gülcan ve diğ., 2019)

Tüm FMTK kompozitlerin 2/1, 3/2, 4/3 ve 5/4 vb. varyasyonları bulunmaktadır. Burada ilk rakam alüminyum sayısını ikinci rakam da alüminyumların arasına giren prepreg sayısını göstermektedir. Alüminyum levhalar için 0,2, 0,3 ve 0,4 kalınlıkları tercih edilmektedir. aramid prepreg kalınlığı olarak da genellikle 0,2 mm kalınlık kullanılmaktadır (Krishnakumar, 1994).

Tablo 2.5. ARALL ve GLARE ticari ürün formları (Krishnakumar, 1994)

ARALL esaslı FMTK	GLARE esaslı FMTK
Yüksek modüllü Aramid elyafı tek yönlü yapışkan epoksi prepreg ($V_r = O_j$)	R-Glass fiberlerle tek yönlü veya Çapraz katlı yapışkan epoksi prepreg ($V_r = 0.6$)
ARALL-1 Alüminyum alaşım 7075-T61 120 °C (250 °F) kütleme, % 0.4 kalıcı gerdirmeye (AMS 4253 - beklemede)	GLARE-1 Alüminyum alaşım 7475-T76 Tek Yönlü R-cam 120 °C (250 °F) kütleme, % 0.5 kalıcı gerdirmeye
ARALL-2 Alüminyum alaşımı 2024-T3 120 °C (250 °F), %0,4 gerdirmeli veya gerdirilmemiş kütleme	GLARE-2 Alüminyum alaşım 2024-T3 Tek Yönlü R-cam 120 °C (250 °F) kütleme, kalıcı gerdirmeye yok
ARALL-3 Alüminyum alaşım 7475-T761 120 °C (250 °F) kütleme, % 0.4 kalıcı gerdirmeye (AMS 4302-1990)	GLARE-3 Alüminyum alaşımı 2024-T3 Çapraz kat (% 50 L,% 50 LT) cam 120 °C (250 °F) kütleme, kalıcı gerdirmeye yok
ARALL-4 Alüminyum alaşımı 2024-T8 175 °C (350 °F) %0,4 gerdirmeli veya gerdirilmemiş kütleme	GLARE-4 Alüminyum alaşım 2024-T3 Çapraz kat (% 67 L,% 33 LT) cam 120 °C (250 °F) kütleme, kalıcı gerdirmeye yok

2.3.2. Cam Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (GLARE)

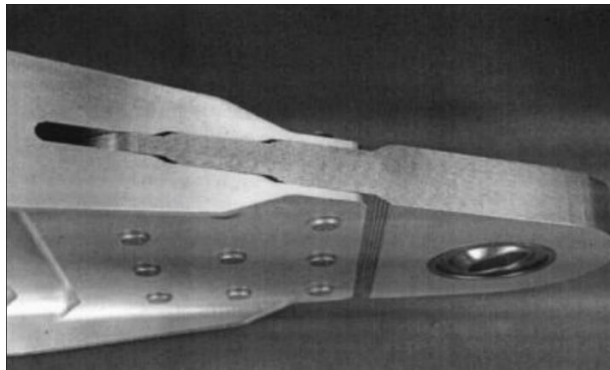
Reçine emdirilmiş cam fiberler ile ince alüminyum levhaların üst üste istiflenmesi şeklinde oluşturulur. GLARE esaslı FMTK, monolitik alüminyumdan % 10 daha yoğundur. Bununla birlikte yüksek mukavemetli cam elyaflarına (R VE S2) sahip GLARE esaslı FMTK, daha iyi yapışma, gelişmiş gerilme ve basınç mukavemeti sağlar. R ve S2 gibi cam elyaflar ikinci nesil olarak geliştirilmiş ve en yoğun olarak kullanılan cam elyaf türleridirler. Yüksek gerilme mukavemetleri sebebiyle cam elyaflar çapraz yüklü konfigürasyonda döşenebilir ve bu nedenle basınçlı gövde kaplaması gibi iki eksenli yüklemeye maruz kalan yerlerde kullanılabilir (Krishnakumar, 1994).

GLARE esaslı FMTK altı farklı standart sınıfta gruplandırılmıştır. Tüm GLARE esaslı FMTK malzemeleri epoksi yapıştırıcı ve tek yönlü cam elyaflardan oluşmaktadır. %60'lık nominal elyaf hacmi ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretim sırasında elyaflar farklı yönlendirmeler ile serildikleri için farklı GLARE esaslı FMTK varyasyonları oluşmuştur. Bu varyasyonlar ve özellikleri Tablo 2.6'da gösterilmektedir (Botelho ve diğ., 2006).

Tablo 2.6. GLARE Kompozitin Sınıflandırılması (Botelho ve diğ., 2006)

GLARE Sınıfı	Alt Başlıklar	Alüminyum Kalınlığı	Her Bir Fiber Katman Da Prepreg Yönlenmesi	Faydalı Özellikleri
GLARE 1		0,3 - 0,4 (7475 - T761)	0 ° / 0 °	Yorulma, Mukavemet, Akma Dayanımı
GLARE 2	GLARE 2A	0,2 - 0,5 (2024 -T3)	0 ° / 0 °	Yorulma, Mukavemet
	GLARE 2B	0,2 - 0,5 (2024 -T3)	90 ° / 90 °	Yorulma, Mukavemet
GLARE 3		0,2 - 0,5 (2024 - T3)	0 ° / 90 °	Yorulma, Darbe
GLARE 4	GLARE 4A	0,2 - 0,5 (2024 - T3)	0 ° / 90 ° / 0 °	Yorulma, Mukavemet, 0° Yönlenmiş
	GLARE 4B	0,2 - 0,5 (2024 -T3)	90 ° / 0 ° / 90 °	Yorulma, Mukavemet, 90° Yönlenmiş
GLARE 5		0,2 - 0,5 (2024 -T3)	0 ° / 90 ° / 90 ° / 0 °	Kesme, Eksen Dışı Özellikler
GLARE 6	GLARE 6A	0,2 - 0,5 (2024 -T3)	+ 45 ° / - 45 °	Kesme, Eksen Dışı Özellikler
	GLARE 6B	0,2 - 0,5 (2024 -T3)	- 45 ° / + 45 °	

Tablo 2.6 da görüldüğü gibi sadece GLARE 1 kompozitinde farklı olarak 7475-T761 temperlenmiş Alüminyum Alaşımı serisi kullanılmıştır. Diğer tüm GLARE sınıflarında 2024-T3 serisi temperlenmiş Alüminyum Alaşımı serisi kullanılmaktadır. Diğer yandan fiberler ile alüminyum metali arasında 0 °, 90 °, 45 ° vb. farklı derecelerde yönlenmeler farklı özelliklerin oluşmasını sağlamaktadır. Burada fiber ile metal tabaka arasındaki farklı varyasyonların farklı sonuçlar doğurduğu açıktır.



Şekil 2.3. GLARE 1'den üretilen uçak kanat gövde bağlantı kulağı (Gülcan ve diğ., 2019)

2.3.3. Karbon Fiber Takviyeli Alüminyum Laminantlar (CARALL)

Reçine emdirilmiş karbon fiberler(prepreg) ile ince alüminyum levhaların üst üste bindirilmesinden oluşurlar. Karbon fiberlerin yoğunluğu oldukça düşüktür ve aynı zamanda yüksek modüle sahiptirler. Buda karbon fiberlerin spesifik modülünün (modül / yoğunluk oranı) oldukça yüksek olmasını sağlar. Karbon fiberlerin ana dezavantajı, cam, aramid fiberlerinden daha düşük olan sünekliğidir. Modülü yüksek olan karbon fiberler, yüksek mukavemetli karbon fiberlerden bile daha düşük sünekliliğe sahiptir. Piyasada var olan karbon fiberler üçe ayrılmaktadır. Bunlar; Genel Amaçlı (GA), Yüksek Performanslı (YP) ve Aktif Karbon Fiberler (AKF)'dir. GA fiberler, amorf yapıda, izotropiktir, düşük gerilme modülü ve mukavemeti ve düşük maliyetlidir. YP karbon fiberler ise yüksek mukavemet ve modüle sahip olduğunu söyleyebiliriz. AKF ise çok sayıda mikro gözeneklerin varlığı ile karakterize edilirler.

Karbon fiberler sahip oldukları yüksek mukavemet, yüksek modül ve kırılma yapılarına rağmen polimerler, metaller, karbonlar ve seramikler için bir takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır. Karbon fiberler polimer ve seramik matrislerin iletken olmamalarına rağmen elektriksel ve termal olarak iletkenlerdir. Bu yüzden bir takviye malzemesinin yanında aynı zamanda elektriksel veya termal iletkenliği arttırmak için de kullanılmaktadır (Chung, 1994).

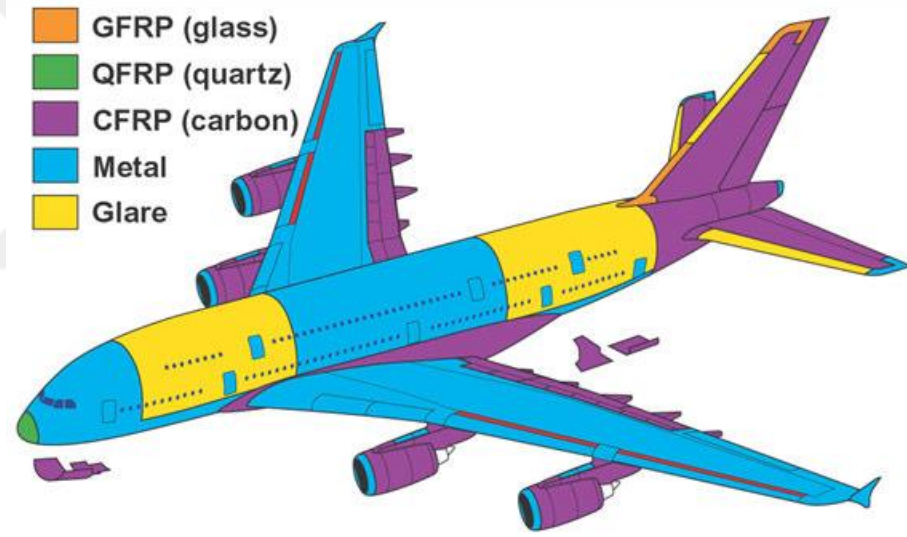
Karbon Fiber Takviyeli Kompozitler (Carbon Reinforced Aluminum Laminate-CARALL), aramid fiber takviyeli kompozitlerin sahip olduğu düşük basınç dayanımını geliştirmek için üretilmişlerdir. CARALL'ın sahip olduğu yüksek mukavemet, sertlik ve iyi darbe emicilik özellikleri, CARALL esaslı FMTK malzemesini havacılık ve uzay uygulamaları için vazgeçilmez bir malzeme yapar. Aynı zamanda CARALL esaslı FMTK'ler helikopter ve uçak koltukları için darbe emici olarak kullanılmaktadır (Nguyen ve diğ., 2017).

2.4. Havacılıkta FMTK Malzemelerin Kullanım Örnekleri

Havacılık ve Uzay Sektörü için tasarlanan FMTK'ların, 1970 yıllarına kadar uzanan bir geçmişi vardır (Wanhill, 2017). Havacılık uygulamalarındaki işletme maliyetlerinin yüksek olması, yüksek rekabet olmasına karşı kar oranının düşük olması nedenleriyle, kompozit malzemelerin ağırlığı azaltma ve korozyon direncini artırma

vb. avantajları olsa bile bu malzemelerin havacılık sektörlerinde kullanımı beklenenden yavaş olmuştur. Kullanma isteksizliğinin sebepleri yüksek sertifikasyon maliyeti ve üretim maliyetleridir. Bu maliyetler kompozitlerin geniş bir alanda kullanımının ana sınırlayıcısıdır.

Yıllar içerisinde kompozit malzemelere gereken önemin verilmesiyle, kompozit kullanımında artış görülmüştür. 2000 yılından beri ulaşım endüstrisi 1.3 milyar dolarlık kompozit tüketimiyle günümüzde en büyük kompozit malzeme kullanıcısı konumuna yükselmiştir. Airbus A380, yapısında kompozit kullanımını arttırarak, toplam gövde ağırlığının %16'sını kompozit malzemelerden oluşturmuştur. Bu geleneksel alüminyum kullanımının %20'lik kısmının kompozit malzemelerle değişmesine eşdeğerdir (Razali ve diğ., 2017).



Şekil 2.4. Airbus A380 uçağındaki kompozit kullanımı (Zarei ve diğ., 2016)

Şekil 2.4'de Airbus A380 uçağının, üst gövdesinde GLARE esaslı FMTK malzemesinin kullanıldığını görülmektedir. Ayrıca GLARE esaslı FMTK malzemelerinden diğer sivil ve nakliye uçaklarında kargo bölmesi kat değiştirmelerinde, Ear Learjet 45 için radome ön bölümünde, patlamaya dayanıklı kargo konteynerlerinde de yararlanılmaktadır (Wanhill, 2017). Diğer yandan Airbus A380 uçağının dış kanat ve kanatçıklarında, spoilerinde, kuyruk kanatlarında ve motor kaputunda ise Karbo Fiber Katkılı Polimer (Carbon Fiber-Reinforced Polymer-CFRP) malzemeleri tercih edilmektedir (Razali ve diğ., 2017). Diğer kalan bölgelerde ise metal ve alaşımları kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere kompozit malzemelerin sahip

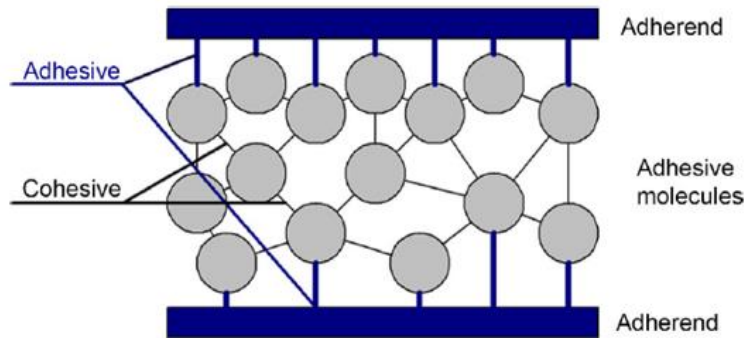
olduğu, hafiflik ve en önemlisi darbelere karşı göstermiş oldukları dirençleri sayesinde uçak endüstrisindeki kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Şekil 2.5’de ise GLARE esaslı FMTK malzemesinden üretilen uçak üst gövde panelinin resmi görülmektedir.



Şekil 2.5. GLARE kompozitinden üretilen üst gövde panelleri (Marsh, 2004)

2.5. FMTK Malzemelerde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Yüzey İşlemleri

Yapıştırma işlemi; iki malzemenin birbirine yapıştırılması ve yapışma yoluyla yeterli iç mukavemetin sağlanması işlemidir. Yapıştırma işlemiyle, gerilmenin yüzey boyunca eşit dağılması ve montajın hizmet ömrü uzatılır. Yapıştırma işlemiyle yüksek yorulma direnci ve dinamik yüklere karşı mukavemet sağlanır. Yapıştırmada üç temel adım vardır. Bunlar; yapıştırıcının yüzeye uygulanması, derz montajı ve kütleme işlemidir. Yapıştırma ile birleştirmede işlemin tekrarlanabilir olması önemlidir. Aksi takdirde en ufak bir yüzey çizdiği işlemlerin birbirleriyle tutarsız olmasına neden olmaktadır. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi yapışma işleminden iki tür kuvvet sorumludur. Bunlar; adezyon (yapışma) ve kohezyon (birbirini tutma) kuvvetleridir.



Şekil 2.6. Yapıştırma işleminde kohezif ve adhezif kuvvetler (Rudawska, 2019)

Yapışma esas olarak, malzemeler arasındaki bir çekim olayıdır. İki malzeme arasında moleküller arası ve atomlar arası meydana gelmektedir. Yapıştırıcı pürüzlü alt tabaka yüzeyine düzgün şekilde nüfuz etmesi iyi bir yapışma ve yüzey ıslanabilirliği temin edilemez. Yüzey ıslanabilirliği esas olarak yüzey enerjisine bağlı bir olaydır. Malzeme yüzey gerilmeleri, yüzey enerjisinden düşük ise iyi bir ıslatmadan söz edilebilir. Bu sebeple metallere göre polimerlerin yapıştırma ile birleştirilmeleri zordur.

Yapıştırma derz mukavemeti, statik ve nihai mukavemet olarak ikiye ayrılır. Statik mukavemet nispeten kolay ölçülür. Fakat kesin bilgi sağlamaz. Lakin mukavemet testlerinde çok kullanılır. Statik mukavemet, uygulanan yüzey işleme yöntemine, yapıştırıcının tipine ve kürüne, yapışma kalınlığına ve bağın boyutlarına , yükleme tipine ve değerine bağlıdır.

Mukavemet testlerinde dikkate alınan bir diğer test yorulma mukavemetidir. Yorulma mukavemeti dinamik testler ile ölçülür. Bu testlerde yapışkan bağ hasar görür ve parçalanır. Hasar olayı, statik mukavemete göre daha düşük yüklerde oluşur. Yorgunluk mukavemeti bazı faktörlere bağlıdır. Bunlar; yapışkanın mekanik özellikleri, alt-tabaka tipi, yüzey ön işlemleri ve yapışkanın kalınlığıdır (Rudawska, 2019).

Yukarıda görüldüğü gibi hem yorulma mukavemeti, hemde statik mukavemet de yüzeye uygulanan yüzey işlemleri önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca yüzeyde iyi bir yapışma ve ıslatılabilirlik için yüzey ön işlemlerinin önemi büyüktür. Yüzeye uygulanan yüzey işlemleri, yapışma tutarlılığının devamlılığı için uygulanması esas olan işlemlerdir. Tezimin konusu olan GLARE esaslı FMTK malzemelerde kullanılan alüminyum esaslı malzemelere uygulanan yüzey işlemleri için bu bölüm ayrıca en önemli bölümü oluşturmaktadır. Bundan sonraki aşamalarda GLARE esaslı FMTK malzemelerde kullanılan alüminyum esaslı metallere uygulanan yüzey işlemlerinden bahsedilecektir.

Alüminyum Alaşımları genelde bağlanma zorluğu olan metaller olarak tanınırlar. Bu yüzden yapıştırma işlemi gerçekleştirilmeden yüzey işlemlerine tabi tutulurlar. Bu yüzey işlemleri olmadan yüzeyde mukavemetli ve uzun ömürlü bir yapışma beklemek olanaksızdır. Havacılık ve uzay endüstrisi, yüzey işleme ve yapıştırma sorunlarını daha ilk aşamalarda gördü ve buna uygun yüzey işleme ve yapıştırma yöntemleri

geliştirdi. Bu sayede geliştirilen eloksal işlemiyle, uzun süre çevresel ve kimyasal etkilere maruz kalmasına rağmen, dayanıklılığını muhafaza eden kompozit katmanlar üretildi. Tablo 2.7’de metaller için en iyi bilinen ve uygulanan yüzey işleme yöntemleri görülmektedir.

Tablo 2.7. Alüminyum Alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri (Kwakernaak ve diğ., 2012)

Yüzey İşlemi Türleri	Yüzey İşlemleri
Kimyasal ve Elektrokimyasal işlemler	Yağ Alma Dağlama (CSA/FPL) Eloksal (SAA, PAA, CAA, PSA)
Mekanik işlemler	Kumlama(adhezif aşınma) Zımparalama Shotpeening Lazer Yüzey İşlemi (LYİ)
CSA - Dağlama (Chromic and Sulphuric Acid Etching) FPL - Dağlama (Forest Products Laboratory Etching) / Fosforik Asit Eloksal (Phosphoric Acid Anodising - PAA) Kromik Asit Eloksal (Chromic Acid Anodising – CAA) Fosforik-Sülfürik Asit Eloksal (Phosphoric-Sulphuric Acid Anodising – PSA)	

Yağ Alma İşlemi tüm yüzey işlemlerinde uygulanan bir yöntemdir. Bu işlem bir bez veya yağ giderme maddesiyle yapılabilir. İşlem bağlanma mukavemetini arttırabilir. Fakat iyi bir mukavemet eldesi için yeterli değildir. Havacılık ve uzay endüstrisinde alüminyumun doğal oksit tabakasını kaldıracak ve yüzey özelliklerini geliştirecek dağlama yüzey işlemi, yağ gidermenin ardından hemen uygulanır. Dağlama işlemi ile iyi bir bağlanma yüzeyi elde edilmiş olur. Bu yüzey işlemine FPL - Dağlama yöntemini örnek olarak gösterebiliriz. FPL - Dağlama ile yüzey işlemi için işlem koşulları önemlidir. Dayanıklılığı arttırmak için bir de eloksal işlem uygulanır. Bu işlem elektrokimyasal bir işlemdir. Bu şekilde toplam yapışma alanı gözenekli yapı tarafından arttırılmış olmaktadır. Eloksal işleme de Fosforik Asit Eloksal (PAA) ve Kromik Asit Eloksal (CAA) örneklerini verebiliriz (Kwakernaak 2012).

2.5.1. Kimyasal Yüzey İşlemleri

FPL – Dağlama (Forest Products Laboratory Etching): Asitle dağlama işlemi, yağ giderme ve eloksal işlem arasında uygulanan bir yüzey hazırlık işlemidir. Üç farklı asitle dağlama işlemi vardır. Bunlar; Kromik-Sülfürik Asit (Chromic Sulphuric Acid - CAE), FPL-Dağlama ve Sülfö-Ferrik Asit (Sulfo Ferric Acid - P2)’dir. Yağ gidermeden sonra yüzeyin mukavemetini geliştirmek için kullanılır. FPL-Dağlama

sonrası bağ dayanıklılığı sorunlarıyla karşılaşılsa da dikromat-sülfürik asit aşınması kullanılan bu yöntem ile, eloksal işlem öncesi endüstride standart uygulanan bir işlem olmuştur. FPL-Dağlama işleminden sonra gözenekli mikroyapılar oluşur. Yüzey üzerinde 40 nm kalınlığında bir oksit tabakası da pasifleştirilmiş olur (Park ve diğ., 2009).

Fosforik Asit Eloksal(PAA): PAA, organik veya kaplanmış malzemelerin sonraki uygulamalarında kullanılan yüzey işleme yöntemidir. PAA ile yüzey işlenerek, sonradan uygulanacak yapıştırma, boyama ve kaplama işlemleri için yüzeyde gözenekli bir oksit tabakası oluşturulur. Bu işlem Havacılık ve uzay endüstrisinin geliştirdiği bir yöntemdir ve esas olarak bu sektörde alüminyum yapılarının hazırlanması için bir ön işlem olarak kullanılmaktadır. PAA gözenekli ve hidrasyona dirençli oksit üretir. Kırılma tokluğunu geliştirir. Bu işlem ile üretilen kaplamalar diğer işlemlere göre daha yüksek gözeneklilik oluşturur.

Kromik Asit Eloksal(CAA): Bu işlem birçok alüminyum alaşımı yüzeyinde açık ile koyu gri arasında değişen oksit filmi oluşturur. İşlem genellikle havacılık ve askeri uygulamalarda kullanılır. Birleşme işlemi gerçekleştirildikten sonra malzeme işlenebilir. Kromik asit korozyona neden olmaz ve bu işlem yorulma özelliklerini bozamaz. Elektrolitte, litre başına 30-100 g kromik asit vardır. Alüminyum alaşımlarında genellikle işlem sıcaklığı 38-42 °C arasında tutulur. Kullanılan voltaj döngüsü, işlem gören alaşıma bağlıdır. Kaplama ortalama 2-5 µm kalınlığındadır. Nispeten yumuşaktır. Korozyon direnci iyidir. Sızdırmaz değildir. Eloksal banyolarında geciktirme işlemi uygulanarak alüminyum içeriği azaltılır ama elektrolit ömrü uzar.

Sülfürik Asit Eloksal(SAA): Alüminyum alaşımlarında renksiz ve şeffaf bir oksit tabakası oluşur. Diğer demir, manganez ve silisyum alaşımları grimsi veya kahverengimsi renkli oksit tabakaları verme eğilimindedir. Eloksal voltajı olarak 17-22 V aralığı ve sıcaklık olarak genellikle ± 5 °C ve 20 °C'dir. Elektrolit konsantrasyonu olarak genellikle 190 g / l \pm 40 g / l H₂SO₄ kullanılır. Koruyucu ve dekoratif bir SAA için 5-30 µm film kalınlığı yeterlidir. Oksit kaplama daha iyi korozyon direnci eldesi için yalıtılmıştır. Alüminyum yüzeyinde nano boyutta gözenekler ve uzantılar oluşturularak tabakalararası yapışma direnci arttırılmaya

çalışılmaktadır. Sert eloksal işleminde 25-250 µm film kalınlığı elde edilir. Elektrolit de - 5 °C sıcaklık altında çalıştırılmaktadır. Sert eloksal tabakası kapatılmayıp, yağlayıcılar ile karıştırılabilir (European Commission, 2006).

2.5.2. Mekanik yüzey işlemleri

Abrazif Aşındırma(Kumlama): Yüzeyin üzerine hava veya sıvı akış olarak katı parçacıkların gönderilmesi işlemidir. Burdaki amaçlar şunlardır;

- Alüminyum üzerindeki tüm boya ve yüzey oksitlerin uzaklaştırılmasıyla temiz bir yüzey sağlamak
- Parlarmayı ve yansımaları azaltarak mat bir katman oluşturmak
- Eloksal işlem için yüzey gözenekliliğini azaltmak
- Yorgunluk direncinin artırılması
- Gerilme korozyonuna karşı direnç sağlamak

Katı parçacıklar silikon, çelik bilya veya başka sert bir malzeme olabilir. Kumlama sonrası oluşturulan yüzey oldukça kaba ve düzensizdir. Fakat yapışma için tek başına yeterli değildir. İşlem parlamayan bir yüzey oluşturmak için de kullanılmaktadır. Yüzeyde istenmeyen oksit veya yabancı maddeleri uzaklaştırarak temiz bir yüzey sağlar. Genellikle 100 mikro inçten fazla 200-250 mikro inç boyutlarında yüzey profilleri önerilmektedir. Çok sayıda kum türü bulunmaktadır. İşlem sırasında hangi taneciklerin kullanılacağı, kullanım amacı, substrat ve masraflara bağlıdır. Yoğun malzemeler daha fazla momentuma sahip oldukları için yüzeye daha fazla enerji verirler (Ebnessajjad, 2006).

Zımparalama: Kaba veya ince zımpara kağıdı kullanılarak yüzeyden parçacık kaldırma yöntemiyle yüzeyi işleme yöntemidir. Zımparalamanın amacı;

- Pürüzlü yüzeyleri düzeltmek
- Daha iyi yapışma sağlayacak yüzeyler elde etmek
- Pas giderimi

İşlem bir zımparalama makinası veya elle zımparalama olarak gerçekleştirilir. Genellikle elle zımparalama yöntemi kullanılır. Fakat eşit olmayan yüzey profilleri

elde etme gibi dezavantajlara da sahiptir. Üniorm bir yüzey için makine ile zımparalama tercih edilir (URL-2).

ShotPeening: Yuvarlak metal topların alüminyum yüzeyine çarptırılmasından oluşan bir yüzey işleme tekniğidir. Metal toplar yüzey üzerinde çekiçleme etkisine sahiptir. Yüzey gözenekliliği eğilimini azaltmaya yardımcı olur. Sonraki işlemlerde daha sağlam bir taban yüzeyi elde etmemizi sağlar (King, 1988).

2.5.3. Yeni Nesil Yüzey İşlemi Lazer

Lazer ile yüzey işleme ideal bir yöntemdir. Lazerin sahip olduğu radyant enerji, opak bir metalin üst yüzey katmanında emilir ve burdaki yüzey atomlarını uyarır. Böylece yüzey ısınır ve işlemeye uygun hale gelir. Aynı zamanda kimyasal olarak temiz bir işlemdir. Lazer ile yüzey işleminin endüstriyel avantajlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Termal olarak etkilenen bölge üzerindeki enerji formu kolaylıkla şekillendirilebilir ve değiştirilebilir. Sıcaklık derinliği, kapsamı ve süresi gibi parametreler kontrol edilebilir.
- Temiz bir işlemdir.
- İş parçasına müdaleye gerek yoktur.
- Çevresel bozulmanın olmaması nedeniyle otomasyon mümkündür.

Avantajlarının ortada olmasına rağmen, lazerin yüzey işlemlerinde aktif olarak kullanılmaması şaşırtıcıdır. Bunun sebebi olarak bu konuda yapılan akıcı mühendislik olmaması gösterilmektedir. Şuanda lazer işleminin kullanıldığı alanlar şunlardır;

- Lazer Isıl İşlem
- Lazer Yüzey Eritme
- Lazer Yüzey Alaşımaları
- Lazer Kaplama
- Parçacık Enjeksiyonu
- Lazer Destekli Soğuk Püskürtme İşlemi
- Yüzey Tekstüre vb. (Steen, 1996), (Steen, 1991).

Alüminyum ve alaşımlarının yüzey işlemlerinde genellikle CO₂, Nd:YAG, Fiber ve Excimer Lazerler kullanılmaktadır. Çoğunlukla CO₂ ve Nd:YAG Lazerler tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımı büyük özgül ısı, yüksek ısı iletkenliği vb. özelliklere sahip olmasından dolayı, lazer parametrelerinin kontrolü, yüzey eritme işlemi sırasında çok önemlidir. Lazer güç yoğunluğu, etkileşim süresi ve tarama hızı v.b. parametreler katılma davranışını etkiler ve bölgenin mikro yapısı üzerinde değişiklik yapabilir (Razavi ve Gordani, 2014).

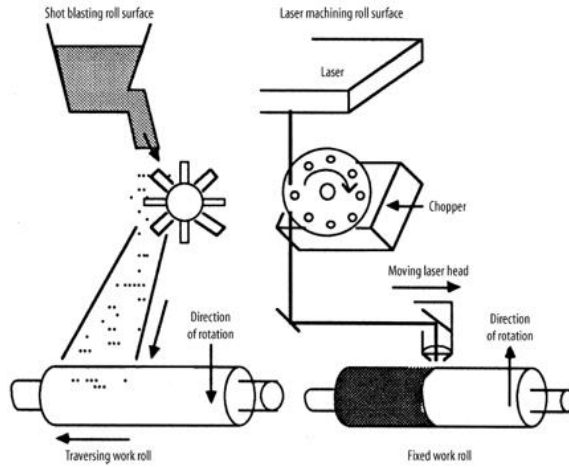
Fiber Lazerler diğer lazerlere göre en yeni lazer türüdür. Hatta birçokları diğer üç lazere göre daha iyi olduğunu savunmaktadır. Fiber Lazerin sunduğu en büyük avantaj son derece kararlı olmasıdır. Diğer lazerler harekete fazla duyarlıdır ve olası bir vurulma, çarpılmada hizalamasını bozabilir. Fakat bir Fiber Lazer, ışınını içerisinde üretmektedir. Yani hassas optiklerin düzgün çalışmasına bağlı değildir. Fiber Lazerin bir başka faydası ışın kalitesinin son derece yüksek olmasıdır. Lazer kesim gibi uygulamalar için mükembeldir. Fiber Lazerin bir diğer yararlı özelliği yüksek yoğunluk ve yüksek güç çıkışlarına rağmen, yüksek verimde kalabilir. Aynı zamanda soğutulması da son derece kolaydır. Son olarak değinebileceğimiz bir başka üstün özelliği, diğer lazerler az miktardaki bir gücü lazere dönüştürebilir. Fakat Fiber Lazerler, gücün %70-80'ini lazere dönüştürebilir. Bunun iki faydası bulunmaktadır. Bunların birinci faydası gücü oldukça verimli kullanabilmektedir. Diğer ikinci faydasıysa gücün, daha az bir kısmı ısı enerjisine dönüşür. Bu da ısının rahat bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar (URL-3).

Lazer yöntemi temassız bir teknik olarak mekanik hasarı en aza indirir ve takım aşınmasını engeller (Çoban ve diğ., 2019). LYİ'de iki yöntem vardır. Bunlar; Lazer Yüzey Sertleştirme ve Lazer Yüzey Eritme yöntemleridir. Lazer Yüzey Sertleştirme işlemiyle malzemenin tribolojik ve korozyon davranışlarında iyileşme olduğu kanıtlanmıştır. Diğer yöntem olan Lazer eritme yöntemiyle malzeme yüzeyinde çok kısa sürede sertlik, tokluk ve aşınma direncinde artış görülmüştür (Montealegre ve diğ., 2010). Bu konuda çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılmaya da devam etmektedir. Tablo 2.8'de bu konuda yapılan çalışmalar listelenmiştir.

Tablo 2.8. Lazer yüzey işleme üzerine yapılan literatür çalışmaları

Çalışmayı Yapanlar	Malzeme Türü	Lazer Türü	Kaynak
Rams ve diğ.	SiC parçacıklarıyla takviye edilmiş Alüminyum Matris Kompozitleri	Diyot Lazer	(Rams ve diğ., 2007)
Chi-Vinh Ngo ve Doo-Man Chun	Alüminyum Alaşımı	Nd:YAG Lazer	(Ngo ve Chun., 2018)
Wijdan H. Muttak ve diğerleri	1050 Alüminyum Alaşımı	Nd:YAG Lazer	(Muttak ve diğ., 2020)
Tianyi Shia ve diğerleri	7050-T451 Alüminyum Alaşımı	120 W MOPA Darbeli Fiber Lazer	(Shi ve diğ., 2019)
Zhaopeng Tong ve diğerleri	AA5083 Alüminyum Alaşımı	ablatif kaplama (LSP) ile lazer şok peening ve ablatif kaplama olmadan lazer şok peening) (LSPwC) uygulama	Tong ve diğ., 2019)
Chuanmin Zhu ve diğerleri	Sac Alüminyum (AA6022-T4), ekstrüzyon (7003-T5) ve dökme Alüminyum(Aural5)	TruMark Station 5020 darbeli Yb: fiber (1062 ± 3 nm dalga boyu) lazer	(Zhu ve diğ., 2019)

Görüldüğü üzere farklı alanlarda LYİ yöntemi araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Lazerin sahip olduğu dalga boyu, frekans, güç vb. parametrelerin kontrolü ile malzeme yüzeyinde istenilen yüzey özellikleri oluşturulabilir. Şekil 2.7’de değirmenlerdeki ruloların yüzey işleme yöntemi görülmektedir.

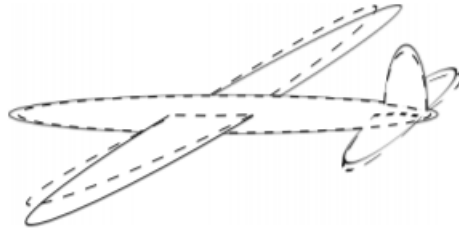


Şekil 2.7. Kumlama ve lazer yönteminin karşılaştırılması (Steen, 1991)

Bu değirmendeki rulolar, presin kavramasını ve yüzeydeki boya akışını sağlamak için dokuludur. Bu işlem için birkaç yöntem vardır. Geleneksel teknik olarak yüzey vurma işlemi söylenebilir. Fakat bu işlem rastgele bir pürüzlülük sağlar. Düzenli bir pürüzlülük için elektrik deşarj işlemi, elektron ışını veya Lazer(CO₂ ve Nd:YAG) işlemi önerilmektedir. Pres şekillendirilebilirliği için pürüzlülük 1 µm'den yüksek olmalı ve dalgalanma düşük olmalıdır. Lazer işlemi bu konuda oldukça başarılı görülmektedir. Oluşturulacak pürüzlülüğün oldukça düzenli ve homojen olması gerekmektedir. Bu konuda CO₂ Lazer tekniği en uygun yöntem olarak keşfedilmiştir. Günümüzde kumlama veya vurma vb. işlemler ile yüzeyde oluşturulabilecek değişiklikler, gelecekte lazer yöntemini ile uygulanabilecektir (Steen, 1991).

2.6. Eğilme Yüklemelerinin FMTK Malzeme Ara Yüzeyine Etkisi

Bir uçağın uçuş hareket rejimi iki sınıfa ayrılabilir. Bu hareket rejimlerinden birincisi doğrusal uçuş, ikincisi de eğrisel uçuştur. Doğrusal uçuşta uçak düz bir çizgide hareket eder ve uçuş yönünde hızlanmadan uçar. Eğrisel uçuşta ise ivmelenerek teğetsel bir hareket yapar. Bu harekete manevra hareketi de denir. Manevra hareketi sırasında aerodinamik ve ataletsel yükler doğrusal uçuştan daha fazladır. Uçağın havada yaptığı manevralar sırasında oluşan dinamik yükler, yere iniş ve kalkışta uçak kanatlarındaki yüksek eğilme yükleri, uçağın yerdeki manevraları sırasında oluşan yükler, uçakta ve kanatlarında farklı dinamik ve eğilme zorlanmalarına sebep olmaktadır (URL-4).



Şekil 2.8. Bir uçağın uçuş sırasında bozulmamış şekli (sürekli çizgi) ve deforme şekli (noktalı çizgi) (Jansson., 2012)

Şekil 2.8'de bir uçağın uçuş sırasındaki esnemeleri görülmektedir. Uçaklarda kullanılan FMTK malzemeler, bu esnemeler karşısında deforme olmadan kalabilmelidir. Bu neden ile eğilme zorlanmaları karşısında FMTK mukavemetin yüksek olması, arayüzeyde iyi bir yapışma veya kilitlenmenin sağlanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu arayüzeydeki mukavemetin değerlendirilmesi üç nokta eğilme deneyi

ile yapılmaktadır. üç nokta eğilme deneylerinde tabakalararası dayanımın yeterli düzeyde çıkmasıyla uçaklarda eğilme yüklerine karşı malzeme dayanıklılığı korunmaktadır.

2.7. Tezin Önemi ve Amacı

Bölüm 2.6'da değindiğimiz bilgiler ışığında, FMTK malzemelerde arayüzeydeki tabakalararası kayma dayanımı özelliğinin, malzemenin deformasyonundaki rolü büyüktür. Malzemedeki metal sac ile reçine emdirilmiş prepreg kumaşın arasında iyi bir yapışmanın veya kilitlemenin sağlanmasında, metallere uygulanan yüzey işlemleri çok önemlidir. Çünkü; metal sac üzerine uygulanan kimyasal veya mekanik yüzey işlemleriyle, yüzeyde istenilen ölçülerde yüzey pürüzlülüğü oluşturulur. Bu metal sac üzerinde oluşturulan yüzey pürüzlülüğü sayesinde metal sac ile reçine emdirilmiş kumaş birbiri içerisine girerek iyi bir kilitleme veya yapışma mekanizması sağlar. Bu sayede arayüzey de iyi bir tabakalararası kayma mukavemeti elde edilmiş olur.

Günümüzde kimyasal olarak, yağ alma, dağlama ve eloksal, mekanik olarak da kumlama, zımparalama ve shot peening işlemleri başarı ile uygulanmaktadır. Kimyasal yöntemler malzeme yüzeyinde istenen yüzey pürüzlülüğü ve kimyasal uyumu sağlamaları nedeni ile daha çok tercih edilmektedir. Fakat kimyasal işlemlerde örneğin; kullanılan kimyasalların insan ve çevreye olan zararları da görmezden gelinemez. Aynı zamanda oldukça pahalı yöntemlerdir. Diğer yandan, mevcut kimyasal ve mekanik işlemlerin, işlem sırasındaki kontrolü de zordur. Bu dezavantajlar, metal yüzeyinde istediğimiz yüzey topografyasının oluşmasını engellemektedir.

Yukarıda bahsedilen tekniklere ek olarak son dönemde üzerinde yoğun çalışmalar gerçekleştirilen yüzey işleme tekniklerinden biride Lazer Yüzey İşleme'dir. Lazer, metal kesme, delme, kaynak ve şekillendirme gibi farklı endüstriyel işlemler için iyi bilinen bir teknolojidir, ek olarak Alüminyum Alaşımları'nda yüzey temizliği, yüzey eritme ve yüzey alaşımlama için de yaygın olarak uygulanmaktadır. Alüminyum Alaşımları'nın yüzeylerinin yapıştırılması için, Lazer ile ön işlemenin temizleme, yapılanma, kimyasal ve morfolojik modifikasyon yoluyla fiziksel ve/veya kimyasal özellikleri geliştirebileceği kanıtlanmıştır. Lazer'ler nerdeyse tüm malzemelerde

güçlerine bağlı olarak yüzeylerde isteğe bağlı geometriler ile yüzey pürüzlülüğü yaratacak kapasitededirler.

Tezin ana özgünlüğü, daha önce FMTK malzemelerin üretimi öncesi kullanılmayan Fiber Lazer ile metal malzeme yüzeyinde kontrollü yüzey pürüzlülükleri ve oksit tabakası oluşturarak, mevcut mekanik yada kimyasal yüzey işlemleri uygulamadan metal/prepreg ara yüzey uyumu sağlanarak FMTK malzemelerin eğilme modülü ve eğilme dayanımı mekanik özelliklerin geliştirilmesi sağlanacaktır. Tezde ayrıca mekanik yada kimyasal yolla yüzeyi hazırlanmış AA 6061-T4 malzemesi içeren FMTK'larda sıcak pres tekniği ile üretilip mekanik özelliklerindeki değişimler karşılaştırılacaktır.

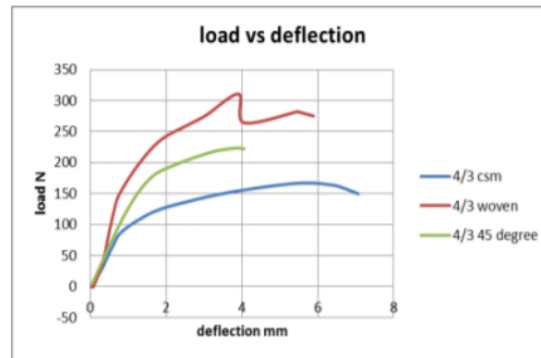
Metal malzemelere uygulanan LYİ'nin ikincil yapıştırma adı verilen metal/metal yada metal/kompozit adhezif yapıştırma bağlantılarında kullanıldığı fakat GLARE esaslı FMTK türü malzemelerde üretim öncesi metal / prepreg ara yüzeyindeki yapışma dayanımını iyileştirmek/geliştirmek için kullanılmadığı tespit edilmiştir. Bu amaçla, tezin diğer bir özgünlüğü olarak havacılık ana yapısal parçalarında kullanılan GLARE esaslı FMTK malzemelerde kullanılan AA 6061-T4 malzemelerin yüzeyleri üretim öncesi optimum Lazer parametrelerinde Fiber Lazer kullanılarak mekanik kilitleme sağlayacak şekilde işlenecektir. Bu sayede metal/prepreg arayüzeyinde optimum yapışma sağlanarak GLARE esaslı FMTK malzemenin tabakalararası kayma dayanımı ve eğilme dayanımı değerlerinin daha da geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca farklı mekanik (Zımparalama), kimyasal (FPL-Dağlama) ve LYİ ile işlenen numunelerden elde edilen üç nokta eğilme sonuçlarından beklenen değerlerin elde edilmesiyle, gerekirse Lazer etkisini arttırmak için tekrarlı LYİ çalışmalarının da gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

3.1. Farklı Fiber Oryantasyonunun FMTK Malzemelerinin Ara Yüzey Dayanımına Etkisi

Bu bölüm de FMTK malzemelerde kullanılan kumaşların fiber oryantasyonunun arayüzey dayanımına etkisini inceleyen araştırmalardan elde edilen bulgulara değinilecektir. Genel olarak yapılan literatür incelemelerinden FMTK malzemelerin eğilme özellikleri ile fiber oryantasyonu arasında yakın bir ilişkinin olduğu saptanmıştır. Bu başlık altında fiber oryantasyonunun ve fiber türünün FMTK malzemelerin prepreg / metal arayüzey dayanımına etkisi, eğilme ve kısa kiriş kayma dayanımı testlerinden elde edilen bulgularla karşılaştırılacaktır.

Mahesh ve Senthil. (2013) çalışmalarında; 4/3 dizilimli Keçe Kumaş (KK), 4 / 3 örgü dokuma kumaş ve 4 / 3 dizilimli 45 ° dikişli keçe kumaş olmak üzere üç farklı FMTK malzemeyi el yatırma yöntemi ile üretmişlerdir. Plakalar oda sıcaklığında bir gün 15 kPa basınç altında kürlendikten sonra 100 °C'de 4 saat fırında kürlenmiştir. Eğilme testine tabi tutulacak numuneler 127 mm uzunluğunda ve 12,7 mm genişliğinde olup 4 / 3 KK - 3,10 mm, 4/3 Dokuma kumaş - 3,48 mm ve 4 / 3 45 ° dikişli keçe kumaş - 4,50 mm kalınlığında 16 : 1 mm alt destekler arası mesafe uzunluğuna göre hazırlanmıştır. Eğilme testleri sonrasında elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. 4 / 3 Konfigürasyonlu, farklı fiber oryantasyonuna sahip FMTK malzemelerinin üç nokta eğilme testi sonrası elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri (Mahesh ve Senthil., 2013)

Şekil 3.1'den genel olarak 4 / 3 örgü dokuma kumaş FMTK malzemelerin daha yüksek yük değerlerini karşıladığı bununla birlikte maksimum yük değerinde yer değiştirme

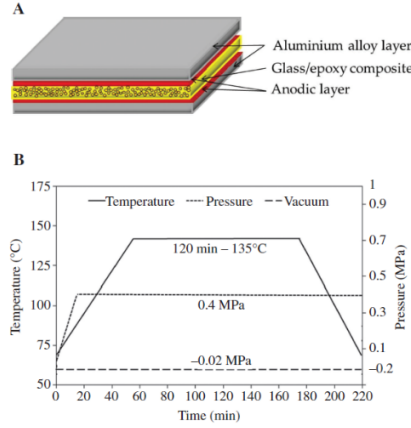
miktarının azaldığı tespit edilmiştir. 0 ° ve 90 ° fiber dizilim yönlerinde örgü dokuma tabakaya sahip olması nedeni ile eğilme yük değerlerinin arttığı belirtilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen yük-yer değiştirme eğrilerinden elde edilen maksimum kopma yükü, maksimum eğilme dayanımı ve yer değiştirme değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablo 3.1’de GLARE esaslı FMTK malzemelerin eğilme davranışlarının, esas olarak fiber hacim yüzdesine ve yönelime bağlı olduğu saptanmıştır. Eğilme dayanımı değerlerinde, örgü dokumanın diğer iki fiber takviyeli FMTK malzemesine göre daha yüksek değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Ek olarak Tablo 3.1’deki diğer bulgular incelendiğinde örgü dokuma tabakalı FMTK numunesinin daha yüksek bükülme mukavemetine sahip olduğu değerler ile ispatlanmaktadır. Ayrıca yer değiştirmelere baktığımızda örgü dokuma ve 45 ° dikişli keçe kumaş malzemelerinde hemen hemen aynı değerler bulunmuştur. KK’ya göre daha düşük yer değiştirme değerleri elde edilmiştir.

Tablo 3.1. 4 / 3 konfigürasyonlu farklı fiber oryantasyonuna sahip FMTK malzemelerinin üç nokta eğilme testi sonrası elde edilen eğilme özellikleri (Mahesh ve Senthil., 2013)

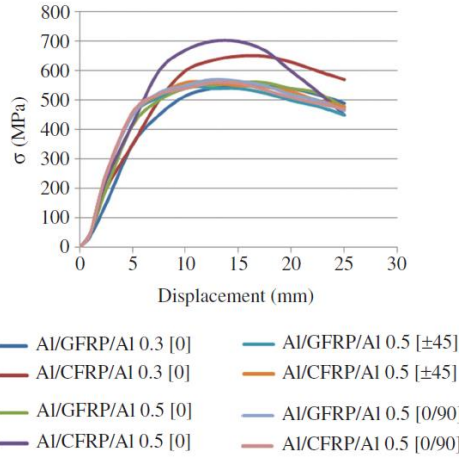
Oryantasyon	Maks. Kopma Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (N / mm ²)	Yer Değiştirme (mm)	Kalınlık (mm)	Fiber hacim(%)
KK	167,13	320,719	5,75	3,10	60
Örgü Dokuma Kumaş	310,60	308,62	3,90	3,48	60
45 ° Dikişli Keçe Kumaş	223,33	208	3,86	4,50	60

Ostapiuk ve diğ. (2017) yapmış oldukları çalışmada; üç nokta eğilme testine maruz kalan FMTK malzemelerin çatlama ve kırılma mekanizmalarını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada bir Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Al/GFRP/Al) ve Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (Al/CFRP/Al) ile yüksek mukavemetli 0,3 / 0,5 mm kalınlıklı AA 2024-T3 kullanmışlardır. Cam olarak yüksek mukavemetli R - Tipi (0,25 mm kalınlıkta) elyaf tercih edilirken, karbon fiberler AS7J (0,13 mm kalınlıkta) türü tercih edilmiştir. Reçine olarak da epoksi kullanılmıştır. Polimer kompozit tabaka içerisindeki elyaf içeriği hacimce % 60’dır. AA 2024 - T3 levha yüzeyleri CAA ile ön yüzey iyileştirme işlemine tabi tutulmuştur. Böylece polimer matrisli kompozit katmanlar ile alüminyum arasındaki ara yüzey yapışma dayanımı geliştirilmiştir. Daha

sonra anotlanmış Alüminyum levhaların yüzeyine, oksidasyonu önlemek için epoksi bazlı astar uygulanmış ve böylece tabakalararası dayanım özelliklerini geliştirmek amaçlanmıştır. FMTK otoklav üretim süreci ve FMTK konfigürasyonu Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. FMTK otoklav üretim süreci ve FMTK konfigürasyonu (Ostapiuk ve diğ., 2017)

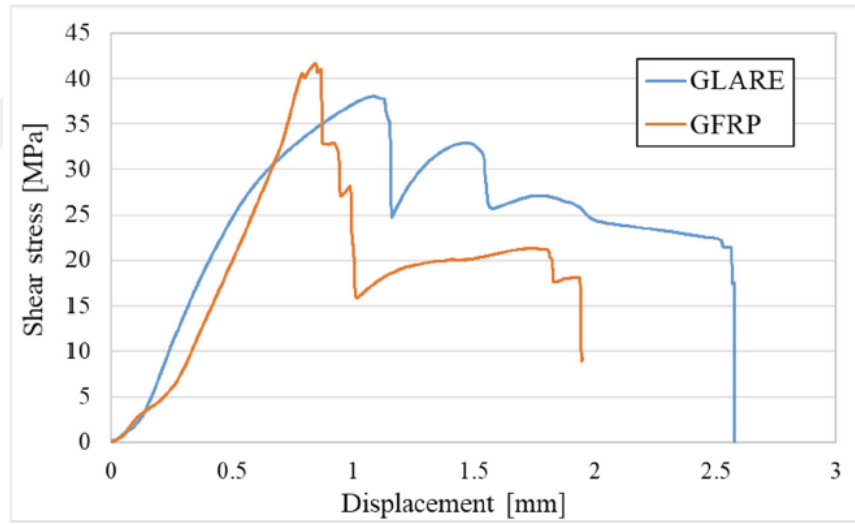


Şekil 3.3. FMTK'ların $[0^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$ ve $[90^\circ / 0^\circ]$ katman konfigürasyonlarındaki cam ve karbon liflerine dayalı gerilim-yer değiştirme eğrileri (Ostapiuk ve diğ., 2017)

Şekil 3.3’de FMTK'ların $[0^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$ ve $[90^\circ / 0^\circ]$ katman konfigürasyonlarındaki cam ve karbon liflerine dayalı gerilim-yer değiştirme eğrileri görülmektedir. İlk başta alüminyum kalınlığının artmasının, malzemelerin gerilme dayanımı değerlerini arttırdığı görülmektedir. Aynı zamanda, kompozit tabaka fiber oryantasyonunda 0° hariç $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ / 90^\circ]$ ve $[90^\circ / 0^\circ]$ yönelimlerinde gerilme-yer değiştirme eğrilerinde hemen hemen hiçbir fark olmadığı belirtilmiştir. Bu sebep

ile fiber oryantasyonunun FMTK malzeme özelliklerin de ikincil bir etki gösterdiği anlaşılmaktadır.

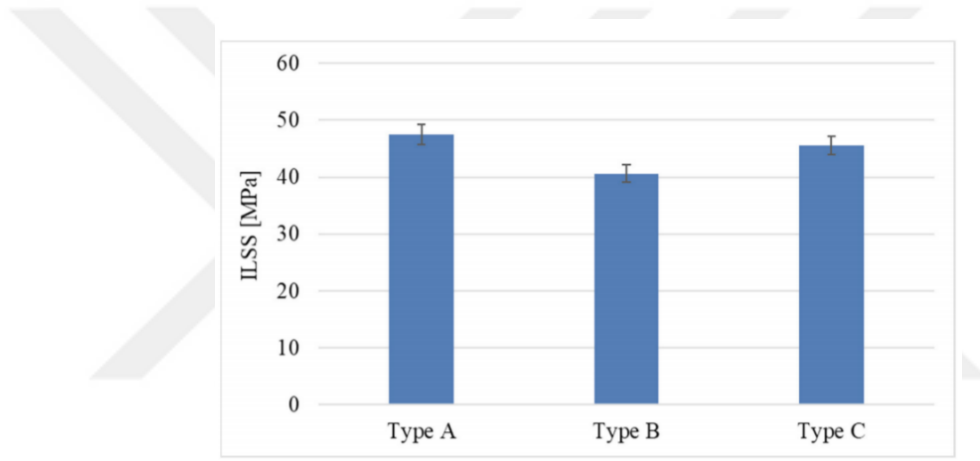
Bellini. (2020) çalışmalarında, GLARE esaslı FMTK malzemelerin mekanik davranışı, geleneksel GFRP malzeme ile karşılaştırılmıştır. Her iki numune de üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. GLARE esaslı FMTK malzemede 0,3 mm kalınlığında üç kat alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Kompozit malzemeler vakumlu torba yöntemiyle aynı üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Her iki tür kompozit malzeme, ASTM (American Society for Testing and Materials - Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu) D2344 standardına göre Kısa Kiriş Eğilme Testine (ILSS - Interlaminar shear strength / tabakalararası kayma dayanımı) tabi tutulmuştur. Vakum torbalama tekniği ile üretilen ve kısa kiriş eğilme testine tabi tutulan iki farklı kompozit numunenin yüklemeye bağlı olarak kayma gerilmesi / yer değiştirme eğrisi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kısa kiriş eğilme testinden elde edilen kayma gerilmesi/yer değiştirme eğrileri (Bellini., 2020)

Şekil 3.4'den genel olarak, tabakalararası kayma dayanımı değerleri geleneksel GFRP kompozit numunesinde biraz daha yüksek çıktığı fakat ilk kırılmadan sonra GLARE esaslı FMTK malzemenin daha yüksek bir kesme gerilmesi gösterdiği saptanmıştır. Sonuç olarak GLARE esaslı FMTK malzemenin yüksek bir performansa sahip olduğu geleneksel GFRP kompozitin ise daha kırılğan bir davranış sergilediği tespit edilmiştir.

Bellini ve diğ. (2019) çalışmalarında hem kompozit / metal arayüzeyinin hem de katman kalınlığının, CARALL esaslı FMTK malzemelerin tabakalararası kayma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Tip A nolu numunelerin arayüzeyinde yapısal bir yapıştırıcı kullanılırken, metal olarak tek bir alüminyum plaka kullanılmıştır. Tip B nolu numunelerde, sadece prepreg reçinesi ile tek bir alüminyum plaka kullanılırken, Tip C nolu numunelerde ise yine yapısal yapıştırıcı kullanılmış ama bu sefer iki alüminyum levha kullanılmıştır. Üretimleri, geleneksel vakumlu torbalama yöntemiyle yapılmıştır. Üretilen CARALL esaslı FMTK malzemelerin tabakalararası kayma dayanımına etkisi ASTM D2344 test yöntemi kullanılarak, üç nokta eğilme testi ile ölçülmüş ve sonuçları Şekil 3.5’de verilmiştir.

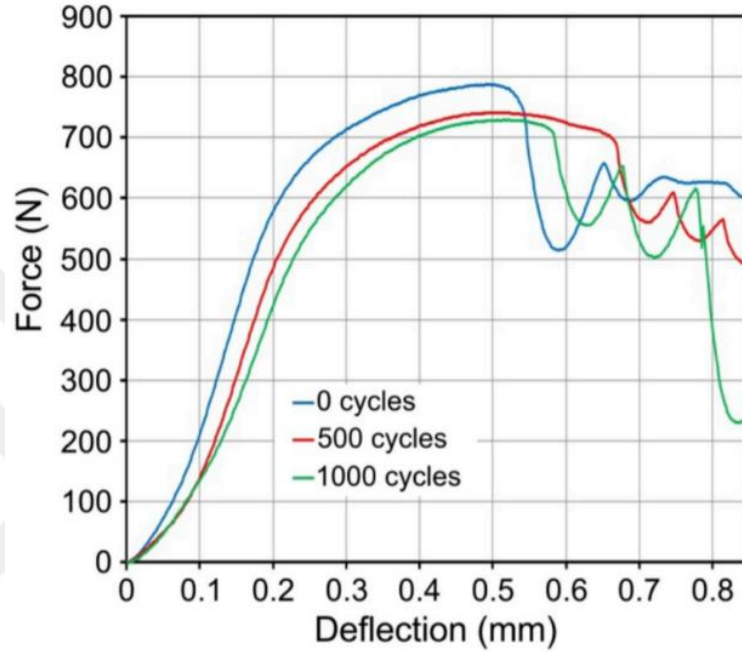


Şekil 3.5. Tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinin grafiksel gösterimi (Bellini ve diğ., 2019)

Şekil 3.5’de elde edilen veriler incelendiğinde en yüksek tabakalararası kayma dayanımı değerlerinin Tip A nolu numunede çıktığı görülmektedir. Yani yapısal yapıştırıcı ile üretilen FMTK malzemelerin, reçine ile yapılan CARALL esaslı FMTK malzemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Tip C nolu numunelerin tabakalararası kayma dayanımı değerlerinin ise Tip A ve B nolu numunelerin tabakalararası kayma dayanımı değerlerinin arasında değerlere sahip olduğu belirtilmiştir. CARALL esaslı FMTK malzemedeki tabaka sayısının tabakalararası kayma dayanımı değerlerine etkisinin çok düşük olduğu görülmüştür.

Kubit ve diğ. (2019) FMTK malzemeye uygulanan termal çevrimlerin malzemenin eğilme özelliklerine etkisini araştırmak için üç nokta eğilme testleri yapmışlardır. Çalışmalarında 0,4 mm kalınlıkta 2024-T3 temperlenmiş alüminyum alaşımı ve 0,36

mm kalınlıklı cam esaslı prepreg malzemelerini, 3 / 2 diziliminde FMTK malzemesini üretmede kullanmışlardır. FMTK malzemeler otoklav yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Şekil 3.6'da farklı termal çevrime maruz bırakılmış FMTK malzemelerin üç nokta eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-yer değıştirme eğrileri gösterilmiştir.

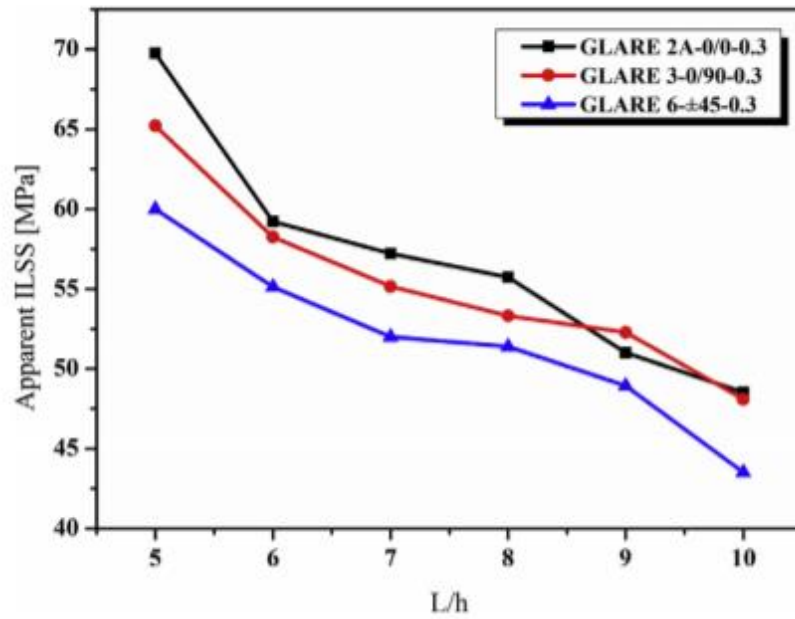


Şekil 3.6. Farklı termal çevrime maruz bırakılmış FMTK malzemelerin üç nokta eğilme testleri sonucunda elde edilen yük-yer değıştirme eğrileri (Kubit ve diğ., 2019)

Şekil 3.6'da 500 ve 1000 termal çevrime maruz kalan FMTK numuneler ile termal yaşlandırılmamış FMTK numunelerin yük-yer değıştirme eğrileri görülmektedir. Şekil 3.6'dan genel olarak iki temel sonuç elde edilmiştir; birincisi, 0 - 0,2 mm yer değıştirme aralığında, yarı doğrusal giden eğrilerde termal yaşlandırılmamış FMTK numunelerin daha yüksek rijitliğe sahip olduğudur. 500 ve 1000 termal çevrime maruz kalan FMTK numunelerde ise malzemenin daha fazla termal çevrime maruz bırakılmasının rijitlik değerlerini kayda değer bir şekilde düşürdüğüdür. İkinci çıkarım ise maksimum yük değerlerinin karşılaştırmasında elde edilmiştir. Termal çevrim sayısının artırılması ile FMTK malzemelerin maksimum yük değerlerinin yaklaşık olarak 800 N'dan 720 N değerlerine düştüğü tespit edilmiştir.

Liu ve diğ. (2016) yapmış oldukları çalışmada, 3 / 2 dizimli GLARE esaslı FMTK malzemelerin, üç nokta eğilme testi altında uzunluk/kalınlık (L / h) oranlarıyla tabakalararası kayma dayanımlarındaki değışimleri incelemiştir. Çalışmada 0,3

mm kalınlığında AA 2024-T3 ve 0,125 mm kalınlıkta S4 - cam/epoksi prepeg malzemeleri kullanılmıştır. Üç farklı numune hazırlanmıştır. Bunlar; GLARE 2A – 0 ° / 0 ° - 0,3, GLARE 3 – 0 ° / 90 ° - 0,3 ve GLARE 6 - ± 45 ° - 0,3 numuneleridir. Alüminyum Alaşımlı levhalar otoklav kürlemesinden önce aseton ile yağdan arındırma, alkali temizleme, fosforik asit elektrolitinde anotlama vb. işlemlerden geçirilmiştir. Otoklav yöntemiyle üretildikten sonra üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Üç farklı GLARE esaslı FMTK malzemelerin tabakalararası kayma dayanımı değerlerine L / h oranının etkisi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



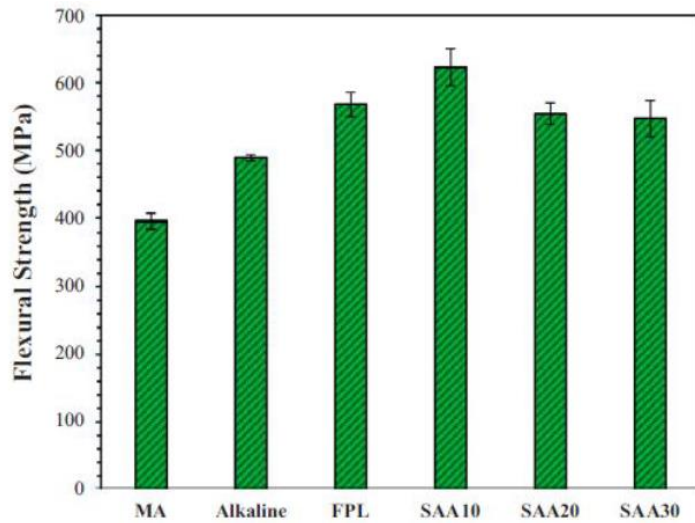
Şekil 3.7. Üç farklı GLARE esaslı FMTK malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımı değerlerine L/h oranının etkisi (Liu ve diğ., 2016)

Şekil 3.7’den genel olarak artan L / h oranıyla tüm GLARE esaslı FMTK malzemelerinin tabakalararası kayma dayanımı değerlerinin kayda değer bir şekilde düştüğü tespit edilmiştir. Özellikle GLARE 6 kodlu numunenin tabakalararası kayma dayanımı değerlerinin diğer tür GLARE esaslı FMTK malzemelere göre ciddi olarak azaldığı, bunun nedeninin ise FMTK malzemedeki prepeg kumaşların fiber dizilimiyle alakalı olduğu belirtilmiştir. GLARE 2A ve GLARE 3 kodlu FMTK numunelerde fiber oryantasyonu 0 ° ve 0 ° / 90 ° yönlerinde olmasından dolayı uygulanan yükü GLARE 6 kodlu numunelerden daha fazla karşılamışlardır. Tabiki yük uygulama doğrultusunda fiberlerin olmayışı tüm GLARE esaslı FMTK malzemelerde yükün alüminyum malzeme tarafından karşılanmasına sebep olmuştur. Ayrıca üretim öncesi

alüminyum malzemeye uygulanan kimyasal ön yüzey işlemleri metal/prepreg arayüzeyini geliştirdiği, fakat artan L / h oranlarıyla gerekli dayanımı sergileyemediği belirlenmiştir.

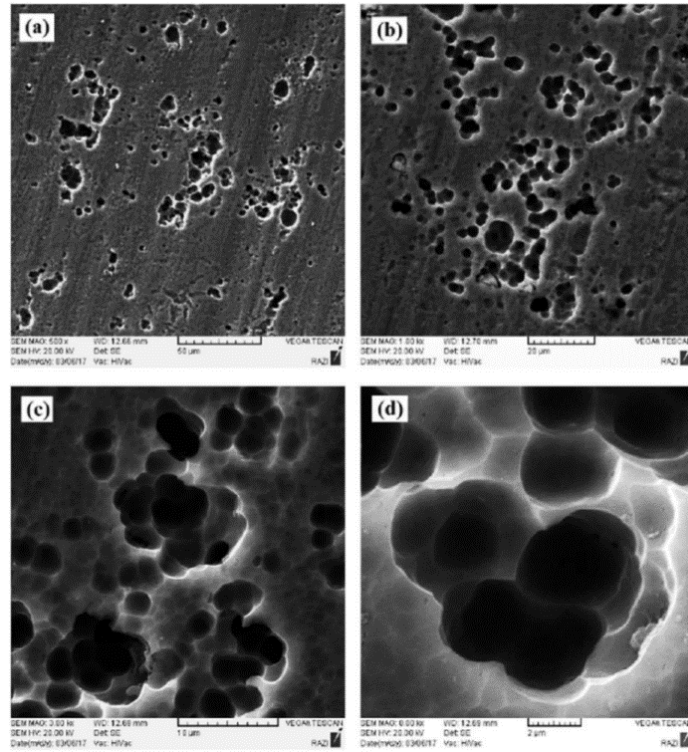
3.2. Farklı Kimyasal Ve Mekanik İşlemlerin FMTK Malzemelerinin Ara yüzey Dayanımına Etkisi

Aghamohammadi ve diğ. (2018) yapmış olduğu çalışmada AA 2024-T3 serisine uygulanan yüzey işlemlerinin Mekanik Aşındırma (MA), Alkalin Dağlama (Alkaline etching), FPL- Dağlama ve SAA basalt fiber ile takviye edilmiş epoksi reçineli fiber metal tabakalı kompozitlerin (FMTK) tabakalararası dayanımlarına etkilerini incelemiştir. 2 / 1 dizimli FMTK'e gerçekleştirilen üç nokta eğilme deneylerinden elde edilen eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde mekanik aşındırma işlemine göre alüminyum yüzeylere uygulanan kimyasal dağlama ve SAA işlemlerinin malzemenin eğilme dayanımı değerlerini iyileştirdiği saptanmıştır. Özellikle Şekil 3.8'den görüldüğü üzere 10 dakika süre ile uygulanan SAA işleme tekniği ile dayanım değerlerinin en yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir. Özellikle Alkalin Dağlama ve MA ile yüzeyleri işlenmiş AA 2024-T3 içeren FMTK malzemelerde metal ile reçine emdirilmiş fiber tabakalar arasında yeterli yapışmanın sağlanamadığı bu nedenle de delaminasyon hasarının oluştuğu belirlenmiştir. Eğilme testleri sonrasında yapılan hasar yüzeyi incelemelerinde ise her iki yüzey işlemi içinde numunelerde adhezif hasarlanmanın gözlemlendiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı ortamda yüzeyi işlenmiş AA 2024-T3 içeren 2/1 dizimli FMTK malzemelerin eğilme dayanımı değerleri (Aghamohammadi ve diğ., 2018)

Özellikle FPL - Dağlama ve SAA işlemlerinin uygulanması ile FMTK malzemelerinin eğilme dayanımı değerlerinin kayda değer bir şekilde arttığı bunun nedeninin ise dağlama ve anotlama işlemleri ile metal yüzeyde oluşturulan mikro ölçekli çukurcuklar (Şekil 3.9) ile üretim esnasında epoksi reçinenin bu çukurcuklara dolmasından kaynaklandığı bununda metal / reçine emdirilmiş kumaş ara yüzeyinde alternatif bir mekanik kilitleme sağladığı belirtilmiştir. Eğilme testleri sonrasında yapılan hasar yüzeyi incelemelerinde ise her iki yüzey işlemi içinde numunelerde hem adhezif hemde kohezif hasarlanmanın gözlendiği tespit edilmiştir. Son olarak metal yüzeyine uygulanan SAA işleminin süresinin FMTK malzemesinin eğilme dayanımı değerlerine etkisinin incelenmesidir. Yapılan incelemelerde SAA işleminin süresinin arttırılması ile metal yüzeyinde oluşan mikro ölçekli çukurcukların sayısının ve bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. Fakat optimum mekanik kilitlemenin sağlanması için yüzeyde oluşturulan mikro ölçekli çukurcukların kontrollü bir seviyede tutulması gerekmektedir. SAA işleminin 10 dakika uygulanması ile yaklaşık yüzey pürüzlülüğü değerlerinin $0,3 \mu m$ değerlerinde olduğu ve bu yüzey pürüzlülüğü değerlerinin malzemenin eğilme dayanımını arttırmak için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 3.9. 10 dakika süresince metal yüzeyine uygulanan SAA işlemi sonrası yüzeyde oluşan mikro ölçekli çukurcuklar (Aghamohammadi ve diğ., 2018)

Laban ve Mahdi (2017) gerçekleştirdikleri çalışmada S - cam fiber epoksi tabakalı kompozit ile farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş AA 2024-T3 malzemesini adeziv olarak yapıştırıp daha sonra Mod I tabakalararası kırılma tokluğunu tespit etmişlerdir. Alüminyum malzemesine dört farklı yüzey işlemi (Alkalin Dağlama, PAA, Oksijen ve Nitrojen Gazları ile Plazma ve Nd-YAG Lazer ile yüzeyde mikro delikler oluşturma) uygulanmıştır. Yüzeyi farklı ortamlarda işlenmiş alüminyum ile $[0^\circ / -45^\circ / 90^\circ / +45^\circ]$ dizimli cam fiber epoksi kompozit VARTM (Vacuum Assited Resin Transfer Molding) tekniği kullanılarak birleştirilmiş ve daha sonra ASTM D5528 standardına göre çift konsol kiriş testi (Double Cantilever Beam - DCB) uygulanmıştır. AA 2024-T3 malzemesine uygulanan yüzey işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Tablo 3.2’de Alkalin + PAA ile işleme tekniğinde yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı, yüzey pürüzlülüğü değerinin artması ile de çatlak ilerlemesi için gerekli olan enerjinin artması gerektiği belirtilmiştir (Park ve diğ., 2010). Fakat bununla birlikte gerçekleştirilen bir başka çalışmada Alkalin + dağlama yüzey işlemi ile yaklaşık olarak 15 μm alüminyum tabaka kaybına yol açtığı bununda özellikle FMTK’larda kullanılan 0,2 – 0,4 mm kalınlığındaki Alüminyum plakalar için kayda değer bir kayıp olduğu belirtilmektedir (Bjorgum ve diğ., 2003), (Sinmazçelik ve diğ., 2011). Tablo 3.2 detaylı incelendiğinde Lazer ile Alüminyum yüzeyinde oluşturulan mikro delikler ile en yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilirken Plazma ve Alkalin + PAA tekniğine göre en düşük yüzey enerjisi elde edildiği saptanmıştır. Bu yüzden de çalışmada yüzey pürüzlülüğünün değiştirilmeden yüzey enerjisinin artırılması için laser+plasma işlemi yapılması gerekliliğini belirtmişlerdir.

Tablo 3.2. AA 2024-T3 malzemesine uygulanan yüzey işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri (Laban ve Mahdi., 2017)

Parametre	Yağ giderme	O ₂ plazma	N ₂ plazma	Alkalin+PAA	Lazer
Yüzey pürüzlülüğü (μm)	1,34±0,03	1,41±0,02	1,30±0,06	1,61±0,04	2,36±0,04
Temas açısı ($^\circ$)	104,80±0,27	28,66±0,53	26,77±0,04	23,97±0,98	34±0,87
Yüzey enerjisi (mJ/m ²)	19,32±1,24	71,74±1,97	72,94±1,88	76,88±1,34	65,63±1,76

Tablo 3.3’de farklı yüzey işleme teknikleri ile yüzeyi işlenmiş AA 2024-T3 yapıştırılmış S-cam fiber epoksi kompozitin çift konsol kiriş testi sonuçları verilmiştir. Tablo 3.3’den azot ortamında yapılan Plazma ile yüzey işlemlerinin oksijen ortamında yapılan işlemlere daha yüksek kırılma tokluğu değerleri sağladığı bunun sebebinin ise azotun alüminyum yüzeyinde antibakteriyel dayanımı arttırmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Plazma işlemlerine göre alkalın + PAA işleminin yüksek yüzey pürüzlülüğü, ıslatma kabiliyeti ve yüksek yüzey enerjisi gibi parametreler nedeni ile malzemenin kırılma tokluğu değerlerini iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte Lazer işleminin ise yaklaşık olarak Plasma tekniği ile işlenen numunelerin kırılma tokluğu değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada delikler arası mesafenin, deliğin çapının ve derinliğinin kırılma tokluğu üzerinde etki edebileceğini belirtmiş olup bu konuda inceleme gerçekleştirilmemiştir. Son olarak Lazer sonrası yapılan azot ortamındaki Plazma işleminde ise kırılma tokluğu değerlerinde kayda değer bir artış sağlandığı tespit etmişlerdir. Bunun nedenin ise Lazer ile açılan mikro mekanik kilitleme sağlayacak delik bölgelerindeki kontaminasyonların azot ortamı ile oluşmasının önlendiğinden kaynaklandığı öngörülmüştür.

Tablo 3.3. Farklı yüzey işleme teknikleri ile yüzeyi işlenmiş AA 2024-T3 yapıştırılmış S-cam fiber epoksi kompozitin çift konsol kiriş testi sonuçları (Laban ve Mahdi., 2017)

Yüzey işleme	Kırılma tokluğu (J/ m ²)	Enerji (mJ)	Hasar tipi
Yağ giderme	35,86±3,34	76,98±2,08	Adhezif
O ₂ plazma	75,77±4,21	119,74±3,44	Adhezif
N ₂ plazma	96,12±5,52	143,39±3,52	Adhezif
Alkalın+PAA	131,46±3,05	272,69±2,22	Karışık
Lazer	83,31±4,23	144,34±2,40	Adhezif
Lazer+ N ₂ plazma	133,80±3,08	192,60±2,86	Karışık

Park ve diğ. (2010) yapmış olduğu çalışmada üretim esnasında FMTK malzemelerin, AA 2024-T3 ve cam prepreg arayüzünde uygun yapışma için metal malzeme yüzeyine farklı işlemler (Yağ Giderme, Zımparalama+PAA (1000 grit + PAA, 220 grit + PAA ve 100 grit + PAA), FPL - Dağlama+PAA (FPL + PAA), Alkali dağlama+PAA (alkali + PAA)) uygulamışlardır. AA 2024-T3 alüminyum alaşımına uygulanan işlemler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülükleri (Ra), temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir. Tablo 3.4 incelendiğinde metal yüzeyinde Yağ Giderme işlemine göre da yüksek bir yüzey pürüzlülüğü kimyasal ve Zımparalama

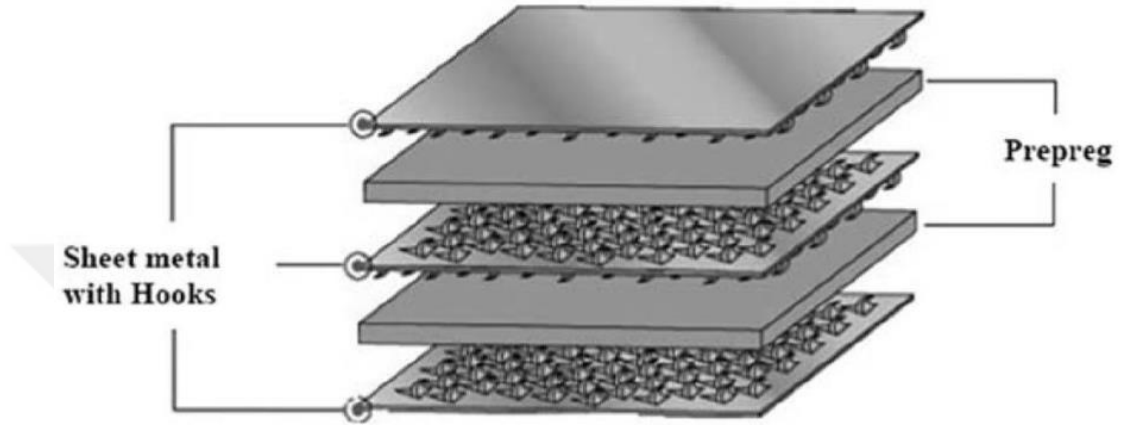
işlemlerinde elde edilmiştir. Burada Zımparalama işleminde en önemli kusur işlem sonrası yüzeyde kalan istenmeyen kalıntı parçacıklardır. Ek olarak kimyasal yüzey işlemlerinde ise arzu edilen yüzey pürüzlülük değerlerine ve bununla birlikte super ıslatılabilme kabiliyetine sahip yüzeyler elde edilmiştir. Islatma kabiliyeti iyi bir yapışma için ön gerekliliktir. Tablo 3.4’te belirtilen yüzey işlemlerinden sonra ayrıca SAA kimyasal işlemlerde uygulanarak yüzeyde dengeli bir oksit tabakası oluşturulmuştur.

Tablo 3.4. 2024-T3 alüminyum alaşımına uygulanan işlemler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlükleri (R_a), temas açısı ve yüzey enerjisi değerleri (Park ve diğ., 2010)

Yüzey işlemi	R_a (μm)	Temas açısı ($^\circ$) De-iyonize su	Yüzey enerjisi (mJ/m^2)
Yağ giderme	0,31±0,04	61,33±4,79	45,15±3,79
Zımpara 1000 grit	0,41±0,04	69,15±4,86	43,77±2,34
Zımpara 220 grit	0,64±0,01	78,95±4,31	41,56±0,92
Zımpara 100 grit	1,14±0,05	71±4,11	52,16±0,68
FPL dağlama	0,46±0,08	24,39±4,31	71,21±1,60
Alkalin dağlama	0,58±0,02	33,97±4,13	69,09±3,43

Alüminyum yüzeylerine yapılan yüzey iyileştirme işlemlerinden sonra 4 / 3 dizilimli FMTK malzemeler vakum torbasına alınarak otoklav altında üretilmişlerdir. Üretilen FMTK malzemelerin Tabakalararası Kayma Dayanımının (İnterlaminar Shear Strength - ILSS) ölçülmesi için kısa kiriş eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile tabakalararası kayma dayanımı değerleri karşılaştırılmış ve yüzey pürüzlülüğünün 0,6 – 0,7 μm arasında olduğu durumlarda kayma dayanımı değerlerinin maksimum değerlere ulaştığı saptanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün az olması yada yüzeyde kirliliğe sebebiyet verebilecek kalıntılar metalin reçine ile ıslatılabilirliğinin azalmasına ve arayüzde boşlukların oluşmasına sebep olmaktadır. Buda FMTK malzemelerin kayma dayanımı değerlerinin düşmesine sebep olmaktadır. Elde edilen bir başka sonuç ise Zımparalama işleminde grit boyutudur. Grit boyutu azaldıkça numunelerin kayma dayanımı değerlerinin yükseldiği saptanmıştır. Zımparalama işleminin arzu edilen kayma dayanımı değerlerinin elde edilmesi için yeterli olmadığı ayrıca SAA işleminin gerekliliği vurgulanmıştır.

Nong ve diğ. (2018) çalışmalarında, havacılıkta kullanılan GLARE esaslı FMTK malzeme arayüzeyinde mekanik kilitlenme sağlamak için, üretim öncesi metal malzeme yüzeylerine CNC tezgahında nano ve mikro boyutta eğri ve düz kancalar (Şekil 3.10) oluşturularak malzemenin statik performansını geliştirmeyi amaçlamışlardır.



Şekil 3.10. 2024-T3 alüminyum yüzeyine CNC tezgahında oluşturulan nano/mikro düz yada eğri kanca mikro kitleme geometrileri (Nong ve diğ., 2018)

Referans GLARE esaslı FMTK dizilimi esas alınarak oluşturulmuş GLARE esaslı FMTK üç kat 0,2 – 0,5 mm kalınlığında AA 2024 - T3 ve iki kat 0,25 mm kalınlığında, termoset reçine ile emdirilmiş S2 - cam tek yönlü elyaflardan oluşmaktadır. Numunelere çekme testi, düzlem içi kayma testi ve üç nokta eğilme testi uygulanmıştır. Tüm testlerde en yüksek dayanım değerlerinin düz nano kancalara sahip GLARE esaslı FMTK numunelerde elde edildiği tespit edilmiştir. Düz nano kancaların reçine emdirilmiş cam elyaf kumaşla daha iyi tutunma sağladığı eğri nano kancalı numunelerde ise eğri nano kancalar nedeni ile ara yüzeyde bazı bölgelerde kancaların elyaflara nüfuz edemediği, elyafların var olan boşluklarda ve kancaların çevresinde bükülme gösterdiği gözlemlenmiştir. Buna çözüm olarak daha düşük lif yoğunluğuna sahip fiberglas örgünün kullanılması ve kancaların daha düz pim profiliyle yeniden tasarlanması gerektiği söylenmiştir. Mikro kancalı numunelerde ise, nano kancalı numunelerden daha kötü dayanım değerlerinin elde edildiği bunun sebebinin ise mikro kancaların kurlenme sırasında basınç altında ezilmesi veya kırılması, aynı zamanda iç hava boşluklarının oluşumundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Benzer olarak, düz geometriye sahip olan mikro kancalar bu grupta yine en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca önemli bir diğer bulguda, yapılan maliyet

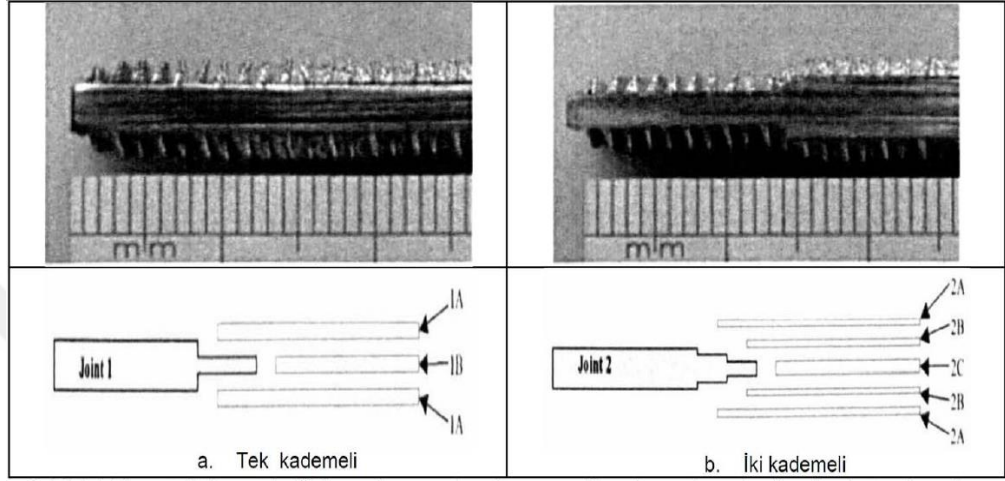
analizlerinden mekanik kilitleme sağlayan kancalara sahip FMTK, Kumlama ve Sol-Jel (Br-127 yapıştırıcı) teknikleri ile üretilen standart bir GLARE esaslı FMTK malzemeye göre daha ucuza üretilmiştir. GLARE esaslı FMTK malzemeye kanca oluşturma işlemi tamamen mekanik iken, standart FMTK malzemedeki koruyucu ekipman ve kullanım için önemli yatırım gerektiren tehlikeli asit çözeltileri (SAA, CAA, PAA, vb.) kullanılmaktadır. Bu hususa dayanarak, mekanik yolla yüzeyi modifiye edilmiş bir GLARE esaslı FMTK malzeme, kimyasal yolla yüzeyi modifiye edilmiş bir GLARE esaslı FMTK malzeme ile karşılaştırıldığında önemli maliyet tasarrufu sağlamaktadır.

Wu ve diğ. (2014) çalışmalarında termoplastik matrisli FMTK malzemelerin uygun maliyet ve yüksek performansta üretimi için yeni bir üretim tekniği olan vakum destekli reçine infüzyonu yöntemi ile üretimler gerçekleştirmişlerdir. FMTK üretimlerinden önce AA 2024-T3 malzeme yüzeyine, yapışma dayanımını arttırmak için farklı yüzey işlemleri uygulanmıştır; Solvent ile Yağ Giderme, O₂ yada N₂ ortamında Plazma, 180, 320 yada 500 grit ile Mekanik Aşındırma, % 2, % 5, % 10 ve % 15 ağırlıkça NaOH çözeltisinde Yağ Giderme.

Tabakalararası Kayma Dayanımı (İnterlaminar Shear Strength - ILSS) testlerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde Alkalin ortamda yapılan Yağ Giderme işlemleri (ağırlıkça % 10 NaOH – 41,63 N/mm²) uygulanan FMTK numunelerde daha yüksek kayma dayanımı değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Ek olarak hem 180 grit ile Mekanik Aşındırma ve sonrasında ağırlıkça %10 NaOH çözeltisinde Yağ Giderme işlemi yapıldığında ise kayma dayanımı değerlerinin 42.39 N / mm² değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir.

Smith. (2016) yaptığı çalışmada, metal ile kompozit malzemelerin vakum torbalama tekniği ile üretimi öncesi Paslanmaz Çelik malzemelerin yüzeyine mekanik yollarla açılan çıkıntılar (Şekil 3.11-a ve b) metal / kompozit bağlantılarının çekme dayanımına etkisini incelemiştir. İki tür bağlantı göz önünde bulundurulmuştur; tek kademeli (Şekil 3.11-a) ve iki kademeli (Şekil 3.11-b). Yüzeyinde mikro boyutta çıkıntılara sahip Paslanmaz Çelik ile (0 / 90) S cam fiber kumaşlar vakum torbalama tekniği ile polyster reçine ile önce 25 °C’de 19 saat daha sonra ise 40 °C’de 21 saat kürlenmiş ve numuneler üretilmiştir.

Üretilen numunelere uygulanan çekme testleri sonucunda yüzeyinde mikro çıkıntılara sahip olmayan Zımparalanmış ve SAA kimyasal işlemi uygulanmış numunelere göre yük taşıma kapasitesinin tek kademeli numuneler için 21 kN değerinden 28 kN değerine yükseldiği, iki kademeli numuneler için ise 27 kN değerlerinden 37 kN değerlerine yükseldiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.11. Vakum torbalama tekniği ile üretim öncesi Paslanmaz Çelik malzemede mekanik yolla oluşturulan mikro çıkıntılar ve bağlantı türleri (Smith., 2016)

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzemeler

Gerçekleştirilen çalışmada 2 / 1 dizimli GLARE esaslı FMTK malzemelerin metal sac plakası 6xxx alüminyum alaşımı serisinden AA 6061-T4 olarak seçilmesi, belirtilen malzemenin işlenebilirliği, korozyona karşı dirençli olması ve mekanik özelliklerinin iyi olmasından kaynaklanmaktadır. GLARE esaslı FMTK malzemelerde kullanılan AA 6061-T4 malzemesi 0.8 mm kalınlığında ve 500 mm x 500 mm ölçülerinde kesilmiştir. AA 6061-T4 malzemesinin teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. AA6061-T4 malzemesinin spesifik özellikleri (URL-5)

Özellikler	Değerler
Elastiklik Modülü (GPa)	68,9
Kayma Modülü (GPa)	26
Akma Dayanımı (MPa)	145
Kopma Dayanımı (MPa)	241
Poisson oranı	0,33
Yoğunluk (g/cm ³)	2,70

Üretilmesi hedeflenen GLARE esaslı FMTK malzemeler de kullanılan prepreg kumaşlar ise yurtiçi bir firmadan tedarik edilmiş olup S-2 cam elyaf 200 gr/m² plain kumaş ve F-1564 epoksi reçine içermektedir. S-2 cam elyaf için spesifik özellikler Tablo 4.2’de verilmiştir. FMTK malzemeyi oluşturan hem metal sac hemde prepreg kumaşlar havacılık malzemeleri olup özellikle lazer yüzey işleme etkisinin metal / prepreg kumaş ara yüzeyine etkisi araştırılmış olup, elde edilen çıktıların sektörel uygulamalar için ışık tutacağı düşünülmektedir.

Tablo 4.2. S2 Cam elyafın spesifik özellikleri (URL-6)

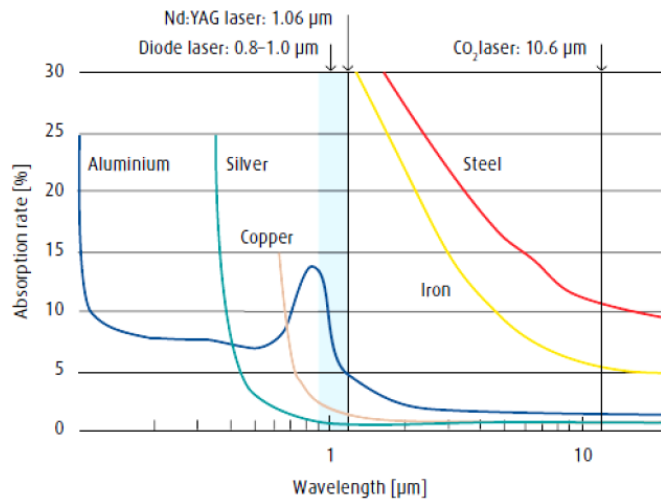
Özellikler	S-2 cam elyaf
Yoğunluk (g/cm ³)	2,46-2,49
Refrakto indeksi	1,521
Yumuşama noktası (°C)	1056
Tavlama noktası (°C)	816
Gerilme noktası (°C)	766
Gerilme Mukavemeti (MPa) (23 °C)	4890
Young Modülü (GPa) (23 °C)	86,9
Spesifik Gerilme Dayanımı x10 ³ m	220
Spesifik Gerilme Modülü x 10 ⁶ m	3,9

4.2. AA 6061-T4 Alüminyum Malzeme Yüzeylerine Uygulanan Ön Yüzey İşlemleri

4.2.1. AA 6061-T4 Alüminyum malzemelerin fiber lazer ile ön yüzey işlemleri

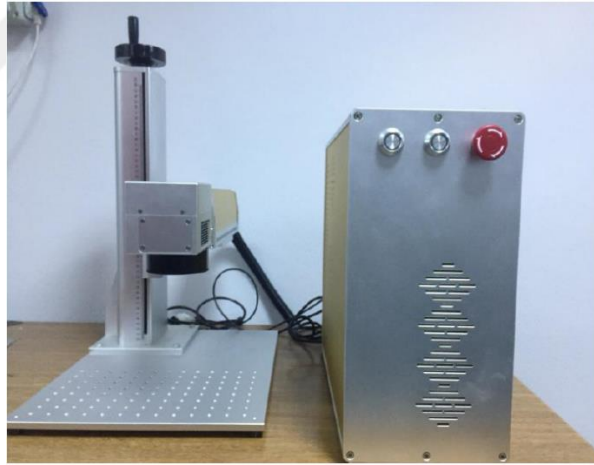
Lazer yüzey mühendisliği malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmenin bir başka yoludur. Lazer kesim, kaynak, tavlama, eritme ve sertleştirme vb. işlemler Lazer yüzey mühendisliğinin dallarını oluşturmaktadır. Lazer yüzey eritme çok kısa sürede malzeme yüzeyinde sertlik, tokluk ve aşınma direnci sağlar (Montealegre ve diğ., 2010). Günümüz Lazer teknolojilerinin geldiği noktada lazer demetinin yüzeye aktardığı ısı miktarı farklı atım sürelerinde, atım enerjileri ve tekrarlama oranlarında olmak üzere birçok farklı parametre ile kontrol edilebilmektedir. Bunlara ek olarak malzemelerin lazer dalgaboyuna verdiği tepkide farklılık göstermektedir. Bu nedenle malzemeye bağlı olarak uygun lazer parametrelerinin belirlenmesi sonuç üründe yüksek kalite elde edilebilmesi açısından çok önemlidir.

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda Lazer malzeme işlemede taşıyıcı yük fiber ($\lambda=1\mu\text{m}$) ve karbondioksit ($(\lambda=10\mu\text{m})$ CO₂) Lazerlerdedir. Lazerin endüstriye girmesi ile yüksek güçlerde çıkış verme kabiliyetlerinden dolayı CO₂ Lazerler birçok alanda kullanılırken, günümüzde bunların yerini verim ve yine yüksek çıkış verebilmelerinden dolayı Fiber Lazerler almıştır. Gerçekleştirilen bu tezde alüminyum yüzeylerin işlenmesi nispeten yüksek soğurma katsayısına (Şekil 4.1) sahip olduğu için Fiber Lazer ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı metaller için lazerlerin soğurma spektrumu

Çalışmalarda kullanılan Fiber Lazer 50 W ortalama gücünde ve 1,06 μm dalgaboyuna sahip olup 100 ns'lik atımlar üretebilmektedir. Maksimum atım enerjisi 1 mJ olup 10 kW'lık tepe gücüne ulaşabilmektedir. Kullanılacak Fiber Lazer 20 kHz - 80 kHz tekraralama oranlarında lazer atımları üretebilmektedir. Lazer demetinin malzeme yüzeyine aktarılması 2D tarayıcı ayna sistemi ve F-Theta mercekten oluşan galvo tarama sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Hali hazırda var olan sistemde 160 mm odak uzaklığına sahip F-Theta mercek bulunmaktadır. Bu mercek 100 x 100 mm²'lik bir alanda bilgisayar kontrollü olarak işlem yapma imkânı vermektedir. Lazer çizgileri arası 80 μm olarak ayarlanmıştır. Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi bünyesinde bulunan Havacılık Malzemeleri Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarı (HAMAG) altyapısında var olan özellikleri yukarıda verilen Fiber Lazere ait görüntü Şekil 4.2'de verilmektedir. Tablo 4.3'te AA 6061-T4 alüminyum sac plakalara farklı parametreler altında Fiber Lazer ile uygulanan lazer yüzey işlemleri belirtilen cihazda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'de Fiber Lazer ile işlenen AA 6061-T4 malzemesinin görüntüsü görülmektedir.



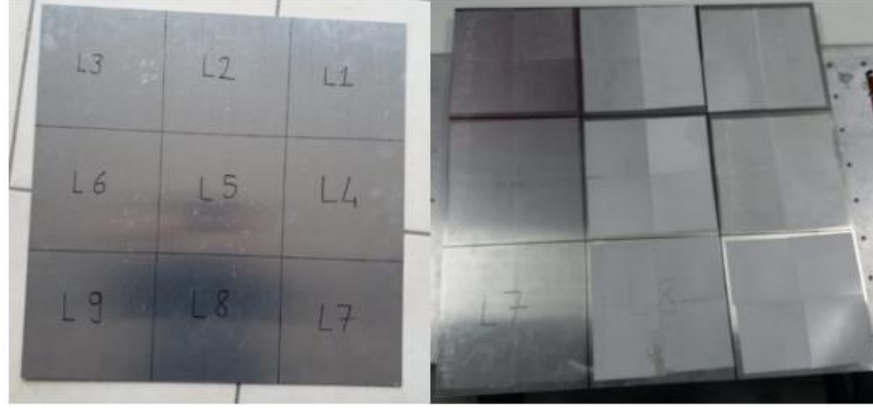
Şekil 4.2. Alüminyum malzemelerin yüzey işleminde kullanılacak 50 W gücünde Fiber Lazer

Tablo 4.3. Alüminyum yüzeyine uygulanan Fiber Lazer parametreleri

Numune kodu	Frekans (kHz)	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)
L1-Lazer İşlemi	20	10	400
L2-Lazer İşlemi	20	30	800
L3-Lazer İşlemi	20	50	1600
L4-Lazer İşlemi	50	10	400
L5-Lazer İşlemi	50	30	800
L6-Lazer İşlemi	50	50	1600

Tablo 4.3. (Devam) Alüminyum yüzeyine uygulanan Fiber Lazer parametreleri

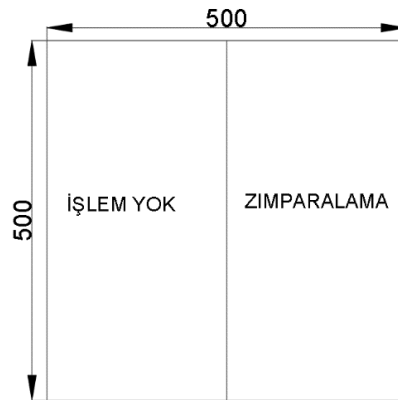
L7-Lazer İşlemi	80	10	400
L8-Lazer İşlemi	80	30	800
L9-Lazer İşlemi	80	50	1600



Şekil 4.3. Yüzeyleri farklı fiber lazer parametreleri ile işlenmiş alüminyum sac plakalar (a - yüzeyi fiber lazer ile işlenmemiş alüminyum sac plaka b - yüzeyi farklı parametreler ile işlenmiş alüminyum sac plaka)

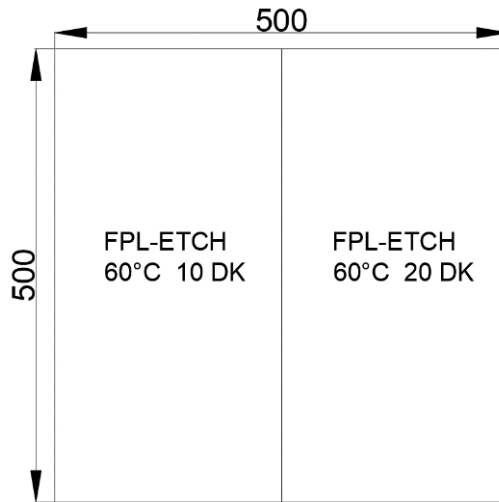
4.2.2. AA 6061-T4 Alüminyum Malzemelerin Kimyasal ve Mekanik Yöntemlerle Ön Yüzey İşlemleri

500 x 500 x 0.8 mm³ ölçülerindeki Alüminyum sac plakaların 250 x 500 mm'lik bölümüne hiçbir işlem uygulanmamıştır. Bu İşlemsiz numune referans numune olarak kabul edilmiştir. Diğer 250 x 500 mm'lik kısmına ise Zımparalama işlemleri uygulanmıştır. Zımparalama işlemi malzeme yüzeyine yaklaşık beş dakika boyunca P400C gritlik zımpara kağıdı ile uygulanmıştır. Alüminyum sac plakanın teknik resim görüntüsü Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Zımparalanmış ve İşlemsiz Alüminyum sac plakanın teknik resim görüntüsü

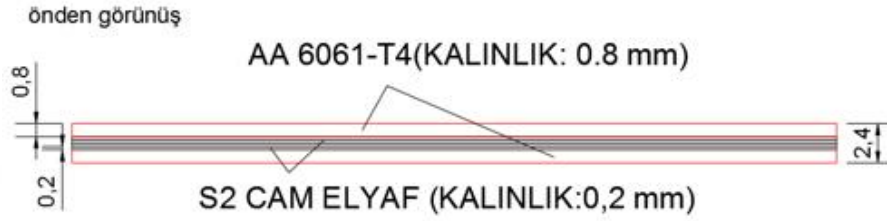
Alüminyum, oksijen ile karşılaştığında hızlı bir şekilde okside olur ve üzerinde ince (~ 10 nm) bir Alüminyum oksit ve/veya hidroksit tabakası oluşmaktadır. Meydana gelen doğal oksit tabakası kararsızdır ve genellikle zayıf kimyasal bağlara yol açar. Kuvvetli ve iyi bir yapışma için uygun kimyasal işlemler gerekmektedir (Prolongo ve Urena., 2009), (Withy ve diğ., 2006) 500 mm x 500 mm ebatında AA 6061 - T4 Alüminyum malzemesine uygulanmış FPL - Dağlama işlemi alüminyum tabakada gözenekli bir oksit yapısı oluşturarak prepreg ile yapışma / bağlanma kuvvetlerinin artırılması planlanmıştır. Böylece uygulanacak kimyasal işlemle alüminyum alaşımının yüzey yapısı değiştirilerek farklı yüzeyler arasında kuvvetli yapışma sağlanabilecektir. Çalışmada kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıktadır. İşlem öncesi 500 mm x 500 mm ebatındaki Alüminyum plakalar yüzeyindeki safsızlıkları gidermek amacı ile saf aseton ile oda sıcaklığında yıkanmıştır. Aseton ile temizlenen plakalar hemen, 30 kısım (su) H₂O, 10 kısım (sülfürik asit) H₂SO₄ ve 2 kısım (Sodyum di kromat) Na₂Cr₂O₇'den oluşacak şekilde hazırlanan 60 °C sıcaklığındaki FPL - Dağlama çözeltisi (250 mm x 500 mm) içerisine 10 dk. ve 20 dk. sürelerinde daldırılmıştır. Plakalar banyodan çıkartılıp saf su püskürtülerek yıkanmış ve 60 °C sıcaklıkta havası alınmış etüv de 1 saat süre ile kurutulmuştur. Çözelti banyoları 25 cm x 33 cm x 35 cm ebatlarında tasarlanmıştır. FPL - Dağlama işlemleri Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği'ndeki laboratuvar da yapılmıştır.



Şekil 4.5. FPL - Dağlama çözeltisinde 60 °C sıcaklığında 10 dk ve 20 dk sürelerde bekletilen sac plakanın teknik resim görüntüsü

4.3. FMTK Malzemelerin Sıcak Pres Tekniği İle Üretimi

Farklı parametrelerde Fiber Lazer kullanılarak yüzeyleri işlenmiş 500 mm x 500 mm x 0,8 mm boyutundaki AA 6061-T4 sac plakalar ve epoksi reçine emdirilmiş S - 2 cam fiber takviyeli prepregler (500 mm x 500 mm boyutunda), 2 / 1 dizilimli GLARE esaslı FMTK üretimi (Şekil 4.6) için hazırlanarak çalışma sıcaklığı 300 °C kapasiteli, 15 ton pres gücüne sahip ısıtmalı hidrolik prese yerleştirilmiştir.



a



b

Şekil 4.6. (a) FMTK dizilimi (b) sıcak pres makinası

GLARE esaslı FMTK üretimleri yurt içi bir firmadan hizmet alımı yoluyla yaptırılmıştır. 2 / 1 dizilimli GLARE esaslı FMTK malzemelerde kullanılacak metal sac plakalar ve prepreglerin sıcak prese yerleştirme dizilimi Şekil 4.6 - a ve GLARE esaslı FMTK üretimde kullanılan ısıtmalı hidrolik pres Şekil 4.6 - b'de gösterilmiştir. Kullanılan sürekli tek yönlü S - 2 cam fiber takviyeli epoksi reçineli prepregler 0 ° / 90 ° örgü kumaş şeklindedir. Prepreglerin alt ve üst katlarına ise birer kat 0.8 mm et kalınlığına sahip AA 6061-T4 sac plakalar yerleştirilerek 2 / 1 dizilimli FMTK elde edilmiştir. Sıcak Pres Tekniği ile GLARE esaslı FMTK üretimleri 125 °C sıcaklıkta

150 kPa basınç altında 1 saat sürede gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi sonrasında numuneler sıcak presten çıkartılıp oda sıcaklığında bekletilmiştir. Elde edilen FMTK numunelerin kalınlıkları $2,26 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ olmuştur. Isıtmalı hidrolik presin pres baskı alanı 500 mm x 500 mm olup, dijital termokupl ve sıcaklık ayarlamasına sahiptir. Ek olarak geleneksel yüzey işlemleri (mekanik-kimyasal) uygulanmış AA 6061-T4 sac plakalar ihtiva eden 2 / 1 dizilimli GLARE esaslı FMTK malzemelerin mekanik özelliklerinin saptanabilmesi ve karşılaştırma yapılabilmesi için benzer proses parametreleri altında Sıcak Pres Tekniği ile üretilmiştir. Her setten 1 adet 500 mm x 500 mm boyutuna sahip GLARE esaslı FMTK malzeme üretilmiş (toplamda 4 GLARE esaslı FMTK plaka) ve daha sonra GLARE esaslı FMTK malzemeler üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmak için uygun standartlarda belirtilen boyutlara su jeti kullanılarak kesilmiştir.

4.4. Üç Nokta Eğilme Testi

Sıcak Pres Tekniği ile üretilmiş olan 2/1 dizilimli hem geleneksel yöntemler ile yüzeyleri işlenmiş hemde farklı fiber lazer parametreleri ile yüzeyleri işlenmiş GLARE esaslı FMTK malzemelerin, eğilme dayanımı, eğilme modülü ve eğilme miktarı değerleri gibi eğilme özelliklerini ölçmek için ASTM D790-15 (2016) standardına göre üç nokta eğilme testleri uygulanmıştır. Üç nokta eğilme testi için GLARE esaslı FMTK numunelerin kalınlığı referans alınarak numune kalınlığının 40 katı büyüklüğünde alt destek mesafesi belirlenmiştir. Numune genişliği 13,4 mm olarak seçilmiştir. Numune boyu ise alt destek mesafelerinin %20 kadar fazlası olarak belirlenmiştir. GLARE esaslı FMTK numuneler standartta belirtilen boyutta hazırlanması için sıcak pres üretiminden sonra su jeti ile kesim işlemine tabi tutulmuştur. Yükleme ve destekleme ekipmanı olarak 5 mm çapa sahip üç rijit rulman kullanılacaktır. Yüzeyle lokal zarar vermemek için çubukların ve numunenin arasına 12,7 mm genişliğinde kauçuk baskı yastıkları yerleştirilmiştir. Üç nokta eğilme testlerinde elde edilen eğilme özelliklerinin belirlenebilmesi için en az 5 adet numune her bir deney seti için teste tabi tutulmuştur. GLARE esaslı FMTK numuneleri TÜBİTAK-MAM da 30 KN kapasiteli ZWICK marka universal test cihazın da 5 mm/dk hızda 96 mm span mesafesinde test edilmiştir. ASTM D790-15 (2016) standardında belirtilen Denklem (1-3)'e göre eğilme gerilmesi, eğilme gerinimi ve elastik modül değerleri hesaplanmıştır;

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (4.2)$$

$$E_B = \frac{mL^3}{4bd^3} \quad (4.3)$$

Denklem (1-3)'de σ_f eğilme gerilmesini (MPa), P yük-yerdeğiştirme grafiğindeki belirli bir yükü (N), L destek aralığını (mm), b numune genişliğini (mm), d numune kalınlığını (mm), ε_f dış yüzeydeki gerinimi (mm/mm), D maksimum sapma miktarını (mm), E_B eğmedeki elastik modülü (MPa) m yük-yer değiştirme eğrisindeki tanjant sapma eğimini (N/mm) vermektedir.

4.5. İşlenen Yüzeylerin Optik Mikroskop İle İncelenmesi

AA 6061 - T4 malzemesinden İşlemsiz, Zımparalanmış ve farklı Lazer parametreleri ile (güç, frekans, hız) yüzeyleri işlenmiş numuneler hazırlanarak yüzey görüntüleri "Olympus BX51 model ışık mikroskobu ile incelenmiştir (Şekil 4.7). 20x büyütme oranında yüzey ve kesitlerden alınan görüntüler ile Lazerle işlemede malzeme etkileşimi, Lazer aşındırma seviyeleri ve Lazer ile açılan kanalların değişimleri incelenmiştir.



Şekil 4.7. Olympus BX51 model optik mikroskop

4.6. Kontak Açısı Ölçümü

AA 6061 - T4 malzemesinden İşlemsiz, Zımparalanmış, FPL - Dağlama ve farklı parametrelerle (güç, frekans, hız) yüzeyleri Fiber Lazer ile işlenmiş numuneler hazırlanarak yüzey enerjilerinin ve pürüzlülüklerinin durumuna göre ortaya çıkan kontak açısı değişimlerini incelemek için $\pm 2^\circ$ sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazı (Şekil 4.8) ile ölçümler alınmıştır.



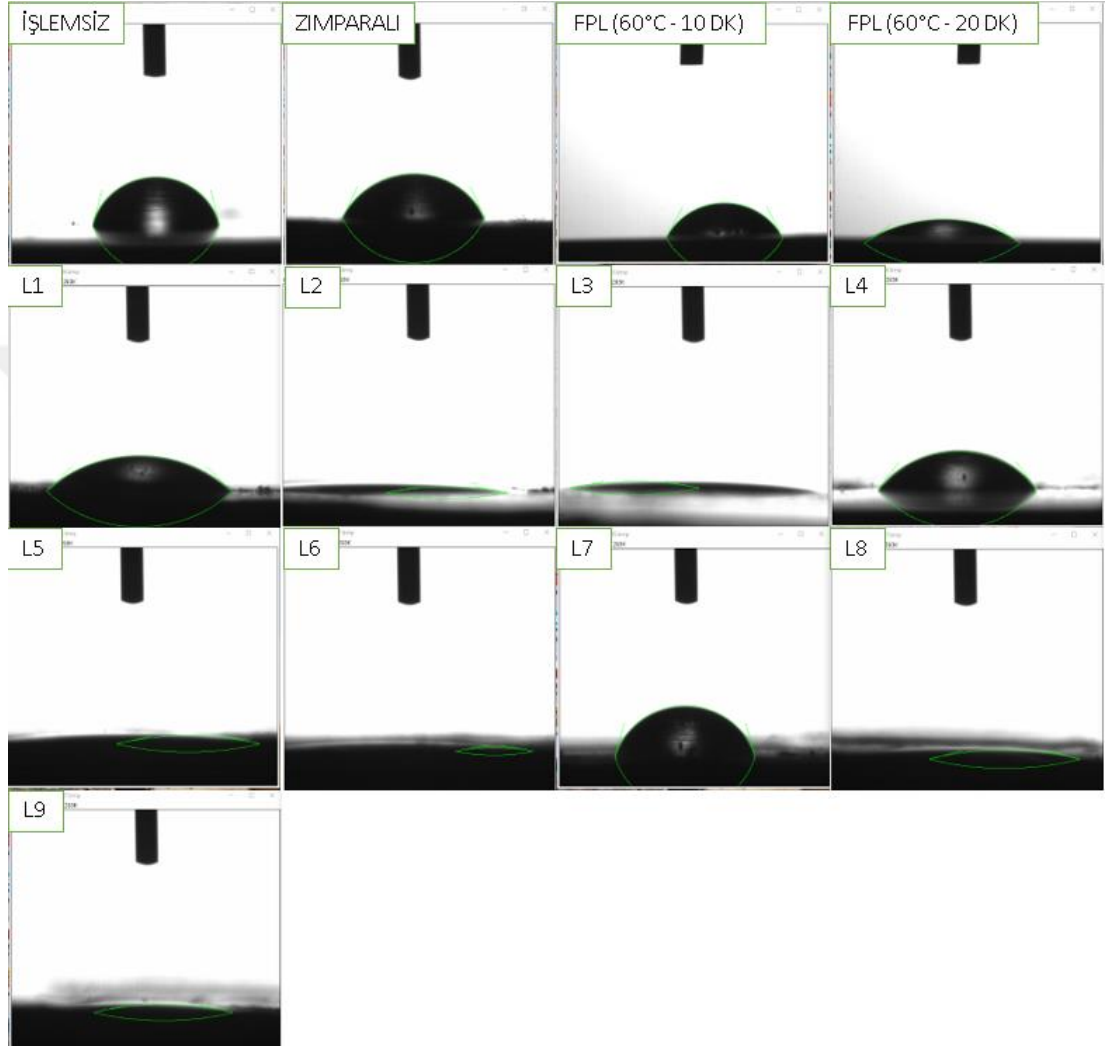
Şekil 4.8. Kontak açısı ölçüm cihazı

4.7. Profilometre Ölçümü

AA6061 - T4 malzemesi, İşlemsiz, Zımparalanmış, FPL - Dağlama ve farklı Lazer parametreleri kullanılarak yüzeyi Fiber Lazer yöntemiyle işlenmiş olarak üretilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri için bir Ambios xi-100 plus cihazı ile profilometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Yüzeyinde Temas Açısı Ölçümlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 5.1. Zımparalama, FPL - Dağlama ve farklı Lazer parametreleriyle işlenmiş AA 6061-T4 yüzeyinden alınmış temas açısı görüntüleri

Şekil 5.1’de farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş numuneler hazırlanarak yüzey enerjilerinin ve pürüzlülüklerinin durumuna göre ortaya çıkan kontak açısı değişimlerini incelemek için $\pm 2^\circ$ sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazı ile ölçümler alınmıştır. Kontak açısı ölçümleri yüzeyin ıslanabilirlik derecesini ve yüzey gerilimini tespit etmek için kullanılmaktadır. Temas açısının büyümesi yüzeyin hidrofobik (ıslatmaz) ve yüzey geriliminin yüksek olmasını, temas açısının 0° ’ye yaklaşması ise yüzeyin hidrofilik (ıslatılabilirlik) ve yüzey geriliminin düşük olmasını göstermektedir. Yüzeyin iyi ıslatılabilirliği ve yüzey geriliminin düşük olması, reçine

ve malzeme arasında iyi bir yapışmanın sağlanmasını arttırmaktadır. Kontak açısı ölçümleri arayüzey yapışması hakkında bilgi edinmemizi sağlayabilmektedir.

Tablo 5.1. Zımparalama, FPL - Dağlama ve farklı Lazer parametreleriyle işlenmiş AA 6061-T4 yüzeyinden alınmış temas açısı değerleri

Kontak Açısı	Ölçüm	Kontak Açısı	Ölçüm
İşlemsiz	74,107 ° ± 0,35	L4	51,75 ° ± 1,12
Zımparalı	60 ° ± 3	L5	12,29 ° ± 0,3
FPL (60 °C–10 dk)	61,38 ° ± 0,33	L6	10,03 ° ± 0,6
FPL (60 °C–20 dk)	32,55 ° ± 0,5	L7	70,62 ° ± 2,5
L1	42,73 ° ± 0,63	L8	15,51 ° ± 2,13
L2	10,42 °	L9	12,05 ° ± 0,72
L3	13,76 ° ± 2,4		

Tablo 5.1 incelendiğinde LYİ'nin diğer işlemlere göre yüzey ıslatılabilirliğini arttırdığı ve yüzeyi daha hidrofilik hale getirdiği görülmektedir. Ngo ve Chun. (2018) saf Alüminyum yüzeyine darbeli Lazer ablasyon işlemi ve son işlem(kaynar suda bekletme veya normal ısı işlem) uygulayarak yüzeyin hidrofilik ve hidrofobik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Sonuç olarak Lazer işlemi sonrası kaynar suda bekletilen Alüminyum yüzeyi hidrofilik hale gelmiştir. Jingnan Zhao ve diğ. (2019) saf Alüminyum plaka yüzeyine darbeli Lazer yöntemini kullanarak tek yatay veya ızgara desen şeklinde yüzey işlemi uygulayarak yüzeyin ıslatılabilirliğini arttırmayı amaçlamışlardır. Izgara desenli işlenen yüzey, tek yatay işlenen yüzeye göre daha hidrofilik hale gelmiştir. Bunun yanında Zımparalama işlemleri ve İşlemsiz numunelerin temas açısı ölçümlerine baktığımızda lazer işlemeye göre yüzeyin daha hidrofobik kaldığı saptanmıştır. FPL - Dağlama yönteminde de işlem süresinin artmasıyla yüzey daha hidrofilik hal aldysada, yüzeyi lazerle işlenmiş göre daha hidrofobik kalmıştır. Özellikle Lazer yöntemiyle yüzey işlemede kullanılan lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinin sırasıyla 10 W ve 400 mm/s'den 30-50 W ve 800-1600 mm/s değerlerine yükseltilmesiyle, alüminyum yüzeyi ani bir hidrofilik yüzey halini almıştır. Aynı zamanda LYİ de frekans değerlerinin artması yüzeyi tam tersine daha hidrofobik yapmıştır. LYİ de lazer gücü ve tarama hızı parametreleri değerlerinin iyi kullanılması yüzeyin durumunu etkilemektedir.

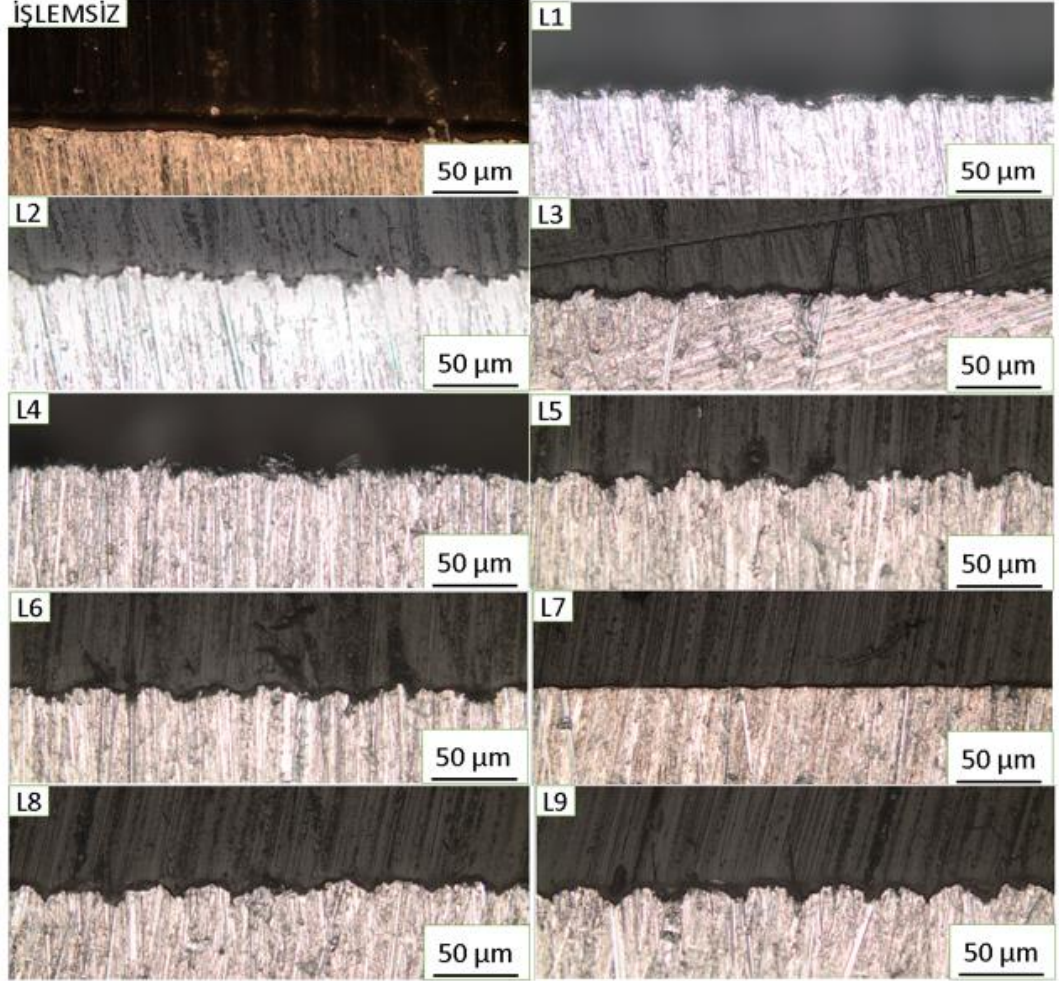
5.2. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemenin Yüzey, Kesit ve Yüzey Topografyası Görünümlerinin Değerlendirilmesi



Şekil 5.2. Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin yüzey görünümleri

Şekil 5.2’de farklı işlemlere tabi tutulmuş AA 6061-T4 yüzeyinde oluşturulan kanal formasyonları görülmektedir. L8 ve L9’da 80 kHz frekansa karşılık 30-50 W güç ve 800-1600 mm/s hız sayesinde yaklaşık 42-45 µm arası genişlikte kanal formasyonları oluşmuştur. Bu genişlikte kanalların oluşumunda yüksek frekansın yanında yüksek güç ve hızın etkisi büyüktür. Buna karşılık 80 kHz frekans da verilen 10 W güç ve 400 mm/s hız yüzey de sadece bir yüzey temizliği vazifesi görmüştür. 20-50 kHz frekans üçlü gruplarında maksimum 30 µm genişliğe kadar kanallar oluşmuştur. Fakat 60 °C – 20 dk da uygulanan FPL - Dağlama yöntemiyle yüzeyde 35 µm genişliğe kadar oluşturulan kanallar, 20-50 kHz frekanslarında uygulanan lazer yüzey işlemlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Sonuç olarak 20-50 kHz frekanslarında uygulanan lazer

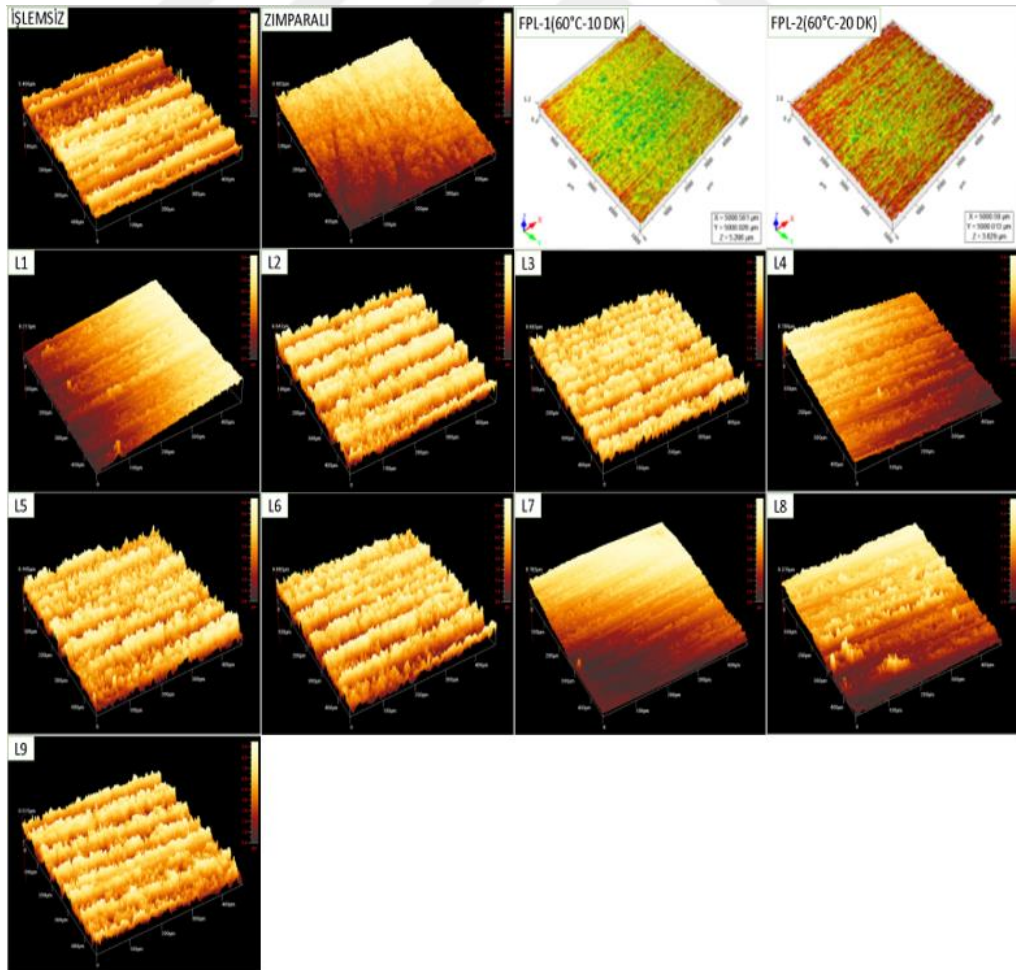
parametreleri, geleneksel FPL - Dağlama yöntemine göre etkili bir arayüzey dayanımı ve mikrokilitleme mekanizması elde etmek için yetersiz kalmıştır.



Şekil 5.3. Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin kesit görünüşleri

Şekil 5.3’de farklı parametreler ile yüzeyi işlenen Alüminyum Alaşımının kesit görünüşleri görülmektedir. L8’de yaklaşık 42 µm genişlik ve 23 µm derinlik elde edilirken, L9’da yaklaşık 45 µm genişlik ve 25 µm derinlik elde edilerek en iyi kanal formasyonu değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak yüksek güç ve hız parametrelerinin etkisinin yanında yüksek frekans etkisinin de payı vardır. Rams ve diğ. (2007) %10 SiC partikülleri ile güçlendirilmiş Al – % 4,0 Cu -% 10 Mg alaşım matris kompozitine Lazer Sertleştirme İşlemi uygulayarak tüm numunelerde mikrosertlik ve aşınma direnci elde etmişlerdir. Bunu da Lazer ile işlenmiş numunede meydana gelen mikroyapısal homojenizasyon ve tane inceltmesine bağlamışlardır. Diğer yandan L5’de yaklaşık 24 µm genişlik ve 12 µm derinlik ve L6’da yaklaşık 30 µm genişlik ve 16 µm derinlik elde edilmiştir. Burda düşük frekansa karşılık yüksek

güç ve hız parametrelerinin rolü büyüktür. Fakat geleneksel FPL - Dağlama yönteminden elde edilen 35 µm genişlik ve 20 µm derinlik L8-L9 Lazer parametreleri haricindeki Lazer işlemlerinden daha iyi sonuç vermiştir. Wijdan H. Muttlak ve diğ. (2020) bir Nd:YAG Lazer ile kısa darbeler uygulayarak AA 1050 malzemesinin korozyon direncini arttırmayı başarmışlardır. Sonuçlar oksit tabakasının Lazer işleminden etkilendiğini göstermiştir. Çalışmamızda L2 ve L3’de ise yüksek güç ve hız parametrelerine rağmen, çok düşük frekans parametresi nedeniyle iyi bir kanal formasyonu elde edilememiştir. L1, L4 ve L7 düşük güç ve hız parametreleri nedeniyle, frekansın giderek artmasına rağmen iyi bir kanal formasyonu oluşturmamıştır. Sonuçlara baktığımızda Etkili Lazer parametreleri ile istenilen kanal formasyonu elde edilebilmesi sayesinde arayüzeyde istenilen mikrokilitleme mekanizması sağlanabilir. Bunun yanında Lazer işlemiyle oluşan mikrokilitlemenin devamlılığını sağlayan mikrosertlik, aşınma direnci, korozyon direnci, oksit tabakası etkisi vb. diğer faktörler de LYİ ile iyileştirilebilir.



Şekil 5.4. Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin yüzey topografyası görüntüleri

Tablo 5.2. Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin Ra değerleri

	Pürüzlülük Parametresi(Ra)
İşlemsiz Numune	0,553 ± 0,015 µm
Zımparalı Numune	1,337 ± 0,5 µm
FPL Numune	0,934 ± 0,1 µm
L1-L9 Lazer Numune	1,25 – 1,75 µm arasında

Tablo 5.2’de farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş numunelerden alınan Ra pürüzlülük değerleri, Şekil 4.4’de ise yüzey topografyası üç boyutlu görüntüleri verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü yaklaşık ortalama 1,25 µm ile 1,75 µm arası bir değer olarak, LYİ yöntemiyle işlenen numunelerde daha yüksek çıkmıştır. Bunu yaklaşık 1,337 µm ile Zımparalanmış numuneler takip etmiştir. Tianyi Shi ve diğ. (2019) 120W MOPA darbeli fiber lazer kullanarak AA 7050 yüzeyine, yüzey temizleme prosesi uygulamışlardır. Sonuçlar, Lazer işleminin alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasını giderebileceğini ve buda malzemenin çekme ve eğilme özelliklerini geliştirebileceğini göstermiştir. Chuanmin Zhu ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada sac (6022-T4), döküm (Aural 5) ve ekstrüzyon (7003-T5) alüminyum alaşımları yüzeyini, Fiber Lazer ile işlenmesiyle Alüminyum levha alt tabakalarının yapışkanla birleştirilme performansını geliştireceğini kanıtlamışlardır.

5.3. Zımparalama, FPL - Dağlama Ve Farklı Lazer Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemelerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

Tablo 5.3. Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları

Ön yüzey işlemi	Kuvvet (N)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
İşlemsiz	155,95 ± 1,5	328,11 ± 6	57,848 ± 1,6
Zımparalanmış	159,14 ± 1,3	334,84 ± 3	59,575 ± 2
FPL Dağlama-60 oC-10 dk	160,22 ± 1,8	337,1 ± 3	61,395 ± 1,7
FPL Dağlama-60 oC-20 dk	166,06 ± 1,6	349,4 ± 2	62,877 ± 1,9
L1-Lazer işlemlili	156,29 ± 2,4	328,82 ± 5	58,549 ± 2,3
L2-Lazer işlemlili	158,14 ± 2,1	332,72 ± 6	60,928 ± 0,85
L3-Lazer işlemlili	159,01 ± 2	334,55 ± 5	61,090 ± 1,45
L4-Lazer işlemlili	161,23 ± 2,8	339,22 ± 4	61,959 ± 1,8
L5-Lazer işlemlili	162,59 ± 1,7	342,08 ± 4	61,562 ± 2,1

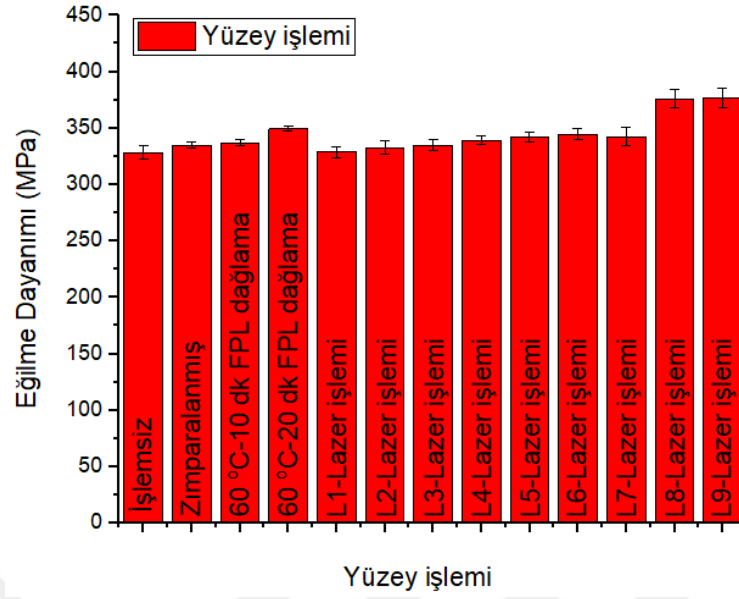
Tablo 5.3. (Devam) Farklı işlemlere tabi tutulmuş numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları

L6-Lazer işlemlili	163,84 ± 1,8	344,71 ± 5	61,941 ± 1,9
L7-Lazer işlemlili	162,82 ± 2,1	342,58 ± 8	62,507 ± 1,4
L8-Lazer işlemlili	178,8 ± 2,5	375,99 ± 8	66,908 ± 1,6
L9-Lazer işlemlili	179,01 ± 2,6	376,62 ± 9	69,873 ± 1,2

Tablo 5.3’de farklı işlemlere tabi tutulmuş GLARE esaslı FMTK numunelerin üç nokta eğilme testi sonuçları verilmiştir. İşlemsiz AA 6061-T4 malzemesi ile üretilen GLARE esaslı FMTK malzemede eğilme dayanımı yaklaşık 328 MPa, eğilme modülü yaklaşık 57 GPa bulunmuştur. LYİ uygulanarak üretilen numunelerdeyse eğilme dayanım değerleri yaklaşık 376 MPa, eğilme modülü değerleri yaklaşık 69 GPa değerlerine yükselmiştir.

L.H. Wu ve diğ. (2020) metal / CFRP yapıştırma bağlantısını oluşturmak için, AA 5052 malzemesi ve sade karbon çeliği yüzeyine Lazer işlemiyle gözenekli yapılar oluşturmuşlardır. Yapılan bu yüzey işlemi ile kayma dayanımı, işlem görmemiş metal / CFRP bağlantıya göre, AA 5052 / CFRP bağlantısında 1.5 kN’dan 4.9 kN’a ve Sade Karbon Çeliği / CFRP bağlantısında 1.5 kN’dan 3.9 kN’a çıkmıştır. Lazerle oluşturulmuş gözenekli yapıya dolan matris malzemenin bir sonucu olarak arayüzeyde iyi bir yapışma kuvveti oluşturulmuştur. Oleksandr Kapustynskyi ve diğ. (2020) % 0.3’den az karbon içeren yapısal yüksek kaliteli karbon çeliğinin (1.0402) yüzeyini Nd:YAG 4 eksenli lazer kaynak makinesi (BMM400) ile işlemişlerdir. İşlenen bölgelerdeki çeliğin sertlik ve mukavemeti, işlenmemiş alanlara kıyasla % 50 artmıştır. Lazerle oluşturulan sertlik, metal plakanın eğilme sertliğinde bir artışa ve plastik deformasyon olmadan maksimum dayanma gücüne sebep olmuştur. Çelikte oluşan bu sertlik, Lazer işleme parametrelerine, işlenen alana, lazer izlerinin sayısına ve izler arasındaki mesafeye bağlı olduğu tespit edilmiştir.

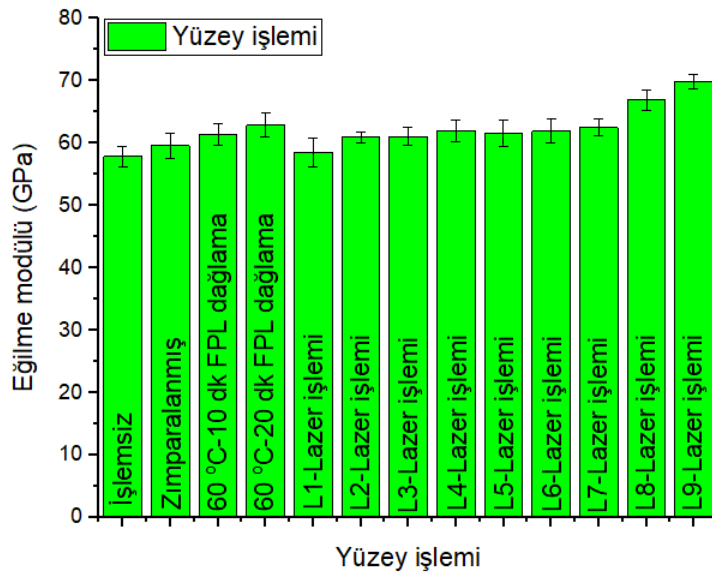
Tablo 5.3 incelendiğinde, FPL - Dağlama yönteminin de İşlemsiz numuneye göre işlem süresinin artmasıyla, eğilme dayanımı değerini yaklaşık 328 MPa’dan yaklaşık 349 MPa değerlerine, eğilme modülünü de yaklaşık 57 GPa’dan 62 GPa değerlerine arttırdığı görülmüştür. Fakat Lazer parametrelerindeki güç, hız, ve frekans parametrelerinin optimuma ayarlanması, 20 dk boyunca uygulanan FPL - Dağlama yönteminden daha iyi sonuçlar alınmasını sağlamıştır.



Şekil 5.5. Farklı işlemlere tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme dayanımı grafiği

Şekil 5.5’de farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuş numunelerdeki eğilme dayanımı değerlerinin değişimi görülmektedir. İşlemsiz numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerlerine göre, L8 ve L9 Lazerle işlenmiş GLARE esaslı FMTK numunelerde eğilme dayanımı değerleri yaklaşık olarak %14 artmıştır. FPL - Dağlama yönteminin 20 dk boyunca uygulanmasıyla, İşlemsiz numuneye göre yaklaşık olarak %6’lık bir artış sağlanmıştır. Şekil 5.6’da farklı işlemlere tabi tutulmuş GLARE esaslı FMTK numunelerin eğilme modülü değerlerinin değişim grafiği verilmiştir. İşlemsiz GLARE esaslı FMTK numunelere göre yine L8 ve L9 Lazerle işlenmiş GLARE esaslı FMTK numunelerde eğilme modülü değeri yaklaşık olarak %18’lik bir artış sağlamıştır. Hamed Aghamohammadi ve diğ. (2020) yaptığı çalışmada, Çok Katmanlı Karbon nNanotüplerin (ÇKKN), AA 2024-T3 ve bazalt elyaf/epoksi katmanlarından oluşan fiber metal tabakalı kompozitlerin eğilme ve darbe davranışları üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, ÇKKN’lerin % 0,5’e kadar ilavesiyle, FMTK’lerdeki eğilme modülü değerlerinin, referans numuneye göre % 60,16’ya kadar arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. M. Megahed ve diğ. (2019) yapmış olduğu bir başka çalışmada, birkaç çeşit farklı dolgu maddesi ekleyerek GLARE esaslı FMTK malzemelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları işlemler sonucunda, SiO₂, Al₂O₃, Al ve Cu nanoparçacıklarının GLARE esaslı FMTK malzemesine eklenmesiyle, eğilme modülü değerlerin de sırasıyla % 46, % 36,9, % 4,18 ve %3,69’luk bir artış olduğunu bulmuşlardır. Bu araştırmaların ışığında Şekil 5.6

grafiğine baktığımızda, FPL - Dağlama yönteminin 20 dk boyunca uygulanması ile İşlemsiz GLARE esaslı FMTK numunelere göre yaklaşık olarak % 3'lük bir eğilme modülü artışı görülmüştür. Sonuç olarak; havacılıkta kullanımı olan GLARE esaslı FMTK malzemeler de metal / prepreg arayüzey yapışmasını arttırmak ve tabakalar arası mukavemeti sağlamak için daha çok kimyasal yöntemler tercih edilmektedir. Kimyasal yöntemlere kıyasla mekanik bir işlem olan LYİ de gelecekte arayüzey yapışmasını ve tabakalararası mukavemeti arttırmak için uygulanabilir bir yöntem olduğunu bu çalışmada göstermektedir.

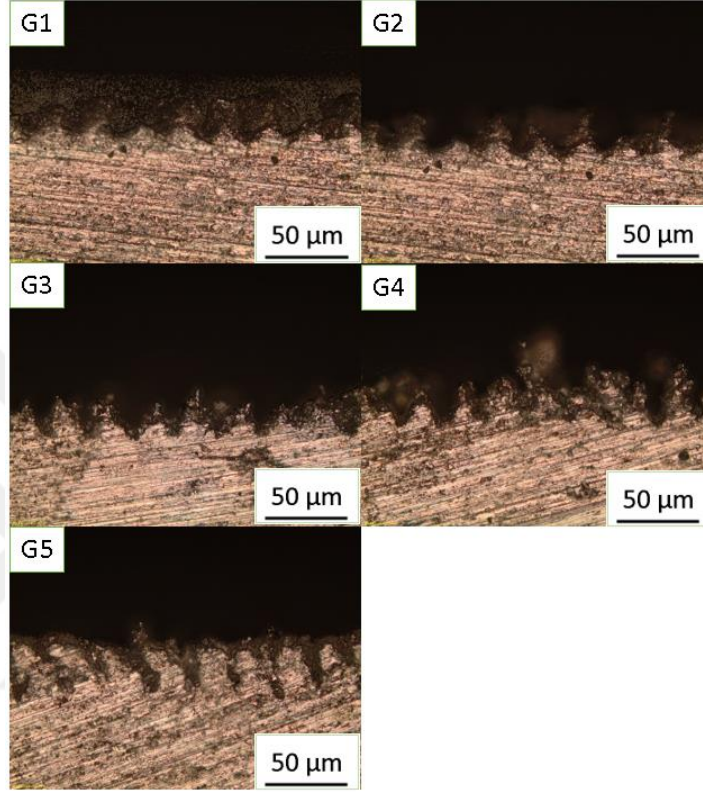


Şekil 5.6. Farklı işlemlere tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme modülü grafiği

5.4. Tekrarlı Lazer Geçiş Parametreleriyle İşlenmiş AA 6061-T4 Malzemelerin Üç Nokta Eğilme Testi Sonuçları

Bölüm 5.2 ve 5.3'de belirtildiği üzere, farklı Lazer parametreleriyle işlenmiş AA 6061-T4 malzemesinden üretilen FMTK'ler de Lazer işleminin arayüzey yapışmasını arttırdığı ve tabakalararası mukavemeti geliştirdiği saptanmıştır. Farklı güç, hız ve frekans parametreleri ile uygulanan yüzey işleme çalışmaları ve üretilen GLARE esaslı FMTK malzemeleri üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmuştur. 4. Bölüm Tablo 4.3 de belirtildiği üzere 80 kHz frekans, 50 W güç ve 1600 mm/s tarama hızındaki L9 Lazer işleme parametreleri kullanılarak üretilen GLARE esaslı FMTK malzemelerinden elde edilen değerler, diğer işlemler kullanılarak üretilen GLARE esaslı FMTK malzemelerine göre üstünlüklerini ortaya koymuştur. Yapılan literatür

araştırmalarından Lazer etkisini arttırmak, elde edilen sonuçları geliştirmek için yüzeje tekrarlı geçişlerin uygulandığı tespit edilmiştir. Bu nedenle farklı bir konu başlığı altında aynı L9 Lazer parametreleri kullanılarak Alüminyum yüzejeine uygulanan tekrarlı geçiş çalışmaları ve sonuçları verilmiştir.

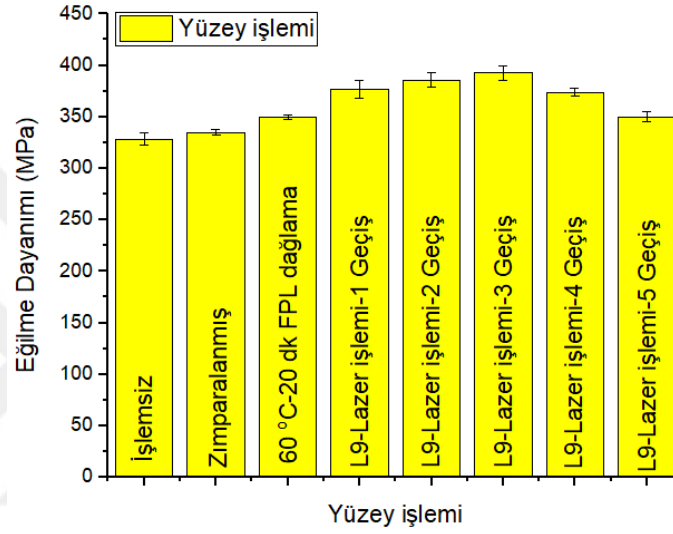


şekil 5.7. Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin kesit görünüşleri

şekil 5.7’de Lazer ile tekrarlı geçiş uygulanan malzemelerin kesit görünüşleri verilmiştir. 1 geçişli G1 kesitinde, 45 µm genişlik ve 25 µm derinliğe sahip kanal formasyonları oluşmuştur. 2 geçişli G2 kanal formasyonlarında kanalın genişliği 49 µm, kanalın derinliği 30 µm olarak artmıştır. Ayrıca iki kesit görünüşünde de Lazer ile eritilen malzeme lazer geri tepme basıncı sayesinde rahatlıkla dışarı atılabilmektedir. Karl-Heinz Leitz (2011) ve diğ. mikro, nano, piko ve femtosaniye lazer darbeleriyle, metal yüzejeindeki ablyasyon oranlarını karşılaştırmışlardır. Artan darbe sayılarıyla ablyasyon bölgesinin çap ve derinliğinin arttığını ve darbe sayılarının daha da artmasıyla eriyiğin dışarı atılmasının zorlaşacağını yapılan denemeler sonucunda bulmuşlardır. 3 geçiş uygulanan G3 kesitiyse 55 µm genişlik ve 36 µm derinlik ile en uygun kanal formasyonunu oluşturmaktadır. G3 kesiti, en son rahatlıkla eriyiğin atıldığı kanal formasyonudur.

Tablo 5.4. Farklı geçiş işlemlerine tabi tutulmuş numunelerin u nokta eğilme testi sonuçları

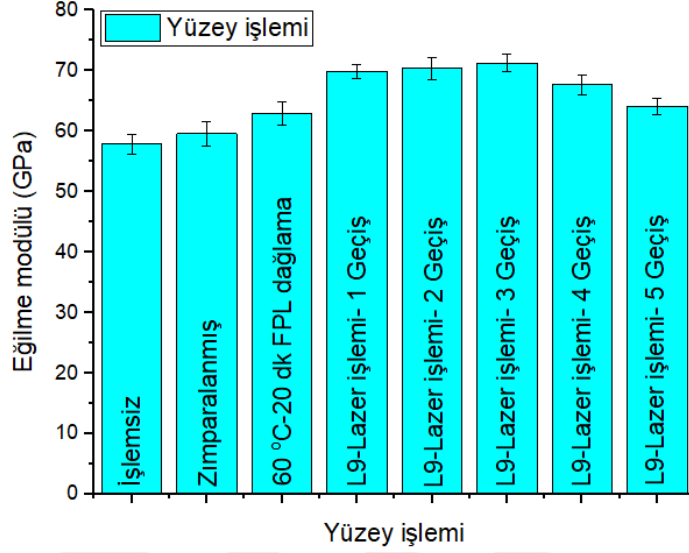
Lazer geçiş sayısı	Kuvvet (N)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)
L9-Geçiş sayısı 1	179,01 ± 2,6	376,62 ± 9	69,873 ± 1,2
L9-Geçiş sayısı 2	183,28 ± 3,2	385,63 ± 7	70,368 ± 1,8
L9-Geçiş sayısı 3	186,73 ± 2,8	392,87 ± 7	71,240 ± 1,4
L9-Geçiş sayısı 4	177,61 ± 2,4	373,68 ± 4	67,658 ± 1,7
L9-Geçiş sayısı 5	166,30 ± 3,6	349,89 ± 5	64,139 ± 1,3



şekil 5.8. Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme dayanımı grafiği

Tablo 5.4, şekil 5.7 ve 5.8'deki görüntü ve grafiğlere baktığımızda, geçiş sayısının 1'den 3 geçişe artmasıyla eğilme dayanımı % 4, eğilme modülüyse % 2 artmıştır. Bu da bize metal / prepreg arasında daha mukavemetli bir mikrokilitleme mekanizmasının olduğunu göstermektedir. Erhan Akman ve diğ. (2021) AA 2024-T3 yüzeyinde Fiber Lazer kullanarak oluşturulan, kanal derinliği, genişliği ve birim alan sayısı gibi mekanik kilitleme parametreleriyle CFRP kompozitin yapışma mukavemetini optimize etmişlerdir. Kanal derinliğinin artmasıyla, yapışma yüzey alanının % 308 arttığını tespit etmişlerdir. Fakat derinlikteki artış dolayısıyla oluşan yapışma yüzey alanı ve kanal giriş genişliğinin, kesme mukavemeti üzerinde ortak bir etkisi olduğunu görmüşlerdir. Yapışma yüzey alanı ve kanal giriş genişliği arttıkça kesme mukavemetinin arttığını, fakat yapışma yüzey alanı artsa bile giriş genişliğindeki daralmanın kesme mukavemetini azaltacağını tespit etmişlerdir. Bu nedenle çalışmada 5 geçişten sonraki geçiş çalışmalarında kanal formasyonunun bozulduğunu ve

malzeme yüzeyinde bir kaotik yapının oluştuğunu ve bu yapının da kesme mukavemetini düşürdüğünü deneyler ile ortaya koymuşlardır.



Şekil 5.9. Tekrarlı lazer geçiş işlemlerine tabi tutulmuş FMTK numunelerin eğilme modülü değerleri

Diğer bir çalışma da Shashank Sharma ve diğ. (2018) Lazer delme sırasında oluşan eriyik akış modelleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İlk darbeler ile eriyiğin kolayca dışarı atıldığını görmüşlerdir. Fakat özellikle derinliğin artmasıyla Lazer tepme basıncının önemini yitirdiğini ve eriyiğin dışarı atılmayarak kanal ağzında ve kanal duvarlarında birikmelere ve delik ağzının kapanmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Yine atılmayan eriyik malzemenin kanal formasyonunu bozduğu ve yüzeyde bir kaotik yapının oluştuğunu modellemeler ile ortaya koymuşlardır. Literatür taramalarının ışığında, Şekil 5.7'deki 4 ve 5 geçişli kesit görünüşlerine baktığımızda da aynı senaryoların gerçekleştiği görülmektedir. 3 geçişten sonra derinlik, Lazer tepme basıncından daha fazla artmış ve eriyik dışarı atılmayarak kanal girişinde veya kanal duvarlarında birikmeler yaparak kalmıştır. Bu da kanal formasyonunu bozmuş ve düzensiz bir kaotik yapının oluşmasına neden olmuştur. Şekil 5.8 ve 5.9'daki grafiklere baktığımızda da kanaldaki yapışma yüzey alanı artsa bile kanal giriş genişliğindeki azalmanın kesme mukavemetini azalttığı, yüzeyde bir kaotik yapının oluştuğu ve sonuç olarak eğilme dayanımı ve eğilme modülü değerlerinin giderek azaldığı ortaya konulmuştur.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FMTK üretiminde kullanılan Alüminyum Alaşımları ve reçine emdirilmiş prepreglerin arasında iyi bir yapışmanın sağlanabilmesi için alüminyum yüzeyine farklı mekanik ve kimyasal yöntemler uygulanmaktadır. Yapılan çalışmada üretilen 2/1 GLARE esaslı FMTK'ler de kullanılan AA 6061-T4, üretim öncesi alüminyum yüzeyine uygulanan geleneksel Zımparalama, FPL - Dağlama yüzey işleme yöntemlerinin yanında, farklı bir yöntem olan Fiber Lazer ile yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur. Sıcak Pres Tekniği kullanılarak üretilen GLARE esaslı FMTK malzemeleri Üç Nokta Eğme testlerine tabi tutularak elde edilen sonuçlar 4. bölüm de tartışılmıştır. Bu bölüm de çalışmadan elde edilen net sonuçlar ve öneriler paylaşılacaktır.

$\pm 2^\circ$ sapma ile çalışan kontak açısı ölçüm cihazından elde edilen sonuçlar, özellikle Lazer parametrelerinin 10 W ve 400 mm/s'den 30-50 W ve 800-1600 mm/s değerlerine yükseltilmesiyle, uygulanan Zımparalama, FPL - Dağlama yöntemlerine göre yüzeyi daha hidrofilik(ıslatılabilirlik) hale getirdiği ve bu da metal yüzeyinin reçine ile iyi ıslatılabileceğini ve sonuç olarak metal / prepreg arasında güçlü bir mekanik kilitlemenin sağlanabileceğini göstermektedir.

Lazer parametreleriyle yüzeyi işlenmiş Alüminyum Alaşımlarının kesit görünüşlerine baktığımızda, L8'de yaklaşık 42 μm genişlik ve 23 μm derinlik elde edilirken, L9'da yaklaşık 45 μm genişlik ve 25 μm derinlik elde edilerek en iyi kanal formasyonu değerleri elde edilmiştir. Diğer yandan L5'de yaklaşık 24 μm genişlik ve 12 μm derinlik ve L6'da yaklaşık 30 μm genişlik ve 16 μm derinlik elde edilmiştir. Fakat geleneksel FPL - Dağlama yönteminden elde edilen 35 μm genişlik ve 20 μm derinlik L8-L9 Lazer parametreleri haricindeki lazer işlemlerinden daha iyi sonuç vermiştir.

GLARE esaslı FMTK numunelerinin üç nokta eğilme testi sonuçlarına baktığımızda İşlemsiz GLARE esaslı FMTK malzemedeki eğilme dayanımı yaklaşık 328 MPa, eğilme modülü yaklaşık 57 GPa bulunmuştur. Fiber LYİ uygulanarak üretilen GLARE esaslı FMTK'larda ise eğilme dayanım değerleri yaklaşık 376 MPa, eğilme modülü değerleri yaklaşık 69 GPa değerlerine yükselmiştir. FPL - Dağlama yönteminin de İşlemsiz numuneye göre işlem süresinin artmasıyla, eğilme dayanımı değerini yaklaşık 328 MPa'dan yaklaşık 349 MPa değerlerine, eğilme modülünü de yaklaşık 57 GPa'dan 62

GPa değerlerine arttırdığı görülmüştür. Fakat en iyi sonuçların LYİ yöntemi ile elde edildiği açıktır.

İşlemsiz numunelerden elde edilen eğilme dayanımı değerlerine göre, L8 ve L9 Lazerle işlenmiş GLARE esaslı FMTK numunelerde eğilme dayanımı değerleri yaklaşık olarak % 14 artmıştır. FPL - Dağlama yönteminin 20 dk boyunca uygulanmasıyla, İşlemsiz numuneye göre yaklaşık olarak % 6'lık bir artış sağlanmıştır. İşlemsiz GLARE esaslı FMTK numunelere göre yine L8 ve L9 lazerle işlenmiş GLARE esaslı FMTK numunelerde eğilme modülü değeri yaklaşık olarak % 18'lik bir artış sağlamıştır. FPL - Dağlama yönteminin 20 dk boyunca uygulanması ile işlemsiz GLARE esaslı FMTK numunelere göre yaklaşık olarak % 3'lük bir eğilme modülü artışı görülmüştür.

Yapılan literatür araştırmalarından Lazer etkisini arttırmak, elde edilen sonuçları geliştirmek için yüzeye tekrarlı geçişlerin uygulandığı tespit edilmiştir. En iyi Lazer yüzey işleme sonucunun alındığı L9 Lazer işleme parametreleri kullanılarak uygulanan tekrarlı geçiş çalışmalarında 3 geçiş uygulanan G3 kesitinde 55 µm genişlik ve 36 µm derinlik ile en uygun kanal formasyonu elde edilmiştir. 3 geçişli lazer işleme yönteminin en iyi sonucu vermesindeki asıl neden olarak Lazer tepme basıncı maksimum yüksekliği ile kanal derinliğinin artık aynı seviyeye ulaşması gösterilebilir. Yani kanal derinliğinin artması arayüzeyde iyi bir mekanik kilitlenme sağlanması için önemlidir. Fakat artan derinlik lazer tepme basınç kuvveti ile dışarı atılan malzemenin atılmasını zorlaştırmaktadır. 3 geçiş sonrası Lazer tepme basıncı ile çıkarılan malzeme kanal derinliğinin artması nedeniyle kanal ağzının kapanmasına neden olmaktadır.

Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında Fiber Lazer haricinde CO₂, Nd:YAG, Excimer vb. lazer türlerinin de FMTK malzemelerde kullanılan 6061-T4 Alüminyum alaşımı veya farklı Alüminyum Alaşımları yüzeylerinin işlenmesinde kullanılabilirliği üzerine başka çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada kullanılan mekanik ve kimyasal yöntemlerin haricinde var olan diğer yüzey işleme yöntemlerinin de kullanılarak Fiber Lazer Yüzey İşleme yöntemi ile karşılaştırılması yapılabilir. FMTK kompozitlerde kullanımı olmayan Lazer işleme yönteminin, bu alanda kullanılabilirliğini arttırmak için farklı Lazer türleri ile yapılan çalışmalar literatüre kazandırılabilir.

KAYNAKLAR

- Aghamohammadi H., Abbandanak S.N.H., Farsani R.E., Siadati M.H., (2018), Effects Of Various Aluminum Surface Treatments On The Basalt Fiber Metal Laminates İnterlaminar Adhesion, *International Journal Of Adhesion and Adhesives*, 84, 184–193.
- Aghamohammadi H., Farsani R.E., Tcharkhtchi A., (2020), The Effect Of Multi Walled Carbon Nanotubes On The Mechanical Behavior Of Basalt Fibers Metal Laminates: An Experimental Study, *International Journal Of Adhesion & Adhesives*, 98, 102538.
- Akman E., Bora M.Ö., Çoban O., Oztoprak B., (2021), Laser-İnduced Groove Optimization For Al/Cfrp Adhesive Joint Strength, *International Journal Of Adhesion & Adhesives*, 107, 102830.
- Bere P., (2014), Experimental Research Regarding Vacuum Bag Technology For Obtaining Carbon/Epoxi Composites, *Academic Journal Of Manufacturing Engineering*, 12 (1).
- Balasubramanian M., (2013), Introduction To Composites, Composite Materials and Processing, 1st Ed. Crc Press, Boca Raton, 1-30.
- Botelho E.C., Silva R.A., Pardini L.C., Rezende M.C., (2006), A Review On The Development and Properties Of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Compositesfor Aircraft Structures, *Materials Research*, 9 (3), 247-256.
- Bellini C., (2020), Damage Analysis Of A Glare Laminate Subjected To İnterlaminar Shear, *Procedia Structural Integrity*, 25, 262–267.
- Bellini C., Cocco V.D., Iacoviello F., Sorrentino L., (2019), Influence Of Structural Characteristics On The İnterlaminar Shear Strength Of Cfrp/Al Fibre Metal Laminates, *Procedia Structural Integrity*, 18, 373–378.
- Björgum A, Lapique F, Walmsley J, Redford K., (2003), Anodising As Pre-Treatment For Structural Bonding. *Int J Adhes Adhes*, 23(5), 401–12.
- Campoli G., Alderliesten R.C., Benedictus R., (2009), Characterization Of The Crack Tip Behaviour İn Fibre Metal Laminates By Means Of Digital Image Correlation, *Structural Dynamics, And Materials Conference*, California 4 - 7 May.
- Chung D.D.L., (1994), Introduction To Carbon Fibers, Carbon Fiber Composites, 1st Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 3-11.
- Çoban O., Akman E., Bora M.Ö., Oztoprak B.G., Demir A., (2019), Laser Surface Treatment Of Cfrp Composites For A Better Adhesive Bonding Owing To The Mechanical Interlocking Mechanism, *Polymer Composites*, 3611-3622.

- Divya H.V., Naik L.L., Yogesha B., (2016), Processing Techniques Of Polymer Matrix Composites – A Review, *International Journal Of Engineering Research And General Science*, 4 (3), May-June.
- D790 – 15, Standard Test Methods For Flexural Properties Of Unreinforced And Reinforced Plastics And Electrical Insulating Materials, 100 Barr Harbor Drive, Po Box C700, West Conshohocken, Pa 19428-2959, United States.
- Ebrahim Moussavi-Torshizi S., Dariushi S., Sadighi M., Safarpour P., (2010), A Study On Tensile Properties Of A Novel Fiber/Metal Laminates, *Materials Science And Engineering*, 527, 4920–4925.
- Ezzat M., El-Waily M.A., Abdel-Rahman M., Ismail Y., (2018), Treatment Of Aluminum Alloys Surface By Nanosecond Laser, *Surface Review And Letters*, 25 (7), 1850079 (7 Pages)
- European Commission, Applied Processes And Techniques, Surface Treatment Of Metals And Plastics, August 2006.
- Ebnesajjad S., (2006), Material Surface Preparation Techniques, Ebnesajjad S., Ebnesajjad C., Surface Treatment Of Materials For Adhesion Bonding, 1st Ed., Elsevier Science, Amsterdam, 95-154.
- Frank J., Composite Manufacturing Processes, National Resource Center, [Http://Www.Materialseducation.Org/Educators/Matedu/Docs/Composite_Manufacturing_Processes.Pdf](http://www.Materialseducation.Org/Educators/Matedu/Docs/Composite_Manufacturing_Processes.Pdf) (Ziyaret Tarihi: 08 Mayıs 2020).
- Faye Smith (2005) Comeld™: An Innovation In Composite To Metal Joining, *Materials Technology*, 20 (2), 91-96.
- Gülcan O., Tekkanat K., Çetinkaya B., (2019), Fiber Metal Laminatlar Ve Uçak Sanayiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme, *Mühendis Ve Makine*, 60 (697), S. 262-288.
- Gupta M., (2018), Metal Matrix Composites, *Mdpi, Metals*, 8, 379;
- Haghshenas M., (2015), Metal–Matrix Composites, Researchgate, 1-28.
- Ishak N. M., Sivakumar D., Mansor M. R., Munirand F. A. Zakaria K. A., (2018), Application Of Triz To Develop Natural Fibre Metal Laminate For Car Front Hood, *Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences*, 13 (1).
- Ibrahim I.D., Jamiru T., Sadiku R.E., Kupolati W.K., Agwuncha S.C., Ekundayo G., (2015), The Use Of Polypropylene In Bamboo Fibre Composite And Their Mechanical Properties – A Review, *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*.

- Jakubczak P., Surowska B., Biemas J., (2016), Evaluation Of Force-Time Changes During Impact Of Hybrid Laminates Made Of Titanium And Fibrous Composite, *Arch. Metall. Mater.*, 61 (2), P. 689–694.
- Jansson N., (2012), Analysis Of Dynamic Flight Loads, Licentiate Thesis, Kth, School Of Engineering Sciences (Sci), Aeronautical And Vehicle Engineering, Stockholm, P. 27.
- Kaya A.İ., (2016), Kompozit Malzemeler Ve Özellikleri, Researchgate, 38-45.
- Krishnakumar S., Fiber Metal Laminates — The Synthesis Of Metals And Composites, *Material And Manufacturing Process*, 9 (2), 295-354.
- Kwakernaak A., Hofstede J., Poulis J., Benedictus R., (2010), Improvements In Bonding Metals (Steel, Aluminium), Dillard D.A., *Advances In Structural Adhesive Bonding*, 1st Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 235-287.
- King R.G., (1988), Mechanical And Textured Finishes, Surface Treatment And Finishing Of Aluminium, 1st Ed. Pergamon Press, Oxford, 1-12.
- Kubit A., Trzepiecinski T., Kłonica M., Hebda M., Pytel M., (2019), The Influence Of Temperature Gradient Thermal Shock Cycles On The Interlaminar Shear Strength Of Fibre Metal Laminate Composite Determined By The Short Beam Test, *Composites Part B: Engineering*, 176, 107217.
- Kapustynskiy O., Višniakov N., Zabulionis D., Piščalov A., (2020), Feasibility Evaluation Of Local Laser Treatment For Strengthening Of Thin-Walled Structures From Low-Carbon Steel Subjected To Bending, *Materials*, 13(14), 3085.
- Leitz K.H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., Schmidt M., (2011), Metal Ablation With Short And Ultrashort Laser Pulses, *Physics Procedia*, 12, 230-238.
- Laban O., Mahdi E., (2017), Enhancing Mode I Inter-Laminar Fracture Toughness Of Aluminum/Fiberglass Fiber-Metal Laminates By Combining Surface Pre-Treatments, *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 78, 234-239.
- Liu C., Du D., Li H., Hu Y., Xu Y., Tian J., Tao G., Tao J., (2016), Interlaminar Failure Behavior Of Glare Laminates Under Short-Beam Three-Point-Bending Load, *Composites Part B: Engineering*, 97, 361-367.
- Linganiso L.Z., Anandjiwala R.D., (2016), Fibre-Reinforced Laminates In Aerospace Engineering, Rana S., Figueiro R., *Advanced Composite Materials For Aerospace Engineering*, 1st Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 101-127.
- Longbiao L., (2020), Introduction And Overview Of Ceramic-Matrix Composites, Durability Of Ceramic-Matrix Composites, 1st Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 1-73.

- Low I.M., (2018), *Advances In Ceramic Matrix Composites: Introduction, Advances In Ceramic Matrix Composites*, 2nd Ed., Woodhead Publishing, Sawston, 1-7.
- Langer M., Rechner R., Thieme M., Jansen I., Beyer E., (2012), Surface Analytical Characterisation Of Nd:Yag-Laser Pre-Treated Almg₃ As A Preparation For Bonding. *Solid State Sciences*, 14 (7), 926-935.
- Marsh G., (2004), Composites Lift Off In Primary Aerostructures, *Reinforced Plastics*, 22-27.
- Montealegre M. A., Castro G., Rodriguez P.R., Arias J.L., Vázquez P., González M., (2010), Surface Treatments By Laser Technology, *Contemporary Materials*, 1(1), 1-13.
- Muttalak W.H., Alwahib A.A., Mohammed A.Z., Sayed H., (2020), Effect Of Q-Switched Nd:Yag Laser On The Anodization Of 1050 Aluminum Alloy, *Optics And Laser Technology*, 125, 106055.
- Mahesh M. Senthil Kumar A., (2014), Comparison Of Mechanical Properties For Aluminium Metal Laminates (Glare) Of Three Different Orientations Such As Csm, Woven Roving And 450 Stitched Mat, *Iosr Journal Of Mechanical And Civil Engineering (Iosr-Jmce)*, India.
- Megahed M., Abd El-Baky M.A., Alsaedy A.M., Alshorbagy A.E., (2019), An Experimental Investigation On The Effect Of Incorporation Of Different Nanofillers On The Mechanical Characterization Of Fiber Metal Laminate, *Composites Part B*, 176, 107277.
- Nong T.V., Elsayed M.S.A., Biseul C., (2018), Experimental Optimization And Static Characterization Of Modified Fiber Metal Laminates With Integrated Mechanical Interlock Bonding System For Aerospace Applications, *Polymer Composites*, 40, 1510-1525.
- Ngo C.V., Chun D.M., (2018), Control Of Laser-Ablated Aluminum Surface Wettability To Superhydrophobic Or Superhydrophilic Through Simple Heat Treatment Or Water Boiling Post-Processing, *Applied Surface Science*, 435, 974-982.
- Nguyen H., Zatar W., Mutsuyoshi H., (2017), Hybrid Polymer Composites For Structural Applications, Thakur V.K., Thakur M.K., Pappu A., *Hybrid Polymer Composite Materials*, 1st Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 35-51.
- Nagavally R.R., (2017), Composite Materials - History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, And Applications. *International Journal Of Mechanical And Production Engineering*, 5 (9).

- Ouarhim W., Zari N., Bouhfid R., Qaiss A.E.K., (2019), Mechanical Performance Of Natural Fiberbased Thermosetting Composites, Jawaid M., Thariq M., Saba N., Mechanical And Physical Testing Of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites And Hybrid Composites, 1st Ed. Elsevier Science, 43-60.
- Ostapiuk M., Bienias J., Surowska B., (2017), Analysis Of The Bending And Failure Of Fiber Metal Laminates Based On Glass And Carbon Fibers, *Sci Eng Compos Mater*.
- Prolongo S.G. Ureña A., (2008), Effect Of Surface Pre-Treatment On The Adhesive Strength Of Epoxy-Aluminum Joints, *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 29, 23-31.
- Park S.Y., Choi W.J., Choi H.S., Kwon H., (2010), Effects Of Surface Pre-Treatment and Void Content On Glare Laminate Process Characteristics, *Journal Of Materials Processing Technology*, 210, 1008-1016.
- Pastuszak P.D., Muc A., (2013), Application Of Composite Materials In Modern Constructions, *Key Engineering Materials*, 542, Pp 119-129.
- Park S.Y., Choi W.J., Choi H.S., Kwon H., Kim S.H., (2010), Recent Trends In Surface Treatment Technologies For Airframe Adhesive Bonding Processing: A Review (1995–2008), *The Journal Of Adhesion*, 86 (2), 192-221.
- Qin Q.H., (2015), Introduction To The Composite And Its Toughening Mechanisms, Qin Q. And Ye J., Toughening Mechanisms In Composite Materials, 1st Ed. Woodhead Publishing, Sawston, 1-32.
- Rajaka D.K., Pagarb D.D., Kumarc R., Pruncud C.I., (2019), Recent Progress Of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview Of Composite Materials, *J. Mater Res Technol*, 8 (6), Pages 6354-6374.
- Razali N., Sultan M.T.H., Jawaid M., (2017), A Review On Detecting And Characterizing Damage Mechanisms Of Synthetic And Natural Fiber Based Composites, *Biores*, 12 (4), 9502-9519.
- Rudawska A., (2019), Bonding Technology, Surface Treatment In Bonding Technology, 1st Ed. Elsevier Science, Amsterdam, 7-46.
- Razavi R. S., Gordani G. R., (2011), Laser Surface Treatments Of Aluminum Alloys, Ahmad Z., Recent Trends In Processing And Degradation Of Aluminium Alloys.
- Rams, J., Pardo, A., Urena, A., Arrabal, R., Viejo, F., Lopez, A.J., (2007), Surface Treatment Of Aluminum Matrix Composites Using A High Power Diode Laser. 34th International Conference And Metallurgical Coatings And Thin Films (Icmctf 2007). *Surf. Coat. Technol.*, 202 (4–7), 1199–1203.

- Sapuan Sm., (2017), Introduction., Composite Materials-Concurrent Engineering Approach., 1st Ed., Elsevier Science., 1-27.
- Sınmazçelik T., Avcu E., Bora M.Ö., Çoban O., (2011), A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types And Applied Test Methods, *Materials And Design*, 32, 3671–3685.
- Steen W.M., (1996), Laser Surface Treatment. In: Mazumder J., Conde O., Villar R., Steen W. (Eds) Laser Processing: Surface Treatment And Film Deposition. Nato Ası Series (Series E: Applied Sciences), 307, Springer, Dordrecht.
- Steen W.M., (1991), Laser Surface Treatment. In: Laser Material Processing. Springer, London.
- Shia T., Wanga C., Mia G., Yana F., (2019), A Study Of Microstructure And Mechanical Properties Of Aluminum Alloy Using Laser Cleaning, *Journal Of Manufacturing Processes* 42, 60–66.
- Sharma S., Mandal V., Ramakrishna S.A., Ramkumar J., (2018), Numerical Simulation Of Melt Hydrodynamics Induced Hole Blockage İn Quasi-Cw Fiber Laser Micro-Drilling Of Tial6v4, *Journal Of Materials Processing Tech.*, 262, 131-148.
- Tong Z., Jiao J., Zhou W., Yang Y., Chen L., Liu H., Sun Y., Ren X., (2019), Improvement İn Cavitation Erosion Resistance Of AA5083 Aluminium Alloy By Laser Shock Processing, *Surface & Coatings Technology*, 377, 124799.
- Upadhyaya M., (2014), Studies On Transition Metal Doped Polyaniline And Polyaniline Clay Nanocomposites, Ph.D., Gauhati University, Department Of Chemistry, India.
- Url-1: https://www.compositesworld.com/cdn/cms/glare_laminate-aerospace.pdf (Ziyaret Tarihi: 07 Ağustos 2019).
- U.S. Congress, (1988), Office Of Technology Assessment , Advanced Materials By Design , Ota E - 351 (Washington , Dc : U.S. Government Printing Office).
- Url-2: <https://www.barilcoatings.com/file/technisch-handboek---en.pdf> (Ziyaret Tarihi : 24 Nisan 2020).
- Url-3: <https://www.spilasers.com/industrial-fiber-lasers/how-fiber-lasers-work/> (Ziyaret Tarihi :08 Mayıs 2020).
- Url-4: <https://aerospaceengineeringblog.com/loads-on-aircraft/> (Ziyaret Tarihi: 13 Mayıs 2020).

Url-5:

[Http://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=Ma6061t4](http://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=Ma6061t4)(Ziyaret Tarihi:16 Ocak 2021).

Url-6: [Http://www.tekniktekstiller.com/articles/cam-lifleri/](http://www.tekniktekstiller.com/articles/cam-lifleri/) (Ziyaret Tarihi: 17 Ocak 2021).

Wanhill R.J.H., (2016), Glare®: A Versatile Fibre Metal Laminate (Fml) Concept, Wanhill R.J.H., Prasad N.E., Aerospace Materials And Material Technologies, 1st Ed. Springer, Singapore, Pp 291-307.

Wu W., Abliz D., Jiang B., Ziegmann G., Meiners D., (2014), A Novel Process For Cost Effective Manufacturing Of Fiber Metal Laminate With Textile Reinforced Pcbt Composites And Aluminum Alloy, *Composite Structures*, 108, 172–180.

Withy B., Hyland M., James B., (2006), Pretreatment Effects On The Surface Chemistry And Morphology Of Aluminium, *International Journal Of Modern Physics B*, 20, 3611-3616.

Wu L.H., Xiao B.L., Nagatsuka K., Nakata K., Ma Z.Y., (2020), Achieving Strong Friction Lap Joints Of Carbon-Fiber Reinforced Plastic And Metals By Modifying Metal Surface Structure Via Laser-Processing Pretreatment, *Composite Structures*, 242, 112167.

Yi X.S., (2015), Development Of Multifunctional Composites For Aerospace Application, Friedrich K., Breuer U., Multifunctionality Of Polymer Composites Challenges And New Solutions, 1st, Elsevier Science, 367-418.

Zarei, H., Fallah, M., Minak, G., Bisadi, H., Daneshmehr, A., (2016), Low Velocity Impact Analysis Of Fiber Metal Laminates (Fmls) In Thermal Environments With Various Boundary Conditions, *Composite Structures*.

Zhu C., Wan H., Min J., Mei Y., Lin J., Carlson B.E., Maddela S., (2019), Application Of Pulsed Yb: Fiber Laser To Surface Treatment Of Al Alloys For Improved Adhesive Bonded Performance, *Optics And Lasers In Engineering*, 119, 65-76.

Zhao J., Guo J., Shrotriya P., Wang Y., Han Y., Dong Y., Yang S., (2019), A Rapid One-Step Nanosecond Laser Process For Fabrication Of Superhydrophilic Aluminum Surface, *Optics And Laser Technology*, 117, 134-141.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aksüt R., Bora M.Ö., Akman E., (2021), Investigation of Interlaminar Strength of Fiber Metal Laminates Including 6061-T4 Aluminum Sheet Surfaces Processed with Fiber Laser Technique, *7th International Congress on Engineering, Architecture and Design*, Istanbul, Turkey, 21/22 May, 789-797.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğretimini Karamürsel Kaymakam Hikmet Özbağcı İlköğretim okulunda, lise eğitimini Gölcük Atatürk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2018 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2019-2021 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Şu anda Gölcük PRO-SMH MAK. PAZ. SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ firmasında Tasarım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

