

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARAÇLARINDA KULLANILABİLECEK YENİ NESİL
FİBER METAL TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
METAL/PREPREG ARAYÜZEY DAYANIMININ
BELİRLENMESİ

CEM UÇAN

KOCAELİ 2023

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARAÇLARINDA KULLANILABİLECEK YENİ NESİL
FİBER METAL TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
METAL/PREPREG ARAYÜZEY DAYANIMININ
BELİRLENMESİ

CEM UÇAN

Doç.Dr. Mustafa Özgür BORA
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Sinan FİDAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet İskender ÖZSOY
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.01.2023

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin 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/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

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

☒ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler Teknorot Otomotiv Ürünleri San. Tic A.Ş. tarafından 2021-02 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.

Cem UÇAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin 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/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır. Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin 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/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Cem UÇAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Fiber Metal Tabakalı Kompozitler, havacılık sektörü başta olmak üzere kullanım alanı genişleyen kompozit malzemelerden biri olan ve özellikle yüksek yorulma mukavemetlerine sahip olmaları sebebiyle hava araçlarında kullanılan alüminyum malzemelere alternatif olarak değerlendirilebilecek kompozit malzemelerdir. Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Fiber Metal Tabakalı Kompozitler grubuna dahil olan GLARE kompozit malzemelerin genel yapısı, üretim yöntemi, üç nokta eğme testi altındaki mekanik davranışı ve mekanik özelliklerin farklı çevrimsel termal koşullar altındaki değişimi incelenmiştir.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesinden her zaman faydalandığım, tez çalışmam boyunca desteğiyle her zaman yanımda olan ve yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Özgür BORA'ya sonsuz teşekkür ederim.

Hem yüksek lisans ders sürecimde hem de tez çalışmama ışık tutan deneysel çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen Ar-Ge Direktörüm Sayın Murat ARSLANOĞLU'na, Fikri-Sınai Haklar ve Ar-Ge Teşvikleri Müdürüm Sayın Fatih ÇAĞIRANKAYA'ya ve bünyesinde çalışmaktan kıvanç duyduğum Teknorot Otomotiv Ürünleri San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Test numunelerine termal çevrim uygulanması için yardımcı olan TUBİTAK-MAM Malzeme Enstitüsü'ne, üç nokta eğme testlerinin İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapılar Laboratuvarı'nda yapılmasında ve yorumlanmasında yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Sedat SÜSLER hocalarıma ve profilometre analizleri konusunda desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Sinan FİDAN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez sürecimde birlikte geçiremediğimiz zamanlarda gösterdiği sabır, anlayış ve destek için eşim Hilal UÇAN başta olmak üzere, varlığıyla hayata neşeyi bakmamı sağlayan ve en büyük motivasyon kaynağım olan biricik oğlum Ali Aras UÇAN'a ve eğitim hayatım boyunca hem maddi hem manevi desteklerini tüm gücüyle veren ve her zaman arkamda olan canım babam Mensur UÇAN, canım annem Gülhan UÇAN ve canım halam Nurşen UÇAR'a sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ocak-2023

Cem UÇAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	I
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. FMTK Malzemelerin Tarihsel Gelişimi	4
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	8
2.2.1. Matrise Göre Sınıflandırma	8
2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Sınıflandırma.....	10
2.3. FMTK Malzemelerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması.....	12
2.4. Literatür Araştırması.....	15
2.5. Tez Konusunun Özgünlüğü ve Yapılan Çalışmalar	29
3. MALZEME VE YÖNTEM	30
3.1. Kullanılan Malzeme ve FMTK Üretimi Öncesi Ön Yüzey İşlemleri.....	30
3.2. FMTK Üretimi	34
3.3. Su Jeti ile FMTK Kesim İşlemi	35
3.4. Termal Yaşlandırma	36
3.5. Üç Nokta Eğme Testi.....	39
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	41
4.1. Alt Destek Mesafesi Etkisi	41
4.2. Termal Yaşlandırma Etkisi	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR.....	62
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tipik bir fiber metal tabakalı kompozit yapısı.....	5
Şekil 2.2.	Fiberlerin çatlak köprülemesi ve tabakalardaki delaminasyon.....	6
Şekil 2.3.	FMTK'ların havacılık sektöründeki tarihsel gelişimi.....	7
Şekil 2.4.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	8
Şekil 2.5.	Takviye malzemesine göre kompozit malzeme türleri	10
Şekil 2.6.	Tabakalı kompozit şematik gösterim	12
Şekil 2.7.	FMTK malzemelerin sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.8.	a) Ön yüzey işlemi uygulanmış, b) ön yüzey işlemi uygulanmamış metal yapışma yüzeyleri	14
Şekil 2.9.	Airbus A380 uçağındaki kompozit kullanımı.....	15
Şekil 2.10.	Zımparalanmış yüzeylerin optik görüntüleri a) p120 zımpara kağıdı ile, b) p220 zımpara kağıdı ile c) p400 zımpara kağıdı ile	16
Şekil 2.11.	Zımparalamanın tabakalar arası karma direncine etkisi a) Yüzey pürüzlülüğü etkisi, b) Zımpara kağıdı tipi ve zımparalama süresinin etkisi	17
Şekil 2.12.	Yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak kayma dayanımı değişimi.....	18
Şekil 2.13.	ILSS testi sonrası 20x büyütme ile tabakalar arası ayrılma incelemesi a) Ön yüzey işlemsiz b) Ön yüzey işlemlili	19
Şekil 2.14.	Üç farklı GLARE malzeme için tespit edilen ILSS değeri ve L/h oranı arasındaki korelasyon	20
Şekil 2.15.	Üç nokta eğme testleri sonrası farklı alt destek mesafelerinde ortaya çıkan hasar modları a) GLARE 2A, b) GLARE 3, c) GLARE 6	20
Şekil 2.16.	Anodize edilmiş ve anodize edilmemiş numunelerin tepe yükleri	21
Şekil 2.17.	ILSS testi sonrası ortaya çıkan çatlakların mikroskopik olarak tanımlanması	21
Şekil 2.18.	Cam/epoksi tabakalı kompozit ve 7/6 GLARE kompozit malzeme.....	23
Şekil 2.19.	Farklı içeriklere sahip FMTK malzemelerin termal çevrim sonrası ILSS karşılaştırmaları	23
Şekil 2.20.	Termal çevrim öncesi ve sonrası mekanik değer değişimleri a) Gerilme direnci, b) Elastik modül.....	24
Şekil 2.21.	Termal çevrim sonrası gerilme-gerinim diyagramı	24
Şekil 2.22.	Termal çevrim döngü örneği.....	25
Şekil 2.23.	Termal çevrim öncesi ve sonrası yük-yer değiştirme grafikleri	26
Şekil 2.24.	Farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilme direnci ve ILSS değerleri.....	26
Şekil 2.25.	Termal çevrim döngü örneği.....	27
Şekil 2.26.	Üç nokta eğme testi sonrası grafikler a)yük-yer değiştirme, b)Termal çevrime bağlı ILSS değişimi.....	28
Şekil 2.27.	500 çevrim termal yaşlandırmaya tabi tutulmuş bir FMTK numunesinin hasar yapılarının SEM görüntüleri	28
Şekil 3.1.	Nanovea PS50 3D profilometre	31

Şekil 3.2.	AA6061-T6 yüzeyleri profilometre ölçüm sonuçları a) Yüzey işlemleri yapılmamış, b) Zımparalanmış, c) Yağ alma işlemi yapılmış ve d) Hem yağ alma hem zımparalama işlemi yapılmış	32
Şekil 3.3.	Sıcak pres üretim tekniği, a) Şematik gösterimi, b) Sıcak pres makinası	34
Şekil 3.4.	Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş FMTK plakalar.....	35
Şekil 3.5.	Su jeti	36
Şekil 3.6.	Su jeti ile FMTK kesim işlemi.....	36
Şekil 3.7.	Atlas SC 600 Solar Simulator (İklimlendirme kabini)	37
Şekil 3.8.	Termal çevrim koşulları, a) Birinci termal çevrim, b) İkinci termal çevrim	38
Şekil 3.9.	MTS® universal test cihazı	40
Şekil 4.1.	S/h:4.0 için test edilen GLARE malzemelerin yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri	43
Şekil 4.2.	S/h:10.0 için test edilen GLARE malzemelerin yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri	46
Şekil 4.3.	Üç nokta eğme testi sonrası hasarlanmış 3/2 GLARE test numuneleri (S/h:4.0)	48
Şekil 4.4.	Üç nokta eğme testi sonrası hasarlanmış 3/2 GLARE test numuneleri (S/h:10.0)	50
Şekil 4.5.	Birinci termal çevrim sonrasında GLARE malzemelere uygulanan ILSS testleri sonucu ortaya çıkan yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri.....	52
Şekil 4.6.	İkinci termal çevrim sonrasında GLARE malzemelere uygulanan ILSS testleri sonucu ortaya çıkan yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri.....	54
Şekil 4.7.	Tüm yüzey konfigürasyonları ve termal koşullar için ortalama ILSS değerleri ile standart sapma değerlerinin karşılaştırması.....	55
Şekil 4.8.	Birinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS testlerinde hasarlanmış GLARE malzemeler	57
Şekil 4.9.	İkinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS testlerinde hasarlanmış GLARE malzemeler	58

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Fiberlerin mekanik özellikleri.....	11
Tablo 2.2.	Ticari olarak kullanılan FMTK malzemeler	13
Tablo 3.1.	Profilometre ölçüm sonuçları.....	32
Tablo 3.2.	6061-T6 Alüminyum malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri	33
Tablo 3.3.	6061-T6 Alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi.....	33
Tablo 3.4.	S-2 cam fiber teknik özellikleri.....	33
Tablo 3.5.	Epoksi reçineli prepreg teknik özellikleri	33
Tablo 3.6.	Atlas SC 600 Solar Simulator (İklimlendirme kabini) teknik özellikleri... ..	37
Tablo 4.1.	Her yüzey işlemi için S/h:4.0 ve S/h:10.0 kullanılarak mm cinsinden ölçülen numune genişlik ve kalınlıkları	42
Tablo 4.2.	S/h:4.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum yük	44
Tablo 4.3.	S/h:4.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar	45
Tablo 4.4.	S/h:10.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum yük	46
Tablo 4.5.	S/h:10.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar	47
Tablo 4.6.	Farklı yüzey konfigürasyonları ve termal döngü şartları için ölçülen numune genişlik ve kalınlıkları	51
Tablo 4.7.	Birinci termal çevrim sonrası her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar.....	52
Tablo 4.8.	İkinci termal çevrim sonrası her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

b	: Ölçülen numune genişliği
h	: Ölçülen numune kalınlığı
cm	: Santimetre
°C	: Santigrat Derece
kN	: Kilonewton
m	: Metre
mm	: Milimetre
m ³	: Metreküp
GPa	: Gigapascal
MPa	: Megapascal
P _m	: Test sırasında gözlenen maksimum yük
R	: Maksimum normal gerilimin maksimum kayma gerilimine oranı
S	: Ölçülen numune uzunluğu
S _a	: Alansal yüzey pürüzlülüğü
T	: Sıcaklık
W	: Watt
µm	: Mikrometre
σ _x ^m	: Maksimum normal gerilim
τ _{xy} ^m	: Maksimum kayma gerilimi

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
ARALL	: Aramid Reinforced Fibre Metal Laminate (Aramid Elyaf Takviyeli Fiber Metal Tabakalı Kompozit)
CARALL	: Carbon Reinforced Fibre Metal Laminate (Karbon Elyaf Takviyeli Fiber Metal Tabakalı Kompozit)
CFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam elyaf takviyeli polimer)
FMTK	: Fiber Metal Tabakalı Kompozit
GLARE	: Glass Reinforced Fibre Metal Laminate (Cam Elyaf Takviyeli Fiber Metal Tabakalı Kompozit)
HRC	: Hardness Rockwell C (Sertlik Rockwell C)
ILSS	: Interlaminar Shear Strength (Tabakalar Arası Kesme Mukavemeti)
RH	: Relative Humidity (Bağıl Nem)

HAVA ARAÇLARINDA KULLANILABİLECEK YENİ NESİL FİBER METAL TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN METAL/PREPREG ARAYÜZEY DAYANIMININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, AA6061-T6 alüminyum sac plaka ve S2 cam fiber ile sıcak pres yöntemi ile imal edilmiş 3/2 GLARE malzemeler için ön yüzey işlemlerinin etkisi değerlendirilmiştir. GLARE malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımlarını arttırmak amacıyla AA6061-T6 sac plakalara zımparalama, yağ alma ve hem yağ alma hem zımparalama ön yüzey işlemleri uygulanmıştır. Üç nokta eğme testleri, tabakalar arası kayma ve eğilme davranışlarının deformasyon ve hata modlarındaki etkisini incelemek için iki farklı uzunluk-numune kalınlık oranı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan testler sonrasında tabakalar arası kayma dayanımları ve hata modları incelenmiş olup yük-yer değiştirme ve gerilim-yer değiştirme eğriler değerlendirilmiştir. Kaymaya karşı eğilme etkisinin artması nedeniyle, yüzey işlemli tüm GLARE malzemelerde dayanım değerlerinin ve kırılma modlarının alt destek mesafesinin yükselmesinden etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, yüzey işlemlerinin GLARE malzeme üzerinde termal yaşlandırma şartları altındaki etkisi değerlendirilmiştir. Bunun için tipik bir kargo uçağının maruz kaldığı sıcaklık değişimlerine atıf yapan iki farklı döngüsel termal şartlarda yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Elde edilen bulgular oda sıcaklığında yapılan üç nokta testleri ile karşılaştırılmıştır ve GLARE malzemelerin çevrimsel termal şartlar altındaki tabakalar arası kayma dayanımındaki değişiklik değerlendirilmiştir. Oda sıcaklığında bekletilen GLARE malzemelerin üç nokta eğme testinde elde edilen dayanım değerleri karşılaştırıldığında ön yüzey işlemi yapılmamış referans malzemelere oranla %29 ila %37 arasında artış olduğu gözlenmiştir. Termal yaşlandırma sonrası uygulanan üç nokta eğme testleri sonrasında ise tabakalar arası kayma dayanımlarının ön yüzey işlemi yapılmamış referans numunelere göre %29 ila %73 arasında arttığı gözlenmiştir. Her ne kadar sıcaklık değişimleri altında kayma dayanımları düşse de alüminyum sac plakalara hem yağ alma hem zımparalama işlemlerinin aynı anda yapıldığı kombine bir mekanik-kimyasal ön yüzey işlemi uygulandığında dayanım değerleri büyük ölçüde korunmuştur ve termal yaşlandırmaya maruz bırakılmamış numunelere göre yalnızca %4'lük bir kayıp olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Delaminasyon, GLARE, Kayma Dayanımı, Termal Yaşlandırma, Yüzey İşlemi.

DETERMINATION OF METAL/PREPREG INTERFACE STRENGTH OF NEW GENERATION FIBER METAL LAMINATE COMPOSITE MATERIALS THAT CAN BE USED IN AIRCRAFT

ABSTRACT

In this study, the effect of front surface treatments for 3/2 GLARE laminates manufactured by hot press method with AA6061-T6 aluminum sheet plate and S2 glass fiber was evaluated. Sandpapering, degreasing and both degreasing and sanding pre-surface treatments were applied to AA6061-T6 sheet metal plates in order to increase the shear strength between layers of GLARE laminates. Three point bending tests were performed using two different length-to-sample thickness ratios to examine the effect of interlaminar shear and bending behaviors on deformation and failure modes. After the applied tests, shear strengths and failure modes between layers were examined and load-displacement and stress-displacement curves were evaluated. It is observed that the strength values and failure modes of all surface-treated GLARE laminates are influenced by an increase in the lower support distance because of the increase in bending effect against shear. In addition, the effect of surface treatments on GLARE laminate under thermal aging conditions was also evaluated. For this purpose, two different cyclic thermal conditions, which refer to the temperature changes that a typical cargo aircraft is exposed to, were aged. The obtained findings were compared with three point tests at room temperature and the change in shear strength between layers of GLARE laminates under cyclic thermal conditions was evaluated. When the strength values obtained in the three-point bending test of GLARE laminates kept at room temperature were compared, it was observed that there was an increase of 29% to 37% compared to the reference materials without pre-treatment. After the three-point bending tests applied after thermal aging, it was observed that the shear strengths between the layers increased between 29% and 73% compared to the reference samples without pre-surface treatment. Although the shear strength decreases under temperature changes, when a combined mechanical-chemical prefacing treatment is applied to aluminum sheet plates with simultaneous degreasing and sandpapering, the strength values are largely preserved, with a loss of only 4% compared to the samples that are not exposed to thermal aging.

Keywords: Delamination, GLARE, Shear Strength, Thermal Aging, Surface Treatment.

1. GİRİŞ

İnsanoğlu, tarih boyunca ihtiyaçlarını karşılayabilmek için sürekli yeni ürünler ve malzemeler geliştirerek daha konforlu bir hayat sürme eğiliminde olmuştur. Zaman içerisinde, geleneksel malzemelerin yanında yeni malzeme çalışmaları yapma ihtiyacı doğmuştur. Havacılık, inşaat, robotik, otomotiv, sağlık, bilişim, savunma, uzay bilimleri gibi birçok sektör ise bu ihtiyacın ana müşterisi konumundadır. Bu doğal sürecin bir parçası olarak, termal ve boyutsal yönden kararlılığı yüksek, aşınma özellikleri kuvvetli, güçlü mukavemet özelliklerine ve sertliklere sahip olabilen ve bu özellikleri çeşitlendirilebilen kompozit malzemeler öne çıkmaktadır. Farklı özelliklerde olan en az iki kimyasal ya da fiziksel malzemenin bir araya getirilmeleri ile oluşturulmuş ve ortaya çıkan özellikleri bakımında daha güçlü bir malzeme grubu olarak sınıflanan kompozit malzemeler gelişen teknolojinin odak noktasında olmaktadır.

Çeşitli kompozit malzemeler, kullanım yeri ve kullanım gereksinimlerine göre farklı üretim yöntemleri ile imal edilebilmektedir. Alt kompozit sınıflarından biri olan tabakalı kompozitler, özellikle havacılık sektöründe önemli bir kullanım yelpazesine sahiptir. Kuyruk, zemin, kanat ve diğer yapısal parçalarda kullanım yerleri bulunan tabakalı kompozitlerin en büyük avantajı, maruz kalınan yükleme şartlarına uygun oryantasyon tasarımı yaparak tabakalar arasında varyasyon oluşturabilmesidir. Tabakaların açısız pozisyonu, tabakalar arası tutunma kuvveti, tabaka kalınlıkları ve tercih edilen malzeme özelliklerine göre çeşitlilik sağlanabilmektedir. Ayrıca ısı dayanımlarının yüksekliği ve hafifliklerinin yanı sıra ürün haline getirildiklerinde mukavemet özellikleri, sahip olabildikleri asimetric tabaka yapısı sayesinde metal malzemelerin muadili olabilecek düzeyde yüksektir.

Tabakalı kompozitlerin her ne kadar tabaka oryantasyonu ile mukavemetleri iyileştirilebilse de tabaka arayüzeyleri arasındaki mekanik davranış özellikle dinamik yükler altında önemli bir etki yapmaktadır. Arayüzeylerde hem matris malzemesi tarafında hem de takviye malzemesi tarafında kimyasal ve fiziksel bir etki olmakla beraber mekanik olarak da bir etkileşim mevcuttur. Yüksek performanslı bir tabakalı kompozite sahip olmak için takviye malzemesi ve matris malzemesine ait olarak arayüzeyler bağlanmasının üst düzey olması gereklidir. Arayüzeyler, maruz kalınan yüklerin oluşturduğu yapısal gerilmeleri tüm yapıya aktarırlar. Arayüzey bağlanmasının

kuvvetli olduğu noktalarda ortaya çıkan gerilmelerin aktarılması önemli ölçüde absorbe edilebilmektedir. Ancak arayüzey bağlanmaları zayıfladığında kompozit malzemenin yük taşıma kabiliyeti azalır ve yapısal bütünlüklerinin bozulmak riskleri ortaya çıkar. Arayüzeylerin bağlanma özelliklerinin güçlü olması için kimyasal ve çevresel etkilere karşı dirençli olması gerekmektedir. Servis şartlarında gelen yükler altında, arayüzeylerin dayanımının yeterli olmaması halinde matris fiber ayrılmalarına bağlı olarak delaminasyon hasarları ortaya çıkmaktadır.

Fiber metal tabakalı kompozitler (FMTK) sandviç türü yapısal bir kompozit olup prepreg/ince metal sac malzemelerin istiflenerek üretildiği bir malzeme türüdür. FMTK malzemelerin imalatı öncesinde metal sac plakalara ön yüzey işlemi yapmak prepreg/metal arayüzey mukavemetini arttırmaktadır. Bu sayede yapısal yüzey süreksizlikleri giderilir ve diğer safsızlıklar uzaklaştırılır. Zımparalama, taşlama, kumlama, anodizasyon, FPL-dağlama, yağ alma gibi mekanik veya kimyasal ön yüzey işlemleri uygulanabilir. Metal tabakalara uygulanan ön yüzey işlemi ile artan yüzey pürüzlülüğü ve ıslatma açısı ile daha kuvvetli arayüzey bağlanmaları elde edilmektedir. Bu da servis şartlarında birincil yapısal parçalarda kullanılan FMTK malzemelerinin kullanım ömürlerini arttırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, AA6XXX serisi, farklı ön yüzey işlemlerine tabi tutulmuş alüminyum plakalar ile tabakalandırılmış, S-2 cam elyaf takviyeli epoksi matrise sahip cam fiber takviyeli alüminyum (glass aluminium reinforced-GLARE) malzemelerde ön yüzey işlemlerinin alt destek mesafesi ve termal yaşlandırma etkileri ayrı ayrı incelenmiştir. GLARE malzemeler her ne kadar ticari olarak AA2XXX ve AA7XXX serisi alüminyum plakaların kullanımı ile ticarileşmiş olsa da AA6XXX serisi alüminyum plakalar ile temelde düşük maliyetlerle ikincil havacılık yapılarında da kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu yapılar, bir uçağın mutfak gibi bölümlerindeki iç yapısal destek parçaları, paneller veya aerodinamik yüzeyler olabilir. Başka bir uygulama alanı olarak ise insansız hava araçları için düşük maliyetli birincil yapılar için mükemmel bir şekilde uyarlanabilir. Buna bağlı olarak, GLARE malzeme imalatından önce AA6061-T6 kalite alüminyum plakalara zımparalama, yağ alma ve hem yağ alma hem de zımparalama olmak üzere üç çeşit yüzey işlemi uygulanmıştır. Bu sayede, uygulanan ön yüzey işlemlerinin metal/prepreg arayüzey bağlanmasına etkileri üç nokta eğme tabakalar arası

kayma dayanımı (interlaminar shear strength-ILSS) testleri uygulanarak belirlenmiştir. Literatürde, geleneksel GLARE malzemelerin tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinin farklı S/h oranlarında incelendiği görülmüştür. Ancak alt destek mesafesi olarak tanımlanan uzunluk-numune kalınlık oranı (S/h) değişimi ile malzemenin kayma veya eğilme davranışının ILSS değerleri üzerindeki etkileri incelenmemiştir. S/h oranı literatürde analitik denklemlerle net bir şekilde tanımlanmamıştır. Çalışma kapsamında, GLARE malzemelerin iki farklı uzunluk-numune kalınlık oranı (S/h:4.0 ve S/h:10.0) altında tabakalar arası kayma ve eğilme davranışları incelenmiştir. Yüzey işlemlerinin ve S/h oranının GLARE malzemeler üzerindeki etkisi, yük-yer değiştirme ve gerilim-yer değiştirme grafikleri kullanılarak tespit edilmiştir. Mukavemet değerleri, hem S/h oranları hem de yüzey işlem türleri için elde edilmiştir. Hata modları, hem yüzey işlemlerinin hem de S/h oranlarının etkileri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca, tipik bir kargo uçağının maruz kalabileceği iki farklı uçuş özelliklerine atıfta bulunan iki farklı termal koşul uygulanarak yine metal/prepreg bağlanmasına ön yüzey işlemlerinin etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, yeni nesil GLARE malzemelerinin sadece uçakların dış yapısal kısımlarında değil, iç mekan uygulamalarında da kullanılabilirliğe imkan vermesi beklenmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

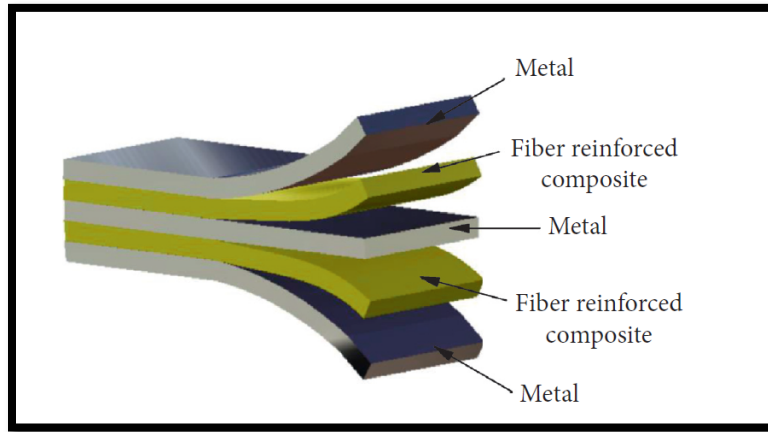
2.1. FMTK Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Kompozit kelimesi etimolojik tabanda Fransızca kökenlidir. Temelde “composite” kelimesinden türetilmiş ve karma, farklı tarzları bir arada bulunduran anlamına gelmektedir (İşlek, 2020). Kompozitler, birbirinden farklı en az iki malzemenin bir diğerinin içinde çözünmeden, makro ölçekte bir araya getirilmesiyle ortaya çıkartılan bir malzeme grubudur. Bu sayede geleneksel malzemeler olan ahşap malzemeler, alüminyum malzemeler, çelik malzemeler, diğer metal ve metal dışı malzemelerin tekil olarak sahip olamadığı birden çok fiziksel özellik ve tasarımsal esnekliğe sahiptirler. Genel bir özet ile, kompozitleri oluşturan malzemeler birbirlerinin zayıf özelliklerini geliştirir ve ortaya çıkan nihai kompozit malzemenin geleneksel malzemelere kıyasla üstün özellikleri olmasını sağlayabilirler (İşlek, 2020) (Kocaoğlu, 2021).

Tarihsel süreç göz önüne alındığında, kompozit malzemelerin insanoğlu tarafından kullanılmaya başlanması antik çağlara kadar dayanmaktadır (İşlek, 2020). İnsanoğlu eski çağlardan bu yana, kırılgan malzemelerin için bitkisel veya hayvansal çeşitli lifler entegre ederek bu malzemeleri güçlendirmeye çalışmışlardır. Bilindiği kadarıyla insanların kullandığı en eski eski kompozit malzeme kerpiçtir. Çamur ile birlikte saman ve sapların karıştırılması ile malzeme dayanımı artırılmış ve sağlam barınaklar inşa etmek mümkün olmuştur (İşlek, 2020). Tarihsel süreçte en çok kullanılan kompozit malzeme ise betondur (Kocaoğlu, 2021). Kompozit malzeme gelişimine en çok katkı sağlayan olgulardan biri de savaşlardır. Spartalılar ve Emeviler kenevir gibi doğal elyafları ağaç reçineleriyle birleştirip miğfer, zırh ve kalkan gibi savaşlarda ihtiyaç duyulan çeşitli araç ve gereçleri geliştirmişlerdir (İşlek, 2020). Moğollar, daha güçlü, hedef isabetinde başarıyı arttıran ve günümüzdeki incelemelere göre 400 metrenin üzerinde menzile sahip yaylar yapmışlardır. Bu yayları, dönemlerindeki esnedikçe kırılganlaşan kronik problemi aşmak için sığır tendonları, sığır boynuzları, bambu ağacı ve çam reçinesi kullanarak kompozitleştirmişlerdir. Bu kompozit yayların ise Cengiz Han’ın başarılarında büyük katma değer sağladığı düşünülmektedir (URL-1).

Günümüzde hala kullanılan reçinelerin gelişimi ilk 1930’lu yıllarda görülmüştür. 1936 yılında Carleton Ellis ilk doymamış poliestere reçinesinin, 1938 yılında da Pierre Castan

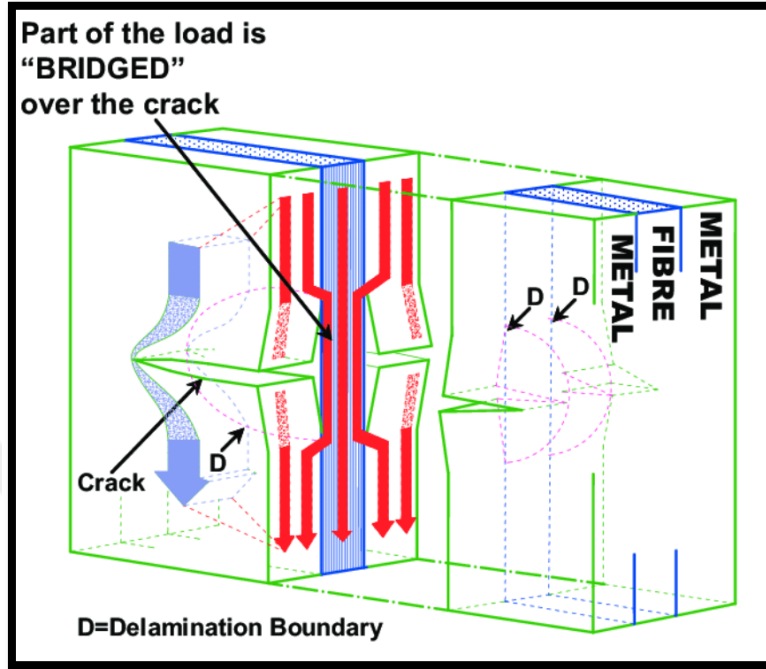
ilk epoksi reçinenin patentini almışlardır. Fakat bu reçineler ile üretilen malzemeler her uygulama için gerekli özelliğe sahip olmadıkları için Owens, 1932’de bu problemi ortadan kaldırmak adına, ilk cam elyaf takviyeyi üretmiştir. 1935’te Corning ile birleşmişler ve Owens Corning adıyla (OC) ilk cam elyaf fabrikasının temelini atmışlardır. Burada kullanılan cam takviye malzemeli reçineler sayesinde, sağlam ve hafif ürünler elde edilmeye başlanmıştır. Bu süreç, kompozit-CTP (cam takviyeli plastik), endüstrisinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir (URL-1). Owens Corning tarafından tanıtılan bu ilk cam elyaf (fiberglass) plastik bir polimer ile bir araya getirildiğinde oluşturduğu son derece güçlü yapının yanında aynı zamanda oldukça hafif olma özelliği taşımaktadır (URL-2). Özellikle İkinci Dünya Savaşı’nı takip eden süreç ile birlikte kompozit malzemeler laboratuvarlardan gerçek üretime geçmeye başlamış ve kullanım yoğunlukları ivmelenmiştir. Özellikle havacılık sektörünün kompozitlere olan ilgisi yine bu süreç ile birlikte yoğunlaşmıştır. Kompozitlerin sahip olduğu yüksek spesifik mukavemet, yüksek sertlik-ağırlık oranı, çok iyi yorulma direnci ve yüksek korozyon direnci özellikleri üstüne ilgi çekmesinin başlıca sebeplerindendir. Ancak darbe dayanımlarının özellikle metal alternatiflerine göre zayıf olması yeni bir arayış doğurmuş olup fiber metal tabakalı kompozit (FMTK) malzemelerin gelişimine sebep olmuştur (URL-2) (Das ve diğ., 2016). Tipik bir FMTK yapısı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Tipik bir fiber metal tabakalı kompozit yapısı (Chen ve diğ., 2020)

FMTK malzemeler 1940’lı yıllarda Fokker firmasının çalışmaları ile literatürde yer edinmeye başlamışlardır. Yapılan ilk çalışmalarda AA 2024-T3 alüminyum plakalara anodizasyon ön yüzey işlemi uygulanmıştır. Tabakalı yapıların incelenmesi sonucunda çatlak ilerleme hızlarının oldukça yavaş olduğu ve bir çatlak oluşumu sonrası bir tabakada

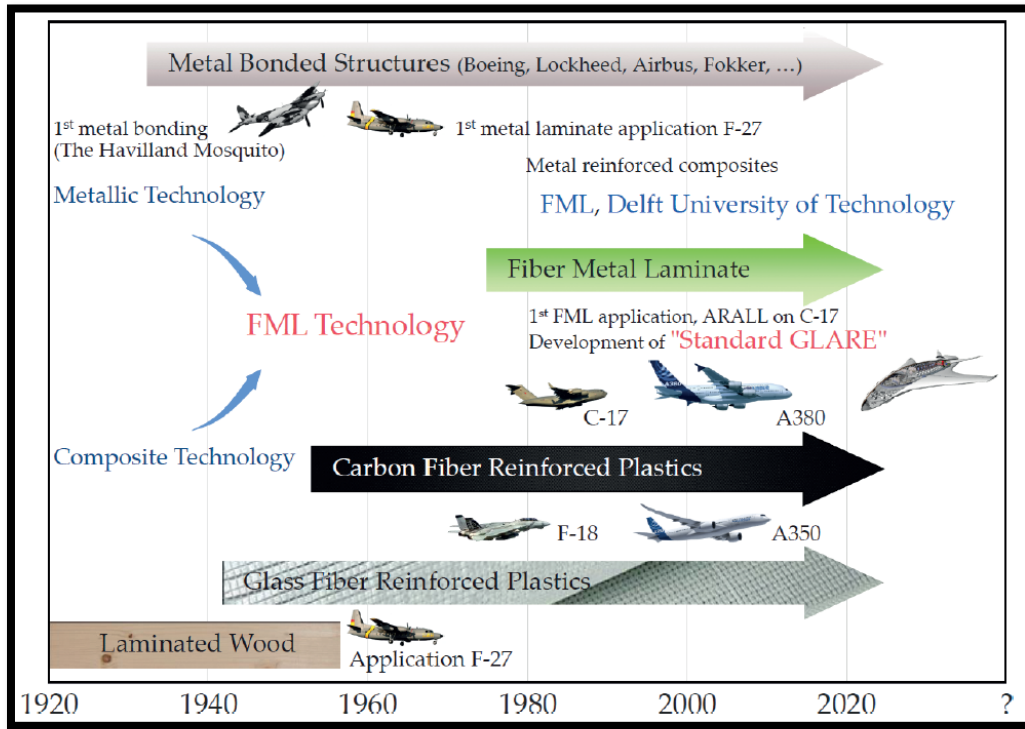
ilerlese bile diğer tabakaların bu çatlığa bir bariyer oluşturarak ilerlemesinin engellendiğini gözlemlemişlerdir (Schijve ve diğ., 1979). FMTK malzemelerde çatlak ilerlemesine karşı oluşan bu bariyer Şekil 2.2’de şematize edilmiştir.



Şekil 2.2. Fiberlerin çatlak köprülemesi ve tabakalardaki delaminasyon (Khan ve diğ., 2009)

Delft Üniversitesi’nde aramid takviyeli alüminyum (aramid reinforced aluminium-ARALL) ve karbon takviyeli metal plakaları (carbon reinforced aluminium-CARALL) yapıştırarak elde edilen FMTK’larda elde edilen sonuçlar en bata başarılı gözükse de örneklem sayısı artırıldığında delaminasyon problemi ile karşılaşmıştır. Yapı içerisinde çatlak bulunduğu fakat delaminasyon gözlemlenmediği durumlarda fiberler çok uzayarak kırıldığı; delaminasyonun var olduğu durumlarda ise çatlak çok hızlı bir şekilde ilerlediği ve yapıda açılmaya sebep olduğu tespit edilmiştir. Çatlak büyümesi ve delaminasyon arasındaki ilişkinin optimize edilmesi için Marissen, yorulmaya bağlı çatlak ilerleme miktarını hesaplayabilecek analitik model üzerinde çalışmıştır. Delft üniversitesinde yapılan çalışmaların sonucunda üniversitenin ince metal plakalar üreten ALCOA firması, aramid fiber imalatı yapan AKZO firması ve yapıştırıcı üreticisi olan 3M firması ile ortak çalışmalar yapmalarına yol açmıştır (Vermeeren, 2003). Fokker firması, F-27’lerin ve F-28’lerin geliştirilmesinden sonra yeni bir uçak geliştirmede için, 1960’lardan sonra aramid fiber takviyeli FMTK’lar ve sonrasında cam elyaf takviyeli

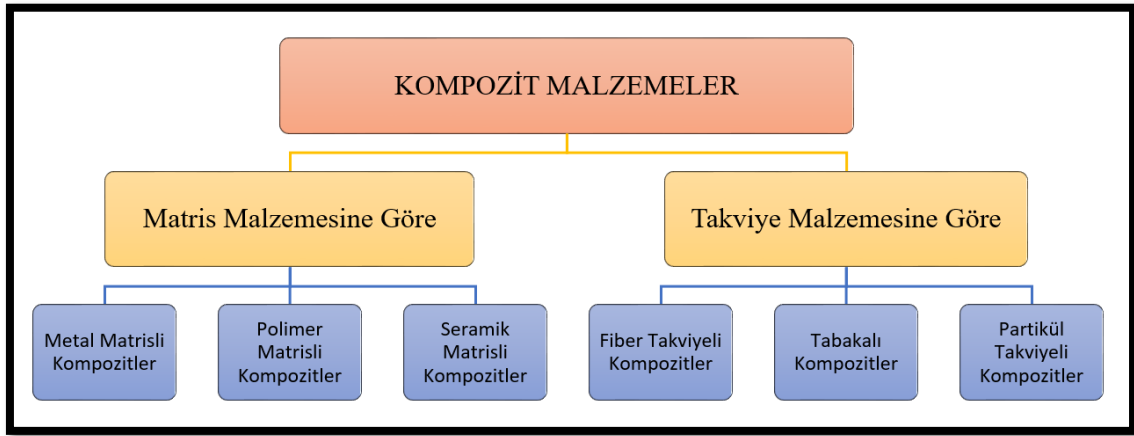
FMTK'ların yeni bir uçak üzerinde kullanımı için yapılan çalışmalar tamamlanamamıştır. Ancak Hollanda Havacılık Programları Kurulu'nun desteği ile 1984 yılında Fokker, Delft Üniversitesi ve ALCOA, daha önceden Fokker tarafından üretilen ve başarılı bir şekilde uçan F-27 uçağının kanadında bulunan bir parçasının aramid takviyeli alüminyum tabakalı kompozit ile üretilmesi konusunda işbirliği kararı alınmıştır. O tarihe kadar üretilen en büyük FMTK bir A4 yaprağı boyutlarında iken ALCOA firması 2 metre uzunluğa ve 1,5 metre genişliğe sahip bir kanat parçasını üretme taahhüdünde bulunmuştur. Aramid takviyeli alüminyum tabakalı kompozitler ilk olarak ALCOA firması tarafından 1982 ve 1983 yıllarında ARALL adı altında ticarileştirilmiştir (Surowska ve diğ., 2017). ARALL'ın yorulma özelliklerini arttırabilmek için devam eden çalışmaların bir sonucu olarak alüminyum plakalar arasında cam fiber serilerek GLARE malzemeler geliştirilmiştir. GLARE, ilk olarak 1987 yılında AKZO firması tarafından bir patente konu olmuştur. Ardından 1989'da Airbus'ın A330 ve A340 modellerinin gövdelerinde test edilmiştir. Ancak GLARE bir uçakta ilk kez 1990'lı yıllarda Boeing firması tarafından 777 modelinin kargo zemininde ve Bombardier 125'in kirişlerinde kullanılmıştır (Vermeeren, 2003) (Chai ve Manikandan, 2014). FMTK'ların havacılık sektöründeki tarihsel gelişimi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. FMTK'ların havacılık sektöründeki tarihsel gelişimi (Park ve Choi, 2018)

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler malzemeler mikroskobik ölçekte birbirleriyle yakın temas halinde olan iki veya daha fazla katı faza sahip heterojen malzemelerdir (Gupta ve Srivastava, 2015). Kompozitler malzemeler, içeriklerinde kullanılan farklı malzeme yelpazesi ve sahip olabildikleri yapısal çeşitlilikler ile birlikte çok fazla kombinasyona sahip olabilirler. Temelde, biri matris malzemesine göre diğeri de takviye malzemesine göre olmak üzere temelde iki ayrı grupta sınıflandırılabilirler (Elmarakbi, 2013). Bu temel sınıflandırmanın şematize edilmiş gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Eren, 2007) (İbrahim ve diğ., 2015)

2.2.1. Matrise Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemelerde matris fazlarının başlıca görevleri aşağıda verilmiştir (Aydın, 2020):

- Kompozit yapının formunu oluşturmak,
- Fiberleri sararak çevresel etkilerden korumak,
- Yapıya gelen yükleri takviye elemanlarına aktarmak.
- Fiberlerin yapı içerisinde bağımsız hareket etmelerini engellemek ve fiber yapıları bir arada tutmak.

Matris malzemesi olarak seçilecek olan malzeme belirlenirken korozyon direnci, maliyet etkisi, kimyasal, termal, elektrik, tutuşma özellikleri, beklenen performans ve üretim gerekliliklerine göre değerlendirilmektedir (Öztürk, 2020).

Metal matrisli kompozitler, ağırlıklı olarak otomotiv ve uzay endüstrilerinde özellikle yüksek sıcaklıkta çalışma kabiliyetleri sayesinde motor aksamaları veya türbin gibi parçalarda kendilerine kullanım alanı bulabilmektedirler. Metal matrisli kompozitlerin yüksek ısı ve elektrik iletme kabiliyeti, kolay şekillendirilebilirlik özelliği, yüksek radyasyon direnci, enine kitlerde daha yüksek değerlere ulaşabilen mekanik özellikler ve yüksek tokluk gibi özellikleri seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitlerden farklılaşan karakteristik özellikleri mevcuttur (Öztürk, 2020). Ancak metal malzemelerin korozyon afitineri yüksek olduğu için metal matrisli kompozitlerin en zayıf yönlerinin korozyon dirençlerinin düşük olduğunu söylemek mümkündür.

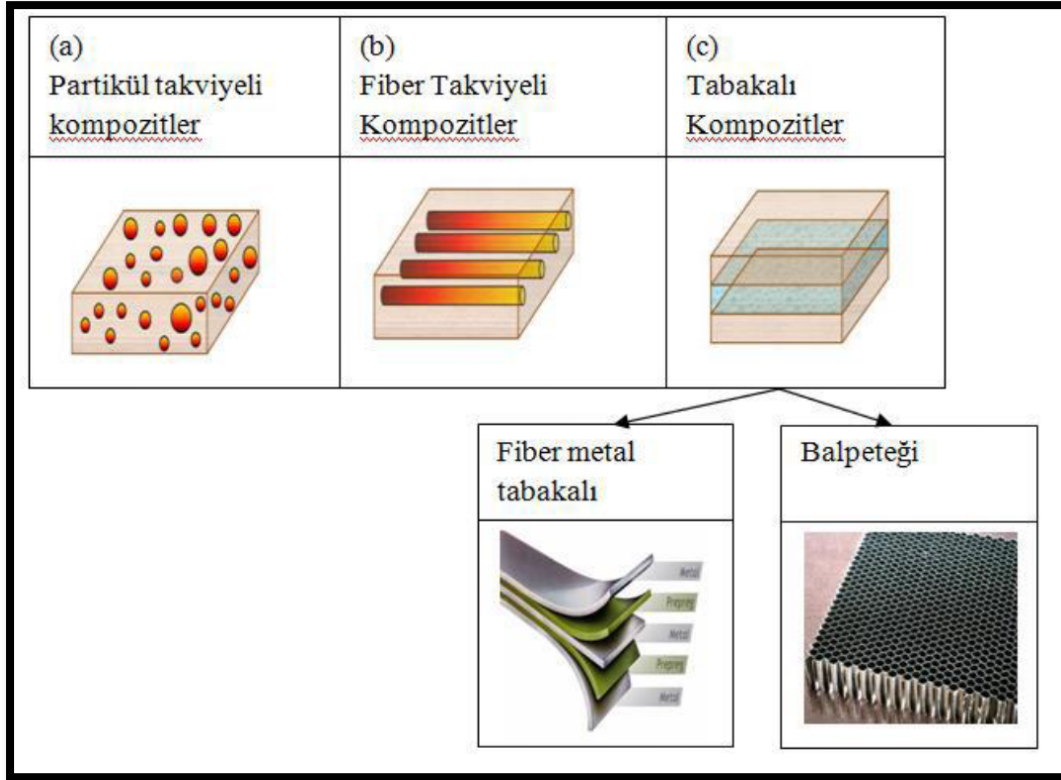
En az iki metal veya metal dışı malzemenin bir araya gelmesiyle oluşan inorganik malzemeler seramik olarak tanımlanır. Seramik matrisli kompozitlerin en önemli özellikleri, yüksek mekanik değerlere, çok yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyetine ve düşük yoğunluğa sahip olmalarıdır. Bu özellikleri sayesinde, kompozit malzemelerin matris fazlarından biri olma özelliği seramik malzemeler için de geçerlidir. Seramik malzemeler, her ne kadar yüksek performanslı bir malzeme grubu olsa da doğaları gereği gevrek özellikte olmaları ve mikro ölçekte bulunabilecek olan boşluk veya çatlaklar sebebiyle davranışsal değişkenlik gösterebilmektedirler (Semercigöz, 2021).

Polimerler terimsel anlamda, monomer adı verilen küçük moleküllerin kovalent bağ yapıları ile birbirine bağlanmasıyla ortaya çıkan kimyasal yapılardır. Polimerler tek başına kullanım yerine genellikle, çeşitli dolgu ve katkı maddeleri ile bir araya getirilerek kompozitleştirilmektedir. Polimer matrisli kompozitler, düşük maliyet, yüksek mukavemet ve basit üretim prensipleri sayesinde en geniş kullanım alanına sahip olan kompozit grubudur. Boyutlandırılabilirlik ve şekillendirilebilirlik özellikleri ilgi çekicidir. Polimer matrisli kompozit malzemeler; korozyona dirençli, uzun süreli kullanımlara yatkın, işlenebilirliği yüksek ve oldukça hafif malzemelerdir. Ayrıca sıvı etkileşimine, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla çok daha yatkındır. Örneğin makine parçaları gibi sıvı teması yoğun çalışma koşullarında bu özellikleri sayesinde tercih edilirler (Eryılmaz, 2021). İhtiyaç duyulan özelliklerin tümüne tek bir malzemedeki sahip olmak neredeyse imkansızdır. Polimer matrisli kompozitler metal veya seramik alternatiflerinin ikamesi olarak bazı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Fakat bunun sebebi yalnızca güçlü mekanik

dayanım ve hafifliğe sahip olmaları değil, insan dokuları ile uyum sağlayan ve sertlik derecesi ayarlanabilen yapay doku ve yapay organlar gibi uygulamalarda ve özel sistemlerin yapımında yer alabilmeleridir. Bir plastik matris fazı olarak kullanıldığında darbe sönümleyici, esneklik verici bir katkı sağlarken, takviye fazı olarak fiber versiyonu kullanıldığında yük taşıyıcı özelliğe sahip olmaktadır (Bulut, 2014). Bu çeşitlilik de polimer matrisli kompozitlerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

2.2.2. Takviye Malzemesine Göre Sınıflandırma

Ana matrisin içerisinde mukavemet sağlanması istenen yönlerin kuvvetlenmesi amacıyla takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler Şekil 2.5’de gösterildiği gibi takviye elemanlarına göre üç alt başlıkta gösterilebilirler (Kurt, 2021).



Şekil 2.5. Takviye malzemesine göre kompozit malzeme türleri (Kurt, 2021)

Partikül takviyeli kompozit malzemeler, yapı içerisindeki matris malzemenin içine, istenilen özelliklere sahip başka bir veya birkaç malzeme parçacıklarının eklenmesi ile üretilen kompozit grubudur. Yapısal olarak izotrop turlar. Mukavemet değerleri için genel bir veri bulunmayıp yapının mukavemetini içine eklenen partiküller

belirlemektedir. Yaygın olarak, plastik matris içerisinde eklenen metal partiküller ile kullanılırlar. Isıl ve elektriksel iletkenliklerini metal partiküller sağlamaktadır. Farklı bir tür olarak metal matrisler içerisinde yer alan seramik partiküllü kompozitler sahip oldukları sertlik ve yüksek sıcaklık dayanım özellikleri ile bilinirler. Partikül takviyeli kompozitler, esas olarak kompozitin sertliğinde artışa neden olmakla beraber aynı zamanda mukavemet ve tokluk değerlerinde de artış oluşmasını sağlarlar. Partikül takviyeli kompozitler yapı içerisinde bulunan yüksek sertliğe sahip takviye fazları sayesinde iyi aşınma direnci gösterirler (Şanlıtürk, 2020).

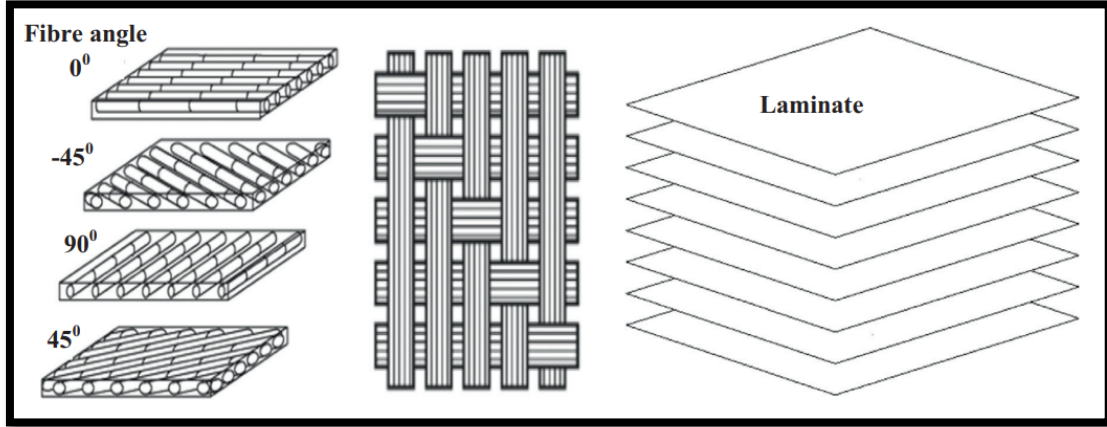
Fiber takviyeli kompozit malzemeler, matris fazına göre daha yüksek dayanıma sahip elyafların, matris fazının içine entegre edilmesiyle imal edilen malzeme grubudur. Elyafların matris içi oryantasyonu, ana malzemenin mekanik davranışını ve dayanım özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Fiber serimi paralel yapıldığında, yerleşim doğrultusundan gelen kuvvetlere karşı mukavemeti artırırken dik gelecek kuvvete karşı düşük mukavemet ortaya çıkmaktadır. Matris fazı da iyi yüzey kalitesi, fiberleri bir arada tutma ve fiberlerde olduğu gibi ana malzemeye süneklik, darbe dayanımı, tokluk gibi özellikler kazandırır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan bazı fiberlerin birkaç mekanik özelliği Tablo 2.1’de gösterilmiştir (Kurt, 2021).

Tablo 2.1. Fiberlerin mekanik özellikleri (Kurt, 2021)

Fiber	Yoğunluk (kN/m ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Alüminyum	26,3	620	73
Titanyum	46,1	1930	115
Çelik	76,6	4100	207
E-cam	25,0	3500	72
S-cam	24,4	4800	86
Karbon	13,8	1700	186
Boron	25,2	3450	400

Tabakalı kompozitler, en az iki tabaka bir araya getirilerek oluşturulur ve bu sayede arzu edilen özelliklere sahip olmaya çabalanır (Kılıç, 2006). Şekil 2.6’da da görüldüğü gibi, takviye fiber fazları matris eksenine farklı yönlenmeler ile istiflenebilir ve beklenen özelliğe göre uyarlama yapılabilir. Sertlik, hafiflik, iyi korozyon direnci, iyi aşınma direnci, yüksek mukavemet gibi özellikler tabakalı yapılar sayesinde elde

edilebilmektedir. Metal malzemelere göre daha hafif ve birçok durumda daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları için kullanım alanları geniştir (Eşer, 2021).

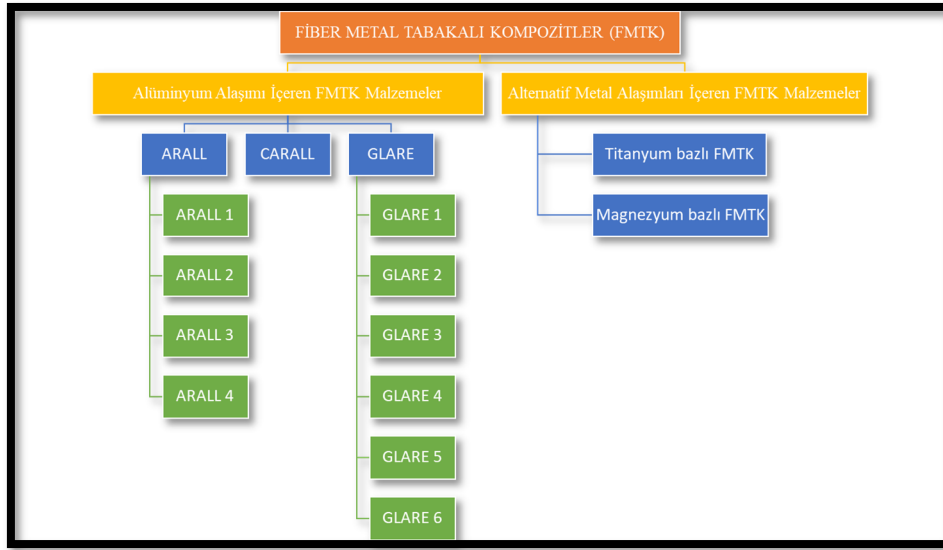


Şekil 2.6. Tabakalı kompozit şematik gösterim (Farooq ve Myler, 2016)

2.3. FMTK Malzemelerin Tanımlanması ve Sınıflandırılması

FMTK malzemeler fiber takviyeli prepreg ile birlikte ince sac metal plakalarla bir araya getirilen bir malzeme grubudur (Şanlıtürk, 2020). FMTK malzemeler, konvansiyonel malzemeler ile karşılaştırıldığında spesifik mukavemetleri (mukavemet-ağırlık oranı) oldukça yüksektir. Bu üstün özellik sayesinde kendilerine havacılık sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Kurt, 2021).

Fiber/metal kompozit teknolojisi, metal malzemelerin ve fiber takviyeli matris sistemlerinin avantajlarını birleştirebilmektedir. Bu yöntem ile ortaya çıkan kompozit malzeme, geleneksel alüminyumdan daha yüksek mukavemet ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Aynı zamanda, termoset kompozitlerden daha iyi darbe direnci ve kolay işlenebilirlik gibi farklı avantajlar da ortaya çıkmaktadır. En dikkat çekici yönü ise prepreg tabakalarındaki liflerin çatlak köprüleme etkisinden kaynaklanan olağanüstü yorulma direncidir. Ayrıca mükemmel korozyon direnci ve doğal olarak yüksek yanma direncinin yanı sıra iyi sönümlenme ve yalıtım özelliklerine sahiptirler. Tüm bunların yanında, fiber metal tabakalı kompozit olarak kabul edilmesine rağmen, kompozitlerden ziyade metal levhalara benzer şekilde tasarlanır, üretilir ve uygulanır (Sinmazçelik ve ark., 2011). Şekil 2.7’de FMTK malzemelerin sınıflandırması verilmiştir.



Şekil 2.7. FMTK malzemelerin sınıflandırılması (Sinmazçelik ve diğ., 2011)

Tablo 2.2. ticari olarak piyasada yer edinen FMTK malzemelerin isimlerini ve özelliklerinin detaylı bir şekilde göstermektedir.

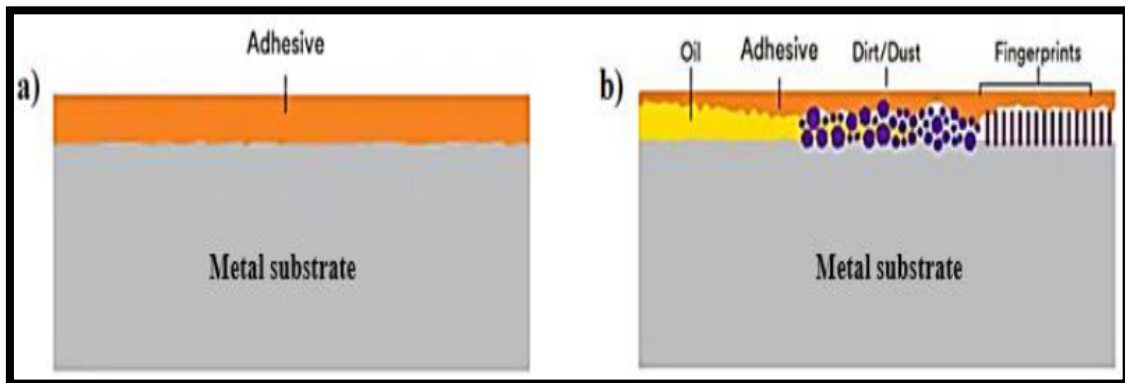
Tablo 2.2. Ticari olarak kullanılan FMTK malzemeler (Khan ve diğ., 2009)

	Alüminyum Sac Kalitesi	Alüminyum Sac Kalınlığı (mm)	Fiber Oryantasyonu (°)	Karakteristik Güçlü Özellikleri
ARALL 1	7075-T6	0,3	0/0	Yorulma Mukavemet
ARALL 2	2024-T3	0,3	0/0	Yorulma Şekillendirebilirlik
ARALL 3	7075-T6	0,3	0/0	Yorulma Mukavemet Tabaka kalkması
ARALL 4	2024-T8	0,3	0/0	Yorulma Yüksek sıcaklık
GLARE 1	7075-T61	0,3-0,4	0/0	Yorulma Mukavemet Akma dayanımı
GLARE 2	2024-T3	0,2-0,5	0/0, 90/90	Yorulma Mukavemet
GLARE 3	2024-T3	0,2-0,5	0/90	Yorulma Darbe direnci
GLARE 4	2024-T3	0,2-0,5	0/90/0, 90/0/90	0/90 yönde yorulma 0/90 yönde mukavemet
GLARE 5	2024-T3	0,2-0,5	0/90/90/0	Darbe direnci
GLARE 6	2024-T3	0,2-0,5	±45, ±45	Tabakalar arası kayma Eksen dışı özellikler

FMTK malzemelerin tarihsel gelişiminde ilk olarak ARALL ticari girişimlere konu olmuştur ancak GLARE malzemelerin fiber yönündeki spesifik sonuçlar ve dayanım

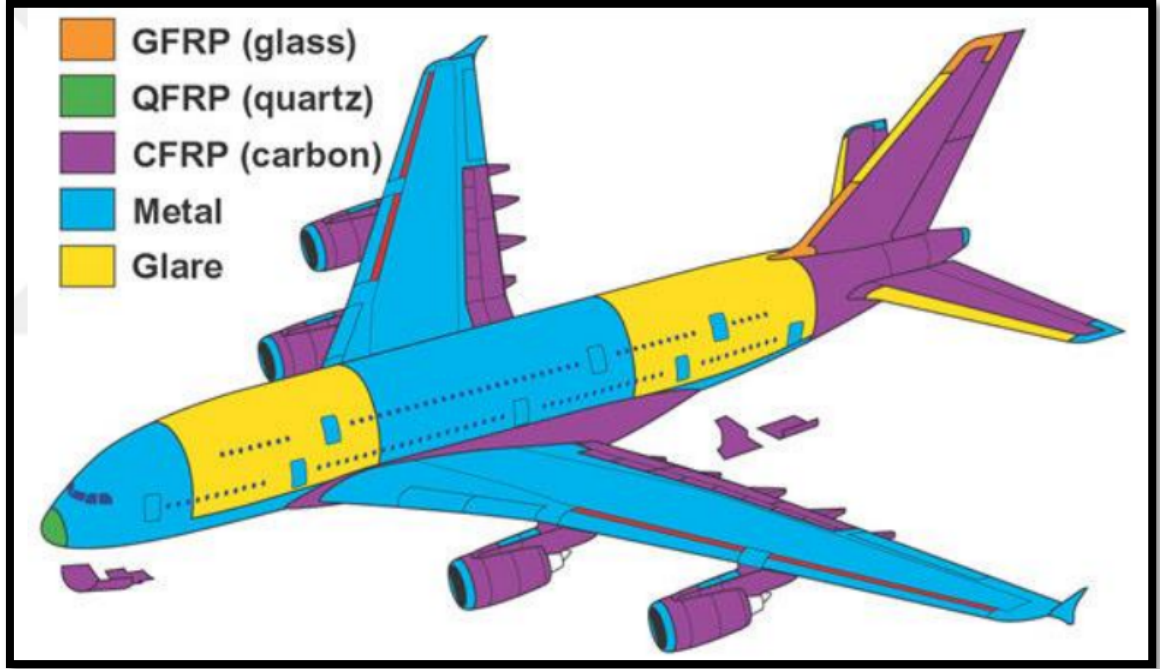
değeri, metal tabakalar için kullanılan yüksek dayanımlı alüminyum alaşımına göre artırılmıştır. Bu sayede, gerilmeye maruz kalan odak noktası tasarımında ağırlık tasarrufuna önemli ölçüde katkı sağlanır. GLARE malzemelerin ARALL malzemelere göre diğer avantajları, yüksek basma ve çekme kuvvetleri, daha iyi darbe dayanım ve yüksek gerilme-gerinme değerleridir. Reçine ve cam fiberler arasındaki daha iyi yapışmalar sayesinde GLARE tabakalı yaşamlarını iki yönlü yapmak mümkündür. Bundan dolayı iki eksenli gerilmelerin meydana geldiği bazı uzunluktaki parçalarda kullanıma uygundur (Kurt, 2021).

Metalik malzemeler Şekil 2.8’de de gösterildiği gibi üzere yağ, toz, absorbe edilmiş su, pas gibi yüzey süreksizliklerine sahiptir. Başarılı bir FMTK üretimi için yapışmanın olacağı yüzey, malzemenin doğasından gelen kirlerden bağımsız, temiz ve kararlı olmak zorundadır. Birden fazla yüzey topografyası gösteren doğası gereği kararsız ve homojen olmayan bir oksit tabakasına sahip alüminyum yüzeylerdeki bu safsızlıklar yapıştırma öncesinde malzeme yüzeyinden uzaklaştırılmalıdır. Epoksi-metal yapıştırıcılarında, metalik yüzey iyonları proses esnasında epoksi aminleriyle etkileşime girerek anlık ve uzun süreli dayanım performansı açısından değerlendirildiğinde saf epoksiden farklı özelliklere sahip bir arayüzey bölgesi oluşturmaktadır. Yağ alma ve mekanik ön yüzey işlemlerinin birlikte uygulandığı örneklerde ise yüzeydeki süreksizlikler daha güçlü bir şekilde giderilmekte ve oluşturulan yüzey pürüzlülüğü ile yapışma alanında artış sağlanmaktadır (Ozun, 2022). GLARE malzemeler FMTK üretimi öncesinde uygulanan ön yüzey işlemleri ile mükemmel yapışma davranışı gösterebilmektedirler.



Şekil 2.8. a) Ön yüzey işlemi uygulanmış, b) ön yüzey işlemi uygulanmamış metal yapışma yüzeyleri (Ozun, 2022)

Tüm bu üstün özellikleri ve yapışma yeteneği ile ticari anlamda havacılık sektöründe kullanım alanı günden güne artan GLARE malzemelerin kullanımına bir örnek olarak Airbus A380 uçağındaki kullanım yerleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

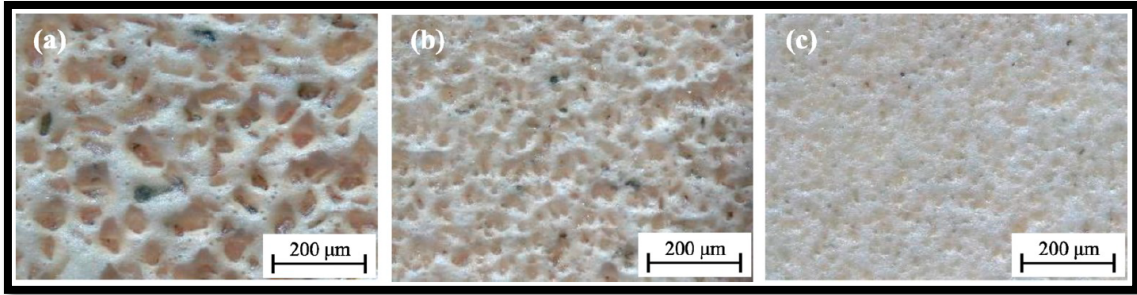


Şekil 2.9. Airbus A380 uçağındaki kompozit kullanımı (Aksüt, 2021)

2.4. Literatür Araştırması

Geliştirilmiş mekanik ve arayüzey özelliklerine sahip GLARE malzemeler, alüminyum yüzey modifikasyonu ve prepreg modifikasyon teknikleri birleştirilerek üretilir. Alüminyum alaşımının mikroyapısal araştırması, sonunda metal/prepreg arayüzey bağıni geliştiren yüzey modifikasyonuna bağıli mikro çukurların varlığını ortaya koymaktadır. Çekme, kırılma tokluğu ve ILSS test sonuçlarına göre, alüminyum yüzey işlemleri ve matris modifikasyonunun kombinasyonunun FMTK'ların genel performansını iyileştirdiğı açıkça belirtilmektedir (Rauf ve diğ., 2021). Rudawska (2014), yağ alma işleminin çelik plakaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki mekanik işlemlere etkisini araştırmıştır. En yüksek pürüzlülüğün taşlama işleminden sonra 0,55 µm olarak elde edildiğı ve yağ alma işleminden sonraki yüzey pürüzlülüğünün taşlamaya göre daha düşük olduğı tespit etmiştir. Kwon ve diğ. (2019), alüminyum/karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerden yapılmış hibrit malzemeler için arayüzey yapışmasını iyileştirmek için yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemiştir. Alüminyumun yüzey pürüzlülüğü, farklı

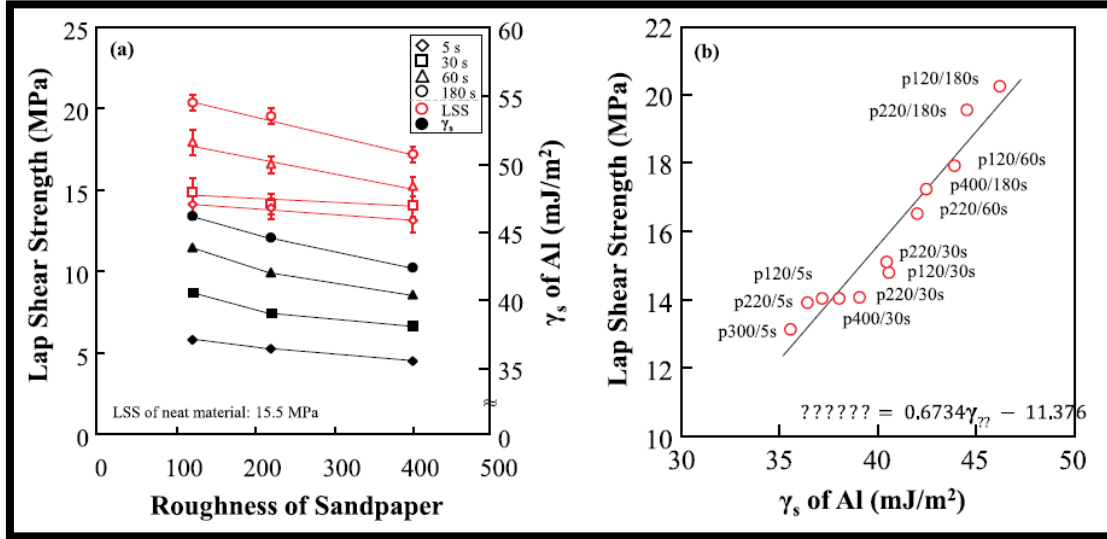
zımpara türleri (P120, P220 ve P400) ve çeşitli zımparalama süreleri (30 sn, 60 sn ve 180 sn) kullanılarak kontrol etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, saf alüminyuma ($0,42 \mu\text{m}$) kıyasla yüzey pürüzlülük değerlerinin zımparalama ile arttığını göstermektedir. Şekil 2.10'da kullanılan farklı zımpara kağıtlarından sonra elde edilen yüzeyinin optik mikroskop fotoğraflarını göstermektedir. Zımpara kağıtlarının p numarasının artışı ile yüzey pürüzlülüğünün düştüğüne dikkat çekilmektedir. P120 kağıt ile 30 sn'de zımparalama için en yüksek pürüzlülük değeri $1,75 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Ancak 180 sn zımparalama süresinden sonra elde edilen yüzey pürüzlülüğü $1,4 \mu\text{m}$ değerine sahip olarak düşüş göstermiştir. P220 ve P400 zımpara kağıtları kullanıldığı durumlarda da benzer eğilimler ortaya çıkmıştır. Kullanılan zımpara kağıtları ve elde edilen yüzey pürüzlülüklerine ait grafikler Şekil 2.11'de verilmiştir. Literatürle uyumlu olarak, ön yüzey işlemi görmüş GLARE malzemelerin ILSS değerlerindeki artışların bu çalışmada elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topoloji analizi ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 2.10. Zımparalanmış yüzeylerin optik görüntüleri a) p120 zımpara kağıdı ile, b) p220 zımpara kağıdı ile c) p400 zımpara kağıdı ile (Kwon ve diğ. 2019)

Endüstride, GLARE gibi metalik katmanlara sahip olan hibrit kompozitlerin mekanik veya kimyasal olarak yüzey işlemleriyle mukavemetlerini artırmaya eğilimi vardır. Hibrit polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılması, istifleme dizisinin analizi, fiber tiplerinin tanımlanması ve matrislerin nanopartiküller ile güçlendirilmesi gibi farklı parametrelerle sağlanabilir. Velumail ve Palaniyel (2022), termal özellikleri etkileyen parametreleri araştırmıştır. Altı farklı hibrit kompoziti incelemiş ve hibrit kompozitlerin Kevlar elyaf yüklemesine kıyasla bazalt elyaf yüklemesine kayda değer termal özelliklere ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Karthik ve diğ. (2022) silisyum karbür (SiC) nano parçacıkları ile karbon, cam ve kevlar elyaf takviyeli epoksi matris kompozitinin istifleme

dizisinin, geliştirilen yeni hibrit polimer matris kompozitlerin mekanik ve visko-elastik davranışı üzerindeki etkisine odaklanmıştır.



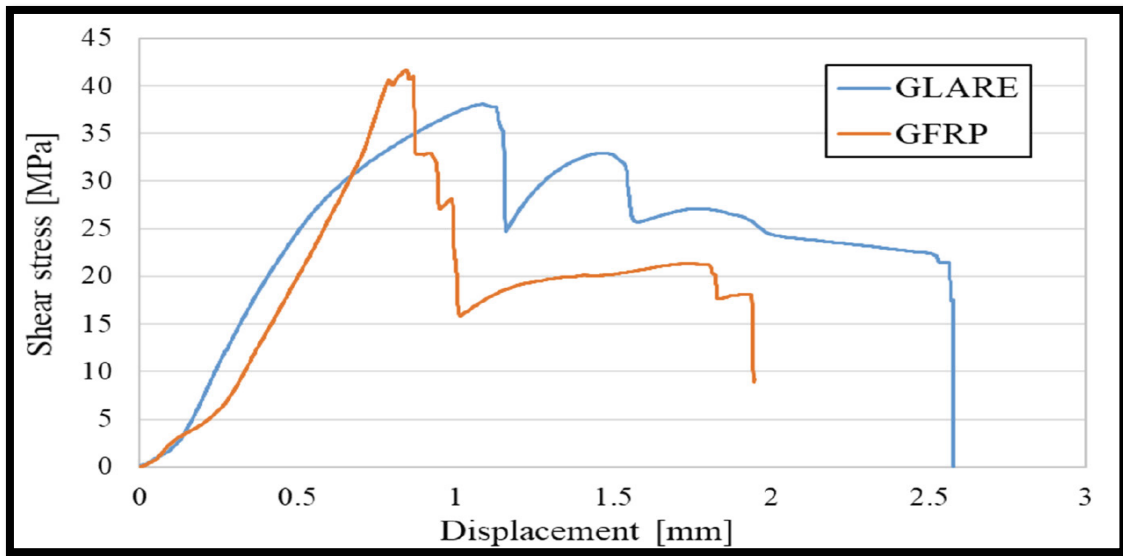
Şekil 2.11. Zımparalamanın tabakalar arası karma direncine etkisi a) Yüzey pürüzlülüğü etkisi, b) Zımpara kağıdı tipi ve zımparalama süresinin etkisi (Kwon ve diğ., 2019)

Bu kompozit malzemelerde farklı sentetik elyaf keçelerin istifleme sırasının, kompozitlerin termo-mekanik davranışını oldukça etkilediğini bulmuşlardır. Velumail ve Palaniyel (2021), Kevlar/epoksi ve bazalt/epoksi ve Kevlar/bazalt/epoksi hibrit kompozit malzemelerin üretimini araştırarak ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır ve sonuç olarak saf bazalt/epoksinin, daha yüksek yoğunluk değeri nedeniyle Kevlar/epoksi muadilinden daha yüksek çekme, eğilme ve darbe dayanımı sergilediğini bulmuşlardır. Fayaz ve diğ. (2022) üç farklı doğal elyafı güçlendirilmiş bir epoksi matrisli kompozite nano titanyum oksit ve poliamid elyafların eklenmesinin, kompozitin yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Poliamid liflerinin, büyük termal kararlılıkları nedeniyle malzemeleri güçlendirmek için kullanıldığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca termal bozunma ile ilişkili aktivasyon enerjilerini hesaplayarak ve polimerin termal bozunmasının, ikinci adımın en yavaş olduğu Broido grafiklerine göre beş adımda gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

Bir FMTK'nin ILSS değeri artırılırken diğer düzlem içi özellikler, farklı özelliklere sahip olabilir. Düzlem içi mekanik özellikler, fiber matris yapışmasından önemli ölçüde etkilenmez. İşlem yapılmamış liflere sahip dökme kompozit numuneler için mukavemette önemli bir düşüş gözlemlenmesine rağmen enine çekme mukavemeti neredeyse

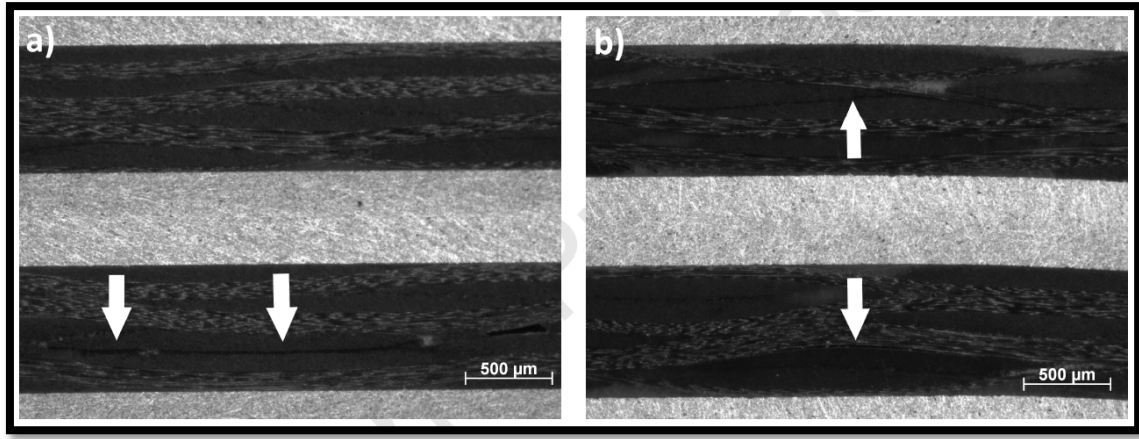
etkilenmez. Bunun nedeni, FMTK'larda enine özelliklerin, metalik katman özellikleri ile domine edilmesidir. Bu nedenle, fiber matris yapışmasının, FMTK'ların enine mukavemeti üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır. Bu gerçek, metalik katmanların benzer hakimiyetinden dolayı Young Modülü ve enine Poisson Oranı için de geçerlidir. Uzunlamasına yönde, fiber ve matris, yükleme yönüne paralel olarak bağlanır ve bu nedenle fiber matris yapışmasının etkisi daha az önemli hale gelir (Afaghi-Khatibi ve diğ., 2000).

Bellini (2020), 3/2 oryante edilmiş GLARE bazlı FMTK malzemesinin mekanik davranışını geleneksel cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile karşılaştırmıştır. Özellikle, hibrit ve geleneksel sandviç yapılardan çıkarılan kısa kiriş numuneleri üzerinde üç nokta eğme testi gerçekleştirilerek tabakalar arası kayma özelliklerini tespit etmiştir. Aynı tip yüke maruz kalan iki farklı türdeki numunenin gerilme-yer değiştirme eğrileri gözlemlenerek, GFRP biraz daha yüksek bir değer gösterse bile maksimum kayma gerilmesi seviyesinin her iki numune için oldukça benzer olduğunu tespit etmiştir. Özellikle, GLARE numunesinin maksimum kayma gerilmesi GFRP'ninkinden daha düşük olsa bile, elde edilen yer değiştirme sonucu daha yüksek olarak bulunmuştur. Yani, GLARE malzemenin yapısal deformasyonu GFRP'ninkinden daha geç meydana gelmiştir. GLARE'in ortalama ILSS'si 39,22 MPa, GFRP'ninki ise 44,83 MPa olarak bulunmuştur. Karşılaştırma grafikleri Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Yer değiştirmenin bir fonksiyonu olarak kayma dayanımı değişimi (Bellini, 2020)

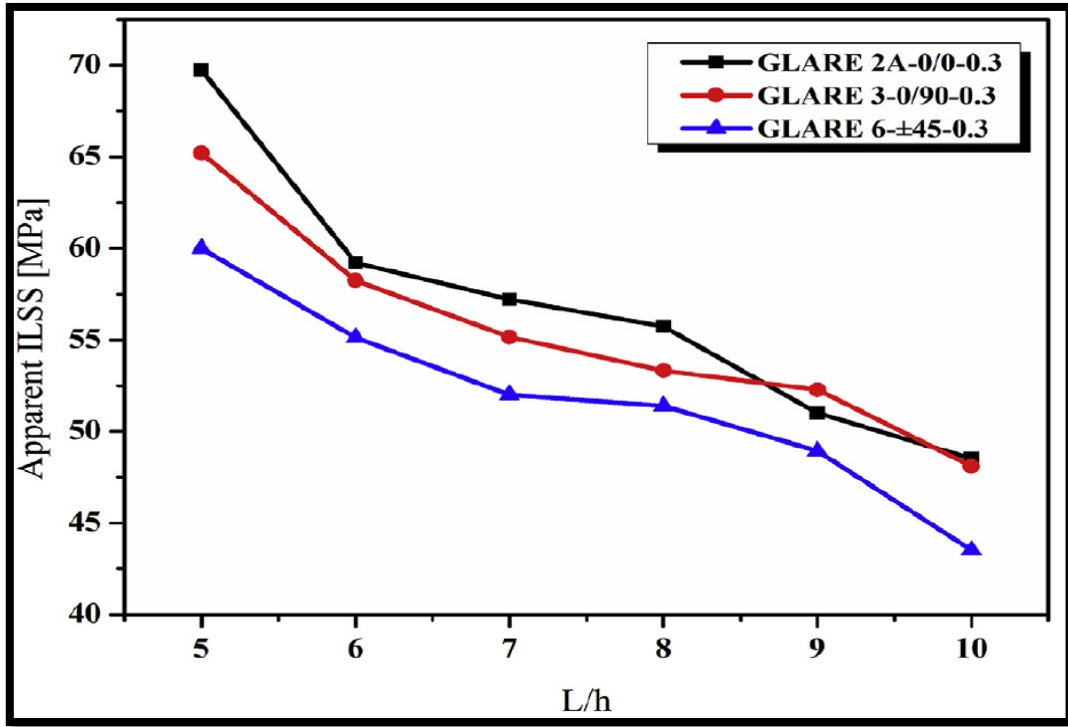
Santos ve diğ. (2020), 2024-T3 alüminyum plakaların anodizasyonunun FMTK'ların mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştırmıştır ve bu amaçla ILSS testleri uygulamışlardır. Ortalama ILSS hesaplandıktan sonra ön yüzey işlemi yapılmamış alüminyum ile üretilen FMTK numuneleri $57,4 \pm 2,3$ MPa, anodize edilmiş alüminyum ile üretilen FMTK numuneleri ise $64,5 \pm 1,2$ MPa değere ulaşmıştır. Anodizasyon işleminin tabakalar arası kayma mukavemetini %12,4 artırdığını tespit etmişlerdir. Alüminyum plakların, metal ve prepreg katmanları arasında daha iyi arayüzey yapışmasına sahip olması için, GLARE üretiminden önce işlem görmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. ILSS testinden sonra bakelite alınmış ve kırılma modlarını değerlendirmek için zımparalanmış optik mikroskop görüntüleri Şekil 2.13'te verilmiştir.



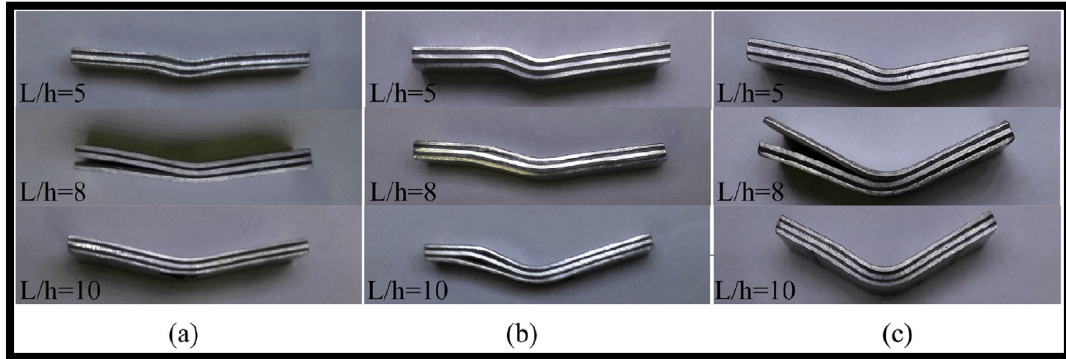
Şekil 2.13. ILSS testi sonrası 20x büyütme ile tabakalar arası ayrılma incelemesi a) Ön yüzey işlemsiz b) Ön yüzey işlemlidir (Santos ve diğ., 2020)

Literatür taramasında kısa alt destek mesafesi testlerinde kayma, kayma faktörünün etkisinde olurken, uzun alt destek mesafesi testlerinde ise hasar modunun eğilme hasarı olarak ortaya çıktığı görülmüştür (Chen ve diğ., 2020). Benzer bir araştırma Liu ve diğ. (2016) tarafından yapılmıştır ve alt destek mesafelerinin değişimi ile farklı GLARE malzemelerin ILSS değerleri ve hasar modları incelenmiştir. Numune uzunluk-kalınlık oranının artışı ile ILSS değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Grafikselsel çizim Şekil 2.14'te verilmiştir.

Bu çalışmada ayrıca hasar modlarını görsel olarak incelemiş ve alt destek mesafesinin büyümesi ile ortaya çıkan hasar modunun tabaka ayrılmasından eğilme davranışına doğru evrildiği Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

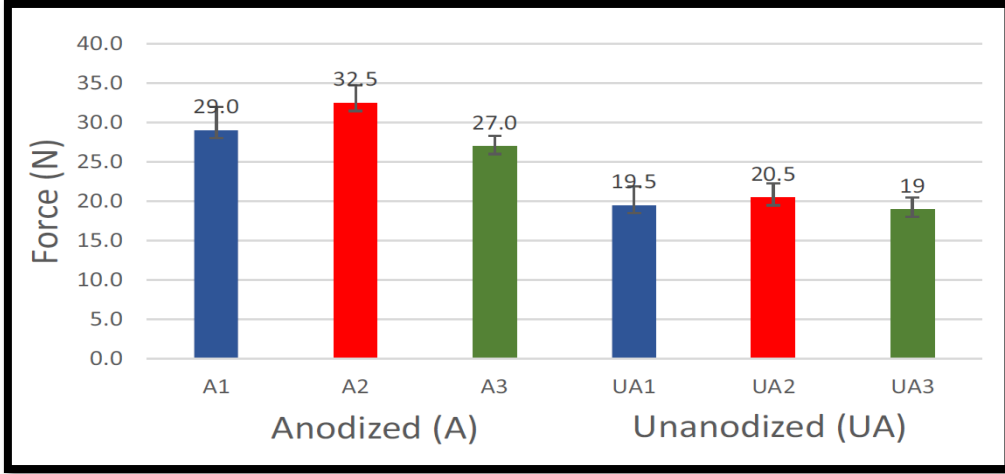


Şekil 2.14. Üç farklı GLARE malzeme için tespit edilen ILSS değeri ve L/h oranı arasındaki korelasyon (Liu ve diğ., 2016)



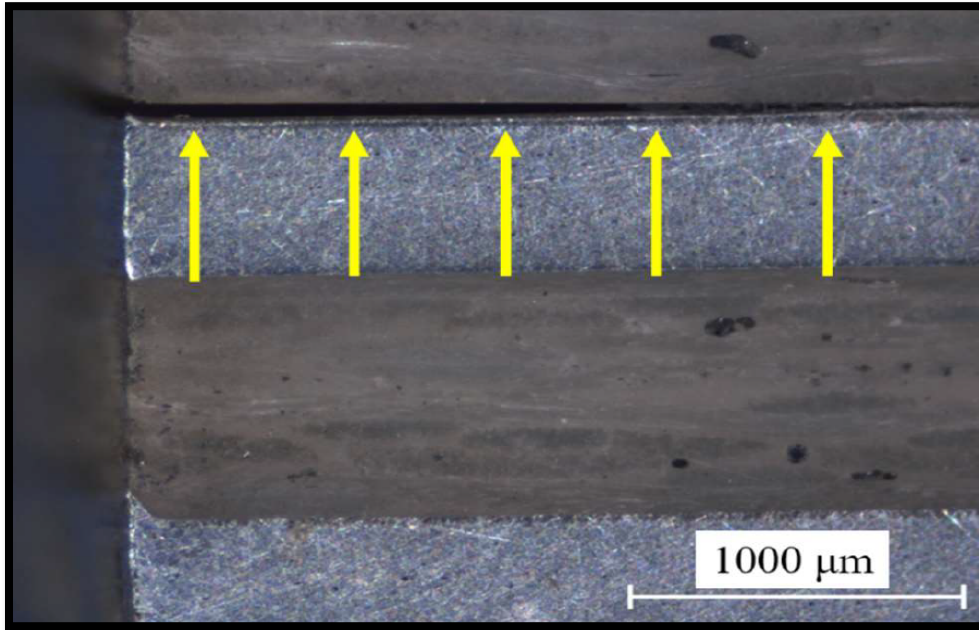
Şekil 2.15. Üç nokta eğme testleri sonrası farklı alt destek mesafelerinde ortaya çıkan hasar modları a) GLARE 2A, b) GLARE 3, c) GLARE 6 (Liu ve diğ., 2016)

Khalid ve diğerleri (2021) AA2024-T3 alüminyum plaka kullanılarak imal edilmiş 2/1 GLARE malzemelerde anodizasyon ön yüzey işleminin ILSS üzerindeki etkilerini incelemiştir. Elde ettikleri bulgulara göre anodize edilmiş numuneler iyi bir arayüzey yapışmasına sahiptir ve bu sayede daha yüksek tabakalar arası kayma direncine ulaşılabilmiştir. Şekil 2.16 hem anodizasyon yapılmış hem de anodizasyon yapılmamış numuneler için elde edilen ve tabaka ayrılması için gerekli olan en yüksek dayanım yüklerinin karşılaştırmasını göstermektedir.



Şekil 2.16. Anodize edilmiş ve anodize edilmemiş numunelerin tepe yükleri (Khalid ve diğ., 2021)

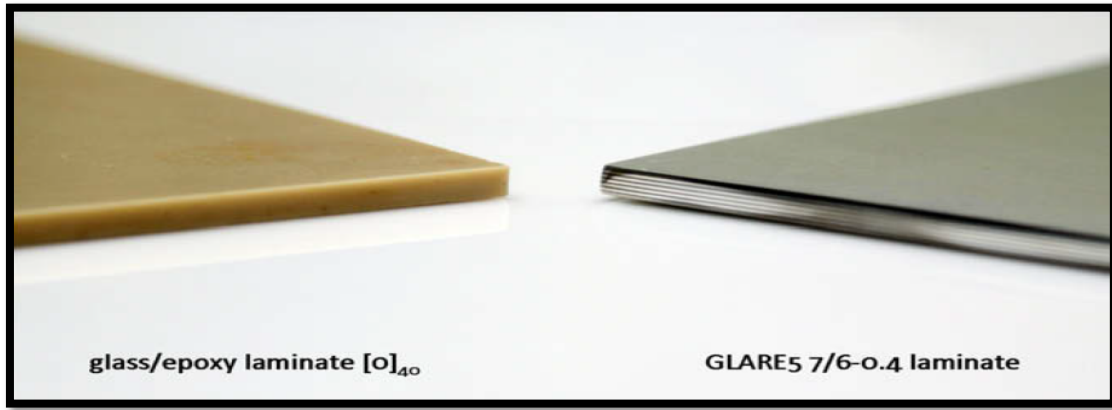
Bonhin ve diğerleri (2022) anodizasyon yapılmadan yalnızca mekanik ön yüzey işlemi yapılmış GLARE malzemelerin tabakalar arası kayma direncini incelemişlerdir. Test malzemesi olarak ürettikleri GLARE’de üç tabaka 0,4 mm kalınlıkta AA2024-T3 sac plaka kullanmışlardır ve elde edilen ILSS değeri $48,18 \pm 2,20$ MPa’dır. Elde edilen sonuç, literatür kıyaslamalarına göre kimyasal ön yüzey işlemi yapılmış GLARE malzemelerin ulaştığı değerlerin yaklaşık %15 kadar altındadır. Test sonrası hasar görselleri Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17. ILSS testi sonrası ortaya çıkan çatlakların mikroskobik olarak tanımlanması (Bonhin ve diğ., 2022)

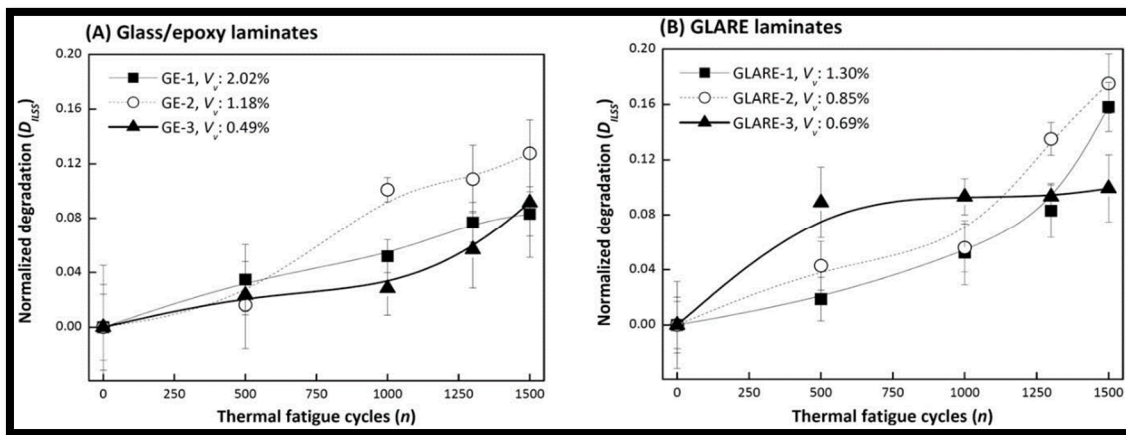
Bir uçağın kompozit yapısal bileşenleri, hizmet ömrü boyunca sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan döngüsel termal gerilmeler ve gerinimlerin bir sonucu olarak matris çatlaklarına, lif kırılmalarına ve delaminasyona yol açabilecek binlerce termal döngüye maruz kalırlar. Termal döngünün nedenleri, farklı irtifalar için sıcaklık farklılıkları ve uçuş sırasında meydana gelen aerodinamik ısınmadır. Yapısal hava aracı parçaları, tipik bir uçuş sürecinde -50°C ile $+80^{\circ}\text{C}$ aralığında sıcaklık geçişlerine maruz kalabilmektedirler. Yapısal parçalarda kullanılan FMTK malzemeler, bu şartlar altında katmanların ısı gerinimlerindeki farklılıktan ve döngüsel termal gerilmelerden kaynaklanan dolayı uzun vadede hasarlanabilmektedirler. FMTK malzemelerde tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) gibi genel olarak dayanımın aşılmasına yol açan çeşitli mekanik yüklerin sonradan etkisi de dahil edildiğinde hasar mekanizmaları daha hızlı olabilir. Birbirine sıkı sıkıya bağlı metalik ve kompozit tabakaların ısı genleşme katsayılarındaki %80'e varan farklılıklar nedeniyle FMTK malzemelerin metal/prepreg arayüzlerinde hasar meydana gelir. Öte yandan, sıcaklık sıfırın altından yüksek seviyelere doğru değişirken, ısıdaki aşırı değişim nedeniyle ortaya çıkan nem de bir başka sorundur. Higrotermal bir ortamda, fiberle güçlendirilmiş bir polimer matris kompozit, epoksiye difüzyon sürecinden kaynaklanan nemi emme eğilimindedir. FMTK'lar, dış alüminyum katmanları nedeniyle polimer kompozitlere kıyasla nemi çok yavaş emerler. Alüminyum ve prepreg katmanlar arasındaki arayüzey, FMTK'larda nem etkisi ile hasarlanmaya en açık alandır. Bu nedenle, bir FMTK'nın çeşitli mekanik özellikleri, yapıştırıcıyla bağlanmış alanlar ve reçine matrisinin higrotermal bir koşul altında plastikleşmesi nedeniyle olumsuz etkilenir (Noor ve diğ., 2017). Uçak endüstrisindeki yüksek kalite standartlarını karşılamak için, şiddetli termal yüklerin etkisi altındaki GLARE gibi gelişmiş bir hibrit malzemenin dayanıklılığının araştırılması gerekir. Çeşitli döngüsel termal koşullara maruz kalan FMTK'lar ile ilgili güncel çalışmalar literatürde kolayca bulunamamaktadır. Gerekli olan bilgi havuzu, güvenli operasyon koşullarını garanti etmek için sıkı bir sertifikasyon sürecinden geçen ticari ve askeri hava taşıtlarında kullanıldıkları için muhtemelen mevcuttur. Ancak bu bilgiler, havacılık ve uzay şirketlerinin gizlilik sözleşmeleri ile kısıtlanabilir (da Costa ve diğ., 2012). Termal yorgunluğun bir yapı üzerindeki uzun vadeli etkileri, döngüsel termal şartlandırma testleri aracılığıyla simüle edilebilir (Hagenbeek ve diğ., 2019). Termal çevrim işleminde, çapraz bağlama zincirinin kesilmesi ve mikro çatlama, polimer matrisinin bozulmasına yol açar.

Metallerin ve polimerlerin termal genleşme katsayıları arasındaki önemli fark, FMTK'ların mekanik özelliklerinde önemli rol oynar (Azghan ve Farsani, 2018). Park ve diğ. [2010], çalışmalarında kullandıkları numuneleri 25°C ile 125°C arasında 1500 termal çevrim ve her döngü için 15 dakikalık süre uyguladıktan sonra üç nokta eğme testleri yaparak, ILSS test sonuçlarında cam/epoksi için %8 ila %13, GLARE için %9 ila %18 azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışma kapsamında üretilen cam/epoksi ve GLARE5 7/6 numune fotoğrafları Şekil 2.18'de verilmiştir.



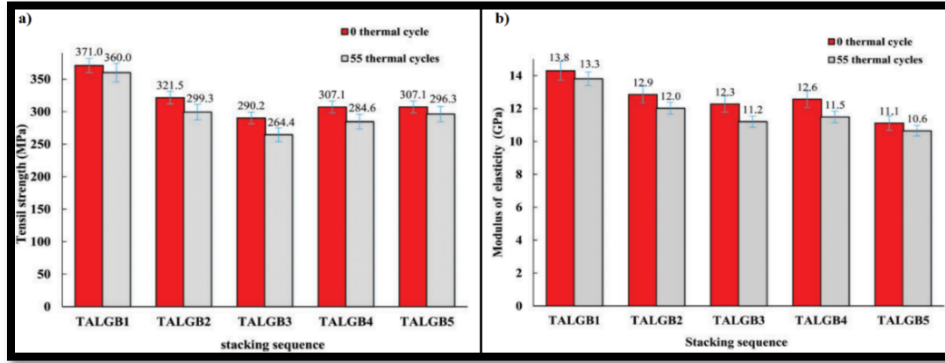
Şekil 2.18. Cam/epoksi tabakalı kompozit ve 7/6 GLARE kompozit malzeme (Park ve diğ., 2010)

Ayrıca, GLARE malzemenin normalize edildikten sonraki bozunmasının cam/epoksi FMTK'dan %1-7 daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu dayanım düşüşünün sebebini de iç gerilmelerden kaynaklı olarak açıklamaktadırlar. Şekil 2.19, elde edilen grafikleri göstermektedir.

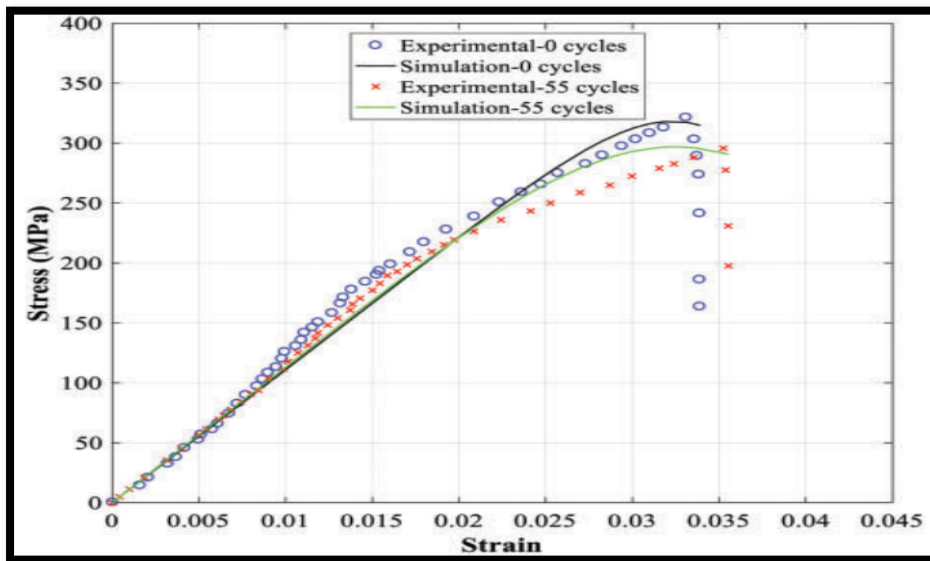


Şekil 2.19. Farklı içeriklere sahip FMTK malzemelerin termal çevrim sonrası ILSS karşılaştırmaları (Park ve diğ., 2010)

Azghan ve diğ. (2021) cam ve bazalt elyaf takviyeli prepreg ve 2024-T3 alüminyum sac plaka içeren FMTK'ların gerilme davranışı üzerindeki termal döngü ve istifleme dizisinin etkisini araştırmışlardır. 25°C ile 115°C sıcaklık aralığında 6 dakika boyunca toplam 55 termal çevrim uygulanmıştır. Termal çevrim sonrasında; bazalt elyaf takviyeli FMTK'ların çekme mukavemeti, elastik modül ve enerji emilimi sırasıyla %2,9, %3,4 ve %1,8 azalırken, cam elyaf takviyeli FMTK'ların mekanik özelliklerinin sırasıyla %3,5, %4,1 ve %4 azaldığı tespit edilmiştir. Termal çevrim öncesi ve sonrası elde edilen mekanik değerlerin karşılaştırma grafikleri Şekil 2.20'de verilmiştir. Ayrıca, termal çevrim öncesi ve sonrası gerilme-gerinme diyagramları deneysel olarak değerlendirilmiş ve ardından fiziki numune testleri ile karşılaştırılmıştır. Örnek bir karşılaştırma grafiği ve elde edilen düşüş eğrileri Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

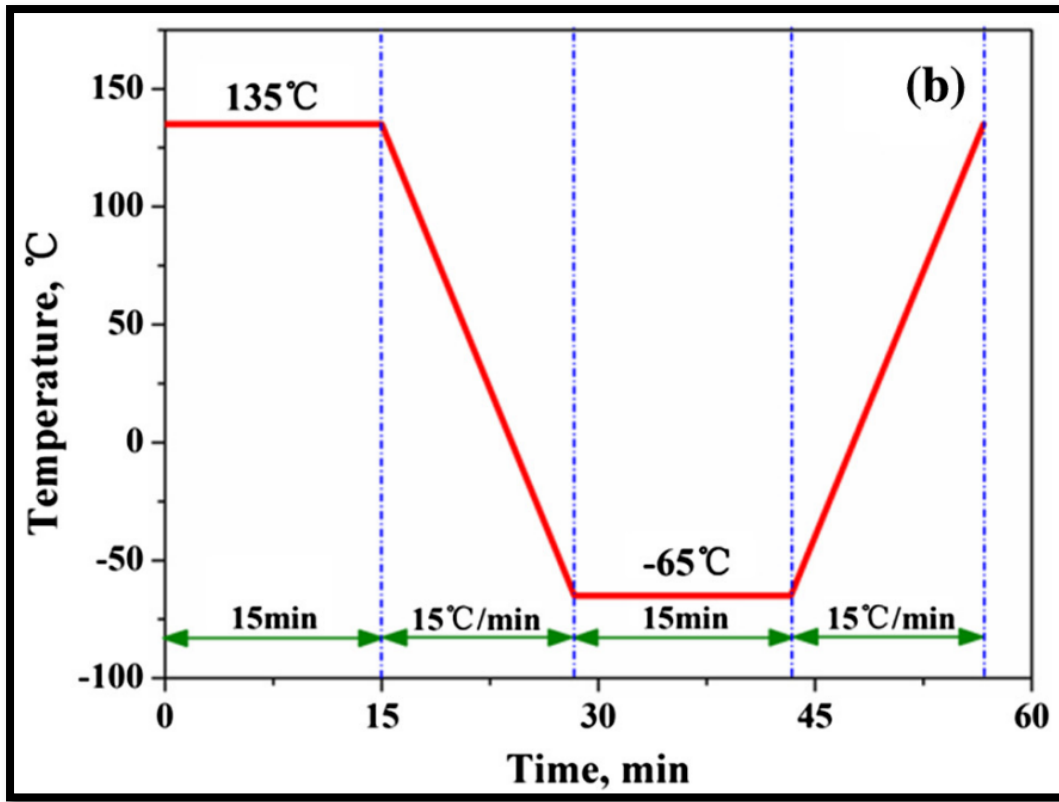


Şekil 2.20. Termal çevrim öncesi ve sonrası mekanik değer değişimleri a) Gerilme direnci, b) Elastik modül (Azghan ve diğ., 2021)

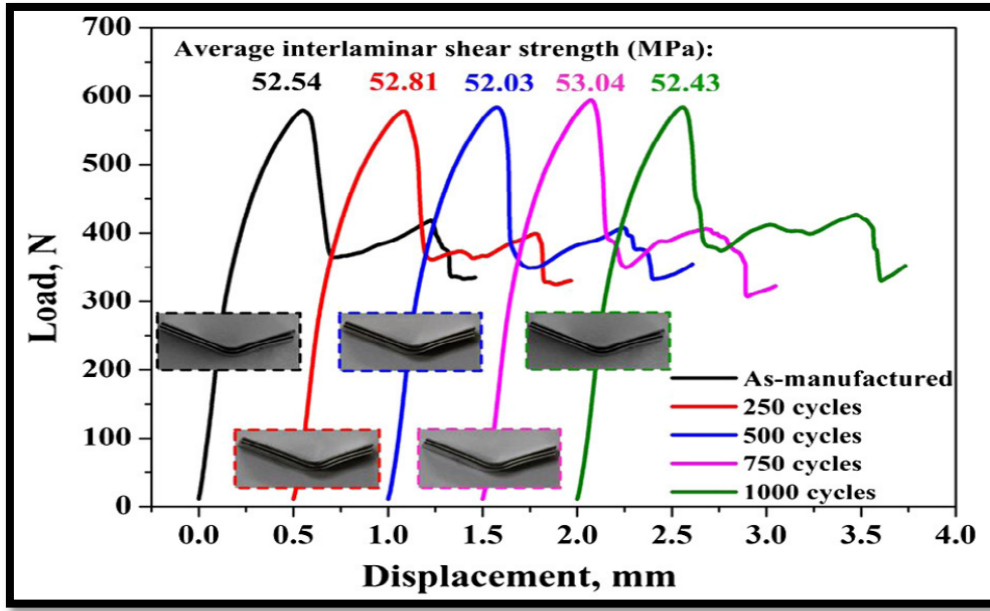


Şekil 2.21. Termal çevrim sonrası gerilme-gerinim diyagramı (Azghan ve diğ., 2021)

Alderliesten (2005), metal/prepreg arayüzeyinin FMTK malzemeler için her zaman zayıf arayüzeyi olarak kabul edildiğini ve termal yaşlandırma sonrasında metal/prepreg arayüzeyinde hasar oluşturma kolay olduğunu söylemiştir. Bunun sebebi ise metal ve fiber katmanların sahip olduğu termal genleşme katsayıları arasındaki büyük farklılıklardır. Li ve diğ. (2016) termal çevrime bağlı ortaya çıkan yorgunluğun, alüminyum-lityum alaşımına dayalı FMTK'ların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Dört set FMTK, yüksek hızlı bir uçağın tasarlanmış hizmet ömrüne atıfta bulunulan sırasıyla 250, 500, 750 ve 1000 termal çevrime tabi tutulmuştur. Döngüsel sıcaklık -65°C 'den $+135^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar değiştirilmiştir. Uygulanan termal çevrim döngüsü Şekil 2.22'de verilmiştir. Sonuçlar, bileşenlerin termal genleşme katsayılarındaki farkın kabaca arayüzey hasarına ve yeni FMTK'ların performans düşüşüne yol açtığını göstermektedir. Elde edilen ILSS değerleri birbirine yakın ve 52 MPa civarında tepe dayanım değerine ulaşmışlardır ve termal çevrimler sonunda büyük düşüşler elde edilmemiştir. Bunun sebebinin çok iyi tabaka yapışması olduğunu iddia etmektedirler. Grafikselleştirme ise Şekil 2.23'te gösterilmiştir.

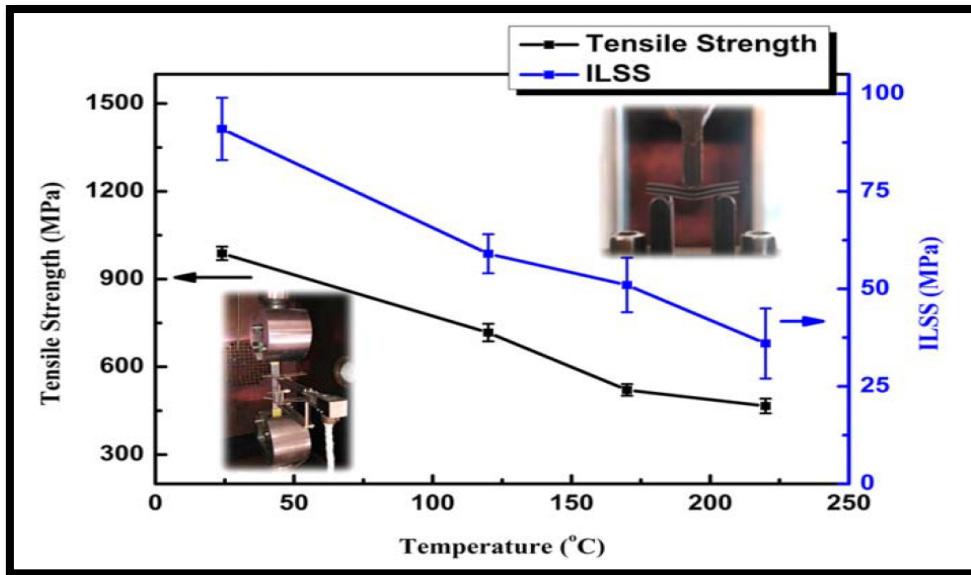


Şekil 2.22. Termal çevrim döngüsü örneği (Li ve diğ., 2016)



Şekil 2.23. Termal çevrim öncesi ve sonrası yük-yer değiştirme grafikleri (Li ve diğ., 2016)

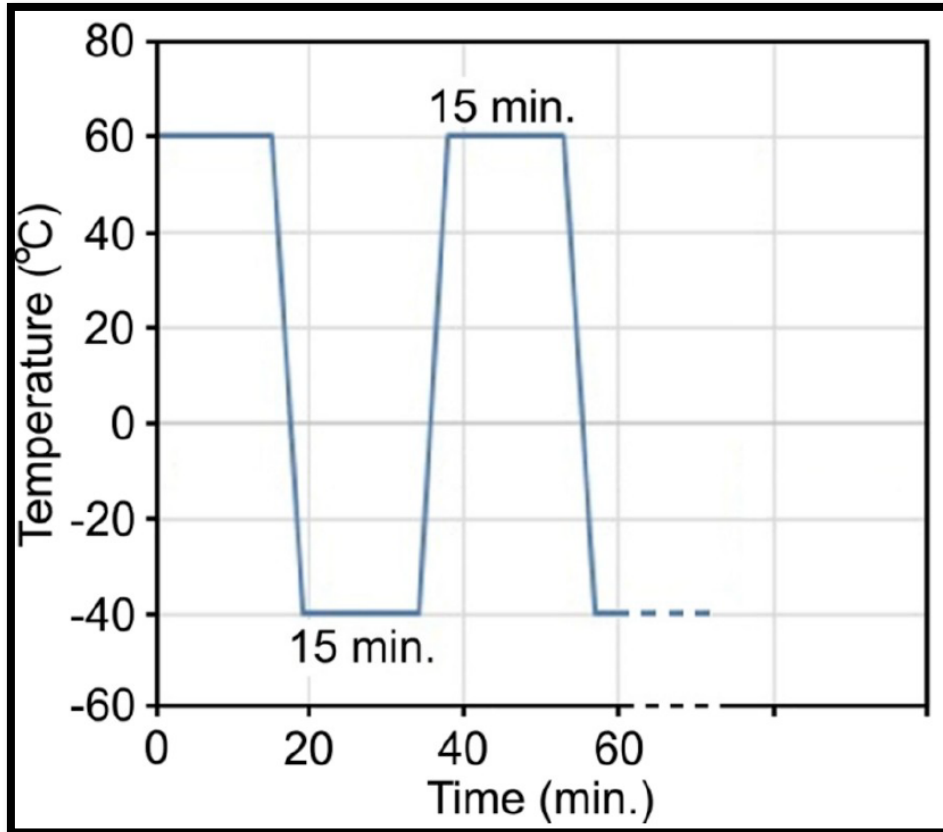
Hu ve diğ. (2018) sıcaklık değişiminin polietereketon (PEEK) bazlı FMTK'ların gerilme mukavemeti ve ILSS'si üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Şekil 2.24 farklı sıcaklık düzeylerinde elde edilen gerilme direnci ve ILSS değerlerini göstermektedir. Artan sıcaklıkla nihai mukavemette ve ILSS dayanımında azalmaya yönelik genel bir eğilim vardır.



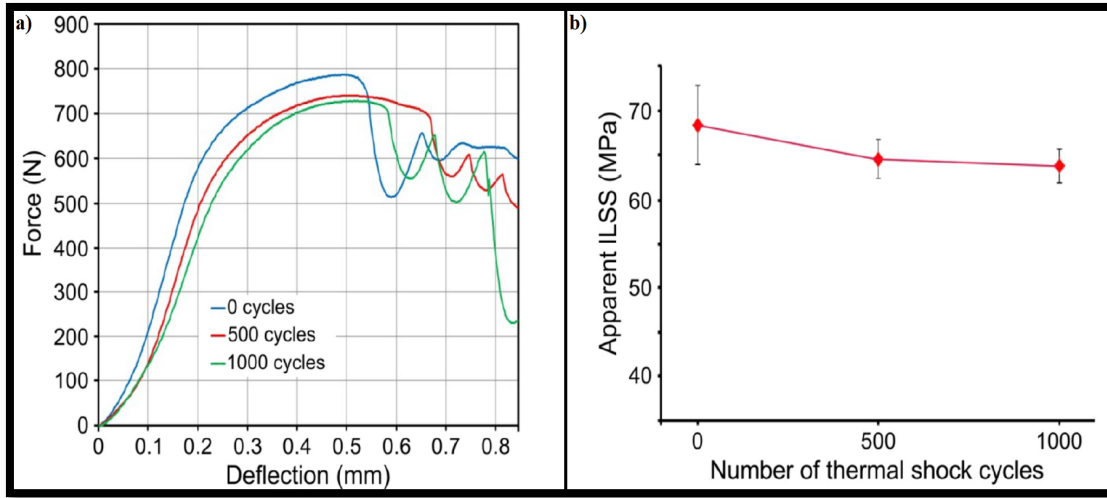
Şekil 2.24. Farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilme direnci ve ILSS değerleri (Hu ve diğ., 2018)

Termal döngü, 250, 500, 750 ve 1000 çevrim için -65 °C ila +135 °C arasında gerçekleştirilmiştir. Fakat elde edilen bulgular Li ve diğerlerinin (2016) çalışmasında olduğu gibi, termal döngüye rağmen mekanik özellikler üzerinde önemli bir fark ortaya çıkmadığını göstermiştir.

Liu (2017), GLARE malzemelerin tabakalar arası kayma hasar davranışını incelemiştir ve etkili olan tabakalar arası kayma hata modunun, kayma yanlış hizalaması, yerel kayma bağını çözme veya uç açma ile kendini gösteren, nötr tabakanın yakınındaki tabakada delaminasyon olduğunu belirlemiştir. Termal döngüye uygulanan FMTK'ların arıza modu da ayrıca araştırılmıştır. Kubit ve diğ. (2019) prepreg katmanlarının, termal çevrim sonrasında çatlamadan önce katmanlar üzerindeki yapışkan bağ kuvvetinin azalması nedeniyle gözle görülür bir delaminasyona neden olduğunu belirlemiştir. Uygulanana termal çevrim döngüsü Şekil 2.25'te ve üç nokta eğme testi sonunda elde edilen yük-yer değiştirme ve ILSS-termal çevrim değişim grafikleri Şekil 2.26'da verilmiştir.

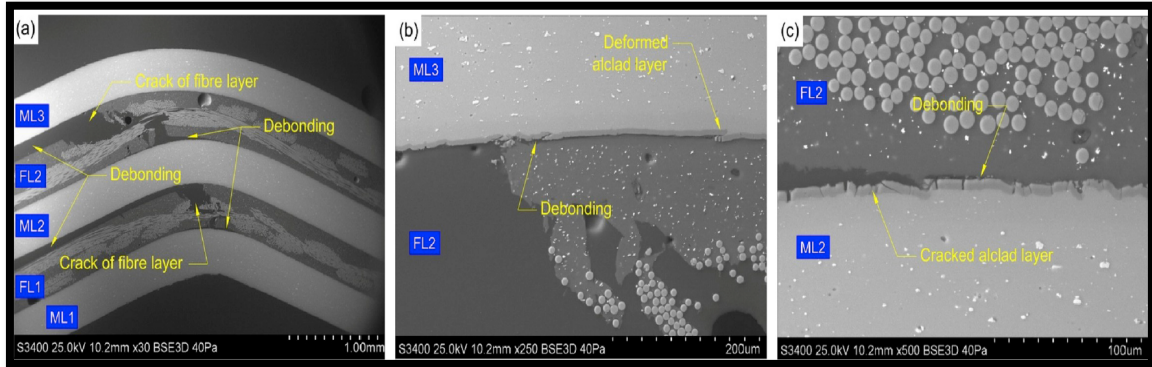


Şekil 2.25. Termal çevrim döngü örneği (Kubit ve diğ., 2019)



Şekil 2.26. Üç nokta eğme testi sonrası grafikler a)yük-yer değiştirme, b)Termal çevrime bağlı ILSS değişimi (Kubit ve diğ., 2019)

Kubit ve diğerleri (2019) çalışmalarında hasar modlarını SEM görüntüleri ile incelemişlerdir ve yapıdaki tabaka ayrılma ve delaminasyon hatalarının olduğu bölgeleri fotoğraflamışlardır. Şekil 2.27 termal çevrime maruz bırakılmış numunelere ILSS testi uygulandıktan sonra meydana gelen hasar modlarının SEM görüntülerini göstermektedir.



Şekil 2.27. 500 çevrim termal yaşlandırmaya tabi tutulmuş bir FMTK numunesinin hasar yapılarının SEM görüntüleri (Kubir ve diğ., 2019)

Jakubczak ve diğ., (2018) termal döngüden sonra FMTK örneklerinin hata modlarını mikroskopik olarak incelemiştir. Gözlenen tek hata modu, lif veya matris çatlağı tespit edilmediği halde tabaka ayrılmasıdır. Termal çevrime maruz kalmayan numunelerin orta bölgesinde delaminasyon görülmesine rağmen, termal çevrim sonrası test edilen numunelerin kenarlarında delaminasyon görülmüştür.

2.5. Tez Konusunun Özgünlüğü ve Yapılan Çalışmalar

GLARE malzemeler ticari olarak AA 2XXX ve AA 7XXX serileri olarak endüstride yer edinmiştir. Literatürde de buna uyumlu olarak özellikle Al 2024-T3 alüminyum sac plaka kullanılarak imal edilmiş GLARE malzemeler çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında, kolay bulunabilirliği ve düşük maliyet ile GLARE malzeme üretebilmenin ve üretilen bu malzemelerin ticari olarak da endüstride yer edinebilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu sebeple, literatüre katkı vermek amacıyla AA 6XXX serisine dahil olan Al 6061-T6 sac plakalar ve S2 cam fiberler ile oryante edilerek 3/2 GLARE malzeme üretimi yapılmıştır. FMTK malzemelerin mekanik davranışını belirleyen en önemli parametre metal/prepreg arayüzeyleri arasındaki yapışmadır. Literatürde kısıtlı ölçüde metal malzemelere ön yüzey işlemi uygulanarak imal edilen GLARE malzemeler üzerine araştırmalar mevcuttur. Ancak ön yüzey işlemlerinin hem alt destek mesafesi değişimi ile elde edilen mekanik davranışa etkisi hem de termal şoklara maruz bırakılmış GLARE malzemelerde ön yüzey işlemlerinin etkisi detaylı bir şekilde çalışılmamıştır.

Bu çalışma, aynı zamanda ilk kez AA6XXX serisinden yapılmış metalik levhalara dayalı GLARE malzemeler için üç nokta eğme testindeki alt destek mesafesi oranının etkisini pratik ve anlaşılır bir şekilde vurgulamaya çalışmaktadır.

Literatürdeki çalışmalar ağırlıkla döngüsel termal yüklerin FMTK'ların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgilidir. Yüzey işlemlerinin, döngüsel termal yüklere maruz kalan FMTK'ların mekanik davranışları üzerindeki olası ilerleyici etkileri henüz çalışılmamıştır. FMTK'lar için en önemli mekanik özelliklerden biri, tabakalı yapıları ve delaminasyona eğilimli olmaları nedeniyle ILSS'dir. Çeşitli FMTK'lara ait metalik katmanların yüzeylerinde mekanik veya kimyasal, hatta basit yüzey işlemlerinin, yüzey işlemi olmayanlara kıyasla ILSS'yi artırdığını daha önce birçok çalışma kanıtlamıştır. Ancak, bu çalışmaların hiçbiri şiddetli termal döngü öncesi koşullar altında ILSS üzerinde yüzey işlemlerinin performansını araştırmamıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzeme ve FMTK Üretimi Öncesi Ön Yüzey İşlemleri

Bu çalışmada, S-2 cam fiber takviyeli epoksi reçineli prepregler ve 6061 kalite, T6 temperlenmiş alüminyum sac plakalar ile imal edilmiş fiber metal tabakalı kompozit (Glass reinforced aluminium (GLARE)) malzeme kullanılmıştır. 6061 kalite T6 temperlenmiş alüminyum sac plakalar yurtiçinden 200x200X0,5 mm³ boyutlarında tedarik edilmiştir. Fiber metal tabakalı kompozit malzemenin sac plaka kalitesinin 6XXX alüminyum alaşımı serisinden 6061-T6 olarak seçilme sebebi, malzemenin düşük yoğunluklara karşı üstün mukavemet özellikleri ve mükemmel korozyon direncine sahip olmasıdır.

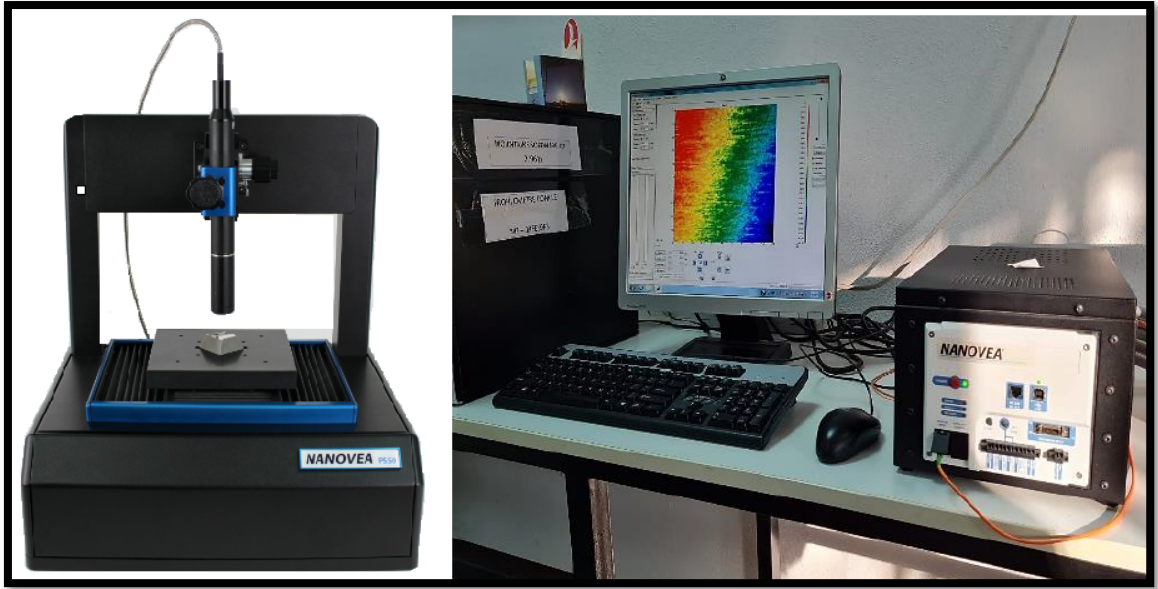
200x200x0,5 mm³ boyutlarında kesilmiş olan 6061-T6 alüminyum alaşımlı sac plakalar fiber metal tabakalı kompozit üretimi öncesinde farklı yüzey özelliklerine göre gruplandırılmıştır. Bu gruplar aşağıdaki gibidir:

- 1- Yüzey işlemi yapılmamış
- 2- Alüminyum yüzeyi zımparalanmış
- 3- Alüminyum yüzeyine degrease (yağ alma) işlemi yapılmış
- 4- Alüminyum yüzeyine degrease (yağ alma) işlemi yapılmış ve zımparalanmış

200x200X0,5 mm³ boyutlarındaki alüminyum sac plakaların birinci grubuna hiçbir işlem uygulanmamıştır. Bu yüzey işlemsiz grup, referans numune olarak kabul edilmiştir. İkinci grup alüminyum sac plakalar için alkali yağ alma yüzey işlemi yapılmıştır. Üçüncü grup alüminyum sac plakalara alkali yağ alma yüzey işlemi yapıldıktan ve plakalar kurutulduktan sonra zımparalama işlemi yapılmıştır. Dördüncü grup alüminyum sac plakaların yüzeylerinde ise yalnızca zımparalama işlemi yapılmıştır.

Yağ alma işlemi, daldırma yöntemi ile alkali yağ alma banyosunda yapılmıştır. Daldırma yağ alma banyo sıcaklığı 60 °C ve işlem süresi 10 dakika olarak uygulanmıştır. Zımpara işleminde ise P220C gritlik zımpara kağıdı kullanılmıştır. Zımparalama işlemine, malzeme yüzeyinin yeterli yüzey pürüzlülüğü oluşana kadar yaklaşık 5 dakikada devam edilmiştir.

Yüzey işlemleri tamamlandıktan sonra kimyasal ve mekanik yüzey işlemlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini görebilmek amacıyla Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'ndeki aşınma laboratuvarında bulunan Nanovea marka PS50 3D optik profilometre cihazı ile her bir yüzey özelliğindeki AA6061-T6 plakanın alansal yüzey pürüzlülük ortalama değerleri (S_a) elde edilmiştir. Şekil 3.1'de ölçüm yapılan profilometre cihazı gösterilmiştir. Her bir yüzeyden üçer kez ölçüm alınmış ve ölçüm hassasiyeti $0,1 \mu\text{m}$ 'dir. Profilometre ölçümlerinin ardından Mountain Software programı vasıtası ile alüminyum plaka yüzeylerinin 3 boyutlu topoğraflarını oluşturulmuş ve görselleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

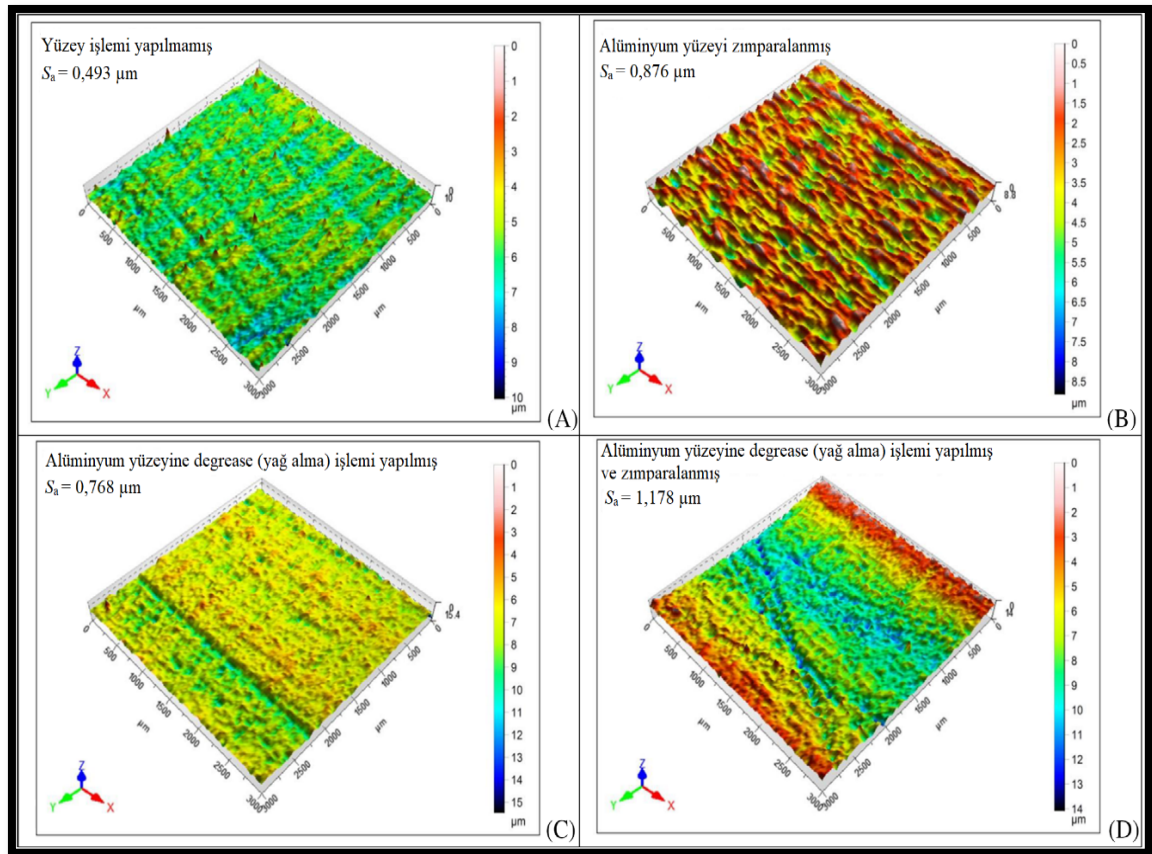


Şekil 3.1. Nanovea PS50 3D profilometre

Uygulanan yüzey işlemleri ile S_a değerinin arttığı tespit edilmiştir. Profilometre ölçüm sonuçları Tablo 3.1'de verilmiştir.

Buna göre, yüzey işlemi görmüş GLARE numunelerinin ILSS değerlerindeki iyileşmelerin mikro yapı ile uyumlu olduğu ve mekanik ve kimyasal yüzey işlemlerinin uygulanmasıyla sağlanan yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli ölçüde artış olduğu belirlenmiştir.

Fiber metal tabakalı kompozit malzemeler, 3 kat 6061-T6 alüminyum ve 2 kat örgü S-2 cam fiber takviyeli epoksi reçineli prepreg kullanılarak sıcak pres tekniği ile üretilmiştir. Her bir kat için oryantasyon 0° ve 90° yönlü örgüdür.



Şekil 3.2. AA6061-T6 yüzeyleri profilometre ölçüm sonuçları a) Yüzey işlemi yapılmamış, b) Zımparalanmış, c) Yağ alma işlemi yapılmış ve d) Hem yağ alma hem zımparalama işlemi yapılmış

Tablo 3.1. Profilometre ölçüm sonuçları

Yüzey İşlemi	Değer (μm)
Yüzey işlemi yapılmamış	0,493 ± 0,07
Zımparalanmış	0,876 ± 0,10
Yağ alma işlemi yapılmış	0,768 ± 0,08
Hem yağ alma hem zımparala işlemi yapılmış	1,178 ± 0,12

Fiber metal tabakalı kompozit malzemenin üretim aşamalarında kullanılan ve ön yüzey işlemlerinin uygulandığı AA6061-T6 sac plakanın fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.2’te verilmiştir. Kullanılan AA6061-T6 sac plakanın kimyasal bileşimi ise Tablo 3.3’te verilmiştir. S-2 cam fiberin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.4’de verilmiştir. S-2 cam fiber ve alüminyum yapışmasını sağlamak ve istenilen arayüzey dayanımını sağlayabilmek üzere kullanılan kullanılan epoksi reçineli prepreğin teknik özellikleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.2. 6061-T6 Alüminyum malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-3, URL-4)

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Değer
Akma Mukavemeti	240-270 MPa
Çekme Mukavemeti	260-310 MPa
Elastisite Modülü	69 GPa
Uzama	%10-15
Sertlik	95 - 110 HB
Erime Sıcaklığı	582 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	$23,4 \times 10^{-6} /K$
Isıl Kapasite	170 W / mK
Elektriksel İletkenlik	%43 IACS
Kesme Dayanımı	207 MPa
Yoğunluk	2,63 g/cm ³

Tablo 3.3. 6061-T6 Alüminyum malzemenin kimyasal bileşimi (URL-3)

Element	Değer (%)
Fe	0,00 – 0,70
Si	0,40 – 0,80
Cu	0,15 – 0,40
Mn	0,00 – 0,15
Mg	0,80 – 1,20
Zn	0,00 – 0,25
Cr	0,04 – 0,35
Ti	0,00 – 0,15
Diğer	0,00 – 0,15
Al	Kalan

Tablo 3.4. S-2 cam fiber teknik özellikleri (Cameron ve Rapp, 2001)

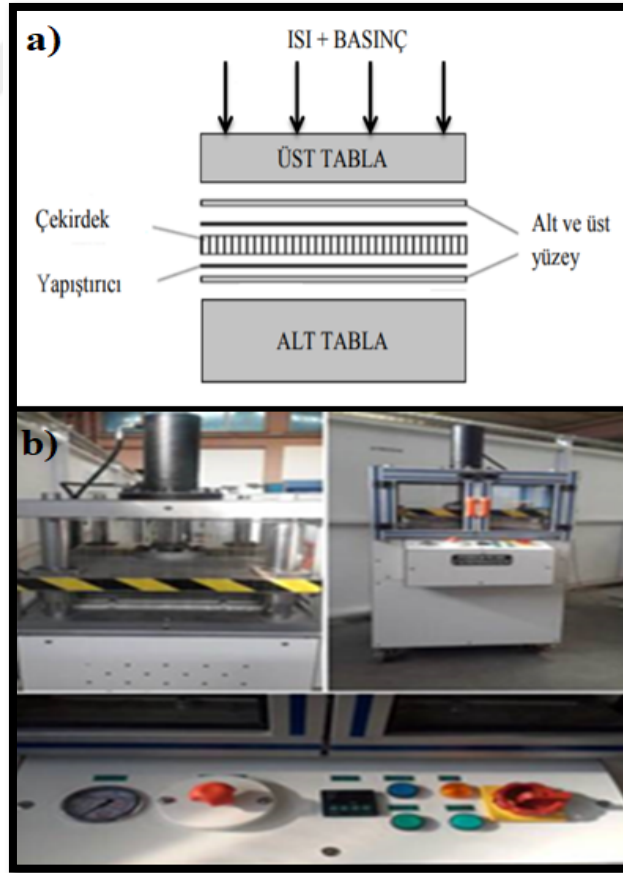
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Değer
Fiber Yoğunluğu	180-200 g/m ² plain kumaş
Kumaş Örgüsü	Woven (0° - 90° oryante edilmiş)
Elastisite Modülü	86,9 GPa
Yumuşama Sıcaklığı	1056 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	$16 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Çekme Mukavemeti	4890 MPa

Tablo 3.5. Epoksi reçineli prepreg teknik özellikleri

Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Değer
Görünüm	Berrak - Sıvı
Vizkozite (25°C)	250-300 MPa.s
Yoğunluk (25°C)	0,55-1,05 g/cm ²
Raf Ömrü (25°C)	32 ay

3.2. FMTK Üretimi

Farklı parametrelerde yüzey özellikleri bulunan 200x200x0,5 mm³ boyutlarındaki 6061-T6 alüminyum alaşımlı sac plakalar ve prepregler, 3/2 dizilimli fiber metal tabakalı kompozit üretimi için hazırlanarak; çalışma sıcaklığı 300 °C kapasiteli, 15 ton pres gücüne sahip ısıtmalı hidrolik preslerde üretilmiştir. Isıtmalı hidrolik presin pres baskı alanı 500 x 500 mm² olup, dijital termokupl ve sıcaklık ayarlamasına sahiptir. Üretim, 120 °C’de 1 saat pres altında gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi sonrasında numuneler sıcak presten çıkartılıp oda sıcaklığında bekletilmiştir. Şekil 3.3’de sıcak pres makinasının çalışma prensibi ve üretim yapılan makine gösterilmiştir. Fiber metal tabakalı kompozit üretimi İzmir’de bulunan Kompozitsan firmasında yaptırılmıştır. Üretim sonrası elde edilen FMTK plakalar Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Üretilen numunelerin kalınlıklarının 2mm olması hedeflenmiştir ancak üretim ve yapıştırma işlemlerinden dolayı yaklaşık 0,1 mm’lik sapmalar mevcuttur.



Şekil 3.3. Sıcak pres üretim tekniği, a) Şematik gösterimi (Kıyak, 2017), b) Sıcak pres makinası



Şekil 3.4. Sıcak pres yöntemi ile üretilmiş FMTK plakalar

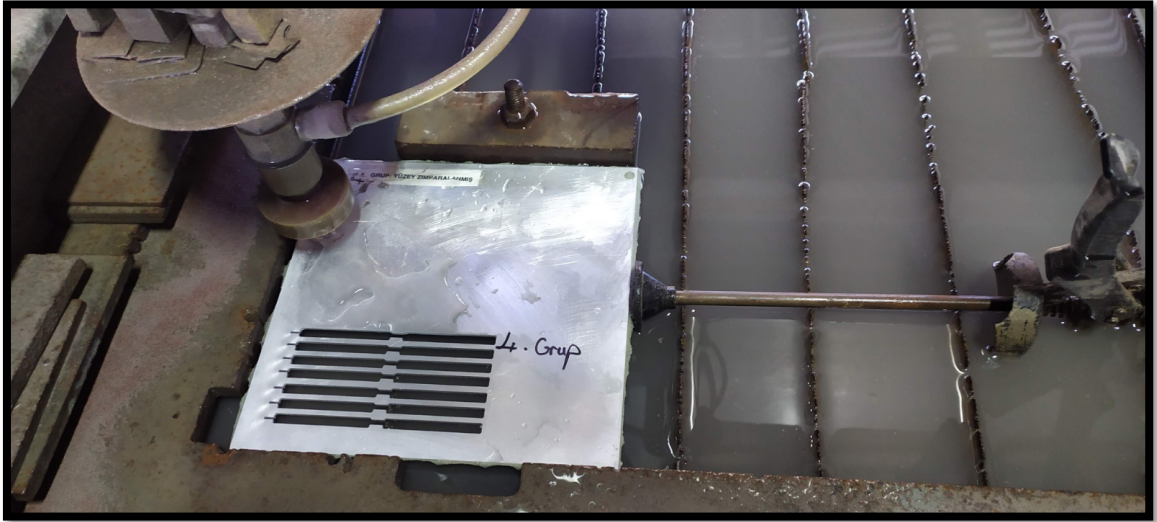
3.3. Su Jeti ile FMTK Kesim İşlemi

Su jeti, kesilecek olan materyalin sertlik ve yumuşaklık derecesini ayırmaksızın 0,1 mm’lik oldukça hassas bir tolerans payı ile kesebilen, ”kesici bir alet olmayan” aşındırıcı madde destekli, su bazlı bir imalat aracıdır. Bilgisayarda tasarımı yapılan görsel şekiller, su jeti ile kusursuz ve çapaksız bir şekilde uygulanır ve kesim işlemi tamamlanır. Su jeti ile kesim hızlı ve ekonomiktir.

FMTK üretimi tamamlandıktan sonra statik testlerin yapılabilmesi için Lazer Makine firmasında su jeti ile kesilmiştir. Şekil 3.5’te kesim yapılan su jeti gösterilmiştir. ASTM D2344/D2344M-16 (2016) standardına göre 4 x 50 mm² boyutlarında yapılan numune kesiminin bir görseli Şekil 3.6’da verilmiştir. Kesim işlemin sonunda, plaka kenarlarındaki çapaklar zımpara ile temizlenmiştir. Ardından numuneler mikro fiber bez ile silinmiş ve kuruması beklendikten sonra paketlenerek statik testlerin yapılacağı test laboratuvarlarına sevk edilmiştir.



Şekil 3.5. Su jeti



Şekil 3.6. Su jeti ile FMTK kesim işlemi

3.4. Termal Yaşlandırma

Hava araçları servis koşullarında termal-döngüsel yüklere maruz kalmaktadırlar. Bu etkileri simüle etme amaçlı; oda sıcaklığında üretilmiş ve üç nokta eğme testi uygulanmış FMTK numuneleri ile kıyaslama yapabilmek adına 2 farklı termal çevrim uygulanmış FMTK numunelerine de ayrıca üç nokta eğme testleri yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Termal çevrim işlemleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nda (TÜBİTAK-MAM) bulunan Atlas SC 600 Solar Simulator model iklimlendirme kabini

kullanılmıştır. İklimlendirme işleminin yapıldığı cihazın teknik özellikleri Tablo 3.6.'da verilmiş ve cihaz, Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

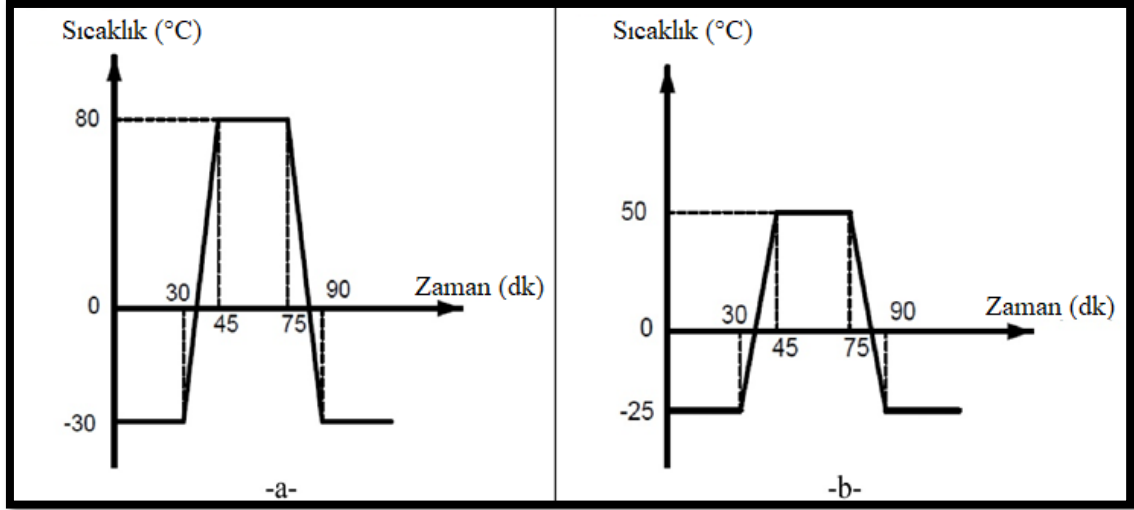
Tablo 3.6. Atlas SC 600 Solar Simulator (İklimlendirme kabini) teknik özellikleri

Teknik Özellik	Değer
Sıcaklık Değişim Kapasitesi	-30° ile 100°C arası
Radyasyon Kaynağı	Metal halojenür
Radyasyon	1000 W/m ²
Kabin Hacmi	600 lt
Maruziyet Alanı	3000 cm ²



Şekil 3.7. Atlas SC 600 Solar Simulator (İklimlendirme kabini)

GLARE numuneleri, her iki sıcaklık aralığı için çevrim sayısını sabit tutarken (500 çevrim) iki farklı sıcaklık aralığında tam işlevli bir iklimlendirme kabini içinde iki farklı çevrimsel termal koşula tabi tutulmuşlardır. Şekil 3.8, termal çevrim koşulları sırasında uygulanan sıcaklık değişikliklerini göstermektedir. Sıcaklık aralıklarına karar verilirken, tipik bir nakliye kategorisi hava aracının uçuş özellikleri göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.8. Termal çevrim koşulları, a) Birinci termal çevrim, b) İkinci termal çevrim

İlk grup GLARE numuneleri, sıcaklık genliği için 110 °C'ye ulaşan 90 dakika boyunca -30 °C ile +80 °C arasında termal döngülere tabi tutulmuştur (Şekil 3.8a). Numuneler 30 °C'de 30 dakika bekletilmiştir ve ardından sıcaklık, 15 dakikada -30 °C'den +80 °C'ye doğrusal olarak yükseltilmiştir.

Numuneler +80 °C'de 30 dakika bekletildikten sonra sıcaklık doğrusal olarak +80 °C'den -30 °C'ye 15 dakikalık bir periyot ile düşürülmüştür ve bu bir çevrim olarak kabul edilmiştir. Termal çevrim uygulanan GLARE numunelerinin ikinci grubu, sıcaklık genliği için 75 °C'ye ulaşan 90 dakika boyunca -25 °C ile + 50 °C arasında termal döngülere tabi tutulmuştur (Şekil 3.8b). Bir çevrimin her adımı için aynı süreler, ikinci termal çevrim için de uygulanmıştır.

GLARE numuneleri, aşağıdaki kontrollü faktörlerle döngüsel ortamlara tabi tutuldu: Bağıl Nem (RH) ve ortam sıcaklığı (T). Ek olarak, tüm termal yaşlandırılmalı GLARE numuneleri için bağıl nem yalnızca 0 °C ile her bir profilin maksimum sıcaklığı (+50 °C / +80 °C) arasında uygulanmıştır. Hızlandırılmış termal yaşlandırma yapılan GLARE numuneleri, pozitif sıcaklıklarda elde edilen %98 bağıl neme maruz bırakılmışlardır. GLARE numuneleri, termal çevrim işlemlerinden sonra, iklimlendirme kabininden çıkartılmış ve ILSS testlerinden önce bir gün süreyle oda sıcaklığında bekletilmişlerdir.

3.5. Üç Nokta Eğme Testi

Hava araçları seyir halindeyken ve taksi yaparken farklı yüklere maruz kalmaktadırlar. Hem seyir halinde hem de taksi sırasında kanatlarda basma gerilmeleri ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Buna bağlı olarak, farklı yüzey özellikleriyle gruplandırılarak imal edilmiş 3/2 dizilimli fiber metal tabakalı kompozitlerin eğilme modülü, eğilme dayanımı ve eğilme miktarı gibi parametreleri belirleyebilmek için ASTM D2344/D2344M-16 (2016) standardında belirtilen kriterlere göre üç nokta eğme testleri uygulanmıştır. Standartlaştırılmış ILSS testlerini gerçekleştirmek için sertliği 62 HRC olan çelik üç noktalı basma aparatı üretilmiştir. Yükleme burnunun yarıçapı 3 mm iken destek silindirlerinin yarıçapı 2 mm'dir. Taşıyıcı kısımlar hareket edebilmektedir ve doğrusal bir yatakta istenilen noktada sabitlenebilmektedir. Bu özellik, gerektiğinde destek mesafesinin değiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Aparat, maksimum yükleme kapasitesi 100 kN olan bilgisayar destekli hidrolik MTS® universal test makinesinin eksenel yükleme silindrine sabitlenmiştir.

Üç nokta eğme testleri ile arzu edilen eğme parametrelerinin belirlenebilmesi için ASTM D2344/D2344M-16 (2016) standardında tavsiye edildiği gibi her bir deney grubu için en az 5 adet numune test edilmiştir. Üç nokta eğme testi için, hazırlanan fiber metal tabakalı kompozitlerin yaklaşık 2 mm kalınlığı referans alınmıştır.

Hazırlanan FMTK numuneleri, eğme özelliklerinin belirlenmesi ve yorulma testlerinin tamamlanması için İstanbul Teknik Üniversitesi'ne (İTÜ) gönderilmiştir. Numunelerin eğme özellikleri, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi'nde bulunan Kompozit Yapılar Laboratuvarı bünyesindeki Şekil 3.9'da gösterilen MTS® universal test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında 1 mm/dk. test hızıyla yapılan üç nokta eğme testleri ile belirlenmiştir ve Yük ve yer değiştirme değerleri 40 Hz örnekleme hızı ile kayıt altına alınmıştır. Yük verileri, alt tablaya sabitlenmiş hassas bir yük hücresi tarafından toplanarak bir bilgisayara aktarılmıştır.

Testler sonrasında ortaya çıkan hasar mekanizmaları ve alüminyum/prepreg ayrılma modları, Teknorot Otomotiv Ürünleri San. Tic. A.Ş. bünyesinde bulunan yüksek çözünürlüklü dijital kamera ve profesyonel fotoğraf aydınlatma kurulumu kullanılarak görüntülenmiştir.



Şekil 3.9. MTS® üniversal test cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Alt Destek Mesafesi Etkisi

GLARE malzeme gibi bir tabakalı kompozitte iç yüklemeler ile oluşan şiddetli gerilme durumu, eğme etkisi altında kritik yapısal hasarlara yol açmıştır. Genellikle, reçine ve tabakalar arası özelliklerden kaynaklanan tabakalar arası kayma kırılması hata modlarının en yaygın olanıdır. Bu hata modu genellikle delaminasyondur ve tabakalar arası kayma direncini aşmanın bir sonucu olarak ortaya çıkar. Üç nokta eğme testinde yüklenen kısa alt destek mesafesi konfigürasyonu kullanılarak yapılan bir test simülasyonu, uygulanan kayma yükünü iç gerilmeler arasında baskın hale getirmenin en etkili yoludur. Bu çalışmaya rehberlik eden ASTM D2344/D2344M–16 (2016), yeterli kayma gerilmesinin etkisinin uygulanabilirliği ile sonuçlanacak bir test yöntemi tanımlayarak, polimer matrisli kompozit malzemelerin tabakalar arası kayma mukavemetini elde etmek için pratik bir çözüm sunmaktadır. Test yöntemi, klasik bir üç noktalı eğme testi sunar; ancak numune boyutlarına göre 'kısa kiriş' adı verilen özel bir form olarak sınıflandırılır.

Ayarlanabilir aparat sayesinde, alt destek mesafesi değiştirilerek hem uzunluk-kalınlık oranı (S/h:4.0) (kısa kiriş) hem de uzunluk-kalınlık oranı (S/h:10.0) (uzun kiriş) olan test koşullarda test yapılmıştır. Bu farklılık sayesinde malzemenin eğilme davranışındaki hata modları ve tabakalar arası kayma davranışındaki hata modları arasındaki ilişki değerlendirilmek istenmiştir. Ayrıca, alt destek mesafesinin değiştirilmesi yapısal hasarın ortaya çıktığı en büyük ILSS kuvvetine hangi ölçüde etki ediyor sorusunun cevabı aranmıştır.

ILSS testlerinin yapılması için her bir yüzey işlemine tabi tutulmuş alüminyum plakalar ile üretilen GLARE malzemeler ile yüzey işlemi yapılmamış alüminyum plaka ile üretilmiş GLARE malzemelerden beşer adet numune ölçülmüştür ve testler bu numuneler üzerinde uygulanmıştır.

Numunelerin hata modları, her test sırasında ve sonrasında incelenerek görsel olarak tanımlanmıştır. Tüm yüzey konfigürasyonları ve her iki uzunluk-numune kalınlık oranı (S/h:4.0 ve S/h:10.0) için hazırlanan test numunelerinin genişliği ve kalınlığı Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Her yüzey işlemi için S/h:4.0 ve S/h:10.0 kullanılarak mm cinsinden ölçülen numune genişlik ve kalınlıkları

İşlemsiz			Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
S/h: 4.0								
Test No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	4,07	1,92	4,08	1,90	4,09	1,91	4,06	1,93
2	4,07	1,90	4,10	1,89	4,07	1,95	4,10	1,93
3	4,06	1,93	4,08	1,91	4,09	1,93	4,06	1,94
4	4,07	1,92	4,12	1,90	4,07	1,92	4,12	1,94
5	4,08	1,94	4,10	1,90	4,07	1,94	4,06	1,90
S/h: 10.0								
Test No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	4,07	1,95	4,09	1,87	4,07	1,94	4,06	1,94
2	4,08	1,93	4,07	1,92	4,04	1,90	4,06	1,93
3	4,14	1,91	4,08	1,90	4,08	1,92	4,06	1,92
4	4,12	1,94	4,10	1,91	4,08	1,90	4,10	1,92
5	4,10	1,93	4,07	1,90	4,04	1,94	4,07	1,90

Tabakalar arası kayma mukavemeti uzunluk-numune kalınlık oranı (S/h) 4.0 olan grup için Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır. Uzunluk-numune kalınlık oranı (S/h) 10.0 olarak belirlenen ikinci test grubu için de aynı denklem kullanılarak en büyük kuvvet hesaplanmıştır. P_m , test sırasında gözlenen maksimum yüküdür. b ölçülen numune genişliği, h ölçülen numune kalınlığıdır. Denklem 4.1, P_m ile birlikte tüm yük verileri (P) için formülü uygulayarak gerilim-yer değiştirme geçmişlerini elde etmek amacıyla ek olarak kullanılır.

$$\tau_{xy}^m = \frac{3P_m}{4bh} \quad (4.1)$$

ASTM D2344/D2344M-16 (2016) standardı, tabakalar arası kayma mukavemetini elde etmek için S/h:4.0 kullanımıyla sınırlı olmasına rağmen, mukavemet değerleri, bükülmenin hata modları üzerindeki etkisini araştırmak için iki farklı S/h kullanılarak elde edilmiştir. Maksimum normal gerilim (σ_x^m) ve maksimum kayma gerilimi (τ_{xy}^m), üç nokta eğme testi için sırasıyla eğme ve tabakalar arası kayma mukavemeti hesaplanır. Üç nokta eğme testinde eğilmeden kaynaklanan maksimum normal gerilim aşağıda verilen Denklem 4.2 ile hesaplanır ve maksimum kayma gerilimi Denklem 4.1 kullanılarak formüle edilir.

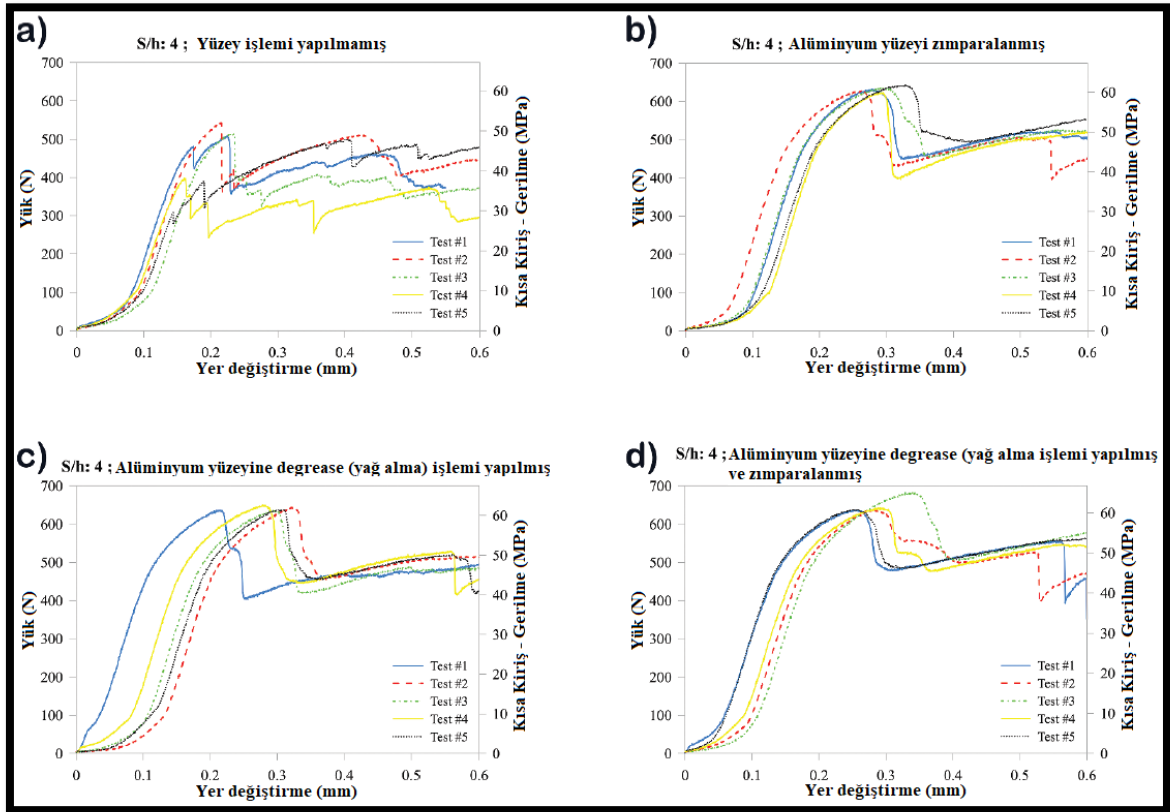
$$\sigma_x^m = \frac{3P_m S}{2bh^2} \quad (4.2)$$

Maksimum normal gerilimin maksimum kayma gerilimine oranı (R) Denklem 4.3 ile ifade edilir.

$$R = \frac{2S}{h} \quad (4.3)$$

R değeri, kısa ve uzun alt destek mesafeleri için sırasıyla 8 ve 20 olarak elde edilmiştir. Uzun alt destek mesafesi ile yapılan testlerde, kısa alt destek mesafesi ile yapılan testlere kıyasla hakim deformasyon davranışı, eğilme olarak ortaya çıkmıştır.

S/h:4.0 alt destek mesafesi etkisini incelemek için test edilen GLARE malzemelerin tüm konfigürasyonlarına ait yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. S/h:4.0 için test edilen GLARE malzemelerin yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri

Grafiklerde de açıkça görüldüğü gibi, alüminyum yüzeylerine ön yüzey işlemi uygulandığında, tabakalar arası kayma mukavemetleri ön yüzey uygulanmamış alüminyum plaka ile imal edilen GLARE malzemeye göre önemli ölçüde artış

göstermektedir. Bununla beraber, ön yüzey işlemsiz numunelerin test sonuçlarında tutarsızlıklar gözükmemekte olup ön yüzey işlemlili numunelerin sonuçları oldukça tutarlı veriler sağlamıştır. Ön yüzey işlemi uygulamanın, ILSS değerleri ve kırılma özellikleri açısından, GLARE malzemeleri daha öngörülebilir hale getirdiğini söylemek mümkündür. Bu sayede, havacılık yapılarının uygulamaları için daha güvenilir bir yapıya elde edilmesi mümkün olacaktır. Yüzey işleme yöntemlerine göre kıyaslama yapıldığında elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olmasına rağmen, ILSS'nin hem zımparalama işlemi hem de yağ alma işleminin uygulandığı ön yüzey işlemlili numunelerde küçük bir farkla daha yüksek mukavemet sağladığı görülmüştür. Zımparalama ve yağ alma işlemleri ayrı ayrı karşılaştırıldığında, yağ alma yönteminin tekil olarak zımparalamaya kıyasla küçük bir farkla daha yüksek mukavemet değerleri sağladığı görülmüştür.

Farklılıkları daha iyi anlamak için, S/h:4.0 ile uygulanan her bir test için maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri Tablo 4.2'de verilmiş ve tüm ön yüzey işlemi konfigürasyonları karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2. S/h:4.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum yük

Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)
1	0,23	509	0,21	637	0,28	631	0,25	67
2	0,21	542	0,32	643	0,26	628	0,28	640
3	0,23	515	0,29	636	0,30	636	0,34	683
4	0,16	399	0,28	650	0,29	623	0,29	642
5	0,40	500	0,30	638	0,33	643	0,25	639

Maksimum yüklerde yer değiştirme değerleri için karşılaştırılabilir sonuçlar bulunmamakla birlikte, her testin maksimum yükü Şekil 4.1'de yapılan yorumları desteklemektedir. S/h:4.0 için her testin ILSS'si listelenmiş ve her yüzey işlemi için standart sapmalı ortalama değerler Tablo 4.3'te karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar, zımparalanmış, yağdan alma yapılmış ve hem yağ alma yapılmış hem zımparalanmış ön yüzey işlemlili GLARE malzemelerin ILSS değerlerinin, ön yüzey işlemi yapılmadan imal edilmiş GLARE malzemeye göre sırasıyla %29, %31 ve %31 oranında arttığını göstermektedir.

Tablo 4.3. S/h:4.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar

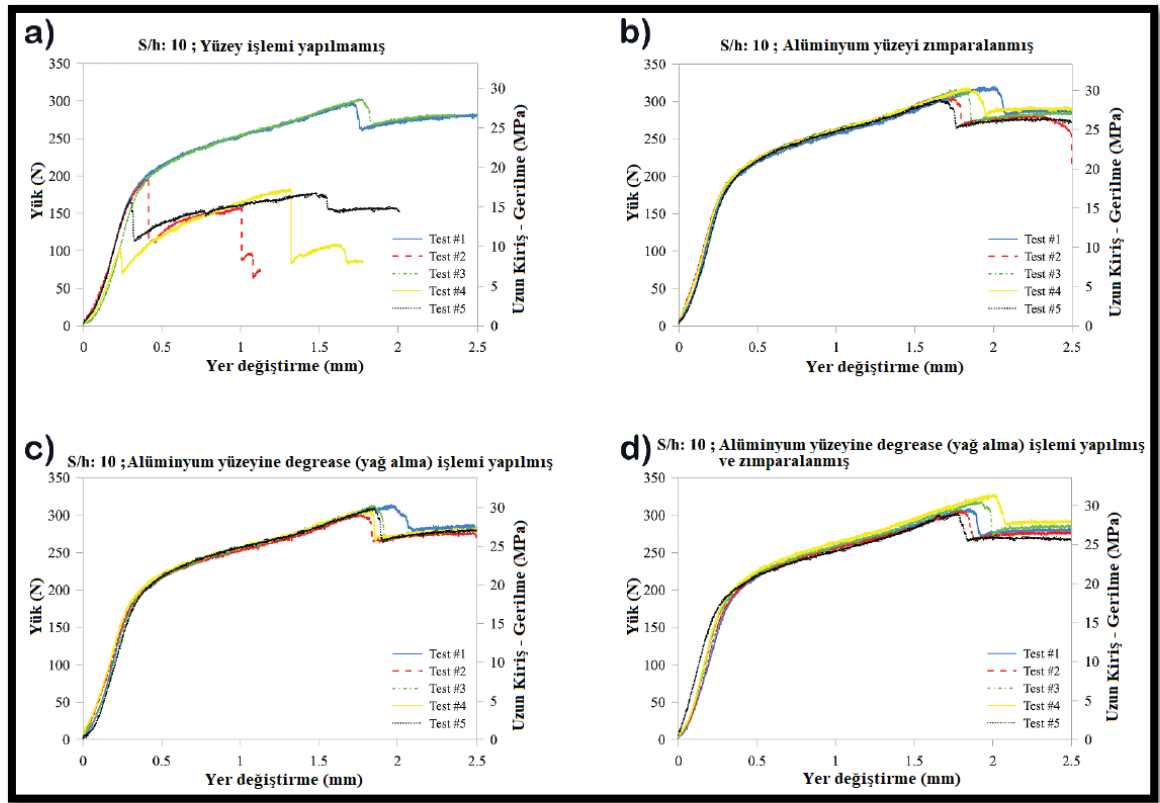
Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)
1	48,9		61,6		60,0		61,0	
2	52,6		62,3		61,4		60,6	
3	49,3	47,3 (4,81)	61,2	61,8 (0,46)	60,9	60,8 (0,59)	65,0	61,8 (1,73)
4	38,3		62,3		60,3		60,2	
5	47,3		61,4		61,5		62,1	

Ön yüzey işlemi yapılmamış gruptaki numunelerin test sonuçlarındaki standart sapma, ön yüzey işlemi yapılmış olanlara kıyasla çok daha yüksektir ve bu yüksek sapma değeri, Şekil 4.1'de çizilen grafiklerle uyumludur. Ön yüzey işlemli numunelerin standart sapmaları, beklendiği gibi daha küçük değerlere sahiptir. Ancak hem zımparalanmış hem yağ alma işlemi yapılmış olan grupta ortaya çıkan standart sapma değeri beklenmedik şekilde diğer iki ön yüzey işlemine göre daha yüksek çıkmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen maksimum ILSS değeri olan 61,8 MPa, AA6XXX serisinden üretilen GLARE'nin, AA2XXX veya AA7XXX serisinden üretilen GLARE malzemeler ile karşılaştırıldığında, standarda uygunluk koşullarında oldukça rekabetçi bir performanstır.

Üç nokta eğme testleri, kayma karakteristiklerinden daha fazla eğilme davranışının tabakalar arası ayrılma karakteristikleri üzerindeki etkisini göstermek için daha büyük bir S/h kullanılarak gerçekleştirilmiştir. S/h:10.0 kısa kiriş mesafesi etkisini incelemek için test edilen GLARE malzemelerin tüm konfigürasyonlarına ait yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir.

S/h oranı artırıldığında, beklendiği gibi yer değiştirmeler çok daha yüksek ve dayanım değerleri S/h:4.0 için olan değerlerden çok daha düşük olarak ortaya çıkmışlardır. Şekil 4.2.a'daki ön yüzey işlemsiz numunelerin üç test sonucunun (Test #2, #4, #5) dışında kalan tüm numunelerin eğilme ağırlıklı bir hata moduna sahip olduğu görülmektedir. Yapısal haralar meydana geldiğinde bu 3 test sonucunda şaşırtıcı bir şekilde delaminasyonlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.2. S/h:10.0 için test edilen GLARE malzemelerin yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri

S/h:10.0 ile uygulanan her bir test için maksimum yük ve maksimum yer değiştirme değerleri Tablo 4.4'te verilmiş ve tüm ön yüzey işlemi konfigürasyonları karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.4. S/h:10.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen maksimum yer değiştirme ve maksimum yük

Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)	Yer Değiş. (mm)	Maks. yük (N)
1	1,71	299	1,96	314	2,00	320	1,84	308
2	0,41	197	1,76	302	1,70	311	1,76	306
3	1,77	303	1,84	313	1,76	316	1,89	319
4	1,31	183	1,82	307	1,82	318	2,01	328
5	1,48	178	1,83	310	1,66	303	1,77	304

S/h:10.0 için her testin ILSS'si listelenmiş ve her yüzey işlemi için standart sapmalı ortalama değerler Tablo 4.5'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.5. S/h:10.0 ve her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar

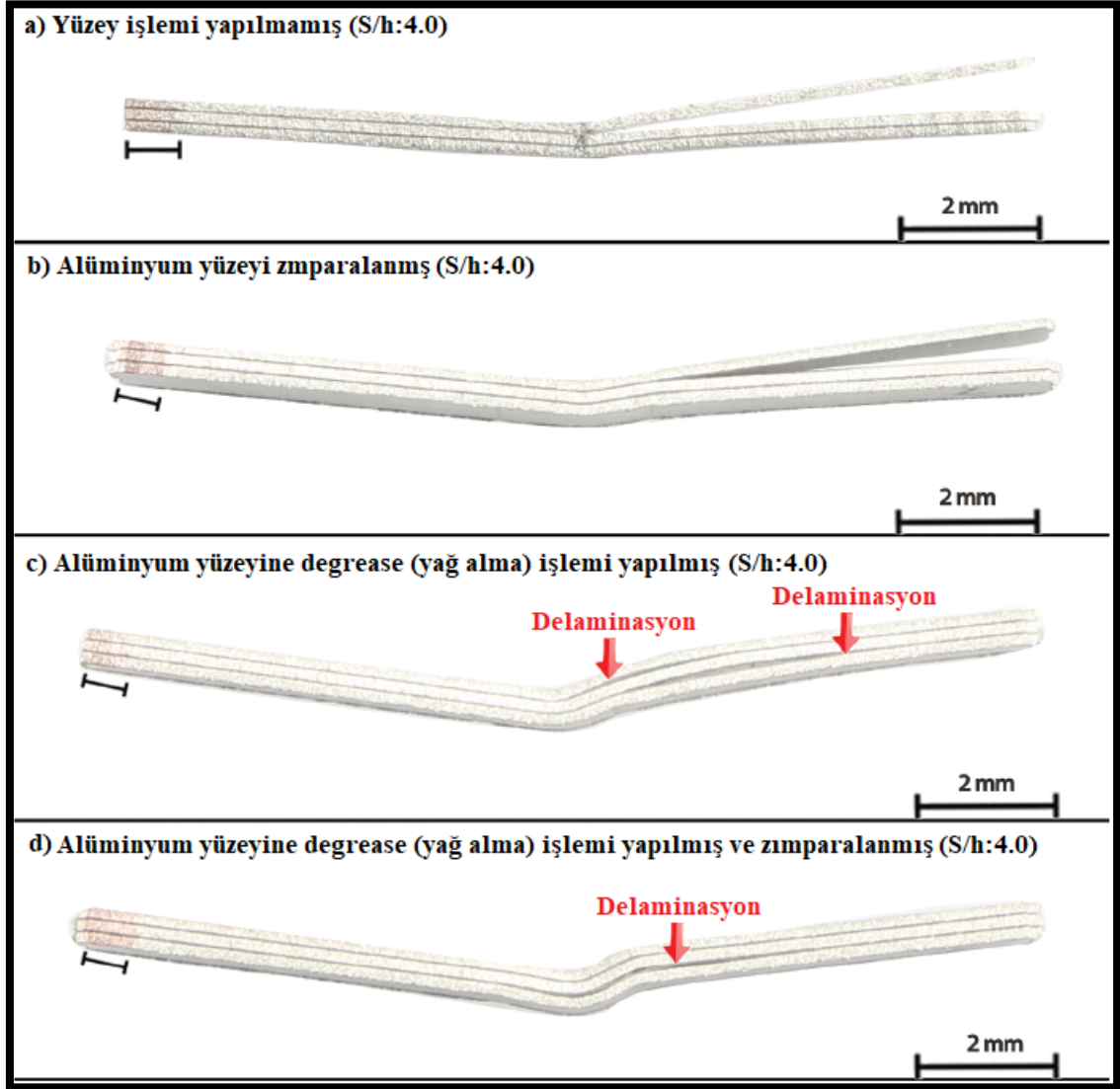
Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)
1	28,2		30,8		30,7		29,3	
2	18,8		29		29,4		29,3	
3	28,8	21,9 (5,40)	30,3	29,9 (0,64)	30,0	29,9 (0,70)	30,7	30,0 (0,81)
4	17,1		29,4		30,5		31,2	
5	16,8		30,0		28,8		29,4	

Sonuçlar, zımparalanmış, yağ alma yapılmış ve hem yağ alma yapılmış hem de zımparalama yapılmış ön yüzey işlemleri GLARE malzemelerin mukavemet değerlerinin, ön yüzey işlemi görmemiş GLARE malzemelere karşı %37 oranında arttığını göstermektedir. Artış oranları S/h:4.0 kısa kiriş testindeki bulgulara göre bu testte daha yüksektir. Bu durum, daha küçük S/h'ye maruz kalan numunelerin hasar modlarının bir sonucu olabilir. Diğer bir neden ise, yüzey işlemlerinin yapışma performansı üzerinde daha iyi etkilere sahip olması ve hata modu özelliklerinin eğilme deformasyonuna eğilimli olması olabilir. Ön yüzey işlemi görmemiş numunelerin test sonuçlarındaki standart sapma, yine ön yüzey işlemi görmüş numune sonuçlarından çok daha yüksektir ve sapma değeri, Şekil 4.2.a'daki eğrilerle uyumludur. Bu sonuç, ön yüzey işlemi görmemiş GLARE malzemelerin hem düşük dayanım değerleri hem de test sonlarında numunelerin aşırı derecede hasarlanması nedeniyle endüstriyel kullanım için güvenilir olmadığını bir kez daha göstermektedir.

S/h:4.0 kısa alt destek mesafesi ile yapılan ILSS testlerinden sonra hem ön yüzey işlemi yapılmamış hem de ön yüzey işlemi yapılmış GLARE numunelerinde ortaya çıkan hata modlarının dijital görüntüleri Şekil 4.3'te verilmiştir.

Genel olarak, tüm GLARE numuneleri için tepe yüküne ulaşıldığında ara alüminyum tabakası ile prepreg tabakası arasında delaminasyonun meydana geldiği tespit edilmiştir. Çatlak oluşumunun, alüminyum/prepreg arayüzey bölgesi boyunca ilerlediği ve nihai olarak, Ye ve diğerlerinin (2021) çalışmasına benzer şekilde tipik bir kayma kırılması olan enine kayma gerilimi altında prepreg tabakasına kadar genişlemiştir. Ayrıca, elde edilen bulgular Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b'deki GLARE malzemelerin zayıf metal/prepreg

arayüzeyi, Lawcock ve diğerlerinin (1998) çalışmasına benzer şekilde katastrofik delaminasyon olarak tabakalar arası ayrılmaya sebep olmuştur.



Şekil 4.3. Üç nokta eğme testi sonrası hasarlanmış 3/2 GLARE test numuneleri (S/h:4.0)

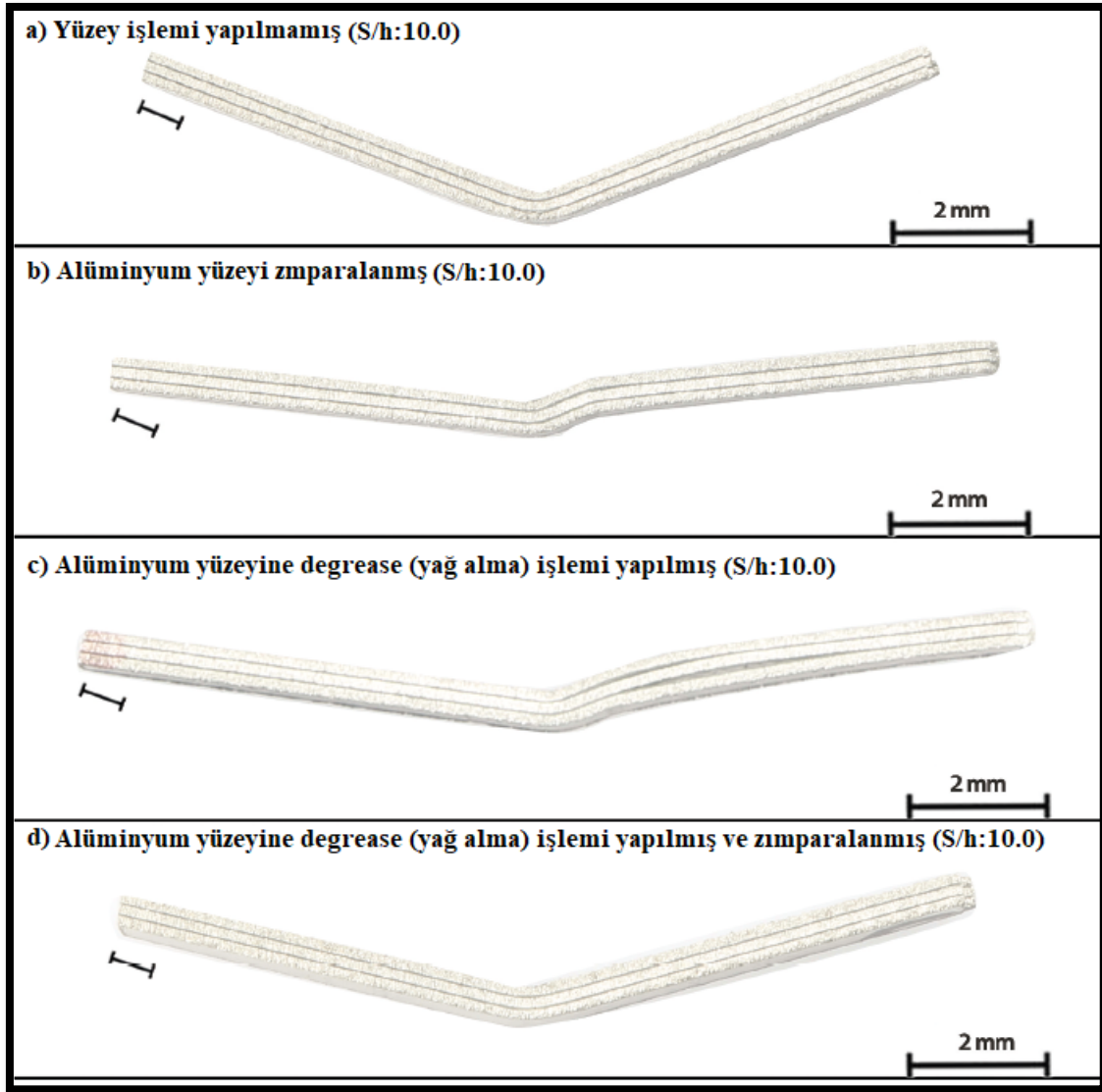
Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b’de görülen hata modu bir diğer çalışmada (Rauf ve diğ., 2021) baskın şekilde ortaya çıkan tabaka ayrılması hata modunun ön yüzey işlemi yapılmamış ve zımparalanmış numunelerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Yapışma hata modunun temel sebebi, ön yüzey işlemi yapılmamış ve zımparalanmış FMTK numunelerindeki arayüzey bağlanmasının zayıf olmasıdır. Lopes ve diğerlerinin (2008) araştırmasında bahsedildiği gibi, destek noktaları ile yükleme noktası arasındaki kayma yüklü arayüzey bölgelerinde çatlaklar başlamıştır. Daha sonra, aşamalı olarak ön yüzey işlemi

yapılmamış ve zımparalanmış GLARE numunelerin uçlarına doğru yayılmıştır. Delaminasyon başlangıcı ise ara alüminyum/prepreg ara yüzeyinde meydana gelmiştir. Bunun nedeni, yalnızca numune orta düzleminde kesme çekme kuvvetlerinin daha yüksek olması değildir. Aynı zamanda, GLARE numunelerinin yağ alma ve hem yağ alma hem de zımparalama gibi yüzey işlemlerinden sonra bunun tersine, alüminyum/prepreg ara yüz bölgesinde bir yapışma gelişimi sergilediği belirlenmiştir. Şekil 4.3c ve Şekil 4.3d’te, yağ alma yapılmış ve hem yağ alma hem de zımparalanmış GLARE numuneleri için burkulma olgusundan dolayı alüminyum ve prepreg katman arayüzeyi arasındaki bölgesel delaminasyon hasar mekanizması da gözlemlenebilir. Hem yağ alma hem de zımparalamanın uygulandığı ön yüzey işleminde delaminasyon bölgesinin boyutunun küçüldüğü gözükmemektedir.

S/h:10.0 alt destek mesafesi ile yapılan üç nokta eğme testlerinde, tüm GLARE numunelerinin üst yüzeyleri basma gerilmesine, numunelerin alt yüzeyleri ise eğilme deformasyonu fonksiyonu altında çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. Çeşitli yüzey işlemine tabi tutulmuş GLARE numuneleri ayrıca katmanlar arası kayma geriliminin fonksiyonuna tabi tutulmuştur (Hu ve diğ., 2019). Şekil 4.4’te S/h:10.0 için üç nokta eğme testine tabi tutulan GLARE numunelerinin hata modları gösterilmektedir.

Bölgesel bir burkulma kırılması, herhangi bir delaminasyon arızası olmaksızın, GLARE numunelerinin birincil hata modları olarak ortaya çıkmıştır. Çeşitli yüzey işlemli GLARE numuneleri için elde edilen kuvvet değerleri, alüminyum/prepreg tabakaların arayüzey bölgelerinde hasar oluşturmaya yetmemiş, bunun yerine gerilmiş bölgede delaminasyon oluşumunu engellemiştir. Gerilmiş katmanda açıkça görülebilen bir delaminasyon hata modu gözlenmemiştir. Genel olarak, hem sıkıştırılan hem de gerdirilen katmanlarda herhangi bir tahribat olmamıştır.

Test sonuçlarına göre, delaminasyon ve tabakalar arası kayma hata modları yalnızca kısa alt destek mesafesi (S/h:4.0) kullanılan durumda gözlenmiştir. Ancak alt destek mesafesinin büyütüldüğü (S/h:10.0) durumda ise sıkıştırma deformasyonunu gözlenmiştir.



Şekil 4.4. Üç nokta eğme testi sonrası hasarlanmış 3/2 GLARE test numuneleri (S/h:10.0)

Hata modunun alt destek mesafesi (S/h oranı) ile değiştiğini ve tabakalar arası bağlanma kuvvetinin FMTK davranışını ve hata modunu belirlemek için önemli olduğunu söylemek mümkündür.

4.2. Termal Yaşlandırma Etkisi

GLARE, FMTK malzemeler içerisinde ince alüminyum sac plakalar ve cam/epoksi takviyeli elyaflardan oluşan bir üyesidir. GLARE malzemeler, mükemmel darbe performansları, hasar toleransları ve yüksek yorulma dirençlerinin yanı sıra ağırlıktan tasarruf etme yetenekleri nedeniyle gövde ve kanat ön kenarları gibi uçak yapılarına uygulanmaktadırlar. Reçine ve tabaklar arası yapışma sonucu oluşturulan özellikleri ile

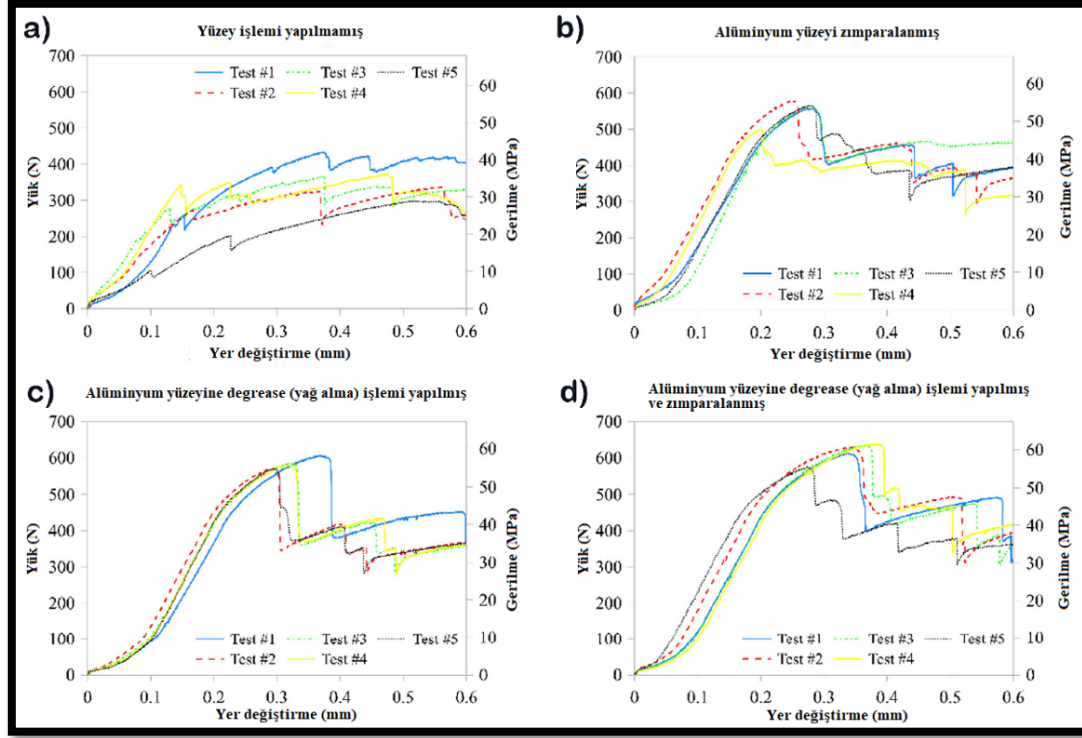
karmaşık bir çoklu arayüzey mekanizmasına sahiptir. Bununla birlikte, katmanlarında bulunan GLARE'nin arayüzeyleri, kayma yüküne karşı hassastır ve GLARE, eğilme ve burulma yüklerine maruz kalırken, arayüzey bağları sırasında ezilme eğilimindedir. Delaminasyon, GLARE malzemelerin en kritik başarısızlık mekanizmalarından biridir. Servis koşullarında maruz kalınana ısı değişimlerin delaminasyon oluşumuna etkisi incelenmiştir.

Tipik bir kargo uçağının uçuş özelliklerine atıfta bulunulan iki farklı döngüsel termal koşul, çevresel etkiyi simüle etmek amacıyla sıcaklık limitlerini değiştirerek ve döngü sayısını aynı tutarak GLARE numunelerine uygulanmıştır. Farklı ön yüzey işlemlerinin GLARE malzemelerin ILSS değerleri üzerindeki etkisini görmek amacıyla hem termal çevrime maruz bırakılmış hem de termal çevrim uygulanmamış numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sayede hem ön yüzey işlemi hem de ısı etki ayrı ayrı değerlendirilebilmiştir. Buna bağlı olarak yük-yer değiştirme ve gerilim-yer değiştirme grafikleri çizilmiştir ve hata modları görsel olarak tanımlanmıştır. Tüm yüzey konfigürasyonları ve her iki termal çevrim için hazırlanan test numunelerinin genişliği ve kalınlığı Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Farklı yüzey konfigürasyonları ve termal döngü şartları için ölçülen numune genişlik ve kalınlıkları

İşlemsiz			Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
Birinci Termal Çevrim (-30°C / +80°C)								
Test No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	4,05	1,92	4,09	1,90	4,08	1,93	4,08	1,94
2	4,07	1,91	4,07	1,90	4,08	1,94	4,09	1,93
3	4,08	1,90	4,06	1,91	4,07	1,92	4,07	1,94
4	4,06	1,91	4,06	1,91	4,08	1,94	4,08	1,92
5	4,08	1,93	4,11	1,91	4,08	1,94	4,08	1,91
İkinci Termal Çevrim (-25°C / +50°C)								
Test No	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)
1	4,10	1,93	4,08	1,87	4,05	1,93	4,07	1,91
2	4,09	1,94	4,07	1,90	4,04	1,92	4,09	1,93
3	4,11	1,91	4,08	1,89	4,06	1,91	4,06	1,93
4	4,12	1,91	4,10	1,91	4,05	1,90	4,08	1,92
5	4,11	1,93	4,09	1,88	4,04	1,92	4,07	1,93

Birinci termal çevrim (-30°C / $+80^{\circ}\text{C}$ arasında 500 döngü) sonrasında S/h:4.0 alt destek mesafesi ile yapılan ILSS testlerinin tüm yüzey koşulları için yük-değiştirme ve gerilme-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Birinci termal çevrim sonrasında GLARE malzemelere uygulanan ILSS testleri sonucu ortaya çıkan yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri

Buna ek olarak, birinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS test sonuçları, ortalama değerleri ve standart sapmaları Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7. Birinci termal çevrim sonrası her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar

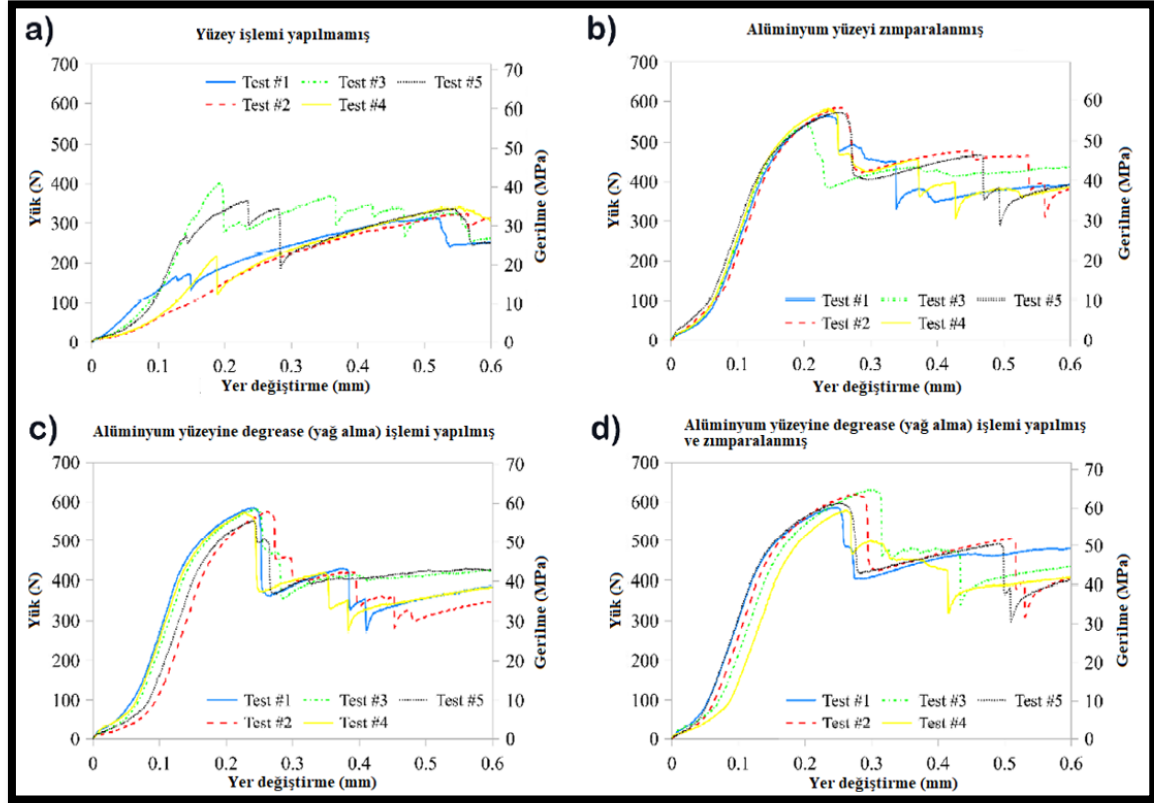
Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)
1	41,6		52,6		56,9		59,6	
2	33,1		54,6		55,0		60,2	
3	35,7	35,1 (4,23)	54,3	53,0 (2,01)	56,6	55,8 (0,86)	59,7	59,6 (0,48)
4	36,4		42,2		55,7		59,6	
5	28,7		54,2		54,7		58,7	

Tüm ön yüzey işlemi uygulanan GLARE malzemelerin ILSS değerleri, oda sıcaklığındaki termal çevrime maruz bırakılmamış duruma kıyasla birinci termal çevrim sonrasında ön yüzey işlemi yapılmamış konfigürasyona karşı oldukça anlamlı bir iyileşme sağlamıştır. Sonuçlar, zımparalanmış, yağ alma yapılmış ve hem yağ alma yapılmış hem de zımparalanmış ön yüzeyi işlemi yapılmış GLARE malzemeler için ILSS ortalama değerlerinin, birinci termal çevrim altında ön yüzey işlemsiz referans malzemeye göre sırasıyla %51, %59 ve %70 oranında arttığını göstermektedir. Oda sıcaklığında, termal çevrime maruz bırakılmamış koşul ve birinci termal çevrim sonrası koşul için tabakalar arası kayma performansları karşılaştırıldığında beklenildiği gibi, şiddetli çevrimsel termal koşul nedeniyle hem ön yüzey işlemi yapılmamış hem de ön yüzey işlemi yapılmış GLARE malzemelerin tümü için dayanım değerleri düşmektedir. Bununla birlikte, bir GLARE malzemeler hem zımparalama hem de yağ alma ön yüzey işlemine sahip olduğunda, mukavemetin yalnızca ön yüzey işlemsiz GLARE malzemedenden değil, aynı zamanda sadece zımparalanmış veya sadece yağ alma yapılmış GLARE malzemelerden de çok daha fazla korunabileceği gösterilmiştir. Zımparalama ve yağ alma birlikte uygulandığında ILSS değeri birinci termal koşulda %4 kadar düşmüştür. Düşüş oranları, yağ alma, zımparalama ve ön yüzey işlem görmeme durumları için sırasıyla %10, %13 ve %26'dır. Şekil 4.5'e göre ön yüzey işlemi yapılmış her numunenin test sonuçlarında ve Tablo 4.7'de verilen standart sapmalarda bir tutarlılık mevcutken, ön yüzey işlemi yapılmamış GLARE malzemelerin test sonuçları arasında hala bir miktar tutarsızlık görülmüştür. Bununla birlikte, hem zımparalama hem de yağ alma ön yüzey işlemi yapılmış GLARE malzemeler için sonuçlar daha tutarlıdır ve bu numune grubu, birinci termal çevrim altında diğerlerine kıyasla daha düşük standart sapmaya sahiptir.

İkinci termal çevrim (-25°C / + 50°C arasında 500 döngü) sonrasında S/h:4.0 alt destek mesafesi ile yapılan ILSS testlerinin tüm yüzey koşulları için yük-değiştirme ve gerilme-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.6'da verilmiştir.

Buna ek olarak, ikinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS test sonuçları, ortalama değerleri ve standart sapmaları Tablo 4.8'de verilmiştir. Tüm ön yüzey işlemi uygulanan GLARE malzemelerin ILSS değerleri, oda sıcaklığındaki termal çevrime maruz bırakılmamış duruma kıyasla ikinci termal çevrim sonrasında da birinci termal çevrime

maruz bırakılmış gruba benzer olarak ön yüzey işlemi yapılmamış konfigürasyona karşı oldukça anlamlı bir iyileşme sağlamaktadır.



Şekil 4.6. İkinci termal çevrim sonrasında GLARE malzemelere uygulanan ILSS testleri sonucu ortaya çıkan yük-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri

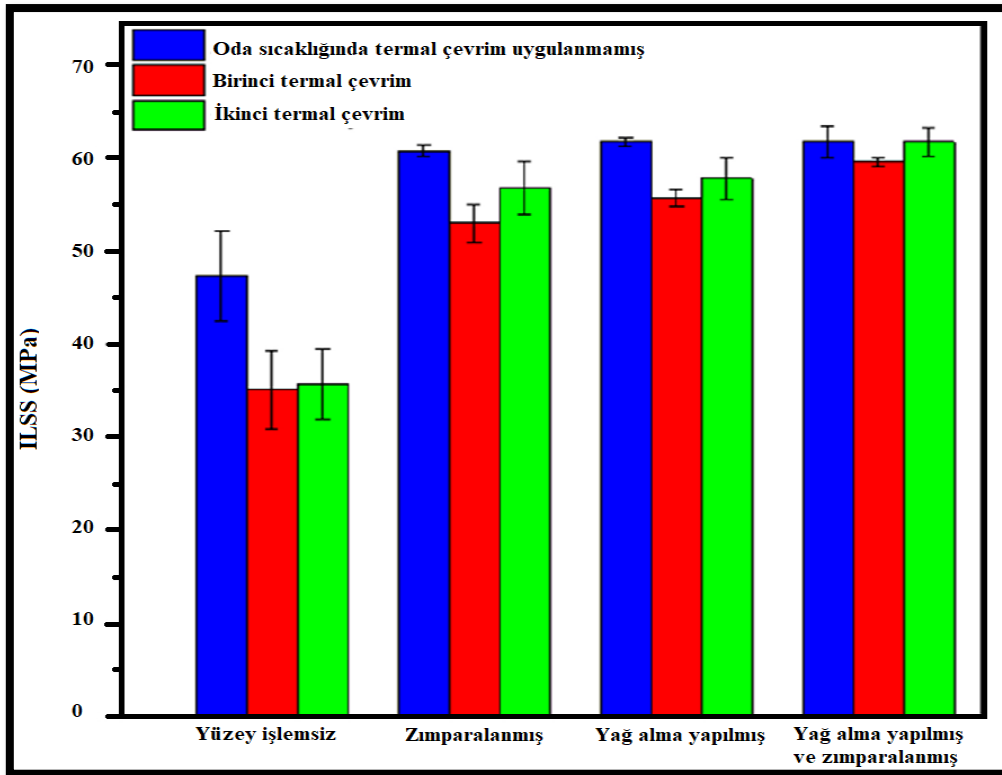
Tablo 4.8. İkinci termal çevrim sonrası her bir ön yüzey işlemi için elde edilen tabakalar arası kayma mukavemeti ve ortalama değerler ile standart sapmalar

Test No	İşlemsiz		Zımparalanmış		Yağ Alma Yapılmış		Yağ Alma ve Zımparalanmış	
	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)	ILSS (MPa)	Ortalama- (SD)
1	32,1		57,7		61,2		61,9	
2	32,5		56,6		57,1		62,9	
3	42,4	35,7 (3,83)	51,8	56,8 (2,85)	58,0	57,8 (2,18)	62,6	61,8 (1,50)
4	34,0		57,4		58,1		58,9	
5	37,3		60,6		54,4		62,8	

Sonuçlar, zımparalanmış, yağ alma yapılmış ve hem yağ alma yapılmış hem de zımparalanmış ön yüzeyi işlemi yapılmış GLARE malzemeler için ILSS ortalama değerlerinin, ikinci termal çevrim altında ön yüzey işlemsiz referans malzemeye göre sırasıyla %59, %62 ve %73 oranında arttığını göstermektedir. Her ne kadar her iki termal

çevrim koşulunda ortaya çıkan iyileşmeler her ne kadar birbirlerine yakın olsalar ve tüm ön yüzey işlemlili GLARE malzemelerde iyileşme görülmüş olsa da zımparalama ön yüzey işlemlili yapılmış GLARE malzemedeki iyileşme daha belirgin düzeydedir. Oda sıcaklığında, termal çevrime maruz bırakılmamış koşul ve ikinci termal çevrim sonrası koşul için tabakalar arası kayma performansları karşılaştırıldığında, dayanım değerlerinin termal çevrimsiz durumdaki değerlere göre düşüşleri, ön yüzey işlemlili yapılmamış GLARE malzeme hariç, özellikle hem zımparalama hem de yağ alma ön yüzey işlemlili yapılmış GLARE malzemelerde sınırlıdır. Bu durum ikinci termal çevrimdeki farklı sıcaklık limitlerinden ve termal çevrimin uygulandığı daha küçük sıcaklık genliğinden kaynaklanmaktadır. Zımparalama ve yağ alma birlikte uygulandığında, dayanım değerleri ikinci termal koşulda tamamen korunur ve yağ alma, zımparalama ve ön yüzey işlemlili görmeme durumlarında elde edilen dayanım değerlerinde sırasıyla %6, %7 ve %25 azalma görülmüştür.

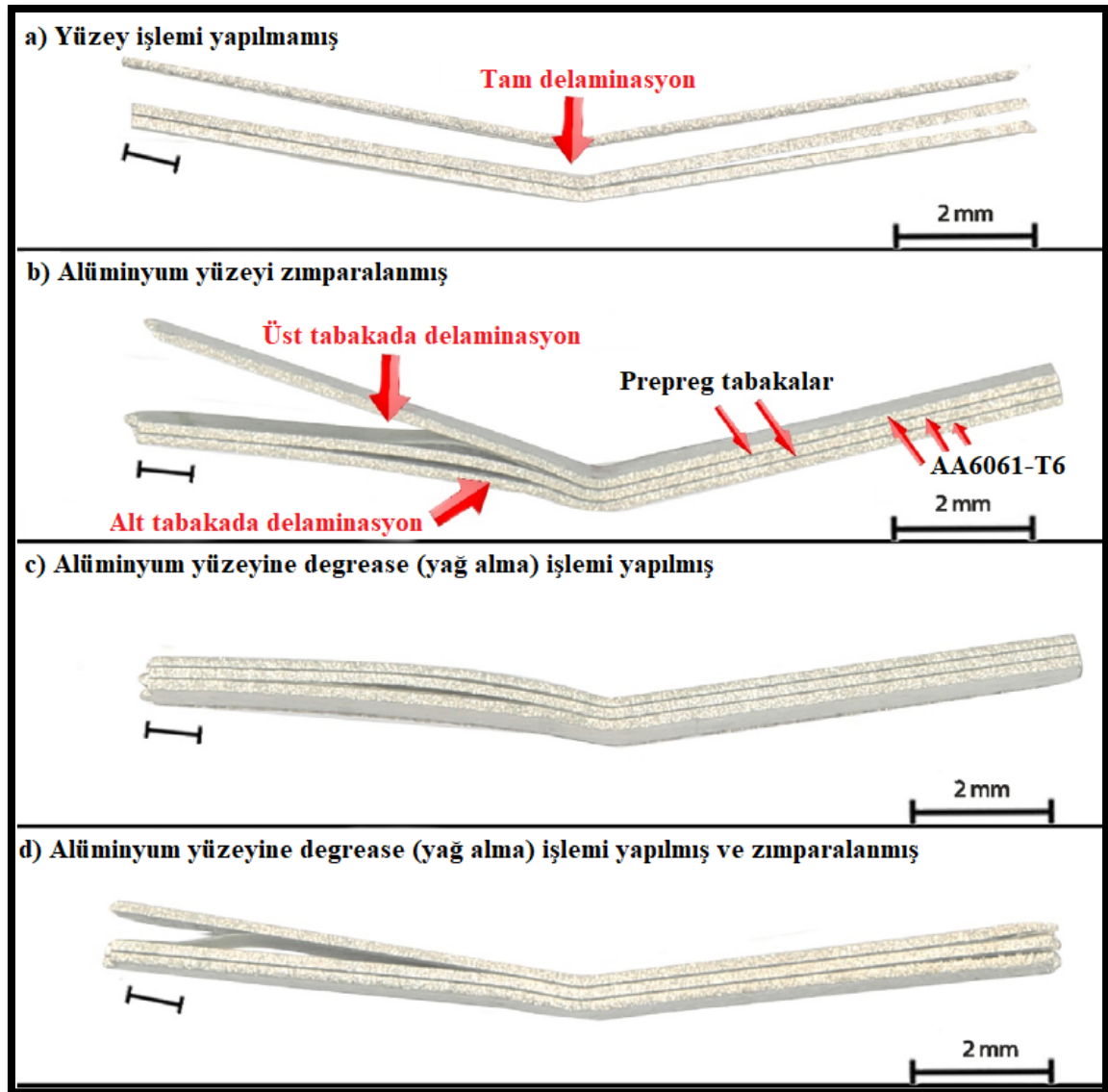
Tüm yüzey konfigürasyonları ve tüm termal koşullardaki ortalama dayanım değeri ve standart sapmalar Şekil 4.7’de özetlenmiştir.



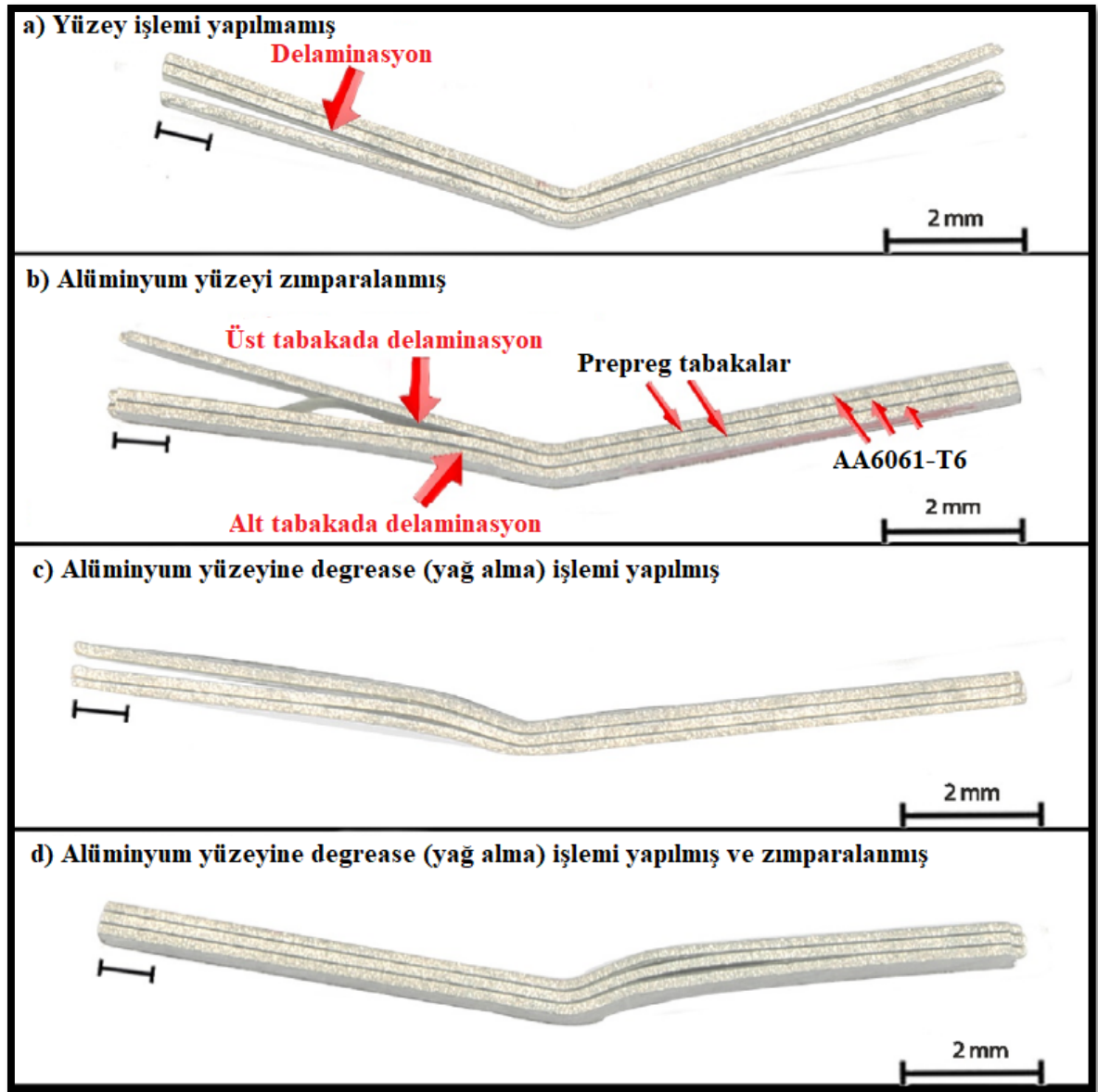
Şekil 4.7. Tüm yüzey konfigürasyonları ve termal koşullar için ortalama ILSS değerleri ile standart sapma değerlerinin karşılaştırması

Müller ve diğerleri (2015) tarafından belirtildiği gibi, daha uzun soğutma süreleri, soğutucular için daha fazla sıcaklık artışına neden olabilir ve dengesiz bir termal döngü süreci ile sonuçlanabilir. Yüksek sıcaklık değişimi, numunenin kalınlık yönünde daha az homojen olan bir sıcaklık dağılımına neden olabilir. Tüm yüzey konfigürasyonlarına sahip GLARE numunelerinin alüminyum/prepreg arayüzeyleri sıcaklık değişimlerinden etkilenmiştir ve özellikle birinci termal çevrim altında daha yüksek sıcaklık değişimi nedeniyle önemli ölçüde zayıflamıştır. Bu durum ayrıca, epoksi matrisi plastikleşebilir veya şişebilir ve alüminyumun prepreg katmanlara yapışmasının azalmasıyla sonuçlanabilir. Surowska ve diğerlerine (2021) göre termal şoklardan kaynaklanan gerilimler genellikle GLARE numunelerinin arayüzeylerinde maksimum değere ulaşmaktadır.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla birinci termal çevrim sonrası ve ikinci termal çevrim sonrası ortaya çıkan hata modları gösterilmiştir. Özellikle ön yüzey işlemi yapılmamış ve zımparalama işlemi yapıldıktan sonra imal edilmiş GLARE malzemelerdeki ana hata modunun delaminasyon olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Sonuç olarak, termal çevrime maruz bırakılmamış GLARE malzemelerine kıyasla tüm GLARE numuneleri için baskın deformasyon mekanizması delaminasyondur. Ayrıca yağ alma ve hem yağ alma hem de zımparalama gibi yüzey işlemleri uygulanarak üst veya alt arayüzlerde oluşan delaminasyon bölgeleri sınırlandırılabilmiştir. Bunun sebebi ise termal şoklardan kaynaklanan stresin, iyi yapışma nedeniyle alüminyum/prepreg arayüzlerinde emilmesidir.



Şekil 4.8. Birinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS testlerinde hasarlanmış GLARE malzemeler



Şekil 4.9. İkinci termal çevrim sonrası uygulanan ILSS testlerinde hasarlanmış GLARE malzemeler

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında AA6061-T6 alüminyum plaka ve S2 cam fiber ile oryante edilmiş 3/2 GLARE kompozit malzemelerde alüminyum/prepreg yapışmasının alüminyum plakalara ön yüzey işlemi uygulanarak iyileştirilmesi, üç nokta eğme testinde alt destek mesafesi değişikliği ile ortaya çıkan hata modlarının değerlendirilmesi ve son olarak çevrimsel termal yaşlandırmanın metal/prepreg yapışmasına bağlı olarak tabakalar arası kayma mukavemetine etkisi değerlendirilmiştir. Alüminyum plakalara zımparalama, yağ alma ve hem yağ alma hem zımparalama yüzey işlemleri uygulanarak metal/prepreg yapışmasının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. GLARE malzemelerinin büyük ölçüde AA2XXX ve A7XXX serisi alüminyum sac plakalar kullanılarak imal edildiği ve bu şekilde ile ticarileştirildiği bilinmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar, AA6061-T6 levhaların GLARE üretiminde kullanılan geleneksel alüminyum levhaların yerini alması için olumlu bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Her ne kadar ön yüzey işlemsiz AA2024-T3 ile imal edilen GLARE malzemelerin ILSS değerleri, ön yüzey işlemsiz AA6061-T6 ile imal edilen GLARE malzemelere göre daha yüksek olsa da, alüminyum plakalara ön yüzey işlemi uygulandığında en yüksek tabakalar arası kayma direnci her iki malzeme için de yakın seviyelerde gözükmektedir. Elde edilen bulgular ve çıkarımlar aşağıda verilmiştir;

- AA6XXX serisi, en yaygın kullanılan ve en ucuz alüminyum alaşım serilerinden biridir. Bunun yanında, A6XXX serisi alaşımlar yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel kaynaklanabilirlik, korozyon direnci ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, AA6061-T6 metal plakalar ile üretilen GLARE malzemelerin yüksek tabakalar arası kayma dayanım değerlerine sahip olduğu kanıtlanmıştır.
- Elde edilen en yüksek tabakalar arası kayma dayanımı olan 61,80 MPa, AA6XXX serisi ile üretilen GLARE'in literatürdeki kayma dayanım aralıkları 39 MPa ve 64,50 MPa arasında değişkenlik gösteren AA2XXX ve AA7XXX serileri ile üretilen GLARE malzemelere karşı oldukça rekabetçi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

- AA6XXX serisinden üretilen GLARE malzemeler, bir uçağın mutfak gibi bölümlerindeki iç yapısal destek parçaları ve paneller gibi uygulamalarda veya çoğunlukla ikincil havacılık yapıları şeklinde konstrüksiyonun aerodinamik şeklini veren yapılarda kullanılabilir. Diğer bir uygulama ise insansız hava araçlarının birincil yapısal parçaları olabilir.
- Yapıda oluşan deformasyon ve hata modları üç nokta eğme testlerinde uygulanan alt destek mesafesi değişikliğinden etkilenmektedir. ASTM D2344/D2344M-16 (2016) tarafından tavsiye edilen küçük S/h oranına (4.0) sahip numuneler mükemmel bir şekilde kayma etkisini göstermekteyken 2,5 kat daha büyük olan S/h oranı (10.0) kullanıldığında ön yüzey işleme tabi tutulmayan alüminyum plakalar ile imal edilmiş GLARE malzemelerin dışında kalan numuneler tabakalar arası kayma davranışı yerine eğilme davranışı göstermiştir.
- ILSS testlerine göre, alüminyum sac plaka yüzeylerine ön yüzey işlemi uygulandığında elde edilen sonuçlar ön yüzey işlemi uygulanmamış alüminyum sac plakalar ile imal edilen GLARE malzemelere göre %29 ila %37 arasında daha yüksek tabaka ayrılma dayanımına ulaşıldığını göstermektedir.
- Metal/prepreg yapışma özelliğini iyileştirdiği açık olan metal malzeme yüzeyine ön yüzey işlemi uygulamanın yüksek dayanımlı FMTK malzemeler için gerekli olduğu belirlenmiştir.
- Laboratuvar sıcaklığı ve bağıl nem gereksinimleri altında çeşitli statik ve dinamik yüklere veya eşzamanlı statik higrotermal yüklere maruz bırakılan, mekanik veya kimyasal ön yüzey işlemlili FMTK'lar daha önce incelenmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmaların hiçbiri GLARE gibi FMTK'lar üzerindeki çeşitli döngüsel termal koşulları dikkate almamıştır. Çevrimsel termal koşullar uygulandığında, metalik tabaka üzerindeki ön yüzey işlemlerinin, GLARE dahil olmak üzere havacılık FMTK'ları için zorunlu olduğu kanıtlanmıştır. Basit bir mekanik işlem olsa bile, GLARE malzemelerde yüzey işlemiyle elde edilen bir tabakalar arası kayma mukavemetindeki artış, şiddetli çevrimsel termal koşullar altında oda sıcaklığında bekletilen numunelere oranla daha yüksektir.

- Elde edilen sonuçlar, ön yüzey işlemlili GLARE malzemeler için tabakalar arası kayma dayanımı değerlerinin, ön yüzey işlemi yapılmamış GLARE malzemelere göre %29 ila %73 arasında bir artışa sahip olduğunu ve mukavemet değerinin maruz kalınan çevrimsel termal profile direkt bağlı olduğunu göstermektedir.
- Hem mekanik hem kimyasal (zımparalama ve yağ alma) kombine bir ön yüzey uygulandığında, oda sıcaklığında termal etkiye maruz bırakılmamış olmayan sonuçlara göre tabakalar arası kayma dayanımı birinci şiddetli termal çevrimde sadece %4 azalırken, ikinci şiddetli termal koşul altında tamamen korunmuştur.
- Tabakalar arası kayma dayanımındaki azalma, sadece zımparalama veya yağ alma ön yüzey işlemi uygulandığında daha yüksek olmakla birlikte, mekanik ve kimyasal yüzey işlemleri, ön yüzey işlemi yapılmamış uygulamaya göre anlamlı bir artışa sahiptir. Ancak sadece yağ alma ön yüzey işlemi zımparalamaya karşı daha iyi bir performansa sahiptir. Hem yağ alma hem de zımparalama ile kombine bir ön yüzey işlemi ile metal/prepreg yapıştırması optimize edildiğinde, şiddetli termal döngülerin olumsuz etkisinin minimum olacağı gösterilmiştir.
- Tabakalar arası kayma dirençlerinin ön yüzey işlemlili GLARE malzemelerde şiddetli termal döngüler sonrasında bile düşük standart sapmalı sonuçlar vermesi kullanılan malzemenin havacılık yapılarında kullanılabilmesi için güvenilir bir kaynak olmuştur.

Farklı higrotermal iklimlendirme koşulları altında, farklı alüminyum sac plaka kaliteleri (AA2XXX serisi, AA7XXX serisi ve AA6XXX serisi) ve farklı ön yüzey işlemleri ile imal edilmiş GLARE malzemelerin çekme mukavemeti, elastik modülü, eksenel yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü araştırmak ilginç olabilir. Bu çalışma, gelecekte bu kapsamda yapılacak çalışmalara ışık tutucu niteliktedir.

KAYNAKLAR

- Afaghi-Khatibi, A., Lawcock, G., Ye, L., Mai, Y.W. (2000). On the fracture mechanical behaviour of fibre reinforced metal laminates (FRMLs). *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 185 (2-4), 173-190.
- Aksüt, R. (2021). Fiber Lazer Tekniği Kullanılarak Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Metal/Prepreg Kumaş Arayüzey Dayanımının Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 716278.
- Alderliesten, R.C. (2005), Fatigue crack propagation and delamination growth in Glare. TU Delft: Delft University of Technology.
- American Society for Testing and Materials (ASTM International). (2016). Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates (ASTM D2344/D2344M-16).
- Aydın, B. (2020). Daha Hafif ve Dayanıklı Yüksekte Çalışma Oturağının Kompozit Malzemeden Tasarımı, Analizi ve Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 620571.
- Azghan, M.A., Farsani, R.E., (2018). The effects of stacking sequence and thermal cycling on the flexural properties of laminate composites of aluminium-epoxy/basalt-glass fibres. *Materials Research Express*, 5, 025302.
- Azghan, M.A., Sambran, F.B., Farsani, R.E., (2021). Modeling and experimental study on the mechanical behaviour of glass/basalt fiber metal laminates after thermal cycling. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(8), 1192-1212.
- Bellini, C. (2020). Damage analysis of a GLARE laminate subjected to interlaminar shear. *Procedia Structural Integrity*, 25, 262-267.
- Bonhin, E.P., Botelho, E.C., Ribeiro, M.V. (2022). Interlaminar shear of FML produced with surface treatment by mechanical abrasion. *Procedia CIRP*, 108, 555-559.
- Bulut, M. (2014). Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 371620.
- Cameron, N.M., Rapp, C.F. (2001). Fiberglass. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, (2nd ed.) (3142-3146). Owens Corning Science and Technology Center, Granville, Ohio.
- Chai, G. B., Manikandan, P. (2014). Low velocity impact response of fibre-metal laminates – A review. *Composite Structures*, 107, 363-381.
- Chen, Y., Wang, Y., Wang, H. (2020). Research Progress on Interlaminar Failure Behavior of Fiber Metal Laminates. *Advances in Polymer Technology*, Article ID 3097839. <https://doi.org/10.1155/2020/3097839>

- Da Costa, A.A., Da Silva, D.F.N.R., Travessa, D.N., Botelho, E.C. (2012). The effect of thermal cycles on the mechanical properties of fiber-metal laminates. *Materials & Design*, 42, 434-440.
- Das, R., Chanda, A., Brechou, J., Banerjee, A. (2016). Impact behaviour of fibre-metal laminates. Silberschmidt, V.V., (Ed.), *Dynamic Deformation, Damage and Fracture in Composite Materials and Structures* (491-542). Woodhead Publishing.
- Elmarakbi, A. (2013). Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness. John Wiley & Sons.
- Eren Y., (2007). Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 202834.
- Eryılmaz, A.N., (2020). Otomotiv Endüstrileri için Doğal Lifler ile Güçlendirilmiş Polimer Matrisli Kompozitlerin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, 619768.
- Eşer, K. (2021). Sandviç Kompozit Yapılarda Balpeteği Özelliklerinin ve Farklı Yapıştırıcı Tabakaların Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 674881.
- Farooq, U., Myler, P. (2016). Finite element simulation of damage and failure predictions of relatively thick carbon fibre-reinforced laminated composite panels subjected to flat and round noses low velocity drop-weight impact. *Thin-Walled Structures*, 104, 82-105.
- Fayaz, H., Karthik, K., Jaya Christiyan, K.G., Arun Kumar, M., Sivakumar, A., Kaliappan, S., Jinnah Sheik Mohamed, M., Subbiah, R., Yishak, S. (2022). An Investigation on the Activation Energy and Thermal Degradation Biocomposites of Jute/Bagasse/Coir/Nano TiO₂/Epoxy-Reinforced Polyaramid Fibers. *Journal of Nanomaterials*, Article ID 3758212. <https://doi.org/10.1155/2022/3758212>
- Gupta, M. K., Srivastava, R. K. (2015). Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1098694>
- Hagenbeek, M., Müller, B., Sinke, J.(2019). Effect of Thermal Cycling and Aging on Heated Fiber Metal Laminates and Glass-Fiber Epoxy Composites. *Advanced Engineering Materials*, 21 (6), 1800084.
- Hu, Y., Li, H., Tao, J., Pan, L., Xu, J. (2018). The effects of temperature variation on mechanical behaviors of polyetheretherketone-based fiber metal laminates. *Polymer Composites*, 39 (5), 1447-1454.
- Hu, Y., Zhang, Y., Fu, X., Hao, G., Jiang, W. (2019). Mechanical properties of Ti/CF/PMR polyimide fiber metal laminates with various layup configurations. *Composite Structures*, 229, 111408.

- 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*, 34 (16):1347-1356.
- İşlek, H.A. (2020). *Kompozit Malzemeler ve Kısa Tarihi*. <http://kompozithayalleri.com/kompozit-malzemeler-ve-kisa-tarihi/> (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2022)
- Jakubczak, P., Bienias, J., Surowska, B. (2018). Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles. *Composite Structures*, 206, 876-887.
- Karthik, K., Prakash, J.U., Binoj, J.S., Mansingh, B.B. (2022). Effect of stacking sequence and silicon carbide nanoparticles on properties of carbon/glass/Kevlar fiber reinforced hybrid polymer composites. *Polymer Composites*, 43 (9), 6096-6105.
- Khan, S.U., Alderliesten, R.C., Benedictus, R. (2009). Post-stretching induced stress redistribution in fibre metal laminates for increased fatigue crack growth resistance. *Composites Science and Technology*, 69 (3-4), 396-405.
- Khalid, M., Al Rashid, A., Sheikh, M. (2021). Effect of Anodizing Process on Inter Laminar Shear Strength of GLARE Composite through T-Peel Test: Experimental and Numerical Approach. *Experimental Techniques*, 45, 227–235.
- Kılıç, E. (2006). Kompozit Malzemedan Yapılan Yaprak Yayların Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 202436.
- Kıyak, B. (2017). Karbon Fiber Kompozit Çekirdekli Sandviç Levhaların İmalatı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 477823.
- Kocaoğlu, İ. (2021). Kompozit Malzemeler Sektörü ve Türkiye'nin Durumu. <https://startinizmir.izka.org.tr/kompozit-malzemeler-sektoru-ve-turkiyenin-durumu/> (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2022)
- Kubit, A., Trzepieciniski, 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.
- Kurt, E. (2021). Farklı Termal Çevrimlere Maruz Bırakılmış Alüminyum/Alüminyum Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Eğilme Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 671470.
- Kwon, D. J., Kim, J. H., Kim, Y. J., Kim, J. J., Park, S. M., Kwon, I. J., Shin, P. S., DeVries, L. K., Park, J. M. (2019). Comparison of interfacial adhesion of hybrid materials of aluminum/carbon fiber reinforced epoxy composites with different surface roughness. *Composites Part B*, 170, 11-18.

- Lawcock, G.D., Ye, L., Mai, Y.W., Sun, C.T. (1998). Effects of fibre/matrix adhesion on carbon-fibre-reinforced metal laminates-II. impact behaviour. *Composites Science and Technology*, 57 (12), 1621-1628.
- Li, H., Hu, Y. Liu, C., Zheng, X., Liu, H., Tao, J. (2016). The effect of thermal fatigue on the mechanical properties of the novel fiber metal laminates based on aluminum–lithium alloy. *Composites: Part A*, 84, 36-42.
- Liu, C., (2017). M.Sc. Thesis, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nankin, Çin.
- 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. *Composite Part B Engineering*, 97, 361–367.
- Lopes, C. S., Remmers, J.J.C., Gürdal, Z. (2008). Influence of Porosity on the Interlaminar Shear Strength of Fibre-Metal Laminates. *In Key Engineering Materials*, 383, 35–52.
- Muller, B., Teixeira de Freitas, S., & Sinke, J. (2015). Thermal cycling fiber metal laminates: Considerations, test setup and results. *In OT. Thomsen (Ed.), Proceedings of the 20th international conference on composite materials*. ICCM 20, 1-11.
- Noor, M. F., Pash,a R. A., Wakeel, A. , Nasir, M.A., Bilal Y. (2017). Effect of thermal cycling on the tensile behavior of Cf/Al fiber metal laminates. *Advances in Science and Technology*, 11 (3), 80-86.
- Ozun, E., (2022). Nano Malzeme Takviyeli Epoksinin Alüminyum Yapıştırma Bağlantılarında Higrotermal Yaşlandırmaya ve Hibrit Takviyenin Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 744356.
- Öztürk, K. (2020). Alüminyum Matrisli Melez Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Linsan Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 642280.
- Park, S.Y., Choi, W.J. (2018). The Guidelines of Material Design and Process Control on Hybrid Fiber Metal Laminate for Aircraft Structures, In (Ed.), Optimum Composite Structures. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78217>
- Park, S.Y., Choi, W.J., Choi, s.c. (2010). The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviours of glass/epoxy and GLARE laminates. *Composite Structures*, 92, 18-24.
- Rauf, O. U., Khurram, A. A., Hussain, R., Tauqir, A., Hashmi, F., Shah, O. U. R., Khokhar, M. S., Shifa, M. (2021). Nanoparticles enhanced interfaces of Glass fiber laminate aluminum reinforced epoxy (GLARE) fiber metal laminates. *Polymer Composites*, 42 (8), 3954-3968.

- Rudawska, A. (2014). Selected aspects of the effect of mechanical treatment on surface roughness and adhesive joint strength of steel sheets. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50, 235-243.
- Santos, A.L., Nakazato, R.Z., Schmeer, S., Botelho, E.C. (2020). Influence of anodization of aluminum 2024 T3 for application in aluminum/Cf/ epoxy laminate. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107718.
- Schijve, J., Van Lipzig, H.T.M., Van Gestel, G.F.J.A., Hoeymakers, A.H.W. (1979). Fatigue properties of adhesive-bonded laminated sheet material of aluminum alloys. *Engineering Fracture Mechanics*, 12, 561-579.
- Semercigöz, S.M. (2021). Bor Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 676492.
- Sinmazçelik, 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.
- Surowska, B., Dadej, K., Jakubczak, P., Bienias, J. (2021). Short-beam shear fatigue life assessment of thermally cycled carbon–aluminium laminates with protective glass interlayers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21, 50.
- Surowska, B., Jakubczak, P., Bienias, J. (2017). Structure and chemistry of fiber metal laminates. Thakur, V.K., Thakur, M.K., Gupta, R.K. (Ed.), *Hybrid Polymer Composite Materials* (193-234). Woodhead Publishing.
- Şanlıtürk, S. (2020). Al Katmanlar Kullanılarak Üretilmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Delinmesinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 634517.
- URL-1: <https://unsalkompozit.com/>, (Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2022)
- URL-2: <https://tr.eferrit.com/kompozitlerin-tarihcesi/> , (Ziyaret tarihi: 5 Aralık 2022)
- URL-3: <https://www.seykoc.com.tr/icerik/6061?dil=tr> , (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2021)
- URL-4: <http://referansmetal.com/> , (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2021)
- Velumayil, R., Palanivel, A. (2021). Thermal analysis of Kevlar/basalt reinforced hybrid polymer composite. *Materials Research Express*, 8, 115302.
- Velumayil, R., Palanivel, A. (2022). Hybridization Effect on Mechanical Properties of Basalt/Kevlar/Epoxy Composite Laminates. *Polymers*, 14 (7), 1382.
- Vermeeren, C. A. J. R. (2003). An historic overview of the development of fibre metal laminates. *Applied Composite Materials*, 10, 189-205.

Ye, J., Wang, H., Dong, J., Liu, C., Gao, Y., Gong, B., Su, B., Peng, H.X. (2021). Metal surface nanopatterning for enhanced interfacial adhesion in fiber metal laminates. *Compos Science and Technology*, 205, 108651.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Ucan, C.**, Bora, M. O., Coban, O. (2019). The Effect of Cataphoresis Coating on Fatigue Behaviour of Control Arms under Corrosion Environment . *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics* , 7 , 212-219. <http://www.epstem.net/tr/pub/issue/50288/655411>
- Susler S., Bora M. O., **Ucan C.**, Turkmen H. S. (2022). The Effect of Surface Treatments on the Interlaminar Shear Failure of GLARE Laminate Included AA6061-T6 Layers by Comparing Failure Characteristics. *Composite Interfaces*. <https://doi.org/10.1080/09276440.2022.2120739>
- Susler S., Bora M. O., **Ucan C.**, Turkmen H. S. (2022). The Effect of Surface Treatments on the Interlaminar Shear Failure of GLARE Laminates Subjected to Pre-Cyclic Thermal Loads. *Polymer Composites*, 43, 9040–9053. <https://doi.org/10.1002/pc.27082>

ÖZGEÇMİŞ

Cem Uçan, ilk öğretim, orta öğretim ve lise öğrenimini Düzce’de tamamladı. Lise sonrası yerleştiği, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında mezun oldu. Ardından askerlik görevini Edirne Uzunköprü’de bulunan 105. Topçu Alayı’nda Topçu Onbaşı olarak tamamladı. İlk iş deneyimi olan ARTEG firmasının ardından halen çalışmakta olduğu Teknorot Otomotiv Ürünleri San. Tic. A.Ş. firmasına 2017 yılında dahil oldu. Ar-Ge departmanı bünyesinde 3,5 yıl Ürün Teknik Destek Mühendisi olarak çalıştı. Bu süreçte, 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2021 yılının başından itibaren Teknorot Otomotiv Ar-Ge departmanında Ürün İyileştirme ve Teknik Destek Sorumlusu olarak çalışmaya devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

