



**MAGNEZYUM MATRİSLİ LAMİNE KOMPOZİT ÜRETİMİ VE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Reyhan KALAYCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Reyhan KALAYCI

26 / 01 / 2024

MAGNEZYUM MATRİSLİ LAMİNE KOMPOZİT ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Reyhan KALAYCI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2024

ÖZET

Bu çalışma ticari olarak alüminyum kullanılarak üretilen fiber metal lamine (FML) kompozit malzemelerde alternatif bir malzeme olarak magnezyum alaşımlarının kullanılabilirliğinin incelenmesini amaçlamaktadır. Magnezyumun düşük yoğunluğa sahip olması, son yıllarda özellikle havacılık ve savunma endüstrilerinde araştırılan ve kullanılan bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır. Çalışma kapsamında AZ31B ve 1050 Al metal plakalar ile üretilmiş FML kompozit malzemelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Karbon ve cam (glass) prepreg kumaşlar ve yapıştırma işlemi için bazı numunelerde yapıştırıcı (adhesive) film kullanılmıştır. Kumaşlar 0° yönünde serilmiştir. Kumaşların serimi öncesinde yüzey hazırlığı olarak mekanik ve kimyasal yüzey hazırlıkları yapılmıştır. Yüzey hazırlığının yapışmaya etkisini görmek adına her bir AZ31B ve 1050 Al plaka için zımpara ve kumlama yüzey işlemleri yapılmıştır. Ardından yüzeylere %7'lik kromik asit çözeltisi uygulanmıştır. Test plakaları vakum altında otoklavda 120 ± 5 °C'de 6 bar'da kürlenmiştir. Kürleme işlemi sonucunda, yüzey hazırlığı zımparalama ile yapılan AZ31B, karbon ve cam (glass) prepreg kombinasyonu ile üretilen numunede katların birbirinden ayrıldığı görüldü. Diğer numunelerde makro boyutta yapışma görülmüştür. Numunelerin CNC'de kesimi sırasında AZ31B ve karbon prepreg kombinasyonu ile üretilen numunede katlar arası ayrılma görülmüştür. Yapılan ultrasonik muayene sonucunda yüzey hazırlığı kumlama ile yapılmış AZ31B, karbon ve cam (glass) prepreg kombinasyonu ile üretilen numune de bölgesel olarak katlar arası ayrılma tespit edilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda cam (glass) ve AZ31B kullanılan kombinasyonlarda yüzey işlemi fark etmeksizin katlar arasında yapışma sağlanamamıştır. Üretilen FML kompozitler ile yapılan çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre 1050 Al kullanılarak üretilen FML numunelerinin çekme dayanımlarında %50 oranında artış gözlenmiştir. AZ31B kullanılarak üretilen FML numunelerinin çekme dayanımlarında ise %14 oranında bir artış görülmüştür. Optik mikroskop ile yapılan görüntülemelerde AZ31B ve 1050 Al metal plaklar ile prepreg katlar arasında yapışmanın sağlandığı ve dayanım artışının sağlandığı görüldü.

Bilim Kodu : 91512

Anahtar Kelimeler : Fiber metal lamine, magnezyum, kompozit malzemeler

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Prof. Dr. Burhanettin İNEM

PRODUCTION OF MAGNESIUM MATRIX LAMINATED COMPOSITE AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES

(M. Sc. Thesis)

Reyhan KALAYCI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

ABSTRACT

This study aims to investigate the feasibility of using magnesium alloys as an alternative material in fiber metal laminated (FML) composite materials, which are commercially produced using aluminum. The low density of magnesium has made it a material that has been researched and used in the aerospace and defense industries in recent years. Within the scope of the study, the properties of FML composite materials produced with AZ31B and 1050 Al metal plates were compared. Carbon and glass prepreg fabrics and adhesive film were used for bonding in some samples. The fabrics were lay-up in the 0° direction. Mechanical and chemical surface preparations were performed as surface preparation before laying the fabrics. In order to see the effect of surface preparation on adhesion, sanding and sandblasting surface treatments were performed for each AZ31B and 1050 Al plate. The surfaces were then treated with a 7% chromic acid solution. The test plates were cured in an autoclave under vacuum at 120 ± 5 °C and 6 bar. As a result of the curing process, it was seen that the plies were separated from each other in the sample produced with the combination of AZ31B, carbon and glass prepreg, whose surface preparation was done by sanding. Macro adhesion was observed in other specimens. During CNC cutting of the samples, separation between the layers was observed in the sample produced with the combination of AZ31B and carbon prepreg. As a result of the ultrasonic examination, localized interlayer separation was detected in the sample produced with the combination of AZ31B, carbon and glass prepreg, whose surface preparation was made by sandblasting. In line with this information, adhesion between the layers could not be achieved regardless of the surface treatment in the combinations using glass and AZ31B. According to the results obtained from the tensile tests performed with the produced FML composites, a 50% increase in the tensile strength of the FML samples produced using 1050 Al was observed. An increase of 14% was observed in the tensile strength of FML specimens produced using AZ31B. Optical microscope imaging showed that adhesion was achieved between AZ31B and 1050 Al metal plates and prepreg plies and strength increase was achieved.

Science Code : 91512

Key Words : Fiber metal laminated, magnesium, composite materials

Page Number : 81

Supervisor : Prof. Dr. Burhanettin İNEM

TEŞEKKÜR

Çalışmam sırasında bana yol gösteren, konu seçimimde, araştırmalarımı yürütmemde destek olan ve sürekli motive eden, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışmanlığımı üstlenen Prof. Dr. Burhanettin İNEM'e teşekkür ediyorum.

Tez çalışmalarımı yürütmem için her türlü desteği sağlayan, çalışmakta olduğum Epsilon Kompozit Teknoloji ve Savunma Sanayii A.Ş.'ye, başta Laboratuvar birimi olmak üzere, yöneticilerime ve üretim personeline vermiş oldukları destek ve sağladıkları katkılar için teşekkürlerimi özellikle belirtmek istiyorum.

Hayatım boyunca bana her zaman inanan, beni her koşulda destekleyen, her zaman yanımda olan aileme, bu süreçte göstermiş oldukları sabır ve vermiş oldukları desteklerden dolayı çok teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri	4
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	6
2.2.1. Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler	7
2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit (SMK) malzemeler.....	9
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozit (PMK) malzemeler	10
2.2.4. Parçacık Takviyeli Kompozit malzemeler	11
2.2.5. Fiber Takviyeli Kompozit malzemeler	12
2.2.6. Yapısal kompozitler	13
3. FİBER METAL LAMİNE (FML) KOMPOZİTLER	17
3.1. FML Kompozitlerin Tarihçesi.....	17
3.2. FML Kompozitlerin Özellikleri	19
3.3. FML Kompozitlerin Sınıflandırılması	20
3.3.1. ARALL FML kompozitler	21
3.3.2. GLARE FML kompozitler	22

	Sayfa
3.3.3. CARALL FML kompozitler.....	23
3.4. FML Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler	24
3.4.1. Metal katmanlar	24
3.4.2. Fiber katmanlar	26
3.5. FML Kompozitler İçin Yüzey Hazırlık Uygulamaları.....	32
3.5.1. Mekanik yüzey işlemleri.....	33
3.5.2. Kimyasal yüzey işlemleri.....	34
3.6. FML Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	35
3.6.1. Otoklavla üretim.....	35
3.6.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi.....	37
3.6.1. Sıcak Presleme yöntemi	38
3.6. FML kompozitlerin uygulama alanları	39
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
4.1. Kullanılan Malzemeler ve Test Plakalarının Kesilmesi.....	41
4.1.1. 1050 alüminyum	41
4.1.2. AZ31B magnezyum	42
4.1.3. Cam (Glass) prepreg kumaş	44
4.1.4. Karbon prepreg kumaş	45
4.1.5. Yapıştırıcı (Adhesive) film	45
4.2. Numunelerin Yüzey Hazırlık İşlemleri	46
4.3. Serim (Lay-up) ve Kurlenme Aşaması	49
4.4. Test Numunelerinin Kesilmesi.....	54
5. NUMUNELERİN TESTLERİ.....	59
5.1. Çekme Testlerinin Yapılması.....	59

	Sayfa
5.2. Katmanlar Arası Kayma Gerilmesi (ILSS) Testi	60
5.3. Optik Mikroskop ile Kesit Görüntülerinin Alınması	61
6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	63
6.1. Çekme Testi Sonuçları	63
6.2. Katmanlar Arası Kayma Gerilmesi (ILSS) Testi Sonuçları.....	68
5.3. Optik Mikroskop Görüntülerinin Yorumlanması.....	70
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	73
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Ticari olarak kullanılan ARALL FML kompozitler.....	21
Çizelge 3.2. Ticari olarak kullanılan GLARE FML kompozit malzemeler.....	22
Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	24
Çizelge 3.4. Cam fiber türlerinin isimlendirilmesi.....	27
Çizelge 3.5. Fiberlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	29
Çizelge 3.6. Farklı uçak modellerinde FML kompozitlerin kullanıldığı kısımlar	40
Çizelge 4.1. 1050 Al kimyasal kompozisyonu (%).....	42
Çizelge 4.2. 1050 Al H14 Mekanik ve fiziksel özellikleri.....	42
Çizelge 4.3. AZ31B kimyasal kompozisyonu.....	43
Çizelge 4.4. AZ31B mekanik ve fiziksel özellikleri	43
Çizelge 4.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları	47
Çizelge 4.6. Hazırlanan test numunelerinin gruplandırılması.....	49
Çizelge 6.1. Çekme testi sonuçları	63
Çizelge 6.2. ILSS Test Sonuçları	68
Çizelge 6.3. 1050 Al ile üretilen FML kompozitlerinin optik mikroskop görüntüleri....	71
Çizelge 6.4. AZ31B ile üretilen FML test numunelerinin optik mikroskop görüntüleri..	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin tarihi.....	4
Şekil 2.2. Malzeme gruplarının yoğunluk ve mukavemetlerinin karşılaştırılması	5
Şekil 2.3. Kompozit malzemenin yapısı	6
Şekil 2.4. Matris tipine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	7
Şekil 2.5. SiC takviyeli bakır matrisli kompozitin kırılma yüzeyi görüntüsü	8
Şekil 2.6. MMK malzemelerin üretimi için tercih edilen üretim yöntemleri	9
Şekil 2.7. SiNC fiber takviyeli SiC matris kompozit seramik yapısı.....	10
Şekil 2.8. Elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme.....	11
Şekil 2.9. Takviye Elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.10. Tungsten karbür takviyeli kobalt matrisli parçacık takviyeli kompozit	12
Şekil 2.11. Farklı şekillerde yönelmiş fiber takviyeli kompozitler.....	13
Şekil 2.12. Arka arkaya yönlenmiş fiber takviyeli tabakaların istiflenmesi	14
Şekil 2.13. Sandviç kompozit yapının şematik gösterimi.....	15
Şekil 3.1. Fiber metal lamine kompozitlerin şematik gösterimi	17
Şekil 3.2. FML kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi.....	18
Şekil 3.3. Airbus uçaklarında kompozit kullanımının yıllara göre eğilimi.....	19
Şekil 3.4. FML kompozitlerin sınıflandırılması	20
Şekil 3.5. ARALL 2 şematik gösterimi	22
Şekil 3.6. GLARE 3 için şematik gösterimi	23
Şekil 3.7. CARALL şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.8. Aramid kumaş.....	26
Şekil 3.9. Cam (Glass) Kumaş.....	28
Şekil 3.10. Karbon Fiber Kumaş.....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. Fiberlerin diğer malzemeler ile karşılaştırılması	30
Şekil 3.12. Fiber örgü tipleri	31
Şekil 3.13. Fiber yönleri.....	31
Şekil 3.14. Fiber oryantasyonuna göre dayanımı.....	32
Şekil 3.15. Yüzey pürüzlülüğünün ıslanabilirliğe etkisi.....	33
Şekil 3.16. Yüzey pürüzlülüğü şematik gösterimi	33
Şekil 3.17. Zımpara grid boyutları.....	34
Şekil 3.18. FML kompozit üretim yöntemleri	35
Şekil 3.20. Otoklav	36
Şekil 3.21. Otoklav şematik gösterimi.....	37
Şekil 3.22. Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.23. Sıcak Pres cihazının şematik gösterimi	39
Şekil 3.24. Kompozit malzemelerin uygulama alanları.....	39
Şekil 4.1. 1050 Alüminyum test plakalarının kesildiği levha.....	41
Şekil 4.2. AZ31B Magnezyum Alaşımı.....	42
Şekil 4.3. CNC kesim aşaması.....	43
Şekil 4.4. Kesilen alüminyum ve magnezyum test plakaları	44
Şekil 4.5. Cam (Glass) prepreg kumaş.....	44
Şekil 4.6. Karbon prepreg kumaş.....	45
Şekil 4.7. Yapıştırıcı (Adhesive) film	45
Şekil 4.8. Kumlanmış plakalar.....	46
Şekil 4.9. Zımparalanmış plakalar	46
Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	47
Şekil 4.11. Kromik asit çözeltisinde bekletilen test plakaları.....	48

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. Kromik asit çözeltisinden çıkarılan plakaların saf su ile yıkanması.....	48
Şekil 4.13. Serim aşaması	50
Şekil 4.14. Serimi yapılan FML kompozitlerin şematik gösterimi.....	50
Şekil 4.15. Üretilen FML kompozitler için vakum torbalamaların şematik gösterimi...	51
Şekil 4.16. Vakum torbalama işlemleri.....	52
Şekil 4.17. FML kompozitlerin kurlenme grafiği.....	53
Şekil 4.18. Ayrılma görülen G12 test plakası	53
Şekil 4.19. Çekme numunesinin şematik gösterimi.....	55
Şekil 4.20. ILSS testi numunesi.....	55
Şekil 4.21. CNC sırasında ayrılma görülen G4 numaralı FML	56
Şekil 4.22. Çekme numuneleri.....	56
Şekil 4.23. ILSS numuneleri.....	57
Şekil 5.1. Çekme testinin gerçekleştirilmesi.....	59
Şekil 5.2. ILSS testlerinin gerçekleştirilmesi.....	60
Şekil 5.3. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin ILSS testi, b) AZ31B ile üretilen FML kompozitin ILSS testi	61
Şekil 5.4. Optik görüntüleri için hazırlanan numuneler.....	61
Şekil 6.1. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin çekme testi sonrası kırılma yüzeyi	64
Şekil 6.2. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin (G13-1) çekme grafiği.....	64
Şekil 6.3. AZ31B ile üretilen FML kompozitin (G14-1) çekme grafiği.....	65
Şekil 6.4. Metal levha ve FML kompozitlerin çekme dayanımlarının karşılaştırılması..	65
Şekil 6.5. Çekme testi kırılma tipleri	66
Şekil 6.6. Numunelerin kırılma tipleri	67
Şekil 6.7. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin ILSS testi.....	69
Şekil 6.8. ILSS testi sonrası 1050 Al ile üretilen FML kompozitler	69

Şekil**Sayfa**

Şekil 6.9. ILSS testi sırasında kırılan AZ31B ile üretilen FML kompozit	70
---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

°C

MPa

GPa

kN

mm

Açıklamalar

Santigrat

Megapascal

Gigapascal

Kilonewton

Milimetre

Kısaltmalar

1050 Al

ARALL

ASTM

AZ31B

CARALL

CNC

FML

GLARE

gsm

ILSS

MMK

PMK

SMK

Açıklamalar

Alüminyum

Aramid Alüminyum Lamine

American Society fro Testing and Materials

Magnezyum alaşımı

Carbon Alüminyum Lamine

Computer Numerical Control

Fiber Metal Lamine

Glass Lamine Alüminyum

metrekare başına ağırlık (grams per square meter)

Katmanlar Arası Kayma Mukavemeti

Metal Matrisli Kompozitler

Polimer Matrisli Kompozitler

Seramik Matrisli Kompozitler

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler en az iki malzemenin üstün ve uygun özelliklerinin bir araya getirilerek oluşturulduğu malzeme gruplarıdır. Önemi ve kullanım alanları her geçen gün artmakta olup geliştirilmeye ve araştırılmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca tercih sebepleri, metallere kıyasla hafif olmaları ve buna karşın yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Fiber metal lamine kompozitler, metal ve fiber lamine katmanların bir araya getirilerek oluşturulan bir türüdür.

1940'lı yıllarda fiber metal lamine kompozitler ile ilgili ilk çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. İkinci dünya savaşında havacılığın ve savunmanın önem kazanması ile birlikte 1970'li yıllara gelindiğinde fiber metal lamine kompozitler ticari olarak geliştirilmiştir. Fiber metal lamina kompozitlerde ilk olarak metal plaka olarak alüminyum ve fiber katmanı olarak aramid tercih edilmiştir. Ortaya çıkan bu malzemeye ARALL ismi verilmiştir. Ardından yapılan araştırmalar ve çalışmalarla alüminyum metal değiştirilmemiş ancak fiber katman olarak cam (glass) ve karbon kumaşlar da kullanılmıştır. Cam (Glass) kumaş kullanılan FML kompozitlere GLARE, karbon kumaş kullanılır FML kompozitlere CARALL ismi verilmiştir. 1990'lı yıllara gelindiğinde FML kompozitler, hafif olmaları ve beraberinde yüksek dayanıma sahip olmaları sebebiyle uçaklarda tercih edilen malzemeler haline gelmiştir. Günümüze kadar gelen bu süreçte havacılık ve savunma sanayisinin her geçen gün gelişmesi sonucunda FML kompozitler üzerine yapılan çalışmalar yaygınlaşmıştır. Bu çalışmalar kapsamında metal katman olarak kullanılan alüminyum malzeme yerine alternatif malzemeler araştırılmaktadır. Yapılan literatür taraması sonucunda titanyum ve magnezyum alaşımları ile fiber metal lamine kompozit üretimi üzerine çalışmaların araştırmaların yapıldığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında magnezyum alaşımlarının tercih edilmesinin sebebi havacılık için önemli bir kriter olan hafifliktir. Magnezyum malzemeler alüminyum malzemelere göre daha düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir.

Hafiflik ve dayanıklılığın bir arada bulunduğu magnezyum, alüminyumdan yaklaşık %33, çelikten ise %75 daha hafiftir. Sahip olduğu bu özellik ile havacılık ve ulaşım sektörlerinde yakıt verimliliği ve buna bağlı olarak performans artışı sağlayabilen bir malzemedir.

Üretiminin kolay olması magnezyumun öne çıkan özelliklerindendir. İşlenmesi, dökülmesi ve şekillendirilmesi oldukça kolay olmasının yanında geri dönüştürülebilirlik özelliği ile çevreye duyarlı bir metal olarak öne çıkıyor.

Sonuç olarak magnezyum, hafifliği, işlenebilirliği ve çevre dostu olması ile birçok alanda kullanılabilir, önemli bir malzeme haline gelmiştir [1]. Günümüzde magnezyum için yapılan araştırmalar artmış ve özellikle havacılık sektörünün son yıllardaki gelişimi ve düşük yoğunluklu malzeme ihtiyacı ile birlikte önem kazanmaya devam etmektedir.

Magnezyumun bu özelliği fiber metal lamine kompozitlerde daha hafif ve özgül dayanımı yüksek yapılar elde edilmesi için bir fırsat oluşturulabileceği düşünülmüş ve böyle bir çalışma ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde yapılan incelemelerde, magnezyum alaşımları ile üretilen fiber metal lamine kompozitlerin özgül dayanımları ve çekme dayanımlarında görülen artışlar, magnezyum alaşımlarının fiber metal lamine kompozitler için kullanılabilirliği üzerine araştırmalar yapılması konusunda destekleyici olmuştur. 2003 yılında M.C. Kuo ve arkadaşlarının yaptığı “Fabrication of High Performance Magnesium/Carbon-Fiber/PEEK Laminated Composites” isimli çalışmada AZ31B magnezyum alaşımı ile üretilen fiber metal lamine kompozitin fiber yönünde dayanımının yaklaşık 900 MPa seviyelerine kadar arttığı görülmüştür. Özgül dayanımı ise 500 MPa seviyelerini görmüştür. Buradan elde edilen sonuç, düşük bir yoğunluğa ve dayanıma sahip olan magnezyum alaşımı fiber takviyesi ile hafif ve yüksek dayanımlı kompozit yapılar elde edilebilmektedir.

2020 yılında Mustafa Yunus Aşkın’ın yaptığı “Alüminyum ve Magnezyum Matrisli Prepreg Takviyeli Lamine Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi” isimli çalışmasında da AZ31B magnezyum alaşımı kullanılarak fiber metal lamine kompozit malzeme üretilmiştir. Bu çalışma kapsamında üretilen fiber metal lamine kompozitin, AZ31B magnezyum alaşımına göre dayanımının %30 oranında arttığı gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ışığında, AZ31B magnezyum alaşımının karbon ve cam (glass) prepreg kumaşlar ile fiber metal lamine kompozit malzeme üretilebilirliği ve üretilen fiber metal lamine kompozitin dayanım artışı incelenmiştir.

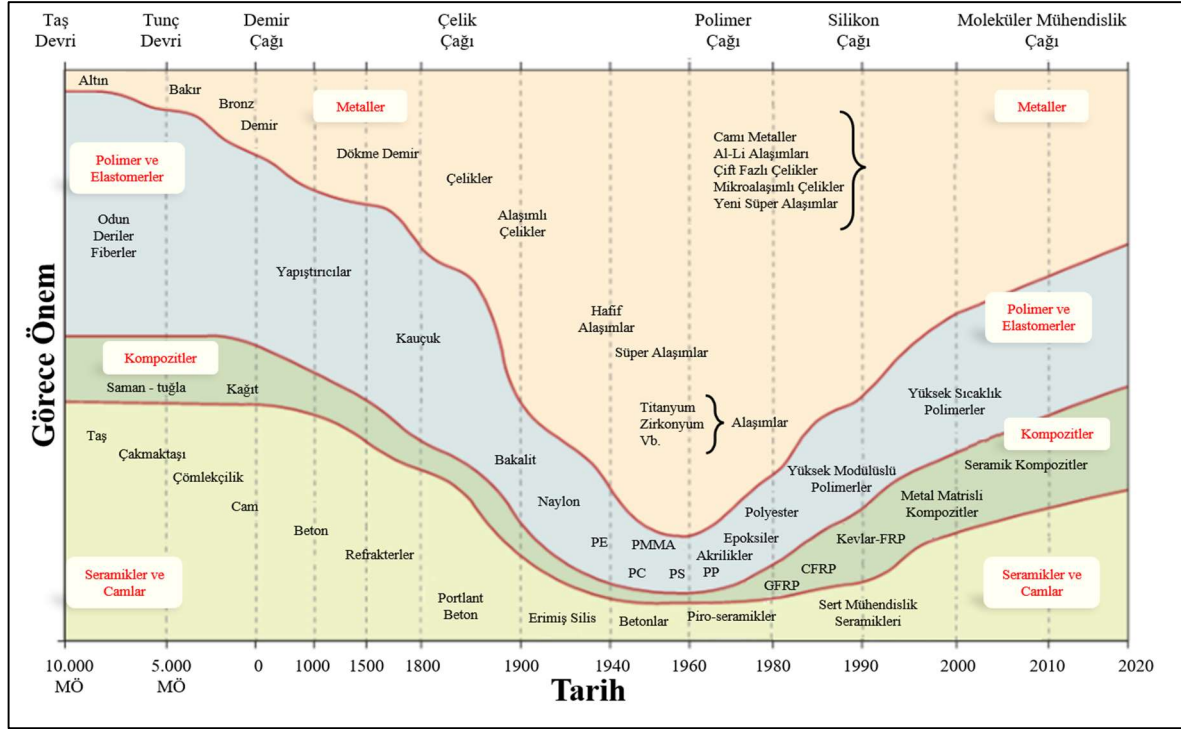
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Geçen yüzyıllar boyunca havacılık, uzay, savunma, inşaat, otomobil vb. sektörlerinin artan ihtiyaçları, talepleri ve beraberinde gelişen teknolojiyi karşılamak adına, geleneksel malzemeler zamanla iyileştirilerek ve geliştirilerek yeni malzemeler ortaya çıkmıştır. Kompozit malzemeler de gelişen teknoloji ile birlikte her geçen yıl sektörde daha çok önem kazanan ve ihtiyaç duyulan bir malzeme grubu haline gelmiştir.

Kompozit kelimesi Fransızca bir kelime olan “composite” kelimesinden meydana gelmekte olup karma, değişik tarzları bir arada taşıyan anlamına gelmektedir [1].

Kompozit malzemelerin sanılanın aksine ilk örnekleri bin yıl öncelerine kadar dayanmaktadır. Antik çağlarda, kırılgan, dayanıksız yapıdaki malzemeleri, bitki lifleri, hayvansal lifleri gibi doğal malzemeler ile birleştirerek daha dayanıklı malzemeler elde etmeyi denemişlerdir. Akla gelen ilk örneklerden birisi çamura saman karıştırarak elde edilen, çamurun daha dayanımlı hale geldiği “kerpiç” malzeme aslında bir kompozit malzemedir. Bir başka örnek ise Moğollar kullandıkları yayların esneyen kısımlarında farklı yönlerde sahip hayvan tendonları kullanmasıdır. Böylelikle yaylarına esneklik ve dayanım kazandırmışlardır. Antik çağlarda yapılan bu uygulamalar doğal kompozit malzemelerin ilk ortaya çıktığı ve uygulandığı zamanlardır.

1930’lu yıllarda OwensCorning firmasında cam elyafın üretilmesi ile birlikte günümüz modern kompozit malzemelerin temelleri atılmıştır. İkinci Dünya Savaşı ile birlikte artan uçak ihtiyacı, kompozit malzemelerin gelişimine katkı sağlamıştır. İlerleyen yıllarda sadece özel amaçlarla kullanımı sınırlı kalmamış, otomotiv, inşaat, ulaşım, sağlık vb. birçok alanda kullanılmaya ve geliştirilmeye devam etmektedir. Günümüzde aranan, tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Yıllar içinde malzemelerin önem dereceleri Şekil 2.1’de verilen grafikte verilmiştir [2]. Şekil 2.1’de de görüldüğü üzere 1980’li yılların başından itibaren kompozit malzemeler, teknolojinin gelişmesi, hafif ve dayanıklı malzemelere duyulan ihtiyaç ile birlikte her geçen yıl önem kazanmış ve kullanımı artmış malzemeler haline gelmiştir.



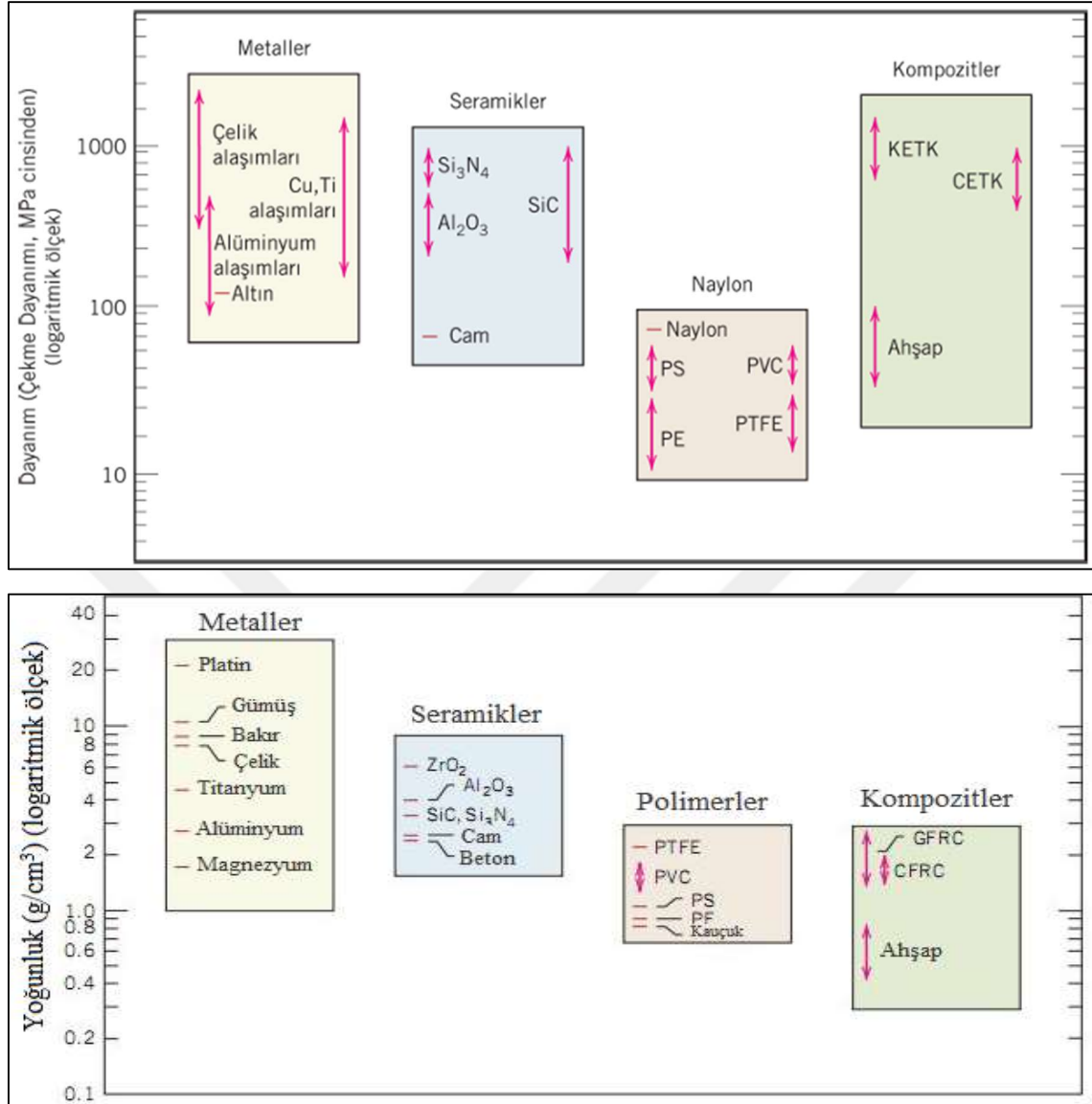
Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin tarihi [2]

2.1. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin en iyi ve uygun özelliklerinin kombinasyonu sonucu meydana gelen çok fazlı malzemelerdir. Meydana gelen bu malzeme kombinasyonu ile en iyi, optimum özellikler bir araya geldiği için daha iyi özellikler elde edilir.

Mühendislik malzemeleri arasında en çok metal malzemeler tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler özellikle özgül dayanımları karşılaştırıldığında, metallere oranla daha yüksek mukavemet, daha hafif malzemeler olarak birçok sektörde önemli derecede yer edinmeye başlamışlardır.

Mühendislik malzemelerinin dayanım özellikleri Şekil 2.2’de karşılaştırılmıştır [3]. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere kompozit malzemeler düşük yoğunluk değerleri ile metal malzemelerin ulaştığı dayanım değerlerine ulaşabilmektedir. Bu grafiklerden çıkarılacak sonuç, kompozit malzemelerin mukavemet / yoğunluk (özgül dayanımı) değeri, diğer malzemelere göre çok daha yüksektir.



Şekil 2.2. Malzeme gruplarının yoğunluk ve mukavemetlerinin karşılaştırılması [3]

Kompozit malzemeler genellikle kendi başlarına elde edilemeyen bileşenlerin istenen, en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesiyle bir malzeme elde edilmesi aşağıdaki avantajları sağlar;

- Yüksek dayanım
- Yüksek rijitlik
- Yüksek korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Yüksek sıcaklık dayanımı
- Hafiflik

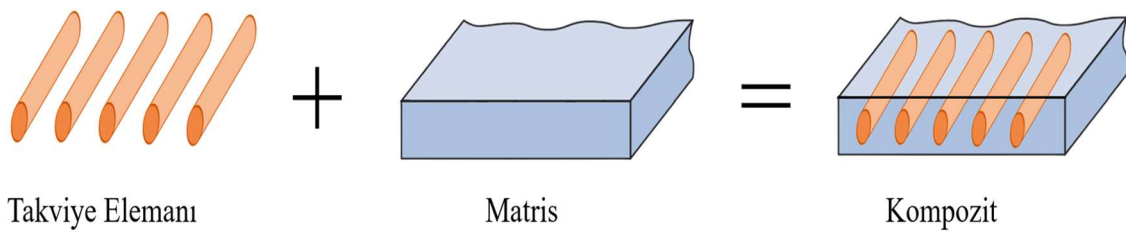
Her malzemede olduğu gibi kompozit malzemelerin kullanımı ile ilgili dezavantajları da vardır.

- Üretim süreçlerinin karmaşık olması
- Yüksek maliyetler
- Geri dönüşümünün olmaması
- Kırılma uzamasının az olması

Kompozit malzemeler, birçok avantajı ve dezavantajı olan, birçok farklı alanda kullanılabilen bir malzeme türüdür. Kompozit bir malzemeyi seçerken, uygulamanın özel gereksinimleri ve kompozitin avantajları ve dezavantajları dikkate alınmalıdır.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzeme sistemi; takviye elemanı, matris ve arayüzey bağından oluşur. Matris, ana bileşendir. Şekil 2.3’de kompozit malzemenin yapısının şematik gösterimi verilmiştir. [4]. Ana görevi takviye elemanının etrafının sararak sürekliliğini sağlamaktır. Matris takviye elemanlarını bir arada tutarak uygulanan kuvveti arayüzey bağı aracılığıyla takviye elemanına dağıtır. Takviye elemanı ise matris yapıdan gelen yükün büyük bir kısmını taşıyarak matris yapıya destek olur. Matris yapının ve takviye elemanının malzeme seçiminde optimum ve en iyi özellikleri seçilmesine dikkat edilir.



Şekil 2.3. Kompozit malzemenin yapısı [4]

Matris, metal polimer ve seramik malzemelerden oluşabilmektedir. En çok metal ve polimer malzemeler tercih edilmektedir. Matrisin görevleri şunlardır;

- Takviye elemanlarını bir arada tutar
- Uygulanan yükü takviye elemanlarına iletir.
- Takviye elemanlarının yüzeylerini hasardan korur.
- Çatlağın ilerleyişini engeller.

Takviye elemanlarının başlıca görevleri ise şunlardır,

- Uygulanan yükü büyük bir kısmını taşımak ile görevlidir.
- Dislokasyonların ilerlemesini engelleyerek malzemenin mukavemetini arttırmaktadır.

Kompozit malzemeler matris tipine ve takviye elemanına göre sınıflandırılabilir. Şekil 2.4’ de matris tipine göre sınıflandırılmış kompozit malzemeler görülmektedir.



Şekil 2.4. Matris tipine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

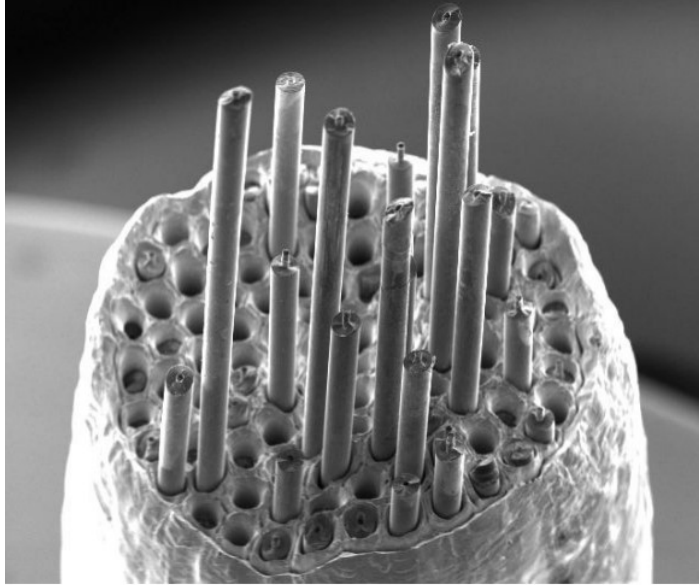
2.2.1. Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler

Adından da anlaşılacağı gibi matris malzemesinin metal olarak tercih edildiği kompozit malzemelerdir. 1960 yılların başında daha yüksek sıcaklıklarda ve daha yüksek mukavemete sahip malzemelere duyulan ihtiyaç soncunda geliştirilmiş malzemelerdir. MMK’lerin ortaya çıkışı ile takviyesiz metal malzemelere kıyasla avantajlı birçok özellik elde edilmiştir. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek tokluk dayanımı, yüzey

sertliği, yüksek özgül dayanım, ısıl şoka karşı düşük hassasiyet gibi özellikler bunlardan birkaç tanesidir [5]. MMK'ler yüksek ortam sıcaklıklarında kullanılabilirler.

Bunların yanında MMK'lerin dezavantajları da vardır. Sürekli fiber takviyesi söz konusu olduğu için üretimi için karmaşık süreçlerin olması, metallere göre sünekliklerinin az olması gibi durumlar MMK kompozitlerin üretimi için sınırlayıcı durumlardır.

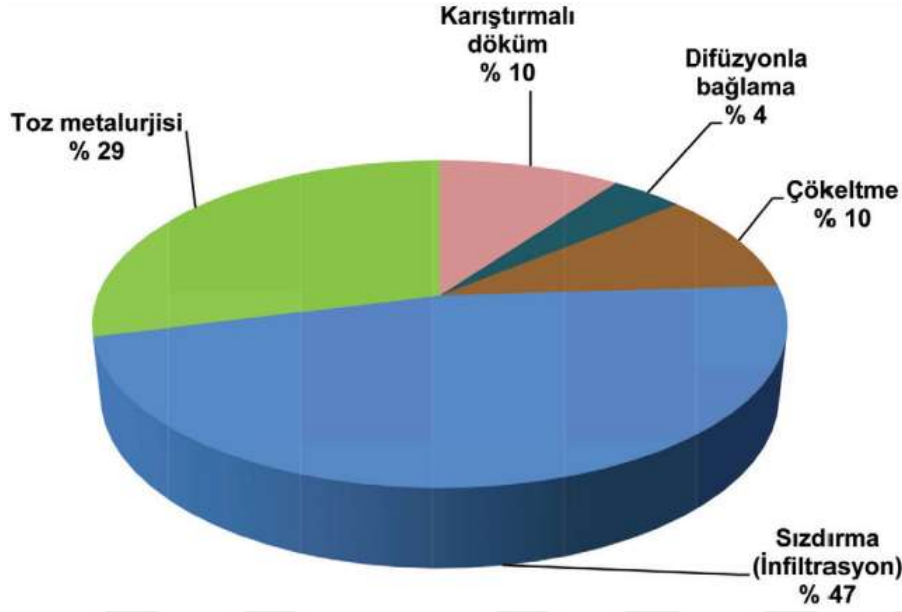
MMK malzemelerde en çok tercih edilen matris malzemeleri, alüminyum, titanyum, bakır ve magnezyumdur. Takviye malzemesi olarak parçacık, sürekli ve süreksiz elyaf ve whisker kullanılabilmektedir [4]. Örnek olarak Şekil 2.5'te SiC ile takviye edilmiş bakır matrisli kompozit malzemenin mikroskobik görüntüsü verilmiştir [4].



Şekil 2.5. SiC takviyeli bakır matrisli kompozitin kırılma yüzeyi görüntüsü [6]

Takviye malzemeleri ile güçlendirilse de metal malzemeler çok yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetme eğilimi olan malzemelerdir. Bu yüzden MMK malzemeler için çalışma sıcaklığı, göz önünde bulundurulması gereken konulardan biridir.

MMK'lerin üretimi, birleştirme ve şekillendirme olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır [6]. Genel olarak MMK malzemelerin üretim yöntemleri Şekil 2.6.' de gösterilmiştir [7].



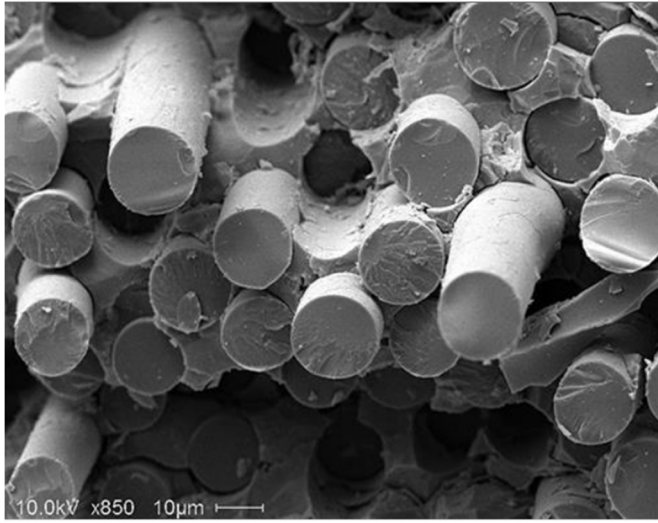
Şekil 2.6. MMK malzemelerin üretimi için tercih edilen üretim yöntemleri [7]

2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit (SMK) malzemeler

Seramik malzemelerin diğer malzemelere göre avantajları, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve bozulmaya karşı dayanıklılıkları, yüksek erime noktaları ve yüksek basınç dayanımlarıdır. Ancak, seramikler düşük kırılma tokluğu değerlerine sahiptirler. Kırılma tokluğundaki bu zayıflığı iyileştirmeye yönelik yapılan araştırma ve geliştirmeler ile Seramik Matrisli Kompozit (SMK) malzemeler ortaya çıkmıştır.

Matris malzemesi olarak seramik tercih edilen, kırılma tokluğu düşük olan takviyesiz seramik malzemelere karşılık parçacık, elyaf veya whisker formundaki takviye elamanlarının ilavesi ile kırılma tokluğu oldukça iyileştirilen malzemelerdir. Kırılma tokluğundaki bu iyileşmenin temelinde, matriste başlayan çatlağın ilerleyişinin parçacıklar tarafından engellenmesi vardır. İyileştirilen tek özellik kırılma tokluğu değildir. Bunun yanında, yüksek sıcaklıklara dayanımın artışı, aşınma direncinin artışı da sağlanmıştır.

SMK malzemeler sıcak presleme, eş basınçlı sıcak presleme ve sıvı faz sinterlemesi yöntemleri ile üretilebilirler. Şekil 2.7’de seramik matrisli kompozit malzemeye örnek bir görsel verilmiştir [8].



Şekil 2.7. SiNC fiber takviyeli SiC matris kompozit seramik yapısı [8]

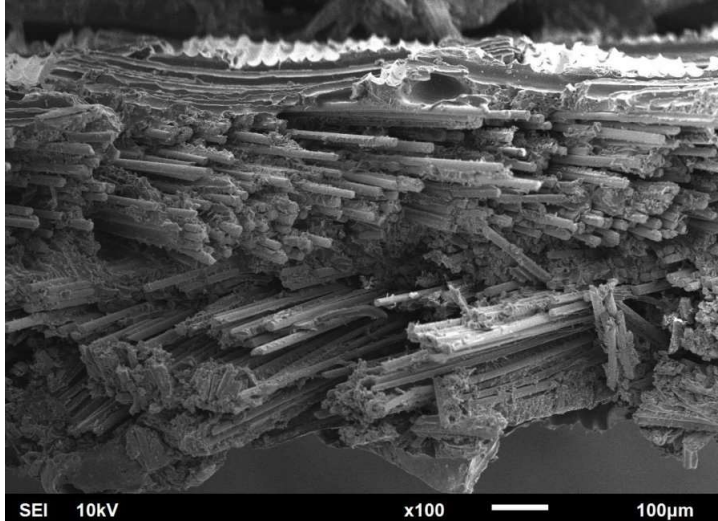
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozit (PMK) malzemeler

Matris malzemesi olarak termoplastik, termoset, elastomer tercih edilen malzemelerdir. Takviye elemanı olarak genellikle cam, aramid veya karbon elyaflar tercih edilmektedir.

PMK malzemelerin kırılma dayanıklılığı, gerilme kuvvetleri, aşınma dirençleri, korozyon dirençleri oldukça yüksektir. Ancak termal dirençlerinin düşük olması ve termal genleşmelerinin yüksek olması bu malzemelerin kullanımı için dezavantaj oluşturmaktadır.

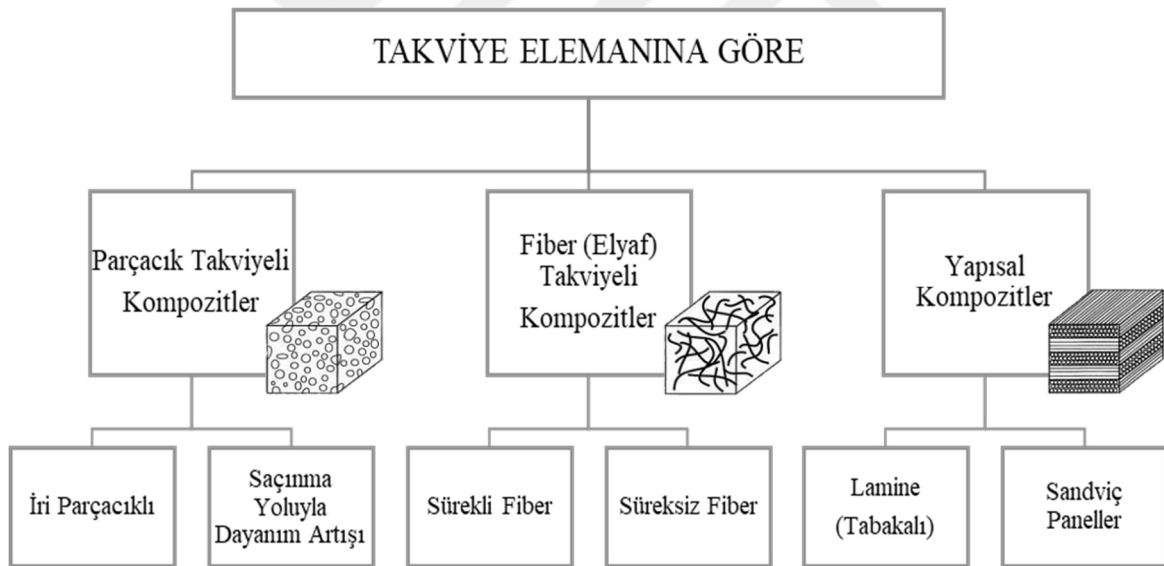
Kolay üretim yöntemlerinin olması ve maliyetlerinin düşük olması, kullanımı en yaygın olan kompozit türü olmasına neden olmuştur.

PMK parçalar çeşitli yöntemlerle üretilmektedir. Üretilcek parçanın kalitesine, istenilen özelliklere, miktarına ve maliyetine göre uygun yöntem seçilebilir. Bu yöntemlerden bazıları, elle yatırma, püskürtme yöntemi, elyaf sarma yöntemi, reçine transfer kalıplama yöntemidir. Elyaf takviyeli kompozit malzeme yapısına örnek olarak SEM görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir [9].



Şekil 2.8. Elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme [9]

Kompozit malzemeler matris tipine göre sınıflandırılabilirdiği gibi takviye elemanına göre de sınıflandırılabilir. Şekil 2.9’da bu sınıflandırmanın detayları görülebilir.



Şekil 2.9. Takviye Elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

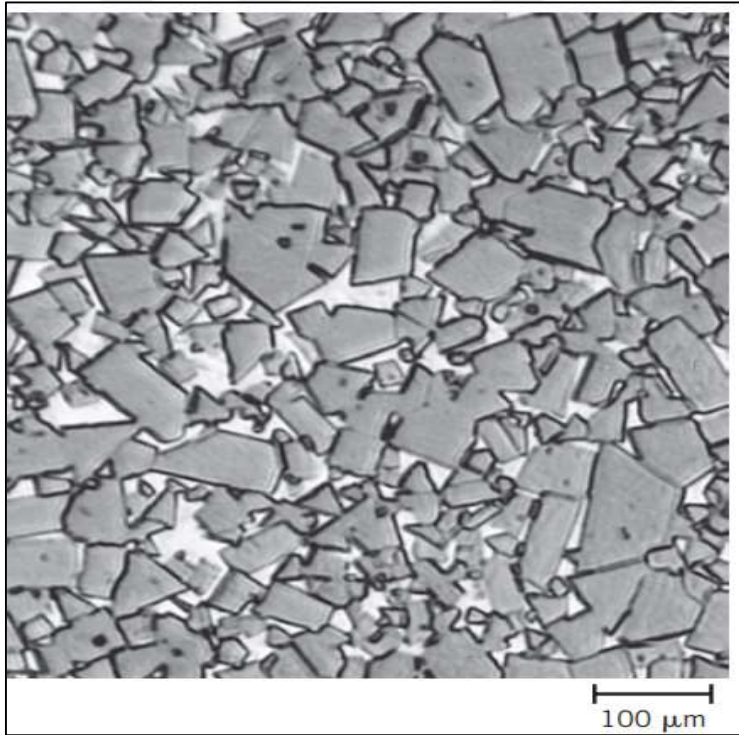
2.2.4. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Parçacık takviyeli olarak sınıflandırılmasının nedeni, takviye elemanının partikül, whisker veya kırılmış elyaf olmasından kaynaklıdır. Bu kompozit malzemelerin genelinde parçacık fazı, matristen daha sert malzemelerdir. Parçacıklar etrafındaki matrisin hareketini engelleyerek matrisin dayanımının artmasını sağlar. Matris ile parçacıklar arasında yükün taşınması için bir oransal bir paylaşım gerçekleşir. Matris, uygulanan yükün önemli bir

kısmını taşıırken, küçük saçınmış parçacıklar dislokasyon hareketlerini engeller. Böylece plastik şekil değişimi azaltılarak, akma ve çekme dayanımlarında artış görülmektedir. Mekanik özelliklerin artırılma veya iyileştirilme miktarı, matris parçacık ara yüzeyindeki dayanıma, parçacıkların büyüklüğüne, parçacıkların birbirleri ile olan mesafesine bağlıdır [4]. En çok kullanılan parçacıklar Al_2O_3 ve SiC 'den oluşan seramiklerdir.

Parçacık takviyeli kompozitler kendi içerisinde, iri parçacıklı ve saçınımla dayanımı artırılmış kompozitler olarak da ikiye ayrılmaktadır. Birbirleri arasındaki fark takviyeler ve dayanım artırma mekanizmalarına göre yapılabilir.

Şekil 2.10'da görülen görüntüde kesici takımlarda kullanılan TiC (tungsten karbür) takviyeli Co (kobalt) matrisli malzeme bu kompozit grubuna örnek gösterilebilir.



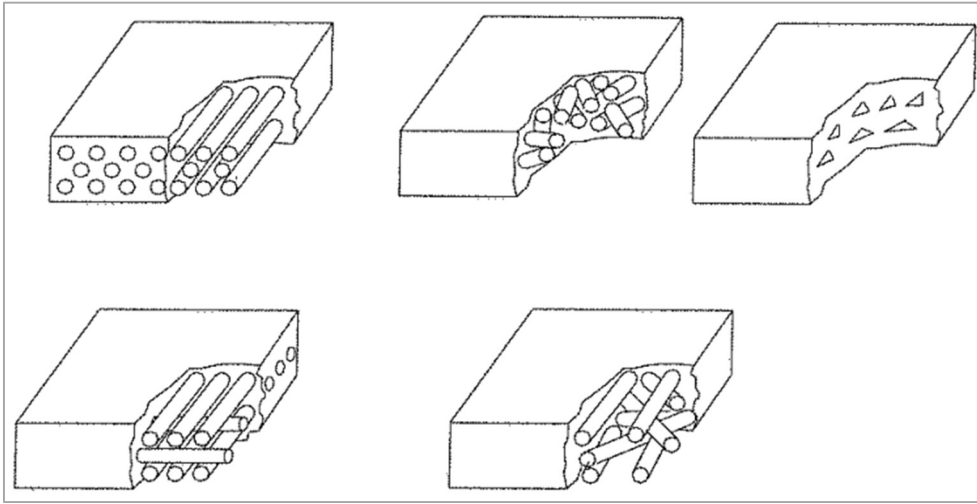
Şekil 2.10. Tungsten karbür takviyeli kobalt matrisli parçacık takviyeli kompozit [4]

2.2.5. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Takviye elemanı olarak sert, dayanıklı ve elastikliği yüksek, sürekli veya süreksiz fiberlerin, nispeten yumuşak ve sünek matris içerisine ilave edilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Matris malzemesi genellikle yükü fiberlere transfer ederek yumuşaklık ve tok özellikleri sergilerken fiberler yükün büyük bir kısmını taşımaktadır [10]. Fiber

takviyeli kompozitlerin tasarım amacı genellikle düşük ağırlıkla birlikte yüksek elastik modüldür [4].

Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, fiberin özelliklerine ve matris fazının uygulanan yükün ne kadarını fibere iletebildiğine bağlıdır. Fiberin özelliklerinden bahsetmek gerekirse, fiberin uzunluğu, çapı, matris içerisindeki yönelimi ve en önemlisi matris içerisindeki oranı kompozit malzemenin özelliklerini etkileyen kritik parametrelerdir. Fiberlerin farklı yönelimleri ile ilgili örnek bir görsel Şekil 2.11’de verilmiştir [10].



Şekil 2.11. Farklı şekillerde yönelmiş fiber takviyeli kompozitler [10]

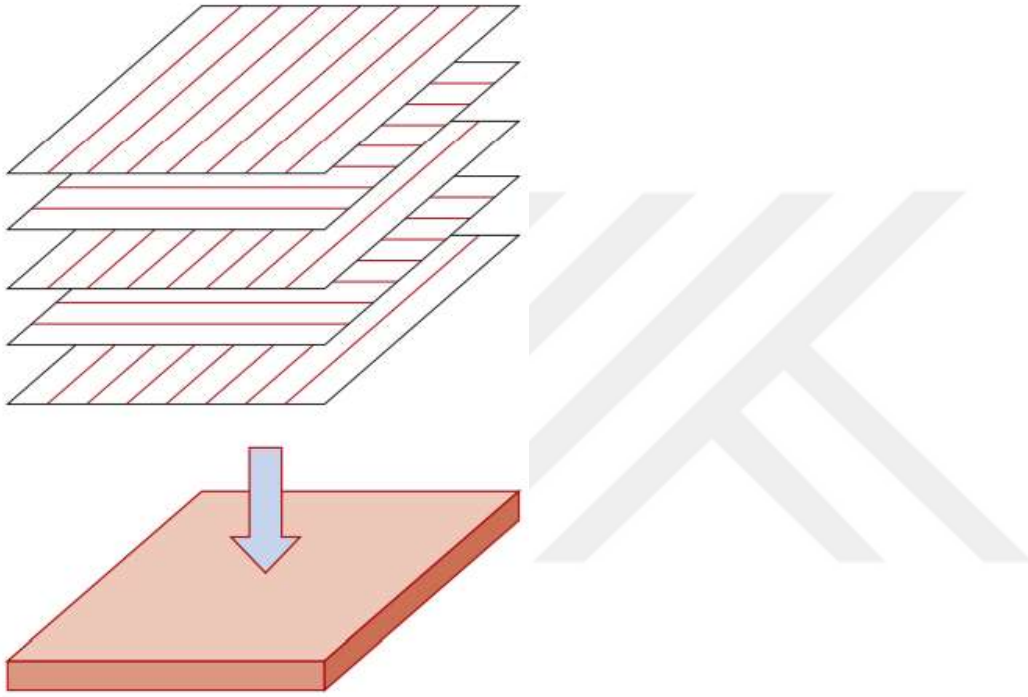
2.2.6. Yapısal kompozitler

Yapısal kompozitler, özelliklerinin yalnız bileşenlere bağlı olmadığı, geometriye de bağlı olduğu homojen ve kompozit malzemelerin birleşimi ile elde edilir [4].

Yapısal kompozitler, lamine (tabakalı) ve sandviç panel kompozitler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Lamine (tabakalı) kompozitler, her biri belirli bir yönde dayanımı arttıracak şekilde üst üste istiflenen ahşap, metal ya da fiber takviyeli tabakaların bir araya gelmesi ile oluşturulur. Lamine kompozit malzeme tasarımında en önemli özellik, ihtiyaca en uygun matris ile fiber birleşimidir. Matris ve fiber birleşiminin yanı sıra en uygun fiber oryantasyonunun seçilmesi de önemli özellikler arasındadır. Tek yönde serim ile o yönde maksimum mukavemet elde edilebilirken, dik yöndeki bir kuvvet karşısında da tam tersi minimum mukavemet gösterebilmektedir. Metal tabakalar arasına takviye edilen farklı

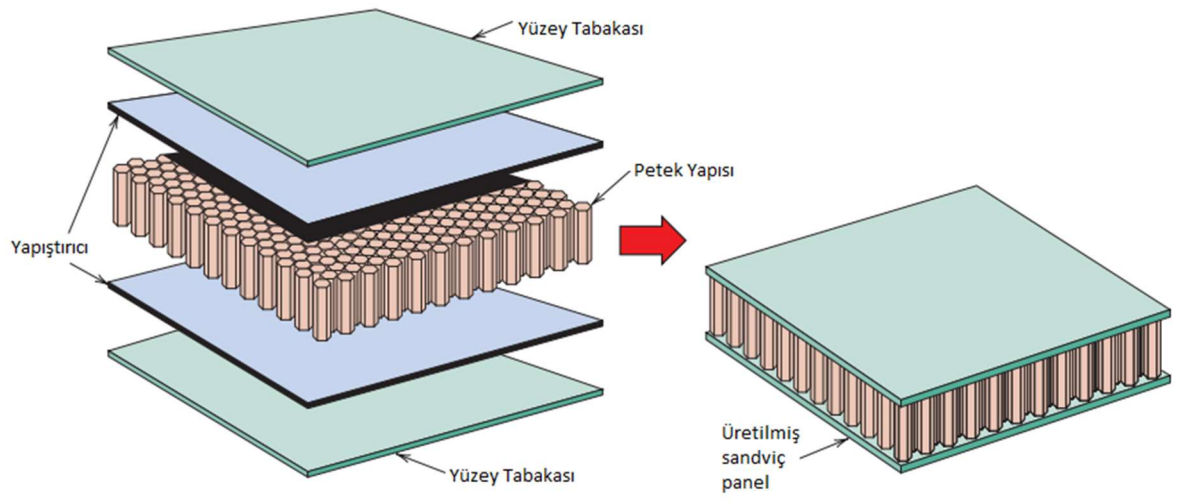
oryantasyonlardaki fiberler ile oluşturulan fiber metal lamine kompozitler bu malzeme grubu için gösterilebilecek en iyi örneklerdendir. 3. Bölümde Fiber Metal Lamine Kompozitler başlığı altında daha detaylı bir anlatım yapılacaktır.

Şekil 2.12’de fiber takviye elemanlarının arka arkaya istiflenerek dizilimi şematik olarak verilmiştir [4].



Şekil 2.12. Arka arkaya yönelmiş fiber takviyeli tabakaların istiflenmesi [4]

Sandviç panel kompozitler, iki rijit, dayanımlı alt ve üst malzeme tabakası arasına kalın ama hafif bir ara tabakanın bir başka deyişle çekirdek malzemenin yerleştirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Dış katmanları oluşturan tabakalar sert, dayanıklı olmasıyla yapıya mukavemet, sertlik kazandırarak, yükleme kaynaklı gerilmelere dayanıklılık gösterir. Titanyum, alüminyum alaşımları, elyaf takviyeli plastik ve çelik malzemeler dış katman malzemeler olarak tercih edilebilir. Çekirdek yapı ise oldukça hafif ve elastik modüle sahip bir malzemedir. Çekirdek yapı olarak sert polimerik malzemeler, ahşap ve bal peteği şeklindeki yapılar tercih edilmektedir. Şekil 2.13’te bir sandviç kompozit yapının şematik gösterimi verilmiştir [4].

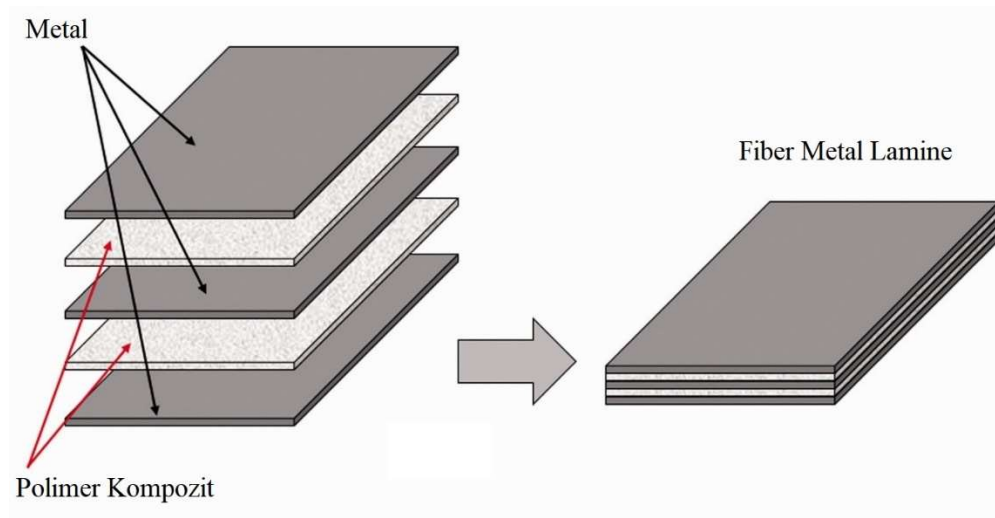


Şekil 2.13 Sandviç kompozit yapının şematik gösterimi [4]



3. FİBER METAL LAMİNE (FML) KOMPOZİTLER

Fiber metal lamine kompozitler, isminden de anlaşılacağı üzere fiber ve metal laminelerin bir araya getirilerek oluşturulduğu malzeme sınıfıdır. Metal katmanlar ile fiber takviyeli yapılar lamine bir yapı oluşturur. Genellikle metal olarak alüminyum, titanyum veya magnezyum kullanılmaktadır. Fiber takviyeli katman için genelde karbon, cam veya aramid gibi yüksek mukavemetli prepreg / fiber malzemeler tercih edilmektedir. Şekil 3.1’de bir fiber metal lamine kompozitin şematik gösterimi verilmiştir [11].



Şekil 3.1. Fiber metal lamine kompozitlerin şematik gösterimi [11]

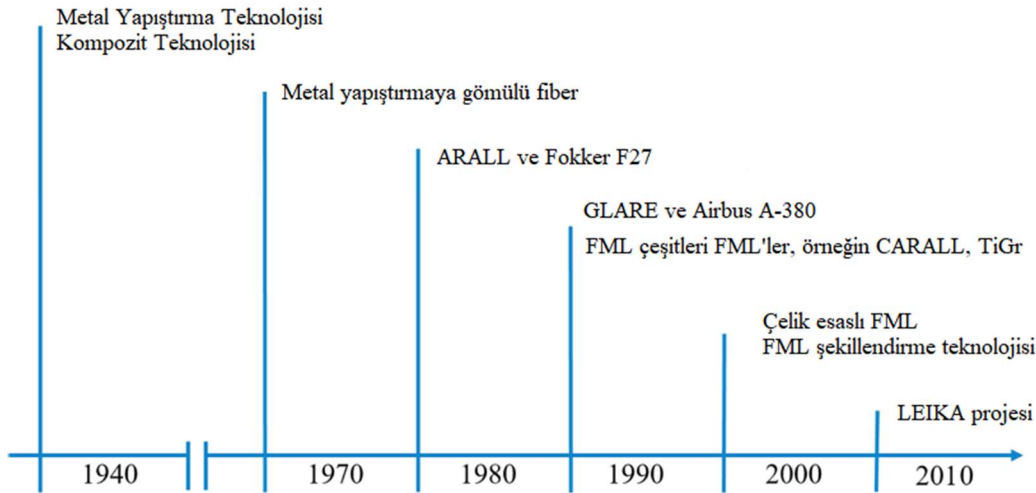
3.1. FML Kompozitlerin Tarihçesi

Fiber metal lamine kompozitlerin tarihi ilk olarak 1940’lı yıllara uzanmaktadır. İkinci Dünya Savaşı ile birlikte havacılık ve savunma endüstrisinin stratejik bir sektör haline gelmesiyle, bu sektörde kullanılan malzemelerde hafiflik ve dayanım bir arada aranan bir özellik haline gelmiştir. 1945 yılında Rob Schliekelmann’ın Fokker firmasında alüminyum tabakaları yapıştırıp otoklavda kürlemesi ile fiber metal kompozit üretimi alanında ilk adımlar atılmış oldu. Elde edilen verilerle tam olarak istenilen sonuçlar elde edilemedi. Bu çalışmanın ardından Delft Üniversitesi’ndeki araştırmacılar karbon, aramid takviyeli metal plakaları yapıştırmayı denedi. Bu çalışmada da aynı şekilde yapışma tam anlamıyla gerçekleşmemiş ve delaminasyon sorunları ile karşılaşılıyordu. Üniversitede yapılan bu çalışmalar AKZO firması (fiber üreticisi) ve ALCAO (metal plaka üreticisi) ve 3M (yapıştırıcı üreticisi) firmalarının ortak çalışma yapmaları için bir başlangıç olmuştur.

1950’li yıllardan 1980’li yıllara kadar olan süreçte F-27, F28 gibi uçakların bazı parçalarında aramid fiber takviyeli FML kullanımı için önerilerde bulunulmuştur. 1983 yılında aramid takviyeli alüminyum levhalar ARALL (Aramid Alüminyum Lamine) adı ile ticarileşmiştir. Bu önemli adım ile birlikte FML kompozitlerin gelişimi hızla devam etti. 1987 yılına gelindiğinde Airbus A330 / 340’ın gövdelerinde alüminyum arasına serilen cam elyaflar ile üretilen GLARE’lar (Glass Lamine Aluminum Reinforced Epoxy) test edilmeye başlanmıştı. Sadece havacılık ile sınırlı kalmayıp otomotiv, spor ekipmanları gibi farklı alanlarda da kullanılmaya başlanmıştı.

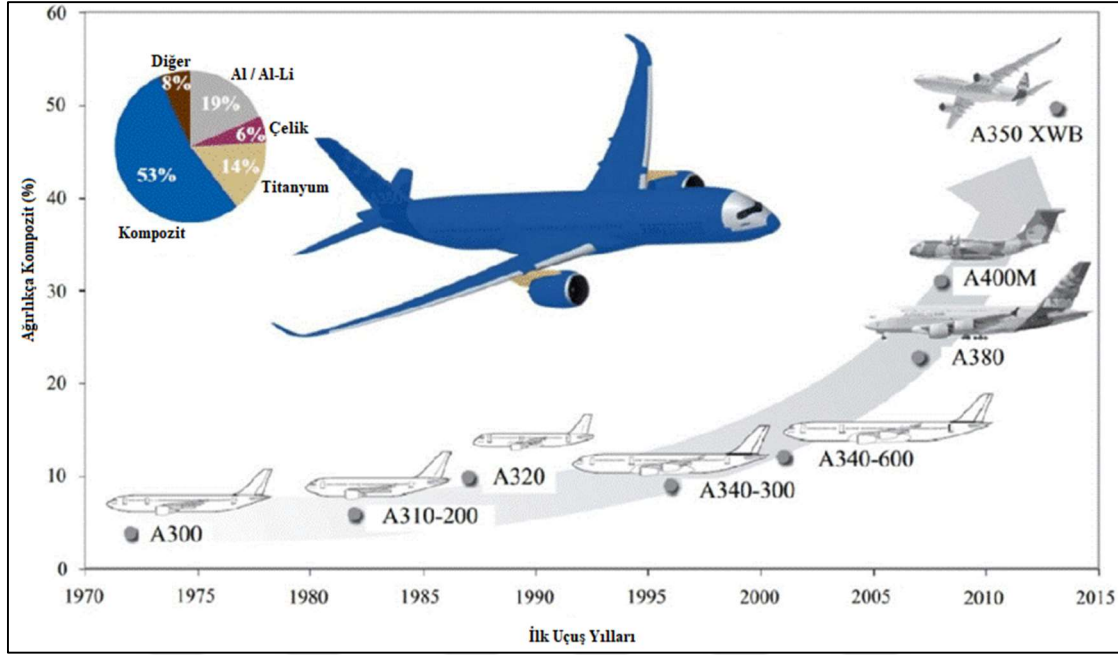
1990’lara gelindiğinde FML kompozitler artık havacılık sektöründe, Boeing 777’nin kargo zemininde FML’lerin kullanılmasıyla bu malzemeler önemli ve geliştirme ihtiyacı oldukça artan malzemeler haline geldi [12].

2000’li yıllara gelindiğinde alüminyum ile birlikte çelik ve magnezyum alaşımları gibi metallerde FML yapılarda kullanılmak üzere tercih edilmeye başlamıştır [13]. Şekil 3.2 FML kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi ile ilgili bir grafik verilmiştir.



Şekil 3.2. FML kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi [13]

Günümüzde farklı birçok metal ve fiber takviye elemanları ile mümkün olan en iyi ve optimum değerleri elde etmeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Tüm dünyada ve özellikle ülkemizde de FML kompozitler savunma ve havacılık sektöründe en çok kullanılan malzemelerden biri haline geldi. Şekil 3.3’te yıllar içerisinde Airbus uçaklarında kompozit kullanımındaki eğilimi gösteren bir grafik verilmiştir [14].



Şekil 3.3. Airbus uçaklarında kompozit kullanımının yıllara göre eğilimi [14]

3.2. FML Kompozitlerin Özellikleri

FML kompozitler yakın bir geçmişte literatürümüze girmesiyle özellikle havacılık endüstrisinin ihtiyaçları doğrultusunda birçok önemli özellik kazandırılarak geliştirilmiştir. FML sektörlerin hızlı bir şekilde yer edinmesi ile birlikte sahip olduğu özelliklerde beraberinde gelişmeye devam etmiştir.

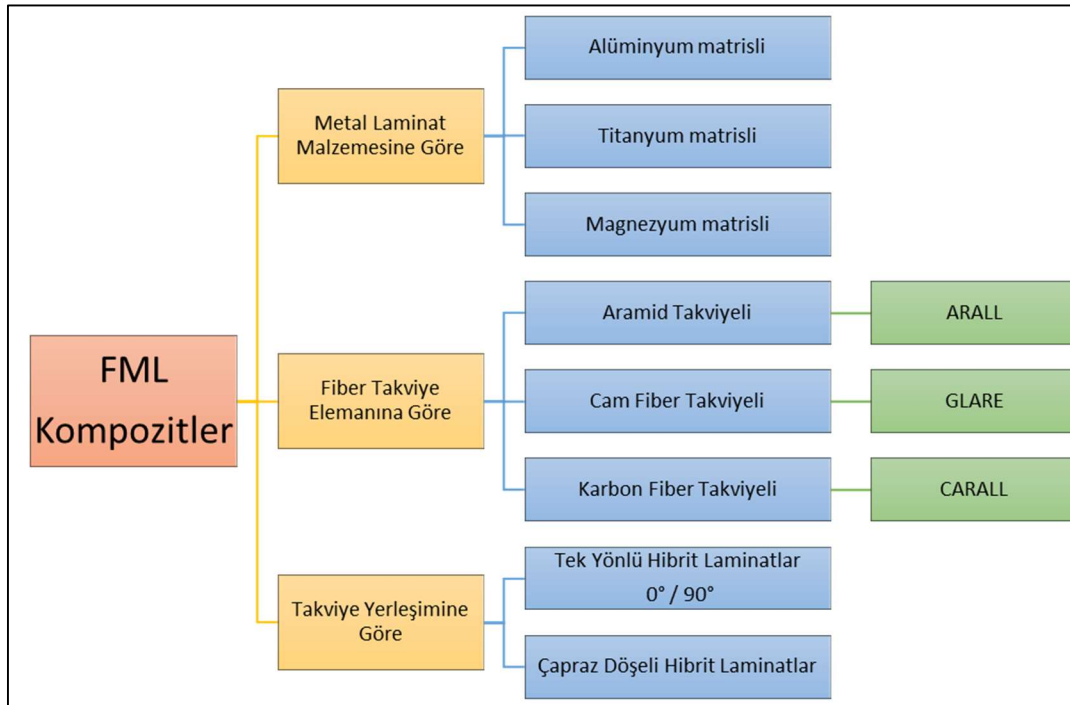
FML kompozitlerde metallerin ve fiber kompozitlerin en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesi istenir. Geleneksel alüminyum malzemeler ile karşılaştırıldıklarında FML kompozitler daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek mukavemete sahiptirler. Ayrıca darbe dayanımları, korozyon dirençleri de alüminyumlara göre daha yüksektir. FML yapısında bulunan fiberler lifler çatlak meydana geldiğinde yükü metal katmanlar arasındaki aktararak çatlak köprüleme etkisini ortaya çıkarır. Bunun sonucunda FML kompozitler oldukça yüksek yorulma dayanımları kazanır [12,15].

Yukarıda da bahsedildiği gibi birçok olağanüstü özelliğe sahip olan FML kompozitlerin dezavantaj oluşturacak özellikleri de vardır. FML kompozitlerde ciddi sorunlardan birisi fiber takviyeler ile metaller arasındaki galvanik korozyon sorunudur. Havacılıkta kullanılan FML kompozitler için korozyon büyük problemlere sebep olabilecek bir sorundur. Günümüzde bu sorunu çözmeye yönelik cam (glass) kumaş kullanımı, korozyon

önleyici kimyasalların kullanılması gibi uygulamalar mevcuttur. Bir başka dezavantaj yaratabilecek özelliği ise metal matrisin termal genleşme katsayısı ile elyafın termal genleşme katsayısı arasındaki farklar, malzemenin çeşitli sıcaklık koşullarına maruz kaldığında olumsuz etkiler yaratabilmesidir. Üretim yöntemlerinin karmaşık ve maliyetli olması da FML kompozitler için dezavantaj olarak değerlendirilebilir [12, 16].

3.3. FML Kompozitlerin Sınıflandırılması

FML kompozitler için, yıllar geçtikçe farklı metal ve fiber kombinasyonları araştırılmış ve denenmiştir. FML kompozitler için ilk olarak alüminyum tabakalar kullanılmıştır. İlk ticarileşmiş FML kompozitlerin ticarileşen ilk örneklerin olan ARALL'da 7075 ve 2024 alüminyum malzemeler tercih edilmiştir. Endüstrinin ihtiyaçları ile farklı malzeme arayışları olmuştur. Metal katman olarak titanyum, çelik ve magnezyum malzemeler de kullanılmıştır. Fiber takviye katmanı için aramid, cam (glass) ve karbon kumaş malzemeler tercih edilmiştir. FML kompozitler 3 farklı şekilde sınıflandırılabilir. Kullanılan metal matrise göre, kullanılan takviye elemanına göre ve takviye elemanın yerleşimine göre sınıflandırılabilir. Şekil 3.4.' de FML kompozitlerin sınıflandırılması grafik haline getirilmiştir.



Şekil 3.4. FML kompozitlerin sınıflandırılması

Alüminyum matrisli FML kompozitler en yaygın şekilde araştırılan ve geliştirilen FML kompozitlerdir. Son yıllarda titanyum matrisli FML kompozitler uzay ve havacılık alanında çalışmalar için araştırılmaktadır. Magnezyum matrisli FML kompozitlerde havacılık, savunma ve otomotiv sektörleri için araştırılan ve geliştirme ihtiyacı duyulan malzemeler haline gelmiştir [13].

FML kompozit malzemeler yapısında bulunan metal ve fiber laminelerin dizilimine göre de sınıflandırılabilir. Örneğin 3/2 gibi bir gösterimle tarif edilen bir FML kompozit şu anlama gelmektedir; ilk rakam olan 3 metal plaka sayısını, ikinci rakam olan 2 ise fiber katman sayısını ifade eder. Bu durumda 3/2 olarak adlandırılan bir FML kompozitte metal/fiber/metal/fiber/metal şeklinde bir dizilim gerçekleşmiş olur [16]. Genelde en alt ve üst katmanlar metal plaka olduğundan metal katman sayısı hep bir fazla olur [17].

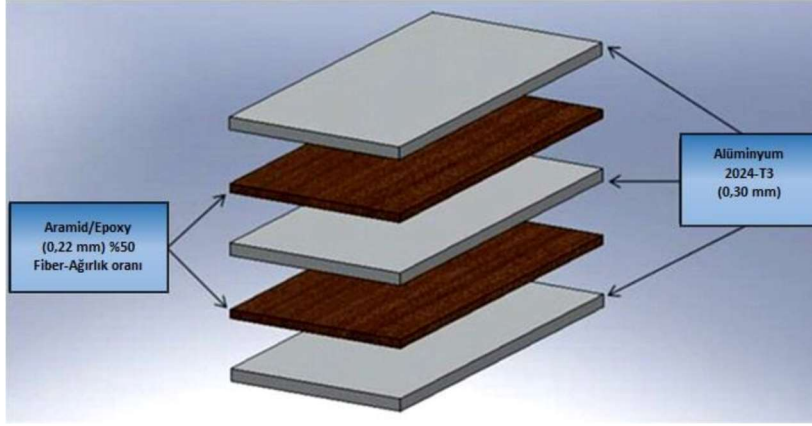
3.3.1. ARALL FML kompozitler

Alüminyum metal levhalar ile aramid fiberlerin uygun oryantasyonda serilmesi ile elde edilir. Havacılık sektöründe, geçen yıllarla birlikte önem kazanan ve yaygın bir şekilde kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Bir yanda alüminyumun sünekliği korunurken diğer yandan aramid, dayanım ve yorulma dayanımını oldukça arttırmıştır. Ticari olarak kullanılan 4 farklı ARALL FML kompozit malzeme vardır. Çizelge 3.1' de detayları verilmiştir. Çizelge incelendiğinde aramid fiberlerin tek yönlü dizildikleri görülmektedir. Bu durum tek yönde oldukça yüksek mukavemet sağlamaktadır ancak bir diğer yandan delik delinmesi durumunda düşük mekanik özellikler sergilemektedir. Ayrıca fiberlerin reçine ile olan zayıf bağları sebebiyle fiber oranı en fazla %50 olacak şekilde sınırlı tutulmaktadır [12]. Fokker F-27 uçaklarında, Boeing C-17 uçaklarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Ticari olarak kullanılan ARALL FML kompozitler [17,18]

	Metal cinsi	Metal levha kalınlığı (mm)	Fiber kalınlığı (mm)	Fiber oryantasyonu (°)
ARALL 1	7075-T6	0,3	0,22	0 / 0
ARALL 2	2024-T3	0,3	0,22	0 / 0
ARALL 3	7075-T6	0,3	0,22	0 / 0
ARALL 4	2024-T8	0,3	0,22	0 / 0

Şekil 3.5’ te örnek olarak ARALL 2 yapısının şematik gösterimi verilmiştir [19].



Şekil 3.5. ARALL 2 şematik gösterimi [19]

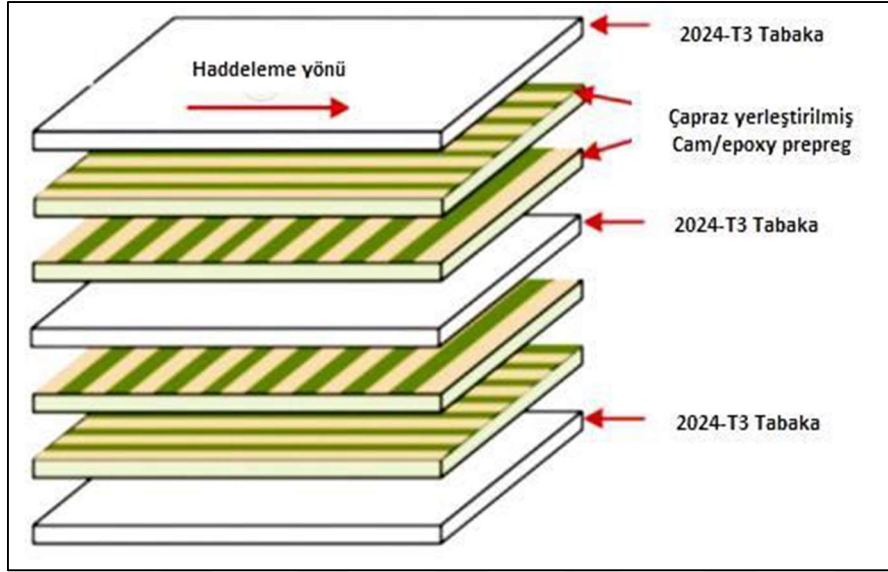
3.3.2. GLARE FML kompozitler

ARALL için var olan dezavantajlar sonrasında geliştirmeye yönelik araştırmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda metal türü değişmemiş, fiber takviye elemanı için aramid yerine cam malzeme kullanılmıştır. Aramid yerine cam tercih edilmesinin en önemli sebepleri; reçine yapışma oranının aramide göre daha fazla olması, fiberlerin kırılma dayanımının daha yüksek olması, çift yönlü fiber kullanılabilmesi olmasıdır [20]. Camın bu üstün özellikleri GLARE için yüksek basma dayanımı ve mukavemet sağlamıştır [21]. ARALL’a göre daha üstün özelliklere sahip olan bu malzeme için çalışmalar da hızlandırılmıştır. Ticari olarak üretilen GLARE FML kompozit malzemeler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Ticari olarak kullanılan GLARE FML kompozit malzemeler [17,18]

	Metal cinsi	Metal levha kalınlığı (mm)	Fiber kalınlığı (mm)	Fiber oryantasyonu (°)
GLARE 1	7075-T61	0,3 - 0,4	0,25	0 / 0
GLARE 2	2024-T3	0,2 – 0,5	0,25	0 / 0 , 90 / 90
GLARE 3	2024-T3	0,2 – 0,5	0,25	0 / 90
GLARE 4	2024-T3	0,2 – 0,5	0,275	0 / 90 / 0 , 90 / 0 / 90
GLARE 5	2024-T3	0,2 – 0,5	0,5	0 / 90 / 90 / 0
GLARE 6	2024-T3	0,2 – 0,5	0,25	±45 , ±45

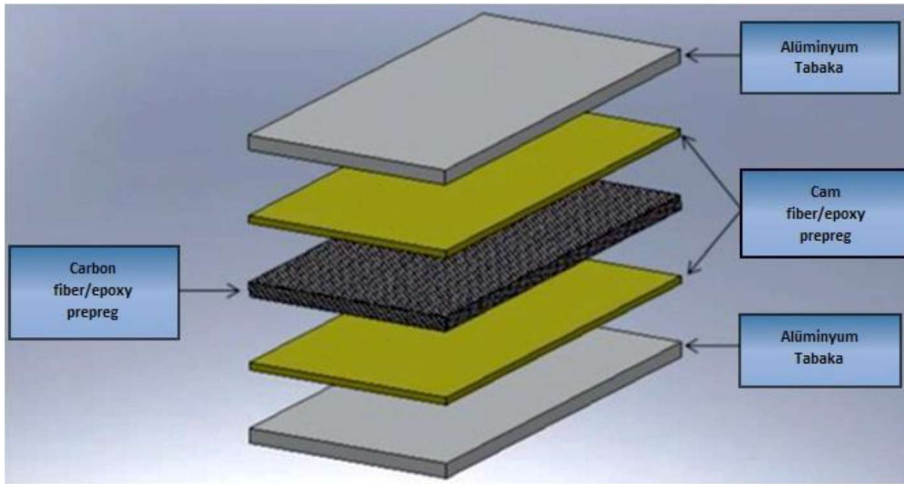
Şekil 3.6.'da örnek olarak GLARE 3'ün şematik gösterimi verilmiştir. [19]



Şekil 3.6. GLARE 3 için şematik gösterimi [19]

3.3.3. CARALL FML Kompozitler

ARALL ve GLARE FML kompozitlerde olduğu gibi CARALL FML kompozitlerde de farklı olarak, takıye elemanı için karbon fiberler tercih edilmiştir. Karbon fiberler aramid ile karşılaştırıldığında yüksek sertlikleri, çatlak ilerleyişini engelleme konusunda başarılı olduğu görülmüştür [21]. Ancak, karşılaşılan en büyük problem , metaller ile fiberler arasında meydana gelen galvanik korozyondur. Bu sebeple CARALL'ın kullanımı sınırlı kalmıştır [17]. Şekil 3.7'de CARALL FML kompozit yapısının görseli verilmiştir [19].



Şekil 3.7. CARALL şematik gösterimi [19]

3.4. FML Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler

3.4.1. Metal katmanlar

Alüminyum

FML kompozit malzemelerde en çok kullanılan malzemedir. Birçok metale göre oldukça düşük yoğunluğa sahip olması, hafifliğin önemli bir kriter olduğu havacılık, savuma, otomotiv gibi birçok sektörde tercih edilmesi sebebi olmuştur. Yoğunluğunun düşük olması özgül dayanımının yüksek olmasını sağlamaktadır.

Saf halde dayanımı düşük olmasına rağmen alaşımlarının dayanımları nispeten daha yüksektir. Kolay imal edilebilirliği, şekil verilmesinin kolay olması da alüminyum tercih edilebilir bir malzeme haline getirmektedir. Genel olarak alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması Çizelge 3.3'te verilmiştir [22].

Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [22]

Seri	Alaşım	Uygulama Alanları
1XXX	Ticari saflıkta (%99 Al.)	Genellikle elektrik ve kimya sektörlerinde kullanılmaktadır.
2XXX	Al- Cu alaşımları.	Yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe tercih edilir.
3XXX	Al-Mn alaşımları	Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılır.
4XXX	Al-Si alaşımları	Kaynaklı yapılarda, otomobil parçalarında kullanılır.
5XXX	Al-Mg alaşımları	Denizel korozyona dayanıklı olduğundan bu ortamlarda çalışacak yapılarda kullanılması tercih edilir.
6XXX	Al-Mg-Si alaşımları	Şekillendirme kabiliyeti yüksek olduğundan ekstrüzyon ile üretilen parça imalatlarında sıklıkla tercih edilir.
7XXX	Al-Zn alaşımları	Alüminyum alaşımlarında en yüksek mukavemete sahip gruptur. Uçak parçalarının yapımı ve yüksek mukavemet isteyen diğer alanlarda tercih edilir.
8XXX	Al-Li alaşımları	Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanımı tercih edilmektedir.

Titanyum

FML kompozitlerin geliştirilmesiyle birlikte alüminyum yerine alternatif metaller araştırılmaya başlanmıştır. Özellikle havacılık ve savunma sanayinin gelişmesiyle çelik malzemelere göre daha hafif bir yapısı olması sebebiyle tercih edilen bir malzeme olmaya başlamıştır. Genellikle Ti-64Al-4V alaşımı ile uygulamalar yapılmaktadır. Yaklaşık 4,43 gr/cm³ yoğunluğa sahip olan bu alaşımın yoğunluğu çelikten düşük olmasına karşın alüminyum ve magnezyum gibi malzemelere kıyasla daha ağırdır. Ancak mekanik özellikleri alüminyum ve magnezyum malzemelere göre oldukça yüksektir.

Magnezyum

Son yıllarda alüminyum malzemelere alternatif bir malzeme olarak düşünülmesinin en önemli sebebi hafif olmasıdır. Alüminyuma göre yoğunluğunun düşük olması, özgül dayanımının yüksek olmasını sağlamaktadır. Havacılık ve savunmada magnezyumun bu özellikleri kullanılabilirliğine alan açmaktadır. Örnek olarak, B36 bombardıman uçağında 3.4 ton Mg alaşımı kullanılmıştır. Mg yerine Al tercih edilseydi bu ağırlık 4.5 tonlara kadar ulaşacaktır [23].

Ancak magnezyumun korozyif bir malzeme olması, kullanımını sınırlayan dezavantajlarından birisidir. Yüzeyinde bir kaplama olmadığında magnezyum malzemeler kolaylıkla korozyona uğrar.

Mg alaşımlarının isimlendirilmesinde kullanılan harfler, alaşım içerisindeki ana alaşım elementlerini ve miktarlarını ifade etmektedir. AZ31B için açıklamak gerekirse;

AZ: Magnezyum-alüminyum-çinko

3: Alüminyum içeriği (%)

1: Çinko İçeriği(%)

B: Spesifik

anlamalarına gelmektedir.

Magnezyum alaşımları genel olarak dayanımı düşük malzemeler gibi görünse de düşük yoğunlukları özellikle havacılık ve savunma sektörlerinde araştırmalara konu olmasını sağlamaktadır.

3.4.2. Fiber katmanlar

Aramid

Aramid 1970'lerin başında kullanılmaya başlanan, dayanımı oldukça yüksek bir takviye elemanıdır. Ticari olarak diğer adı Kevlar, Nomex olarak da anılmaktadır [4]. Aramid poliamid grubu bir polimerdir. İlk ticari FML kompozitlerden olan ARALL'da takviye elemanı olarak tercih edilmiştir. Aramid fiberler, çeliklerden oldukça hafif olmasına rağmen çeliğe göre çok yüksek bir mukavemete sahiptir. Hafif olup dayanımının çok yüksek olması savunma sanayi alanında kullanılan bir malzeme olmasını sağlamıştır. Kurşun geçirmez yeleklerde, zırhlarda ve dayanım isteyen diğer askeri uygulamalarda, tekne gövdelerinde, uçakların gövde parçaları gibi birçok farklı alanda sıklıkla kullanılır. Şekil 3.8'de aramid kumaşının görseli verilmiştir [24].



Şekil 3.8. Aramid kumaş [24]

Cam elyaf

Sektörde en çok tercih edilen takviye elemanıdır. Cam elyafın ilk ticari üretimi 1930'lu yıllarda Amerika'da gerçekleşmiştir. ARALL'ın üretiminin ardından aramid yerine daha dayanıklı alternatif bir malzeme olarak düşünülmüş ve GLARE FML kompozitlerde

kullanılmıştır. Çekme mukavemetlerinin yüksek olması, kimyasal maddelere karşı dirençli olması, uzun ömürlü olması ve en önemlisi uygun fiyatlı olması gibi özellikleri sebebiyle birçok alanda kullanılan bir malzeme haline gelmiştir. Elektrik iletkenliklerinin olmaması, bazı alanlarda özellikle tercih edilen bir yalıtım malzemesi olmasını sağlamıştır.

Bu kadar üstün özelliklere sahip bu malzemenin bazı dezavantajları da vardır. Mukavemeti yüksek bir malzeme ancak ani darbeler karşısında kırılabilirlik gösterebilmektedir. Karbon fiberlere kıyasla yoğunluğunun daha yüksek olması bazı durumlarda tercih edilmesini sınırlayıcı sebeplerden biri olabilmektedir [25].

En yaygın kullanılan cam fiberler; S2-cam, R-cam ve E-cam fiberlerdir. Cam fiber türlerinin isimlendirilmesi Çizelge.3.4'te açıklanmıştır [26].

Çizelge.3.4. Cam fiber türlerinin isimlendirilmesi [26]

Harf Gösterimi	Özellikler
E – Elektriksel	Düşük elektrik iletkenliği
S – Dayanım	Yüksek dayanım
C – Kimyasal	Yüksek kimyasal dayanıklılık
A - Alkali	Yüksek alkali cam
D – Dielektrik	Düşük elektrik sabiti
M – Modül	Yüksek modül

Basitçe tarif etmek gerekirse camın eritilmiş bir şekilde oldukça küçük deliklerden akıtılması ile cam fiberler elde edilir. Üretim işlemi 5 ana adımdan oluşur. Harmanlama adımında cam elyafa istenilen özelliklerin kazandırılması amacıyla takviye elemanlarının ilavesi yapılır. Harmanlama sonucunda elde edilen karışım, yaklaşık 1400°C’de eritilir. Bir sonraki adımda erimiş cam elyaflaştırma adımında elyaf şeklini almak üzere 200-8000 adet deliğe sahip kalıplardan geçer. Daha sonra burçtan çıkan cam elyaflar yüksek hızda döndürülerek toplanırlar. Elyafın kopmasına, aşınmasına karşı direnç sağlamak için kimyasal kaplamalar yapılır. Son olarak cam fiberler paketlenir [27]. Şekil 3.9’da cam kumaşın görseli verilmiştir [28].

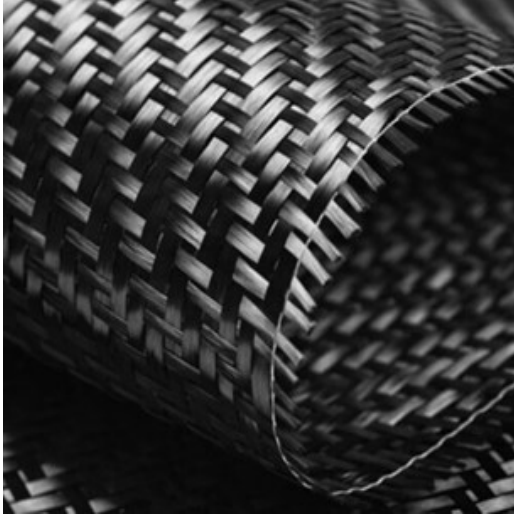


Şekil.3.9. Cam (Glass) Kumaş [28]

Karbon fiberler

Karbon elyaf olarak da bilinen bu malzeme, teknoloji ve endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilmiş bir malzemedir. 1968 yılında ticari olarak üretilmeye başlanan bu malzemeler başta havacılık, savunma, otomotiv sektörleri olmak üzere farklı birçok sektörde cam fiberlerden sonra en çok tercih edilen malzemelerdir.

Karbon fiber malzemelerin önemli özelliği hafif ve dayanıklı malzemeler olmasıdır. Çeliklerden yaklaşık 4.5 kat daha hafif olan karbon fiberlerin dayanımı çeliklerin 3 katına kadar ulaşmaktadır [29]. Karbon fiberler, yüksek mukavemete, yüksek elastite modülü, yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Özellikle yüksek sıcaklıklarda aramid ve cam gibi elyaflara oranla üstün özellikler göstermektedir. Ancak yüksek sıcaklıklarda korozyon karbon için bir sorun haline gelmektedir. Dünyada birçok ülke tarafından karbon elyaf üretimi yapılmaktadır. Türkiye’de ilk olarak 1971 yılında Aksa Akrilik Kimya Sanayi A.Ş. tarafından girişimler yapılmıştır. 2009’a gelindiğinde Aksa Akrilik karbon elyaf üretmeye başlamıştır. 2012 yılında Dow Chemical Company ile yapılan ortaklık ile kurulan DowAksa firması Türkiye’nin ve dünyanın karbon elyaf ihtiyacını karşılamaktadır. Şekil 3.10’da karbon kumaşın görseli verilmiştir [30].



Şekil 3.10. Karbon Fiber Kumaş [30]

Yukarıda bahsi geçen bu kumaş türlerinin ticari olarak isimlendirmeleri, 245 gsm karbon, 190 gsm cam (glass) veya 170 gsm aramid prepreg kumaş şeklindedir.

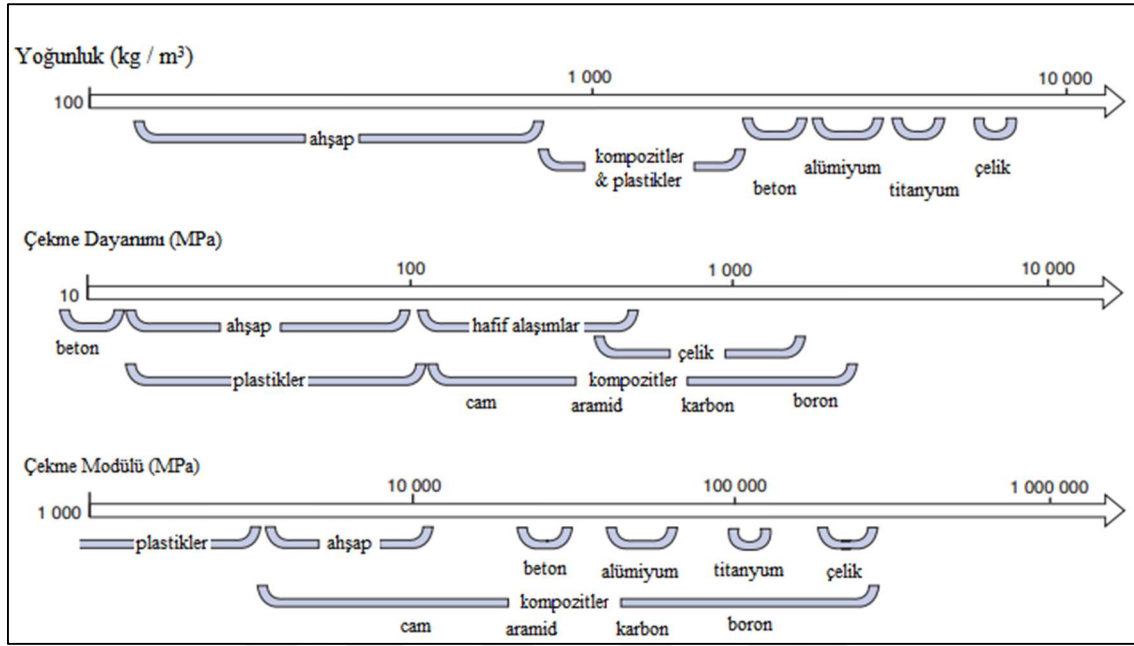
Prepreg kumaşların tanımlarken kullanılan “gsm (grams per square meter)” kavramı, prepreg kumaşların birim alandaki ağırlığını belirlemek için kullanılmaktadır. Örneğin 200 gsm’lik bir prepreg kumaş bir metrekarelik alanın ağırlığıdır.

Yukarıda bahsedilen fiberler için tercih sebebi olacak önemli özelliklerinin karşılaştırılması Çizelge.3.5’te verilmiştir [4]

Çizelge 3.5. Fiberlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [4]

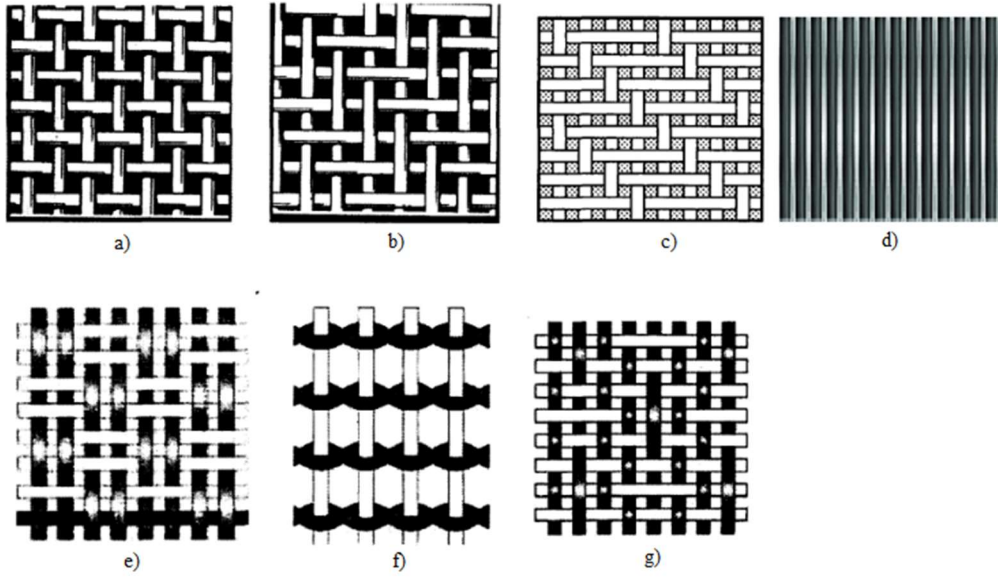
Fiber Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastite Modülü (N/mm ²)
Cam Elyaf (Glass)	2,54	2410	70 000
Karbon Elyaf	1,75	3100	220 000
Aramid	1,46	3600	124 000

Fiberlerin diğer malzemeler ile karşılaştırılması Şekil 3.11’de verilmiştir [31].



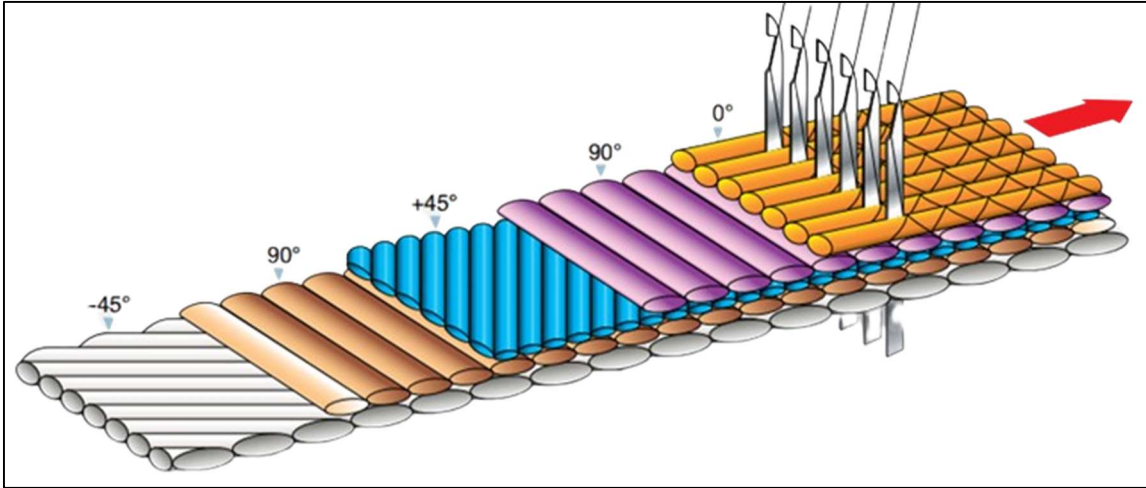
Şekil 3.11. Fiberlerin diğer malzemeler ile karşılaştırılması [31]

Yukarıda bahsedilen fiber malzemeler farklı birçok yöntem ile havacılık, savunma, otomotiv, denizcilik gibi birçok alanlarında kullanılmak üzere fiberler mekanik olarak birbirlerine kenetlenerek bir araya getirilir. Fiberleri bir arada tutmak için reçineler matris görevi görür [32]. Kuru kumaş türlerinde reçine üretim esnasında kumaşa emdirilir. “Prepreg (pre-impregnated)” isimli kumaşlarda ise reçine önceden emdirilmiştir. Kumaşları fiberlerin oryantasyonuna göre sınıflandırılabilir. Tek yönlü (UD), Dokuma, Çok Eksenli ve Rastgele örgü tipleri olarak 4 ana kategoride sınıflandırılabilir. [32]. Örgü tipleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



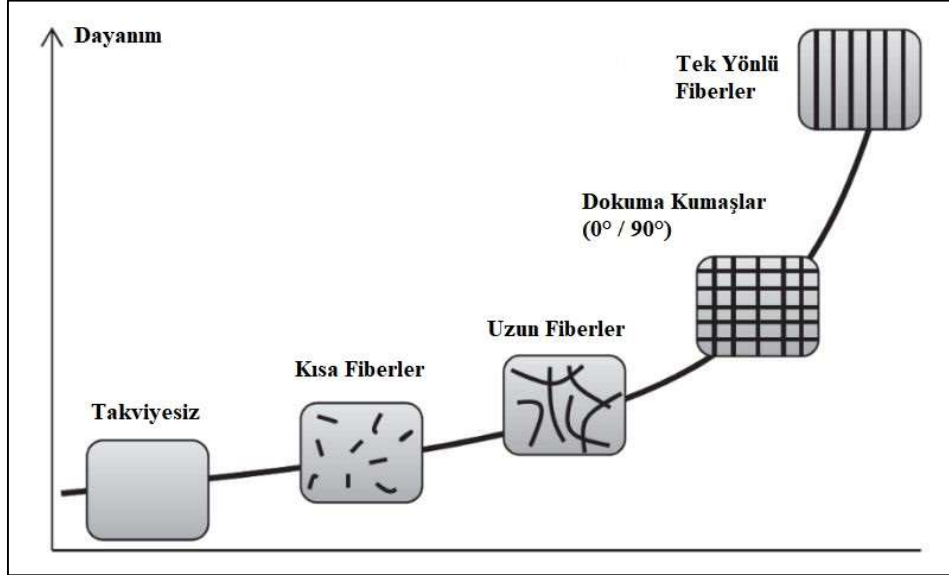
Şekil 3.12. Fiber örgü tipleri [32] a)Düz dokuma (plain), b) çapraz dokuma (twill), c) saten dokuma (satin), d) tek yönlü (UD), e)Sepet dokuma (basket), f) leno dokuma, g) sahte leno dokuma

Fiberlerin oryantasyonları 0° , -45° , $+45^\circ$ ve 90° olarak isimlendirilir. Şekil 3.13'te kumaşların yönü görsel olarak verilmiştir [33]. Fiberlerin yönlerine göre kumaşın dayanımı değişmektedir.



Şekil 3.13. Fiber yönleri [33]

Örnek olarak Şekil 3.14'te fiber yönlerinin dayanımı nasıl etkilediğini gösteren bir grafik verilmiştir [33].



Şekil 3.14. Fiber oryantasyonuna göre dayanımı [33]

3.5. FML Kompozitler İçin Yüzey Hazırlık Uygulamaları

FML kompozitler de fiber ve metal katmanların özellikleri yanında özellikler arayüzey bağının da önemli olduğu bilinmektedir. Fiber ve metalin birbirine yapışması kritik konulardan biridir. Yapışma sağlanmadığı takdirde kompozit yapı istenen mekanik özellik değerlerini karşılayamayacaktır. Metal yüzey için uygulanacak uygun bir yüzey hazırlığı işlemi tercihi, fiber takviye elemanın yapışma oranına arttıracaktır.

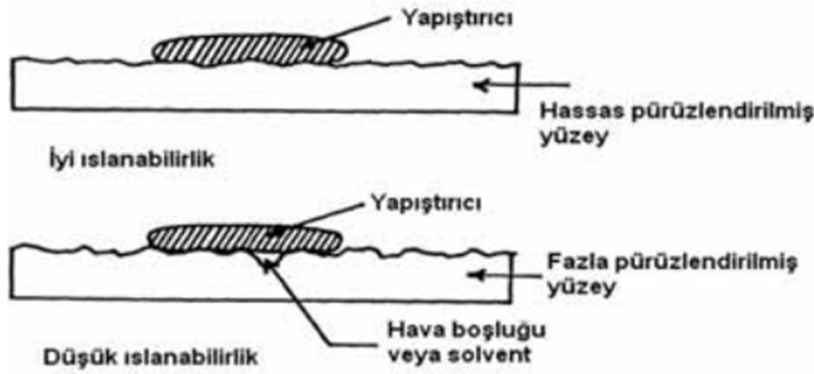
Yüzey, yağ ve kirden arındırılır ve yapışmanın kuvvetli olması için yüzey mekanik, kimyasal, elektrokimyasal vb. yöntemler ile aşındırılır.

Genel olarak yüzey hazırlığı işlemleri bu tez kapsamında 2 başlık olarak ele alınacaktır.

1. Mekanik yüzey işlemleri
2. Kimyasal yüzey işlemleri

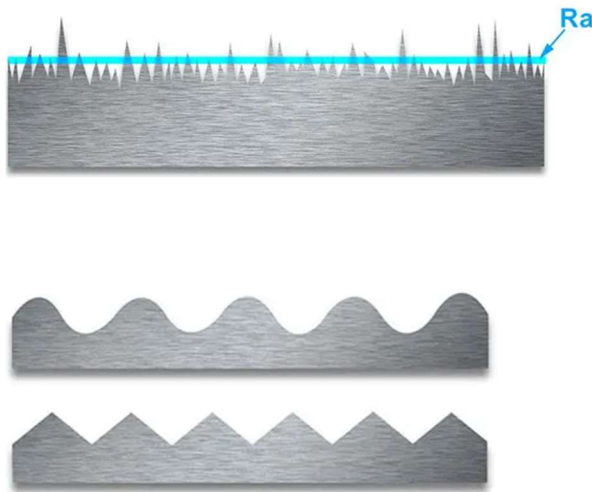
3.5.1. Mekanik yüzey işlemleri

Yüzey mekanik olarak aşındırılarak yapışma için pürüzlü, girintili / çıkıntılı bir yüzey elde edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü çok düşük olduğunda yapışma yüzeyi az olacaktır ve yapışma dayanımı da düşük olacaktır. Aşırı pürüzlü yüzeylerde de yapışma sırasında oluşabilecek boşluklardan dolayı dayanımın düşük olabilmektedir. Şekil 3.15’de yüzey pürüzlülüğünün ıslanabilirliğe etkisi gösterilmiştir [34].



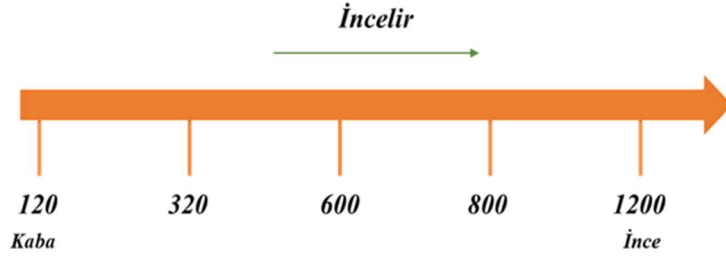
Şekil 3.15. Yüzey pürüzlülüğünün ıslanabilirliğe etkisi [34]

Yüzeydeki pürüzlülük makro seviyede görülebilmektedir. Zımparalama, kumlama, shot peening gibi uygulamalar mekanik aşındırma yöntemlerinden bazılarıdır. Yüzey pürüzlülüğü ile görsel Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Yüzey pürüzlülüğü şematik gösterimi

Zımparalama işleminde farklı gridlere (tane boyutlarına) sahip zımpara kağıtları ile yapılmaktadır. Zımpara kağıtlarında sayı arttıkça incelir. En yaygın kullanılan zımparalar, alüminyum oksitten, silikon karbürden oluşur.



Şekil 3.17. Zımpara grid boyutları

Kumlama işlemi manuel veya otomatik makineler ile yapılmaktadır. Belli bir basınçta kum tanecikleri yüzeye çarptırılarak yüzey mekanik olarak aşındırılmaktadır. Kumların gridleri genellikle SA 1, SA 2, SA 2,5 ve SA 3 olarak adlandırılmaktadır. Numarası arttıkça pürüzlendirme miktarı da artmaktadır.

3.5.2. Kimyasal yüzey işlemleri

Kimyasal yüzey işlemi temelde metal yüzeyi asit ile dağlayarak bir yapışma yüzeyi elde etme üzerinedir. Farklı tür malzemeler için farklı çözeltilerde asitler hazırlanmaktadır. Her asit ve malzeme için de dağlama süresi farklılık göstermektedir.

Kimyasal yüzey işlemleri mekanik yüzey işlemleri devamında uygulanarak yapışmanın dayanımı ve sürekliliği arttırılabilir [34].

Bu tez çalışmasında alüminyum ve magnezyum malzemeler kullanıldığından bu malzemeler için yapılan kimyasal yüzey işlemlerinden kısaca bahsedilecektir.

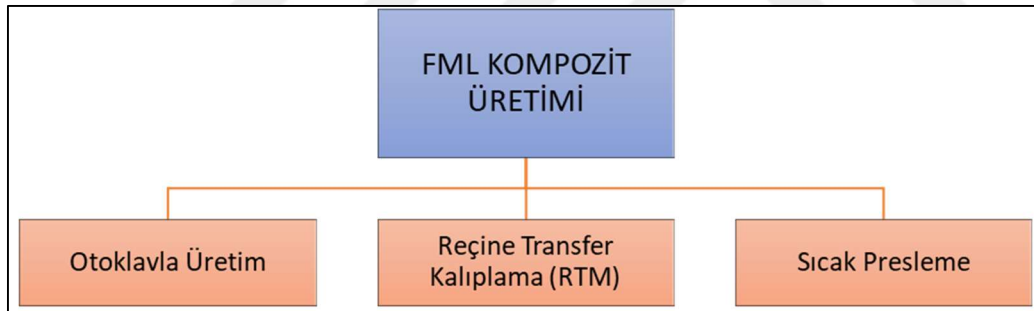
Magnezyum ve alaşımlarının en büyük problemlerinden birisi korozyondur. Yüksek aktivitesinden dolayı yüzeyi kolaylıkla korozyona uğrayabilmektedir. Bu nedenle yüzeyde koruyucu bir tabakanın olması gerekmektedir.

Magnezyum ve alaşımları için genelde uygulanan kimyasal işlemlerde genellikle kromik asit kullanılabilmektedir. Farklı asitlerin ilavesiyle de çözeltiler hazırlanmaktadır.

Alüminyum ve alaşımları, yüzeyleri hızlıca okside olabilen malzemelerdir. Kaplama veya yapışma öncesinde yüzeydeki oksitin temizlenmesi gerekmektedir. Örnek olarak hidroklorik asit veya sülfirik asit çözeltileri ile yüzeydeki oksit tabakası temizlenir ve böylece yapışmaya elverişli bir yüzey elde edilir.

3.6. FML Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler iki farklı malzemenin istenilen özelliklerinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzemeler olduğundan üretim teknikleri de bu özellikleri sağlayabilecek şekilde seçilmektedir. Kompozit malzemelerin yıllar içerisindeki gelişimi, birçok üretim tekniğinin geliştirilmesi ve ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ancak günümüzde hala kompozit malzemelerin üretimi, karmaşık ve maliyetli süreçlerdir. Üretim yöntemi tercih edilirken matris tipi, takviye elemanına, istenilen özelliklere, parça şekline dikkat edilmelidir [10]. Bu tez çalışmasında FML kompozit malzemelerin üretiminde en çok tercih edilen üretim yöntemleri Şekil 3.18’de verilmiştir [16].



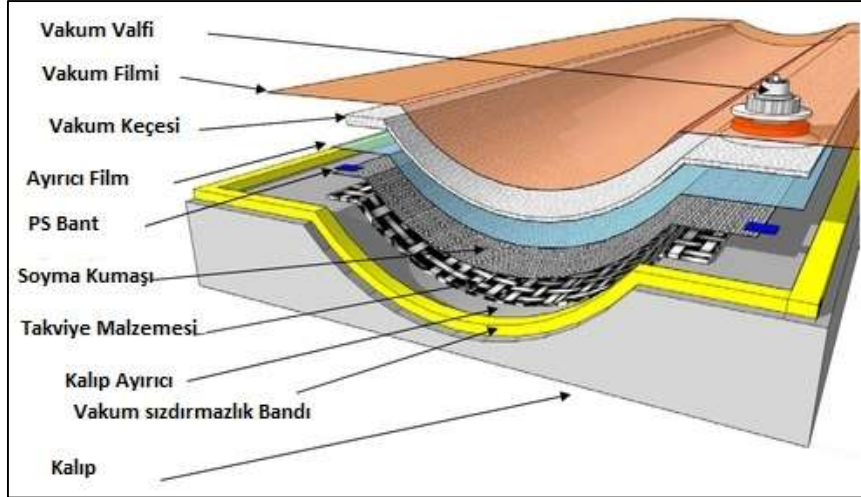
Şekil 3.18. FML kompozit üretim yöntemleri

3.6.1. Otoklavla Üretim

Havacılık ve savunma sanayi endüstrisinde sıklıkla kullanılan bu yöntem lamine kompozitler üretmek için kullanılmaktadır [16].

Otoklav silindirik şekline sahip, sıcaklık ve basınç üretebilen metal bir kaptır [16]. Bu kap içerisinde kontrollü bir şekilde yüksek sıcaklık ve basınç kullanılarak parçada oluşabilecek hava boşlukları minimuma indirgenir. Bu yöntem, çok büyük ve karmaşık parçaların üretilmesi için elverişlidir.

Yüzeyleri hazırlanan metal plakalar arasına prepreg veya kuru kumaşlar serilir. İstenilen oryantasyon ve sırada istiflenen metal ve kumaşlar kalıp üzerinde fazla reçineyi emmesi için ayırıcı film ve vakum battaniyesi serildikten sonra vakuma alınır. Vakum torbalama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.19’da verilmiştir [35].

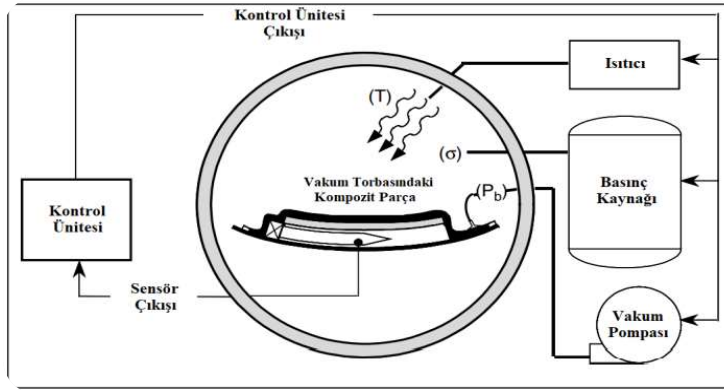


Şekil 3.19 .Vakum torbalama şematik gösterimi [35]

Vakum altındaki parçalar kürlenmek üzere otoklav içerisine yerleştirilir. Düzenli bir sıcaklık artışı kürlenme sıcaklığına ulaşılır ve bununla birlikte parçaya basınçta uygulanır. Kürlenme süresi kullanılan kumaşın, reçinenin tipine göre değişmektedir. Kürlenme boyunca sıcaklık ve basınç sabit kalmaktadır. Kürlenmenin sonlarına doğru yine kontrollü bir şekilde sıcaklık oda sıcaklıklarına kadar düşürülür. Şekil 3.20’de otoklav görseli verilmiştir. Şekil 3.21’de otoklavın şematik gösterimi verilmiştir [16].



Şekil 3.20. Otoklav



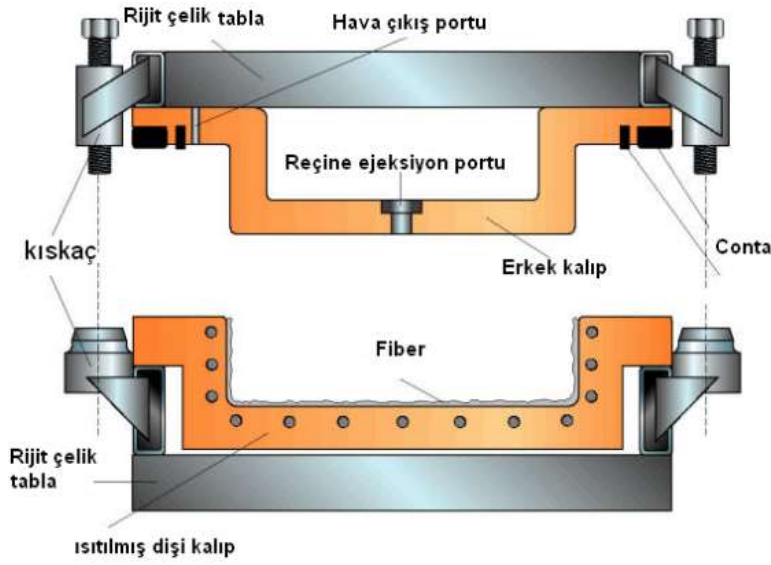
Şekil 3.21. Otoklav şematik gösterimi [16]

3.6.2. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi

Sıvı kalıplama yöntemi olarak da bilinmektedir [36]. Bu yöntem denizcilik, havacılık, otomotiv gibi pek çok alanda tercih edilen bir yöntemdir.

Bu yöntemde metal ve takviye elemanlarının erkek ve dişi kalıplar arasında kalıplanır. Daha sonra hazırlanan reçine karışımı kalıp içerisine pompalanır [37]. Bu yöntemde erkek ve dişi kalıpların kullanılması sebebiyle parçanın her iki yüzeyinde de yüksek yüzey kalitesi elde edilir. Reçine transferi sırasında yüzeyden reçinenin dağılımı görülmesine rağmen parçada hava boşlukları ve kumaşların kuru kalabilme ihtimalinin olması parçaların mekanik özellikleri üzerinde etkisi olan bir durumdur.

Kalıp üzerine metal ve takviye elemanları istenilen şekilde istiflendikten sonra vakum torbası içerisinde kompozit yapı vakumlanır. Sertleştiricisi ile hazırlanan reçine karışımı vakum altındaki kompozit malzemeye emdirilmek üzere pompalanır. Reçine malzemenin kompozit yapının tümüne homojen bir şekilde dağılması sağlanır. Hava boşluğu ve kuru bir alanın kalmamasına özen gösterilir. Reçine tamamen dağıldıktan sonra reçinenin sertleşmesi için oda sıcaklığında kür olmak üzere bekletilir. Şekil 3.22’de RTM yöntemi için şematik gösterim verilmiştir [16].



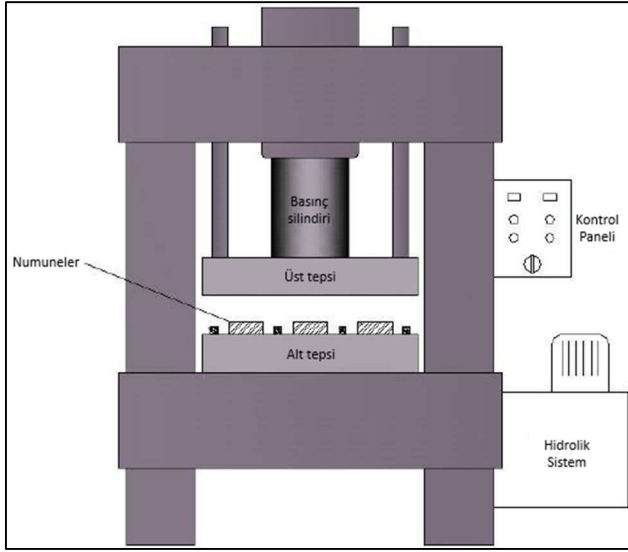
Şekil 3.22. Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi [16]

3.6.3. Sıcak presleme yöntemi

İsminden de anlaşılacağı gibi sıcaklık ve basınç ile gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir [37]. Genelde yassı tabaklı ürünler üretilmektedir. Uygun kalıp ve ekipmanlarda farklı geometriye sahip yapılarda üretmek mümkün olabilir. Metal ve fiber takviye elemanları istenilen şekil ve oryantasyonda tabla üzerine dizilir. Dizme işlemi gerçekleştirilemeden önce ayırma işleminin kolay olması için ayırıcı sürülür. Koç yardımı ile tabakalar sıkıştırılır. Isıtılmış tabla ve koç arasında belirli bir sıcaklık ve basınç altında tabakalar kürlenir [37]. Kürlenmiş malzemeler soğumaya bırakılır.

Diğer yöntemlere göre parça boyutları bu yöntem için kısıtlayıcıdır. Ancak düşük maliyetli ve hızlı bir yöntem olması sıklıkla kullanılan bir yöntem olmasını sağlamaktadır [16].

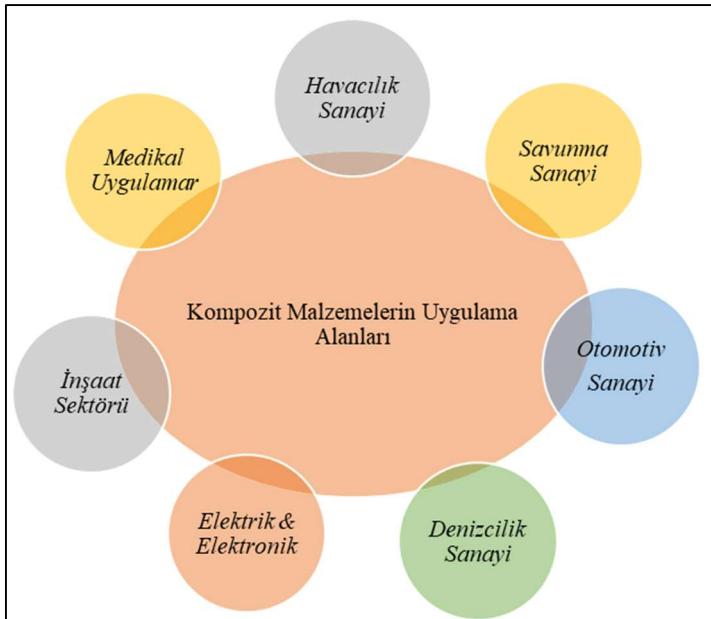
Şekil 3.23’de sıcak pres cihazının şematik görseli verilmiştir [38].



Şekil 3.23. Sıcak Pres cihazının şematik gösterimi [38]

3.7. FML Kompozitlerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemeler keşfedildiği zamanlarda spesifik alanlarda kullanılmaktaydı. Başta havacılık, savunma, sağlık alanları için önemli bir keşif olan kompozit malzemeler her geçen yıl geliştirilmeye devam etmiş ve günlük hayatımızda sıkça karşılaştığımız bir malzeme grubu haline gelmiştir. Genel olarak kompozit malzemelerin uygulama alanları Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. Kompozit malzemelerin uygulama alanları

FML kompozitler daha yakın bir geçmişte keşfedilip geliştirilmiştir. İkinci dünya savaşı ile birlikte dikkat çekmiş ve araştırmalar artmıştır. Günümüzde medikal malzemelerden spor malzemelerine, otomotivden inşaat her sektörde rastladığımız malzemeler haline gelmişlerdir. Dayanıklı ve hafif olmaları spor sektöründe her geçen gün daha öne çıkılmalarını sağlamaktadır. Kanolar, golf sopaları, tenis racketlerinde kullanımları artmıştır [39].

Yine otomotiv ve ulaşım sektörlerinde hafifliğin ve dayanımın ön planla olduğu parçalarda, örneğin dikiz aynasında, kaportada otomobil yan gövde iskeletlerinde özellikler tercih edilmekte ve araştırılmaktadır [39]. İnşaat alanında depreme dayanıklı yapıların inşasından karbon fiberler güçlendirici malzemeler olarak kullanılmaktadır. Medikal uygulamalarda biyouyumlu birçok yeni malzeme geliştirilmekte ve bunlar arasında yine kompozit malzemeler yer almaktadır.

Havacılık sektörünün ilerlemesiyle hafiflikleri, dayanımları sebebiyle FML kompozitler çok tercih edilen malzemeler olmuştur. Havacılık alanında farklı firmaların FML kompozitleri kullandıkları alanlar Çizelge 3.6’da verilmiştir [12].

Çizelge 3.6. Farklı uçak modellerinde FML kompozitlerin kullanıldığı kısımlar [12]

Firma	Uçak	Parça	Malzeme
Boeing	777	Kargo zemini	GLARE (Cam (Glass) + Alüminyum)
Bombardier	Lear 45	Ön duvar	GLARE (Cam (Glass) + Alüminyum)
Air Canada	A320	Kargo zemini	GLARE (Cam (Glass) + Alüminyum)
Lockheed Martin	C 130	Alt flap kabuğu	ARALL (Aramid + Alüminyum)
Fokker	F100	Çatlak stopleri	ARALL (Aramid + Alüminyum)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan malzemeler ve test plakalarının kesilmesi

4.1.1. 1050 alüminyum

Bu çalışmada 1 mm kalınlığında 1050 kalite alüminyum kullanılmıştır. Alüminyum levha, Seydişehir Alüminyum firmasından tedarik edilmiştir. 1000 x 2000 mm ebatlarındaki levhadan 100 x 100 mm ve 300 x 250 mm ebatlarında test plakaları kesilmiştir. Şekil 4.1’de alüminyum levha verilmiştir.



Şekil 4.1. 1050 Alüminyum test plakalarının kesildiği levha

Bu tez çalışmasında 1050 H14 alüminyum malzeme kullanılacaktır. Dayanımı diğer alüminyum alaşımlarına göre düşük olduğu bilinen bu malzemenin fiber takviye elemanları ile kombinasyonu sonucu dayanımının artırılması hedeflenmiştir.

1050 H14 alüminyum malzemenin kimyasal analiz bilgileri üreticinin sertifikasında belirtilen EN 573-3 standardına göre Çizelge 4.1’de verilmiştir. Mekanik ve fiziksel özellikleri EN 485 standardına göre Çizelge 4.2de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 1050 Al kimyasal kompozisyonu (%) [43]

	Si (max.)	Fe (max.)	Cu (max.)	Mn (max.)	Zn (max.)	Ti (max.)	Al (min.)
1050 Al	0,25	0,40	0,05	0,05	0,07	0,05	99,50

Çizelge 4.2. 1050 Al H14 Mekanik ve fiziksel özellikleri [43]

	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Yoğunluk (g/cm ³)
1050 Al	105 - 145	85 (min.)	2	34	2,705

4.1.2. AZ31B magnezyum

Literatür tarama çalışmaları sonucunda ve havacılıkta tercih edilen bir malzeme olması sebebiyle AZ31B alaşımı tercih edilmiştir. Magnesium Turkey'den 1,6 mm kalınlığında 600 x 900 mm ebatlarında AZ31B levha tedarik edilmiştir. Şekil 4.2'de AZ31B levhanın görseli verilmiştir.



Şekil 4.2. AZ31B Magnezyum Alaşımı

Bu çalışmada alüminyum içeren bir magnezyum türü olan AZ31B malzeme kullanılmıştır. AZ31B malzemenin ASTM B90/B90M standardına göre kimyasal analizi Çizelge 4.3'te verilmiştir. Mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. AZ31B kimyasal kompozisyonu (%) [43]

	Al	Zn	Mn	Si (max.)	Fe (max.)	Cu (max.)	Ni (min.)	Mg
AZ31B	2,5 – 3,5	0,6 – 1,4	0,2 – 1,0	0,1	0,005	0,05	0,002	Kalan Mik.

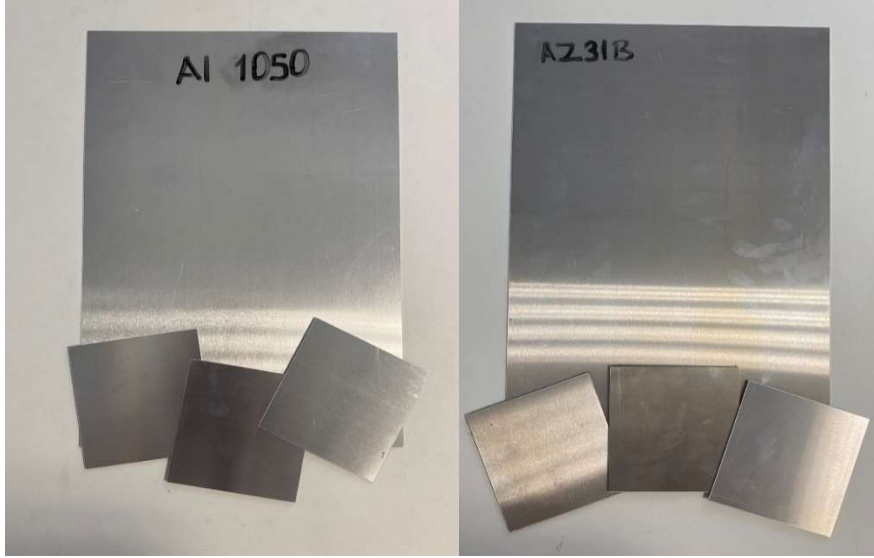
Çizelge 4.4. AZ31B mekanik ve fiziksel özellikleri [22,43]

	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (min %)	Sertlik (HB)	Yoğunluk (g/cm ³)
AZ31B	221 - 275	-	12	56	1,77

Alüminyum ve magnezyum plakalar CNC tezgahında 100 x 100 mm ve 300 x 250 mm boyutlarında CNC tezgahında kesilmiştir. Şekil 4.3'de CNC kesim aşaması verilmiştir. Şekil 4.4'te kesilen alüminyum ve magnezyum plakalarının görüntüleri verilmiştir.



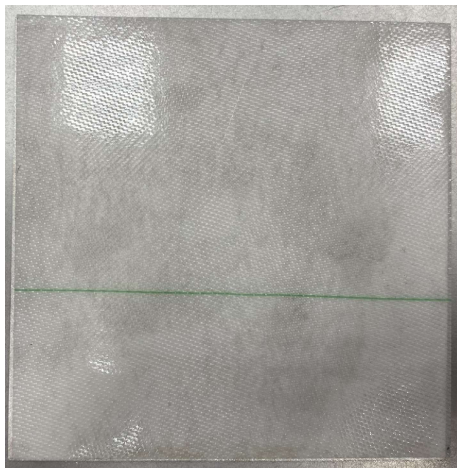
Şekil 4.3. CNC kesim aşaması



Şekil 4.4. Kesilen alüminyum ve magnezyum test plakaları

4.1.3. Cam (Glass) prepreg kumaş

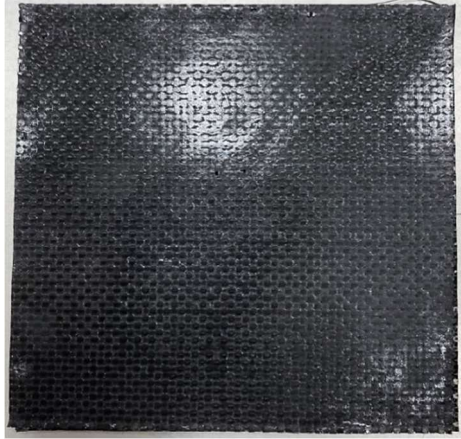
Bu çalışmada cam (glass) kumaşın magnezyuma yapışabilirliğini incelemek adına bazı test plakalarında cam (glass) kumaş da kullanılmıştır. KORDSA 190 gsm cam (glass) prepreg kullanılmıştır. Malzeme Epsilon Kompozit firmasından tedarik edilmiştir. Cam (Glass) prepreg kumaşı takviye elemanı olarak kullanılmamıştır. Cam (Glass) kumaşlar korozyon önlemek amacıyla kullanılabilir. Bu sebeple magnezyuma yapışabilirliği incelenmek istenmiştir. Şekil 4.5'te cam (glass) kumaşın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5. Cam (Glass) prepreg kumaş

4.1.4. Karbon prepreg kumaş

Bütün test plakalarında karbon prepreg kumaş takviye elemanı olarak kullanılmıştır. DowAksa üretimi olan 245 gsm twill kumaş kullanılmıştır. Malzeme Epsilon Kompozit firmasından tedarik edilmiştir. şekil 4.6’da karbon prepreg görüntüsü verilmiştir.



şekil 4.6. Karbon prepreg kumaş

4.1.5. Yapıştırıcı (Adhesive) film

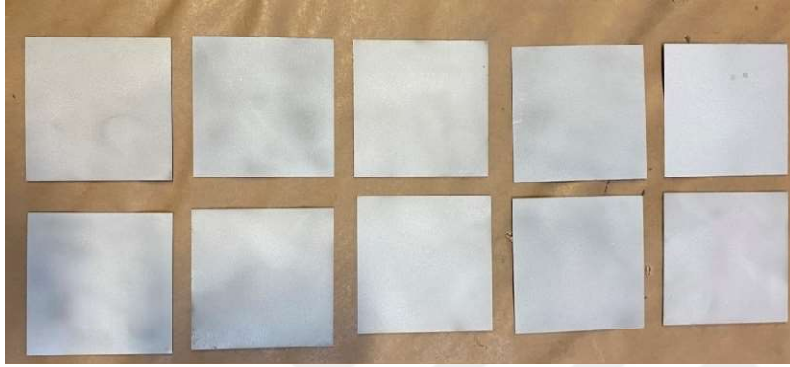
Yapıştırıcı film seçili test plakalarında yapıştırıcı olarak kullanılmıştır. Malzeme Epsilon Kompozit firmasından tedarik edilmiştir. Kullanım amacı karbon kumaşlar ile metal plakalar arasında kuvvetli bir yapışma sağlamaktır. şekil 4.7’de yapıştırıcı filmin görseli verilmiştir.



şekil 4.7. Yapıştırıcı (Adhesive) film

4.2. Numunelerin Yüzey Hazırlık İşlemleri

Mekanik ve kimyasal olmak üzere iki farklı yüzey işlemi yapılmıştır. Mekanik yüzey hazırlığı olarak test plakalarının bir kısmına yalnızca zımparalama bir diğer kısmına kumlama yapılmıştır. Zımparalama işlemi 320 grid zımpara ile gerçekleştirilmiştir. Kumlama işlemi ise Sa 2,5 kum ile yapılmıştır. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sırasıyla kumlanan ve zımparalanan alüminyum ve magnezyum test plakaları verilmiştir.

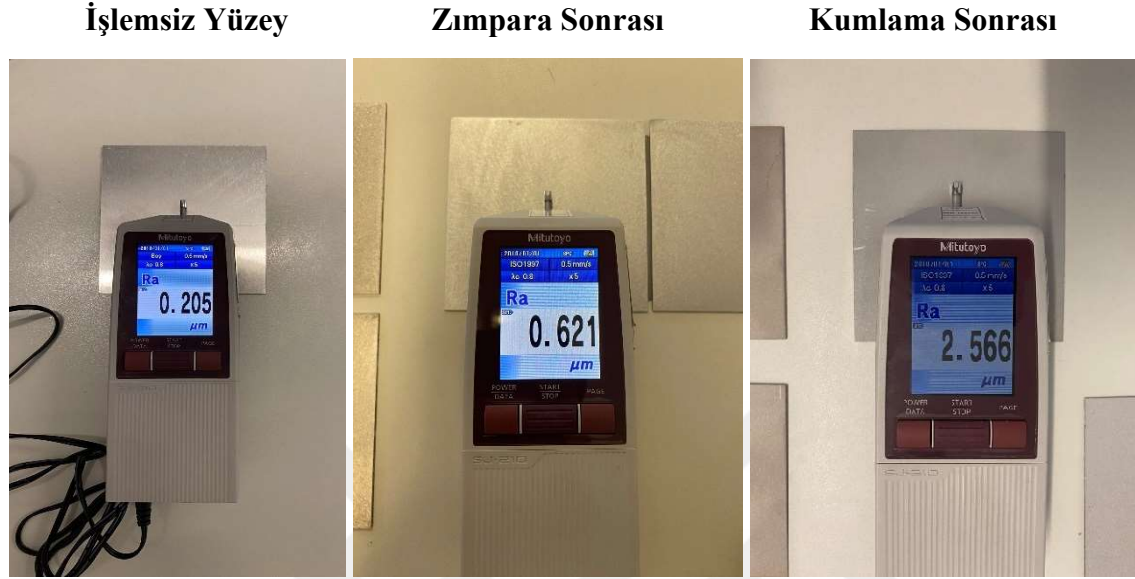


Şekil 4.8. Kumlanmış plakalar



Şekil 4.9. Zımparalanmış plakalar

Yüzeylere mekanik yüzey işlemleri yapılmadan önce, zımparalama ve kumlama sonrasında yüzeylerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.10'da yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Çizelge 4.5' de zımpara ve kumlamanın yüzey pürüzlülüğünün artışına etkisi görülmektedir. (Değerler ortalama olarak verilmiştir)

Çizelge 4.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

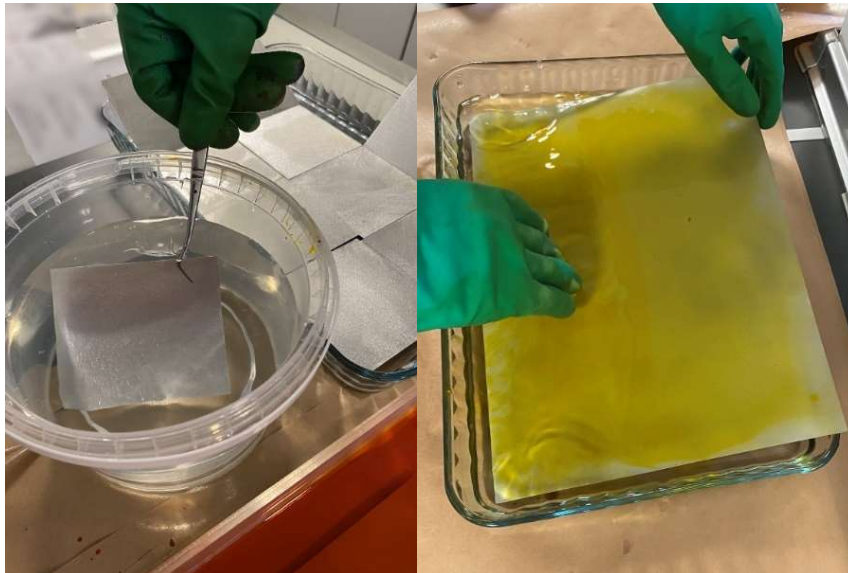
İşlemsiz Yüzey	Zımparalama Sonrası	Kumlama Sonrası
Ra 0,25	Ra 0,82	Ra 2,41

Mekanik yüzey işlemlerinin ardından yüzeyde kalabilecek yağ ve kiri arındırmak ve yapışma yüzeylerini hazırlamak için alüminyum ve magnezyum plakalar 15 dk süre ile %7 kromik asit çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Zımparalanmış ve kumllanmış yüzeyler ayrı ayrı bekletilmiştir. Şekil 4.11'de kromik asit çözeltisinde bekletilen test plakalarının görseli verilmiştir.



Şekil 4.11. Kromik asit çözeltisinde bekletilen test plakaları

Kromik asit çözeltisinde 5 dk bekletilen plakalar saf su ile yıkandıktan sonra kurumaya bırakılmıştır. Yapılan bu işlemlerin ardından yüzeye temas edilmemesine özen gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Kromik asit çözeltisinden çıkarılan plakaların saf su ile yıkanması

4.3. Serim (Lay-up) ve Kürlenme Aşaması

Bu çalışmada öncelikli olarak magnezyum alaşımlarına karbon, cam (glass) gibi malzemelerin yapışabilirliği sorgulanmaktadır. Bu çalışma için üretilen test plakaları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

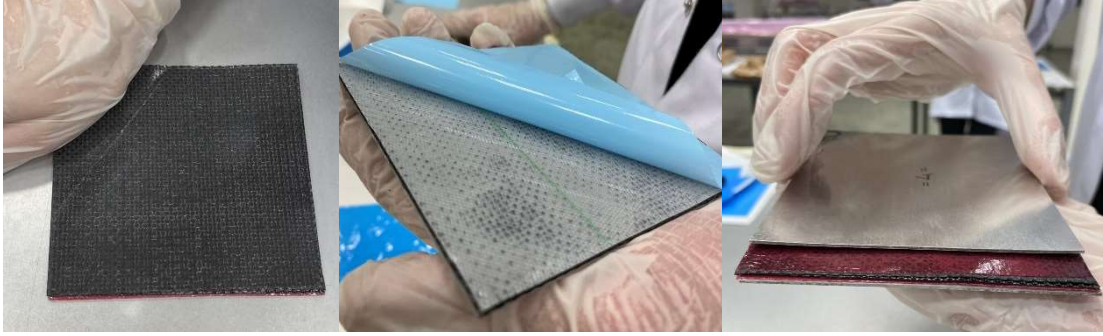
Çizelge 4.6. Hazırlanan test numunelerinin gruplandırılması

Grup No	Yüzey İşlemi	Dizilim	Metal Katman	Fiber Katman
G.1	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon
G.2	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon
G.3	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon
G.4	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon
G.5	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)
G.6	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)
G.7	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)
G.8	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)
G.9	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon + Cam (Glass)
G.10	Kumlama + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon + Cam (Glass)
G.11	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm 1050 Alüminyum	Karbon + Cam (Glass)
G.12	Zımpara + Kromik Asit	2/1	100 x 100 mm AZ31B Magnezyum	Karbon + Cam (Glass)
G.13	Kumlama + Kromik Asit	2/1	300 x 250 mm 1050 Alüminyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)
G.14	Kumlama + Kromik Asit	2/1	300 x 250 mm AZ31B Magnezyum	Karbon + Yapıştırıcı (Adhesive)

Serim işlemi, sıcaklık, nem ve toz partiküllerinin kontrollü olduğu temiz oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yüzeyleri hazırlanan test plakaları sırasıyla gruplanmıştır. Metallerin ardından kesilen kumaşlarda gruplanmıştır.

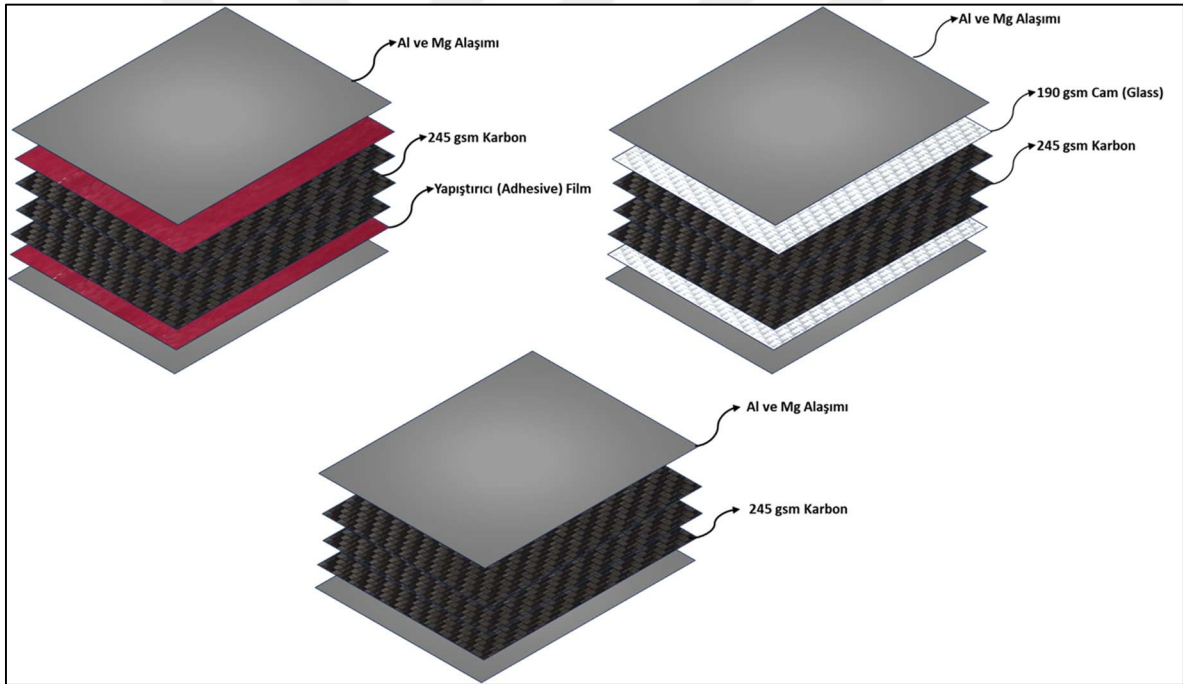
Otoklava uygun bir kalıp üzerinde serim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kumaşların hepsi 0° yönünden serilmiştir. Kumaşların ön ve arka filmleri soyularak istenen oryantasyonda sırasıyla serilmiştir.

Serim aşamasına ait Şekil 4.13'te detaylar verilmiştir.



Şekil 4.13. Serim aşaması

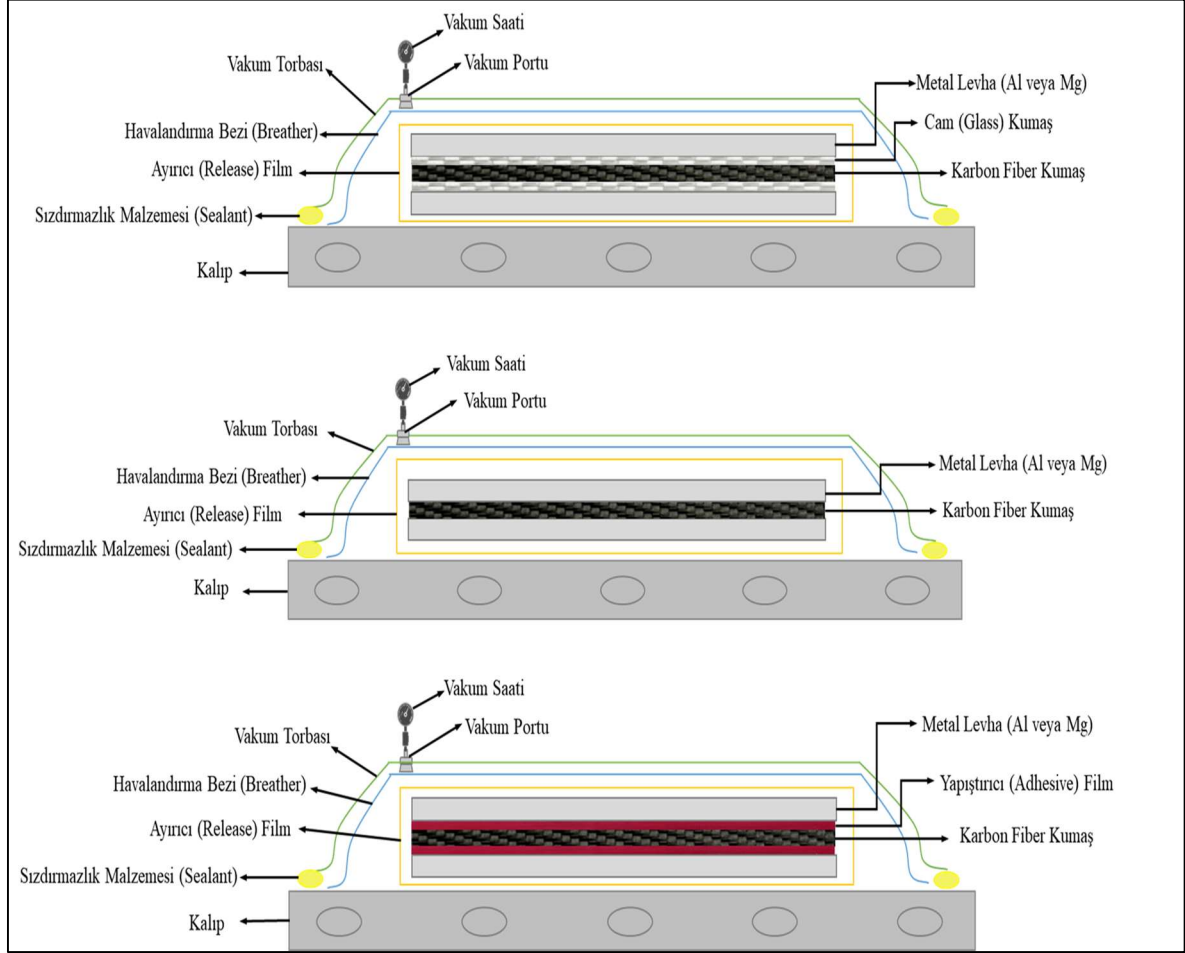
Üretilen FML kompozitlerin serimleri şematik olarak Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Serimi yapılan FML kompozitlerin şematik gösterimi

Serimi tamamlanan test plakaları kalıp üzerine dizilmiş ve termal bantlar ile tanımlanmıştır. Ardından vakum torbalama adımına geçilmiştir. İlk olarak test plakaları ayırıcı (release) film ile kaplanmıştır. Bir sonraki adımda ayırıcı (release) film ile kaplanan test plakalarının vakuma alma sırasında kaymaması için kalıba sabitlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Test plakaları sabitlendikten sonra parçalar üzerine havalandırma bezi (breather) serilmiştir. Vakum portlarının giriş yerleri belirlenir ve yerleştirilir. Son olarak üzerin vakum torbası serilmiştir.

Vakum torbası kalıp üzerinde bulunan sealant bantlar yardımı ile içerisi hava almayacak şekilde kapatılır. Şekil 4.15'te üretilen FML kompozitler için vakum torbalamalarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.15. Üretilen FML kompozitler için vakum torbalamaların şematik gösterimi

Vakum torbasında kaçak olmadığı kontrol etmek için parça vakuma alınır. Daha sonra vakumdan çıkarılan kalıp vakum saati ile kontrol edilerek kaçak olup olmadığı kontrol edilir. Kaçak olmadığına emin olduğunda parçalar kürlenmek üzere otoklava gönderilir.

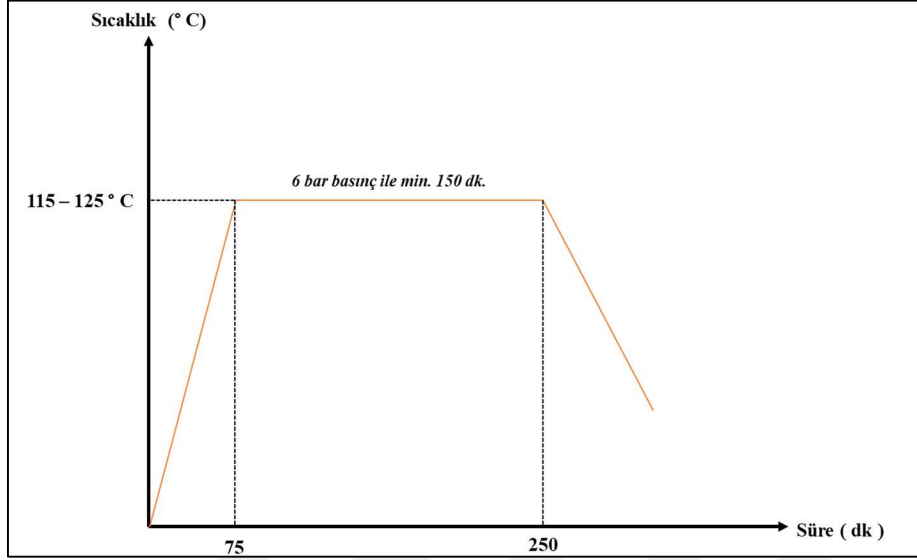
Üretim aşamalarına ait görseller Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Vakum torbalama işlemleri

- a) Ayırıcı (Release) film ile kaplanması
- b) Havalandırma bezi (breather) serilmesi
- c) Vakum naylonunun serilmesi ve vakuma alınması
- d) Vakum kaçak testinin yapılması

Üretilen FML kompozitler 120 ± 5 °C sıcaklığında 6 bar basınçta yaklaşık 6 saat süre ile kürlenmiştir. Kürlenme grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. FML kompozitlerin kürlenme grafiği

Kürlenme işlemi sonrasında otoklavdan çıkarılan malzemeler kontrol edilmiştir. Makro seviyede bir yapışma sağlandığı ayrışma olmadığı görülmüştür. Tüm test numuneleri kontrol edildiğinde G12 olarak kodlanmış test numunesinde gözle görülür biçimde ayrışma olduğu görüldü. Magnezyum plakalarının zımparalama işlemi gördüğü, karbon ile metal arasına cam (glass) kumaş kullanıldığı numunenin fiber ve metal arayüzeyinden ayrıldığı görüldü. Şekil 4.18’de ayrışma görülen test plakasının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.18. Ayrılma görülen G12 test plakası

Ayrışma görüldükten sonra üretilen tüm test plakaları için ultrasonik muayene yöntemi ile FML parçaların iç kısımlarında ayrılma (delaminasyon) olup olmadığı kontrol edildi. Yalnızca bir parçada makro seviyede yapışma görülse de yapışmayan kısımlar olduğu tespit edildi. G10 numaralı bu test plakası magnezyum levhaların kumlama işlemi gördüğü, karbon ve cam (glass) kumaşların kullanıldığı test plakasıdır.

4.4. Test Numunelerinin Kesilmesi

Çekme ve tabakalar arası kesme mukavemeti testler (ILSS) için numuneler CNC tezgahında kesilmiştir. Çekme numuneleri yapıştırıcı (adhesive) film kullanılan 300 x 250 mm ölçülerindeki test plakalarından kesilmiştir. ILSS için numuneler 100 x 100 mm ebatlarındaki plakalardan kesilmiştir.

Çekme testi ASTM 3039 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Standarda göre numune ölçüleri aşağıdaki gibi olmalıdır;

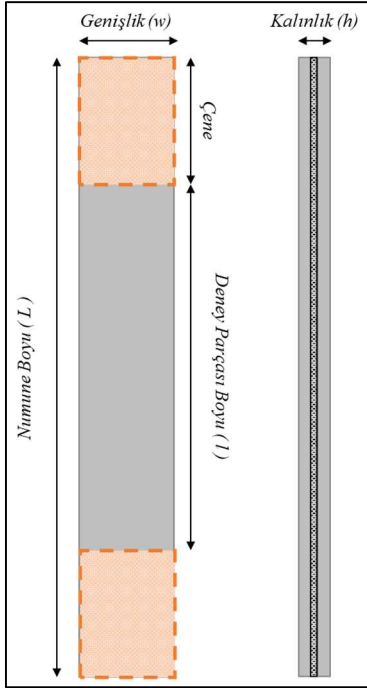
Numune Boyu (L) = 250 mm

Deney Parçası Boyu (l) = 150 mm

Genişlik (w) = 25 mm

Kalınlık (h) = Numunenin kalınlığı

Numunenin şematik görseli Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Çekme numunesinin şematik gösterimi [41]

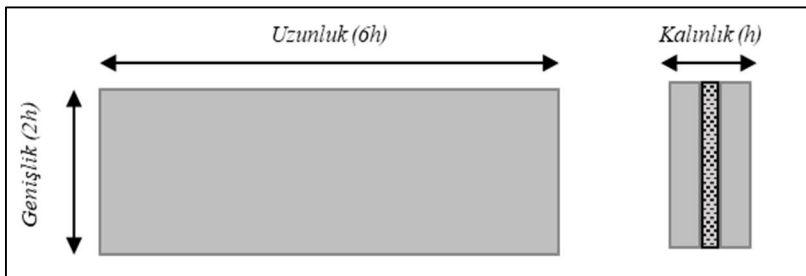
ILSS testi için ASTM 2344'e göre test numuneleri hazırlanmıştır. Standartta göre numune ölçüleri için formülüzasyon şu şekildedir;

Kalınlık = h ise

Genişlik = $2h$

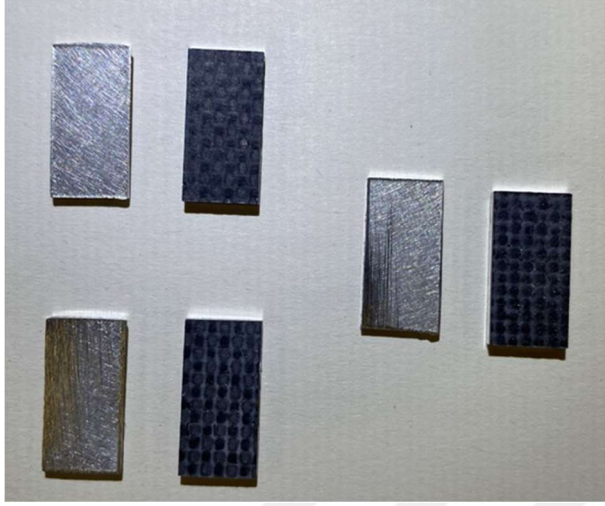
Uzunluk = $6h$

Standart, kalınlığı 6 mm'ye kadar olan malzemeler için geçerlidir. Test numunesinin şematik görseli Şekil 4.20'de verilmiştir.



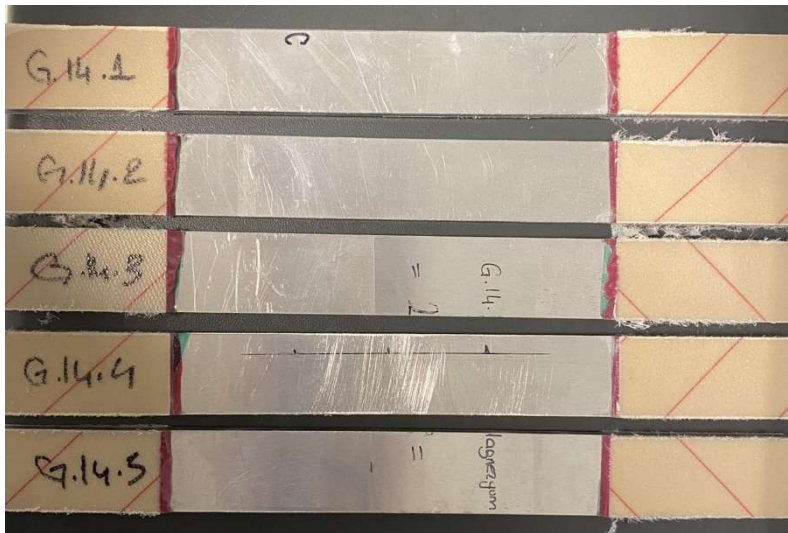
Şekil 4.20. ILSS testi numunesi

Test numunelerinin tamamı CNC tezgahda kesilmiştir. Kesim sırasında, yüzey hazırlığı zımparalama ile yapılmış AZ31B ve karbon prepreg ile üretilmiş G4 numaralı FML kompozit parçada ayrılma görüldü. G4 test plakasından standart gereği 5 adet numune kesilmiştir. Üçünde ayrılma görülmüştür. Geri kalan iki numunede ayrılma gözlenmemiştir. Şekil 4.21’de ayrılan parçaların görseli verilmiştir.

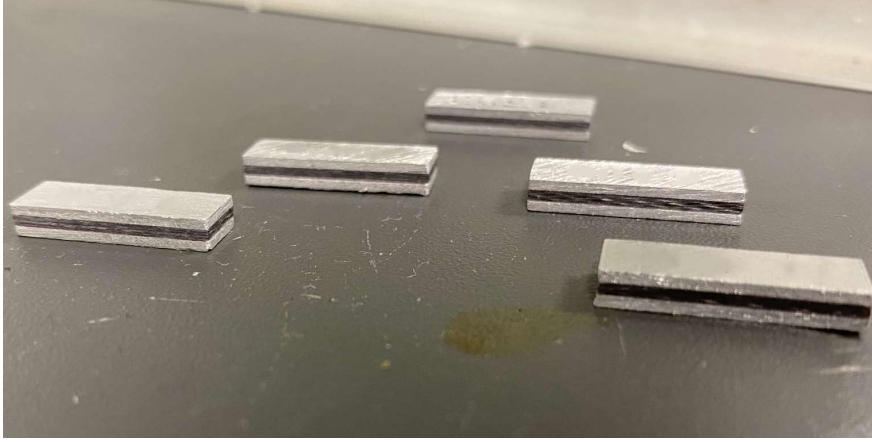


Şekil 4.21. CNC sırasında ayrılma görülen G4 numaralı FML

Diğer grupların çekme ve ILSS numuneleri hazırlanırken bir ayrılma durumu söz konusu olmamıştır. Çekme numunelerine ait görsel 4.2’de verilmiştir. ILSS numuneleri Şekil 4.23’te verilmiştir.



Şekil 4.22. Çekme numuneleri



Şekil 4.23. ILSS numuneleri



5. NUMUNELERİN TESTLERİ

Çekme testleri ve ILSS testleri Epsilon Kompozit firmasının Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Numuneler ASTM standartlarına göre hazırlanmıştır.

Optik mikroskop görüntüleri, Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında alınmıştır.

5.1. Çekme Testlerinin Yapılması

Çekme testleri ASTM 3039'a göre gerçekleştirildi. Çekme testleri için G13 VE G14 test plakaları kullanılmıştır. Bu test plakalarında alüminyum ve magnezyum için metal yüzeyleri kumlanmış ve karbon kumaşlar yapıştırıcı (adhesive) film ile yapıştırılmıştır. Her grup için de standart gereği 5'er adet numune test edilmiştir. Test cihazı olarak 100 kN'luk MTS marka çekme cihazı kullanılmıştır. 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testine ait görsel Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Çekme testinin gerçekleştirilmesi

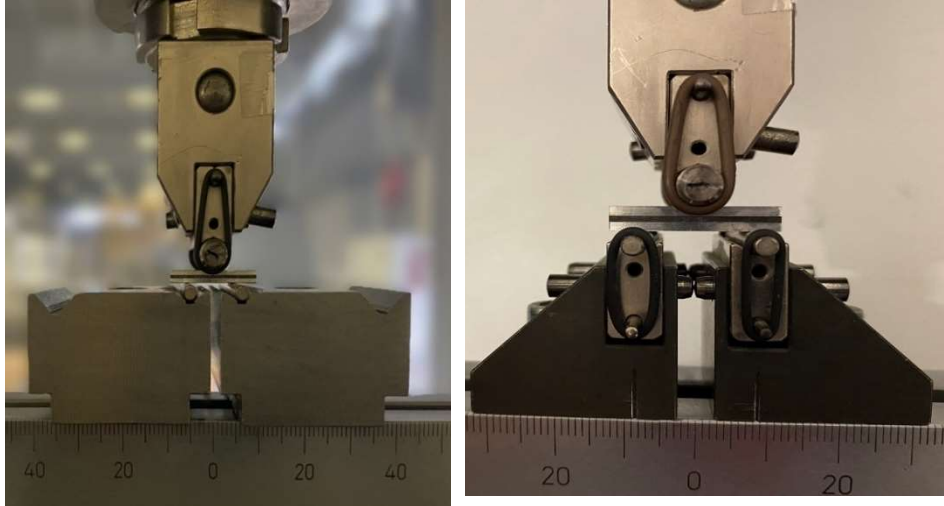
5.2. Katmanlar Arası Kayma Gerilmesi (ILSS) Testi

ILSS testi ASTM 2344 standardına uygun şekilde yapıldı. CNC ile kesin sırasında görülen metal yüzey ile karbonun ayrılması, NDT’de tespit edilen delaminasyon sonucunda ILSS testi yalnızca karbonun yapıştırıcı (adhesive) film ile yapıştırıldığı numuneler için uygulanmıştır. Test cihazına ait görsel Şekil 5.2’de verilmiştir. Numunelerin boyları ve cihazdaki ölçüler standarda göre ayarlandıktan sonra testle gerçekleştirilmiştir. Mesnet açıklığı testin doğruluğu için önemli bir kriterdir.



Şekil 5.2. ILSS testlerinin gerçekleştirilmesi

Şekil 5.3’te 1050 Al ile üretilen FML ve AZ31B ile üretilen FML’nin ILSS test görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.3. a) 1050 Al ile üretilen FML kompozitin ILSS testi, b) AZ31B ile üretilen FML kompozitin ILSS testi

5.3. Optik Mikroskop ile Kesit Görüntülerinin Alınması

Numune kesitlerinden görüntü alarak mikro seviyede yapışma olup olmadığı incelenmek istenmiştir. Numune hazırlıkları ve görüntü alma işlemleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği ait laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir. İlk olarak görüntü almaya uygun olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Bakalite alınan FML kompozitlerin kesit yüzeyleri sırasıyla 100,400,800 ve 1200 grid zımparalar ile zımparalanmıştır. Ardından yüzeyler parlatılmıştır. Numunelere ait görsel Şekil 4.28’de verilmiştir. Optik mikroskop olarak LEICA DM 4000M markalı mikroskop kullanılmıştır. x5, x10, x20 ve x50 büyütmelerde görüntüler alınmıştır.



Şekil 5.4. Optik görüntüleri için hazırlanan numuneler



6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

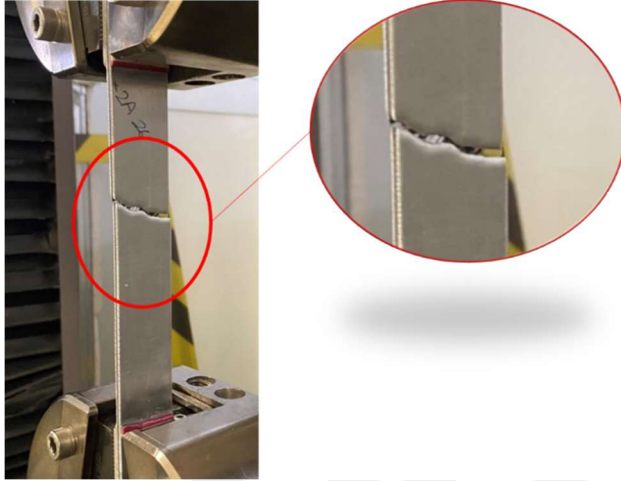
6.1. Çekme Testi Sonuçları

G13 ve G14 grupları için yapılan çekme testi sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Çekme testi sonuçları

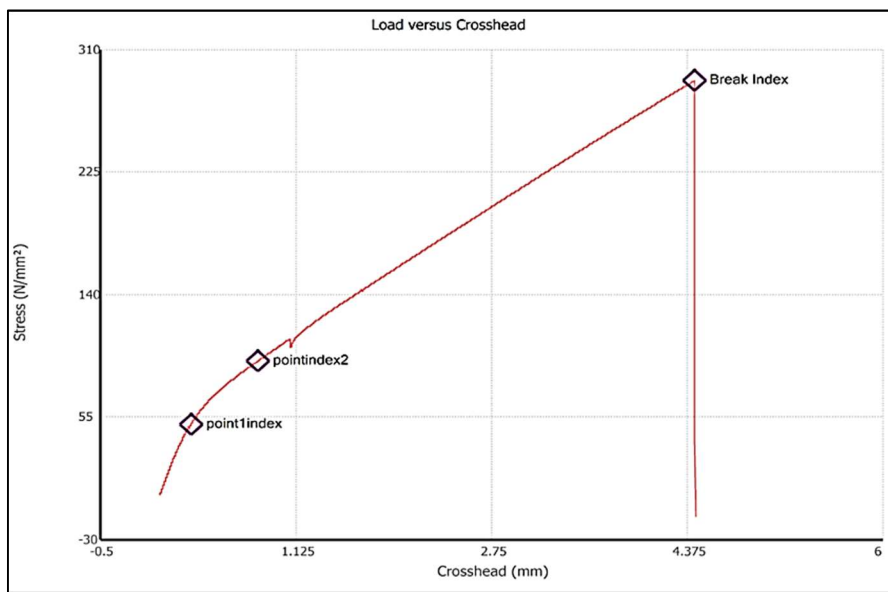
FML Yapısı	Numune Adı	Yüzey İşlemi	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Gerilim (MPa)	Modülüs (GPa)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Alan (mm ²)	Kırılma Türü
Alüminyum + Yapıştırıcı (Adhesive) + Karbon	G13 - 1	Kumlama	22,75	288,1	21,829	24,68	3,2	78,976	AGM
	G13 - 2	Kumlama	22,623	283,5	21,78	24,86	3,21	79,800	LAB
	G13 - 3	Kumlama	23,336	296,2	21,733	24,85	3,17	78,774	AGM
	G13 - 4	Kumlama	22,642	284,3	22,282	24,97	3,19	79,654	LAB
	G13 - 5	Kumlama	23,054	291,5	21,981	24,95	3,17	79,091	LAB
Magnezyum + Yapıştırıcı (Adhesive) + Karbon	G14 - 1	Kumlama	32,147	291,1	33,214	24,93	4,43	110,439	LGM
	G14 - 2	Kumlama	30,795	278,2	34,157	24,93	4,44	110,689	LGM
	G14 - 3	Kumlama	31,832	288,3	32,841	24,98	4,42	110,411	LGM
	G14 - 4	Kumlama	32,541	298,2	34,273	24,91	4,38	109,105	LGM
	G14 - 5	Kumlama	31,233	284,1	34,37	24,93	4,41	109,941	LWM

G13 alüminyum ile üretilen FML kompozitlerin sonuçlar incelendiğinde, karbon kumaş takviyesinin alüminyuma dayanım kazandırdığını söylemek mümkündür. Test sırasında kırılan numuneye ait görsel Şekil 6.1.'de verilmiştir.



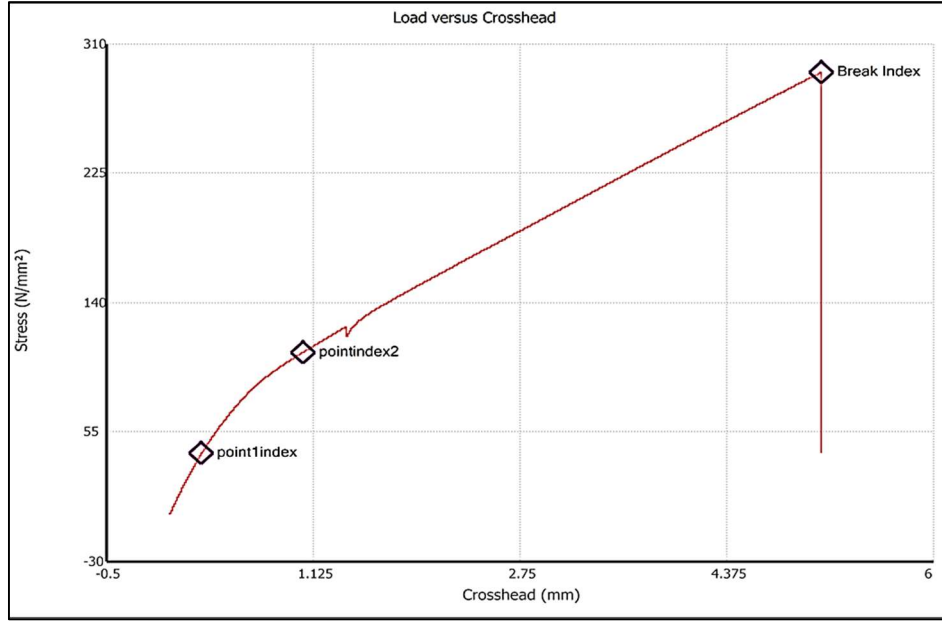
Şekil 6.1. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin çekme testi sonrası kırılma yüzeyi

Takviyesiz 1050 alüminyum malzeme için literatürde çekme dayanımı 105- 145 MPa aralığındadır. Karbon kumaş takviyesi ile FML kompozitin dayanımı ortalama 288 MPa'a kadar ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çekme dayanımında yaklaşık olarak %50 oranında bir artış gözlenmiştir. 1050 Al ile üretilen FML kompozit test numunelerinden G13-1 için çekme grafiği Şekil 6.2'de verilmiştir.



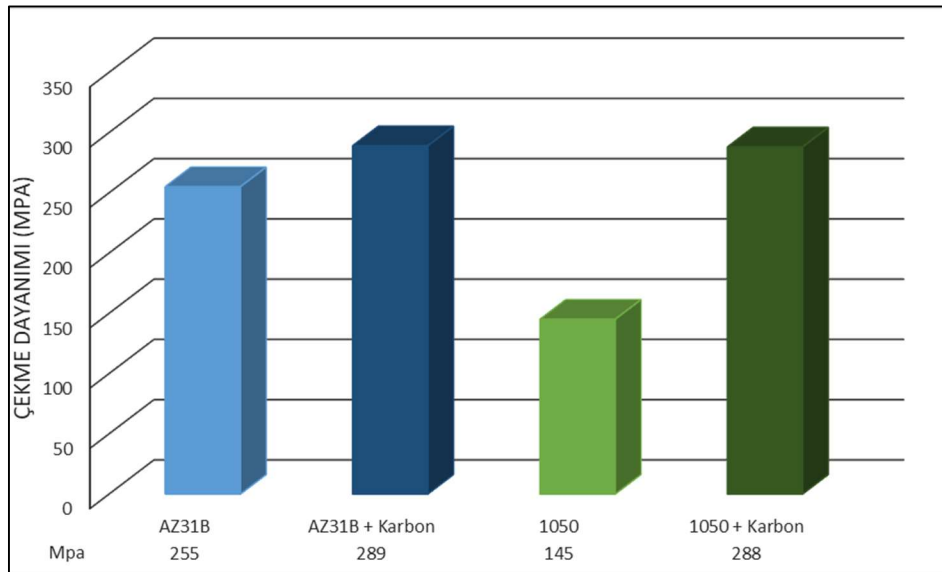
Şekil 6.2. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin (G13-1) çekme grafiği

AZ31B ile üretilen FML kompozitler için yapılan çekme testlerinde çekme dayanımının ortalama 289 MPa olduğu görülmüştür. Literatürde AZ31B alaşımı için çekme dayanımı ortalama 250 MPa olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yaklaşık %14'lük bir artış olduğu görülmüştür. AZ31B ile üretilen FML kompozit için test numunelerinden G14-1 için çekme grafiği Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3. AZ31B ile üretilen FML kompozitin (G14-1) çekme grafiği

Takviyesiz metal levhalar ile, karbon kumaşla takviye edilerek üretilen FML kompozitlerin çekme dayanımlarının karşılaştırıldığı sütun grafiği Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Metal levha ve FML kompozitlerin çekme dayanımlarının karşılaştırılması

Çizelge 6.1’de bahsedilen” kırılma türü”, ASTM 3039 standardına göre belirlenmiştir. Standartta çekme testi sonrasında numunede meydana gelen kırılmalar için türler ve kodlar verilmiştir. Şekil 6.5’te kırılma türleri verilmiştir.

İlk Karakter	
Kırılma Tipi	Kod
Açılı	A
Kenar Delaminasyonu	D
Uç –Tab	G
Yanal	L
Çoklu mod	M(xyz)
Boyuna ayrılma	S
Patlama	X
Diğer	O
İkinci Karakter	
Kırılma Alanı	Kod
Tab içinde	I
Tab üzerinde	A
< Tab'dan 1W uzaklıkta	W
Ölçüm alanı	G
Birden fazla alan	M
Çeşitli	V
Bilinmeyen	U
Üçüncü Karakter	
Kırılma Yeri	Kod
Alt	B
Üst	T
Sol	L
Sağ	R
Orta	M
Çeşitli	V
Bilinmeyen	U

Şekil 6.5. Çekme testi kırılma tipleri

Şekil 6.6’da numunelerin AGM, LAB ve LAT için kırılma tipleri verilmiştir. 1050 Al ile üretilen FML kompozit parçalar test sırasında kırılırken boyun vermiştir ve sünek bir kırılma sergilemiştir. AZ31B ile üretilen FML kompozit numunelerde ise gevrek kırılma gözlenmiştir.



Şekil 6.6. Numunelerin kırılma tipleri

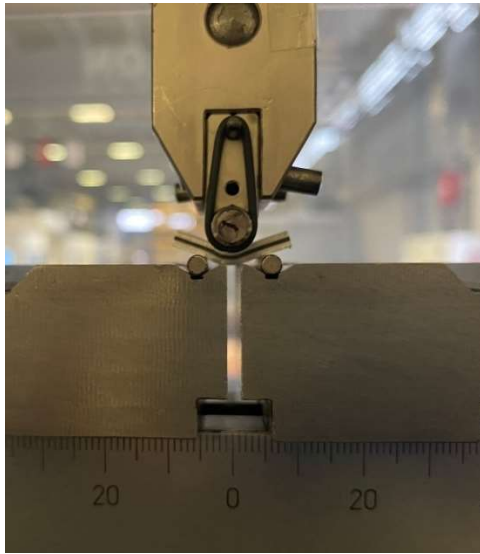
6.2. Katmanlar Arası Kayma Gerilmesi (ILSS) Testi Sonuçları

ILSS testleri de çekme testinde olduğu gibi, en sağlam yapışmanın olduğu düşünüldüğü metal ve karbonun yapıştırıcı (adhesive) film ile yapıştırıldığı test plakaları için uygulanmıştır. Standarda göre malzeme kalınlıklarının ortalaması alınıp 4 ile çarpılarak çeneler arası bırakılması gereken boşluk hesaplanmaktadır. ASTM 2344 standardı gereği 5'er adet numune test edilmiştir. Çizelge 6.2'de ILSS test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 6.2 ILSS Test Sonuçları

FML Yapısı	Numune Adı	Yüzey İşlemi	Akma Noktasındaki Yük (kN)	Akma Noktasındaki Gerilim (MPa)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Kalınlık (mm)
Alüminyum +Adhesive+ Karbon	G13-1-1	Kumlama	0,497	288,1	12,88	3,23
	G13-2-1	Kumlama	0,586	283,5	12,88	3,26
	G13-3-1	Kumlama	0,530	296,2	12,88	3,19
	G13-4-1	Kumlama	0,483	284,3	12,88	3,18
	G13-5-1	Kumlama	0,438	291,5	12,88	3,25
FML Yapısı	Numune Adı	Yüzey İşlemi	Maksimum Yük (kN)	Maksimum Gerilim (MPa)	Mesnetler arası açıklık (mm)	Kalınlık (mm)
Magnezyum +Adhesive+ Karbon	G14-1-1	Kumlama	1,69	33,7	17,52	4,36
	G14-2-1	Kumlama	1,62	31,9	17,52	4,40

1050 Al ile üretilen FML kompozit için 1 set (5 numune) test uygulanmıştır. Numunelerde beklenildiği gibi kayma veya kırılma meydana gelmemiştir. ASTM 2344 standardında testin geçerli olması için verilen kırılma türleri 1050 Al ile üretilen FML kompozitler için gerçekleşmemiştir. Alüminyumun sünek yapısı sebebiyle malzeme yük altında eğilmiş ancak kırılmamıştır. Bir noktadan sonra numune çenelere dayanmıştır. Yukarıdaki veriler numunenin çenelere dayanmadan hemen önce maruz kaldığı yük ve gösterdiği dayanımı ifade etmektedir. Şekil 6.7’ de 1050 Al ile üretilen FML kompozitler için gerçekleştirilen testin görüntüsü verilmiştir.



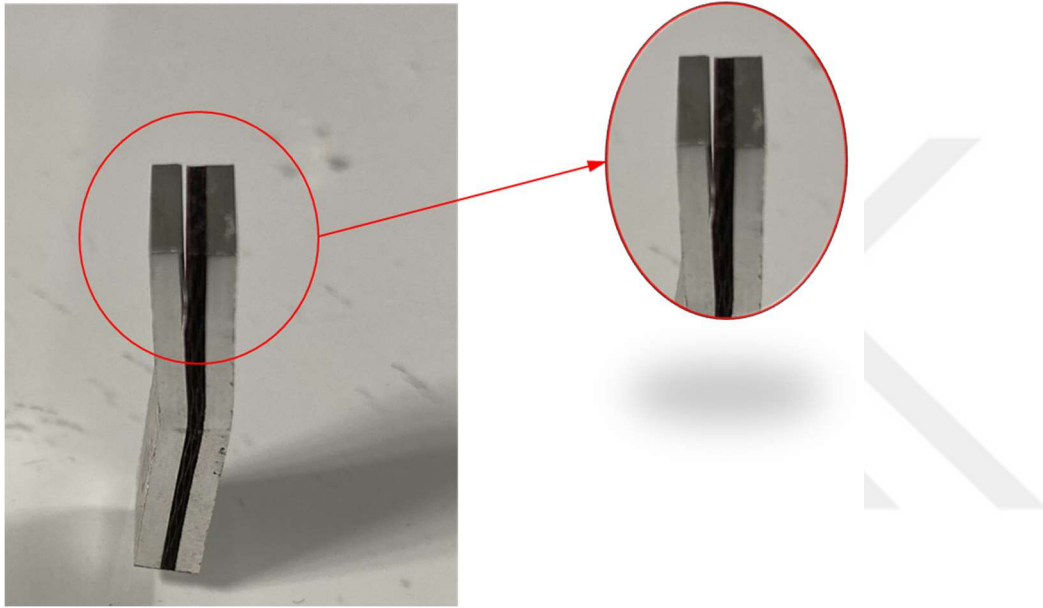
Şekil 6.7. 1050 Al ile üretilen FML kompozitin ILSS testi

Şekil 6.8’de ILSS testi sonrası 1050 Al ile üretilen FML kompozitleri kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.8. ILSS testi sonrası 1050 Al ile üretilen FML kompozitler

AZ31B ile üretilen FML kompozit malzemeleri ILSS testleri için 5 adet numune hazırlanmıştır. Ancak 2 adet numune için test gerçekleştirilmiştir. Testin devam etmemesinin sebebi, 1050 Al ile üretilen FML kompozitte olduğu gibi numunelerin yük altında kırılmayıp yükün çeneleri binmesidir. 1050 Al ile üretilen FML'lerden farklı olarak, yalnızca bir adet AZ31B ile üretilen FML kompozit numunesi için test başarıyla gerçekleşmiştir. Test sırasında numune standarda uygun şekilde kırılmıştır. Şekil 6.9.'da kırılmış test numunesinin görseli verilmiştir.

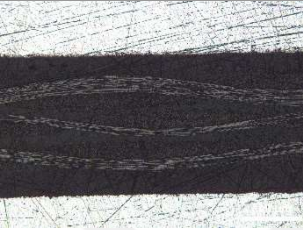
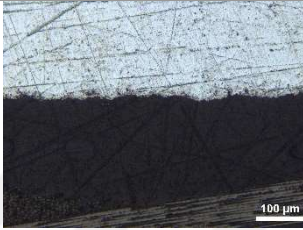
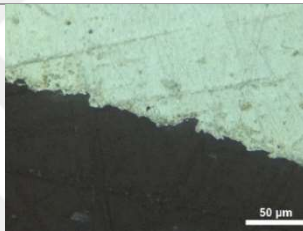
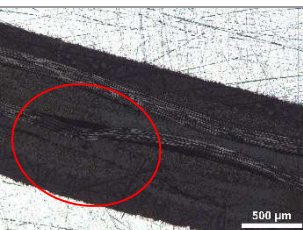


Şekil 6.9. ILSS testi sırasında kırılan AZ31B ile üretilen FML kompozit

6.3. Optik Mikroskop Görüntülerinin Yorumlanması

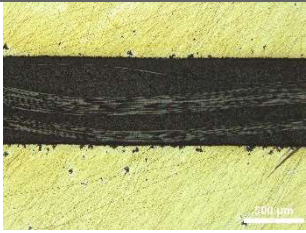
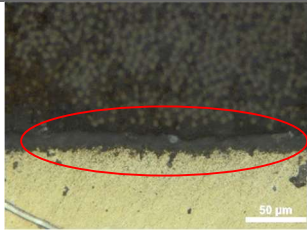
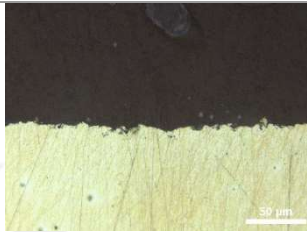
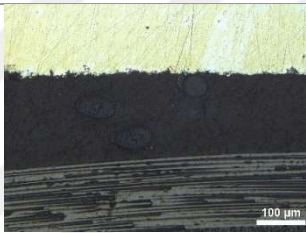
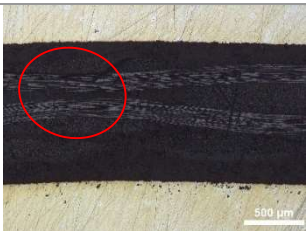
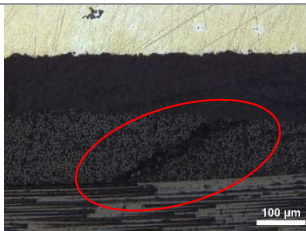
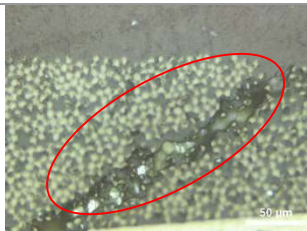
Makro boyutta yapışmanın görüldü numunelerin kesitleri optik mikroskopta incelenmiştir. Özellikle ILSS testi sırasında 1050 Al ile üretilen FML test numunelerinde uygulanan kuvvet karşısında bükülme görüldü ancak kırılma tespit edilemedi. Bu sebeple ILSS test numuneleri de optik mikroskop ile incelenmiştir. Çizelge 6.3'te 1050 Al ile üretilen FML test numunelerinin kesitlerinin görselleri verilmiştir. Çizelge 6.4'de AZ31B ile üretilen FML test numunelerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görüntüler kırılmalar ve yapışmayan bölgeler daire içerisine alınmıştır. Cam (Glass) kumaş kullanılan numunelerde yapışmanın sağlanamadığı makro seviyede görüldüğü için optik mikroskop ile görüntü alınmamıştır.

Çizelge 6.3. 1050 Al ile üretilen FML kompozitlerinin optik mikroskop görüntüleri

	x50 büyütme	x200 büyütme	x500 büyütme
G1-3			
G5-2			
G13-1 (ILSS)			
G13-1 FİBER KIRIKLARI			

1050 Al ile üretilen FML kompozitler için yapılan incelemelerde mikro seviyede de yapışmanın sağlandığı görüldü. ILSS test numunelerinde bükülmenin gerçekleştiği nokta ve çevresinde yalnızca fiberler de kırıklar tespit edilmiştir. Metalde kırılma tespit edilmemiştir. Ayrıca bükülme metal ve fiber katmanlar arasında ayrılmaya sebep olmamıştır.

Çizelge 6.4. AZ31B ile üretilen FML test numunelerinin optik mikroskop görüntüleri

	x50 büyütme	x200 büyütme	x500 büyütme
G2-4			
G6-2			
G14-1-1 (ILSS)			
G14-1-1 FİBER KIRIKLARI			

AZ31B ile üretilen FML kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde G2-4 test numunesi için x500 büyütmede metal ve fiber katman arasında ara yüzey bağının tüm yüzey boyunca oluşmadığı görülmüştür. Bağlanmanın bölgesel olduğu düşünülmektedir.

ILSS testi sırasında kırılmayan test numunesinin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde bölgesel olarak fiber katmanlarda fiberlerin kırıldığı tespit edilmiştir. Test sırasında yüke maruz kalan ve bükülmenin gerçekleştiği noktada yapılan incelemelerde, fiberlerin kırıldığı ancak metal katmanda kırılma meydana gelmediği görülmüştür. Ayrıca bükülmenin olduğu bölgelerde fiber katman ve metal katman arasında ara yüzey bağının korunduğu görülmüştür.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, AZ31B magnezyum alaşımları ile fiber kumaşların yapışabilirliği ve fiber kumaşların takviyesinin ana malzemenin dayanıma etkisi olup olmadığı, 1050 Al matrisli cam ve karbon takviyeli lamine kompozitlerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve tartışma maddeleri aşağıda verilmiştir.

- “AZ31B / cam (glass) / karbon / cam (glass) / AZ31B” kombinasyonu için zımparalama ve kumlama yüzey hazırlık işlemi fark etmeksizin yapışma gözlenmemiştir.
- CNC ile numune kesimi sırasında AZ31B / karbon / AZ31B numunesinde ayrışma görülmüştür.
- Çekme testi sonuçlarına göre 1050 Al ile üretilen FML kompozitlerin dayanımı, takviyesiz 1050 alüminyum malzemeye göre %50 artış göstermiştir.
- AZ31B FML kompozitlerin dayanımı, takviyesiz AZ31B magnezyuma göre %14 oranında artış göstermiştir.
- ILSS testleri sırasında yalnızca bir numune de kırılma görülmüştür. Sebebinin, metal malzemelerin kalınlıklarının fiber katmanlara göre kalın olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.
- ILSS sırasında kırılma görülmeyen numuneler için yapılan optik mikroskop görüntülemelerinde fiber katmanlarda kırılmalar tespit edilmiştir. Ancak metal katmanlarda mikro ölçekte bir kırılma görülmemiştir.
- Mikroskop ile yapılan incelemelerde, ILSS testi sırasında yüke maruz kalan ve eğilen noktalarda metal katman ile fiber katmanlar arasında ayrışmalar görülmemiştir.
- G2-4 numunesi için alınan optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde x500 büyütmede metal ve fiber kumaş katmanları arasında arayüzey bağının bölgesel sağlanabildiği görülmüştür.

- Farklı kombinasyonlarda üretilen magnezyum matrisli FML kompozitlerde en başarılı ve sürekli yapışma “AZ31B / yapıştırıcı film / karbon / yapıştırıcı film / AZ31B” kombinasyonunda görülmüştür.
- 1050 Al ile üretilen FML kompozitlerin hiçbir test plakasında, üretim ve testler sırasında ayrılma durumu gözlenmemiştir. Optik mikroskop ile yapılan yüzey incelemelerinde de metal ve fiber katmanlar arasında başarılı bir ara yüzey bağının olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak magnezyum alaşımları ile fiber kumaşlar arasında uygun kombinasyon (metal/karbon + yapıştırıcı (adhesive) film ve metal/karbon) ile yapışmanın mümkün görülmüştür. Fiber takviyenin çekme dayanımında sağladığı artış ve başarılı yapışma yüzeyleri magnezyum alaşımlarının fiber metal lamine üretimlerinde alternatif malzeme olarak kullanılabileceği işaretini vermektedir. İncelenen diğer çalışmalarda (literatürde) AZ31B ile üretilen FML kompozit malzemelerde dayanım artışının %14'den daha fazla olduğu görülmüştür.

Literatürde yapılan araştırmalar incelendiğinde kullanılan magnezyum malzeme kalınlığı 0,3 – 0,8 mm kalınlığındadır. Bu çalışmada literatüre göre yaklaşık %50 oranında daha kalın malzeme kullanılmıştır. M.C. Kuo ve arkadaşlarının çalışması , Mustafa Yunus Aşkın'ın yaptığı çalışma, L B Vogelesang ve J W Gunnink'nin ARALL üzerine yaptığı çalışma incelendiğinde, 1mm'den kalın metal malzemenin kullanılmadığı görüldü. Bu çalışmada kullanılan metal malzemelerin kalınlığının dayanım değerlerini etkilediği düşünülmektedir.

Kalınlık arttıkça kalıntı gerilme oranı da artmaktadır. Kalıntı gerilmeler arttıkça geri yaylanma (spring back) etkisi ile ara yüzde ayrılma (yapışmama) gibi durumlar ile sıkça karşılaşılabilir.

M.C. Kuo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2 mm kalınlığındaki magnezyum plaka sıcak haddeleme ile iki aşamada 0,5 mm nihai kalınlık elde etmiştir. Bu işlem ile magnezyum plakadaki kalıntı gerilmelerin bir kısmı giderilmiştir ve plaka yapıştırma için daha uygun hale getirilmiştir.

Düşük dayanımlı 1050 alüminyum için FML kompozit üretimi başarılı sonuçlanmıştır. Literatür araştırmalarında genellikle 2000, 5000 ve 7000 serisi alüminyum alaşımlarının kullanıldığı tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, 1050 Al alüminyumun dayanım ve yapışma konusunda alternatif bir malzeme olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.

ILSS testleri sırasında numunelerin test standardına uygun şekilde kırılma ile sonuçlanmamasının metal katmanlarda kullanılan malzemelerin kalınlığından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Daha ince kalınlıkta ve daha kalın fiber katmanlar ile elde edilecek sonuçlar merak konusu olmuştur.

Çalışma sonucunda diğer çalışmalara kıyasla beklenen dayanım değerlerine ulaşılmasa da, fiber ve metal katmanlar arasındaki yapışma ümit vericidir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: TDK Sözlük, Türk Dil Kurumu Sözlükleri. URL:<https://sozluk.gov.tr/> Son Erişim Tarihi: 22 Kasım 2023
2. S. Guo and C. T. Liu. (2011). Phase stability in high entropy alloys: Formation of solid solution phase or amorphous phase. *Progress in Natural Science: Materials International*. 21(6), 433–446.
3. İnternet: Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ders Notları. Bartın Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümü (2023). URL:<https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c/> Son Erişim Tarihi: 16.11.2023
4. Callister, William. and D. Rethwisch David G.(2011). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. (Çev. K.Genel). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
5. İnternet: Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış.(2014). *Researchgate*. URL:https://www.researchgate.net/publication/269624843_Metal_Matrisli_Kompozitlere_Genel_Bir_Bakis/Son Erişim Tarihi: 27.11.2023
6. Sönmez, M. (2009). *Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
7. İnternet: Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış. (2014). *Researchgate*. URL:https://www.researchgate.net/publication/269624843_Metal_Matrisli_Kompozitlere_Genel_Bir_Bakis/ Son Erişim Tarihi: 27.11.2023
8. İnternet: Seramik Matrisli Kompozitler. (2019). *Malzeme Bilimi.net* URL:<https://malzemebilimi.net/seramik-matrisli-kompozitler.html>/SonErişimTarihi: 24.11.2023
9. İnternet: Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler. (2022). URL:<http://www.evocopolymers.com/blog-detay/elyaf-takviyeli-polimer-kompozitler/> Son Erişim Tarihi: 27.11.2023
10. Şahin Y.(2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*.(1. Baskı). Ankara: Gazi Kitap Evi.
11. Thirukumaran, M., Siva, I., Jappes, J.T.W, Amico, S.C., Davim J.P. (2018), Investigation of Margin effect to minimize delamination during drilling of Differently Stacked GFRP-Aluminum Fiber Metal Laminates (3/2 GLARE), *Journal of Manufacturing Technology Research*, 10 (1-2)
12. Gülcan, O. , Tekkanat, K. ve Çetinkaya, B. (2019). A Review on Fiber Metal Laminates and Their Usage in Aerospace Industry. *Mühendis ve Makine*, 60(697), 262-288.
13. Ding Z. , Wang H. , Luo J. and Li N. (2020). A Review On Forming Technologies Of Fibre Metal Laminates. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 4(1). 110-126

14. Trzepieciński, T., Najm, S.M., Sbayti, M., Belhadjsalah, H., Szpunar, M. and Lemu, H.G. (2021). New Advances and Future Possibilities in Forming Technology of Hybrid Metal–Polymer Composites Used in Aerospace Applications. *Journal Composites Science* 5.217.
15. Bora M.Ö. ve Uçan C. (2023). *Hava Araçlarında Kullanılabilecek Yeni Nesil Fibermetal Tabakalı Kompozit Malzemelerin Metal/Prepreg Arayüzey Dayanımının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
16. Aşkın, M. Y. (2020). *Alüminyum ve Magnezyum Matrisli Prepreg Takviyeli Lamine Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
17. Yaban E. (2022). *Al-Li Fiber Metal Laminat Malzeme Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
18. 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.
19. Sınmazçelik T. Avcu E. Bora M. Çoban O. (2011). A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*, 32(7).1-15.
20. Akbulut S.(2023) *Bazı Fiber Metal Laminantların Çekme, Basma ve Üç Nokta Eğme Davranışlarının DeneySEL Olarak Araştırılması*. Yüksek Lisan Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
21. Şanlıtürk, S. (2020). *Al Katmanlar ile Üretilmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Delinmesinin Araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
22. İnternet: Altek Metal. (2023). URL: <https://www.altekmetal.com/>
23. Kacar, İ. Zile, M. Öztürk,F. (2006). *Havacılık Sanayinde Magnezyum Alaşımları*. 1.Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Ankara.
24. İnternet: Ca Composites.(2023) URL:<https://cacomposites.com/prepregs/kevlar-prepreg/> Son Erişim Tarihi : 05.12.2023
25. İnternet: Cam Elyaf Nedir.(2019). CTECH-LLC. URL:<https://ctech-llc.com/tr/wikitech/glass-fiber/> Son Erişim Tarihi: 25.11.2023
26. Kırhasanoğlu E.Ö. Turgut Y. (2021).Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının DeneySEL Araştırılması. *Gazi Journal Of Engineering Sciences*, 7(2), 152–159.
27. İnternet: Cam Elyaf Nedir? Nasıl Üretilir? (2021) Malzeme Bilimi.net URL:<https://malzemebilimi.net/cam-elyaf-nedir-nasil-uretilir.html>/Son Erişim Tarihi: 10.12.2023

28. İnternet: Glass Fiber Fabric Prepreg Product.(2023). Kompass. URL:<https://kr.kompass.com/p/hyundai-fiber-co-ltd/kr091946/glass-fiber-fabric-prepreg/96b3834d-23e3-426a-a06b-6d8e3076565f/> / Son Erişim Tarihi : 08.12.2023
30. İnternet: Karbon Kumaşlar. (2023). Carbomid. URL:<https://www.carbomid.com.tr/urunler/karbon-kumaslar> /Son Erişim Tarihi : 08.12.2023
31. İnternet: Hexply Prepreg. (2023). Hexply. URL:<https://www.hexcel.com/Products/Prepregs-and-Resins/HexPly-Prepregs> / Son Erişim Tarihi : 08.12.2023
32. Qureshi, A. (2020). *Vibration Analysis Of Composites Beams Structure*. Concepts Books Publication India Pvt. ltd. 24-29.
33. Federal Aviation Administration . *Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe* Ch.07 Advanced Composite Materials. Oklahoma: United States Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airman Testing Standards Branch.
34. Şekercioğlu, T. Özenç, M. (2012). Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, 53(627), 43-50
35. İnternet: Vakum Torbaları(2023). Maskim. URL:<http://www.maskim.com.tr/tr/sayfa/urun-detay/93/vakum-torbalari/0> / Son Erişim Tarihi : 15.12.2023
36. Işık, A. (2008). *Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme ve Burulma Yükü Altında DeneySEL ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
37. Maraş, S. (2020). *Fiber Metal Tabakalı Kompozit Plakaların Diferansiyel Quadrature Metodu ile Titreşim Analizi*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
38. Pelit, H. Sönmez, A. Budakçı, M. (2015). Effects of thermomechanical densification and heat treatment on density and Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern beech (*Fagus orientalis* L.), *BioResources*. 10(2), 3097-3111.
39. Tosunlu,U. (2015). *Sandviç Yapılı Kompozitlerin Darbe Davranışının Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
40. İnternet : Prof. Dr. Bilsen Beşergil, Kompozitler; Tabakalı, Yapısal (layered, structural composites). URL:https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_97.html / Son Erişim tarihi : 25 Kasım 2023.
41. Kazemi, M.E. Shanmugam, L. Yang, L. Yang, J. (2020). A Review on the Hybrid Titanium Composite Laminates (HTCLs) with Focuses on Surface Treatments, Fabrications, and Mechanical Properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.128.
42. İnternet:Matweb.URL:<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ac0c011a4d6a4948ac7b56c07f91b95f&ckck=1> / Son Erişim Tarihi : 01.12.2023

43. Çelik, M. E. (2020). *Karbon Kompozit Çarpışma Kutularında Metal Takviyesinin Çarpışma Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.





Gazili olmak ayrıcalıktır