



T.C.
TOKAT GAZİOSMANPAŞA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAZI FİBER METAL LAMİNANTLARIN ÇEKME, BASMA VE ÜÇ
NOKTA EĞME DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat AKBULUT

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Berkant DİNDAR

TOKAT-2023

ETİK SÖZLEŞME

Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Berkant DİNDAR danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bazı Fiber Metal Laminantların Çekme, Basma ve Üç Nokta Eğme Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması” adlı Yüksek Lisans tezinin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

04/01/2023

Serhat AKBULUT

JÜRİ KABUL VE ONAY



Çocuklarım Zeynep Papatya & Melik Arden için,
çalışmak için en büyük motivasyonum sizlersiniz...

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinden çalışmanın tamamlanmasına kadar yürütülen bütün aşamalarda bana yol gösteren ve rehberlik eden değerli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Berkant DİNDAR'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmamı değerlendirip tezimin son halinin şekillenmesinde katkı sunan değerli jüri üyeleri sayın Dr. Öğr. Üyesi Sait KOÇAK'a ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Mithat ŞİMŞEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarına katılan, zaman ayıran ve manevi olarak destek vererek Fatih EMEKSİZ ve Okan EROĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

İhtiyacım olduğunda hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili eşime ve çalışmam için beni motive eden çocuklarıma teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında laboratuvarlarını kullandığımız TÜBİTAK SAGE'ye teşekkür ederim.

ÖZET

BAZI FİBER METAL LAMİNANTLARIN ÇEKME, BASMA VE ÜÇ NOKTA EĞME DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Akbulut, Serhat
Yüksek Lisans, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Berkant Dindar
Ocak2023, xiii + 73 sayfa

Bu tez çalışmasında E-cam ve karbon fiber takviyeli epoxy matrisli kompozitler üretilerek 2 mm kalınlığındaki 304 paslanmaz çelik ve 5754 H-111 alüminyum levhalar ile yapıştırılarak fiber metal laminantlar oluşturulmuştur. Kompozitlerin üretilmesinde el yatırması yöntemi kullanılmıştır. Fiber kumaşlara el yatırması yöntemi ile reçine uygulandıktan sonra bir saat beklenerek reçinenin kumaşlara iyice düfize olması ve mikro hava kabarcıklarının üzeninden atılması sağlanmıştır. Devamında 400x400 mm boyutlarında reçine emdirilmiş kumaşlar ısıya dayanıklı yağlı kuşe kağıt ile paketlenerek sıcak pres de 130°C iki saat süre ile kürleşmeye tabi tutulmuştur. İki saatlik sürenin sonunda plakalar hemen çıkartılmamış kompozit plakaların ani soğumadan dolayı çarpılmaması için presin 60°C kadar soğuması beklenmiş ve presin çeneleri istenilen sıcaklığa inmesi ile presin çeneleri açılmıştır. Daha sonra metal ve kompozit plakalardan 100x100 mm boyutlarında kesilen parçalar Weicon RK 7100 çift komponentli yapıştırıcı ile birbirlerine yapıştırılarak fiber metal laminatlar üretilmiştir. Bu deney numunelerine çekme, basma ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Ayrıca kompozit levhalardan numuneler alınarak optik mikroskop ile iç yapıları incelenmiştir. Yapılan bu tez çalışmasından farklı konfigürasyondaki fiber metal laminantların dayanım değerleri göz önüne alındığında ilgili yapısal mühendislik uygulamaları için uygun olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mekanik Özellikler, E-Cam, Karbon Fiber, Epoksi, Fiber Metal Laninanatlar

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TENSILE, COMPRESSION AND THREE POINT BENDING BEHAVIORS OF SOME FIBER METAL LAMINANTS

Akbulut, Serhat
Master's Thesis, Department of Mechatronics Engineering
Advisor: Asst. Prof. Dr. Berkant Dindar
January 2023, xiii +73 pages

In this thesis, E-glass and carbon fiber reinforced epoxy matrix composites were produced and bonded with 2 mm thick 304 stainless steel and 5754 H-111 aluminum sheets to form fiber metal laminates. The hand lay-up method was used to produce the composites. After the resin was applied to the fiber fabrics by hand lay-up method, it was waited for one hour so that the resin was thoroughly dispersed on the fabrics and the micro-air bubbles were removed from it. Afterwards, resin-impregnated fabrics of 400x400 mm dimensions were packaged with heat-resistant oiled coated paper and cured in a hot press at 130°C for two hours. At the end of the two-hour period, the plates were not removed immediately, and the press was waited to cool down to 60°C in order to prevent the composite plates from colliding due to sudden cooling, and the press jaws were opened when the jaws of the press were reduced to the desired temperature. Then, the pieces cut from metal and composite plates in dimensions of 100x100 mm were bonded to each other with Weicon RK 7100 two-component adhesive and fiber metal laminates were produced. Tensile, compression and three-point bending tests were performed on these test specimens. The results are given in graphs. In addition, samples were taken from the composite sheets and their internal structures were examined with an optical microscope. Considering the strength values of fiber metal laminates in different configurations from this thesis study, it is considered to be suitable for related structural engineering applications.

Keywords: Mechanical Properties, E-Glass, Carbon Fiber, Epoxy, Fiber Metal Laminates

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK SÖZLEŞME.....	i
JÜRİ KABUL VE ONAY	ii
ÖNSÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Kompozit Malzemeler.....	3
2.2. Fiber Metal Laminantlar (FML).....	3
2.3. FML'nin Sınıflandırılması	4
2.4. FML'nin Uygulama Alanları	7
2.5. FML'nin Avantajları ve Dezavantajları	8
2.6. Fiber Malzemeleri	9
2.7. Polimerik Reçineler.....	17
2.7.1. Epoksi reçineler.....	18
2.7.2. Polyester reçineler.....	18
2.7.3. Vinilester reçineler	19
2.8. Karbon Nanotüpler.....	19
2.9. Matris-Fiber Ara Yüzeyi	20
2.10. FML'lar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	20
3. MATERYAL VE METOT	29

3.1. Kullanılan Takviye Malzemeleri.....	31
3.1.1. Kullanılan metal plakalar	31
3.1.2. Kullanılan fiber kumaşlar.....	33
3.1.3. Kullanılan epoksi reçine.....	33
3.1.4. Kullanılan yapıştırıcı	34
3.1.5. Kullanılan nanopartikül.....	35
3.2. Fiber Metal Laminantların Üretimi.....	36
3.2.1. El yatırması yöntemi	36
3.2.2. Sıcak presleme işlemi.....	38
3.2.3. Plakaların yapıştırılması.....	39
3.2.4 Plakaların kesilmesi	39
3.3.Deneysel Çalışmalar.....	40
3.3.1.Çalışmada kullanılan cihazlar	40
3.3.2. Deneyleri yapılan numuneler	42
4.BULGULAR VE TARTIŞMA	47
4.1. Çekme deneyleri.....	47
4.2 Basma deneyleri	53
4.3 Üç Nokta Eğme Deneyleri	58
4.4 İçyapı Görüntüleri	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	68
EKLER.....	74
Ek 1. Özgeçmiş	74

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Standart ARALL FML'nin sınıflandırılması (Khan ve ark., 2009)	6
Tablo 2.2. Standart GLARE FML (Vlot & Gunnink, 2001)	6
Tablo 2.3. FML'nin farklı firmalar tarafından kullanımı (Gülcan ve ark., 2019)	7
Tablo 2.3. (Devam) FML'nin farklı firmalar tarafından kullanımı (Gülcan ve ark., 2019)	8
Tablo 3.1. Alüminyum 5457 H-111 ve paslanmaz çelik 304 plakaların bazı özellikleri (Dindar, 2021; Dindar & Ağır, 2021;referansmetal.com)	32
Tablo 3.2. Alüminyum 5457 H-111 ve paslanmaz çelik 304 plakaların bazı kimyasal özellikleri (Dindar ve Ağır, 2021; Mahdavinejad ve Saeedy, 2011; Rudawska ve Wahab, 2019).....	32
Tablo 3.3.Weicon RK-7100'ün teknik bilgileri (Weicon, 2018).....	35

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fiber metal laminatlar (Gülcan ve ark., 2019).....	3
Şekil 2.2. Fiber köprüleme olayı (Gülcan ve ark., 2019).....	4
Şekil 2.3. FML'nin sınıflandırılması (Sinmazçelik ve ark., 2021)	5
Şekil 2. 4. FML'nin Airbus A380'deki kullanım yerleri (Wanhill, 2017)	7
FML'nin diğer kullanım alanları:	7
Şekil 2.5. Unidirectional (tek yönlü) kumaş	10
Şekil 2.6. Plain (düz) kumaş	10
Şekil 2.7. Twill (kabartma çizgili) kumaş.....	11
Şekil 2.8. Karbon fiber kumaş (afzir.com)	12
Şekil 2.9. PAN liflerinden karbon lif üretimi (Yaman ve ark., 2006)	12
Şekil 2.10. Cam fiber kumaş (afzir.com).....	14
Şekil 2.11. Cam fiberlerin üretim süreci (malzemebilimi.net)	15
Şekil 2.12. Aramid kumaş (carbomid.com).....	16
Şekil 2.13. Para-aramidlerin lif oluşum süreçleri (Tanner & Knoff, 1989).....	17
Şekil 3.1. Yapılan çalışmaların şematize gösterimi	29
Şekil 3.1. (Devam) Yapılan çalışmaların şematize gösterimi.....	30
Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan metal levhalar: (a) 5457 H-111 alüminyum, (b) 304 paslanmaz çelik.....	32
Şekil 3.4. Epoksi DGEBA'nın moleküler yapısı (Kim ve ark., 2009)	33
Şekil 3.5. DGEBA bazlı standart bir epoksi reçine ve sertleştiricisi	34
Şekil 3.6. Weicon RK-7100 çift komponentli yapıştırıcı	34
Şekil 3.7. Kullanılan karbon nanotüpler, (a) ÇDKNT, (b) ÇDKNT şematik moloküler yapısı (dokumtek.com)	35
Şekil 3.8. Kumaşların kesilmesi, (a) Karbon kumaş, (b) E-Cam kumaş	37
Şekil 3.9. El yatırması yöntemi.....	38
Şekil 3.10. Sıcak preslemeyle plakaların üretilmesi (a) karbon plakaların kürleştirilmesi (b), E-Cam plakaların kürleştirilmesi, (c) plakaların son halleri	38
Şekil 3.11. Metal ve kompozit plakaların Weicon RK-7100 ile yapıştırılması.....	39
Şekil 3.12. Hibrit plakalardan numune çıkarılması; (a) Kesim işlemi, (b) numuneler...	40

Şekil 3.13. ZEISS Axioscope 5	41
Şekil 3.14. Zwick Z100 çekme-basma test cihazı.	42
Şekil 3.15. Örnekbir çekme deneyi.....	42
Şekil 3.16. E-cam/epoksi/çelik konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi	43
Şekil 3.17. Karbon/epoksi/çelik konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi.....	44
Şekil 3.18. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi.....	45
Şekil 3.19. E-cam/epoksi/ ÇDNKT/alüminyum konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi.....	46
Şekil 4.1. Çekme testinden bir görünüş	47
Şekil 4.2. Hasarlı deney numuneleri, (a)E-cam/epoksi/çelik, (b) karbon/epoksi/çelik, (c)alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum	48
Şekil 4.3. Fiber metal laminant konfigürasyonlarının nihai çekme dayanımı	49
Şekil 4.4. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi	50
Şekil 4.5. Karbon/epoksi-Çelik fiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi.....	51
Şekil 4.6. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyumfiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi.....	52
Şekil 4.7. E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyumfiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi	53
Şekil 4.8. Basma testinden bir görünüş.....	54
Şekil 4.9 Hasarlı deney numuneleri, (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) Karbon/epoksi/çelik, (c) Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum	54
Şekil 4.10. Fiber metal laminan konfigürasyonlarının nihayi basma dayanımı	55
Şekil 4.11. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi	56
Şekil 4.12. Karbon/epoksi/çelik fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi.....	56
Şekil 4.13. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi.....	57
Şekil 4.14. E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi	58
Şekil 4.15. Üç nokta eğme testinden bir görünüş	59

Şekil 4.16. Hasarlı deney numuneleri, (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) Karbon/epoksi/çelik, (c) Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum.....	60
Şekil 4.17. Fiber metal laminant konfigürasyonlarının nihai üç nokta eğme dayanımı .	61
Şekil 4.18. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantıngerilme-deplasman eğrisi	61
Şekil 4.19. Karbon/epoksi/çelik fiber metal laminantıngerilme-deplasman eğrisi.....	62
Şekil 4.20. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum fiber metal laminantıngerilme-deplasman eğrisi	63
Şekil 4.21. Karbon elyaf iç yapı görüntüsü	64
Şekil 4.22. E-cam elyaf iç yapı görüntüsü	64
Şekil 4.23. E-cam/ÇDKNT elyaf iç yapı görüntüsü	65

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simge ve Kısaltmalar	Açıklama
Al	Alüminyum
Al-Li	Alüminyum-lityum
ARALL	Aramid elyaf takviyeli alüminyum laminantlar
ARALL 1	Aramidfiber/alüminyum
C	Karbon
CARALL	Karbon elyaf takviyeli alüminyum laminantlar
Cr	Krom
CFRP	Karbon takviyeli plastikler
ÇDKNT	Çoğul duvarlı karbon nanotüp
DGEBA	Diglisidil ether bisfenol A
Fe	Demir
FML	Fiber metal laminatlar
g/cm ³	gram/santimetre ³
GLARE	Cam elyaf takviyeli alüminyum laminantlar
GLARE 1	Cam fiber/alüminyum
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
Mn	Mangan
mPa.s	milipaskal.saniye
N	Newton
Ni	Nikel
N/mm ²	Newton/milimetre ²
P	Fosfor
PAN	Poliakrilnitril
S	Kükürt
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum dioksit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Zn	Çinko
°C	Santigrat derece
%	Yüzde

1. GİRİŞ

Günlük yaşamda kullandığımız malzemeler ve bu malzemelerin sahip olduğu özelliklerin insanlığın ulaşmak istediği büyük bilimsel ve teknolojik hedefler karşısında yetersiz kaldığı görülmüştür. İnsanoğlu büyük hedeflere ulaşmak istediğinde varolan kaynaklar sınırlı ise bir malzemenin nasıl ucuz, hafif ve dayanıklı olabileceğine yanıt aranmaktadır. Bu soruların yanıtını insanlık önce deneme yanılma sonra gelişen teknoloji ile bulmaya çalıştı. Hızla ilerleyen teknoloji sayesinde farklı özelliklere sahip malzemelerin güçlü yönlerinin özel olarak ve istenilen yönde tasarlanarak oluşturulankompozit malzemelere yönelinmiştir. Farklı özelliklere sahip birden fazla malzemenin özel yöntemlerle fiziksel olarak birleştirilmesi ile kompozit malzemeler ortaya çıkmış ve kompozit malzemeler günümüzde daha da önemli hale gelmiştir.

Kompozit malzemeler yorulma dayanımları, yüksek ısıl dayanımları, mukavemetlerinin ve korozyon direncinin yüksek oluşu ile birlikte rijitlik gibi özelliklerinden dolayı imalat, savunma, havacılık, otomotiv ve denizcilik sanayisinde kendisine oldukça fazla yer bulmuştur. Fiber metal laminantlar (FML) ise yukarıda bahsi geçen özelliklerin her birini sağlarken;özellikle kompozit yapıların darbe dayanımlarının az olması, fiber metal laminantın geliştirilmesindeki en önemli motivasyon kaynağı olmuştur. Özellikle uçak sanayisi için uçağın ağırlığını azaltmak, uçuş ve mekanik performansını artırmak için geliştirilmekte olan FMLkonusu araştırmacıların çokça ilgisini çekmektedir.

FML'nin üretiminin yanında çalışma ömrü ve çalışma esnasında uğrayabilecekleri hasarlara karşı davranışlarının bilinmesi, bu malzemelerden üretilen yapısal mühendislik uygulamalarında güvenle kullanılması son derece önemlidir. Bu kapsamda çalışmamızdadört farklı kombinasyonda kompozit fiber laminan türetilerek bu kompozitlere deneysel olarak çekme, basma ve üç nokta eğme dayanımları deneysel olarak incelenerek elde edilen bulgular grafikler halinde sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında üretilen FML malzemelerinin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada, yapılan testlerin sonuçları grafik ve tablolar halinde verilmiştir. Ayrıca numunelerin dijital mikroskop ile görüntüleri

alınarak deney öncesi fiberlerde mikro yapı hataları, lif yapılarının homojenliği, epoksi reçinenin dağılımı kontrol edilmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

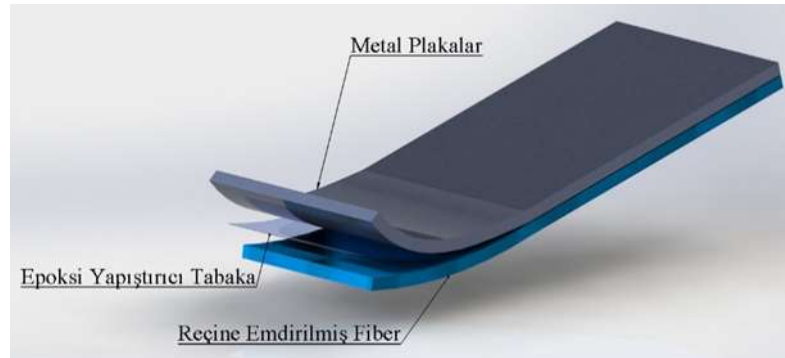
2.1. Kompozit Malzemeler

İki yada daha fazla malzemenin mikro veya makro ölçüde bir araya getirilmesiyle oluşan malzemelere kompozit malzemeler denmektedir.

Kompozit malzemeler başlıca iki kısımdan oluşmaktadırlar. Bunlardan ilki kompozit malzemeye gelen yükün taşınmasını sağlayan fiber gibi takviye elemanları, ikincisi de bu takviye elemanlarını bir arada tutan ve gövdeye şeklini veren matris kısmıdır.

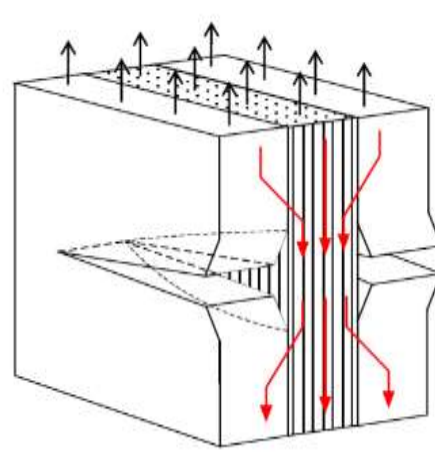
2.2. Fiber Metal Laminantlar (FML)

Tabakalı kompozitler takviye elemanlarının istenen oryantasyon açılarında üst üste dizilerek oluşturulması sonucunda oluşan kompozitlere verilen isimdir (Sezgin, 2020).FML, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi tabakalı kompozitler ve metal plakaların makro düzeyde birleştirilmesi sonucu meydana gelen kompozitlerdir. FML yüksek mekanik ve yorulma özelliklerinden dolayı genellikle uçakların kargo zemini, gövde kabuğu gibi farklı bölgelerinde kullanılmaktadır. Farklı amaçlarla kullanılacak FML üretilirken öncelikle fiber/epoksi katmanın daha iyi yapışabilmesi için metal katmanın mekanik ya da kimyasal olarak (kromik asitle ya da fosforik asitle dağlama) aşındırılması gerekmektedir. Metal ve fiber/epoksi katmanlar serildikten sonra otoklava fırınında ısı ve basıncın etkisi ile kürleme işlemi uygulanır. Kürlemeden sonra malzemede biriken kalıntı gerilmelerin giderilmesi için parçalar esnetilebilir (Sinmazçelik ve ark., 2011; Gülcan ve ark., 2019).



Şekil 2.1. Fiber metal laminatlar (Gülcan ve ark., 2019)

Fiber metal lamnantların geliştirilmesindeki en temel etkenlerden biri havacılık sanayisinde yorulma çatlaması ve bu çatlamaların büyümesi ile oluşan uçak kazaların meydana gelmesidir. Bunu önlemek adına ilk çalışma Hollanda'da bulunan Delft Teknoloji Üniversitesinde yapılmıştır. Araştırmada aynı kalınlıkta iki alüminyum tabaka ile aynı kalınlığa sahip tek parça alüminyum üzerlerine uygulanan kuvvet sonucunda görülmüş ki iki parçadan yapıştırılarak oluşan alüminyumun, yorulma çatlama performansının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Arştırmanın devamında iki metal levha arasına aramid lif yapıştırılmıştır. Bu oluşturulan yeni yapının yüzeyine kuvvet uygulanmış ve uygulanan kuvvetin ilk yüzeyde çatlama oluşturduğu, fakat diğer metal yüzeye bu çatlamanın metal katmanlar arası yükün akmasını sağlayarak (fiber köprüleme; Şekil 2.2) çatlağın durduğu görülmüştür (Asundi & Choi, 1997; Şanlıtürk, 2020; Villanueva & Cantwell, 2004). Aynı üniversite araştırmalarını karbon fiber ve cam fiber ile devam etmiştir.



Şekil 2.1. Fiber köprüleme olayı (Gülcan ve ark., 2019)

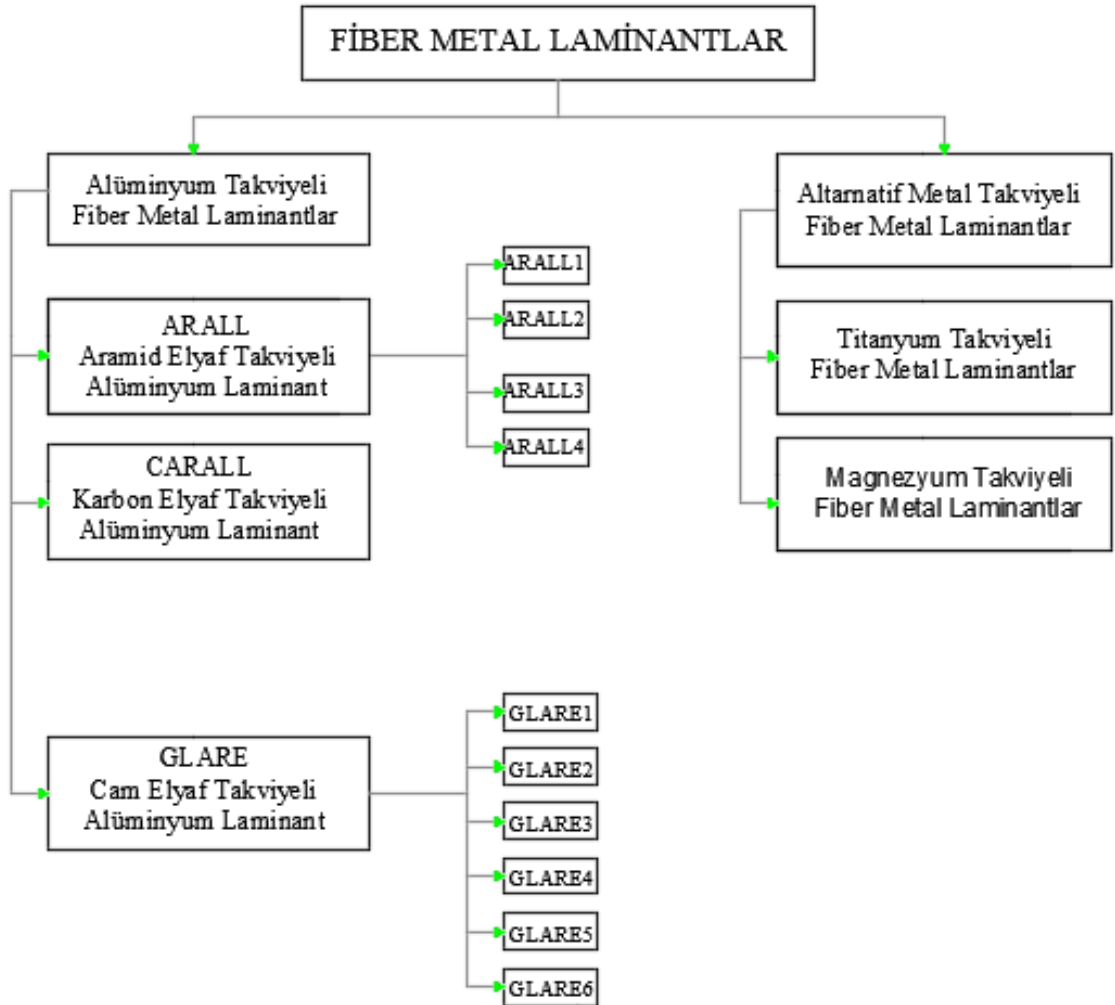
2.3. FML'nin Sınıflandırılması

FML hibrit kompozit yapıdadır. Farklı katman ve farklı alaşımlı metal plakalara sahip yapılardır. Fiber metal kompozit teknolojisi metalik ve fiber takviyeli kompozitlerin avantajlarını bir araya getirmektedir. Örneğin metalik alaşımlar izotropiktir, yüksek taşıma mukavemetlerine, yüksek darbe dirençlerine sahipken onarımları kolaydır. Kompozitler ise mükemmel yorulma dayanımı özelliklerine, yüksek mukavemete ve sertliğe sahiptir.

Metallerin dezavantajlarından olan yorulma ve negatif korozyon özellikleri kompozit malzemelerle fiber metal laminant oluşturulması durumunda bu dezavantajlar elimine edilebilir (Sinmazçelik ve ark., 2021).

Bu malzeme sistemleri, kompozit laminant katların metal plakaya yapıştırılmasıyla oluşturulur. Konsept genellikle aramid ve cam fiberli alüminyuma uygulanır. Fakat farklı mühendislik uygulamaları için karbon/epoksi kompozitler ve çelik levhalar fiber metal laminant bileşenleri olarak tercih edilebilir.

Şekil 2.3’de FML’nin sınıflandırılması verilmiştir. Metal katlar üzerinde ticari olarak en çok satılan FML; aramidfiber/alüminyum (ARALL 1), yüksek mukavemetli cam fiber/alüminyum (GLARE 1) türü laminantlardır (Sinmazçelik ve ark., 2021).



Şekil 2.2. FML’nin sınıflandırılması (Sinmazçelik ve ark., 2021)

Standart olarak kullanılan aramid elyaf takviyeli alüminyum laminant (ARALL) türü FML Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Standart olarak kullanılan ARALL1/ARALL2/ARALL3/ARALL4 de metal, fiber kalınlıkları ve fiber açıları aynı aralıklarda iken, kullanılan metalin cinsi bütün ARALL türlerinde farklıdır.

Tablo 2.1. Standart ARALL FML’nin sınıflandırılması (Khan ve ark., 2009)

ARALL Türü	Metal Cinsi	Metal Kalınlığı (mm)	Fiber Kalınlığı (mm)	Fiber Açısı (°)
ARALL1	7075-T6	0.3	0.22	0/0
ARALL2	2024-T3	0.3	0.22	0/0
ARALL3	7475-T76	0.3	0.22	0/0
ARALL4	2024-T8	0.3	0.22	0/0

Standart olarak kullanılan cam FML Tablo 2.2’de gösterilmiştir. Standart olarak üretilen GLARE’lerde, GLARE1 haricinde metal kalınlıkları ve metal cinsleri aynı aralıklarda iken, GLARE1 ve GLARE 2A’da fiber açıları aynıdır.

Tablo 2.2. Standart GLARE FML (Vlot & Gunnink, 2001)

GLARE Türü	GLARE Alt Türü	Metal Cinsi (mm)	Metal Kalınlığı (mm)	Fiber Açısı (°)
GLARE1	-	7475-T761	0.3-0.4	0/0
GLARE2	GLARE 2A	2024-T3	0.2-0.5	0/0
	GLARE 2B	2024-T3	0.2-0.5	90/90
GLARE3	-	2024-T3	0.2-0.5	0/90
GLARE4	GLARE 4A	2024-T3	0.2-0.5	0/90/0
	GLARE 4B	2024-T3	0.2-0.5	90/0/90
GLARE5	-	2024-T3	0.2-0.5	0/90/90/0
GLARE6	GLARE 6A	2024-T3	0.2-0.5	+45/-45
	GLARE 6B	2024-T3	0.2-0.5	-45/+45

2.4. FML'nin Uygulama Alanları

FML'nin başlıca kullanımında havacılık sektörü gelmektedir. Örnek olarak Şekil 3.4'deki Airbus A380 uçağının gövdesindeki FML verilebilir. Burada geleneksel alüminyum alaşımları, GLARE ve CFRP'ler, alüminyum-lityum (Al-Li) alaşımları kullanılmıştır.



Şekil 2. 3. FML'nin Airbus A380'deki kullanım yerleri (Wanhill, 2017)

FML'nin diğer kullanım alanları:

FML'nin farklı firmalar tarafından uygulanan kullanım alanları Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. FML'nin farklı firmalar tarafından kullanımı (Gülcan ve ark., 2019)

Firma/Uçak	FML'nin kullanıldığı uçak ve parça tipi	Mevcut durum	FML tipi
Bombardier	DHC 8 alt flap kabuğu	Geliştirme	ARALL
Lockheed Martin	C130 alt flap kabuğu	Geliştirme	ARALL
Bombardier	Test gövdesi	Geliştirme	ARALL/GLARE
Deutsche Aerospace	Airbus test gövdesi	Geliştirme	GLARE
Cessna	Test gövdesi	Geliştirme	GLARE
Deutsche Aerospace	Airbus basıç duvarı	Geliştirme	GLARE

Tablo 2.3. (Devam) FML'nin farklı firmalar tarafından kullanımı (Gülcan ve ark., 2019)

Firma/Uçak	FML'nin kullanıldığı uçak ve parça tipi	Mevcut durum	FML tipi
Aerospatiale	A330/A340 kokpit tavanı	Geliştirme	GLARE
USAF	C-5 gövde tamir yamaları	Geliştirme	GLARE
US Airways	737 kargo zemini	Geliştirme	GLARE
Garuda	MD-11 kargo zemini	Geliştirme	GLARE
Northwest Airlines	A320/A321 Kargo zemini	Geliştirme	GLARE
Air Canada	A320 kargo zemini	Geliştirme	GLARE
Boeing 737	Alt flap kabukları	Geliştirme	GLARE
USAF	C17 arka kargo kapısı	Uygulama	ARALL
US government	T38 sırt kaplamaları	Uygulama	ARALL
Fokker	F100 çatlak stoperi	Uygulama	ARALL
Boeing 777	Kargo zemini	Uygulama	GLARE
United 737 ve 757	Kargo zemini	Uygulama	GLARE
Qantas All Boeing Aircraft	Kargo zemini	Uygulama	GLARE
Midwest Express DC9	Kargo zemini	Uygulama	GLARE
Aviation Equipment Structures	Kargo zemini	Uygulama	GLARE
Bombardier	Lear 45 ön duvarı	Uygulama	GLARE
AT&T	Uçak elektronik kabinleri	Uygulama	GLARE

2.5. FML'nin Avantajları ve Dezavantajları

FML; uçak, otomotiv, savunma sanayisi gibi alanlarda daha dayanıklı parça üretimi, onarım ve bakım masraflarının azaltılması, yüksek performans değerlerinin arandığı,

hafifliğin istendiği durumlarda kullanılmaktadırlar. FML'nin avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

FML'nin Bazı Avantajları

- FML'nin yorulma dayanımı yüksektir.
- FML'nin korozyon, nem dayanımı metallere nazaran daha yüksektir.
- FML yüksek ısı değerleri sayesinde yangına karşı dirençlidirler.
- FML'nin darbeye gösterdiği direnç alüminyuma göre daha fazladır.(GLARE ve ARALL için)
- FML'nin çekme dayanımı alüminyumlara göre daha yüksektir (GLARE ve ARALL için) (Gülcan ve ark., 2019).

FML'nin Bazı Dezavantajları

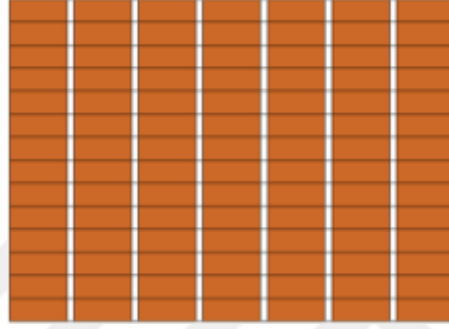
- FML'nin özellikle katmanlı uygulandığı uçak gövdeleri gibi kısımlarında zaman, işçilik ve üretim maliyetlerini artırmaktadır.
- FML'nin tamiri çok zordur.
- FML'nin aynı anda kırılma tokluğu ve mukavemet metallere kıyasla daha düşüktür (Gülcan ve ark., 2019; silo.tips.com).

2.6. Fiber Malzemeleri

Fiberler tabakalı kompozitlerin takviye malzemeleridir. Rijitlik ve çekme mukavemeti gibi özelliklerin belirlenmesinde başat rol oynamaktadırlar. Fiberlerin üretilmesi genellikle eriyiğin eğilmesi metodu ile olmaktadır. Fiberler sürekli veya kırılmış formda olabilirler. Kompozitlerde kullanılan kırılmış fiberler boy ve çap oranlarına bağlı olarak kısa fiber ya da uzun fiber takviyeli olarak sınıflandırılırlar. Boy çap oranları 100'den büyük ise uzun fiber takviyeli, küçük ise kısa fiber takviyeli kompozitler olarak isimlendirilir. Sürekli fiberler takviyeli kompozitlerde ise fiberler iplik, demet, fitil ve tel şeklinde olabilmektedirler (Eskizeybek, 2012). Bu fiberlerden farklı dokuma tekniklerine göre kumaşlar üretilmektedir. Tabakalı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan üç dokuma türü unidirectional (tek yönlü), plain ve twill dokumadır. Bu dokuma teknikleri aşağıda açıklanmıştır.

Unidirectional (Tek Yönlü) Kumaş

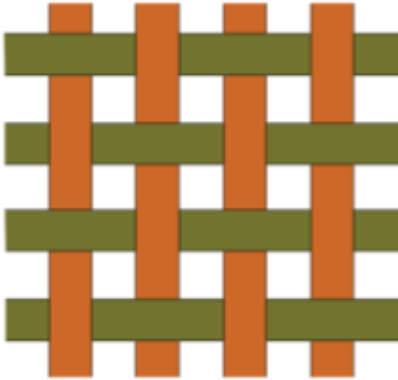
Şekil 2.5’de unidirectional (tek yönlü) kumaş türü görülmektedir. Bu kumaşlarda eksenel yönlü dayanım çok yüksek olmasına rağmen eksene dik yönde dayanım çok düşüktür. Tabakalı kompozitlerde mekanik dayanımın istenilen doğrultuda yüksek veya düşük tutulması bu kumaş türüyle rahatlıkla ayarlanabilmektedir (netcomposites.com/guide-tools).



Şekil 2.4. Unidirectional (tek yönlü) kumaş

Plain (Düz) Kumaş

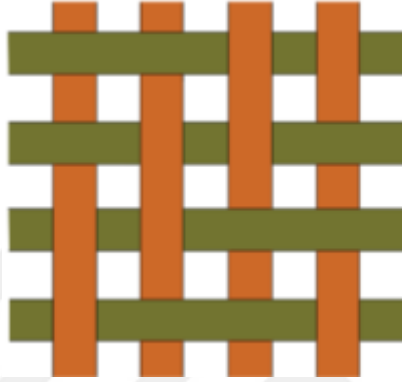
Şekil 2.6’da görülen plain kumaş türü, dayanım ve hafifliğin çok önemli olduğu uygulamalar için ideal bir çözüm sunar. Plain kumaş gözenek yapılarının dar ve simetrik dokunması sayesinde yüksek mekanik özellikler sunmaktadır (netcomposites.com/guide-tools). Ayrıca dokunmaları nisbeten kolaydır.



Şekil 2.5. Plain (düz) kumaş

Twill (Kabartma Çizgili) Kumaş

Şekil 2.7’de twill kumaş türü görülmekte olup, bu kumaş türünün tek yönlü ve plain kumaşa kıyasla dokuması zordur. Bu kumaşın kıvrımı diğer kumaş türlerine nazaran daha çok olduğundan daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir (netcomposites.com/guide-tools).



Şekil 2.6. Twill (kabartma çizgili) kumaş

Fiberler üretildikleri malzeme türüne göre ise yaygın olarak karbon, E-cam ve aramid olarak piyasada bulunmaktadır.

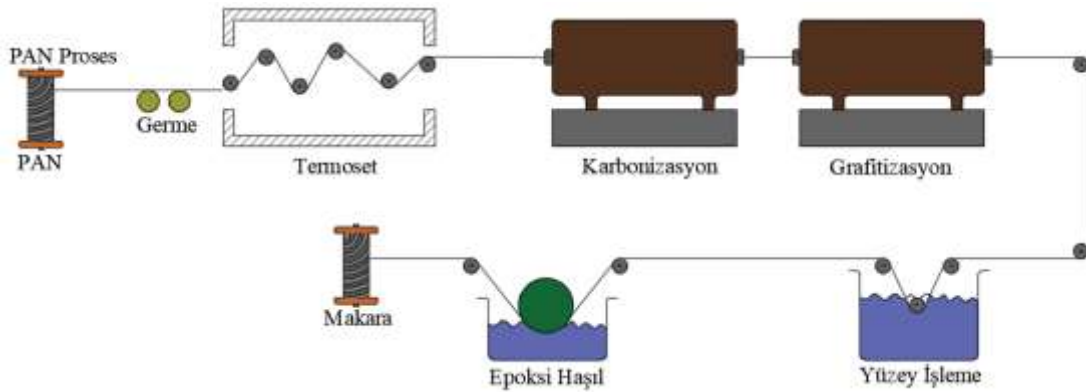
Karbon Fiber

Karbon fiber, teknoloji ürünü ipliksi bir tür maddedir. Bu maddeden üretilmiş kumaş Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Ana bileşimleri karbonlaşmış akrilik bir fiber (Orlon), katran ve naylondur. Karbon fiberin yapısı, çelikten 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Karbon fiber, naylon gibi esnek ve orlon gibi de orta derecede dayanıklı değildir. Daha sert ve çok daha dayanıklıdır (wikipedia.org/wiki/Karbon_elyaf).



Şekil 2.7. Karbon fiber kumaş (afzir.com)

Karbon fiberlerin üretiminde yaygın olarak poliakrilnitril(PAN) liflerden üretim yöntemi kullanılır. Bu yöntem toplam üretimin yaklaşık %90'nı kapsamaktadır. Bu üretim şematik olarak Şekil 2.9'da verilmiştir. Burada PAN esaslı polimerlerden karbon fiberi elde etmek için PAN lifleri oksitleme fırınından girerler ve burada sıcaklık 180-300 °C'ye çıkartılarak birkaç dakika havadaki oksijenin liflere bağlanması sağlanarak oksidatif denge oluşturulmaktadır. Devamında sıcaklık daha da arttırılarak 1000-1500 °C'de karbonizasyon (azot ortamında) sonrasında ise 1500-3000 °C'de grafitasyon süreci yani karbon harici bütün elemenlerin atılma işlemi gerçekleşmektedir. Sonrasında elektrik yüklü yüzey işleme bölümünde asitle aşındırıldırılmaktadır. Burada amaç tabakalar arası kayma dayanımını, kimyasal bağını, ıslanabilirliğini ve reçine emmesini artırmaktır. Daha sonra karbon liflerin kimyasal bağını kalıp reçinesi ile güçlendirmek için epoksi reçinesine geçirilmekte ve oluşan karbon fiber lifler makaraya sarılarak üretim prosesi tamamlanmaktadır.



Şekil 2.8. PAN liflerinden karbon lif üretimi (Yaman ve ark., 2006)

Karbon fiberler savunma sanayi, havacılık, otomotiv ve uzay sanayisinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Karbon fiberler, cam fiberlerden sonra en fazla tercih edilen fiber çeşididir. Nedenlerinden kısaca bahsetmek gerekirse karbon fiberlerin diğer yapısal malzemelerle karşılaştırıldığında grade 1020 çelikten beş kat daha sağlam ve beş kat daha hafif olduğunu, 6061 alüminyum alaşımına nazaran iki kat daha katı ve yedi kat daha sert olduğunu, karbon fiberlerin mevcut bulunan bütün metallerden daha fazla yorulma dayanımı özelliği olduğunu bilmekteyiz. Ayrıca perde ve PAN bazlı bazı karbon fiberlerin statik elektriği ve elektriksel iletkenlikleri oldukça fazladır (Bağatır, 2018).

Karbon Fiberlerin Bazı Spesifik Kullanım Alanları

- Basınçlı depolama tanklarında,
- Spor malzemelerinin (tenis, buz hokeyi, kayak gibi) hareketli kısımlarında,
- Karbon fiberler elektrik fırınlarında 3000°C'a kadar elektrik izolasyonunda,
- Uçakların fren diskinde,
- Hafifliğinden dolayı yarış arabalarının yakıt depolarında,
- Rüzgar trübinlerinde pervane üretimininde,
- Metan depolamada polarize elektrod olarak kullanılmaktadır (Yaman ve ark., 2007).

Cam Fiber

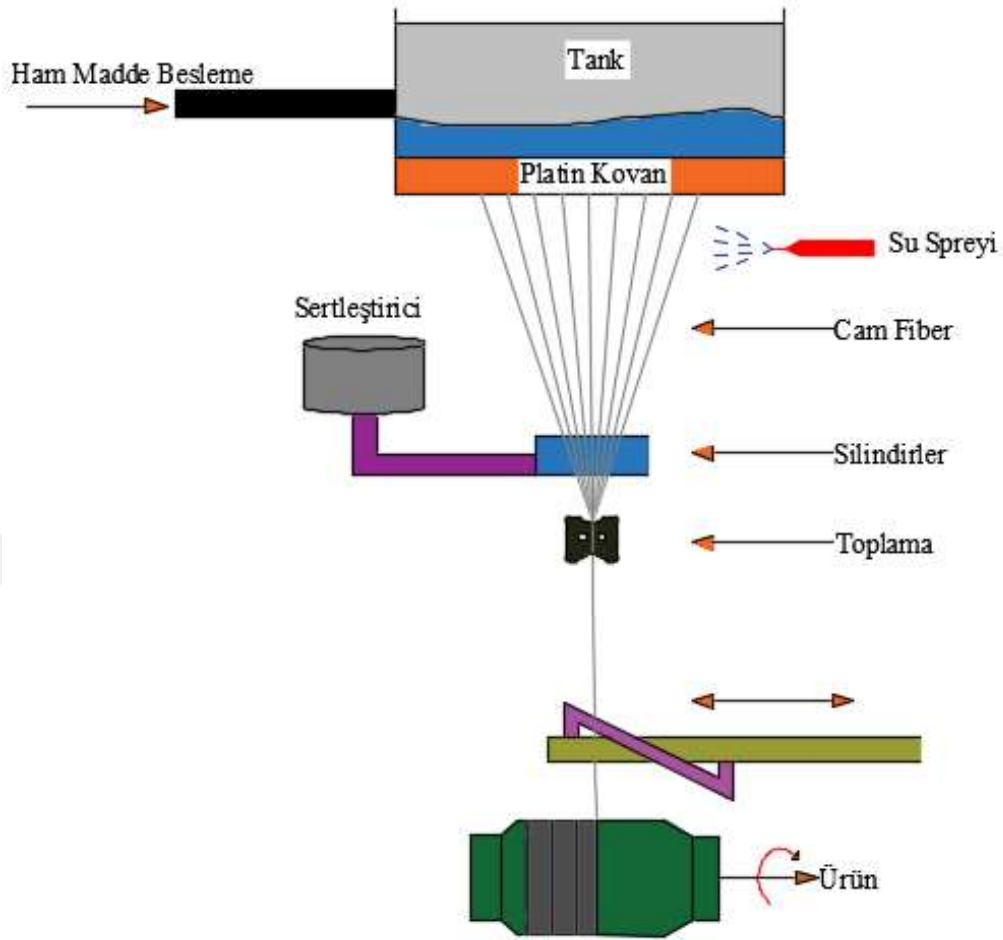
Piyasada en fazla tercih edilen ürün cam fiberlerdir (Şekil 2.10). Bunun nedenlerinden kısaca bahsetmek gerekirse üretim maliyetlerinin düşük olması sıcaklık ve korozyona karşı mukavemetleridir. Bununla birlikte elektriksel yalıtkanlığı tercih nedenlerindendir. Diğer taraftan cam fiberlerin dezavantajlarında bulunmaktadır. Bunlar kuvvet altında çatlamalar, sürtünme katsayısının ve yorgunluk direncinin düşük olmasıdır (Chawla, 2019).



Şekil 2.9. Cam fiber kumaş (afzir.com)

Cam fiber malzemelerin üretimi Şekil 2.11’de gösterildiği gibi eritilmiş haldeki camın çok küçük deliklerden geçirilip daha sonra katılaşması ile gerçekleşir. Devamında eritme işlemi yapılır. Bu işlemde cam fiberi yüksek sıcaklıktaki (1400°C) fırında eritilerek, presleme ile kovanlardan geçirilerek fiberleştirme yapılır. Fiberleştirme işlemi iki aşamalıdır, bunlardan ilki olan ekstrüzyonda, erimiş haldeki cam 200 ila 8000 delikten oluşan bir burçtan geçirilir. Burç plakaları sabit bir eriyik viskozitesi sağlanması amacı ile elektronik olarak ısıtılmaktadır. Daha sonra burçlardan 1204°C sıcaklıkta çıkan cam lifleri su jetleri tarafından su püskürtülerek soğutulmaktadır. Fiberleştirmenin ikinci aşamasında yüksek hızlı bir sarıcı erimiş haldeki cam fiberleri yakalar ve 2-3 km dev/dk. hızla rulo halinde toplayarak üretim süreci tamamlanmış olur (malzemebilimi.net).

Cam fiberlerden beklenecek özelliklere göre takviye elemanlarında yararlanılmaktadır. Bu işe harmanlama adı verilmektedir. Örnek olarak dayanımı artırmak için SiO_2 eklenirken, sıcaklığa dayanımını artırmak istediğimizde ise bor eklenmektedir.



Şekil 2.10. Cam fiberlerin üretim süreci (malzemebilimi.net)

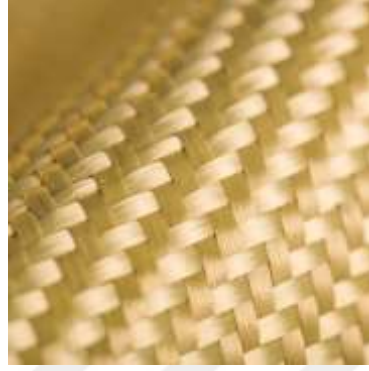
Cam Fiberlerin Bazı Spesifik Kullanım Alanları

- Savunma sanayisinde, balistik kalkan üretiminde,
- Kimyasallara karşı direnci fazla olduğunda tank imalatı ve boru imalatında,
- Tekstil sanayisinde kalıp üretmek amacıyla,
- Spor malzemelerinden olan yay ve ok yapımında,
- İnşaat sektöründe beton, alçı kalıplarda, mutfak tezgâhlarında, çatı kaplamalarında ve küvet imalatında kullanılmaktadır (malzemebilimi.net).

Aramid Fiber

Aramid naylon sınıfından yüksek performanslı yapay bir fiberdir (Şekil 2.12). Aramid fiber mekanik ısıl dayanıklılık ve mekanik dayanıklılık açısından çok yüksek

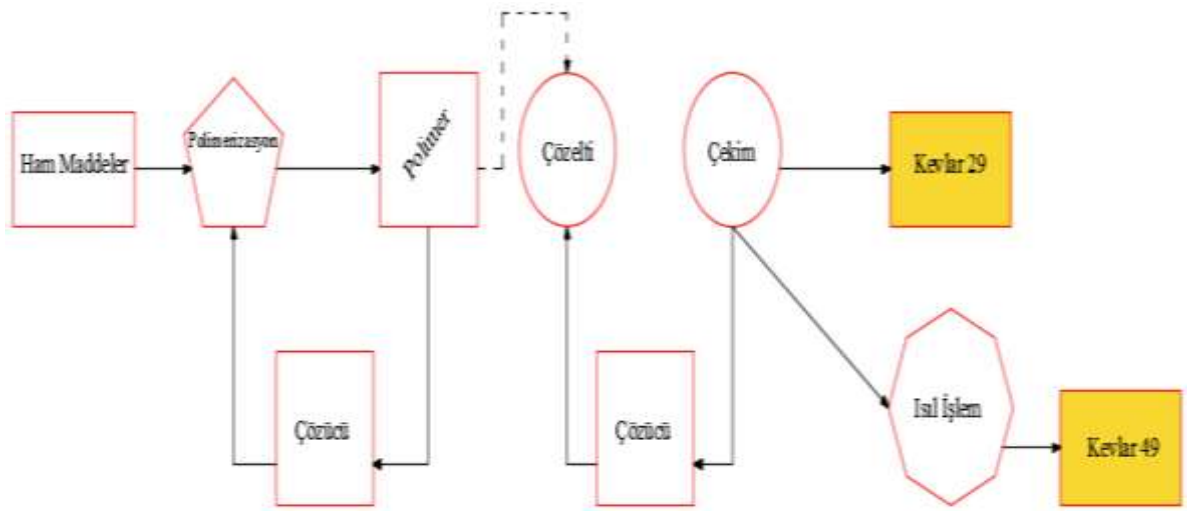
dayanıklılığı sayesinde diğer malzemelerle kompozit oluşturularak bu üstün özelliklerinin yeni oluşturulan kompozit malzemeye aktarılması sağlanmaktadır(Meryemoğlu & Erbatur, 2020).



Şekil 2.12. Aramid kumaş (carbomid.com)

Aramid lif, ısıya dayanıklı ve güçlü bir sentetik lif türüdür. Savunma sanayisinde, kurşun geçirmez giysi ve balistik bileşimlerinde, spor sektöründe ise bisiklet tekerlerinde asbest yerine kullanılabilir. Aramid ismi, "aromatik poliamit" kelimelerinin birleşiminden gelir (wikipedia.org/wiki/Aramid).

Aramid fiberler terephthaloyl klorit ve para-phenylene diamine'den üretilmektedirler (Şekil 2.13). Bu ham maddeler öncelikle bir çözücü yardımı ile eritilerek daha güçlü bir asit olan sülfürik asit (H_2SO_4) ile karıştırılmaktadır. Eriyik hale gelen karışım $70^{\circ}C$ ile $90^{\circ}C$ sıcaklık aralığında fiber demetleri halinde çekilmektedir. Çekilen bu fiber demetleri kısa bir süre havalandırıldıktan sonra dilute sülfürik asit veya su banyosuna alınmaktadır. Buna lif çöktürme banyosuda denilmektedir. Lif çöktürme banyosunun sıcaklığının oda koşullarında olması yeterlidir. Fakat mukavemet açısından çok yüksek lif üretilmek isteniyorsa lif banyosunun sıcaklığı $5^{\circ}C$ artırılabilir. Bu aşamadan sonra aramid lifler yıkanıp, kurutulup makaralara sarılır.



Şekil 2.11. Para-aramidlerin lif oluşum süreçleri (Tanner & Knoff, 1989)

Aramid Fiberlerin Bazı Spesifik Kullanım Alanları

- Yüksek ısıya dayanıklı kıyafetler ve başlıklarda,
- Mayına dayanıklı ayakkabılarda,
- Miğferlerde,
- Uçak gemilerinde uçakları yakalamak için kullanılan halatlarda,
- Kurşungeçirmez yelek yapımında,
- Fren sistemlerinde ve balatalarda asbest yerine,
- Sülfür ile birleştirildiğinde tekerlek yapımında,
- Halat ve kablo imalatında,
- Fiber optik kabloların imalatında,
- Batari yüzeylerinde,
- Hoparlör diyaframlarında kullanılmaktadırlar (wikipedia.org/wiki/Aramid).

2.7. Polimerik Reçineler

Polimerik reçineler termoplastikler ve termosetler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Aralarındaki en önemli fark termoplastiklerin molokül bağlarının zayıf olmasından dolayı katılaştıklarında tekrardan eritilerek geri dönüşümleri sağlanabilmektedir. Termoset reçinelerde ise bir kez kürlenme olduktan sonra eritilmeleri mümkün olmamaktadır. Kompozit üretiminde yaygın olarak termoset

reçineler kullanılmaktadır. Termoset reçinelerden en çok tercih edilen epoksi, polyester ve vinilester reçinelerdir. Bu reçineler kompoziti bir arada tutan matris kısmını oluşturmaktadırlar. Mekanik olarak da kompozitin basma ve kayma mukavemeti gibi özelliklerinde başat rol oynamaktadırlar.

2.7.1. Epoksi reçineler

Epoksi reçineler mekanik dayanımları yüksek ve diğer reçinelere göre daha maliyetlidir. Kalite ve dayanımın ön planda olduğu lüks yatlar, kaiteli spor malzemeleri ve lüks spor arabalarda kullanılmaktadırlar.

Epoksi reçinelerin kürleşmiş yapıları oldukça serttir. Suya, kimyasallara, soğuk ve ısıcağa karşı dayanıklı moloküller olup seramik, cam, lastik ve metale güçlü yapışma özelliği göstermekle birlikte iyi bir yalıtım özelliğine sahiptir (Aytekin ve ark., 2015).

2.7.2. Polyester reçineler

Polyester reçineler polialkoller ile dibazik asitlein tepkimesi sonucu oluşan yapılardır. Polyester reçineler termoplast, sıvı ve katı halde bulunabilirler.

Polyester reçinelerin diğer reçinelere göre fiyatları daha uygundur. Epoksilerle kıyaslandığında mekanik özellikleri nispeten daha düşüktür. Bu yüzden genellikle çok yüksek mekanik dayanımın gerekmeyen düşük maliyetli uygulamalarda tercih nedenidir. Su kaydırakları, kaydıraklar ve lunapark oyuncakları gibi yerlerde sıklıkla kullanılır.

Polyester reçineler kullanım alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

- *Kimyasal Maddelere Dayanıklı Polyester Reçineleri:* Sahip olduğu mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde kimyasal maddelere dayanıklı bir reçine türüdür. Bu tür reçineler kimyevi madde, atık su ve yakıt depolama gibi yerlerde kullanılmaktadırlar.
- *Akrilik Saniter Malzeme Takviyeli Polyester Reçineleri:* Duş teknesi, jakuzi ve küvet gibi malzeme üretiminde takviye ürünü olarak kullanılırlar.

- *Işık Geçirgen Polyester Reçineleri:* Bu tür reçineler ise genellikle ultraviyole ışınlarına karşı yüksek dayanımı sayesinde çatı örtüsü, sera kaplamaları ve aydınlatma ürünleri yapımında kullanılmaktadırlar.
- *Sıcak Pres Tipi Polyester Reçineleri:* Yüksek mekanik özelliklere ve ısıl dayanımlara sahip reçine türüdür. Bu tip reçineler çatı, cepe kaplamaları, elektrik ve doğalgaz kutularında sıklıkla kullanılmaktadırlar.
- *Düğme Tipi Polyester Reçineleri:* Özellikle tekstil sanayisi için geliştirilmiş bu reçine türü santrifüj üretiminde kullanılmaktadırlar (Bozkurt, 2014).

2.7.3. Vinilester reçineler

Vinilester reçineler polyester ve epoksi reçinelerden kullanım metodu ve görünüş olarak farklılık göstermese de mekanik ve korozyona karşı dirençleri oldukça yüksektir (Topkaya, 2017).

Vinilester reçineler diğer reçinelere kıyasla maliyet açısından epoksi kadar pahalı olmamakla birlikte, polyester kadar da çok ucuz değildir. Vinilester reçineler kimyasal dayanımı yüksek olduğundan dolayı koroziv ve kimyasal ortamlarda sıklıkla tercih edilirler (Taşkesen, 2020).

2.8. Karbon Nanotüpler

Grafenin silindirik haldeki yapısına karbon nanaotüp denmektedir. Günümüzde karbon nanotüplerin üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar yoğunlaştırma gibi yöntemler kullanılmaktadır. Karbon nanotüpler cidar sayılarına göre tek cidarlı, iki cidarlı ve çoğul cidarlı olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Karbon nanotüpler çok yüksek mekanik özelliklere sahiptirler. Çoğul duvarlı karbon nanotüpler 1 TPa'a yaklaşan elastisite modülü ve 100 GPa'lık bir gerilme kuvvetine ulaşabilirler. Bu yüksek mekanik özellikleri sayesinde tabakalı kompozit malzemelerde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemenin üretimi sırasında reçineye çok küçük miktarda katılmaktadır. Reçineye katılan bu karbon nanotüpler elyaflara fiziksel olarak saplanmakta, matrise ise kimyasal olarak bağlanmaktadır. Bu sayede matris ile fiberler arasında bir köprü görevi görerek fiber matris arayüzey kalitesini artırmaktadırlar.

2.9. Matris-Fiber Ara Yüzeyi

Tabakalı kompozitler takviye ve matris elemanı olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Takviye elemanları genellikle fiber bazlı kumaşlardan oluştururken, kompozite etki eden yükü bu takviye elemanları taşımaktadır. Matris kısmı ise genellikle reçinelerden oluşmakta ve fiberleri bir arada tutmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Kompozite gelen yükler öncelikle matrise etki etmekte daha sonra takviye malzemesine aktarılmaktadır. Kompozit malzemenin dayanımında en önemli faktörlerden birisi matris-fiber ara yüzeylerinin bağlanma kalitesidir. Bağlanma ara yüzey kalitesi arttıkça kompozitin kaliteside artmaktadır. Günümüzde bu arayüzey kalitesini artırmak amacıyla nano partikül uygulamalarına araştırmacılar yoğun ilgi göstermektedir.

2.10. FML'lar ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Birçok farklı kaynaktan yapılan literatür taraması sonucunda FML ile ilgili çok sayıda çalışma olduğu görülmüştür. Yapılan literatür taraması doğrultusunda daha az araştırmaya konu olan konfigürasyonlardan uygun görülen dört tanesi seçilerek bu dört konfigürasyon üzerine çalışılarak literatürün bu eksiğinin azaltılması amaçlanmıştır. Yapılan literatür çalışması aşağıda sunulmuştur.

Yau ve ark., (2022), FML'nin farklı sıcaklıklarda (25°C - 175°C) çekme davranışları ve hasar modları inceledikleri çalışma sonucunda numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kırılma yüzeyi taraması yoluyla mikroskobik hasar modları tanımlamışlardır. FML'nin mukavemetlerinin sıcaklık artışı ile doğrusal olmayan bir düşüş eğilimine girdiklerini ifade etmişlerdir.

Gouve ark., (2022), yaptıkları çalışmalarında (0°/90°), (0°/+45°/-45°/0°), (0°) oryantasyon açılarında ve 30, 70, 90, 110, 130, 180mm kalınlığında çelik/karbon takviyeli plastikler (CFRP), metal laminantların şekillendirilmesini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda çelik/karbon fiber takviyeli kompozit FML'den yerleşim şekli 30 mm ve (0°) oryantasyon açısına sahip numunenin diğer numunelere kıyasla en iyi şekillendirmeye sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

He ve ark., (2021), yaptıkları çalışmalarında deneysel, sayısal ve analitik yöntemlerle FML'nin en son durumu hakkında kapsamlı bir araştırma sunmuşlardır. Malzeme seçimi ve üretim tekniklerine dayalı olarak, fiber metal laminatların malzemenin darbe direncini artırmak için bazı uygulanabilir yöntemler önermişlerdir. Alüminyum fiber metal yerine poliüretan kaplı FML'nin daha sünek olduğunu ve daha fazla enerjiyi absorbe ettiğini, FML'de hangi tür metal kullanıldığı veya kullanılan fiberlerin oryantasyon açısının nasıl sıralandığının FML'ye uygulanan darbe etkisinde önemli rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Khalidve ark., (2021), yaptıkları çalışmalarında alüminyum (7075-T6) levhaları yeni özellikteki FML imal etmek için kullanmışlardır. Çalışmada ürettikleri yeni özellikteki karbon ve cam FML'nin tabakalar arası kesme dayanımını (ILSS) araştırmışlardır. Sonuç olarak karbon elyaf takviyeli alüminyum laminantların (CARALL), tabakalar arası kesme dayanımının cam takviyeli alüminyumdan daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Sharmave ark.,(2021), çalışmalarında FML'de yüksek hızdaki merminin, laminantın metal kısmındaki kalınlık değişimine olan etkisini araştırmışlardır. Araştırmada kullanılan metal malzemesi olarak titanyum (Ti-6Al-4V) alaşımı kompozit malzeme olarak ise E-cam/epoksi kullanmışlardır. Çalışmalarında hava tabancasıyla sabitlendirilmiş fiber metal laminantalara ateş edilerek yüksek hızlı delinme eşikleri tespit etmişlerdir. Sonuç olarak beş farklı kalınlık ve beş farklı tabaka açısı kombinasyonunda yüksek hızlı darbe testleri yapılmıştır. 3.41 mm kalınlığındaki [T3/0/T3/90/90/ T3/0/T3] konfrigasyonlu numune en iyi yüksek hızlı darbe dayanımını göstermiştir.

Hu ve ark., (2021), karbon/epoksi kompozitler alüminyum laminantları ile birleştirilerek CARALL FML ürettikleri çalışmalarında ürettikleri 2/1 (2 alüminyum/1 karbonfiber/epoksibu), 3/2, 4/3, 5/4 dizilimlerinde fiber laminatlara üç nokta eğme deneyleri yaparak tabakalama diziliminin eğilme davranışlarına etkisini incelemişlerdir. Deneylerinin sonucunda diğer dizilimlere kıyasla 3/2 olan fiber metal laminantın en

yüksek sertliğe sahip olduğunu, tabakalama sayısı arttıkça bükülme ve hacim özelliklerinin zayıfladığını yük taşımanın ise arttığını tespit etmişlerdir.

Dingve ark., (2021) yüksek hacimli üretim için lamina şekillendirme ve FML'nin oluşturulmasındaki deformasyon kusurları üzerine yaptıkları araştırma sonucunda termoplastiklerin termosetlere nazan daha hızlı üretildiği ve çok daha iyi geri dönüşebildikleri, elyaf takviyeli polimerlerin ve FML'nin metallerle karşılaştırıldığında deformasyon hasarları metallerden daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca FML'nin deformasyon ve hata analizleri üzerine karşılaşılan zorluklardan bahsetmişlerdir.

Annamalaive ark., (2021), fiber metal laminant kompozitlerin bir alt kolu olan GLARE'nin farklı tabaka dizilim kombinasyonlarının mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda iki fiber metal laminant GLARE hazırlamışlardır. Bunlardan ilki 3/4 layup (Aluminum-3 layers, Glass fibre- 4 layers, Al/G/G/Al/G/G/Al) ikincisinde 5/4 layup (Aluminum-5 layers, Glass fibre- 4 layers, Al/G/Al/G/Al/G/Al/G/Al) GLARE'dir. Çalışmalarının sonucunda ilk (3/4) olan üretimin daha yüksek çekme ve üç nokta eğme dayanımı sergilediğini bulmuşlardır.

Azhdarive ark., (2021), iki farklı oryantasyon açısında ($0^{\circ}/90^{\circ}$), fiber metal laminant türü olan cam elyaf takviyeli alüminyum laminantların (GLARE'in) düşük hızlı darbe tepkisini ve oluşan hasarın SEM ve optik mikroskop (OM) altında inceleyerek araştırdıkları çalışmada GLARE numunelere 8 J, 11,5 J, 15 J ve 18,5 J'lük dört farklı enerji seviyesinde darbe etkisi uygulamışlardır. Deney sonucunda darbe hasarına 18,5 J'de uğradığını ayrıca darbe enerjisi arttıkça fiber metal katmanlarda çatlak oluşumunun arttığını, delaminasyonun etkisinin en yüksek olduğu yüzeyin ise 90° 'lik açıda gerçekleştiğini bulmuşlardır.

Sunve ark., (2021), titanyum levhaya sahip karbon/epoksi kompozitli fiber metal laminatların çekme dayanımlarını yarı statik yükleme koşullarında araştırmışlardır. Araştırmada kompozit tabakaların istiflenme parametrelerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda eksenel yönlü fiberlerden oluşan fiber metal laminalı

kompozitlerin mukavemet, sertlik ve çekme dayanımlarının daha yüksek olduğunu bulmuşlardır.

Sharma ve Velmurugan (2021), metal malzemesi olarak 0,2 mm, 0,4 mm kalınlıklı titanyum (Ti-6Al-4V) levhalar kullanarak gerçekleştirdikleri araştırmada kompozit malzemesi olarak ise 0,6 mm li eksenel yönlü cam fiberli kompozit laminalar kullanılmışlardır. Aynı kalınlıkta olacak şekilde oluşturdıkları dört farklı kombinasyondaki fiber metal laminatların elastik-plastik davranışlarını incelemek amacıyla makro mekanik tipte bir ortotropik plastisite teorisi ve klasik katmalı levha teorisi kullanmışlardır.

Zhouve ark., (2021), çalışmalarında magnezyum esaslı fiber metal laminatların ara yüzey ve mekanik özelliklerini geliştirmek için Mg-Zn-Al ötektik alaşımlı lehim ile bağlamış magnezyum ve epoksi ile bağlanmış olarak iki farklı metot ile magnezyum bazlı hibrit metal laminanlar (Mg-FML'ler) hazırlamıştır. Deney sonuçlarında epoksiyle yapıştırılan magnezyum fiber laminantların diğerlerine göre daha yüksek katmanlar arası çekme performansı sergilediğini ortaya koymuşlardır.

Sezgin (2020), vakum infüzyon metoduyla epoksi reçineye nanoalümina ilave ederek takviye elemanı olarak cam ve karbon fiber kumaşlar kullandığı çalışmada 3,5 ve 7 tabakalı hibrit kompozitler üretmiştir. Üretilen bu kompozitlere yakma, çekme ve çentik darbe deneyleri uygulamıştır. Çekme ve çentik darbe deneyleri sonucunda en iyi dayanım değerlerine 7 katlı numune örneklerinde ulaşmıştır.

Dindar (2020), e-cam/epoksi/çoğul duvarlı karbon nanotüp (ÇDKNT)/alüminyum, e-cam/epoksi/ÇDKNT/bakır ve e-cam/epoksi/ÇDKNT/pirinç olmak üzere üç farklı fiber metal laminantın üç nokta eğme davranışını incelediği çalışma sonucunda bu üç konfigürasyondan en yüksek dayanımı e-cam/epoksi/ÇDKNT/alüminyum fiber metal laminantlı kompozitlerin sergilediği sonucuna ulaşmıştır.

Şanlıtürk (2020), cam farklı FML'nin delme performanslarının kesme kuvveti, iş mili devrinin (1000, 2000, 3000 dev/dk), çap sapması, maksimum çap, çapak yüksekliği ve

iş mili devrin (0.05, 0.10, 0.15mm/dev) değerleri alınarak, kullanılan takımın (yüksek hız çeliği, TİN kaplı karbür) delme üzerine etkisini inceleyen deneysel çalışmalar yapmıştır. Elde edilen sonuçlarda iş milindeki devir artışının kesme kuvvetini artırdığını, en iy kesme kuvvetini yüksek hız çeliği kullanılan takımla sağlandığını, ilerleme arttıkça çapak yüksekliği, kesme kuvveti, çap sapmasını artırdığını, iş mili devrinin artması ise delik çap sapmasını azaltırken çapak yüksekliği ve kesme kuvvetini azalttığını tespit etmiştir.

Cheve ark., (2020), FML'nin üretim sırasında verilen şekillerinin korunmasına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmalarında bunların analizinde bir analitik teori olan Eckstein teorisini kullanmışlardır. Devamında sonlu elemanlar analizi yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda iki yöntemden alınan sonuçların birbirlerine yakın olduğunu bulmuşlardır.

Heve ark., (2020), yaptıkları çalışmalarında çentikli FML'nin katman yönü, çentik şekli ve çentik boyunun etkilerini dijital görüntülü (DIC) olarak çekme testleri uygulamıştır. Çentikli FML'nin katman yönü ve çentik boyutunun bariz etkiye sahip olduğunu, çentik şeklinin ise fiber metal laminant üzerindeki etkisinin az olduğunu tespit etmişlerdir.

Kazemi ve ark., (2020), hibrit titatanyum kompozit laminantlar (HTC) ve FML arasında bir karşılaştırma yaptıkları çalışmalarında titanyumun hafiflik özelliği, sıcaklık dayanımı, sertlik, akma dayanımı, yorulma ve yüksek hızlı darbe dayanımı gibi özellikleriyle FML'ye göre havacılık, denizcilik ve askeri uygulamalarda daha iyi performans göstererek FML'den daha üstün özellikler sergilediğini ifade etmişlerdir.

Hu ve ark., (2019), farklı fiber tabaka yönelimlerinin iç yüzey kesme mukavemetine etkisini (0° , 90° , ve $\pm 45^\circ$) ve Ti/CF/PMR polyamid/fiber metal laminatların oryantasyon açılarında mekanik özelliklerini inceledikleri çalışma sonucunda tek yönlü katmanlı fiber laminatların iç yüzey kesme mukavemetleri en yüksek değere sahipken $\pm 45^\circ$ olanların nispeten düşük olduğunu bulmuşlardır.

Hu ve ark., (2019), fiber katman oryantasyon açıları (0° , 90° , $\pm 45^\circ$) olan titanyum/karbonfiber/poliimid (Tİ/CF/PMR) FML'nin mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışma sonucunda elastisite modüllerinin ve gerilmelerinin karbon fiberlerin yönlendirilmesinin uygulanan polliimid arayüzey yapıştırıcı hacminin başat rol oynadığını ve oryantasyon açılarında tek yönlü FML'nin çapraz katmanlı farklı oryantasyon açısına sahip FML'den daha yüksek eğilme mukavemetine dayandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca Tİ/CF/PMR FML'nin oryantasyon açılarının kesme mukavemeti üzerinde başat rol oynadığını ifade etmişlerdir.

Bellinive ark., (2019), çalışmalarında fiber metal laminantlı, karbon/epoksi/alüminyum (CFRP/alüminyum) kompozitlerin eğilme davranışlarını belirlemek amacıyla üç nokta eğme testleri yapmışlardır. Deney parametresi olarak katman ve yapıştırıcı etkisini araştırmışlardır. Bu bağlamda iki üretimden ilki tek alüminyum levhali iki kompozitli, ikincisi ise iki alüminyumlu üç kompozit laminalı fiber metaldir. Bu bağlamda ikincisinde yapıştırılan katman sayısı fazlalığının üç nokta eğme deneylerinde malzemeyi hasara daha elverişli hale getirdiğini belirtmişlerdir.

Bellinive ark.,(2019), FML'nin karbon/epoksi/alüminyum (CFRP/Al) tabakalar arası kesme mukavemeti üzerine yaptıkları çalışmada iki farklı arayüz parametresi üzerinde durmuşlardır. Bunlardan ilki yapısal yapıştırıcıyla oluşturulmuş ara yüzey ikincisi ise prepreg reçineli arayüzeydir. Metal kompozit hacim oranı sabit tutularak bir alüminyum levhali ve iki alüminyum levhali FML üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda levha sayısının tabakalar arası kesme dayanımını etkilemediğini ve tabakalar arası kesme dayanımına yapısal yapıştırıcının başat etki ettiğini belirlemişlerdir.

Dos Santosve ark., (2019), fiber metal laminantlı, karbon/epoksi/titanyum kompozitlerde 50, 3.2, 0.8 mm tabaka yerleşim konfigürasyonları ve ara yüzeylerde yapıştırıcı tabakaların hasar yüküne etkisini sonlu elemanlar analizi ile test etmişlerdir. Araştırmanın sonunda 0.8 mm kalınlığında titanyum katmanların kullanıldığı karbon fiber takviyeli polimerlerin en iyi sonuçlara ulaştığını, test edilen karbon/epoksi/titanyum kompozitlerde delaminasyo kohezyon oluşuma raslandığını fakat delaminasyon oluşumunun gerçekleşmediğini ifade etmişlerdir.

Majzoobive ark., (2018), FML'nin balistik olarak emilen enerji ve arıza mekanizmalarını inceledikleri çalışmalarında alüminyum/aramid/titanyum (Al/R/Ti), alüminyum/aramid/alüminyum(Al/R/Al), ve titanyum/aramid/alüminyum(Ti/R/Al), üç farklı konfigürasyonda deneyler yapmışlardır. Alüminyum/aramid/titanyum (Al/R/Ti) konfigürasyonun balistik hasar eşiği alüminyum/aramid/alüminyum(Al/R/Al), ve titanyum/aramid/alüminyum (Ti/R/Al), hasar eşiğinden yüksek olduğunu bulmuşlardır.

Balcıoğlu (2017), el yatırması metoduyla üretmiş olduğu sekiz tabakalı karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitleri bazik ve asidik (HCl) ortamlarda bir, iki, üç ve dört ay bekleterek kompozit malzemelerin statik dayanımlarını belirlemek amacıyla çeki, bası ve eğme deneyleri uygulamış ve bu ortamların kompozit numuneler üzerindeki etkisini incelemiştir. Deney sonucunda asidik yada bazik ortamda kalmayan numunenin en yüksek çeki, bası ve üç nokta eğme dayanımına sahip olduğu, asidik (HCl) ortamda 4 ay süresince bekleyen cam/epoksi katmanlı kompozitin uygulanan çekme, basma ve üç nokta eğme deneylerinden en düşük dayanım değerlerine sahip olduğu, ayrıca ister HCl ortamında isterse bazik ortamda test edilen karbon/epoksi isterse de cam/epoksi kompozitlerin bekleme süreleri arttıkça mekanik dayanımlarında azaldığını tespit etmiştir.

Demir (2017), vakum destekli el yatırması yöntemini kullanarak karbon/kumaş ve cam/kumaş ile simetrik ve simetrik olmayan hibrit kompozitler elde ettikleri çalışmasında, bu kompozitleri çoğul duvarlı karbon nano tüpler ile modifiye ederek mekanik testlerini yapmıştır. Testler sonucunda simetrik olmayan tabakalamada çoğul duvarlı karbon nano tüp modifiyesi çekme dayanımına pozitif etki ederken, simetrik tabakalamada negatif etki ettiğini, ayrıca çoğul duvarlı karbon nano tüp takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı arttığını, simetrik hibrit kompozitlerde ise düştüğünü ifade etmiştir.

Sharma ve ark., (2017), 0,2, 0,4 ve 0,6 mm kalınlıklarında alüminyum (2024-T3) levhalar ile tek yönlü cam fiber takviyeli kompozit katmanlardan oluşan fiber metal matrisli laminaların, çekme gerilme davranışlarını araştırdıkları çalışmanın sonucunda

tabaka diziliminin fiber metal matrisli laminanın çekme gerilmesini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır.

Bozkurt (2011), çalışmasında 90x25 mm ebatlarında ve 4 mm kalınlığında 18 kattan (0G°,45G°,+45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,45G°,0C°,0C°,45G°,+45G°,0G°,90G°,0G°,+45G°,45G°,0°) oluşan ve farklı tabakalama (C1,C2) konfigürasyonunun etkisini görebilmek amacıyla iki farklı sınır şartında (A=Ankastre/B=Basit)ve 2m/s, 2.5m/s, 3m/s hızlarında karbon/epoksi ve E-cam/epoksi kompozitlere düşük hızlı darbe deneylerini yapıp oluşan hasar ve elastik özelliklerin değişimini incelemiştir. Çalışmasının sonucunda C2 Konfigürasyonlu üretilen mazeme, C1 konfigürasyonlu üretilen malzemeden daha az enerjiyi absorbe ettiğini, ankastre mesnete uygulanan darbe enerjisinin,elastik özelliklerindeki düşüş basit mesnetkonfigürasyonundaki malzemeye göre daha fazla olduğunu tespit etmiştir.

Alderliesten ve Benedictus (2009), karbon ve cam FML'nin yapıştırılması ve perçinlenmesi üzerine birdizi deneysel çalışma yapmışlardır. Araştırma sonucunda yapıştırılmış FML'nin perçinlenmiş FML'den daha iyi performans sergilediklerini tespit etmişlerdir. Fakat perçinli FML'nin ise eklem yerlerinde daha iyi taşıma mukavemeti sağladıklarını belirtmişlerdir.

Botelho ve ark., (2006), yaptıkları çalışmada havacılık endüstrisi için FML'nin kombinasyonunun, mekanik özellikler üzerine birçok avantaj sağladığını; özellikle FML'nin karbon/epoksi kompozitlerle karşılaştırıldığında düşük nem emilimi sunduğunu, havacılık endüstrisinin uçak gövdelerinde, hem maliyeti düşürmek hemde zorlu atmosfer koşullarında uçuş güvenliğini sağlamak amacıyla alternatif fiber metal laminant malzemelere yöneldiklerini ifade etmişlerdir.

Cortes ve Cantwell (2006), titanyum bazlı FML'nin farklı lif ofset açısı (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) değerlerinin etkisini ve gerilme, yarı statik gerilme özellikleri araştırdıkları çalışmalarında 0° ve 15° açılarında karbon liflerinde meydana gelen kırılma sorucunda hasar meydana geldiğini, 15°'den büyük ofset açılarında fiber matris ara

yüzeyinde bağlar çözülerek bölgesel hasar meydana geldiğini, ayrıca 0° ile 45° arasında olan FML'nin ise kompozit katmanlarında ayrışmalar olduğunu bulmuşlardır.

Asundive Choi Alta (1997), uçaklarda fiber metal laminant kullanımının sağlayacağı faydalar üzerine yaptıkları bir dizi çalışmada uçaklarda fiber metal laminant kullanımının üretim, işletme maliyetinin azaltmasının yanısıra yapısal ağırlığını düşürdüğünü ve yorulma çatlakları genişlemesini de önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca oluşturulan bu FML'nin sivil taşıma uçaklarının (VLCT) gövde ve alt kanat malzemesi olarak kullanılmasının umut verici olduğunu ifade etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez kapsamında öncelikli olarak dört farklı kombinasyonda deney numuneleri üretilmiştir. Daha sonra üretilen bu deney numunelerinin çekme, basma ve üç nokta eğme deneyleri üçer tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca kompozit malzemelerin içyapısı ZEISS Axioscope 5 dijital mikroskop ile 200X büyütme yapılarak alınan görüntüler incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan bu çalışmalar Şekil 3.1’de şematize olarak gösterilmiş, ayrıca ayrıntılı bir şekilde alt başlıklar halinde açıklanmıştır.



Şekil 3.1. Yapılan çalışmaların şematize gösterimi



Şekil 3.1. (Devam) Yapılan çalışmaların şematize gösterimi

3.1. Kullanılan Takviye Malzemeleri

Bu bölümde numunelerin üretiminde kullanılan takviye malzemelerinin özellikleri alt başlıklar halinde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

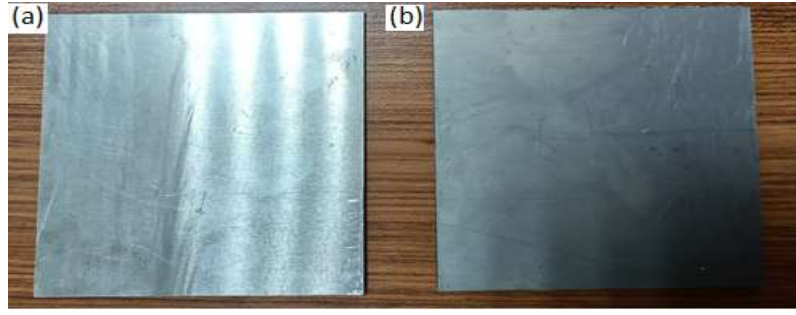
3.1.1. Kullanılan metal plakalar

Bu tez çalışmasında Şekil 3.2 (a)'da gösterilen 2 mm kalınlığında 5754- H111 alüminyum plakalar kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum metal levhalar Ankara'da faaliyet gösteren METAL REYONU firmasından tedarik edilmiştir.

5xxx serisinin alüminyum alaşımları, iyi özgül güçleri, mükemmel korozyon direnci ve gerinimle sertleşebilirlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bunların en büyük dezavantajı, nispeten düşük akma mukavemetleridir. Standart şekillendirme yöntemleriyle deformasyon uygulamak bu eksik giderilebilmektedir. (Ezequiel ve ark., 2020; Taktak ve ark., 2017).

Şekil 3.2 (b)'de gösterilen 2mm kalınlığında 304 paslanmaz çelik plakalar Tokat'ta faaliyet gösteren BORUSAN firmasından tedarik edilmiştir.

Paslanmaz 304 çeliğin çok farklı endüstriyel kullanım alanları bulunmaktadır. Bunlardan başlıcaları madencilik, gıda, kimya ve havacılık birleşenlerindedir. Ayrıca paslanmaz çelik 304 yüksek mukavemeti sayesinde zorlu kimyasal ortamlara maruz kalan parçalarda oksidasyona karşı dirençli olması nedeniyle tercih sebebidir (Kumar ve ark., 2021; Mahdavinejad ve Saeedy, 2011). Fakat bu çeliğin kullanımının ana ikilemi, düşük ısı iletkenliği ve sertleştirme işleminin zor olması sebebiyle işlenmesinin karmaşık ve zor olmasıdır (Pradhan ve ark., 2015).



Şekil 3.2. Tez çalışmasında kullanılan metal levhalar: (a) 5457 H-111 alüminyum, (b) 304 paslanmaz çelik

Kullanılan bu metal plakların bazı özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Alüminyum 5457 H-111 ve paslanmaz çelik 304 plakaların bazı özellikleri (Dindar, 2021; Dindar & Ağır, 2021;referansmetal.com)

<i>Malzeme</i>	<i>Elastite modülü (GPa)</i>	<i>Çekme dayanımı (MPa)</i>	<i>Poisson oranı (ν)</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm^3)</i>
Alüminyum 5457 H-111	68	215	0,33	2,680
Paslanmaz çelik 304	193	686	0,26	7,93

En yaygın kullanılan paslanmaz çelik 304 içerisinde %18 ile %20 arasında değişen oranda krom, %8 ile % 10,5 arasında değişen oranda nikel bulunur. Ayrıca normal çeliğe göre korozyona karşı daha yüksek bir dirence sahiptir ve kolayca farklı formlara dönüştürülebileceği için yaygın olarak kullanılmaktadır (Thunaipragasam ve ark., 2021). Tablo 3.2’de deney numunelerinde kullanılmış olan Alüminyum 5457 H-111 ve paslanmaz çelik 304’ün bazı kimyasal özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2. Alüminyum 5457 H-111 ve paslanmaz çelik 304 plakaların bazı kimyasal özellikleri (Dindar ve Ağır, 2021; Mahdavinejad ve Saeedy, 2011; Rudawska ve Wahab, 2019)

<i>Malzeme</i>	<i>C</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Co</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>	<i>Zn</i>
Alüminyum 5457 H-111	-	>0,03	-	>0,5	>0,4	-	-	-	>0,4	>0,20
Paslanmaz çelik 304	0,0466	18,07	8,11	1,37	0,46	0,46	0,028	0,0006	71,514	-

3.1.2. Kullanılan fiber kumaşlar

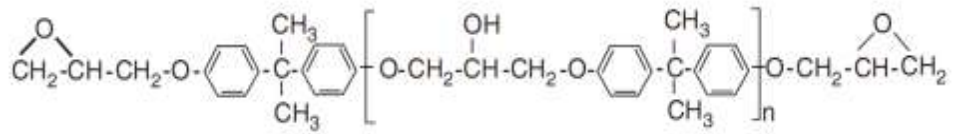
Tezde kompozit levhaların üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan kumaşlar Şekil 3.3’de verilmiştir. Şekil 3.3 (a) 200 g/m² plain dokuma E-cam kumaş, 3.3 (b) 200 g/m² plain dokuma karbon kumaş, 3.3 (c) 330 g/m² unidirectional (tek yönlü) E-cam kumaşlar görülmektedir. Bu kumaşlar İzmir’de faaliyet gösteren KOMPOZİTSAN firmasından tedarik edilmiştir.



Şekil 3.3. Tez çalışmasında kullanılan (a) 200 g/m² plain dokuma E-cam kumaş, (b) 200 g/m² plain dokuma karbon kumaş, (c) 330 g/m² unidirectional (tekyönlü) E-cam kumaş

3.1.3. Kullanılan epoksi reçine

Tez çalışmasında kullanılan epoksi reçineler kompozitlerin üretimi, kaplama, yapıştırıcı veya genel amaçlı kullanılmaktadırlar. Epoksi reçineler diğer polimer yapıştırıcılardan farklı olarak, çevresel etkilere dayanımlı ve mekanik özellikleri yüksektir. Ayrıca kimyasallara karşı koyma dirençleri fazla olmalarından dolayı önemli yapıştırıcılar gurubuna girerler(Dindar, 2019). Bu tez kapsamında; kullanılan epoksi reçineler İzmir’de faaliyet gösteren MEDUZA karbon firmasından tedarik edilmiştir. Şekil 3.4 DGEBA’nın moleküler yapısını göstermekte iken, şekil 3.5’te çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici görülmektedir.



Şekil 3.4. Epoksi DGEBA’nın moleküler yapısı (Kim ve ark., 2009)



Şekil 3.5. DGEBA bazlı standart bir epoksi reçine ve sertleştiricisi

3.1.4. Kullanılan yapıştırıcı

Bu tez çalışmasında Şekil 3.6’da gösterilen Weicon RK-7100 çift komponentli yapıştırıcı kullanılmıştır. Alman menşei olan bu yapıştırıcı Ankara’da faaliyet gösteren ETİTECHS ENDÜSTÜRÜYEL SAN. ithalatçı firmasından tedarik edilmiştir. RK-7100 yüksek kesme, çekme ve soyulma dayanımı ile metaller, seramikler, plastikler ve ahşap malzemeleri birbirlerine yapıştırmak için kullanılmaktadır. Özellikle yüksek mukavemetin istendiği yapısal uygulamalar için idealdir (Weicon, 2018). Weicon RK-7100 teknik özellikleri Tablo 3.3’de gösterilmiştir.



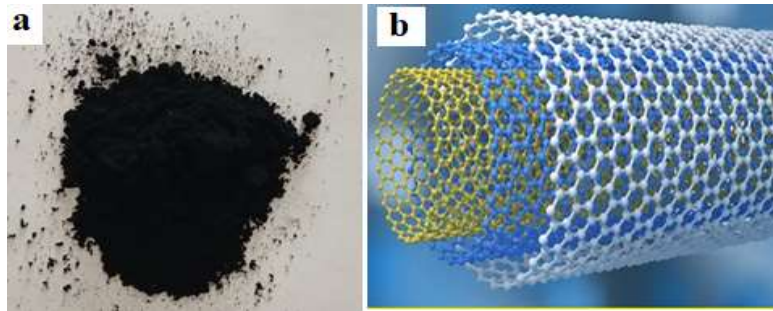
Şekil 3.6. Weicon RK-7100 çift komponentli yapıştırıcı

Tablo 3.3.Weicon RK-7100'ün teknik bilgileri (Weicon, 2018)

Weicon RK-7100 Teknik Bilgiler	
Temel	Metil metakrilat
Sertleşmeden sonra renk	Krembeyaz, sütümsü
Karışma oranı Reçine/Sertleştirici	1:1
Karışımın yoğunluğu	0,98 - 1,02 g/cm ³
Karışımın viskozitesi	40.000 - 60.000 mPa·s
O +20°C'de uygulama süresi (+68°F)	5 dk.
İşleme sıcaklığı	+10 ile +40 °C arası
Nihai sertleşme (%100 güç)	12 saat
Alüminyum Yapıştırma Mukavemeti	20 N/mm ²

3.1.5. Kullanılan nanopartikül

Şekil 3.7.(a)'de görülen karbon nanotüpler İzmir'de faaliyet gösteren EGE NANOTEK firmasından çoğul duvarlı (Şekil 3.6.(b)) ve – OH ile fonksiyonelleştirilmiş olarak temin edilmiştir.Çalışmada kullanılan epoksi reçine (%60), sertleştiricinin (%40) içerisine %0,5'i kadar çoğul cidarlı karbon nano partikül eklenmiş ve mekanik olarak karıştırılmıştır. Bu karbon nanotüplerin dış çapları 10-20 nm, iç çapları 5-10 nm, uzunlukları 0,5-2 mikrometre (µm) uzunluğunda, saflıkları %98 ayrıca yoğunlukları ise 0.22 g/cm³'dür.



Şekil 3.7. Kullanılan karbon nanotüpler, (a) ÇDKNT, (b) ÇDKNT şematik moleküler yapısı (dokumtek.com)

3.2. Fiber Metal Laminantların Üretimi

Önce kumaşlar 400x400 mm ölçülerinde kesilerek düz bir zemin üzerine yatırılmıştır. Ardından üretici firmanın tavsiye ettiği oranda karıştırılmış olan %40 sertleştirici ve %60 epoksi reçine bir rulo yardımı ile kumaşlara boşluk kalmayacak şekilde sürülmüştür. Daha sonra reçinenin kumaşlara iyice difüze olması ve üzerinde mikro kabarcıklarını atabilmesi için bir saat süreyle beklenmiştir. Aynı bir kapta karbon nanotüpler tartılarak reçineye ağırlıkça %0,5 oranında katılarak mekanik olarak karıştırılarak homojenize edilmiştir.

3.2.1. El yatırması yöntemi

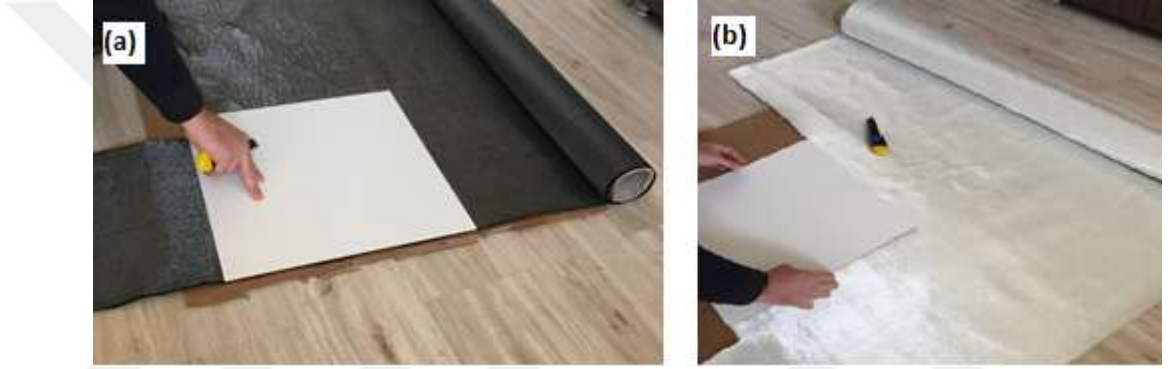
El yatırması, fiber/kumaş takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın ve en eski açık kalıplama yöntemidir. Bu yöntem bir kalıba elle yerleştirilen fiber/kumaşların bir fırça veya rulo ile reçine uygulanması esasına dayanmaktadır (makrokompozit.com, 2022).

El yatırması yönteminin uygulanacağı ortam serin (10°C) olmalıdır. Eğer sıcaklık 10°C'nin altındaysa, sertleştirici oranı artırılmalıdır. Üretim sırasında havanın yeteri kadar kuru olması gereklidir. Havada nemden dolayı bulunan su zerrecikleri, reçinenin tam olarak görevini yapmasını engellemektedir. Bu durumun oluşturacağı hatalar kimyasal katkılarla bile iyileştirilememektedir (Yalçın, 2012).

Kompozit üretiminde kullanılacak olan matris malzemesi üreticiden alındığında beraberinde genelde hızlandırıcı da verilir. Verilen bu hızlandırıcı öncelikle üreticinin tavsiye ettiği oranda reçineye ilave edilir. Bu malzeme reçineye katıldıktan sonra çok iyi karıştırılmalı ancak bu işlem sırasında reçine kabının çalkalanmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü hava kabarcıkları tekrar matris malzemesine girebilir. Eğer gerekliyse, reçine kabı bir süre durgun olarak bekletilerek hava kabacıklarından arındırılmalıdır. Sertleştirici, reçine sürülmeye hazır hale geldikten sonra eklenmelidir. Çünkü sertleştirici eklendikten sonra reçinenin sınırlı bir raf ömrü kalır. Sertleştirici katılma oranı çok kritik değildir, fakat üreticinin tavsiye ettiği oranı kullanmak gerekir.

Hızlı bir jelleşme zamanı isteniyorsa ya da üretim yapılan ortam sıcaklığı düşük ise sertleştirici malzeme oranı artırılabilir ya da jelleşme zamanı uzatılmak isteniyorsa veya ortam sıcaklığı yüksek ise sertleştirici malzeme oranı azaltılabilir (Yalçın, 2012).

Çalışmada uygulanan elle yatırma işleminde önce şekil 3.8’de görüldüğü üzere marangoza 400x400 mm ebatlarında kontrplaklar kestirilmiştir. Daha sonra bu kontrplakalar mastar olarak kullanılarak karbon fiber ve cam fiber kumaşlar maket bıçağı kullanılarak kesilmiştir.



Şekil 3.8. Kumaşların kesilmesi, (a) Karbon kumaş, (b) E-Cam kumaş

İzmir’de faaliyet gösteren MEDUZA karbon firmasından temin edilen DGEBA bazlı standart (%60 oranında) epoksi reçine ve (%40 oranında) sertleştirici üretici firmanın tavsiye ettiği şekilde bir kaba alınarak tahta bir çubuk ile mekanik olarak 5 dk süreyle karıştırılmıştır (bkz. Bölüm 3.1.3. Kullanılan epoksi reçine).

Daha sonra kumaşlar düz bir zemine yatırılmış ve bir rulo yardımı ile hazırlanmış olan reçine sertleştirici karışımı Şekil 3.9’deki gibi kumaşlara boşluk kalmayacak şekilde uygulanmıştır. Mikro kabarcık oluşumunu önlemek ve reçinenin kumaşlara iyice difüze olabilmesi için bir saat süre ile beklenmiştir.



Şekil 3.9. El yatırması yöntemi

3.2.2. Sıcak presleme işlemi

Şekil 3.10 (a) ve (b)' deki reçine emdirilmiş karbon ve E- cam kumaşlar 130 °C' de 3 saat 7 bar basınç altında MEDUZA karbon firmasında preslenerek kürleştirilmiştir. Kürleştirilen plakaların çarpılmasını önlemek amacıyla presin çeneleri hemen açılmayarak sıcaklığın 60°C'ye inmesibeklenmiştir. Presin sıcaklığı istenilen değere geldiğinde plakalar alınmış ve oluşan çapaklar, çapak temizleme testeresi ile temizlenmiştir. Plakaların son hali Şekil 3.10 (c)' deki gibi oluşmuştur.



Şekil 3.10. Sıcak preslemeyle plakaların üretilmesi (a) karbon plakaların kürleştirilmesi (b), E-Cam plakaların kürleştirilmesi, (c) plakaların son halleri

3.2.3. Plakaların yapıştırılması

Öncelikle üretilen metal ve kompozit plakalar işlem kolaylığı açısından 100x100 mm ebatlarında kesilerek hazırlanmıştır. Metal plakalar yapıştırılmadan önce döner keçeyle tutularak üzerlerinde fabrika imalatları sırasında oluşan kaygan parlak tabaka alınmıştır. Daha sonra suya tutularak üzerlerindeki tozlar giderilmiş ve basınçlı hava tutularak kurutulmuştur. Kompozit plakalar ise üzerlerindeki toz ve partikülleri sadece suyun altına tutulup basınçlı hava yardımıyla yüzeyleri yapıştırılmaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere bu plakalara Weicon RK-7100 çift komponentli yapıştırıcıyı yapıştırma aparatı yardımıyla yapıştırıcı sertleştirici oranı 1:1 olacak şekilde yüzeylere tatbik edilmiş ve sonrasında üzerlerine bir kilo ağırlık konularak oda sıcaklığında kürleşmesi için üç gün beklemeye alınmıştır.



Şekil 3.11. Metal ve kompozit plakaların Weicon RK-7100 ile yapıştırılması

3.2.4 Plakaların kesilmesi

Oluşan plakalar Şekil 3.12’deki gibi Tokat Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Metal Teknolojisi Atölyesinde bulunan ince uçlu daire testere yardımı ile 20x100 mm

ebatlarında sürtünmeden kaynaklı ısı hasarını engellemek amacıyla bor sıvısı ile kesme işlemi gerçekleştirilmiştir.



şekil 3.12. Hibrit plakalardan numune çıkarılması; (a) Kesim işlemi, (b) numuneler

3.3.Deneysel alıřmalar

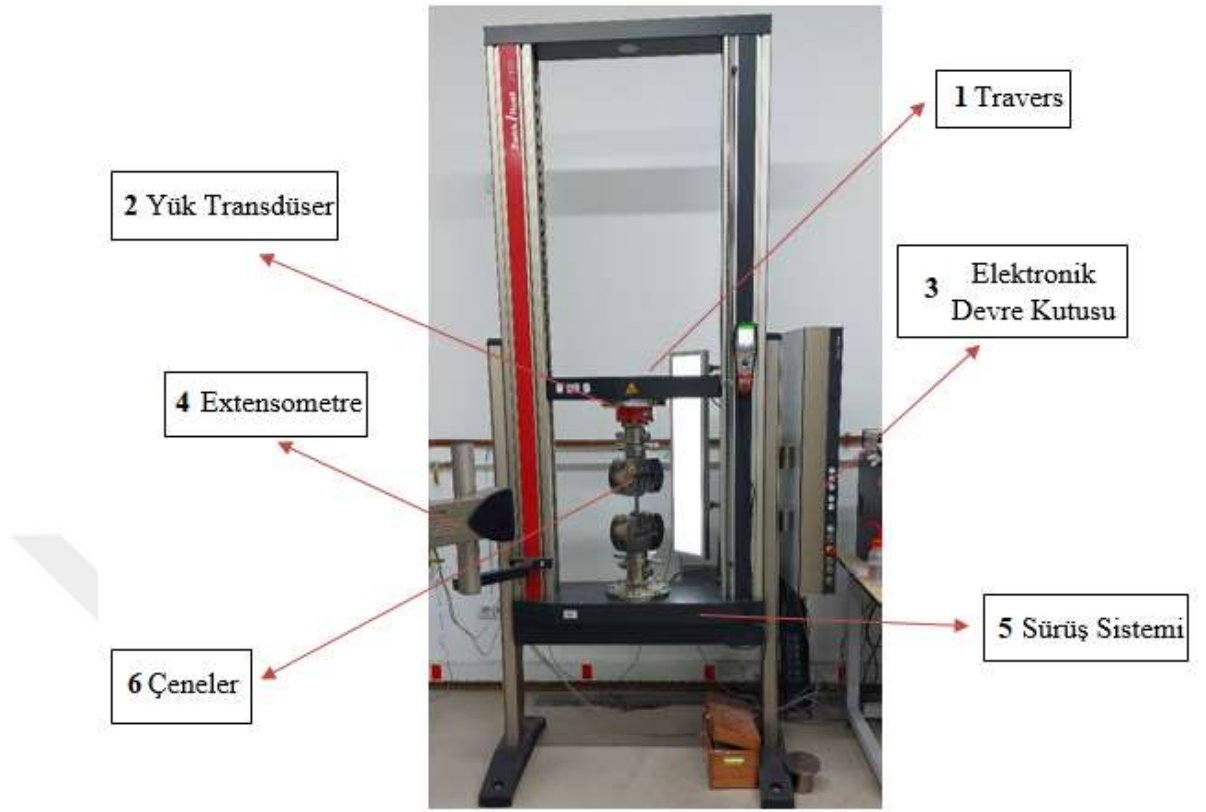
3.3.1.Çalışmada kullanılan cihazlar

Yapılmış deneysel çalışmada dört farklı kombinasyonda çekme, basma ve üç nokta eğmedeneyleri üçer tekrarlı olacak şekilde uygulanmıştır. Devamında hasarlı numunelerden alınan parçaların TÜBİTAK SAGE Labaratuvarlarında bulunanşekil 3.13. ZEISS Axioscope 5 dijital mikroskop ile yüzey görüntüleri 200X büyütülerek fotoğraflanmıştır.



Şekil 3.13. ZEISS Axioscope 5

Tez çalışması süresince çekme, basma ve üç nokta eğme deneylerinin yapıldığı cihaz TÜBİTAK SAGE laboratuvarlarında bulunan 100 kN kapasiteli Zwick marka hidrolik test cihazıdır. Cihaz Şekil 3.14 de verilmiştir. 1 numaralı aksam (travers) çenenin yukarı ve aşağı hareketini kontrol etmek için kullanılmaktadır. 2 numaralı aksam mekanik yük kuvvetini elektronik sinyallere dönüştürmeyi sağlayan transdüserlerdir. 3 numara ile gösterilen aksam elektronik devre kutusu çekme test cihazının hareket eden parçalarını kontrol eder. Traversin hızı ve dolayısı ile yükleme hızı servo kontrollerdeki (geri besleme cihazı ve kontrolör) bu kutu içerisinde bulunan bir mikro işlemci tarafından kontrol edilmektedir. 4 numara ile gösterilen aksam extansometre numunenin gerinimini ölçmektedir. 5 numaralı sürüş sistemi tork ve motor hızını kontrol etmektedir. 6 numara ile gösterilen çeneler numune ve çekme cihazı arasındaki mekanik bağlantıyı oluşturur. İşlevleri ise travers hareketini numuneye aktarmak ve numunede oluşturulan kuvveti yük hücresine aktarmaktır. Şekil 3.15 de çekme cihazına bağlanmış örnekbir deney görülmektedir.



Şekil 3.14. Zwick Z100 çekme-basma test cihazı.

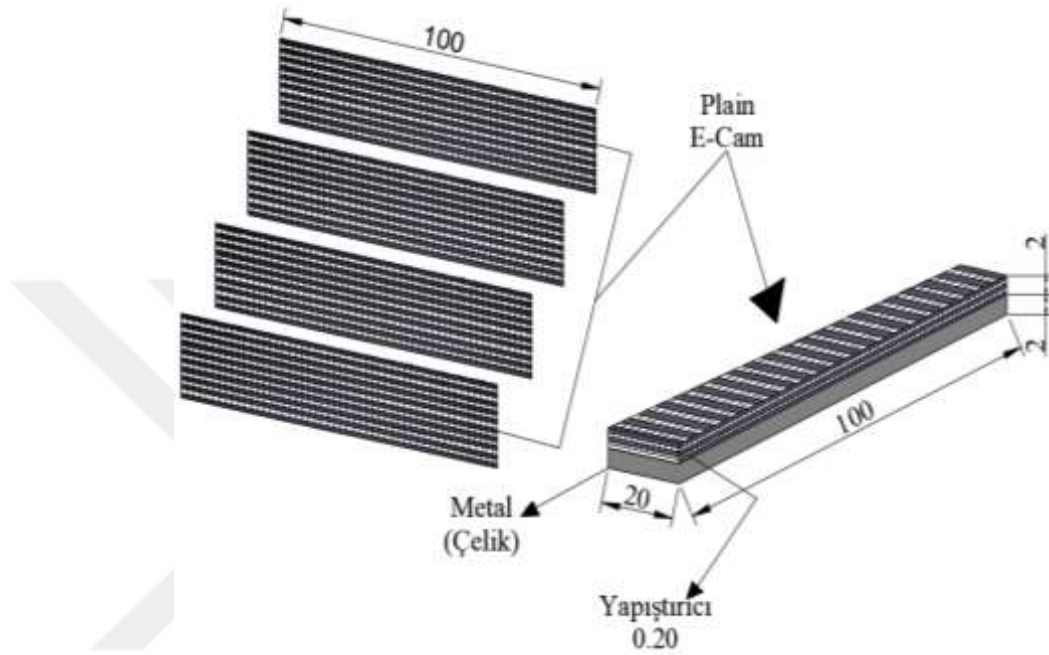


Şekil 3.15. Örnekbir çekme deneyi

3.3.2. Deneyleri yapılan numuneler

E-cam/epoksi/çelik

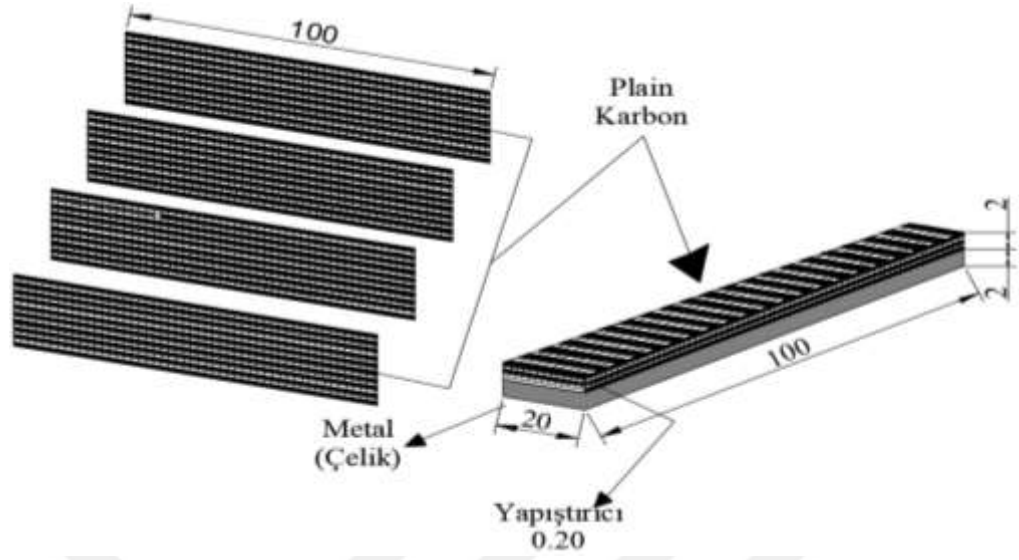
Şekil 3.16’da E-cam/epoksi/çelik numunenin konfigürasyonu verilmiştir. Numunede altta 2 mm kalınlığında bir çelik levha ile bunun üstüne yapıştırılmış, plain kumaşlardan oluşan 4 katmanlı E-cam/epoksi bulunmaktadır.



Şekil 3.16. E-cam/epoksi/çelik konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi

Karbon/epoksi/çelik

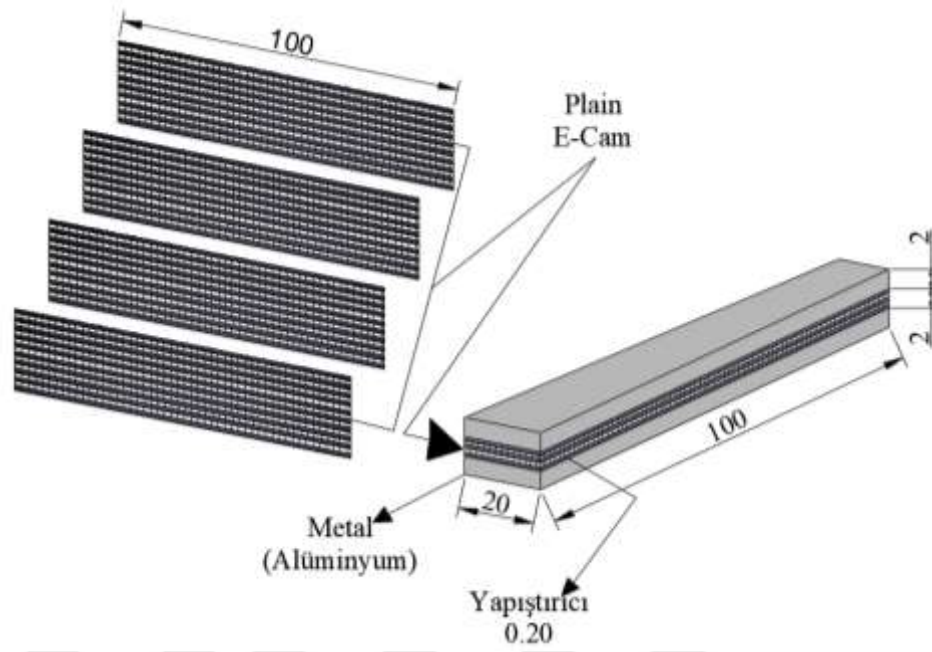
Şekil 3.17’de Karbon/epoksi/çelik numunenin konfigürasyonu verilmiştir. Numunede altta 2 mm kalınlığında bir çelik levha ile bunun üstüne yapıştırılmış, plain kumaşlardan oluşan 4 katmanlı karbon/epoksi bulunmaktadır.



Şekil 3.17. Karbon/epoksi/çelik konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi

Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum

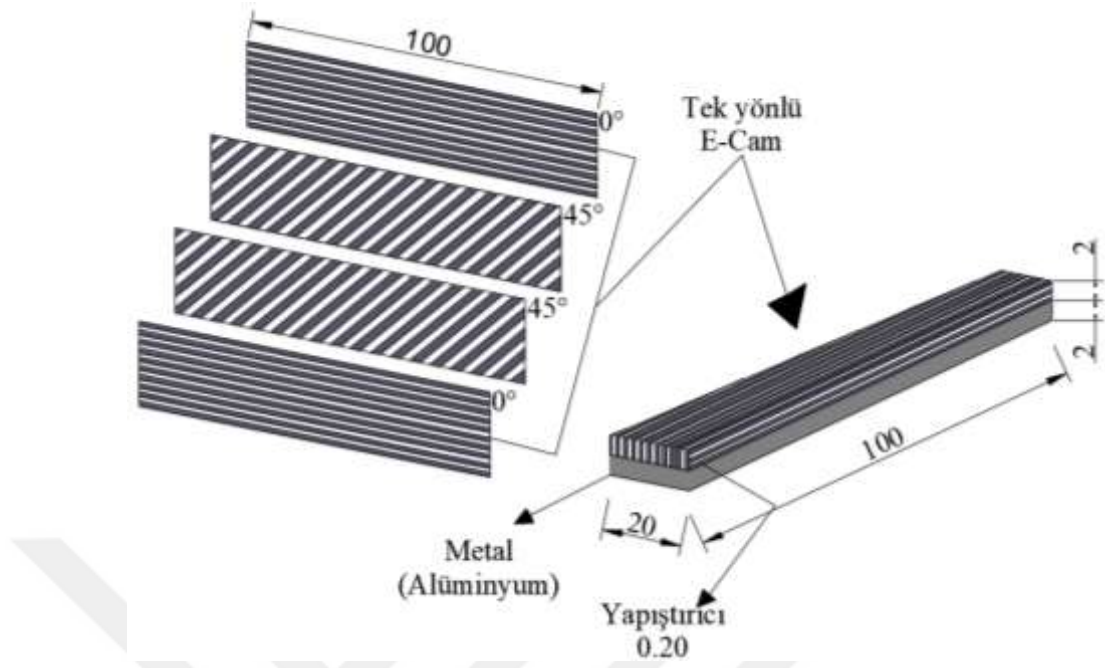
Şekil 3.18’de alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum numunenin konfigürasyonu verilmiştir. Numunede altta ve üste 2 mm kalınlığında bir alüminyum levha ile bunların ortasına yapıştırılmış, plain kumaşlardan oluşan 4 katmanlı E-cam/epoksi bulunmaktadır.



Şekil 3.18. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi

E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum

Şekil 3.19’da E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum numunenin konfigürasyonu verilmiştir. Üste ve altta 2 mm kalınlığında bir alüminyum levha ile bunun üstüne yapıştırılmış, tek yönlü kumaşlarla oluşturulmuş $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ oryantasyona sahip E-cam/epoksi/ÇDNKT bulunmaktadır.



Şekil 3.19. E-cam/epoksi/ ÇDNKT/alüminyum konfigürasyonlu numunenin teknik resim çizimi

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çekme deneyleri

FML'nin çekme özelliklerini belirlemek amacıyla MEDUZA karbon firmasında üretilmiş olan 4 katmanlı 200 g/m² plain dokuma E-cam kumaş, 4 katmanlı 200 g/m² plain dokuma karbon kumaş, 4 katmanlı 330 g/m² unidirectional (tek yönlü) E-cam kumaş ve [0°/45°/45°/0°] oryantasyon açısına sahip ÇDKNT'lü kullanılarak üretilen kompozit plakalar alüminyum ve çelik levhalarla yapıştırılarak (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) karbon/epoksi/çelik, (c) alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum ve (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum konfigürasyonlu numuneler elde edilmiştir. Elde edilen bu numunelerin deneyleri ortam nem sıcaklığı ve ortam nem koşullarında deplasman kontrollü olarak 9 mm/dk çeki hızıyla çekme testleri, Şekil 4.1'deki örnek uygulamada gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çekme testinden bir görünüş

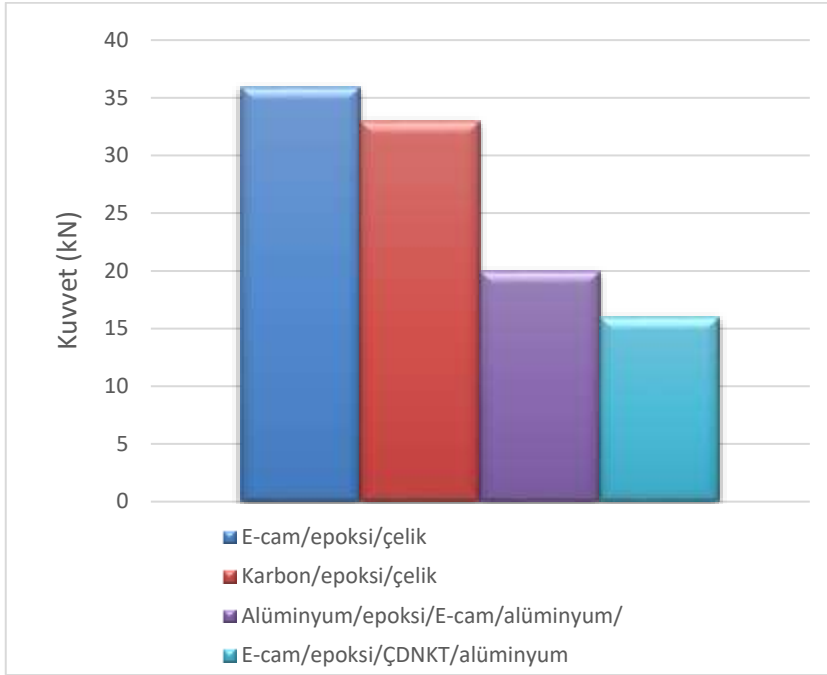
Çekme testi sonucunda oluşan hasarlı numuneler Şekil 4.2'te gösterilmektedir. Şekil 4.2(a)'da gösterilen E-cam/epoksi/çelik numune öncelikle kompozit parçalanarak gevrek hasara uğramıştır. Sonrasında çelik kısım uzayarak keskin bir şekilde kopmuştur. Şekil 4.2 (b)'de ise karbon/epoksi/çelik numunede benzer davranış göstererek öncelikle kompozit kısmın fiberleri daha sonra çelik kısım sünek olarak uzayarak kopmuştur. Şekil 4.2 (c)'de alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum numune diğerlerinden farklı olarak alüminyum plakalardan sadece bir tanesi kopma hasarına uğramıştır. Şekil 4.2 (d)'de E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum numunede

elyaflarların bir kısmı 45° açı ile konumlandırıldığı için kompozit plakanın hasarı 45° açılı olarak görülmektedir. Metal kısmın hasarı ise diğer numunelerle benzerdir.



Şekil 4.2. Hasarlı deney numuneleri, (a)E-cam/epoksi/çelik, (b) karbon/epoksi/çelik, (c)alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum

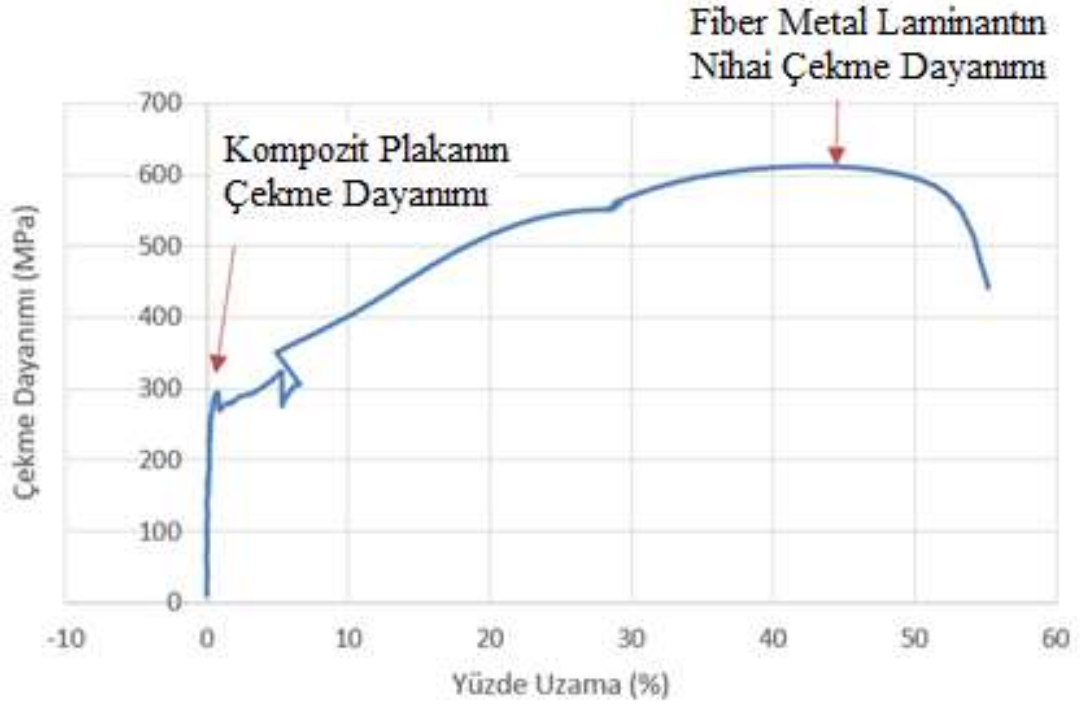
Şekil 4.3'deki nihai çekme dayanımı stün grafiği incelendiğinde plain kumaş ve çelik kullanılan E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantın çekme dayanımı ortalama 35,9 kN dur. Bu numunenin hasar mekanizması incelendiğinde öncelikle kompozit kısım hasara uğramıştır. Metal kısım kompozit kısma göre daha sünek olduğundan uzamaya devam ederek sonrasında metal kısım hasara uğramıştır. Böylelikle nihai çekme dayanımı metal kısım üzerinden elde edilmiştir. Benzer şekilde plain kumaş ve çelik kullanılan karbon/epoksi/çelik ortalama 33 kN da hasara uğramıştır. İki tarafı metal plaka ile desteklenmiş olan numune alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum ise 20 kN da hasara uğramıştır. Son olarak, tek yönlü ÇDNKT ile desteklenmiş $[0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ]$ oryantasyon açısına sahip E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum 16 kN da hasara uğramıştır.



Şekil 4.3. Fiber metal laminant konfigürasyonlarının nihai çekme dayanımı

E-cam/epoksi/çelik

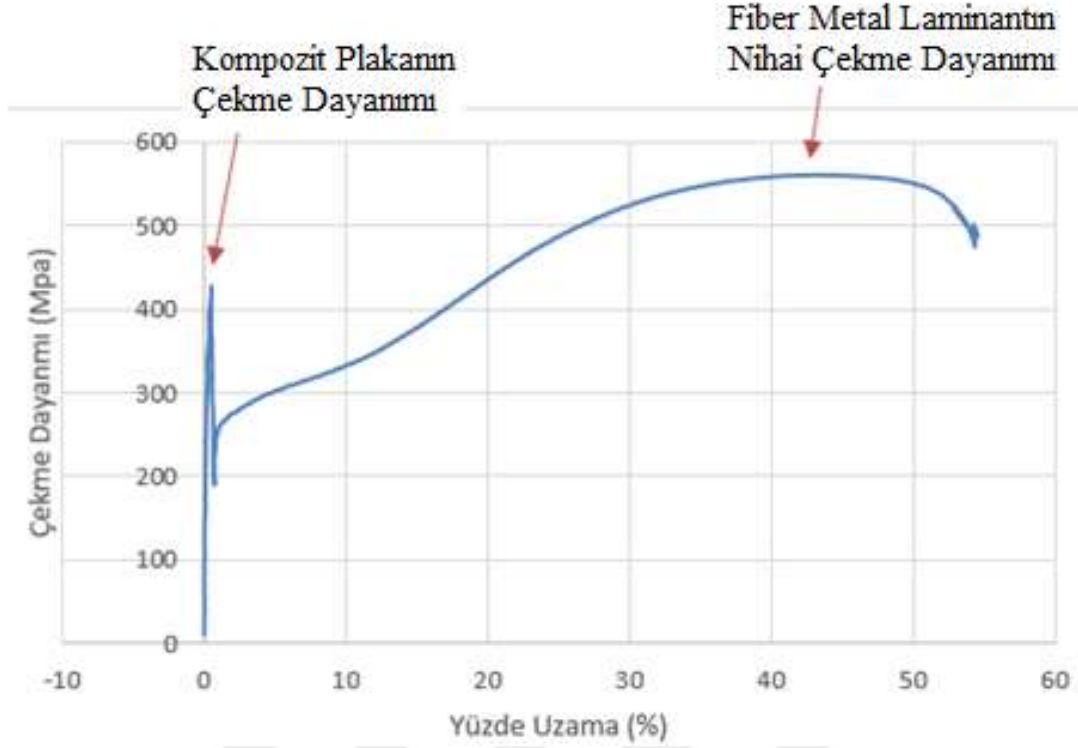
Şekil 4.4’de E-cam/epoksi-çelikkompozit kısmın yaklaşık 300 MPa da hasara uğradığı, daha sonra metal kısım uzamaya devam ederek yaklaşık 600 MPa civarlarında hasara uğradığı tespit edilmiştir. Metalin hasara uğradığı bu değer fiber metal laminantın nihai çekme dayanımını göstermektedir. Fiber metal laminantın kompozit kısmı gevrek hasara uğramasına rağmen metal kısmı %55 civarında uzama göstererek sünek hasara uğramıştır.



Şekil 4.4. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantın gerilme-yüzde uzama eğrisi

Karbon/epoksi/çelik

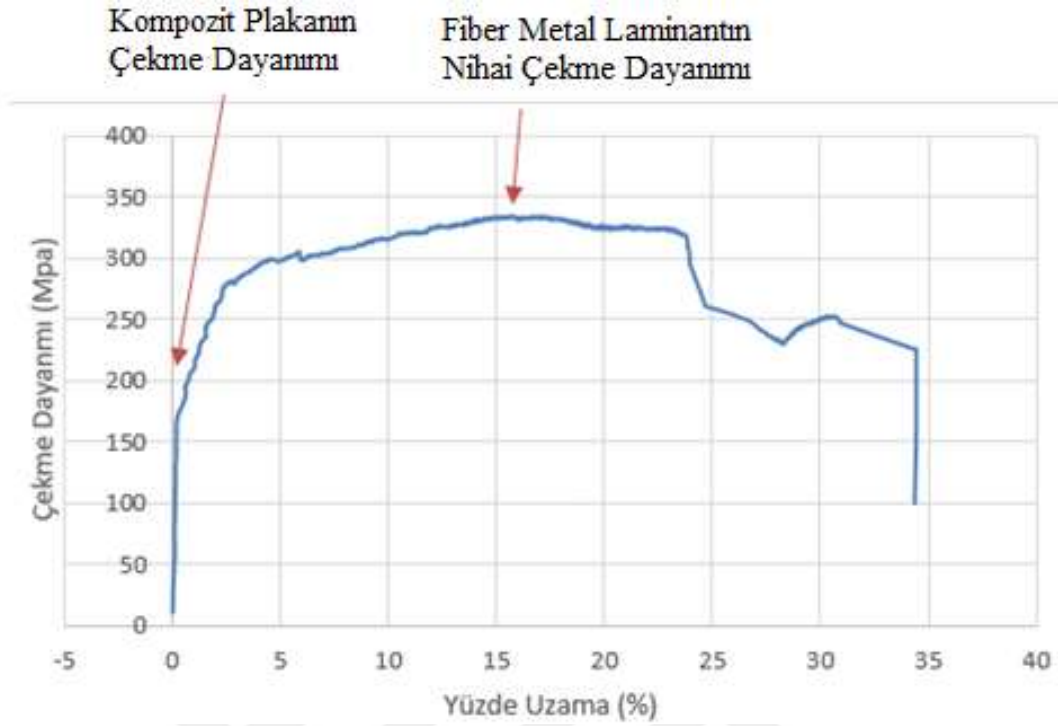
Şekil 4.5’de karbon/epoksi/çelik kompozit kısmın yaklaşık 430 MPa da hasara uğradığı, daha sonra metal kısım uzamaya devam ederek yaklaşık 570 MPa civarlarında hasara uğradığı tespit edilmiştir. Metalin hasara uğradığı bu değer fiber metal laminantın nihai çekme dayanımını göstermektedir. Fiber metal laminantın kompozit kısmı gevrek hasara uğramasına rağmen metal kısmı % 55 civarında uzama göstererek sünek hasara uğramıştır.



Şekil 4.5. Karbon/epoksi-Çelik fiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi

Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum

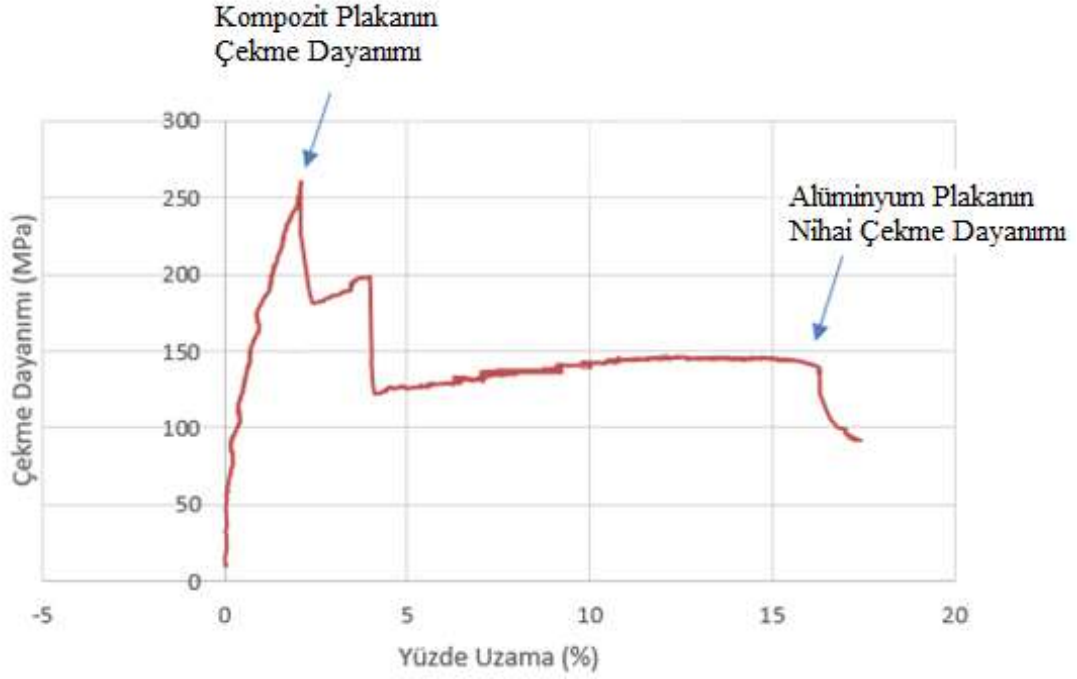
Şekil 4.6’de alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyumkompozit kısmın yaklaşık 170 MPa da hasara uğradığı, daha sonra metal kısım uzamaya devam ederek yaklaşık 340 MPa civarlarında hasara uğradığı tespit edilmiştir. Metalin hasara uğradığı bu değer fiber metal laminantın nihai çekme dayanımını göstermektedir. Fiber metal laminantın kompozit kısmı gevrek hasara uğramasına rağmen metal kısmı %34 civarında uzama göstererek sünek hasara uğramıştır.



Şekil 4.6. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyumfiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi

E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum

Şekil 4.7’de E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyumkompozit kısmın gevrek olarak yaklaşık 260 MPa da hasara uğradığı,devamıda yük alüminyum levhaya binerek levha sünek davranış göstererek %17 uzama göstermiştir ve daha sonra metal kısım uzamaya devam ederek yaklaşık 148 MPa civarlarında hasara uğradığı tespit edilmiştir. Kompozit laminantın hasar değeri fiber metal laminantın nihai çekme dayanımını göstermektedir.



Şekil 4.7. E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyumfiber metal laminantıngerilme-yüzde uzama eğrisi

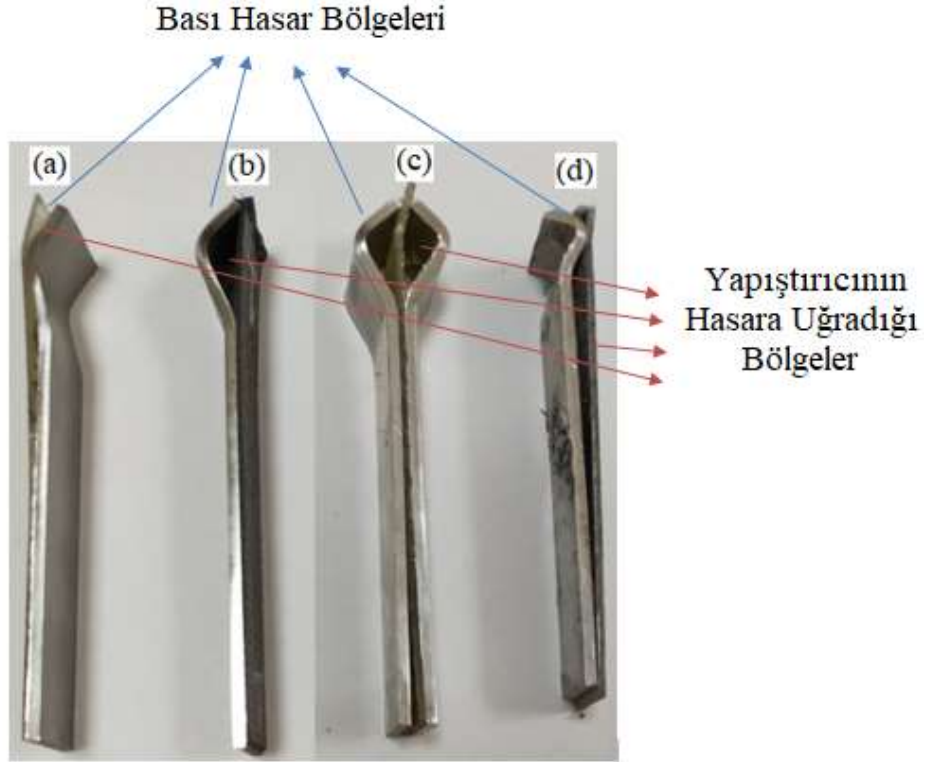
4.2 Basma deneyleri

Basma deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol alan deney türüdür. Basma testleri çekme testlerinin zıttı bir uygulama olup çekme testinde kullanılan cihaz kullanılmaktadır. Uygun görülen basma geometrisine sahip(a) E-cam/epoksi/çelik, (b) E-cam/epoksi/çelik (d) alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum numuneler Şekil 4.8’da örnek uygulamada gösterildiği gibi ortamsıcılık ve nem şartlarında deplasman kontrollü olarak 3 dk/mm bası hızıyla basma testleri bası yüküne maruz bırakılmışlardır. Deneylerden elde edilen bası eğrileri aşağıda verilmiştir.



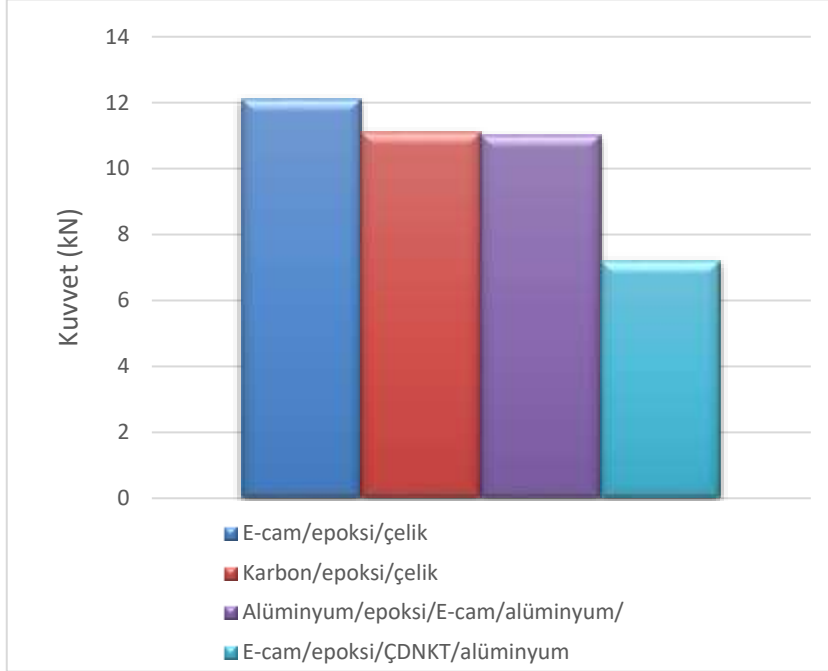
Şekil4.8. Basma testinden bir görünüş

Şekil 4.9’de basma testi sonucunda kompozit malzemelerin metal malzemelerden ayrıldığı ayrıca bütün numunelerde yapıştırıcı hasarının bölgesel olarak meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.9 Hasarlı deney numuneleri, (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) Karbon/epoksi/çelik, (c) Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, (d) E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum

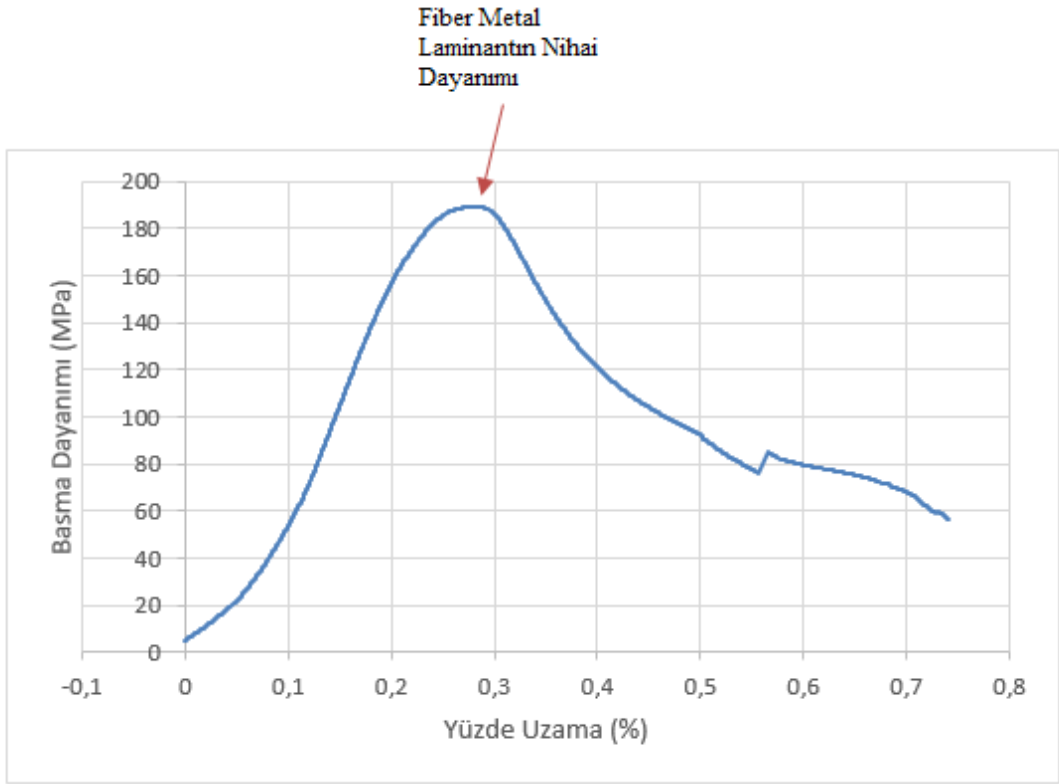
Bası deneyleri sonucunda Şekil 4.10’de E-cam/epoksi/çelik’in bası dayanımı 12.1 kN, karbon/epoksi/çelik’in 11.1kN, alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum’un 11 kN ve E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum’un ise 7.2 kN olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Fiber metal laminan konfigürasyonlarının nihayi basma dayanımı

E-cam/epoksi/çelik

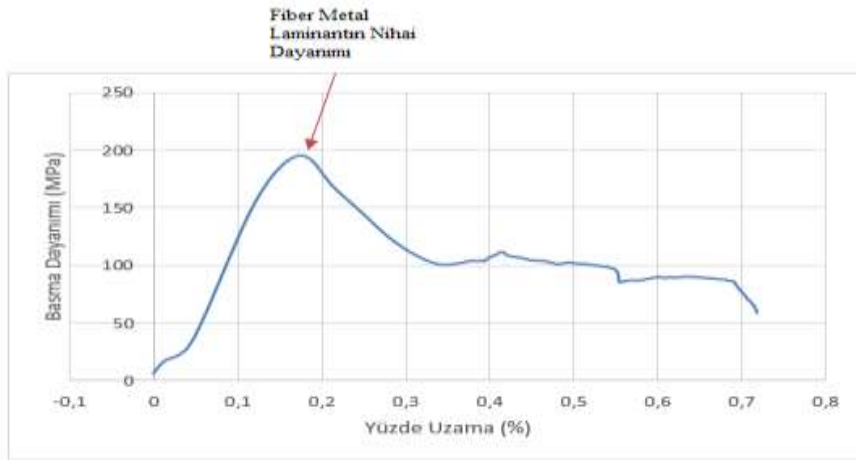
Şekil 4.11’da E-cam/epoksi/çelik’in nihai dayanımı yaklaşık 189 MPa dır.Daha sonra 82 MPa’da kompozit kısımda lif kırılmaları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi

Karbon/epoksi/çelik

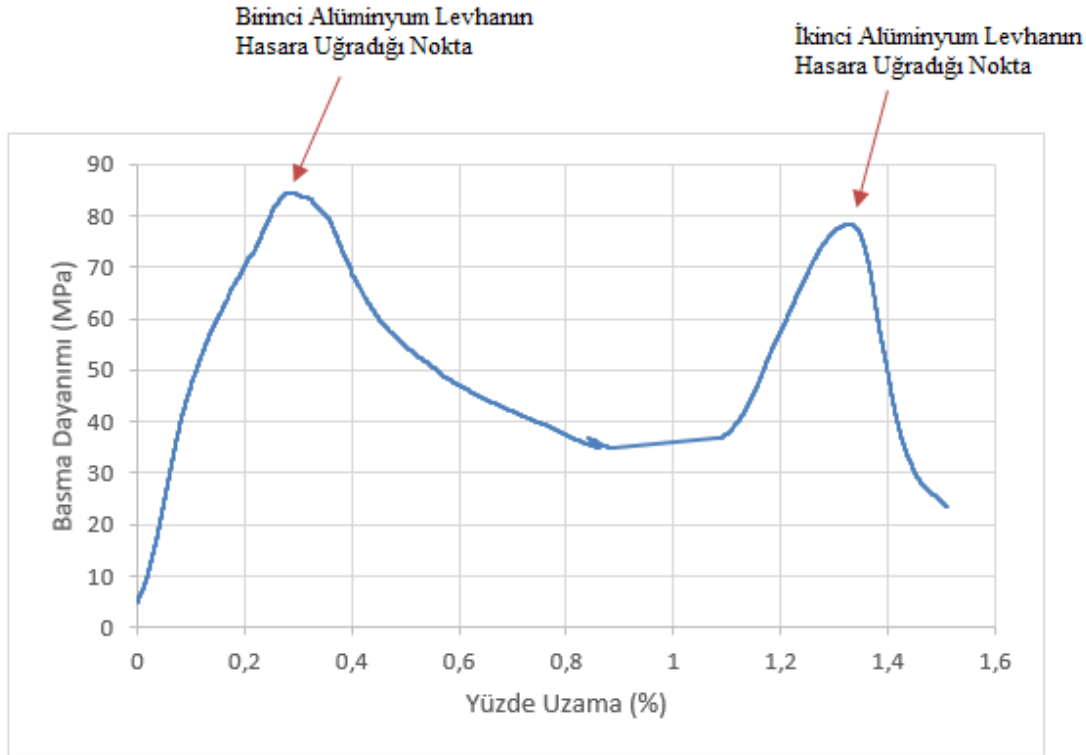
Şekil 4.12’de karbon/epoksi/çelik’in nihai dayanımı yaklaşık 191 MPa’da hasara uğradığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Karbon/epoksi/çelik fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi

Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum

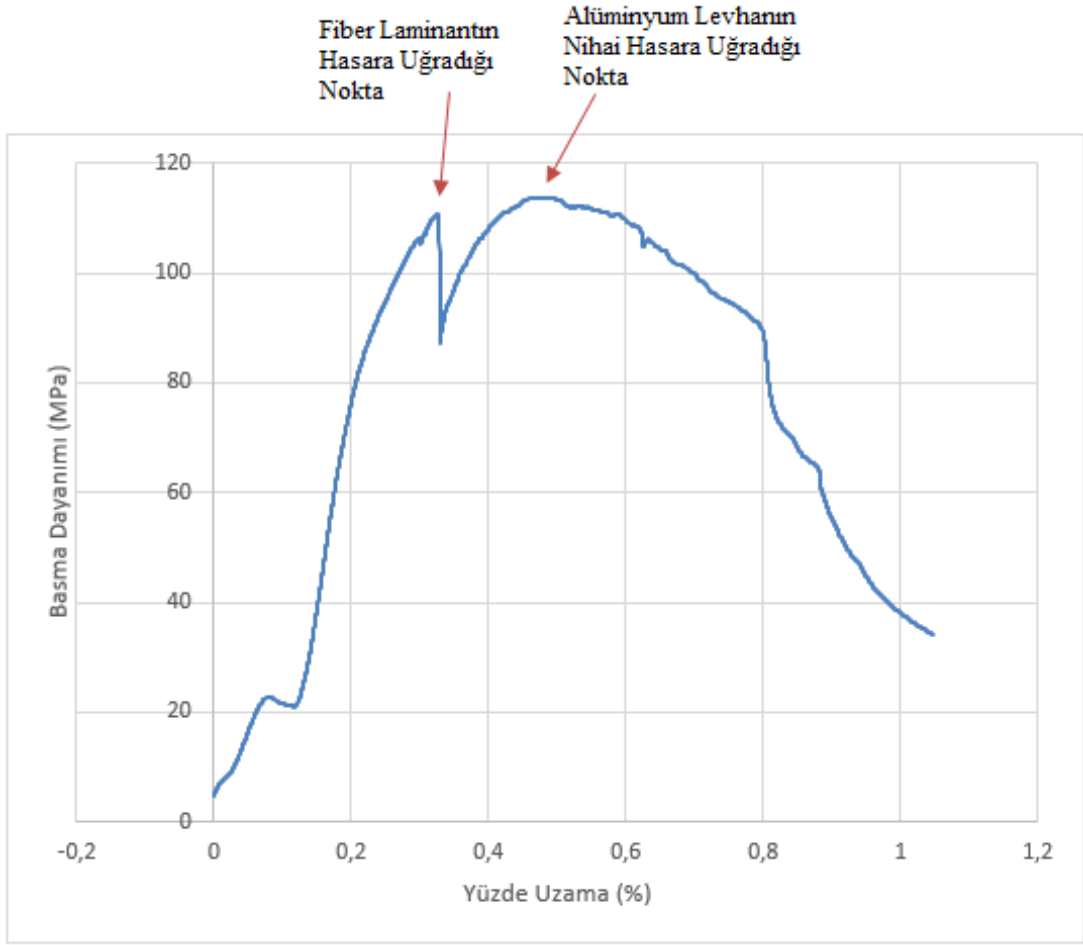
Şekil 4.13’de alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum birinci alüminyum levhanın hasara uğradığı nokta yaklaşık 83 MPa iken ikinci alüminyum levhanın hasara uğradığı noktase yaklaşık 78 MPa’dır.



Şekil 4.13. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum fiber metal laminantınbasma-yüzde uzama eğrisi

E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum

Şekil 4.14’deE-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyumun kompozit kısmı yaklaşık 110 MPa’da hasara uğradığısonrasında fiber kırılma meydana gelerek gerilmeye küçük bir düşüş olmuştur.Bası yükü alüminyum levhaya binerek gerilme yükselmeye devam etmiştir. Sonrasındaalüminyum levhada 113 MPa’da hasara uğrayarak nihai dayanım hasarı meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum fiber metal laminantın basma-yüzde uzama eğrisi

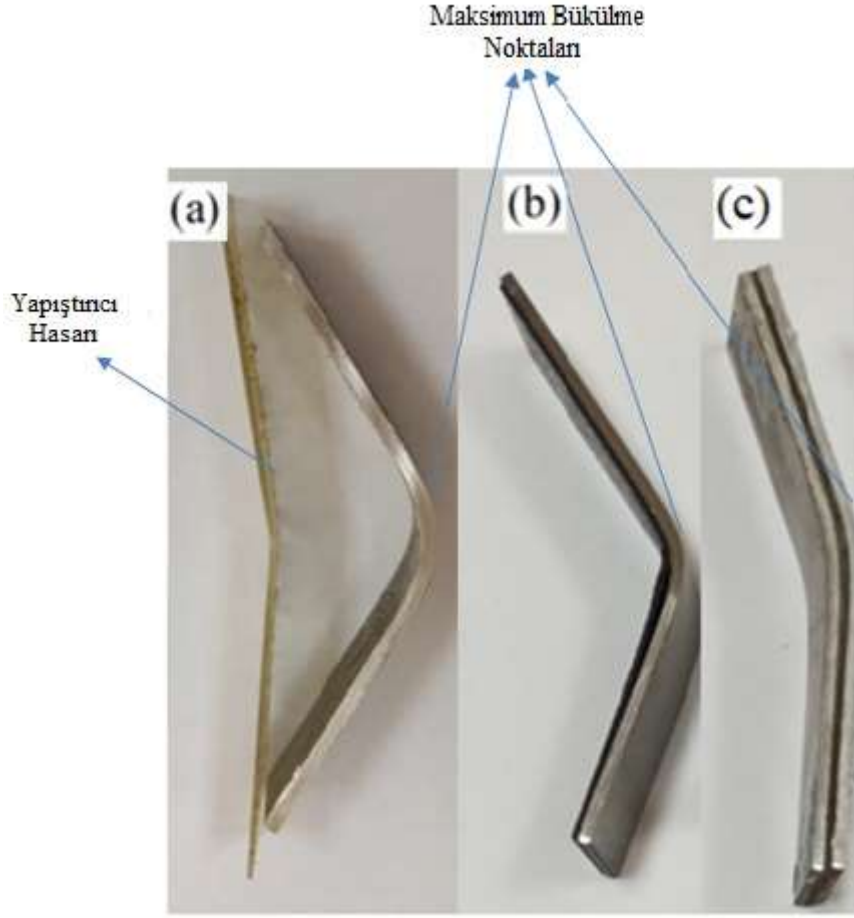
4.3 Üç Nokta Eğme Deneyleri

Testler deplasman kontrollü olarak 3 mm/dk deney hızında kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15’de gösterildiği gibi 50mm aralığındaki iki mesnete yerleştirilmiş olan numuneye hareketli olan üst çeneye takılmış deney aparatı ile 3 dk/mm hızında numunenin orta noktasından baskı uygulayarak numuneyi eğmeye zorlamaktadır. Numunenin eğmeye karşı gösterdiği dirençten üç nokta eğme dayanım değerleri tespit edilmiştir. Deneyde kullanılan numuneler (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) karbon/epoksi/çelik, (c) alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyumdan oluşan 3’er adet test numunesi olmak üzere toplamda 9 test numunesi ile gerçekleştirilmiştir.



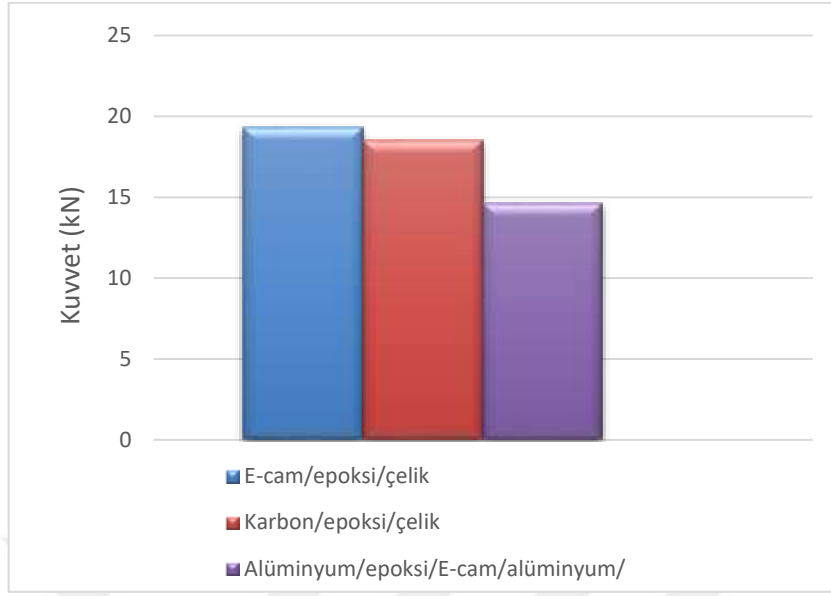
Şekil 4.15. Üç nokta eğme testinden bir görünüş

Çalışmalar kapsamında üretilmiş olan 200 g/m^2 plain dokuma E-cam kumaş, 200 g/m^2 plain dokuma karbon kumaş kullanılarak üretilen kompozit plakalar alüminyum ve çelik levhalarla yapıştırılarak, E-cam/epoksi/çelik, karbon/epoksi/çelik, alüminyum/epoksi/E-cam/alüminyum, konfigürasyonlu numuneler elde edilmiştir. Üç nokta eğme deneyi sonucunda numunelerde oluşan hasarlar Şekil 4.16'de gösterilmektedir. 4.16 (a)'da gösterilen E-cam/epoksi/çelik numunenin üzerine uygulanan bası kuvveti sunucunda plaka bütünlüğünü koruyamamış ve kompozit plaka çelikten ayrılmıştır. 4.16 (b) ve (c)'de ise kompozit malzemeler bükülme esnasında yapısal bütünlüğünü korumuşlardır.



Şekil 4.16. Hasarlı deney numuneleri, (a) E-cam/epoksi/çelik, (b) Karbon/epoksi/çelik, (c) Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum

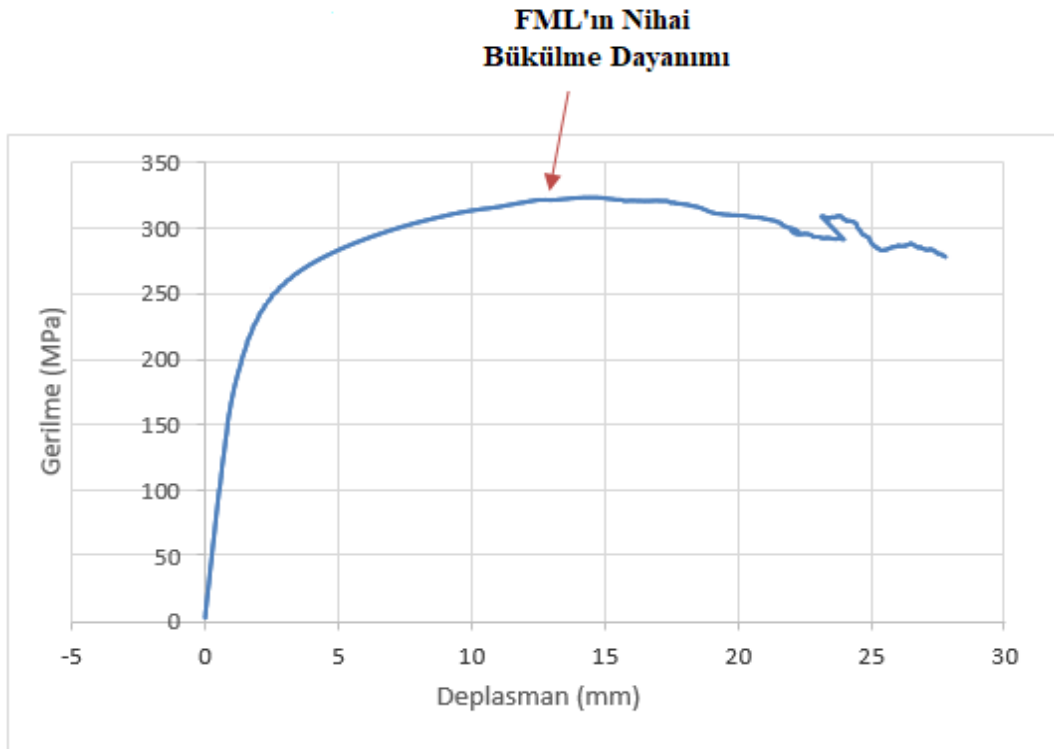
Şekil 4.17'deki nihai üç nokta eğme dayanımı sütun grafiği incelendiğinde plain kumaş ve çelik kullanılan E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantın üç nokta eğme dayanımı ortalama 19.3kN'dur. Benzer şekilde plain kumaş ve çelik kullanılan karbon/epoksi/çelik ortalama 18.5 kN, iki tarafı metal plaka ile desteklenmiş numune alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum ise ortalama 14.6 kN'dur.



Şekil 4.17. Fiber metal laminant konfigürasyonlarının nihai üç nokta eğme dayanımı

E-cam/epoksi/çelik

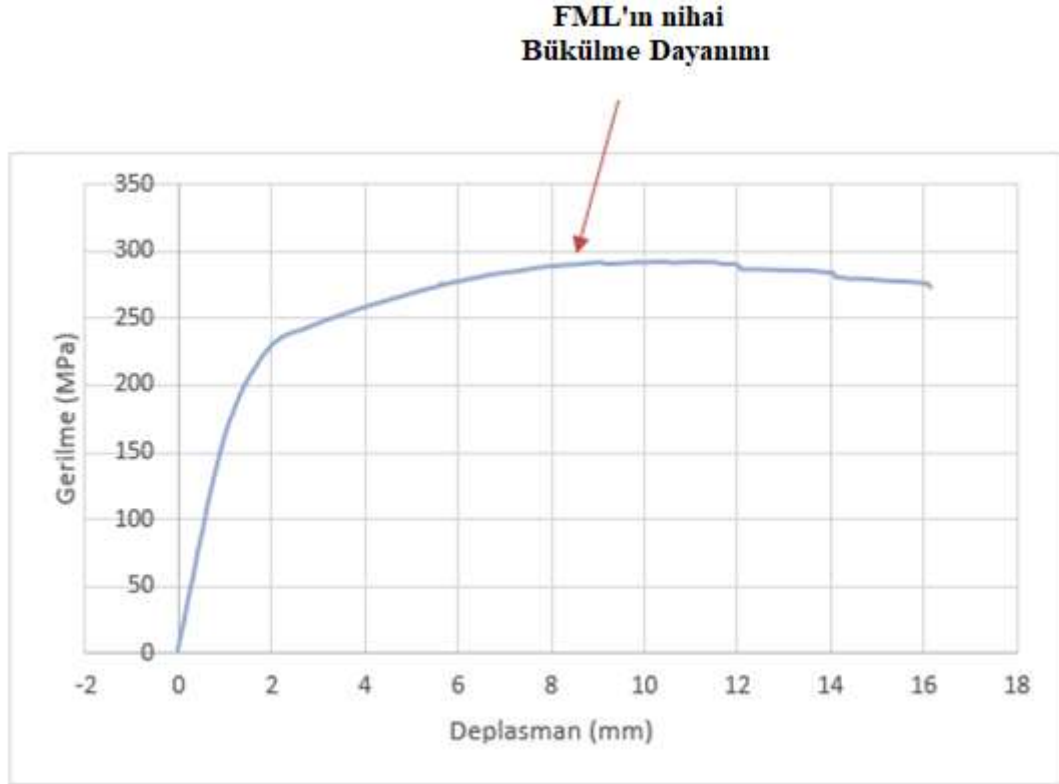
Şekil 4.18’de E-cam/epoksi/çelik FML’ın nihai dayanımı ortalama 323 MPa dayanım değerine ulaştığında hasara uğramıştır.



Şekil 4.18. E-cam/epoksi/çelik fiber metal laminantın gerilme-deplasman eğrisi

Karbon/epoksi/çelik

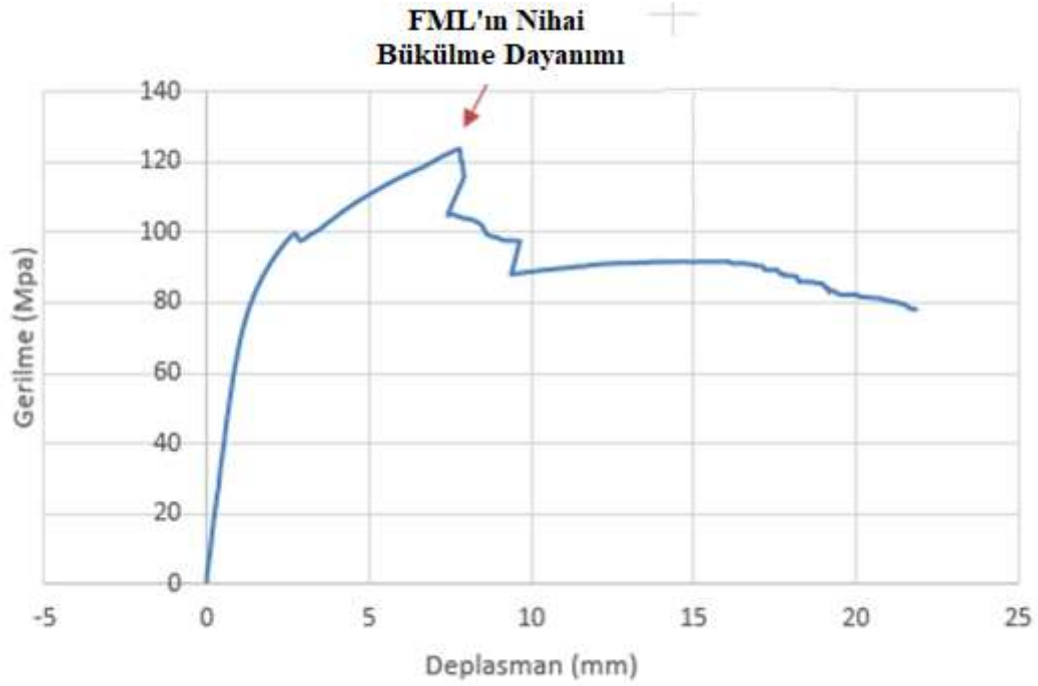
Şekil 4.19’de Karbon/epoksi/çelik FML’ın nihai dayanımı ortalama 300 MPa dayanım değerine ulaştığında hasara uğramıştır.



Şekil 4.19. Karbon/epoksi/çelik fiber metal laminantın gerilme-deplasman eğrisi

Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum

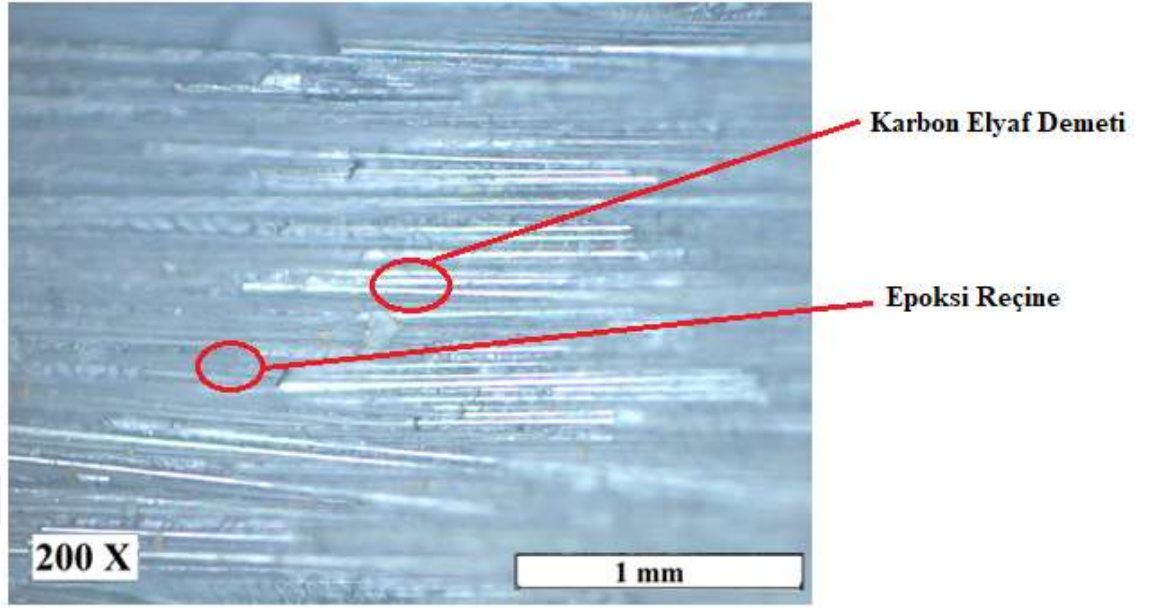
Şekil 4.20’de alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum FML’ın nihai dayanımı ortalama 123 MPa dayanım değerine ulaştığında hasara uğramıştır.



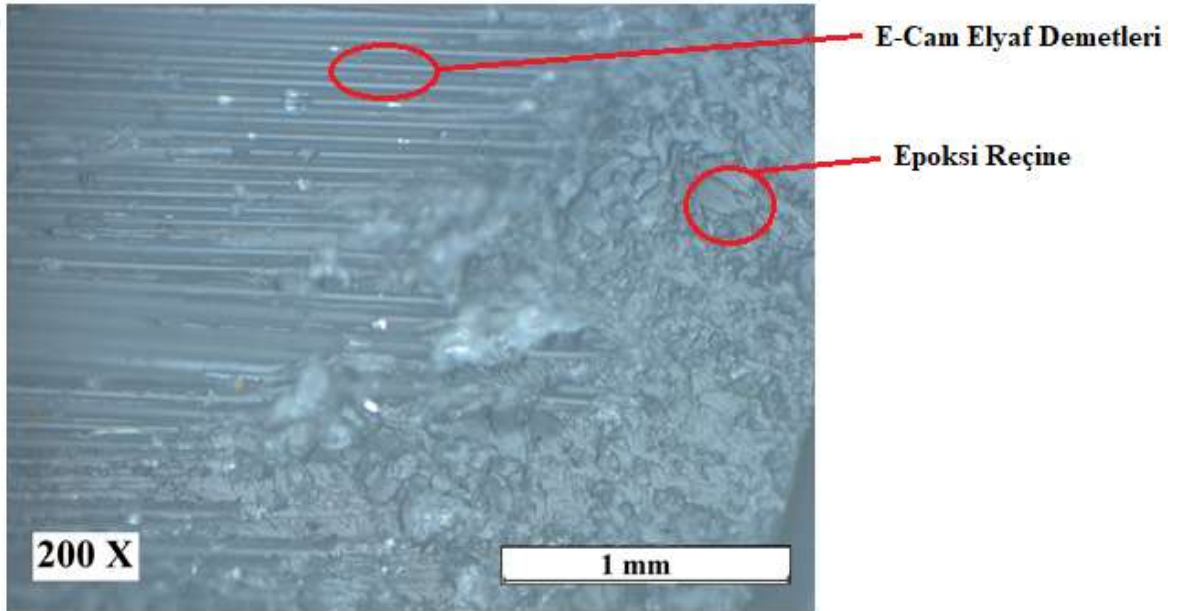
Şekil 4.20. Alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum fiber metal laminantıngerilme-deplasman eğrisi

4.4 İçyapı Görüntüleri

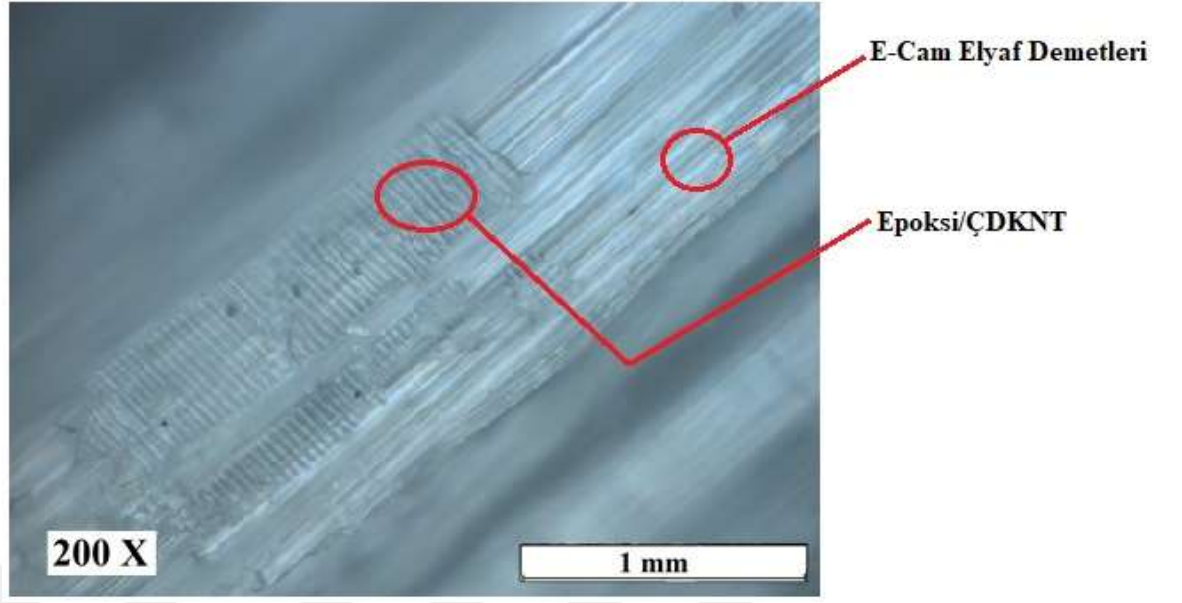
Deneylerden önce Karbon, E-Cam ve E Cam/ÇDKNT'den numune alınarak ortadan ikiye bölünmüş ve 200X büyütme yapılarak iç yapı görüntüleri elde edilmiştir. Burada deney öncesi test numunelerinin lif yapılarının ve epoksi reçinenin dağılımlarının düzgün olduğu görülmekte olup ayrıca boşluk ve hava kabarcığı gibi mikro yapı hatalarına rastlanmamıştır. Şekil 4.21'de karbon liflerin homojen dağıldığı ve bu karbon lifleri dışını kaplayan plakanın ana bileşenini oluşturan epoksi reçine ile uyumluluk halinde olduğu görülmektedir. Şekil 4.22'de E-Cam liflerin ve epoksi reçinenin karbonliflerde olduğu gibi homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Şekil 4.23'de E-Cam/epoksi/ÇDKNT'de ise diğer numunelerden farklı bir dağılıma rastlanmamıştır.



Şekil 4.21. Karbon elyaf iç yapı görüntüsü



Şekil 4.22. E-cam elyaf iç yapı görüntüsü



Şekil 4.23. E-cam/ÇDKNT elyaf iç yapı görüntüsü

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel tez çalışmasında E-cam/epoksi/çelik, karbon/epoksi/çelik, alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum, E-cam/epoksi/ÇDKNT/alüminyum FML'nin çekme, basma ve üç nokta eğme dayanımları incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çekme testlerinde öncelikle kompozit plakalar gevrek hasara uğramış ve kompozit plakaya göre daha sünek olan metal plakalar daha sonra sünek hasara uğramışlardır.
- Çekme deneylerinde E-cam/epoksi/çelik 600 MPa, karbon/epoksi/çelik 570 MPa ve alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum'un 340 MPa, E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum 240 MPa, civarlarında nihai dayanım göstermiştir.
- Basma deneylerinde E-cam/epoksi/çelik 189 MPa, karbon/epoksi/çelik 191 MPa, alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum ilk alüminyum levhanında yaklaşık olarak 83 MPa, E-cam/epoksi/ÇDNKT/alüminyum 110 MPa nihai dayanımlar sergilemişlerdir.
- Üç nokta eğme deneylerinde E-cam/epoksi/Çelik 323 MPa, karbon/epoksi/çelik 300 MPa, alüminyum/epoksi/E-cam/epoksi/alüminyum 91 MPa' da hasara uğradıkları tespit edilmiştir.
- Kompozit plakalardan alınan iç yapı görüntülerinde herhangi bir üretim hatasına rastlanmamıştır. Kompozitlerin üretim sırasında oluşan herhangi bir boşluk, çentik veya hava kabarcığı görülmemiştir.
- Üretimi yapılan bu farklı konfigürasyondaki FML'nin dayanım değerleri göz önüne alındığında ilgili yapısal mühendislik uygulamaları için uygun olduğu düşünülmektedir.

- İleride yapılacak çalışmalarda FML malzemelere darbe testleri yapılarak incelemeler de gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Alderliesten, R.C., Benedictus R., 2008. Fiber/Metal Composite Technology for Future Primary Aircraft Structures. *Journal of aircraft*, 45(4), 1-21.
- Annamalai, I., ve diğ., 2021. Experimental Investigation Of Mechanical Properties Of GLARE Composite With Different Layup Sequences. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1-5.
- Asundi A. ve Choi Alta Y. N., 1997. Fiber Metal Laminates: An Advanced Material For Future Aircraft. *Journal Of Materials Processing Technology*, 63, 384-394.
- ASTM, 2014. D3039: Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA,USA.
- Aytekin, A., diğ. 2015. Epoksi Reçineleri ve Mesleki Dermatozlarla İlişkisi. *Ankara Med J*, 15(2), 1-6.
- Azhdari, S., ve diğ. 2021. An Experimental And Numerical Investigation On Low Velocity Impact Response Of Glares. *Composite Structures*, 271, 1-13.
- Bağatır, T., 2018. Grafen Nanopartikül Takviyesinin Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. (Yüksek Lisan Tezi), Batman Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Balcıoğlu, H. E., 2017. Farklı Çevre Koşullarının Tabakalı Kompozitlerin Statik Ve Dinamik Dayanımlarına Etkisi. (Doktora Tezi), Uşak Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak.
- Bellini, C., ve diğ., 2019. Influence Of Structural Characteristics On The Interlaminar Shear Strength Of CFRP/Al Fibre Metal Laminates. *ScienceDirect*, 18, 373-378.
- Bellini, C., ve diğ. 2019. Analysis of CFRP/Al Hybrid Laminates Flexural Strength. *ScienceDirect*, 18, 368-372.
- Botelho, E.C., Silva, R.A., Pardini, L.C., Rezende, M.C., 2006. A Review On The Development And Properties Of Continuous Fiber/Epoxy/Aluminum Hybrid Composites For Aircraft Structures. *Mater Res.*, 9(3), 247–56.
- Bozkurt, L., 2011. Hibrit Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Davranışı. (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Bozkurt, S., 2014. Sandviç Kompozitlerin Mekanik Performansının Deneysel Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisan Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Che, L., ve diğ., 2020. Investigation Of Curing Deformation Behavior Of Curved Fiber Metal Laminates. *Composite Structures*, 232, 1-9.
- Chawla, K. K., 2019. Ceramic Matrix Composites, In *Composite Materials* . 251- 296. Springer, Cham.
- Cortes.P., Cantwell R., 2006. The Prediction Of Tensile Failure İn Titanium-Based Thermoplastic Fibre–Metal Laminates. *Composite science and technology*, 66, 2306-2316.
- Demir, O., 2017. Karbon Nanotüp Takviyeli Cam-Karbon Elyaf/Epoksi Hibrit Nanokompozitlerin Mekanik Özellikleri Ve Düşük Hızlı Darbe Davranışları. (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- Dindar, B., 2019. Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Nanopartikül Katkısının Yorulma, Burkulma Ve Darbe Davranışına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. (Doktora Tezi), Pamukkale Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.
- Dindar, B., Ağır, İ., 2021. Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş Oval Çentikli Çelik Plakanın Çekme Dayanımının Deneysel Olarak Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 687-701.
- Dindar, B., 2020. Metal-Cam fiber/Epoksi/ÇDKNT Sandviç Panellerin Eğilme Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 249-253.
- Ding, Z., ve diğ., 2021. A Review On Forming Technologies Of Fibre Metal Laminates. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4, 1-17.
- Dindar, B., 2021. Three-Point Bending Properties Of V-Notched Aluminum Repaired With A Nanocomposite Patch. *Emerging Materials Research*, 10(3), 300-306.
- Dos santos, D.G., ve diğ., 2019. Reinforcement Of CFRP Joints With Fibre Metal Laminates And Additional Adhesive Layers. *Composites Part B*, 165, 1-11.
- Eskizeybek, V. 2012. Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi Ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi. (Doktora Tezi), Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ezequiel, M., diğ. 2020. Numerical And Experimental Study Of A 5754-Aluminum Alloy Processed By Heterogeneous Repetitive Corrugation And Straightening. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1971-1947.

- Gülcan, O., Tekkanat, K., Çetinkaya, B., 2019. Fiber Metal Laminatlar ve Uçak Sanayiinde Kullanımı Üzerine Bir İnceleme. Mühendis ve Makine, (60), sayı 697 262-288.
- Gou. Y., ve diğ., 2022. Study On Formability And Failure Modes Of Steel/CFRP Based Fmlsconsisting Of Carbon Fiber Reinforced Polymer Prepreg And Steel Sheet. Composite Structures, 281, 1-12.
- He. W., ve diğ. 2020. Characterizing And Predicting The Tensile Mechanical Behavior And Failure Mechanisms Of Notched Fmls—Combined With DIC And Numerical Techniques. Composite Structures, 254, 1-25.
- He. W., ve diğ. 2021. On İmpact Behavior Of Fiber Metal Laminate (FML) Structures: A State-Of-The-Art Review. Thin-Walled Structures, 167, 1-33.
- Hu, Y., ve diğ. 2019. Mechanical Properties Of Ti/CF/PMR Polyimide Fiber Metal Laminates With Various Layup Configurations. Composite Structures, 229, 1-6.
- Hu, C., ve diğ. 2021. Experimental And Numerical Characterization Of Flexural Properties And Failure Behavior Of CFRP/Al Laminates. Composite Structures, 281, 1-11.
- 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, 128, 1-16.
- Khalid, M.Y., ve diğ. 2021. Interlaminar Shear Strength (ILSS) Characterization Of Fiber Metal Laminates (Fmls) Manufactured Through VARTM Process. Forces in Mechanics, 4, 1-6.
- Kim, J.T., ve diğ. 2009. 3-Aminopropyltriethoxysilane Effect on Thermal and Mechanical Properties of Multi-walled Carbon Nanotubes Reinforced Epoxy Composites. Journal of COMPOSITE MATERIALS, 43, 1-10.
- Kumar, A., ve diğ. 2021. A Review On Machining Performance Of AISI 304 Steel. Materials Today: Proceedings, 1-7, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.003.
- Majzoobi, G.H., ve diğ. 2018. The Effect Of Aluminum And Titanium Sequence On Ballistic Limit Of Bi-Metal 2/1 Fmls. Thin-Walled Structures, 122, 1-7.
- Mahdavinejad, R. A., Saeedy, S., 2011. Investigation Of The İnfluent Parameters Of Machining Of AISI 304 Stainless Steel. Indian Academy of Sciences, 36(6), 963-970.
- Meryemoğlu, B., Erbatur, O., 2020. Polietilen-İndirgenmiş Grafen Oksit ve Polietilen-İndirgenmiş Grafen Oksit-Aramid Kompozitlerinin Hazırlanması. Iğdır Üniversitesi. Fen Bilimleri. Enstitüsü Dergisi, 10(1), 427-438.

- Pradhan K.K., diğ. 2015. Analysis Of Erosion-Corrosion Resistance And Various Application İn Domestic And Industrial Field of Stainless Steel Grade 304. International Journal of Research (IJR), 2 (4), 807-811.
- Rudawska A., Wahab, A. M., 2019. The Effect Of Cathoretic And Powder Coatings On The Strength And Failure Modes Of EN AW-5754 Aluminium Alloy Adhesive Joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 89, 40-50.
- Sezgin, A., 2020. Vakum İnfüzyon Yöntemiyle Alümina Nanopartikül Takviyeli Hibrit Kompozit Malzemelerin Üretilmesi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Beykent Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü, İstanbul.
- Sharma, A.P., ve diğ. 2017. Experimental And Numerical İ Investigation On The Uni-Axial Tensile Response And Failure Of Fiber Metal Laminates. Composites Part B, 125, 259-274.
- Sharma, A.P., ve diğ. 2021. High-Velocity İmpact Response Of Titanium-Based Fiber Metal Laminates. Part I: Experimental İ Investigations. International Journal of Impact Engineering, 152, 1-15.
- Sharma, A.P., Velmurugan, R., 2021. Uni-Axial Tensile Response And Failure Of Glass Fiber Reinforced Titanium Laminates. Thin-Walled Structures, 154, 1-22.
- Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., Çoban, O., 2011. A Review: Fibre Metal Laminates, Background, Bonding Types And Applied Test Methods. Materials and Design, 32, 3671-3685.
- Sun, J., ve diğ. 2021. Tensile Behaviour Of Titanium-Based Carbon-Fibre/Epoxy Laminate. Construction and Building Materials, 281, 1-11.
- Şanlıtürk, S., 2020. Al Katmanlar Kullanılarak Üretilmiş Fiber Metal Tabakalı Kompozitlerin Delinmesinin Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Batman Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Taktak, W., diğ. 2017. Study Of The İ Influence Of Cold Working On Mechanical Behavior And Ductile Fracture Of 5754 Aluminum Alloy: Experimental And Numerical Simulations. J Theor Appl Mech, 923.
- Taşkesen, H. İ., 2020. Bal Peteği Sandviç Kompozitlerde Darbe Testi Sonrası Basma Davranışlarının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Tanner, D., Knoff, W. F., 1989. Aramid Structure/Property Relationships and Their Role in Applications Development, High Technology Fibers, Marcel Dekker Inc USA.

- Thunaipragasam, S., diğ. 2021. Mechanical properties Of 304 Stainless Steel Plates And Friction Stir Welded Al 2219 Alloy. Materials Today: Proceedings, 1-6, doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.100.
- Topkaya, T., 2017. Bal Peteği Sandviç Kompozitlerin Darbe Ön Hasarı Sonrası Yorulma Davranışlarının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Villanueva, G. R., Cantwell, W. J., 2004. The High Velocity Impact Response Of Composite And FML-Reinforced Sandwich Structures. Composites Science and Technology, 64(1), 35-54.
- Vlot, A., Vogelesang, L. B., De Vries, T. J., 1999. Towards application of fibre metal laminates in large aircraft. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 71(6), 558-570.
- Yau, L., ve diğ. 2022. Tensile Mechanical Behavior And Failure Mechanisms Of Fiber Metal Laminates Under Various Temperature Environments. Composite Structures, 284, 1-18.
- Yalçın, E. B., 2012. Farklı Kumaş Ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş Ctp Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi. (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yaman, N., diğ. 2006. Karbon Liflerinin Üretimi. Tekstil ve Konfeksiyon, 1-10.
- Yaman, N., diğ., 2007. Karbon Liflerinin Özellikleri Ve Kullanım Olanakları. Tekstil ve Konfeksiyon, 1-6.
- Zhou, X., ve diğ., 2021. Fabrication And Mechanical Properties Of Novel CFRP/Mg Alloy Hybrid Laminates With Enhanced Interface Adhesion. Materials and Design, 197, 1-8.
- Wanhill, R. J. H., 2017. GLARE® : A Versatile Fibre Metal Laminate (FML) Concept, 1-12.
- Weicon, 2018. Easy-Mix RK-7100 Teknik bilgi formu.
- <https://afzir.com/tr/products/glass-wrap-pgw/> (alınma tarihi 11.02.2022).
- <https://www.carbomid.com.tr/urunler/aramid-kumaslar> (Alınma tarihi 11.02.2022).
- <https://www.makrokompozit.com/el-yatirmasi>. (Alınma tarihi, 10.02.2022).
- <https://malzemebilimi.net/cam-elyaf-nedir-nasil-uretilir.html>(alınmatarihi 11.02.2022).
- <https://netcomposites.com/guide/> (alınma tarihi 11.02.2022).

<http://referansmetal.com/upload/files/aluminyum-mekanik-ozellikler.pdf> (Alınma tarihi, 10.02.2022).

<http://referansmetal.com/upload/files/aluminyum-mekanik-ozellikler.pdf> (Alınma tarihi, 10.02.2022).

<https://silo.tips/download/kompozit-malzemeler-kompozit-malzemelerin-tanimi> (alınma tarihi 13.02.2022).

<https://tr.wikipedia.org/wiki/Aramid> (alınma tarihi 11.02.2022).

https://tr.wikipedia.org/wiki/Karbon_elyaf%C4%B1(alınma tarihi 11.02.2022).



EKLER

Ek 1. Özgeçmiş

