



**POLİMER KOMPOZİTLERDE FİBER ORYANTASYONLARININ
MEKANİK BİRLEŞTİRME DAYANIMLARINA ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Ruşen SÖZER

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

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

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

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

Ruşen SÖZER

14/07/2021

POLİMER KOMPOZİTLERDE FİBER ORYANTASYONLARININ MEKANİK
BİRLEŞTİRME DAYANIMLARINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ruşen SÖZER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2021

ÖZET

Bu çalışmada, tek yönlü karbon elyaf malzeme olan reçine emdirilmiş prepreg karbon kumaşlar kullanılmıştır. Prepreg karbon kumaşlardan laminat plaka üretimi için, alüminyum 7075 kalıp malzemeleri kullanılarak ve prepreg karbon elyaf standartlarına göre belirlenen otoklav reçetesi uygulanarak, kürlleme işlemi yapılmıştır. Otoklav süreci tamamlanan kompozit plakalar ile 8 kat kumaş kullanılarak 1.9 ± 1 mm kalınlıkta ve yaklaşık %58 lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde kompozit karbon elyaf laminatların üretimi gerçekleştirilmiştir. Test işlemleri için 5 adet farklı elyaf dizilimleri içeren kompozit plakaların her birinden 12 adet numune alınmıştır. Toplam olarak 60 numune ASTM D953 standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve yine bu standartlara göre test aparatları üretilerek test işlemleri yapılmıştır. Kompozit plakaların içerdikleri elyaf dizilimlerine göre gruplandırılması yapılan numuneler ilk olarak tahribatsız muayeneye tabi tutulmuştur. Tahribatsız muayene işleminde SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri alınan numunelerde serim süreci ve sonrası oluşabilecek hatalar gözlenmiştir. Ayrıca, kompozit malzemelere ASTM D953 standartlarına uygun olarak çekme testi uygulanmış ve dizilim farklılıklarının oluşturduğu şekiller yorumlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elyaf oryantasyonunun istif açılarının değiştirilmesi ile mekanik dayanımın artırılabilceği gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 91512

Anahtar Kelimeler : Prepreg, kompozit, karbon elyaf, otoklav, reçine

Sayfa Adedi : 76

Danışman : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FIBER ORIENTATIONS ON MECHANICAL JOINING STRENGTHS IN POLYMER COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Rusen SOZER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

In this study, resin-impregnated prepreg carbon fabrics that is a unidirectional carbon fiber material, were used. The curing process was completed by using aluminum alloy 7075 mold materials and applying the autoclave prescription determined according to prepreg carbon fiber standards for laminate plate production from prepreg carbon fabrics. The composite plates, whose autoclave process was completed, were used to produce composite carbon fiber laminates by 8 layers of fabric with a thickness of 1.9 ± 1 mm and a fiber volume ratio of approximately 58%. For testing, 12 samples were taken from different composite plates containing 5 different fiber arrays. A total of 60 samples were prepared in accordance with ASTM D953 standards, and in the same way, test apparatus was produced in accordance with ASTM D953 standards and tested. The samples, which were grouped according to the fiber arrays of the composite plates, were first subjected to non-destructive testing and control. SEM (Scanning Electron Microscopy) images of the samples were taken non-destructively, and errors that may occur during and after the laying process were observed. It was subjected to the tensile test destructively in accordance with ASTM D953 standards and the graphics created by the sequence differences were interpreted one by one. As a result, it has been shown that the mechanical strength can be increased by changing the stacking angles of the fiber orientation.

Science Code : 91512

Key Words : Prepreg, composite, carbon fiber, autoclave, resin

Page Number : 76

Supervisor : Prof. Dr. Cemil CETINKAYA

TEŞEKKÜR

Bugün eğitimli, donanımlı, ayakları yere basan, toplumda eşit haklara sahip bir Türk Mühendisiysem Ulu Önderimiz Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK sayesinde; sevgi, saygı ve şükranlarımla...

Lisans, yüksek lisans ve tez çalışmam boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA 'ya Lisans eğitimimden bu yana her konuda gelişimime katkı sağlayan, bilgi ve deneyimleri ile bana ışık tutan kıymetli hocalarım, Gazi Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Fakültesi öğretim üyesi Sayın Dr. Öğr Üyesi Meryem POLAT GÖNÜLLÜ 'ye

Her konuda büyük destekçim olan aileme sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
RESİMLERİN LİSTESİ	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
3. KOMPOZİT GENEL TERİMLERİ	5
4. TAKVİYE MALZEMELERİ	15
4.1. Fiber Hammadde Sınıfları.....	15
4.1.1. Takviye malzemelerinin karşılaştırılması	15
4.1.2. Yoğunluk karşılaştırılması	15
4.1.3. Kopma uzaması karşılaştırılması	16
4.1.4. Çekme mukavemeti karşılaştırılması	16
5. TAKVİYE KUMAŞ TÜRLERİ	19
5.1. Dokuma Örgüler.....	19
5.1.1. Düz (plain) dokuma.....	19
5.1.2. Twill dokuma	20
5.1.3. Çok yönlü (multiaxial) örgüler	20
5.1.4. Tek yönlü (unidirectional) örgüler	21
5.1.5. Çift yönlü (biaxial) örgüler	21
5.1.6. Üç yönlü (triaxial) örgüler	22

Sayfa

6. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ	23
6.1. Açık Kalıplama Yöntemleri	24
6.1.1. El yatırma yöntemi	24
6.1.2. Sprey kalıplama / püskürtme yöntemi.....	24
6.1.3. Elyaf sarma yöntemi	25
6.1.4. Vakum torbası yöntemi	25
6.1.5. Otoklav yöntemi.....	26
6.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri	26
6.2.1. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	26
6.2.2. Pultrüzyon yöntemi	28
6.2.3. Ekstrüzyon yöntemi	29
6.2.4. Hazır kalıplama yöntemi	29
6.2.5. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi	30
6.2.6. Savurma yöntemi ile kalıplama.....	30
7. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR TARAMASI	33
8. MATERYAL VE METOD	37
8.1. Prebreg kumaş seçimi	37
8.1.1. Ud (tek yönlü) prebreg kumaşlar	38
8.1.2. Örgülü (plain) kumaşlar:	38
8.2. Kalıp Seçimi	39
8.3. Kalıp Ayıcı	40
8.4. Soyma Kumaşı (Peel Ply)	40
8.5. Reçine Geçirgenliği Sağlayan Film (Release Film)	40
8.6. Vakum Battaniyesi (Air Breather)	41
8.7. Vakum Naylonu	41
8.8. Kompozit Plakaların Hazırlanması	41

	Sayfa
8.8.1. Serim işlemi için kalıp hazırlığı;	44
8.8.2. Vakum torbalama yöntemi	45
8.8.3. Vakum torbalama yönteminin avantajları:	47
8.8.4. Su jeti kesim işlemi	48
8.8.5. Aşındırıcı su jetinin faydaları	49
9. DENEYSEL ÇALIŞMA	51
9.1. Soyma Kumaşın Uygulanması	53
9.2. Ayırıcı Film ve Baskı Plakası Uygulaması	54
9.3. Vakum İşlemi	54
9.4. Otoklav İşlemi	55
9.5. Su Jeti İşlemi	56
9.6. Numuneler	56
9.7. Çekme Cihazı ve Özellikleri	57
10. DENEYSEL SONUÇLAR	59
10.1. A Grubu Numune Sonuçları.....	59
10.2. B Grubu Numune Sonuçları	60
10.3. C Grubu Numune Sonuçları	61
10.4. D Grubu Grubu Numune Sonuçları	63
10.5. E Grubu Numune Sonuçları	64
11. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kompozit yapı örneklemeleri	3
Resim 3.1. Fiber serim yönleri.....	9
Resim 3.2. Camsı geçiş sıcaklığı (T _g) şematik gösterimi.....	10
Resim 3.3. Erime sıcaklığı	11
Resim 3.4. Makaraya sarılı ip gösterimleri	11
Resim 3.5. Pan ve zift prosesleri ile karbon fiber üretimi	13
Resim 3.6. Çözü ve atkı ipi gösterimi.....	13
Resim 5.1. Fiber kumaşın örgü ve çözgü yönlerinin gösterim	19
Resim 5.2. Düz dokuma örneği.....	20
Resim 5.3. Düz dokuma örneği.....	20
Resim 5.4. Tek yönlü (unidirectional) örgüler.....	21
Resim 5.5. Çift yönlü (biaxial) örgüler	22
Resim 5.6. Üç yönlü (triaxial) örgüler	22
Resim 6.1. Kompozit malzemenin oluşumu	23
Resim 6.2. El yatırma yönteminin şematik gösterimi	24
Resim 6.3. Püskürtme yöntemi şematik gösterimi.....	25
Resim 6.4. Elyaf sarma yöntemi şematik gösterimi	25
Resim 6.5. Otoklav yöntemi şematik gösterimi	26
Resim 6.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi.....	27
Resim 6.7. Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi	28
Resim 6.8. Ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi	29
Resim 6.9. Hazır kalıplama yöntemi şematik gösterimi	30
Resim 6.10. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi şematik gösterimi	30
Resim 6.11. Savurma yöntemi ile kalıplama şematik gösterimi.....	31
Resim 8.1. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit üretimi	37

Resim	Sayfa
Resim 8.2. UD kumaş serimi	39
Resim 8.3. Örgü kumaş serim	39
Resim 8.4. Kompozit serim öncesi kalıbın hazırlanması	44
Resim 8.5. İlk katman olarak örgü kumaşın serilmesi	45
Resim 8.6. Tek yönlü kumaşların serilmesi	45
Resim 8.7. Dizilim kuralları	46
Resim 8.8. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi	47
Resim 8.9. Hazırlanan kompozit plakanın torbalanması.	47
Resim 8.10. ASTM D953 Standartlarına uygun olarak üretilen test numunesi	49
Resim 9.1. Serim işlemi	51
Resim 9.2. a) Soyma kumaşı (peel ply) uygulaması b) Vakum işlemi ve kontrolü	52
Resim 9.3. a) Çekme cihazı, test aparatı ve numune b) Numune ve ölçüsel gösterimi ..	53
Resim 9.4. Soyma kumaşı (peel ply) uygulaması	54
Resim 9.5. Ayırıcı film ve baskı plakası uygulaması	54
Resim 9.6. Vakum hazırlıkları ve vakum işlemi	55
Resim 9.7. Otoklav reçetesi ve gösterimi	55
Resim 9.8. Su jeti sonrası laminat gösterimi	56
Resim 9.9. Numunelerin markalanmış gösterimi	56
Resim 10.1. A Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri	60
Resim 10.2. B Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri	61
Resim 10.3. C Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri	62
Resim 10.4. D Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri	64
Resim 10.5. E Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri	65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Fiber elyaf sınıflandırılması.....	8
Çizelge 4.1. Fiber sınıfları	15
Çizelge 8.1. OM10 reçine sistemine ait olan teknik bilgiler.....	42
Çizelge 8.2. Kurlenmiş olan Om10 reçinesine ait olan mekanik özellikler.....	42
Çizelge 9.1. Dizilim yönleri.....	51
Çizelge 9.2. Instron 3369 teknik özellikler	57
Çizelge 10.1. Değerlendirilen numunelerin mekanik değerleri	66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 8.1. Om10 reçinesine ait sıcaklık-viskozite değişimi	43
Şekil 8.2. Otoklav kür sıcaklığı-zaman grafiği	44
Şekil 8.3. Otoklav kür döngüsü.....	48
Şekil 10.1. A Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği	59
Şekil 10.2. B Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği	61
Şekil 10.3. C Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği	62
Şekil 10.4. D Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği	63
Şekil 10.5. E Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği.....	65

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme insanlık tarihi boyunca yapı malzemelerinin kullanıldığı alanlarda insanoğlunun yıllarca problemlerini çözmek amacı ile farklı malzemelerin makro ölçekte bir araya getirilerek problemlerini çözdükleri malzemeler olmuştur [1]. Kompozit malzemeler; benzer veya benzer olmayan en az iki farklı malzemenin belirli bir amaç ile bir araya gelmesi sonucu oluşur. Bir araya gelen bu malzemeler, her bir bileşenin kendi özelliğini yapıda sergilemesiyle yeni bir malzeme ortaya çıkarmaktadır. Kompozit malzemeler; iki fazdan oluşmaktadır. Birincil faz matriks fazıdır ve bu faz genel olarak düşük dayanıma sahiptir. Kompozit malzeme içerisinde matriks fazı kompozit elemanlarını bir arada tutma, yükü bileşenlere dağıtma ve çevresel etkilerden koruma görevlerini yerine getirmektedir. İkincil faz ise takviye fazıdır. Bu faz genel olarak takviye fazı olarak bilinir ve oluşturulan kompozit malzemeye yüksek dayanım sağlayan fazdır. Kompozit malzeme makro ölçekte bağdaşık özellik gösterse de mikro boyutlarda ayrışık özellikler göstermektedir [2].

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, matriks fazı ve takviye fazı olarak birçok duruma göre sınıflandırılabilir. Kompozit malzemelerin üretiminde termoset polimerler, termoplastik polimerler gibi birçok matriks fazı kullanılabilirken, takviye fazı olarak da karbon elyaf, aramid elyaf veya cam elyaf gibi de birçok takviye fazı kullanılabilir. Yapısal dayanıma en çok ihtiyaç duyulan sektörler olan, otomotiv ve havacılık sektörlerinde genel olarak termoset polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Termoset kompozit malzemelerin tercih edilmesinin ikinci büyük nedenlerinden biri ise atmosferik şartlarda olan dayanımı ve uygun koşullarda uzun raf ömrüdür. Epoksi matriksler poliester matrikslere göre daha yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler (175°C), bu sebeple yüksek seviyede performans gerektiren alanlarda epoksi matriksli kompozitler tercih edilmektedir [3]. Bu çalışmada, epoksi matriks içerisine karbon elyaf takviye edilmiş prepregler kullanılarak kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik olarak birleştirilmesinde mukavemetin araştırılması amaçlanmaktadır. Literatürde bu konu üzerine yapılmış bazı çalışmalar incelenmiş ve gerekli değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

İki veya daha fazla malzemenin birleşmesiyle oluşurlar. Bu malzemeler:

- Takviye malzemeleri
- Reçine / matris malzemeleri

Olarak tanımlanırlar. Yukarıda bahsedilen malzemeler kendi özelliklerini koruyarak birbirlerine yapışırlar, fakat kimyasal bileşik oluşturmazlar veya çözünmezler. Normal olarak kompozit malzemeyi oluşturan malzemeler fiziksel olarak yapı içinde ayrı ayrı gözüktürler ve birbirlerine bağlı olarak işlevlerini sürdürürler, dolayısıyla yapı içindeki maddeler fiziksel olarak da ayrı ayrı belirlenebilmektedir. Resim 2.1.'de kompozit malzemeye günlük hayat içindeki kullanımları için örnekler verilmiştir.

Çok fazla farkında olmadığımız kompozit malzemeler, günlük yaşantımızda çok fazla yer tutmaktadır. Basit bir elektronik cihaz içerisindeki plastik parçalardan, uçak yapısal parçalarına, kurşun geçirmez kasklara, inşaat sektöründeki yapısal parçalara, yatlara, rüzgâr türbinlerine, otomotiv sektörüne kadar geniş yelpazede kompozit malzemeler kullanılmaktadır.



Resim 2.1. Kompozit yapı örneklemeleri

Kompozit malzemenin mekanik bakış açısıyla tanımı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek daha mukavemetli daha hafif malzeme oluşturmastır.



3. KOMPOZİT GENEL TERİMLERİ

Akustik emisyon

Akustik Emisyon (AE), stres altında olan malzemelerde birden fazla yük kaynağının hızlı bir biçimde enerji salınımı yaparak meydana getirdiği kalıcı olmayan dalgalardır. AE; malzeme içerisinde geniş bir alanı kapsayan doğal olayların tamamıdır. Büyük çaplı sismik bir olaydır. AE ile muayene yöntemlerinden en çok kullanılan yöntem; metaller içerisinde bulunan dislokasyon hareketinin ölçümüdür [4].

Alev geciktirici özellik

Kompozit malzeme içerisinde kullanılan ve matris yapı olarak bilinen reçinenin yanma eğilimini azaltmak amacıyla kullanılan kimyasal katkı maddeleri olduğu bilinmektedir.

Antioksidan

Oksitleyici etkiler sonucunda, bozulmayı engellemek amacıyla küçük miktarda reçine içine katılan katkı maddeleridir.

Antistatik maddeler

Aromatik aminlerin Schiff diye adlandırılan birtakım karmaşık kimyasal tepkimelerde çeşitli substratlara oksijen iletici olarak, polimer malzeme teknolojisi içinde antistatik malzemeler olarak kullanılmaktadır. Bazı metal bileşimlerinde görülen likit kristal özelliği ile havacılık sanayisinde ve dijital saatlerin gösterge ekranlarında kullanılmaktadır. Schiff bazlarının yapılarında oksokrom gruplar bulunduğu takdirde bunlardan elde edilen metal bileşimleri renksiz olmayan maddeler olduklarından boya sanayisinde ve özellikle tekstilde ana boya uygulayıcı madde olarak kullanılmaktadır [5]

Ara duruş

Bir kalıptaki ısı veya basınç uygulamasının kısa bir süre ile durdurularak, kalıp tam olarak

kapatılmadan önce, kalıplama malzemesinden gaz çıkışının sağlanmasıdır.

Ara malzeme

Sandviç yapıdaki ürünlerde, genellikle köpük veya bal peteği şeklinde, lamina/laminat arasında yapıştırılmış olarak yer alan malzemelerdir.

Bağlayıcı

Keçe veya önşekil (perform) verilmiş kuru takviyelerde, imalattan kalıplamaya kadar geçen süre içinde fiber veya kumaşları bir arada tutan kimyasal bileşiktir.

Balık gözü

Laminat yüzeyinde beliren kabarcıklar ve küçük göçmelerdir. Yüzeyin kirli olması veya reçine üzerine düşen yabancı maddeler gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Laminat yüzeyinde oluşan hata tanımıdır.

Buruşma

Jelkotlu dış yüzeyde, buruşma veya katlanma şeklinde görülen bir kalıplama hatasıdır.

Boşluk

Laminat içindeki boşluk alan tanımıdır. Boşluk genel olarak reçine eksikliği ve lamina köprülenmesi durumlarında kullanılan bir tanımlamadır.

Boşluk oranı

Laminat içindeki boşluğun hacim olarak tanımıdır. Hesaplamalarla boşluk değerini bulmak hatalı sonuçlara götürebileceği için mikroskopik analiz sonuçları kullanılmalıdır. Genel olarak kompozit yapılarda bu oran %2'den düşük olması istenir. Kompozit malzemelerin mekanik dayanımında, elyafın dayanımı belirleyici olan en önemli etkenlerdendir. Uzunluğun çapa oranı ile iletken yük miktarı doğru orantılı olarak değişmektedir. Kompozit

malzemelerin oluşumunda kullanılan elyaf cinsi kadar elyaf oranı da önemli bir etkidir. Elyaf oranının artması, aynı zamanda matris fazının azalmasına neden olacağından bir noktaya kadar arttırmakla birlikte belli bir oranı aşmasıyla mekanik mukavemette azalmalar görülmektedir. Ek olarak, elyaf ve matris arasındaki bağ oluşumunda, matris fazında bulunan boşluklar elyaflar ile iletişimi azaltacaktır. Bu yüzden elyaf ve matris arası etkileşim, mukavemet açısından önemli bir değerdir [6].

Dokuma

Fitil veya ipliklerin, birbirleri arasından geçirilerek birbirlerini sıkıştırmaları sonucunda, ağ şeklinde oluşturulan kumaşa verilen genel addır.

Eğrisel yüzey serim özelliği

Kumaşların eğrisel yüzeylere serim özelliğini göstermek için tanımlanmaktadır. Kumaşın kalıp yüzeyini sarmaması durumunda;

- Reçine zenginliği,
- Reçine eksikliği,
- Lamina (kumaş buruşması),

gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu nedenle yüzey eğriselliğine göre kumaş seçiminde dikkatli olunmalıdır.

Ekzoterm

Polimerin kürleşme reaksiyonu sırasında ısı açığa çıkarması ve açığa çıkan ısıya serbest kalması ve yayılmasıdır.

Elastomer

Deformasyona neden olan faktörün kaldırılmasından sonra oda sıcaklığında orijinal boyutunu ve şeklini yeniden kazanan malzemedir.

Fiber elyaf

Son zamanlarda, uzun yıllar çalışılarak geliştirilmiş olan karbon fiber ürünler sanayide çok geniş oranda kullanım alanlarına erişmiştir. Günümüzde pek çok metalin yerine kullanımları söz konusudur. Metallere oranla metal kadar ağır olmamaları çok büyük avantaj sağlamaktadır. Karbon fiberlerin kullanımı Thomas Edison'un akkor lamba filamentleri için pamuk ve bambu elyaflarını kullanarak karbonlaştırması sonucu karbon fiber elde ettiği döneme dayanmaktadır. Ticari olarak kullanımları ise 1950 yıllarının sonlarında roket yapımında kullanılan ablatif malzemelerin araştırılmaları yapılırken başlamıştır [7].

Fiber sınıfları

Takviyeleri oluşturan fiber sınıfları Çizelge 3.1.'de gösterildiği biçimde tanımlanabilmektedir. Tablo sınıflandırılması reçineli/reçine içermeyen kumaşlar ve alt grup olarak ip ve kumaş ile tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1. Fiber elyaf sınıflandırılması

Fiber	Reçine emdirilmiş	Tek yön şerit
		Bükümsüz ip
		Reçine emdirilmiş kumaş
	Kuru fiber	Bükümlü ip
		Bükümsüz ip
		Tek yön dokuma
		Üç yön dokuma
		Ön form verilmiş kumaş
		Spiral
		Sac örgü
		Kıvrımsız kumaş

Kürleme sonrası lamina kalınlığı

Kürleşme sonrası istenilen parça kalınlığını elde edebilmek için kullanılması gereken

lamina adet belirlenmesi gerekli bir tanımlamadır. Kürleme sonrası lamina kalınlığı genel olarak aşağıdaki formül ile hesaplanır [8].

$$CPT = \frac{Wf}{PfxVf}$$

CPT= Kürleme sonrası lamina kalınlığı

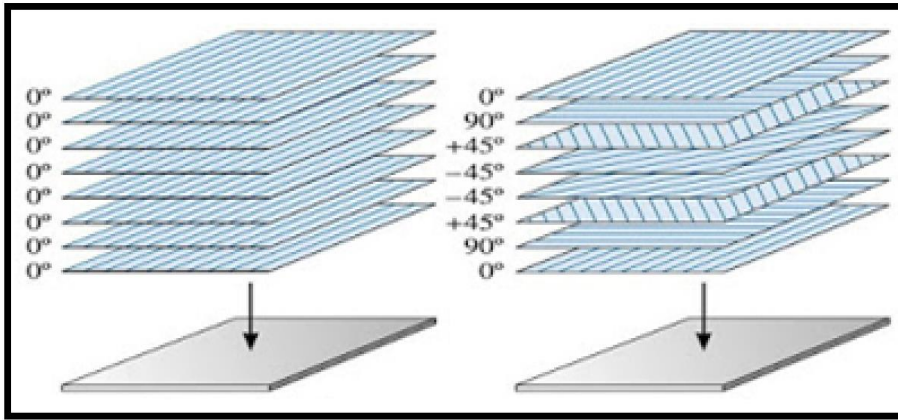
= Fiber yoğunluğu (gr/cm³)

= Fiber hacim (%)

= Reçine emdirilmiş kumaş içindeki fiber alan ağırlığı (gr/m²)

Fiber yönü

Fiber yönü lamina seriminde fiberin konumlandığı yeri göstermektedir. Resim 3.2.'de lamina serim yön eksen ve serim açıları örneklendirilmektedir. Şekiller karbon şerit malzemeye göre verildiği için yön tanımının gerçekçi olması açısından imaj renkleri açık gösterilmektedir. Fiber yönleri genel olarak 0°, ±45°, ve 90° olarak seçilmektedir.



Resim 3.1. Fiber serim yönleri

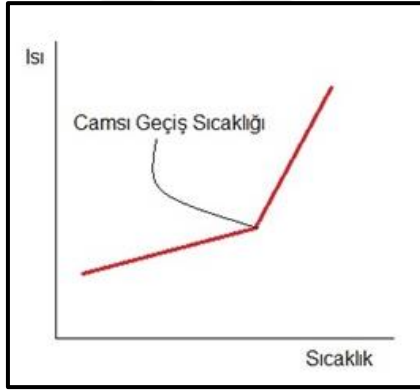
Geçiş sıcaklığı

Bir malzemenin kimyasal özelliklerinin değiştiği sıcaklık tanımıdır.

Camsı geçiş sıcaklığı (Tg)

Polimer malzemelerin içerdikleri polimer zincirler, ısınmada etkisi ile içerdikleri enerjilerini kinetik enerji olarak harcarlar ve kendilerini daha az enerjili bir konuma getirirler. Aslında

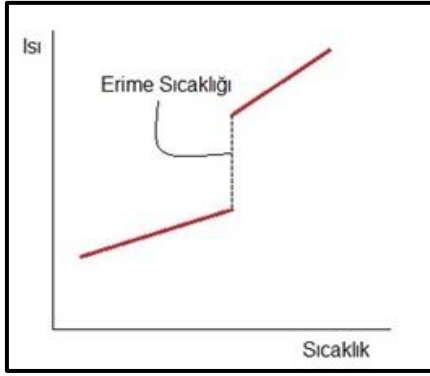
bu enerji durumu tüm sıcaklık kademeleri için geçerlidir, fakat malzeme ısıtılması devam ettikçe malzemenin ulaştığı sıcaklık değeri polimer zincirler arasındaki hareketlilik tüm zincirlere yayıldığı için bu sıcaklığa “camsı geçiş sıcaklığı” denmektedir. Reçine grupları içerisindeki epoksi reçine grupları, katılaşma zamanını kısaltmak ve aynı zamanda istenen mekanik özellikleri kazandırabilmek amacı ile sertleştirici malzemeler ile birlikte kullanılmaktadırlar. Kullanılmakta olan bu sertleştirici malzemeler genel olarak epoksi reçinenin, termal kararlılık, kimyasal olarak dayanım ve camsı geçiş sıcaklığı gibi özelliklerini belirlemektedirler. Anhydride ler iyi elektriksel direnç, termal mukavemet ve çevresel kararlılık sağlamaktadırlar. Aromatic amine ler yüksek termal mukavemet sağlarlar fakat yüksek sertleştirme (cure) sıcaklıkları gerektirmektedirler [9].



Resim 3.2. Camsı geçiş sıcaklığı (Tg) şematik gösterimi

Erime derecesi

Sıvı fazdaki polimer soğutulmaya başlandığında enerjisi azalır ve böylelikle epoksi reçine içerisinde bulunan moleküllerin titreşim ve dönme eğilimleri de azalmaktadır. Yeteri miktarda soğuma gerçekleştiğinde polimer malzeme kristallenir. Polimer kristallerinin katı fazdan sıvı faza geçtiği sıcaklık “erime noktası”dır.



Resim 3.3. Erime sıcaklığı

%100 amorf polimerlerde erime noktası gözlenmez, sadece camsı geçiş sıcaklığı vardır. Yarı kristal polimerlerde hem camsı geçiş sıcaklığı hem de erime noktası gözlenir. Polimer, aldığı ısı ile önce camsı geçişe uğrar, daha sonra da erir [10].

İp

Fiber veya elyafların belli sayıda gruplandırılmasına İP denir. Resim 3.5.'de cam fiber, aramid fiber ve karbon fiber ip çeşitleri gösterilmektedir.



Resim 3.4. Makaraya sarılı ip gösterimleri

Karbon, yoğunluğu 2.268 g/cm^3 olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyafların tarihsel gelişimine bakarsak cam elyaflardan daha sonra gelişmesine rağmen daha sık kullanılan elyaflardır. Karbon elyafların ve grafit elyafların elyaf adı altında adlandırılmasının nedeni ise organik maddelerden üretilmelerinden dolayıdır. Karbon elyaf liflerinin her bir lifinde en az oranla %92 karbon içermektedir [8]. Karbon elyaflar; kesikli karbon elyaflar ve sürekli karbon elyaflar şeklinde iki biçimde üretilmektedir. İç yapıları kristal, amorf veya yarı kristal olabilir [11]. Karbon elyaf malzemeler epoksi malzemeler ile birleştirildiklerinde mükemmel bir dayanım göstererek karbon fiber kompozit malzemeleri

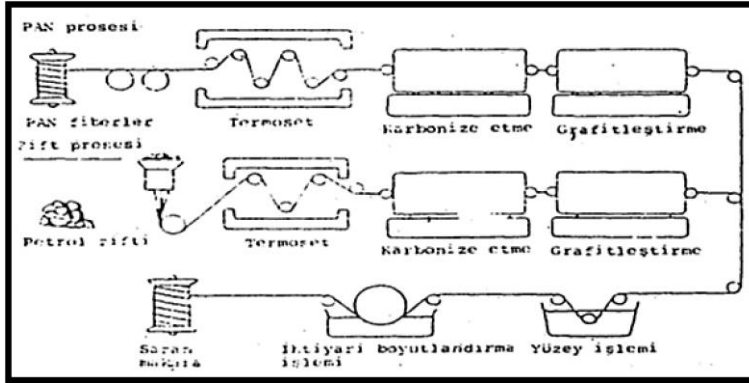
oluştururlar. Karbon elyaf üretimi nispeten cam elyaf ve aramid elyaflara nazaran daha zor ve maliyetli olduğundan genelde uçak üretiminde, spor araç ve gereçlerin üretiminde ve tıbbi cihazların üretiminde kullanılmaktadır [12]. Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemeden üretilir;

- Zift
- Pan (Poliakrilonitril)

Zift temelli karbon fiber elyafları rölatif bir biçimde mekanik özellikleri düşüktür. Yapısal olarak daha düşük bir dayanıma sahip olması nedeniyle yapısal dayanım gerektiren uygulamalarda daha az tercih edilmektedir [13]. PAN temelli karbon fiber elyaflar, zift temelli elyaflara nazaran mekanik özellikleri daha yüksektir. Bu karbon elyaflar günümüzde halen gelişimi devam etmektedir. PAN karbon elyafların üretimi için sırasıyla dört ana basamak vardır.

1. Oksidasyon; hava ortamında 300 °C ısıtılan karbon elyaflar bu aşamada hidrojenin ayrılması ve uçucu oksijenin eklenmesi sağlanır. Polimer malzeme bu işlem ile daha kararlı olması sağlanır. Bu işlem öncesinde elyafların rengi beyazdır, bu işlem neticesinde siyah bir renk almaktadır.
2. Karbonizasyon; yanıcı gazlardan tamamen izole bir ortamda elyaflar 3000 °C'ye kadar ısıtılır. Bu sayede liflerin %100 oranda karbonlaşması sağlanmaktadır. Bu sırada karbon elyaflar üzerine uygulanan sıcaklığın miktarı, karbon elyafların sınıfını belirlemektedir.
3. Yüzey iyileştirilmesi; karbon fiber malzemenin yüzey temizlemesi bu kademede yapılmaktadır. Elektrolit banyosu yaptırılarak karbon elyaf yüzeylerinde bulunan istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması sağlanır, bu sayede karbon elyaflar matris yapı içerisinde daha homojen bir birleşme sağlamaktadır.
4. Kaplama; karbon fiber elyaflara reçine ile ince bir film tabakası şeklinde bir ara yüz uygulaması yapılır ve üretim tamamlanır.

PAN tabanlı karbon elyafları kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir. PAN'ın karbon elyafına birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmektedir; [14]. Resim 3.6.'da PAN ve Zift yöntemi kullanılarak üretilen karbon elyafların şematik olarak gösterimi verilmiştir.

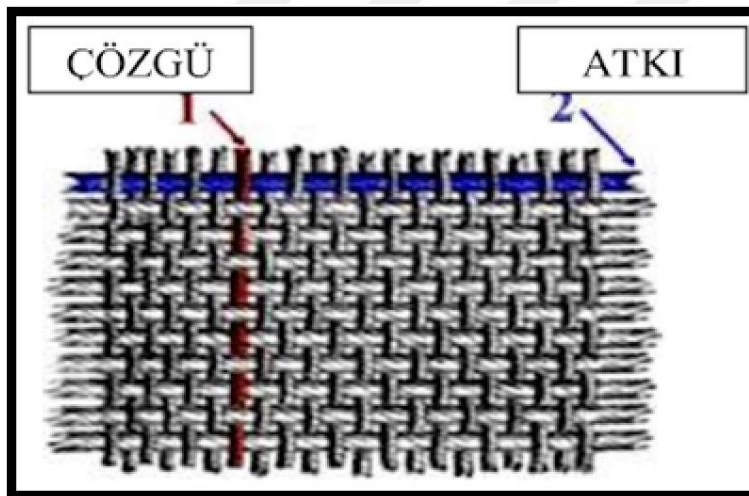


Resim 3.5. Pan ve zift prosesleri ile karbon fiber üretimi

Çözü ipi ve atkı ipi

Çözü ipi: Dokuma kumaştaki boylamasına yöndeki ip tanımıdır.

Atkı ipi: Çözgünün altından ve üstünden geçen çözgüye dik iplik tanımıdır.



Resim 3.6. Çözü ve atkı ipi gösterimi



4. TAKVİYE MALZEMELERİ

Takviye malzemeleri kompozit malzemeler için katışkı malzemeler olarak bilinmektedir. Aynı zamanda bu malzemeler kompozit malzemelerin hangi sınıf kompozit malzeme olduklarının isimlerini belirlemede kullanılır. Örnek olarak: Karbon fiber iplikler takviye edilerek oluşturulan kompozit malzemeler “karbon fiber kompozitler” olarak bilinir.

4.1. Fiber Hammadde Sınıfları

Kompozit malzemelerdeki takviyelerin ilk kademesini fiberler oluşturmaktadır. Mekanik sınıflandırma açısından da fiber özellikleri, kompozit mukavemet hesaplamalarında en önemli özelliği oluşturmaktadır. Doğal fiberler günlük yaşantımızın içinde oldukça sık kullandığımız ürünler olsa da sentetik fiberler de kompozit malzemelerde oldukça sık kullanılmaktadır. Çizelge 4.1.’de doğal ve sentetik fiber sınıfları gösterilmektedir [15].

Çizelge 4.1. Fiber sınıfları

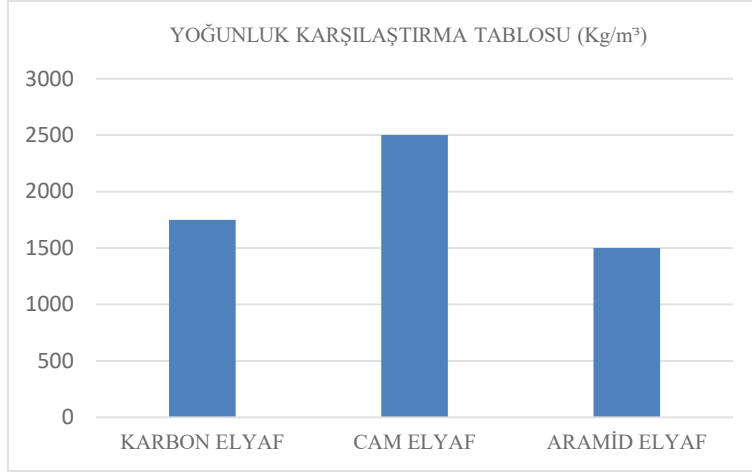
FİBER	ELDE EDİLME	ÖRNEK
DOĞAL FİBERLER	HAYVANSAL	ANGORA, DEVE KILI, KAŞMİR, MOHER, YÜN, İPEK
	BİTKİSEL	BAMBU, PAMUK
	MİNERAL	ASBEST, CAM YÜNÜ
SENTETİK FİBERLER	KİMYASAL ÜRÜNLER	ARAMİD, KARBON, POLYESTER, NAYLON, POLİETİLEN, AKRİLİK

4.1.1. Takviye malzemelerinin karşılaştırılması

Bu bölümde aramid, karbon ve cam elyaf takviye malzemelerinin mekanik özellikleri açısından karşılaştırılmaktadır. Tablo değerleri referans ve sadece değerlendirme amaçlı olarak kullanılmaktadır. Mekanik değerler farklı referans değerlerine göre farklılık gösterebilir.

4.1.2. Yoğunluk karşılaştırılması

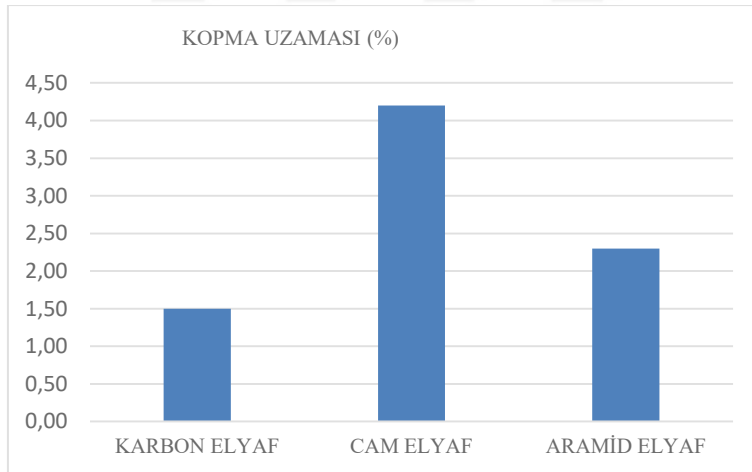
Takviye malzemeleri yoğunluk karşılaştırılması Şekil 4.1.’de gösterilmektedir. Cam elyaf malzemenin yoğunluğu en yüksek, aramid malzemenin yoğunluğu en düşüktür.



Şekil 4.1. Takviye malzemenin yoğunluk karşılaştırması

4.1.3. Kopma uzaması karşılaştırılması

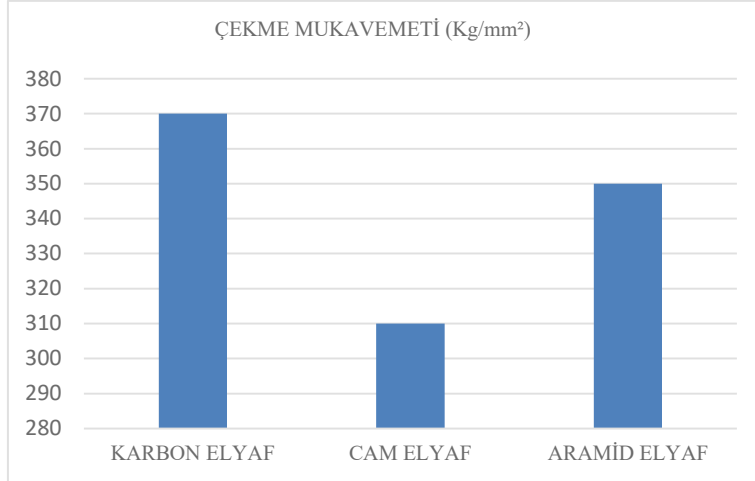
Takviye malzemelerin kopma uzaması (%) Şekil 4.2.'de gösterilmektedir. Katılık açısından karbon fiber en iyi özelliğe sahiptir. Başka bir anlatımla karbon malzemeler en düşük kopma uzaması değerine sahiptir.



Şekil 4.2. Takviye malzemelerin kopma uzaması

4.1.4. Çekme mukavemeti karşılaştırılması

Takviye malzemeleri çekme mukavemeti karşılaştırılması Şekil 4.3.'de gösterilmektedir. Çekme mukavemeti açısından yapısal cam elyaf yüksek görülse de teknolojik gelişmeler karbon fiberi cam elyaf üzerine taşımaktadır [15].



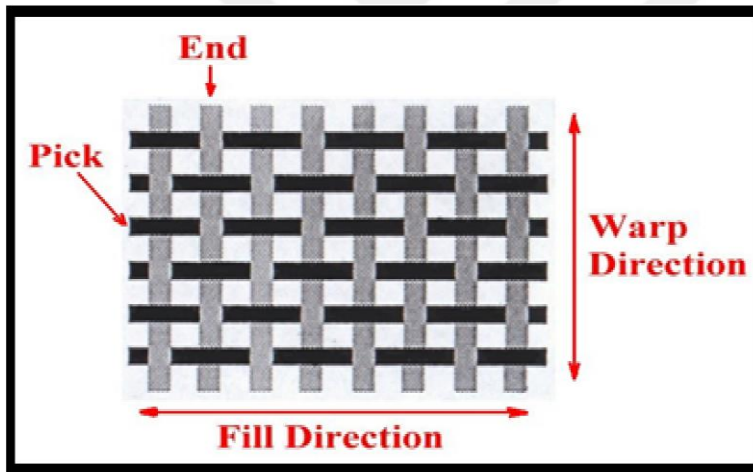
Şekil 4.3. Takviye malzemeleri çekme mukavemeti



5. TAKVİYE KUMAŞ TÜRLERİ

5.1. Dokuma Örgüler

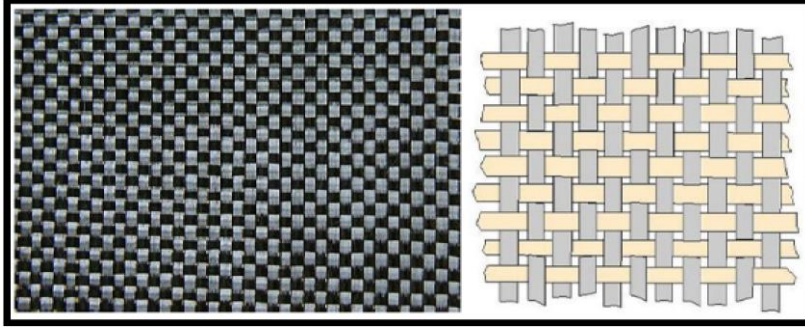
Fiber dokuma örgüler toplu halde bulunan elyaf ipliklerin bir ters bir düz olarak ve aynı zamanda 0° ve 90° olarak birbirleri altından ve üzerinden geçirilerek oluşturulan elyaf dokuma türüdür. Bu elyaf kümelenmesi halinde bulunan ipliklerin 0° istikametinde bulunan ipliklerin grubuna “atkı” (warp) adı verilirken 90° istikametinde bulunan iplik grubuna ise “çözgü” (fill) adı verilmektedir. İplik gruplarının birbirleri üzerinden ve altından geçme sırası ve sayısı oluşturulan dokuma elyaf türüne ismini kazandırmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılan iplik gruplarının oluşturduğu dokuma tipleri düz, twill ve satin dokumadır. Örgü ve çözgü Resim 5.1.’de gösterilmektedir.



Resim 5.1. Fiber kumaşın örgü ve çözgü yönlerinin gösterim

5.1.1. Düz (plain) dokuma

Atkı ve çözgü ipliklerinin her bir tanesi toplam alan içerisinde bir adet altından ve bir adet üstünden geçirilmesi sonucu oluşan elyaf dokuma türüne tekstil sektörü başta olmak üzere “düz” dokuma olarak adlandırılır.

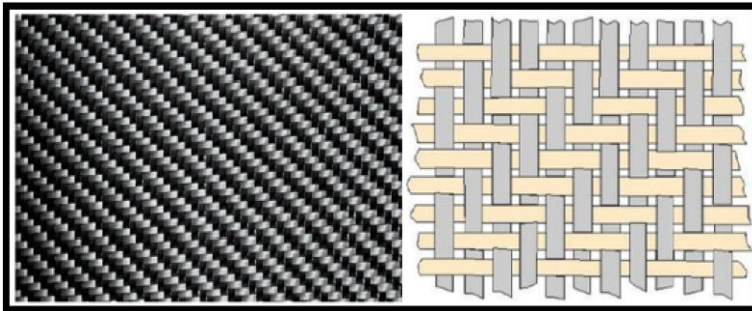


Resim 5.2. Düz dokuma örneği

5.1.2. Twill dokuma

Atkı ve çözgü ipliklerinin her bir tanesi toplam alan içerisinde iki adet altından ve iki adet üstünden geçirilmesi sonucu oluşan elyaf dokuma türüne tekstil sektörü başta olmak üzere “twill” dokuma olarak adlandırılır. Kozmetik açıdan güzel bir görünüm vermesi nedeniyle görünüm estetiği aranan uygulamalarda bu tarzda olan dokuma elyaflar tercih edilmektedir.

Sheffer ve arkadaşları [16], dokuma türlerinin mekanik dayanıma olan mukavemetini incelemişlerdir. Üç farklı elyaf dokuma türünde olan yapılardan S-camından 1x1 rib, interlock ve milano rib tarzında örülmüş olan yapıların incelenmesi sonucunda; düz elyaf dokuma olarak örülmüş olan kompozit malzemelerin en iyi darbe dayanımı gösterdiklerini keşfetmişlerdir.



Resim 5.3. Düz dokuma örneği

5.1.3. Çok yönlü (multiaxial) örgüler

Son zamanlarda kompozit malzeme üretiminde çift yönlü 0° ve 90° kumaşların yerine “tek yönlü, çift yönlü, üç veya dört yönlü” olan çok yönlü olarak üretimi sağlanabilen çok yönlü

elyaf ipliklerin kullanımına başlanmıştır. Yapı içerisinde kullanılan elyaf iplikler ince bir polyester iplik yardımı ile dikilmesi gerçekleştirilmektedir. Bu yapılar içerisinde ince polyester ipliklerinin kullanılması hem ağırlık bakımından hem de maliyet açısından önem arz etmektedir [14].

5.1.4. Tek yönlü (unidirectional) örgüler

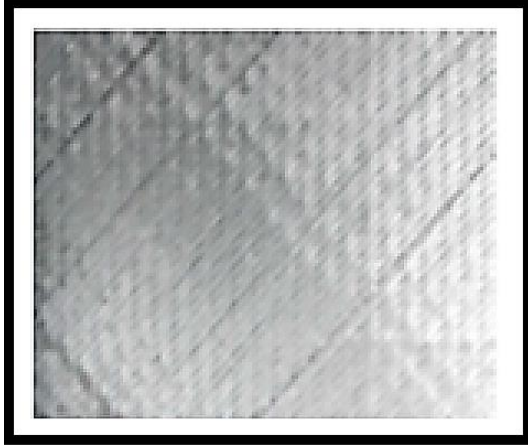
Yapı içerisinde sadece 0° ve 90° istikametinde bulunan elyaf iplikler bulunmaktadır. Bu ipliklerin bir arada tutulabilmesi amacı ile tek yönlü yapı dikiş iplikleri ile dikilerek sabitlenmesi sağlanmaktadır. Resim 5.4.'te tek yönlü (unidirectional) örgüler gösterilmektedir.



Resim 5.4. Tek yönlü (unidirectional) örgüler

5.1.5. Çift yönlü (biaxial) örgüler

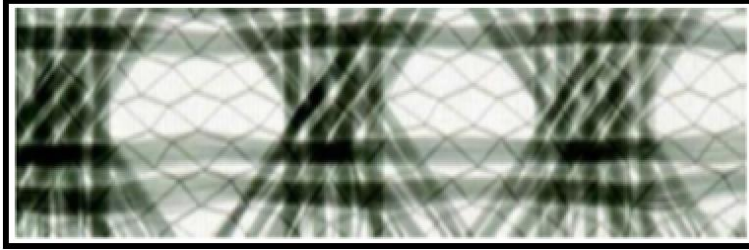
Yapı içerisinde sadece 0° ve 90° veya $+45^\circ$ ve -45° istikametinde bulunan elyaf iplikler bulunmaktadır. Bu iplikler yapı içerisinde iki tabakalı dikiş iplikleri ile dikilmesi sonucu oluşan elyaf iplik grubudur. İhtiyaç doğrultusunda olarak $+30^\circ$ ve -30° gibi açı değerlerinde veya daha farklı açı değerlerinde üretilmesi mümkündür. Örneğin $+30^\circ/-30^\circ$ Resim 5.5.



Resim 5.5. Çift yönlü (biaxial) örgüler

5.1.6. Üç yönlü (triaxial) örgüler

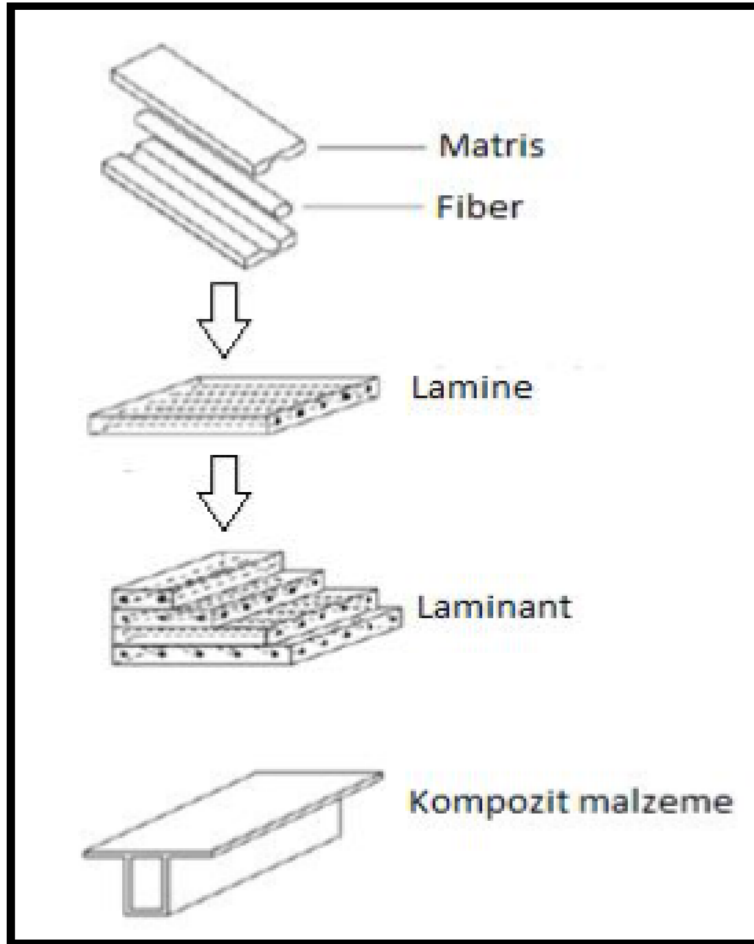
Yapı içerisinde sadece $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ veya $+45^\circ/-45^\circ/90^\circ$ gibi istif istikametinde bulunan açı gruplarındaki elyafların her birinin birbirine paralel olarak dikilmesi sonucu oluşan elyaf iplik yapı grubudur. Bu tür elyaf gruplarındaki iplik gruplara “multiaxial” kumaş türü denmektedir. Resim 5.6.



Resim 5.6. Üç yönlü (triaxial) örgüler

6. KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit malzeme üretimi, en başta istenen mekanik ve fiziksel özellikleri olmak üzere, takviye malzemesine, matris malzemesine, parça şekline ve maliyetine bağlı olarak değişiklik kazanmaktadır. Kompozit üretim yöntemi, matris ve takviye elemanından sonra bir parçanın son halini belirlemede önemli rol almaktadır. En genel hali ile kompozit üretimi Resim 6.1.'de gösterilmiştir. Matris ve fiber mikro ölçekte birleşerek tek tabakaya sahip bir lamine oluşturur. Bu tek tabaka lamineler ise üretilecek parçanın kalınlığına bağlı olarak bir araya gelerek büyük boyutlarda laminant oluşumuna izin verir. Bu birleşme istenilen mekanik özelliklere bağlı kalarak, belirli üretim yöntemleriyle yapılmak zorundadır [17].



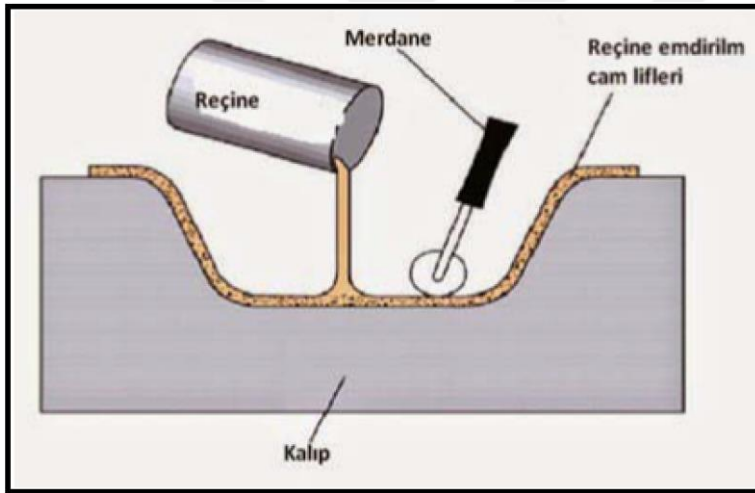
Resim 6.1. Kompozit malzemenin oluşumu

Açık ve kapalı kalıplama yöntemleri olmak üzere iki ana kısma ayrılır.

6.1. Açık Kalıplama Yöntemleri

6.1.1. El yatırma yöntemi

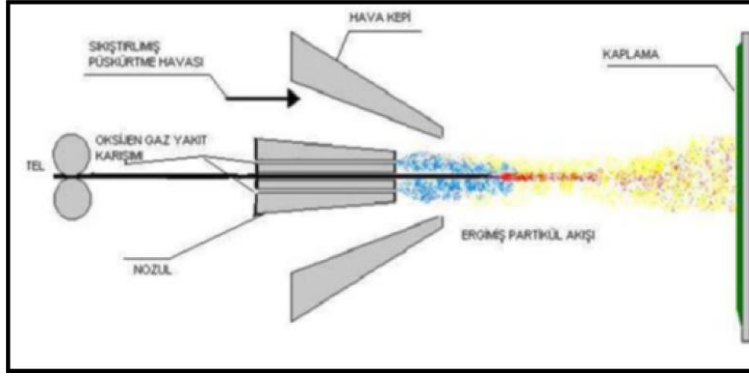
Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılır üzerine sıvı reçine elyaf katmanlarına gelecek de emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülmelidir. Belli bir süre sonra jelkot sertleşmektedir. Jelkot sertleşmesi sonrası elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülerek işlem tamamlanır. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi emdirilmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksinin yanı sıra vinilester ve fenolik reçineler de kullanılabilir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen az miktardaki üretimler için çok uygundur [17].



Resim 6.2. El yatırma yönteminin şematik gösterimi

6.1.2. Sprey kalıplama / püskürtme yöntemi

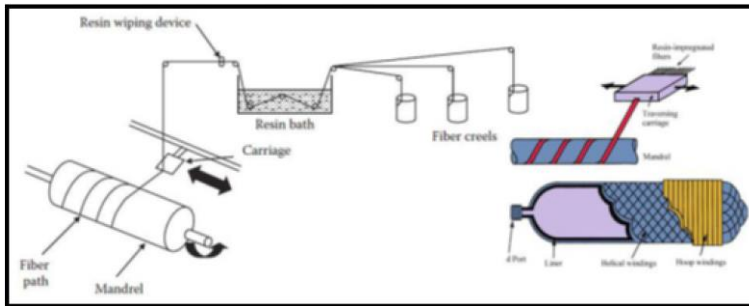
Püskürtme yöntemi elle yatırma yöntemini aletli kullanılmış hali olarak kabul görür. Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine yardımıyla özel bir tabanca sayesinde püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerindeki bağımsız çalışma özelliğine sahip bir kırıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrasında yüzeyin bir rulo yardımıyla düzeltilmesi sağlanır ve ürün hazırlanmış olur [18].



Resim 6.3. Püskürtme yöntemi şematik gösterimi

6.1.3. Elyaf sarma yöntemi

Bu yöntem özel şekillere sahip ürünlerin seri üretimine olanak vermektedir. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilmesi ve dönen bir kalıp üzerine sarılmasıyla gerçekleştirilir. Daima liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün belirli bir sertliğe ulaşır. Ardından döner kalıp çıkar. Bu metod yardımıyla yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır [19].



Resim 6.4. Elyaf sarma yöntemi şematik gösterimi

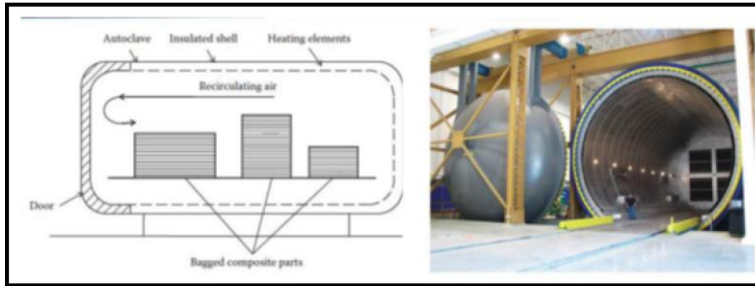
6.1.4. Vakum torbası yöntemi

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, hemen ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesi sayesinde vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygular ve aşağıya doğru çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin

kürleşmesi için yüksek sıcaklıklara çıkarılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanmaktadır. Kompozit malzemelerin tamir işlemlerinde de vakumlu kalıp yöntemi kullanılır [18].

6.1.5. Otoklav yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını fazlalaştırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamıyla en aza indirmek gerekmektedir. Bunun gerçekleştirilmesi için malzemeyi yüksek sıcaklık ve basınca maruz bırakmak gerekmektedir. Vakum bagging yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba yardımıyla elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol altında olabilir bir basıncın uygulanabilmesi için dış basınca ihtiyaç duyulmaktadır. Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve karışık şekillerde en çok kontrol edilebilen yöntem, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu hazneye aktarılmasıdır. Otoklav kesin basıncın, sıcaklığın ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir haznedir. Vakum bagging yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Fırın yerine otoklav tercih edilir. Böylece farklı amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol altında olur. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürer ve daha pahalı bir yöntemdir [20].



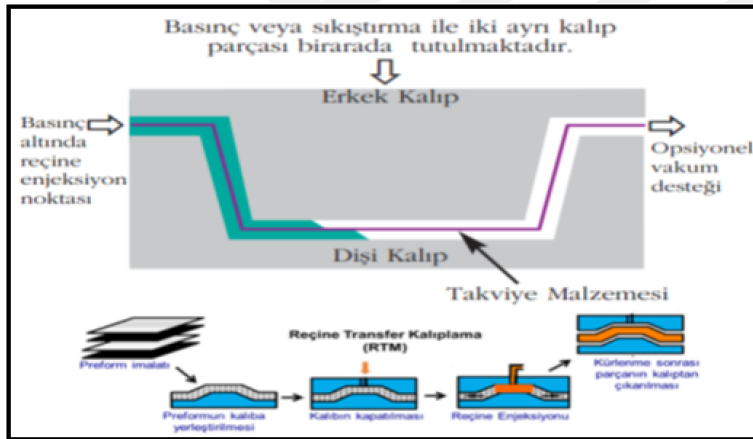
Resim 6.5. Otoklav yöntemi şematik gösterimi

6.2. Kapalı Kalıplama Yöntemleri

6.2.1. Reçine transfer kalıplama yöntemi

İlgili kompozit üretim metodunda elle yatırma sistemlere daha hızlı ve kullanım süresi çok olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gerekir. Kalıbın kompozit malzemeyle yapılması

metal kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasını sağlamaktadır. RTM yöntemi çoğu zaman jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda tercih edilir. Takviye malzemesinde kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin birleşimi kullanılır. Takviye malzemesi ilk olarak kalıp boşluğunu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde zamanla çözün en reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde hareket etmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba doğru pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman almaktadır. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar sıcaklığı arttırılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içeride bulunan havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi yerleşmesi için vakum tercih edilmektedir. Elyafın kalıba yerleştirilmesi zaman aldığından dolayı uzun süren bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için zararlı gazlar minimize olur ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntem yardımıyla karmaşık parçalar üretile bilinmektedir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında kullanılan bazı parçalar bu yöntem yardımıyla üretilmektedir [21].



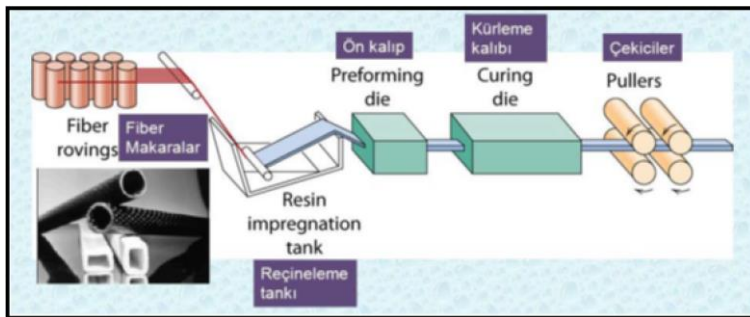
Resim 6.6. Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi

RTM'nin en önemli avantajları düşük sermaye ve işleme giderleri, daha iyi doğrusal ölçüler, karışık geometriye sahip parçaların üretiminde kolaylık, her iki tarafta iyi yüzey kaplaması, bir dereceye kadar yüksek lif hacim fraksiyonu ve kapalı kalıp teknolojisinden dolayı "düşük uçucu emisyon" olarak bilinmektedir. Bununla birlikte takım tasarımının karmaşık olması ve kompleks parçaların imalatındaki süreç problemleri veya akış modellemesine ihtiyaç duyulması gibi bazı koşullar RTM'nin dezavantajlarıdır [22]. Otomotiv alanında RTM tekniğinin kullanımı McLaren Automotive tarafından Mercedes SLR için karbon elyaf parçaların üretimi ile gerçekleştirilmiştir. Firma, RTM kullanarak yüksek üretim oranı gözlemlemiştir. Aynı şekilde, dokunmamış kumaş preformları ve RTM tekniği kullanarak,

Bayerische Motoren Werke (BMW) tarafından, M3 ve M6 modelleri için karbon fiber destekli plastik (CFRP) çatı ve M6 için tampon desteği üretilmiştir [23]. Böylece, RTM tekniği otomotiv sektöründe termoset tabanlı tam zamanlı fiber takviyeli kompozitlerin üretilmesinde tercih edilen bir metod haline gelmiştir. Mercedes-Benz ile birlikte Toray Industries, RTM tekniği kullanımıyla yılda ortalama 20,000-40,000 parça arasında seri üretim rakamları hedeflemiştir [24, 25]. Son zamanlarda, Han ve ark. çok noktadan ve vakumlu yeni bir yüksek hızlı RTM süreci önermiştir. Bu çalışmanın amacı, mevcut kullanılan RTM proseslerinde ürünlerin yüzey alanıyla doğrusal orantılı olarak reçine enjeksiyon sürelerinin önemli ölçüde artması nedeniyle daha büyük yapıların üretilmesinde koşullara sahip olduklarından dolayı, enjeksiyon süresini azaltmaktır. Bu çalışma ile deneysel sonuçlardan elde edilen veriler ile CFD simülasyon sonuçlarının iyi bir şekilde eşleştiği ve kalınlık yönündeki RTM'nin emdirme hızının, düzlem içi RTM'nin hızının on katından fazla arttığı belirtilmiştir [26].

6.2.2. Pultrüzyon yöntemi

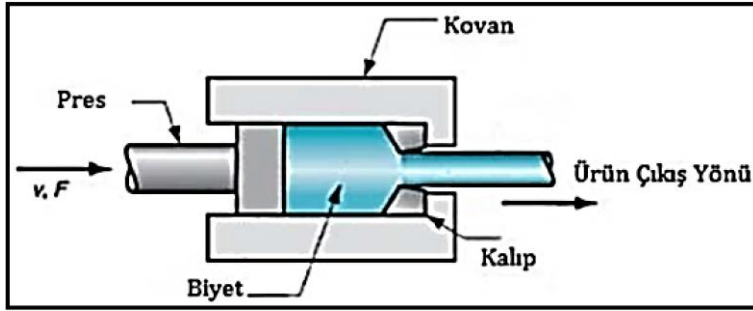
Pultrüzyon (çekme) düşük maliyetli, yüksek-hacimde üretime imkân sağlayan, kalıcı ve otomatik bir süreçtir. İlgili yöntemde genellikle reçine emdirilmiş fiberler bir kalıp boyunca çektilir ve çeşitli kesit şekillerine sahip profil çubuklar üretilir. Pultrüzyon (çekme) ile sabit kesitli ve yüksek uzunluklara sahip parçalar üretmek mümkün olmaktadır. Sıcaklığı artırılan bir kalıp içerisinde sabit bir hızla çekilen fiberler dolayısıyla kompozit parça kalıptan kurlenmiş veya kısmen kurlenmiş olarak çıkarlar. Bu parçalar Pultrüzyondan genellikle ek bir yüzey işlemine tabii olmayacak şekilde çıkarlar. Bu yöntemde matris olarak epoksi, polyester ve vinilester gibi reçineler tercih edilmektedir. Takviye malzemesi olarak herhangi bir fiber türü kullanılabilir. Core (çekirdek) malzemelerin kullanımına uygun değildir [27].



Resim 6.7. Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi

6.2.3. Ekstrüzyon yöntemi

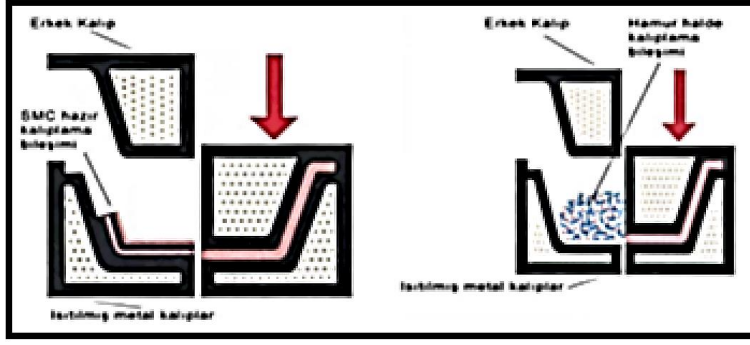
Plastik bir malzemenin sıcaklık ile akıcı hale getirilerek belirli bir formdaki kalıptan basınç ile geçirilmesi ve biçimlendirilmesi metodudur. İlgili biçimlendirmede çubuk, boru, profil malzeme, levha, film ve herhangi başka bir madde üzerine kaplama yardımıyla olabilir. Düşük fiyatlı ve kalıcı bir döküm yöntemidir. Ekstrüzyonda genelde yüksek molekül ağırlığına sahip termoplastik malzemeler tercih edilir [28].



Resim 6.8. Ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi

6.2.4. Hazır kalıplama yöntemi

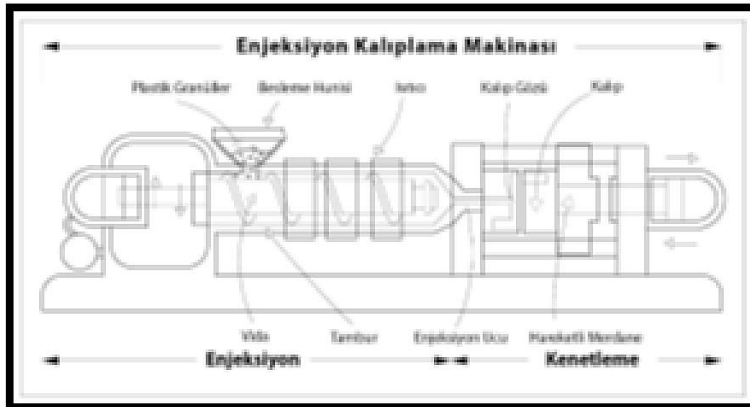
Hazır kalıplama içerisinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri bulunduran kalıplamaya hazır, kalıplama bileşimleri olarak tanımlanan kompozit malzemelerin (SMC, BMC) sıcak pres kalıplar yardımıyla ürünleşmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine yerleştirilmesi, farklı duvar kalınlıkları gibi avantajlara olanak vermektedir. Ayrıca ürünün iki yüzünde kalıp ile ebatlandırılmaktadır. Kullanılan diğer üretim tekniklerinin olanak vermediği delik vb. gibi şekillerin oluşturulmasına imkân vermektedir. Kusur oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları ise kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliğidir. Kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha pahalı olması ve büyük ebatlarda bulunan parçaların üretimi için büyük ve pahalı pres makinelerine ihtiyaç duyulmasıdır [29].



Resim 6.9. Hazır kalıplama yöntemi şematik gösterimi

6.2.5. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi

Enjeksiyonla kalıplama yönteminde polimer yüksek sıcaklıkta ısıtılarak şekil alabilir bir hale getirilir ve yüksek basınç altında bir kalıp boşluğuna doldurulur; burada katı hale gelen parça kalıptan ayrıştırılır. İstenilen boyutlara göre parçalar üretilebilmektedir. Kalıptan çıkacak bir parça için üretim süresi ortalama 10-30 saniye arasındadır. Ancak bazen bu süre 1 dakika veya üstünde olabilir. Kalıpta birden fazla boşluk bulunabilir ve birden fazla parça üretmek mümkündür. Termoplastik malzemeler için çoğunlukla tercih edilen bir imalat yöntemidir. Örnek vermek gerekirse otomobil tamponları bu yöntemle üretilebilmektedir [30].

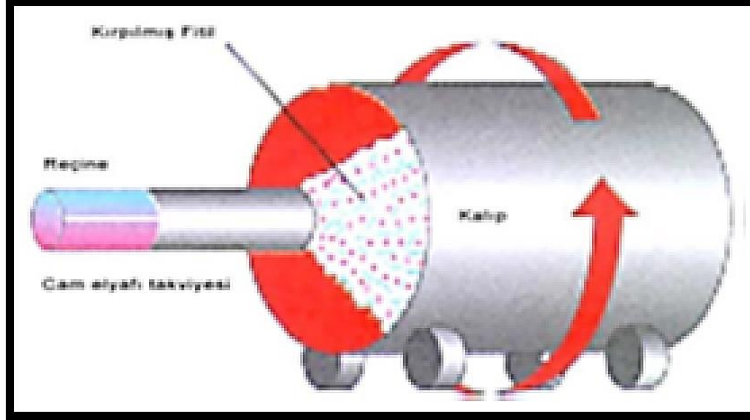


Resim 6.10. Enjeksiyonla kalıplama yöntemi şematik gösterimi

6.2.6. Savurma yöntemi ile kalıplama

Bu yöntemde, savurma makinası kumu derece içerisine yüksek devirde savrulmasıyla sıkıştırılmasına olanak verir. Savurma makinesi çalışmaya başladığında savurma hızı düşük

tutulur, kum model üzerine yayıldıkça hız yavaş yavaş yükseltilir. Bu yöntemle kalıbın ölçülerinden bağımsız sıkıştırma yapılabilir ve böylelikle büyük döküm parçaları da savurma yöntemi ile kalıplanabilir. Savurma yönteminde kullanılan diğer yöntemlere göre daha iyi ve sert bir sıkıştırma yapılabilir [31].



Resim 6.11. Savurma yöntemi ile kalıplama şematik gösterimi



7. TEZ ÇALIŞMASININ LİTERATÜR TARAMASI

Camanho ve Lambert [32], kompozit laminantlarda mekanik olarak bağlanmış laminantların hasar başlangıcı, hasar ilerlemesi ve hasar sonunun değerlendirildiği bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, her bir katmandaki gerilim dağılımı, yarı analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Tahminler, pim ve cıvata yüklü bağlantılarda elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların tahminlerle paralel olarak ilerlediği gözlemlenmiştir. Wang, Lotts ve Davis [33], bağlantı mukavemetini arttırmak amacıyla, bağlantılarda kullanılan cıvata şeklinin dairesel bir cıvata yerine eliptik geometride bir cıvata olarak tasarlanmasının uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Analitik yöntem ile tahmin edilebilen delik kenarlarındaki gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan analiz sonuçları ile de uyum gösterdiğini bulmuşlardır. Yapılan çalışmada, farklı dairesel ve eliptik bağlantılar içeren numuneler için testler yapılmış ve cıvata şeklinin önemli ölçüde mukavemeti değiştirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, eliptik cıvata bağlantısının dairesel cıvata bağlantısına göre kesme yönünde daha fazla mukavemet gösterdiği kanıtlanmıştır. Xiao ve Ishikawa'nın [34], yapmış olduğu çalışmada ise, mekanik olarak birleştirilmiş kompozit parçanın mukavemetinin ve reçine özelliklerinin yatak tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu çalışmada, iki farklı tipte polimer matriks bazlı karbon elyaf ile güçlendirilmiş laminantlar üretilmiştir. Statik çekme testi uygulanan numuneler dâhili hasarı ölçmek için X-ışını radyografisi ve SEM analizlerine tabi tutulmuşlardır. Sonuç olarak kullanılan polimer matriksin yoğunluğu ile oluşan hasarın oranının doğru orantılı değiştiğini bulmuşlardır. Zhou ve Fei'nin [35], yaptığı bir diğer çalışmada ise; bir kompozit plakanın yapısal gerilme konsantrasyonunu belirlemek adına üç şekil perçin deliği olan numunelerin sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için optimal dairesel bir şekil, gerilme konsantrasyonunun azaltılmasına bağlı olarak belirlenmiş ve ardından elips şeklindeki deliğin performansını doğrulamak için perçin delikleri içeren kompozit bir plaka ve modelleri oluşturulmuştur. Elips şeklindeki deliklere sahip plakada gerilim konsantrasyonunun dairesel delikli olana göre daha yüksek oranda azaldığı gözlemlenmiştir. Perçin ve cıvata bağlantı noktaları şiddetli stres nedeniyle yapısal bütünlük açısından elyaf devamlılığını bozduğu için literatürde hala en zayıf halka olarak bilinmektedir. Perçin deliğinin geometri parametreleri değiştirilerek, perçin bağlantı delikleri etrafındaki yoğunlaşma ve güç değerlerinin değişiminin belirlendiği birçok çalışma yapılmıştır [7, 24, 29, 32-38].

Elyaf takviyeli ve epoksi matriksli kompozit malzemeler için elyaf istif açıları, yapısal dayanım için çok büyük önem arz etmektedir. Elyaf istif yöneliminin doğrultusunda plaka mukavemeti en yüksek iken, 90° aksi yönde ise plaka mukavemetinin en zayıf olduğu yapılan çalışmalarca kanıtlanmıştır [39-48]. Dano, Gendron ve Picard [42], yapmış oldukları çalışmalarda, elyaf takviyeli kompozit malzemelerde tek bir bağlantı noktası olacak şekilde birleştirilmiş plakalarda yayınlanan makaleleri gözden geçirmişlerdir. Elde ettikleri bilgiler ışığında, pim yüklü kompozit laminantların tepkisini tahmin etmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Çalışmanın amacı, doğrusal olmayan bir kesme davranışının tahmini ve yük pimi yer değiştirme eğrisine dahil edilebilirliğini göstermektir. Kurt, Yeşil ve Atlı [49] yaptıkları çalışmada ise polimer matriksli kompozit malzeme parçalarının farklı yöntemlerle birleştirilmesinin ardından birleşme bölgesinin çekme kuvvetine olan etkilerini incelenmişlerdir. Kompozit numune üretiminde elle yatırma sonrası sıcak presleme yöntemini kullanmışlardır. Numuneler tam ortadan ikiye bölünerek farklı yöntemlerle birleştirilmiştir. Birleştirme yöntemi olarak vida ile vidalama, piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli bir çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırma, kompozit malzemenin üretildiği laminasyon reçine ile yapıştırma ve aynı laminasyon reçinenin karbon elyaf tozu ile katkılandırılarak yapıştırılması yöntemlerini kullanmışlardır. Yapıştırılan numuneler çekme testine tâbi tutularak birleşme kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Vida ile birleştirilen bölgenin kopma kuvveti en az mukavemet değerini verirken, piyasada yaygın olarak bulunabilen az maliyetli çift bileşenli yapıştırıcı ile yapıştırılan bölgelerin kopma mukavemeti en yüksek değeri vermiştir. Bu değerler sırasıyla 2278,67 Newton (N) ve 12062 Newton (N) olarak bulunmuştur. Yapılan çalışma kapsamında en düşük mukavemet değeri vidalama tekniği ile birleştirilen numunelerde, en yüksek değer ise çift bileşenli yapıştırıcı ile birleştirilen numunelerde gözlenmiştir. Collings ve arkadaşları [50] üç farklı elyaf ve reçine sisteminden yapılan elyaf istif açıları ($0^\circ \pm 45^\circ$), (0° , 90°), ve ($90^\circ \pm 45^\circ$) olan üç grup laminant üzerinde taşıma mukavemeti ölçümelerini yapmışlardır. Bu çalışmada, delik kenarındaki kusurları meydana getiren fiziksel koşullar göz önünde bulundurularak yarı ampirik bir yaklaşım kullanılıp kısıtlı pim yüklü deliklerin nihai yatak dayanımlarını tahmin etmek amacıyla kullanılacak denklemler türetilmiş ve deneysel sonuçlar sunulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda, kullanılan laminant konfigürasyonlarının, elyaf ve reçine sistemlerinin her biri için teorik verilerle uyumlu sonuçlar tespit edilmiştir. Beauchamp ve arkadaşlarının [51] rulman yatakları için yapmış oldukları çalışmada ise, rulman yatağının sapma davranışını belirlemek için yapılan testlerde elyaf istif açıları (0° 90°), ($0^\circ + 45^\circ$) ve ($90^\circ + 45^\circ$) olan, sabit bir tork değeri ile sıkıştırılmış cıvata laminantların davranışı

açıklanmaktadır. Mükemmel eklem gücü özelliklerini sergileyen optimum yatağın ($0^{\circ}+45^{\circ}$) istif açısındaki laminant konfigürasyonunda olduğunu tespit etmişlerdir.

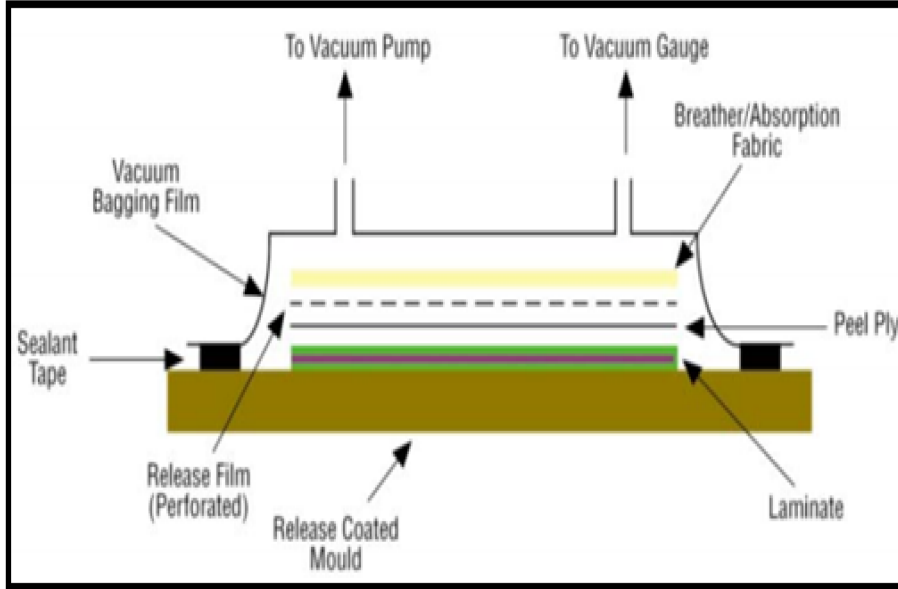
Mevcut çalışma, literatür değerlendirmeleri yapıldıktan sonra var olan çalışmalara yenilikçi bir bakış açısı katacak şekilde karbon elyaf takviyeli epoksi matriksli kompozit yapıların istif açılarının mekaniksel bağlantı mukavemetine olan etkilerini araştırmaktadır. Bu sayede fazladan cıvata bağlantı şeklinin değiştirilmesi ve/veya farklı yapıştırıcı malzeme kullanımı gibi tasarım ve uygulamada sade kullanım sunabilecek malzemelerin üretilmesi hedeflenmektedir. Bu sadeleştirmenin aynı zamanda kompozit malzeme üretimindeki hata payını ve maliyet oranlarını düşüreceği öngörülmektedir.





8. MATERYAL VE METOD

Epoksi matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit plaka üretimi gerekli literatür araştırmaları ve sanayi de kullanılan yöntemler göz önünde bulundurulmuştur.



Resim 8.1. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit üretimi

8.1. Prebreg Kumaş Seçimi

Son yıllarda özellikle havacılık sektörü başta olmak üzere kompozit yapıların oluşturulmasında prebreg (Önceden reçine emdirilmiş karbon, cam ya da aramid elyaflara pre-impregnated) kompozit kumaşlar kullanılmaktadır. Bu tür kumaşlar genel olarak “hot metod” olarak bilinen otoklav ile üretimleri yapılsa bile vakum altında fırınlama ve torbalama yöntemleri ile de üretimleri sağlanabilmektedir. Prebreg kumaşların kullanılmasının amaçlarından en başta her bir üretimin standart ve aynı kalitede olması sağlanabilmesi olmaktadır. Bu kumaşlar ile kompozit malzeme üretimi oldukça kolaydır ve fazladan reçine ve sertleştirici gibi birçok malzemenin kullanılmaması hem üretim parametrelerini en aza indirerek üretim kalitesini ve standartlarını arttırmakta hem de ortamda bulunmayan fazladan kimyasal malzemelerden dolayı oluşabilecek iş kazalarının da önüne geçebilmektedir.

8.1.1. Ud (tek yönlü) prebreg kumaşlar

Mekanik mukavemetin çok fazla önem arz ettiği uçak kanatları, helikopter pervaneleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler havacılık sanayisi standartlarına göre üretilmektedir. Tek yönlü olan elyaf ipliklerin en büyük özelliği, uygulandığı yönde gösterdiği mekanik mukavemetin en yüksek olmasıdır.

Tercih nedenleri;

- Bir yapının hafif ve dayanıklı olması istenildiği durumlarda,
- Kanat, pervane, yat, tekne, medikal ürünler, makina parçaları vb.
- Uçak malzeme standartlarında
- El yatırması için hesaplanan veriler (%35 hacimsel elyaf yoğunluğuna göre)
- Reçine tüketimi: () gr/m², laminat kalınlığı: mm, laminat ağırlığı: g/m²
- Elyaf Özellikler: Elyaf Çapı [μm] Yoğunluk [g/cm³]
- Çekme Dayanımı [MPa] Elastisite modülü [GPa]
- Kopmadaki birim boy değişimi Termal iletkenlik [W/mK]
- Termal genleşme katsayısı Spesifik elektriksel direnç [W cm]

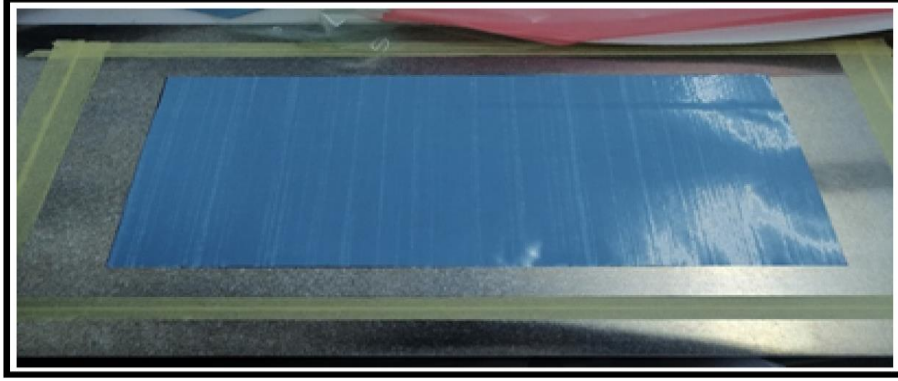
Kullanım alanları;

- Otomotiv
- Havacılık ve Uzay Sanayi
- Savunma Sanayi
- Denizcilik
- Depreme Karşı Bina Güçlendirme

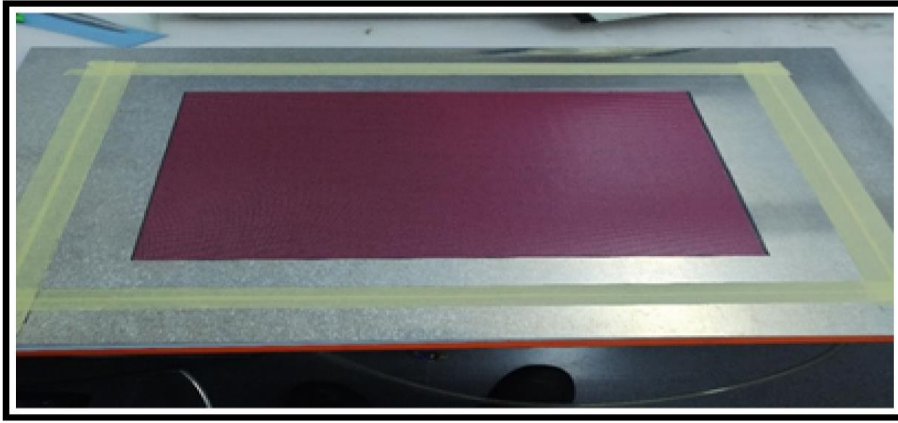
8.1.2. Örgülü (plain) kumaşlar:

Örgülü elyaf tiplerinde en sık kullanılan elyaf türü 2x2 twill diye adlandırılan elyaf örgü tipidir. Daha önce de bahsetmiş olduğumuz kumaş türlerinde genellikle “Plain” diye adlandırılan kumaş türü seçilirken, prebreg yapılarda genel olarak 2x2 “twill” kumaş türleri tercih edilmektedir. Bu tercihin sebebi ise; kalıp yüzeylerinde olan kıvrımlar ve konturların

laminasyon sırasında plain dokuma kumaşlarda uygulama zorluğunun olmasından kaynaklanmaktadır.



Resim 8.2. UD kumaş serimi



Resim 8.3. Örgü kumaş serim

8.2. Kalıp Seçimi

Genellikle otoklav yöntemi ile üretilecek epoksi matrisli kompozit malzemelerin kalıp seçimi yapılırken ısı genleşme nedeniyle kompozit malzemeye en uygun veya en yakın ısı genleşmeye sahip olan malzemelerden seçilir. Seri üretimlerde ilk kalıp malzemesi için en yakın kalıp seçimi yapılır ve bu genelde metal veya ahşap kalıplar kullanılır. Metal kalıpların ısı genleşme yatkınlığı yüzünden çok fazla tercih edilmezken, tamiri ve tekrar kullanımı için saha uygun olması nedeniyle oldukça fazla tercih edilir. Ahşap kalıpların ısı genleşme yatkınlıkları çok düşüktür ancak tekrar tekrar kullanıma uygun değildir ve tamirata genelde çok mümkün değildir. Metal kalıp seçimi yapıldığında bu üretilen kalıptan kompozit kalıp yapılması için kullanılır. Yapılan kompozit kalıp üretimi yapılacak olan kaompozit malzeme

için ısı genleşme açısından mükemmel yakınlık sağlamaktadır. Kalıp yapmakta kullanılacak olan kompozit kalıp malzemesi cure edildikten sonra kullanımına başlanabilir. Bu çalışmada kullanılan kalıp malzemesi, üretilecek kompozit malzemenin formunun düz olması nedeniyle alüminyum 7075 standartlarına sahip malzemelerden seçilmiştir. Üretimi yapılacak kompozit malzemenin ölçüleri 600mmx600mm olması nedeniyle kalıp 900mmx900mm olarak tasarlanmıştır.

8.3. Kalıp Ayırıcı

Kalıp ayırıcı; ısıtma ve otoklav işlemlerinden sonra kompozit malzemeyi kalıptan ayırabilmek için kullanılır. Bu çalışmada FREKOTE 770 NC Loctite kalıp ayırıcısı kullanılmıştır. Kalıp ayırıcı ilk olarak kalıba uygulanmadan önce kalıp izopropil alkol ve temiz bir bez ile temizlenip daha sonra üzerine 0° olacak şekilde temiz bir bez yardımıyla tek tat uygulanır ve 15 dakika beklendikten sonra ikinci kat 90° olacak şekilde kalıp yüzeyine uygulanır ve 15 dakika beklenir, en son olarak tekrar kalıp ayırıcı 0° olarak kalıp yüzeyine uygulanır. Kalıp ayırıcı işlemleri tamamlanan kalıp 120 C° de 60 dakika bekletilir. Burada amaç; kalıp ayırıcı içindeki suyun ayrıştırılması ve kalıp gözeneklerine tam olarak nüfus edebilmesinin sağlanması. Daha sonra fırından çıkarılan metal kalıp soğumaya bırakılır ve işlem öncesinden tekrar üç kat 90°-0°-90° olmak üzere 15 dakika aralıklarla kalıp ayırıcı uygulanır ve üzerine karbon prebreg kumaş serimi yapılabilir.

8.4. Soyma Kumaşı (Peel Ply)

Reçine infüzyon ve el yatırması yöntemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. “**Peel ply**” kullanılmasının amacı kompozit üzerinde bir texture oluşturmak ve vakum torbası ile akış filesini üretilen parçadan rahatça ayırmaktır. Reçine infüzyon ve el yatırması yöntemlerinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Yüksek Mukavemetli Polyester ve PA 66(nylon 66) ipliklerden üretilmiş **kumaşlar** epoksi, fenolik ve polyester reçineler ile birlikte kompozit parça imalatı sırasında sarf malzeme olarak kullanılır.

8.5. Reçine Geçirgenliği Sağlayan Film (Release Film)

Vakum torbalama ve el yatırma laminantları kullanıldığında, önerilen ayırma filmidir. Ayırıcı delikli naylon, epoksi, poliester ve vinilester de dahil olmak üzere çok çeşitli reçine

sistemlerinden mükemmel bir şekilde ayrılabilir. Deliklerinde, ıslak laminat ve havalandırma / emici tabaka arasındaki reçine akışına ideal kısıtlama getirilir ve fazla reçinenin, aşırı miktarda emilmesine izin vermeden laminanttan çekilmesini sağlar. Vakum torbalama, el yatırması ve prepreg ile parça üretiminde yapışmayı önlemek ve daha sonra fiberler den kolayca ayrılması için kullanılır. El yatırmasından, ya da prepreg den parça imalatında kumaşların üzerine önce release film ardından vakum battaniyesi yerleştirilir. Böylelikle Fiber üzerindeki fazla reçine delikli film den geçerek vakum battaniyesi tarafından emilir.

8.6. Vakum Battaniyesi (Air Breather)

Vakum Battaniyesi, prepreg laminantları vakumla torbaya koyarken havalandırma ve emici tabaka olarak kullanılmak için hava geçirmez bir polyester / poliamid keçe kumaştan dokunmuştur. Vakum torbalamada delikli naylondan geçen reçineyi emerek laminantlardaki fazla reçine alınmış olur. Ayrıca vakum torbalama işleminde Vakum battaniyesi vakumun parçanın her tarafına eşit olarak yayılması için bir baskı plakası görevi yapar.

8.7. Vakum Naylonu

Geleneksel vakum torbalama, reçine İnfüzyonu ve prepreg uygulamaları için (otoklav kütleme için) uygun yüksek kaliteli, genel amaçlı çok katlı vakum torbalama filmidir. Reçine infüzyonu Prepreg Laminasyon (otoklav veya otoklav dışına çıkma) Islak yatay vakum torbalama Vakumlu bağlama /kaplama cam laminasyonu ve birçok torbalama filmine kıyasla, özellikle sıkı köşelerde veya daha karmaşık kalıp şekillerinde konsolidasyon ve basıncı geliştiren üstün esneklik ve uzama imkânı sunar. Bu üstün esneklik, özellikle hassas "otoklav dışına çıkarma" işlemlerinde, laminantların daha az iğne deliği ve gelişmiş yüzey kalitesi ile sonuçlanmasını sağlar.

8.8. Kompozit Plakaların Hazırlanması

Kompozit plakanın hazırlanmasında ilk olarak kalıp seçimi ile başlamıştır. Kalıp seçimi ve kalıp hazırlama işlemlerinden sonra kullanılacak olan kompozit prebreg kumaşların araştırılması başlamıştır. Kullanılacak olan kompozit prebreg kumaşlar sanayi açısından sıklıkla tercih edilen ve günümüz havacılık ve savunma sanayisinde fazlaca kullanılan

KORDSA markalı prebreg kumaşlar tercih edilmiştir. Mekanik Karakterizasyon ve Tahribatsız Muayene Laboratuvarı Kordsa, çok çeşitli tek yönlü ve çift yönlü kumaşlara (düz, dimi, koşum saten ve sepet) sahiptir. Karbon, cam veya aramid elyaflar geleneksel ve hibrit kumaşlarda takviye malzemesi olarak kullanılabilir. Dokuma kumaşlar prepreg üretimi, vakumlu infüzyon, RTM ve ıslak serme için uygun olan kumaşlar üretilmektedir. Çalışmada tek yönlü (UD) ve örgü (woven) olmak üzere iki farklı kumaş türü kullanılmıştır. Örgü (woven) olarak tercih edilen kumaş türü: OM10/A38/Twill/3K/280/37%. Tek yönlü (ud) olarak tercih edilen kumaş türü: OM10/A42/UD/12K/200/35%

OM10, Otomotiv Endüstrisinde kullanılan yapısal parçaların ihtiyaçları için pres ve otoklav kürleme için oldukça sertleştirilmiş yapısal Düşük Tg ($> 120^{\circ}\text{C}$) reçinedir. OM10 prepreg, ortam sıcaklığında 4 haftalık uzun kullanım ömrü ile hem preste hem de Otoklavda kürlenir.

Çizelge 8.1. OM10 reçine sistemine ait olan teknik bilgiler

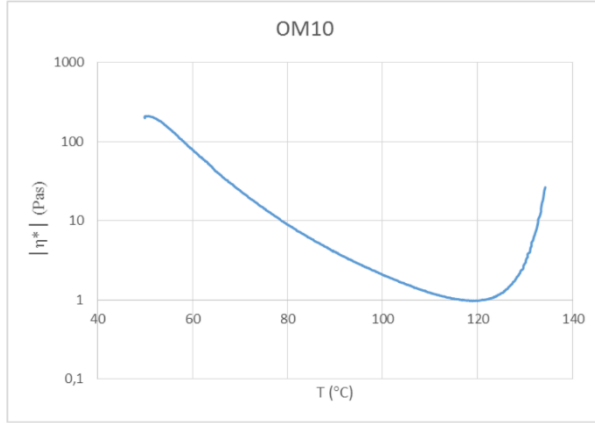
Resin System	OM10
Application	Industrial composites, automotive
Key Features	Structural; White opaque when cured; tacky version is available
Cure Temperature	90°C - 140 °C
Work Life	28 days @ RT
Storage Life	1 year @ 18 °C
Fiber	Carbon, E-glass
Weaving Style	Plain, twill, UD
Dry Fabric Areal Weight (gsm)	110 – 600
%Resin Content (by weight)	35 – 48 $\pm$ 2

Om10 reçine sistemine ait olan kür işlemlerinden sonra sahip olduğu fiziksel mekanik özellikler Çizelge 8.2.'de verilmektedir.

Çizelge 8.2. Kürlenmiş olan Om10 reçinesine ait olan mekanik özellikler

Cured Matric Properties (cured at 120 °C 1h + 140 °C 2h)		
Tensile Test (ISO 527-2)	Tensile Strength (MPa)	36
	Young's modulus (GPa)	2.6
	Elongation at break (%)	2
	Shear modulus (MPa)	974
Flexural Test (ISO 178)	Flexural Strength (MPa)	120
	Flexural modulus (GPa)	2.4
	Elongation at maximum (%)	6
Tg (°C) (DMA)	Onset of E	≥ 130

Seçilen reçine sisteminin otoklav içerisinde sıcaklık ve basınç altında sergileyeceği davranışları belirlemek ve otoklav kr süresini, basınç ve vakum değerlerini hesaplayabilmek için reçine sisteminin sıcaklık-viskozite değerlerinin çok iyi tahlil edilebilmesi için izelge 8.1.'deki bilgiler kullanılmıştır.

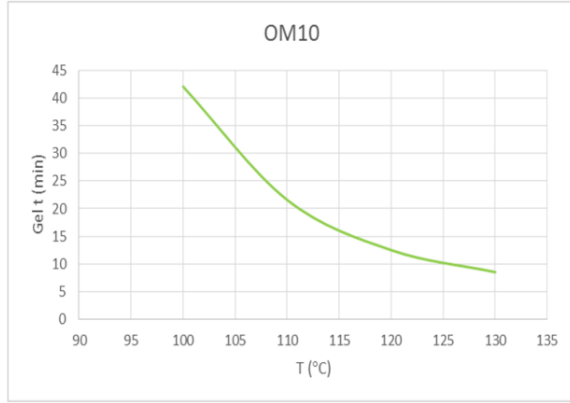


Şekil 8.1. Om10 reçinesine ait sıcaklık-viskozite değişimi

Otoklav kr süresi için kullanılan grafik, Şekil 8.1.'de verilmiştir. Q süresi otoklav içerisinde reçinenin davranışını belirlemekte ve etimi yapılan kompozit ürünün belli bir aralıkta bütün özelliklerini değiştirebilmektedir. Bu nedenle bu hesapların doğru yapılabilmesi oldukça onemlidir. Otoklav içerisinde bulunan malzemenin kr sresinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için aşağıda belirtilen şartların durumu göz önünde bulundurulmalıdır.

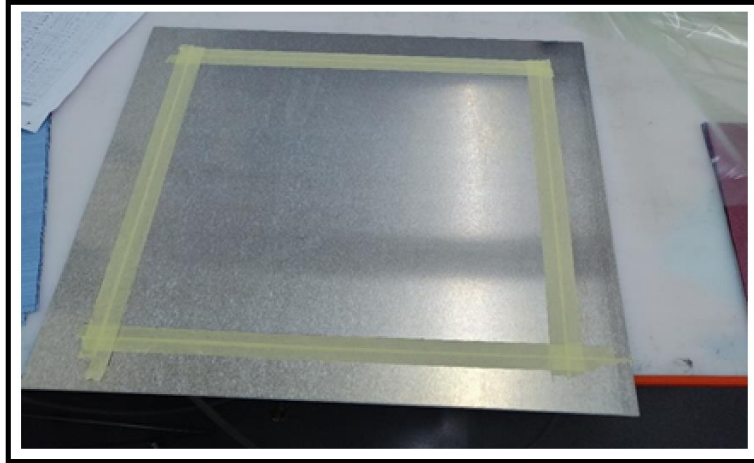
- Otoklav hacmi
- Dış ortam ısısı
- Kalıp ısısı
- Otoklav başlangıç ısısı
- Otoklav vakum kuvveti
- Otoklav iç ısı dağılım homojen yapısı
- Serim yapılan kompozit ürün kalınlığı
- Otoklav içerisindeki kalıp-kütle dağılım

Faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



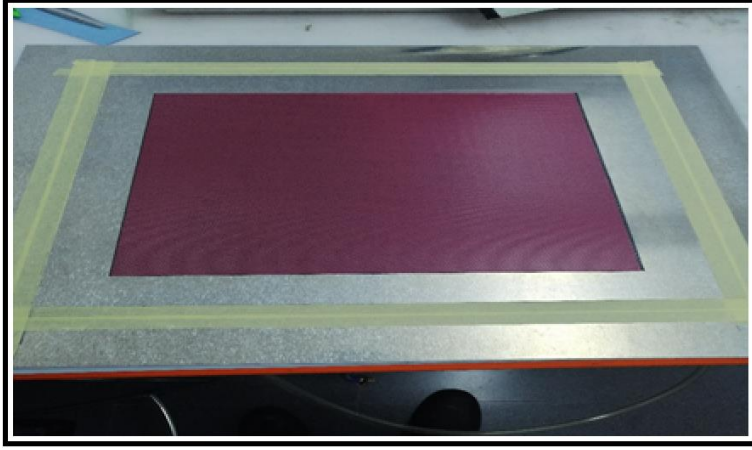
Şekil 8.2. Otoklav kür sıcaklığı-zaman grafiği

8.8.1. Serim işlemi için kalıp hazırlığı;



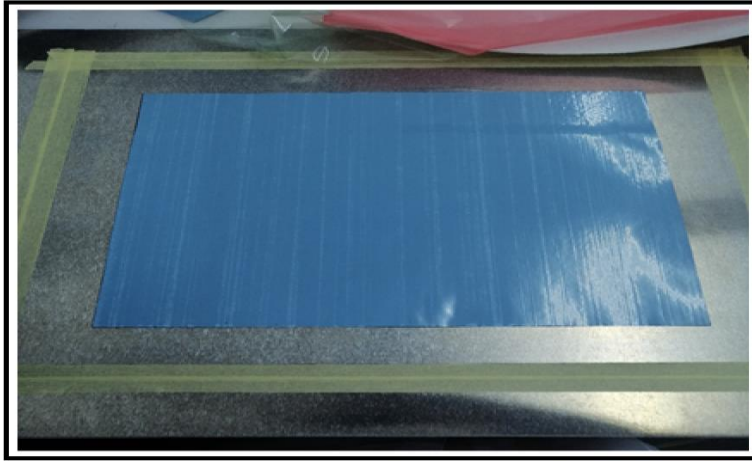
Resim 8.4. Kompozit serim öncesi kalıbın hazırlanması

Seçilimi yapılan kalıp ayırıcı ile temizlenmeden önce vakum işlemi için uygulanması gereken sızdırmazlık bant uygulanan bölge kâğıt bant ile korunarak kalıp ayırıcı uygulanmıştır.



Resim 8.5. İlk katman olarak örgü kumaşın serilmesi

İlk yüzey kumaşı yerleştirilir. Yüzey kumaşı olarak OM10/A38/Twill/3K/280/37% kumaşı kullanılmıştır. Ana dayanımı sağlayacak olan tek yönlü kumaş örgü kumaşlardan sonra yapısal anlamda sağlamlık kazandırmak amacıyla serim işlemleri yapılmıştır.



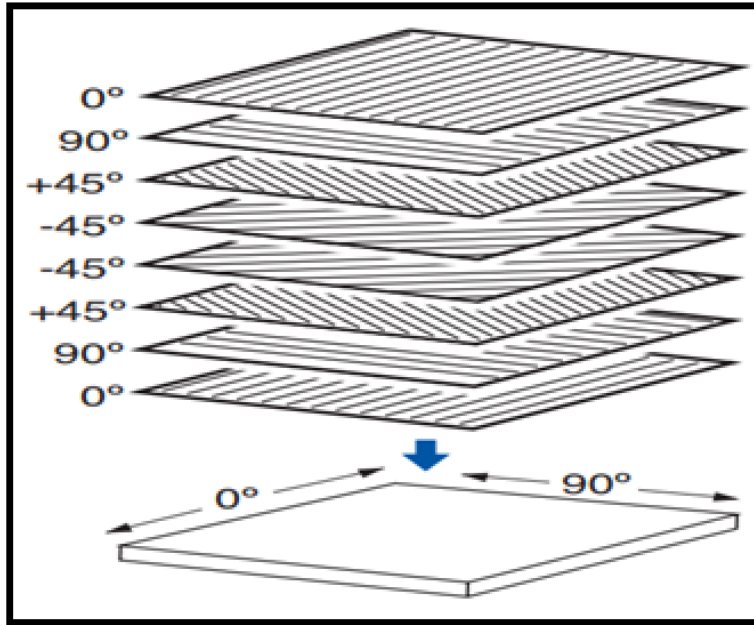
Resim 8.6. Tek yönlü kumaşların serilmesi

Serim işlemleri için gereken açı ve dizilim kuralları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS ACP (pre) ve ANSYS ACP (post) kullanılarak hesaplanmıştır.

8.8.2. Vakum torbalama yöntemi

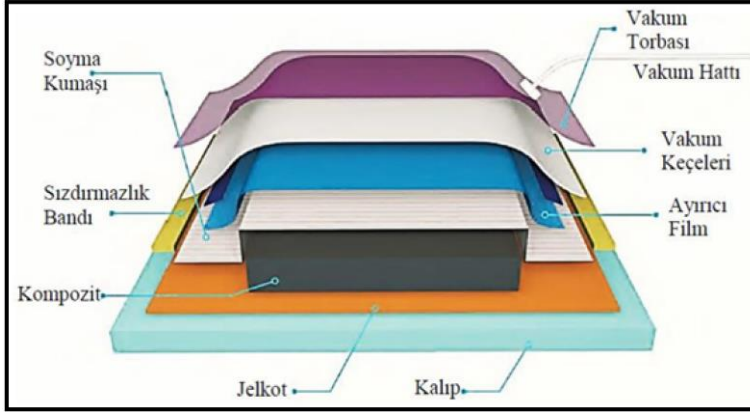
Elyaf reçine oranının sabit ve kompozit parçanın bir diğer yüzeyinin daha az deformasyonlu, parçanın geometrisinin boşluksuz bir şekilde üretimi için el yatırma yöntemine ek olarak vakum torbalama yöntemi kullanılır. Vakum torbalama yönteminde elyaf reçine

laminyasyonunu sıkıştırmak için negatif basınçtan faydalanılır. Torbalamanın fiziksel bir baskı unsuru olarak kullanılabilmesi için hava geçirmez bir düzenek kurulmalıdır. Bu düzenek genelde bir tarafı kalıp yüzeyi diğer tarafı ise hava geçirmez naylon kaplamadan oluşmaktadır. Bu sistemde, naylon ile kapalı devre bir sistem oluşturulur ve içerideki hava bir vakum pompası ile çekilir, oluşan negatif basınç, reçine ve kumaş birleşimini baskı altında tutar, hava kaçak kontrolü yapılır ve sistem sabitlenir, reçinenin sabit basınç altında kürleşmesi için otoklav süreçleri gerçekleştirilir. Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi Resim 8.8.'de gösterilmiştir. Teorik olarak ortamda sağlanabilecek maksimum basınç 1atm 'dir. Bu da vakum torbalama kapalı devre sistemdeki tüm havanın kayıpsız bir şekilde çekilebilmesi ile oluşur. Oluşan negatif basınç kürleşme süresince devam etmelidir. Vakum torbalamada elle yatırma yönteminden kaynaklı ortamdaki fazla reçineyi de kontrol edebiliriz, homojen reçine-elyaf oranı elde edilmesini sağlar.



Resim 8.7. Dizilim kuralları

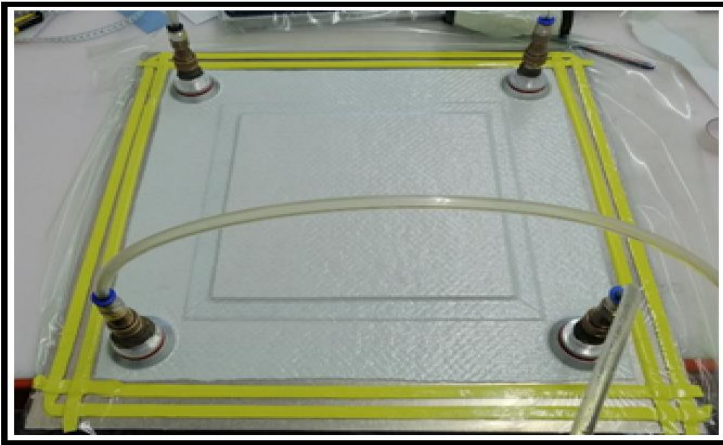
Resim 8.7.'de numune olarak üretilecek olan test numunesine ait olan tek yönlü kumaşların serim kuralları gösterilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılacak kumaşlar 600x600 mm ebatlarında çözgü doğrultusunda kesilmişlerdir. Kumaşlar atkı ve çözgü doğrultusunda aynı özelliklere ve lif hacimsel oranına sahip oldukları için, kompozit numuneler sadece çözgü doğrultusunda kesilmiş kumaşlar ile hazırlanmıştır. Kompozit plakalar vakumlu reçine transfer metodu ile 8 kat kumaş ile yaklaşık 2 mm kalınlıkta ve yaklaşık 58% lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde üretilmişlerdir.



Resim 8.8. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi

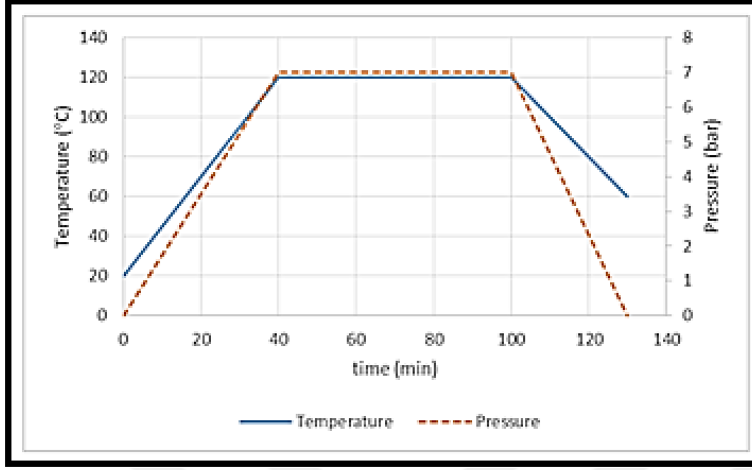
8.8.3. Vakum torbalama yönteminin avantajları:

- Üretimi yapılan kompozit plaka içerisinde kalabilecek olan hava kabarcıklarının en aza indirilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede kompozit plaka yapının mukavemeti önemli ölçüde artmaktadır. Fazla reçine yapı içerisinde emilerek yapının elyaf ve reçine oranının artması sağlanmaktadır.
- Vakum uygulaması sayesinde yapı içerisinde bulunan reçinenin daha homojen bir biçimde dağılması sağlanmaktadır. Reçinenin homojen bir biçimde yapı içerisinde dağılmasının amacı; oluşturulan yapının mekanik mukavemetinin hesaplanabilir hale gelmesini amaçlamaktadır.
- Vakum uygulaması sırasında serim yapılan elyaf yapının birbirleri üzerinde homojen ve maksimum birleşmesi sağlanacağından birleştirme mukavemetinin çok daha fazla olacaktır. Bu sayede kesme mukavemeti de maksimum oranda olacaktır [52].



Resim 8.9. Hazırlanan kompozit plakanın torbalanması.

Otoklav içerisinde yerleştirilen numune plakanın üretimi için kür döngüsü Şekil 8.3.'de olduğu gibi tamamlanmıştır.



Şekil 8.3. Otoklav kür döngüsü

- Döngü proses boyunca -680mmHg vakum altında tutulmuştur
- 40 dakika süresince malzemeler üzerine uygulanan basınç kademeli olarak arttırılmıştır, 6.9-7 bar basınç uygulanmıştır. Basınç rampası 3 olarak belirlenmiştir (dakikada 3 birim artması).
- Sıcaklık 20 °C den başlamaktadır, kalıp ilk sıcaklığı olarak. Daha sonra ısınma rampası 2,5 olarak belirlenerek 120 °C ye kadar ısıtılmıştır
- 120 °C de 60 dakika boyunca kür işlemi yapılmıştır.
- 100 dakika sonunda soğumaya başlanan malzeme aynı rampa miktarınca soğutulmaya başlanmıştır.
- Basınç 100 dakika sonunda 3,5 rampada azaltılarak tamamen otoklavdan uzaklaştırılması sağlanmıştır[53].

8.8.4. Su jeti kesim işlemi

Aşındırıcı su jeti özellikle son yıllarda metal olmayan malzemelerin kesiminde sıklıkla kullanılan bir kesme yöntemidir. Genellikle ısı işleminden etkilenen ve kesme işlemi sırasında ısı açığa çıkması istenmeyen malzemelerin kesiminde kullanılmaktadır. Her ne kadar rağbet gören bir kesme işlemi olsa bile markalama, plazma kesim gibi geleneksel

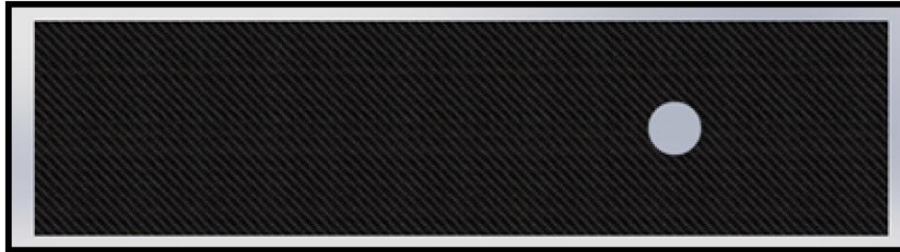
olarak yapılan kesim metotlarının yerini alabilmesi de beklenmemektedir. Su jeti ile kesme yönteminin diğer yöntemlere göre avantajları aşağıda belirtilmektedir.

8.8.5. Aşındırıcılı su jetinin faydaları

Diğer kesme yöntemlerinde olmayan pek çok faydaları vardır. Bunlar;

1. (ITAB) ısı tesiri altında kalan bölge oluşturmamaktadır,
2. Kesme huzmesinin düşük kesme kuvveti,
3. Kesilen bölgede yüzey kalitesinin yüksek olması,
4. Kesim sonunda yüzey temizleme işlemine gerek kalmaması,
5. Metal ve metal olmayan her malzeme türüne uygun olması,
6. Öncelikle pahalı malzemelerin kesiminde çapak oluşturmadiğından tercih edilmektedir,
7. Çok hassas 0.025 mm değerinde bir hassasiyet ile çalışıyor olması,
8. Genel olarak 0.05 mm.'den 300 mm.'ye kadar kalınlıklardaki malzemeleri kesme kabiliyete sahip olması,
9. Küçük malzeme kesim alanı optimal malzeme kullanımını sağlamaktadır [54].

Resim 8.10.'da ASTM D953 standartlarına göre üretilmiş olan test numunesi görülmektedir.



Resim 8.10. ASTM D953 Standartlarına uygun olarak üretilen test numunesi



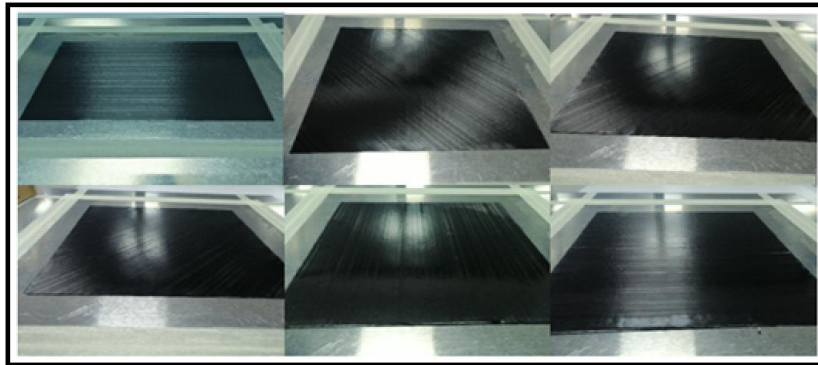
9. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada; tek yönlü (UD) elyaf karbon malzeme olan reçine emdirilmiş karbon kumaşlar kullanılmıştır. Kalıp malzemesi olarak seçilen Al 7075 plaka başlangıçta 22 mm olarak temin edilmiş ve taşlama işlemi ile 20 ± 0.005 mm hassasiyetle işlenmiştir. İşlenen kalıp malzemesi polisaj işlemine tabi tutularak yüzey parlaklığı sağlanmıştır. Toplam olarak 5 adet üretimi yapılan kalıplara, her birine daha önce belirlenen açılarda serimler yapılmıştır. Serim açıları derecelendirilerek gruplandırılan numunelerin ihtiva ettikleri dizilim yönleri Çizelge 9.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 9.1. Dizilim yönleri

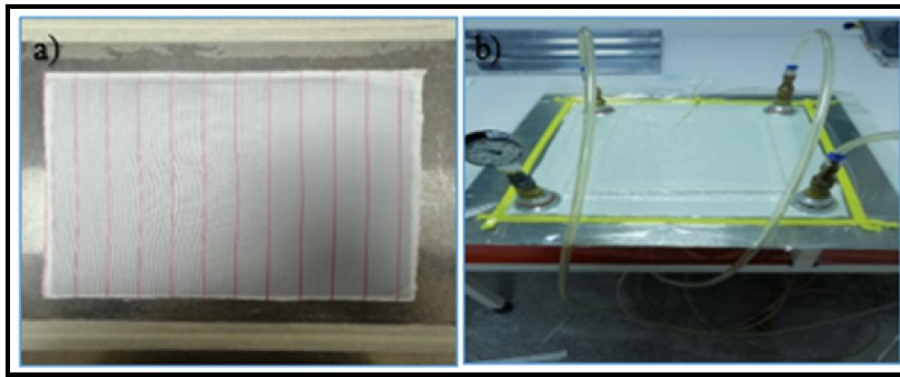
	A GRUBU AÇI DEĞERİ	B GRUBU AÇI DEĞERİ	C GRUBU AÇI DEĞERİ	D GRUBU AÇI DEĞERİ	E GRUBU AÇI DEĞERİ
1. KAT	0	-60	-45	-30	90
2. KAT	90	30	45	60	0
3. KAT	45	75	0	-75	-45
4. KAT	-45	-15	90	15	45
5. KAT	-45	-15	90	15	45
6. KAT	45	75	0	-75	-45
7. KAT	90	30	45	60	0
8. KAT	0	-60	-45	-30	90

Serim işlemi için KORDSA'dan tedarik edilmiş olan OM10 reçine özelliklerine sahip olan reçine emdirilmiş kumaş soğuk odadan çıkarıldıktan sonra 18 saat oda koşullarında bekletilmiştir. Bekleme işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan metal kalıba kalıp ayırıcıları uygulanarak temiz odaya alınmış ve serim işlemine başlanmıştır. Farklı açılı yönelimlerine sahip serim işlemleri aşağıda görülen Resim 9.1'de verilmiştir.



Resim 9.1. Serim işlemi

Serim işlemleri tamamlanan kompozit plakalar için, serim işleminin kusursuz olması ve laminantlar arasında hava kabarcıklarının kalmasını önlemek amacıyla her bir lamina seriminden sonra vakum alınmıştır. Serim işlemi tamamlanan kompozit laminant plakalar için, Al 7075 kalıp malzemesinin oluşturduğu pürüzsüz yüzeyin bozulması ve numunelere uygulanacak olan mekanik test işlemlerinin yapılabilmesi için karbon elyaf malzemenin alt yüzeyine ve üst yüzeyine yönü 0° olacak şekilde soyma kumaşı (peel ply) serme işlemleri yapılmıştır. Kompozit laminant plakalara soyma kumaşının uygulandığı görsel *Resim 9.2 a*'da gösterilmektedir.

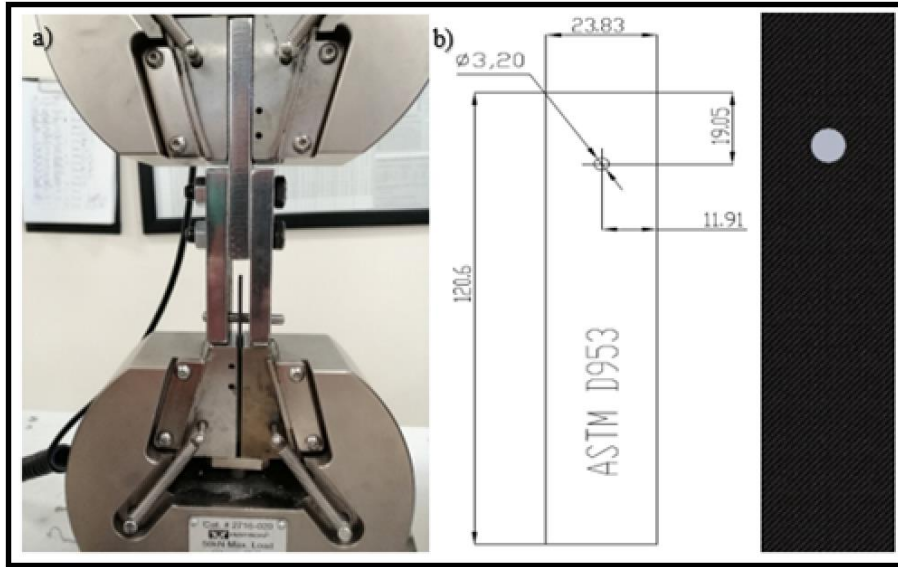


Resim 9.2. a) Soyma kumaşı (peel ply) uygulaması b) Vakum işlemi ve kontrolü

Soyma kumaşının uygulanmasından sonra laminantların vakum işlemine başlanmıştır. Vakum süreci, vakum portları numune köşelerinde olacak şekilde yerleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Vakum portunun 4 adet olmasının amacı, numunenin tamamen homojen bir şekilde vakum işlemine tabi olması, numune kalınlığının her bir bölgede eşit olarak dağılması ve hacimsel olarak reçine akışının eşit olmasını sağlamaktır. Vakum işlemi için GAMAK marka motor ve AKAR MAKİNA marka vakum motoru kullanılmıştır. Numune üzerine otoklav süreci boyunca kesintisiz olarak 50 mm bar bir kuvvet uygulanmıştır. Vakum işlemi yapılan bir kompozit laminant Resim 9.2.b'de gösterilmektedir.

Otoklav süreci, kumaş parametrelerine uygun olacak şekilde kür döngüsünde hazırlanmıştır. Belirlenmiş olan bu döngü ile kür işlemi tamamlanan kompozit plakalar yaklaşık %58 lif hacimsel oranına ulaşacak şekilde üretilmişlerdir. Test işlemleri için 5 adet farklı elyaf dizilimleri içeren farklı kompozit plakalar üretilmiş ve her bir kompozit plakadan 12 adet numune alınmıştır. Toplam 60 adet numune ASTM D953 standartlarına göre hazırlanmıştır. Numunelerin test edilebilmesi için ASTM D953 standartlarına uygun olarak test aparatının

tasarımı ve üretimi sağlanmıştır [55]. Standartlara uygun üretimi yapılan numune ve test aparatı Resim 9.3. a’da gösterilmektedir. Üretilen laminant plakalardan aynı ebatlarda 60 adet numune alınmıştır. Alınan bu numunelere ilişkin olarak ölçüsel değerleri ise Resim 9.3. b’de gösterilmektedir.

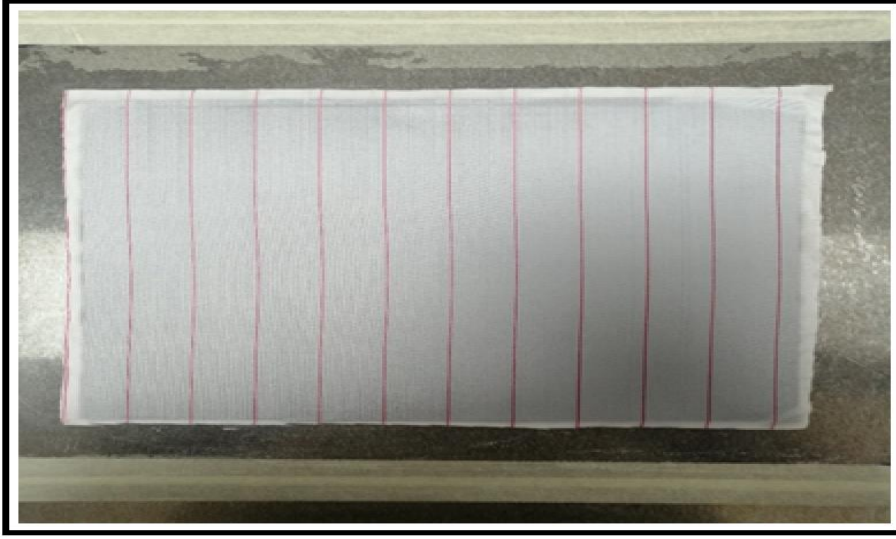


Resim 9.3. a) Çekme cihazı, test aparatı ve numune b) Numune ve ölçüsel gösterimi

Kompozit plakaların içerdikleri elyaf dizilimlerine göre gruplandırılması yapılan numuneler ilk olarak tahribatsız muayene işlemi olan elektron mikroskobu ile analiz edildi. SEM görüntüleri alınan numunelerde, serim süreci ve sonrası oluşabilecek porozite ve delaminasyon gözlenmiştir. Ayrıca, ASTM D953 standartlarına uygun olacak şekilde Instron 3369 Universal test makinesi kullanılarak, hazırlanan numunelere tahribatlı muayene yöntemlerinden biri olan çekme testi yapılmıştır ve dizilim farklılıklarının oluşturduğu çekme şekilleri yorumlanmıştır.

9.1. Soyma Kumaşın Uygulanması

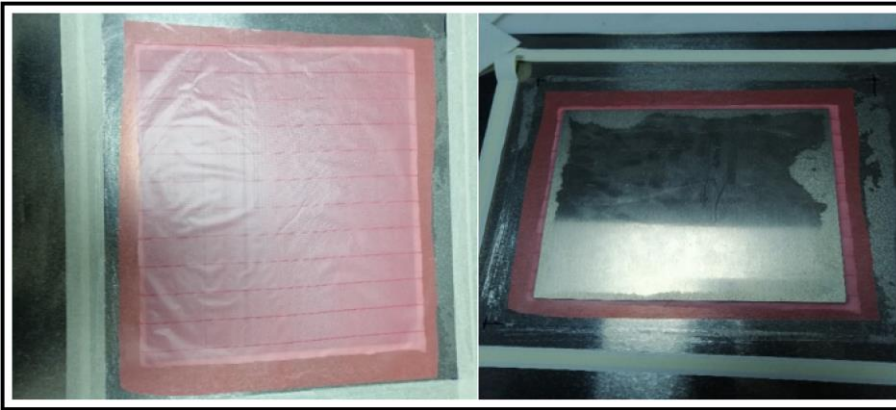
Soyama kumaşı uygulamada PEEL PLY olarak adlandırılır. İşlem sonrasında plaka yüzeyinde hem mat tırtıklı bir yüzey oluşumu hem de serim yönünü belirten şekilde bir iz bırakması için kullanılmıştır. Resim 9.4.'de gösterilmektedir.



Resim 9.4. Soyma kumaşı (peel ply) uygulaması

9.2. Ayırıcı Film ve Baskı Plakası Uygulaması

Ayırıcı film kür sırasında jel haline gelip akışkan olan reçinenin emiliminin sağlanması ve baskı plakasına yapışmasına önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Baskı plakası ise istenilen form elde edilebilmesi için vakum altında plakanın üst tarafına baskı yaparak lineer bir yüzey alması amaçlanmaktadır. Resim 9.5.'de uygulamaları gösterilmektedir.

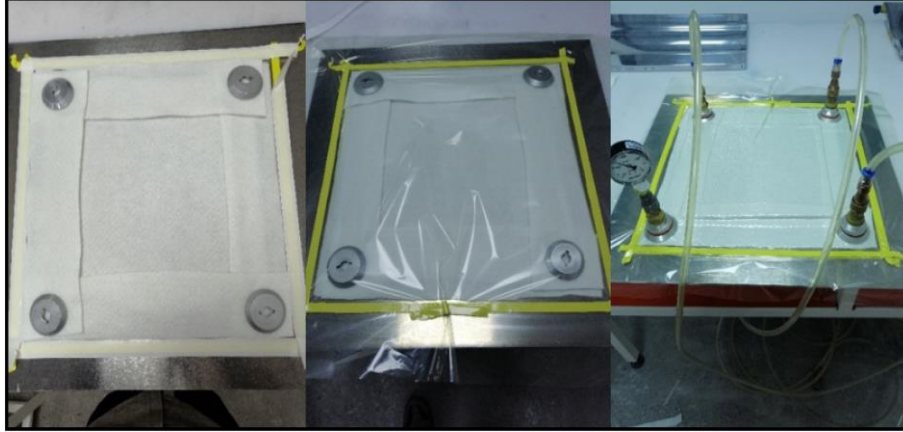


Resim 9.5. Ayırıcı film ve baskı plakası uygulaması

9.3. Vakum İşlemi

Vakum işlemi her 4 kat serim de bir tekrarlanarak katlar arasında hava boşluğu kalmamasını ve katların birbirleri üzerinde daha sıkı bir yapışma sağlamasını amaçlamaktadır. Vakum

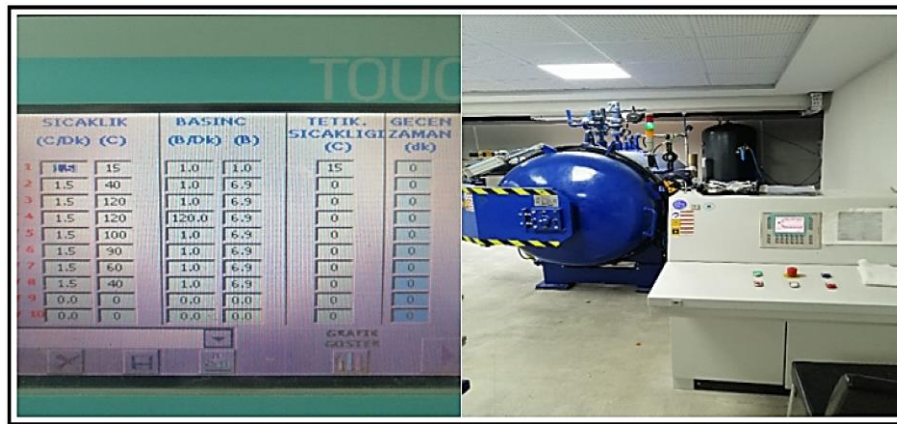
işlemi için kullanılan makine GAMAK marka motor ve AKAR MAKİNA marka vakum motorudur. Uygulanan vakum derinliği 50 mm bar bir kuvvettir. Bu kuvvet otoklav süreci tamamlana kadar süreç boyunca kesintisiz devam etmiştir. Resim 9.6.'da vakum hazırlığı ve uygulaması gösterilmektedir.



Resim 9.6. Vakum hazırlıkları ve vakum işlemi

9.4. Otoklav İşlemi

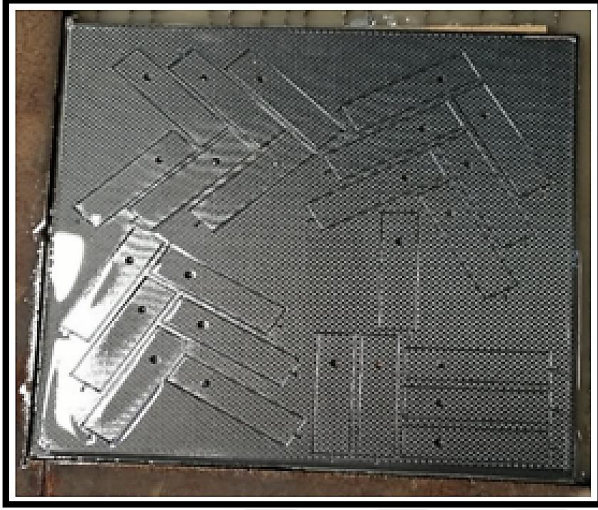
Om10 reçine sistemine sahip olan kumaşların kür süreçleri için gerekli kür döngüsü KORDSA' dan alınan reçine sistem özelliklerine göre otoklav reçetesine yazılmıştır. Reçete Resim 9.7.'de gösterilmektedir. Otoklav kür süreci boyunca tam vakum kuvveti ile çalışmıştır.



Resim 9.7. Otoklav reçetesi ve gösterimi

9.5. Su Jeti İşlemi

Kür işlemi tamamlanan laminat plakanın ASTM D953 standartlarına göre kesimi ve ebatlanması yapılması amacıyla aşındırıcı su jeti kullanılmıştır. Resim 9.8.'de su jeti işlemi sonrası laminat plaka gösterilmektedir.



Resim 9.8. Su jeti sonrası laminat gösterimi

9.6. Numuneler

Kesim işlemi tamamlanan numuneler test esnasında karışmaması amacı ile markalama işlemi yapılmıştır. Markalama işlemi tamamlanan numuneler ise kendi gruplarına ayrılarak aynı numunenin kendi grubu ile karşılaştırılarak test edilmesi sağlanmıştır. Resim 9.9.'da hazırlanan numuneler gösterilmektedir.



Resim 9.9. Numunelerin markalanmış gösterimi

9.7. Çekme Cihazı ve Özellikleri

İnstron 3369 üniversal test makinesi çekme test cihazı yaygın olarak havacılık alanlarında hizmet veren kuruluşlar tarafından kullanılır, havacılık, petrol kimya sanayi, makinalar, metal malzemeler ve ürünler, elektrik tel ve kablo, kâğıt, baskı ve ambalaj, bant, çanta, tekstil elyaf, farmasötik kimya sanayisi, gıda endüstrisi, vb. her türlü malzeme ve ürünlerin fiziksel özellikleri için test, yarı işlenmiş, çekme ve basma yapılabilen test cihazıdır.

Özellikleri:

1. Çekme mukavemetini algılayabilmek üzere, yüksek hassasiyetli yük ve yüksek hassasiyetli veri toplama devresi benimseyen bir test cihazıdır,
2. Yaygın olarak, kauçuk plastik, tel, kablo, terminal, giyim, deri ve fiziksel gücü belirlemek için kullanılan diğer malzemeler.
3. ISO uygula, BT, ASTM, DAN, GB ve diğer standart gereklilikleri [56].

Çizelge 9.2. Instron 3369 teknik özellikler

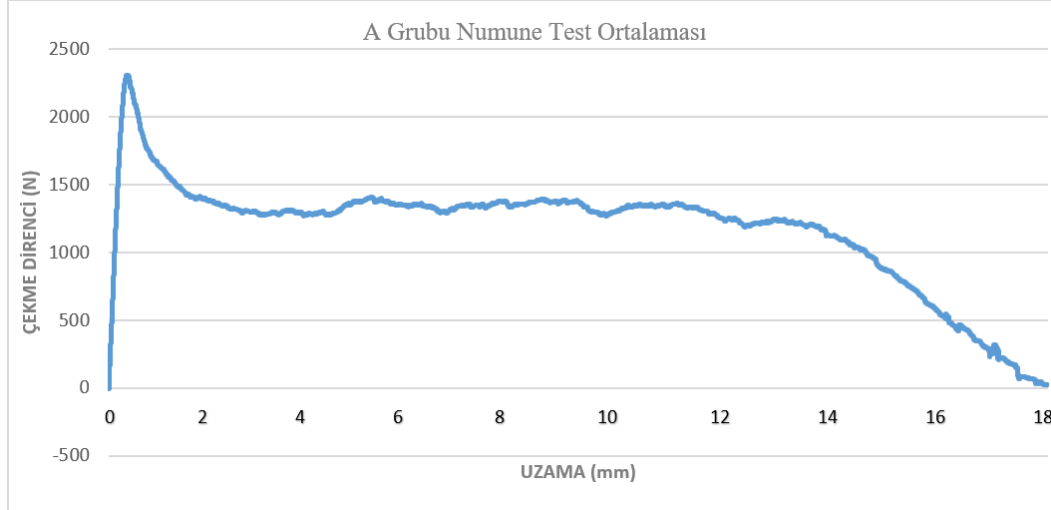
model	YUT-05-S	YUT-10-S _i	YUT-20-S _i	YUT-05-L	YUT-10-L	YUT-20-L
Kapasite(isteğe bağlı)	5000kgf	10000kgf	20000kgf	5000kgf	10000kgf	20000kgf
birim(Değiştirilebilir)	kgf, 1bf, N-, kN, mpa, Kpa'ya			Kilogram, gN, 1b Kgf / cm2 1b / in2 kgf / m2 '		
Yük Çözünürlüğü	1/200,000			1/10,000		
Yük Doğruluk	0.5 ±%			±% 0.1		
Büyütülmesi Oranı yükle	hiçbir dönem					
inme(saplar dışlamak)	1150aa					
Etkili genişliği	570aa					
Hız testi	0.001~ 200 mm / dak(seçilebilir)			10~ 200 mm / dak ayarlanabilir		
İNME Çözünürlük	0.001m					
Örnekleme oranı	200Zaman / sn			10adet / s		
Yazılım	Bilgisayar sistemi					
Motor	AC Servo Motor			DC motor		
boyut(× B xH)	150× 660 x 2200					
	1000× 600 x 1180mm			500× 630 x 1340mm		
Ağırlık(yaklaşık)	640kilogram					
	60kilogram			40kilogram		
Güç	AC 1Ψ 220V / 50Hz					



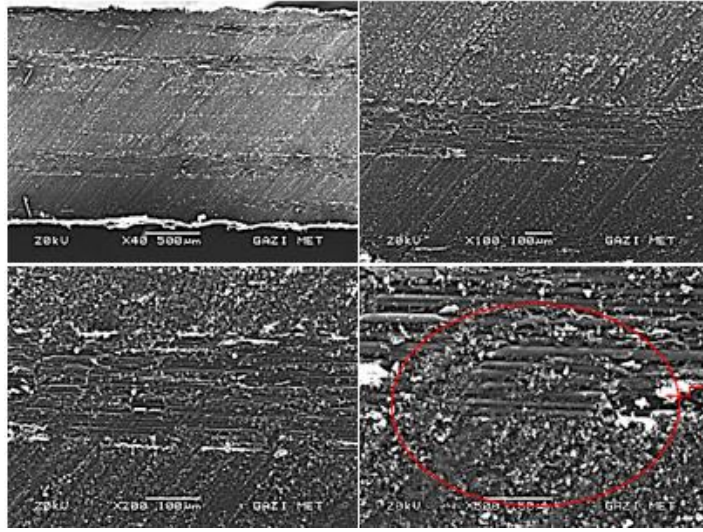
10. DENEYSEL SONUÇLAR

10.1. A Grubu Numune Sonuçları

A grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: 0, 90, 45, -45, -45, 45, 90, 0'dır. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir şekilde (Şekil 10.1.) verilmiştir. Serim açılarına bağlı, A grubu numuneleri ortalama olarak 2334 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1380 N değerinde seyretmekte ve 18 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 12,7 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1380 N değerinde 12,7 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 5,4 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Şekil 10.1. A Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



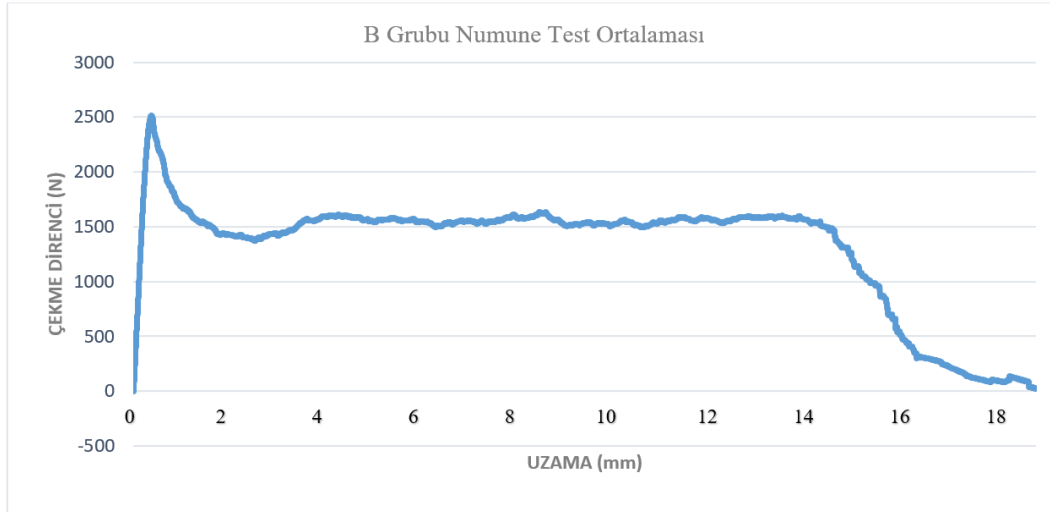
Bakış açısına göre çubuk şeklinde görünmekte olan bu karbon fiber elyaf iplik 90°'lik bir serim açısına sahip olduğu anlamına gelmektedir.

Resim 10.1. A Grubu numunelerinin farklı büyütme ölçeklerinde alınan görüntüleri

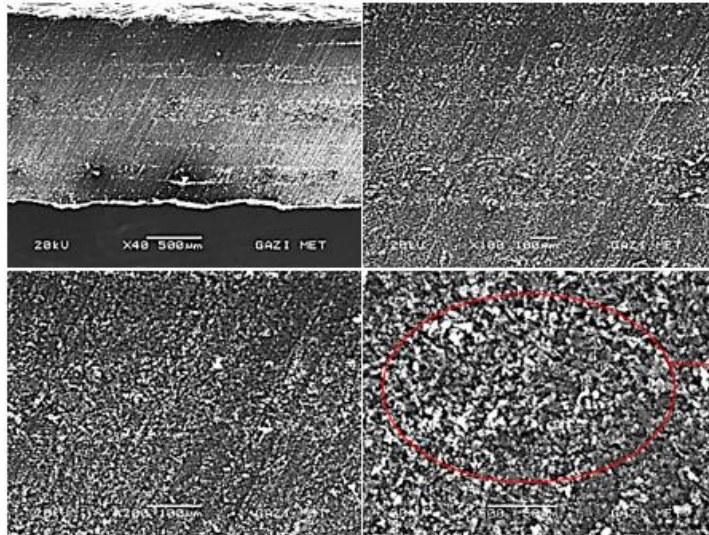
Resim 10.1.'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

10.2. B Grubu Numune Sonuçları

B grubu test numunelerinin sahip oldukları serim açısı değerleri: -60, 30, 75, -15, -15, 75, 30, -60'dır. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir Şekilde (Şekil 10.2.) verilmiştir. Serim açısına bağlı, B grubu numuneleri ortalama olarak 2512 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1518 N değerinde seyretmekte ve 18,9 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 10,8 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1518 N değerinde 10,8 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi laminant plakanın kopma eğilimi 6,3 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Şekil 10.2. B Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



Bakış açısına göre dairesel ve eliptik duran bu karbon fiber iplikler, eliptik mesafenin uzunluğuna bağlı olarak açı değerleri belirlenir. Örn: Eliptik mesafe ne kadar çok ise içerdiği açı değeri o kadar küçüktür.

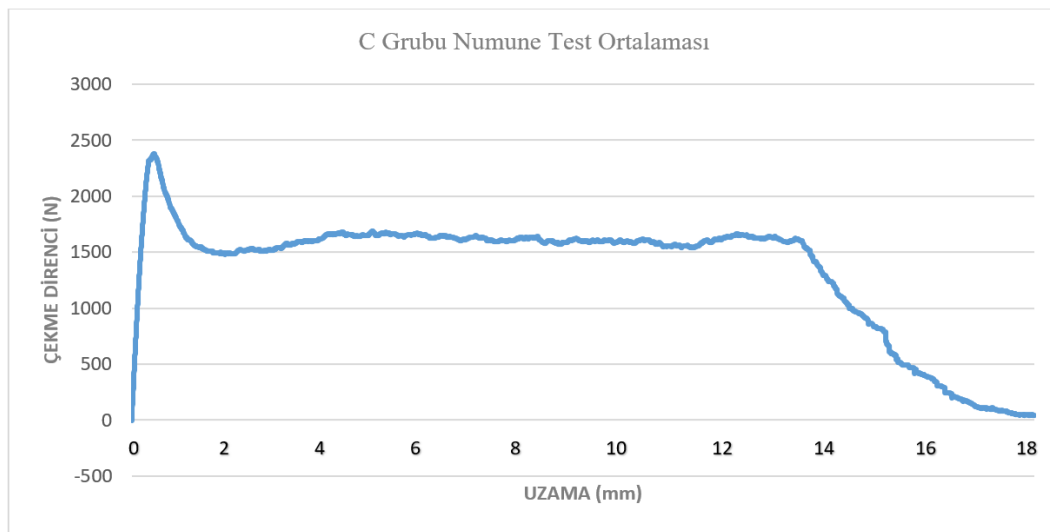
Resim 10.2. B Grubu numunelerinin farklı büyütme oranlarında alınan görüntüleri

Resim 10.2.'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

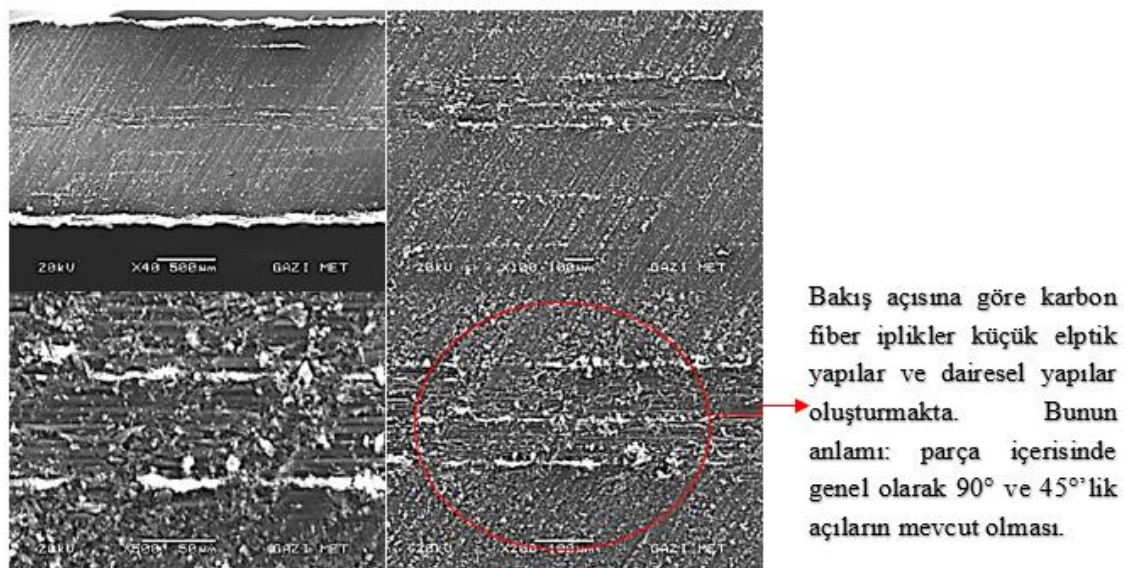
10.3. C Grubu Numune Sonuçları

C grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: -45, 45, 0, 90, 90, 0, 45, -45,'dir. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Daha sonra, genel bir

değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalamaları hesaplanmış ve tek bir Şekilde (Şekil 10.3.) verilmiştir. Serim açlarına bağlı, C grubu numuneleri ortalama olarak 2375 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1524 N değerinde seyretmekte ve 18,2 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 11,3 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1524 N değerinde 11,3 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 5,7 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Şekil 10.3. C Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği

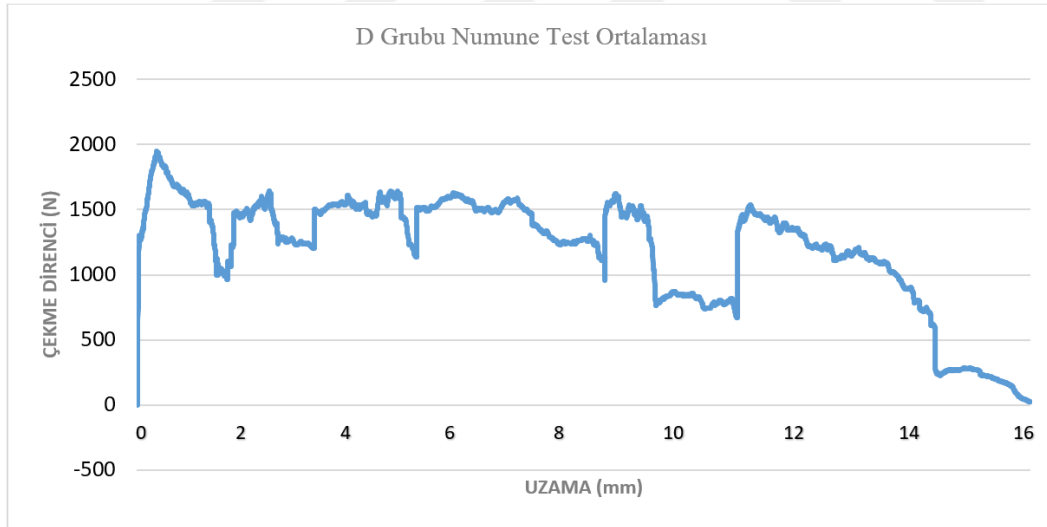


Resim 10.3. C Grubu numunelerinin farklı büyütmelede alınan görüntüleri

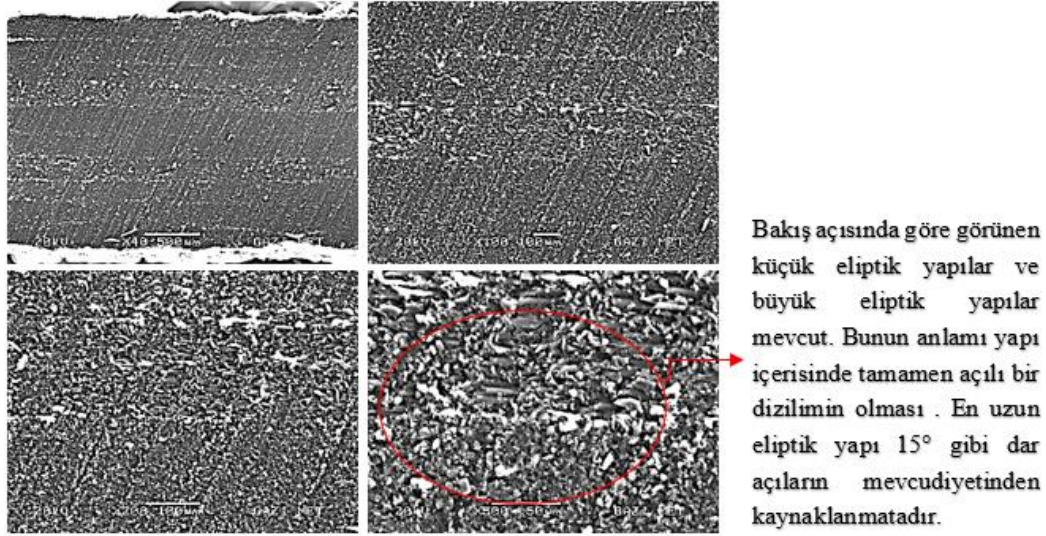
Resim 10.3.'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

10.4. D Grubu Grubu Numune Sonuçları

D grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: -30, 60, -75, 15, 15, -75, 60,-30'dur. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir Şekilde (Şekil 10.4.) verilmiştir. Serim açlarına bağlı, D grubu numuneleri ortalama olarak 1971 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1324 N değerinde seyretmekte ve 16,1 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum olmayışı, tartışmalar kısmında detaylıca incelenmiştir.



Şekil 10.4. D Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği

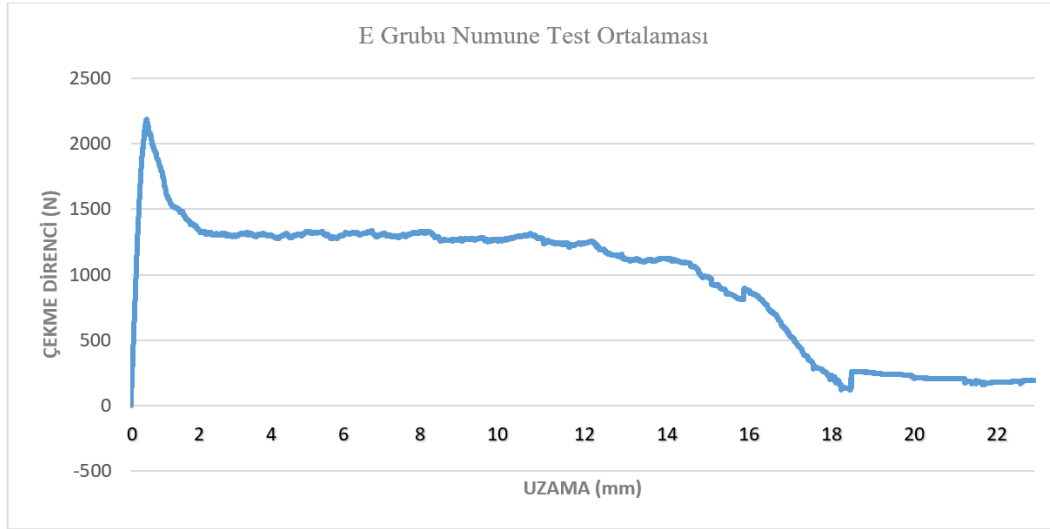


Resim 10.4. D Grubu numunelerinin farklı büyütme oranlarında alınan görüntüleri

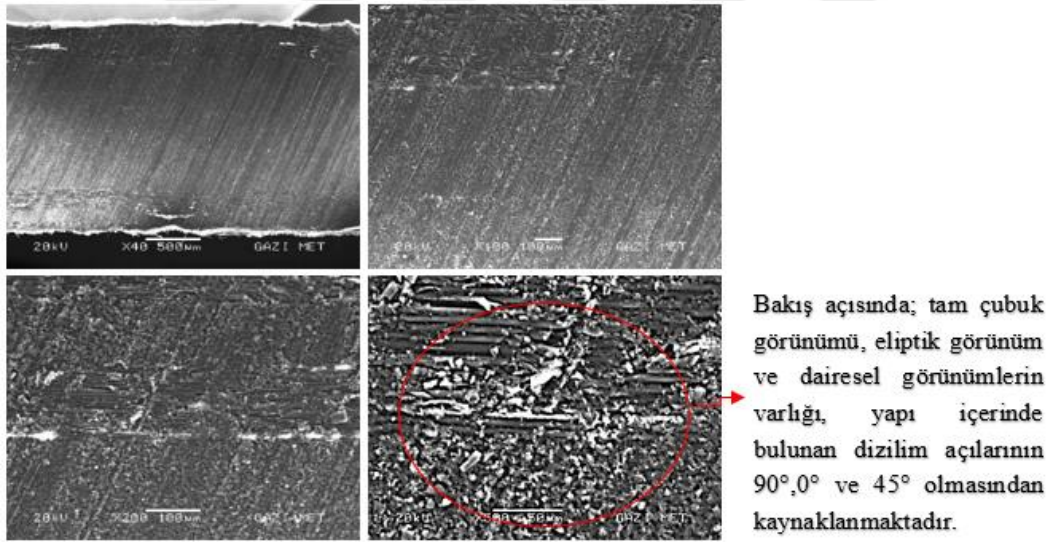
Resim 10.4.'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

10.5. E Grubu Numune Sonuçları

E grubu test numunelerin sahip oldukları serim açısı değerleri: 90, 0, -45, 45, 45, -45, 0, 90'dır. Bu testler sürecinde öncelikle, kompozit laminant plakalardan alınan 12 adet numunenin her birine ait yük altında uzama davranışları ölçülmüştür. Ardından, genel bir değerlendirme yapabilmek amacıyla yük altındaki uzama davranışlarının ortalaması hesaplanmış ve tek bir Şekilde (Şekil 10.5.) verilmiştir. Serim açısına bağlı, E grubu numuneleri ortalama olarak 2217 N'luk çekme mukavemeti sergilemişlerdir. Uzama değerleri ise ortalama olarak 1338 N değerinde seyretmekte ve 23,4 mm değerinde tamamen kopma gözlenmektedir. Kopma uzamasındaki lineer durum ortalama olarak 9,27 mm sürmektedir. Bu aralıkta test edilen numune 1338 N değerinde 9,27 mm değerinde lineer bir durum göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi laminant plakanın kopma eğilimi 13,7 mm'den düşük bir mesafede gerçekleşmiştir.



Şekil 10.5. E Grubu test numuneleri ortalama kuvvet-uzama grafiği



Resim 10.5. E Grubu numunelerinin farklı büyütmelerde alınan görüntüleri

Resim 10.5.'de SEM görüntüsü olan numune için dizilim kusuru ve belirlenen açı değerlerinin doğru olup olmadığı için görüntüler alınmıştır. Değerlendirilen SEM görüntüleri sonucunda, açı değerlerinde yanlışlık ve dizilim kusuru olmadığı anlaşılmıştır.

Çizelge 10.1. Değerlendirilen numunelerin mekanik değerleri

	NUMUNE KALINLIĞI	MAKSİMUM KUVVET	KOPMA NOKTASINDA UZAMA (mm)	MAKSİMUM UZAMA (%)	ABSORBLANAN ENERJİ (J)	KOPMA DAYANIMI (MPa)
A GRUBU	1.9±1	2334	18.00	15.92	19.57	5.33
B GRUBU	1.9±1	2512	18.90	16.13	22.24	8.31
C GRUBU	1.9±1	2375	18.20	15.61	23.42	5.53
D GRUBU	1.9±1	1971	16.10	13.39	24.17	1.1.
E GRUBU	1.9±1	2217	23.40	19.25	18.68	5.9

Çizelge 10.1.'de kompozit malzemelere ait olan çekme testi sonuçlarında elde edilen veriler göstermektedir. Tüm numeler arasında bir değerlendirme yapıldığında D grubu numunesinin kopma noktasındaki uzama 16.1 mm iken maksimum yüzde uzaması 13,39 olarak belirlenmiştir. Absorblanan enerji miktarı da değerlendirildiğinde bu malzemenin en fazla enerjiyi absorbe ettiği görülmektedir. Ancak, Şekilden de görüldüğü üzere lineer bir uzama davranışı sergilemeyişi ve kopma dayanımına gösterdiği zayıf mukavemet diğer malzemelerden farklılığını ortaya koymuştur.

11. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kompozit malzeme üretiminde, malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla alternatif elyaf dizilimleri tasarlanmıştır. Tasarımlar neticesinde, polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik birleştirilmesinde karşılaşılan mukavemet yetersizliklerinin giderilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla kompozit malzemenin yapısı; farklı katmanlarda farklı yönelimlere sahip olan kompozit laminantlar içerecek şekilde tasarlanmış ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Ardından üretimi yapılan bu kompozit malzemelerin yük altında göstermiş oldukları dayanımları incelenmiştir. Beş çeşit dizilim (açı) tasarımı içeren laminant plakaların her birinden numuneler alınarak, dizilimde oluşabilecek problemlerin tanımlanması için Taramalı Elektron Mikroskobu ile farklı büyütme ölçeklerinde yüzey analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda planlanan tasarımlarla üretimi gerçekleştirilen malzemelerin morfolojik özelliklerinin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Analizi yapılan laminant numunelerin hiçbirisinde dizilim ve açı kusurlarına rastlanmamıştır. Testler sonucunda, farklı gruptaki kesimi yapılan her 12 numunenin sahip olduğu ortalama çekme mukavemeti, kopma noktasındaki maksimum uzama, maksimum uzama yüzdesi, absorblanan enerji, kopma dayanımı ve lineer uzama miktarı belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, aynı sayıda katman karbon elyaf sayılarına sahip olan numuneler için mekanik özellik farklılıkların dizilim açılarının tasarımından kaynaklı olduğu açıkça gözlemlenmiştir. B grubu numunelerinden alınan sonuçlar, mekanik birleştirme için içerdikleri açılar (-60, 30, 75, -15, -15, 75, 30, -60) nedeniyle en iyi yapısal mekanik dayanıma sahip oldukları tespit edilmiştir. D grubu numunelerinin analiz sonuçları bu malzemenin en yüksek absorblanan enerji miktarı ve en düşük kopma dayanımına sahip olması nedeniyle malzemenin lineer bir davranış göstermediğini ortaya koymaktadır. D grubu numunelerinin çekirdeğinde bulunan 15° istif açısında çekme mukavemeti yönünde zayıf bir dizilim açısını işaret etmektedir. En dış katmanda bulunan -30° istif açısındaki elyafların 15° açılardaki elyaflara destek olamadığı için lineer bir davranış ortaya koyamadığı düşünülmektedir. B grubu malzemelerin çekirdeğinde bulunan benzer dizilimde bu davranışın görülmemesinin sebebi olarak en dış katmanında yer alan -60°'lik negatif serim açılarının çekirdekte bulunan negatif -15°'lik serim açılara destek sağlaması sebebiyle yapıyı kuvvetlendirdiği değerlendirilmektedir. Bu durum, serim tasarımında en dış katmandan iç katmanlara gidildikçe birbirlerini destekleyici serim tasarımının önemini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, çeşitli tasarımlarda üretilen her malzemenin kendine has

yüzey ve mukavemet özelliklerinin bu malzemelerin her birini farklı uygulama alanlarında kullanıma uygun kompozit malzemeler haline getirdiği belirlenmiştir. Bu tercih edilebilirlik sadece kompozit malzeme üretiminde kullanılan istif açılarının değiştirilerek istenilen alanda istenilen hassasiyeti elde edebilecek şekilde uygun istif açılarının kullanımıyla mekanik mukavemet artırımının sağlanabileceğini ve bunun için fazladan maliyet gereksinimine gerek olmadığını ortaya koymuştur.

Üretimi gerçekleştirilmiş farklı tasarımlara sahip malzemeler birbirlerine göre değerlendirildiğinde; *A Grubu* tasarımında üretilen numunelerinden analiz değerleri incelendiğinde tüm gruplar arasında en fazla lineer *yer değiştirme* (12,7) mm değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu değerler kompozit parçanın kullanım alanını genişletmekle beraber güvenlik katsayısı olarak düşünülen parametrelerin yüksek olması anlamı taşımaktadır. Ayrıca *A grubu* tasarımının ilk hata başlangıcının hassas olmadığı fakat hata ilerleme oranının yüksek olduğu alanlarda kullanımının tercih edilmesinin uygun olacağı söylenebilir. *B Grubu* tasarımlı numunelerin diğer gruplardan farklı olarak *çekme mukavemetinin* (2512 N) daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir ve bu da onun ilk hata başlangıcının yüksek hassasiyet gerektirdiği yerlerde kullanım potansiyelini arttırmaktadır. *B grubu* malzemeye ait ilk hata başlangıç toleransı ve aynı zamanda çekme mukavemeti değerlerinin üstünlüğü bu numunelerin *A Grubu* yerine tercih edilebilir bir kompozit malzeme olması anlamına gelmektedir. Üretilen parçanın boyutsal hiçbir değişiklik göstermeden sadece istif açısı değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilen bu fark; *B grubu* tasarıma sahip epoksi matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin birçok alanda tercih sıralamasını üst sıralara taşımasına temel oluşturacağı beklenmektedir. *C Grubu* tasarımındaki numunelerin analiz sonuçları, *B Grubu* numuneler ile hemen hemen benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, *C Grubu* numunelerin istif açısı değerlerinin (45,-45, 0, 90) üretim kolaylığı açısından tercih edilebilir tasarım olduğunu unutmamak ve yüksek mukavemet değerlerinin uygulama potansiyelini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. *D Grubu* tasarımdaki numunelerinin elde edilen veriler doğrultusunda *en zayıf* (1971 N) olan tasarım olduğu belirlenmiştir. Buna rağmen, *D Grubu* tasarımlı numunelerinin özel durum gerektiren, doğrudan bir kullanıcının kullandığı ve hasar başlangıcında malzemenin *mekanik değişiminin hissedilebilir* olduğu sağlık (kompozit protez malzemeler v.b.) alanında kullanımı çok uygundur. Bu tip tasarıma sahip olan bir kompozit malzeme, kullanımı sırasında hasar başlangıcının belli olması ile birlikte, kullanıcının bu durumu fark etmesi ve tedbir alması bakımından önem arz etmektedir.

Mekanik değişimin hissedilebilir oluşu sayesinde bir anda oluşabilecek hasar sonucunda protez kullanıcısının sağlığına zarar verici durumların önüne geçilebilir. *E Grubu tasarımı* numunelerin *çekme mukavemetinin* ortalama olduğu gözlemlenmiştir. Bu özellik; ilk hata başlangıcının orta ve düşük hassasiyet gerektirdiği yerlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Sadece serim açılarının yani tasarımın değiştirilmesi ile elde edilen yüksek ilk hata başlangıç toleransı ve aynı zamanda kabul edilebilir bir akma mukavemeti değeri, B grubu tasarımı numuneleri E Grubu numunelerinin yerine tercih edilebilir bir kompozit malzeme haline getirmektedir.

Bu çalışmada elde edilen verileri kıyaslayabilmek adına mümkün olan en yakın literatür çalışmalarına göre bir değerlendirme yapılmaya çalışılmış ve elde edilen veriler ayrıca aşağıda sunulmuştur. Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, yapılan araştırmaların çoğunun bağlantı noktasının güçlendirilmesi için yapıştırıcı kullanımı, bağlantı noktalarında kullanılan cıvata ve somun malzemelerinin geometrik değişiminin üzerine olduğu görülmüştür. T. Collings, and M. Beauchamp [51] yapmış oldukları çalışmada, rulman yataklarının bulunduğu kompozit malzemelerin, rulman yatak kısmında oluşturulacak hassasiyet toleransı nedeniyle kullanılabilecek olan en iyi açı istif değerini 0° ve 45° olduğunu tespit etmişlerdir. Epoksi matrisli fiber takviyeli bir kompozit malzeme üretiminde, özellikle otoklav yöntemi veya infüzyon yöntemleri kullanılarak yapılan üretim metotlarında, el yatırma ve serim işlemleri oldukça hassasiyet gerektiren durumlar olmaktadır. Bu sebeple genel olarak üretilecek olan malzemenin en hassas ve en yüksek öneme sahip alanlarında istenilen açı dizilimi, üretimi yapılan parçanın hemen hemen tamamına uygulanarak bir üretim sağlanmaktadır. Bu durum özellikle havacılık sanayisinde maliyet ve mekanik mukavemetin ön planda olduğu durumlarda, hem maliyet açısından fazladan oluşan bir işçilik ve malzeme maliyetini ortaya çıkartmakta hem de istenmeyen fazladan oluşabilecek ağırlık oluşumlarını önleyememektedir. B. Agarwal, ve J. Waszczak, and T. Cruse [57] yaptıkları çalışmada, bağlantı noktasında kullanılan cıvata ve somun parçaların geometrik şekillerini değiştirerek bir başarı elde etmeye çalışmışlardır. Dairesel somun ve dairesel cıvata yerine eliptik bir geometri bulunduran bağlantı elemanlarının kullanılmasının, mekanik bağlantı noktasını güçlendirdiklerini keşfetmişlerdir. Literatür çalışmalarına ek olarak bu çalışmada, mekanik olarak bağlantı noktasının güçlendirilmesi amacıyla kompozit parça üretiminde sadece istif açılarının doğru bir şekilde uygulanması neticesinde harici bir cıvata, somun veya farklı bir yapıştırıcı kullanımı gerekmeden mukavemet arttırılmasının mümkün olabildiği görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışmanın

birincil çıktısı olarak özel bağlantı elamanlarının kullanımına gerek olmayan, aynı zamanda kalınlığı arttırılmadan mekanik birleştirilme kabiliyetinin yükseltilebildiği kompozit plakaların tasarımı ve üretiminin gerçekleştirilebildiği görülmektedir. İkincil olarak ise; istif açılarının değiştirilmesi ile elde edilen mekanik mukavemet değişimleri farklı alanlarda kullanım için öncelik kazandırılmaktadır. Hata başlangıcının önem arz ettiği yapılarda kullanılması gereken istif açısı değerleri ve hata ilerleme durumunun hata başlangıcına göre daha önemli olduğu yapılarda ise gereken açısı istif değerleri tespit edilmiştir. Özellikle havacılık sanayisinde kullanılan yapılarda hata başlangıç değerleri çok büyük öneme sahiptir, bu sebeple havacılık sanayisinde kullanılması gereken açısı değeri B Grubu numunelerden alınan (-60, 30, 75, -15, -15, 75, 30, -60) açısı ve istif değerleri iken, sağlık sektörü gibi niş bir alanda hizmet veren ürünlerin yapımında ise D Grubu numunelerinden alınan (-30, 60, -75, 15, 15, -75, 60,-30) açısı ve istif değerleri belirlenmiştir. Bu durumun sebebi ise; Kullanıcının direkt olarak temas ettiği protez ve ortez uygulamalarında kişi kullandığı yapıda meydana gelen en ufak değişimleri fark ederek olası bir yaralanma ve düşme gibi istenmeyen durumların oluşmasından önce, kullandığı ürün ile ilgili hata oluşumuna kendisi karar verip olası önlemleri alabilmesi durumunu ortaya çıkarmıştır.

KAYNAKLAR

1. Karagöz, Ö.G.S., (2008). *Malzeme bilgisi*. Adnan Menderes Üniversitesi, AYMYO Yayınları Ders Notu No: 00, Aydın.
2. Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: türkiye'den dört örnek firma üzerine bir inceleme*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 21-35.
3. Mills, N. (2007). *Polymer foams handbook: Engineering and biomechanics applications and design guide*. Elsevier, 92-93.
4. Bircan, D.A., Karaduman D., ve Çetin, A. (2017). Akustik emisyon (ae) yönteminin biyomedikal alanda alternatif bir metot olarak uygulanması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(6), 34-41.
5. Sharma, P.K., Handa, R.N., and Dubey S.N. (1996). Synthesis and characterization of some transition metal complexes of n-(2-hydroxy-1-naphthylidene) amino acids. *Synthesis and Reactivity in Inorganic and Metal-Organic Chemistry*, 26(7), 1219-1230.
6. Saçak, M. (2002). *Polimer kimyası*. (Sekizinci Baskı), Ankara: Gazi Kitabevi, 38-39.
7. Uusitalo, K. (2013). *Designing in carbon fibre composites*. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 57-64.
8. Hallander, P. (2013). An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates. composites part A: *Applied Science and Manufacturing*, 50(2013), 54-64.
9. Tanoğlu, M. ve Toğulga, M. (2005). *Jeotermal enerji semineri*. (İkinci baskı), İzmir: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 407-419.
10. Kaştan, A. ve Talaş, Ş. (2018). Nano katkıların polimerlerin ergime (tm) ve camsı geçiş (tg) sıcaklıklarına etkisi. *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5(2), 137-142.
11. Askeland, D.R. (2003). *The science and engineering of materials*. London: The Ipswich Book Company, 191-204
12. Arıcasoy, O. (2006). Kompozit sektör raporu. *İstanbul Ticaret Odası Yayınları*, 1(1), 4-15.
13. Şahin, Y. (2000). *Kompozit malzemelere giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi, 45-50.
14. Örs, S. (2014). *Farklı karbon tekstilleriyle ve reçinelerle oluşturulan karbon kompozitlerin karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 20-24.
15. Töre, C. (2011). *Polimer matrisli kompozit malzeme temelleri. (takviye elemanları)*. Ankara: TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 45-72.

16. Sheffer, E., Dotan A., and Yosef, M.B. (2005, May). *Impact Resistance of Knitted Reinforced Composite Material*. Paper presented at the 5th International Istanbul Textile Conference, Istanbul.
17. Enşici, A. (2008). Endüstriyel tasarımda polimer esaslı kompozit malzemeler. *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 178(1), 6-15.
18. Durgun, İ. (2014, 26-27 Mayıs). *Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit parça üretimi*. Otomotiv Teknolojileri Kongresinde sunuldu, Bursa.
19. Genç, G. (2008) *Elyaf sarma yöntemiyle üretilen karbon elyaf kompozitlerde ön gerilme parametrelerinin elyaf ve kompozit mukavemetine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 50-74.
20. Haskılıç, V. (2019). *Kompozit üretiminde otoklav yükleme ve çizelgeleme için yeni bir model önerisi: savunma sanayii uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 75-78.
21. Sakin, R. ve Gülnar, M. (2015, 5-7 Kasım). *Vakum destekli reçine transfer kalıplama (rtm) yöntemi ile kompozit-plaka üretim prosesi üzerine çalışmalar*. Uluslararası Katılımlı III. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumunda sunuldu, Aydın.
22. Mazumdar, S. (2001). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. Florida, ABD: CRC press. 224-235.
23. Jacob, A. (2010). Bmw counts on carbon fibre for its megacity vehicle. *Reinforced Plastics*, 54(5), 38-41.
24. Akil, H. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: a review. *Materials & Design*. 32(8-9), 4107-4121.
25. Stewart, R. (2009). Carbon fibre composites poised for dramatic growth. *Reinforced Plastics*, 53(4), 16-21.
26. Han, S.H. (2015). Study on high-speed rtm to reduce the impregnation time of carbon/epoxy composites. *Composite Structures*, 119(1), 50-58.
27. Okkalıoğlu, M., Pekbey, Y., ve Aktaş, A. (2014). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş I tipi kompozit köşe bağlantılarında çekme dayanımının artırılması. *Engineer & the Machinery Magazine*, 55(649), 50-57.
28. Kurtoğlu, B. (2019). *Sıcak ekstrüzyon yöntemi kullanarak alüminyum alaşımı talaşların geri dönüşümü ile parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, 61-65.
29. Durgun, İ. (2014, 15-16 Mayıs). *El yatırma yöntemi ile kompozit parça üretimi*. 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumunda sunuldu, Ankara.
30. Koçak, H. (2015). Nikel ara katman kullanılarak insörtlü toz enjeksiyon kalıplama yöntemiyle wc-co/hss kompozit parça üretiminin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(2), 374-384.

31. Gülmez, S. (2018). *Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler*, Tezsiz Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Kastamonu, 35-36.
32. Camanho, P.P. and Lambert, M. (2006). A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials. *Composites Science and Technology*, 66(15), 3004-3020.
33. Wang, J., Lotts, C., and Davis Jr, D. (1993). Analysis of bolt-loaded elliptical holes in laminated composite joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 12(2), 128-138.
34. Xiao, Y. and Ishikawa, T. (2005). Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part 1: experimental investigation). *Composites Science and Technology*, 65(7-8), 1022-1031.
35. Zhou, Y. and Fei, Q. (2017). Evaluation of opening-hole shapes for rivet connection of a composite plate. proceedings of the institution of mechanical engineers, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(20), 3810-3817.
36. Deborah, D.C. (1994). Carbon fiber composites. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 171-183.
37. Işık, A. (2008). *Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 30-35.
38. Kaya, A.İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29(1), 38-45.
39. Aktaş, A. (2005). Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading. *Composite Structures*, 67(4), 485-489.
40. Aktas, A. and Dirikolu, M.H. (:2004). An experimental and numerical investigation of strength characteristics of carbon-epoxy pinned-joint plates. *Composites Science and Technology*, 64(10-11), 1605-1611.
41. Bardakçı, R. (2020). *Ortasında Eliptik Yarık Bulunan Cam-Karbon/epoksi Hibrit Kompozit Plakların Burkulma Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 36-41.
42. Dano, M.-L., Gendron, G., and Picard, A. (2000). Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates. *Composite Structures*, 50(3), 287-296.
43. Dursun, T. ve Özbay, M. (2008). Tabakalı kompozit levhalarda hasar ilerleme modellemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 65-68.
44. Echavarría, C., Haller, P., and Salenikovich, A. (2007). Analytical study of a pin-loaded hole in elastic orthotropic plates. *Composite Structures*, 79(1), 107-112.
45. İçten, B.M. and Sayman, O. (2003). Failure analysis of pin-loaded aluminum-glass-epoxy sandwich composite plates. *Composites Science and Technology*, 63(5), 727-737.

46. McCarthy, M.A.(2005). Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: part 1—model development and validation. *Composite Structures*, 71(2), 140-158.
47. Tserpes, K.I., Papanikos, P., and Kermanidis, T. (2001). A three-dimensional progressive damage model for bolted joints in composite laminates subjected to tensile loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24(10), 663-675.
48. Turan, K., Kaman, M.O., and Mustafa, G. (2010). Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(2), 213-220.
49. Recep, K. and Yeşil, M. (2005). Karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin bağlantı bölgelerinin mekanik davranışlarının incelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics*, 1(2), 66-75.
50. Collings, T. (1982). On the bearing strengths of cfrp laminates. *Composites*, 13(3), 241-252.
51. Collings, T. and Beauchamp, M. (2007). Bearing deflection behaviour of a loaded hole in cfrp. *Composites*, 15(1), 33-38.
53. KORDSA, Thechnical Data Sheet. (OM10 Resin System).
54. Saraçyakupoğlu, T.(2012). *Aşındırıcı su jeti ile kesmede malzeme, basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapının yüzey kalitesine etkisinin analizi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 45-48.
55. Kiral, B.G. (2010). Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites. *Materials & Design*, 31(1), 85-93.
56. İnternet: Instron, Instron 3369 Üniversal Test Makinesi. (2017). Url: www.instron.co.uk/en-gb/search-results?region=United%20Kingdom&lang=en-GB. Son Erişim Tarihi: 21.04.2021.
57. Agarwal, B. (1980). Static strength prediction of bolted joint in composite material. *AIAA journal*, 18(11), 1371-1375.



GAZİ GELECEKTİR..