DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK PERFORMANSI ÜZERİNE MEKANİK BAĞLAMANIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yunus Emre KAHVECİOĞLU

Eylül, 2016

İZMİR

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK PERFORMANSI ÜZERİNE MEKANİK BAĞLAMANIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Yunus Emre KAHVECİOĞLU

Eylül, 2016

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

YUNUS EMRE KAHVECİOĞLU, tarafından **DOÇ. DR. YUSUF ARMAN** yönetiminde hazırlanan **"YAPIŞTIRMA BAĞLANTILI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK PERFORMANSI ÜZERİNE MEKANİK BAĞLAMANIN İNCELENMESİ"** başlıklı tez tarafımızdan kabul edilmiş olup, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Yönetici

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU

Juri Üyesi

Prof. Dr. Yeliz PEKBEY

Juri Üyesi

Prof. Dr. Ayşe OKUR
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bana her konuda yardımcı olan, yol gösteren, destek ve tecrübelerini benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın birçok yerinde yardımları bulunan Ömer İPEKTEN ve Samet KIYIK'a da çok teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı kolaylaştıran ve bu çalışmanın önünü açan Rüstem AŞIK'a da ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, bana maddi ve manevi destekte bulunan aileme de çok teşekkür ederim.

Yunus Emre KAHVECİOĞLU

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK PERFORMANSI ÜZERİNE MEKANİK BAĞLAMANIN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, farklı yapıştırma uzunlukları (l_a), cıvata sayısı (n), *E/W* değerleri ve çeşitli cıvata sıkma torkları (T) için, yapıştırılarak bağlanmış kompozit malzemenin üzerine mekanik bağlantının etkilerini araştırmaktır. Bu çalışmada kompozit malzemelerin hasar davranışları deneysel metot kullanılarak araştırılmıştır. Cam elyaf takviyeli epoksi tabakalı kompozit malzeme $(0/90)_6$ kullanılmış olup, numune boyutları *100* x *20* x *2.3 mm*.dir. Yapıştırma işlemi için iki bileşenli *EA 3430* tercih edilmiş olup, mekanik birleştirme işlemi için *M5* çelik cıvatalar kullanılmıştır. Bu deneylerde cıvatalı bağlantılar için üç farklı sıkma torku (*T=5, 10, 15 Nm*) seçilmiştir. Ayrıca cıvata sayısına (*n= 1, 2, 3*) bağlı olarak farklı yapıştırma uzunlukları (l_a*=20, 30, 40mm*) ve *E/W* değerleri seçilmiştir. Her numuneye sentroidal eksenleri boyunca çekme testleri uygulanmıştır. Yük – yerdeğiştirme, eğrileri çizdirilmiş ve veriler tablolarda gösterilmiştir. Yapıştırma boyu (l_a), cıvata sayısı (n), *E/W* değerleri ve cıvata sıkma torkları (T) hakkındaki sonuçlar bu çalışmada yorumlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzemeler, mekanik birleştirme, yapıştırarak birleştirme, tork etkisi, yapıştırma uzunluğu

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BONDING EFFECTS ON MECHANICAL PERFORMANCE OF THE ADHESIVELY BONDED COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

The purpose of this study is investigation mechanical bonding effects on adhesively bonded composite materials for different adhesive lengths (l_a), number of bolts (n), *E/W* values and various bolt torques (T). In this study, the damage behaviors of composite plates were investigated using experimental method. Glass-fibre reinforced epoxy laminated composites $(0/90)_6$ were used as composite material and samples dimensions were *100* x *20* x *2.3 mm*. For adhesion process, two components epoxy adhesive *EA 3430* was preferred and *M5* steel bolts were used for mechanical bonding. Three different tightening torques (*T=5, 10, 15Nm*) were chosen for the bolted joints in the experiments. Also different adhesive lengths (l_a*=20, 30, 40 mm*) and *E/W* values were chosen based on number of bolts (*n=1, 2, 3*). Tensile test was applied through a centroidal axis on each sample. Load – displacement curves were drawn and datas were shown with graphics. Consequences were commented about adhesive length (l_a), number of bolts (n), *E/W* values and bolt tightening torques (T) in this study.

Keywords: Composite materials, mechanical bonding, adhesively bonding, torque effect, adhesive length

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....ii
TEŞEKKÜR…….....iii
ÖZ…….....iv
ABSTRACT.....v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....ix
TABLOLAR LİSTESİ..... .xi

BÖLÜM BİR – GİRİŞ…….....1

1.1 Literatür Araştırması 1

BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER..... 5

2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı 5
2.2 Kompozit Malzemenin Tarihi 7
2.3 Kompozit Malzelerin Kullanım Alanları 10
2.3.1 Havacılık Sanayi..... 10
2.3.2 Denizcilik Sanayi..... 11
2.3.3 Spor Araçları..... 12
2.3.4 Sağlık Sektörü Ürünleri 13
2.3.5 Korozyana Dayanıklı Ürünler 13
2.3.6 Ulaşım Sektöründe Kullanılan Ürünler 13
2.3.6 Otomativ Sektöründe Kullanılan Ürünler..... 14
2.3.6 Müzik Aletleri..... 15
2.3.9 Yapı Sektörü 15
2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 15
2.4.1 Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırma 16
2.4.1.1 Metal Matris Kompozit Malzemeler..... 16
2.4.1.2 Seramik Matris Kompozit Malzemeler..... 16

2.4.1.3 Polimer Matris Kompozit Malzemeler 17
2.4.2 Takviye Malzemesinin Geometrisine Göre Sınıflandırma 18
2.4.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler 18
2.4.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler 20
2.4.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler 20
2.4.2.4 Karma (Hibrit) Kompozit Malemeler 22
2.5 Polimer Matrisli - Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeleri Oluşturan Bileşenler 23
2.5.1 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Başlıca Polimer Türleri 23
2.5.1.1 Termoplastikler 24
2.5.1.2 Termoset Plastikler 25
2.5.2 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Başlıca Elyaf Türleri 27
2.5.2.1 Cam Elyafı 27
2.5.2.2 Karbon Fiber 29
2.5.2.3 Aramid 31
2.6 Polimer Matrisli - Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri 33
2.6.1 Elle Tabakalama 33
2.6.2 Sprey Kalıplama (Püskürtme) 35
2.6.3 İplik Sarma 36
2.6.4 Vakum Paketleme 38
2.6.5 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon 38
2.6.6 Reçine Transfer Kalıplama 39
2.6.7 Pultrüzyon 40
2.6.8 Reçineli Film İnfüzyonu 40
2.6.9 Otoklav Pişirme 41

BÖLÜM ÜÇ – KOMPOZİT MALZEMELERİN BAĞLANTI YÖNTEMLERİ 43

3.1 Giriş 43
3.2 Mekanik Bağlantı Yöntemi 44

3.3 Yapıştırma Bağlantı Yöntemi 46
3.3 Karma (Hibrit) Bağlantı Yöntemi 48

BÖLÜM DÖRT - TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI, TEST METODU VE YAPILIŞI.....50

4.1 Giriş 50
4.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması 52
4.3 Çekme Testlerinin Yapılması 57

BÖLÜM BEŞ – TEST SONUÇLARININ GÖSTERİLMESİ.....59

5.1 Sıkma Torkunun Etkisi 66
5.2 Yapıştırma Boyunun Etkisi 67
5.3 E/W Oranının Etkisi 67
5.4 Kullanılan Cıvata Sayısının Etkisi 68
5.5 Hasar Tipleri 69

BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR…….....66

KAYNAKLAR.....70

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil2.1 Kompozit malzeme ile üretilen Corvette model otomobil parçaları 9
Şekil 2.2 Seramik matrisli kompozit malzeme görüntüsü 17
Şekil 2.3 Fiber açısı – mukavemet arasındaki ilişki 19
Şekil 2.4 Kısa, uzun ve örgü fiber takviyeli kompozit örnekleri 19
Şekil 2.5 Parçacık takviyeli kompozit malzeme içyapısı 20
Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzeme 21
Şekil 2.7 Bina dış cephelerinde kullanılan sandviç panel örneği 21
Şekil 2.8 Bal peteği yapılı sandviç panel örneği 22
Şekil 2.9 Polimer zinciri örnekleri 23
Şekil 2.10 Kompozit malzeme üretim yöntemleri şeması 33
Şekil 2.11 Elle tabakalama üretim yöntemi gösterimi 34
Şekil 2.12 Sprey kalıplama – püskürtme üretim yöntemi gösterimi 35
Şekil 2.13 İplik sarma yöntemi ile üretimin şekilsel gösterimi 37
Şekil 2.14 Vakum destekli reçine infüzyonu üretim yöntemi şematik gösterimi 38
Şekil 2.15 Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi 39
Şekil 2.16 Pultrüzyon üretim metodunun şematik gösterimi 40
Şekil 2.17 Otoklav fırını 42
Şekil 3.1 Kompozit malzemede delik çevresinde gerilme artışı 44
Şekil 3.2 Mekanik birleştirme yöntemleri 45
Şekil 3.3 Cıvatalı birleştirme metodunda kompozit malzemedeki temel hasarlar 46
Şekil 3.4 Yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı 47
Şekil 3.5 Yapıştırma bağlantısındaki yükleme tipleri 48
Şekil 3.6 Adhezyon hasarı 48
Şekil 3.7 Kohezyon hasarı 48
Şekil 3.8 Paralel çift pimli - yapıştırıcılı karma bağlantı örneği 49
Şekil 4.1 Geometri 1 50
Şekil 4.2 Geometri 2 50
Şekil 4.3 Geometri 3 51
Şekil 4.4 Geometri 4 51

Şekil 4.5 Geometri 5 51
Şekil 4.6 Geometri 6 52
Şekil 4.7 0/90 E-Glass cam elyafı 53
Şekil 4.8 Vakum infüzyon yöntemi ile imalat 54
Şekil 4.9 Daire testere tezgahı 55
Şekil 4.10 Numunelerin delinmesi için yapılan ahşap kalıp 55
Şekil 4.11 Sütun matkap 55
Şekil 4.12 Bağlantı yapılmadan önce yapıştırılan ek parçaları 56
Şekil 4.13 Shimadzu AG-X çekme cihazı 58
Şekil 4.14 Trapezium X bilgisayar yazılımı 58
Şekil 5.1 Geometri 1 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 59
Şekil 5.2 Geometri 2 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 59
Şekil 5.3 Geometri 3 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 60
Şekil 5.4 Geometri 4 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 60
Şekil 5.5 Geometri 5 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 61
Şekil 5.6 Geometri 6 için farklı sıkma torklarında kuvvet-deplasman grafiği 61
Şekil 5.7 Geometri 1 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 62
Şekil 5.8 Geometri 2 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 62
Şekil 5.9 Geometri 3 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 63
Şekil 5.10 Geometri 4 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 63
Şekil 5.11 Geometri 5 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 63
Şekil 5.12 Geometri 6 için farklı torklarda ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri 64
Şekil 5.13 Aşırı sıkma torkundan dolayı delik çevresinde oluşan hasar 66
Şekil 5.14 Oluşan hasar örnekleri 69

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Uçaklarda kullanılan kompozit malzeme örnekleri 11
Tablo 2.2 Deniz araçlarında kullanılan kompozit malzeme örnekleri 12
Tablo 2.3 Spor araçlarında kullanılan kompozit malzeme örnekleri. 12
Tablo 2.4 Sağlık sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri.. 13
Tablo 2.5 Korozyon dayanımı amacıyla kullanılan kompozit malzeme örnekleri 13
Tablo 2.6 Ulaşım sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri 13
Tablo 2.7 Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri..... 14
Tablo 2.8 Müzik aletlerindekullanılan kompozit malzeme örnekleri 15
Tablo 2.9 Yapı sektöründekullanılan kompozit malzeme örnekleri.. 15
Tablo 2.10 Cam elyafı tiplerinin özellikleri 29
Tablo 2.11 PAN esaslı karbon liflerin özellikleri.. 31
Tablo 5.1 İlk hasarın meydana geldiği kuvvetler.. 64
Tablo 5.2 23°C sıcaklıkta yapışma boyları için ortalama kuvvetler.. 65
Tablo 5.3 Sıkma torkunun karma bağlantıya etkisi 67
Tablo 5.4 Yapıştırma boyunun karma bağlantıya etkisi 67
Tablo 5.5 Çeşitli tork değerlerinde yapıştırma boyunun ve E/W oranının karma bağlantıya etkisi..... 68
Tablo 5.6 30 mm yapıştırma boyu için cıvata sayısının karma bağlantıya etkisi 69
Tablo 5.7 40 mm yapıştırma boyu için cıvata sayısının karma bağlantıya etkisi 69

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Literatür Araştırması

Kompozit malzemeler, hayatımıza katmış olduğu kolaylıklar nedeniyle günümüzde sıklıkla tercih edilmekte olup, yakın gelecekte de popülaritesini korumaya devam edecek gibi gözükmektedirler. Sağlamış olduğu avantajlar nedeniyle, kompozit malzemeler üzerine yapılan akademik çalışmalar da azımsanmayacak seviyededir. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, mekanik özellikleri, bağlantı metotları, kullanım alanları gibi birçok konu, akademik camia tarafından dünya genelinde çalışılmaya devam etmektedir. Bizim çalışmamız ise kompozit malzemelerin bağlantı yöntemleri ile ilgili deneysel bir çalışma olduğu için, bu konular üzerinde duran çalışmalar incelenmiştir.

Alyanak ve Şen (2015) yapmış oldukları çalışmada, paralel çift pim uygulanmış ve yapıştırılmış karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü altında gerilme analizi konusunu incelemişlerdir. Üç boyutlu modelleme ve sonrasında yapılan gerilme analizleri için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Dolayısıyla gerilme analizi sonlu elemanlar metodu (FEM) ile gerçekleştirilmiştir. Karma bağlantıya etki ettirilen beş farklı değerdeki çekme yükleri tesiriyle, kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakası üzerinde oluşan gerilmeler ve dağılımları bulunmuştur. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları, karma bağlantı üzerindeki çekme gerilmelerinin değerleri ve dağılımlarının, etki ettirilen çekme yükü miktarının değişimine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir.

Kelly (2004) yapmış olduğu çalışmada, tekli bindirme ile hibrit (yapıştırılmış/ cıvatalanmış) bağlantılı kompozitlerdeki yük transferi konusunu incelemiştir. Farklı yük yollarının sertlik değerlerindeki farklılıktan dolayı, hibrit bağlantıları karmaşıklardır. Cıvata deliği etkisi ve lineer olmayan malzeme özelliği göz önüne alınarak yapılan 3-D sonlu eleman analizleri ile malzemenin yük dağılımları tahmin

edilebilir. Çalışmada bu yöntem uygulanmış ve devamında yapılan deneysel çalışma ile numerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Öğrenci (2012), yapmış olduğu çalışmada, mekanik olarak bağlanmış kompozitlerin dayanımını incelemiştir. Epoksi / cam elyafı kullanılarak üretilen malzemede farklı yoğunluktaki elyaf türleri kullanılmıştır. Numune genişliği (W) ve delik çap merkezinden serbest kenara olan uzaklık (E) parametre olarak belirlenmiştir. Her bir numune için yatak mukavemetleri ve hasar şekilleri tespit edilmiştir.

Pekbey (2007) yapmış olduğu çalışmada, pim bağlantılı tabakalı kompozit plakada ön gerilme momenti ile geometrik parametre değişiminin hasar analizine etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada, pim bağlantılı kompozit plakanın hasar yükü ve hasar modu deneysel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, ön gerilme momenti (M), plakanın bir kenarından delik merkezine olan mesafesinin delik çapına oranı (E/D) ve kompozit plaka genişliğinin delik çapına oranı (W/D) gibi parametrelerin, hasara olan etkileri incelenmiştir. Tüm numunelerde, E/D ve W/D oranlarına bağlı olarak yatak, kayma, net çeki ve bunların kombinasyonları olan hasar tipleri oluşmuştur. Ayrıca, ön gerilme momentinin, yatak mukavemetini arttırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Kaptı, Sayman, Özen ve Benli (2010) yapmış oldukları çalışmada, karbon/epoksi tabakalı kompozit plaka bağlantılarının, farklı koşullarda deneysel ve numerik analizi konusunu incelemişlerdir. Çalışmalarının amacı; önyükleme momentinin, nemin ve sıkı geçmenin yatak mukavemetine ve hasar moduna etkilerini incelemek olmuştur. Çalışmalarında farklı E/D ve W/D oranlarına sahip geometriler kullanmışlardır. Çalışmalarında ANSYS yazılımı kullanılarak elde ettikleri sonuçları, deneysel yöntem ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Aydın (2014) yapmış olduğu çalışmada, çevresel koşulların yapıştırılmış kompozitlerin mekanik performanslarına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada yapıştırma yöntemiyle birleştirilmiş sabit kalınlıktaki kompozit malzemelerin çeşitli

sıcaklık değerlerindeki mekanik performansları incelenmiştir. Sıcaklık etkisinin yanı sıra yapıştırma boyunun da yapıştırmalı bağlantılara etkisi incelenmiştir. Değişik boylarda yapıştırılan bağlantılara farklı sıcaklıklarda çekme deneyi uygulanmıştır ve sonuç olarak yapıştırma boyunun ve sıcaklığın, yapıştırma bağlantısının dayanımına yoğun etkisinin olduğu görülmüştür.

Arman (2013) yapmış olduğu çalışmada, cıvata bağlantılı tabakalı kompozit malzemelerde kullanılan rondela tipinin, yatak mukavemetine etkisini incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmada, düz rondela, yaylı rondela ve dişli rondela tipleri kullanılmıştır. Ayrıca her rondela tipi için dört farklı sıkma momenti ve yine dört farklı E/W oranı ile çalışılmıştır. Çalışmada, yatak mukavemetinin yanı sıra test sonucunda oluşan hasar tipleri de incelenmiştir.

Güllübahçe (2013), yapmış olduğu çalışmada çok cıvatalı kompozit bağlantıların çevresel aşınma altındaki performanslarını incelemiştir. Ayrıca çalışmada ön gerilme ve parça boyut etkileri de incelenmiştir. Yatak mukavemetinin E/D, W/D ve ön gerilmeye bağlı olarak değişimi ve yine aynı etkenler için hasar tipindeki değişim gözlenmiştir. Çevresel etkiler için ise atmosferik ortamın yanı sıra tuz sisi ortamında testler yapılmıştır.

Bois, Wargnier, Wahl ve Goff (2012) kompozit malzemelerde hibrit bağlantı (cıvatalınmış / yapıştırılmış) mukavemetinin analitik modeli üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, karmaşık olan sonlu elemanlar modeli ile analiz yerine, alternatif bir analitik model önerilmiştir.

Literatür detaylı olarak incelendiğinde, kompozit malzemelerin birleştirilmesi üzerine yapılmış birçok çalışma görülebilir. İncelemiş olduğum çalışmaların bazılarında bağlantı türüolarak sadece yapıştırıcı, bazılarında sadece cıvata ve bazılarında ise cıvatanın ve yapıştırmanın aynı anda kullanıldığı hibrit – karma bağlantı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılacak olan bağlantı tipi, yapıştırmayı ve cıvatalamayı birlikte içeren karma bağlantıdır. Literatürdeki örneklerde, sıkma torkunun artışı ile birlikte yatak mukavemetinin artışı gözlenmektedir. Literatürdeki

örneklerinden farklı olarak, bu çalışmada sıkma torku 15 Nm değerine kadar yükseltilmiştir.

Bunun yanı sıra, literatürde incelenen çalışmalarda, karma bağlantılı kompozit malzemeler ile ilgili genellikle numerik analiz ya da sonlu elemanlar metodu ile analiz yöntemleri uygulanmıştır. Bu çalışmada ise hibrit bağlantının incelenmesi için deneysel metot tercih edilmiştir, numerik ya da sonlu elemanlar metodu ile analiz yöntemine yer verilmemiştir.

Ayrıca, literatürdeki karma bağlantılı örnekler, genellikle tek cıvata / pim ya da paralel cıvata / pim bağlantısı içermektedir. Bu çalışmada ise tek, iki ve üç cıvata kullanılan farklı geometriler ile çalışılmıştır ve cıvata sayısının farkı da gözlemlenmeye çalışan etkilerden biridir.

Önceki çalışmalarda E/D, W/D ya da E/W geometrik parametreler kullanılarak çalışılmıştır. Bu çalışmada da E/W parametresi dikkate alınarak çalışma yapılmıştır. Delik çapı (D) ve numune genişliği (W) sabit tutulmuş, deliğin serbest kenara olan uzaklığı (E) ise farklı değerlerde olacak şekilde testler alınmıştır.

Literatürde, bağlantı türü olarak sadece yapıştırmayı kullanan çalışmalar mevcuttur ve bu çalışmalarda yapıştırma boyu parametre olarak alınmıştır, fakat karma bağlantılı çalışmalar ile ilgili literatürde yapıştırma boyunun etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada yapıştırma boyunun etkisi de incelenmektedir.

BÖLÜM İKİ
KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzemeleri tanımlamak için öncelikle kompozit ve malzeme kelimelerinin tanımını bilmemiz gerekir. Kompozit kelimesi için, Türk Dil Kurumu'nun Büyük Türkçe Sözlüğü' ne baktığımız zaman kelimenin Fransızca kökenli olduğunu ve "1. (Sf.) Karma. 2.(Mim.) Değişik tarzları bir arada taşıyan." anlamlarını görürüz.

Kelimeyi etimolojik olarak incelediğimizde kökünün Latincede "oturtmak, koymak, bulunmak" (toplace, position) anlamına gelen "Ponere" kelimesinin; önüne geldiği kelimeye birliktelik anlamı ekleyen "Co-" ön ekini alması ile "Componere" kelimesinden geldiğini görürüz. Etimolojik sözlükten günümüze çevirdiğimizde "Birlikte Bulunan" gibi bir anlamının olduğunu söyleyebiliriz.Yani sözlüklerden anladığımız şekliyle "Kompozit" kelimesi "birlikte bulunma", "karma olma" gibi kavramları içeren bir kelimedir.

Malzeme kelimesine Türk Dil Kurumu'nun "Büyük Türkçe Sözlüğü" ne baktığımızda ise kelimenin Arapça kökenli olduğunu ve "Gereç" anlamını görmekteyiz.

Kelimeyi etimolojik olarak incelediğimizde Arapça "l-z-m" kökünden "lazım" kelimesi, "ma-" ön ekini alarak mef'ul hale getirmiş "lazım olan" anlamına gelmektedir.

Elimizdeki gerecin tek başına yeterli olmadığı durumlarda ise, yani diğer bir deyişle elimizdeki gereç tek başına "lazım olduğu duruma malzeme olamadığı için" alternatif durumlar devreye girmiş ve birden fazla gerecin "birlikte bulunduğu" "karıştırıldığı" yeni bir "gereç", "malzeme" durumu ortaya çıkmıştır. "Kompozit

Malzeme" birden fazla malzemenin birlikte bulunduğu bir malzeme türü olarak tanımlanabilir.

Bu demek ki, "Kompozit Malzeme" en az iki tip malzeme bulunmalıdır ve bu malzemelerin fiziksel özellikleri birbirinden farklı olmalıdır. Sonuç olarak ortaya çıkan " Kompozit Malzeme" ise bu iki malzemenin de fiziksel özelliklerinden farklı fiziksel özelliklere sahip olmalıdır.

Birlikte bulunan malzemelerden biri daima daha mekanik olarak taşıyıcı özelliklere sahip olurken diğer malzemenin bir arada tutma ve destekleme özellikleri her zaman daha fazladır. Böylece farklı iki fiziksel özellikli malzeme bir arada olarak tamamen farklı fiziksel özelliklere sahip yeni bir malzeme davranışı gösterirler.

Önceki paragraflarda yapılmış olan tanımlar teknik tanım olmaktan ziyade etimolojik tanımlar ve çıkarımlardır. Pek tabii ki bizim için esas önemli tanım, mekanik bilimi için bir terim olan kompozit malzeme teriminin tanımıdır.

"Kompozit malzeme; birbiri içerisinde çözünemeyen ve makroskobik seviyede birleşmiş iki ya da daha fazla bileşeni olan yapısal malzemedir. Takviye adı verilen faz, matris fazının içine yerleştirilmiştir. Takviye fazı elyaf veya parçacıklar şeklinde olurken matris fazı genellikle kesiksiz – süreklidir. Örneğin çelik takviyeli beton ve grafit takviyeli epoksi gibi " (Kaw, 2006).

"Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilerek; bu malzemelerin ayrı ayrı özelliklerinden daha iyi performans gösteren malzemedir. Metal alaşımlarının aksine, her malzeme kendi fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini muhafaza eder. İki bileşen takviye ve matris bileşenleridir" (Campbell, 2010).

Autor ve Campbell'in de tanımlarına baktığımızda, önceki çıkarımlarımızın haksız olmadığını söyleyebiliriz. Fakat teknik olarak incelediğimizde dikkatten kaçırmamız gereken nokta, birleşmenin belli şartlarının olduğudur. Bu şartlar ise

birleşmeye katılan bileşenlerin, birleşme durumunda da yani kompozit malzeme halinde de kendi fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini korumaya devam ettikleri, birleşmenin alaşımdan farklı olarak makroskobik seviyede olması ve bileşenlerin birbiri içinde çözünmemesi lazım gelmektedir.

Özetlersek, kompozit malzeme iki ya da daha fazla malzemenin makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan yeni malzemedir.Alaşımın aksine kompozit malzemeyi oluşturan malzemeler birbiri içinde çözünemezler.Bileşenler arasında atom alışverişi bulunmaz, kimyasal bir etkileşim olamaz. Her malzeme kendi fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini korur.

Bileşenler takviye ve matris olarak ikiye ayrılır. Matris kompozitin sürekli fazı iken, takviye matrisin içince fiber ya da partikül olarak bulunan fazdır.

2.2 Kompozit Malzemenin Tarihi

İlk insanların hayatlarını kolaylaştırmak için kullandıkları aletleri yaptıkları malzemeler, genellikle çok kolay erişebildikleri taş, toprak, saman, ot gibi malzemelerdi. Metaller, kompozit malzemelerden daha önce tarih sahnesinde yer almış olsalar dahi (altın M.Ö 6000, bakır M.Ö 4200, gümüş M.Ö 4000, kurşun M.Ö 3500) metal cevherinin nadir bulunmasının yanı sıra; madenden çıkarılması, işlenmesi ve alet haline getirilmesi çok zahmetli bir işti. Çok daha zor ulaşılan ve işlenen metaller tarih sahnesinde bu nedenle genelde süs eşyası yahut törenlerde kullanılan değerli eşyalar olarak görülmektedir.

Hayatını idame ettirmek zorunda olan insanoğlu çevresindeki malzemelerden maksimum düzeyde faydalanmanın yolunu aramıştır ve bu arayış “Kompozit Malzeme” sınıfının oluşmasına önayak olmuştur. Samanın etrafını çamur ile kaplayıp kurutması, taş ile ağaç parçalarını birleştirerek en uygun silah – av aracını araması kompozit malzemeler ile ilgili yaptığı çalışmalardır.

Kompozit malzemeler tarih boyunca kullanılagelmiş malzemelerdir. Kompozitlerin ilk uygulamalarını M.Ö. 3400 civarında, ince ağaç katmanlarını farklı açılarda yapıştırarak kontrplak elde eden eski Mezopotamya medeniyetinde görmekteyiz.

M.Ö. 2181-2055 yıllarında Mısırda ölüleri için yaptıkları "Cartonnage" denilen maskelerde sıva ile sıvanmış bez veya papirüs malzemeleri kullanılmıştır.

Yine M.Ö. 1500 yıllarında Mezopotamya ve Mısırda saman ile takviye edilmiş çamur ile tuğla, saksı, tekne gibi eşyalar yapıldığı bilinmektedir.

M.Ö. 25 yılında yazıldığı düşünülen Vitruvius'un "Mimarlık Üzerine 10 Kitap" adlı eserinde harç ve kireçten bahsedilirken yine kitapta bahsedilen çimentonun özelliklerinin bugünkü portland çimentosundan bazı yönlerce üstün olduğu bilinmektedir.

Milattan sonra 1200lü yıllara gelindiğinde, savaş sanatında üstün olan Türklerin icat ettikleri kendilerine has Türk Yaylarını kullandıklarını görüyoruz. Doğal çam reçinesi ile birleştirilen bambu, kemik, sığır tendonu, boynuz, ipek gibi malzemeler kullanarak yaptıkları bu yaylar son derece küçük ve sağlam oldukları gibi hatasız olarak da çalışıyorlardı. 14.yy da ateşli silahlar icat edilene kadar, dünya üzerinde en korkulan silahlar olarak bu Türk yayları görülüyordu.

1870 – 1890 yılları arasında kimya alanında adeta bir devrim yaşandı. Bu tarihlere kadar kullanılan doğal reçinelerin yanına artık polimerizasyon ile üretilen yeni sentetik reçineler eklenmeye başladı. İlk uygulamaları selüloit, melamin ve bakalittir.

1900'lü yılların başında ise artık vinil, polistren, polyester gibi sentetik reçineler geliştirildi.

1930'lar muhtemelen kompozit teknolojisi için en önemli yıllardı. 1935 yılında "OwensCorning" firması, fiber takviyeli polimer olan fiberglası duyurdu. 1936'da

doymamış polyester reçineler patentlendi. 1938 yılında ise yüksek performanslı bir reçine olan epoksi bulunmuştur.

1940'lı yıllar ise 2. Dünya Savaşı nedeniyle kompozit teknolojisinin teorikten pratiğe geçtiği yıllardır. Hafif olmasına rağmen yüksek mukavemet sağlayan kompozit malzemeler savunma sanayiinde o yıllarda kullanılmaya başlamıştır. 1947 yılında, gövdesi tamamen kompozit malzemeden yapılmış bir otomobil yapılmış ve test edilmiştir. Bu araba oldukça başarılı olarak 1953 Corvette model otomobilin gelişmesine yol açmıştır. Bu süreçte farklı üretim metotları gelişmeye başlamıştır ve SMC kalıplama, BMC kalıplama gibi metotlar otomotiv ve diğer üretim sistemlerine entegre olmaya başlamıştır.



Şekil 2.1 Kompozit malzeme ile üretilen "Corvette" model otomobil parçaları.

1950'lerin başında, pultrüzyon, vakum döküm ve filament sarma gibi üretim metotları da kullanılmaya başlamıştır. Filament sarma üretim yöntemi, 1960 ve sonrasında devam edecek uzay keşfi çalışmalarına, büyük ölçekli roket motorlarının imalatını sağlayarak yol açmıştır.

1961 yılında "karbon fiber" bulunarak patentlendi fakat ticari hayata geçerek kullanılması birkaç yıl aldı. Karbon fiberin bulunması ile birlikte parça ağırlığına

oranla rijitlik değerleri oldukça düzeldi, bu da kompozit malzemelere havacılık, otomotiv, spor malzemeleri ve tüketim ürünleri gibi geniş yelpazeli bir kullanım alanı açtı.

1960'ların sonundan günümüze ultra yüksek moleküler ağırlıklı fiber malzemelerden, yüksek ısı dayanımlı reçinelere, nano ölçüde üretilen ve şekillendirilen nano kompozit tüplere kadar birçok gelişme kat etmiş ve gelişmeye de hızla devam etmektedir.

2.3 Kompozit Malzemenin Kullanım Alanları

Önceki konularda bahsettiğimiz üzere kompozit malzemeler özellikle 1900'lü yıllar ile birlikte hızlı bir gelişim göstermiş ve günümüze geldiğimizde aşağıda sıralamış olduğum pek çok ticari alanda kullanılır duruma gelmişlerdir. Özellikle havacılık ve savunma sanayi için olmazsa olmaz olan kompozit malzemeler artık bu sektörlerin dışında pek çok farklı sektörde yaygın ve etkin konumdadır.

2.3.1 Havacılık Sanayi

Havacılık alanında genellikle ileri kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Polimer esaslı kompozitlerin sağlamış olduğu hafifliğe rağmen yüksek mukavemet nedeniyle haça araçlarının sadece içinde değil, yapılsak parçalarında da kompozit malzemeler olmaz ise olmaz malzemelerdir.

Hava araçlarının ağırlık, sürat, ömür, emniyet gibi birçok tasarım kriteri vardır. Bu tasarım kriterlerini ve maliyet durumunu göz önüne aldığımız ve optimal bir sonuca gitmeye çalıştığımızda kompozit malzemelerin yüksek avantajı ortaya çıkmaktadır.

F-16'larda, yatay ve dikey dengeleyicilerin yanı sıra kontrol yüzeyleri; karbonepoksi, F/A-18 uçaklarında kanat yüzeyleri, yatay ve dikey dengeleyiciler, hız frenleri ve kontrol yüzeyleri, AV-8B uçaklarında; kanatlar, yatay dengeleyiciler, ön

gövde ve kontrol yüzeyleri karbon-epoksi olarak yapılmıştır. Boeing 757 ve 767'lerde; kontrol yüzeyleri karbon-epoksi motor kaportaları karbon/aramid-epoksidir.

Tablo 2.1 Uçaklarda kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Uçak	**Kullanıldığı Yer**	**Malzeme**
B2 Bombardıman	Gövde panelleri	Karbon fiber + epoksi
Airbus A380	Kanat panelleri ve flapler	Karbon fiber + epoksi
	Dikey stabilizer	Aramid fiber + epoksi
	Burun bölümü	Cam elyaf takviyeli polyester (CTP)
Airbus A320	Kanat, spayler, eleronlar, kuyruk takımı, silindirik motor kılıfları	Karbon takviyeli kompozit
Airbus A300/600	Zemin plakası	Karbon takviyeli polietermid
F14	Yatay stabilizer	Bor – epoksi kompozit
F15	Yatay ve dikey stabilizer	Bor – epoksi kompozit
F16	Kontrol yüzeyleri	Karbon fiber + epoksi
F/A - 18	Kanat yüzeyleri, yatay ve dikey stabilizer, hız frenleri, kontrol yüzeyleri	Karbon fiber + epoksi
AV-8B	Kanatlar, yatay stebilizerler,ön gövde ve kontrol yüzeyleri	Karbon fiber + epoksi
Boeing 757 ve 767	Kontrol yüzeyleri	Karbon fiber + Epoksi
	Motor kaportaları	Karbon / aramid + epoksi

2.3.2 Denizcilik Sanayi

Kompozit malzemeler ile hafiflik ve mukavemetin yanı sıra doğru malzeme bileşenleri ile yüksek korozyon direnci de elde edilebilir. Özellikle yarış kayıkları

veya kanolar bunun iyi bir örneğidir. Kanonun yapı malzemesi, epoksi reçinesi içine aramid ve karbon fiber takviye edilmiş kompozittir. Epoksi reçine yüksek korozyon direncini oluşumunu sağlarken, aramid veya karbon lifler gövdenin yüksek mukavemetini sağlarlar.

Tablo 2.2 Deniz araçlarında kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Deniz aracı	Malzeme
Yelkenli gövdesi	CTP, balsa ve polümer köpük üstüne cam, aramid karbon dokumaları ile kaplanması
Merdiven basamakları	CTP
Yelken direği	Aramid + epoksi

2.3.3 Spor Araçları

Kompozit malzemelerin kullanımının gittikçe arttığı alanlardan biri de spor araçlarıdır. Kompozit malzemelerin gelişmesi ile beraber daha hafif ve güçlü spor araçları yapılabilir hale gelmiştir. Özellikle cam ve karbon elyaflı takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Dağ bisikleti, tenis raketi, golf sopası, kayak gibi spor aletlerini düşündüğümüz zaman; bu araçların ağırlığının, dayanımının, korozyon direncinin profesyonel sporcular için ne kadar önemli olduğunu tahmin edebiliriz.

Tablo 2.3 Spor araçlarında kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Spor Aracı	Malzeme
Su kayağı	Termoplastikprepreg
Kar kayağı	Karbon sarılmış ahşap, aramidcam elyafı karışımı + epoksi
Su kaydırağı	CTP
Sörf tahtaları	CTP
Bisiklet	Karbon + poliamid
Spor ayakkabı	Termoplastikpoliüretan (Honeycomb)
Golf sopası	Karbon fiber + epoksi
Tenis raketi	Aramid + epoksi
Zıpkın gövdesi	Karbon fiber + epoksi

2.3.4 Sağlık Sektörü Ürünleri

Tablo 2.4 Sağlık sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Araç	**Malzeme**
Tekerlekli sandalye	CTP veya karbon fiber takviyeli polyester
Tıbbi tetkik cihazları dış muhafazaları	CTP

2.3.5 Korozyona Dayanıklı Ürünler

Tablo 2.5 Korozyon dayanımı amacıyla kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Ürün	**Malzeme**
Su tankı	CTP
Mazgal olukları	CTP
Yeraltı boruları	CTP
İlan panoları	CTP
Çit	CTP

2.3.6 Ulaşım Sektöründe Kullanılan Ürünler

Tablo 2.6 Ulaşım sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Ürün	**Malzeme**
Traktör kaportası	SCM (Hazır kalıplama pestili)
Kabin	
Toplu taşıma araçları oturma yeri	
İlan panoları	CTP
Konteynır tabanı	GMT (Preslenebilir takviyeli kompozit)
Otobüs havalandırma kanalı, bagaj parçaları, gösterge paneli	CTP
Golf arabaları tavan ve kaporta	CTP

2.3.7 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Ürünler

Otomobil sektöründeki ciddi rekabet otomotiv firmalarını sürekli daha az yakıt tüketen, daha çabuk hızlanan ürünler üretmeye zorlamaktadır. Bunun da birincil yolu otomobilin ağırlığını düşürmekten geçer. Otomobilin gerektirdiği güvenlik şartlarını sağlamaya devam ederek otomobilin ağırlığını düşürmenin yolu da kompozit malzemelerden geçer.

Tablo 2.7 Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Ürün	**Malzeme**
Cam sileceği	%30 Cam + PBT (Polibütilentereftalat)
Filtre kutusu (Mercedes)	%35 Cam + poliamid 66
Pedallar	%40 Cam + poliamid 6
Otomobil gösterge paneli	GMT
Otomobil spoiler	CTP
Otomobil yan gövde iskeleti (Ford)	CTP
Otomobil kaporta (Corvette)	SMC, CTP

Formula 1 yarışlarında kullanılan araçlara baktığımızda ise, özel şartlardan ötürü daha özel düzenlemeler görülür. Araç için ağırlık, çok dikkatle tasarlanması gereken çok önemli bir kriterdir. Yarışlarda başarıyı yakalamak için sğlamlıktan ve güvenlikten ödün vermeden en hafif tasarımı yapmak gereklidir. Daha önceleri yarış arabalarında hafif bir metal olan alüminyum kullanılmaktaydı fakat kompozit malzemelerin kullanılması ile beraber daha düşük ağırlıklarla daha yüksek dayanım elde edilmeye başlanmıştır. Ayrıca karmaşık parçaların kompozit malzemelerle üretilebilmesiyle F1 otomobillerin üretiminde gerekli parça sayısı azaltılabilmektedir. Ayrıca bağlantı elemanları olarak cıvata, perçin gibi ağırlığı yüksek metaller kullanmak yerine, epoksi ile yapıştırılarak montaj yapılabilmektedir.

2.3.8 Müzik Aletleri

Tablo 2.8 Müzik aletlerinde kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Ürün	Malzeme
Keman	Karbon fiber + epoksi
Gitar	Karbon lamine tabakalar arası polimer köpük
Akustik gitar	Grafit + epoksi
Çello	Karbon + epoksi

2.3.9 Yapı Sektörü

Tablo 2.9 Yapı sektöründe kullanılan kompozit malzeme örnekleri (Arıcasoy, 2006)

Ürün	Malzeme
Köprü Tabanı	CTP
Bina Balkon Korkuluğu	CTP
Kapı	CTP
Küvet - Lavabo	CTP

Yukarıda saydığımız sektörlerin dışında birçok sektörde ve bu sektörlerin içinde verdiğimiz örneklerin dışında da birçok üründe kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin çeşitliliğinden dolayı sınıflandırmaları da oldukça zordur. Bu çalışmada genel olarak kompozit malzemeleri iki ana yönüne bakarak sınıflandıracağız. Bunlar kompozit malzemeyi oluşturan ögeler olan matris malzemelerine göre sınıflandırma ve takviye malzemelerine göre sınıflandırma şeklinde olacaktır.

2.4.1 Matris Malzemelerine Göre Sınıflandırma

Kompozit malzemeleri tanımlarken, bileşeninde farklı malzemelerin olduğunu belirtmiştik. Bu nedenle martis malzemesi de farklı bir malzeme türünde olacaktır. Kompozit malzemenin avantajlarından biri, neredeyse her malzeme ile kullanılabilmesidir. Doğada bilinen tüm malzemeler; metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve yarı iletkenler başlıklarında sınıflandırılır. Kompozit malzemelerin matris malzemeleri ise metal, seramik veya polimer malzemeden olabilmektedir.

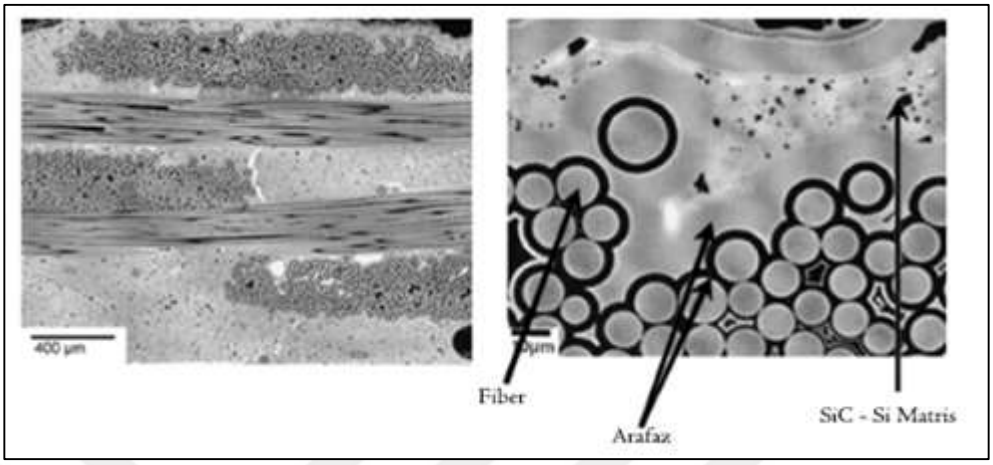
2.4.1.1 Metal Matris Kompozit Malzemeler

Adından da anlaşılacağı üzere, matris malzemesi metal olan kompozit malzemelerdir. Genellikle Alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır ve alaşımları metal matris malzemesi olarak kullanılır. Takviye malzemesinin geometrisi partikül, kırpık fiber ya da sürekli fiber şeklinde olabilir. Takviye malzemeleri çok çeşitli olmakla birlikte metal matris kompozitlerde en çok kullanılan takviye malzemeleri Alümina (Al2O3), Silisyum Karbür (SiC), Bor, Titanyum Karbür (TiC) ve Karbondur. Toz metalürjisi, difüzyon bağı, sıvı metal infiltrasyon, sıkıştırma döküm, sıvı metal karıştırma, plazma püskürtme gibi yöntemler ile üretilirler. En yaygın, kolay ve ucuz üretim yöntemi ise döküm yöntemidir.

2.4.1.2 Seramik Matris Kompozit Malzemeler

Matris malzemesi seramik olan kompozit malzemelerdir. Seramik malzemeler denince aklımıza daha çok sıcaklığa ve korozyona karşı yüksek dirençleri gelmektedir. Ayrıca yoğunlukları düşük oldukları için hafiftirler. Bunun yanı sıra yüksek sertliğe ve kırılganlığa sahiptirler. Seramik matrisli kompozit malzemeler de daha çok yüksek sıcaklık dayanımına yahut yüksek korozyon direncine ihtiyaç olan uygulamalarda kullanılırlar. Seramik matris olarak kompozit malzemelerde genellikle alümina, silisyum karbür, silikon nitrit (Si3N4) ve Bor Karbür (B4C) sıklıkla kullanılır. Takviye elemanı olarak ise genellikle Al2O3 ve SiC seramik

malzemeler fiber formuna getirilerek kullanılabilir. Takviye malzemesi sürekli fiberler, süreksiz fiberler ve partükül halinde olabilir.



Şekil 2.2 Seramik matrisli kompozit malzeme görüntüsü (Corman, Brun ve Luthra, 1999)

Seramik kompozit malzemeler, yüksek darbe dirençlerine, yüksek sıcaklıklara, elektriksel ve termal dirençleri gibi özellikleri nedeniyle uzay teknolojilerinde, yüksek teknolojili zırhların yapımında ve bunun gibi yüksek teknolojik ürünlerde tercih edilirler.

2.4.1.3 Polimer Matris Kompozit Malzemeler

Matris malzemesi polimer olan kompozit türüdür. Bu araştırmadaki deneysel çalışmalar da polimer matrisli kompozit malzeme üzerine olacağı için, bu tip kompozit malzemelere diğer türlere göre daha fazla değinilecektir. Kompozit malzeme tanımı çok geniş olmak ile beraber günümüzde kompozit malzeme denildiği zaman akla ilk olarak polimer matrisli kompozit malzemeler gelmektedir. Kullanım alanı çok geniştir. Takviye lifleri olarak genellikle cam, karbon, aramid, boron gibi lifler kullanılırken matris malzemesi olarak polyester, epoksi gibi polimerler çokça kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin içermiş olduğu polimer ve takviye malzemelerine ilerideki başlıklarda detaylıca yer verilecektir.

2.4.2 Takviye Malzemelerinin Geometrisine Göre Sınıflandırma

Çok farklı şekil ve geometrilerde kompozit malzemeler oluşturulabilmek ile beraber, kompozit malzemeleri takviye elemanlarının şekilsel durumlarına göre;

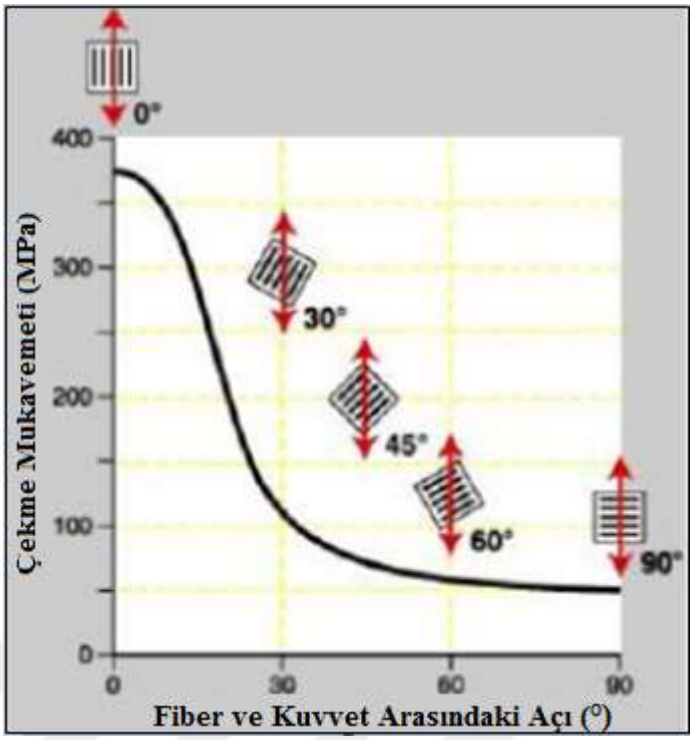
- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma (Hibrit) Kompozitler

olarak dört ana gruba ayırabiliriz.

2.4.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

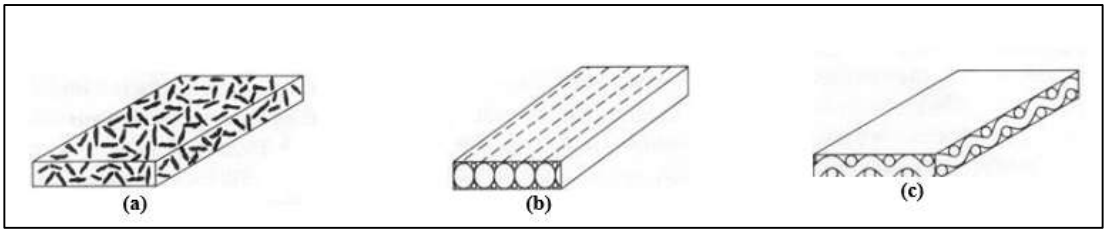
Elyaf takviyeli kompozitler olarak sınıflandırdığımız malzeme içindeki takviye malzemesi elyaf şeklinde olur ve uygun bir matris malzemesi ile birlikte bulunur. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf liflerinin uzunluğu, bulundukları doğrultu ve yerleşimleri, malzemenin mekanik özelliklerini son derece etkilemektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, kuvveti elyafların doğrultusunda taşımaya uygundurlar, yani elyaf doğrultusundaki mukavemetleri daha yüksektir. Bu nedenle malzeme istenilen yönde mukavemet sağlayacak şekilde üretilebilmektedir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde fiberler çeşitli geometrilerde kompozit malzemenin içinde bulunabilirler. Fiber takviyesinin etkisini belirleyen en önemli iki unsur, fiberlerin uzunluğu ve fiberlerin yönlendiği doğrultudur.



Şekil 2.3 Fiber açısı – mukavemet arasındaki ilişki

Lifler uzun ve sürekli olabilecekleri gibi, kısa kısa kesilmiş yahut örülmüş şekilde de takviye edilebilirler. Liflerin uzun ve sürekli olduğu durumda lifler kendi doğrultularınca yük taşırlarken, örgü halinde bulunan elyaflarda lifler birden fazla doğrultada (örgünün biçimine göre) bulundukları için, kompozit malzeme birden fazla doğrultuda yüksek mukavemet gösterecektir. Kısa liflerde ise (whisker) mukavemet tek bir yönde değil malzemenin her yönünde yakın değer gösterir (izotropi) fakat bu değer uzun lifli kompozit malzemelere göre daha düşük bir mukavemet değeri olacaktır. Unutmamak gerekir ki elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yükü ileten faz matris değil takviye yani fiber içeren fazdır ve fiberlerin kırpılmış olması yükün tamamen fiberler üzerinden taşınmasını engeller.

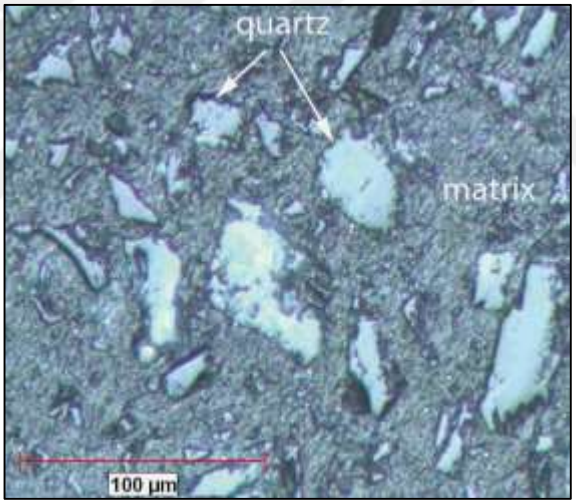


Şekil 2.4 Kısa fiber (a), uzun fiber (b) ve örgü fiber (c) takviyeli kompozit örnekleri

Cam ve karbon en çok bilinen ve kullanılan elyaf türleri olsa da boron, alüminyum oksit, silisyum karbür, aramid gibi elyaf takviye malzemeleri vardır.

2.4.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

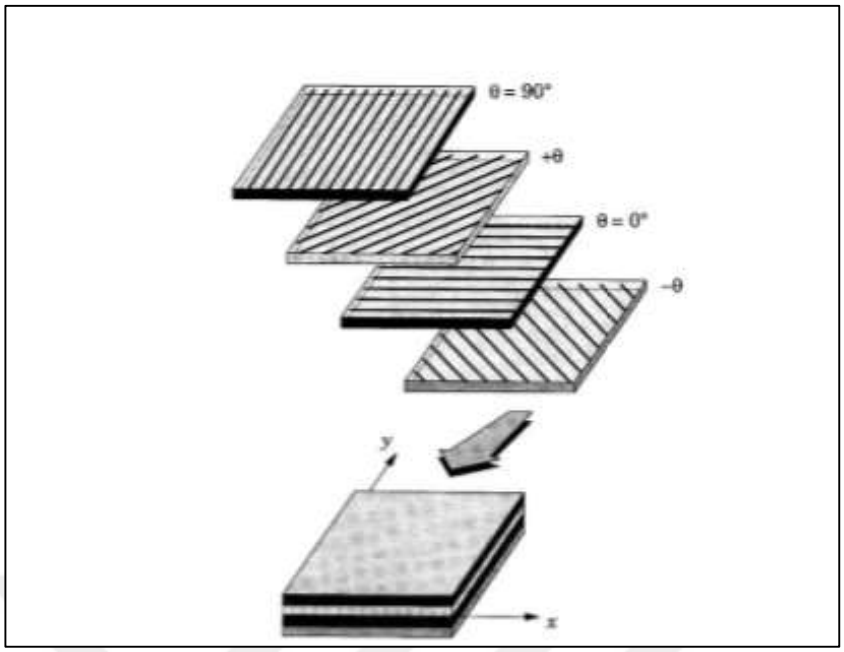
Takviye fazının, matrisin içinde partikül olarak bulunduğu malzemelerdir. Yani takviye, elyaf takviyesi gibi sürekli ya da kesik fiberler gibi değil, tanecikli partiküller şeklinde matris fazın içinde dağılır. İzotropik yapıdadırlar, tüm yönlerde aynı malzeme davranışlarını gösterirler. Bu tip kompozitlerin çoğunda, takviye fazı matris fazından daha serttir ve genellikle matris fazının hareketini engelleme eğilimindedir. Yani yapının mukavemetini, parçacıkların sertliği belirler. Partikül boyutu nanometre seviyesinde ise, bu tip kompozitlere "nanokompozitler" denir.



Şekil 2.5 Parçacık takviyeli kompozit malzeme içyapısı (Ateş ve Aztekin, 2011)

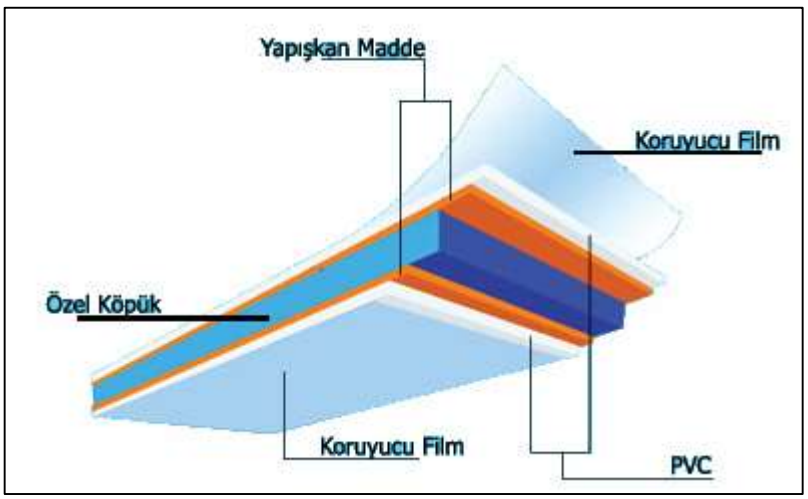
2.4.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit malzeme türüdür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip farklı plakaların bir araya gelerek oluşturduğu yapısal bir kompozit malzeme türüdür. Farklı tabakalarda farklı elyaf yönlenmeleri olduğu için, her yönde yüksek mukavemet elde edilir.



Şekil 2.6 Tabakalı kompozit malzeme (Şahin, 2008)

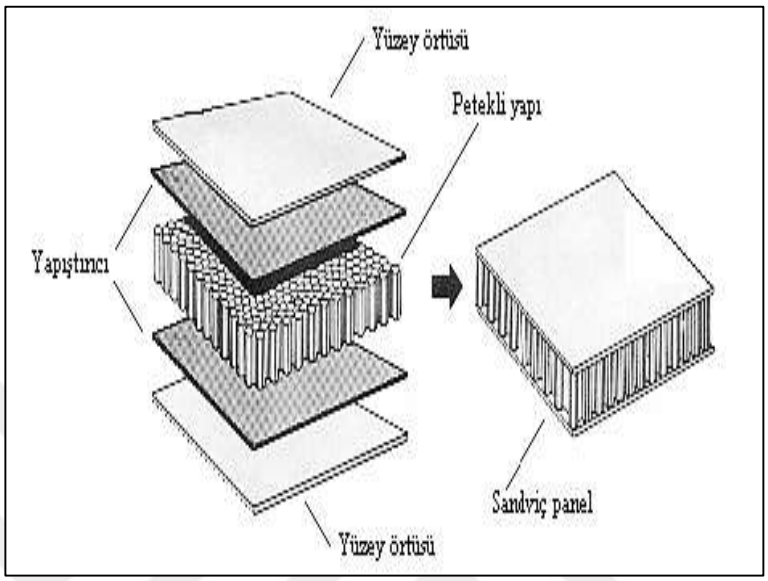
Tabaklı kompozit malzemeler sınıfında olan ve çokça uygulanan bir diğer kompozit malzeme türü de "sandviç paneller" dir. İki tabaka arasına farklı formdaki farklı bir malzemenin yerleştirilmesi ile elde edilen yapılara bu isim verilir.



Şekil 2.7 Bina dış cephelerinde kullanılan sandviç panel örneği

Sandviç paneller grubunda olup uygulamalarını oldukça sık gördüğümüz bir kompozit türü de "Bal peteği" (Honeycomb) yapıdır. Bu yapı içerisinde bal peteği şeklinde bir plaka bulunur. Petekli kompozit yapılar, özellikle çarpma sonucu ortaya çıkan enerjinin absorbe edildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren

konstrüksiyonlarda kullanılır. Hafif ve dayanıklı malzemeler elde etmek için bu form sıklıkla kullanılır. Bu form sayesinde malzemenin atalet momenti ve eğilme dayanımı yükselir.



Şekil 2.8 Bal peteği yapılı sandviç panel örneği

2.4.2.4 Karma (Hibrit) Kompozit Malzemeler

Aynı kompozit yapı içinde birden fazla elyaf malzemesi bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere karma (hibrit) kompozit malzeme denir.Özellikle yeni kompozit yapıların geliştirilmesine uygun bir türdür.

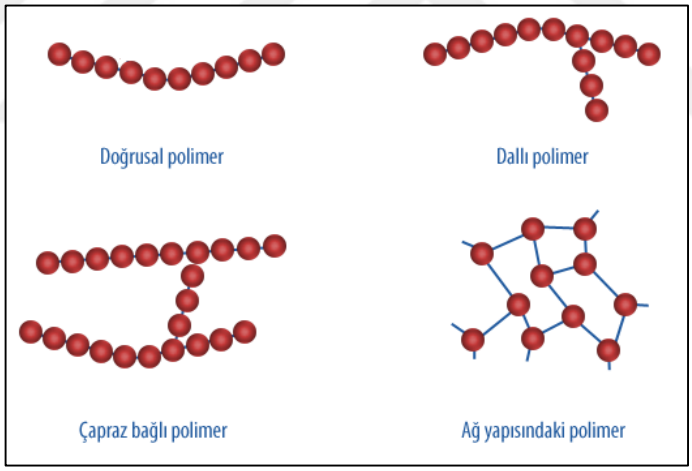
Örneğin kevlar ucuz ve tok bir elyaftır fakat basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın birlikte kullanıldığı kompozit malzemede istenilen özelliklere sahip optimum bir malzeme geliştirilebilir. Diğer bir örnek olarak karbon ve cam elyafı takviyeli polimerik reçinedir. Daha güçlü ve daha tok olan cam-karbon hibritler, daha yüksek bir darbe mukavemetine sahiptir. Tamamen karbon veya tamamen cam takviyeli plastiklere göre daha düşük bir maliyetle üretilebilir.

2.5 Polimer Matrisli – Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeleri Oluşturan Bileşenler

Bu çalışmada üzerinde çalışan malzeme polimer matrisli, elyaf takviyeli bir kompozit malzeme olduğu için bu tip malzeme üzerinde daha çok durulacaktır. Bu bölümde polimer matris ve elyaf türlerinden ve özelliklerinden bahsedilecektir.

2.5.1 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Başlıca Polimer Türleri

Polimer sözcüğü, eski Yunancada çok anlamına gelen "poli" ve "parça" anlamına gelen meros kelimelerinden türetilmiştir. "Monomer" denilen küçük moleküllerin birbirlerine tekrarlar halinde eklenmesiyle oluşan çok uzun zincirli moleküllerdir. Aynı momomerlerden ve ya farlı birden fazla momoner tekrarlanarak bu polimer zincirlerini oluşturabilir.



Şekil 2.9 Polimer zinciri örnekleri

Monomerlerin belli koşullarda (ısı ve basınç altında) birleşerek polimerleri oluşturmasına ise "polimerleşme" reaksiyonu adı verilir.

Polimerleri birden fazla özelliklerine göre sınıflandırabiliriz. Yapılarındaki kimyasal bağa bağlı olarak polimerleri sınıflandıracak olursak polimerleri üç ayıralbiliriz. Bunlar;termoplastikler, termosetler ve elastomerlerdir.

2.5.1.1 Termoplastikler

Oda sıcaklığında katı halde olmalarına rağmen rahatlıkla ısıtılıp, akıcı hale getirip özelliklerinde bozulma olmadan soğutularak yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Bu özellikleri sayesinde kolayca ve ekonomik olarak ürün haline getirilebilirler. Ayrıca bu özellikleri sayesinde geri dönüşüm açısından çok avantajlı malzemelerdir, tekrar tekrar ısıtılıp şekil değiştirilip kullanılabilirler. Zincir içinde kovalent, zincirler arası van der Waals bağları vardır.

Sayıca çok fazla termoplastik malzeme olmasına rağmen kompozit malzemelerde matris fazı olarak kullanılan termoplastiklerin sayısı sınırlıdır. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastiklerintermosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır. Devamlı kullanım sıcaklıkları 60 °C ile 245 °C arasında değişebilen termoplastik reçine çeşitleri bulunmaktadır.

Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geridönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler.

En yoğun çalışmalar PA, PBT/PET ve PP gibi düşük sıcaklıklarda kullanılan polimerlerin üzerine yapılmıştır. Tüm bu polimerlerin haricinde ABS, SAN, SMA (StirenMaleikAnhidrit), PSU (polisülfon), PPE (polifenilen eter) matris olarak kullanılır. Termoplastik reçineler malzemenin çekme ve eğilme dayanımlarının

artırılması için kullanılırlar. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan termoplastikler uçak sanayisinde de yüksek performanslı malzeme çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Çoğunlukla enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yöntemleri ile üretilen termoplastiklerin üretiminde GMT (Glass Mat ReinforcedThermoplastics / Preslenebilir Takviyeli Termoplastik) olarak ta üretilmektedir (Bkz. kompozit malzeme üretim yöntemleri). Bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler soğuk plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe tercih edilmektedir.

2.5.1.2 Termoset Plastikler

Zincir molekülleri arasında bulundurdukları çapraz bağlar aracılığıyla üç boyutlu bir yapı oluşturarak, mekanik etki ve yüklemelere daha rijitleşirler. Rijitleşmeleri, elastik modülü ve dayanımlarının diğer polimer çeşitlerine (termoplastik ve elastomerler) göre daha yüksek olmasını sağlar. Termoplastiklerde olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda ikincil bağların (Van der Waals bağları) zayıflaması veya kopması sonucu zincirlerin kayma-dönme hareketlerinden ötürü oluşan elastik-plastik deformasyonlar, termosetlerde görülmez. Çünkü Van der Waals bağlarının yerine çapraz bağların getirmiş olduğu rijitlik sebebiyle, geleneksel termosetlerin plastik şekil değiştirme kabiliyetleri diğer polimerlere göre yok denecek kadar azdır, yani gevrektirler. Gevrek olmaları, bir anlamda kırılma tokluklarının da göreceli olarak düşük olmasının bir sebebidir. Yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korurlar, ısıl stabiliteleri yüksektir. Buna rağmen erimezler, viskoz davranış göstermezler. Eğer çapraz bağların deforme olabilmesine imkan verebilecek şekilde bir ısı artışı olursa, direk olarak yanmaya başlarlar. Bu özellikleri sebebiyle geri dönüşümleri mümkün değildir.

Çekme eğrilerine bakıldığında homojen elastik deformasyon sonucu akma sınırını hemen geçtiklerinde koptukları, kırıldıkları görülür. Bu da plastik deformasyon kabiliyetlerinin ne kadar düşük olduğuna işaret eden güzel bir kanıttır. Termoset polimerler, yalnızca polimerleşme ve olgunlaşma sırasında şekillendirilebilir. Termoset malzemeler polimerizasyon ve olgunlaşma süreçlerini tamamladıktan sonra

çapraz bağlı güçlü bir yapı oluştururlar, ısıya ve korozyona dayanımları termoplastik malzemelere göre daha yüksektir. Termoset plastiklere örnek olarak reçineler poliüretan, poliamid, polibütadien ve vulkanize kauçukları verebiliriz, termoplastik ürünlere örnek olarak ise polietilen, polipropilen ve polistireni verebiliriz. Termoset matris malzemelerin üretiminde kullanılan malzeme tipleri ise; epoksi, polyester, vinylester ve fenolik reçinelerdir.

Polyester: Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyester. Polyester reçinelerini polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyarlar. Polyester reçinelerin avantajları; kolay kullanım ve çok düşük maliyetli olmasıdır. Dezavantajları ise; sertleşme sırasında yüksek oranda çekme, zehirli sitiren gazı yayma, orta mekanik özellikler ve kısa raf ömrüdür.

Epoksi: Suya, aside ve alkaliye direnci çok iyidir, zamanla direnç özelliğini yitirmez. Yüksek aşınma direncine sahiptir. Kopma mukavemeti yüksektir. Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlar, bu nedenle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak çokça tercih edilirler. Polyestere karşı daha pahalı olması dezavantajıdır. Yine polyestere göre viskozitesi daha yüksektir. Bu da uygulanmasını polyestere göre daha zorlaştırır ve dezavantaj olarak görülebilir.

Vinil ester: Son derece yüksek kimyasal ve çevresel dayanıma sahip ve polyesterden daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasına karşın aşırı sitiren içermesi, polyesterden daha pahalı olması, iyi özellikler için ikincil kür işlemlerine ihtiyaç duyulması ve sertleşme sırasında yüksek oranda çekmesi gibi olumsuz özellikleri de vardır.

Fenolikler: ateşe dayanım ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Kür işleminin buharlaşma özelliği hava boşlukların oluşmasına ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olur. Uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve

demiryollarında kullanılır. Avantajları Yüksek ateş dayanımı, düşük maliyet; dezavantajları ise yaş halde son derece zararlı olması, oldukça kırılgan ve düşük yüzey kalitesine sahip olmasıdır.

2.5.2 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Başlıca Elyaf Türleri

Kompozit malzemelerde bir çok elyaf türü kullanılabilmektedir, ayrıca bu türlere yeni yapılan çalışmalar ile yenileri de eklenmeye devam etmektedir. Biz çalışmamızda, uygulamada en çok kullanılan elyaf türlerinden bahsedeceğiz.

2.5.2.1 Cam Elyafı

Düz cam yapımında kullanılan benzer cam hammaddelerinin kullanılmasıyla üretilen ince lif (fiber veya tel) şeklinde malzemelerdir. Farklı bileşenlerin ilavesiyle farklı türlerde cam elyaflar üretilebilir. Cam elyafı, yüksek mukavemeti ve darbe dayanımı, hafifliği, kimyasallara karşı yüksek direnci ve genellikle düşük maliyeti sebebiyle çokça tercih edilmektedir. Cam elyafı, ateşe karşı yüksek direnci sebebiyle yapı sektöründe de önemli kullanım alanına sahiptir. Cam elyafı üretimi için, farklı bileşime sahip camlar kullanılabilmektedir. Standart kuvvetlendirici cam, E-glass'dır. İlk E-cam'ı patenti 1943 yılında alınmış olup %9 B2O3 içeriğine sahiptir. Bu da camın stabilitesini artırmakta ve yüksek çekme mukavemeti vermektedir. Yüksek elektriksel dirence sahip olmak için, toplam alkali içeriği %1 ile sınırlandırılmıştır. Özellikle elektrik izolasyonunda kullanıldığı için ilk önce E-glass veya elekriksel camı olarak adlandırılmıştır. Daha sonra E-camının içeriği ve alkali kısıtlaması değişmiştir. Modern E-camları %6-10 B2O3 içeriğine sahiptir. Bu camlar, gemi yapımı, uzay çalışmalarında kullanılan aletlerin (roket vb.) ürünleri gibi birçok endüstri sektöründe kullanılmaktadır. C-glass, kimyasal olarak yüksek rezistansa sahip bir cam olup, (bituminousroofingsheet) levhaların güçlendirilmesi için tercih edilmektedir. S-glass ise yüksek mukavemete sahip olup borularda özel kimyasal rezistant olarak veya ileri düzeyde yüksek mukavemetli binalarda kullanılmaktadır. D glass ise, %23 B2O3 içeriği ile en yüksek bor oksit içeriğine sahiptir.

Tekstil tipi cam elyaf üretiminde birinci kademe, hazırlanan hammadde karışımının 1600°C'de ergitilmesi işlemini kapsar. İkinci kademede; ergimiş cam platin/rodyum alaşımından yapılmış ve elektrik enerjisi kullanılarak +0,5º C , -0,5º C tolerans ile 1250° C'de kontrol edilen kovanlara (bushings) beslenir. Üçüncü kademede; cam elyaf çekimi gerçekleştirilir. Platin-rodyum (Pt-%10Rd) alaşımından üretilen kovanlara gelen eriyiğin 50-70 m/s gibi yüksek bir hızda kovanlarda bulunan deliklerden akması sağlanarak cam lifleri elde edilir. Kovanlarda 1-2 mm çapında ve 400-800-1200-1600 veya daha fazla delik bulunur. 9 ile 20 mikron çapında çekilen cam lifleri bir mandrel üzerine sarılarak "kek" adı verilen bir bobin üzerinde toplanır. Dördüncü kademede ise cam elyaf ürünlerinin üretilmesi sağlanır. Kovandaki deliklerden ayrılan eriyik kısa 14 sürede cam flaman haline gelmesi için akma esnasında su püskürtülerek belli bir sıcaklığa kadar soğutulur. Soğuyarak ipliksi bir hale gelen flamanlar bir tambur üzerinden geçirilerek gerekli kimyasallarla yüzeyi kaplanır. Bu işleme "apreleme" adı verilmektedir.

Kompozisyonlarına bağlı olarak, değişik cam elyafı cinsleri vardır. Bunlar içinde "E" camı elyafının en başta geldiği görülmektedir. Elektrik ve mekanik özellikleri ile maliyetinin iyi bir denge oluşturması sonucu, bu kalsiyum alüminosilikat bileşiminin, kullanılan toplam cam elyafı takviye malzemeleri içinde %90 pazar payına sahip olduğu görülmektedir.

"E-CR"camı, "E" camının modifiye edilmiş şekli olup, asitlere karşı dayanım sağlamak amacı ile kompozisyonunda bor içermemektedir. "E-CR" camı elyafı, genellikle kimyasal dayanım istenen tank ve boru imalatında kullanılmaktadır.

Yüksek mekanik dayanım aranan ürünler için kullanılan cam elyafı cinsleri Amerika'da "S" CAMI; Avrupa'da "R" camı olarak nitelenmektedir. Kompozitin mukavemetini ve rijitliğini arttıran bu cins cam elyafı havacılık, uzay ve askeri alanlarda, yüksek teknik performans gereksinimi nedeni ile kullanılmaktadır. Ayrıca, nakliye, spor ve dinlence alanlarında da bazı ürünler için kullanıldığı görülmektedir.

Bunların dışında, mükemmel dielektrik özellikler taşıyan ve elektronik endüstrisinde sıkça kullanılan, "D" camı elyafı ve özellikle yüzey tüllerinde kullanılan kimyasal dayanımlı "C" camı elyafı da bulunmaktadır.

Elyaf türlerinin karakteristik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Cam elyafı seçiminde bu hususlara dikkat edilmelidir.

Tablo 2.10 Cam elyafı tiplerinin özellikleri

Cam Tipi	**Özellikleri**
A-camı	Yüksek alkali oranı-düşük maliyet
C-camı	Kimyasal dayanım (Yüzey tülleri)
E-camı	Elektriksel özellikler
L-camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M-camı	Yüksek elastik modül
S-2 camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 camı	Paneller için yarı şeffaf
AR-camı	Alkali dayanım
R-camı	Yüksek çekme dayanımı

2.5.2.2 Karbon Fiber

İlk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Cam elyafının metale göre sertliğinin çok düşük olmasından dolayı sertliğin 3-5 kat artırılması çok belirgin bir amaçtı. Karbon elyafları çok yüksek ısıl işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyafının üretimi çok pahalı olduğu için ancak uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli

uygulamalarında kullanılmaktadır. Karbon elyafları piyasada 2 biçimde bulunmaktadır:

Sürekli elyaflar: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreglarda kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Kırpılmış elyaf: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılırlar. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptirler.

Karbon elyafı çoğunlukla iki malzemeden elde edilir:

- Zift
- PAN (Poliakrilonitril)

Zift tabanlı karbon elyafları göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. 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:

1. Oksidasyon: Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300° C'ye ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H'nin ayrılmasını daha uçucu olan O 'nin eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek grafit teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyah olur.
2. Karbonizasyon: Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C'ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.

3. Yüzey iyileştirmesi: Karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır.
4. Kaplama; Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir ara yüz görevi görür.

Karbon elyafının tüm diğer elyaflara göre en önemli avantajı yüksek elastik modülüne sahip olmasıdır. Karbon elyafı bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir.

Tablo 2.11 PAN esaslı karbon liflerin özellikleri (Yaman, Öktem ve Seventekin, 2007)

		Ticari	Uzay Endüstrisi		
Özellik	Birim	Standart Modül	Standart Modül	Orta Modül	Yüksek Modül
Germe Modülü	GPa	228	220-241	290-297	345-448
Germe Dayanımı	MPa	380	3450-4830	3450-6200	3450-5520
Kopma uzaması	%	1,6	1,5-2,2	1,3-2,0	0,7-1,0
Elektriksel özdirenç	μΩ*cm	1650	1650	1450	900
Isıl iletkenliği	W/m*K	20	20	20	50-80
Eksen yönünde elektriksel uzama katsayısı	10^{-6}*K	-0,4	-0,4	-0,55	-0,75
Yoğunluk	g/cm^3	1,8	1,8	1,8	1,9
Karbon içeriği	%	95	95	95	+99
Lif çapı	μm	6-8	6-8	5-6	5-8

2.5.2.3 Aramid

Naylon ailesinin bir üyesi olan aramidin kimyevi bileşimi "poli para fenilenterepitelamid" olarak tanımlanır. İlk olarak 1960'larda geliştirilen meta-aramid ve daha sonra üretilen para-aramid olarak iki bilinen türü mevcuttur. Meta-aramidler ısıya karşı yüksek dirençleri, olağan oksijen seviyelerinde erimemeleri ve alev almamaları sebebiyle koruyucu giysiler, ısı ve elektrik yalıtım malzemeleri gibi alanlarda kullanılırlar.

Burada kısaca bahsedilecek olan para-aramidler ise bazı üstün mekanik nitelikleri sebebiyle karma malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Para-aramidin, otomobil lastikleri içindeki çelik tellerin yerine kullanılacak bir malzeme arayışı esnasında Dupont tarafından geliştirildiği söylenmektedir. Malzeme halk arasında ticari olarak piyasaya sürülen ilk para-aramid lifine verilen *"Kevlar"* tescilli ismiyle tanınır. Dünyadaki ikinci para-aramid üreticisi ise Japon Teijin'dir.

Piyasada farklı uygulamalar için geliştirilen muhtelif para-aramid türevleri mecvuttur. Bunların en bilinen ve yaygın olanları;

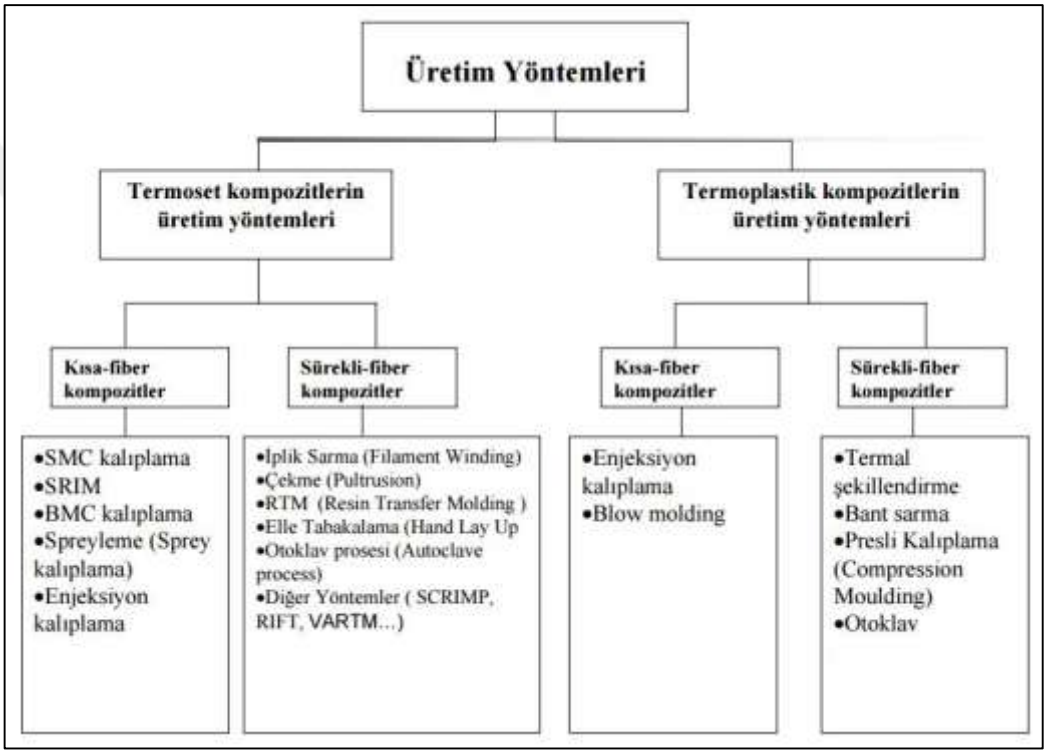
- Kevlar 29 (Dupont)
- Technora (Teijin)
- Kevlar 49 (Dupont)
- Twaron (Teijin)

olarak sıralanabilir. Bu dört elyaftan ilk ikisi kurşungeçirmez uygulamalar, son ikisi ise kompozit uygulamaları için kullanılır ve aralarında ciddi farklılıklar vardır. Gemi mühendisliği alanında yaygın olarak Kevlar 49 ve Twaron elyafları kullanılır.

Para-aramidlerin temel niteliklerinden bahsetmek gerekirse, üstünlük olarak; düşük yoğunluk, yüksek esneklik katsayısı, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe mukavemeti, yüksek yorulma mukavemeti, yüksek sürtünme mukavemeti, yüksek kimyasal dayanıklılık, düşük kopma uzaması, düşük ısıl genleşme,ateşe dayanıklılık (erime noktası yok, ~300°C'de mekanik özelliklerde ani düşüş olur, ~500°C de bozulma başlar) ve yalıtkanlık özellikleri sayılabilir. Zafiyet olarak ise; düşük basma mukavemeti, morötesi ışınlara karşı hassasiyet (sürekli karanlıkta saklanmaları gereklidir), lif veya kumaş halindeyken katlama, büzme gibi etkilerle zarar görebilmesi, mekanik işleme zorluğu, bünyesine nem almaya meyilli olması ve tuzlara ve asitlere karşı hassasiyet özellikleri sayılabilir.

2.6 Polimer Matrisli – Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklere ve üretilmek istenen şekle göre birçok kompozit üretim yöntemi bulunmaktadır. Bir parçayı üretmek için genel olarak; ham madde, kalıp, ısı ve basınca ihtiyaç vardır. Kompozit üretim yöntemlerini aşağıdaki çizim ile genel olarak gösterebiliriz.



Şekil 2.10 Kompozit malzeme üretim yöntemleri şeması (Mazumdar, 2002)

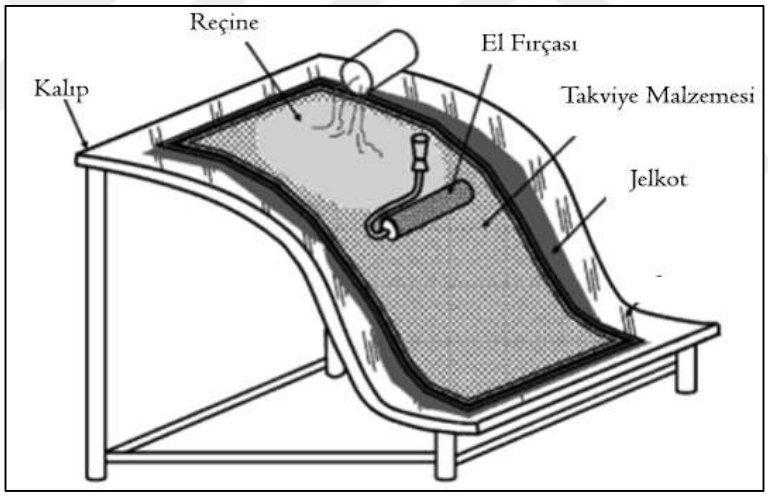
2.6.1 Elle Tabakalama

Bir kalıbın üzerine, el ile yerleştirilen kumaşlara (elyaf), reçinenin emdirilmesi şeklinde yapılan üretim yöntemidir. Reçine emdirilmiş kumaşlar, reçinenin, kumaşın türüne ve istenilen mekanik özelliklere göre istenilen basınç ve sıcaklıkta kürlenmeye bırakılır. Bu yöntemde termoset reçinelerin tamamı kullanılabilir. Yine takviye malzemesi olarak da bilinen elyaflar (cam, karbon, aramid) kullanılabilir fakat ağır aramid kumaşlara bu yöntem ile reçine emdirmek çok zordur. Bu

yöntemde reçine emdirilmesi için sadece fırça ya da rulo gibi yöntemler kullanılır, sistemde vakum yoktur.

İşlem basamakları:

1. Kalıp yüzeyi bir kalıp ayırıcı madde ile kaplanır.
2. Kalıp yüzeyine jel-kaplama (gel-coat) yapılır ve sertleşmesi beklenir.
3. Sertleşen jelkotun üzerine reçine yayılır.
4. Reçinenin üzerine elyaf yerleştirilerek, reçine elyafa rulo ve fırça yardımıyla yedirilir.
5. İstenilen kalınlık elde edilene kadar tekrar tekrar elyaf konularak reçine emdirilir.
6. İşlem sonunda reçinenin kürlenmesi için uygun sıcaklık ve basınçta uygun süre beklenilmelidir.



Şekil 2.11 Elle tabakalama üretim yöntemi gösterimi (Suong, 2009)

Yıllardır geniş ölçüde kullanılan bu yöntemin avantaj, dezavantajları ve uygulama alanları şu şekilde özetlenebilir:

Avantajları:

1. Öğrenilmesi ve uygulaması çok kolaydır.
2. Oda sıcaklığında kürlenen reçineler ile kullanıldığında maliyeti çok düşüktür.
3. Yönteme uygun malzeme temini çok kolaydır.

4. Spreyleme yöntemine oranla daha fazla fiber yoğunluğu ve sürekli lif kullanımı sağlanır.

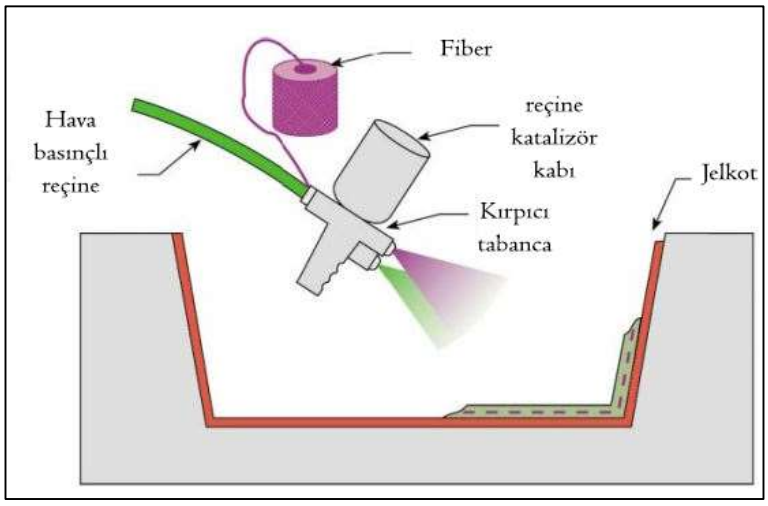
Dezavantajları:

1. Yöntem, tabakalamayı yapan kişinin el becerisine çok bağlıdır.
2. Yüksek fiber hacimsel yoğunluğuna ulaşmak zordur.
3. Reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelebilir.
4. Bu yöntemde kullanılan reçinelerin viskozitesi düşüktür. Bu tür reçinelerin insan sağlığı açısından ağır moleküllü reçinelere oranla daha zararlıdır.
5. Pahalı havalandırma sistemleri olmaksızın Polyester ve vinilester için havaya karışan sitren konsantrasyonunu yasal sınırlarda tutmak zordur.

Uygulama alanları: Rüzgar türbin kanatları, plakalar, tekne üretimi, mimari amaçlı kalıplamalar...

2.6.2 Sprey Kalıplama (Püskürtme)

Elle tabakalamada olduğu gibi bir kalıp ve jelkot kullanılır, fakat elyaf ve reçine el ile tabakalanmaz; el tabancası ile kalıbın üzerine püskürtülür.



Şekil 2.12 Sprey kalıplama – püskürtme üretim yöntemi gösterimi

İşlem basamakları:

1. Kalıp yüzeyi bir kalıp ayırıcı madde ile kaplanır.
2. Kalıp yüzeyine jel-kaplama (gel-coat) yapılır ve sertleşmesi beklenir.
3. Fiberler bir el tabancasında kıyılır (kısa fiberler haline getirilir) ve katalizör/sertleştirici ile karıştırılan bu fiberler bir kalıba püskürtülerek üretim gerçekleştirilir.
4. Belli bir kalınlık elde edildikten sonra da malzeme genellikle ortam şartlarında pişmeye (curing) bırakılır.

Avantajları:

1. Kısa sürede düşük maliyetli üretim
2. Uygulanması basit
3. Karmaşık yapılı parçaların imal edilmesine uygun

Dezavantajları:

1. Elde edilen üründe reçine oranı yüksek (ağır bir yapı)
2. Kısa liflerden dolayı sınırlı mekanik özellikler
3. Yüksek styrene içeriği (sağlık açısından zararlı)
4. Düşük viskozite nedeni ile spreyleme esnasında açığa çıkan partiküllerin giysilere vs. nüfuzu daha kolay

Uygulama alanları: Çeper türü basit yapılar, karavan gövdesi gibi yük taşımanın esas olmadığı durumlar, banyo küvetleri

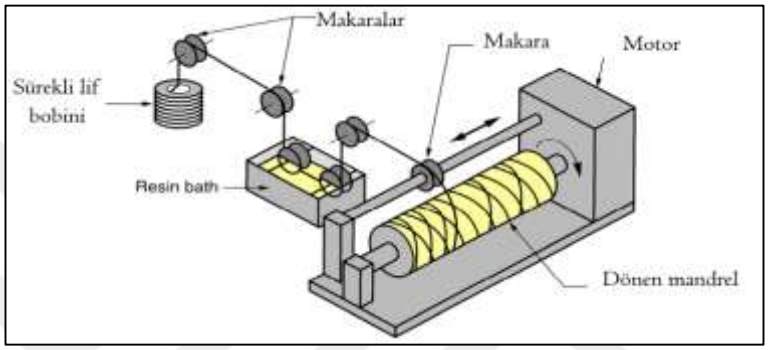
2.6.3 İplik Sarma

Bu yöntem, genellikle boru ve tank gibi içi boş parçaların üretiminde kullanılır. Yöntemin işlem basamakları kısaca şu şekildedir.

1. Bobinlere sarılı olan fiberler bir reçine banyosundan geçer
2. Reçine emmiş olan fiberler hareketli bir mekanizma ile belli bir hızda ekseni etrafında dönen mandrele istenen oryantasyonda (açıda) sarılır

3. İstenen kalınlığa veya katman sayısına (tabakaya) ulaştıktan sonra işlem tamamlanmış olur.
4. Kurutma işlemi oda sıcaklığında ve bir fırında geçekleştirilir.

Bu yöntemde herhangi bir termosetreçine (epoxy, polyester, vinylester,phenolic) kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise bir bobine sarılıolan sürekli lifler kullanılır. Kumaşşeklindeki elyaflar kullanılmaz.



Şekil 2.13 İplik sarma yöntemi ile üretimin şekilsel gösterimi

Bu yöntemin avantaj ve dezavantajlarından şu şekilde bahsedilebilir.

Avantajları:

1. Malzeme sarımı hızlı ve ekonomik bir yöntemdir.
2. Reçine oranı el yatırma yöntemine göre daha iyi kontrol edilebilir.
3. Bobine sarılı lifler, kumaşlardan daha ekonomiktirler.
4. Her katmanda farklı yönde sarım yapılabilir, bu da değişik yüklemelerin yapı tarafından karşılanmasına imkan verir.

Dezavantajları:

Sadece konveks şekilli parçalara uygulanabilir.

Büyük parçalar için mandreller pahalı olabilir.

Düzgün dış yüzey elde etmek için parçanın işlenmesi gerekebilir.

Uygulama alanları: Depolama tankları, borular, silindirler.

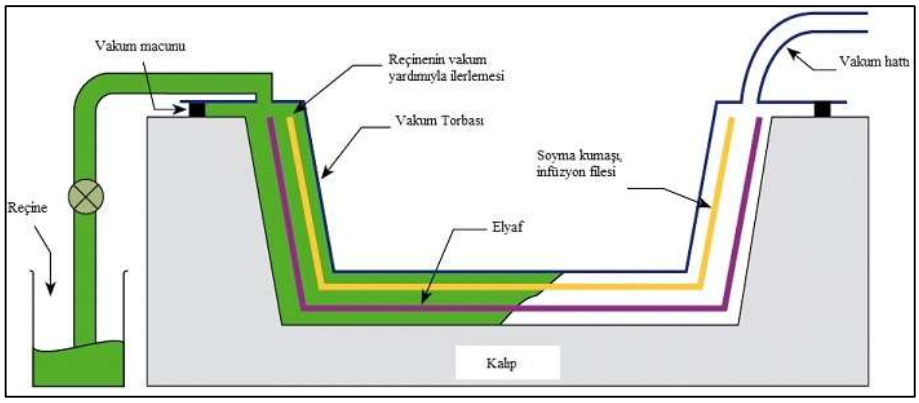
2.6.4 Vakum Paketleme

Bu yöntem elle tabakalama yönteminin devamı şeklinde düşünülebilir. Tek fark elle reçine sürülmüş tabakalı yapının devamında vakum ortamına alınmasıdır. Bu yöntem özellikle epoksi kullanımına uygundur. Çünkü vakum, polyester ve vinilester uygulamalarında fazla oranda sitrenin reçineden çıkarılmasına sebebiyet verebilir. Bu da polimerleşmeyi engelleyici bir faktör olarak ortaya çıkar.

Elle yatırma tekniğinin devamında vakum ortamına sokulmuş halidir. Vakum sayesinde reçine liflere çok daha iyi yedirilir ve fazla reçine uzaklaştırılır. Böylece daha yüksek fiber oranı elde edilmiş olur. Ayrıca vakum sayesinde yapı içerisinde hava kabarcığı kalma ihtimali de azalmış olur. Yine sağlığa zararlı gazlar da vakum ortamı ile emdirilerek uzaklaştırılırlar. Bunların yanında elle yatırma işlemine göre ek işlem olduğu için üretim maliyeti yükselmiş olur. Tekne ve bot gövdelerinde, yarış araçlarının parçalarının üretiminde kullanılırlar.

2.6.5 Vakum Destekli Reçine İnfüzyon

Vakum ortamında, elyaflara reçine emdirilmesi esasına dayanır. Kalıbın içerisine yerleştirilen elyaflar, vakum filmi ile kapatılarak sızdırmaz vakum ortamı sağlanır. Plakanın üzerine ayırıcı film ve reçine dağıtıcı tabaka konur. Vakum yardımı ile reçinenin istiflenmiş kuru kumaşa nüfuz etmesi sağlanır. Genel olarak epoksi, polyester ve vinilester reçineler kullanılır.

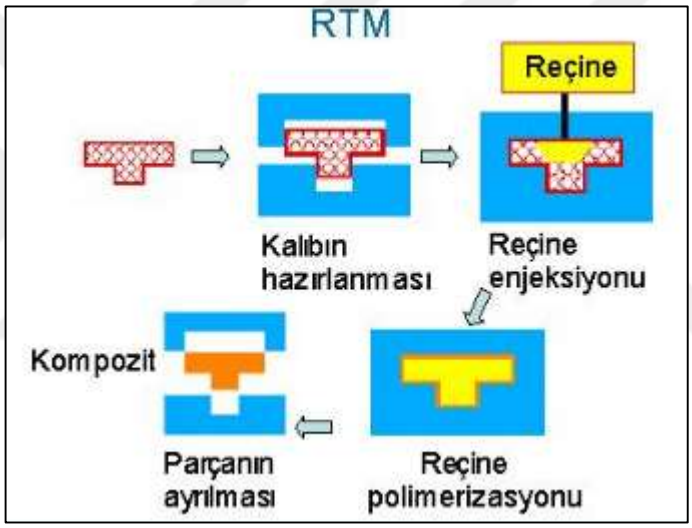


Şekil 2.14 Vakum destekli reçine infüzyonu üretim yöntemi şematik gösterimi

Bu çalışmada üretilen kompozit plakalar da vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmişlerdir. İleriki bölümlerde numunelerin hazırlanması kısmında bu yöntemden detaylıca bahsedilecektir.

2.6.6 Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

İnfüzyon yönteminden farklı olarak bu yöntemde tek değil iki kalıp kullanılır. Kalıbın içine RTM için özel üretilmiş takviye malzemeleri yerleştirilir. Kalıplar kapatılınca, reçine kalıbın içine basınçlı olarak gönderilir. Bazı uygulamalarda reçinenin ilerlemesine yardımcı olmak için basıncın yanında vakum da kullanılabilir.

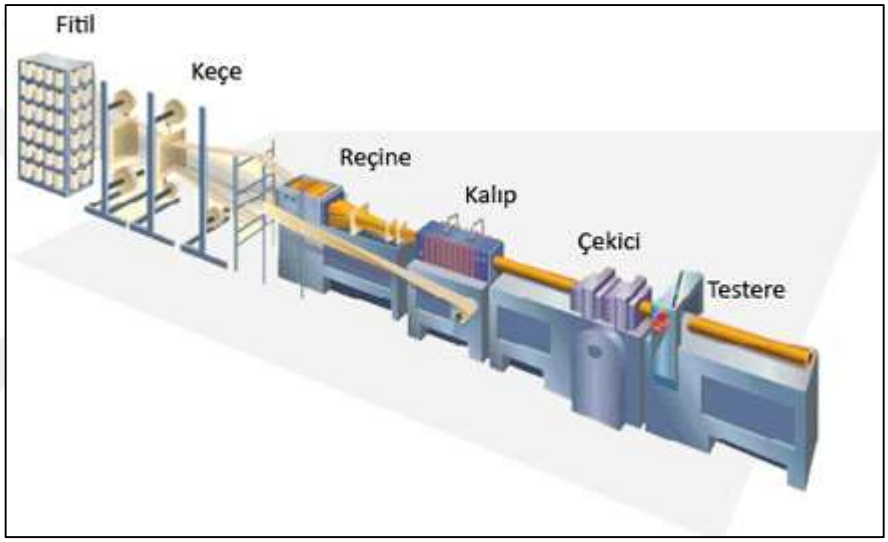


Şekil 2.15 Reçine transfer kalıplama yönteminin şematik gösterimi

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken konulardan bir tanesi, reçine viskozitesidir. Reçine viskozitesi, elyafın içine nüfuz edecek kadar düşük olmalıdır. Ayrıca çarpılma olmadan yüksek sıcaklıkta hızlı sertleşmelidir. Kalıplı bir üretim yöntemi olduğu için kalıptan kolay çıkmalıdır. Bu şartlar sağlandığında bu yöntem ile karmaşık parçalar üretilebilir. Ayrıca üretim hızı yüksektir. Seri ve kaliteli üretim için tercih edilir. Diğer taraftan, çift kalıp içerdiği için yatırım maliyeti yüksektir. Üretim ise genellikle küçük parçalar ile sınırlıdır. Küçük ve karmaşık uçak ve otomobil parçalarının imalatında tercih edilir.

2.6.7 Pultrüzyon

Pultrüzyon, düşük maliyetli, yüksek hacimde üretime izin veren, sürekli ve otomatik bir prosestir. Pultrüzyon yöntemi, çekme işlemi ile yapılır. Reçine emdirilmiş fiberler bir kalıp boyunca çekilerek çeşitli kesit geometrilerine sahip profil çubuklar üretilir. Isıtılan bir kalıp içerisinden sabit hızla çekilen fiberler geçerler. Dolayısıyla kompozit parça, kalıptan pişmiş ya da kısmen pişmiş olarak çıkar. Bu nedenle pultrüzyondan sonra genellikle ekstra bir yüzey işleme gerek kalmaz.



Şekil 2.16 Pultrüzyon üretim metodunun şematik gösterimi

Sürekli, otomatik bir yöntem olduğu için ve kumaş elyaf yerine direk iplik kullandığı için hem hızlı hem de ekonomik bir yöntemdir. Üretim hızı yüksektir. Sadece sabit kesitli parça üretilebiliyor olması ise bir dezavantajdır. Yapı elemanı olarak kiriş ve direk sistemlerinde, bina kafes sistemlerinde ve iskeletlerde kullanılan elemanların imalatında kullanılırlar.

2.6.8 Reçineli Film İnfüzyonu

Bu yöntemde, önce yarı-katı bir reçine filmi kalıba yatırılır. Daha sonra kumaşlar kalıbın içerisine istiflenir. Vakumlu torbalamadaki işlemlere benzer adımlar takip edilerek vakumlama yapılır. Sonolarak vakumlanan parçaya birşekilde ısı verilerek

(dorudan kalıpısıtılabilir veya bir fırının içine konabilir) reçinenin erimesi vemalzemeye nüfuz etmesi sağlanır.

Bu yöntem ile yüksek hacimsel fiber oranı ve düşük boşluklu yapılar elde edilebilir. Kullanılan yarı katı polimer filmler, prepreglerden genellikle daha düşük maliyetli üretimler ortaya çıkarırlar. Reçine nüfuz etmemiş bölge kalma riski düşüktür. Diğer yandan, yöntemin özelliği gereği daima bir fırına ve vakumlu torbalamaya ihtiyaç vardır. Kullanılan malzemelerin işlem sıcaklığına dayanıklı olması gerekir. Geniş uygulama sahası yoktur, havacılık alanında kullanımı mevcuttur.

2.6.9 Otoklav Pişirme

Bu yöntemde öne üretimi yapılacak parça için laminasyon şemasına uygun olarak tabakalamave vakum torbalaması yapılır. Daha sonra hazırlanan malzeme bir otoklav fırınının içine yerleştirilerek sıcaklık ve basınç altında pişme ve katılaşma gerçekleşir. Otoklav fırınları iç basıncı ve sıcaklığı kontrol edilebilir basınç kaplar şeklinde dizayn edilirler. Pişme ve katılaşma belli bir pişme çevrimine göre gerçekleşir. Pişme çevrimini kullanılan reçine tipi (reçine ve sertleştirici), üretilecek malzemenin kalınlığı ve geometrisi belirler. Otoklav içindeki basınç iki şekilde oluşturulabilir: Vakumlu torbalamada olduğu gibi torbalanmış malzemeye torbanın içinde vakum oluşturarak, ya da otoklav içinde torbanın dışında dış basınç oluşturularak. Sıcaklık ise rezistanslar sayesinde sağlanır. Sıcaklık ve basınç otomatik olarak kontrol altında tutulur.



Şekil 2.17 Otoklav fırını

Yüksek dayanım ağırlık oranı, yüksek fiber hacimsel oranı, düşük boşluklu yapı, otoklav sistemi ile elde edilir. Basınç ve sıcaklık çok iyi kontrol edilir. Büyük parçalar ya da birçok küçük parça aynı anda üretilebilir. Diğer yandan, sistemin ilk yatırım maliyeti yüksektir.

Polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde genellikle kullanılan yöntemler bu yöntemlerdir. Bu yöntemler dışında yaygın olmasa da farklı üretim yöntemleri görmek mümkün olabilmektedir.

BÖLÜM ÜÇ
KOMPOZİT MALZEMELERİN BAĞLANTI YÖNTEMLERİ

3.1 Giriş

Kompozit malzemeler kullanılarak yapılan üretim ve montajlarda, kaçınılmaz olarak malzemelerin birleştirilme ihtiyacı olmaktadır. Kompozit malzemelere has olmayan birleştirme ihtiyacı, kompozit malzemelerde kendine has farklı özelliklere ve ihtiyaçlara sahiptir. Metal, polimer ya da seramik malzemelerdeki birleştirme kriterleri, kompozit malzemelerde geçerli değildir. Kompozit malzemenin içeriğinde bulunan fiber ve fiberin etrafını kaplayan matris malzeme, birleştirme özelliklerini ciddi bicinde etkilemektedir.Malzemelerin birleştirilmesindeki temel amaç, birleşen parçaların, özelliklerini yitirmeden, tek parça gibi davranış göstermesini sağlamaktır.

Temel amaç bu parçaların birleştirme işleminin ardından yekpare parça gibi mekanik özellik gösterilmesinin sağlanmasıdır. Çünkü kompozit malzemelerin birleştirilmesinin ardından birleşme bölgesindeki mukavemet değerleri düşmektedir. (Harper, 1995)

Harper'ın da belirttiği gibi, birleştirme bölgesindeki mukavemet değerlerinde düşüş görülmektedir. Amaç, uygun bağlantıyı sağlayarak, bağlantı bölgesindeki mukavemet düşüşünün en az seviyede tutulmasını sağlamaktır.

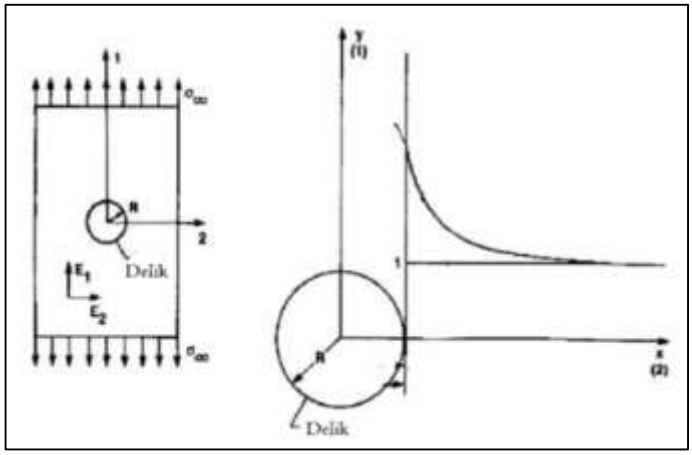
Bu çalışmada, tabakalı kompozit malzemeler ile çalışılmaktadır ve birleştirme metotları da incelenirken tabakalı kompozit malzemelerin birleştirilme yöntemleri üzerinde durulacaktır. Tabakalı kompozit malzemelerde temelde iki çeşit bağlantı yöntemi uygulanmaktadır. Bunlar, mekanik birleştirme yöntemi ve yapıştırma bağlantı yöntemidir. Diğer bir birleştirme yöntemi ise bu iki birleştirme yöntemi birden içeren karma (hibrit) birleştirme yöntemidir. Karma birleştirme yöntemi, hem mekanik birleştirme hem de yapıştırma birleştirme özelliklerini birlikte gösterir. Karma bağlantılar, mekanik ve yapıştırma bağlantılarının ikisini birden içerdiği için

uygulaması daha zordur fakat istenilen bağlantı mukavemeti istenildiği zaman tercih edilebilmektedir.

3.2 Mekanik Bağlantı Yöntemi

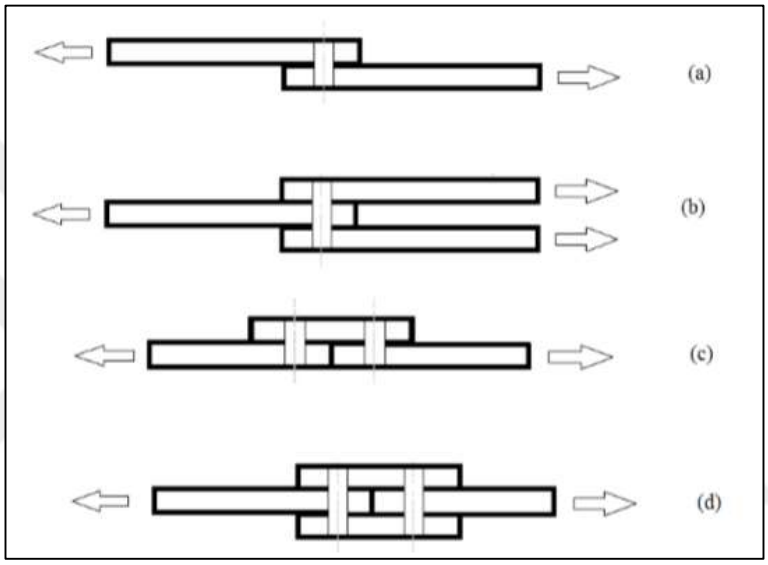
Mekanik birleştirmede birleştirme aracı olarak, cıvata, perçin ve kaynaktır. Cıvata sökülebilen bağlantı elemanı iken perçinin hasar verilmeden sökülmesi mümkün değildir. Parçaların servis edilebilme, değiştirme ihtiyacı var ise, bağlantı için sökülebilir eleman tercih edilebilir. Cıvatalı bağlantı, bu tip bağlantılar için uygundur. Perçin ise, sökülmesine ihtiyaç duyulmayacak bağlantılarda tercih edilmektedir. Perçin bağlantısının kolay ve hızlı yapılabiliyor olması, üretim açısından da bağlantıda avantaj sağlamaktadır.

Cıvata ve perçin bağlantıları için, malzeme üzerinde bağlantının yapılacağı noktalarda deliğe ihtiyaç vardır. Tabakalı kompozit malzemelerde delik, fiber sürekliliğine zarar vermektedir. Deliğe denk gelen yerlerdeki fiberler koparıldığı için, fiberin kuvvet iletimi zarar görmektedir. Ayrıca deliğin olduğu bölgede malzeme kalınlığı inceldiği için delik çevresindeki bölgelerde gerilme değerleri yükselmektedir. Gerilmeler delik çevresinde gerilme yığılmaları oluştururlar. Bu da malzemenin o bölgelerde mukavemet açısından zayıf kalmasına sebep olur. Bu zayıflık ile ilgili tasarımsal tedbirler alınmalıdır. Şekil 3.1 de delik çevresindeki gerilme artışı görülmektedir.



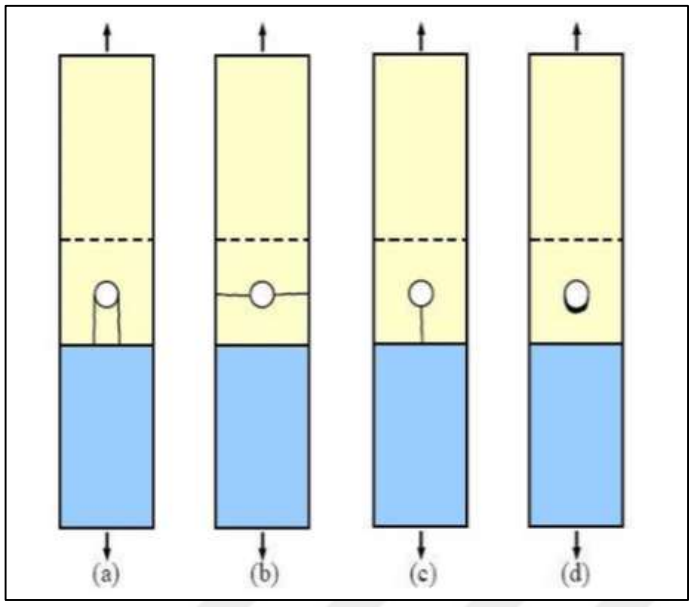
Şekil 3.1 Kompozit malzemede delik çevresinde gerilme artışı (Toubal, Karama ve Lorrain, 2004)

Mekanik birleştirmede kullanılan perin ve cıvatalar genellikle metal bağlantı elemanlarıdır. Bu nedenle bu noktalar korozyona açıktır. Ayrıca metalin yoğunluğunun yüksek olması nedeniyle malzemenin bağlantı noktaları diğer noktalarına göre daha ağır olur. Bunlar mekanik bağlantı için dezavantaj olarak görülebilir. Diğer taraftan da yapıştırma bağlantıları gibi mukavemetin son haline gelmesi için süreye ihtiyaç yoktur. Mekanik bağlantı tamamlandığı anda başka bir sürece ihtiyaç yoktur ve süreç hızlıdır.



Şekil 3.2 Mekanik birleştirme yöntemleri; (a) tekli bindirme, (b) ikili bindirme, (c) tek takviyeli birleştirme, (d) çift takviyeli birleştirme (Aydın, 2014)

Kompozit malzemelerin mekanik bağlantılarında oluşan hasarlar 4 tip olarak meydana gelir. Ayrıca bu 4 tipin birden fazlasının birlikte meydana geldiği hasar durumları da olabilmektedir. Bu hasar tipleri Şekil 3.3 de görüldüğü üzere kayma, çekme, yarılma ve yataklama hasarlarıdır.



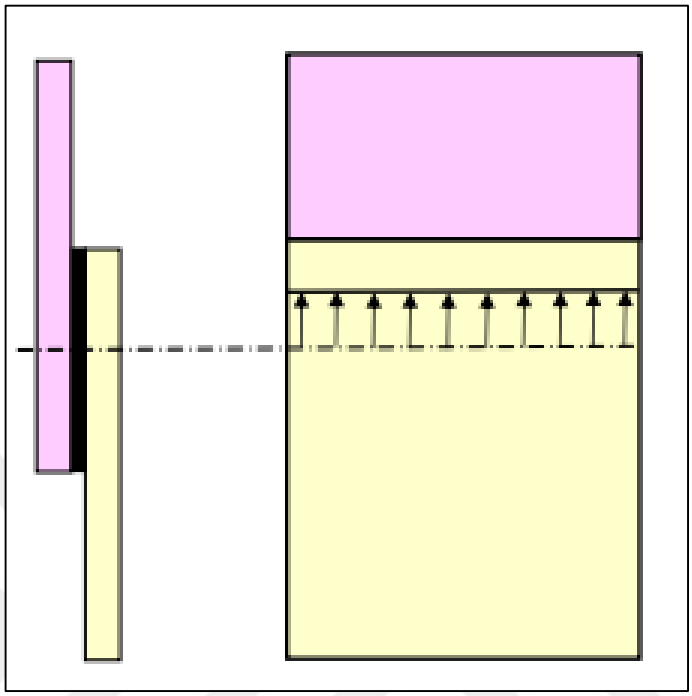
Şekil 3.3 Civatalı birleştirme metodunda kompozit malzemelerdeki temel hasarlar; (a) kayma, (b) çekme, (c) yarılma, (d) yataklama hasarı (Mallick, 1993)

3.3 Yapıştırma Bağlantı Yöntemi

Adından da anlaşılacağı üzere, parçaların birleştirilmesi için yapıştırıcıların kullanıldığı birleştirme metodudur. Mekanik birleştirmede düzgün olmayan gerilmeler, düzgün yapılmış yapıştırma bağlantılarında düzenli olarak dağılır ve her noktada eşittir. Gerilmelerin birleşme noktalarında hep aynı olması, yapıştırma bağlantıları için önemli bir avantajdır. Mekanik birleştirmede bahsedilen ağırlık artışı gibi negatif durumlar, yapıştırma bağlantılarında görülmez. Yine metal bağlantı elemanları kullanılmadığı için, korozyon ihtimali de ortadan kalkar.

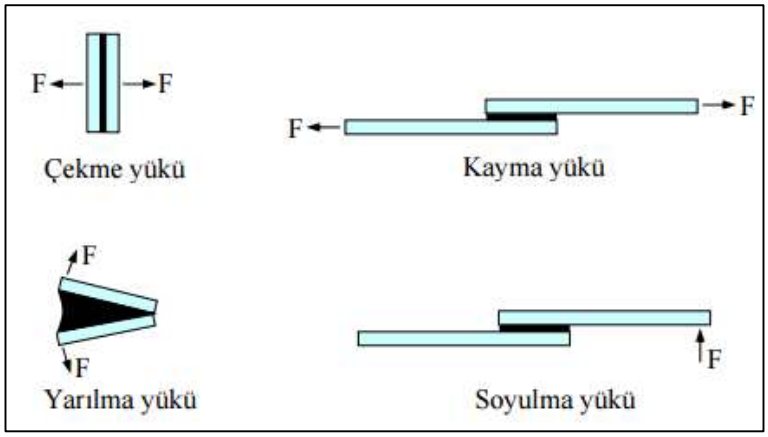
Yapıştırıcının kompozitle uyum gösterebilmesi, yapıştırıcı seçiminde aranacak en önemli faktördür. Kompozit ile yapıştırıcı arasında oluşacak bağın sağlam olması bu uyuma bağlıdır. Bu nedenle genellikle kompozitte kullanılan reçinenin kimyasal doğasına yakın bir yapıştırıcı seçilmelidir. Yapıştırıcı bağlantılarında dikkat edilecek diğer nokta, yapıştırıcının birleştirme yüzeyine tamamen yayılmasının sağlanmasıdır. Bu işleme "yüzeyi sıvamak" denir. Sıvama, yapıştırıcının sürüleceği yüzeyinin temizolmasına da bağlıdır. Malzeme yüzeyinde yağlar, partiküller ve diğer yüzey kirliliklerinin olmaması gerekir. Yapıştırma bağlantısının daha iyi olması için, yapıştırılacak yüzeyler pürüzlendirilebilir. Böylece yapıştırılacak yüzey alanı

arttırılmış olur. Yapıştırıcılardan tam olarakperformans alabilmek için yüzeylerde bu şekilde bir hazırlığa gidilebilir.



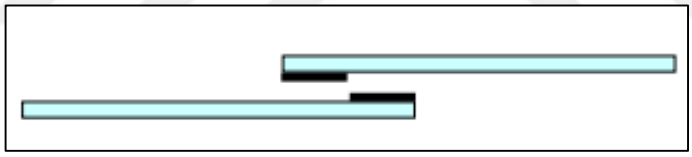
Şekil 3.4 Yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı (Altan, 2009)

Bir yapıştırma bağlantısı Şekil 3.5'de gösterildiği gibi çekme, kayma, yarılma veya soyulma gibi yüklemelere maruz kalabilmektedir. Yapıştırıcıların soyulma ve yarılmaetkilerinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı dayanımları zayıf iken çekme vekayma yüklerinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı dayanımları oldukça iyidir (Shields, 1974). Bahsedilen yükleme tipleri tek tek gerçekleşebileceği gibi bazı durumlarda bunlardan birkaçı bir arada da meydana gelebilir. Birleştirmenin tasarımı yapılırken, bağlantı üzerine gelecek yük analiz edilmeli ve gerçekleşecek hasara tedbir alacak şekilde tasarım yapılmalıdır. Bu araştırmada numuneler çekme testine tabi tutulmuştur ve numuneler üzerine gelen yük kayma yükü şeklindedir.

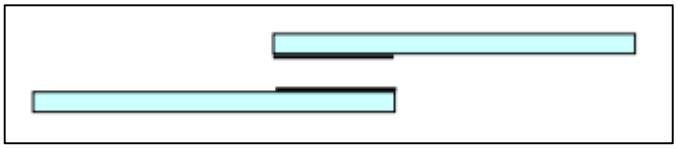


Şekil 3.5 Yapıştırma bağlantılarında yüklemetipleri (Altan, 2009)

Yapıştırma bağlantılarında meydana gelen hasarlar ise; adhezyon hasarı ve kohezyon hasarıdır. Adhezyon hasarında yapıştırıcı ile plaka yüzeyleri birbirlerinden komple ayrılır. Kohezyon hasarında ise, yapıştırıcının kendi oluşturduğu yapışkan tabaka hasar görüp kopmaktadır. Bu hasarda yapıştırıcı, her iki yüzey üzerinde de kalabilir.



Şekil 3.6 Adhezyon hasarı (Altan, 2009)

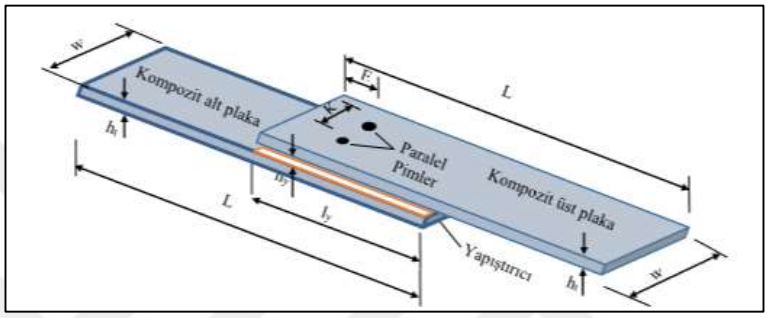


Şekil 3.7 Kohezyon hasarı (Altan, 2009)

3.4 Karma (Hibrit) Birleştirme Yöntemi

Mekanik bağlantı ve yapıştırma bağlantılarının yanı sıra, bu iki bağlantı tipinin bir arada uygulandığı bağlantı türü karma bağlantı olarak adlandırılmaktadır. Mekanik ya da yapıştırma bağlantı uygulamaları daha sık görülse de özel uyguamalarda karma bağlantı uygulamaları da görülmektedir. Bazı özel uygulamalarda mekanik ve yapıştırıcı bağlantılarının avantajlarından birlikte yararlanmak istenilmektedir.

Ayrıca tek başlarına uygulandıklarında sahip oldukları dezavantajlar, karma bağlantı uygulamalarında azalabilmektedir. Örneğin yapıştırıcı bağlantısı ile gerilmenin tüm yüzeye yayılması sayesinde,mekanik bağlantıda delik civarında meydana gelen gerilme yığılmalarının azaltılabilir. Bunun yanı sıra, sadece cıvata ya da sadece yapıştırma ile elde edilemeyen mukavemet değerlerine de karma bağlantı ile ulaşılabilmektedir. Bu çalışmada da bu konu üzerine bir çalışma yapılmıştır. Şekil 3.8' de bir karma bağlantı örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Paralel çift pimli – yapıştırıcılı karma bağlantı örneği (Alyanak ve Şen, 2015)

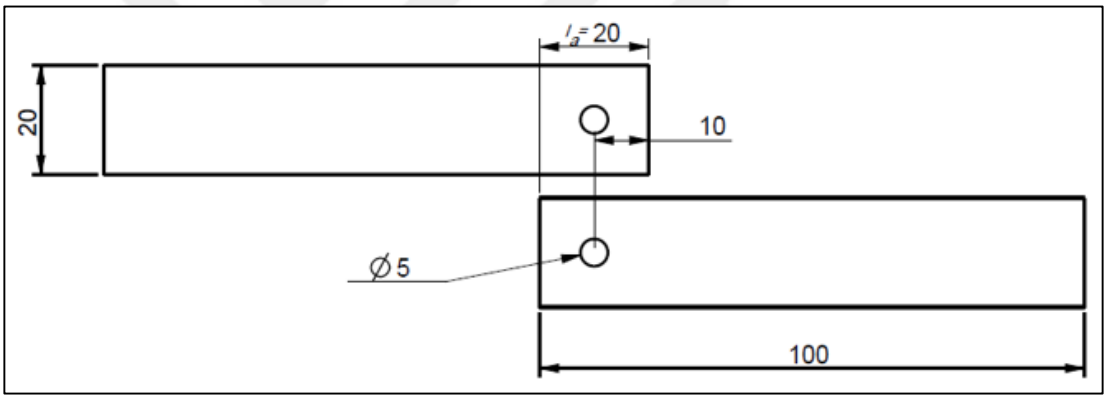
Bu çalışmada karma bağlantılı kompozit malzeme kullanılmıştır. Mekanik bağlantı elemanları olarak M6 cıvata – somun bağlantısı kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak ise çift bileşenli epoksi tercih edilmiştir. Kompozit malzemenin matris yapısı epoksi olduğu için epoksi bazlı yapıştırıcı seçilmiştir.

Karma bağlantı oluşturulurken, yüzeyler önce temizlenmiştir. Devamında çift bileşenli epoksi yapıştırıcı hazırlanarak yüzeye sürülmüş ve yüzeyler yapıştırılmıştır. Hemen devamında cıvata bağlantısı sağlanarak cıvatalar torklanmıştır. Böylece yapıştırma bağlantı için ihtiyaç olan bası kuvveti de sağlanmıştır. Numuneler bu şekilde kürlenmeye bırakılmıştır. İşlemler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

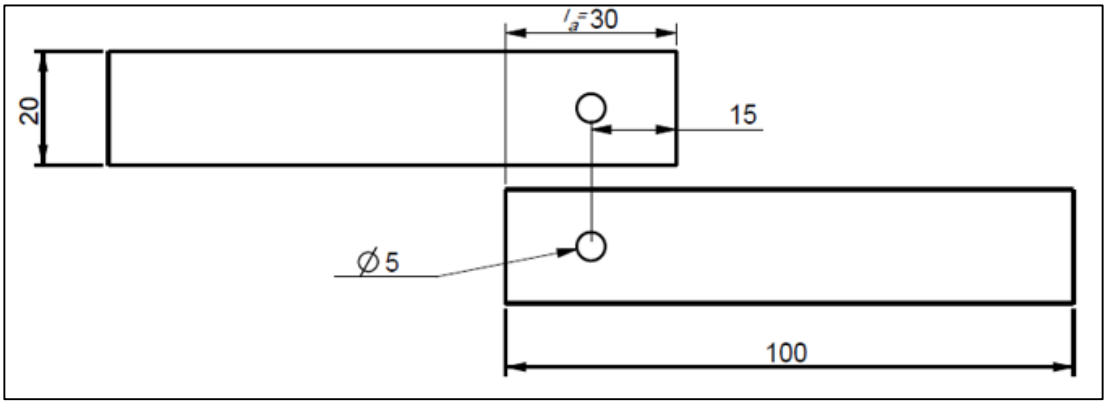
BÖLÜM DÖRT
TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI, TEST METODU VE YAPILIŞI

4.1 Giriş

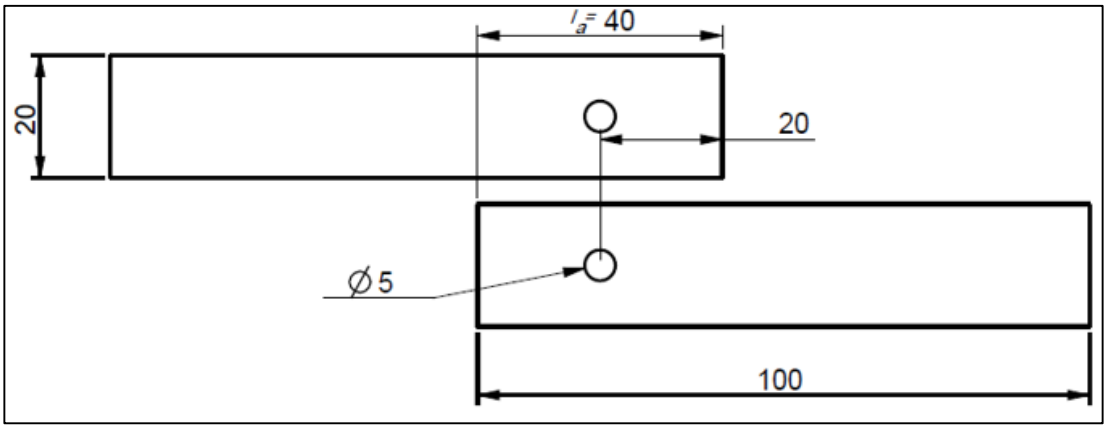
Çalışmamızda kompozit malzemelerin yapıştırılarak birleştirilmesi üzerine yapılan mekanik birleştirmenin ve bu birleştirmeyi etkileyen yapışma uzunluğu (l_a), cıvata sıkma torku (T), cıvata sayısı (n), E/W değerleri, cıvataların konumları gibi faktörlerin, kompozit malzemelerin mekanik performansına etkileri incelenmiştir. Bahsettiğimiz faktörlerin etkilerinin gözlemlenebilmesi için 6 farklı numune geometrisi ile çalışılmıştır. Geometri ölçüleri milimetre olarak gösterilmiştir.



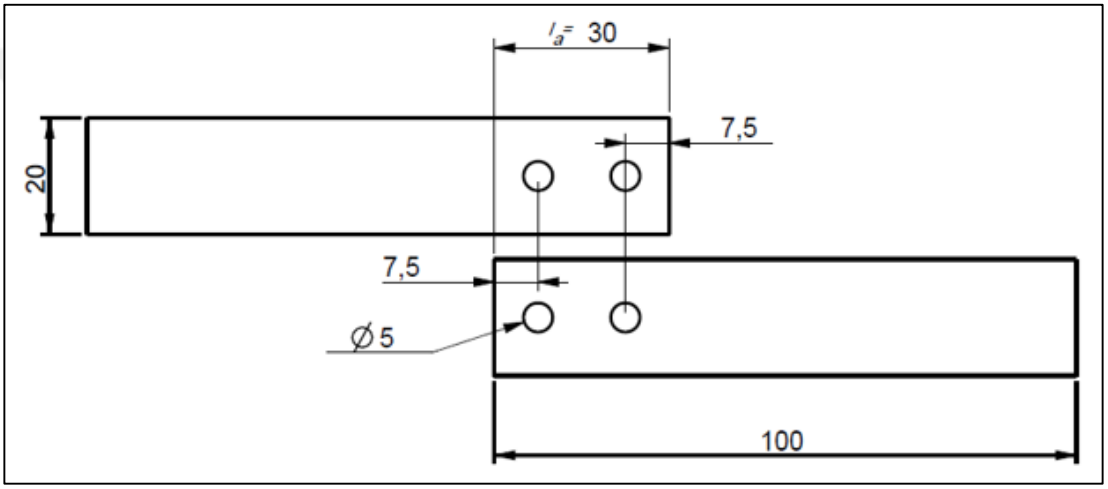
Şekil4.1 Geometri 1



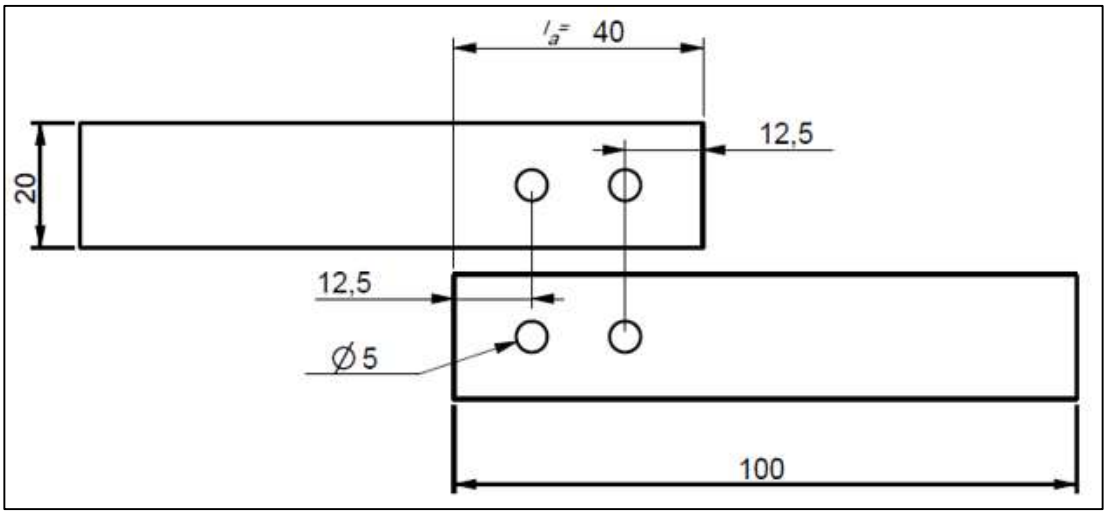
Şekil 4.2 Geometri 2



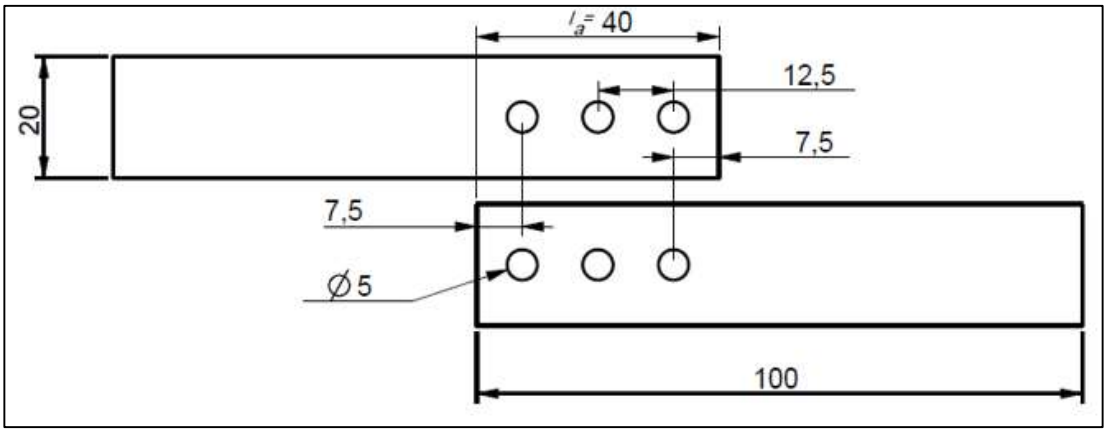
Şekil 4.3 Geometri 3



Şekil 4.4 Geometri 4



Şekil 4.5 Geometri 5



Şekil 4.6 Geometri 6

Görmüş olduğunuz gibi altı farklı geometride, cıvata sayıları (n), deliklerin yerleri ve E/W oranları farklıdır. Altı farklı geometrinin her birinden, sonuçların doğru değerlere yakınsaması için üçer adet deney numunesi hazırlanmış ve çekme testi uygulanmıştır. Ayrıca her geometri için cıvata sıkma torku (T = 5 , 10, 15 Nm) olmak üzere üç ayrı sıkma torku uygulanmıştır. Böylece yukarıda belirtilmiş olan değişkenlere bağlı olarak yapıştırma üzerine uygulanan mekanik birleştirmenin kompozit malzemenin performansına etkisi doğru olarak test edilmeye çalışılmıştır.

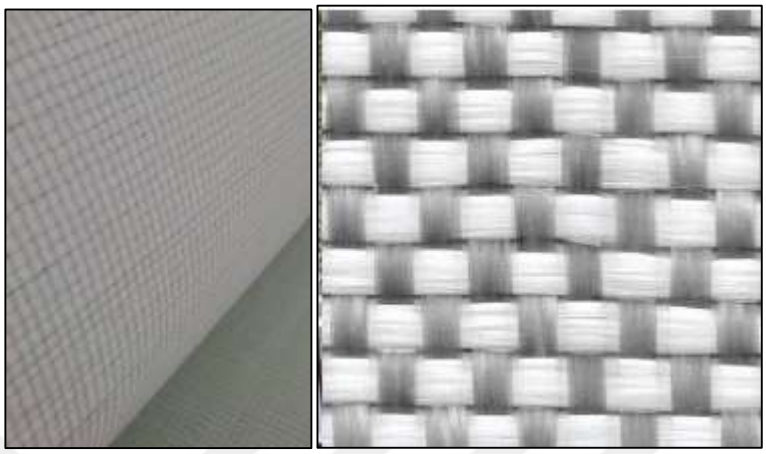
4.2 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Her bir numunenin malzemesi aynı olup malzeme olarak cam elyafı takviyeli epoksi malzeme tercih edilmiştir. Cam elyafı takviyeli epoksi malzeme, plaka olarak, vakum destekli reçine infüzyon sistemi ile üretilmiştir.

Tabakalı kompozit plakaların üretiminde, takviye malzemesi olarak 300 gr/m2 lik (0/90) dokuma E – Cam lifi kumaş kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise çift komponentli epoksi tercih edilmiştir. Epoksi ile sertleştiricisi 100:34 oranında karıştırılarak kullanılmıştır.

Plakaların üretimi için, önceki konularda da bahsetmiş olduğumuz vakum infüzyon metodu kullanılmıştır. Plakanın üretileceği alttan ısıtmalı masa, plakaların kusursuz olabilmesi için öncelikle temizlenir. Böylece masa üstünün düz, kusursuz

olması sağlanır. Devamında bu temiz yüzeyin üstüne, matris malzemesinin yapışmaması için teflon içerikli film serilir.

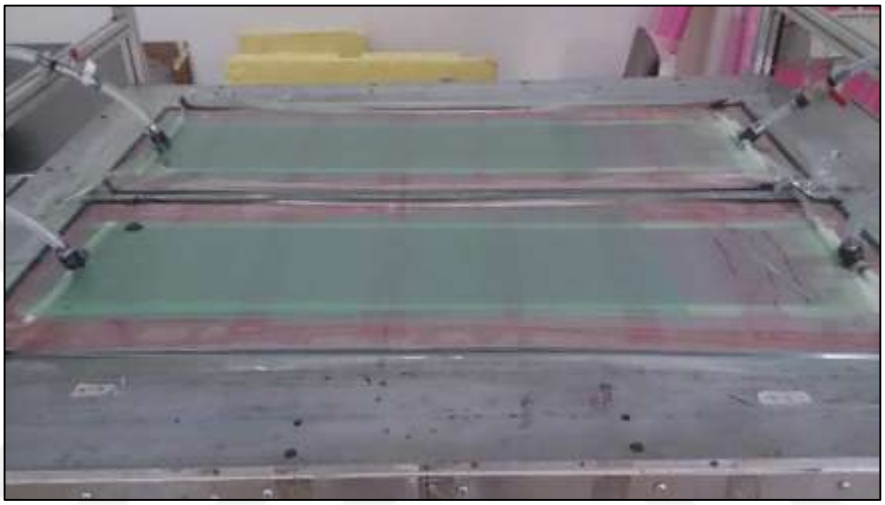


Şekil 4.7 0/90 E – Glass cam elyafı

Teflon içerikli filmin ve masanın kenarına sızdırmazlığı sağlaması amacıyla vakum macunu kullanılır. Böylece vakum oluşturulacak izole hacim oluşturulur. Plakada kullanılacak takviye malzemesi yani bizim çalışmamızda E - Cam elyaflı kumaş, üretilecek plaka boyutlarında kesilerek ayırıcı filmin üzerine ortalanarak konulur. 6 tabaka bu şekilde konulduktan sonra üstlerine yüzey pürüzlülüğünü sağlayan tabaka yerleştirilir. Bu katman sayesinde kompozit yapı vakum torbasından ayrılabilecektir. Epoksinin kompozit malzeme içerisinde daha iyi yayılabilmesi için en üste gözenekli yayıcı file konur. Vakum torbası da sistemin en üstünde yapıyı tamamen kapatacak şekilde kesilir. Torba içine girecek reçine hattı ve reçinenin emdirilmesini sağlayan vakum hatları ayarlanır ve bu hatların üzerlerine açma – kapama vanaları konulur. Vakum hattı vakum sağlayıcı pompaya bağlanır. Reçine hattından reçine verilmeden önce sistem vakum pompası çalıştırılıp sistem vakuma alınır, böylece torba içi vakumlanmış olur, sistemdeki hava alınır. Vakum yapıldıktan sonra vanalar kapatılarak sistemdeki vakum kontrol edilir. Sistemde kaçak olup olmadığını anlamak için bir süre beklenilir.

Vakum sızdırmazlığının düzgün olduğu anlaşıldıktan sonra, sisteme reçine verme aşamasına geçilebilir. Reçine ile sertleştiricisinin belirlenen oranda karıştırılması sağlanmalıdır ve karışımın iyi olduğundan emin olunmalıdır. Eğer karışımda

kabarcık vs. oluşumu var ise reçineyi besleme hortumuna vermeden önce, kabarcıkların yok olması beklenmelidir. Vakum sistemi ve reçine hazır ise, sistem vakumda iken, reçine besleme hortumu vasıtası ile sisteme verilir. Sistem izlenerek yapının tamamen ıslanması beklenir. Vakum hattının yakını da ıslandıktan sonra ilk olarak reçine girişindeki ve devamında vakum hattı üzerindeki vanalar kapatılır. Sistemin hava almadığından emin olunur, bu haliyle sistem kürlenmesi için bırakılır. Çalışmamızdaki sistemde kürlenme, 80º C'de 8 saat beklenilerek sağlanmıştır.



Şekil 4.8 Vakum infüzyon yöntem ile imalat (İpek, 2015)

Deney numunelerinin hazırlanacağı plakalar yukarıda anlatıldığı gibi ve Şekil 4.8' de gösterildiği gibi vakum infüzyon yöntemi ile elde edilmiştir. Bir sonraki işlem, plakaların kesilerek istenilen deney numunesi boyutlarına getirilmesi işlemidir.Plakalar, daire testere yardımı ile kesilerek 20 x 100 mm ölçülerine getirilmişlerdir. 20 x 100 mm ölçülerine gelmiş parçalar için bir sonraki işlem, cıvata deliklerinin delinmesi işlemidir. Cıvata delikleri, metrik 5 cıvata bağlantısına uygun olacak şekilde sütun matkap ile delinmişlerdir. Cıvata deliklerinin, istenilen konumda delinebilmesi için, sütun matkabın tezgâhına sabitlenebilen bir ahşap kalıp hazırlanmıştır. Kalıbın içine sabitlenen numuneler, sütun matkap ile hatasız delinebilmişlerdir.



Şekil 4.9 Daire testere tezgahı



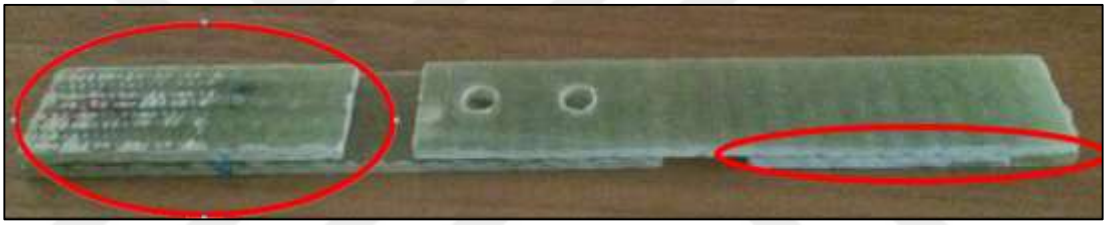
Şekil 4.10 Numunelerin delinmesi için yapılan ahşap kalıp



Şekil 4.11 Sütun matkap

Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen numuneler, daire testere ile istenilen boyutlara getirilip, devamında sütun matkap yardımı ile gerekli cıvata delikleri açıldıktan sonra, numunelerin bağlantıya uzak uçlarına ek parça yapıştırması işlemi yapılmıştır.

Numuneler, çekme testine tabi tutulacağı için, çekme kuvvetinin doğrusal olarak düzgün bir şekilde bağlantının üzerinden iletilmesi gerekmektedir. Bağlantı yapılan plakalar, tekli bindirme ile bağlanacağı için, çekme kuvvetleri karşılıklı ve doğrusal olarak denk gelmemektedir. Şekil 3.2 (a) görselinde kuvvetlerin karşılıklı gelmediği gösterilmiştir. Bu sorunu çözmek için numunelerin uzak iki ucuna ek parça yapıştırılmıştır. Böylece, numunelerin, çekme cihazına doğrusal olarak bağlanması sağlanabilmiştir.



Şekil 4.12 Bağlantı yapılmadan önce yapıştırılan ek parça yerleri

Ek parçaların yapıştırılması için "*Pattex 2K Profesyönel Hızlı Yapıştırıcı*" kullanılmıştır. Yapıştırılacak yüzeylerden birine yapıştırıcının kendisi uygulanırken, diğer yüzeye ise aktivatör uygulanmıştır ve yüzeyler birbirlerine bastırılarak yapışma işlemi uygulanmıştır. Böylece numuneler karma bağlantı uygulaması için hazır hale gelmişlerdir.

Kompozit malzemelerin birleştirilmesi için, bu çalışmada karma bağlantı uygulaması yapılmıştır. Karma bağlantı, hem yapıştırma bağlantısını hem de cıvatalı mekanik bağlantıyı içermektedir. Karma bağlantının yapılması için bu çalışmada ilk olarak yapıştırma uygulaması yapılmıştır.

Yapıştırma yapılacak yüzeyler öncelikle; yağ, kir, toz gibi elemanlardan temizlenmiştir. Yapıştırıcı olarak *Loctite EA 3430*çift komponentli epoksi yapıştırıcı

seçilmiştir. Temiz bir yüzeyde çift komponentli epoksikomponentleri1:1 oranında karıştırılmıştır ve devamında beklenmeden numunelerin yapıştırma boylarına uygun olarak yüzeylere uygulanmıştır ve yüzeyler hemen yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminin devamında vakit geçirilmeden, önceden hazırlanan cıvata deliklerinden cıvatalama işlemi yapılmıştır. Cıvatalar, belirlenmiş olan test torklarına göre torklanmıştır. Torklama sayesinde, iyi bir yapışma için gerekli olan bası kuvveti de plakalar arasında sağlanmıştır. Epoksi ile yapıştırılmış ve torklanmış olan numuneler, yapıştırıcının kürlenmesi için 24 saat süre ile beklemeye bırakılmıştır. Yapıştırma ve kürlenme işlemi, oda sıcaklığında yapılmıştır.

Sonuç olarak, 6 farklı geometriye sahip, denenecek 3 tork değeri için 3'er adet olmak üzere toplam 54 çekme numunesi hazır hale getirilmiştir. Farklı geometriler farklı yapıştırma uzunlukları, farklı delik sayıları ve farklı E/W değerlerine sahiptirler ve bu sayede sıkma torku ile beraber bu sayılan değişkenlerin etkilerinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.

4.3 Çekme Testlerinin Yapılması

Numunelerin yapıştırılıp beklenmesinden sonra,numuneler çekme testleri için hazır hale gelmişlerdir. İstenilen her durum için 3 adet numune hazırlanmıştır.Farklı 6 geometri ve farklı 3 tork değeri de düşünülünce, toplamda 54 adet çekme testi gerçekleştirilmiştir.

Çekme testi için *"ShimadzuAutograph AG-X"*çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme hızı 2 mm/dk olarak cihaz üzerinden ayarlanmıştır. Çekme işlemi oluşan ilk hasarın ardından bir süre daha devam ettirilmiş ve ardından sonlandırılmıştır. Tüm testler oda sıcaklığında ve koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13 Shimadzu AG-X çekme cihazı

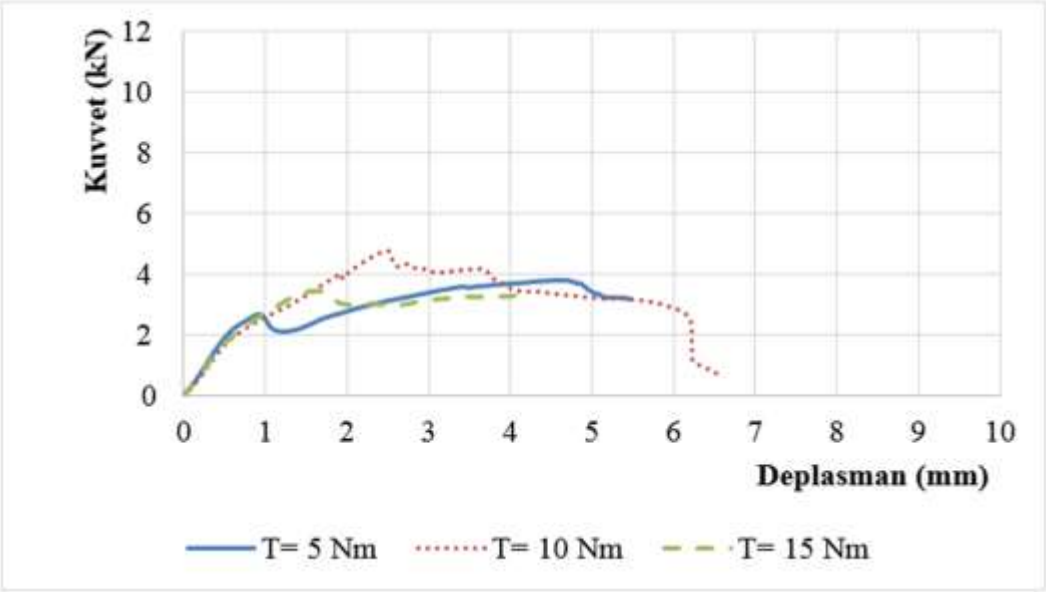
Çekme testleri sonuçları, çekme cihazına entegre olarak çalışan *"Trapezium X"*isimli yazılımdan direk kuvvet – deplasman değerleri olarak alınmıştır.



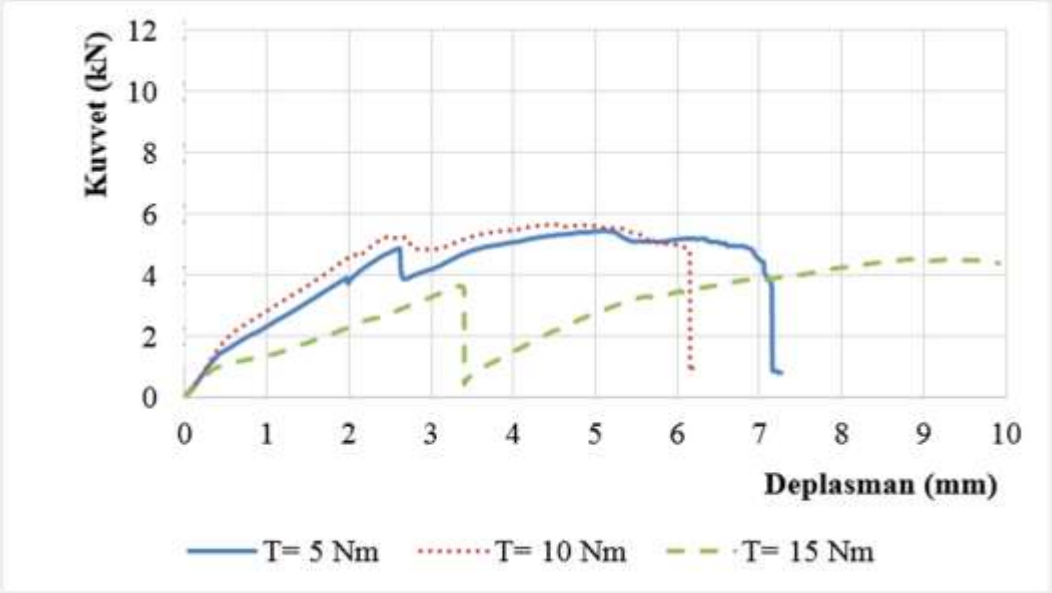
Şekil 4. 14 Trapezium X bilgisayar yazılımı

BÖLÜM BEŞ
TEST SONUÇLARININ GÖSTERİLMESİ VE YORUMLANMASI

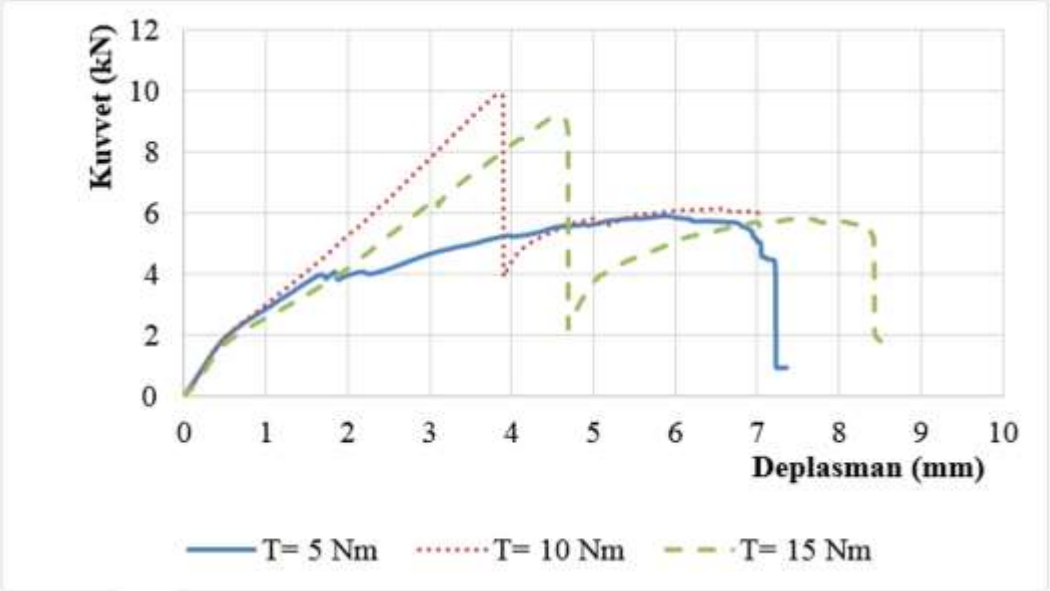
Yapılan testlerin sonuçlarında deplasman – kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Grafikler bu bölümde gösterilmiştir.



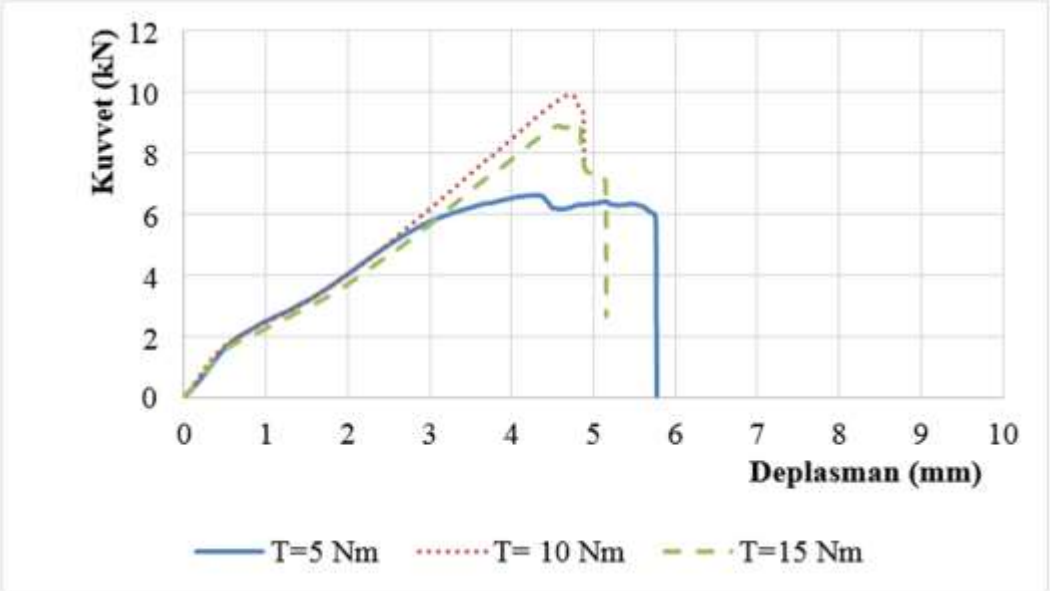
Şekil 5.1 Geometri 1 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet – deplasman grafiği



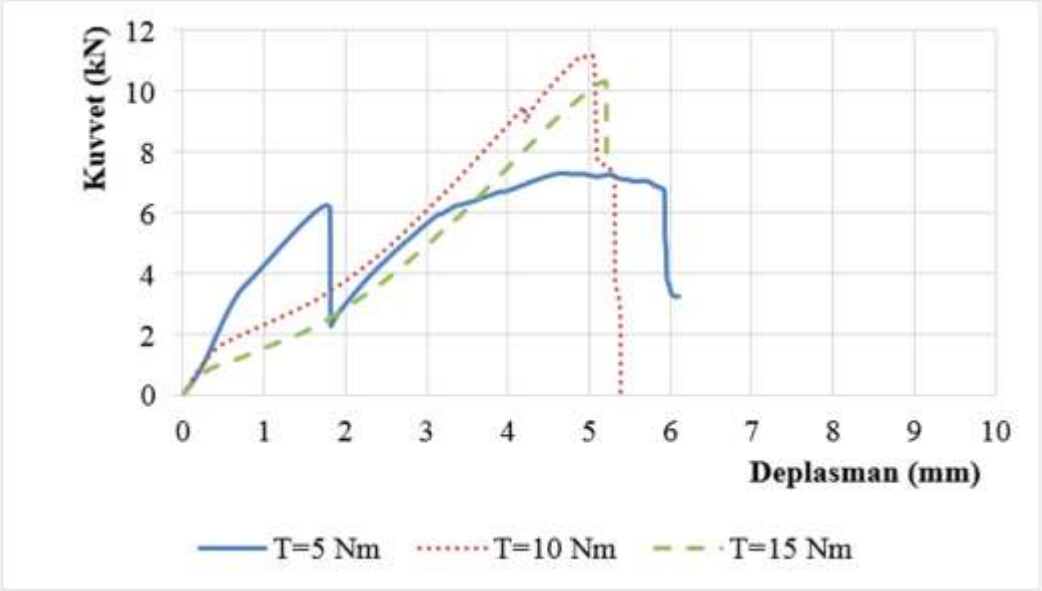
Şekil 5.2 Geometri 2 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet – deplasman grafiği



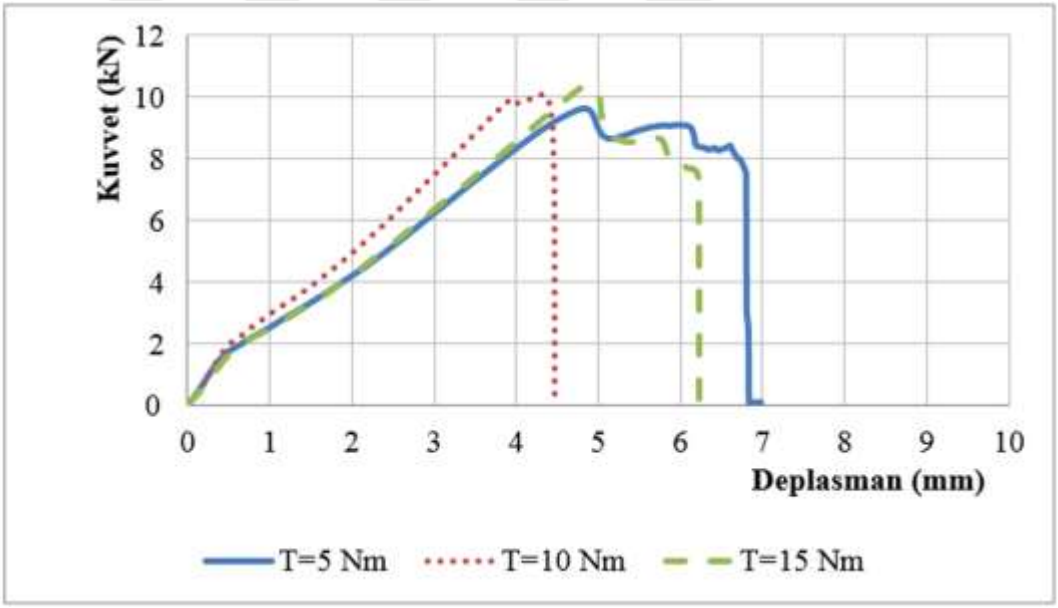
Şekil 5.3 Geometri 3 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet -deplasman grafiği



Şekil 5.4 Geometri 4 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet – deplasman grafiği

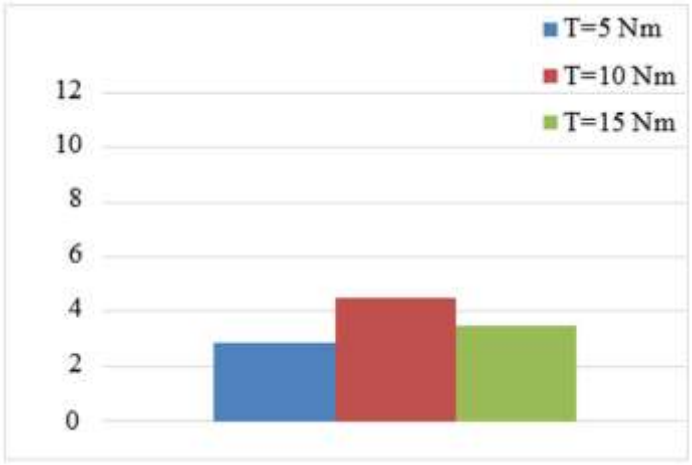


Şekil 5.5 Geometri 5 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet – deplasman grafiği

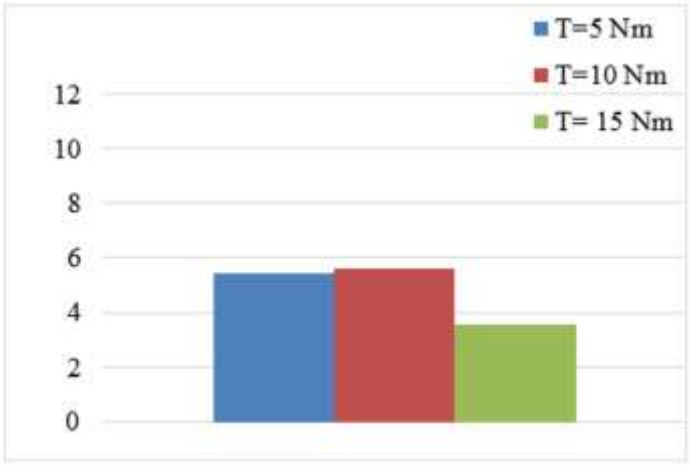


Şekil 5.6 Geometri 6 için farklı sıkma torku değerlerinde kuvvet – deplasman grafikleri

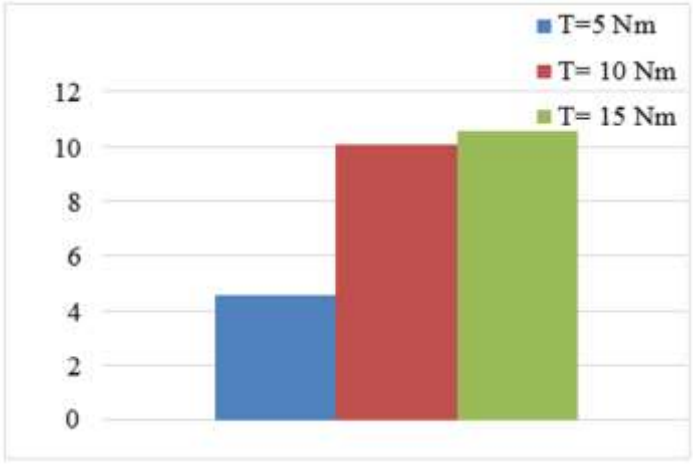
Sonuçlarımızı yorumlarken, ilk hasarın meydana geldiği kuvvet değerleri, önemli verilerdir. Farklı sıkma torkları ile birleştirilmiş numunelerde ilk hasarın meydana geldiği kuvvet değerleri aşağıda grafik olarak verilmiştir.



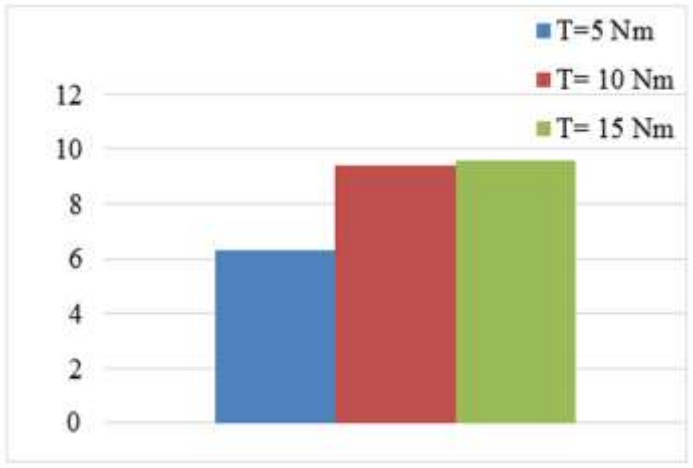
Şekil 5.7 Geometri 1 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri (kN)



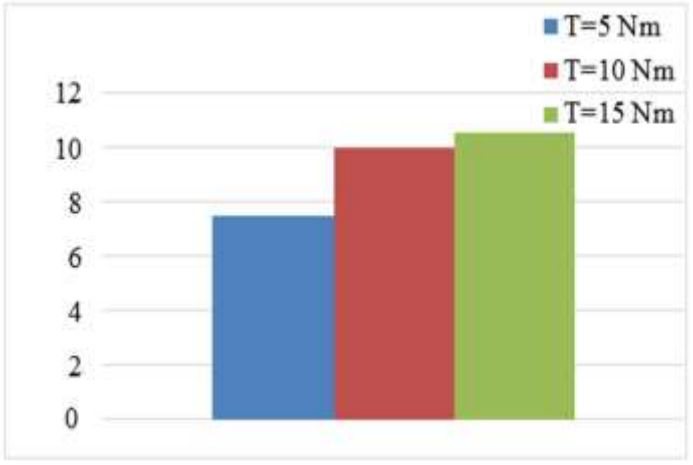
Şekil 5.8 Geometri 2 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri (kN)



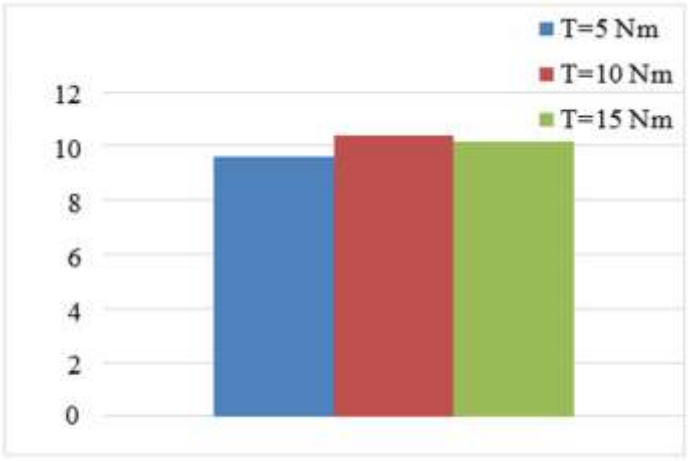
Şekil 5.9 Geometri 3 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri (kN)



Şekil 5.10 Geometri 4 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğukuvvet değerleri (kN)



Şekil 5.11 Geometri 5 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri (kN)



Şekil 5.12 Geometri 6 için farklı tork değerlerinde ilk hasarın oluştuğu kuvvet değerleri (kN)

Grafiklere bakıldığı zaman, tork etkisi ile hasarın oluştuğu kuvvet arasında bir ilişki göze çarpmaktadır. Sıkma torku 5 Nm'den 10 Nm'ye yükseltildiğinde, hasarın meydana geldiği kuvvet, tüm geometriler için artmıştır. Sıkma torku 15 Nm'ye çıkarıldığında ise, ilk hasar kuvvetinde ya düşüş, ya da ciddi olmayan az miktarda artışlar gözlenmiştir.Bunun sebebi, 15 Nm sıkma torku değerinde, cıvata – somun çiftinin malzeme üzerinde oluşturduğu deformasyondur. 15 Nm sıkma torku ile oluşan kapama kuvveti değeri, malzemeyi ezerek deformasyona sebep olmuştur.

Tablo 5.1 İlk hasarın meydana geldiği kuvvetler [N]

Geometri	**n**	**La**	**E/W**	**T= 5 Nm**	**T= 10 Nm**	**T= 15 Nm**
1	1	20	0.5	2870	4999	3484
2	1	30	0.75	4825	5608	3571
3	1	40	1	4569	10091	10580
4	2	30	0.75	6286	9387	9582
5	2	40	1	7468	9927	10508
6	3	40	1	9612	10404	10172

Tüm numuneler ile ilgili hasarların meydana geldiği kuvvetler yukarıda tablo ile gösterilmiştir. Numunede kullanılan cıvata sayısı (n), yapıştırma boyu (L_a) ile gösterilmiştir. E/W ise numunede bulunan bağlantı ucuna en yakın deliğin kenara uzaklığının, numune genişliğine oranıdır.

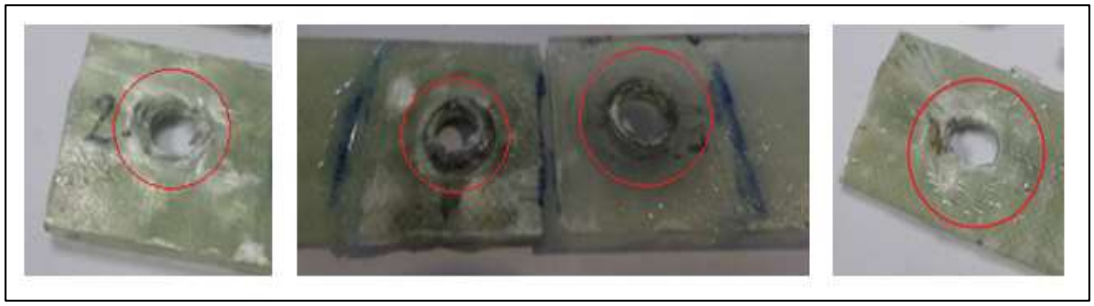
Tablo 5.2 23ºC sıcaklıkta yapışma boyları için ortalama kuvvetler (Aydın, 2014)

Geometri		**Ortalama Kuvvet [N]**
E/W	**La**	
0,5	20 mm	3531
0,75	30 mm	4351

Çalışmamızda, 6 farklı geometri için 3 ayrı sıkma torku değeri ile mekanik bağlantı sağlanmıştır. Sadece yapıştırma bağlantılı bir test yapılmamıştır. Sadece yapıştırma bağlantısının etkisini görmek için Aydin'in 2014 yılında yapmış olduğu yüksek lisans tezinden faydalanılmıştır. Aydın, oda koşullarında aynı malzeme ve yapıştırıcı türü için çalışmış ve çekme testleri yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan numunelerin genişliği 20 mm iken, Aydın'ın yapmış olduğu çalışmada numune genişlikleri 25 mm'dir. Aydın eğer 20 mm genişliğinde numune ile çalışmış olsaydı, yapışma yüzeyinin azalmasından dolayı bir miktar daha düşük kuvvet değerlerinde hasar meydana gelecekti. Yani, Aydın'ın çalışmasından aldığımız kuvvet değerlerinin, bizim numunelerimiz için bir miktar yukarıda olduğunu düşünerek yorumlama yapmamız mümkündür.

5.1 Sıkma Torkunun Etkisi

Yapılan test sonuçları incelendiğinde, sıkma torkunun, bağlantı üzerinde genel olarak olumlu bir etki gösterdiğini söylemek mümkündür fakat sıkma torkunun belli bir değerinin üstüne çıktığı durumlarda, cıvatanın oluşturduğu kapama kuvveti, malzemeye hasar vermektedir. Bu nedenle, sıkma torkunun, mekanik bağlantıda malzemeye hasar vermeyecek yükseklikte seçilmesi önemlidir. Aşırı sıkma torkunun oluşturduğu hasar Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 5.13 Aşırı sıkma torkundan dolayı delik çevresinde oluşan hasar

Yapışma bağlantısının üzerine yapılan mekanik bağlantılarda, düşük sıkma torku değerlerinde, bağlantının mukavemetinin olumsuz etkilendiği söylenilebilir. Bu olumsuzluğun sebebi, malzemede açılan cıvata deliğidir. Sadece yapıştırma yapılmış numuneler ile 5 Nm sıkma torku ile sıkılmış numuneler incelendiğinde, bağlantıların yakın değerlerde olduğunu gözlemleriz. Sıkma torku 10 Nm değerine çıkarıldığında ise, bağlantının karma bağlantının dayanımı, sadece yapıştırma bağlantısına göre gözle görülür şekilde artış göstermektedir.

Sonuç olarak; yapıştırma üzerine cıvata bağlantısı kullanılmasının, sadece yapıştırma bağlantısına göre bağlantı üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür fakat karma bağlantıda kullanılan cıvatanın sıkma torku, cıvata deliğinin olumsuz etkisini giderecek kadar yüksek olmalıdır. Diğer taraftan, sıkma torku sonucunda oluşan cıvata kapama kuvveti, malzemeye hasar vermeyecek seviyelerde olmalıdır, aşırı sıkma torku da uygulanmamalıdır.

Tablo 5.3 Sıkma torkunun karma bağlantıya etkisi– ilk hasar kuvvetleri [N]

Geo.	**n**	**La**	**E/W**	**5 Nm**	**10 Nm**	**% Artış**	**15 Nm**	**% Artış**
1	1	20	0,5	2870	4999	74	3484	21
2	1	30	0,75	4825	5608	16	3571	-25
3	1	40	1	4569	10091	121	10580	132
4	2	30	0,75	6286	9387	49	9582	52
5	2	40	1	7468	9927	33	10508	41
6	3	40	1	9612	10404	8	10172	6

5.2 Yapıştırma Boyunun Etkisi

Literatürde, sadece yapıştırma bağı içeren çalışmalar incelendiğinde; yapıştırma boyunun artmasının, bağlantı mukavemetine olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Bu çalışmada yapılan testlerde de, karma bağlantıda da, yapıştırma boyu artışının, bağlantı mukavemetine olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.4 Yapıştırma boyunun karma bağlantıya etkisi - ilk hasar kuvvetleri [N]

Geo	n	La	E/W	5 Nm	% Artış	10 Nm	% Artış	15 Nm	% Artış
1	1	20	0,5	2870		4999		3484	
2	1	30	0,75	4825	68	5608	12	3571	3
3	1	40	1	4569	-5	10091	80	10580	196
4	2	30	0,75	6286		9387		9582	
5	2	40	1	7468	19	9927	6	10508	10

5.3 E/W Oranının Etkisi

Yapılan testlerde E/W oranının, bağlantı mukavemetini etkileyen önemli faktörlerden biri olduğu görülmüştür. E/W oranı arttıkça, bağlantının dayanımı yükselmiştir. Bu çalışmada, E/W oranının etkisini direk olarak gözlemlemek mümkün değildir, çünkü E/W oranı birlikte yapıştırma boyu da değiştirilmiştir. E/W oranının etkisini anlamak için, literatürde bulunan önceki bir araştırmadan faydalanılmıştır. Aydın'ın 2014 yılında yapmış olduğu çalışmada, sabit oda sıcaklığında yapılan testlerde, yapışma boyunun 20 mm'den 30 mm'ye artışında, hasar kuvvetinin %23 civarında arttığı görülmüştür. Bu çalışmada ise, yapıştırma boyu 20 mm'den 30 mm'ye çıkartılırken, E/W değeri de 0,50'den 0,75'e çıkarılmıştır ve sıkma torku5 Nm'de sabit tutulmuştur. Bu durumda hasar kuvvetinin, %68 arttığı görülmüştür. Yapıştırma boyu artışı aynı olmasına rağmen, hasarın meydana geldiği kuvvetlerdeki artış farkı, cıvata deliğinin etkisinden kaynaklanmaktadır. Delik, kenardan uzaklaştıkça, bağlantının sağlamlığı artmaktadır. Diğer taraftan, sıkma torkunun 10 Nm olduğu durumda, yapıştırma boyunun ve E/W oranının artışı ile meydana gelen hasar kuvveti artış oranı %12 olurken; sıkma torkunun 15 Nm olduğu durumda, yapıştırma boyunun ve E/W

oranının artışı ile meydana gelen hasar kuvveti artış oranı %2'lerde kalmıştır. Bu sonuçlara, sıkma torku değeri arttıkça, E/W etkisi gittikçe azalmaktadır.

Tablo 5.5 Çeşitli tork değerlerinde yapıştırma boyunun ve E/W oranının karma bağlantıya etkisi

E/W	La	İlk Hasar Kuvvetleri [N]			
		Sadece Yapıştırma	T= 5 Nm	T= 10 Nm	T= 15 Nm
0,5	20 mm	3531	2870	4999	3484
0,75	30 mm	4351	4825	5608	3571
	Fark (%)	23	68	12	3

5.4 Kullanılan Cıvata Sayısının Etkisi

Bu çalışmada, birden fazla cıvatanın kullanıldığı karma bağlantı deneylerinde, oluşan tüm hasarlar, en kenarda bulunan delik civarında meydana gelmiştir. Diğer deliklerin çevresinden oluşan bir hasar sözkonusu değildir.

Yapıştırma boyutunun 30 mm olduğu örneklerde, cıvata sayısının artışının, bağlantı mukavemetine pozitif katkısı net olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 5.6 30 mm yapıştırma boyu için cıvata sayısı artışının bağlantıya etkisi –ilk hasar kuvvetleri [N]

Geometri	n	La	E/W	5 Nm	10 Nm	15 Nm
2	1	30	0,75	4825	5608	3571
4	2	30	0,75	6286	9387	9582
			% Değişim	30	67	168

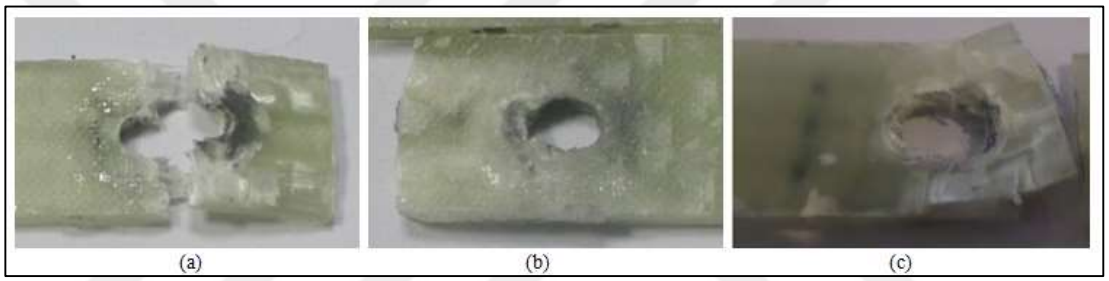
Yapıştırma boyunun 40 mm olduğu örneklerde ise, düşük sıkma torku değerinde cıvata sayısının bağlantıya olumlu etkisi gözlenirken, daha yüksek torklarda ise pek bir etkisinin olmadığı, hasarın meydana geldiği kuvvetlerin neredeyse aynı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.7 40 mm yapıştırma boyu için cıvata sayısı artışının bağlantıya etkisi – ilk hasar kuvvetleri [N]

Geo	n	La	E/W	5 Nm	% Artış	10 Nm	% Artış	10 Nm	% Artış
3	1	40	1	4569		10091		10580	
5	2	40	1	7468	63	9927	-2	10508	-1
6	3	40	1	9612	29	10404	5	10172	-3

5.5Hasar Tipleri

Çalışmada; çekme hasarı, yataklama hasarı ve bu iki hasarın bileşiminden meydana gelen hasar tipleri görülmüştür.



Şekil 5.14 Oluşan hasar örnekleri (a) çekme hasarı, (b) yataklama hasarı, (c) iki hasarın bileşiminden oluşan hasar tipi örneği

Meydana gelen hasar tiplerinin oluşma sebeplerinde ise, bu çalışmada özel bir neden çıkarılamamıştır. Bahsedilen 3 hasar türü de, tüm yapıştırma boyu, tork, cıvata sayısı etkilerinden bağımsız olarak tüm değerlerdeki çeşitli numunelerde gözlemlenmiştir.

BÖLÜM ALTI
SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapıştırma bağlantılı kompozit malzemelerin mekanik performansı üzerine, mekanik bağlamanın etkileri incelenmiştir. Çalışmada, deneysel metot uygulanmış, hazırlanan numunelere çekme testi yapılmış ve sonuçları analiz edilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda, yapıştırma bağlantı üzerine uygulanan cıvatalı bağlantıda, sıkma torkunun, bağlantı mukavemetine önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür. Cıvataların uygun sıkma torku ile sıkılması durumunda, bağlantı performansının, sadece yapıştırma bağlantısına göre olumlu etkilendiği gözlemlenmiştir.

Diğer bir değişken olarak incelenen yapıştırma boyunun da, bağlantı performansında etkili olduğu, yapıştırıcı boyu arttıkça bağlantı performansının iyileştiği görülmüştür. Yine bu çalışmada incelenen E/W oranının da, bağlantı performansına etkileri olduğu gözlemlenmiştir.

Cıvata sayısının artışı incelendiğinde, uzun yapıştırıcı boyu ve yüksek sıkma torklarında cıvata sayısının artışının belirgin bir etkisi görülmemiştir fakat düşük sıkma torkları ve yapıştırıcı uzunlukları için, cıvata sayısının artışı bağlantı performansını olumlu etkilemiştir. Cıvata sayısı kaç olursa olsun, hasar her zaman bağlantıya en yakın cıvata çevresinde oluşmuştur.

Çalışmada numuneler üzerinde oluşan hasarlar, çekme hasarı, yataklama hasarı ve bu iki hasar tipinin birleşimi olarak meydana gelmiştir. Bu hasarların meydana gelişinde, çalışılan değişkenlerin net bir etkisi gözlenememiştir.

KAYNAKLAR

Altan, G. (2009). *Değişik sıcaklık ve nem etkisinde çalışan birleştirilmiş kompozit malzemelerin yorulma mukavemetlerinin incelenmesi.* Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Alyanak, İ. ve Şen, F. (2015). Paralel çift pim uygulanmış ve yapıştırılmış karma bağlantılı kompozit plakaların çekme yükü altındaki gerilme analizi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2*, 11-23.

Arıcasoy, O. (2006). *Kompozit sektör raporu*. 12 Ağustos 2016,http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-57.pdf.

Arman, Y. (2013). Effect of washertype on bearingstrength of bolted-joint laminated composites. *Advanced Composite Letters*, *21*, 158-164.

Ataş, C. (b.t). *Kompozit üretim yöntemleri.* 12 Ağustos 2016, http://kisi.deu.edu.tr/cesim.atas/.

Ateş, E. ve Aztekin, K. (2011). Parçacık ve fiber takviyeli polimer kompozitlerin yoğunluk ve basma dayanımı özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26* (2), 479 – 486.

Aydın, Ö.F. (2014). *Çevresel koşulların yapıştırılmış kompozitlerin mekanik performanslarına etkisi.*Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Bois, C.,Wargnier, H., Wahl, J. C. ve Goff, E.L. (2013). An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints. *Composite Structures, 97,* 252 – 260.

Campbell, F.C. (2010). *Structural composit ematerials*. Ohio: ASM International.

Chan, W. S. ve Vedhagiri, S. (2001). Analysis of composite bonded / bolted joints used in repairing. *Journal of Composite Materials, 35,* 1045-1061.

Corman, G.S.,Brun, M.K., K.L ve Luthra, K.L. (1999). Silicon melt infiltrated ceramic composites prepared by melt in filtration (MI) for gas turbine applications. *International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition.*

Güllübahçe, M. (2013). *Çok cıvatalı kompozit bağlantıların çevresel aşınma altındaki performansları.* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

İpek, G. (2015). *Tabakalı kompozit malzemelerin burkulma davranışına çoklu süreksizlik bölgesinin etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Kaptı, S., Sayman, O., Özen, M. ve Benli, S., (2010). Experimental and numerical failure analysis of carbon/epoxy laminated composite joints under different conditions. *Materials and Desing, 31,* 4933 – 4942.

Kaw, Authar K. (2006). *Mechanics of composite materials*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Kelly, G. (2004). Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite Structures, 69,* 35-43.

Mallick, P.K. (1993). *Fiber - reinforced composites.* New York: Marcel Dekker.

Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: materials, product and process engineering*. Florida: CRC Press.

Öğrenci, H. D. (2012). *Mekanik olarak bağlanmış kompozitlerin dayanımı.* Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Pekbey, Y. (2007). Effect of preload moment and geometrical parameters to failure behavior of pin-loaded laminated composite plates. *Proceedings of 8th International Fracture Conference*, 554 -562.

Shields, J. (1974). *Adhesive bonding*. London: Oxford University Press.

Suong, V. H. (2009). *Principles of the manufacturing of composite materials.* Pennsylvania: DEStech Publications.

Şahin, M. (2008). *Burkulmaya maruz tabakalı kompozit plakaların deneysel ve nümerik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.

Toubal, L., Karama M. ve Lorrain B. (2005). Stress concentration in a circular hole in composite plate. *Composite Structures, 68*, 31–36.

Yaman, N., Öktem, T. ve Seventekin, N., (2007). Karbon liflerinin özellikleri ve kullanım olanakları. *Tekstil ve Konfeksiyon, 1* (2), 90-95.