

**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**TERMOSET KOMPOZİTLERİN YÜZEY  
ÖZELLİKLERİNİN YAPIŞMAYA ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**Salih DİDİM**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilim Dalı Kodu : 625.03.00**

**Sunuş Tarihi : 09.06.2014**

**Bornova-İZMİR**

**2014**

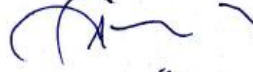


Salih DIDİM tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “**Termoset Kompozitlerin Yüzey Özelliklerinin Yapışmaya Etkisinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 09.06.2014.tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri:**

**İmza**

**Jüri Başkanı :** Doç.Dr. İbrahim Etem SAKLAKOĞLU



**Raportör Üye:** Yrd.Doç.Dr. Mehmet SARIKANAT



**Üye :** Yrd.Doç.Dr. Kutlay SEVER





**EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi / Doktora Tezi olarak sunduğum “**TERMOSET KOMPOZİTLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN YAPIŞMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

09 / 06 / 2014

  
İmza

Salih DİDİM





**ÖZET****TERMOSET KOMPOZİTLERİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN  
YAPIŞMAYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

DİDİM, Salih

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Haziran 2014, 66 sayfa

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler günümüzde yüksek dayanım/ağırlık oranı, güçlü boyutsal stabilite, sıcaklık ve kimyasal dirence sahip olmaları nedeniyle; uçak ve uzay yapılarında, denizcilik, savunma sanayi, sağlık ve otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanlarının artması ile birlikte gerek kullanım sırasında gerekse üretimleri esnasında birtakım hasarlar meydana gelebilmektedir.

Günümüzde, fiber takviyeli termoset kompozitlerin geri dönüşümünün olmaması ek maliyet oluşturmasının yanı sıra birtakım çevre kirliliği sorunlarına da sebep olmaktadır. Bu nedenle, özellikle termoset kompozitlerde onarım günümüzde çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Bundan dolayı termoset kompozitlerin onarım yöntemleri ve onarılmış kompozitlerin performanslarını konu alan literatürde birçok çalışma mevcuttur.

Bu çalışmada vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilen kompozit plakaların yüzeylerine karbondioksit lazer ile kanallar oluşturulmuş ve oluşturulan bu kanalların yapışma mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca iki farklı numara zımpara (60,360 grid) ile numune yüzeyleri zımparalanarak farklı yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Hazırlanan tüm numuneler için mod I tabakalar arası kırılma tokluğu deneyi, çekme ve sıyırma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünün ve lazer işlemi ile numune yüzeylerinde oluşturulan kanalların yapışma mukavemetine etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar sözcükler:** Termoset kompozit, yapışma mukavemeti, onarım, lazer



**ABSTRACT****THESIS ON EFFECT OF ADHESION TO THERMOSET  
COMPOSITES SURFACE CHARACTERISTICS**

DİDİM, SALİH

Msc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

June 2014, 66 pages

Fiber reinforced layered composite materials are used nowadays in many fields like aircraft and space structures, marine, defense industry, medical stores, automotive industry because they have high resistance/weight rate, strong dimensional stability, warmth and chemical resistance. Together with the increasing use of this material, not only during the use of it but also during the production process some damages can occur.

Today, fiber reinforced layered composites cause environmental pollution problems because they have no recycling and they have above the line cost, for this reason especially the repair and maintenance of thermoset composites are very important at present. Therefore there are many studies in literature about the repair ways of thermoset composites and the performance of repaired composites.

In this experiment, on the surfaces of plates which are produced with the vacuum assisted resin infusion process, the channels were formed with the help of CO<sub>2</sub> laser and the effect on adhesion strength of those formed channels was analyzed. On the other hand with two different sandpapers (60, 360 grid) the surfaces of samples were grinded and different surface roughness was found. For the whole samples, Mode I interlaminar fracture toughness test, tensile test and peeling test were carried out. As a result of experiments surface roughness, the channels and patterns formed on the surface of samples, adhesion strength effect is evaluated by making comparison.

**Keywords:** Thermoset composites, adhesion strength, repair, laser



## TEŞEKKÜR

Tez çalışmasında beni yönlendiren ve kıymetli görüşlerinden yararlandığım değerli hocalarım Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet SARIKANAT'a, yardımlarını ve ilgisini esirgemeyen ve çalışmamda her türlü desteği sağlayan İbrahim ŞEN, Zafer YENİER ve Sezgin BEDİR'e, bu süreçte her konuda maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	vii
ABSTRACT .....	ix
TEŞEKKÜR .....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xx
1.GİRİŞ .....	1
2.TEORİK BİLGİLER .....	2
2.1 Kompozit Malzemeler .....	2
2.1.1 Tanımı ve tarihçesi .....	2
2.1.2 Kompozit malzemelerin ana elemanları .....	4
2.1.3 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları .....	13
2.1.4 Kompozit malzemelerin kullanım alanları .....	15
2.2 Lazer ile Oyma Yöntemi .....	16
2.2.1 Tanımı ve tarihçesi .....	16
2.2.2 Lazer tezgahı ve kısımları .....	17
2.2.3 Lazer ile işleme parametreleri .....	19

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
2.3 Yapıştırma.....	20
3.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (LİTERATÜR ÖZETİ).....	22
4.MATERYAL-METHOD.....	29
4.1 Materyal.....	29
4.2 Yöntemler.....	29
4.2.1 Vakum destekli reçine inf. yöntemi ile kompozit plaka üretimi.....	29
4.2.2 Testere ile plakaların numune boyutlarına kesilmesi.....	30
4.2.3 CO <sub>2</sub> lazer ile numunelerin işlenmesi.....	32
4.2.4 Numune yüzeylerinin zımparalanması.....	37
4.2.5 Numunelerin ultrasonik yöntem ile temizlenmesi.....	37
4.2.6 Lazer işlem derinliklerinin stereo mikroskop ile tespiti.....	38
4.2.7 Numunelerin epoksi reçine ile yapıştırılması.....	41
4.2.8 Epoksi reçinenin kürleşme işleminin yapılması.....	42
4.2.9 Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapılması.....	43
4.2.10 Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu deneyi.....	43
4.2.11 Sıyırma (Peeling) deneylerinin yapılması.....	45
4.2.12 Çekme deneylerinin yapılması.....	46

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<u>Sayfa</u>
5. DENEYSEL SONUÇLAR .....	48
5.1 Yüzey Pürüzlülük Testi Sonuçları .....	48
5.2 Mod I Deneyi Sonuçları.....	48
5.3 Sıyırma (peeling) Deneyi Sonuçları .....	53
5.4 Çekme Deneyi Sonuçları .....	56
6. SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	66



**ŞEKİLLER DİZİNİ**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Malzemelerin tarihsel gelişimi .....	3
2.2 Matriks malzemelerin özellikleri .....	5
2.3 Kompozit malzemelerin matriks malzemesine göre sınıflandırılması .....	5
2.4 Değişik tipte fiber kompozitler .....	8
4.1 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle kompozit plaka üretimi .....	30
4.2 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiş plaka .....	30
4.3 Falkon P251 elektrikli testere tezgahı .....	32
4.4.Coherent E150 CO <sub>2</sub> lazer tezgahı .....	33
4.5 CO <sub>2</sub> lazer tezgahı ile numune yüzeylerine kanal açılması .....	34
4.6 Lazer ile işlenen plakaların model görüntüleri .....	35
4.7 Lazer ile kanal açılmış numunenin ön temizlik öncesi durumu .....	36
4.8 Lazer ile kanal açılmış numunenin ön temizlik sonrası durumu .....	36

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.9 Elmasonic E120H ultrasonik temizleme cihazı .....	37
4.10 Ultrasonik temizleme işleminin uygulanışı.....	38
4.11 Bir tur lazer işlemi ile oluşan derinlik.....	40
4.12 İki tur lazer işlemi ile oluşan derinlik .....	40
4.13 Dört tur lazer işlemi ile oluşan derinlik .....	40
4.14 Epoksi ve hızlandırıcının hassas kantar kullanılarak karıştırılması .....	41
4.15 Üç farklı deney için yapıştırılmış numuneler.....	42
4.16 Kürleşme işlemi için kullanılan hidrolik pres .....	42
4.17 Ayrık kiriş testi numunesi.....	43
4.18 Çatlak boyu düzeltme faktörünün hesaplanması .....	45
4.19 Sıyırma (peeling) deney numunesi .....	46
4.20 Çekme deney numunesi .....	46
4.21 Shimadzu Autograph AG-IS serisi universal çekme test cihazı.....	47
5.1 Zımpara işleminin kırılma tokluğu değerine etkisi .....	50
5.2 Kanal derinliğinin kırılma tokluğu değerine etkisi .....	50
5.3 Kanal sayısının kırılma tokluğu değerine etkisi.....	51

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.4 Kanal genişliğinin kırılma tokluğu değerine etkisi.....	52
5.5 Zımpara işleminin sıyırma kuvveti değerine etkisi .....	53
5.6 Kanal derinliğinin sıyırma kuvveti değerine etkisi.....	54
5.7 Kanal sayısının sıyırma kuvveti değerine etkisi .....	54
5.8 Kanal genişliğinin sıyırma kuvveti değerine etkisi .....	55
5.9 Zımpara işleminin çekme dayanımına etkisi .....	56
5.10 Kanal derinliğinin çekme dayanımına etkisi .....	57
5.11 Kanal sayısının çekme dayanımına etkisi.....	57
5.12 Kanal genişliğinin çekme dayanımına etkisi .....	58

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Falkon P251 elektrikli testere tezgahının teknik özellikleri.....	31
4.2 Lazert tezgah bilgileri ve işleme parametreleri.....	33
4.3 Olympus SZ61 stereo mikroskobunun teknik ve optik özellikleri .....	39
4.4 Deney numunesi boyutları .....	43
5.1 Kırılma tokluğu ve düzeltilmiş kırılma tokluğu değerleri.....	49

## 1. GİRİŞ

Fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler günümüzde yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek rijitlik/ağırlık oranına sahip olması, boyutsal stabiliteye, sıcaklık ve kimyasal dirence sahip olmaları nedeniyle; uzay yapılarında, ulaşım araçlarında, savunma sanayinde, elektrik, kimya, konstrüksiyon ve gıda gibi alanlarda geniş kullanım alanları bulmuştur. Kullanım alanlarının artması ile birlikte gerek kompozit yapıların üretimi sırasında gerekse kullanımları esnasında hasarlar meydana gelmektedir.

Günümüzde, fiber takviyeli termoset kompozitlerin geri dönüşümünün olmaması ek maliyete sebep olmasının yanı sıra birtakım çevre kirliliği sorunlarına da sebep olmaktadır. Bu nedenle, özellikle termoset kompozitlerde onarım çok önemli bir konu haline gelmiştir. Bundan dolayı da onarım yöntemleri ve onarılmış kompozitlerin performansları üzerine literatürde yapılmış birçok çalışmalar bulunmaktadır.

Bu çalışmada vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen kompozit plakaların yüzeylerine karbondioksit lazer ile farklı genişlik ve derinliklerde kanallar oluşturulmuş ve oluşturulan bu kanalların yapışma mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca iki farklı zımpara (60,360 grid) ile numune yüzeyleri zımparalanarak farklı yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Hazırlanan tüm numuneler için mod I tabakalar arası kırılma tokluğu deneyi, çekme ve sıyırma deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünün ve lazer işlemi ile numune yüzeylerinde oluşturulan kanalların yapışma mukavemetine etkisi karşılaştırmalı olarak incelenerek değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın amacı kompozitlerin onarım esnasındaki yapışma mukavemeti ile ilgili sorunlara bir çözüm sunabilmek, bu sayede ortaya çıkan ek onarım maliyetleri, çevre kirliliği ve termoset kompozitlerin geri dönüşümü konusunda endüstriye katkıda bulunmaktır. Öte yandan yapışma mukavemetinin geliştirilmesi ile daha mukavemetli onarımların yapılması amaçlanmaktadır. Ayrıca numune yüzey işlemleri için lazer kullanılarak termoset kompozitlerin onarımı ve performansı konusunda literatürdeki çalışmalara farklı bir bakış açısı ile bakarak bu konuda literatürü zenginleştirmek de hedeflenmektedir.

## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1. Kompozit Malzemeler

#### 2.1.1. Tanımı ve tarihçesi

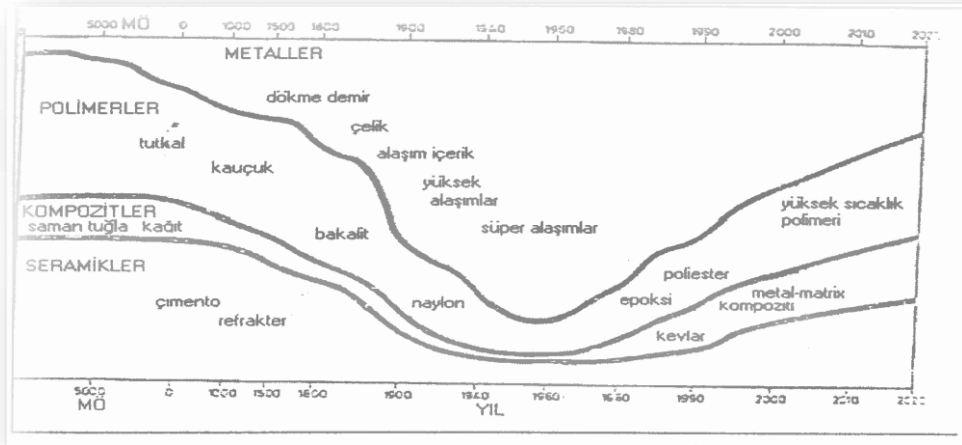
Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Kompozit malzemeler ile hafif, mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve sünek malzemeler üretilebilir. Kompozitler, çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ve onun içinde dağılmış takviye edici bir faz bulunmaktadır.

Bir başka tanım olarak kompozit malzeme; tasarım amacına uygun olarak (ısı, mekanik, fiziksel, işletme vb.) istenilen bir veya birden fazla özelliği içeren bileşenlerin makro ve/veya mikro olarak bir araya getirilmesi ile oluşturulan, istenen özelliklerin baskın istenmeyen özelliklerin yok edilmesini veya azaltılmasını sağlayan malzemelere verilen genel addır (Ünal, O., 2005).

İsrailliler çamur ve samanla tuğla yaparak, orta çağda askerler kılıçlarını sağlamlaştırarak, Mısırlılar kontrplağı yaparak vb. günümüze değin önemi gittikçe artan kompozit malzemeyi o zamanlardan kullanmaya başlamışlardır (Sınmazçelik, T., 2001). İlk çağdan XX. yüzyıla kadar gelindiğinde, bu zaman aralığında metallere çelikler, alaşımlar, yapıştırıcılar, lastikler, bakalitler, polimer olarak Portland çimentosu, ısı refrakterler vb. geliştirilmiştir. Buradan anlıyoruz ki ilk çağdan XX. yüzyılın başlarına kadar kompozit malzemelerde fazla bir artma olmamıştır.

Geliştirilen kompozitler pahalı olduğu için o güne kadar daima daha ucuz, daha güvenli, daha mukavim vb. malzemeler yapılabilmıştır. Ancak havacılığın I. ve II. Dünya savaşları sonrası hızla gelişimiyle malzemeye olan ihtiyacın türü değişmeye başlamıştır.

Kompozitler önce uçak, sonra uzay yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek bir yapısal verim ve mukavemet/ağırlık oranının tasarımlarda aranmasına klasik malzemeler bir cevap olamamıştır. İşte kompozit malzemeler özellikleri dolayısıyla bu tasarımlara uygun malzemelerdir.



Şekil 2.1 Malzemelerin tarihsel gelişimi [ Sınmazçelik,2001].

Liflerle donatılı sentetik reçineler 1950'li yılların ortalarından itibaren endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemenin en bilinen grubu cam lifi takviyeli polyeşter reçine kompoziti oluşturmaktadır. Ülkemizde “fiberglas” diye tanınan bu malzeme 1960'lı yılların başından itibaren Türkiye’de sıvı depoları, çatı levhaları, küçük boyda deniz teknelerinin yapımı gibi alanlarda kullanılmıştır. Ülkemizin ilk yerli otomobili olan “Anadol”un kaportası bu malzemedен üretilmiştir.

Cam lifleriyle donatılı sentetik reçine matriksli malzemeler için “Cam Takviyeli Plastik (CTP)” adı dilimizde kullanılmaktadır. Cam takviyeli plastiklerin üretiminde, en çok kullanılan malzeme olan polyeşterin yanı sıra, diğer termoset ve termoplastik reçinelerde kullanılmaktadır(Sınmazçelik, 2001). Cam lifli polyeşterlerin mukavemeti ve elastisite modülü düşüktür. Ancak diğerlerine göre daha ucuz ve kolay uygulandığından deniz tekneleri, oto, spor malzemeleri ve yapı elemanları üretiminde çok yaygın olarak kullanılır.

Metallerde ise son yıllarda işlemleri ve kontrolü daha yüksek kaliteli ve gelişimi yavaş malzeme olarak cam-metaller, Al-Li alaşımları, çift yüzlü çelikler, mikro alaşımlı çelikler ve yeni süper alaşımlı çelikler geliştirilmeye başlanmıştır.

Polimerler, yüzyıl başında naylonun gelişmesiyle ön plana çıkmıştır ki, bunların en önemlileri plastiklerdir. Son yıllarda ise akrilikler, epoksiler ve polyeşterler oldukça kullanım alanı bulmuşlardır.

Seramiklerde, çimentodan sonra sermetler-ısıt seramikler,  $Al_2O_3$ ,  $Si_3N_4$ ,  $PsZ$ , vb. tür seramik çeşitleri geliştirilmeye başlanmıştır.

Metallerin, seramiklerin ve polimerlerin gelişmesi dolayısıyla, bunların daha üstün ve daha çok çeşitli özelliği bir arada toplayan malzeme olarak kompozit malzemelerin gelişimi de çok hızlandırılmıştır. Havacılıkta özellikle hava-uzay yapı elemanlarında kullanılan kompozitler klasik tür karma malzemedan ayrıldığı için bunlara ileri kompozit malzemeler denmiştir. Ayrıca cam elyaflı plastik malzemeler, karbon fiber takviyeli plastik malzemeler, Kevlar (RP-4) gibi kompozit malzemelerde geliştirilmiştir.

### **2.1.2. Kompozit malzemelerin ana elemanları**

Kompozit malzemelerin üç ana elemanı bulunmaktadır. Bunlar:

- Matriks elemanı
- Takviye elemanı
- Katkı maddeleri

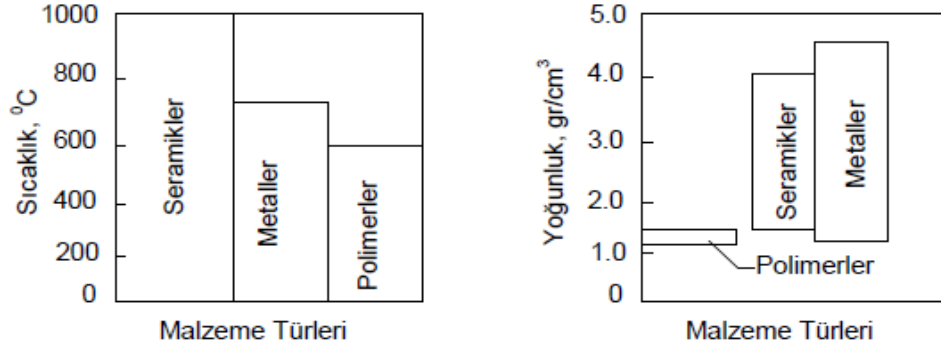
#### **2.1.2.1. Matriks elemanı**

Kompozit malzemelerde matriksin üç temel görevi vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matriks malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Matriks malzemesi, termoset veya termoplastik polimer malzeme olarak ana fazı oluşturur. Termosetler grubunda vinil ester/bifenol, epoksi ve fenolik reçineler ve polyesterler kullanılır. Termoplastik grubunda ise polyamid, polipropilen kullanımı görülmektedir bunun yanı sıra hibrit formda polietilen ve polibütlen tereftalat, polietereterketon ve polietersülfon kullanımı da dikkat çekmektedir(Deniz, 2005).

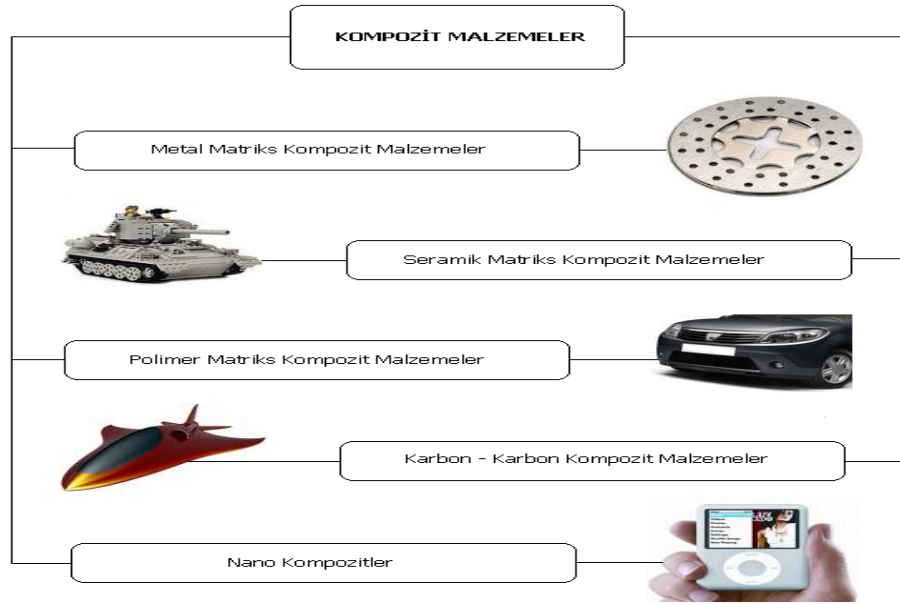
Kompozit malzemelerde polimer esaslı matrikslerin yanı sıra metal, seramik türevi malzemeler de matriks olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin %90'ı polimer matriksli olarak üretilmektedir.

Tüm diğer matriks alternatifleri arasında ticari olarak en uygun olan plastik matriksler ve bunların arasında en çok kullanılanlar termoset esaslı olan polye ester ve epoksi reçineleridir. Şekil 2.2 de bazı matriks malzeme özellikleri görülmektedir.



Şekil 2.2 Matriks malzemelerin özellikleri [Deniz, 2005]

Matriksler güçlü yapıştırma, çevre ve atmosfer şartlarına yüksek dayanım ve yüksek mekanik özellikler gösterirler. Bir matriksin öncelikle sağladığı mekanik özellikler, yüksek sertlik ve yüksek dayanıklılık değerleridir. İyi bir malzeme sert olmalıdır, ancak gevrek davranış göstermemelidir. Bu özellikleri büyük ölçüde karşılayan polimer esaslı matriksler termoset ve termoplastik matrikslerdir. Şekil 2.3 te matriks malzemesine göre kompozitler görülmektedir.



Şekil 2.3 Kompozit malzemelerin matriks malzemesinin cinsine göre sınıflandırılması [Soy,2009]

### 2.1.2.1.1. Reçineler ve özellikleri

Fiber takviyeli kompozit imalatında kullanılan reçineler bazen polimer olarak da anılırlar. Polimerler basit molekül yapılarının oluşturduğu zincir yapılardır. Polimerler; termoplastikler ve termosetler olarak iki gruba ayrılır.

Termoplastikler, metallerde olduğu gibi, yeterli ısı ile eriyen soğutulduklarında da yeniden katılaşabilen yapılardır. Yani geri dönüşümü olan polimer yapılardır. Naylon, polipropilen, polietilen tipik termoplastik örnekleridir.

Termosetler, reçine ve sertleştiricilerin belli oranlarda karıştırılması ve takviye malzemesine nüfuz ettirilmesi ile elde edilir. Bu karışım esnasında reçine ile katalizör arasında geri dönüşümü olmayan kimyasal reaksiyonlar ve bağlar meydana gelir. Katılaştıran termosetler ısı ile bir daha sıvı hale dönüşemezler. Kompozit endüstrisinde en çok kullanılan reçine türleri polyester, vinilester ve epoksidir.

#### 2.1.2.1.1.1. Epoksi reçineleri

Epoksi reçineleri bifenol A ile epiklorhidridin reaksiyon ürünü olup sertleştirici (katalist) ile karıştırıldığında düşük sıcaklıkta veya fırınlama ile (70 – 90°C) belli bir sürede kurluşir ve bir plastik görünümü alır. Önemli özellikleri sıvı, viskoz sıvı veya katı hallerde bulunabilmeleri, elektrik, ısı, kimyasal dirençleri ile mekanik özelliklerinin yüksek olması, hava şartlarından etkilenmemeleridir. Depolanma süreleri genel olarak oda sıcaklığında 24 aydır. Havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları gibi kullanım alanları mevcuttur. Epoksi reçinelerin avantajları şunlardır:

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- Suya dayanımları iyidir.
- Islakken 140°C, kuruyken 220°C 'ye kadar ısı dayanımları vardır.
- Sertleşme sırasında düşük oranda çekme gösterirler.

Epoksi reçinelerin dezavantajları şunlardır:

- Polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdır.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.
- Yüksek maliyet, 5 – 25 \$/kg
- Cilde aşırı zararlıdır.
- Doğru oranlarda reçine ve sertleştirici karışım oranı önemlidir.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilme gibi avantajları sebebiyle yaygın bir kullanım alanına sahiptirler.

### **2.1.2.2. Takviye elemanı**

Matriks malzeme içinde yer alan takviye elemanı kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar.

Aramid, karbon, grafit, boron, silisyum karbür (SiC), alümina, cam ve polietilen malzemelerin kısa veya uzun sürekli elyaf formunda kullanıldığı ve matriksi yaklaşık % 60 hacim oranında pekiştirici işlevi olan malzemelerdir. (Deniz,2005)

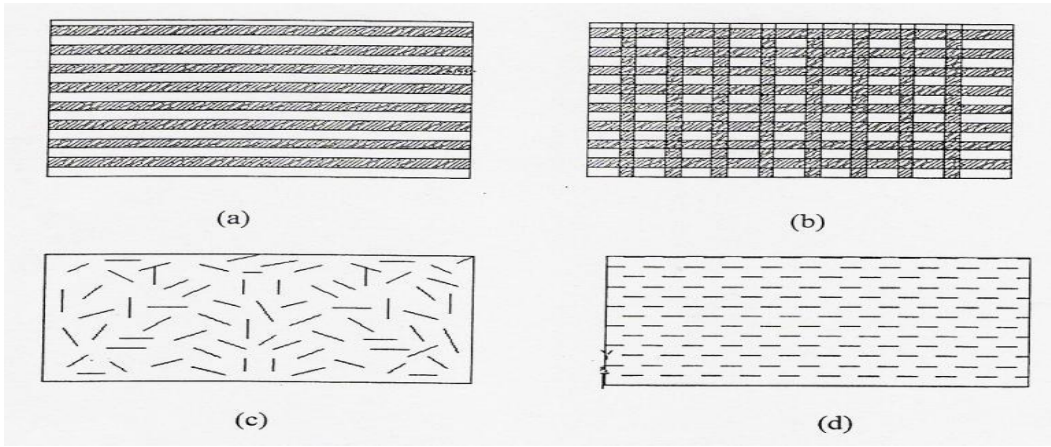
#### **2.1.2.2.1. Elyaf ve özellikleri**

Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok önemli bir faktördür. Takviyeler temel olarak üç farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklar, süreksiz ve sürekli elyaflar.

Parçacık genelde küresel bir biçimde olmamasına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlardadır. Çakıl, mikrobalonlar ve reçine tozu parçacık takviyelerine örnekler arasında sayılabilir.

Takviye malzemelerinin bir boyutu diğer boyutlarına göre daha fazla olduğunda elyaf olarak isimlendirilebilirler. Süreksiz elyaflar birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçülerde olabilmektedir. Çoğu lifin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle elyafın parçacık halden lif haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur.

Sürekli elyaflar ise kesilmeden ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar en yüksek mekanik özelliklerini enlerinden daha çok boylarına gösterirler. Bu özellikler kompozit malzemelerin metallere rastlanmayan aşırı anizotropik malzeme özelliği göstermelerine neden olur.



Şekil 2.4 Değişik tipte fiber kompozitler [Ünal,2005]

- a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber
- b) Örgü formunda fiber
- c) Rastgele yönlü sürekli fiber
- d) Yönlendirilmiş süreksiz fiber

Bazı durumlarda malzemenin dayanımı artırmak, tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek için elyaflar kumaş olarak dokunurlar. Sürekli liflerle hazırlanan dokuma elyaf kumaşlarının farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri vardır.

Cam elyafının günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbonun elyafı kullanılmaktadır.

Karbon elyafı cam elyafına oranla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır. Karbon elyafından daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan ise bor elyafıdır.

Kompozit kombinasyonlarının günümüzde tercih edilmesinin ve kullanımlarındaki artışın mutlak sebepleri sağlamlıkları ve hafiflikleridir. Çeşitli plastik malzemelerin seramik, metal bazen de sert polimerlerin elyafları ile güçlendirilerek ileri derecede faydalar sağlayan malzemeler üretmek mümkündür. İçindeki plastik sayesinde kolaylıkla şekil verilebilen ve takviye elyaflar sayesinde son derece sağlam, sert ve hafif olan bu malzeme kombinasyonları, kompozitler her gün yepyeni uygulama alanlarında karşımıza çıkmaktadırlar.

Ayrıca metallere kıyasla malzeme yorulması, malzeme üzerinde hasarların tolere edilmesi ve korozyona dayanıklılık özellikleri bakımından avantaj sağlamaktadır. Tüm bu faydalarına rağmen kompozitlerin tamamıyla metalin yerine geçmemesinin dört ana sebebi vardır;

1. Titanyum ve çelik gibi metallerin bazı uygulamalarda ihtiyaç duyulan kritik düzeyde ısı, mekanik özellikleri günümüz kompozitleri karşılayamamaktadır.
2. Yeni geliştirilen matriks malzemelerle, elyafların tüm karakteristik özellikleri metaller kadar bilinmemektedir.
3. Bazı karmaşık biçimler düşük maliyetler çerçevesinde üretilmemektedir.
4. Kompozitler kg başına düşen üretim maliyeti rakamları metallerden daha yüksektir.

Polimerler matriks olarak kullanımlarının yanı sıra kompozitler için elyaf üretiminde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek düzeyde sağlamlık katan ve sertlik kazandıran Kevlar (Aramid) bir polimer elyafıdır. Konstrüksiyonlarda hafiflik ve güvenilirlik isteniyorsa aramid elyafı kullanılır. Malzemelerin anizotropik ve izotropik özellikleri uzun lifli elyaflar kullanıldığında liflerin yönlerini değiştirilerek farklı yönlerde farklı mekanik özellikler elde etmek mümkündür. Bu duruma anizotropik özellikler denir.

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca elyaf türleri;

- 1.Cam elyafı,
- 2.Karbon (Graphite) elyafı, (PAN -polyacrylonitrile- ve zift kökenli)
- 3.Aramid (Aromatic Polyamid) elyafı, (Ticari ismi; Kevlar-DuPont)
- 4.Bor elyafı,
- 5.Silisyum karbür elyaf
6. Alumina elyaf

Elyafların bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

- 1.Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.
- 2.Boy/çap oranı arttıkça matriks malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.
- 3.Elastite modülünün çok yüksek olması.

#### **2.1.2.2.1.1. Cam elyaflar ve özellikleri**

Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam, amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis ( $\text{SiO}_2$ ) şeklinde bulunur. Cam eldesi için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken  $1260\text{ }^\circ\text{C}$  civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir.

Elyaflar işlem sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdırlar. Cam elyafı halen aramid ve karbon elyaflarından daha yüksek dayanıklılık özelliğine sahiptir. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafı üretilebilmektedir;

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir.
2. Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
3. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
4. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyaflı kompozitlerde matriks ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
5. Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyaflı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanırırlar.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

**1. A (Alkali) Camı:** A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.

**2. C (Korozyon) Camı:** Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

**3. E (Elektrik) Camı:** Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

**4. S (Mukavemet) Camı:** Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar

Cam elyafının kullanım amacına bağılı olarak elyaf sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafi biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımın artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. [Vatangül, 2008].

Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır. Elyaf ile reçinenin birbirine iyi yapışması çok önemlidir. İyi yapışmamaktan dolayı birbirinden kayan takviye malzemesi ve matriks, kompozit malzemenin sertliğini ve sağlamlık performansını düşürür. Bu durumun engellenmesi için elyaf kimyasallarla kaplanır.

### **2.1.2.3. Katkı maddeleri**

Dolgular, kimyasallar ve diğer katkıları matrikse niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilirler.

Bu gruptaki kompozit malzemeler uçak-uzay, savunma, yapı-inşaat, tüketim mallarında, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, elektrik-elektronik, denizcilik, kara taşıtlarında ve özel amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe giderek artan ve % 6'ya yaklaşan bir uygulama artış hızı görülmektedir(Ünal, 2005).

Asfalt viskoz ve düşük mukavemetlidir. Taş ise sert ve gevrek, kütle halinde fazla şekil değiştirmeden çatlayarak kolayca kırılabilirler. Farklı boyutlardaki kırmataş ile asfaltın birleşerek hem sünek hem de yeter mukavemetli olan yol kaplaması malzemesini oluştururlar.

Tungsten karbür (WC) taneciklerinin Co metali ile yüksek sıcaklıkta basınç altında sinterlenmesi sonucu elde edilen kompozit çok sert olup yüksek hızlı kesme takımı üretimine elverişlidir. Uygulamada bunlara SERMET denir. Uygulamada en önemli kompozitler lifli olanlardır. Liflerin çapları yaklaşık 0,1mm civarında olup tek başına kullanılmazlar. Kalınlıkları arttığında kusur oluşma olasılığı nedeniyle mukavemetleri çok azalır. Bu lifler uygun bir malzemeyle istenen boyutta taşıyıcı kütlelere dönüştürürler. Bu bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir.

Uygulamada donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin çoğu kuvvetli kovalent bağı sahiptir. Aynı amaçla kullanılan metal liflerin mukavemeti de soğuk çekme ile artırılmaktadır. Lifler yönlendirilmiş veya rasgele dağılmış olabilir. Yönlendirilmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak yanal doğrultudan çok daha büyük olur. Pekiştirici liflerin miktarı artıkça kompozitin mukavemeti de yükselir. Yönlendirilmiş liflerde bu oran hacmen %80, rastgele yönlendirilmişlerde ise %40-50 arasında kalır.

### 2.1.3. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin genel olarak avantajları aşağıdaki gibidir:

- 1-Yüksek mukavemet:** Kompozitler yüksek mukavemet değerleri sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir.
- 2. Hafiflik:** Kompozitler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastiklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadır.
- 3. Tasarım esnekliği:** Kompozitler bir tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif ya da fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilir.
- 4. Boyutsal stabilite:** Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar.
- 5. Yüksek Dielektrik Direnimi:** Kompozitlerin göze çarpan elektrik yalıtım özellikleri, birçok komponent'in üretimi konusunda açık bir tercih nedenidir.
- 6. Korozyon dayanımı:** Kompozitler' in antikorozyif özelliği, diğer üretim malzemelerinden üstün olan niteliklerinden biridir.
- 7. Kalıplama kolaylığı:** Kompozit ürünler, çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırmaktadır.

**8.Yüzey uygulamaları:** Kompozit ürünlerde kullanılan polyester reçine, özel pigment katkıları ile renklendirilmek suretiyle, amaca uygun kendinden renkli olarakta üretilebilir.

**9.Şeffaflık özelliği:** Kompozitler, cam kadar ışık geçirgen olabilir. Tam şeffaf olması nedeni ile ışığı yayması sayesinde, diffüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantaj sağlar.

**10.Beton yüzeylere uygulama imkanı:** Beton yüzeylere, kompozitler mükemmel yapıştır. Özellikle, betonun gözenekli olması nedeniyle, kompoziti oluşturan ana malzemelerden polyester reçinenin beton gözeneklerinden sızması ve beton kütle içinde sertleşmesinden dolayı mükemmel bir yapışma sağlanır.

**11.Ahşap yüzeylere uygulama imkanı:** Kompozitler ahşap yüzeylere yapışma özelliğine sahiptir. Ancak ahşabın kuru olması ve stiren ihtiva eden polyester reçine ile iyi bir şekilde emdirilmesi gerekir.

**12.Demir yüzeylere uygulama imkanı:** Demir yüzeydeki pas ve yağ kalıntıları temizlendikten sonra kompozitlerle kaplanabilir. Bu sayede demir ve çelik yüzeyler, kompozitlerle kaplanarak korozyon etkilerinden korunmaktadır.

**13.Yanmazlık özelliği:** Kompozitlerin alev dayanımı, kullanılan polyesterin özelliğine bağlıdır. Alev dayanım özelliğinin arandığı yerlerde “Alev dayanımlı” polyester kullanılmalıdır.

**14.Sıcaklığa dayanım:** Termoset plastikler grubundan polyester reçineler ile yapılan kompozit ürünler yumuşamaz ve şekil değiştirmez. Isı dayanıklılığı kullanılan polyester reçinenin cinsine bağlıdır.

**15.Kompozitler içine farklı malzemeler gömülebilir:** Kompozitler içine demir, ahşap, halat, tel, mukavva, poliüretan sert köpük gibi malzemeler gömülerek mekanik özellikleri farklılaştırılabilir.

**16.Tamir edilebilirlik özelliği:** Tamir izlerinin görünmemesi için, onarım işleminin bir kalıp üzerinde yapılması, ya da onarımdan sonra zımpara veya boya yapılması gerekir.

**17.Kompozitler kesilip delinebilir:** Kompozitler, tahta gibi kolayca kesilir, delinir, zımparalanır. Bu amaçla kullanılan aletlerin sert çelik veya elmas uçlu olması halinde daha iyi sonuç alınmaktadır.

Kompozit malzemelerin bazı dezavantajları ise aşağıda sıralanmıştır:

1. Hammaddenin pahalı olması; Uçaklarda kullanılacak kalitede karbon elyafının bir metre karelik kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$'dır.
2. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesime dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.
3. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
4. Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.
5. Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
6. Sıcak kurutma gerekmektedir.
7. Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır.
8. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir.

#### **2.1.4. Kompozit malzemelerin kullanım alanları**

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanım alanları başlıca şu şekildedir:

- Denizcilik sanayi
- Spor araçları, müzik aletleri
- Korozyona dayanıklı ürünler
- Basınçlı gaz kapları
- Sağlık
- Ulaşım
- Otomotiv
- Formula 1 araçları

- Uzay ve havacılık sanayi
- Silah, roket ve diğer mühimmat sanayi
- Yapı sektörü
- Motorlar, dişli çarklar, özel takımlar, boru tesisatları, nükleer reaktörler
- Elektrik kontak malzemeleri, sürtünme dirençli manyetik malzemeler
- Batarya ızgaraları, elektrik elemanları, ısıtıcılar

## 2.2. Lazer ile Oyma Yöntemi

### 2.2.1. Tanımı ve tarihçesi

Lazer ile oyma yöntemi; foton enerjisinin termal ya da fotokimyasal yollarla işlenecek parçaya ulaştırılması, işlenecek malzemenin eritme ve buharlaştırma (evaporation) yoluyla “atom-atom” işlenmesi ve eriyik malzemenin kullanılan gazla yardımıyla kesim bölgesinden uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir (Berkmanns,2001). Yöntemin malzeme üzerinde oluşturduğu kuvvet mikro seviyededir ve oluşan ısıl etki bölgesi oldukça küçüktür.

İlk katı hal lazeri 1960 yılında A.B.D’li fizikçi T.H. Maiman tarafından yapılmıştır. İlk gaz lazer (Helyum-Neon) ise 1963 yılında yapılmıştır. Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation- Uyarıcı Radyasyon Emisyonu ile Işın Amplifikasyonu-), kızıl ötesinden (IR) başlayıp morötesine (UV) kadar uzanan, ışık şiddeti arttırılmış eş fazlı (coherent yapıda) ışınımlardan oluşan (güneş ve lamba incoherent yapıdadır) bir ışın demetidir. Lazer ışığı, yüksek yoğunluk nedeniyle uzun mesafede çok düşük sapma özelliğine sahiptir (Holthaus, M., 2007).

Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır. Lazer kaynağı olarak kullanılan malzemenin (kristal, gaz, sıvı) atomlarının yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp (pumped) bir üst yörüngeye çıkmaları ve tekrar eski kararlı konumlarına dönmeleri sırasında aldıkları enerjiyi dışarı verme işlemi lazerin ana çalışma prensibini oluşturmaktadır. Verilen enerji kesildiği zaman elektron tekrar kararlı konuma geçer ( bir alt yörüngeye düşer). Bu sırada kazanmış olduğu enerjiyi foton şeklinde yayar. Yayılan bu enerji iki tarafta bulunan yansıtımlı aynalar vasıtasıyla transfer edilir. Bu işlem elektronların tekrar tekrar uyarılması ile devam eder.

Böylece eş fazda şiddeti çok artarak uyarılmış ve o atomun frekans (renk) karakteristiklerini taşıyan güçlü bir ışınım (foton demeti) elde edilmiş olur.

Endüstriyel alanda en çok tercih edilen lazer kesme sistemleri CO<sub>2</sub> ve Nd:YAG (Neodymium- Doped Yttrium Aluminium Garnet) lazerleridir. CO<sub>2</sub> lazerlerde ( dalga boyu: 10600nm) lazer ışık hüzmesi, rezonatör (lazer kafası) içinde CO<sub>2</sub>, He ve N<sub>2</sub> gazlarının karıştırılması sonucu üretilir. Üretilen lazer hüzmesini çevresel etkilerden korumak için, hüzmenin izlediği yol genellikle basınçlı ve yüksek kaliteli hava veya nitrojen gazı yardımıyla desteklenir. Kullanılan yansıtıcı aynaların konumlandırma güçlükleri nedeniyle CO<sub>2</sub> lazerlerden çoğunlukla 2D uygulamalarda yararlanılmaktadır.

Nd:YAG lazerlerde (dalga boyu: 1064nm), rezonatör gazları yerine neodymium içeren YAG kristalleri kullanılmaktadır. Lazer hüzmesi, kullanılan bu kristal yardımıyla üretilir. Nd:YAG lazerlerin en büyük iki avantajı, çok hassas işlemler için kullanılabilir olmaları ve lazer hüzmesinin fiber optik kablolar yardımıyla taşınabilir olmasıdır. Bu nedenle, Nd:YAG lazerle robotik uygulamalar için oldukça uygundur(Hallum, D.L., 2008).

### **2.2.2. Lazer tezgahı ve kısımları**

Lazer makinaları, kullanılan lazer teknolojisi ile belirli malzemelerde, iki veya üç boyutta, sınırsız geometrilerde kesim olanağı sağlayan, yüksek hassasiyetli, düşük ısı kayıplı makinalardır. Lazer kesim makinası 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Lazer ışınının üretildiği rezonatör, makine gövdesi ve hareketli eksenler, ışının tarayıcı kafaya kadar iletiildiği optik sistemden oluşmaktadır.

#### **2.2.2.1. Rezonatör (Işın kaynağı)**

Endüstriyel lazerlerin birçoğunda, lazer ışınının oluşabilmesi için özel gazların kullanılması gereklidir. Gazın kalitesi ve seçimi, lazerin güvenilirliğini ve işlemin verimliliğini doğrudan etkilemektedir(Sümen,H.,2010). Lazer gazları genellikle, yüksek saflıkta özel gazlardır. Lazer gazları, makinaya ayrı ayrı tüplerde ya da önceden belli oranlarda karıştırılmış olarak verilmektedir. Bu ön karışma ya da gazların ayrı tüplerde verilmesindeki işlem parametreleri ( gaz debisi, basınç saflığı vb.) her lazer makinası üreticisi tarafından belirlenir ve o şartlarda makinaya verilmektedir.

Karbondioksit lazerini oluşturan gazlar; karbondioksit, azot ve helyumdur. Bazı lazer gazları dört ya da beş bileşen içerebilir (Ortama; CO<sub>2</sub>,N<sub>2</sub> ve helyumun dışında CO, H<sub>2</sub> ve Ne eklenebilir)(Sümen,H., 2010).

Lazer kesim tezgahlarında 3 tip lazer ışın kaynağı kullanılmaktadır. Teknoloji gelişim sırasına göre:

- 1) Standart CO<sub>2</sub> lazeri
- 2) Slab lazer
- 3) Fiber lazer

Bu lazer ışın kaynaklarının ilk üretilen tipi olan standart CO<sub>2</sub> lazerler, dışarıdan sürekli gaz beslenmesine ihtiyaç duyarlar. Gaz tüketimi slab lazer ve fiber lazere göre yüksektir. Lazer ışını, slab ve fiber lazerlere oranla daha fazla yayılım gösterir. Bu tip rezonatöre sahip lazer makinalarında ışın yolu uzun ise ışın saçılımını dengelemek için, ek olarak odaklayıcı ve doğrultucu elemanlar kullanılmaktadır. Bu elemanlar, ek maliyet, periyodik bakım-değişim ve servis maliyeti gerektirmektedir.

Standart ve slab lazer kullanılan kesim makinalarında ışın kesme kafasına ayna sistemiyle taşınır. Aynalar üzerinde her bir aynada ışının bir miktarı ısı enerjisine dönüşür. Oluşan ısı aynaların içinde bulunan su kanallarından, su akışı sağlanarak soğutulur.

Fiber lazerlerin avantajları, gaz tüketiminin olmaması ve üretilen lazer ışınının tarayıcı kafaya aynaya gerek kalmadan fiber optik kablo ile taşınmasıdır. Fiber optik kablolarda güç kaybı olmamakta dolayısıyla ilave olarak soğutma sistemine gerek kalmamaktadır. Enerji verimlilikleri çok daha yüksektir (örn. Ortalama olarak 1 kW lazer enerjisi için CO<sub>2</sub> lazerleri 10 kW elektrik enerjisi tüketirken fiber lazer 3-4 kW elektrik enerjisi tüketir)( Zheng, H.Y. et al., 2009). Ancak fiber lazerlerin üretim maliyetlerinin şimdilik yüksek olması dezavantaj teşkil etmektedir. Ayrıca fiber lazerlerde 40 kW enerjilere çıkılabilmektedir ve fiber lazerlerin standart dalga boyu CO<sub>2</sub> lazerlere göre 10 kat daha düşüktür.

### **2.2.2.2. Makine gövdesi ve hareketli eksenler**

Kesintisiz sürekli işleme kalitesi, pürüzlülük ve hassasiyetin korunması için makina gövdesinin, eksen hareketlerinden ve dış ortamdan gelen harici titreşimlerden etkilenmemesi gerekir.

### **2.2.2.3. Optik sistem**

Işının lazer ışın kaynağından başlayıp tarayıcı kafadan çıkana kadar izlediği yoldur. Kullanılan rezonatör tipine göre düz aynalar, odaklayıcı ve doğrultucu aynalar, ışın yolu ve lensten oluşur. Bakım ve kalitesine göre hemen hepsinin belli ömürleri vardır ki işleme maliyetlerine ciddi etkendir( Dubey, A.K., 2008).Fiber lazerlerde optik sistem; fiber kablo, kolimatör mercek ve kesim kafasından oluşur, ayna maliyeti yoktur.

Lazer ile yapılan üretim hem otomasyonu sağlamakta hem de üretim hatasını azaltmaktadır. Lazerin çeşitli tezgahlarda uygulamasıyla üretim 24 saat yapılabilmekte, seri üretim sağlanmasıyla da üretim maliyetleri azalmaktadır. Özellikle lazerle yapılan işlemlerde birçok kalıp ve ayardan tasarruf edilir.

Lazerin avantajlarından bazıları; kesme kalıp ve aparatı gerektirmemesi ve iş parçası yüzeyinin pürüzsüzlüğü olarak sayılabilir. Küçük bir nokta şeklinde yüksek yoğunluklu lazer ışını oluşmaktadır ve ısınma bu yoğun enerjiye rağmen çok az gerçekleşmektedir( Majumdar, J.D., 2003).

### **2.2.3. Lazer ışını ile işleme parametreleri**

Lazer ışını ile işleme yönteminde kaliteli bir işlemin gerçekleştirilebilmesi için birçok parametrenin optimize edilmiş olması çok önemlidir. Bu parametreler üç ana başlık altında tutulabilir. Bu ana başlıklar lazer parametreleri, proses parametreleri ve makine parametreleri olarak ayrılabilir(Wang, X., 2010).

Lazer parametreleri olarak aşağıdaki etmenleri saymak mümkündür:

- Lazer gücü
- Güç yoğunluk dağılımı
- Güç stabilitesi
- Lazer ışınının kesiti
- Sapma açısı
- Polarizasyon

Lazer ile işleme yönteminde proses parametreleri olarak aşağıdaki etmenler sayılabilir:

- İşleme hızı
- Kullanılan gaz tipi
- Gaz basıncı
- Odaklama noktası

Makine parametreleri ise aşağıdaki gibi sayılabilir:

- Lazer ışınının çıkış aynası
- Işın ayarı
- Işın yönlendirme aynaları
- Odaklama mercekleri

gibi etmenlerdir.

### **2.3.Yapıştırma**

Kompozit yapıları birleştirmede genellikle yapılan iki tür yöntem vardır. Bunlar mekanik bağlantı ve yapıştırma işlemleridir. Mekanik bağlantı işleminde kompozit parçalar üzerinde bir dizi delik delinir ve delinen bu delikler gerilme konsantrasyonunun artışına neden olabilir(Brack, N., 2012).

Yapıştırma işleminde ise yük ve gerilmeler kompozit parçalara üniform olarak daha geniş bir alana yayıldığından dolayı yapıştırma işlemi mekanik bağlantıya göre daha verimlidir.

Yapıştırıcı ile birleştirme artan yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapışkan eklemlerin özellikleri havacılık, otomotiv ve mühendislik gibi sektörlerde onları cazip hale getirmektedir. Mekanik olarak tutturulmuş eklem ile karşılaştırıldığında, yapıştırıcı eklem avantajları, stres dağılımlarının ve yüklerin daha muntazam bir dağılım göstermesi ve yorulma özelliklerinin daha iyi olması olarak sıralanabilir( Kim, J.K., 2003).

Kompozit yapılar diğer yapılarla birleştirilecek olduğunda yüzeylerine onarım, tedavi gibi birtakım işlemler yapılabilir. Genel olarak, mekanik aşınma yöntemi kompozitlerin bağlanma performansını geliştirmek için kullanılmıştır. Ayrıca plazma ve alev işlemi vb. kimyasal işlemlerde kompozit malzemelerin yapışma mukavemetini arttırmak için yapılan diğer işlemlerdir.

Aramid fiberler yüksek mukavemet ve düşük termal genişleme katsayısına sahip olduğundan, yapıştırıcıların mukavemeti ve rijitliği fiberlerle desteklenmiş yapıştırıcı tabakalarıyla arttırılabilir. Kür işlemi sırasında oluşan termal gerilmeleri azaltır. Bu da yapışma tabakasının yapışma performansını arttırmak için yapılan bir başka durumdur. Aynı zamanda takviye edici elyaflar ve epoksi reçine arasındaki ara yüzey yapışma mukavemeti kompozit malzeme ve yapışkan tabakanın özelliklerini belirlemek için önemlidir. Yapışma performansını arttırmada yalnızca aramid fiberler kullanılmaz fakat aramid fiberlerin düşük yoğunluklarından dolayı karbon fiber kompozitlerin kompozit tabakalar arası ve ara tabakalar arası yapışma mukavemetini geliştirmek açısından kullanılabilir.

Ayrıca karbon siyahı gömme, kompozit malzemelerin yapışma mukavemetini arttırıcı bir diğer yöntemdir. Buna ek olarak akıllı kür döngüsü kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirerek daha iyi yapışma sağlar ve termal gerilmeleri azaltır (Park, S.W., 2009).

### 3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR (LİTERATÜR ÖZETİ)

Choi ve Lee yaptıkları bir çalışmada karbon fiber epoksi kompozitleri rastgele dizilmiş aramid fiberler ile takviyelendirilerek yapışma mukavemetinin artırılmasını amaçlamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda rastgele yönlendirilmiş aramid elyafı ile takviyelendirilmiş kompozit ile yüzey modifikasyonu yapılmamış kompozit kıyaslanmıştır. Sonuç olarak aramid elyafı ile yüzey modifikasyonu yapılan numunenin daha faydalı bir yapışma sağladığı tespitine ulaşılmıştır (Choi, I., Lee, D.G., 2013).

Seyedmohammad ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, çekme yükü altındaki fiber takviyeli kompozit laminatlar üzerinde olan derin bir çizik hasarının onarımı için uygun teknikler incelenmiştir. Bu çalışmanın genel amacı hasarlı kompozit malzemeye yapılan onarımın rijitlik ve yapışma mukavemeti gibi özelliklerini incelemektir. Deney sonuçları incelendiğinde iki tabakalı olarak yapılan yama ile malzemenin önemli yük artışlarına dayanıklılık sergilediği görülmüş ancak iki tabakadan fazla yapılan yamalarda ikincil eğilme etkilerinin söz konusu olabileceği sonucunu ortaya koymuştur (Seyedmohammad, S., El-Hajjar, R.F., 2013).

Pinto ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, kenevir takviyeli epoksi tabakalı kompozitlerin yüzeylerine uygulanan yüzey işlemlerinin ve mikrofiber desteklerinin tabakalar arası hasar ve delaminasyon direncine etkisini incelenmiştir. Çekme ve düzlem-içi kesme testleri de mekanik özellikleri üzerinde kalınlık boyunca takviye etkisinin daha bütünsel bir şekilde anlaşılmasını sağlamak için yapılmıştır. Sonuç olarak yüzey işlemleri, aşılama, alkali yıkama ve silanın kombinasyonu kenevir / epoksi kompozit tabakalarda ara yüz bağ kuvvetini artırarak %10 ayrılma direncini arttırmıştır. Örgü şeklinde takviyelendirilmiş kumaşlar düz yönlü kumaşlara göre %28 daha iyi tokluk göstermiştir (Pinto, M., et al., 2013).

Li ve Sullivan yaptıkları bir çalışmada, tek tur bağlantıları sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler genellikle ortak örnekler ve/veya tam alan bir Moire girişim ölçümü tekniği kullanılarak yapışkan soylarının ölçümü yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı, düzlemsel gerilme ve gerinme şartları altında birleşme yapışmasını belirlemektir.

Bunlara ek olarak diğerk faktörler sınır koşullarında geometrilerin üst üste örtüşmesi, yapışma modülü, üst üste örtüşen kenarlarda eğilme moment faktörü ve yapışmadan dolayı oluşan gerilmelerde incelenmiştir (Li, G., Sullivan, P.L., 2001).

Sonlu elemanlar metodu yöntemiyle yapılan sonuçlarda düzlemsel gerilme ve gerinme, eğilme moment faktörü değerleri analitik çözümde yapılan sonuçlar ile birbirine yakın çıkmıştır. Analitik çözümde Oplinger metodu kullanılmıştır. Oplinger ve sonlu elemanlar metodu karşılaştırıldığında, Oplinger ve analitik çözümün kabuk gerilmeleri için oldukça yakın tahminler verdiği, ancak sonlu elemanlar simülasyonlarının daha yüksek yapıştırıcı kayma gerilmesi tahmin etme eğiliminde olduğu görülmüştür. Kayma gerilmeleri hafifçe artarken, yarıçap olan bölgelerde yapışma gerilmeleri azalmaktadır (Li, G., Sullivan, P.L., 2001).

Tong ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, incelenen yapı, her kat için tek yönde düzenlenmiş kuru lifler ve enine yönde %10 karbon fiber içeren lifler ile beraber düzenlenmiştir. Dikişli örneklerde, kumaş zigzag deseni kullanılarak üst üste binme bölgesinde enine biçimde dikilmiştir. Deneysel sonuçlar, dikişli tek turluk birleşmiş numunelerin gerilme dayanımlarının, dikişsiz numunelerden %20 daha fazla olduğunu gösterdi. Buna ek olarak, dikişli örneklerin ortalama aksenal yer değiştirmesi, dikişsiz numunelerden %25 daha büyük olmuştur. Sem mikroskopisi ile incelenen fotoğraflardan çıkan sonuca göre baskın olan temel etmenin mod 1 hasar mekanizması olduğu tespit edilmiştir (Tong, L., et al., 1997).

Kong ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, yapışma hattı boyunca oluşan normal gerilme, kayma gerilmesi, stres dağılımları ve yorulma özellikleri üç boyutlu analiz programında incelenmiştir. Ayrıca, kalınlık, elastik modülü ve yapıştırıcıların Poisson oranlarına etkileri ve klivaj ekleme yapışkan tabakanın 3D stres durumu da araştırılmıştır. Sonuç olarak yapıştırıcı kalınlığının artması ile normal gerilme değerleri de yükselmiştir. Ayrıca yapıştırıcının poisson oranı ve elastisite modülünün artması ile de normal gerilme bileşenlerinin pik değerleri artmıştır. Bununla birlikte 3 boyutlu programlarla yapılan analiz yapışma hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarını gözlem problemi içinde yararlı olmaktadır (Kong, F., et al., 2007).

Panigrahi ve Pradhan yaptıkları bir çalışmada, yapıştırma ile birleşimleri yapılmış tek tur tabakalı fiber ile güçlendirilmiş kompozit eklemlerin delaminasyon genişliğinin delaminasyon yayılmasına etkileri 3 boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri yapılarak incelemiştir. FRP tabakalı kompozit yapıştırıcılarda birleşme bölgesine bitişik uç noktalarda bulunan gerilme nedeniyle delaminasyonların geliştiği gözlemlenmiştir. (Panigrahi, S.K., Pradhan, B., 2009).

Reis ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, tek tur bağlantıların mukavemetlerine, elastisite modülü ve akma mukavemetinin etkisi araştırılmıştır. Üç farklı madde (alüminyum, yüksek elastik sınır çelik ve karbon / epoksi kompozit), altı farklı kombinasyonda mekanik mukavemet ve hasar mekanizmaları açısından test edilmiştir (Reis, P.N.B., et al., 2011).

Yapılan incelemede farklı yapışkan karbon / epoksi kompozit, yüksek elastik limit çelik Docol 1000 ve 6082-T6 alüminyum alaşım ile tek tur bağlantıların kesme direnci Reis ve arkadaşları tarafından tespit edildi. Söz konusu çalışmada yüksek rijitlikte yapıştırıcılar kullanılarak yüksek kayma mukavemetleri elde edilmiştir. Numerik analizler sonucunda birleşim için kullanılan yapışkanın rijitliği arttıkça yapıştırılan numunenin rotasyonu düşer ve yapışkan içinde daha homojen bir gerilme dağılımı sağlar. Rijitlik artışı birleşimin mukavemetini artırır ancak verim stres etkisi bu kriterden çok daha önemlidir (Reis, P.N.B., et al., 2011).

Encinas ve arkadaşları, uçak yapımında kullanılan iki farklı kompozit, cam ve karbon fiber takviyeli epoksi reçineler ile güçlü bir yapışma mukavemeti elde etmek amacıyla farklı yüzey işlemlerine tabi tutmuşlardır. Fiziksel olarak yapılan aşındırma işleminde T-9 grid alüminyum oksit zımpara ve 240 grid alüminyum oksit raspa kullanılmıştır. Mod I testleri yapılarak, yapıştırılarak onarılmış sistemin kırılma dayanıklılığı, hasar mekanizmaları ve yüzey işlemleri sonrası yapışma mukavemetleri incelenmiştir. Sonuçlarda mekanik aşındırmanın yüzeydeki yapışmayı engelleyici florin tabakasını kaldırarak yapışma mukavemetinin arttığını göstermiştir (Encinas, N. et al., 2014).

Kim ve arkadaşları yapılan bir başka çalışmada yardımcı kütleme ve ikincil bağlama yöntemi kullanılarak birleşimi sağlanan numunelerin mekanik özellikleri incelemiştir.

Yapılan deneylerde hasar sürecinde malzemelerin hasar modları, yapışma mukavemetleri, bağ hattı kalınlıkları, mekanik aşındırma ve radyuslu bölgeler gibi parametrelerin yapışma mukavemetine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma ikincil bağlama yönteminin yardımcı kürleme yönteminden daha mukavemetsiz olduğunu göstermiştir (Kim, K.S., Yoo J.S., et al., 2006).

Yi ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada, tek tur yapıştırılmış kompozit bağlantılarda, yapıştırıcının yapışma mukavemeti ve çeşitli bağlama yöntemlerine göre plastik davranışını inceleyerek hasar metodolojisini tahmin edilmiştir. Yapışma gücü ve yapışkan tabakanın plastik davranış etkileri de sayısal olarak incelenmiştir. Hasar tahminleri sonlu elemanlar analizinde önerilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hasar modu ve mukavemetle ilgili yapılan tahmin sonuçları ile yapılan test sonuçları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Sayısal analiz sonucunda daha güçlü bir yapıştırıcı kullanarak daha mukavemetli birleşimler için yeni bir bağlantı gücü iyileştirme tekniği geliştirmek gerektiğini ortaya çıkarmıştır (Kim, K.S., Yi, Y.M., et al., 2008).

Panigrahi ve Pradhan bir çalışmada, kaynaklı zararların başlangıcını ve gelişimini incelemek için üç-boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri grafit / epoksi kompozit çift tur bağlantıların yapışma yetmezliği ve delaminleştirme yapılmıştır. Tsai-Wu hasar kriteri kullanılarak yapışma sorunu veya delaminasyon hasarının olabileceği kritik bölgeler tespit edilmiştir. Numunelerin mod I testleri yapılarak çıkan deney sonuçları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak maksimum düzlem gerilmesi, numune ile yapışkan tabaka arasındaki yüzeyde meydana gelmiştir. Örtüşme bölgesinin içinde olan delaminasyon ile dışında olan delaminasyon karşılaştırıldığında örtüşme bölgesi içinde olan delaminasyonun daha tehlikeli olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak çift tur bağlantılarda yapışma hasarı ve delaminasyon hasarı kıyaslandığında yapışma hasarının daha tehlikeli olduğu tespit edilmiştir (Panigrahi, S.K., Pradhan, B., 2008).

Sarıkanat ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, onarım esnasında işlem gören bölgelerin yüzey pürüzlülüklerinin onarım kalitesine etkisi incelemiştirlerdir. Farklı pürüzlülük değerlerine sahip ara yüzeylerin yapışma kabiliyetini ve dolayısı ile onarım kalitesini belirlemek için tek yönlü cam fiber takviyeli epoksi kompozit plakaların mod-I ve mod-II tabakalararası kırılma tokluğu deneyleri yapılmıştır.

Aynı deneyler hasarsız (onarılmamış) plakalar için de yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, onarım yapılacak yüzeyin pürüzlülüğü arttıkça tabakalararası kırılma tokluğu değerlerinin arttığı görülmüştür (Atas, C., Sarıkanat, M. et al., 2011).

Aymerich ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, deneysel ve sayısal analizlerle, eş-kürleme yapılan tek tur bağlantıların kırılma davranışı üzerinde seçici dikiş etkisini değerlendirmek ve tanımlamak için model oluşturmuş, delamine eklemlerin geçiş bölgesinin mekanik olarak yük altında hasar toleransı üzerindeki etkisi araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, dikişin tek tur eş kürleme bağlantıların statik güçlerini artırmadığı ancak önemli ölçüde yorulma ömürlerini uzatıldığı görülmüştür. Delamine bağlantıların yorulma hasar toleransları delaminasyon yayılımlarının geciktirilmesi ile geliştirilir. Dikişli eklemlerde yorulma çatlak ilerlemesi, Paris güç hukukunu ile tahmin edilebilir (Aymerich, F., Onnis, R., Priolo, P., 2006).

Dransfield ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, karbon epoksi kompozitlerin delaminasyon dayanıklılığı, dikişli ve dikişsiz halde çift konsol giriş kullanılarak araştırmışlardır. Deneylerde değişen dikiş yoğunlukları, iplik çapı ve iplik türü gibi kriterler incelenmiştir. Dikişli ve dikişsiz numunelerin dayanım değerleri karşılaştırıldığında, dikişin 15 kata kadar numunelerin dayanıklılığını geliştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, deneysel sonuçlar önceden yapılan mikromekanik-tabanlı model teorik tahminleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların olumlu olduğu görülmüştür (Dransfield, K.A., Jain, L.K., Mai, Y.W., 1998).

Antonson ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, kompozit numunelere dört farklı bitirme/parlatma işlemi uygulayarak farklı yüzey pürüzlülükleri elde etmiş ve elde edilen bu pürüzlülüklerin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi göz önüne alınarak bu dört farklı durumu kıyaslamışlardır. Yapılan yüzey işlemlerinden sonra yüzey pürüzlülüğü ve parlaklık temel ölçüm değerleri kaydedilmiştir. Her durum için bir numune SEM altında incelenmiştir. Yüzey işlemleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler, işlemler yapılmadan önceki mekanik özelliklerden daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Antonson, S.A. et al., 2011).

Panigrahi yaptığı bir çalışma, kırılma mekaniği ilkelerini kullanarak delamine yapışan tek tur bağlantıların yapısal tasarımını kapsamaktadır. Yapılan tasarımlarda tabakalar arası gerilmeler ve gerilim enerjisi yayılım oranı delaminasyon hasarını karakterize eden iki parametre olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda delaminasyon hasarları ya daha önceden numune içinde mevcut olan yerlerde ya da tabakalar arası yapışma sınırlarında oluşmuştur. Deneysel sonuçlara göre alt tabakada oluşan delaminasyon hasarı üst tabakadakine göre daha zararlı olmaktadır (Panigrahi, S.K., 2013).

Zielecki ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, S235JR çeliğinin yüzey topoğrafisinin kayma mukavemeti üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çelik üzerine birtakım yüzey pürüzlülük işlemleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yapışkanın kayma mukavemetindeki iyileşmenin, mekanik olarak numune yüzeyine yapılan raspalama işleminden kaynaklanabileceği ve yapışma yüzey alanının artması ile kayma mukavemet değerlerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır (Zielecki, W., et al., 2013).

Guler ve Duran yaptıkları bir çalışmada, farklı tozlar kullanarak kompozit reçine dolgulu materyallerin yüzeylerini hava ile parlatmış ve farklı yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri profilometre yardımıyla yapılmıştır. Bu yüzey pürüzlülük değerlerinin kompozit reçine dolgulu materyallerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyler sonucunda hava ile parlatma uygulaması sonucunda bütün numuneler için yüzey pürüzlülük değerleri artmış ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına mukabil kompozit numunelerin mekanik özellikleri de iyileşmiştir (Guler, A.U., Duran, I., et al., 2010).

Mobarak yaptığı bir çalışmada, 24 saat boyunca yaşlandırılmış siloran bazlı kompozitlerde, yüzey pürüzlülüğü ve yapışkan sistemlerin onarım sonrası yapışma mukavemetine etkisi incelemiştir. Yapılan testler sonucunda 0 hipotezinin de desteklediği gibi yüzey pürüzlülüğü ve onarım malzemesindeki fark ile siloran bazlı reçine kompozitlerin yapışma mukavemeti arasında bir bağlantı bulunmadığı sonucuna ulaşılmıştır (Mobarak, E.H., 2012).

Yukimoto ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, mod 2 yük etkisi altındaki numunelerde mikrodese ve yapışkan özelliklerinin ara yüzey kırılma dayanıklılığı ve çatlağın yayılmasına etkisini incelemiştir.

Farklı mekanik özelliklere sahip olan iki yapıştırıcı kullanarak mikroyapılarında meydana gelen kalıp içindeki yüzey değişimleri, kırılma davranışları ve boy oranları incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda kırılma tokluğu daha iyi olan yapışkanın yüzey kırılma dayanımının daha iyi olduğu ve diğer yapışkana göre çatlak ilerleme hızının daha yavaş olduğu tespit edilmiştir (Yukimoto, Y., Matsuzaki, R., Todoroki, A., 2014).

Beylergil ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, cam fiber takviyeli kompozitlerin ara yüzeyleri, cam fiber içeren kompozit bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış ve yapışma mukavemeti deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. İki tip bağlantı incelenmiştir. Birincisi ara yapışkansız tek tur bağlantı, diğeri ise fiber pimi kullanılarak yapılan bağlantı tipidir. Deneysel ve nümerik sonuçlar incelendiğinde fiberlerin kompozit bağlantıların mukavemet ve hasar tolerans değerlerini oldukça iyi bir şekilde geliştirdiğini göstermiştir (Beylergil, B., Cunedioğlu, Y., Aktas, A., 2011).

Tang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, kalın kompozit plakaların, kalın yapışma hattı ile yapılan tek tur bağlantıların statik ve yorulma davranışlarını nümerik ve deneysel olarak incelenmişlerdir. Yapışkan kalınlığı ve yapıştırıcının yorulma ömrüne etkisi kriterleri dikkate alınmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, hasarın yapışkan ile yapıştırıcı arayüzünde meydana geldiği ve çatlağın bu arayüze en yakın birinci katmandan başlamak üzere yayıldığı gözlemlenmiştir. Statik değerler ve yorulma dayanım değerleri yapışma bağ hattının artması ile artmıştır. (Tang, J.H., Sridhar, I., Srikanth, N., 2013).

Gultekin ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, farklı tek tur bağlantı yapılandırmalarının mekanik özellikleri ve farklı yapışkan kalınlığı değerlerini çekme yükü altında deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda yapışkan kalınlığının ve yapışma alanının artması ile yük taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen veriler ile deneysel sonuçların çoğunlukla tutarlılık sağladığı görülmüştür (Gultekin, K., Akpınar, S., Ozel, A., 2014).

## **4. MATERYAL-METHOD**

### **4.1. Materyal**

Bu çalışmada kompozit plaka üretiminde vakum destekli reçine infüzyon metodu kullanılmıştır. Reçine olarak epoksi, takviye malzemesi olarak tek yönlü cam elyaf kullanılmıştır.

### **4.2. Yöntemler**

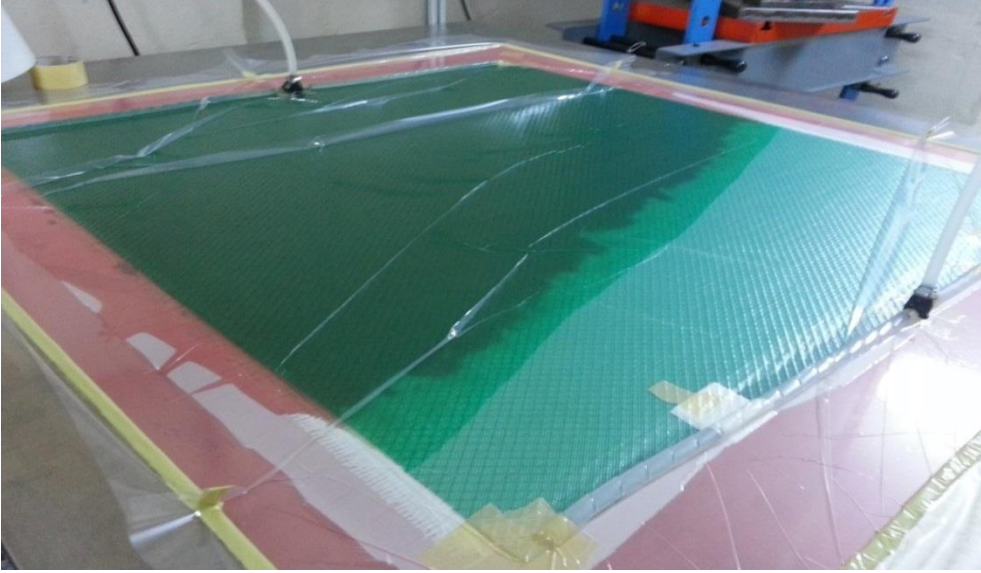
#### **4.2.1. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile kompozit plakaların üretilmesi**

Bu çalışmada, vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak tek yönlü cam fiber ve epoksi reçine kullanılarak tabakalı cam elyaf kompozit plakalar üretilmiştir (Şekil 4.2.).

İlk olarak cam elyaf kumaşın üretim yapılacak zemine yapışmaması için polyefin film bandı üretim zemini üzerine serildi. 1m<sup>2</sup> si 300 gram olan cam elyaf kumaştan 10 tabakalı olarak cam elyaf kumaşlara epoksi reçine vakum altında nüfuz ettirilerek kompozit plakalar üretilmiştir. Reçine sistemi LY 1564 Huntsman işlenmemiş sıvı epoksi ve Aradur 3487 sertleştirici olarak iki bileşenden oluşmaktadır. Reçine içindeki epoksi ve sertleştiricinin (hızlandırıcının) ağırlıkça oranı %78 LY 1564 epoksi, %22 Aradur 3487 sertleştirici şeklindedir.

Reçine karışımı, kumaşlar, vakum reçine infüzyon sistemi hazırlandıktan sonra vakum ünitesi çalıştırılarak sistem vakumlandı. Üretim zemininin sıcaklığı 40°C ye getirilerek vakumlama ile beraber ön ısıtma yapıldı. Bunun sebebi kumaşlar arasında reçine akışının kolaylaştırılmasıdır. Vakum ünitesi çalıştırılarak reçine kumaşlara emdirilir. Bu esnada sıcaklık kademeli olarak 40°C den 90-100°C ye çıkar. 90-100°C de 30 ile 45 dakika arasında kürleşme işlemi sürer. Kürleşme aşaması tamamlandıktan sonra plaka soğuma aşamasına geçmiş olur. Soğuma aşamasında sıcaklık kademeli olarak azalarak oda sıcaklığına ulaşır. Soğuma evresi de yaklaşık 30 dakika civarında sürer.

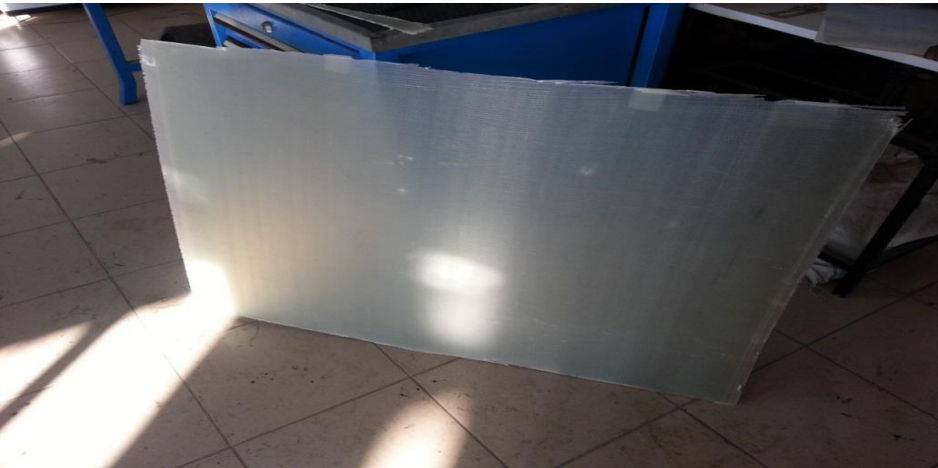
Oda sıcaklığına ulaşmış olan plaka yüzeyinden diğer filmler soyularak, 10 tabakalı cam elyaf kompozit plakalarımız üretilmiştir. Plakanın ortalama kalınlığı 2.3mm civarındadır ( Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle kompozit plaka üretimi

#### 4.2.2. Testere ile plakaların numune boyutlarına kesilmesi

Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiş her biri 1m<sup>2</sup> olan 10 tabakalı cam elyaf kompozit plakalar standartlara uygun olarak Falkon P251 elektrikli testere yardımıyla 150x25mm olan numune boyutlarına kesilmiştir.



Şekil 4.2. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile üretilmiş plaka

Numune kesimi için kullanılmış olan Falkon P251 elektrikli testere tezgahının teknik özellikleri Çizelge 4.1 de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Falkon P251 elektrikli testere tezgahının teknik özellikleri

<b>Voltaaj (V)</b>	230
<b>Frekans (Hz)</b>	50
<b>Güç (KW)</b>	1,28
<b>Testere mili hızı (d/dak)</b>	2800
<b>Max. testere çapı (mm)</b>	250
<b>Min. testere çapı (mm)</b>	200
<b>Mil çapı (mm)</b>	25,4
<b>Max. kesme uzunluğu (düz) (mm)</b>	940
<b>Min. kesme uzunluğu (eğimli) (mm)</b>	665
<b>Max. kesme derinliği (90 derece) (mm)</b>	67
<b>Max. kesme derinliği (45 derece) (mm)</b>	47



Şekil 4.3. Falkon P 251 elektrikli testere tezgahı

### 4.2.3. CO<sub>2</sub> lazer ile numunelerin işlenmesi

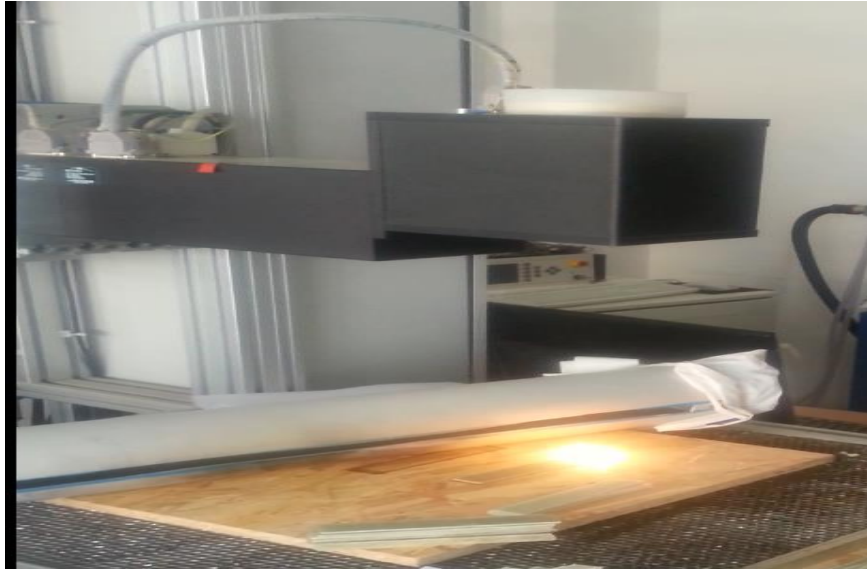
#### 4.2.3.1. CO<sub>2</sub> lazer parametreleri

150x25mm olarak 10 tabakalı cam elyaf kompozit plakadan testere ile kesilip hazırlanmış kompozit plakalar CO<sub>2</sub> lazer ile işlenmiştir. Lazer ile numune yüzeylerine kanallar oluşturulmuştur. Bu işlemler için kullanılan lazer tezgahının bilgileri ve lazer işleme parametreleri Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Lazer tezgah bilgileri ve işleme parametreleri

<b>Lazer çalışma alanı</b>	400x400mm
<b>Lazer gücü</b>	150-180W
<b>Tarama sıklığı</b>	0.30mm
<b>Frekans</b>	5kHz
<b>Markalama hızı</b>	500mm/sn
<b>Işın dalga boyu</b>	10600nm
<b>Lazer tüpü</b>	150W Coherent E150 diamond CO <sub>2</sub>
<b>Tarayıcı kafa</b>	Rayleigh BO300

Numune yüzey işlemlerinde kullanılan Coherent E150 CO<sub>2</sub> lazer tezgahı Şekil 4.4. te verilmiştir.

Şekil 4.4. Coherent E150 CO<sub>2</sub> lazer tezgahı

#### 4.2.3.2. CO<sub>2</sub> lazer ile numune yüzeylerine kanalların açılması

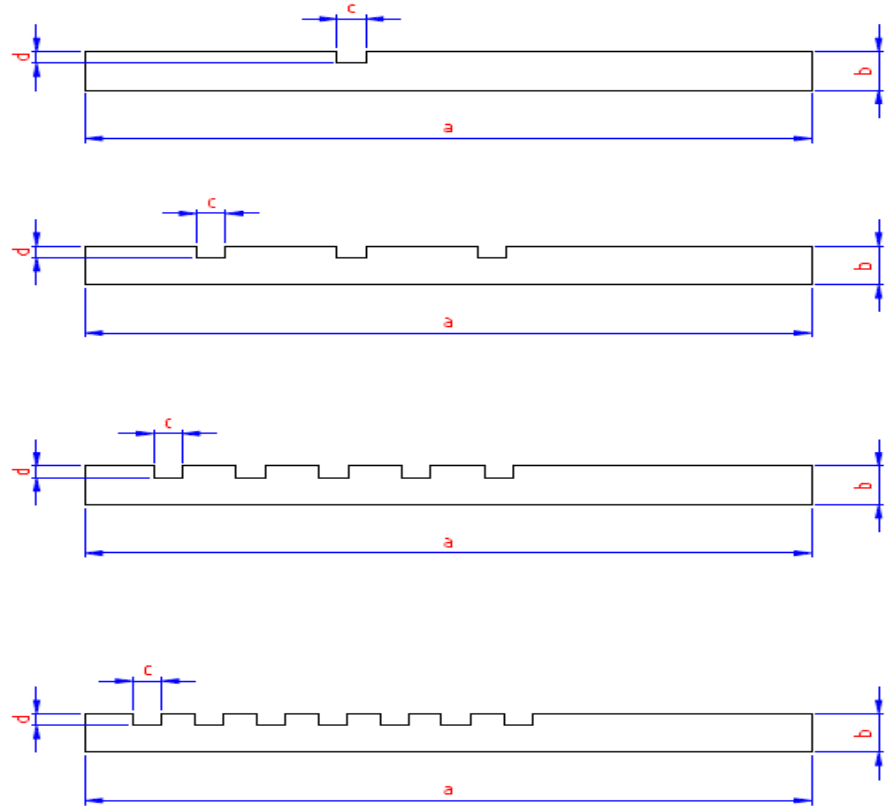
150x25mm boyutlarında daha önceden hazırlanmış olan kompozit plakaların yüzeylerine Coherent E150 CO<sub>2</sub> lazer tezgahı ile kanallar açılmıştır (Şekil 4.5.). Bu kanallar oluşturulurken 150 mm boya sahip olan numunelerde 40 mm boşluk bırakılmış, geriye kalan 110 mm lik kısımda lazer işlemi uygulanarak kanallar oluşturulmuştur.



Şekil 4.5. CO<sub>2</sub> lazer tezgahı ile numune yüzeylerine kanalların açılması

Şekil 4.6 da ise karbondioksit lazer ile işlenen plakaların kanal adeti, kanal derinlik ve genişlik ölçüleri model olarak gösterilmiştir. Şekildeki a,b,c,d sırasıyla plaka boyu, plaka kalınlığı, kanal genişliği ve kanal derinliğini göstermektedir.

Tüm numuneler için plaka boyu  $a=150\text{mm}$  ve plaka kalınlığı ortalama  $b=2.3\text{mm}$  dir. Plakalar bir, üç, beş ve yedi kanallı olacak şekilde işlenmiştir. Kanal genişlikleri  $c=3,5,7\text{mm}$  olacak şekilde tüm numune kombinasyonları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu tüm kombinasyonlar için kanal derinlikleri  $d$  bir tur lazer işlemi için  $0.086\text{mm}$ , iki tur lazer işlemi için  $0.172\text{mm}$  ve dört tur lazer işlemi için  $0.345\text{mm}$  olacak şekilde bu kanal adedi, genişliği ve derinliği oluşturacak tüm numune kombinasyonları oluşturulmuştur.



Şekil 4.6. Lazer ile işlenen plakaların model görüntüleri

Tüm durumlar için numuneler bir, iki ve dört tur işlenmiş ve farklı derinlikler elde edilmiştir. Bütün bu kombinasyonlar tüm numuneler için erkek ve dişi çifti olacak şekilde oluşturulmuştur. Oluşan bu derinlikler ultrasonik yöntemle numunelerin temizlenmesinin ardından stereo mikroskop ile ölçülmüştür.

Numune yüzeylerine lazer ile kanalların açılması tamamlandıktan sonra erkek ve dişi numuneler için kanal içlerinde ve kanal aralarında kalan yanmış lif partikülleri tel fırça ve alkol ile yapıştırılmadan evvel ultrasonik temizleme öncesi ön bir temizleme işlemi yapılmıştır. Burada amaç aradaki tüm toz ve kül partiküllerinin temizlenerek daha sağlıklı bir yapıştırma sağlamaktır. Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. de yapılan ön temizlik öncesi ve sonrası durumlar görülmektedir.



Şekil 4.7. Lazer ile kanal açılmış numunenin ön temizlik öncesi durumu



Şekil 4.8. Lazer ile kanal açılmış numunenin ön temizlik sonrası durumu

Numune yüzeylerine açılan kanalların genişlik ve aralıkları Corel Draw X5 programı ile hazırlanmış ve Coherent E150 lazer tezgahı ile entegre bir şekilde kullanılarak numuneler işlenmiştir.

Burada numuneler yüzeylerine farklı sayıda, genişlikte ve derinlikte kanallarının oluşturulmasının amacı daha sonra yapılacak deneylerde bu parametrelerin numunelerin yapışma mukavemetine etkisini incelemektir.

#### 4.2.4. Numune yüzeylerinin zımparalanması

150x25mm boyutlarındaki numuneler 60 ve 360 grid farklı numara zımparalar ile zımparalanarak farklı yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Her numune 30 kez gidip-gelme şeklinde aynı sayıda zımparalanarak hazırlanmıştır. Mod I, çekme ve sıyırma(peeling) deneylerinde kullanılmak üzere her deney ve her zımpara için üç adet deney numunesi hazırlanmıştır. Farklı numara zımparalar ile zımparalanan yüzeyler temizlenmiştir. Yüzeyleri temizlenen numunelerin daha sonra yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.

#### 4.2.5. Numunelerin ultrasonik yöntem ile ethanol çözeltisinde temizlenmesi

CO<sub>2</sub> lazer ile yüzeylerine kanal oluşturulmuş ve ön temizliği yapılmış olan numunelerin tümü üçlü gruplar halinde plastik bir kaba yerleştirilmiştir. Kap içerisine yerleştirilmiş olan numunelerin üst seviyesini geçecek şekilde kaba ethanol konulmuş ve kap ultrasonik temizleme cihazı içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Elmasonic E 120H ultrasonik temizleme cihazı

Ultrasonik temizleme cihazı olarak Elmasonic E 120H model cihaz kullanılmıştır. Tüm numuneler 37kHz frekansta 1 dakika süre ile ultrasonik olarak ethanol çözeltisi içerisinde temizlenmiş ve daha sonra kurumaya bırakılmıştır. Ultrasonik temizlemenin uygulanması Şekil 4.10 da görülmektedir.



Şekil 4.10. Ultrasonik temizleme işleminin uygulanışı

#### 4.2.6. Lazer işlem derinliklerinin stereo mikroskop ile tespiti

Lazer ile numune yüzeylerine kanal oluşturulmuş ve ultrasonik olarak temizlenmiş olan numunelerden aynı kanal sayısına sahip 1,2, ve 4 tur işlenmiş üç numune örneği alınarak lazer işlem derinliği stereo mikroskop altında tespit edilmiştir. Yapılan inceleme sonucu lazer işleminin bir turu 0.086mm, iki turu 0.172mm, dört turunun ise 0.345mm derinlik oluşturduğu tespit edilmiştir. Yapılan incelemelerin mikroskobik görüntüleri Şekil 4.11-13 te görülmektedir.

Tespitler Olympus SZ61 stereo mikroskobu altında yapılmış ve elde edilen görüntü Tviewer programı kullanılarak numunelerin lazer işlem derinlikleri tespit edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinin büyütme oranı 30x tir. Olympus SZ61 stereo mikroskobunun teknik özellikleri Çizelge 4.3 te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Olympus SZ61 stereo mikroskobunun teknik ve optik özellikleri

Parça	SZ61	SZ60-61	SZ61TR	SZ51	SZ51-60
Mikroskop gövdesi	Büyütme oranı			0.67X 'den 4.5X e	
	Zoom oranı			6.7	
	Çalışma mesafesi			110 mm	
	Tüp eğimi açısı	45°	60°	45°	60°

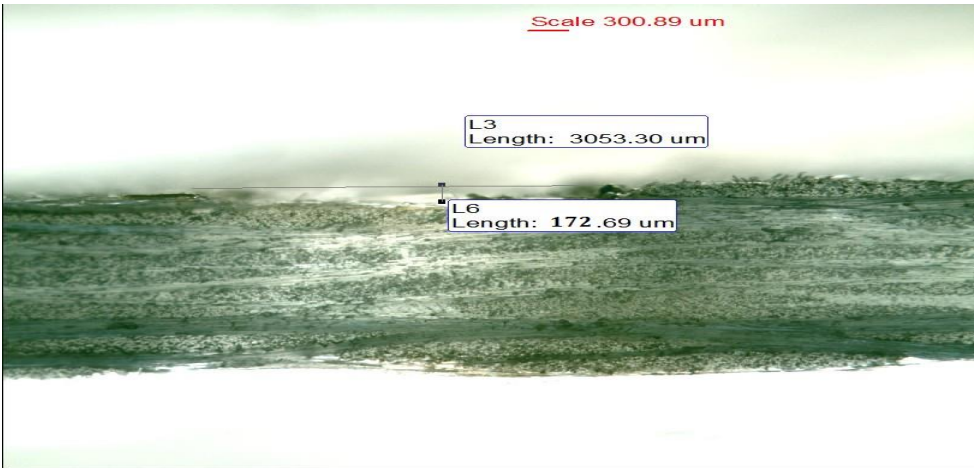
Gözler arası uzaklık ayarı	Sol/sağ içten bağlı. Ayar aralığı:52 den 76 mm.ye (WHSZ10X oküleri kullanılarak)				
	TV Kamerası uyumluluğu	---	C-mount (yerleşik 0.5X lens)	---	
	Zoom ayar düğmesi	Sol/sağ tek-şaft yatay düğmeleri (yüksek/alçak zoom büyütme üst limit kontrolü ile)			
	Yardımcı objektif	Çerçevenin altındaki yere vidalanarak (M48 yeri 0.75)			
Okülerler**	WHSZ10X-H: FN 22, 24 mm oküler mikrometre disk yerleştirilebilir				
	WHSZ15X-H: FN 16, 24 mm oküler mikrometre disk yerleştirilebilir*				
	WHSZ20X-H: FN 12.5, 24 mm oküler mikrometre disk yerleştirilebilir*				
	WHSZ30X-H: FN 7, 24 mm oküler mikrometre disk yerleştirilebilir*				
Gövde	Çerçeve kurulumu	Montaj çapı 76mm			
	Fokus ayarı	Bilyalı gövde için rak Düğme dönüş sertliği ayarlanabilir Fokus hareketi 120 mm			
	Numune plakası	100 mm çapında, süt beyazı (arka tarafı siyah)			
	Işık kaynağı kurulumu	İndirekt aydınlatma sistemi (LSGA), ışık kılavuzu aydınlatma sistemi (SZ2-LGB) veya alttan aydınlatma gövdesi takılabilir.			
Kullanım ortamı	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Kapalı alan</li> <li>* İrtifa: Maksimum 2000 metre</li> <li>* Ortam ısısı: 5°'den 40°'ye (41°'den 104°F 'ye)</li> <li>* Maksimum göreceli nem: 31°C 'ye (88 F) kadar olan ısılarda %80, 34°C 'de (93F) düzlemsel olarak %70'e düşüyor, 37°C 'de (99 F) %60, 40 C (104 F)'de %50 oluyor.</li> <li>* Voltaj dalgalanmaları – normal voltajın ±%10'unu aşmamalı</li> <li>* Kirlilik derecesi: 2 (IEC60664'e göre)</li> <li>* Kurulum (Fazla voltaj) kategorisi: II (IEC60664'e göre)</li> </ul>				

## OPTİK ÖZELLİKLER

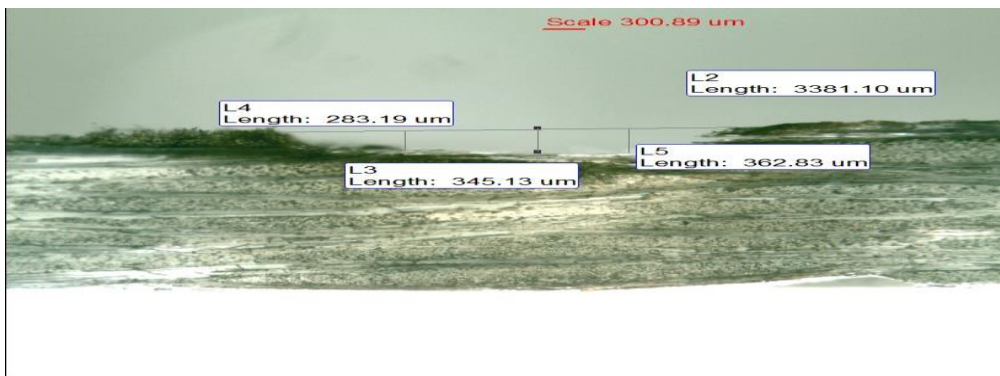
Zoom Büyütmesi	Çalışma Mesafesi (mm)	OKÜLERLER							
		WHSZ10 X FN22		WHSZ15X FN16		WHSZ20X FN 12.5		WHSZ30X FN7	
		Toplam Güç	Gerçek Alan	Toplam Güç	Gerçek Alan	Toplam Güç	Gerçek Alan	Toplam Güç	Gerçek Alan
0,67X	110	6,7X	32,8	10X	23,8	13,4X	18,7	20X	10,4
0,8X		8X	27,5	12X	20	16X	15,6	24X	8,8
1X		10X	22	15X	16	20X	12,5	30X	7
2X		20X	11	30X	8	40X	6,3	60X	3,5
4X		40X	5,5	60X	4	60X	3,1	120X	1,8
4,5X		45X	4,89	67,5X	3,6	90X	2,8	135X	1,6



Şekil 4.11. Bir tur lazer işlemleri ile oluşan derinlik (0,086mm)



Şekil 4.12. İki tur lazer işlemleri ile oluşan derinlik (0,172mm)



Şekil 4.13. Dört tur lazer işlemleri ile oluşan derinlik (0,345mm)

Ayrıca mikroskopta yapılan incelemede plaka yüzeyine en yakın fiberin uzaklığı 0.2mm olarak ölçülmüştür.

#### 4.2.7. Numunelerin epoksi reçine ile yapıştırılması

Ultrasonik yöntem ile ethanol çözeltisinde temizlenen lazer ile yüzeylerine kanal oluşturulmuş numuneler uygun oranlarda karıştırılmış LY 1564 Huntsman epoksi reçine ve Aradur 3487 hızlandırıcı (sertleştirici) karışımı ile yapıştırılmıştır. Karışım %78 epoksi reçine %22 hızlandırıcı şeklinde yapılmıştır. Karışım oranı hassas kantar kullanılarak plastik bir kap içerisinde yapılmış ve homojen bir karışım elde etmek için 3-5dk civarında karıştırılmıştır.



Şekil 4.14. Epoksi ve hızlandırıcının hassas kantar kullanılarak karıştırılması

Uygun oranlarda karıştırılan epoksi ve hızlandırıcı karışımı mümkün olduğunca homojen olarak aynı sayıda fırça darbesi kullanılarak erkek ve dişi numune yüzeylerine sürülerek yapıştırılması sağlandı.

Numuneler üç tip deneyde kullanılmak üzere farklı şekillerde hazırlandı. Mod I deney numunelerinin yapıştırılma işleminde numunenin 40mm lik kısmı boş kalacak şekilde geri kalan kısmı yapıştırıcı karışımı sürülerek yapıştırıldı. Çekme deney numunelerine tüm yüzeye yapıştırıcı sürülerek yüzey yüzeye tam olarak oturacak şekilde yapıştırıldı. Sıyırma deneyi numuneleri ise 40mm iki taraftan kaydırmalı olarak yapıştırıldı ve numunelerin 40 mm dışarıda kalan kısımlarına yapıştırıcı sürülmedi. Üç farklı deney için hazırlanan numuneler Şekil 4.15 te görülmektedir.



Şekil 4.15. Üç farklı deney için yapılandırılmış numuneler

#### 4.2.8. Epoksi reçinenin kürleşme işleminin yapılması

Mod I, çekme ve sıyırma testleri için hazırlanmış olan numunelerdeki yapıştırıcı olan epoksi reçine ve hızlandırıcı karışımının kürleşme işleminin olması için hazırlanmış olan tüm numuneler kürleşme için gerekli olan 90°C sıcaklıkta 30 dk boyunca hidrolik preste preslenerek karışımın kürleşmesi sağlandı.



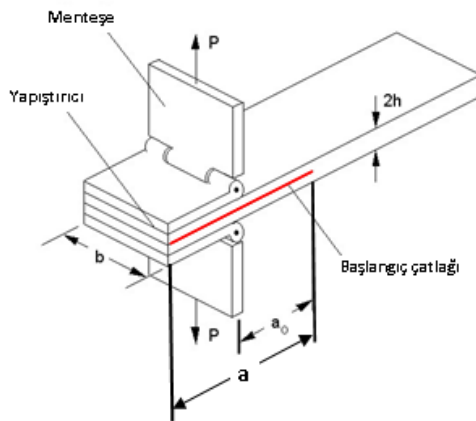
Şekil 4.16. Kürleşme işlemi için kullanılan hidrolik pres

#### 4.2.9. Numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapılması

60 ve 360 grid zımpara ile zımparalanmış numunelerden her bir zımpara türü için 3 adet numune seçilerek yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ301 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri her numune için üç ayrı noktadan yapılmış ve ortalama pürüzlülük değeri alınmıştır.

#### 4.2.10. Mode I tabakalar arası kırılma tokluğu deneyi (DCB test)

Bu çalışmada, tek yönlü fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu ( $G_{Ic}$ ) değerleri ASTM D 5528 standartında ayrık kiriş testi kullanılarak ölçülmüştür. Ayrık kiriş testinde 100kN yük hücreğine sahip Shimadzu AUTOGRAPH AG-IS Serisi üniversal çekme test cihazı kullanılmıştır. Veri aktarımı ve cihazın kontrolünde Trapezium bilgisayar programından faydalanılmıştır. Ön çatlak içeren ayrık kiriş test numunelerine iki yüzeyden yapıştırılan menteşeler yardımı ile üniversal çekme test cihazı kullanılarak laminar arası bölge mod I konumunda yüklenmiştir. Ayrıca, çatlak ilerleme miktarının tespit edilmesi için kağıt üzerine cetvel çizilerek numune üzerine uygun şekilde yapıştırılmıştır. Deney numunesi Şekil 4.17. de gösterilmiştir. Deney numunesinin boyutları ise Çizelge 4.4 te verilmiştir.



Şekil 4.17. Ayrık kiriş testi numunesi

Çizelge 4.4. Deney numunesi boyutları

Boy: $L$ (mm)	150
Genişlik: $b$ (mm)	25
Kalınlık: $2h$ (mm)	4.6mm
Çatlak boyu: $a_0$ ( $a$ )	40 mm

Numuneler yapıştırılan menteşelerin ucundan üniversal test cihazının çenelerine bağlanarak 0.1 mm/dk'lık bir hızla çekilmiştir. Çekme işlemi devam ederken CCD kamera ile belirli aralıklarla çatlak açılması miktarı ( $a$ ), kuvvet ( $P$ ) ve çatlak ucu açılması miktarı ( $\delta$ ) kaydedilmiştir.

Kritik bırakılan birim şekil değiştirme enerji oranı ( $G_{IC}$ ), lineer elastik kırılma mekaniği formüllerinden yararlanılarak,

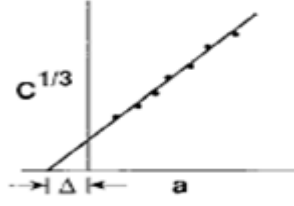
$$G_C = \frac{3P^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{P\delta}{2bc} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,  $P$  çatlak ilerlemesindeki kritik yük,  $b$  numune genişliği,  $\delta$  çatlak ağzının açılma miktarı,  $a$  çatlak genişliğidir.  $C$  ise  $\delta/P$  oranı olarak tanımlanmıştır.

Bu sınır koşullarındaki deney numunesinin Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu ( $G_{IC}$ ) değerlerini hesaplamak için basit kiriş teorisi kullanılmıştır. Buna göre 1 nolu denklem;

$$G_C = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (2)$$

denkleminde dönüşür. Pratikte kiriş teorisinde kabul edilen ideal şartların geçerli olduğunda  $G$  değerlerinin hesabı bu eşitlik yardımıyla yapılır. Ancak gerçek olarak bu ideal şartlar hiçbir zaman sağlanmaz. Büyük deformasyon, kayma deformasyonu, menteşelerin yapıştırma rijitliği vb. etkilerin çatlak boyuna etkileri vardır. Bunun için gerçekte çatlak boyunun düzeltilmesine ihtiyaç vardır. Çatlak boyu düzeltilmesi ( $\Delta$ ); kaydedilen her bir çatlak açılması miktarı ( $a$ ), uygulanan kuvvet ( $P$ ) ve çatlak ucu açılması miktarına ( $\delta$ ) karşılık gelen  $C$  oranının küp kökünün çatlak boyuna bağlı olarak değişim grafiğinin çizilmesi ile hesaplanır. Bu grafik çizildikten sonra bu noktalardan lineer bir doğru geçirilir (Şekil 4.18.). Bu doğrunun çatlak boyu eksenini kestiği noktadan olan uzaklığı çatlak boyu düzeltme faktörünü verir.



Şekil 4.18. Çatlak boyu düzeltme faktörünün hesaplanması

Çatlak boyu düzeltme faktörü dikkate alınarak mod I tabakalar arası kırılma tokluğu ( $G_{IC}$ );

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (3)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada,  $P$  uygulanan yük,  $\delta$  çatlak başlangıcındaki yer değiştirme, sırasıyla  $a$ ,  $b$  ve  $\Delta$  tabakaların ayrılma uzunluğu, test numunesi genişliği ve deneysel veriye bağlı düzeltme faktörüdür.

#### 4.2.11. Sıyırma (peeling) deneylerinin yapılması

Sıyırma deneylerinde 100kN yük hücresine sahip Shimadzu AUTOGRAPH AG-IS Serisi üniversal çekme test cihazı kullanılmıştır. Veri aktarımı ve cihazın kontrolünde Trapezium bilgisayar programından faydalanılmıştır. Deney numune boyutları kalınlık, en, boy olmak üzere sırasıyla 2.3mm,25mm,150mm dir. İki deney numunesinin 40mm lik kısımları boşta kalacak şekilde yapıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan deney numunelerinin tam eksende çekilebilmesi için boşta kalan 40mm lik kısımlara plakalar yapıştırılmıştır.

Numuneler yapıştırılan plakalardan üniversal test cihazının çenelerine bağlanarak 3 mm/dk'lık bir hızla çekilmiştir. Numuneler sıyrılanaya kadar deney devam etmiş ve deney sonucunda maksimum kuvvet ve strok gibi değerler okunmuştur. Şekil 4.19 da sıyırma deney numunesi görülmektedir.



Şekil 4.19. Sıyırma (peeling) deney numunesi

#### 4.2.12. Çekme deneylerinin yapılması

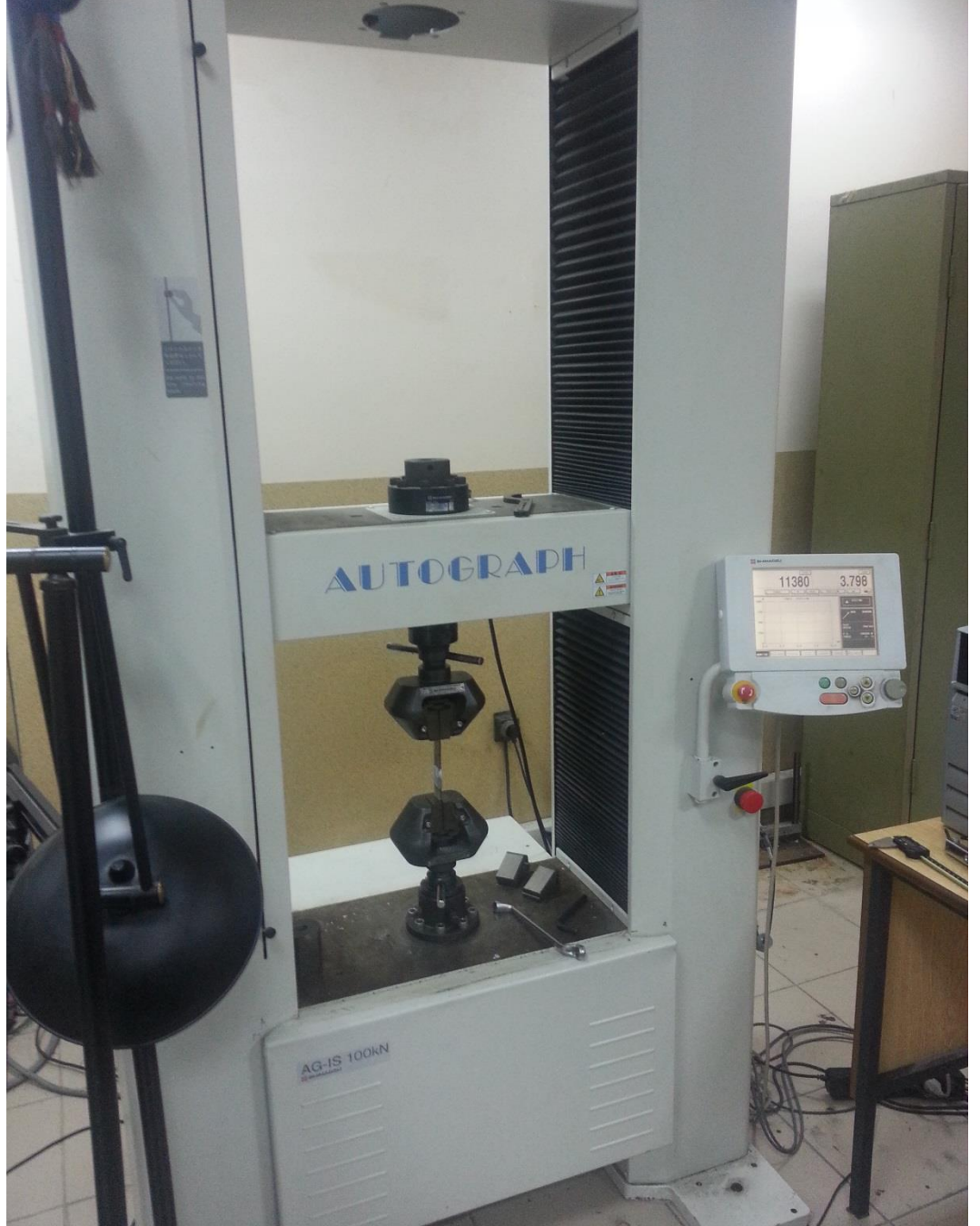
Çekme deneylerinde 100kN yük hücreesine sahip Shimadzu AUTOGRAPH AG-IS Serisi universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Veri aktarımı ve cihazın kontrolünde Trapezium bilgisayar programından faydalanılmıştır. Deney numune boyutları kalınlık, en, boy olmak üzere sırasıyla 2.3mm,25mm,150mm dir. İki deney numunesi tam olarak yüzey yüzeye gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Numune çekme cihazının çenelerinden kaymaması için dört tarafına plakalar yapıştırılmıştır.

Numuneler yapıştırılan plakalardan universal test cihazının çenelerine bağlanarak 3 mm/dk'lık bir hızla çekilmiştir. Numuneler kopana kadar deney devam etmiş ve deney sonucunda maksimum kuvvet ve strok gibi değerler okunmuştur. Daha sonra tüm numuneler için yapışma alanları hesaplanmıştır.  $\sigma$  çekme gerilmesi değerleri deney sonucunda bulunan kuvvetin yapışma alanına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Şekil 4.20 de çekme deney numunesi görülmektedir.



Şekil 4.20. Çekme deney numunesi

Mod 1, çekme ve sıyrma deneylerinde kullanılan 100kN yük hücreğine sahip Shimadzu Autograph AG-IS serisi üniversal çekme test cihazı Şekil 4.21 de görülmektedir.



Şekil 4.21. Shimadzu Autograph AG-IS serisi üniversal çekme test cihazı

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1. Yüzey pürüzlülük testi sonuçları

60 ve 360 grid zımpara ile zımparalanmış numunelerden her bir zımpara türü için 3 adet numune seçilerek yüzey pürüzlülük ölçümleri Mitutoyo SurfTest SJ301 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yapılmıştır. 60 grid zımpara için yapılan yüzey pürüzlülük ölçümünde ortalama  $R_a=3.5 \mu\text{m}$  ve  $R_z=22.7 \mu\text{m}$  dir. 360 grid zımpara için yapılan yüzey pürüzlülük ölçümünde ise  $R_a=2.34 \mu\text{m}$  ve  $R_z= 13.5 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

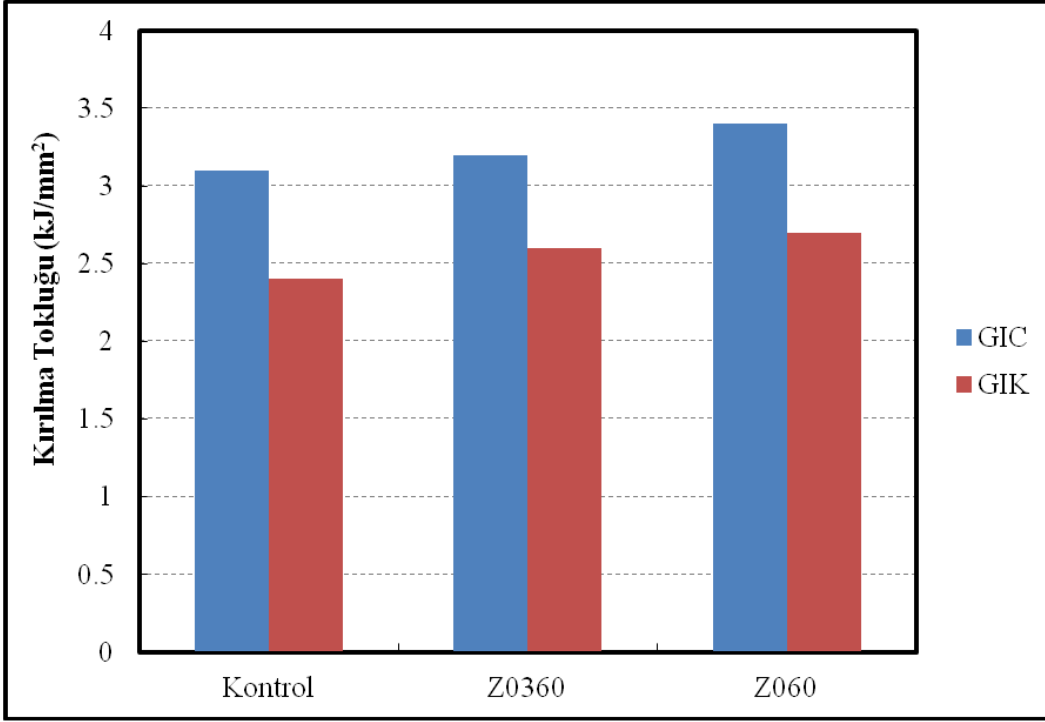
### 5.2. Mod I Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Deney Sonuçları

Kırılma tokluğu değerleri tabakalı kompozitlerde tabakalar arası yapışmanın en önemli göstergesidir. Numunelerin kırılma tokluğu (G1C) ve düzeltilmiş kırılma tokluğu (G1K) değerleri Çizelge 5.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 5.1-5.4’ de ise bazı numunelerin sonuçları özetlenmiştir. Kontrol numunesi plakaların üzerine hiç bir işlem yapılmadan birbirine yapıştırılmış numuneyi gösterir. Z060 60 lık zımpara ile, Z0360 de ise 360 lık zımpara ile yapışma yüzeyleri zımparalanarak yapışma miktarını arttırmak için yüzeyde pürüzlükler yaratılmıştır. Bu işlem sonucunda, Z060 ve Z0360 numune yüzeylerinde sırasıyla  $R_a=3.5 \mu\text{m}$  ve  $R_a=2.34 \mu\text{m}$  değerlerinde yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere zımpara ile yüzey işleminde yüzey pürüzlülüğü değeri arttıkça kırılma tokluğu değerleri artmaktadır.

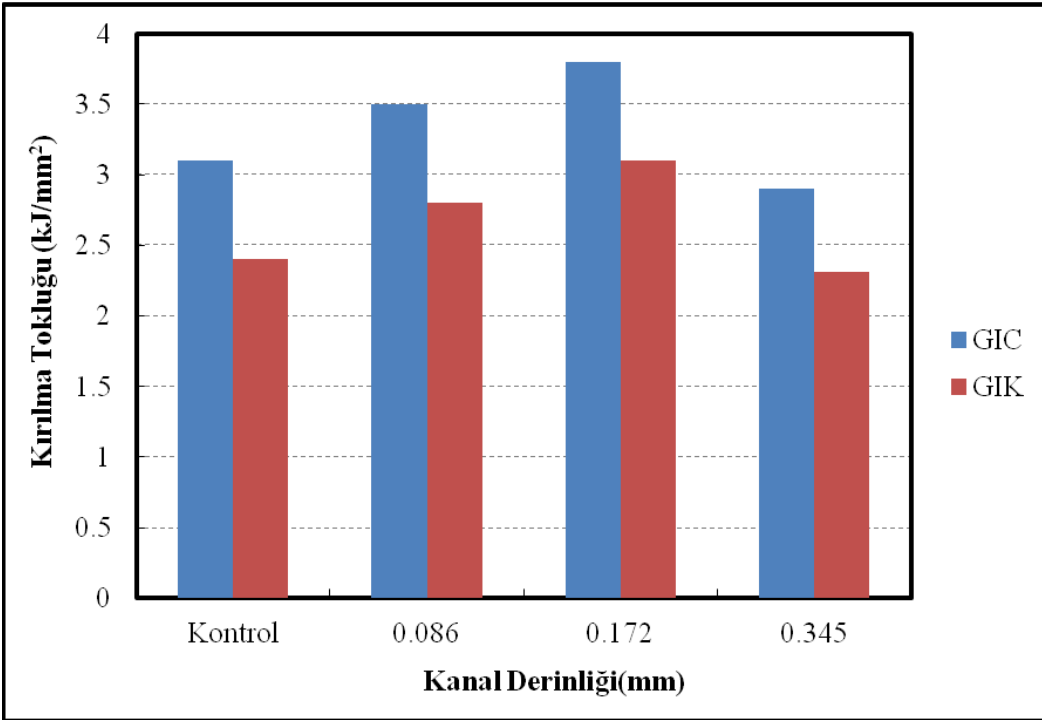
Şekil 5.2’de ise kanal derinliğinin kırılma tokluğu üzerine etkileri gösterilmiştir. Buna göre kanalsız kontrol numunesinde kırılma tokluğu değeri  $3.1 \text{ kJ/mm}^2$  iken bu numune üzerine  $0.086\text{mm}$  derinliğinde tek kanal açıldığında kırılma tokluğu  $3.5 \text{ kJ/mm}^2$  değerine yükselmiştir. Kanal derinliği  $0.172\text{mm}$  değerine artırıldığında bu değer kontrol numunesine göre yaklaşık %23’lük bir artışla  $3.8 \text{ kJ/mm}^2$  olmuştur. Bu da kanal derinliğinin artmasıyla birlikte tabakalar arasındaki yapışmanın arttığını göstermektedir. Kanal derinliği  $0.345\text{mm}$  olduğunda ise kırılma tokluğu  $2.9 \text{ kJ/mm}^2$  değerine düşmektedir. Bunun sebebi kanal açarken bu derinlikte lazer işleminin cam fiber malzemesine zarar vermesidir. Buda tabakaların birbirine yapışmasını kötüleştirir. Diğer kalınlıklarda ise kanal derinliği yüzeydeki epoksi reçinesinin içerisinde kaldığından yapışma daha iyi olmaktadır.

Çizelge 5.1. Kırılma tokluğu ve düzeltilmiş kırılma tokluğu değerleri

Kanal Sayısı	Kanal derinliği (mm)																			
	0		0.086						0.172						0.345					
	Kanal genişliği (mm)																			
	0		3		5		7		3		5		7		3		5		7	
0	3.1	2.4	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K	G1C	G1K
1			3.5	2.8	3.2	2.6	2.9	2.1	3.8	3.1	3.5	2.9	3.2	2.7	2.9	2.3	3.2	2.5	2.8	2.2
3			4.2	3.1	3.9	3.4	4.3	3.7	4.8	3.7	4.2	3.6	4.6	4.1	4.3	3.2	3.7	3.3	4.2	3.6
5			4.7	4.1	4.3	3.7	4.7	4.2	5.2	4.5	4.8	4.1	5.1	4.8	4.9	4.3	3.9	3.5		
7			5.2	4.7	5.3	4.9	5.2	4.7	5.6	4.9	5.8	5.2	5.5	4.8						

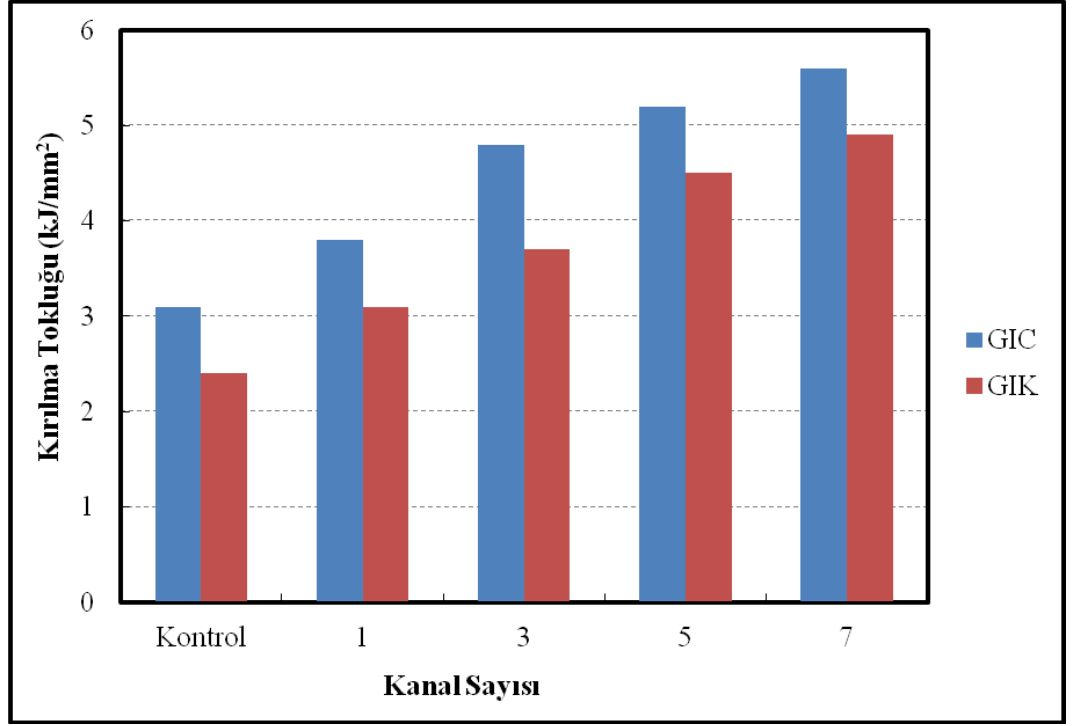


Şekil 5.1. Zımpara işleminin kırılma tokluğu değerlerine etkisi



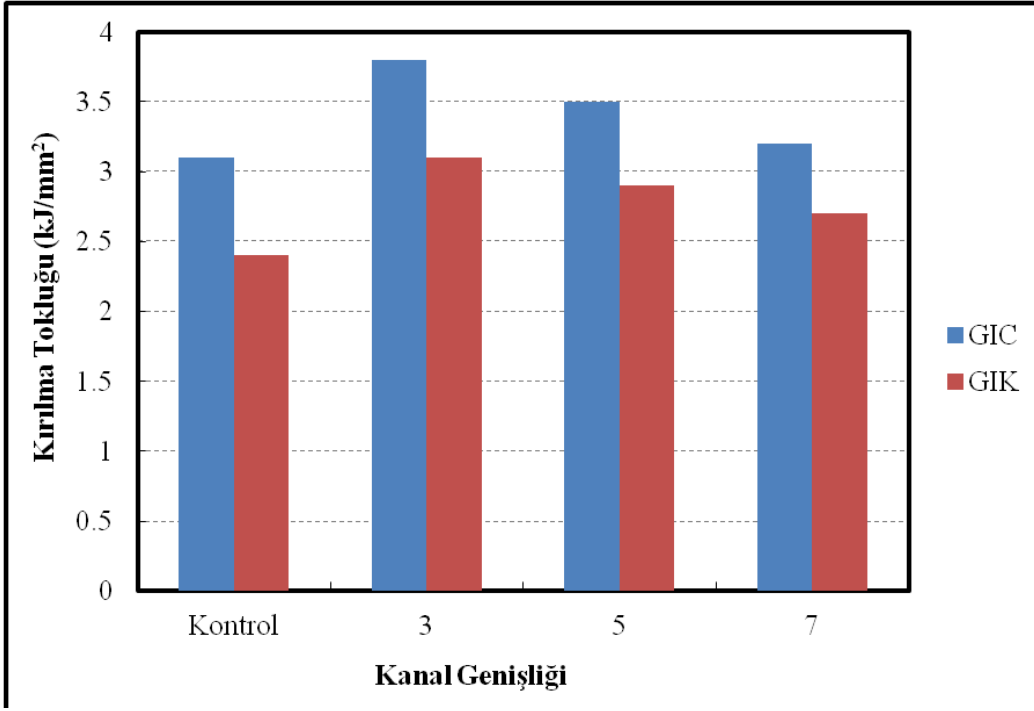
Şekil 5.2. Kanal derinliğinin kırılma tokluğu değerlerine etkisi

Kanal sayısının kırılma tokluğuna etkisi Şekil 5.3' de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde kanal sayısı arttıkça kırılma tokluğu değerleri artmaktadır. En yüksek kırılma tokluğu değerleri 7 kanallı numunede elde edilmiştir. Bu artışın sebebi kanal sayısı arttıkça iki yapıştırılan plaka arasında daha iyi bir mekanik kilitlenme sağlanmasıdır.



Şekil 5.3. Kanal sayısının kırılma tokluğu değerlerine etkisi

Sabit kanal derinliğinde ve sabit kanal sayısında kanal genişliğinin kırılma tokluğuna etkileri Şekil 5.4'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kanal genişliği arttıkça yapıştırılacak iki plaka arasında mekanik kilitlenme azalmakta ve yapışma kabiliyeti düşmektedir.

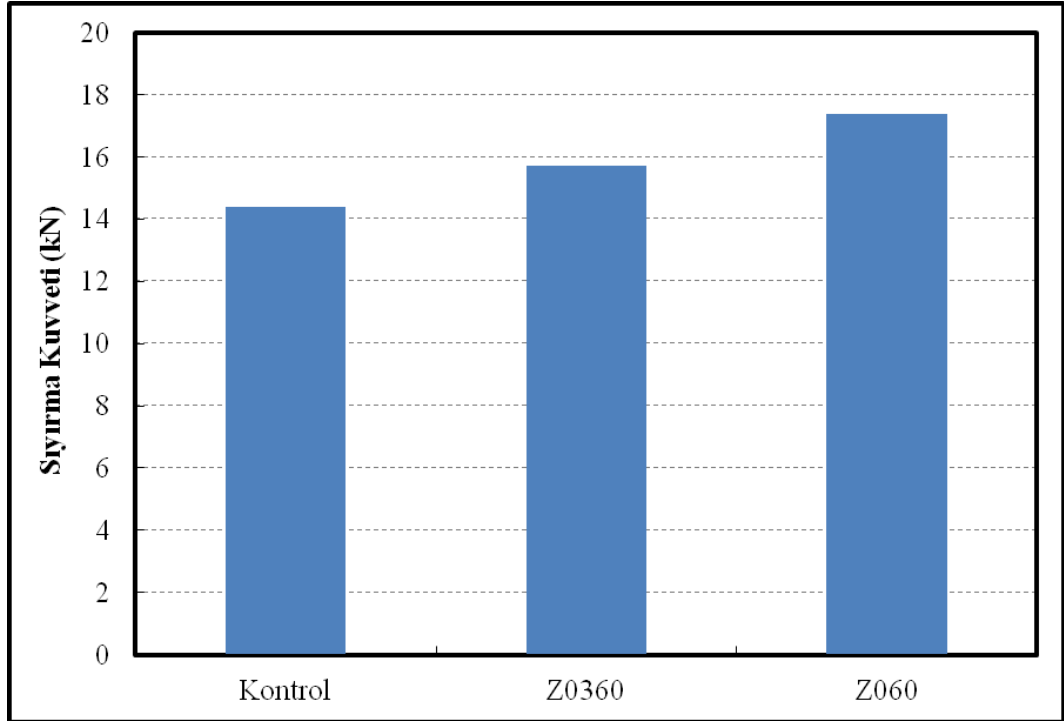


şekil 5.4. Kanal genişliğinin kırılma tokluğu değerlerine etkisi

Mod I tabakalar arası tokluğu (GIC), atlak ilerlemesi sırasında absorblama enerjinin geniği anlamına gelmektedir ve kompozitin morfolojisi ile alakalıdır (Li, G. et al., 2008). Yüzeydeki çatlaklar ve oluklar yapışma alanını genişletmekte ve iki plaka arasında mekanik kilitleme sağlayarak iki yüzey arasındaki yapışmayı arttırmaktadır (Bozaci, E. Et al., 2013).

### 5.3. Sıyırma Deneyi Sonuçları

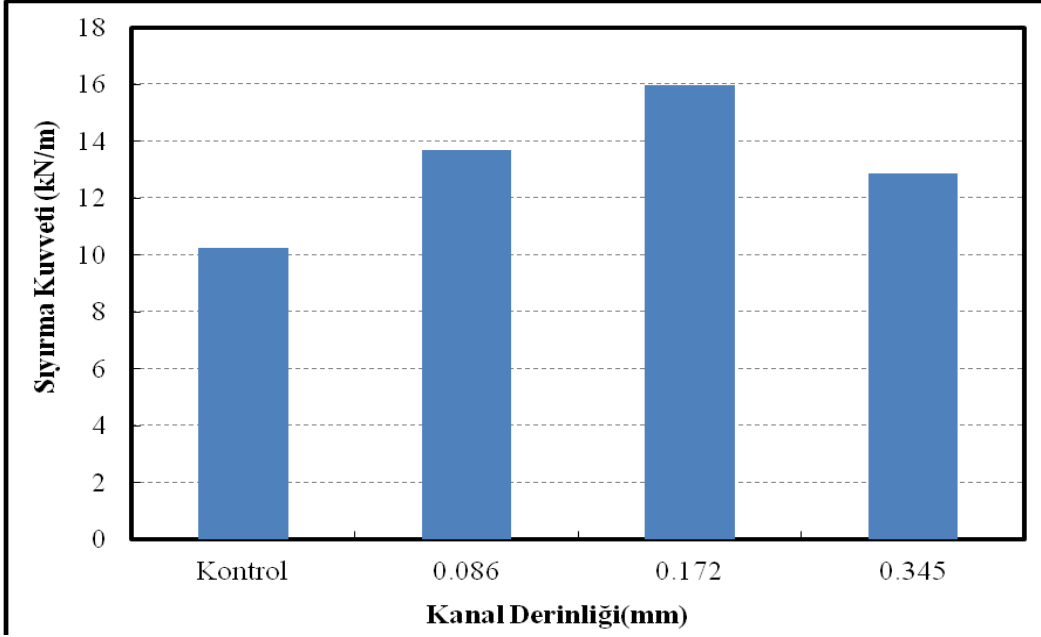
Sıyırma testi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.5-5.8’de verilmiştir. Sıyırma testi iki plakanın birbirine yapışma derecesinin bir ölçüsüdür. Şekil 5.5’te zımparalama işleminin sıyırma kuvvetine etkisi gösterilmiştir. Buna göre zımparalama işlemi yapıştırma işlemi iyileştirmektedir. Pürüzlülük değeri arttıkça sıyırma kuvveti değeri artmaktadır.



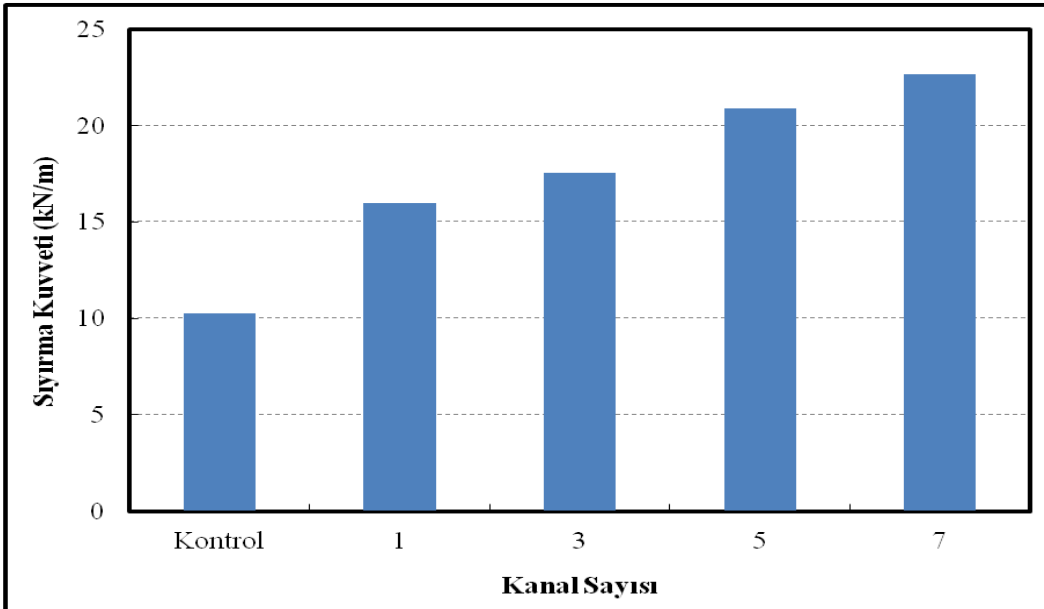
Şekil 5.5. Zımpara işleminin sıyırma kuvveti değerlerine etkisi

Kanal derinliğinin sıyırma kuvvetine etkisi Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Bu sonuçlar mod I kırılma tokluğu değerleri ile paralellik göstermektedir. Kanalsız kontrol numunesinde sıyırma kuvveti 10.26 kN/m olarak bulunmuştur. 0.086mm ve 0.172mm derinliğindeki kanallarda sıyırma kuvveti değerleri sırasıyla 13.69 ve 15.97 kN/m değerlerine artış göstermiştir. Ancak 0.345 mm derinliğinde kanal açılırken cam fiber zarar görmüş ve yapışma kötüleşmiştir. Bu yüzden sıyırma kuvveti 12.85 kN/m değerine kadar düşmüştür.

Şekil 5.7’de ise kanal sayısının sıyırma kuvvetine etkileri görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kanal sayısı arttıkça plakalar arası daha iyi mekanik kilitlenme sağlanmakta ve aynı zamanda yapışma yüzey alanı arttığında sıyırma kuvveti artmaktadır. En iyi yapışma 7 kanallı numunede bulunmuştur. Bu numune için sıyırma kuvveti 22.67 kN/m olarak bulunmuştur.

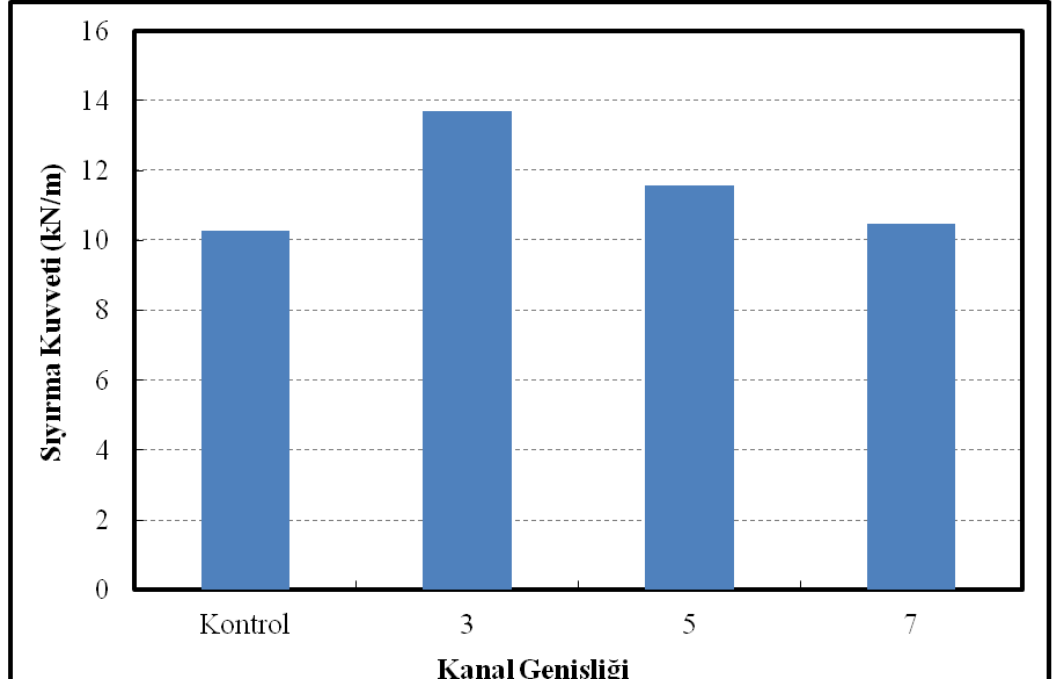


Şekil 5.6. Kanal derinliğinin sıyırma kuvveti değerine etkisi



Şekil 5.7. Kanal sayısının sıyırma kuvveti değerlerine etkisi

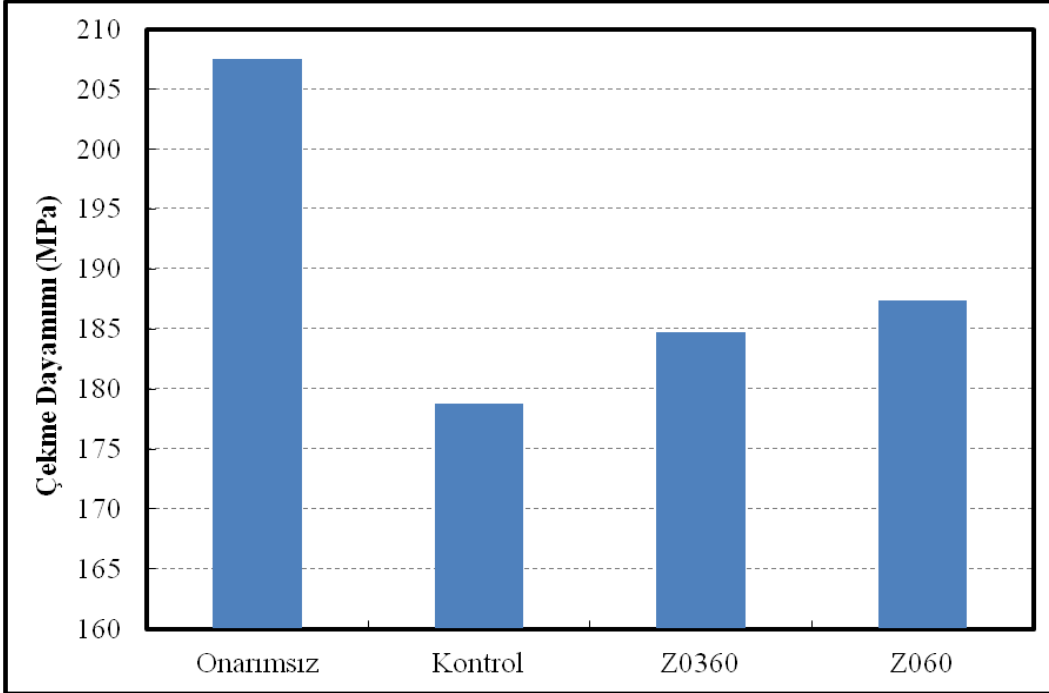
Şekil 5.8’de görüldüğü üzere kanal genişliği 3mm açıldığında kontrol numunesine göre yaklaşık %33 lük bir artış göstermiştir. Ancak kanal genişliği arttıkça numune kontrol numunesine doğru yaklaşmakta ve sıyırma kuvveti değerleri 3 mm kanal genişliğine göre düşüş göstermektedir.



Şekil 5.8. Kanal genişliğinin sıyırma değerlerine etkisi

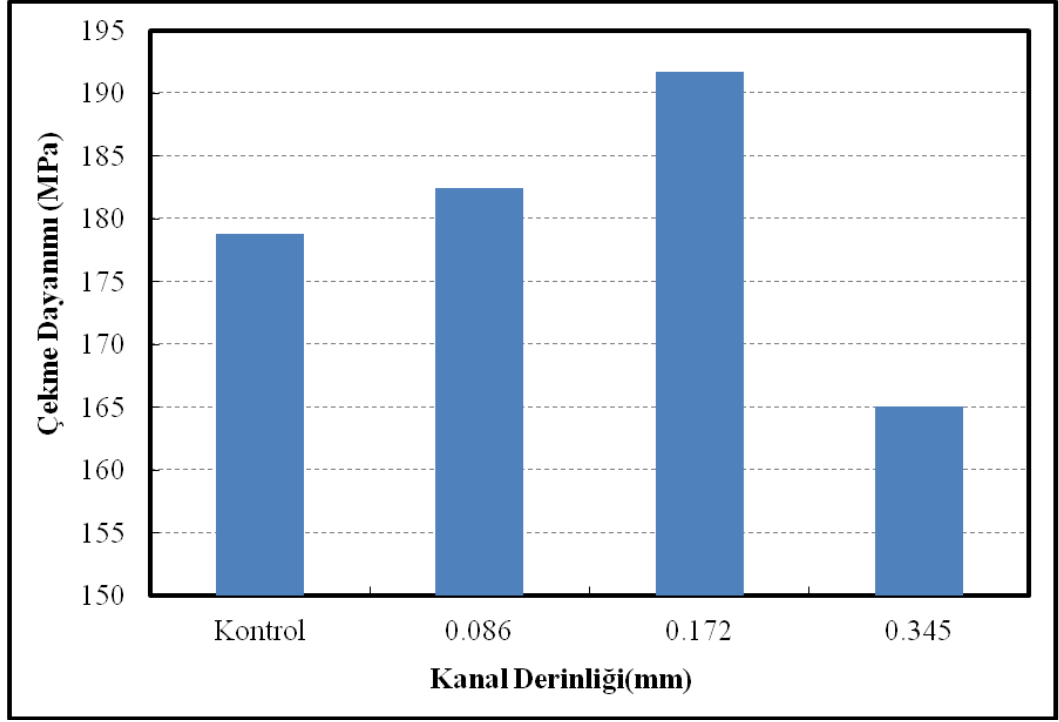
#### 5.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.9-5.12’de verilmiştir. Onarımsız olarak üretilen plakanın çekme dayanımı 207.56 MPa olarak bulunmuştur. İki plakanın birbirine yapıştırılması elde edilen plakanın çekme dayanımı 178.78 MPa değerine düşmüştür. Buda yapıştırmanın plakanın çekme dayanımını düşürdüğünü göstermektedir. Yapıştırılacak iki plaka yüzeyine farklı iki kabalıkta zımpara işlemi uygulandığında yapışmaya paralel olarak plakanın çekme dayanımı kontrol grubuna göre Şekil 5.9’da görüldüğü üzere artmaktadır. 360 lık zımpara ile zımparalanmış plakanın(Z360) çekme dayanımı 184.78MPa, 60 lık zımpara ile yapışma yüzeyi zımparalanmış numunenin (Z060) çekme dayanımı ise 187.35 MPa değerine ulaşmıştır.

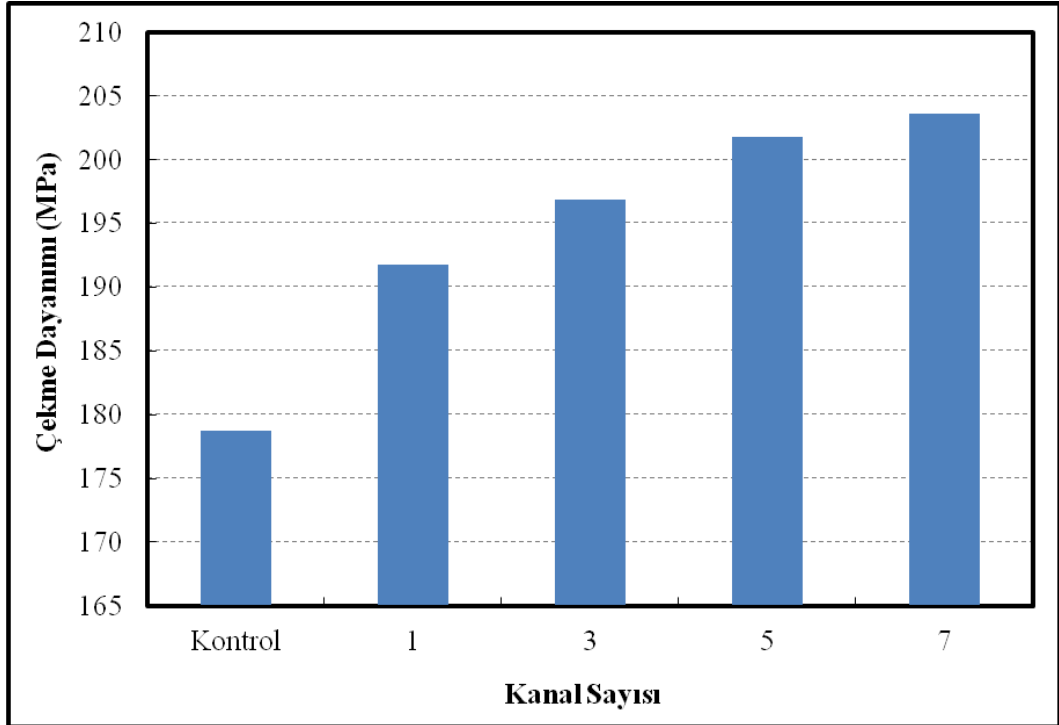


Şekil 5.9. Zımpara işleminin çekme dayanımına etkisi

Şekil 5.10’da kanal derinliğinin çekme dayanımına etkisi gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 0.086mm ve 0.172mm kanal derinliğindeki yapıştırma yapıldıktan sonra çekme dayanımları sırasıyla kontrol grubuna göre %2 ve %7’ lik bir artış meydana gelmektedir. 0.345mm kanal derinliğinde ise %8’ lik bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise cam fiberin ve reçinenin zarar görmesidir.

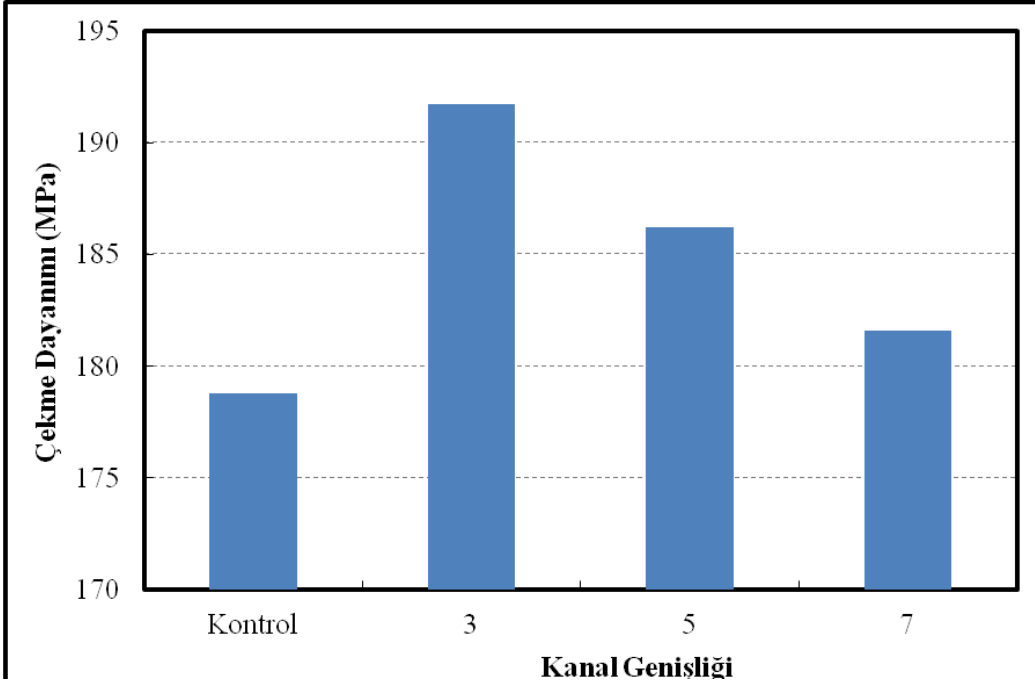


Şekil 5.10. Kanal derinliğinin çekme dayanımına etkisi



Şekil 5.11. Kanal sayısının çekme dayanımına etkisi

Kanal sayısının çekme dayanımına etkisi ise Şekil 5.11’de özetlenmiştir. Şekilden görüldüğü üzere kanal sayısı arttıkça yapışma iyileşmekte ve buna bağlı olarak plakanın çekme dayanımı artmaktadır. 1, 3, 5 ve 7 kanallı plakaların yapıştırılması ile edilen plakaların çekme dayanım değerleri sırasıyla 191.72, 196.85, 201.75 ve 203.57 MPa’dır.



Şekil 5.12. Kanal genişliğinin çekme dayanımına etkisi

Şekil 5.12’ de verilen sonuçlara göre 3mm kanal genişliğinde yapışma sonucu oluşan plakanın çekme dayanımı 191.72 MPa değerine yükselmiştir. Bu artış kontrol numunesine göre %7’lik bir artıştır. Ancak kanal genişliği arttıkça bu artış oranı düşmekte ve kontrol numunesinin değerine yaklaşmaktadır.

## 6. SONUÇ

Bu çalışma termoset kompozitlerin yapıştırılmasında geleneksel olarak uygulanan zımparalama yöntemine alternatif olarak lazerle oyma yoluyla yüzeyde kanallar oluşturularak yapışma mukavemetinin artırılması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm çalışmalar göz önüne alındığında aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

Elde edilen deney sonuçlarına göre numunelere yapılan zımpara işlemi sonucu oluşan yüzey pürüzlülükleri yapışma miktarını arttırmıştır. Ayrıca artan yüzey pürüzlülüğüne paralel olarak numunelerin kırılma tokluğu değerleri de artış göstermektedir.

Kanal derinliğinin kırılma tokluğu değerleri üzerindeki etkisine bakıldığında kanal derinliğinin artması ile beraber kırılma tokluğu değerleri artmıştır. Fakat kırılma tokluğu değerlerindeki bu artış derinliğin cam fiber malzemesine ulaşana kadardır. Daha sonraki derinliklerde fiber tabaka zarar gördüğünden yapışma hızlı bir şekilde kötülemiş ve kırılma tokluğu değerleri düşüş göstermiştir.

Kanal sayısının kırılma tokluğuna etkisi incelendiğinde kanal sayısı arttıkça kırılma tokluğu değerleri artmaktadır. En yüksek kırılma tokluğu değerleri 7 kanallı numunede elde edilmiştir. Bu artışın sebebi kanal sayısı arttıkça iki yapıştırılan plaka arasında daha iyi bir mekanik kilitleme sağlanması ve yapışma alanının artmasıdır.

Kanal genişliğinin kırılma tokluğuna etkisi incelendiğinde kanal genişliğinin 3mm olması ile kırılma tokluğu değeri kontrol numunesine göre artış göstermiştir. Ancak kanal genişliğinin bu değerden sonraki artışlarında kırılma tokluğu değerleri düşmekte ve kontrol numunesinin kırılma tokluğu değerlerine doğru yaklaşmaktadır.

Lazerle yüzey oyma işleminin termoset plastiklerinin yapıştırma mukavemetinin artırılmasında alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceği söylenebilir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

**Antonson, S.A. et al.**, 2011, Comparison of different finishing/polishing systems on surface roughness and gloss of resin composites. *Journal of Dentistry*, (39): 9-17 pp.

**Atas, C., Akgun, Y., Dagdelen, O., Icten, B. ve Sarikanat, M.**, 2011, An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes. *Composite Structures*, (93): 1178-1186 s.

**Aymerich, F., Onnis, R. and Priolo, P.**, 2006, Analysis of the effect of stitching on the fatigue strength of single-lap composite joints. *Composites Science and Technology*, (66): 166-175 pp.

**Berkmanns, J.**, 2001, Selecting laser assist gas systems. *Forming and Fabricating*, No:1.

**Beylergil, B., Cunedioğlu, Y. and Aktas, A.**, 2011, Experimental and numerical analysis of single lap composite joints with inter-adherend fibers. *Composites: Part B*, (42): 1885-1896 pp.

**Bozaci, E., Sever, K., Sarikanat, M., Seki, Y., Demir, A. ve Ozdogan, E.**, 2013, Effects of the atmospheric plasma treatments on surface and mechanical properties of flax fiber and adhesion between fiber–matrix for composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 45(1):565-72 s.

**Brack, N.**, 2012, Surface treatments and adhesives for bonded repairs to high temperature carbon-bismaleimide composite structure. *J Adhes Sci Technol*, 26(7): 911-37 pp.

**Choi, I. and Lee, D.G.**, 2013, Surface modification of carbon fiber/epoxy composites with randomly oriented aramid fiber felt for adhesion strength enhancement. *Composites: Part A*, (48): 1–8 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Deniz, M.E.**, 2005, Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarımı ve İmalatı. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalı Yüksek Lisans tezi.

**Dransfield, K.A., Jain, L.K. and Mai, Y.W.**, 1998, On the effects of stitching in cfrps-I. Mode I delamination toughness. Composites Science and Technology, (58): 815-827 pp.

**Dubey, A.K. and Yadava, V.**, 2008, Laser beam machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, 609-628 pp.

**Encinas, N. et al.**, 2014, Surface modification of air craft used composites for adhesive bonding. International Journal of Adhesion & Adhesives, (50): 157-163 pp.

**Guler, A.U., Duran, I., Yucel, A.C. ve Ozkan, P.**, 2010, Effects of air polishing powders on the surface roughness of composite resins. J Dent Sci, 5(3): 136-143 s

**Gultekin, K., Akpınar, S. ve Ozel, A.**, 2014, The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: Experimental and numerical analysis. Composites: Part B, (60): 736-745 s.

**Hallum, D.L.**, 2008, Cutting Exotic Materials: It's in The Gas. Forming and Fabricating, No:4.

**Holthaus, M.**, 2007, Pioneering lasers for rapid tooling. Manufacturing Engineering, No:1.

**Kim, J.K.**, 2003, Adhesion characteristics of carbon/epoxy compositewith low and atmospheric pressure plasma treatments. J Adhes Sci Technol, 17(13): 1751-71 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Kim, K.S., Yoo J.S., Yi, Y.M. and Kim, C.G.,** 2006, Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods. *Composite Structures*, (72): 477-485 pp.

**Kim, K.S., Yi, Y.M., Cho, G.R. and Kim, C.G.,** 2008, Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints. *Composite Structures*, (82): 513-520 pp.

**Kong, F., You, M., Zheng, X.L. and Yu, H.Z.,** 2007, Three-dimensional stress analysis of adhesive-bonded joints under cleavage loading, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, (27): 28-305 pp.

**Li, G., Sullivan, P.L.,** 2001, Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, (21): 211-220 pp.

**Li, G., Li, P., Zhang, C., Liu, H. and Zhang, S.,** 2008, Inhomogeneous toughening of carbon fiber/epoxy composite using electrospun polysulfone nanofibrous membranes by in situ phase separation. *Compos Sci Technol*, 68(3):987-94 pp.

**Majumdar, J.D. and Manna, I.,** 2003, Laser processing of materials. *Sadhana*, 28 [3-4], 495-562 pp.

**Mobarak, E.H.,** 2012, Effect of surface roughness and adhesive system on repair potential of silorane-based resin composite. *Journal of Advanced Research*, (3): 279-286 pp.

**Panigrahi, S.K.,** 2013, Structural design of single lap joints with delaminated FRP composite adherends. *Composites: Part B*, (51): 112-120 pp.

**Panigrahi, S.K. and Pradhan, B.,** 2008, Onset and growth of adhesion failure and delamination induced damages in double lap joint of laminated FRP composites. *Composite Structures*, (85): 326-336 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Panigrahi, S.K. and Pradhan, B.,** 2009, Through-the-width delamination damage propagation characteristics in single-lap laminated FRP composite joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, (29):114-124 pp.

**Park, S.W.,** 2009, Strength of the double lap joints bonded with the carbon black reinforced adhesive under the cryogenic environment. *J Adhes Sci Technol*, 23(4): 619-38 pp.

**Pinto, M., Chalivendra, V., Kim, Y. and Lewis, A.,** 2013, Effect of surface treatment and Z-axis reinforcement on the interlaminar fracture of jute/epoxy laminated composites. *Engineering Fracture Mechanics*, (114): 104-114 pp.

**Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M. and Antunes, F.,** 2011, Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, (31): 193-201 pp.

**Seyedmohammad, S. and El-Hajjar, R.F.,** 2013, Overlay patch repair of scratch damage in carbon fiber/epoxy laminated composites. *Composites: Part A*, (49): 148-156 pp.

**Sınmazçelik, T.,** 2001, "Kompozit malzemeler ders notu" Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmit.

**Soy, U.,** 2009, "Kompozit Malzemeler" Dr. Uğur SOY, Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Esentepe Kampüsü, Sakarya.

**Sümen, H.,** 2010, Lazer teknolojisi ve getirileri, Sac işleme teknolojileri dergisi, Ocak 2010.

**Tang, J.H., Sridhar, I. and Srikanth, N.,** 2013, Static and fatigue failure analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints. *Composites Science and Technology*, (86): 18-25 pp.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

**Tong, L., Jain, L.K., Leong, K.H., Kelly, D. and Herszberg, I.,** 1997, Failure of transversely stitched rtm lap joints. Composites Science and Technology, (58): 221-227 pp.

**Ünal, O.,** 2005, “Yapı malzemesi ders notları” Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL

**Vatangül, E.,** 2008, Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve Ansys 10 programı ile ısı gerilme analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir.

**Wang, X. and Wang, J.,** 2010, Laser 3D machining with variable process parameters, International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, American Institute of Physics, Paris, 1157-1162 pp.

**Yukimoto, Y., Matsuzaki, R. and Todoroki, A.,** 2014, Mode II interfacial fracture toughness of composite /adhesive interfaces obtained by in-mold surface modification. International Journal of Adhesion & Adhesives, (50): 191-198 pp.

**Zheng, H.Y. et al,** 2009, Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting. Journal of Material Processing Technology, 62: 294-298 pp.

**Zielecki, W., Pawlus, P., Perłowski, R. and Dzierwa, A.,** 2013, Surface topography effect on strength of lap adhesive joints after mechanical pre-treatment. Archives of civil and mechanical engineering, (13): 175-185 pp.



## ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1990 yılında İzmir’de dünyaya gelmiştir. Lise eğitimini İzmir Aliğa Yabancı Dil Ağırlıklı lisesinde tamamlamış daha sonra 2008 yılında yükseköğrenim hayatına Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde başlamıştır.

2012 yılı Haziran ayında bu bölümden bölüm üçüncülüğü derecesiyle mezun olmuştur. 2012 yılında Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Kompozit malzemeler konusunda çalışmalarına devam etmektedir.