



**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜŐÜ**

**PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN
KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAMİL SEÇKİN BORAZAN

UŞAK, TEMMUZ 2018

**T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN KIRILMA TOKLUĞUNUN
BELİRLENMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAMİL SEÇKİN BORAZAN

UŞAK 2018

Kamil Seçkin BORAZAN tarafından hazırlanan “**Partikül Takviyeli Kompozitlerin Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi**” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. HALİT GÜN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. HALİT GÜN

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Prof. Dr. OSMAN ASİ

(Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Doç. Dr. YUSUF ARMAN

(Makine Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üye. ÖZER PAMUK

(Malzeme Bilimi ve Nanotek. Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üye. ALİ MORTAZAVİ

(İnşaat Mühendisliği, Uşak Üniversitesi)

Tarih: 29.06.2018

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans / Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. İSA YEŞİYURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kamil Seçkin BORAZAN



PARTİKÜL TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN KIRILMA TOKLUĞUNUN BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kamil Seçkin BORAZAN

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz, 2018

ÖZET

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin kendi özelliklerinden daha üstün özellikte yeni bir malzeme meydana getirmek için makro seviyede birleşmeleriyle meydana gelirler. Kompozit malzemeler hafiflik, yüksek darbe dayanımı, yüksek korozyon direnci ve yüksek termal özelliklerinden dolayı çoğu mühendislik uygulamasında geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadırlar. Fiber takviyeli kompozit malzemeler yapılarda en çok kullanılan kompozit malzeme türüdür. Cam, karbon, aramid ve bor lifleri, fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan başlıca takviye malzemeleridir. Fakat bu tür doğal olmayan liflerin hem üretim maliyetlerinin fazla olması, hem de üretim sırasında çevreye salınan atıklar bilim adamlarını daha çevreci çözümler araştırmaya itmiştir. Doğal liflerin üretimleri için enerji maliyetlerinin az olması ve üretimleri esnasında doğaya karbon salınmaması onlara çevresel ve ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır. Buna karşın doğal lifler petrol esaslı liflerle kıyaslandığında daha düşük mukavemet değerlerine sahiptirler. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için kompozit malzemelerin içerisine belirli oranlarda takviye yapılmaktadır. Bunların en göze çarpanı kompozit malzemelerin içerisine partikül takviyesi yapmaktır.

Bu çalışmada; seramik partiküllerle takviye edilecek jüt/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, Mod I, Mod I-II ve Mod II yükleme durumundaki kırılma toklukları ve kırılma enerjileri belirlenmiştir. Bu kapsamda 4,5 μ , 9,3 μ ve 53 μ tanecik büyüklüğünde ve %0, %3, %6 ve %9 takviye oranında silisyum karbür (SiC) partiküller ile takviye edilerek 6 tabakalı jüt/epoksi kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalardan Compact Tension Shear (CTS) test numuneleri standarda (ASTM) uygun ölçülerde kesilmiştir. Kırılma tokluklarını belirlemek için CTS numuneleri ARCAN test aparatı kullanılarak farklı açılarda (0°, 30°, 45°, 60° ve 90°) çekme testine tabi tutulmuştur. SiC partikül boyutu ve takviye oranının kırılma tokluğuna etkisini daha iyi anlamak için kırılma testleri sonrası, hasarlı numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir.

Projedeki bir diğer çalışmada, seramik partikül takviyesine sahip jüt/epoksi kompozit plakaların kırılma toklukları, ANSYS sonlu elemanlar paket programında J-İntegral metodu ile belirlenmiştir. Bunun için farklı oranda ve farklı tanecik büyüklüğü ile takviye edilmiş jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu: 625.03.00

Anahtar Kelimeler: Kırılma mekaniği, silisyum karbür, jüt/epoksi, sonlu elemanlar, mekanik özellikler, CTS, arcan test aparatı, SEM, partikül büyüklüğü.

Sayfa Adedi: 145

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Halit GÜN

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF PARTICULATE REINFORCED COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Kamil Seçkin BORAZAN

**UŞAK UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July, 2018

ABSTRACT

Composite materials are produced by combining two or more materials at macro level in order to create new material with superior properties which have better properties than its constituent materials. Composite materials are used as the alternative materials to the conventional materials in many engineering applications due to their superior properties such as lightness, high impact strength, high corrosion resistance, and appropriate thermal properties. Fiber reinforced composite materials are the most used composite material type in the structures. Glass, carbon, aramid, and boron fibers are the major reinforcement materials which are used in the fiber reinforced composite materials. But, either the manufacturing cost of such unnatural fiber is expensive or waste emission into the environment during their manufacturing encourage researchers to find more eco-friendly solutions. Due to low energy cost for manufacturing of natural fibers without carbon emitting into the environment during their manufacturing, this type of fibers are preferred. Since the natural fibers have low strength value when compared with the petroleum-based fibers, to enhance mechanical strength of composite materials, they are reinforced with different materials in certain rates. The most prominent method is to make particle reinforcement into composite materials.

In this project, fracture toughness of jute/epoxy laminated composites, which were reinforced with ceramic particles, were determined under Mode I, Mode I-II, and Mode II loading condition. In this extend, jute/epoxy composite plates with six lamina, which were reinforced with silicone carbide (SiC) having 4,5 μ , 9,3 μ , and 53 μ particle size and 0%, 3%, 6%, and 9% reinforcement ratio, were manufactured. Compact tension shear (CTS) test specimens were cut according to the ASTM standard from manufactured composite plates. CTS test specimens were exposed to tensile test at different angle (0°, 30°, 45°, 60°, and 90°) by using Arcan test fixtures. After fracture tests the surface morphology of damaged specimens were photographed with scanned electron microscope (SEM) to better understand the effect of particle size and reinforcement ratio of SiC on the fracture toughness.

Another study in the project were determined of the fracture toughness of jute/epoxy composite plate, which have ceramic particle reinforcement by using Ansys finite element package program with J-integral method. For this, mechanical properties of jute/epoxy laminated composites, which have reinforced with different particle size and ratio, were determined, experimentally.

Science Code: 625.03.00

Key Words: Fracture toughness, silicone carbide, jute/epoxy, finite element, mechanicalproperties, compact tension shear (CTS), arcan test fixturex, scanned electron microscope (SEM), particle size.

Page Number: 145

Adviser: Prof. Dr. Halit GÜN

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmam sırasında, bilimsel bir çalışmanın ne kadar yorucu ve stresli olduğunu anladım. Bu yolda birçok problemle karşılaştım. Maddi ve manevi birçok sıkıntının yanında proje sırasında yaşadığım zorlu süreç anlatılamaz. Sonuç olarak bütün bu sıkıntıları atlatarak bu çalışmanın bitmesini sağlayan;

Yüksek Lisans çalışmam süresince yaptığı katkılardan ve yol göstericiliğinden dolayı danışmanım Sayın Prof. Dr. Halit GÜN'e

Değerli fikirleri ile yüksek lisans çalışmam süresince yolumu aydınlatan, birçok konuda yardımcı olan özellikle teorik bilgilerle yolumu açan ve çalışmanın ileriye taşınmasını sağlayan Sayın Arş. Gör. Dr. H. Ersen BALCIOĞLU'na

Tabakalı kompozitlerin üretiminde büyük emeği olan Derviş YALÇIN kardeşime,

Tez çalışmamın bazı aşamalarında teknik desteklerinden dolayı Uşak Pull-Tech FRP fabrikasına,

SEM görüntülerinin alınmasında emeği geçen Sayın Dr. Erkan HALAY'a

2015/TP002 numaralı projeme mali desteklerinden dolayı Uşak Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne,

Sonlu elemanlar analizi için Dokuz Eylül Üniversitesi'nin imkanlarının kullanılmasında bizlere yardımcı olan bu üniversitenin Mühendislik Fakültesi Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a

Ve öncelikli olarak aileme, daha sonra ise hayatımın her aşamasında bana mutluluk ve huzur veren, çalışmam süresince beni hiç yalnız bırakmayan ve manevi olarak beni destekleyerek bu projenin bitmesini sağlayan biricik eşime sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Kamil Seçkin BORAZAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	xii
RESİM LİSTESİ	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
SİMGELER ve KISALTMALAR	xvi
1. BÖLÜM GİRİŞ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi.....	12
1.3. Tezin Anahatları.....	13
1.4. Destekleyenler.....	14
2. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELER	15
2.1. Kompozit Malzemelere Giriş.....	15
2.2. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri.....	16
2.2.1. Kompozitlerin Avantajları.....	16
2.2.2. Kompozitlerin Dezavantajları.....	17
2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	18
2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	19
2.4.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma.....	20
2.4.1.1. Metal Matrisli Kompozitler.....	20
2.4.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler.....	21
2.4.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler.....	22
2.4.2. Takviye'ye Göre Sınıflandırma.....	22
2.4.2.1. Fiber (elyaf) Takviyeli Kompozitler.....	23
2.4.2.2. Partikül Takviyeli Kompozitler.....	24
2.4.2.3. Tabakalı Kompozitler.....	24
2.4.2.4. Dolgu Yapılı ve (karma) Kompozitler.....	25
2.5. Polimer Matrisli Kompozitler.....	26
2.5.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Yapısı ve Özellikleri.....	26
2.6. Matris Malzemeleri.....	26
2.6.1. Termosetler.....	26
2.6.1.1. Epoksi Reçineler.....	27

2.6.1.2.	Polyester Reçineler	27
2.6.1.3.	Aminler	27
2.6.2.	Termoplastikler	28
2.7.	Termoset ve Termoplastiklerin Karşılaştırılmaları	28
2.8.	Polimer Esaslı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	28
2.8.1.	Elle Yatırma Yöntemi	29
2.8.2.	Püskürtme Yöntemi	30
2.8.3.	İplik Sarma Yöntemi.....	30
2.8.4.	Profil Çekme Yöntemi	31
2.8.5.	Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu Yöntemi	31
2.9.	Takviye Olarak Kullanılan Doğal Fiberler	32
2.9.1.	Jüt	32
2.9.2.	Keten.....	33
2.9.3.	Kenevir	34
2.9.4.	Kenaf	35
2.9.5.	Sisal	36
2.9.6.	Rami.....	36
3.	BÖLÜM KIRILMA MEKANİĞİ.....	38
3.1.	Kırılma Mekanikğine Giriş.....	38
3.2.	Kırılma Çeşitleri	39
3.2.1.	Sünek Kırılma	39
3.2.2.	Gevrek Kırılma.....	40
3.2.3.	Yorulma Kırılması.....	40
3.2.4.	Sürünme Kırılması.....	41
3.3.	Kırılma Teorileri	41
3.3.1.	Griffith Teoremi	41
3.3.2.	Irwin Teoremi.....	42
3.4.	Lineer Elastik Kırılma Mekanikği	42
3.4.1.	Kırılma Modları.....	43
3.4.2.	Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değişirme	44
3.4.3.	Çatlak Ucu Gerilme Yoğunluğu ve Kayma Bileşenleri	45
3.5.	Elastik Plastik Kırılma Mekanikği.....	49
3.5.1.	Çatlak ucu plastik bölge.....	49
3.6.	Kırılma Enerjisi	50
3.6.1.	Griffith Gevrek Kırılma Teorisi	50
3.6.2.	Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı.....	51

3.7.	Kırılma Tokluğu Deney Türleri	52
3.7.1.	Üç Nokta Eğme Deneyi	53
3.7.2.	Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi.....	53
3.7.3.	Kompakt Çekme Deneyi (CST)	54
3.7.4.	Çift Ankastre Kiriş Test Tekniği (DCB).....	55
4.	BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ.....	56
4.1.	Giriş.....	56
4.2.	Takviye Malzemeleri ve Kompozitin Tüm Bileşenleri	56
4.3.	Kompozit Malzeme Bileşenlerinin Üretime Hazırlanması ve Karışım Oranları	59
4.4.	Partikül Takviyeli Kompozit Plakaların Üretimi	61
4.5.	Deney Numuneleri	64
4.5.1.	Mekanik Özellikler İçin Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	65
4.5.2.	Kırılma Tokluğu için CTS Test Numunesinin Hazırlanması	65
4.5.2.1.	Cts Numunelerine Çatlak Açılması	66
4.6.	Arcan Test Aparatı	67
5.	BÖLÜM DENEYSEL ÇALIŞMALAR	69
5.1.	Giriş.....	69
5.2.	Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	70
5.2.1.	Çekme Dayanımının Belirlenmesi.....	70
5.2.2.	Basma Dayanımının Belirlenmesi	75
5.2.3.	Kayma Dayanımının Belirlenmesi	78
5.3.	Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi	79
5.3.1.	Mod I Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması	84
5.3.2.	Mod II Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması.....	85
5.3.3.	Mix Mod (Mod I-II) Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması	86
5.4.	Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi	89
6.	BÖLÜM KIRILMA TOKLUĞUNUN J-İNTEGRAL METODU İLE BELİRLENMESİ.....	93
6.1.	Giriş.....	93
6.2.	Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması	94
6.3.	J-İntegral Metodu.....	96
6.4.	J-İntegral Değerinin Hesaplanması	97
6.5.	Sonlu Elemanlar Analizinin Sonuçları	99
7.	BÖLÜM SONUÇLAR VE TARTIŞMA	103
7.1.	Giriş.....	103
7.2.	Test Sonuçlarının Karşılaştırılması	104

7.2.1. Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması	104
7.2.1.1. Çekme Dayanımının Karşılaştırılması	104
7.2.1.2. Kayma Dayanımının Karşılaştırılması	109
7.2.1.3. Basma Dayanımının Karşılaştırılması	110
7.2.2. Kırılma Mekanizmasının Karşılaştırılması	112
7.2.2.1. Mod I Kırılma Tokluğu	113
7.2.2.2. Mod I-II (Mixed Mode) Kırılma Tokluğu	115
7.2.2.3. Mod II Kırılma Tokluğu	118
7.2.3. Kırılma Enerjisinin Karşılaştırılması	120
7.2.3.1. Mod I Durumundaki Enerji	120
7.2.3.2. Mod I-II (mix mode) Durumundaki Enerji	122
7.2.3.3. Mod II Durumundaki Enerji	124
7.2.4. Kırılma Tokluklarının Modlara Göre Karşılaştırılması	126
7.2.5. Kırılma Enerjisinin Modlara Göre Karşılaştırılması	127
7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri ve Analizleri	128
7.4. Sonuçlar ve Tartışma	135
KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ	145

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kompozitin bileşenleri [88]	16
Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	20
Şekil 2.3 Kompozitlerin takviye göre sınıflandırılması [87]	23
Şekil 2.4 Elyaf dokuma türleri [88]	24
Şekil 2.5 Tabakalı kompozit [86]	25
Şekil 2.6 Elle yatırma yönteminin aşamaları [85]	29
Şekil 2.7 Püskürtme yöntemi [85]	30
Şekil 2.8 İplik sarma yöntemi [85]	31
Şekil 2.9 Profil çekme yöntemi [91].....	31
Şekil 2.10 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi uygulaması [92]	32
Şekil 2.11 Hasat edilmiş jüt demetleri ve kumaşı.....	33
Şekil 2.12 Keten lifleri	34
Şekil 2.13 Kenevir bitkisi kesiti ve lifleri.....	35
Şekil 2.14 Kenaf lifleri	35
Şekil 2.15 Sisal bitkisi	36
Şekil 2.16 Rami lifleri	37
Şekil 3.1 Sünek kırılma	39
Şekil 3.2 Gevrek kırılma	40
Şekil 3.3 Yorulma kırılması	41
Şekil 3.4 Kırılma modları [57]	43
Şekil 3.5 İki eksenli gerilme altındaki numunelerin düzlem gerilme (a) ve düzlem şekil değiştirme (b) şartları [45].....	45
Şekil 3.6 Çatlak ucu gerilme dağılımları [57]	46
Şekil 3.7 Bir çentik ve çatlağın ucunda gerilme yığılması [52]	50
Şekil 3.8 SENB (single-edge-notched bend) numunesi [79].....	53
Şekil 3.9 SENT (single edge notched tension) numunesi [94]	54
Şekil 3.10 CST (compact tension specimen) numunesi [93]	54
Şekil 3.11 DCB (double cantilever beam) numunesi, ASTM 5528 [71]	55
Şekil 4.1 Compact tension shear (CTS) test numunesi	65
Şekil 4.2 Solidworks programında tasarlanmış arcan test aparatının görünümü	67
Şekil 5.1 ASTM 3039-76 standardından (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yöndeki çekme testi numune geometrileri	71
Şekil 5.2 Temsili gerilme - şekil değiştirme grafiği.....	73
Şekil 5.3 ASTM 3410 - 87 standardından (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yöndeki basma testi numune geometrileri	76
Şekil 5.4 Fiber yönüne 45° lik açıda çekme testi uygulanan kayma numunesinin geometrisi	78
Şekil 5.5 Tipik uzama(mm) – yük(N) diyagramı.....	81
Şekil 5.6 CTS numunesi üzerinde (σ_y) ve (τ_{xy}) bileşenlerinin gösterimi	82
Şekil 6.1 x-y koordinat eksenini	94
Şekil 6.2 Shell 181 eleman tipi [95]	95
Şekil 6.3 Geometrik modele ait fiber yönelmesi ve tabaka dizilimi	95
Şekil 6.4 Geometrik modele mesh uygulanması ve sınır şartlarının tanımlanması.....	96
Şekil 6.5 Çatlak etrafındaki J-integral yörünge tanımı	97

Şekil 6.6 J-İntegral değerinin okunması	98
Şekil 6.7 Yükleme açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değerinin değişimi (a) yakın yörünge ve (b) uzak yörünge	101
Şekil 6.8 Yükleme durumuna bağlı olarak meydana gelen von Mises gerilmeleri	102
Şekil 7.1 Fiber yönündeki elastisite modülünün (E_1) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	106
Şekil 7.2 Fibere dik yöndeki elastisite modülünün (E_2) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	107
Şekil 7.3 Fiber yönündeki max. çekme dayanımının (X_t) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	108
Şekil 7.4 Fibere dik yöndeki max. çekme dayanımının (X_t) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	108
Şekil 7.5 Kayma dayanımının (G_{12}) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi ...	110
Şekil 7.6 Fiber yönündeki basmadayanımının (X_c) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	111
Şekil 7.7 Fibere dik yöndeki basma dayanımının (Y_c) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi	112
Şekil 7.8 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre Mod I durumundaki kırılma tokluğu değerlerinin (K_I) değişimi	114
Şekil 7.9 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 30° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi	117
Şekil 7.10 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 45° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi	117
Şekil 7.11 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 60° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi	117
Şekil 7.12 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre Mod II durumundaki kırılma tokluğu değerlerinin (K_{II}) değişimi	119
Şekil 7.13 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 0° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_I) değişimi	121
Şekil 7.14 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 30° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_I) değişimi	123
Şekil 7.15 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 45° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_I) değişimi	123
Şekil 7.16 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 60° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_I) değişimi	124
Şekil 7.17 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 90° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_{II}) değişimi	125
Şekil 7.18 53μ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına ($^\circ$) göre kırılma tokluklarının değişimi	126
Şekil 7.19 $9,3\mu$ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına ($^\circ$) göre kırılma tokluklarının değişimi	126
Şekil 7.20 $4,5\mu$ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına ($^\circ$) göre kırılma tokluklarının değişimi	127
Şekil 7.21 53μ , $9,3\mu$ ve $4,5\mu$ takviye boyutundaki numunelerin deney açısına ($^\circ$) ve takviye oranlarına (%) göre kırılma enerjilerinin (G) değişimi	128

RESİM LİSTESİ

Resim 4.1 Epoksi reçine ve sertleştirici.....	57
Resim 4.2 Doğal jüt top kumaşı.....	58
Resim 4.3 Üç farklı boyuttaki silisyum karbürler (SiC).....	58
Resim 4.4 100cm x 80cm ebatlarında kesilen jüt kumaşı	59
Resim 4.5 Altı tabakalı kompozit levha için gerekli (a) epoksi (b) sertleştirici miktarları	60
Resim 4.6 Silisyum karbür (SiC) miktarının ayarlanması.....	60
Resim 4.7 Epoksi, sertleştirici ve SiC tozların karışımı	61
Resim 4.8 Metal sac levha üzerine mikro filmin serilmesi.....	62
Resim 4.9 Matris karışımının jüt kumaşa absorbe edilmesi.....	62
Resim 4.10 (a) Mikro filmin en üst kata serilmesi (b) film üstüne metal sac yerleştirilmesi	63
Resim 4.11 Kompozit levhanın hidrolik prese yerleştirilmesi	63
Resim 4.12 Kompozit levhanın prestren çıktıktan sonra soğuması	64
Resim 4.13 Üretilmiş kompozit plakalar	64
Resim 4.14 CTS numunelere matkapta delik açılması.....	66
Resim 4.15 Çatlak açılmış CTS numunesi.....	67
Resim 4.16 Arcan test aparatına CTS numunesinin bağlanması	68
Resim 5.1 Üniversal çekme-basma test cihazı (UTEST)	69
Resim 5.2 Ekstansiyometrenin test numunesine bağlanması	72
Resim 5.3 ASTM 3039-76 numunelerinden (a) fiber yönünde çekme testi yapılmış numuneler ve (b) fibere dik yönde çekme testi yapılmış numunelerin görüntüleri	74
Resim 5.4 ASTM numunesinin test esnasındaki kırılması.....	75
Resim 5.5 Basma numunesinin test cihazına bağlanması	77
Resim 5.6 ASTM 3410 – 87 standart numaralı basma numunelerinin deney sonrası hasar görüntüleri	77
Resim 5.7 Fiber yönüne 45° lik açıda çekme testi uygulanan kayma gerilmesi numunelerinin deney sonrası hasarlı görüntüleri	79
Resim 5.8 CTS numunesinin arcan test aparatına olan bağlantısı	80
Resim 5.9 CTS numunesinin mod I durumundaki (0°) testi.....	84
Resim 5.10 Mod I durumundaki deney esnasında numunede oluşan hasar şekli	85
Resim 5.11 CTS numunesinin mod II durumundaki (90°) testi	86
Resim 5.12 Mod II durumundaki deney esnasında numunede oluşan hasar şekli	86
Resim 5.13 CTS numunelerinin (a) 30° (b) 45° (c) 60° deki mod I-II kırılma tokluğu deneyleri	87
Resim 5.14 Mod I –II kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan (a) ve (b) 30° için (c) ve (d) 45° için (e) ve (f) 60° için CTS hasarlı numune görüntüleri	89
Resim 7.1 Takviyesiz (%0) numunelerin SEM görüntüleri	129
Resim 7.2 53µ boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü	130
Resim 7.3 53µ boyutlu numunelerin değişik SEM görüntüleri	131
Resim 7.4 9,3µ boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü	132
Resim 7.5 9,3µ tanecik boyutlu numunede bulunan silisyum karbür toz parçacıklarının SEM görüntüsü.....	133
Resim 7.6 9,3µ tanecik boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü	133
Resim 7.7 4,5µ tanecik boyutlu numunelerden çekilmiş SEM görüntüleri.....	134

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartları [47].....	70
Çizelge 6.1 Kompozit numunelerin mekanik özellikleri.....	93
Çizelge 6.2 Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	99
Çizelge 6.3 Nümerik analize göre farklı açılardaki kırılma tokluğu değerleri.....	100
Çizelge 7.1 Fiber yönündeki elastisite modülü (E_1) ile fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2) değerleri.....	105
Çizelge 7.2 Fiber yönündeki çekme dayanımı (X_t) ile fibere dik yöndeki çekme dayanımı (Y_c) değerleri.....	105
Çizelge 7.3 Kayma elastisite modülü olan E_{45} ile kayma dayanımı olan G_{12} değerleri.....	109
Çizelge 7.4 Fiber yönündeki basma dayanımı olan X_c ile fibere dik yöndeki basma dayanımı olan Y_c değerleri.....	110
Çizelge 7.5 Mod I kırılma tokluğu değerleri (K_I) ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$).....	113
Çizelge 7.6 Mod I-II (mixed mode) kırılma tokluğu değerleri ($K_{I/II}$) ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$).....	115
Çizelge 7.7 Mod II kırılma tokluğu değerleri (K_{II}) ($\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$).....	118
Çizelge 7.8 Mod I durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_I) (kJ/m^2).....	121
Çizelge 7.9 Mod I-II durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_T) (kJ/m^2).....	122
Çizelge 7.10 Mod II durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_{II}) (kJ/m^2).....	125

SİMGELER ve KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
ϵ	Çekme testinden elde edilen numunenin birim şekil değişimi
ν_{12}	Poisson's oranı
E	Elastisite modülü
t	Numune et kalınlığı
W	Numune genişliği
E_1	Fiber yönü elastisite modülü
E_2	Fibere dik yön elastisite modülü
E_{45}	Çapraz yön elastisite modülü
G_{12}	Kayma modülü
X_c	Fiber yönü basma mukavemeti
X_t	Fiber yönü çekme mukavemeti
Y_c	Fibere dik yön basma mukavemeti
Y_t	Fibere dik yön çekme mukavemeti
K	Gerilme yoğunluk faktörü
K_I	Açılma modundaki (mod I) gerilme yoğunluk faktörü
K_{II}	Kayma modundaki (mod II) gerilme yoğunluk faktörü
$K_{I/II}$	Mixed mode daki gerilme yoğunluk faktörü
K_{IC}	Kırılma tokluğu sabiti
Σ	Gerilme
a	Çatlak uzunluğu
α	Deney çekme açısı
$f(a/w)$	Geometrik faktör
σ_{xx}	x eksenindeki gerilme değeri

σ_{yy}	y eksenindeki gerilme değeri
σ_{zz}	z eksenindeki gerilme değeri
G	Enerji yayılım hızı
G_I	Mod I deki enerji yayılım hızı
G_{II}	Mod II deki enerji yayılım hızı
G_T	Mod I-II deki enerji yayılım hızı
E_I	Açılma modundaki efektif modül
E_{II}	Kayma modundaki efektif modül
P_{max}	Deneysel olarak bulunan max. kopma kuvveti
Γ	Saatın tersi yönündeki kapalı yörünge

Kısaltmalar	Açıklama
MMC	Metal matrisli kompozit
SMC	Seramik matrisli kompozit
PMC	Polimer matrisli kompozit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
CTS	Compact tension shear
LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği
SiC	Silisyum karbür
DŞD	Düzlem şekil değiştirme
DG	Düzlem gerilme

1. BÖLÜM GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzdeki mühendislik malzemelerini bilmek ve tanımak birçok tasarımcı ve imalatçı tarafından oldukça önemli bir konudur. Makina elemanları, çalışma şartlarına uygun gerekli mukavemeti sağlayacak çalışma ortamının tüm şartlarını karşılayacak şekilde malzemeden imal edilmek zorundadır. Bunun için ise tasarımcılar mühendislikte kullanılan tüm malzemelerin fiziksel ve kimyasal tüm özelliklerini en iyi şekilde bilmek ve analiz etmek zorundadırlar.

Mühendislik malzemelerini metaller, seramikler, polimerler ve hibrit malzemeler olmak üzere 4 ana kısma ayırabiliriz. Bunların da kendi içlerinde birçok alt kısma ayrıldığını söyleyebiliriz. Bu malzemelerin yetersiz kaldığı durumlarda ise devreye kompozit malzemeler girer. Bizim asıl malzememiz olan kompozit malzemeler ise bu ana malzemelerden en az ikisinin fiziksel olarak makro veya mikro yapıda birleşmesiyle meydana gelen yeni bir malzemedir.

Kompozit malzemeler genel özellikleri itibariyle birçok malzemeye göre üstün özelliklere sahip olabilmektedir. Mekanik dayanım, sertlik, ısı direnç, yorulma direnci, hafiflik, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık, rijitlik, kırılma tokluğu vs. gibi birçok yönden üstün özellikleri olabilmektedir. Ayrıca bu özelliklerinin yanında dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşmektedir. Bu amaçla kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değişmeyen temel ilke ise zayıf yönlerinin iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Üstün özelliklerinin yanında kullanım esnasında veya üretim esnasında oluşabilecek mikro bir çatlakla malzeme kırılabilmekte ve büyük hasarlar meydana getirebilmektedir. Kompozit malzemeler üzerine yapılmış sayısız yayın ve araştırmalar mevcuttur ve son zamanlarda kompozit malzemenin öneminden dolayı bunların sayısı giderek artmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Bulut ve Erdoğan [1] doğal lif takviyeli kompozit materyallerde takviye materyali olarak kullanılan doğal lifler, içyapıları, mekanik ve fiziksel özellikleri ile matris polimerleri incelemiştir. Hem mukavemet ve dayanıklılık kazandıran hem de biyo uyumluluk

özelliği ile ön plana çıkan doğal liflerin takviye edilmesi ile geliştirilen kompozit malzemeler çok farklı alanlarda ve sektörlerde üstün özellikleri sayesinde birçok farklı materyallere göre öncelik sahibi olmaktadır ve kullanım alanlarının genişlemekte olduğunu gözlemlemişlerdir.

Khan ve arkadaşları [2] bambu elyaf takviyeli epoksili kompozitlerin kırılma mekaniğini deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmada bambu liflerinin NaOH konsantrasyonu tespit edilmiştir. Sonuçlar, % 6 NaOH ile mukayese edilmiştir. Bambu elyaf takviyeli epoksili kompozitler, epoksi matris içinde rasgele dağılım gösteren 10mm, 20mm ve 25mm uzunluğunda % 6 NaOH ile işlenmiş bambu elyafları kullanılarak imal edilmiştir. Bambu lif takviyeli epoksi kompozitlerinin mod-I düzlem gerilme kırılma tokluğu (K_{IC}), ASTM D5045'e göre Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM) yaklaşımına dayanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, 25 mm uzunluğunda elyaf ihtiva eden kompozitlerin en büyük (K_{IC}) değerine sahip olduğu, 10 mm elyaf uzunluğundaki kompozitlerin en düşük kırılma tokluğu (K_{IC}) değerine sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Shrivastava ve arkadaşları [3] fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin, kolay üretim yöntemleri, düşük ağırlığa sahip olmaları, yüksek mukavemet, düşük üretim maliyetleri vb. gibi birçok özelliğe sahip olduğunu araştırmıştır. Ancak doğal elyaf iyi özelliklere sahip olmakla birlikte, suya olan yakınlığı ve uygun olmayan matris arayüzü gibi olumsuz özelliklere de sahiptir. Hindistan cevizi lifinin nem emme davranışını azaltmak için ise kimyasal olarak sodyum hidroksit ile işlenmiştir. Bu kimyasal işlem, fiberin malzemeye olan yakınlığını azaltır ve böylece yüzey pürüzlülüğünü arttırarak daha iyimatris takviyesi ile arayüz bağlantısını sağlar. Bu çalışma kompozitlerin mekanik özelliklerinin, liflerin hacim oranları ve lif uzunluğuna göre değiştirdiğini doğrulamaktadır.

Aral ve arkadaşları [4] takviye malzemesi olarak ikisi %100 polyester ve diğeri %100 pamuk hammaddeli üç farklı düz dokuma kumaş, matris malzemesi olarak ise doymamış polyester reçine kullanmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan kumaşlar tek yönlü ve sürekli veya küçük boyutlarda ve rastgele olarak tasarlanmıştır. Plakalar şeklinde üretilen deneysel numunelerin darbe ve çekme deneyleri yapılmış ve bu sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler saf reçine değerleriyle mukayese edildiğinde, üretilen tüm kompozit plakalarda darbe dayanımı kazancının sağlandığı görülmüştür. Çekme sonuçlarına

bakıldığında ise kompozit plakaların daha yüksek uzama değerlerine sahip olduğu ve saf reçineye göre daha sünek davranış gösterdiğini gözlemlemiştir.

Gupta ve Srivastava [5] hibrit elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine çalışmıştır. Fiber takviyeli polimer kompozitler birçok avantaja sahiptir. İki veya daha fazla elyafın tek bir polimer matrisi içerisine konması, hibrid kompozitlerin gelişmesine yol açar. Hibridizasyonun tek lif takviyeli polimer kompozitin mekanik özelliklerini iyi yönde geliştirebilir. Bu çalışma doğal elyaf takviyeli polimer kompozitin mekanik özelliklerinin, benzer şekilde yüksek uzama elyaflarının dahil edilmesiyle arttığını göstermektedir.

Ku ve arkadaşları [6] doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin gerilme özelliklerini incelemiştir. Khoathane ve arkadaşları ağartılmış kenevir lifleriyle takviye edilmiş kompozitlerin çekme mukavemeti ve elastisite modülünün artan lif yüklemesi ile inanılmaz bir şekilde arttığını bulmuşlardır. Matematiksel modelleme ile Karışım kuralının (ROM) tahmin edildiği ve farklı doğal elyaf takviyeli HDPE kompozitlerinin deneysel gerilme mukavemetinin birbirine çok yakın olduğu keşfedilmiştir.

Saba ve arkadaşları [7] dinamik mekanik analiz tekniği ile depolama modülü (E'), kayıp modülü (E'') ve sönüm faktörü ($\tan \sigma$) gibi dinamik parametrelerin sıcaklıkla ilişkisi ve kompozit malzemenin güçlendirilmiş elyaf ve polimer matrisi arasındaki arayüzey bağlanmalarını incelemiştir. Dinamik parametreler, lif uzunluğu ve yüklenmesindeki artıştan olağandışı bir şekilde etkilenmiştir. Doğal lif takviyeli polimer kompozitler, hibrid ve nano kompozitlerin dinamik mekanik özelliklerini ve uygulamalarını kapsayan kapsamlı bir literatür kaynağı olarak karşımıza çıkmıştır.

Arifuzzaman Khan ve arkadaşları [8] dokuma yapısının ve doğrultusunun mekanik özelliklere yani gerilme, eğilme ve darbe özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çalışmada dokuma jüt kompozitin (çözgü yönünde) ortalama gerilme mukavemeti (TS), çekme modülü (TM), bükülme mukavemeti (FS), bükülme modülü (FM) ve darbe dayanımı (IS) yaklaşık %103, %95.2, %42.4 ve %85.9 oranında ve kompozit numuneler için maksimum gerilmede %11.7 oranında iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir. Çözgü yönündeki kompozitlerin kuvvet ve modüllerinin atkı yönündeki değerlere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Çözgü ve atkı yönlerinde WJF kompozitleri, dokuma olmayan jüt kumaş (NWJF) kompozitlerinden üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu görmüşlerdir.

Zabihzadeh ve arkadaşları [9] bu çalışmada kolza tohum katkılı termoplastik polimer kompozit panellerin eğilme mukavemetine ve fiziksel özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) ve kolza tohumu atıkları kullanılarak düz preslenmiş kompozitler sıcak pres yöntemi ile üretilmiştir. Esneklik modülü ve bükülme mukavemeti ağırlıklı olarak katkı maddesi içeriğinden etkilenmiştir. Doldurucu içeriğinin artmasıyla birlikte, bir çeşit selülozik dolgu maddesinin güçlü hidrofilitesi sayesinde malzemenin su emme ve kalınlık şişmesi de önemli ölçüde artmıştır. Su emme özelliğinin, bir Fick difüzyon işleminin kinetiğinin varlığını kanıtlamıştır.

Elbadry ve arkadaşları [10] hasır jüt kompozitlerin çekme ve eğilme özelliklerine jüt dokuma kumaşının etkisini, farklı lif ağırlığı açısından araştırmışlardır. Ayrıca, bu kompozitlerin çentik duyarlılığında, sonlu elemanlar metodu (FEM) ile hesaplanan karakteristik mesafeyi kullanarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar jüt mat kompozitlerinin çekme ve bükülme özelliklerinin, lif ağırlığı içeriğini arttırarak ve jüt kumaşını deri tabakaları olarak ekleyerek arttığını göstermiştir.

Campilho ve arkadaşları [11] bu çalışmada doğal elyaf kompozitlerin arasındaki yapışkan bağlantıların çekme kırılma tokluğu, sünek bir yapıştırıcı ile yapıştırılarak ve sertleştirilerek incelemiştir. Kürlenmiş numuneler elde etmek için geleneksel yöntemler kullanılırken, birleştirilen bağlantı içindeki yapıştırıcı için J-integrali düşünülmüştür. Çatlak ucu açıklığının ve test sırasında çatlak ucundaki yapışkan rotanın değerlendirilmesi için bir optik ölçüm yöntemi geliştirmiştir ve bu yöntem jüt takviyeli doğal elyaf kompozitlerin kırılma davranışlarını daha sonraki mukavemet tahmini için kullanılmıştır.

Liu ve Hughes [12] dokuma ipliklerinin doğrusal yoğunluğu, dokuma örgü biçimleri ve dokuma istif sırasının, kompozitler üzerindeki kırılma davranışı ve kırılma tokluğuna değişim etkilerini araştırmışlardır. Dokuma kumaş ilavesinin kırılma tokluğunda takviyesiz olana göre 2-4 kat daha fazla iyileşme sağladığı ve çapraz kat laminat için ise yaklaşık 6 MPa m^{1/2} değerinin elde edildiği bulunmuştur. Kırılma davranışı ve kırılma tokluğunun atkı ipliğinin doğrusal yoğunluğuna ve çatlak yayılım yönüne dokuma yönüne göre kuvvetli bir

şekilde bağımlı olduğu bulunmuş ancak örgü tipinin etkisinin belirgin olmadığı kanısına varılmıştır.

Patel ve arkadaşları [13] kenevir lifi hasır takviyeli sac kalıplama bileşiminin (H-SMC) stres yoğunluğu faktörünü ve gerinim enerji boşalma hızı açısından kırılma tokluğunu kompakt gerilim (CT) yöntemi ile ölçmüş ve katkı cam elyafı ile karşılaştırmıştır. Bileşik optimizasyon için üç materyal parametresi düşünülmüştür. H-SMC kompozitleri için en yüksek kırılma tokluğu yaklaşık %30 hacimlik bir fiber yüklemesinde elde edilirken, aynı zamanda H-SMC'nin kırılma tokluğunun mineral dolgu maddesi içeriğine duyarlı olduğu da gösterilmiştir.

Mustapha ve arkadaşları [14] doğal elyaf takviyeli toprak bazlı kompozit malzemelerin mukavemet, kırılma tokluğu ve dirençlerini kombine olarak deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Laterit, kil ve saman karışımlarından oluşan kompozitlerin sağlamlıkları stabilize edilmiştir. Basınç dayanımı, eğilme / bükülme mukavemeti ve kırılma tokluğunun farklı oranlardaki materyallerin kullanılmasıyla kompozit ve çatlak ucu koruma modellemeleri araştırılmıştır. Bu, saman liflerinin çatlak köprüsü oluşturduğuna dair kanıt ortaya koymuştur. Ölçülen direnç eğrisi davranışının küçük ve büyük ölçekli köprü modellerinden gelen tahminlerle tutarlı olduğu gösterilmiştir. Sonuçların sonuçları, daha sonra, sürdürülebilir çevre dostu evler için sağlam yeryüzü tabanlı yapı malzemeleri tasarımında potansiyel uygulamalar için tartışılmaktadır.

Rawandi ve arkadaşları [15] doğal elyafların tabakalar üzerinde kullanılarak dikiş kalınlığı boyunca, keten elyaf / epoksi kompozit tabakaların kırılma tokluğu ve gerilme özellikleri üzerine çalışmıştır. Gerilme ve çift konsol kiriş testleri sırasıyla düzlem içi gerilme özelliklerini ve Mode I ara tabakasının kırılma tokluğunun karakteristik özelliklerini belirlemek için yapılmıştır. Sonuçlar, dikişlerden kaynaklanan kusurlara bağlı olarak kompozitlerin gerilme özelliklerinde azalmanın, her iki dikiş malzemesi için hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir.

Kim ve arkadaşları [16] epoksi yapıştırıcısının kırılma tokluğunu iyileştirmek için, siyah karbon ve nanokil gibi nano-parçacık katkı maddeleri ile epoksi reçineyi karıştırmışlardır. Kırılma tokluğu, oda sıcaklığında (25°C) ve dondurucu sıcaklıkta (-150°C) tek kenarlı çentikli büküm numunesi kullanılarak deneysel olarak ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre,

nano-partiküllerle takviye edilmesi, oda sıcaklığında kırılma tokluğunu iyileştirmiştir fakat katılaştırma etkisine rağmen dondurucu sıcaklıkta ise kırılma tokluğunu azalttığı görülmüştür.

Lauke [17], parçacık takviyeli polimerlerin kırılma tokluğu, parçacıkların boyutundan çok etkilendiği için kullanılan malzemelere ve değerlerin karşılaştırıldığı hacim kısımlarına bağlı olarak geliştirilebilir veya azaltılabilir olduğunu gözlemlemiştir. Ara yüzdeki stres kriterleri daha küçük parçacıkların kırılma tokluğunu arttırdığı sonucunu desteklemektedir.

Watanabe ve arkadaşları [18] ön dişlerin restorasyonları için kullanılan reçine kompozitlerinin Mode I ve mode II kırılma tokluk değerlerini Brezilya disk testi yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Malzeme başına her kırılma modu için 25 mm çapında ve 2 mm kalınlığında çita çentikli beş reçine kompozit disk hazırlanmıştır. Numuneler 37°C'de 24 saat boyunca damıtılmış suda saklandı ve daha sonra bir Zwick test makinesi ile oda sıcaklığında 0.25 mm/dak sabit bir çapraz hızda sıkıştırma modunda test edilmiştir. Karma ve nano parçacıklı reçine kompozitlerin kırılma tokluğu değerleri, mikro dolgulu reçine kompozitlerinkinden daha yüksek olduğu kanısına varmıştır.

El-Hajjar ve Haj-Ali [19] arcan test aparatı ile kelebek numunesi üzerinde çalışmışlardır. Kelebek numunesini, kalın kesitli çekilmiş FRP kompozitlerin düzlemsel kayma tepkisini test etmek için tasarlamışlardır. Önerilen test yönteminin amacı hem malzeme kesme sertliği hem de lineer olmayan gerilme - çekme tepkisini belirlemektir. Uygulanan yüke paralel, keskin olmayan bir çentik ve fitil yönünde kelebek geometrisinin, master kesitinde eşit kayma gerilmesi olduğu bulunmuştur. Gerinim ölçer ve kızılötesi termografik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, aparatın etkinliğini ve numune geometrisinin uyumunu doğrulamıştır.

Shameli ve Choupani [20] bu çalışmada, dokuma kumaş cam-epoksi kompozitlerinin tabaka içi kırılma mekaniği karışık modlarda statik yükleme koşulları altında deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirmiştir. Bunun için arcan test aparatı ve kelebek numuneler kullanılmıştır. Deneysel verileri sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmış ve sonuç olarak bu çalışmadaki kompozit malzemenin kayma yük koşullarında daha sert ve gerilme yüklerinde zayıf olduğunu gözlemlemişlerdir.

Gurubaran ve arkadaşları [21] makalede arcan aparatına yapıştırılmış bağlantı numunesi ile karışık mod yüklemelerde kırılma tokluğunun yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmıştır. İki çeşit arcan modellemesi ile testler gerçekleştirilmiştir. Yükleme açısı 0° , 45° ve 90° arasında değişerek, özel numuneye bağlanmak için Araldite (Huntsman) modülü ve yapışkan oranı 1:1 (Partikül ağırlığı) kullanılmıştır. Sonuç olarak normal modifiye edilmiş arcan numunesinin, kesme modunda (90°) yapışma mukavemetli ve kırılma tokluğunun açılma modundan (0°) daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğunu görmüşlerdir.

Alfonso ve arkadaşları [22] düzlem dışı yüklemelere maruz bırakılan bir tabakalı kompozitin davranışını arcan test aparatı ile bir 3D hata kriteri tanımlayarak incelemiştir. Bir arcan testine tabi tutulan kompozitte üretilen düzlem dışı gerilmeler, yığın sırası etkisini belirlemek için 3D Sonlu Elemanlar hesaplamaları kullanılarak incelenmiştir. Farklı açılarda ve farklı istif sıralamalarına tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarında ters kimlik doğrulama prosedürü ile düzlem dışı hata arzını tanımlamanın mümkün olduğu görülmüştür.

Azar ve arkadaşları [23] CTS (Kompakt gerilim Kesme), Brezilyan Disk (CSTBD) ve Yarı Dairesel Bükme (SCB) standart numuneleri kullanarak, çimento harcının kırılma karakteristiklerini doğal zeolit taşı ve silika dumanı ekleyerek araştırmışlardır. Deneysel testler çimento harcının %0, %7,5 ve %15'i SF ve Ze ile değiştirilerek yapılmıştır. Farklı yükleme modları altında çatlak ucunu ayırmak için J-integral yöntemi kullanılmıştır. Silisyum dumanının zeolit ten daha iyi kırılma karakteristiği gösterdiği görülmüştür.

Rikards ve arkadaşları [24] tek yönlü cam elyaf takviyeli bir kompozitin düzlem içi yükleme koşulları altında tüm tabaka içi kırılma davranışlarını araştırmışlardır. Deneysel olarak ölçülen kritik yüklerden, mod I, mod II ve çatlak başlangıcında çeşitli karışık kritik enerji boşalma oranları, sonlu elemanlar yöntemi ve geliştirilmiş sanal çatlak kapanması integral yöntemi yardımıyla belirlenmiştir. Bunun için CTS numunesi kullanmışlardır. Sonuç olarak kırılma kriterlerini belirlemişlerdir.

Rikards [25] tabakalı kompozitin düzlem içi yükleme koşulları altında tabaka içi kırılma davranışı araştırmıştır. Saf mod I'den mod II'ye kadar çeşitli mixed mod I / II oranları ile kompakt kayma gerilmesi numunesinin önerilen bileşik versiyonunun yardımı ile yükleme koşulları oluşturulmuştur. Deneysel olarak ölçülen kritik yüklerden, mod I, mod II ve çatlak başlangıcındaki çeşitli karışık mod I / II enerji boşalma oranlarını sonlu elemanlar yöntemi

ve gelişmiş sanal çatlak kapanma integral yöntemi yardımıyla belirlemiştir. Bu sonuçlara dayanarak, dikkate alınan bileşik için bir kırılma kriteri oluşturmuştur.

Song ve arkadaşları [26] bu makalede mod II yüküne maruz bırakılan gelişmiş CTS numunesi kullanarak başlangıçtaki çatlak ve yük büyüklüklerinin farklı şekilleri için gözlemlenen yorulma çatlakları için başlatma ve yayılma davranışının özelliklerini araştırmıştır. Düşük yük koşulunda, ön çatlak yüzeyindeki sürtünme bir ana çatlakla dönüştüğü için, çentik kökünde ikincil yorulma çatlama yaratılmıştır. Mod II yüklemesindeki yorulma kırılmasının yayılım yönü, şekli ve yük büyüklüğü ne olursa olsun, ilk çatlaktan yaklaşık 70 derecelik bir açıda olduğunu saptamışlardır.

Jansson ve Leckie [27] nin çalışmasında çekme ve eğilme testleri, yüksek mukavemetli bir silisyum karbür ve elyaf takviyeli cam - matris (LAS) kompozit üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, kompozit bileşenin mukavemetinin, geometriye ve yüklenmeye şiddetle bağlı olduğuna işaret etmektedir. Matrisin kuvveti, liflerin özelliklerinin istatistiksel niteliği ve lif çekme uzunluğunun boyutu dikkate alındığında, deneylerin tekdüze bir şekilde yorumlanmasına imkan olmadığını görmüştür.

Li ve arkadaşları [28] tarafından değişken ağırlık yüzdeleri (ağırlıkça %0, %1, %3 ve %5) nanotüpler ile takviyeli epoksi kompozitlerin tek duvarlı karbon nanotüpün (SWNT) nanomekanik özellikleri, nanoiz ve nanokroskop teknikleri ile ölçülmüştür. Nanokompozitlerin viskoelastik özellikleri nano sertlik testi dinamik mekanik analiz testleri kullanılarak ölçülmüştür. Takviye mekanizmaları SWNT takviyeli polimer kompozitlerinde nanotüp dağılımı ara yüz bağlama ve yük aktarımı referans alınarak tartışılmıştır.

Lopes ve arkadaşları [29] CaO-P2O5 cam ve bir çeşit kalsiyum tuz takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğu ve sertlik özellikleri, çentik teknikleri ve Laugier ve Evans denklemlerine göre hesaplayarak sonuçları değerlendirmişlerdir. Her iki özellik de, birtakım mikro yapısal özelliklere, yani artık gözenekli yapıya ve bileşiklerin yapısındaki ikincil β ve α trikalsiyum fosfat fazlarının yüzdesine bağlı olduğunu göstermiştir.

Fu ve arkadaşları [30] katmanlı silikat ve karbon nanotüp takviyeli polimer nanokompozitleri üzerine bir araştırma yapmış olup, dolguların yüksek en-boy oranlarına sahip olduğu bir dizi incelemeler yapmıştır. Yüksek performans partiküllü kompozitleri

geliştirmek için, bu kompozitlerin takviye, güçlendirme, sertleştirme mekanizmalarının bazı temel anlayışlarına sahip olmak gerektiğini görmüştür.

Derradji ve arkadaşları [31] silisyum karbür (SiC) mikropartikülleri ile güçlendirilmiş kimyasal reçineyle bir kompozit üretmiş ve çeşitli ağırlık oranları için (%0-20 arasında değişen oranlarda), mikro-SiC parçacıklarının mekanik ve termal özelliklere etkisini incelemiştir. Termal analizden elde edilen sonuçlar, başlangıç bozunma sıcaklığının ve artık ağırlığın takviye edici fazın eklenmesiyle önemli ölçüde iyileştiğini ortaya koymuştur.

Wang ve arkadaşları [32] bir grup polipropilen (PP) / baryum sülfat (BaSO₄) kompozitinin mekanik performansı üzerine ara yüzey etkileşimin etkisini araştırmıştır. PP'nin özel olarak işlenmiş BaSO₄ partikülleri ile sertleştirilebileceğini bulmuştur. Ara yüz modifikasyonu, iki açıdan sertleşmeye katkıda bulunur. Bunların sonucunda birinci olarak matris bağlarının plastik deformasyonu için stres koşullarını tatmin eder. İkinci olarak ise PP kristallerinin oluşumuna yol açar ve bağlaşmanın gerçekleşmesinden sonra matrisin plastik deformasyonunu teşvik eder, sonuçlarına varmıştır.

McGrath ve arkadaşları [33] alüminyum katkılı epoksi reçinelerinin termal, mekanik, kimyasal ve kırılma özelliklerini karşılaştırmak için dinamik kayma reolojisi, termomekanik analiz taraması, elektron mikroskobu (SEM), Yakın Uç X-ışını emilim ve kırılma tokluğu testlerini kullanmıştır. Boyut dağılımı, partikül şekli, yükleme ve epoksi çapraz yoğunluğunun etkilerini araştırmıştır. Sonuç olarak pratik uygulamalarda, partikül dolgulu polimer kompozitler uygulanma için kritik öneme sahiptir; çünkü, rahat malzeme özellikleri ve taşıma prosedürlerin verimliliğini artırdığını görmüşlerdir.

Chisholm ve arkadaşları [34] mikro ve nano boyutlu SiC katkı maddelerini bir epoksi matrisi içerisine ilave edilerek matris özelliklerini araştırmak için sistematik bir çalışma yapmıştır. Elde edilen yapısal kompozitler mekanik özellikleri değerlendirmek için eğilme ve gerilme yükleri altında test edilmiştir. Parçacık yük miktarı, reçinenin ağırlığı ile %1,5-3,0 miktarları arasında değişmiştir. Nanopartiküller aynı zamanda, imal edilen bileşimlerin boşluk içeriğini azaltma eğilimindedir ve böylece artan mekanik özelliklere dönüşür. Ağırlıkça %1,5 yükleme ile mekanik özelliklerde ortalama %20-30 artış gözlemlenmiştir.

Uddin ve Sun [35] nanopartiküller infüzyon yoluyla matris özellikleri artırılarak tek yönlü bileşiklerin mukavemetini arttırmak için bir teknik üzerinde çalışmıştır. Elyaf kompozitler oluşturmak için matriks olarak silis nanopartikülleri (Nanopox F 400) ile piyasada bulunan standart bir DGEBA epoksisi kullanmıştır. Nanopox'daki silis nanoparçacıkları, daha sonra ağırlıkça %15 parçacık yüklemesine seyreltilen ağırlıkça %40'lık bir konsantrasyon ile sonuçlanan bir sol-jel işlemi vasıtasıyla üretilmiştir. Silika nanoparçacıklarının ilavesi sonucu, boyuna basınç dayanımını çarpıcı bir biçimde artmış ve uzunlamasına ve enine gerilme mukavemetlerini orta derecede artırmış olduğunu gözlemlemiştir.

Cheang ve Khor [36] toz morfolojisinin polimer-hidroksiapatit (HA) kompozitlerin gerilme özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Deneysel bulgular, HA tozunun yüzey morfolojisinin ve yapısal bütünlüğünün, bileşiklerin gerilme özelliği üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çekme modülünün, tozun yüzey özelliklerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Kaba yüzeyli HA tozunun, birbirine kenetlenmeyi arttırdığı ve ara yüzeylerde yapışmayı geliştirdiği, dolayısıyla pürüzsüz yüzeylere sahip tozdan daha yüksek gerilme modülüne neden olduğunu bulmuştur. Yoğun küresel HA tozları, keskin çatlakların başlamasını ve yayılmasını engellemiş ve iyi bir ara yüzey bağlanması sağlandığında daha yüksek gerilme mukavemetine neden olduğunu görmüştür.

Konopka ve arkadaşları [37] bu çalışmada, molibden metal parçacık takviyesinin alüminyum oksit matris kompozitler üzerindeki kırılma tokluğuna etkilerini araştırmıştır. Sunulan sonuçlarda bir seramik-metal bileşiğinin kırılma tokluğunun değişiminin metalik fazın hacimsel oranı ve metal parçacıklarının boyutu tarafından kontrol edilebildiğini göstermiştir. Modelleme hesaplamaları deneysel olarak ölçülen K_{IC} değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Li ve arkadaşları [38] dinamik sıcaklık kontrollü doğru akım ısıtma teknolojisi ile hazırlanan farklı seramik parçacıkları (SiC, Cr₃C₂, TiC ve Ti (C, N)) ile geliştirilmiş demir matris kompozitlerinin dayanım, elastisite modül ve sertlik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. SiC takviye parçacıklarının deneysel olarak dört çeşit takviye bileşimi arasındaki kompozisyonun kuvvetini arttırmaya yönelik en güçlü etkiyi gösterdiğini bulmuştur. Modelleme ile gerilme-şekil değiştirme eğrileri, TiC / Fe ve Ti (C, N) / Fe kompozitleri üzerindeki deneylerde iyi bir uyum sağlamış ancak SiC / Fe ve Cr₃C₂ / Fe kompozitleri üzerinde sağlamamıştır.

Teja ve arkadaşları [39] bu çalışmada SiC'nin doğal sisal fiber kompozitler üzerindeki etkisini mekanik ve termal yönden araştırmıştır. Deneysel sonuçları, %10 SiC ile kompozitin çekme mukavemetinin, SiC içermeyen kompozitinkinden 2.53 kat daha fazla olduğunu göstermiştir. Hacimce %0, %5, %10 SiC tozu ile üç farklı numune düşünülmüş ve SiC dolgu tozu ilavesi ile ısıl iletkenliğinin arttığı, termal yayılma oranının arttığı ve SiC tozu ile termal kararlılığın arttığı gözlemlenmiştir.

Kaman [40] tek kenarlı çentikli elyaf takviyeli kompozit plakaların kırılma tokluğunu deneysel olarak araştırmıştır. Tek yönlü karbon elyaf / epoksi reçine takviyeli kompozit plakalar için yükleme - şekil değiştirme eğrileri, gerilme yükü altında deneysel olarak elde edilmiştir. Ansys programı ile modelleme yapılmıştır. Deneysel ve sayısal veriler karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Song [41] SiC parçacıklarının hacim oranlarının kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri hem model simülasyonun hem de deneysel yöntemle incelemiştir. SiC parçacık takviyeli saf alüminyum kompozitler toz metalurji yöntemi kullanılarak imal edilmiştir. Sonuç olarak ise akma mukavemeti ve gerilme mukavemetinin arttığını, ancak uzamanın SiC parçacıklarının hacim oranındaki artış ile azaldığını gözlemiştir.

Pawar ve arkadaşları [42] bu çalışmada, iki tip jüt epoksi kompozit imal etmiştir. Bunlardan birincisi, %10 aralıklarla ağırlıkça %10 ile %50 yük değişimi arasında, ikincisi ise %8 aralıklarla ağırlıkça %0 ile %24 granit tozu eklenmiş halidir. İlk çalışmada, rüzgar türbini bıçağı uygulaması için polimerik kompozitlerin hazırlanması yapmış ve kompozitlerin kırılma tokluğu dahil olmak üzere fiziksel ve termo-mekanik özelliklerini incelemiştir. Kırılma tokluğunun tüm kabul edilen çatlak uzunlukları için sabit olduğu gözlenirken, değeri her iki donatı ile önemli ölçüde geliştirilmiştir. Dinamik mekanik analiz, devirli gerilmeler altında mekanik performans için parçacık takviyesinin olumlu etkisini göstermektedir.

Choupani [43] bu makalede, deneysel ve sayısal analizlere dayanan dokuma karbon fibril/polieterimid (CF / PEI) termoplastik kompozit malzemedeki karışık modlu tabakalı kompozitlerin kırılma davranışını araştırmıştır. Deneysel, özel test yükleme cihazı kullanılarak geliştirilmiş arcan numuneleri üzerinde yürütülmüştür. 0° ile 90° arasındaki yükleme açısını değiştirerek saf mode-I, mode-II ve çok çeşitli karıştırılmış mod verileri

deneysel olarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle sonuçları analiz etmiştir. Sonuç olarak kırılma açısı arttıkça kırılma direncinin arttığını ve çatlamanın artmasına neden olduğunu gözlemlemiştir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi

Kompozit malzemeler ağırlıklarına oranla daha yüksek dayanıma sahip olmaları nedeniyle son yıllarda metalik malzemelere alternatif olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin özellikle mekanik özelliklerini iyileştirmek için kompozit malzemelerin içerisine belirli oranlarda takviye yapılmaktadır. Bunların en göze çarpanı kompozit malzemelerin içerisine partikül takviyesi yapmaktır. Kompozit malzemelere partikül takviyesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği bir çok literatürde sıkça karşımıza çıkmaktadır. Mekanik özellikleri daha iyi olan malzemelerin kırılma tokluklarının da daha iyi olması beklenir. Ancak yapmış olduğumuz araştırmalar neticesinde partikül takviyeli polimer esaslı kompozitlerin kırılma toklukları ile ilgili çok az sayıda çalışma olduğunu gördük. Buna paralel olarak bu tez çalışmasında farklı tanecik büyüklüğüne sahip seramik partiküllerin belirli farklı oranlarda jüt/epoksi tabakalı kompozitlere takviye edilmesiyle elde edilen yeni kompozit malzemelerin kırılma tokluklarını farklı bir açıdan incelemeyi amaçladık.

Literatürde yapılmış çalışmalara bakıldığında partikül takviyeli jüt/epoksi polimer kompozit malzemelerin kırılma tokluklarının belirlenmesine yönelik çalışma fazla yoktur. Bu çalışmada farklı boyutlarda seramik partikül takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin hem mekanik özellikleri hem de Mod I, Mod I-II ve Mod II yükleme durumlarındaki kırılma toklukları belirlenmiştir. Bu kapsamda boyutları 4,5µ, 9,3µ ve 53µ olan üç farklı silisyum karbür (SiC) tanecik, dört farklı oranda kullanılarak (%0, %3, %6 ve %9) altı tabakalı jüt/epoksi kompozitler Uşak Üniversitesi laboratuvarında bulunan PLC kontrollü hidrolik preste üretilmiştir. Üretilen kompozit plakalardan Compact Tension Shear (CTS) test numuneleri standarda uygun ölçülerde kesilmiştir. Kesilen numunelere standartlarda belirtilen şekilde çatlaklar açılmıştır. Üretilen bu kompozit numuneler ARCAN test aparatı kullanılarak beş farklı açıda (0°, 30°, 45°, 60° ve 90°) çekme testine tabi tutulmuştur. Kırılma sonrası, farklı boyutta ve farklı oranda silisyum karbür (SiC) ile takviye edilmiş numunelerin hasar bölgesinin içyapı görüntüleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Ayrıca deneysel ve nümerik karşılaştırma yapmak için kırılma tokluğu değerleri nümerik olarakta Ansys 12.1 sonlu elemanlar programı

kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar incelenmiş, grafik ve çizelgelerle desteklenerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

Deneysel aşamada yapılmış bir diğer çalışmada partikül takviyeli jüt/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu kapsamda üretilen silisyum karbür takviyeli kompozit malzemelerden belirtilen standartlarda numuneler kesilmiş ve Uşak Üniversitesi laboratuvarında bulunan üniversal çekme cihazında deneyler yapılmıştır. ASTM D-3039 standardına göre çekme ve kayma mukavemet değerleri ve ASTM D-3410 standardına göre basma mukavemet değerleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Şu ana kadar ki literatür çalışmalarından da görüldüğü üzere karışık-mod (Mod I-II) yükleme durumunda ki kırılma tokluğu ile ilgili bir çok çalışma ve yayın vardır fakat doğal lif (jüt) takviyeli kompozitlerin karışık-mod (Mod I-II) yükleme durumunda ki kırılma tokluğu ile ilgili hiç çalışma yoktur ve bu değerler belirlenmemiştir. Bu çalışmada silisyum karbür partiküllerinin tanecik büyüklüğünün ve takviye oranının jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğuna nasıl etkidiği belirlenmiştir. Tüm bu durumlar projenin özgün değerlerini oluşturmaktadır.

1.3. Tezin Anahatları

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm de teze giriş ve tezin amacı anlatılmış olup bu alanda yapılmış benzer makale ve yayınlardan örnekler verilmiştir. İkinci bölümde genel olarak kompozit malzemelerin özelliklerinden, sınıflandırılmasından, çeşitlerinden, kullanım alanlarından, takviye elemanlarından genel ve spesifik olarak bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde kırılma mekaniğinden bahsedilmiştir. Kırılma mekaniğinin modları ve çeşitleri genel olarak anlatılmış olup tezimizle ilgili bölümlerinden bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalarımız için gerekli olan kompozit numunelerin üretim aşamaları tüm detaylarıyla anlatılmıştır. Beşinci bölümde deneysel çalışmalar anlatılmış olup yapmış olduğumuz tüm deneyler ve deneyler sonrası numune hasar görüntüleri verilmiştir. Altıncı bölümde ise ansys 12.1 sonlu elemanlar programı ile nümerik olarak hesaplanan kırılma tokluğu değerleri deneysel olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Yedinci ve son bölümde ise ağırlıklı olarak tezin sonuç kısmı ile alakalı olup tüm yaptığımız deneysel ve teoriksel çalışmalar grafik ve çizelgelerle kıyaslanarak anlatılmış ve sonuca bağlanmıştır.

1.4. Destekleyenler

Tezimiz Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiş olup projemizin türü UBAP06, numarası ise 2015/TP002' dir. Kompozit numune üretiminde kullandığımız doğal jütler Jut Çuval İp San. ve Tic. Aş. firmasından, silisyum karbürler Akyol Taş San. ve Tic. Aş. firmasından, ARCAN test aparatı Uşak Coşkunlar Torna firmasından temin edilmiştir. Numune kesimlerimizi Uşak küçük sanayi sitesinde bir yerde şerit testere ile kestirdik. Numunelere çatlak açımını Uşak Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında bulunan dekupaj testere ile yaptık. Partikül takviyeli tabakalı kompozitlerimizin kırılma tokluklarını ve mekanik özelliklerini belirlemek için Uşak Üniversitesinde bulunan universal çekme – basma test cihazını ve Uşak Pull–Tech FRP Mekanik Test Laboratuvarında bulunan U – test marka universal test cihazını kullandık.

2. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELER

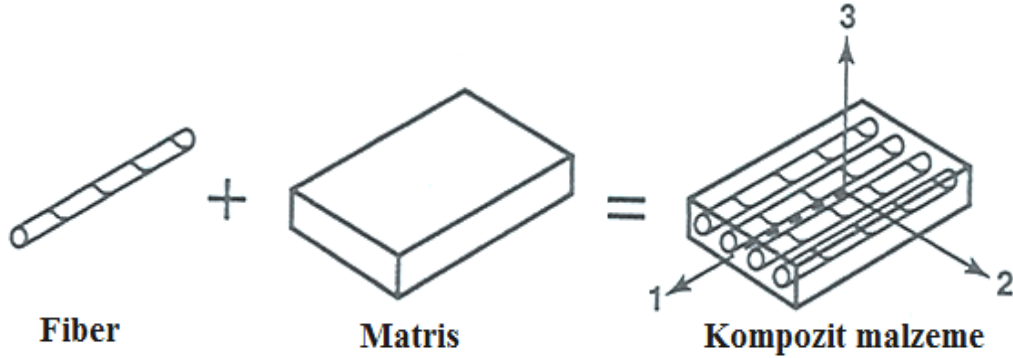
2.1. Kompozit Malzemelere Giriş

İki ya da daha fazla malzemenin fiziksel olarak makro yapıda birleştirilmesi sonucu oluşan ve kendisini oluşturan malzemelerin uygun özelliklerini kullanarak meydana gelen yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemelerin üretilmesiyle birlikte kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin her biri tek başına kullanıldığında elde edilemeyen bazı mekanik özellikleri elde etmek mümkün olmaktadır. Böylece hedeflenen uygulama alanı için gerekli olan tüm özelliklere sahip yeni bir malzemenin tasarlanması ve üretimi mümkün olmaktadır.

Kompozitlerin kullanımı gün geçtikçe artsa da aslında ilk örnekleri çok eskilere dayanmaktadır. Gerçek anlamda kompozitlerin mühendislik anlamında tasarlanması ve bir konu olarak ele alınması ise 20. yy ortalarına doğru olmuştur. Özellikle uzay ve hava araçlarının yapımına geçilen zamanlarda, bilim adamları çağın yenilikleri ile birlikte mevcut malzemelerin özelliklerinin yetersiz kalmasından dolayı yeni malzeme arayışlarına gitmişlerdir. Bilim ve teknolojinin gelişmesi paralelinde günün şartlarına uyacak şekilde gerek ekonomik gerekse teknik yönden daha uygun malzemeler imal etme yolunu seçmişlerdir. Dolayısıyla hem ekonomik hem daha yüksek mukavemetli ve hem de çok hafif malzemelerin oluşturulması için yapılan çalışmalar yoğunlaştırılmıştır ve kompozit malzemelerin git gide önem kazanarak ortaya çıkmıştır. Böylece malzemeyi teşkil eden bileşenlerin, özellikleri farklı olan kombinasyonlarının oluşturdukları kompozit malzemeler, çok önemli hal almıştır.

Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler yapı içerisinde üstlendikleri görevlere göre isimlendirilirler. Bir kompozit malzemenin yapısında matris fazı ve takviye (fiber) fazı olmak üzere iki tane temel bileşen bulunmaktadır (Şekil 2.1). Matrisler takviye malzemesini bir arada tutar ve takviye fazını dış ortamın etkilerine karşı korur. Matris fazı, kompozit malzeme üzerine gelen yükü takviye fazına dağıtarak yük ve dayanım arasında köprü vazifesi görür. Epoksiler, reçineler, çimento birer matris malzemesidir. Takviye fazı ise kompozit yapının üzerine gelen yükü doğrudan karşılayan bileşenidir. Elyaflar, lifler vs. birer fiber malzemedir. Kompozitlere örnek olarak kilden yapılmış ve samanla takviye

edilmiş kerpiç, çelik donatılı betonlar, cam fiber donatılı polyesterler vs. gibi basit örnekler gösterilebilir.



Şekil 2.1 Kompozitin bileşenleri [88]

2.2. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Kompozit malzeme kullanılarak üretilecek olan parçalar tasarlanırken, parçanın hangi alanda ve ne için kullanılacağı, kullanımına yönelik özel ihtiyaçların neler olduğu gibi bazı durumların bilinmesi gereklidir. Kompozit bir parça tasarlanırken maliyet, malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri, çevre koşullarının parçaya etkisi, imalat yöntemi, kalite kontrol metotları gibi birçok unsur birlikte değerlendirilmelidir.

Uygulamalarda ve yeni tasarımlarda kullanılacak kompozit malzemelerin mekanik olarak birçok avantaj ve dezavantajı vardır. Kompozitlerin genel özelliklerini avantajları ve dezavantajları olarak ele alabiliriz. Kompozit tasarımında amaç genel olarak üretilecek yeni bir kompozit malzemenin özelliklerinden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi olmalıdır.

2.2.1. Kompozitlerin Avantajları

Kompozit malzemelerde diğer malzemelere kıyasla birçok avantaj bulunmakta olup bu avantajların hepsini aynı malzeme de toplamak mümkün değildir. Bunun için hangi özelliklerden maksimum kazanç elde etmek istiyorsak ona göre uygun kompozit tasarımı yapmak zorundayız. Genel olarak kompozitlerin birçok avantajından söz etmek mümkündür. Aşağıdaki bazı avantajlarından söz edilmiştir.

- Yüksek mukavemet: Çekmeye ve eğilmeye karşı dayanımları birçok metalik malzemeye göre daha yüksektir.
- Hafiflik: Özgül ağırlığı çok düşük malzemelerden oluştukları için metallere ve seramiklere göre çok hafiftirler.
- Kolay şekillenebilirlik: Büyük ve karmaşık parçalar tek bir işlemle kalıplanabilmek üretilbilir, buda üretim ve işçilikten kolaylık sağlarlar.
- Isıya dayanıklılık: Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden üretildikleri zaman çok yüksek ısılarda çalışabilme özelliğine sahip olurlar.
- Yüksek korozyon direnci: Havadan, sudan ve çoğu kimyasallardan zarar görmezler ve bu nedenle deniz araçları ve tehlikeli sıvı bulunduran tanklarda çoğunlukla kullanılırlar.
- Yüksek yorulma dayanımı: Bazı çelik ve alüminyum türevlerine göre yüksek yorulma davranışı gösterirler.
- Titreşim sönümleme: Sünek olmaları sebebiyle ses ve titreşim gibi etkenleri sönümleyebilirler ve çatlak oluşumuna izin vermezler.
- Elektrik iletkenliği: Farklı malzemelerden oluştukları için oluştuğu malzemenin iletken veya yalıtkan özelliğini alarak istenilen elektrik iletkenliği yaratabilirler.

2.2.2. Kompozitlerin Dezavantajları

Her ne kadar avantajları çok olsa da kompozit yapıyı oluşturan bileşenlerin bazı kusurlu yönleri kompozit malzemenin bazı dezavantajlara da sahip olmasına neden olmaktadır. Bunun için tasarımı yapılacak kompozitin hangi özellikleri karşılayacağı çok iyi belirlenmeli ve herhangi bir can kaybı veya maddi hasara imkan vermemesi sağlanmalıdır. Örneğin kompozitin içindeki herhangi bir malzemenin (fiber veya matris) herhangi bir mekanik özelliği kötü ise üretilen kompozit malzemede de o kötü olan özelliği barındırır ve bu durum dezavantaj oluşturur. Genel olarak kompozitlerin bazı dezavantajları ise şunlardır;

- Daha yüksek maliyet: Farklı malzemelerin birleşimlerinden meydana geldikleri için birleşme malzemesin özelliğine göre ve üretim yöntemine göre çok yüksek maliyetler çıkabilmektedir
- İşleme zorlukları: Kompozitlere delik delme, talaş kaldırma gibi işlemlerin yapılması zordur ve uygun değildir. Yüksek yüzey kalitesi elde etmek diğer malzeme guruplarına nazaran daha zordur.
- Kolay zarar görmeleri: Gevrek yapıda olanlar çok olay zarar görürler ve darbelere dayanımları düşüktür.
- Geri dönüşüm olmayışı: Farklı malzeme gurupları ve özellikleri içeriğinden dolayı geri dönüşümleri metaller gibi değildir ve çok zordur.
- Üretim zorluğu: Çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur ve kompleks parçalarda malzeme birleşimlerinde zorluklar olabilmektedir.
- Yorulma özelliği: Üretim esnasında malzeme içinde kalan hava kabarcıkları veya çatlaklar olumsuz bir yorulma direnci oluştururlar.

2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler günümüzde gittikçe yüksek oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman hava sanayisindeki ihtiyaçların çoğu kompozit malzemelerden karşılanmakta idi fakat son dönemlerde ise yeni birçok sektöre girmiş ve girmeye de devam etmektedir. Bu sektörlerden kısaca bahsedecek kompozitler;

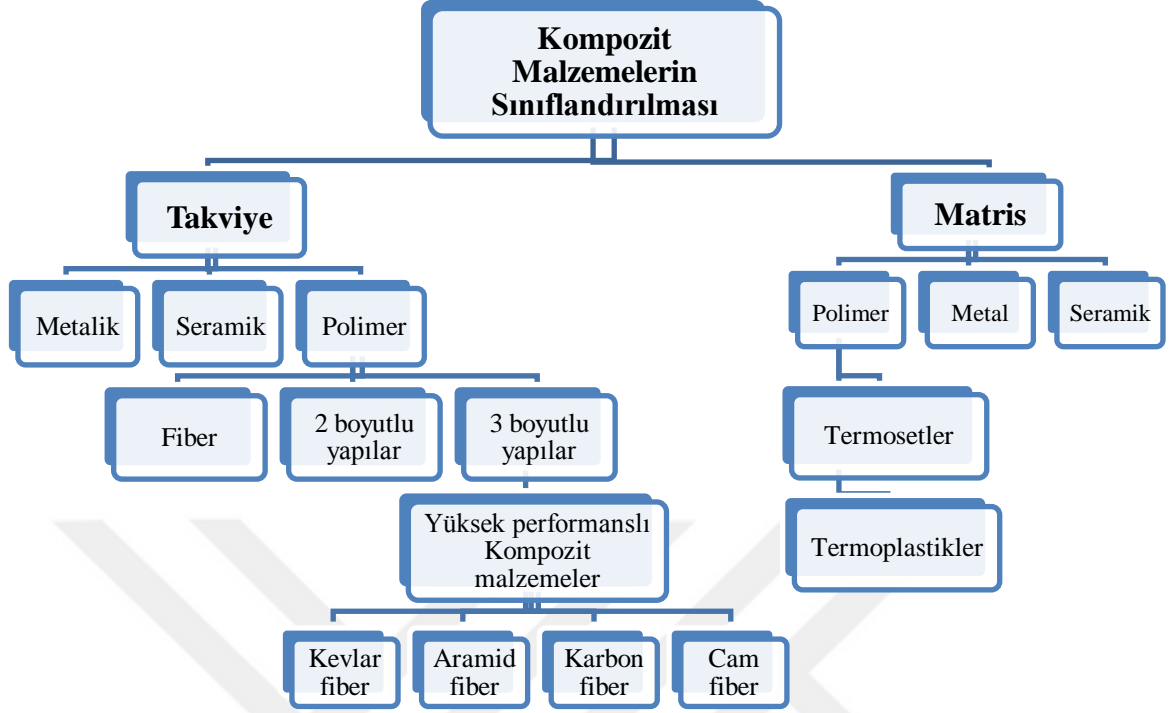
- Havacılık ve savunma sanayi: Uçak gövdesinde ve bazı önemli kısımlarda
- Deniz taşımacılığı: Tekne gövdesi, yat ve tekne arkası platform ve basamaklarda, yelken direklerinde
- Kara taşımacılığı: Traktör kabinleri, toplu taşıma araçları oturakları vs.
- Otomotiv sanayi: Otomobil kaportalarda, dikiz aynası, far gövdesi fitre kutuları pedallar, gösterge panelleri vs.

- Sportif ürünler: Su kayağı, patenler, golf sopaları, tenis racketleri, vs.
- Sağlık: Tekerlekli sandalyeler, tıbbi cihazlar vs.
- Müzik aletleri: Keman, gitar, vs.
- Yapı sektörü: Küvet, lavabo, boru, taşıyıcı konstrüksiyon, yürüme yolları, vs.
- Enerji sektörü: Rüzgar türbinleri, enerji iletim kabloları vs.
- Tanklar ve basınçlı kaplar: Su tankları, çeşitli kaplar vs.

gibi alanlarda ve daha fazla sektörde kullanılmaktadırlar.

2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması yapılırken kesin bir hat çizmek mümkün değildir. Kompozit malzemelerin oluşumları göz önüne alındığında farklı malzeme grupları ve çeşitlerinden söz edildiği için sonsuz sayıda komplikasyondan bahsedebiliriz. Bundan dolayı sınıflandırılmaları aslında çok zordur. Fakat yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonucunda genel olarak ana yapılarını oluşturan matris fazına göre ve takviye fazına göre iki çeşit bir sınıflandırmadan söz etmek mümkündür. Bu sınıflandırma Şekil 2.2’de basitleştirilmiş şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

2.4.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma

2.4.1.1. Metal Matrisli Kompozitler

Mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda kullanılacak ve daha yüksek mukavemet özelliğine sahip malzemelere duyulan ihtiyaçlar nedeniyle metal matrisli kompozit (MMK) malzeme geliştirme süreci başlamıştır. Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu, yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılabilirler. Fakat metalik partiküller ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitler, her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek mukavemet özelliklerini vermektedirler. Metal matrisli kompozitler genellikle alüminyum, magnezyum, çinko, bakır ve titanyum gibi metal bir matris ile karbon, alümina (Al_2O_3), titanyum karbür (TiC) ve silisyum karbür (SiC) gibi fiberlerden meydana gelirler. Bu kompozitlerde metal matris içine gömülen ikinci faz, sürekli lifler şeklinde olabileceği gibi, gelişi güzel olarak dağıtılmış küçük küçük parçalar halinde de olabilmektedir. Bakır ve alüminyum matrisli, wolfram veya molibden fiberli ve Al-Cu kompoziti, bize bu kompozisyonları veren birkaç örneklerdir [55].

Genel olarak bakıldığında metal matrisli kompozitlerin, metallere göre üstün olan temel özellikleri vardır. Daha yüksek aşınma direnci, daha iyi yorulma direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürtünme oranı, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı gibi bazı üstün özellikleri vardır. Füze güdüm sistemlerinin hassas bileşenlerinde, otomobil motorlarının bazı aksamalarında, uzay mekiği gövde iskeletlerinde, gaz türbin motorlarında vs. gibi yerlerde ağırlıklı olarak metal matrisli kompozitler kullanılmaktadır.

2.4.1.2. *Seramik Matrisli Kompozitler*

Seramik malzemeler düşük yoğunlukları nedeniyle diğer malzemere göre daha hafiftirler. Ayrıca yüksek oksidasyon dirençleri sebebiyle yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya oldukça elverişli malzemelerdir. Seramik malzemeler çatlaklara karşı ise çok hassastırlar. Seramiklerin yüksek sıcaklık mukavemeti, düşük yoğunluk, kimyasal kararlılık ve aşınma direnci gibi pek çok önemli özelliği kırılma yapıları nedeniyle arka plana atılmaktadır. Bundan dolayı seramik malzemenin içine konulan başka özellikli bir malzeme ile bu kırılma ortadan kaldırılmaya çalışılmış ve seramik matrisli kompozitler bundan dolayı ortaya çıkmıştır. Seramik matrisli kompozitler karbon veya silisyum karbür gibi fiberlerle birlikte alümina kalsiyum, zirkonyum oksit ve alümina silikat gibi seramik matrisler içerirler. Seramiklerin tek başlarına düşük olan kırılma toklukları, silisyum karbür veya karbon fiberlerle takviyeleri sonucu artırılmış olur. Seramik matrisli kompozitler sanayide her türlü alanda kullanılmakla beraber en fazla savunma sanayi, uzay ve hava araçlarında kullanılmaktadır. Genel olarak kesici takımlarda, motor parçalarında, pompa sızdırmazlık contalarında, tankların dış gövdelerinde, uçak gaz türbin motorlarında, zırh yeleklerde, motor egzoz bölümleri ve daha birçok yerde kullanılmaktadırlar [82].

- **Silisyum Karbür**

Silisyum karbür oldukça sert, keskin ve agresif seramik bazlı bir aşındırıcıdır. Acheson prosesine göre, elektrikli fırın ortamında ve yaklaşık 2000°C sıcaklığın üzerinde silis ve kok arasında gerçekleşen karbotermik reaksiyonla oluşur. Silisyum karbür kimyasal olarak daha istikrarlı bir ürün olup, direnci yüksek olduğundan çok daha uzun kullanım imkanına sahiptir. Silisyum karbürün özgül ağırlığı 3,20 gr/cm³'tür. Silisyum karbür toksik maddeler ile kanserojen maddeler içermez. Silisyum karbür radyoaktif bir mineral değildir. 1µm ile 1500µm boyutları arasında üretimleri yapılabilir.

Piyasada iki çeşit silisyum karbür bulunmaktadır. Bunlar yeşil ve siyah silisyum karbür'dür. Yeşil silisyum karbür özellikle sert ve çok kırılğan bir aşındırıcıdır. Sertliği yaklaşık 9.5 mohs' dur. Çarpma ve darbelere karşı duyarlıdır. Başlıca sert metal ve seramik gibi malzemelerin, cam ve aside dayanıklı östenitik içyapılı çeliklerin işlenmesinde kullanılır. Siyah silisyum karbür çok sert fakat yeşil silisyum karbür e nazaran daha az kırılğandır. Sertliği yaklaşık 9,5 mohs'dur. Silisyum Karbür, düşük çekme mukavemetine sahip metal ve metal dışı malzemeler ile gri döküm, küresel grafitli döküm, soğuk dökme demir, prinç, bronz, alüminyum, organik mineraller ve seramik malzemelerin işlenmesinde kullanılır [83, 89].

2.4.1.3. *Polimer Matrisli Kompozitler*

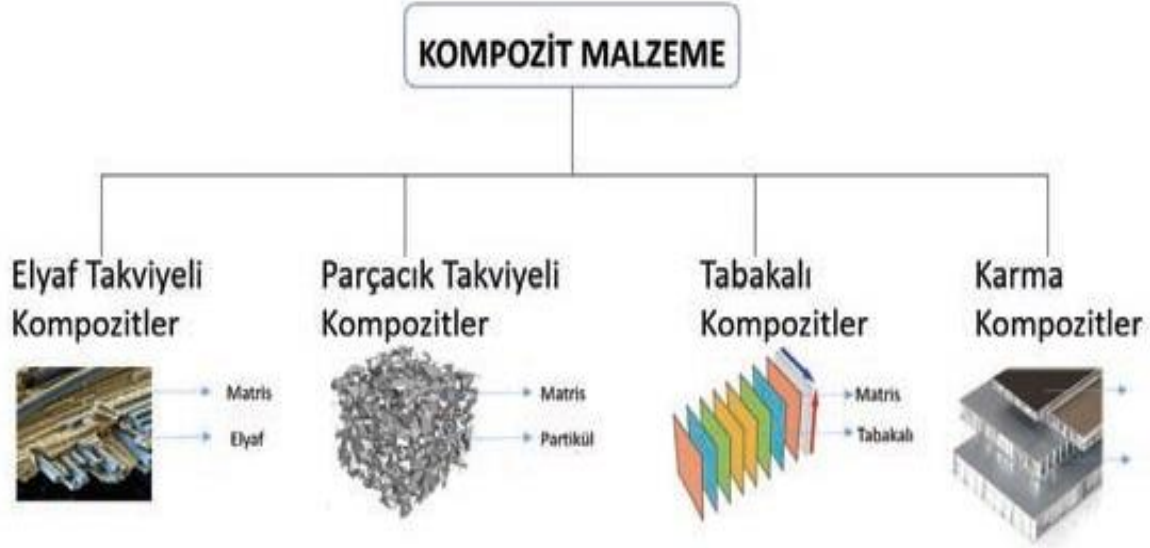
Polimer matrisli kompozitler mühendislikte kompozit alanında en yaygın kullanılan sınıflardan biri haline gelmiştir. Bu durumun nedeni karbon, polietilen, aramid gibi yüksek performanslı fiberlerde sağlanan gelişmelerden dolayı ve matris malzemesi olarak kullanılan polimerlerdeki gelişmelerden dolayıdır. Ayrıca bir diğer etkende metal matrisli ve seramik matrisli kompozitlerin üretimlerinin polimerlere kıyasla ekonomik olmamasıdır. Matris malzemesi olarak kullanılan çeşitli polimerlerin üretimi hem kolaydır hem de ucuzdur. Yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmez. Karmaşık şekilli parçaların üretimi bu sayede kolaylaşır. Polimer matrisli kompozitler çalışmamızda kullandığımız sınıf olmakla beraber ileride daha detaylı olarak anlatılmıştır.

2.4.2. **Takviye'ye Göre Sınıflandırma**

Şekil 2.2'de verilen kompozitlerin sınıflandırma şemasına göre takviye fazı; metalik, seramik ve polimer malzemelerden olabilir. Bunların en yaygın kullanılanı ekonomik, daha iyi mukavemet, daha iyi mekanik özellikler ve şartlar, üretim kolaylığı gibi birçok etkenden dolayı polimer malzeme grubudur. Burada metal malzeme olarak çelik, titanyum, bor vs. kullanılır. Seramik malzeme olarak oksitler, karbürler, nitrürler, silikatlar vs. kullanılır. Polimer malzeme olarak ise çeşit çok daha fazla olmakla beraber elyaf, aramid, naylon, polyester, cam, doğal lifler vs. gibi daha birçok çeşit sayabiliriz.

Takviye fazında kullanılan malzeme gruplarının yapı bileşenleri, kompozit malzeme içerisinde farklı şekilde dağılım gösterirler ve bu tasarım için önemli bir yer tutar. Takviye

elemanı lif halinde, parçacık halinde, tabaka halinde veya karmaşık yapıda olabilmektedir ve bu sınıflandırma Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



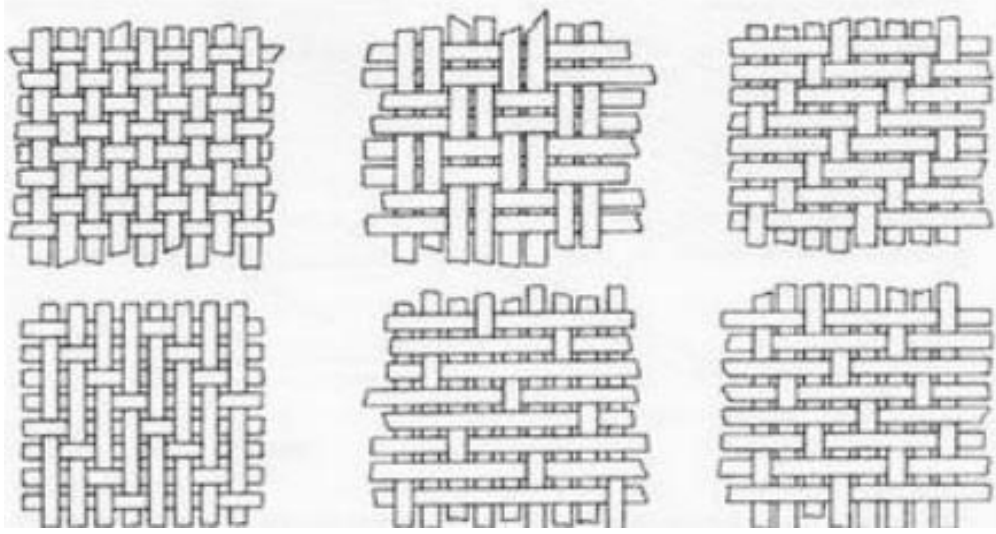
Şekil 2.3 Kompozitlerin takviye göre sınıflandırılması [87]

2.4.2.1. Fiber (elyaf) Takviyeli Kompozitler

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda yerleştirmelerde oldukça düşük mukavemet elde edilir. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Pekiştirici olarak ise cam, karbon kevlar ve boron lifleri gibi malzemeler kullanılmaktadır.

Günümüzde kompozit yapılarda en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyaflar teknolojiye kullanılan en eski elyaf tiplerindendir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür, poliamid, polyester ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda en çok kullanılan elyaf tiplerini oluşturmaktadır.

Sürekli fiber kompozitler sürekli fiber içerirler. Mukavemetleri, dayanımları ve rijitlikleri oldukça iyidir. Sürekli fiberler tek yönde yerleşebilecekleri gibi birbirlerine dik iki ana yönde ve farklı yönlerde yerleştirilebilirler (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Elyaf dokuma türleri [88]

2.4.2.2. *Partikül Takviyeli Kompozitler*

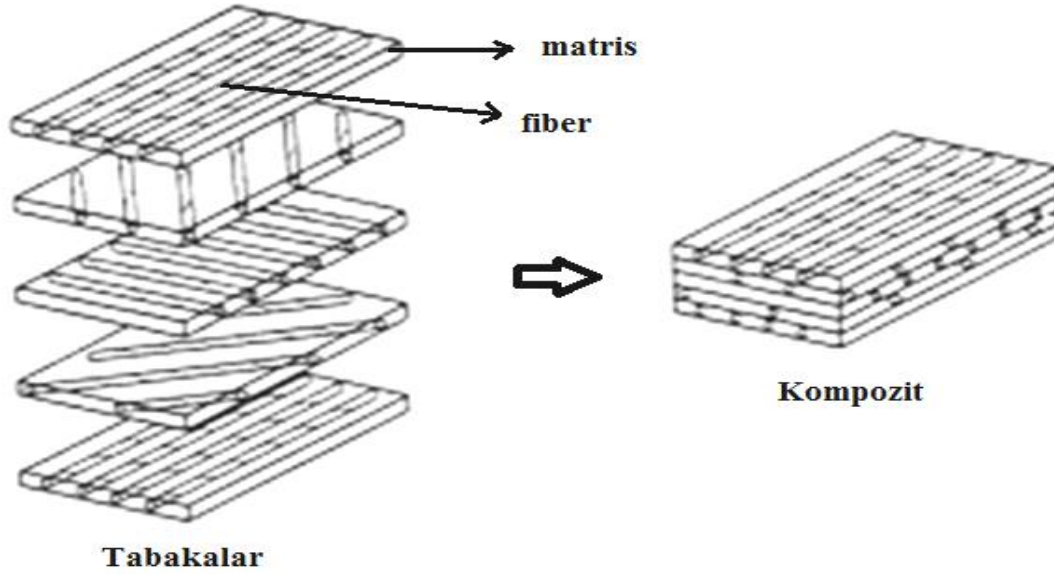
Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilen kompozitler bu sınıfa girerler. Yapının sertliği ve mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. Parçacıklar iri veya küçük taneli olabilirler. En yaygın tipleri ise polimer matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel iletkenlik sağlarlar. Parçacıklar sadece mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaz. Bunun yanı sıra üretim ve tasarım moduna göre katılaşma geciktirici, katılaşma hızlandırıcı, gaz oluşturuç gibi çeşitli maddeler kompozite katılarak tasarım yapılabilir. Partikül takviyesi birçok malzeme olabilir. Genel olarak tozlar, kumlar, cam, karbon, silisyum karbür, alüminyum karbür, bor karbür, whisker, kısa fiberler vs. gibi malzemeler sayılabilir.

2.4.2.3. *Tabakalı Kompozitler*

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Bu tür kompozitler farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur (Şekil 2.5). Çok değişik kombinasyonlarla tabakalanmış kompozitlerin üretimi mümkündür. Farklı elyaf yönlendirmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Bunlar ısıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallerle göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle çok tercih edilen malzemelerden olmuşlardır [83].

Pek çok katmanlı kompozitler; düşük maliyet, yüksek dayanım veya hafifliğini korurken, aşınma veya abrasiv aşınma direnci, gelişmiş görünüm ve mükemmel ısıl genleşme

özelliklerini kapsamaktadır. Buna karşın korozyon ve aşınma direnci gibi önemli özelliklerin pek çoğu öncelikle kompoziti oluşturan elemanlardan birine bağlıdır. Korozyon direnci zayıf metaller üzerine, daha yüksek dirençli metallerin veya plastiklerin kaplanmasıyla korozyon özelliğinin, yumuşak metallerin sert malzemelerle birleştirilmesiyle sertlik ve aşınma direncinin, farklı fiber yönelmesine sahip tek tabakaların birleştirilmesiyle ise çok yönlü yük taşıma özelliğinin geliştirilmesi mümkün olmaktadır [83].



Şekil 2.5 Tabakalı kompozit [86]

2.4.2.4. Dolgu Yapılı ve (karma) Kompozitler

Bu tür kompozitler, 3 boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine 3 boyutlu bir dolgu malzemesiyle doldurulması ile oluşan kompozit malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahiptir ve bir ağ ya da şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbirini içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi çok önemlidir [83].

Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki

elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyafı kompozitten daha yüksektir [86].

2.5. Polimer Matrisli Kompozitler

2.5.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Yapısı ve Özellikleri

Polimer matrisli kompozit malzemeler, çoğunlukla petrokimya esaslı ürünlerdir ve günümüzde en yaygın kullanım alanı olan malzemelerdir. En yaygın kullanılan polimer matrisli ileri kompozitler, küçük çaplı fiberlerle (grafit, aramid, boron gibi) takviye edilmiş bir polimerden (epoksi, polyeater, üretan gibi) oluşan grafit/epoksi gibi polimer matrisli kompozitlerdir.

Yaygın olarak kullanılma nedenleri arasında düşük maliyetli, korozyona dirençli, uzun süreli kullanıma uygun, işlenmesi kolay, yüksek mukavemetli ve birim kütle başına yük kapasitesi yüksek malzeme olmaları yer almaktadır. Ayrıca basit üretim prensiplerine sahip olmaları da yaygın kullanılma nedenleri arasında gösterilebilir [73].

Polimerik kompozit malzeme yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için, yapıyı oluşturan matris ve takviye malzemelerinin ayrı ayrı incelenmesi konunun daha rahat kavranması açısından faydalı olacaktır.

2.6. Matris Malzemeleri

2.6.1. Termosetler

Termoset esaslı kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlar arasındadır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşirler. Termoset polimerler; katı hale gelmeden önce bağımsız moleküller içerirler ve sertleşme sonrası kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana çapraz bağların oluşturduğu 3 boyutlu bir ağ yapıdadırlar. Fiziksel ve mekanik özellikleri, 3 boyutlu ağ yapısını oluşturan moleküllerinin özelliğine ve moleküller arası bağlara bağlıdır ve polimerizasyon sırasında çapraz bağlanma süreciyle kontrol edilebilirler. Termosetler rijit malzemelerdir ve ısı etkisiyle tekrar yumuşamazlar. Termoplastiklere nazaran daha gevrekler ve termoplastiklerden daha yüksek dayanım göstermektedirler [90].

2.6.1.1. Epoksi Reçineler

Epoksi reçine yapıştırma, koruyucu kaplama ve taşıyıcı malzeme olarak kullanılabilir. Metalik ve metalik olmayan yüzeylere iyi yapışma özelliğine sahip epoksiler iyi mekanik ve elektrik özelliği, üstün boyut değişmezliği, ısı ve kimyasallara karşı yüksek direnç göstermeleriyle karakterize edilirler. Epoksilerin reçineler mekanik ve elektriksel özelliklerinin iyi olması, korozyon dayanımları ve elektriksel özelliklerinin kombinasyonları sayesinde yüksek performanslı kompozit ürünlerinin üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Islakken 140°C, kuruyken 220°C'ye kadar ısı dayanımı vardır. Diğer reçinelere göre pahalıdır. Havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanları gibi geniş kullanım alanına sahiptirler [48].

2.6.1.2. Polyester Reçineler

Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan 2 tür polyester reçine vardır; daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyesterdir. En yaygın polimerik kompozit matris malzemelerinden olan polyester, epoksi gibi hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta işlenebilen çeşitlere sahiptir. Çok yönlü olduklarından ve polimer zincirlerinin oluşumu sırasında modifiye edilebildiklerinden kompozit endüstrisinin hemen hemen tüm alanlarında sınırsız kullanım alanına sahiptirler. Polyesterler epoksilere nazaran daha ucuz polimerlerdir. Ancak yapışma özelliklerinin zayıf oluşu, termal şok ve işleme sırasında çatlama eğilimleri, polimerizasyon çekmesi ve nemli koşullarda elektriksel özelliklerindeki değişim epoksiler karşısındaki zayıf yönleridir. Farklı fiziksel özelliklere sahip polyesterler de elde etmek mümkündür. Polyesterlerden elde edilebilecek kompozit ürünler sayılamayacak kadar çok olsa da en yaygın kullanım alanları arasında otomotiv gövde panelleri, gemi iskeletleri, inşaat panelleri, büyük tanklar, borular ve çok sayıda tüketim malları sayılabilir [48].

2.6.1.3. Aminler

Ekonomik kalıplama yöntemleriyle üretilebilen üre veya melamin formaldehitten oluşan amino gruplarıdır. Melaminler, fenolik reçinelere göre daha iyi dayanım özellikleri sergilerler ancak suya karşı dayanımları düşüktür. Asit ve kuvvetli kimyasallara karşı da dayanımları düşüktür. Melamin formaldehitler katı, rijit ve aşınmaya karşı dirençli

polimerlerdir. Yüksek deformasyon direnci gösterirler ve kırılmadan sıfırın altındaki sıcaklıklara kadar soğutulabilmektedirler. Ayrıca sıcak suya karşı dayanımları mükemmel yakındır. Farklı renklerde ve ışık geçirgen olarak elde edilebilirler. Fenoliklerden daha pahalıdırlar. Geniş kullanım alanına sahip olan melamin – formaldehit reçineleri aynı zamanda, tekstil sanayi, beton kimyasalları, çatı kaplama ürünlerinde ve endüstriyel boya üretiminde bağlayıcı olarak da kullanılmaktadırlar [48].

2.6.2. Termoplastikler

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar, ısıtıldıklarında yumuşarlar. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Polietilen (PE), polipropilen, selülozlar, naylonlar, polikarbonatlar, polivinilklorürler (PVC), politetra fluorethylene (PTFE) bazı termoplastik malzemelere örnek olarak verilebilir [83].

2.7. Termoset ve Termoplastiklerin Karşılaştırılmaları

Termoplastikler termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedenleri ise üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastikler termosetlere kıyasla hammaddesi daha pahalıdır. Ayrıca düşük mukavemet ve rijitlik gösterirler [83].

2.8. Polimer Esaslı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

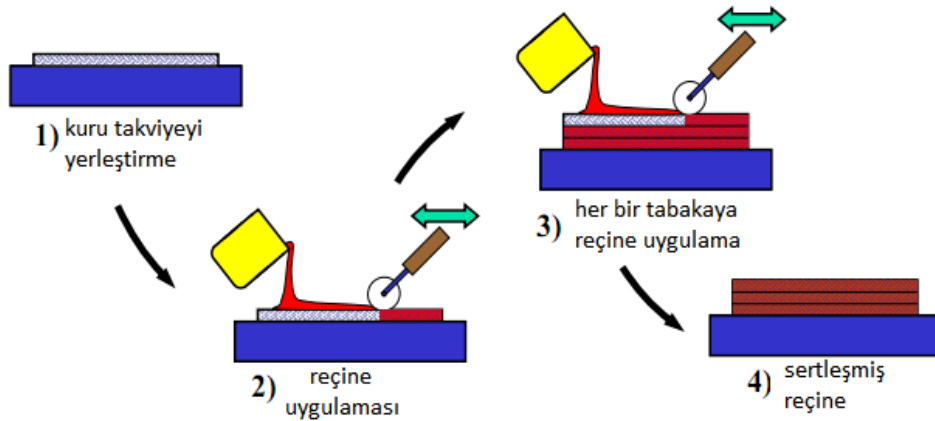
Seçilecek üretim yöntemi; takviye malzemesine (elyaf), matris malzemeye (reçine), parça şekline, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere, maliyete ve üretim hızına bağlı olarak değişim gösterir. Bir parçayı üretmek için genel olarak; ham madde, kalıp, ısı ve basınç ihtiyacı vardır. Kullanılan reçine ve takviye malzemesine ilave olarak, üretim yöntemi de bir kompozit yapının nihai özelliklerini belirlemede önemli rol oynar. Polimer esaslı

kompozitlerin birçok üretim yöntemi vardır. Bunlardan en çok tercih edilenlerden bazıları aşağıda anlatılmış olup bizim çalışmamızda kullandığımız el yatırma yöntemidir [83, 85].

2.8.1. Elle Yatırma Yöntemi

Kompozit üretiminde kullanılan en eski ve yaygın yöntemlerden biridir. Yoğun işçilik gerektirmesine rağmen daha çok üretim adetleri düşük, büyük parçaların üretimleri için tercih edilen bir yöntemdir. Bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara (elyaf) bir rulo veya fırça ile reçinenin emdirilmesi esasına dayanır. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında veya farklı sıcaklık ve basınçlar altında pişmeye/kurumaya bırakılır. Reçineler kumaşlara kat kat yedirilebildiği gibi kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmana aynı anda da reçine sürülebilir [85].

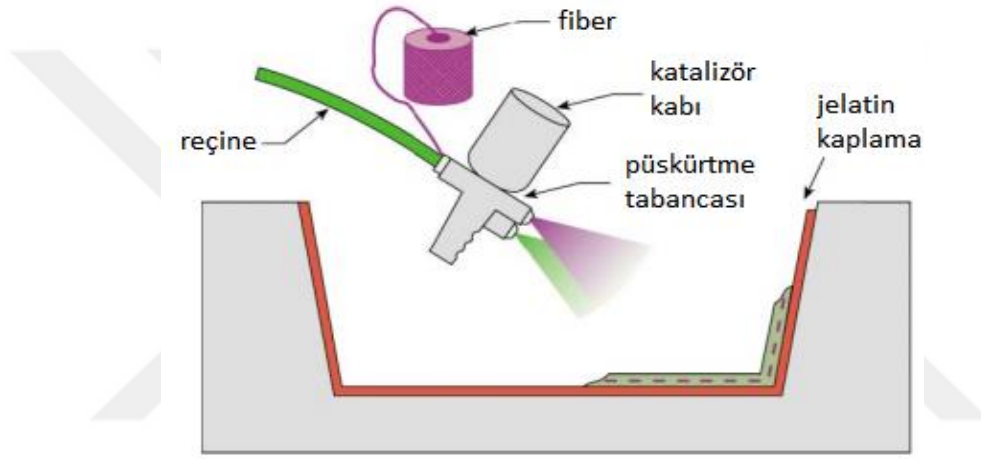
Avantajları olarak öğrenilmesi ve uygulanması çok kolaydır. Özellikle oda sıcaklığında pişen reçinelerin kullanımında düşük maliyet yönteme uygun malzeme temini çok kolaydır. Dezavantajları olarak yöntem laminasyonu (tabakalama) yapan kişinin el becerisine çok bağlıdır. Yüksek “Fiber Hacimsel Yoğunluğu” na ulaşmak çok zordur. Reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelebilmektedir. Bu yöntemde kullanılan reçinelerin yoğunluğu ve viskozitesi düşüktür. Bu tür reçinelerin insan sağlığı açısından ağır moleküllü reçinelere oranla daha zararlıdır.



Şekil 2.6 Elle yatırma yönteminin aşamaları [85]

2.8.2. Püskürtme Yöntemi

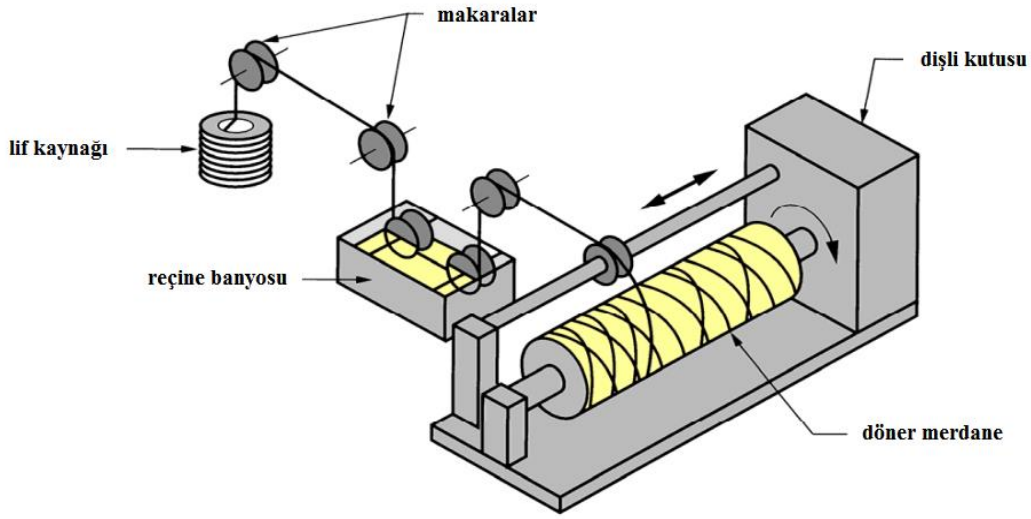
El yatırması metodunun daha seri olarak uygulanmasını sağlayan bir kalıplama metodudur. Üretim sırasında kalıp üzerine polyester ve cam elyafı özel bir makine yardımı ile püskürtülür. Avantajları olarak kısa sürede düşük maliyetli üretim yapılabilir ve uygulanması basittir. Karmaşık yapıları parçaların imal edilmesine de uygundur. Dezavantajları olarak ise elde edilen üründe reçine oranı yüksek çıkabilir. Kısa liflerden dolayı sınırlı mekanik özelliklere sahiptir. Düşük viskozite nedeni ile spreyleme esnasında açığa çıkan partiküllerin giysilere vs nüfuzu daha kolay olabilmektedir.



Şekil 2.7 Püskürtme yöntemi [85]

2.8.3. İplik Sarma Yöntemi

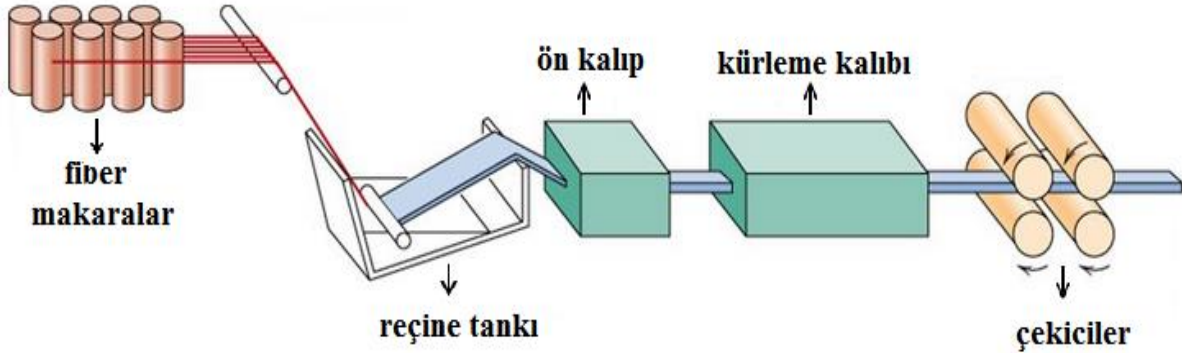
Bu yöntem, genellikle boru ve tank gibi içi boş parçaların üretiminde kullanılır. Bobinlere sarılı olan fiberler bir reçine banyosundan geçerek hareketli bir mekanizma ile belli bir hızda eksenini etrafında dönen mandrelle istenen oryantasyonda (açıda) sarılır. İstenilen kalınlığa veya katman sayısına ulaşıldıktan sonra işlem tamamlanmış olur. Kurutma işlemi oda sıcaklığında ve bir fırında gerçekleştirilebilir. Kimyasal depolama tankları, borularda, gaz silindireleri gibi alanlarda kullanılır.



Şekil 2.8 İplik sarma yöntemi [85]

2.8.4. Profil Çekme Yöntemi

Devamlı cam elyafından fitillerin polyester banyosundan geçirildikten sonra istenilen profilde bir sıcak kalıp içinden çekilirken sertleştirilmesi prensibine dayanır. Elyaf takviyesi yönünde çok dayanıklı ve cam elyafı oranı çok yüksek olan profil ürünlerin elde edilmesinde bu yöntem uygulanır.

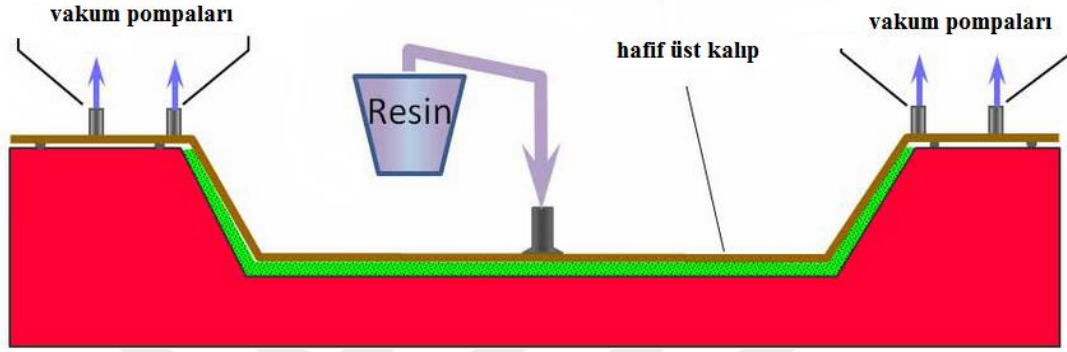


Şekil 2.9 Profil çekme yöntemi [91]

2.8.5. Vakum Destekli Reçine İnfüzyonu Yöntemi

Vakum destekli reçine infüzyonu yüksek kaliteli, büyük kompozit parçaların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Kalıp yüzeyi bir ayırıcı ile kaplanır. Belli bir dizilişte kuru kumaşlar (elyaf) kalıba yatırılır. Kumaşın üzerine soyma kumaşı, ayırıcı film, reçine dağıtıcı

filmler konular. Plastik bir vakum filmi ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak, istiflenmiş kumaşlar çepeçevre dışı ortamdan izole edilir. Vakum yardımı ile reçinenin istiflenmiş kuru kumaşlara tamamen nüfuz etmesi sağlanır ve malzeme pişmeye bırakılır.



Şekil 2.10 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi uygulaması [92]

Yukarıdaki anlattığımız üretim yöntemleri dışında reçine enjeksiyon metodu, hazır kalıplama bileşimleri, savurma döküm metodu, termoplastik enjeksiyon metodu, vakumla kalıplama, soğuk kalıplama yöntemi gibi birçok üretim yöntemi mevcuttur.

2.9. Takviye Olarak Kullanılan Doğal Fiberler

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan karbon, aramid, cam, grafit vs. gibi fiberlerin polyester, epoksi, vinilester gibi matrislerle kombine edilmeleri sonucu oluşan kompozitlerin üretimi hem pahalıdır hem de insan sağlığı açısından oldukça zararlıdır. Ayrıca kullanım ömrünün tamamlayan malzemelerin geri dönüşümü zor ve pahalıdır. Günümüzde hem çevre ve insan sağlığı açısından hem de daha ekonomik olmasından dolayı doğal fiberlere ihtiyaç duyulmaya başlamıştır. Bu çerçevede jüt, keten, kenevir, pamuk, sisal, bamboo vs. gibi bazı doğal lifler önem kazanmıştır.

2.9.1. Jüt

Doğal lif olan jüt bitkisi, 100 çeşidi olan Corchorus isimli bir bitki familyasından üretilir. Tropik bölgelerde yetişen, 2-4 m yüksekliğinde yıllık bir lif bitkisidir. Vatanı Doğu Hindistan'dır. Hindistanı Çin ve Malezya takip etmektedir. Ticarete kullanılan jüt, iki cins

bitkiden elde edilir: Birisi, *Corchorus capsularis*, diğeri ise *Corchorus olitorius*dur. Bu bitkilerin bir sene içerisinde boyu 2-4 metreye ulaşır [68]. Dünyadaki en ucuz bitkisel lifler ve en yüksek kullanım alanına sahiptir [74].

Bitkinin hasadı yapraklar sararmaya başladığı zaman yapılır. Lif üretimi çürütme yöntemi ile yapılır. Toplanan jüt bitkisi balyalar halinde havuzlara atılır ve üzerleri orman bitkileri, hayvan gübresi ile örtülerek bekletilir. Kirli ve havasız su içinde jüt kabukları çürütülür. Çürütme sonunda elyaf demetleri kabuklarından elle soyularak ayrılır. Lifler daha sonra kurumaları için serilir. Elde edilen liflerin boyu 18-25cm'dir. İlk elde edildiğinde açık sarı olan lifler zamanla açık kahverengiye dönüşür. Kenevirden daha parlak elyaf elde edilir. Daha sonraki işlemler fabrikalarda makinelerle yapılır. Lifler taraklanarak temizlenir, bobinlere ip olarak sarılır. Jüt elyafının esnekliği azdır. Diğer selülozik liflerde olduğu gibi nem emiciliği fazladır. Mukavemeti keten ve kenevirden düşüktür. Liflerin yapısında %60 – 64 selüloz, % 20 lignin ve % 5 pektin bulunur. Dünyada üretilen jütün büyük bir kısmı çuval, örtü kumaşı, ip ve sicim yapımında kullanılır [60, 80].



Şekil 2.11 Hasat edilmiş jüt demetleri ve kumaşı

2.9.2. Keten

Keten bitkisi tohumu ve lifi için yetiştirilir. %40 – 45 yağ içeren tohumundan yağ elde edilir. Dünya üretiminde %70 ile Rusya ilk sıralardadır. Bitki yeşilliğini kaybedip yapraklarını dökünce hasadı yapılır. Boyu en az 60 cm olanlardan sanayide kullanılabilen lifler elde edilir. Keten saplarının uzunlukları yaklaşık olarak 80cm, çaplarıysa 1-2mm'dir. Lifler çürütme işlemi ile üretilir. Güzel ve düzenli uzunluktaki keten elyafı genellikle yüksek kaliteli ev tekstili ürünlerinde, mobilya kumaşı olarak ve iç dekorasyon aksesuarlarında

kullanılır. Kısa keten elyafı ise yelkenlerde, çadırlarda ve tuvalerde kullanılır. Kompozitlerde takviye ve dolgu olarak kullanılan daha düşük kaliteli elyaf ise otomotiv sektöründe kullanılır [81].



Şekil 2.12 Keten lifleri

2.9.3. Kenevir

Kenevir, ısırgangillere yakın, Cannabinaceae familyasına mensup, tek yıllık odunsu bir bitkidir. Anavatanı Asya olan bitki çeşitli şekillerde dünyaya yayılmıştır. Günümüzde iki alt türü vardır. Bunlar Cannabis Sativa ve Cannabis Indica (Hint keneviri)'dir. Elyaf üretimi için kullanılan ve endüstriyel öneme sahip olan cinsi Cannabis Sativa'dır. Diğer türünün narkotik özellikleri nedeniyle tüm dünyada üretimi yasaklanmıştır. Kenevir bitkisi lifleri, tohumlarıysa yağı için yetiştirilir. Lifleri kabuk kısmında demetler halinde bulunur. Lif uzunlukları 40 – 45 mm kadardır. Liflerin elde edilmesi için çürütme, dövme ve taraklama işlemleri yapılır. Sanayide birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 2.13 Kenevir bitkisi kesiti ve lifleri

2.9.4. Kenaf

Kenaf bitkisi hibisküs cinsine ait olup yaklaşık 300 türü olan yıllık bir bitkidir. Kenaf bitkisi Hindistan, Bangladeş, Tayland, Afrika, Avrupa'nın güneyi ve Amerika'nın ılıman iklim bölgelerinde yetişir. Kenaf bitkisi 4 ile 5 ayda 1,5m ile 3,5m arasında büyüebilmektedir. Elyaf üretiminin yanı sıra kağıt üretiminde de kullanılmaktadır [60].



Şekil 2.14 Kenaf lifleri

2.9.5. Sisal

Sıcak ve nemli ortamlarda yetişir. Yaprak lifi sınıfında en fazla üretilendir. Uzun etli ve kın şeklindeki yaprakların % 80 i sudur. Taze yapraklardan çürütme yöntemi le %3 – 4 kadar lif elde edilir. Liflerin boyu 100 cm e kadar uzanır. Bu bitkiden 15 – 20 yıl boyunca ürün alınabilir. Sağlamdır ve tuzlu suya dayanımı yüksektir. Diğer kaba liflere göre esnektir. Gemi halatlarında ve denizcilikte çok yoğun kullanılır [80].



Şekil 2.15 Sisal bitkisi

2.9.6. Rami

Orta kuşak ikliminde yetişir ve anavatanı Çin'dir. Lifleri hücreleri bitkinin gövdesinde kabuk kısmının altında bulunur ve boyları 15cm kadardır. Liflerin %80 – 85 i selülozdur. Endüstride değişik alanlarda kullanılır [80].



Şekil 2.16 Rami lifleri

3. BÖLÜM KIRILMA MEKANİĞİ

3.1. Kırılma Mekaniğine Giriş

Kırılma, bir parçanın veya malzemenin çeşitli kuvvetler etkisi altında kalması sonucu iki ya da daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanabilir. Kırılma olayı çatlak oluşması ve çatlağın ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir. Kırılma mekaniği ise kırılma olayını mekaniğin temel prensiplerini kullanarak makro ve mikro açılardan ele alan ve inceleyen bir bilim dalı olarak ifade edilebilir [71].

19. yüzyıl endüstri devrimi ile birlikte metal malzemelerin kullanımında büyük artış görülmüş ve bunun sonucunda kazalar da artmıştır. Bu durum, kırılma konusunun araştırılmasına neden olmuştur. Genellikle kazalar; Basınçlı kapların patlaması, boruların patlaması, buhar kazanlarının patlaması, köprülerin çökmesi, kara, deniz ve hava ulaşım araçlarında görülen kazalar şeklinde görülmüştür. Bu kazaların önemli sebepleri ise;

- Tasarım hataları,
- Üretim (imalat) hataları,
- Konstrüksiyon (montaj) hataları,
- Operasyon (işletme) hataları

gibi hatalar olmuştur.

Kazalardan en az hasarla kurtulmanın yolu, o şartlardaki en son teknolojinin kullanılması ile mümkün olmaktadır. 2. Dünya Savaşı sonrası demir esaslı yüksek mukavemetli malzemelerin kullanımında hızlı bir artış olmuştur. Ancak; bu tür malzemeler yük altında gevrek davranış göstermektedirler. Başka bir deyişle sünek malzemelerle kıyaslırsak kırılma olana kadar daha az enerji absorbe ederler. Bu tüm kırılma olayları, kırılma mekaniğinin gelişimini tetiklemiştir [66].

Yük taşıyan yapılarda veya platformlarda hasar, genel olarak akma veya kırılma ile meydana gelir. Bir malzemenin iç yapısındaki hatalar iki hasar şekli için de çok önemlidir. Ancak aralarında önemli farklar da mevcuttur. Akmayla oluşan hasarlarda, kristal kafes

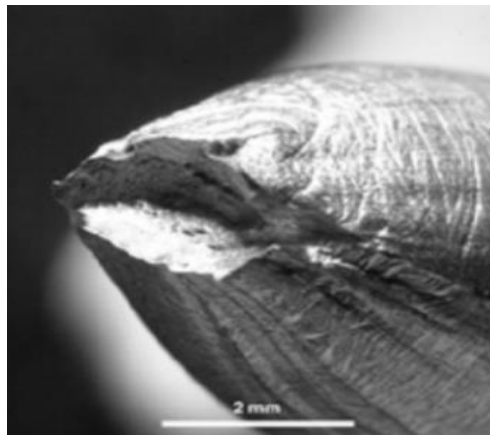
düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalar önemli hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır. Bu hatalara örnek olarak ara yer ve farklı büyüklükteki atomlar, tane sınırları, uyumlu çökeltiler ve dislokasyon ağları verilebilir. Kırılmaya oluşan hasarlarda önemli hatalar ise makroskobik boyuttadır. Çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağlantılı olarak mahallî gerilme - şekil değiştirme alanları söz konusu olur. Makroskobik hatalara örnek olarak, malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları verilebilir. Plastik akma karşı direnci kontrol eden çok küçük kafesle ilgili hatalar burada doğrudan etkin değildir. Ancak malzemenin kırılmaya olan eğilimi plastik deformasyona dirençle ilgili olduğundan önemlidirler [52].

3.2. Kırılma Çeşitleri

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; Bunlar sünek kırılma ve gevrek kırılma şeklindedir. Bunlardan başka yorulma kırılması ve sürünme kırılması da mevcuttur.

3.2.1. Sünek Kırılma

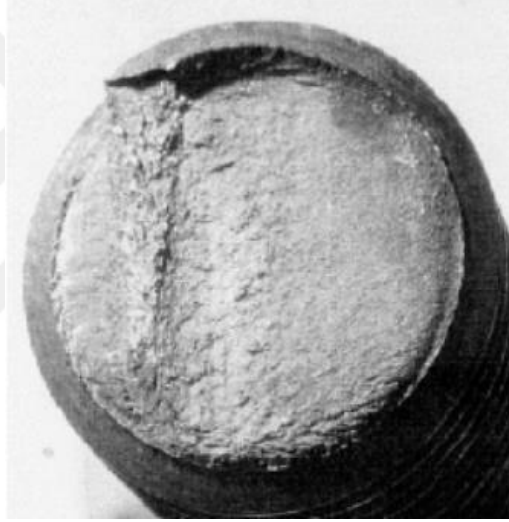
Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla tanımlanabilir. Sünek malzemelerde çatlaklar genellikle içyapıda bulunan oksitler, boşluklar veya sert fazlar çevresinde oluşmaya başlarlar. Orta derecede sünek metal malzemelerin çekme esnasında oluşan plastik deformasyon sonucu malzeme kırılmaya başlar ve sonuç olarak bir boyun vermiş bölge oluşturur. Kırılma, numunenin merkezinden başlar ve kayma ayrılmasıyla gelişerek numunenin kopmasına yol açar (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Sünek kırılma

3.2.2. Gevrek Kırılma

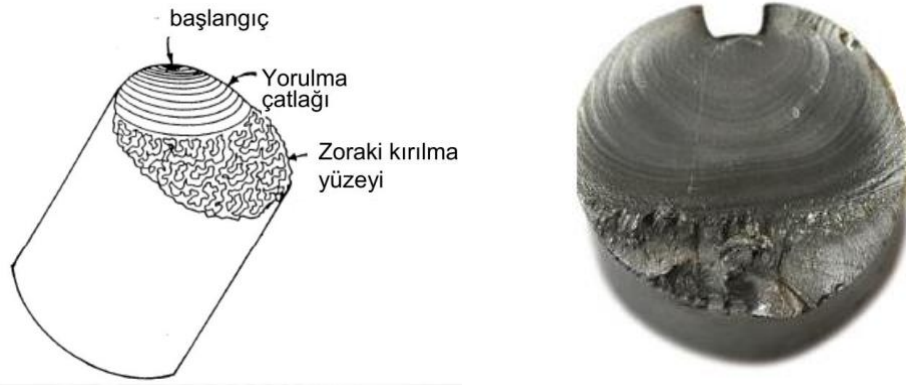
Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla tanımlanır. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artış gösterir. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür. Gevrek kırılma Şekil 3.2’de gösterildiği gibi çekme gerilmesine dik bir ayrılma şeklinde ifade edilir. Dıştan bakıldığında hiçbir deformasyon belirtisi yoktur ancak çeşitli yöntemlerle kırılma yüzeyi incelendiğinde ince bir tabaka deformasyon saptamak mümkündür [57, 62].



Şekil 3.2 Gevrek kırılma

3.2.3. Yorulma Kırılması

Malzemeler elastik limit veya çekme dayanımı altındaki alternatif yük değerlerinin altında kaldıkları zaman kırılma göstermeye başlarlar, bu olaya ise yorulma kırılması adı verilir. Yorulma kırılmaları plastik deformasyon meydana gelmeden de olabilmektedir. Bazen yorulma kırılmaları sünek kırılmalara benzerde yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklıdır ve çatlak her bir yükleme periyodunda ancak belirli bir miktar ilerlermektedir [84].



Şekil 3.3 Yorulma kırılması

3.2.4. Sürünme Kırılması

Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin sürünme deformasyonu sonucunda kırılmasına, sürünme kırılması denir. Makroskopik açıdan bakıldığında, sürünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluşur ve bu sebeple sünek kırılmaya benzer. Mikroskopik açıdan ise sürünme kırılmasının düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklı olduğu görülmüştür [71].

3.3. Kırılma Teorileri

Cisimlerin kuvvetlerin tesiri altında ne gibi sebeplerle kırıldığı bilim adamları tarafından araştırma konusu olmuştur. Bunun için birçok deney uygulamışlar ve sonuç olarak da bazı teoriler ileri sürerek kırılma mekaniği sürecini başlatmışlardır. Böylece kırılma mekaniği, kırılmayla belirlenen hasarları incelemekte başlamış ve iki türlü yaklaşım öngörmektedir. Bunlardan birincisi Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı (1920), diğeri de Irwin teoremidir (1956).

3.3.1. Griffith Teoremi

Kırılmayla ilgili bir problemin çözümü ilk olarak Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith, sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlakın ilerlemeye başlayacağını formülüle etmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür. Gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjidir. Bu teori, gevrek katılarda teorik mukavemetin tahminine yaradığı gibi kırılma mukavemetiyle hata boyutu arasındaki ilişkiyi de verir.

Genel olarak ifade edilirse malzemenin genişliği ve çatlak civarındaki düzlem ölçüleri plastik bölgeye göre yeterince büyükse, büyüme başlangıcındaki K değeri sabittir ve bu onun minimum değeridir. Bu tanım düzlem şekil değiştirme tokluk faktörü olarak adlandırılır ve malzemenin K_1 değeridir. K_1 değeri özellikle malzeme seçiminde önemli bir faktördür çünkü tokluğun diğer ölçülerinden farklı olarak malzemenin şeklinden bağımsızdır [57].

3.3.2. Irwin Teoremi

Griffith'ten sonra ise Irwin (G) ile sembolize edilen bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için depolanan toplam enerjidir. G , şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır ve kritik bir değere ulaştığında kırılma başlar. Bu değere kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı (G_c) denir [52, 57].

1950'lerin ortalarında yine Irwin kırılma mekaniğinde yeni bir çığır açmış olup enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü ($G_{\text{ŞF}}$) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K , çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve geometrisine bağlıdır. Buna göre çatlak ağzında gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu, K_c ortaya çıkmıştır [52].

G ve K 'nin eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ağzının etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynı olmuştur. Dolayısıyla K_c 'nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği de saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir [52].

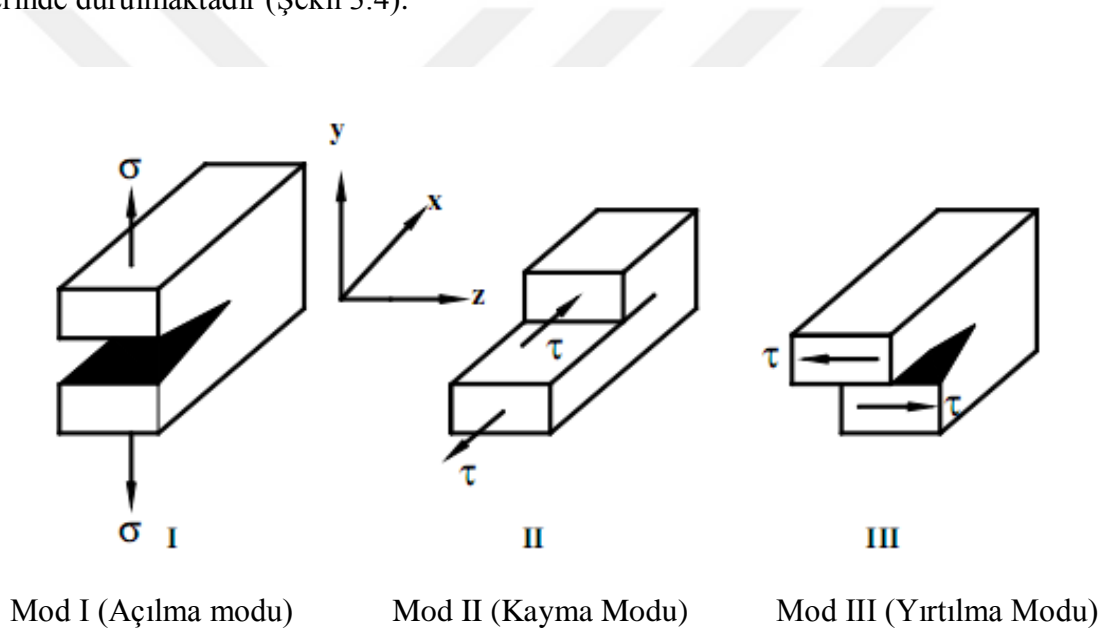
3.4. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Malzeme içinde mikro çatlak ve benzeri kusurlar doğal olarak mevcuttur. Bu kusurlar cürufklar, boşluklar, nüfuziyet eksikliği gibi kaynak proseslerinden ve yorulma, gerilme korozyonu çatlama, darbe hasarı, kendini çekme gibi çalışma şartları sonucu oluşabildiği gibi başka hesapta olmayan nedenlerle de oluşabilmektedir. Kırılma mekaniğinin

incelenmesinde kullanılan ve malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içinde kalması prensibinden hareketle geliştirilen, analitik ifadelerin bütününe Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) denilmektedir. Bu metodun temel prensibi çatlak ucunda oluşan gerilmelerin parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağlı olarak ifade edilmesidir. Buna göre, bir çatlağın ilerleyebilmesi iki şekilde mümkündür, birincisi yükleme sonucu parçada depolanan enerji kritik bir değeri aşmış ise ve ikincisi ise çatlak ucundaki gerilmenin değeri kritik bir değere ulaşmış ise dir [71] .

3.4.1. Kırılma Modları

Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak kırılma tokluğunu ölçmek için üç ana model üzerinde durulmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Kırılma modları [57]

Mod I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. Mod II de kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde birbirine paralel zıt yönde hareket ederler. Mod III'te ise yırtılma modu olarak geçer ve çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar. Bu kırılma modlarından biri ya da birden çok farklı kombinasyonları bir arada olabilir. Bu şekilde oluşan kırılma modlarına ise karışık mod denir. Lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) de birçok formül Şekil 3.5'te gösterilen düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme etkenlerine bağlı olarak geliştirilir ve türetilir.

Çatlak ağzı etrafında oluşan gerilme yoğunluğunun Irwin tarafından bulunduğu daha önce anlatılmıştı. Buna göre K , elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K 'nin gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve en genel haliyle gerilme yoğunluk faktörü (K) denklem (3.1)'de ifade edilmiştir [52].

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (3.1)$$

Burada (σ) gerilme, (a) çatlak uzunluğudur, $f(a/w)$ ise numuneye ve çatlak geometrisine bağlı boyutsuz bir parametredir.

Kırılma tokluğu olarak bilinen büyüklük K_{IC} ile gösterilir. Bu değer bir malzeme parametresidir. K_I ise daha önce anlatıldığı gibi uygulanan gerilmeye ve numunenin geometrisine bağlı bir büyüklüktür. K_{IC} bir malzeme sabitidir ve deneysel olarak tespit edilir. Çatlak ilerlemesi $K_I=K_{IC}$ olduğunda gerçekleşir. Buradan yola çıkarak çatlak ağzındaki gerilme şiddet faktörü (K), sonsuz genişlikteki bir numunede her üç mod içinde aynı olup pratikte en çok mod I gerilme durumu ile karşılaşıldığından gerilme yoğunluk faktörü çözümleri de genellikle mod I için verilir ve K_I olarak ifade edilir. Bu değer ise denklem (3.2)'de gösterilmiştir.

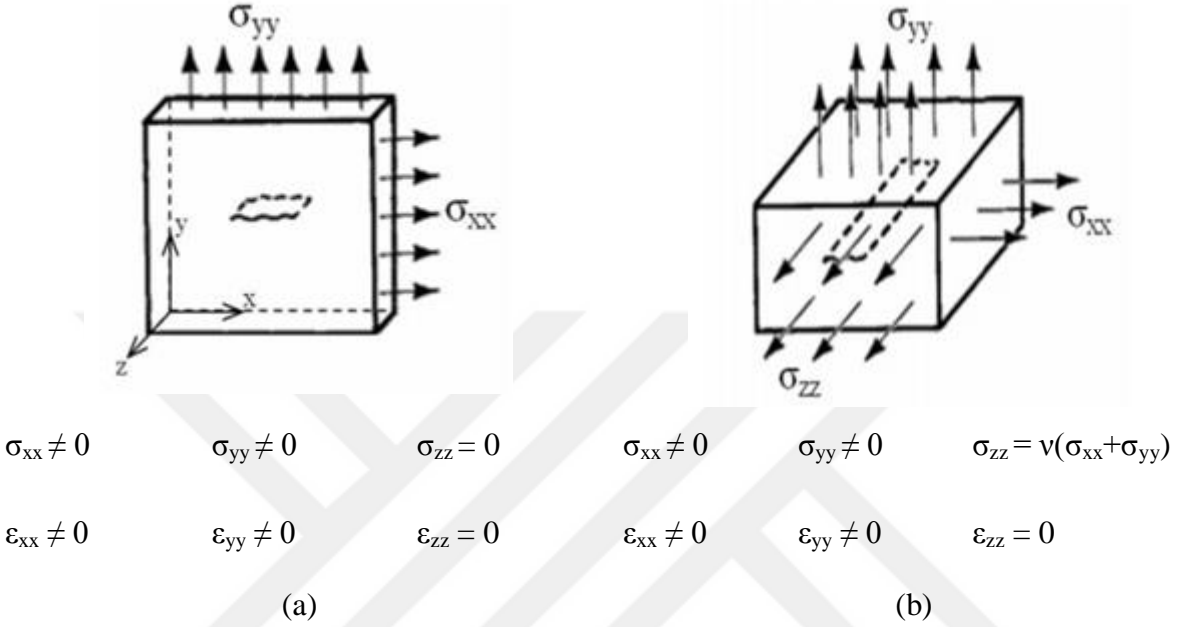
$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a} = K_{IC} \quad (3.2)$$

3.4.2. Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değiştirme

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur veya ihmal edilebilir ($\sigma_z=0$). Çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusu olmuştur (Şekil 3.5a) [52].

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. Z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y

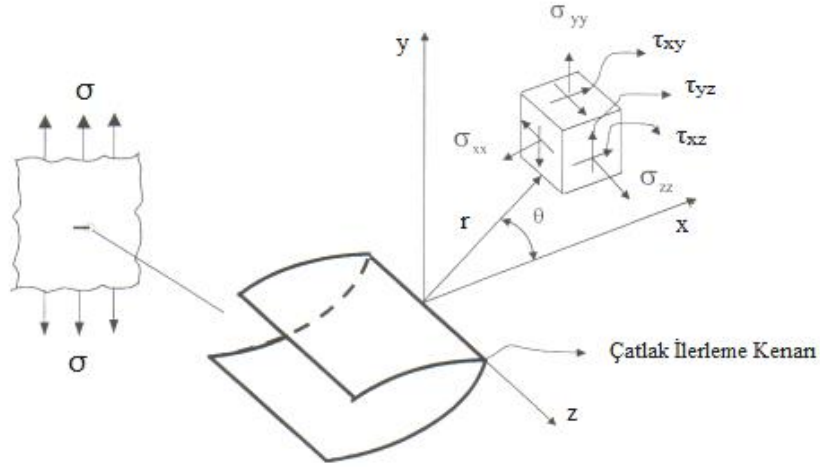
düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenli boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\epsilon_{zz} = 0$). Bu durumda da düzlem şekil değiştirme hali söz konusu olur (Şekil 3.5b) [52].



Şekil 3.5 İki eksenli gerilme altındaki numunelerin düzlem gerilme (a) ve düzlem şekil değiştirme (b) şartları [45]

3.4.3. Çatlak Ucu Gerilme Yoğunluğu ve Kayma Bileşenleri

Lineer elastik ve izotropik malzemeler için çatlak ağzı doğrusal gerilim ve yer değiştirme bileşenleri her üç mod içinde aşağıdaki Şekil 3.6'daki gibi ifade edilebilmektedir [57].



Şekil 3.6 Çatlak ucu gerilme dağılımları [57]

Yukarıdaki Şekil 3.6'da, çatlaktan (r) mesafesi kadar uzaklıktaki bir noktanın o noktadaki şekil değiştirmeleri ve gerilmeleri gösterilmiştir. Şekil değiştirmelere ve gerilmelere bağlı olarak türetilen denklemler ise aşağıda belirtilmiştir.

Şekil 3.6 baz alınarak oluşturulan aşağıda belirtilen denklemlerde (3.3; 3.8), (ν); poisson oranı, E; Elastite modülü, σ_{xx} ; x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} ; y eksenindeki gerilme değeri, σ_{zz} ; z eksenindeki gerilme değerleridir. K_I , K_{II} , K_{III} sırasıyla mod I, mod II, mod III için gerilme şiddet faktörleridir ve sabit değerlerdir. Değişken bir değer olan (θ); r'nin x eksenini ile yaptığı açıdır. u, v, w değerleri ise sırasıyla x, y, z eksenlerindeki yer değiştirmelerdir.

Mod I için gerilme denklemleri [45]

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\cos\frac{\theta}{2} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} 0 & (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \\ \vartheta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & (\text{Düzlem Şekil Değişirme Durumu}) \end{cases}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

Mod I için yer değiştirme denklemleri [45]

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[K + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$u_z = \begin{cases} \frac{-\nu z}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \\ 0 & (\text{Düzlem Şekil Değişirme Durumu}) \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} \frac{3 - \nu}{1 + \nu} & (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \\ 3 - 4\nu & (\text{Düzlem Şekil Değişirme Durumu}) \end{cases}$$

(3.4)

Mod II için gerilme denklemleri [45]

$$\sigma_{xx} = \frac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

(3.5)

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} 0 & (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \\ \vartheta(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & (\text{Düzlem Şekil Değişirme Durumu}) \end{cases}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$$

Mod II için yer değiştirme denklemleri [45]

$$u_x = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[K + 1 + 2\cos^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K - 1 - 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

(3.6)

$$u_z = \begin{cases} \frac{-vZ}{E} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) & \text{(Düzlem Gerilme Durumu)} \\ 0 & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme Durumu)} \end{cases}$$

$$K = \begin{cases} \frac{3-v}{1+v} & \text{(Düzlem Gerilme Durumu)} \\ \frac{3-4\nu}{3-4\nu} & \text{(Düzlem Şekil Değiştirme Durumu)} \end{cases}$$

Mod III için gerilme denklemleri [45]

$$\sigma_{xx} = 0$$

$$\sigma_{yy} = 0$$

$$\tau_{xy} = 0$$

(3.7)

$$\sigma_{zz} = 0$$

$$\tau_{xz} = \frac{-K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}$$

Mod III için yer değiştirme denklemleri [45]

$$\begin{aligned}u_x &= 0 \\u_y &= 0 \\u_z &= \frac{K_{III}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.8}$$

şeklinde ifade edilmektedirler. Yukarıdaki denklemler daha öncede belirtildiği gibi aslında izotropik malzemeler için geçerlidir. Lifli tabakalı kompozitler ortotropik oldukları için bu tür lifli kompozit malzemelerin kırılma şiddeti faktörü olan (K) değerinin hesabında direk bu denklemler kullanılmazlar. Bu denklemler aslında kırılma mekaniğinin temelini oluştururlar. Tüm denklemler bu denklemlerden yola çıkarak türetilirler. Gerilme şiddeti faktörü (K_I) değerinin hesabında birçok literatürde farklı malzeme ve yapılar için farklı denklemlerle çözüme gidildiği görülmüştür. Çalışmamızda kullandığımız denklemler ise yukarıdaki denklemlerden yola çıkarak belirlenmiş denklemler olup bunlara beşinci bölümde yer verilmiştir.

3.5. Elastik Plastik Kırılma Mekaniği

Çoğu malzemelerde, LEFM ile kırılma davranışlarını izah etmek hemen hemen imkansız olup, alternatif bir kırılma modeli gereklidir. EPKM, lineer davranış göstermeyen (plastik deformasyon gibi) malzemeler için uygulanır. Elastik – plastik davranış karakterize eden parametrelerden biri çatlak ağzı açılma miktarı diğeri ise J-integral yöntemidir.

3.5.1. Çatlak ucu plastik bölge

Yapısal malzemeler bir akma gerilmesine sahiptirler ve çatlak ucu yakınlarındaki teorik çok yüksek gerilmeler malzemelerin akma gerilmelerinin üzerine çıkarlar. Bu da, gerçek malzemelerin akma gerilmelerinin üzerinde plastik olarak deforme olmaları nedeniyle, çatlak ucunu çevreleyen bir plastik bölgenin var olması demektir. Bu plastik deformasyona uğramış bölgeye çatlak ucu plastik bölge adı verilir [52].

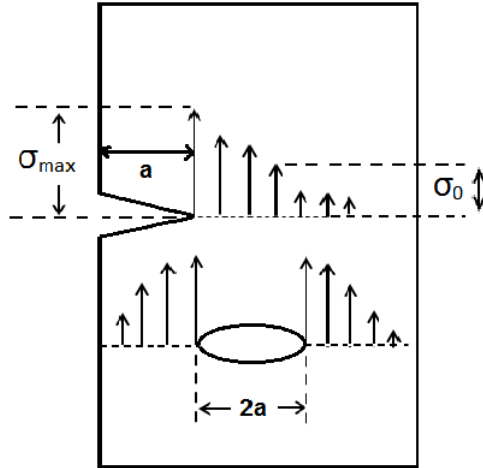
3.6. Kırılma Enerjisi

3.6.1. Griffith Gevrek Kırılma Teorisi

Yüzeyinde veya içinde eliptik bir çatlak içeren bir malzemede (Şekil 3.7), çatlak ucunda yüksek gerilme yığılmaları oluşur. Çatlak ucundaki maksimum gerilme σ_{max} , ortalama σ_0 gerilmesinden çok daha büyüktür. Burada σ_{max} aşağıdaki bağıntı ile bulunur [52].

$$\sigma_{max} = 2\sigma_0 \sqrt{\frac{a}{p}} \quad (3.9)$$

Burada (a) iç çatlağın yarı boyu ve (p) çatlak ucu eğrilik yarı çapıdır.



Şekil 3.7 Bir çentik ve çatlağın ucunda gerilme yığılması [52]

Griffith'in önerdiği teoriye göre, gerilmelerin çatlak civarında oluşturacağı elastik enerji, yeni oluşacak çatlak yüzeylerinin yüzey enerjisine eşit olunca çatlak ilerlemeye başlar. Birim kalınlıkta ve sonsuz genişlikte ki bir levha için bu koşulu sağlayan gerilme değeri denklem (3.10)'da gösterilmiştir [52]

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\gamma_e E}{\pi a}} \quad (3.10)$$

Burada a çatlak yarı boyu, E malzemenin elastisite modülü ve γ_e ise elastik yüzey enerjisidir.

Griffith'in çatlak ilerlemesi için ileri sürdüğü enerji yaklaşımı tüm gevrek malzemeler için oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu tür malzemelerin kırılmasına ise elastik kırılma denir. Ancak görünüşte gevrek olarak kırılan kristalin malzemelerde de çoğunlukla kırılma yüzeyi civarında bir miktar yerel plastik deformasyon oluşur. Bu tür malzemelerde sadece yeni çatlak yüzeyleri oluşması için gerekli enerjiyi değil, aynı zamanda çatlak etrafında oluşacak plastik şekil değiştirme enerjisini de göz önüne almak gerekmektedir.

3.6.2. Griffith Enerji Dengesi Yaklaşımı

Griffith'e göre ideal gevrek malzemelerde çatlak ilerlemesi, uygulanan gerilmeyle çatlak boyunun kareköküne ve ayrıca malzeme özelliklerine bağlı olduğunu denklem (3.15) göstermektedir.

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} = 2\gamma_e \quad (3.15)$$

Bu eşitliğin sol tarafı enerji yayılım hızı (G) olarak tanımlanır. G, çok küçük bir çatlak uzaması için gerekli birim çatlak alanı başına elastik enerjiyi temsil eder. Eşitliğin sağ tarafı da, çok küçük bir çatlak ilerleyişiyle oluşan yüzey enerjisi artışını temsil eder ve çatlak direnci (R) olarak adlandırılır. Bu durumda kararsız çatlak büyümesinin oluşması için, G en azından R'ye eşit olmalıdır. R sabit olduğundan G, G_c gibi kritik bir değeri aşmalıdır. Böylece kırılma;

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} \geq \frac{\pi\sigma_c^2 a}{E} = G = R \quad (3.16)$$

olduğunda gerçekleşir. Kritik G_c değerini hesaplamak için $2a$ uzunluğunda bir çatlakla sahip bir levhayı kırmak için gerekli σ_c gerilmesinin ölçülmesi gerekir. Griffith'in ideal gevrek malzemeler için olan bu teorisinin hem gevrek hem de plastik deformasyon gösteren metallere uygulanabileceğini Irwin önermiştir. Irwin'e göre, malzemenin çatlak ilerleyişine karşı gösterdiği direnç elastik yüzey enerjisi ve plastik şekil değiştirmenin toplamı olarak ele alınmalıdır.

Daha önce gösterildiği gibi (K_I) denklem (3.17)'de gösterildiği gibiydi.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.17)$$

Denklem 3.17 ve diğer tüm denklemlerden yola çıkarak aşağıdaki denklemler genel olarak yazılabilir.

$$G = \frac{K_I^2}{E} (\text{Düzlem Gerilme}) \quad (3.18)$$

$$G = (1 - \nu^2) \frac{K_I^2}{E} (\text{Düzlem Şekil Değiştirme}) \quad (3.19)$$

Bu formüller enerji formülü olarak kullanılabilir [43, 52].

3.7. Kırılma Tokluğu Deney Türleri

Kırılma tokluğu deneylerindeki amaç bir malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnci, yani K_{IC} değerini bulmaktır. Bu değer kalınlıktan ve numunenin geometrisinden bağımsız olması gerekmektedir. Bunun için numune ve çatlak geometrisi ilgili malzemenin kırılma testi standartlarına göre belirlenir ve et kalınlığının da bazı kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bunlar aşağıda belirtilen denklemlerle sağlanır [71].

$$B \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.20)$$

$$w \geq 5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.21)$$

$$a \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$(w - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3.23)$$

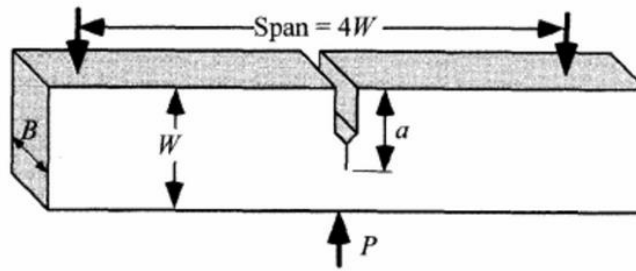
Bu denklemlerde B numune et kalınlığı, a çatlak boyu, w numune genişliği, σ_{ys} ise malzeme akma mukavemetidir.

Malzemelerin kırılma dirençlerini ortaya koyan K_{IC} değerinin doğruluğu, gerilme şiddet faktörünün yorulma çatlaklarının hemen ucunda oluşan gerilme ve şekil değiştirme parametrelerini nasıl etkilediği ile ilgilidir. Çünkü burası kararsız çatlak ilerlemesinin ortaya çıktığı bölgedir.

K_{IC} testleri için numune boyutlarını belirlerken, bu boyutların çentiğin ucunda oluşan plastik bölgeden büyük olması ilkesi esas alınmalıdır. Bu yüzden, plastik bölgenin gerilme şiddeti analizine etkisi ihmal edilebilir ve bu şekilde düzlem deformasyon halinin oluşması sağlanır. Bu bilgiler ışığında test numunesinde çatlak boyu, numune genişliği ve çentik ucundaki kalan kısmın uzunluğu baya önem arz etmektedir. Deney numunelerinin yapılarına ve geometrilerine göre statik kırılma tokluğu deneyleri literatürde dört çeşit olarak karşımıza çıkmaktadır [71].

3.7.1. Üç Nokta Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyinde, Şekil 3.8'de boyutları verilmiş olan test numunesi ASTM standardına göre çatlak (çentik) oluşturulur ve bu kenar deney düzeneğinde iki mesnet üzerine yerleştirilir ve çentiğin karşı kenarından numuneye kuvvet uygulanır, numunenin kırılması ve kuvvet- şekil değiştirme grafiğinin bulunması ile deney sonuçlanmış olur.

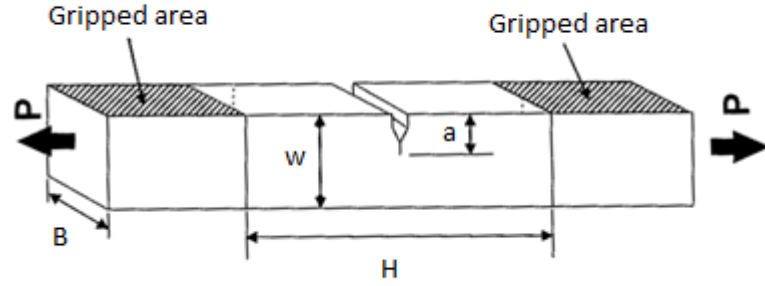


Şekil 3.8 SENB (single-edge-notched bend) numunesi [79]

3.7.2. Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi

SENT (single edge notched tension) deneyinde, Şekil 3.9'da boyutları verilen deney numunesinin bir kenarına ASTM standardına göre çatlak açılır, daha sonra numune çekme

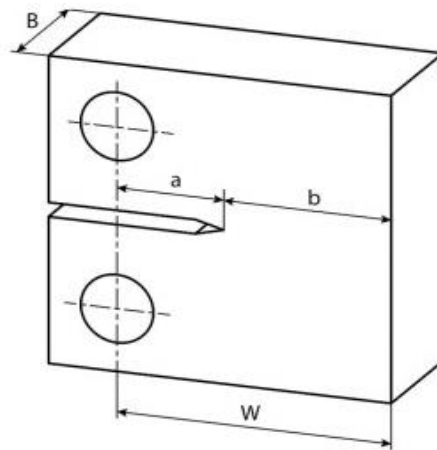
cihazına bağlanır ve iki ucundan çekmeye maruz bırakılır. Test numunesinin kırılması ile birlikte kuvvet-şekil değiştirme grafiği elde edilir ve deney sonuçlanmış olur [71,94].



Şekil 3.9 SENT (single edge notched tension) numunesi [94]

3.7.3. Kompakt Çekme Deneyi (CST)

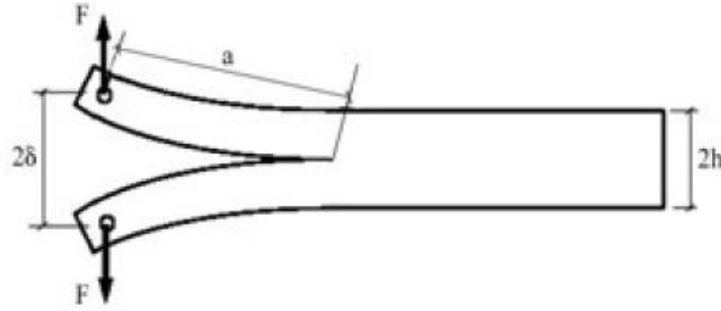
CTS (Compact Tension Specimen) deneyinde, Şekil 3.10'da boyutları verilen test numunesine ASTM E399 standartlarında belirtildiği şekilde çatlak ve delik açılır. Daha sonra ise numune test için çekme cihazına bağlanır ve çekme deneyine tabi tutulur. Deney istenilen sayıda belirlenen numune sayısı kadar tekrar edildikten sonra elde edilen sonuçların ortalamaları alınır ve bazı kırılma mekaniği ile ilgili denklemlerde kullanılarak kırılma tokluğu değerleri hesaplanır. Çıkan sayısal sonuçlar grafiklere dökülür ve yorumlanır [71, 93].



Şekil 3.10 CST (compact tension specimen) numunesi [93]

3.7.4. Çift Ankastre Kiriş Test Tekniği (DCB)

Çift Ankastre Kiriş Test Tekniğinde Şekil 3.11’de boyutları verilmiş olan numuneye ilk olarak çatlak açılır. Daha sonra numune ucu delinir veya uc tarafa menteşe tarzı bir aparat yapıştırılır. Numune çekme deney cihazına bağlanır ve ucundan kuvvet uygulanıp çatlağın ilerlemesi gözlemlenir ve kayıt altına alınarak gerekli hesaplamalar yapılır. Uygulanacak kuvvetin değeri ve döngüsü ASTM standardına bağlı olarak belirlenir. Artan genişlikli test numunesi de kullanılabilir [71].



Şekil 3.11 DCB (double cantilever beam) numunesi, ASTM 5528 [71]

Statik kırılma tokluğu deneylerinde en yaygın olarak kullanılan test teknikleri; Üç nokta eğme deneyi ve kompakt çekme deneyleridir. Yapılan çalışmalarından ve araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre bu iki metot kullanılarak %15’lik sapma ile K_{IC} değeri hesaplanabileceği ortaya konulmuştur [71].

4. BÖLÜM KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ

4.1. Giriş

Bu bölümde, çalışmamızda araştırmaya konu olan silisyum karbür takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozit numunelerin üretim aşamasından bahsedilmiştir. Kompozit malzemelerin birçok üretim şekli olduğundan ikinci bölümde bahsedilmiştir. Bu çalışmada test için kullandığımız kompozit numuneler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Gerek laboratuvar imkanları açısından, gerekse kolaylık ve serilik bakımından daha verimli ve daha ekonomik olduğu için el yatırma yöntemi seçilmiştir. Kullanmış olduğumuz kompozit test numuneleri Uşak Üniversitesi laboratuvarında üretilmiştir. Kompozit plakaların üretimi için laboratuvarda bulunan PLC kontrollü hidrolik pres kullanılmıştır.

Kompozit plakaların üretimi üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama üretimi yapılacak olan kompozit plakalarının tüm malzeme bileşenlerinin tespit edilmesi ve piyasadan temininin sağlanmasıdır. İkinci aşama temin edilen malzemelerle el yatırma yöntemi kullanılarak kompozit plakaların hazırlanması ve üretimi için hidrolik preste pişirilmesidir. Üçüncü aşama ise preslenmiş ve bunun sonucunda sertleşmiş plakaların standart test numuneleri için belirli ve değişik ölçülerle kestirilmesidir. Tüm bu aşamalardan sonra numuneler mekanik özelliklerin ve kırılma tokluğunun belirlenebilmesi için teste tabi tutulmuştur.

4.2. Takviye Malzemeleri ve Kompozitin Tüm Bileşenleri

Kompozitler matris malzemesi ve fiber malzemenin birleşiminden meydana gelirler. Ayrıca kompozitin mukavemet, süneklik, dayanım, rijitlik vs. gibi birçok mekanik özelliğini iyileştirmek amacıyla çeşitli partiküller ek olarak kullanılabilir. Bu partiküller metal, seramik, polimer ve türevleri gibi çeşitli malzeme gruplarından olabilir. Kompozite ilave edilecek partikül takviyesi sayesinde daha iyi mekanik özelliklere sahip malzeme elde edileceği gibi seçilecek takviye partikülünün cinsine ve özelliğine göre daha kötü mekanik özelliklere sahip malzemelerde elde edilebilmektedir.

- **Epoksi reçine (matris)**

Ürettiğimiz kompozitlerin ana matris malzemesi olarak epoksi reçine (DTE 1000) ve sertleştirici (DTS 1100) kullanılmıştır (Resim 4.1). Sertleştirici epoksinin daha kolay tepkimeye girmesi içindir. Epoksi reçine kullanılma amacı ise endüstride en çok kullanılan polimer olması, suya dayanıklılık ve kullanım kolaylığıdır. Kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici Duratek firmasından temin edilmiştir.



Resim 4.1 Epoksi reçine ve sertleştirici

Kullanılan DTE 1000 reçine sisteminin elyafları ıslatalabilirlik özelliği çok iyi ve mukavemeti çok yüksektir. Oda sıcaklığında karışım viskozitesi 300 – 350MPa olan sistemin düşük ekzotermisi ile kompozit laminatların infüzyonuna uygundur. Oda sıcaklığında da kürlenebilen sistem, 60 – 70°C gibi sıcaklıklarda kürlendirildiğinde standartlarda istenilen değerlerin üzerinde özellikler sağlamaktadır [67].

- **Doğal jüt (fiber)**

Fiber malzemesi olarak ise dokuma tip doğal jüt kullanılmıştır. Doğal jüt'ün seçilme sebebi hem üstün özellikleri sayesinde daha iyi malzeme prosesi elde edileceği, hemde ekonomik olmasıdır. Doğal jütler Jüt Çuval İp San. ve Tic. A.ş. firmasından temin edilmiştir. Top kumaş halindeki jüt kumaş yaklaşık 300gr/m² ağırlığındadır (Resim 4.2).



Resim 4.2 Doğal jüt top kumaşı

- **Silisyum karbür (SiC)**

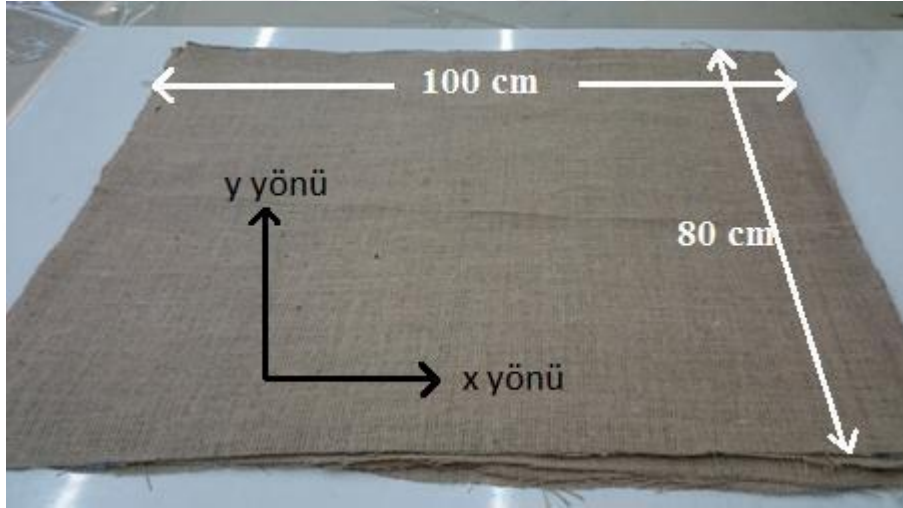
Jüt/epoksi matris ve fiber kombinasyonu olan kompozitimize takviye malzemesi olarak ise seramik oksit grubundan olan üstün mukavemet ve sertlik özellikleri gösteren yeşil silisyum karbür (SiC) partiküller kullanılmıştır. Yeşil silisyum karbürü seçmemizin nedeni ise siyaha göre daha üstün mekanik özelliklere sahip olmasıdır. Silisyum karbür partiküller piyasadan Akyol Taş San. ve Tic. A.ş. firmasından temin edilmiştir. Piyasada numara olarak adlandırılan silisyum karbürlerden üç farklı boyutta F230, F600 ve F1000 alınmıştır (Resim 4.3). Mikron cinsinden ise karşılıkları ortalama olarak (4.5μ , 9.3μ ve 53μ) dur [76].



Resim 4.3 Üç farklı boyuttaki silisyum karbürler (SiC)

4.3. Kompozit Malzeme Bileşenlerinin Üretime Hazırlanması ve Karışım Oranları

Kompozit plakaları üretmek için jüt kumaşların kesim büyüklüğüne göre epoksi, sertleştirici ve silisyum karbür belirli oranlarda ayarlanarak üretim gerçekleştirilmiştir. Öncelikle jüt dokuma tipi kumaş top halinde fabrikasyon olarak eni 100cm olduğu için, 80cm uzunluklarda kesilerek 100*80 cm ölçülerinde parçalar elde edilmiştir (Resim 4.4). Ayrıca kompozit plaklarımızın üretimini gerçekleştireceğimiz hidrolik presin kapasitesi ölçüsünde bu değer belirlenmiştir. Burada x yönü ve y yönü, deneylerde kullanacağımız numunelerin lif yönünün önemi için belirlenmiş olup tüm numune kesim işlemleri buna göre gerçekleştirilmiştir. Jüt kumaş dokuma tipi olduğu için belirli bir lif yönü yoktur fakat deneylerde ve hesaplamalarda karışıklık olmaması için x ve y yönü kabulü yapıp bu yönleri fiber yönü ve fibere dik yön denilmiş ve tüm çalışma boyunca bu şekilde adlandırılmıştır.



Resim 4.4 100cm x 80cm ebatlarında kesilen jüt kumaşı

Fiber malzemenin (jüt) ölçüsü belirledikten sonra epoksi ve sertleştiricinin karışım miktarları belirlenmiştir. 100*80cm ölçüsündeki jüt kumaş parçası yaklaşık 240gr gelmektedir. Kompozit tabakalarımız altı tabakalı olduğu için bir levha için altı adet 100*80'lik kumaş kullanılmıştır. 1440gr lık bir adet tabakamıza karşılık ise yaklaşık 900gr epoksi (Resim 4.5a) ve 300gr sertleştirici (Resim 4.5b) kullanılmıştır. Bunlar ayrı kaplarda tartılıp miktarları ayarlandıktan sonra ayrı bir kaptaki birleştirilmiştir.



(a)



(b)

Resim 4.5 Altı tabakalı kompozit levha için gerekli (a) epoksi (b) sertleştirici miktarları

Takviye olarak kullanılacak silisyum karbürler projede üç farklı boyut ($4,5\mu$, $9,3\mu$ ve 53μ) ve dört farklı oranda (%0, %3, %6, %9)'dır. Burada oranların miktarları matris takviyesinin miktarına göre belirlenmiştir. Yani epoksi ve sertleştirici toplam 1200gr olduğu için bu sayının yüzdesi alınarak her bir 6 tabakalı levhaya takviye edilecek silisyum karbür miktarı elektronik kantarda tartılarak belirlenmiştir (Resim 4.6).



Resim 4.6 Silisyum karbür (SiC) miktarının ayarlanması

Bir kapta tartılan silisyum karbür tozlar daha sonra epoksi ve sertleştirici ile beraber birleştirilmiş ve mekanik karıştırıcı kullanılarak homojen karışım elde edilmiştir (Resim 4.7). Bu işlem her bir kompozit levha için ayrı ayrı yapılmıştır.



Resim 4.7 Epoksi, sertleştirici ve SiC tozların karışımı

4.4. Partikül Takviyeli Kompozit Plakaların Üretimi

Kompozit plakalarımızın üretiminde sırası ile aşağıdaki üretim adımları takip edilmiştir;

1. İlk olarak jüt dokuma kumaşlar 100*80cm ölçüsünde kesilip istiflenmiştir.
2. Resim 4.7'de görüldüğü üzere epoksi, sertleştirici ve silisyum karbürler elektronik terazi de ayrı ayrı tartılıp bir kapta mekanik karıştırıcı vasıtasıyla üçü beraber homojen şekilde karıştırılmıştır.
3. İlk olarak ince bir metal sac üzerine kompozitin üretiminde plakanın saca yapışmasını önlemek amacıyla 250°C sıcaklığa kadar dayanabilen ve yapışmayan 19µm kalınlığında mikro film kullanılmıştır (Resim 4.8).



Resim 4.8 Metal sac levha üzerine mikro filmin serilmesi

4. Film serildikten sonra 6 tabakalı kompozitin ilk tabakası için parça jüt kumaş metal sacı kaplayacak şekilde serilmiş ve epoksi – takviye SiC tozlarının karışımı bir rulo yardımıyla kumaşın her bir tarafını tamamen kaplayacak şekilde, hiç boş yer kalmamak kaydıyla sürülmüştür (Resim 4.9). Bu işlem sırası ile her bir kat için uygulanmıştır.



Resim 4.9 Matris karışımının jüt kumaşa absorbe edilmesi

5. Her kat üst üste serilip epoksi ile kaplama işlemi bittikten sonra en üst kata yine mikro film serilmiş ve onun üzerine metal sac konulmuştur (Resim 4.10a ve Resim 4.10b).



(a)



(b)

Resim 4.10 (a) Mikro filmin en üst kata serilmesi (b) film üstüne metal sac yerleştirilmesi

6. Tüm bu işlemlerden sonra kompozit plakalar pişmesi ve sertleşmesi için hidrolik prese konulmuştur (Resim 4.11).



Resim 4.11 Kompozit levhanın hidrolik prese yerleştirilmesi

7. PLC kontrollü hidrolik preste kompozit plakalar 100°C de ve 40bar basınçta yaklaşık 60dk tutulmuştur. Bu süre sonunda doğal soğumaya bırakılmıştır (Resim 4.12).



Resim 4.12 Kompozit levhanın prestren çıktıktan sonra soğuması

8. Mekanik özellikler ve kırılma tokluğu tayinleri için hesaplanan numune ölçüleri ve sayılarına göre 20 adet plaka üretimi gerçekleştirilmiştir (Resim 4.13).



Resim 4.13 Üretilmiş kompozit plakalar

4.5. Deney Numuneleri

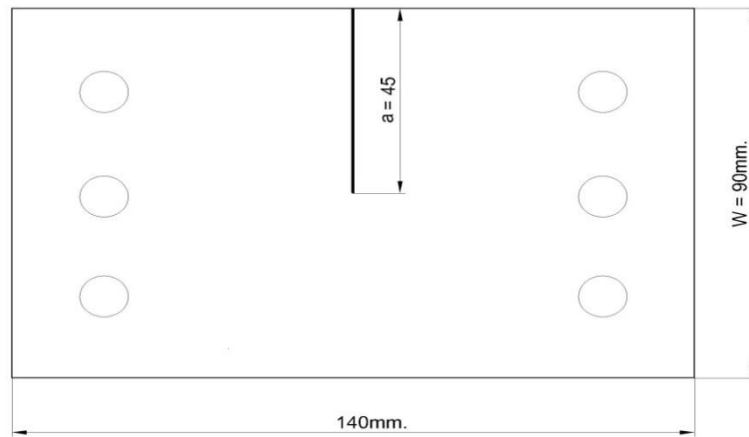
Kompozit plakalarımızın üretiminden sonra hem mekanik özellikler hem de kırılma tokluğu deney numuneleri için plaka kesilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Plaka kesim işlemi Uşak küçük sanayi sitesinde kesim işi yapan bir firmaya yaptırılmıştır. Mekanik özellikler ve kırılma tokluğu deneyleri için kullanılacak numune adeti, hesaplanması gereken parametre sayısı, tekrar sayısı, partikül boyut ve oranları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Bunun sonucunda kesimler oluşabilecek istenmeyen durumlarda göz önüne alınarak kesimi yaptırılmıştır. Beşinci bölümde numune sayıları ve boyutlarından bahsedilmiştir.

4.5.1. Mekanik Özellikler İçin Deney Numunelerinin Hazırlanması

Mekanik özellikler için ilgili testin ASTM standartları kullanılmıştır. Bu çerçevede standartlarda belirtilen ölçülerde numune kesilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için yedi adet parametremiz mevcuttur. Bu parametreler; fiber yönündeki elastisite modülü (E_1), fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2), fiber yönündeki maksimum çekme dayanımı (X_t), fibere dik yöndeki maksimum çekme dayanımı (Y_t), fibere 45° lik açı yönündeki kayma dayanımı (G_{12}), fiber yönündeki basma dayanımı (X_c) ve son olarak ta fibere dik yöndeki basma dayanımı (Y_c)'dır. Burada önemli bir nokta bizim jüt kumaşımız dokuma tipi olduğu için herhangi bir fiber yönü (lif) baskın değildir ve her tarafında hemen hemen eşit derecede fiber (lif) vardır. Burada Resim 4.4'te gösterilen $100*80$ cm boyutlarında kesilen jüt kumaşın uzun kenarı (100cm) x yönü, kısa kenarı (80cm) ise y yönü olarak belirlenmişti. x yönü fiber yönü y yönü ise fibere dik yön olarak kabul edilip deneyler, çözümler, yorumlar ve tüm numune kesim işlemleri buna göre yapılmıştır. Bütün parametreler için de beş adet farklı numune ölçümüz mevcuttur. Burada E_1 ile X_t değerleri için aynı numune ve E_2 ile Y_t değerleri için aynı numune ölçüleri kullanılmıştır. Bu standartlar ve numune ölçüleri beşinci bölümde detaylı bir şekilde anlatılmış ve Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

4.5.2. Kırılma Tokluğu için CTS Test Numunesinin Hazırlanması

Kırılma tokluğunun hesaplanabilmesi için compact tension shear (CTS) test numunesi kullanılmıştır. Tüm silisyum karbür oranları ve boyutları için ayrı ayrı farklı kırılma modlarında yapılan deneyler için tek tip standart numune kullanılmıştır (Şekil 4.1).

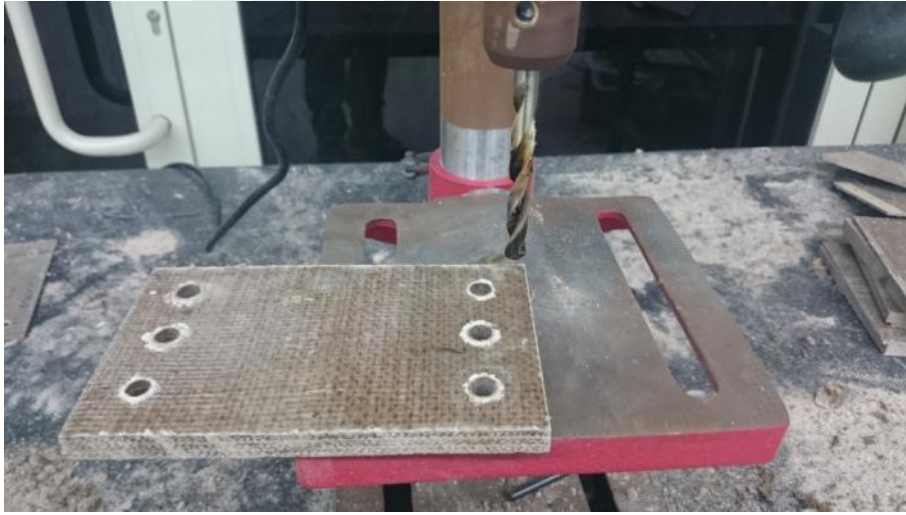


Şekil 4.1 Compact tension shear (CTS) test numunesi

The compact tension shear test specimen (CTS) numunesi Richard ve Benitz tarafından kırılma tokluğunun çeşitli yükleme modları (mod I, mod II, mod I-II) altında belirlenebilmesi için basit bir yöntem olarak ortaya konulmuştur [51].

Cts numunesin ölçülerinin literatür de değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Herhangi tam bir net değerlendirme olmayıp projeye, malzemeye ve numunenin aparatına göre değişik ölçülerde alınabilir. Burada önemli olan en boy ölçülerinden ziyade kırılma metalurjisinin hesaplanabilmesi için numune ortasından açılan çatlak boyutudur. Çatlak boyu, kompakt bir etki alanı oluşturmak için numune en (W) ölçüsünün yarısı (W/2) olarak tayin edilmiştir. CTS numunesinin ölçüleri 140*90mm ve çatlak uzunluğu 45mm'dir [24].

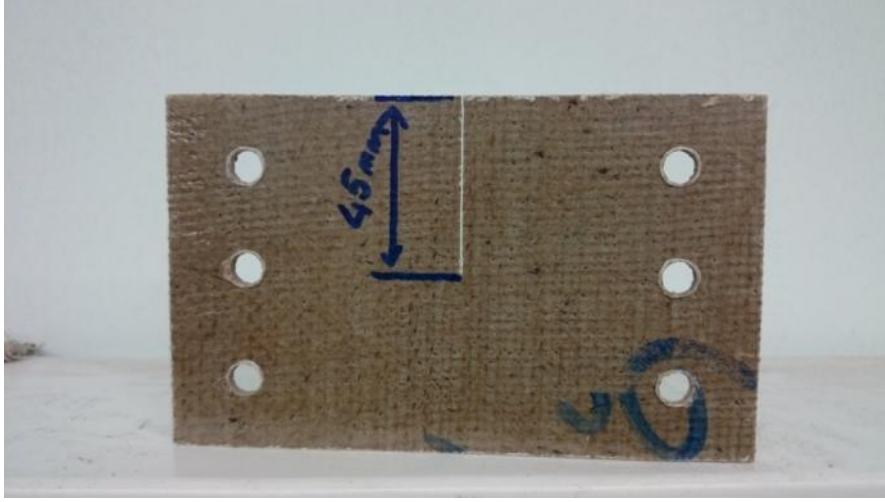
Bu ölçülerde plakalardan kesimi yapılan numunelere aparata net bir şekilde montajı için toplamda altı adet matkapla metrik sekiz delik açılmıştır (Resim 4.14).



Resim 4.14 CTS numunelere matkapta delik açılması

4.5.2.1. Cts Numunelerine Çatlak Açılması

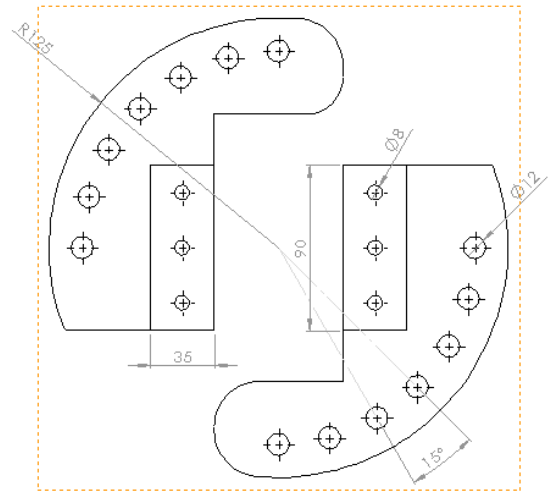
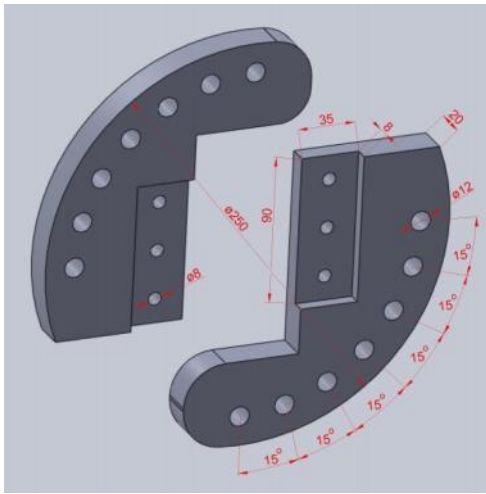
Kırılma tokluğunun hesaplanabilmesi için numune ortasından 45mm uzunluğunda numuneyi tam ortalayacak şekilde kılcal testere vasıtası ile çatlak açılmıştır (Resim 4.15). Buradaki önemli bir nokta çatlak uzunluğunun ölçüsüdür. Çünkü bu değer kırılma tokluğu denklemlerinde kullanılacaktır ve tüm numuneler için çok küçük sapmalarla 45mm değerini sağlamak zorundadır. Çatlak kalınlığının ise hesaplamalarımıza bir etkisi yoktur. Sadece numune mukavemetini düşürmeyecek şekilde olabilecek en ince ölçülerde açılmıştır.



Resim 4.15 Çatlak açılmış CTS numunesi

4.6. Arcan Test Aparatı

Silisyum karbür takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozitlerimizin kırılma tokluğu değerlerini belirlemek için beş farklı açıda (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) CTS numunelerinin çekme testine tabi tutulması gerekmektedir. CTS numunelerinin açılı bir şekilde teste tabi tutulması için bağlanacağı aparata genel olarak arcan test aparatı denilmektedir. Arcan test aparatı farklı ölçülerdeki CTS numuneleri için numuneye özel olarak tasarlanmalarına rağmen çalışma sistemleri hemen hemen aynıdır ve kırılma tokluğu tayininde bu aparatlar kullanılır. Arcan test aparatı solidworks programında tasarlanıp Uşak Coşkunlar Torna firmasına çelik malzemeden yaptırılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Solidworks programında tasarlanmış arcan test aparatının görünümü

CTS numunesinin arcan test aparatına montajı ise Resim 4.16'da gösterildiği gibidir.



Resim 4.16 Arcan test aparatına CTS numunesinin bağlanması

5. BÖLÜM DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Bu bölümde çalışmanın deneysel kısmı anlatılmıştır. Deneysel olarak ilk önce ASTM standartlarında hazırlanan kompozit numunelerin mekanik özellikleri Resim 5.1’de gösterilen, Uşak Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında bulunan üniversal çekme - basma cihazı (UTEST) vasıtasıyla belirlenmiştir. Bu mekanik özellikler; fiber yönü, fibere dik yön ve fibere 45° yöndeki numunelerin çekme ve basma testlerine tabi tutulması sonucu ortaya çıkan çekme - basma gerilme değerlerinin deneysel olarak kayma gerilme değerinin ise teorik olarak bulunmasıdır. Burada daha öncede bahsedildiği gibi fiber yönü, jüt kumaşların Resim 4.4’te gösterilen x yönündeki gerilmeler, fibere dik yön ise y yönündeki gerilmelerdir. x yönü ve y yönü hem kırılma enerjisi hesaplamalarında kullanılması hem de literatürle çelişki oluşturmaması için fiber yönü ve fibere dik yön olarak adlandırılmıştır. Tüm çözümler ve yorumlar buna göre yapılmıştır. Mekanik özelliklerin sayısal değer olarak belirlenmesinden sonra farklı boyutta ve farklı oranlarda silisyum karbür takviye edilerek üretilen CTS numunelerinin kırılma toklukları UTEST cihazı (Resim 5.1) kullanılarak belirlenmiştir. CTS numuneleri arcan test aparatına tek tek bağlanıp beş farklı açıda (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) çekme testine tabi tutulmuştur. Bu test sonuçlarından çıkan sayısal değerler ile mekanik özelliklerden belirlenen bazı parametreler birlikte bazı formülizasyon denklemler içerisinde kullanılarak kırılma toklukları nümerik olarak hesaplanmıştır.




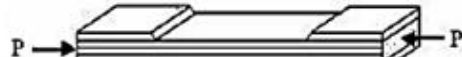



Resim 5.1 Üniversal çekme-basma test cihazı (UTEST)

5.2. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Farklı boyut ve farklı oranlarda silisyum karbür takviyeli jüt/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri için deneysel yöntemle hesaplanması gereken 7 farklı sonuç mevcuttur. Bu sonuçlar; E_1 , X_t , E_2 , Y_t , G_{12} , X_c ve Y_c değerleridir. Burada E_1 ve X_t fiber yönündeki değerler olup ASTM 3039-76 standartından, E_2 ve Y_t ise fibere dik yöndeki değerler olup ASTM 3039-76 standardından hesaplanmıştır. E_1 ve E_2 elastisite modülleri, X_t ve Y_t ise maksimum çekme dayanımlarıdır. G_{12} fibere 45° yönde çekiye maruz kalan kayma modülü olup ASTM 3519-76 standardı kullanılarak hesaplanmıştır. X_c fiber yönündeki, Y_c ise fibere dik yöndeki basma dayanımları olup ASTM 3410-87 standardı kullanılarak hesaplanmıştır. Tüm standartlar Çizelge 5.1’de gösterilmiştir [47, 77].

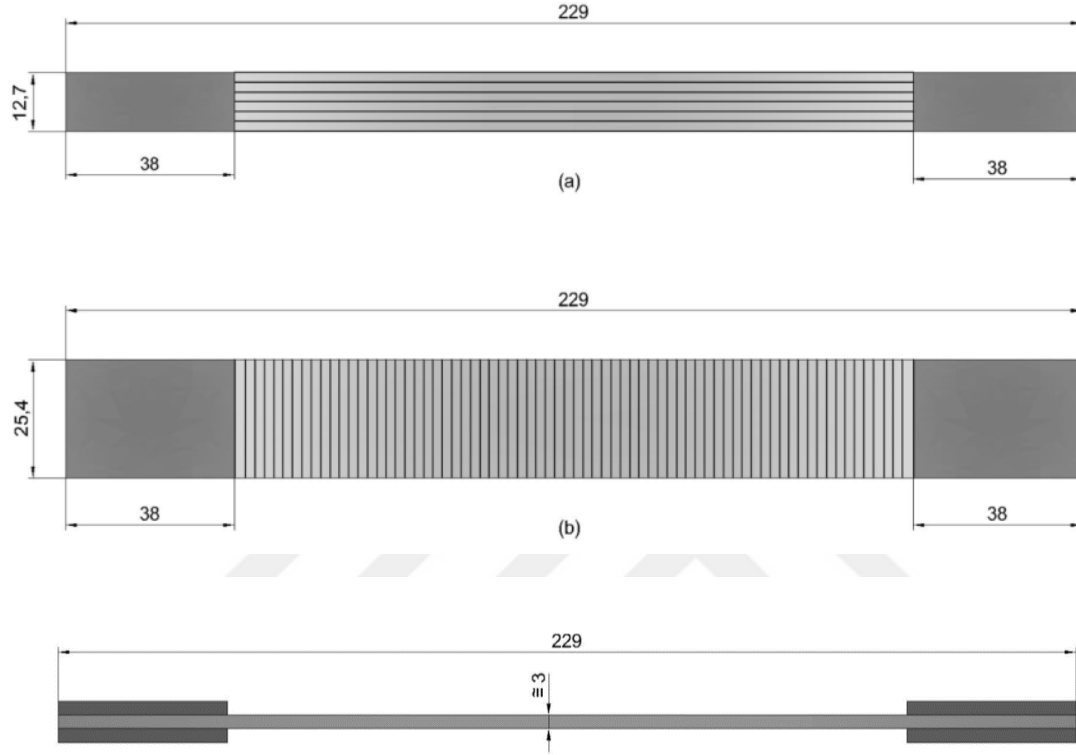
Çizelge 5.1 Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan ASTM standartları [47]

Mekanik Özellikler	Sembol	Geometri	Test Metodu
Fiber yönündeki elastisite modülü (MPa)	E_1		ASTM 3039-76
Poisson Oranı	ν_{12}		
Fiber yönündeki çekme dayanımı (MPa)	X_t		
Fibere dik yöndeki elastisite modülü (MPa)	E_2		ASTM 3039-76
Fibere dik yöndeki çekme dayanımı (MPa)	Y_t		
Kayma modülü (MPa)	G_{12}		ASTM 3519-76
Fiber yönündeki basma dayanımı (MPa)	X_c		ASTM 3410-87
Fibere dik yöndeki basma dayanımı (MPa)	Y_c		ASTM 3410-87

5.2.1. Çekme Dayanımının Belirlenmesi

Çekme deneyi ile E_1 , X_c , E_2 , Y_t ve G_{12} özellikleri belirlenmiştir. Burada E_1 , X_t , E_2 , Y_t için ASTM 3039-76 standardı kullanılmıştır. Şekil 5.1a’da belirtilen, 229mm uzunluğunda ve 12,7 genişliğinde kesilen numunelerden E_1 ve X_t değerleri, Şekil 5.1b’de belirtilen, 229mm

uzunluğunda ve 25,4mm genişliğinde hazırlanan numunelerden ise E_2 ve Y_t değerleri belirlenir. Burada numune et kalınlıkları her bir numune için değişken olup yaklaşık olarak 3mm +/- 0,2 değerleri civarında değişmektedir.



Şekil 5.1 ASTM 3039-76 standardından (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yöndeki çekme testi numune geometrileri

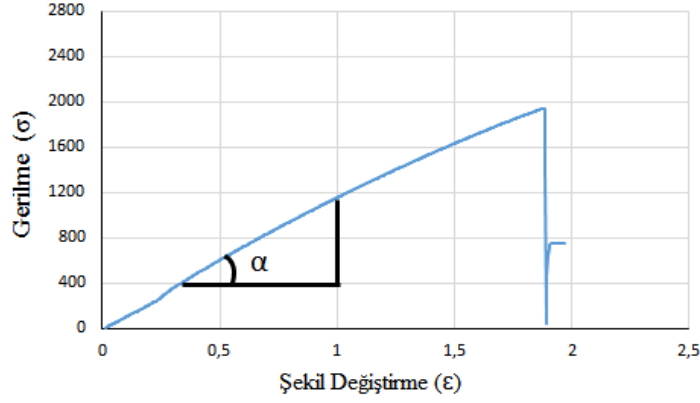
Tane boyutları $4,5\mu$, $9,3\mu$ ve 53μ olan silisyum karbür takviyeli numunelerden her biri için %0(sade), %3, %6, %9 oranlarında beş tekrarlı test olacak şekilde numune sayısı hesaplanıp ona göre üretim yapılmıştır. Tane boyutu $4,5\mu$ olan silisyum karbürden %3 oranında beş adet, %6 oranında beş adet ve %9 oranında beş adet olmak üzere toplam on beş adet numune üretilip teste tabi olmuştur. Aynı sayılar $9,3\mu$ ve 53μ boyut içinde geçerli olduğu için toplamda 45 adet silisyum karbürü numune teste tabi tutulmuştur. Burada %0(sade) olan numunede hiç silisyum karbür olmadığı için sadece beş adet numune teste tabi olmuştur. Sonuç olarak E_1 parametresi için elli adet E_2 parametresi için de elli adet olmak üzere toplamda yüz adet numune çekme deneyine tabi olmuştur.

Yukarıdaki ölçülerde hazırlanan yüz adet numune çekme dayanımlarının belirlenebilmesi için UTEST çekme – basma cihazında 1mm/dak. hızında numuneler kırılana kadar çekiye maruz bırakılmıştır. Bunun sonucunda maksimum çekme kuvveti ve şekil değiştirmeler belirlenmiştir. Numunelere her bir test yapılırken ekstansiyometre takılmıştır (Resim 5.2). Bunun amacı numunelerin çekme esnasında uzamalarını bilgisayara yansıtarak gerçek birim uzamayı bulmaktır.



Resim 5.2 Ekstansiyometrenin test numunesine bağlanması

Gerilme – şekil değiştirme grafiğinin eğimi (α) bize elastisite modülünü (E) verir (denklem 5.1). Deney sonunda bulunan kuvvet değerleri numune çekme yönündeki kesit alanına bölünerek gerilmeler hesaplanır ve ekstansiyometre vasıtası ile bilgisayardan okunan gerçek birim şekil değiştirme değerleri ile beraber kullanılarak gerilme – şekil değiştirme grafiği oluşturulur ve grafiğinin eğimi hesaplanarak E değerleri bulunur (Şekil 5.2).



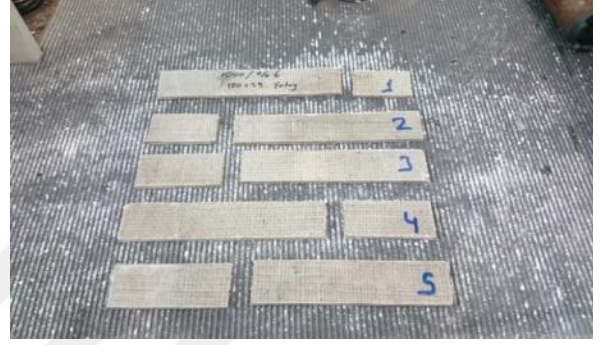
Şekil 5.2 Temsili gerilme - şekil değiştirme grafiği

$$\alpha = E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (5.1)$$

Oluşan grafiğin eğiminin (α) hesaplanmasıyla beraber E_1 ve E_2 değerleri bulunur. Bu işlem her bir seriden beş adet numune teste tabi tutulduğu için bu beş tekrarın ortalamaları alınarak E değerleri hesaplanmıştır.

X_t ile Y_t değerleri ise deney sonucu bulunan maksimum yüklerin numunenin çekme yönündeki kesit alanlarına bölünmesi sonucu elde edilen maksimum çekme dayanımlarıdır. Kesit alanı; numune et kalınlığı ile (3mm) en ölüsünün (X_t için 12,7mm ve Y_t için 25,4mm) arpımıdır. Her bir seriden beş adet numune teste tutulmuştur ve ortalamaları alınarak sonuçlar hesaplanmıştır.

Numuneler kırılına kadar yapılan deneyler sonunda oluşan numune görüntüleri ise Resim 5.3'te görüldüğü gibi olmuştur.

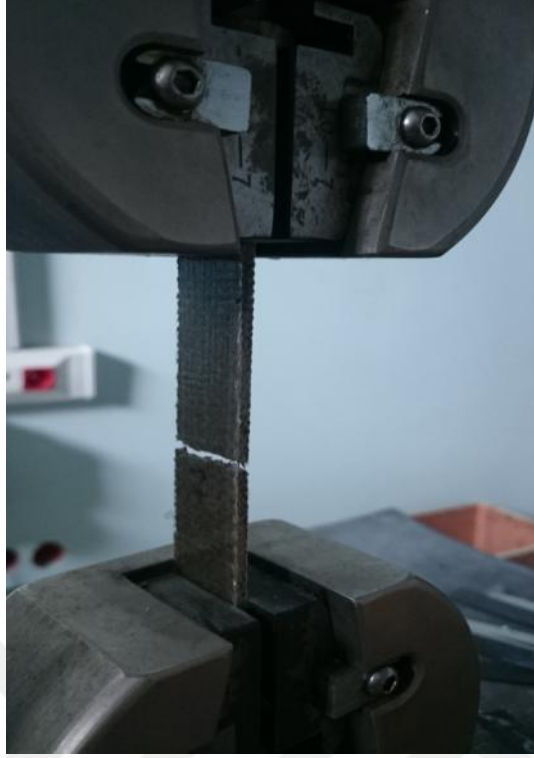


(a)

(b)

Resim 5.3 ASTM 3039-76 numunelerinden (a) fiber yönünde çekme testi yapılmış numuneler ve (b) fibere dik yönde çekme testi yapılmış numunelerin görüntüleri

Yukarıdaki Resim 5.3a'da görülen numuneler fiber yönünde çekmeye maruz kalmış numunelerdir. Resimlerde de görüldüğü üzere numuneler düz bir şekilde liflerin kopması sonucu kırılmıştır. Resim 5.3b'de görülen numuneler ise fibere dik yönde çekmeye maruz kalmış numunelerdir. Bunlarda düz bir şekilde numunenin değişik noktalarından kırılmışlardır. Genellikle numunenin orta noktasına yakın yerlerden kopmuşlardır.

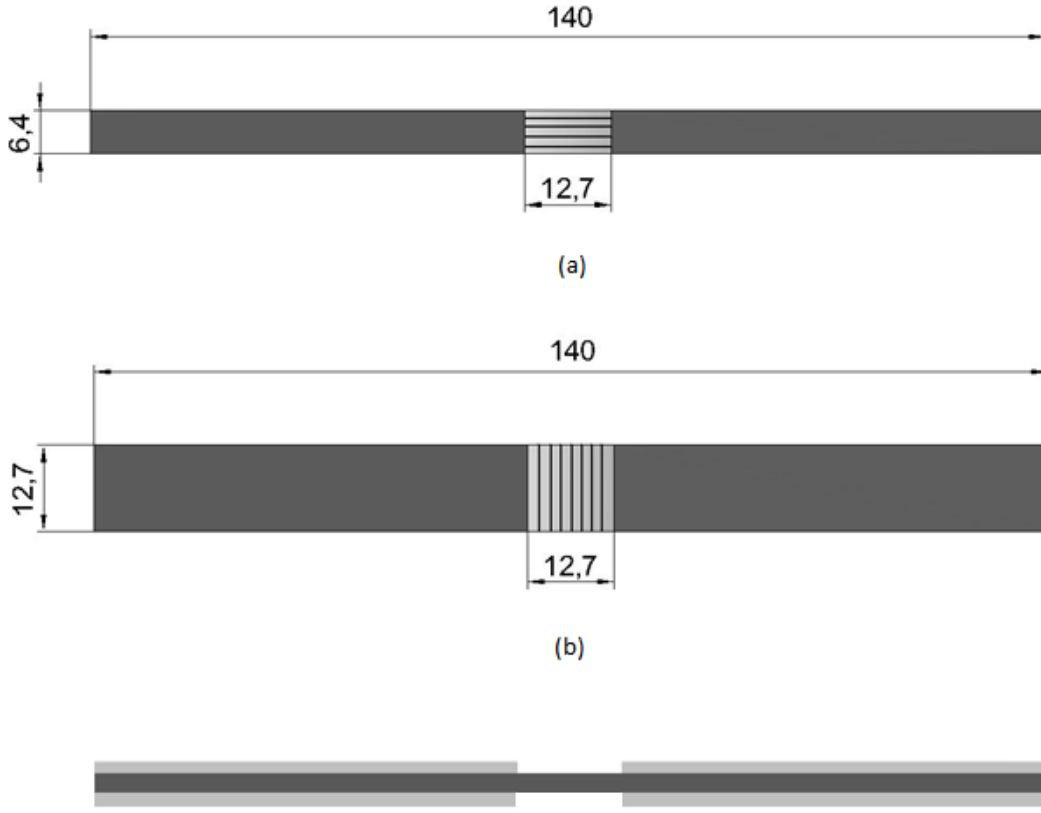


Resim 5.4 ASTM numunesinin test esnasındaki kırılması

Resim 5.4'te de deney esnasında kırılan numune görüntüsü görülmektedir. Resimde görülen numune fibere dik yönde çekmeye tabi tutulan numunedir.

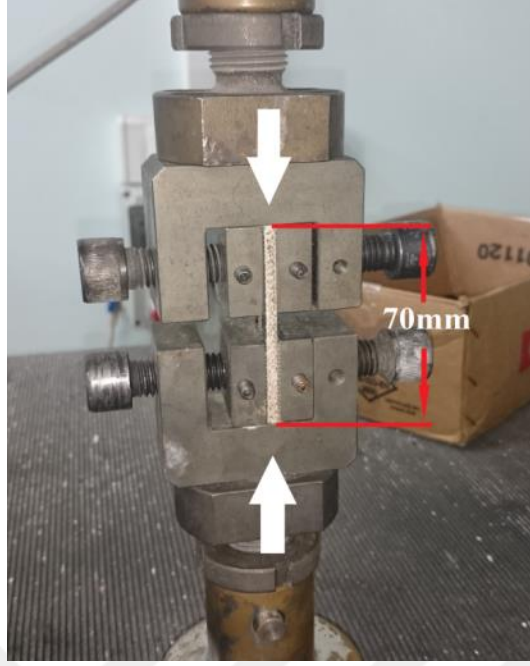
5.2.2. Basma Dayanımının Belirlenmesi

Basma deneyi ile fiber yönündeki X_c ile fibere dik yöndeki Y_c basma dayanımları ASTM 3410 – 87 standardına göre hesaplanmıştır. Fiber yönünde kesilen numune boyutları 140mm uzunluğunda ve 6,4mm genişliğindedir (Şekil 5.3a). Fibere dik yönde kesilen numune boyutları ise 140mm uzunluğunda 12,7mm genişliğindedir (Şekil 5.3b). Numune et kalınlığı ise 3 +/- 0,2mm civarındadır.



Şekil 5.3 ASTM 3410 - 87 standardından (a) fiber yönü ve (b) fibere dik yöndeki basma testi numune geometrileri

Basma deneylerinde numune boyları, çekme cihazımızın tutma çenelerinin geometrisinden dolayı sonuçların daha sağlıklı çıkması için 70mm uzunluğunda kesilmiştir. Basma deneylerinde numuneler 1mm/dak. hızında tamamen deformasyona uğrayana kadar basıya maruz bırakılmıştır (Resim 5.5).



Resim 5.5 Basma numunesinin test cihazına bağlanması

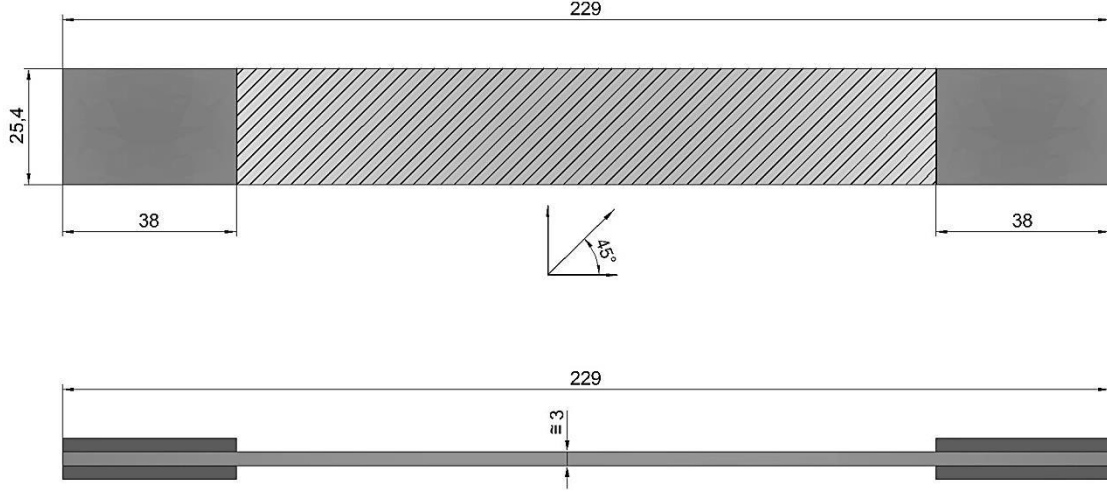
Deney sonuçlarından çıkan maksimum kuvvetlerin numune kesit alanlarına bölünmesiyle X_c ve Y_c dayanımları hesaplanmıştır. Her bir seri için beşer tekrarlı test yapılmış olup ortalamaları alınarak gerilmeler hesaplanmıştır ve toplamda yüz adet numune teste tabi olmuştur. Deneyler numuneler tamamen kırılana kadar yapılmış olup kırık ve hasarlı numune görüntüleri Resim 5.6'da gösterilmiştir.



Resim 5.6 ASTM 3410 – 87 standart numaralı basma numunelerinin deney sonrası hasar görüntüleri

5.2.3. Kayma Dayanımının Belirlenmesi

Kayma dayanımı (G_{12}) ASTM 3519 – 76 standardına göre fiber yönüne 45° lik açılarla kesilen numunelerin çekmeye tabi tutulması sonucu teorik olarak belirlenir. Burada G_{12} değeri için öncelikli olarak 229mm uzunluğunda 25,4mm genişliğinde kesilen numuneler (Şekil 5.4), 1mm/dak. hızında çekme testine tabi tutulmuştur.



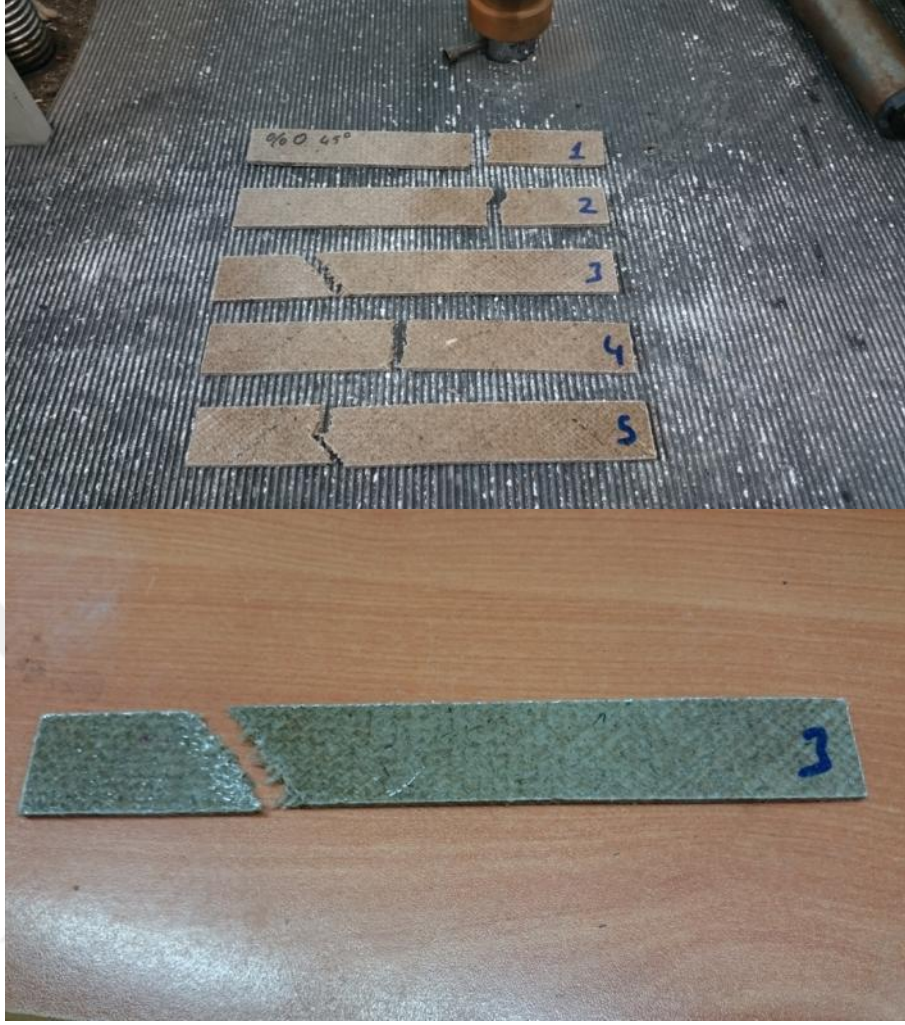
Şekil 5.4 Fiber yönüne 45° lik açıda çekme testi uygulanan kayma numunesinin geometrisi

Elastisite modülleri için E_1 ve E_2 'nin belirlenmesindeki uygulanan işlemlerin aynısı E_{45} değeri için de uygulanmış ve her bir serinin E_{45} değeri belirlenmiştir.

G_{12} değerinin hesaplanabilmesi için ise aşağıda verilen denklem (5.2) kullanılmıştır [77]. Bu denklemdeki değerlerden E_1 fiber yönündeki, E_2 fibere dik yöndeki, E_{45} fiberin 45° yönündeki elastisite modüllerini ifade etmektedir. ν_{12} ise poisson oranını ifade eder ve 0,30 olarak alınmıştır [72].

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1}} \quad (5.2)$$

Deney sonunda fiber yönüne 45° lik açılarla kesilen numunelerin hasara uğramış ve kırılmış görüntüleri Resim 5.7'de gösterilmiştir.



Resim 5.7 Fiber yönüne 45° lik açıda çekme testi uygulanan kayma gerilmesi numelerinin deney sonrası hasarlı görüntüleri

Resim 5.7’de de görüldüğü gibi fiber yönüne 45° lik açılarla kesilen numunelerin kırılmasında 45° lik açı şeklinde olmuştur. Bazı numelerde düze yakın olmasına rağmen tamamen düz değildir. Resimlerde de görüldüğü gibi tırtıklı bir kırılma yüzeyine sahiptir.

5.3. Kırılma Tokluğunun Belirlenmesi

Kırılma tokluğu deneylerimiz Uşak Üniversitesi Mekanik test laboratuvarında bulunan UTEST üniversal çekme cihazında ve Pull-Tech FRP firmasında bulunan 50kN kapasiteli üniversal çekme cihazında, 1mm/dak. hızında her bir seriden beşer tekrar ve beş farklı açıda olacak şekilde yapılmıştır. Toplamda üç farklı SiC boyutu (53 μ , 9,3 μ , 4,5 μ), dört farklı SiC oranı (%0, %3, %6, %9) ve beş farklı açı (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) olacak şekilde 250 adet

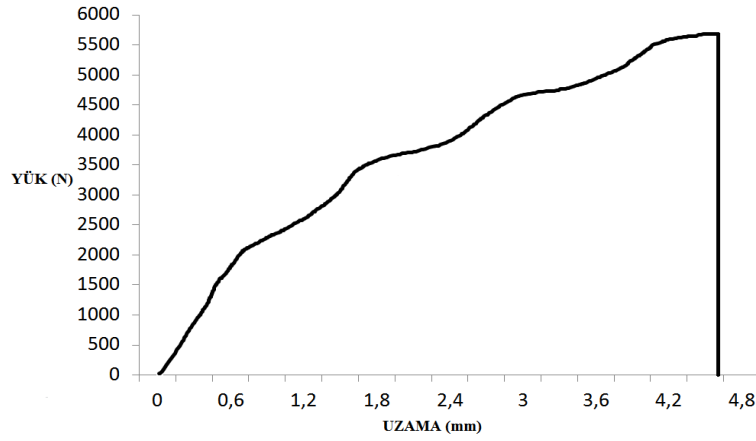
numune teste tabi tutulmuştur. Burada 250 adet numunenin 25 tanesi hiç silisyum karbür eklenmemiş numune (%0)'dir.

Kırılma tokluğu deneyleri yapılırken CTS numunesi arcan test aparatına altı noktadan somun civata bağlantısıyla monte edilmiştir. Her bir numune için bu işlem tekrarlanmıştır. CTS numunesinin arcan test aparatına montaj hali ve aparatın da çekme cihazına bağlanmış hali Resim 5.8'de gösterilmiştir.



Resim 5.8 CTS numunesinin arcan test aparatına olan bağlantısı

Her bir numuneye beş farklı açıda, sağlıklı sonuç elde edebilmek adına beş tekrardan oluşan çekme testi uygulanmıştır. CTS numunesi kırılana kadar numuneye kuvvet uygulanmış ve maksimum kuvvetler, beş tekrarın ortalaması alınarak deney vasıtasıyla bulunmuştur. Deney sonucu bulunan kuvvetler Şekil 5.5'te gösterilen tipik uzama – yük diyagramı oluşturularak grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Tipik uzama(mm) – yük(N) diyagramı

Kırılma tokluğu hesabında mod I, mod II ve mod I-II değerleri CTS numunesinin hangi açıda çekiye maruz kaldığına göre hesaplanır. Burada mod I açılma modu olup numunenin 0° de çekiye maruz kalmasıdır. Mod II kayma modu olup numunenin 90° de çekmeye maruz kalmasıdır. Aradaki 30° , 45° , 60° deki çekiye maruz kalmalar ise mod I-II dir. Mod I için K_I , mod II için K_{II} , mod I-II için ise $K_{I/II}$ kırılma tokluğu değerleridir. Çalışmanın üçüncü bölümünde anlatılan kırılma mekaniği bölümünde aşağıda verilen temel kırılma denklemi (5.3) gösterilmiştir. Bu temel denklemden yola çıkarak türetilen formüllere göre ve deneylerden elde edilen maksimum kuvvetlerinde formül içerisinde kullanılmasıyla numunelerin kırılma değerleri hesaplanır.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f \left(\frac{a}{w} \right) \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklem (5.3)'te belirtilen $f \left(\frac{a}{w} \right)$ değeri yerine Y_1 ve Y_2 değerleri yazılarak aşağıdaki denklem (5.4 ve 5.5) yazılmıştır. Burada σ_y mod I için gerilme değeri, τ_{xy} ise mod II için gerilme değeridir. Mod I-II için kırılma denklemi ise K_I ve K_{II} 'nin kareleri toplamının karekökü şeklinde (denklem 5.6) ifade edilir [59].

$$K_I = Y_1 \sigma_y \sqrt{\pi a} \quad (5.4)$$

$$K_{II} = Y_2 \tau_{xy} \sqrt{\pi a} \quad (5.5)$$

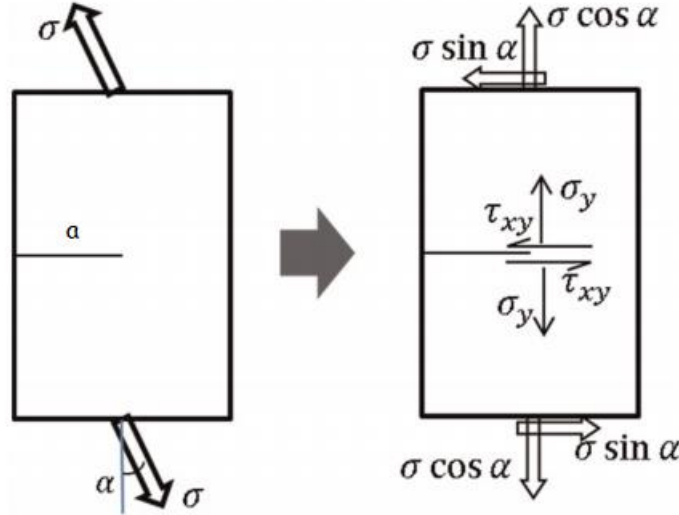
$$K_{I/III} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (5.6)$$

Denklem (5.4 ve 5.5)'te gösterilen normal gerilme bileşeni olan σ_y ve kayma bileşeni olan τ_{xy} ise denklem (5.7 ve 5.8)'e göre bulunur.

$$\sigma_y = \sigma \cos \alpha \quad (5.7)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sin \alpha \quad (5.8)$$

Yukarıdaki denklemlerde verilen σ_y ve τ_{xy} bileşenlerinin yönleri CTS numunesi üzerinde Şekil 5.6'da gösterilmiştir [49].



Şekil 5.6 CTS numunesi üzerinde (σ_y) ve (τ_{xy}) bileşenlerinin gösterimi

Burada α değeri numuneyi çekme açısı, σ değeri ise kuvvetin kesit alanına bölümü ile elde edilen çekme yönündeki gerilmedir.

Denklem (5.4 ve 5.5)'te belirtilen Y_1 ve Y_2 değerleri ise boyutsuz geometrik bileşenler olup numune genişliğine (w) ve çatlak uzunluğuna (a) bağlıdır ve denklem (5.9 ve 5.10)'a göre hesaplanır [59].

$$Y_1 = \frac{1}{1 - \frac{a}{w}} \sqrt{\frac{0,26 + 2,65 \left(\frac{a}{w-a}\right)}{1 + 0,55 \left(\frac{a}{w-a}\right) - 0,08 \left(\frac{a}{w-a}\right)^2}} \quad (5.9)$$

$$Y_2 = \frac{1}{1 - \frac{a}{w}} \sqrt{\frac{-0,23 + 1,4 \left(\frac{a}{w-a}\right)}{1 - 0,67 \left(\frac{a}{w-a}\right) + 2,08 \left(\frac{a}{w-a}\right)^2}} \quad (5.10)$$

Yukarıdaki denklemlerden yola çıkarak kırılma değerleri olan K_I ve K_{II} , denklem (5.11 ve 5.12)'de gösterildiği gibi yazılır [59].

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{wt} \times \frac{\cos \alpha}{1 - \frac{a}{w}} \sqrt{\frac{0,26 + 2,65 \left(\frac{a}{w-a}\right)}{1 + 0,55 \left(\frac{a}{w-a}\right) - 0,08 \left(\frac{a}{w-a}\right)^2}} \quad (5.11)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{wt} \times \frac{\sin \alpha}{1 - \frac{a}{w}} \sqrt{\frac{-0,23 + 1,4 \left(\frac{a}{w-a}\right)}{1 - 0,67 \left(\frac{a}{w-a}\right) + 2,08 \left(\frac{a}{w-a}\right)^2}} \quad (5.12)$$

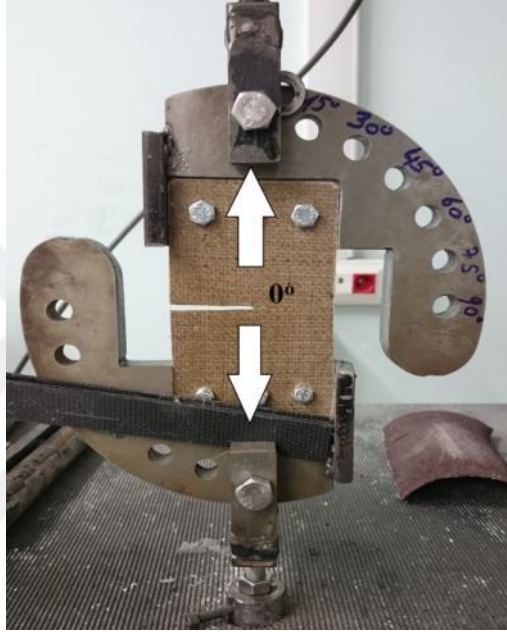
Denklemlerde kullanılan t , w ve a değerleri CTS numunesinden okunan kalınlık, genişlik ve çatlak uzunluğudur. (P) değeri ise deneysel olarak elde edilen maksimum kuvvettir. α değeri ise daha önceden de belirtildiği gibi numune çekme açısıdır.

Beş farklı açıda yapılan kırılma deneyleri için özellikle mixed mod deneylerinde (30° , 45° ve 60°) hem x yönünde hem y yönünde olmak üzere iki yönlü bir gerilme olduğu için bunun sonucunda bulunan kırılma tokluğu değeri $K_{I/II}$ olarak belirtilmiştir ve bu denklem (5.6)'da da gösterildiği gibi K_I ile K_{II} nin karesinin karekökü ile ifade edilmiştir. X yönündeki kuvvet değeri sonucu, hangi açıda deney yapılıyorsa o açı değeri denklemde yerine yazılarak o açı değerinin (K_I)'i bulunur. Bu K_I değeri mod I deki (0°) K_I ile karıştırılmamalıdır. Aynı işlemler y yönündeki kuvvet için de geçerli olup burada da kullanılan K_{II} değeri mod II deki (90°) K_{II} ile karıştırılmamalıdır. Burada hangi açı değerinde deney yapılıyorsa (30° , 45° ve 60°) denklemde o açı değeri girilerek K_I ve K_{II} değerleri bulunur. Sonuç olarak tüm açı değerlerinde yapılan deneyler sonucu x yönündeki gerilmelerde hesaplanan kırılma tokluğu

değerleri K_I , y yönündeki gerilmeler sonucu bulunan kırılma tokluğu değerleri K_{II} olarak adlandırılır.

5.3.1. Mod I Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması

K_I kırılma tokluğunun hesabı için numuneler 0° de Resim 5.9’da gösterildiği gibi deneye tabi tutulmuştur. Her biri farklı boyut ve farklı oranlarda silisyum karbür takviyeli numuneler ve katkısız numunelere beş tekrar olacak şekilde deneyler yapılmıştır.

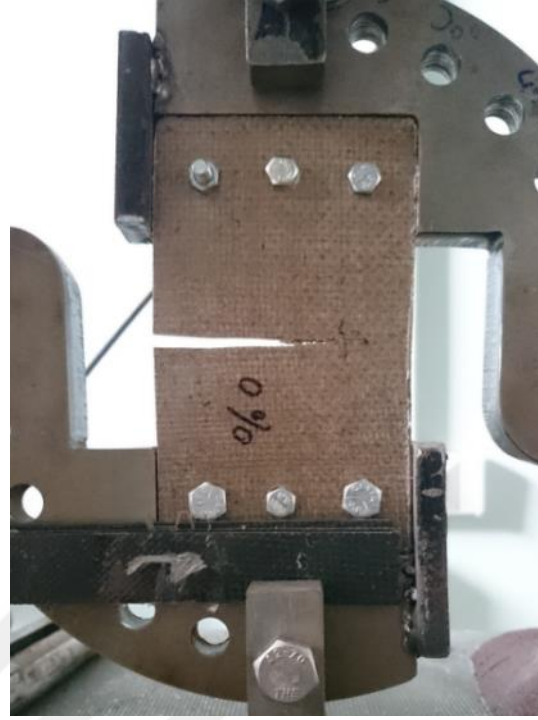


Resim 5.9 CTS numunesinin mod I durumundaki (0°) testi

Numune 0° de açılma durumundadır ve bu durum mod I olarak adlandırılmaktadır. Deneysel olarak bulunan P_{max} kuvvetleri denklem (5.11)’de kullanılarak K_I değerleri hesaplanmıştır.



(a)



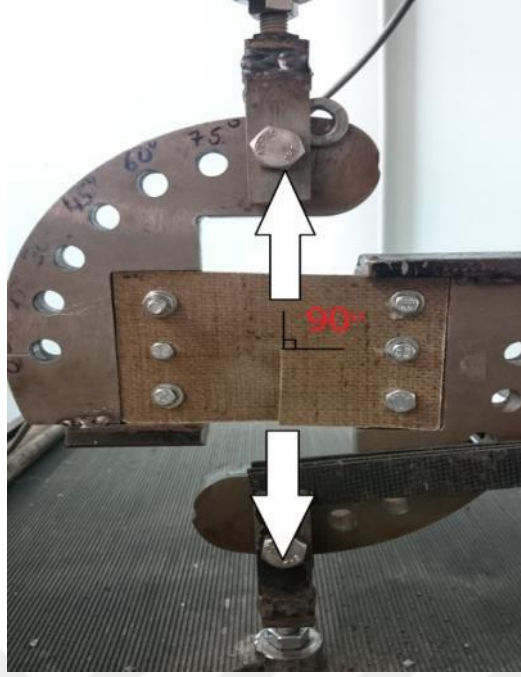
(b)

Resim 5.10 Mod I durumundaki deney esnasında numunede oluşan hasar şekli

Resim 5.10'a göre numune mod I durumunda açılma modundadır ve çatlak uç noktadan açılmaya başlamıştır. Daha sonra ise numune maksimum taşıyabileceği yük değerine ulaştığında kırılmıştır.

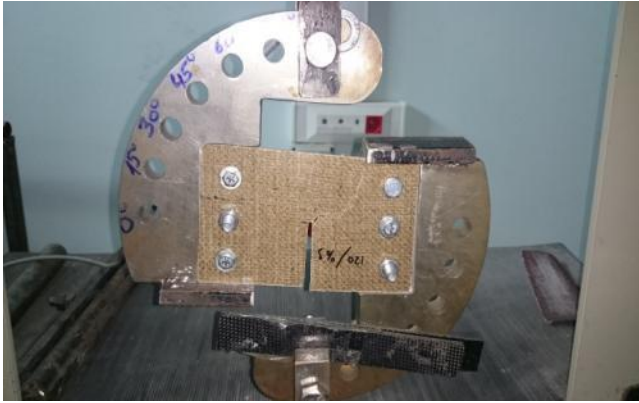
5.3.2. Mod II Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması

K_{II} kırılma tokluğunun hesabı için numuneler 90° 'de Resim 5.11'de gösterildiği gibi deneye tabi tutulmuştur. Her bir farklı boyut ve farklı oranlarda silisyum karbür takviyeli numuneler ve katkısız numuneler beş tekrar olacak şekilde deneyler yapılmıştır.

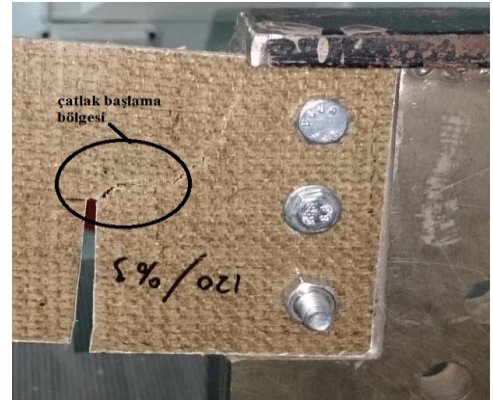


Resim 5.11 CTS numunesinin mod II durumundaki (90°) testi

Numune 90° de kayma modundadır ve bu durum mod II olarak adlandırılmaktadır. Mod II modunda K_{II} değeri hesaplanır ve bunun için deneysel yolla bulunan P_{max} kuvvetleri kullanılmaktadır. Bu P_{max} maksimum kırılma kuvveti değerleri ile denklem (5.12) kullanılarak K_{II} kırılma tokluğu değerleri hesaplanmıştır.



(a)



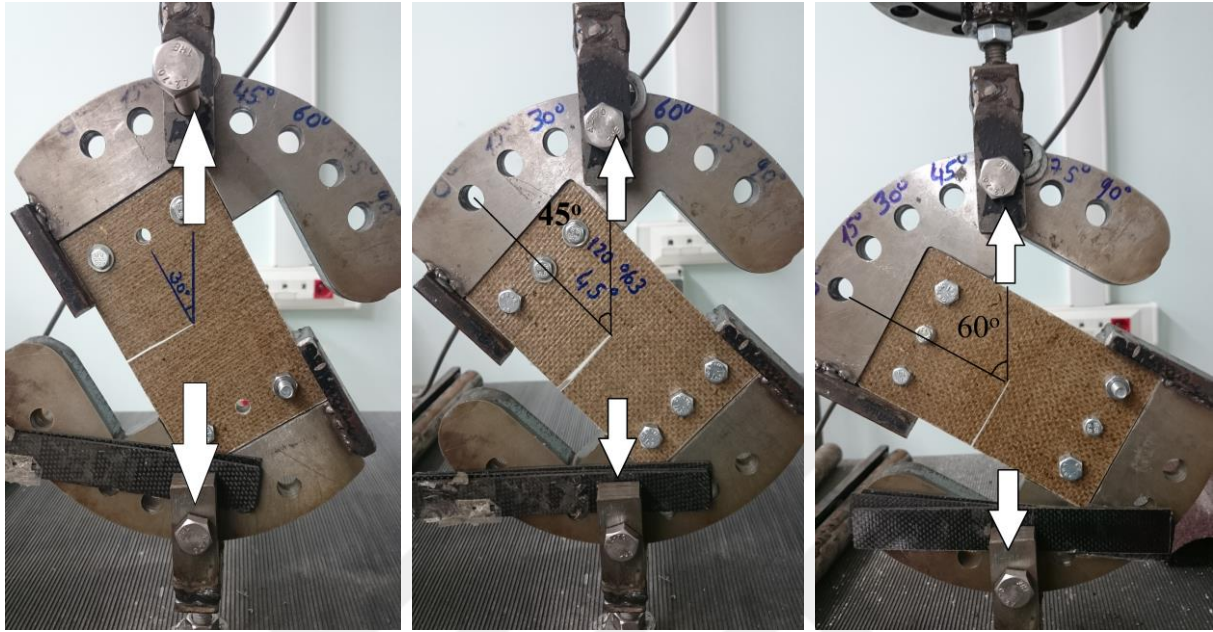
(b)

Resim 5.12 Mod II durumundaki deney esnasında numunede oluşan hasar şekli

5.3.3. Mix Mod (Mod I-II) Kırılma Tokluğu Deneylerinin Yapılması

Mod I-II kırılma tokluğunun hesabı için numuneler 30° (Resim 5.13a), 45° (Resim 5.13b) ve 60° (Resim 5.13c)'de gösterildiği gibi deneye tabi tutulmuştur. Her bir farklı boyut ve farklı

oranlarda silisyum karbür takviyeli numuneler ve katkısız numuneler beş tekrar olacak şekilde üç farklı açı değeri içinde deneyler yapılmıştır.



(a)

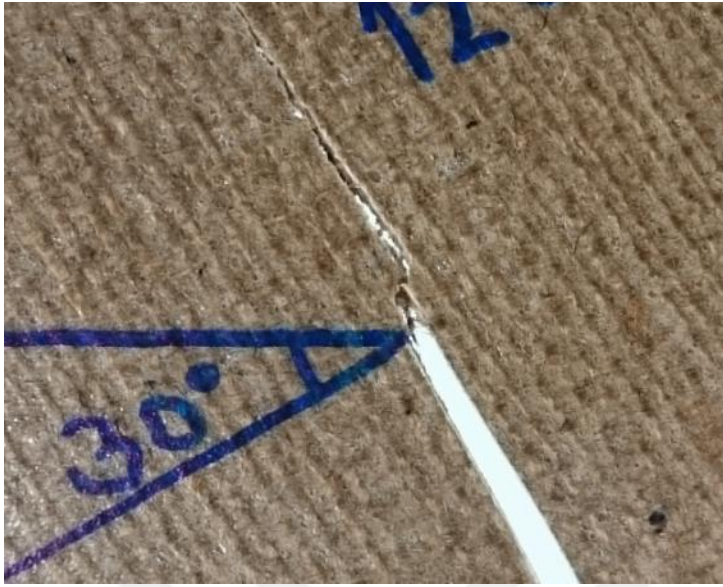
(b)

(c)

Resim 5.13 CTS numunelerinin (a) 30° (b) 45° (c) 60° deki mod I-II kırılma tokluğu deneyleri

CTS numunesinin açılı şekilde çekme testine tabi tutularak $K_{I/II}$ değerinin bulunması mix mod olarak adlandırılmaktadır. Burada bütün seriler için (farklı oran ve farklı boyutlarda SiC taviyeli numuneler ile takviyesiz numune) numuneler üç farklı açıda kırılana kadar teste tabi tutulmuş ve deneysel olarak P_{max} kuvvetleri bulunmuştur. Bulunan bu P_{max} kuvvetleri hem denklem (5.11)'de hem de denklem (5.12)'de kullanılarak 30°, 45° ve 60° lerdeki çekme deneyleri için K_I ve K_{II} değerleri bulunmuştur. Bu denklemlerde α yerine o anki deney açısı değeri yazılmıştır. K_I ve K_{II} bulunduktan sonra denklem (5.6) kullanılarak $K_{I/II}$ kırılma tokluğu değerleri üç farklı açı değeri için de ayrı ayrı hesaplanmıştır.

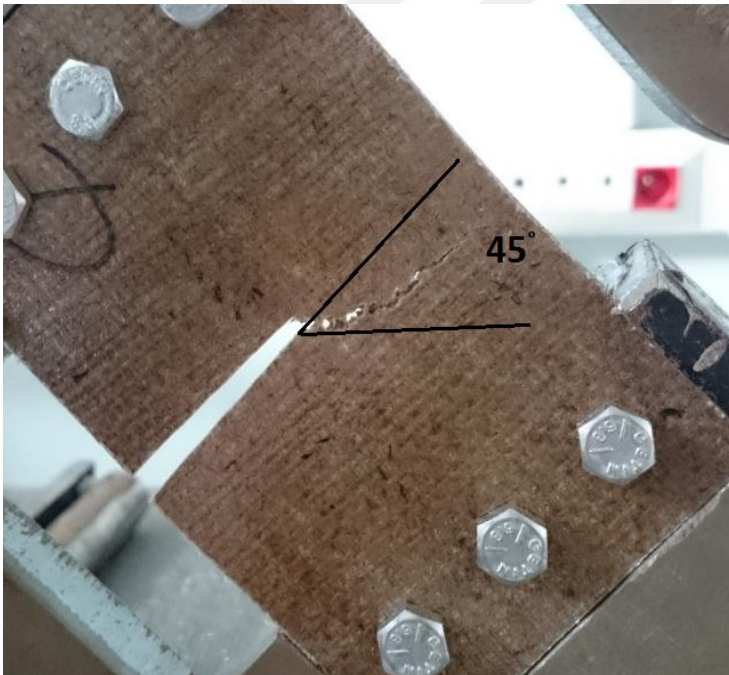
Tüm modlar için yapılan deneylerden sonra CTS numunelerin hasara uğramış ve kırılmış resimleri tüm açı değerleri (30°, 45° ve 60°) için Resim 5.13'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Resim 5.14 Mod I–II kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan (a) ve (b) 30° için (c) ve (d) 45° için (e) ve (f) 60° için CTS hasarlı numune görüntüleri

Resim 5.14a ve b’de belirtilen resimler 30° de çekmeye maruz kalan CTS numunesinin deney esnasında çekilmiş görüntüleridir. Resimlerde görüldüğü üzere çatlak ilerlemesi çatlığa çok az açı yaparak ilerlemiş ve hemen hemen 30° açı yapacak şekilde kırılmaya maruz kalmıştır. Resim 5.14c ve d’de belirtilen resimler 45° de çekmeye maruz kalan CTS numunesinin deney esnasında çekilmiş görüntüleridir. Burada ise çatlak ilerlemesi ana çatlığa yaklaşık olarak 45° açı yapacak şekilde ilerlemiş ve kırılmıştır. Resim 5.14e ve f’de ise 60° de çekmeye tabi olan CTS numunelerinin deney esnasındaki görüntüleridir. Burada da çatlak ana çatlığa yaklaşık olarak 60° açı yaparak ilerlemiş ve sonunda kırılmıştır.

5.4. Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi

Kırılma enerjisi ile ilgili teorik bilgiler üçüncü bölümde anlatılmıştı. Buradan yola çıkarak kırılma toklukları hesaplandıktan sonra numunelerin kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Bunun için ise yine temel denklemden yola çıkarak türetilmiş enerji denklemleri kullanılmıştır.

Enerji değerleri için mekanik özelliklerden bulduğumuz değerlerle kırılma tokluğu deneylerinden hesaplanan değerler birlikte kullanılarak numunelerin kırılma enerji değerleri

hesaplanmıştır. Burada numunelerin tüm açı değerleri için (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) hesaplanan K (kırılma tokluğu) parametrelerinin paralelinde G (enerji) değerleri hesaplanmıştır.

Düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme olarak iki tane enerji denkleminde daha önce bahsedilmiştir. Bu proje kapsamında kullanılan numuneler ince bir levha halinde oldukları için sadece x ve y yönünde gerilme olup z yönünde gerilme hali söz konusu değildir. Bu yüzden düzlem gerilme yönünden değerlendirilip düzlem gerilme denklemleri kullanılmıştır. Bununla alakalı teorik bilgilerden yine üçüncü bölümde bahsedilmiştir. Enerji (G) denklemi olarak iki tane denkleminiz vardı (denklem 3.18 ve 3.19). Düzlem gerilme hali söz konusu olduğu için ve ortotropik malzeme oldukları için enerji (G) değerleri hesabında denklem (3.18) kullanılmıştır ve aşağıdaki denklem (5.13)'de yeniden gösterilmiştir.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \quad (5.13)$$

Birçok kompozit malzemenin katman ayrılması yüzünden çatlak büyümeleri benzerdir ve bu etken (G) değerinin mod I ve mod II ye bölünmesine neden olur. Ortotropik yöne paralel çatlak çizgisine sahip ortotropik materyaller için enerji boşalma oranları (G), fiber yönüne denk gelir ve aşağıda gösterilen mod I (denklem 5.14) ve mod II (denklem 5.15) durumları için hesaplanabilir. Eğer çatlak düzlemi, tabaka içi problemlerinde minimum çatlama direncinin yönü ile çakışırsa, çatlak yayılımının yönü orijinal çatlakla aynı çizgide veya doğrultuda olmuş olur ve mod I ile mod II nin bileşkesi olarak yani mod I-II olarak ifade edilir. Enerjisi (G) ise bu iki modun toplamı olarak denklem (5.16)'daki gibi gösterilmektedir [43].

$$G_I = \frac{K_I^2}{E_I} \quad (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \quad (5.14)$$

$$G_{II} = \frac{K_{II}^2}{E_{II}} \quad (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \quad (5.15)$$

$$G_T = G_I + G_{II} \quad (5.16)$$

Bu denklemlerde K_I ve K_{II} değeri daha önce hesaplanmış her açı değeri için bulunan kırılma tokluğu değerleridir. E_I ve E_{II} ise efektif modüller olup ortotropik malzemelerde aşağıdaki

denklem (5.17) ve denklem (5.18)'deki gibi hesaplanmaktadır. Eğer çatlak düzlemi, interlaminer problemlerde minimum çatlak direncinin yönüne denk geliyorsa, çatlak ilerlemesinin yönü orijinal çatlak ile eşgüdümlüdür ve hesaplanan enerji değerleri fiziksel olarak anlamlı olur. Burada numunelerin ortotropik lineer elastik materyal olduğu ve efektif modüllerinde E_I ve E_{II} olarak tanımlandığı varsayılmaktadır [43].

$$E_I = \sqrt{\frac{2}{a_{11}a_{22}}} \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}} + \frac{2a_{12}+a_{66}}{2a_{11}}}}} \quad (5.17)$$

$$E_{II} = \sqrt{\frac{2}{a_{11}a_{22}}} \frac{1}{\sqrt{\sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}} + \frac{2a_{12}+a_{66}}{2a_{11}}}}} \quad (5.18)$$

Burada a değerleri ortotropik uyum matrisinin sıfır olmayan girdi değerleridir. Denklem (5.19)'da belirtilen mühendislik elastik sabitleriyle tanımlanır [43].

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{E_x}, & a_{22} &= \frac{1}{E_y}, & a_{33} &= \frac{1}{E_z}, & a_{44} &= \frac{1}{G_{yz}}, \\ a_{55} &= \frac{1}{G_{xz}}, & a_{66} &= \frac{1}{G_{xy}}, & a_{12} &= a_{21} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} = -\frac{\nu_{yx}}{E_y}, \\ a_{13} &= a_{31} = -\frac{\nu_{xz}}{E_x} = -\frac{\nu_{zx}}{E_z}, & a_{23} &= a_{32} = -\frac{\nu_{yz}}{E_y} = -\frac{\nu_{zy}}{E_z} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Yukarıdaki denklemlerde E_x malzemenin x yönündeki (fiber yönünde) elastisite modülü, E_y y yönündeki (fibere dik yönde) elastisite modülü, ν_{xy} poisson oranı, G_{xy} ise kayma gerilmesidir. Burada $E_x = E_1$, $E_y = E_2$ ve $G_{xy} = G_{12}$ 'dir. Bu değerler mekanik özelliklerin belirlenmesi başlığında daha önceden değerleri hesaplanmıştı.

Numunelerimiz ince bir levha gibi oldukları için kalınlık yönünde kuvvet yoktu ve sadece düzlem gerilme söz konusu idi. Bu yüzden z yönündeki tüm değerler sıfırdır ve denklem (5.20)'de gösterilmiştir.

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$$
$$\varepsilon_z = 0$$
(5.20)

Daha önce mekanik özellikler ve kırılma tokluğu değerleri belirlenen numunelerin enerji değerlerini belirlemek için ilk olarak yukarıdaki denklemler (5.17) ve (5.18)'den hesaplanan efektif modüller (E_I ve E_{II}) bulunmuştur. Efektif modülleri hesaplarken daha önceden belirlenmiş E_1 , E_2 , G_{12} ve ν_{xy} parametreleri kullanılmıştır. Bulunan efektif modüller daha önceden her açı değeri için bulunmuş K_I ve K_{II} kırılma tokluğu değerleri ile beraber denklemler (5.14, 5.15 ve 5.16) kullanılarak tüm modların kırılma enerjisi değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin hepsine, daha iyi anlaşılabilmesi ve yorumlanabilmesi için altıncı bölümde yer verilmiştir.

6. BÖLÜM KIRILMA TOKLUĞUNUN J-İNTEGRAL METODU İLE BELİRLENMESİ

6.1. Giriş

Bu bölümde jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma toklukları nümerik olarak Ansys 12.1 sonlu elemanlar programı kullanılarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yönteminde kırılma tokluğu belirlemek için J-integral metodu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda SiC takviyeli ve takviyesiz olarak üzere toplanmış 10 farklı numunenin 5 farklı açıdaki (farklı modlardaki) kırılma davranışları belirlenmiştir. Bu bölümde deneysel olarak belirlenmeyen açılardaki kırılma tokluğu değerleri sonlu elemanlar analizi ile sadece takviyesiz jüt/epoksi tabakalı kompozitin davranışları belirlenmiştir. Nümerik model oluşturulurken Bölüm 5'te deneysel olarak belirlenen mekanik dayanım değerleri kullanılmıştır. Sonlu elemanlar modelini oluşturmak için kullanılan mekanik dayanım değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modelinden elde edilen kırılma tokluğu değeri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve gerçeğe en az hata ile sonuç veren model kullanılarak deneysel olarak test edilmeyen açılardaki kırılma tokluğu değeri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1 Kompozit numunelerin mekanik özellikleri

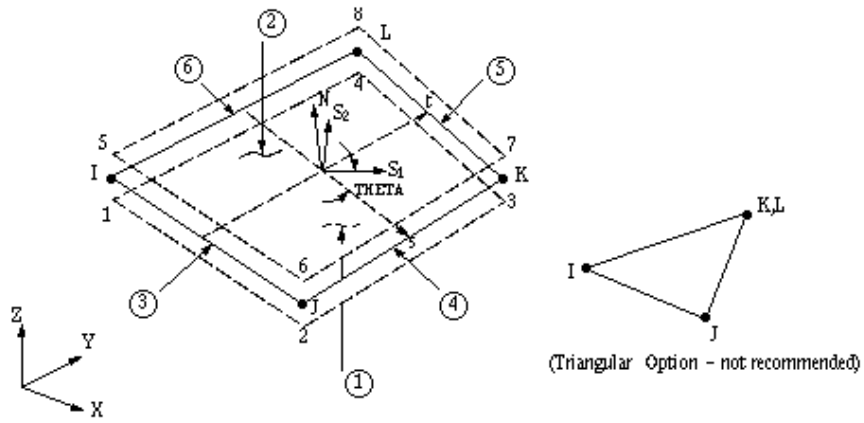
E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	G_{12} (MPa)	$G_{13}=G_{23}$ (MPa)	ν_{12}	$\nu_{13} = \nu_{23}$
5083	4969	2981	939	563	0,3	0,2

Burada E_3 , G_{13} , G_{23} , ν_{12} , ν_{13} ve ν_{23} değerleri deneysel olarak belirlenememiştir, ν_{12} , 1-2 düzlemindeki Poisson's oranı olup literatürdeki çalışmalara bakılarak 0,3 olarak kabul edilmiştir. E_3 , G_{13} , G_{23} , ν_{13} ve ν_{23} değerleri ise denklem (6.1-6.3)'e göre teorik olarak hesaplanmıştır [37, 63].

$$E_3 = 0,6 E_2 \quad (6.1)$$

$$G_{13} = G_{23} = 0,6 G_{12} \quad (6.2)$$

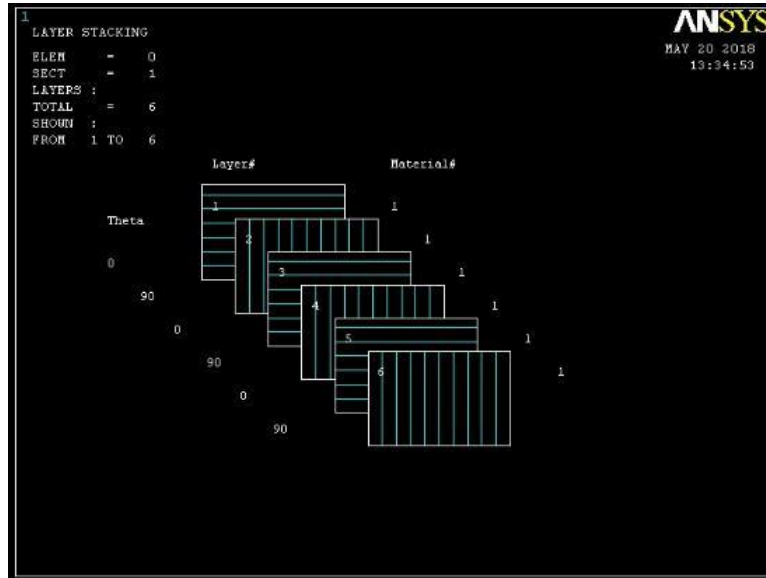
$$\nu_{13} = \nu_{23} = 0,6 \nu_{12} \quad (6.3)$$



Şekil 6.2 Shell 181 eleman tipi [95]

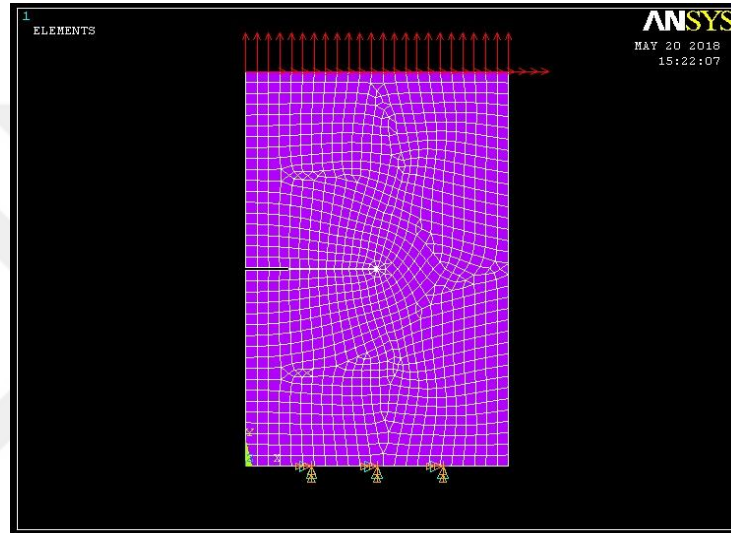
Eleman tipi belirlendikten sonra 2 boyutlu modele 6 tabakalı jüt/epoksi tabakalı kompozitin Çizelge 6.1’de gösterilen mekanik değerlerin ataması yapıldı. Fiber takviyeli tabakalı kompozitler ortotropik malzeme özelliklerine sahip olduğu için malzeme modeli lineer elastik davranış gösteren ortotropik malzeme özellikleri tanımlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan 6 tabakalı kompozitin modellenmesi için yüzey elemana sahip geometrik modele tabaka kalınlığı ve fiber yönlenmesi gibi deneysel parametreler aktarıldı. Jüt kumaş düz dokumaya sahip olduğundan dolayı $[0/90]_3$ tabaka dizilimi ve kalınlığı 3mm olduğu için her bir tabakaya 0,5mm lik kalınlık değeri tanımlanmıştır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Geometrik modele ait fiber yönlenmesi ve tabaka dizilimi

Geometrik model hazırlama, malzeme özellik tanımlama ve tabakalı kompozite ait parametreler tanımlandıktan sonra, geometrik modele mesh işlemi uygulandı. Mesh işlemi ile çatlak etrafında üçgen diğer bölgelerde karesel (Qadratic) olmak üzere geometrik model elemanlara ayrılmıştır. Ardından test şartlarına ait sınır şartları tanımlanmıştır. Kırılma testlerinde olduğu gibi geometrik model alt kısmından sabitlenmiş ve üst kısmından yüklemeye maruz bırakılmıştır (Şekil 6.4). Yükleme ve sınır şartları tanımladıktan sonra geometrik modele çözüm işlemi uygulanmıştır.



Şekil 6.4 Geometrik modele mesh uygulanması ve sınır şartlarının tanımlanması

6.3. J-İntegral Metodu

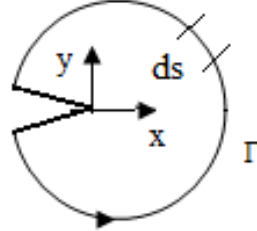
Çatlak merkezinden çıkarılan enerji olarak tanımlanan J-integral ilk olarak Rice tarafından ortaya atılmıştır. Enerjinin korunumu ilkesine dayanarak belli bir sayıda J-integral yörüngesi iki boyutlu olarak tanımlanır. Bu kapalı yörüngelerin iki boyutlu integralleri denklem (6.4)'teki gibidir.

$$J = \oint w dy - t \frac{\partial u}{\partial x} d\Gamma \quad (6.4)$$

$$w = \int_0^\epsilon \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

Burada; w; şekil değiştirme enerjisi yoğunluğunu, Γ ; Şekil 6.5'te gösterildiği gibi saatin tersi yönünde kapalı bir yörüngeyi, t; çatlak çevresindeki yörünge üzerinde dışa doğru çekme

vektörünü u ; deplasman vektörünü $ve d\Gamma$; Γ yörüngesi üzerindeki yay elemanını göstermektedir



Şekil 6.5 Çatlak etrafındaki J-integral yörünge tanımı

Farklı çatlak boylarına sahip yüklenmiş iki özdeş elemanın, potansiyel enerji farkı olarak tanımlanması durumunda J-integralin formülasyonu denklem (6.5)'deki gibi olmaktadır.

$$J = \frac{\partial U_0}{\partial a} = G = \frac{K^2}{E'} \quad (6.5)$$

$$E' = \left\{ \begin{array}{l} E \quad (\text{Düzlem Gerilme}) \\ \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (\text{Düzlem Şekil Değişimi}) \end{array} \right\}$$

Burada; U ; potansiyel enerji farkını, a ; çatlak uzunluğunu, G ; şekil değiştirme enerjisi boşalma oranını ve K ; gerilme şiddet faktörünü ifade etmektedir.

6.4. J-İntegral Değerinin Hesaplanması

Çatlak açılması sırasında açığa çıkan mekanik enerji değeri olan J-integrali değerini hesaplariken çatlak ucunda saat yönünün tersine ilerleyen dairesel bir yörünge tayin edildi. Tayin edilen yörüngeye ait her bir nodun numarası aşağıda verilen ANSYS program koduna aktarıldı ve program kodu ANSYS çözüm dosyasına okutuldu.

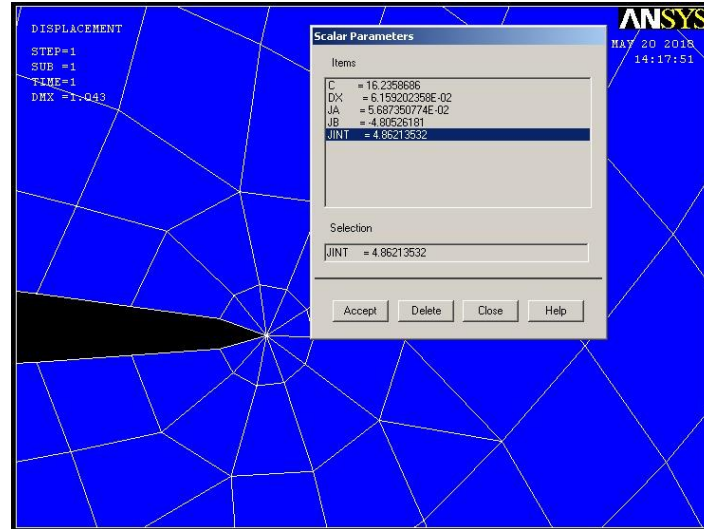
```
ETABLE,SENE,SENE,
ETABLE,VOLU,VOLU
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1      ! CALCULATE STRAIN ENERGY DENSITY
SEXP,W,SENE,VOLU,1,-1
LPATH,58,150,151,152,153,154,155,156,157,158,60 ! DEFINE PATH POINTS BY NODE
PDEF,W,ETAB,W              ! PUT STRAIN ENERGY DENSITY ON THE PATH
PCALC,INTG,J,W,YG         ! INTEGRATE ENERGY W.R.T. GLOBAL Y
*GET,JA,PATH,,LAST,J      ! GET FINAL VALUE OF INTEGRAL FOR 1ST TERM OF J
PDEF,CLEAR                 ! CLEAR OLD PATH VARIABLES
PVECT,NORM,NX,NY,NZ       ! DEFINE THE PATH UNIT NORMAL VECTOR
PDEF,INTR,SX,SX           ! PUT STRESS SX ON THE PATH
PDEF,INTR,SY,SY           ! PUT STRESS SY ON THE PATH
```

```

PDEF,INTR,SXY,SXY      ! PUT STRESS SXY ON THE PATH
PCALC,MULT,TX,SX,NX    ! CALCULATE TRACTION TX
PCALC,MULT,C1,SXY,NY   ! TX = SX*NX + SXY*NY
PCALC,ADD,TX,TX,C1
PCALC,MULT,TY,SXY,NX  ! CALCULATE TRACTION TY
PCALC,MULT,C1,SY,NY   ! TY = SXY*NX + SY*NY
PCALC,ADD,TY,TY,C1
*GET,DX,PATH,,LAST,S  ! DEFINE PATH SHIFT AS 1% OF PATH LENGTH
DX=DX/100
PCALC,ADD,XG,XG,,,-DX/2  ! SHIFT PATH FROM X TO X-DX/2 (GLOBAL X DIR.)
PDEF,INTR,UX1,UX      ! DEFINE UX AT X-DX
PDEF,INTR,UY1,UY      ! DEFINE UY AT X-DX
PCALC,ADD,XG,XG,,DX    ! SHIFT PATH FROM X-DX/2 TO X+DX/2
PDEF,INTR,UX2,UX      ! DEFINE UX AT X+DX
PDEF,INTR,UY2,UY      ! DEFINE UY AT X+DX
PCALC,ADD,XG,XG,,,-DX/2  ! SHIFT PATH BACK TO ORIGINAL POSITION
C=(1/DX)
PCALC,ADD,C1,UX2,UX1,C,-C  ! CALCULATE DERIVATIVE DUX/DX
PCALC,ADD,C2,UY2,UY1,C,-C  ! CALCULATE DERIVATIVE DUY/DX
PCALC,MULT,C1,TX,C1      ! DEFINE INTEGRAND
PCALC,MULT,C2,TY,C2      ! = TX*DUX/DX + TY*DUY/DX
PCALC,ADD,C1,C1,C2
PCALC,INTG,J,C1,S      ! FORM SECOND INTEGRAL (W.R.T. PATH LENGTH S)
*GET,JB,PATH,,LAST,J    ! GET FINAL VALUE OF INTEGRAL FOR 2ND TERM OF J
JINT=JA-JB             ! FOR FULL MODELS
PDEF,CLEAR             ! CLEAR PATH VARIABLES
*END

```

Alt program ortotropik malzemeler için J-integral değerinin hesaplamasını yaptı. Elde edilen J-integral değeri “Scalar Parameters” menüsünden okunur.



Şekil 6.6 J-İntegral değerinin okunması

6.5. Sonlu Elemanlar Analizinin Sonuçları

Lineer elastik kırılma mekaniğine göre J-integral değeri ile gerilme yığılma faktörü (K_{IC}) arasındaki ilişki denklem (6.6)'da matematiksel olarak ifade edilmiştir [37]. Analiz sırasında malzemelerin kalınlıkları ihmal edilirse düzlem gerilme, malzeme kalınlıkları çözüme dahil edilirse düzlem şekil değiştirme durumu geçerlidir.

$$K_{IC} = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{JE} \quad (\text{Düzlem Gerilme Durumu}) \\ \sqrt{\frac{JE}{1-\nu^2}} \quad (\text{Düzlem Şekil Değiştirme Durumu}) \end{array} \right\} \quad (6.6)$$

Çizelge 6.2 Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Açı (°)	Kuvvet (N)	JINT -P1	JINT -P2	K_{IC} (Den.)	P1 (Yakın)		P2 (Uzak)		P1 (Yakın)		P2 (Uzak)	
					K_{IC} (DŞD)	K_{IC} (DG)	K_{IC} (DŞD)	K_{IC} (DG)	%Hata (DŞD)	%Hata (DG)	%Hata (DŞD)	%Hata (DG)
0	1316	4,622	3,133	147	158	153	130	126	7,71	3,98	11,31	14,13
30	1468	5,745	4,359	170	176	170	153	148	3,84	0,52	9,55	12,42
45	1797	8,614	3,895	211	216	209	145	140	2,44	0,79	31,12	33,30
60	2214	13,07	8,865	271	266	257	219	212	1,72	4,93	19,08	21,65
90	2548	17,31	11,73	325	306	296	252	244	5,71	9,23	22,37	24,83

Çizelge 6.2'de deneysel ve nümerik olarak elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin karşılaştırması ve nümerik yöntemle elde edilen sonuçlara ait yüzde hata değerleri verilmiştir. J-integral değeri elde edilirken iki farklı yörüngedeki j-integral değerleri hesaplanmıştır. Bu yörüngelerden çatlğa yakın olan P1 ve uzak olan P2 olarak isimlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında tabakalı kompozitler için çatlğa yakın yörüngede deneysel sonuçlara daha yakın kırılma tokluğu değeri elde edildiği gözlenmiştir. Öyle ki çatlğa yakın yörüngedeki %hata değerleri incelendiğinde maksimum hata oranının %9,23 olduğu görülmektedir. Aynı karşılaştırma çatlğa uzak yörünge için yapıldığında %hata değerinin %24,83 seviyesine ulaştığı görülmektedir. Bu hata yüzdesi sonlu elemanlar için çok kabul edilebilir bir hata değeri değildir.

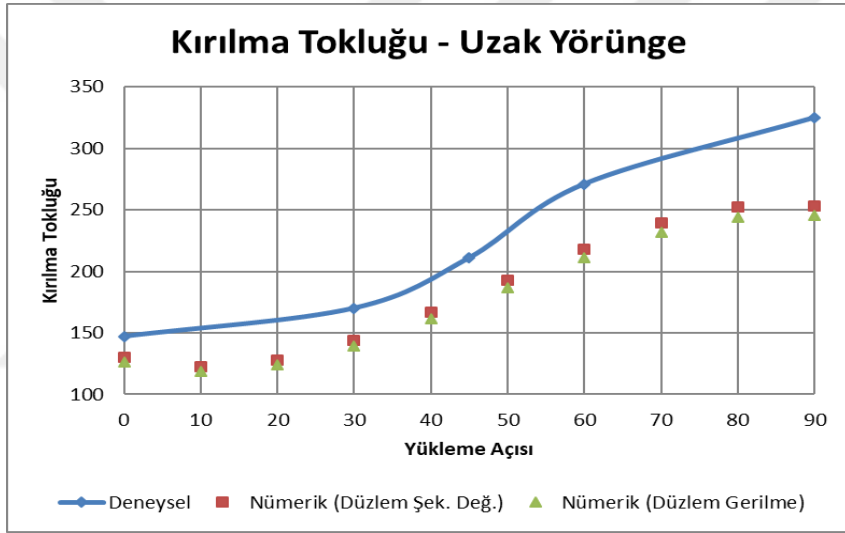
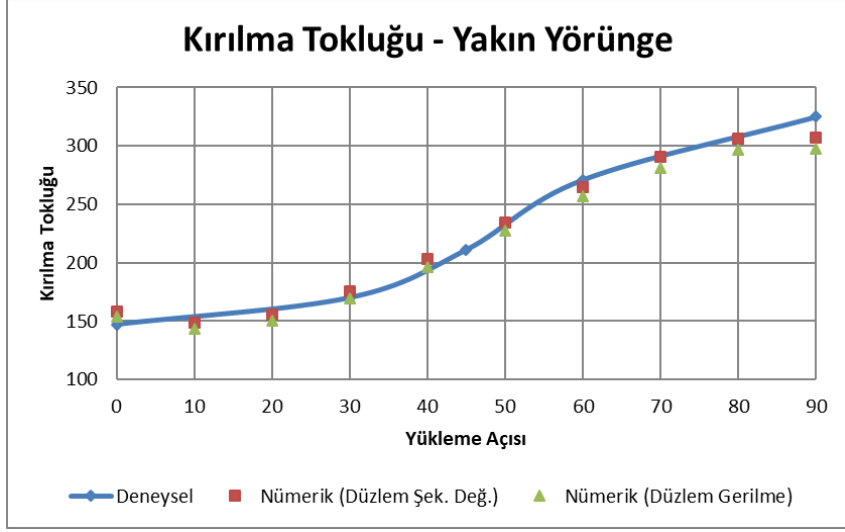
J-integral metodunu kullanarak kırılma tokluğunu hesaplamak için test numunesinin geometrisine göre düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme olmak üzere 2 farklı yaklaşım

vardı. Çizelge 6.2’de 2 farklı yaklaşımında sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde jüt/epoksi tabakalı kompozitler sonlu elemanlar yöntemi ile kırılma analizlerinde düzlem şekil değiştirme durumunda gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Öyle ki düzlem gerilme durumunda maksimum %hata değeri %9,23 iken düzlem şekil değiştirme durumunda maksimum hata %7,71 civarındadır.

Çizelge 6.3’te deneysel olarak hesaplanmayan kırılma tokluğu değerleri sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır ve Çizelge 6.3’te verilmiştir. Buna göre yükleme açısı “0” dereceden “90” dereceye doğru kaydığında kırılma tokluğu değerlerinin arttığını göstermiştir. Bu değişimin sebebi Mod-I durumunda (0° yükleme) çatlak açılarak hasara uğramaktadır. Mod-II (0° yükleme) durumunda ise çatlak kayma yüklemesi neticesinde ilerlemektedir. Kayma neticesinde çatlak ilerlemesi için gerek kuvvet değeri daha yüksek olduğu için kırılma tokluğu değeri de yüksek çıkmıştır (Şekil 6.7).

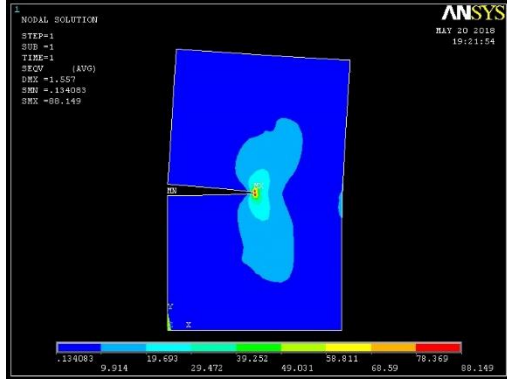
Çizelge 6.3 Nümerik analize göre farklı açılardaki kırılma tokluğu değerleri

Açı	Kuvvet	JINT-P1	JINT-P2	P1 (Yakın)		P2 (Uzak)	
				KI (DŞD)	KI (DG)	KI (DŞD)	KI (DG)
0	1317,2	4,6316	3,1399	158,50	153,46	130,50	126,36
10	1234,25	4,0707	2,7596	148,59	143,87	122,35	118,46
20	1293,26	4,4716	3,0314	155,74	150,79	128,23	124,16
30	1457,03	5,6607	3,8376	175,22	169,66	144,27	139,69
40	1688,36	7,5971	5,1503	202,99	196,55	167,14	161,83
50	1950,05	10,1382	6,8730	234,50	227,05	193,08	186,95
60	2204,9	12,9499	8,7791	265,03	256,61	218,22	211,29
70	2415,71	15,5440	10,5377	290,36	281,14	239,07	231,48
80	2545,28	17,2763	11,7121	306,12	296,39	252,04	244,04
90	2556,41	17,4232	11,8117	307,41	297,65	253,11	245,08

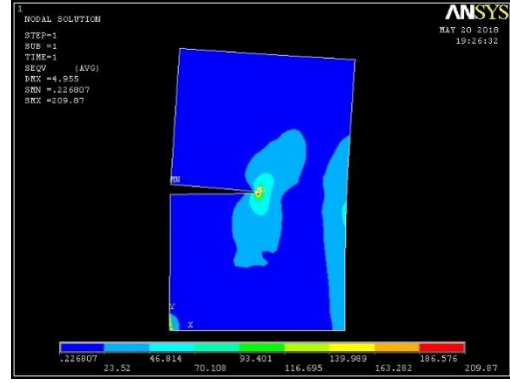


Şekil 6.7 Yüklemeye açısına bağlı olarak kırılma tokluğu değerinin değişimi (a) yakın yörünge ve (b) uzak yörünge

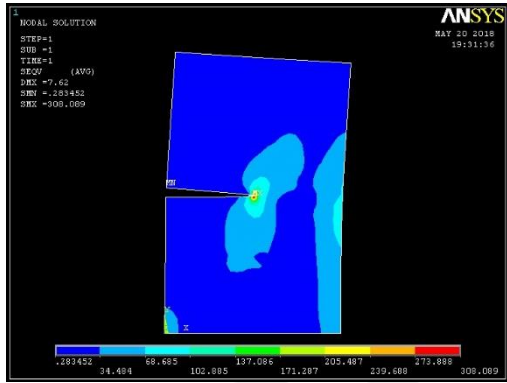
Yüklemeye durumuna bağlı olarak çatlak etrafında meydana gelen von Mises gerilme seviyelerinde farklılıklar gözlenmiştir.



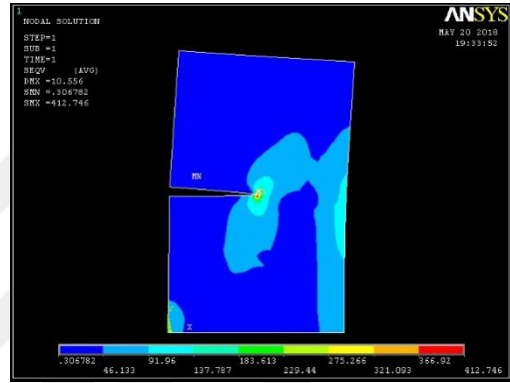
(a)



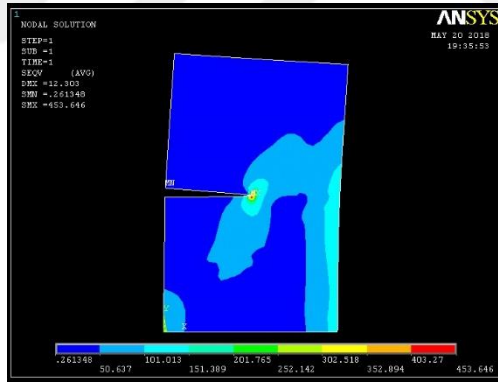
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.8 Yükleme durumuna bağlı olarak meydana gelen von Mises gerilmeleri

Şekil 6.8'e göre Mod-I yükleme durumunda çatlak açılmaya zorlandığı için numune üzerindeki gerilme durumu çatlak etrafında yoğunlaşmıştır. Diğer yükleme açılarında hem gerilme alanı açığa paralel olarak eğilmektedir, hemde kayma gerilmesi etkidiğinden gerilme alanları numunenin kenar bölgelerine doğru yayılmakta olduğu görülmüştür.

7. BÖLÜM SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Giriş

Bu çalışmada farklı oran ve farklı boyutlarda silisyum karbür takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri ve kırılma toklukları belirlenerek sonuçlar irdelenmiş ve kıyaslanmıştır. Burada, farklı oranlarda ve farklı boyutlardaki silisyum karbür takviyesinin, hem mekanik özelliklere hem de kırılma davranışlarına veya kırılma tokluğuna etkisinin ne derece olduğu gözlemlenmiştir. Bunun için çalışmanın önceki bölümlerinde kırılma mekaniği, kompozitlerin üretim aşaması ve deneysel çalışmalar açıklanmıştır.

Üretimi yapılan kompozit numunelerin deney tipine göre standartlarda belirtilen şekilde numune kesimleri yapılmış ve universal çekme cihazında tüm numuneler deneye tabi tutulmuştur. Geniş kapsamlı yapılan literatür araştırmaları sonucu kırılma mekaniği ile ilgili yapılmış bir çok çalışma bulunmuştur. Bu çalışmalarda kullanılan denklemler referans alınarak, SiC takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin statik dayanım değerleri, kırılma tokluk değerleri ve kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Denklemler sonucu ulaşılan matematiksel verilerle çizelgeler oluşturulmuş ve grafikler çizilmiştir. Grafiklerin oluşturulmasıyla beraber sonuçların irdelenmesi ve kıyaslanması kolaylaşmış ve gözle görülür biçimde farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada, dört farklı oranda (%0(sade), %3, %6 ve %9) ve üç farklı boyutta (53 μ , 9,3 μ ve 4,5 μ) silisyum karbür takviyeli jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin mekanik özellikleri olan; fiber yönü elastisite modülü (E_1), fiber yönü çekme dayanımı (X_t), fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2), fibere dik yöndeki çekme dayanımı (Y_t), kayma modülü (G_{12}), fiber yönü basma dayanımı (X_c) ve fibere dik yöndeki basma dayanımı (Y_c), çekme ve basma deneyleri sonucu sayısal olarak bulunmuştur. Daha sonra kırılma tokluğu numuneleri, compact tension shear (CTS), arcan test aparatına bağlanarak beş farklı açıda (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) çekme deneyine tabi tutulmuştur. Buradan çıkan sonuçlar, beşinci bölümde belirtilen denklemler (5.6, 5.11 ve 5.12) vasıtasıyla bütün serilerin K_I , K_{II} ve $K_{I/II}$ parametreleri nümerik olarak hesaplanmıştır. Kırılma tokluğu değerleri bulunduktan sonra ise yine denklemler (5.14, 5.15 ve 5.16) vasıtasıyla bütün serilerin G_I , G_{II} ve G_T enerji değerleri sayısal olarak bulunmuştur.

Bu bölümde yukarıda belirtilen tüm bu matematiksel olarak bulunan değerlerin çizelge ve grafiklere yansıtılmış hali gösterilmiştir. Ayrıca grafiklerin okunması, irdelenmesi ve yorumlanması yapılmıştır. Daha sonra parametreler ile takviye elemanının boyut ve oranları, numune hasarları, çatlak ilerlemesi gibi durumların birbirleriyle olan ilişkileri kıyaslanarak karşılaştırılmaları yapılmış ve çalışmada ne gibi bir sonuca varıldığı anlatılmıştır. Ayrıca kırılmış numunelerin scanned elektron microscope (SEM) görüntüleri çekilmiş ve malzeme mikroyapısı incelenmiştir.

7.2. Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Test sonuçlarının özgün ve anlaşılır şekilde karşılaştırılması için mekanik özellikler, kırılma tokluğu ve enerji değerleri her biri kendi arasında kıyaslanmıştır. Silisyum karbür takviye elemanının hem boyut olarak hem de oran olarak yukarıdaki parametrelere etkisi grafiklerde açıkça görülmektedir.

7.2.1. Mekanik Özelliklerin Karşılaştırılması

Mekanik özellikler için daha öncede belirtildiği gibi E_1 , X_t , E_2 , Y_t , G_{12} , X_c ve Y_c olarak yedi farklı test sonucu belirlenmiştir. Çekme testlerinde kompozit malzemenin E_1 , E_2 , X_t , Y_t ve E_{45} değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Kayma modülü G_{12} ise, deneysel olarak hesaplanan bu değerler kullanılarak denklem (7.1) kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir. Basma yüklemesi altında malzemenin fiber yönü ve fibere dik yön basma dayanımları olan X_c ve Y_c değerleri deneysel olarak hesaplanmıştır. Tüm bu sonuçlar, alt başlıklarda çizelge ve grafiklerle ifade edilmiştir.

7.2.1.1. Çekme Dayanımının Karşılaştırılması

Çalışmada üç farklı silisyum karbür boyutu (53μ , $9,3\mu$ ve $4,5\mu$) ve dört farklı silisyum karbür oranı (%0(sade), %3, %6 ve %9) kullanılmıştır. Deneysel olarak hesaplanan fiber yönündeki E_1 ve X_t ile fibere dik yöndeki E_2 ve Y_t değerleri aşağıdaki Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Fiber yönündeki elastisite modülü (E_1) ile fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2) değerleri

Yüzde (%)	E_1 (MPa)			E_2 (MPa)		
	Boyut					
	53 μ	9,3 μ	4,5 μ	53 μ	9,3 μ	4,5 μ
0	5083,41	5083,41	5083,41	4969,66	4969,66	4969,66
3	5573,74	5675	5847,99	5858,64	5973,14	6097,63
6	5721,57	5977,34	6096,32	6177,11	6425,51	6522,48
9	5380,08	5520,86	5768,64	5156,18	5293,1	5483,04

Çizelge 7.2 Fiber yönündeki çekme dayanımı (X_t) ile fibere dik yöndeki çekme dayanımı (Y_t) değerleri

Yüzde (%)	X_t (MPa)			Y_t (MPa)		
	Boyut					
	53 μ	9,3 μ	4,5 μ	53 μ	9,3 μ	4,5 μ
0	53,95	53,95	53,95	54,55	54,55	54,55
3	57,09	59,28	60,21	57,63	58,19	58,77
6	60,49	62,1	63,13	58,81	60,21	61,29
9	56,26	57,1	58,8	55,76	56,59	57,51

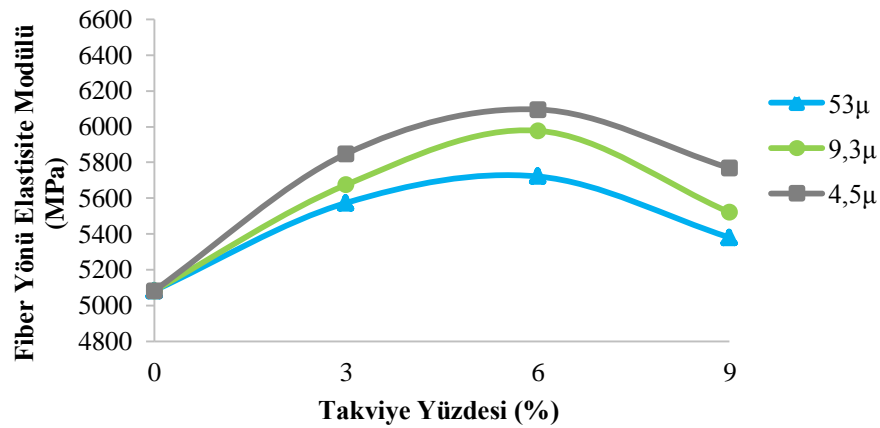
Çizelge 7.1 incelendiğinde fiber yönündeki elastisite modül (E_1) ve fibere dik yöndeki elastisite modül (E_2) değerleri hem birbirleri arasında hemde kendi içlerinde silisyum karbür takviye oranı ve boyutu arasındaki ilişkide dikkate alınarak mukayese edilebilir. Fiber yönündeki elastisite modülünde (E_1) en yüksek değer 6096,32MPa ile yüzde %6 silisyum karbür takviyesinde ve 4,5 μ boyutunda elde edilmiştir. En düşük değer ise 5083,41MPa ile sade numunelerdedir. Fibere dik yöndeki elastisite modülünde ise (E_2) en yüksek değer 6522,48MPa ile yine %6 silisyum karbür takviyesinde 4,5 μ boyutunda elde edilmiştir. En düşük değere ise 4969,66MPa ile silisyum karbür katkısı olmayan sade numuneler sahiptir.

Fiber yönü elastisite modülü değerleri (E_1) için, en küçük değer ile en yüksek değer arasında en küçük değerın %19,92'si kadar bir artış vardır. Fibere dik yöndeki elastisite modülü değerleri (E_2) için ise, en küçük değer ile en yüksek değer arasında en küçük değerın %31,24'ü kadar bir artış olmuştur.

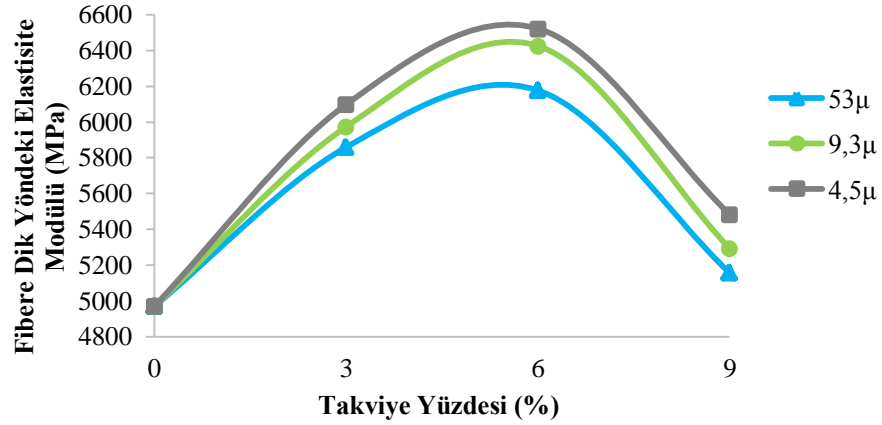
Fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2) değeri ile fiber yönündeki elastisite modülü (E_1) değeri ile kıyaslanırsa aralarında bariz bir farkın olmadığı görülmektedir. Jüt kumaş dokuma tipi olduğu için iki yönde de fiberler olup (x ve y yönü) oluşan gerilmeler hemen hemen birbirine yakındır. Aynı durum çekme dayanımları içinde söylenebilir.

Çizelge 7.2 incelendiğinde ise maksimum çekme dayanımları arasındaki ilişki kıyaslanabilmektedir. Burada fiber yönündeki çekme dayanımı (X_t) için maksimum değer 63,13MPa ile %6 silisyum karbür takviye yüzdesinde ve 4,5 μ takviye oranında çıktığı görülmektedir. Minimum değer ise 53,95MPa ile sade numunede çıkmıştır. X_t için, en küçük değer ile en yüksek değer arasında en küçük değer %17,01'i kadar bir artış vardır. Fibere dik yöndeki çekme dayanımı (Y_t) için ise maksimum değer 61,29MPa ile yine %6 silisyum karbür takviye yüzdesinde ve 4,5 μ takviye oranında olmuştur. Minimum değer ise 54,55MPa ile sade numunededir. Y_t için ise, en küçük değer ile en yüksek değer arasında en küçük değer %12,35'i kadar bir artış olmuştur.

Aşağıda Şekil 7.1 ve 7.2'de ise Çizelge 7.1'deki değerlere göre E_1 ve E_2 'nin silisyum karbür takviye oranına ve boyutlarına göre değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Fiber yönündeki elastisite modülünün (E_1) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

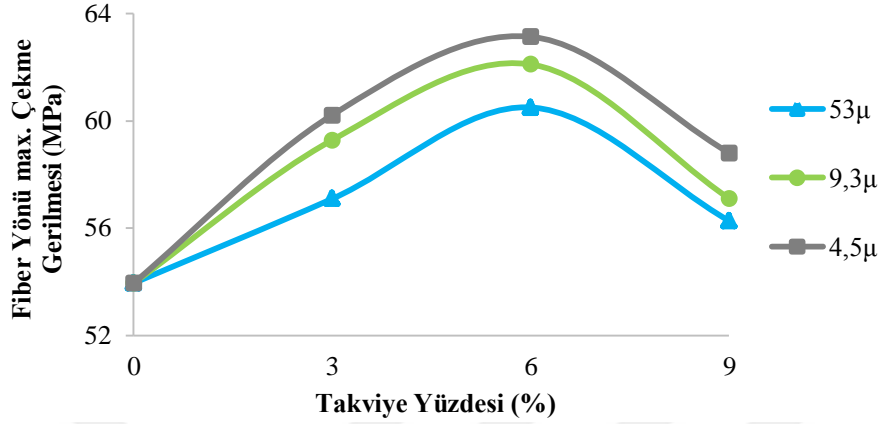


Şekil 7.2 Fibere dik yöndeki elastisite modülünün (E_2) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

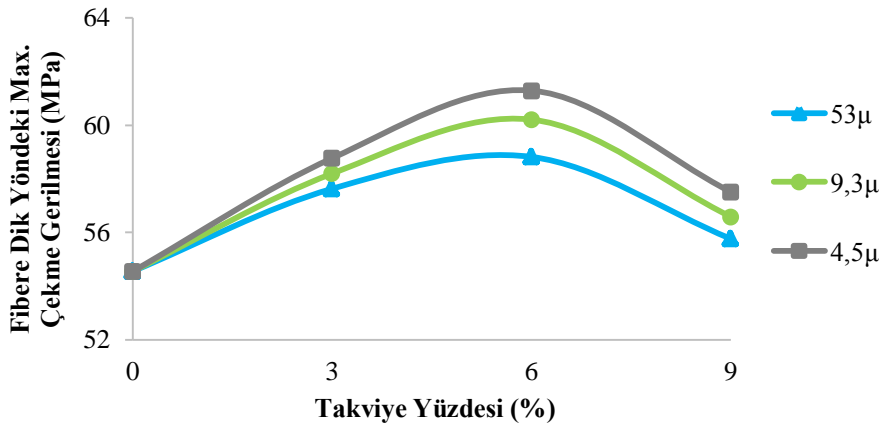
Grafiklerden de anlaşılacağı üzere hiç silisyum karbür ilave edilmemiş kompozit numuneler (%0) her iki grafikte de en düşük elastisite modül değerine sahiptir. %3 silisyum karbürü numunelerden boyutu en küçük olan en büyük, boyutu en büyük olan ise en küçük elastisite modül değerine sahiptir. Bu olay %6 takviye oranına kadar artarak devam etmiştir. Fakat %6 takviye oranından sonra değerler düşüş göstermeye başlamıştır. Bunun nedeni ise; %6 takviye oranından sonra bu komplikasyonun fazla SiC miktarı sebebiyle silisyum karbürlerin epoksi reçinenin fibere bağlanmasını engellediği ve fiber-matris arayüzeyinde boşluk oluşumuna sebep olmasındandır. Bu yüzden modül değerleri %6 takviye oranından sonra düşmüştür. Sonuç olarak silisyum karbür oranı kıyaslamasında %6 silisyum karbür ilavesinde her iki grafik için de maksimum elastisite modül değerleri elde edilmiştir.

Silisyum karbürün boyut olarak kıyaslamasında ise en küçük boyutlu silisyum karbürlerin büyük boyutlu silisyum karbürlerine göre daha yüksek elastisite modüle sahip olduğu ($4,5\mu > 9,3\mu > 53\mu$) görülmüştür. Bunun nedeninin ise küçük parçacıkların fiber-matris oluşumunda malzeme içinde sayıca fazla olmasından dolayı daha çok yer doldurduğu ve fiberin veya epoksinin yapısındaki boşluklara daha iyi nüfus etmesidir. SiC parçacığının boyutunun mekanik özelliklere etkisi ile ilgili yakın bir çalışmayı Chisholm N. ve arkadaşları [34] da yapmış ve daha küçük boyutlu parçacıkların, matris-fiber mikroyapısındaki boşlukları doldurarak daha iyi mekanik özellik gösterdiğini kanıtlamışlardır.

Fiber yönündeki maksimum çekme dayanımı (X_t) ve fibere dik yöndeki maksimum çekme dayanımı (Y_t)'nin grafikleri ise Çizelge 7.2'ye göre Şekil 7.3 ve 7.4'te gösterildiği gibidir.



Şekil 7.3 Fiber yönündeki max. çekme dayanımının (X_t) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi



Şekil 7.4 Fibere dik yöndeki max. çekme dayanımının (X_t) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

Bu grafiklerde görüldüğü üzere takviye oranı her üç boyut içinde %6 olduğu durumda değerler maksimum olmuştur. Sade numunelerde ise değerler her iki grafik içinde minimum değerdedir. Hem fiber yönündeki çekme dayanımı (X_t) değerinde hem de fibere dik yöndeki çekme dayanımı (Y_t) değerinde genel olarak %6 takviye oranına kadar artış olmuş daha sonra fazla SiC ilavesinden dolayı değerler düşüşe geçmiştir. Takviye boyutu ise küçüldükçe maksimum kopma kuvveti arttığı için dolayısıyla da maksimum çekme dayanımı artmıştır. Boyut sıralamasında en küçük taneli silisyum karbürlerden en yüksek dayanım değerleri

elde edilmiştir. Bunun nedeni küçük boyutlu SiC taneciklerin matris ve fiber mikro yapısına daha iyi nüfus etmesi ve içyapıdaki boşlukları rahatlıkla doldurmasıdır.

7.2.1.2. Kayma Dayanımının Karşılaştırılması

Kayma dayanımı olarak G_{12} parametresi hesaplanmıştır. Bunun için numuneler fiber yönüne 45° lik açıda çekiye maruz bırakılmıştır. Fiberler 45° lik açıda olduğu için çekme esnasında x ve y yönünde iki yönlü bir gerilme söz konusudur. Bu iki yönlü gerilmenin bileşkesi ise kayma gerilmesi (dayanımı) olarak karşımıza çıkmaktadır. Deney sonucunda ilk olarak E_{45} parametresi hesaplanmıştır. Daha sonra ise önceden bulduğumuz E_1 ve E_2 değerleri kullanılarak, beşinci bölümde verilmiş olan ve aşağıda tekrar verilen denklem (7.1)'e göre G_{12} kayma dayanımı hesaplanmıştır ve E_{45} değerleri ile birlikte Çizelge 7.3'te gösterilmiştir.

$$G_{12} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\vartheta_{12}}{E_1}} \quad (7.1)$$

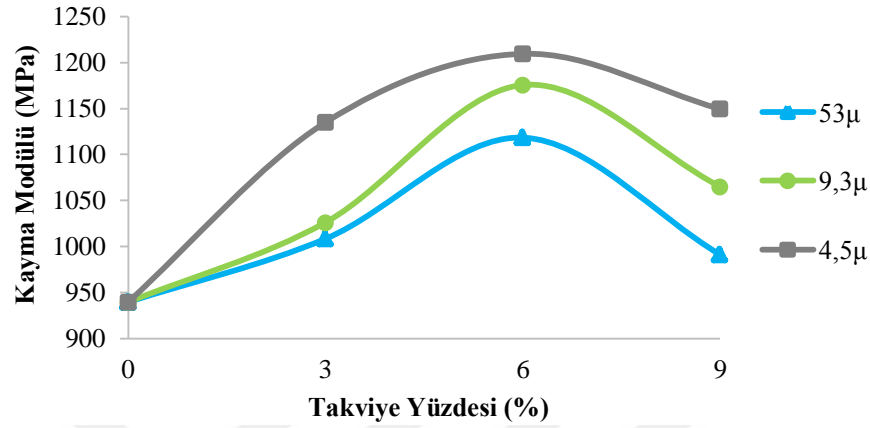
Bu denklemde belirtilen ϑ_{12} değeri poisson oranı olup 0,3 alınmıştır [72].

Çizelge 7.3 Kayma elastisite modülü olan E_{45} ile kayma dayanımı olan G_{12} değerleri

Yüzde (%)	E_{45} (MPa)			G_{12} (MPa)		
	Boyut					
	53 μ	9,3 μ	4,5 μ	53 μ	9,3 μ	4,5 μ
0 (Sade)	3179,41	3179,41	3179,41	939,61	939,61	939,61
3	3335,38	3409,22	3618,02	1008,40	1026,18	1134,99
6	3655,60	3771,21	3889,56	1118,38	1175,62	1209,52
9	3287,91	3490,79	3696,15	991,10	1065,02	1149,51

Çizelgeye göre elastisite kayma modülü değerlerinde en küçük değer 3179,41MPa ile sade numunelere aittir. En yüksek değer ise 3889,56MPa ile %6 takviye oranlı ve 4,5 μ takviye boyutlu numuneye aittir. Bu iki değer arasında %22,33'lük kadar bir fark vardır. Kayma dayanımı (G_{12}) değerlerinde en yüksek değer 4,5 μ takviye boyutunda ve %6 takviye oranında elde edilmiş olup bu değer 1209,52MPa'dır. En küçük değer ise sade numunelerde olmuştur ve değeri 939,61MPa'dır. Burada en küçük değer ile en yüksek değer arasında en küçük değerinin %28,7'si kadar bir artış söz konusudur. Değerler daha önce bulunan çekme ve basma özellikleriyle paralellik göstermiştir.

Fibere 45° yöndeki kayma dayanımı olan G_{12} 'nin silisyum karbür takviye oranına ve boyutuna göre değişimi ise, Çizelge 7.3'teki değerlere göre Şekil 7.5'te grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Kayma dayanımının (G_{12}) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

Şekil 7.5'e göre silisyum karbür takviye oranı arttıkça tüm boyutlar için değerler %6 ya kadar artmış daha sonra düşüşe geçmiştir. En iyi değerlerin %6 takviye oranında elde edildiği grafite açıkça görülmektedir. Burada da grafiğin değişimi çekme testlerindeki grafiklere benzerdir.

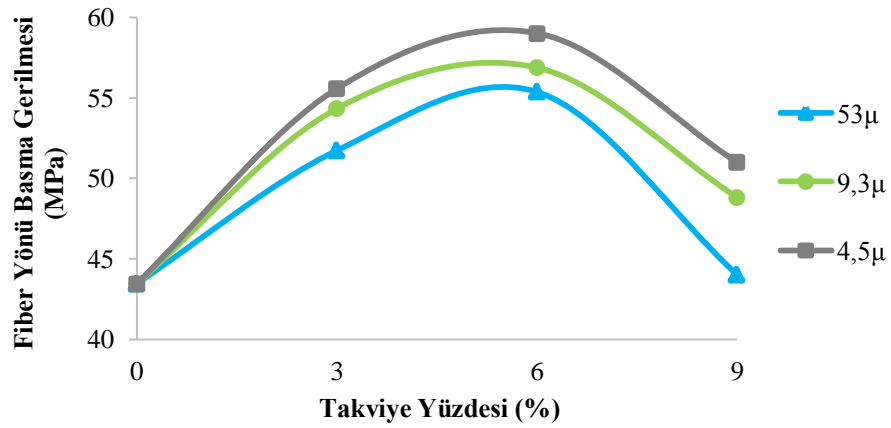
7.2.1.3. Basma Dayanımının Karşılaştırılması

Basma dayanımı olarak hesaplanan iki farklı sonuç mevcuttu. Bunlar; fiber yönündeki basma dayanımı olan X_c ve fibere dik yöndeki basma dayanımı olan Y_c değerleridir. Basma yönündeki deneylerden elde edilen kuvvet değerlerinin, numune kesit alanlarına bölünmesi sonucu hesaplanan maksimum basma dayanımları Çizelge 7.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 7.4 Fiber yönündeki basma dayanımı olan X_c ile fibere dik yöndeki basma dayanımı olan Y_c değerleri

Yüzde (%)	X_c (MPa)			Y_c (MPa)		
	Boyut					
	53μ	9,3μ	4,5μ	53μ	9,3μ	4,5μ
0(Sade)	43,47	43,47	43,47	45,19	45,19	45,19
3	51,73	54,33	55,58	47,31	48,74	51,70
6	55,37	56,88	59,02	53,27	54,87	58,04
9	44,02	48,82	51,00	48,03	49,09	52,29

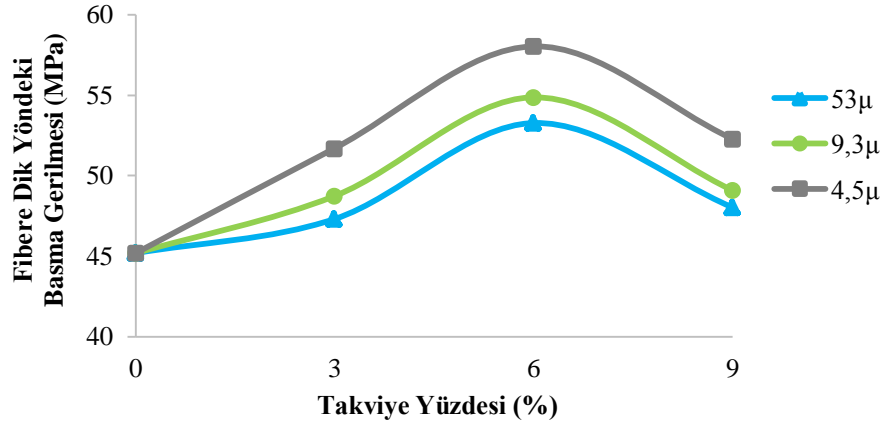
Çizelge 7.4'e göre fiber yönündeki basma dayanımları ile fibere dik yöndeki basma dayanımlarının silisyum karbür takviye oranı arttıkça ve takviye boyutu küçüldükçe %6 takviye oranına kadar arttığı görülmektedir. Maksimum değerler %6 takviye oranında ve 4,5 μ takviye boyutunda elde edilmiş olup fiber yönündeki basma dayanımı (X_c) değeri için 59,02MPa, fibere dik yöndeki basma dayanımı (Y_c) değeri için ise 58,04MPa'dır. Minimum değerler ise sade numunelerde elde edilmiş olup (X_c) için 43,47MPa (Y_c) için 45,19MPa'dır. %6 takviye oranından sonra takviyeyi artırmak her iki değer içinde mukavemeti olumsuz yönde etkilemiştir. X_c ve Y_c için kendi aralarında bir kıyaslama yapacak olursak ta aralarında bariz bir fark bulunmamaktadır. Çünkü dokuma tipi bir jüt olduğu için her iki yöndede gerilmeler yakındır. Fiber yönündeki basma dayanımı olan X_c 'nin silisyum karbür takviye oranına ve boyutuna göre değişimi Çizelge 7.4'teki değerlere göre Şekil 7.6'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.6 Fiber yönündeki basmadayanımının (X_c) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

Grafikten de anlaşılacağı üzere maksimum değerler %6 silisyum karbür oranında ve 4,5 μ boyutunda elde edilmiştir. En düşük değerler ise katkısız numunelerdedir. Genel olarak %6 takviye kadar parabolik bir artış gösteren grafik bu değerden sonra azalmaya gitmiştir. Boyut olarak ise en küçük boyutta yüksek değerler en büyük boyutta düşük değerler elde edilmiştir. Boyut oranı küçüldükçe mukavemet iyileşmektedir.

Fibere dik yöndeki basma dayanımı olan Y_c 'nin silisyum karbür takviye oranına ve boyutuna göre değişimi ise Çizelge 7.4'teki değerlere göre Şekil 7.7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.7 Fibere dik yöndeki basma dayanımının (Y_c) takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre değişimi

Grafikten de anlaşılacağı üzere değerler X_c grafiği ile paralellik göstermiştir. Maksimum değerler %6 silisyum karbür oranında ve $4,5\mu$ boyutunda elde edilmiştir. En düşük değerler ise katkısız numunelerdedir. SiC takviyeler matris-fiber formuna %6'lık orana kadar daha iyi uyum sağlamış ve mukavemeti artırmıştır. Genel olarak %6 takviye oranına kadar artan eğri bu takviye oranından sonra düşüşe geçmiştir. Bunun nedeni ise matris-fiber formunun SiC parçacıklara doygunluğudur. Boyut olarak karşılaştırma yapılacak olursada hem fiber yönündeki basma dayanımı (X_c), hem de fibere dik yöndeki basma dayanımı (Y_c) grafiklerinde en küçük boyutlu silisyum karbürü numuneler en iyi mukavemeti sağlamıştır. Bunun nedeni ise küçük parçacıkların matris veya fiber mikro yapısına daha iyi nüfus etmesi ve malzeme içindeki boşlukları doldurmasıdır.

7.2.2. Kırılma Mekanizmasının Karşılaştırılması

Kırılma mekanizması hesapları için CTS test numuneleri kullanılmıştır. Bu numuneler beş farklı açıda (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) çekme deneyine tabi tutulmuştur. Burada 0° de çekmeye maruz kalan numunelerin deney sonunda hesaplanan kırılma tokluğu değerleri mod I olarak, 30° , 45° ve 60° de çekmeye maruz kalan numunelerin deney sonucu hesaplanan değerleri mod I-II olarak, 90° de çekiye maruz kalan numunelerin deney sonucu hesaplanan değerleri de mod II olarak adlandırılmaktadır. Mod I için bulunan kırılma tokluğu değeri K_I , mod I-II için bulunan değerler $K_{I/II}$ ve son olarak mod II için ise bulunan değerler K_{II} 'dir. Bu kavramlara ve kırılma tokluğu (K_{IC}) değerinin hesabında kullanılan denklemlere beşinci bölümde değinilmiştir. Bu bölümde ise deneysel olarak bulunan sayısal verilerin, denklemlere

uygulanması sonucu hesaplanan kırılma tokluğu (K_{IC}) değerlerinin çizelgeler ve grafikler halinde modlara göre gösterimi yapılmıştır.

7.2.2.1. Mod I Kırılma Tokluğu

Bu mod, arcan test aparatı ile 0° de çekme deneyi yapılmış numunelerin kırılma tokluğunu ifade etmektedir. Deneye tabi tutulmuş numunelerin deney sonucu bulunan maksimum kopma kuvvetlerinin (P_{max}), denklem (5.11)'de kullanılarak kırılma tokluğu (K_I) değerleri hesaplanmış ve değerler Çizelge 7.5'te standart sapmaları ile beraber gösterilmiştir.

Çizelge 7.5 Mod I kırılma tokluğu değerleri (K_I) ($MPa \cdot mm^{3/2}$)

Açı	Partikül Oranı	Partikül Boyutu				
		Sade %0	53 μ	9,5 μ	4,5 μ	
0°	%0	K_I	147,32			
		Std. Sapma	10,42			
	%3	K_I		153,42	155,53	158,69
		Std. Sapma		(10,45)	(3,86)	(5,79)
	%6	K_I		166,91	169,77	177,45
		Std. Sapma		(11,47)	(16,37)	(11,11)
	%9	K_I		158,04	166,62	174,61
		Std. Sapma		(13,78)	(6,48)	(7,99)

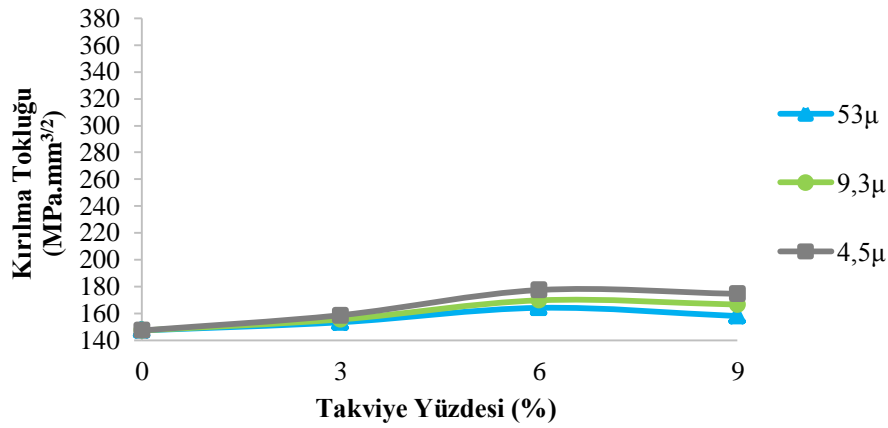
Yukarıdaki Çizelge 7.5 incelendiğinde dört farklı oran ve üç farklı boyutta silisyum karbür takviyeli arcan kırılma testi numunelerinin, arcan test aparatı ile 0° de yapılan çekme deneyleri sonucunda bulunan en küçük kırılma tokluğu değerinin $147,32 MPa \cdot mm^{3/2}$ ile sade (%0) numunelerde olduğu görülmektedir. En yüksek değer ise $177,45 MPa \cdot mm^{3/2}$ ile 4,5 μ takviye boyutunda ve %6 takviye oranında olduğu görülmektedir. Burada SiC parçacık ilavesi ile sade numuneye göre %20,45'lik bir artışla maksimum değer elde edilmiştir.

Mod I kırılma modunda yapılan deneyler takviye oranına ve boyutuna göre beş tekrarlı numune ile çalışılmıştır. Beş tekrarlı çalışma olduğu için bu beş tekrarın ortalaması sonuçlara yansıtılmıştır. Bunun sonucunda her bir değer için standart sapması oluşmuştur. Bu standart sapma değerleri ise yine Çizelge 7.5'te K_I değerleri ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 7.5'te her bir K_I değerinin standart sapması gösterilmiş olup bunlardan en düşük değer 3,86 ile 9,5 μ partikül boyutlu ve %3 takviye oranlı numuneye aittir. En yüksek değer ise 16,37 ile 9,5 μ partikül boyutlu ve %6 takviye oranlı numuneye aittir.

Standart sapma değeri 0 değerine ne kadar yakınsa aynı numunelerin deney sonuçları birbirine o kadar yakın olmuş olur. Beş tekrarlı bir deneyde beş numunenin sonucuda birbirine ne kadar yakında o kadar iyidir ve sonuçlar 0'a yakındır. Sonuçlar arasında bariz farklar varsa da standart sapma değeri de o kadar kötüdür ve değer yüksek çıkmaktadır.

Farklı oranlarda ve farklı boyutlarda silisyum karbür takviye ilave edilmiş CTS numunelerinin Mod I durumundaki kırılma tokluğu değerleri, Çizelge 7.5 baz alınarak Şekil 7.8'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.8 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre Mod I durumundaki kırılma tokluğu değerlerinin (K_I) değişimi

Şekil 7.8'e göre kırılma tokluğu değerleri takviye ilavesi olmayan numunelerde en küçük değere sahiptir. Bu değerden sonra %6 takviye ilavesine kadar takviyenin tüm boyutları için parabolik bir artış olmuş daha sonra ise düşüğe geçmiştir. Takviye boyutu en küçük olan numunelerde en yüksek kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. %9 takviye oranına sahip numuneler % 6 takviye oranına göre düşüktür fakat sade numunelere ve %3 takviye oranlı numunelere göre kırılma tokluğu değerleri yüksektir.

7.2.2.2. Mod I-II (Mixed Mode) Kırılma Tokluğu

Bu mod, arcan test aparatı ile 30°, 45° ve 60° lik açılarla çekme yüklemesi altında kırılma testleri yapılmış numunelerin kırılma tokluklarını ifade etmektedir. Deneye tabi tutulmuş numunelerin deney sonucu bulunan maksimum kopma kuvvetleri (P_{max}) değerlerinin beşinci bölümde verilen denklemler (5.6, 5.11 ve 5.12)'de kullanılması sonucu hesaplanan K_I , K_{II} ve $K_{I/II}$ kırılma tokluğu değerleri standart sapmaları ile beraber Çizelge 7.6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.6 Mod I-II (mixed mode) kırılma tokluğu değerleri ($K_{I/II}$) (MPa.mm^{3/2})

Partikül Boyutu	Partikül Oranı	Açı								
		30°			45°			60°		
		K_I	K_{II}	$K_{I/II}$	K_I	K_{II}	$K_{I/II}$	K_I	K_{II}	$K_{I/II}$
%0 (sade)	%0	141,97	95,05	170,85 (4,87)	137,56	160,37	211,29 (9,19)	116,58	244,65	271,01 (26,02)
	%3	140,81	103,21	174,60 (17,15)	136,62	168,22	216,72 (13,58)	124,32	272,35	299,41 (17,77)
	%6	152,56	111,11	188,74 (15,93)	143,54	184,64	233,87 (13,66)	118,59	281,85	305,79 (5,54)
53μ	%9	159,57	94,22	185,35 (26,59)	136,90	169,82	218,17 (12,57)	119,35	265,90	291,45 (37,31)
	%3	147,14	100,07	177,97 (11,97)	142,90	172,13	223,75 (16,01)	125,54	279,69	306,57 (34,26)
	%6	152,82	116,78	192,34 (17,48)	146,21	192,30	241,59 (24,60)	125,87	294,91	320,67 (17,35)
9,5μ	%9	153,68	109,89	188,94 (5,67)	145,33	180,60	231,85 (12,61)	96,89	215,86	295,76 (7,45)
	%3	147,10	112,11	185,02 (13,02)	138,95	150,70	234,11 (18,34)	117,17	294,67	317,23 (41,01)
	%6	161,21	119,72	200,80 (1,90)	153,16	205,69	256,47 (7,57)	124,27	311,39	335,51 (58,86)
4,5μ	%9	161,23	114,07	197,52 (17,58)	157,24	198,76	253,45 (21,86)	121,72	278,30	303,76 (30,61)

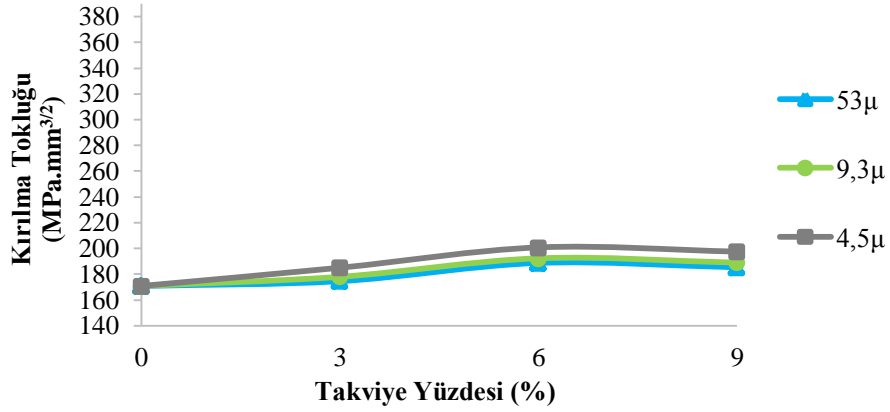
Yukarıdaki Çizelge 7.6'da 30°, 45° ve 60° açılarla deney yapılmış numunelerin kırılma tokluğu değerleri ($K_{I/II}$), kalın puntolarla gösterilmiştir. Altlarındaki parantez içerisinde gösterilen değerlerde numunelerin standart sapma değerleridir. Çizelgede tüm boyut ve oranlardaki numunelerin deney sonuçları ve bu sonuçlara göre hesaplanan tüm kırılma tokluğu değerleri gösterilmiştir. Çizelgede gösterilen K_I ve K_{II} kırılma tokluğu değerleri tüm açılar için farklı değerlerde olmasına rağmen aynı sembole gösterilmiştir. Bunun nedeni mixed mod ta üç açı değeri içinde iki yönlü (x ve y yönünde) bir gerilme söz konusu olduğu

için hem K_I hem K_{II} 'nin söz konusu olmasıdır. $K_{I/II}$ ise bu iki değer bileşkesi olup her açı değeri için farklı sonuca sahiptir. Çizelgede $K_{I/II}$ değerleri incelendiğinde açı değeri arttıkça kırılma tokluğunun da arttığı görülmüştür. Herhangi bir açıda değerlendirme yapacak olursak ta, tüm açılar için en yüksek $K_{I/II}$ değerlerinin her üç açı değeri içinde $4,5\mu$ partikül boyutunda ve %6 takviye oranlarında elde edildiği görülmüştür. En yüksek değer $335,51\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$ ile 60° lik çekme açısında %6 takviye oranında ve $4,5\mu$ takviye boyutunda olmuştur. En küçük $K_{I/II}$ değerinin ise $170,85\text{MPa}\cdot\text{mm}^{3/2}$ ile 30° lik çekme açısında sade numunede olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak ise her bir açı için en küçük değerler yine sade numunelerdedir.

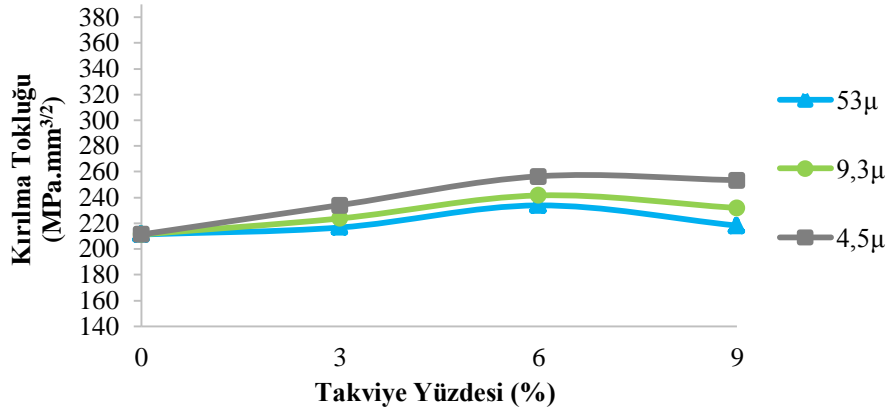
Mod I-II kırılma modunda 30° , 45° ve 60° lik açılarla yapılan deneylerde takviye oranına ve boyutuna göre beş tekrarlı numune ile çalışılmıştır. Beş tekrarlı çalışma olduğu için bu beş tekrarın ortalaması sonuçlara yansıtılmıştır. Bunun sonucunda her bir kırılma tokluğu ($K_{I/II}$) değerinin standart sapması oluşmuştur. Bu standart sapma değerleri ise daha rahat anlaşılabilmesi için Çizelge 7.6'da $K_{I/II}$ değerlerinin altında parantez içerisinde verilmiştir.

Çizelge 7.6'ya göre en küçük yani en iyi standart sapma değeri 1,9 ile 30° lik açıda $4,5\mu$ takviye boyutlu %6 takviye oranlı numunededir. En kötü yani yüksek değer ise 58,86 ile 60° lik açıda $4,5\mu$ takviye boyutlu ve %6 takviye oranlı numunededir. Standart sapma değeri 0 değerine ne kadar yakınsa deney sonuçları o kadar birbirine yakındır ve sağlıklı sonuçlar çıkar. Bu çizelgede genel olarak standart sapmalar 58,86 değeri hariç 41,01 ve altında çıkmıştır.

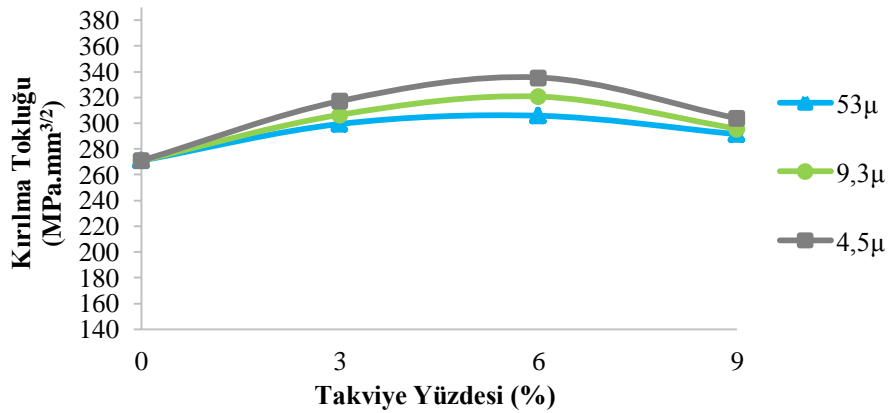
Çizelge 7.6'ya göre 30° , 45° ve 60° deki kırılma tokluğu değerlerinin değişimi ise Şekil 7.9'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.9 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 30° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi



Şekil 7.10 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 45° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi



Şekil 7.11 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 60° deki kırılma tokluğu değerlerinin ($K_{I/II}$) değişimi

Şekil 7.9, 7.10 ve 7.11 birlikte incelenirse kırılma tokluğu değerleri takviye ilavesi olmayan sade numunelerde her açı değerinde en küçük değere sahip olduğu görülür. Bu değerden sonra %6 takviye ilavesine kadar takviyenin tüm boyutları için bir artış olmuş ve maksimum değerler üç açı değerinde de %6 takviye oranında elde edilmiştir. Daha sonra ise düşüş yönlü bir eğilim olmuştur. Bunun en önemli sebebi matris ve fiber fazının SiC takviye ye doyması ve fazla takviyenin fiber ile matrisin birbirine tutunmasını engelleyerek arayüzeylerinde boşluğa sebep olmasındandır. Takviye boyutu en küçük olan numunelerde kırılma tokluğu tüm takviye oranlarında en büyük, takviye boyutu en büyük olan numunelerde ise bütün takviye oranlarında en küçük değerler elde edilmiştir. Bunun nedeni ise küçük parçacıkların malzeme arayüzeylerinde %6 orana kadar iyi bir şekilde yer edininp daha fazla yüzeye nüfus ederek mukavemeti artırmasıdır. Kırılma tokluğu değerleri, %9 takviye oranına sahip numunelerde % 6 takviye oranına göre düşük fakat sade numunelere ve %3 takviye oranlı numunelere göre daha yüksek çıkmıştır.

7.2.2.3. Mod II Kırılma Tokluğu

Bu mod, arcan test aparatı ile 90° de çekme deneyi yapılmış CTS numunelerinin kırılma tokluğunu ifade etmektedir. Deneye tabi tutulmuş numunelerin, deney sonucu bulunan maksimum kopma kuvvetlerinin (P_{max}) beşinci bölümde verilen denklem (5.12)'de kullanılması sonucu hesaplanan kırılma tokluğu (K_{II}) değerleri ile bunların standart sapmaları Çizelge 7.7'de gösterilmiştir.

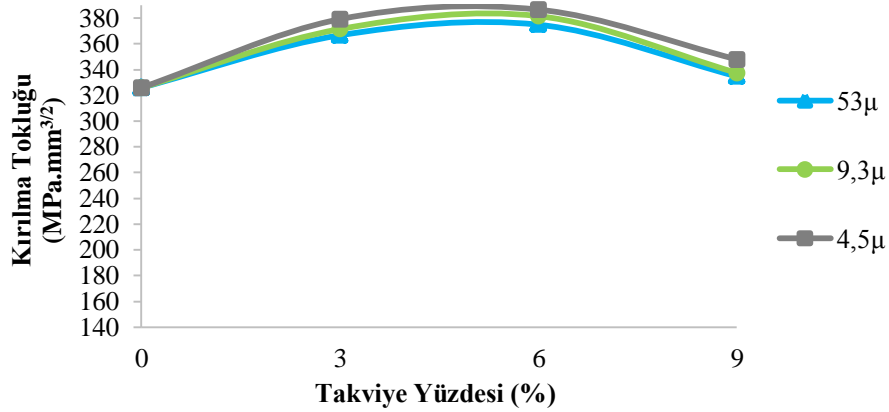
Çizelge 7.7 Mod II kırılma tokluğu değerleri (K_{II}) (MPa.mm^{3/2})

Açı	Partikül Oranı	Partikül Boyutu			
		Sade %0	53µ	9,5µ	4,5µ
90°	%0	K_{II}	325,95		
		Std. Sapma	31,44		
	%3	K_{II}	366,64	371,43	379,14
		Std. Sapma	18,47	12,68	26,46
	%6	K_{II}	374,84	381,54	386,59
		Std. Sapma	30,48	26,90	21,63
	%9	K_{II}	334,71	337,45	347,92
		Std. Sapma	26,27	49,63	72,58

Yukarıdaki Çizelge 7.7 incelendiği zaman dört farklı oran ve üç farklı boyutta silisyum karbür takviyeli CTS numunelerinin, arcan test aparatı ile 90° de yapılan çekme deneyleri sonucunda bulunan kırılma tokluğu (K_{II}) değerlerinde en yüksek değer 386,59MPa.mm^{3/2} ile 4,5µ takviye boyutunda ve %6 takviye oranında olduğu görülmektedir. K_{II} değerinin en küçük olduğu değer ise 325,95MPa.mm^{3/2} ile sade numunedir. Burada SiC parçacık ilavesi ile sade numuneye göre %18,60'lık bir artışla maksimum değer elde edilmiştir.

Çizelge 7.7'de gösterilen standart sapma değerlerine göre standart sapma değeri en iyi olan 12,68 ile 9,5µ takviye boyutlu ve %3 takviye oranlı numunedir. En kötü değer ise 72,58 ile 4,5µ takviye boyutlu ve %9 takviye oranlı numunedir. Bu çizelgede gösterilen standart sapmalar genel olarak dengesizdir ve iyi olan değerler olduğu gibi yüksek çıkan değerlerinde olduğu görülmektedir.

Farklı oranlarda ve farklı boyutlarda silisyum karbür takviye ilave edilmiş CTS numunelerinin Mod II durumundaki kırılma tokluğu değerleri, Çizelge 7.7 baz alınarak Şekil 7.12'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.12 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (µ) göre Mod II durumundaki kırılma tokluğu değerlerinin (K_{II}) değişimi

Şekil 7.12'ye göre kırılma tokluğu değerleri takviye ilavesi olmayan numunelerde en küçük değere sahiptir. Bu değerden sonra %6 takviye ilavesine kadar takviyenin tüm boyutları için bir artış olmuş daha sonra ise düşüş yönlü eğilim olmuştur. Burada her bir tanecik boyutu için maksimum değerler %6 takviye oranında elde edilmiştir. Takviye boyutu en küçük olan numunelerde (4,5µ), en yüksek kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. %9 takviye oranına

sahip numuneler % 6 takviye oranına göre düşüktür fakat sade numunelere ve %3 takviye oranlı numunelere göre kırılma tokluğu değerleri yüksektir. Grafik diğer modlardaki gibi bir eğilimdedir. Bunların nedeni de SiC takviyesinin %6'dan sonra malzemeye fazla gelmesinden dolayı matris-fiber bağlanmasını engellediği içindir.

Her üç mod içinde (mod I, mod II ve mod I-II) genel bir durum olarak SiC miktarının artmasının kırılma tokluğuna etkisinin pozitif yönde olduğunu rahatlıkla söylebiliriz. Bu durum %6 takviye oranında bütün sonuçlar için maksimum seviyeye ulaşmıştır. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda Teja ve arkadaşları [39] ile Ahmed ve arkadaşları [44] da SiC takviye miktarının arttıkça malzeme özelliklerinin iyileştiğini görmüşlerdir.

7.2.3. Kırılma Enerjisinin Karşılaştırması

Arcan test aparatı ile beş farklı açıda (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) yapılan deneyler sonucu hesaplanan kırılma tokluğu değerleri çizelgeler ve grafikler halinde verilmişti. Çalışmanın beşinci bölümünde de enerji dengesi anlatılmış ve enerji denklemleri verilmişti. Bu enerji denklemlerinden faydalanılarak farklı boyut ve farklı oranda silisyum karbür takviyeli numunelerin efektif modülleri denklem (5.17 ve 5.18) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplanan efektif modüller ile kırılma tokluğu değerlerinin bir arada kullanılması sonucu ise enerji değerleri hesaplanır. Bununla ilgili denklemlerden yine çalışmanın beşinci bölümünde bahsedilmiştir.

Kırılma enerjisi olarak kırılma tokluğu ile paralel bir yol izlenmektedir. Her kırılma tokluğuna sahip bir numunenin aynı zamanda enerjisi de mevcuttur. Aynı kırılma tokluğu gibi burada da mod I, mod I-II ve mod II durumları mevcuttur. Kırılma mekaniğinde izlenen yolların aynısı burada da izlenmiş ve her üç mod durumu için kırılma enerjisi değerleri hesaplanmıştır.

7.2.3.1. Mod I Durumundaki Enerji

Mod I durumu arcan test aparatı ile CTS numunelerinin 0° de çekmeye tabi tutulması idi. Daha önceden mod I için kırılma tokluğu değerleri belirlenip çizelge ve grafiklerle verilmişti. Aynı zamanda kırılma enerjisi değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli efektif modüller de numune takviye oranına ve boyutuna göre çizelge halinde verilmişti. Bu

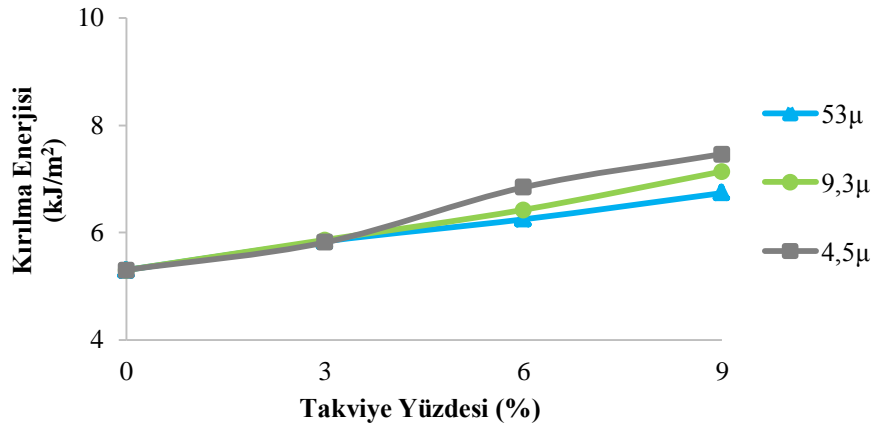
değerlerden yola çıkarak hesaplanan mod I durumundaki kırılma enerjisi değerleri ise, Çizelge 7.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.8 Mod I durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_I) (kJ/m^2)

Açı	Yüzde(%)	G_I			
		%0(Sade)	53 μ	9,3 μ	4,5 μ
0°	0	5,30			
	3		5,84	5,86	5,82
	6		6,25	6,42	6,84
	9		6,74	7,14	7,46

Çizelge 7.8’e göre kırılma enerjisi değeri en yüksek numune 4,5 μ takviye boyutlu ve %9 takviye oranlı numunededir. En küçük değer ise sade numunelerde oluşmuştur. Genel olarak takviye oranı arttıkça kırılma enerjisi değerleri de artmıştır.

Çizelge 7.8’deki değerlere göre kırılma enerjisinin değişim grafiği ise Şekil 7.13’de gösterilmiştir.



Şekil 7.13 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 0° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_I) değişimi

Burada numunelerin kırılma enerjileri, %0 (sade) takviye oranından itibaren %9 takviye oranlıya kadar doğrusal bir artış göstermiştir. En küçük boyutlu numunelerde kırılma enerjisi değeri maksimum, en büyük boyutlu numunelerde ise tüm takviye oranları için minimumdur.

Kırılma enerjisinin kırılma tokluğu diyagramları ile paralel çıkmamasının sebebi; kırılma enerjisinin kırılmanın karesiyle ilişik olmasından dolayıdır. Beş tekrarlı deneyler olduğu için ve her bir serinin deneyinin sonuçları arasında farklılıklar olmasından dolayı böyle bir durum söz konusu olmuştur. Burada toz takviyesi ile kırılma enerjisi doğru orantılıdır.

7.2.3.2. Mod I-II (mix mode) Durumundaki Enerji

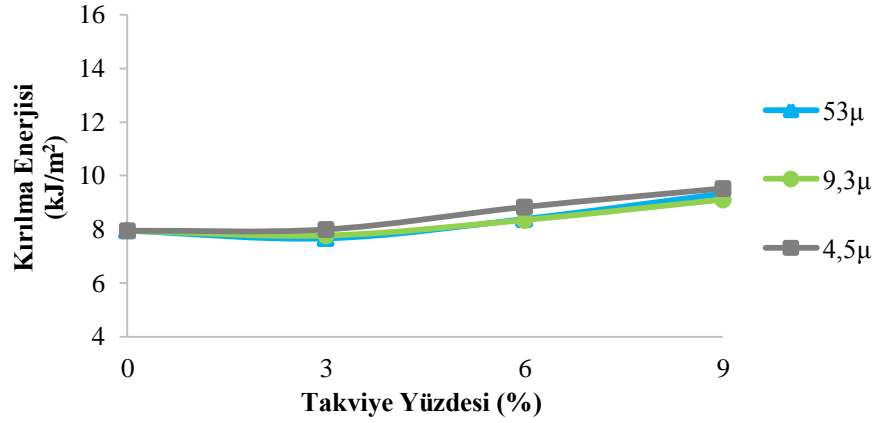
Mod I-II durumu arcan test aparatı ile CTS numunelerinin 30°, 45° ve 60° de çekmeye tabi tutulması idi. Daha önceden mod I-II için tüm açı değerleri için kırılma tokluğu değerleri belirlenip çizelge ve grafiklerle verilmişti. Aynı zamanda kırılma enerjisi değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli efektif modüller de numune takviye oranına ve boyutuna göre çizelge halinde verilmişti. Bu değerlerden yola çıkarak hesaplanan mod I-II durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_T) ise, Çizelge 7.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.9 Mod I-II durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_T) (kJ/m²)

Açı	30°				45°				60°			
	Boyut											
Yüzde(%)	Sade	53μ	9,3μ	4,5μ	Sade	53μ	9,3μ	4,5μ	Sade	53μ	9,3μ	4,5μ
G_T	0	7,95			12,74				20,55			
	3	7,66	7,77	8,00	11,82	12,38	12,90		22,67	23,55	24,04	
	6	8,39	8,35	8,84	12,97	13,33	14,57		22,75	24,36	25,87	
	9	9,34	9,11	9,53	13,45	13,89	15,56		20,01	22,52	23,33	

Çizelge 7.9 incelendiğinde genel olarak açı değeri arttıkça kırılma enerjisi değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durum yine kırılma mekaniği değerleri ile paralel durum göstermiştir. En küçük değerler 30° de %3 takviye oranında elde edilmiştir. En yüksek değerler ise 60° de %6 takviye oranı 4,5μ takviye boyutunda elde edilmiştir.

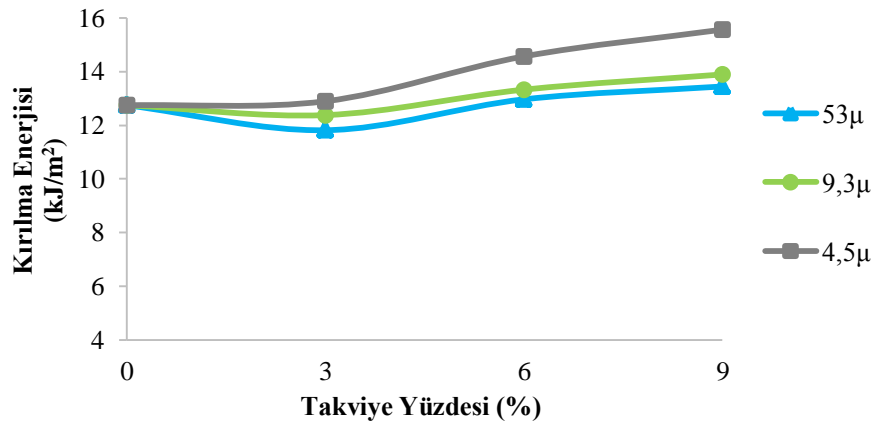
Çizelge 7.9'da ki değerlere göre 30° deki kırılma enerjisinin değişim grafiği ise Şekil 7.14'te gösterilmiştir.



Şekil 7.14 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 30° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_T) değişimi

Burada numunelerin kırılma enerjileri tüm takviye boyutları için, %0 (sade) takviye oranından itibaren %3 takviye oranlı numunelere kadar bir azalma göstermiştir. Daha sonra ise %9 takviye oranına kadar artış göstermiştir. Maksimum değer %9 takviye oranında ve $4,5\mu$ takviye boyutunda gerçekleşmiştir.

Çizelge 7.9'daki değerlere göre 45° deki kırılma enerjisinin değişim grafiği ise Şekil 7.15'te gösterilmiştir.

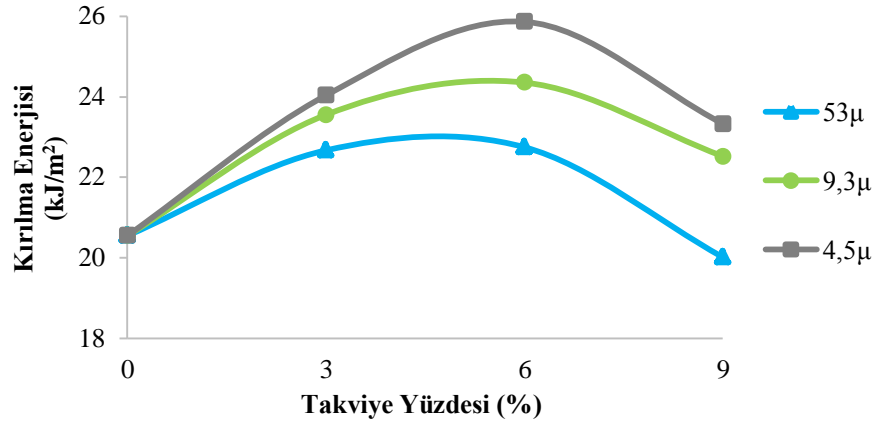


Şekil 7.15 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 45° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_T) değişimi

Şekil 7.15'e göre ise kırılma enerjisi değerlerinde, sade numunelerden %3 takviye oranlı numunelere kadar bir azalma mevcuttur. Azalmanın nedeni numuneler arasındaki boyut

farklılıkları ve çatlak uzunluğudur. Daha sonra ise artışa geçmiştir. Maksimum değerler %9 takviye oranlarında gerçekleşmiştir. Boyutlar arasındaki sıralamada ise en küçük paneli takviyelerin sayısal değerleri büyük takviyeli tanelere göre daha yüksektir.

Çizelge 7.9'daki değerlere göre 60° deki kırılma enerjisinin değişim grafiği ise Şekil 7.16'da gösterilmiştir.



Şekil 7.16 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 60° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_T) değişimi

Şekil 7.16'da kırılma enerjisi değerleri sade numunelerde en düşük değerlere sahiptir. Daha sonra değerler %6 takviye oranına kadar yükselmiş ve sonra düşüşe geçmiştir. Küçük boyutlu numunelerde her takviye oranı için değerler, büyük takviye boyutlu olanlara göre daha büyüktür. Grafik eğrisi aynı derecedeki kırılma tokluğu değerleri ile paralellik göstermiştir.

7.2.3.3. Mod II Durumundaki Enerji

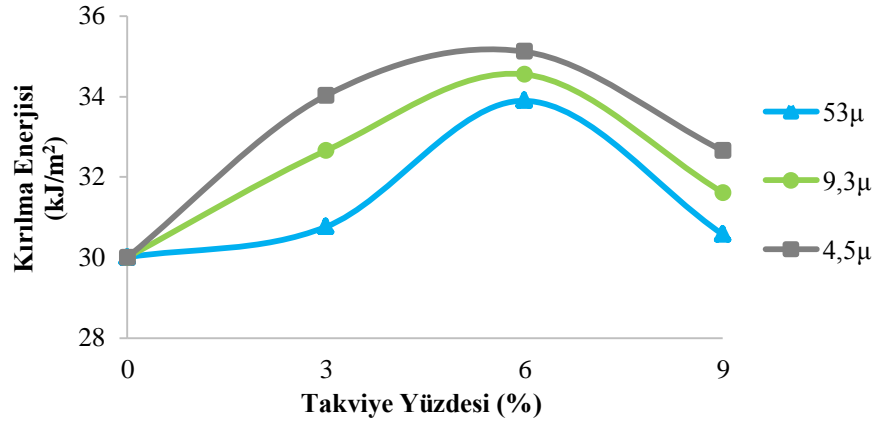
Mod II durumu arcan test aparatı ile CTS numunelerinin 90° de çekmeye tabi tutulması idi. Daha önceden mod II için kırılma tokluğu değerleri belirlenip çizelge ve grafiklerle verilmişti. Aynı zamanda kırılma enerjisi değerlerinin hesaplanabilmesi için gerekli efektif modüller de numune takviye oranına ve boyutuna göre çizelge halinde verilmişti. Bu değerlerden yola çıkarak hesaplanan mod II durumundaki kırılma enerjisi değerleri ise, Çizelge 7.10'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.10 Mod II durumundaki kırılma enerjisi değerleri (G_{II}) (kJ/m^2)

Açı	Yüzde(%)	G_{II}			
		%0(Sade)	53 μ	9,3 μ	4,5 μ
90°	0	30,01			
	3		30,76	32,66	34,03
	6		33,90	34,55	35,12
	9		30,57	31,61	32,65

Çizelge 7.10'a göre kırılma enerjisi değeri en yüksek numune 4,5 μ takviye boyutlu ve %6 takviye oranlı numunededir. En küçük değer ise sade numunelerde oluşmuştur.

Çizelge 7.10'da ki değerlere göre 90° deki kırılma enerjisinin değişim grafiği ise Şekil 7.17'de gösterilmiştir.



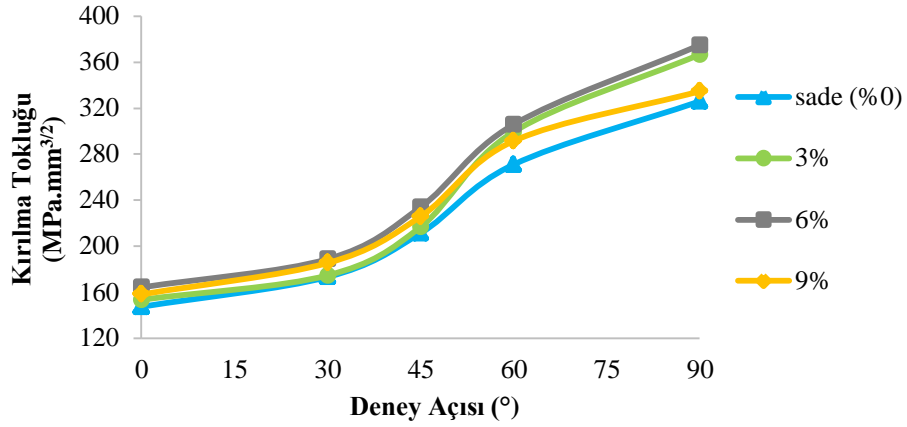
Şekil 7.17 Takviye yüzdesine (%) ve takviye boyutuna (μ) göre 90° deki kırılma enerjisi değerlerinin (G_{II}) değişimi

Şekil 7.17'deki grafiğe göre kırılma enerjisi değerleri sade numunelerde en düşük değerlere sahiptir. Daha sonra değerler %6 takviye oranına kadar yükselmiş ve daha sonra düşüşe geçmiştir. En küçük boyutlu numunelerde her takviye oranı için değerler, en büyük takviye boyutlu olanlara göre daha büyüktür. Grafik eğrisi aynı derecedeki kırılma tokluğu değerleri ile paralellik göstermiştir.

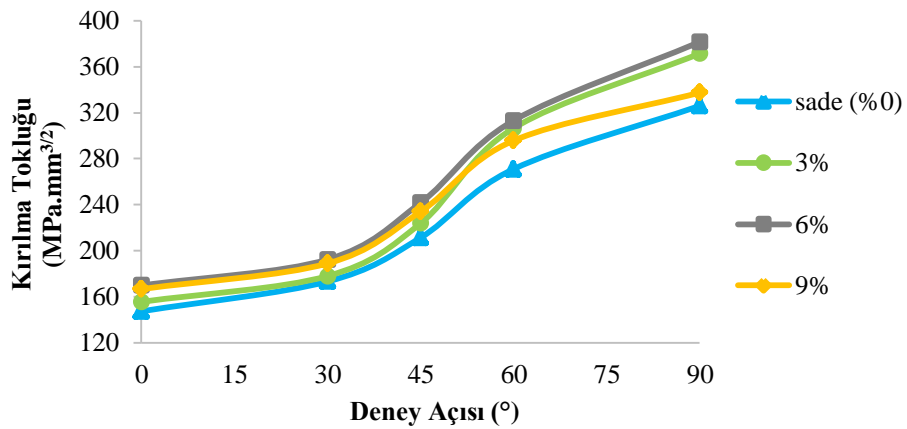
7.2.4. Kırılma Tokluklarının Modlara Göre Karşılaştırılması

Kırılma tokluğu deney sonuçlarının karşılaştırılmasında tüm modlar için grafik ve çizelgeler verilmiştir. Burada mod I durumu, 0° için, mod I-II durumu, 30° , 45° ve 60° için ve mod II durumunda 90° için kırılma modları idi. Toplamda beş farklı açı değerimiz olduğu için bu açılar arasında da kırılma modlarını kıyaslayabiliriz. Üç farklı boyutta takviye elemanımız olduğu için her boyut içinde daha önceden bulunan ve verilen değerler için ayrı ayrı bir kıyaslama yapılmıştır.

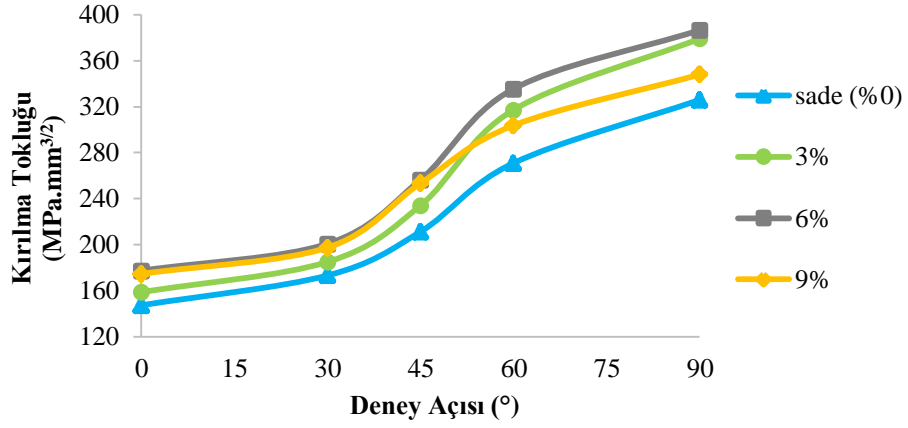
53μ , $9,3\mu$ ve $4,5\mu$ takviye boyutundaki numunelerin tüm açı değerleri için kırılma tokluğu değerleri takviye oranına göre grafiksel olarak Şekil 7.18, 7.19 ve 7.20’de gösterilmiştir.



Şekil 7.18 53μ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına ($^\circ$) göre kırılma tokluklarının değişimi



Şekil 7.19 $9,3\mu$ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına ($^\circ$) göre kırılma tokluklarının değişimi

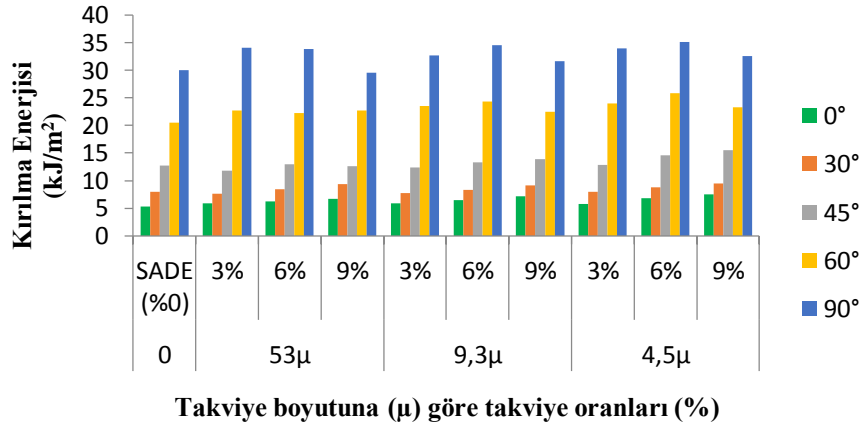


Şekil 7.20 4,5 μ takviye boyutlu numunelerin takviye oranına (%) ve deney açısına (°) göre kırılma tokluklarının değişimi

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü üzere kırılma tokluğu değerlerinin değişimi, açı değerlerine göre kıyaslanması neticesinde daha net anlaşılabilir. Buna göre ise, tüm takviye boyutları için 0° de (açılma modunda) kırılma tokluğu değeri en düşük, 90° de (kayma modunda) ise en yüksek değere sahiptir. Mod I durumu olan 0° den başlayarak mod II durumuna (90°) kadar değerler artmıştır. Bunun nedeni ise numune açılma modunda iken çok çabuk kırılır. Çünkü uyguladığımız kuvvet çatlak yönüne diktir. Kayma modunda ise numuneye uygulanan kuvvet çatlak yönüne paraleldir ve numunenin direnci yükselmektedir. 0° den itibaren 90° ye kadar uygulanan kuvvet git gide çatlak yönüne paralel olduğu için Ayrıca takviye oranı olarak ta bakılırsa %6 takviye oranının diğer takviye oranlarına göre en iyi sonucu verdiği açıkça görülmektedir. Bu grafikten çıkarabileceğimiz en iyi ve en kapsamlı sonuç ise açı değerlerinin arttıkça kırılma tokluğu değerlerinin arttığı ve daha iyi sonuç verdiğidir.

7.2.5. Kırılma Enerjisinin Modlara Göre Karşılaştırılması

Kırılma tokluğu değerlerinin tüm modlara göre kıyaslamasından sonra kırılma enerjisinin de modlara göre karşılaştırılması yapılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılması başlığında kırılma enerjisi değerleri tüm modlar için grafik ve çizelgeler halinde verilmişti. Buradan yola çıkarak bu kırılma enerjisi değerlerinin açı değerleri ile arasındaki ilişkilerini daha kolay görmek ve anlayabilmek için Şekil 7.21 grafiği verilmiş olup bu grafikte; 53 μ , 9,3 μ ve 4,5 μ takviye boyutundaki numunelerin tüm açı değerleri için kırılma enerjisi değerleri takviye oranına göre grafiksel olarak gösterilmiştir.



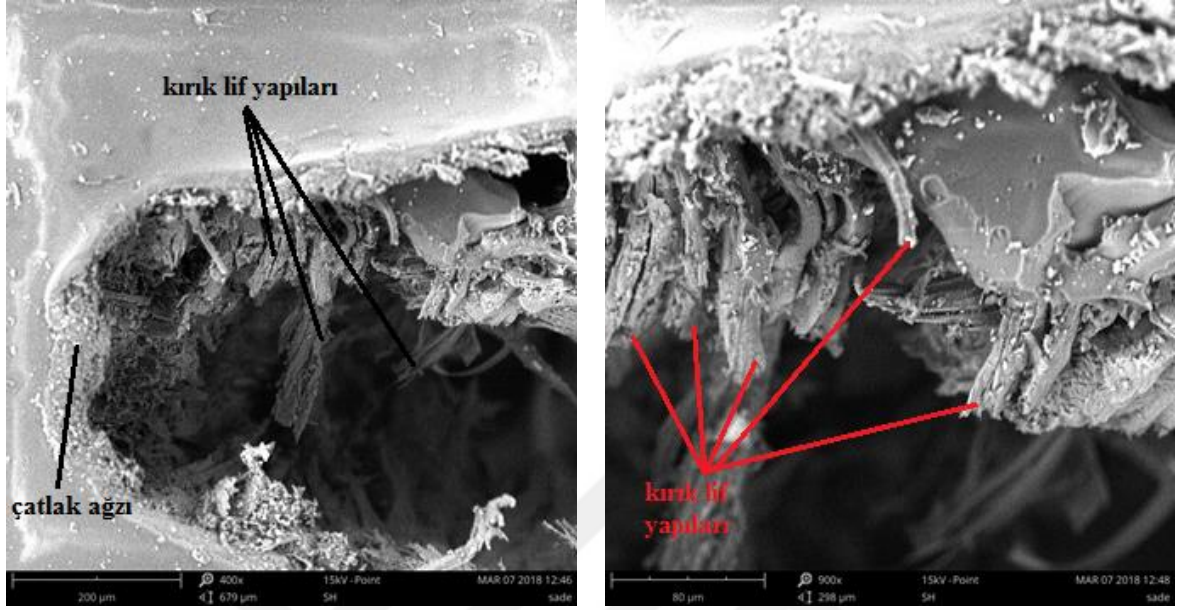
Şekil 7.21 53μ, 9,3μ ve 4,5μ takviye boyutundaki numunelerin deney açısına (°) ve takviye oranlarına (%) göre kırılma enerjilerinin (G) değişimi

Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü üzere kırılma enerjisi değerlerinin değişimi, açı değerleri ile mukayese edildiğinde daha net anlaşılabilir. Buna göre ise, tüm takviye boyutları için 0° de kırılma enerjisi değeri en düşük, 90° de ise en yüksek değere sahiptir. Mod I durumu olan 0° den başlayarak mod II durumuna (90°) kadar değerler artmıştır. Ayrıca takviye oranı olarak ta bakılırsa %6 takviye oranının diğer takviye oranlarına göre en iyi sonucu verdiği açıkça görülmektedir. Sade numunelerin ise genel olarak en düşük enerji değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu grafik eğrileri kırılma tokluğu grafikleri ile paralellik göstermektedir. Bu grafikten çıkarabileceğimiz en iyi ve en kapsamlı sonuç ise; açı değerlerinin arttıkça kırılma enerjisi değerlerinin arttığı ve daha iyi sonuç verdiğidir.

7.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri ve Analizleri

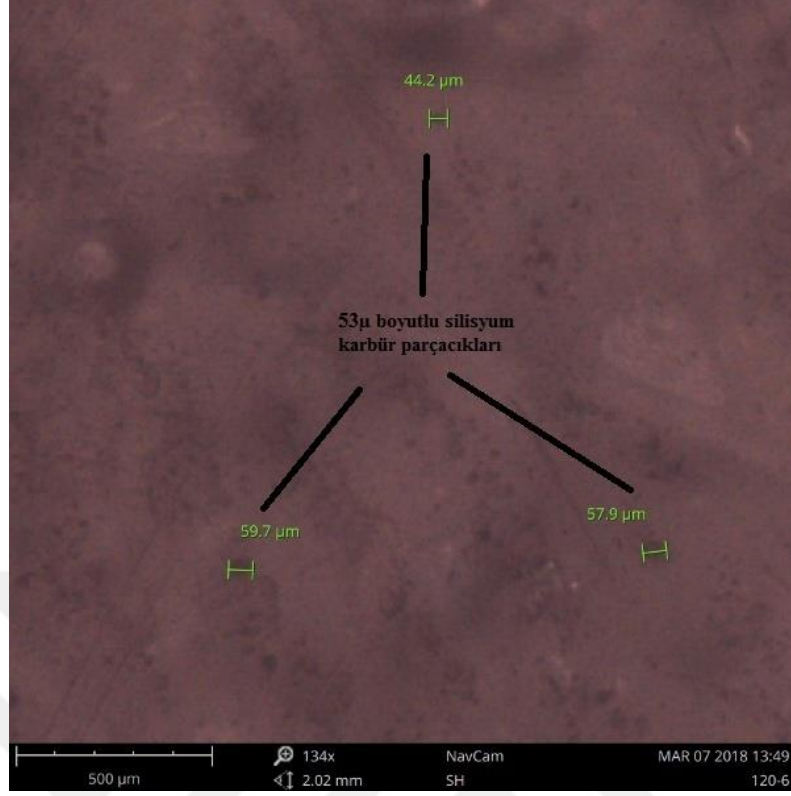
Deneysel çalışmalardan sonra kırılan CTS numunelerin, scanning electron microscopy (SEM) cihazı kullanılarak mikro boyutta içyapıları gözlemlenmiştir. Bunun için Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Laboratuvarında bulunan son model SEM cihazı kullanılmıştır. Burada her bir farklı takviye oranlı ve takviye boyutlu numunelerin kırılma bölgelerinden, yaklaşık olarak 1cm x 1cm ölçülerinde küçük parçalar kesilmiş ve SEM cihazına yerleştirilmiştir. Cihazın olanakları kullanılarak kırılma bölgeleri incelenmiştir. Çıkan sonuçlar tatmin edici olup üretmiş olduğumuz kompozit numunelerin içyapısının istediğimiz düzeyde olduğunu göstermekte, üretim hatasının ise çok düşük olduğu kanısına varılmıştır.

Sem cihazında mikro yapısına bakılan numunelerden takviye ilave edilmemiş (%0) olan numunenin mikroskobik görüntüleri Resim 7.1’de gösterilmiştir.



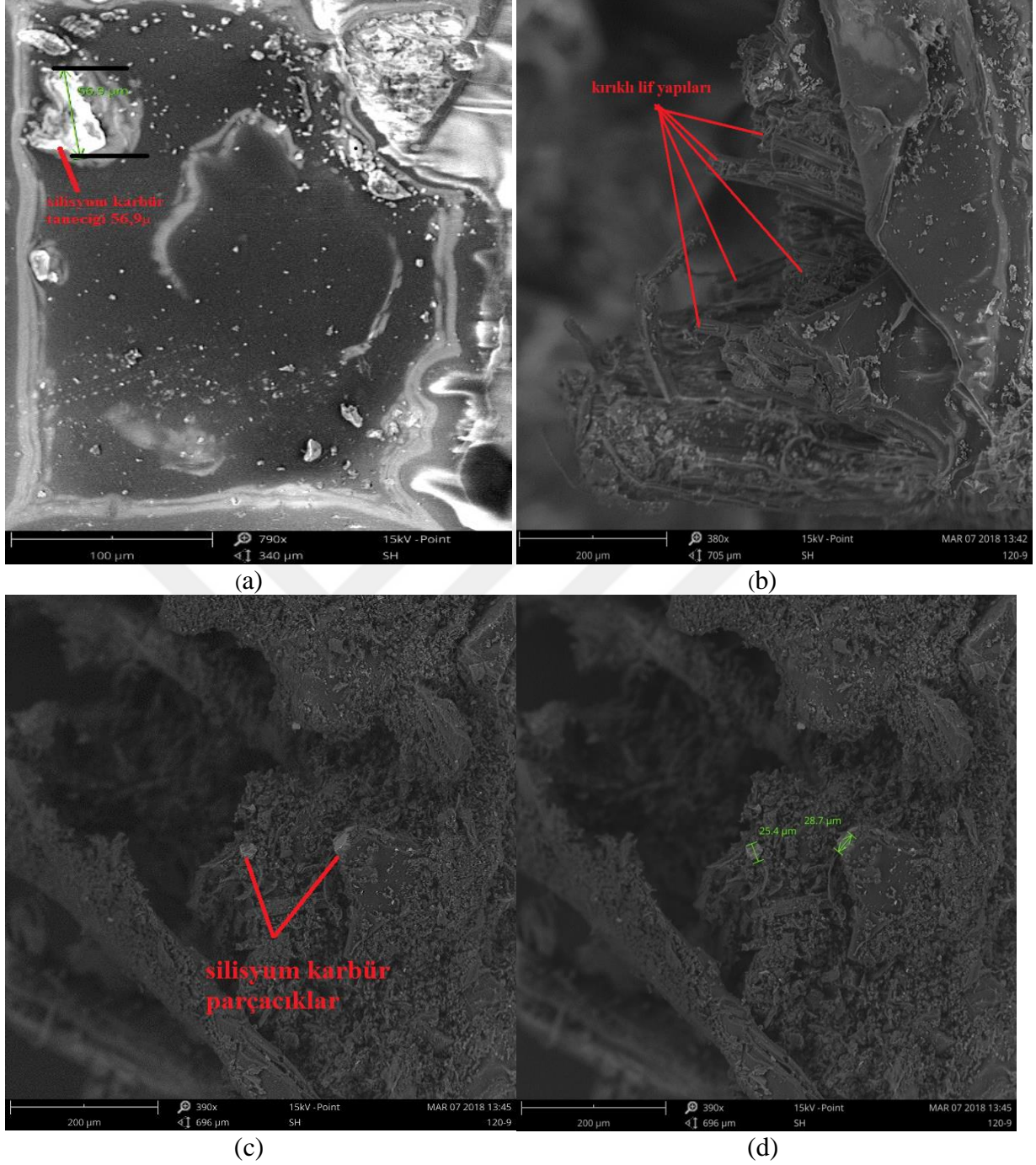
Resim 7.1 Takviyesiz (%0) numunelerin SEM görüntüleri

Yukarıdaki şekil incelendiği zaman numunelerin çatlak ağzından kırılmaya başladığı ve fiberlerin kopması görülmektedir. Numune zayıf olan çatlak bölgesinden kırılmaya başlamıştır.



Resim 7.2 53µ boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü

Yukarıdaki görüntüde ise 53µ boyutlu silisyum karbür tanecik içeren numunenin dışından çekilmiş SEM fotoğrafı görünmektedir. Yeşil renkteki rakamlar orijinal olup mikroskobik olarak çekim esnasında ölçülen değerlerdir. Burada silisyum karbür taneciklerinin ortalaması 53µ olup genel olarak taneciklerin bu değere yakın boyutta olduğunu görmekteyiz. Ayrıca iç yapılarıdaki görüntüleri de aşağıda Resim 7.3'te gösterilmiştir.



Resim 7.3 53μ boyutlu numunelerin değişik SEM görüntüleri

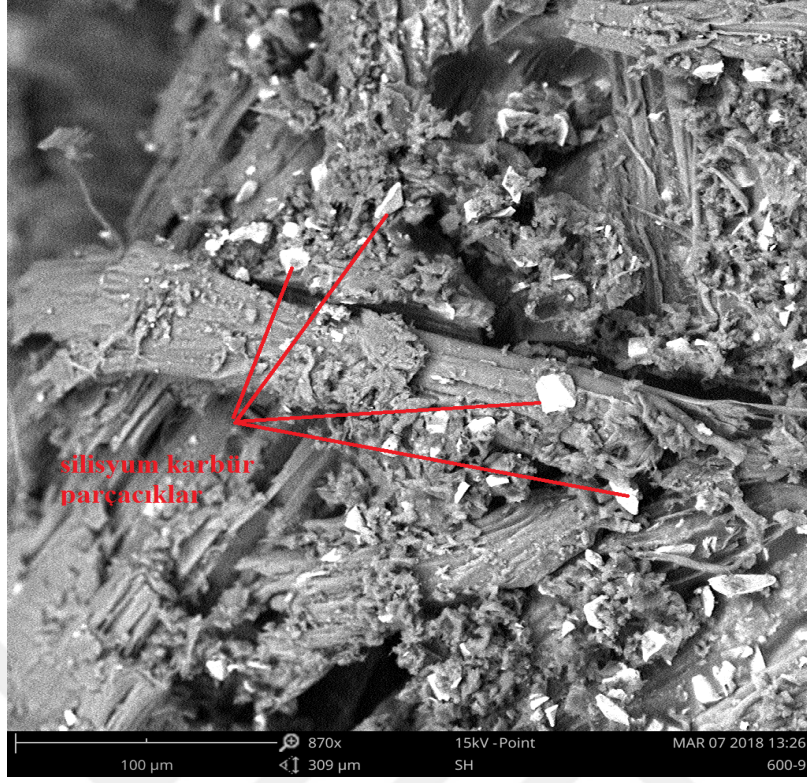
Yukarıdaki resimlerde yine malzemenin fiberlerden koptuğu kırık lif yapıları sayesinde anlaşılmaktadır. Ayrıca silisyum karbür parçacıklar rahatlıkla görünmektedir. 53μ boyutlu silisyum karbürler fabrikadan temin edildiği için boyutları da farklı farklı olmaktadır. Fabrikasyon olarak boyut değerleri ortalamadır. Onun için Resim 7,3d'deki görüntüde görüldüğü üzere numune iç yapılarında değerler farklı olup kimisi büyük kimisi küçük değerde olabilmektedir. Fabrikasyon olarak aralarda küçük boyutlar olabileceği gibi

kompozit numunelerin üretim esnasında pişirmeden dolayı ve çatlak ağzı açım esnasında yanmadan dolayı da boyut değişimleri olabileceğini öngörmekteyiz.

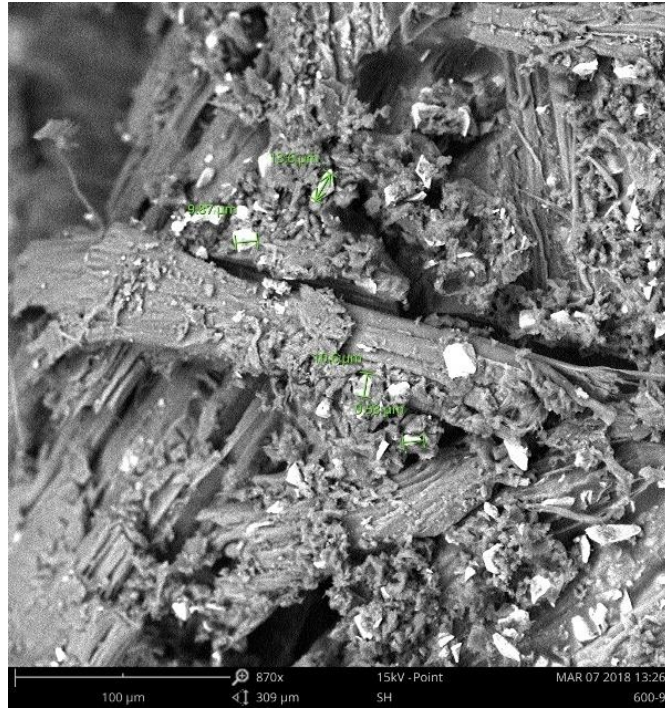


Resim 7.4 9,3µ boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü

Resim 7.4'te ise 9,3µ boyutlu numunenin kırık lif bölgesi gösterilmektedir. Bu sayede malzemenin lifli olması nedeniyle ilk kırılmaya başlamanın bu liflerden gerçekleştiğini söyleyebiliriz.

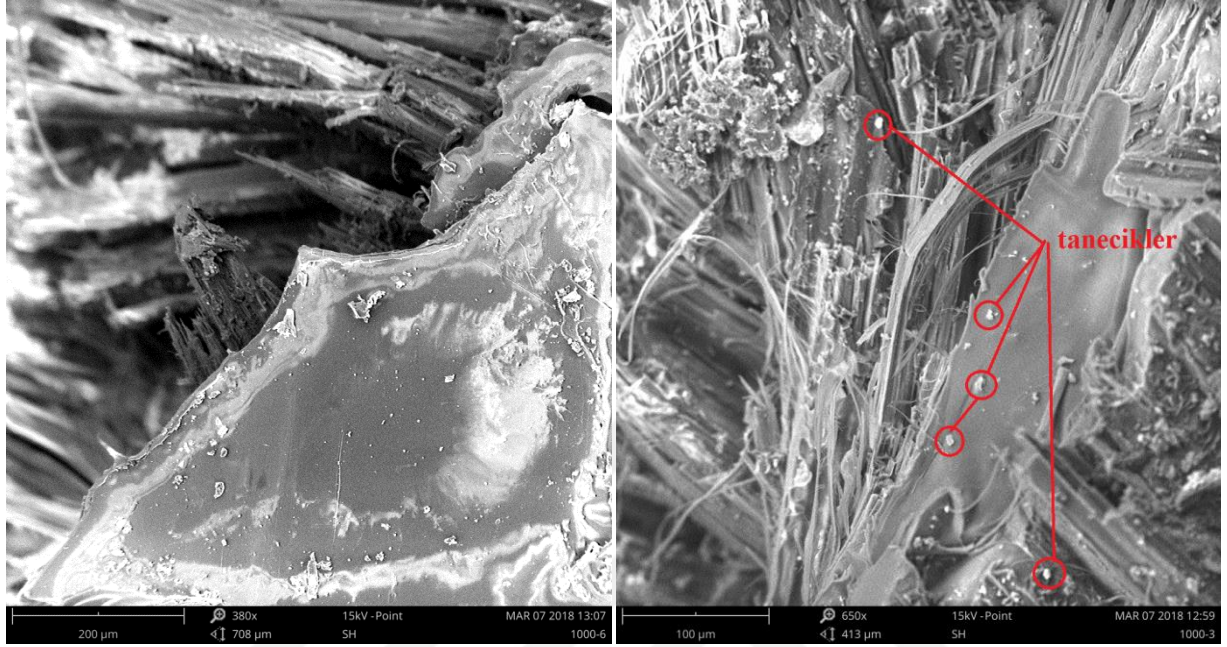


Resim 7.5 9,3µ tanecik boyutlu numunede bulunan silisyum karbür toz parçacıklarının SEM görüntüsü



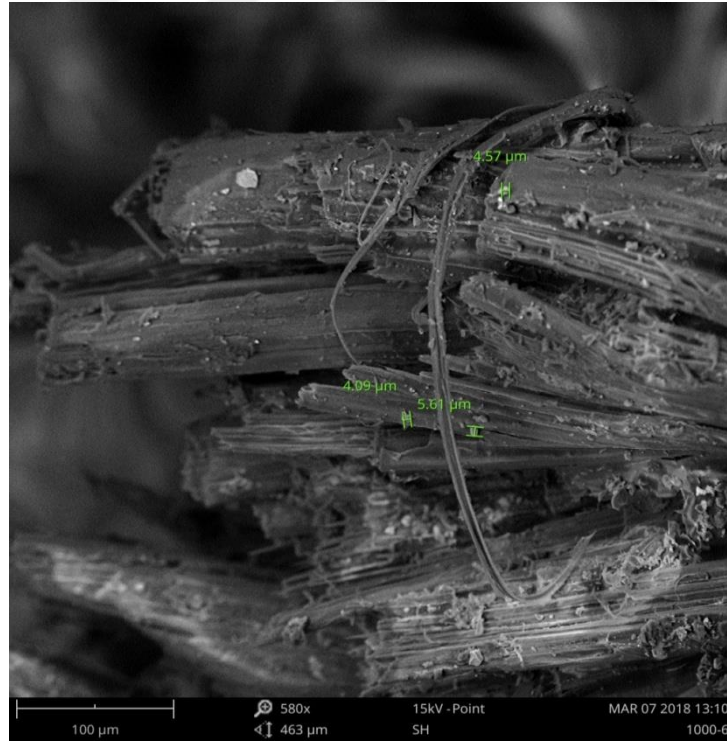
Resim 7.6 9,3µ tanecik boyutlu numuneden çekilmiş SEM görüntüsü

Yukarıda şekillerde $9,3\mu$ boyutlu numuneden çekilmiş görüntüler görülmektedir. Hem silisyum karbür taneciklerin dağılımı hem de orijinal boyutları gösterilmektedir. Hemen hemen tüm boyutlar $9,3\mu$ civarındadır.



(a)

(b)



(c)

Resim 7.7 $4,5\mu$ tanecik boyutlu numunelerden çekilmiş SEM görüntüleri

Resim 7.7a'da epoksi bölgesi ve altında kalan kırık fiberler görünmektedir. Resim 7.7b'de ise silisyum karbür tanecikler görünmektedir. Resim 7.7c'de ise tanecik boyutlarının mikroskopik zoomlama esnasında çekilmiş boyutları görünmekte olup boyutların $4,5\mu$ civarında olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak tüm farklı boyutlarda silisyum karbür içeren numunelerin SEM fotolarına bakılmış aşağıdaki kanıtlara varılmıştır.

- Silisyum karbür parçacıklara numunelerin kırık bölgelerinde rastlanılmış olması sonucu, üretim metodunun ve aşamalarının doğruluk payını ve verimlilik yüzdesini artırmaktadır.
- Silisyum karbür parçacıkların malzeme içinde istenilen boyutlarda genel olarak kaldığını ve kimyasal reaksiyona girip malzeme özelliğini bozmadığını görmekteyiz.
- Numunelerin genel olarak fiberlerin kopması sonucu ve çatlak bölgelerinden kırıldığı resimlerden açıkça görülmektedir.
- En nihayetinde mikro yapıdaki genel görünüşler üretimimizin doğru olduğunu ve istediğimiz şekilde malzemenin hasara uğradığını göstermektedir.

7.4. Sonuçlar ve Tartışma

Çalışmada, üç farklı boyutta (53μ , $9,3\mu$ ve $4,5\mu$) ve dört farklı oranda (%0, %3, %6 ve %9) silisyum karbür takviye edilmiş jüt/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğunu incelemiş bulunmaktayız. Bunun için CTS numunesi kullanılmış ve numuneler arcan test aparatı ile beş farklı açıda (0° , 30° , 45° , 60° ve 90°) çekme deneyine maruz bırakılmıştır. Ayrıca bu kompozitlerin mekanik özelliklerini ve kırılma enerjilerini de inceledik. Deneysel olarak çıkan sonuçlar, bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle teorik olarak ta bulunmuş ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Çalışmanın özetini geçecek olursak ta aşağıdaki maddeleri sıralayabiliriz.

- 1- Projemiz Uşak Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiş olup tarafımıza ödenek sağlanmıştır.

- 2- Kompozit malzeme üretimi için gerekli epoksi, jüt, silisyum karbür parçacıklar ve muhtelif araç gereç piyasadan temin edilmiştir.
- 3- Altı tabakalı kompozit plakaların üretimi Uşak Üniversitesi Laboratuvarında bulunan hidrolik pres vasıtasıyla el yatırma yöntemiyle 80cm x 100cm ölçülerinde gerekli sayıda üretilmiştir.
- 4- Üretimi yapılan kompozit plakalar, standartlarda belirtilen ölçülerde numuneler elde edebilmek için piyasada kestirilmiştir.
- 5- Toplamda beş yüz adet numune kestirilmiş olup bu numuneler bazı işlemlerden (delik delme, çatlak ağzı açma) geçtikten sonra Uşak Üniversitesi Laboratuvarında bulunan üniversal çekme – basma cihazı ve Uşak Pull-Tech FRP Mekanik Test Laboratuvarında bulunan U – test marka üniversal test cihazında teste tabi tutulmuştur.
- 6- Deney sonunda bulunan değerlerle numunelerin mekanik özellikleri, kırılma toklukları ve kırılma enerjileri tek tek hesaplanmıştır.
- 7- Deney sonrası kırılan CTS numunelerinin Sem görüntüleri alınmış ve numune içyapıları incelenmiştir.
- 8- Deney sonucu bulunan değerlerle bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan değerler karşılaştırılıp irdelenmiştir.
- 9- Tüm hesaplamalar ve karşılaştırmalar bittikten sonra genel bir değerlendirme ile çalışma sonuca bağlanmıştır.

Yukarıdaki basamaklarda genel olarak izlenen yol anlatılmıştır. Yaptığımız literatür araştırmaları sonucu böyle bir çalışma olmamasından dolayı çalışmamızın amacına ulaştığını düşünmekte ve doğruluk derecesi yüksek değerler elde etmiş bulunmaktayız. Genel olarak ana amacımız kompozitlere ilave edilen partiküllerin boyutlarının ve oranlarının değişiminin kırılma tokluğuna etkisinin nasıl olduğudur. Bulduğumuz ve sonuca ulaştığımız değerler aşağıda maddeler halinde anlatılmıştır.

- Yapılan mekanik özellikler ve kırılma tokluğu deneylerinde en temel sonuç olarak %6 silisyum karbür (SiC) takviyeli ve 4,5 μ SiC takviye boyutlu olan tüm numunelerin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir.
- Yapılan deneyler neticesinde sade numunelerin (SiC takviyesi olmayan) ise en düşük kırılma tokluğu değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- SiC takviyesinin kompozit malzemeler üzerinde belirli miktara kadar olumlu bir yanı olduğunu ve mukavemeti artırarak kırılma tokluğunu iyileştirdiğini söyleyebiliriz.
- Bu çalışmada %6 takviye oranında maksimum değerler elde edilmiş olup bu değerden sonra kırılma tokluğu değerleri düşüş göstermiştir. Bu %6'lık değer in çalışmada kullanılan epoksi reçine ve doğal jüt kullanımının etkisi ile oluştuğunu düşünmekteyiz. Çünkü fazla SiC miktarı fiberin (doğal jüt) matris e yapışmasını engellemiş ve arayüzeylerinde boşluğa neden olmuştur.
- Çalışmada üç farklı SiC boyut arasından en iyi değerleri en küçük boyutta olan 4,5 μ vermiştir. Bunun nedeninin ise matris veya fiberin mikroyapısındaki boşlukları küçük tanelerin daha çok yüzeye temas etmesinden dolayı tutunduğu malzemeye daha iyi nüfus etmesidir.
- Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlarla kıyaslandığında ise nümerik sonuçlar deneysel sonuçlara, düzlem gerilme hali için maksimum %9,23 hata payı ile yaklaştığı görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bulut Y., Erdoğan Ü.H., 2013, "Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı", *Tekstil ve Mühendis* 18 (82).
- [2] Khan Z., Yousif B. F., Islam M., 2017, "Fracture behaviour of bamboo fiber reinforced epoxy composites", *Composites Part B: Engineering* 116: 186-199.
- [3] Shrivastava R., vd., 2017, "Mechanical Properties of Coir/ G Lass Fiber Epoxy Resin Hybrid Composite", *Materials Today: Proceedings* 4 (2), Part A, 3477-83.
- [4] Aral, N.,Berkal Ö. B., Bakkal M., Sadıkoğlu T. G., 2009,"Investigation of impact and tensile behaviours of waste fabric reinforced polymer composites", *Tekstil ve Konfeksiyon* 19 (2009): 139-144.
- [5] Gupta M.K., Srivastava R.K., 2015, "Mechanical Properties of Hybrid Fibres Reinforced Polymer Composite: A Review", *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 55 (11).
- [6] Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoo N., Trada M., 2011, "A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites", *Composites Part B: Engineering* 42 (4): 856-73.
- [7] Saba N., Jawaid M., Allothman O. Y., Paridah M. T., 2016, "A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites", *Construction and Building Materials* 106: 149-59.
- [8] Arifuzzaman Khan G. M., Terano M., Gafur M. A., Alam M. S., Ocak 2016, "Studies on the mechanical properties of woven jute fabric reinforced poly(l-lactic acid) composites", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 28 (1): 69-74.
- [9] Zabihzadeh S. M., Omidvar A., Marandi M.A.B., 2011, "Physical and Mechanical Properties of Rapeseed Waste-Filled LLDPE Composites", *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 24 (4): 447-58.
- [10] Elbadry E.A., Aly-Hassan M.S., Hamada H., 2012, "Mechanical Properties of Natural Jute Fabric/Jute Mat Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites", *Advances in Mechanical Engineering*, 2012.
- [11] Campilho R. D. S. G., vd., 2013, "Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites", *Composites Part B: Engineering* 50: 120-26.
- [12] Liu Q., Hughes M., 2008, "The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 39 (10): 1644-52.

- [13] Patel H.K., Balasubramanian V., Peijs T., 2017, "The Fracture Toughness of Natural Fibre- and Glass Fibre-Reinforced SMC". *Plastics, Rubber and Composites* 46 (17): 1-10.
- [14] Mustapha K., Annan E., Azeko S.T., 2016, "Strength and Fracture Toughness of Earth-Based and Natural Fiber-Reinforced Composites", *Advanced Materials Research*.
- [15] Ravandi M., Teo W.S., Tran L.Q.N., Yong M.S., Tay T.E., 2016, "The effects of through-the-thickness stitching on the Mode I interlaminar fracture toughness of flax/epoxy composite laminates", *Materials & Design* 109 (16): 659-69.
- [16] Kim B.C., Park S.W., Lee D.G., 2008, "Fracture toughness of the nano-particle reinforced epoxy composite", *Composite Structures* 86 (1): 69-77.
- [17] Lauke B., 2008, "On the effect of particle size on fracture toughness of polymer composites", *Composites Science and Technology* 68 (15): 3365-72.
- [18] Watanabe H., Khera S.C., Vargas M.A., Qian F., 2008, "Fracture Toughness Comparison of Six Resin Composites", *Dental Materials* 24 (3): 418-25.
- [19] El-Hajjar R., Haj-Ali R., 2004, "In-plane shear testing of thick-section pultruded FRP composites using a modified Arcan fixture", *Composites Part B: Engineering* 35 (5): 421-28.
- [20] Shamel M., Choupani N., 2016, "Fracture Criterion of Woven Glass-Epoxy Composite Using a New Modified Mixed-Mode Loading Fixture", *International Journal of Applied Mechanics* 8 (2): 1650015.
- [21] Gurubaran, P., Afendi M., Kanasan N., Haftirman I., Tasyrif Md., Basaruddin K. S., 2016, "Mixed mode loading fracture toughness of Arcan adhesive joint: Effect of surface roughness", *AIP Conference Proceedings* 1775 (1): 30-38.
- [22] Alfonso L., Uguen A., Badulescu C., Cognard J.Y., Bonnemains T., Lolive E., Carrere N., 2015, "Determination of the 3D failure envelope of a composite based on a modified Arcan test device", *Composite Structures* 131: 585-93.
- [23] Azar H.F., Choupani N., Afshin H., Moghadam R.H., 2015, "Effect of mineral admixtures on the mixed-mode (I/II) fracture characterization of cement mortar: CTS, CSTBD and SCB specimens", *Engineering Fracture Mechanics* 134: 20-34.
- [24] Rikards R., Buchholz F. - G., Wang H., Bledzki A. K., Korjakin A., Richard H. - A., 1998, "Investigation of mixed mode I/II interlaminar fracture toughness of laminated composites by using a CTS type specimen", *Engineering Fracture Mechanics* 61 (3): 325-42.
- [25] Rikards, R., 2000, "Interlaminar fracture behaviour of laminated composites", *Computers & Structures* 76 (1): 11-18.

- [26] Song S.H., Lee J.M., 2005, "Mode II Fatigue Crack Behavior in Compact Tension Shear Specimen", *Key Engineering Materials* 297 (300): 1592-97.
- [27] Jansson S., Leckie F.A., 1992, "The mechanics of failure of silicon carbide fiber-reinforced glass-matrix composites", *Acta Metallurgica et Materialia* 40 (11): 2967-78.
- [28] Li X., Gao H., Scrivens W., Fei D., Xu X., Sutton M., Reynolds A., Myrick M., 2004, "Nanomechanical Characterization of Single-Walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Composites", *Nanotechnology* 15 (Kasım): 1416-23.
- [29] Lopes M.A., Monteiro F.J., Santos J.D., 1999, "Glass-reinforced hydroxyapatite composites: fracture toughness and hardness dependence on microstructural characteristics", *Biomaterials* 20 (21): 2085-90.
- [30] Fu Shao-Y., Feng Xi-Q., Lauke B., Mai Y.W., 2008, "Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites", *Composites Part B: Engineering* 39 (6): 933-61.
- [31] Derradji M., Ramdani N., Zhang T., Wang J., Feng T.T., Wang H., Liu W., 2015, "Mechanical and thermal properties of phthalonitrile resin reinforced with silicon carbide particles", *Materials & Design* 71 (Nisan): 48-55.
- [32] Wang K., Wu J., Ye L., Zeng H., 2003, "Mechanical properties and toughening mechanisms of polypropylene/barium sulfate composites", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34 (12): 1199-1205.
- [33] McGrath L.M., Parnas R.S., King S.H., Schroeder J.L., Fischer D.A., Lenhart J.L., 2008, "Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina-epoxy composites", *Polymer* 49 (4): 999-1014.
- [34] Chisholm N., Mahfuz H., Rangari V.K., Ashfaq A., Jeelani S., 2005, "Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites", *Composite Structures* 67 (1): 115-24.
- [35] Uddin M.F., Sun C.T., 2008, "Strength of Unidirectional Glass/Epoxy Composite with Silica Nanoparticle-Enhanced Matrix", *Composites Science and Technology* 7-8 (68): 1637-43.
- [36] Cheang P., Khor K.A., 2003, "Effect of particulate morphology on the tensile behaviour of polymer-hydroxyapatite composites", *Materials Science and Engineering: A* 345 (1): 47-54.
- [37] Konopka K., Maj M., Kurzydłowski K.J., 2003, "Studies of the effect of metal particles on the fracture toughness of ceramic matrix composites", *Materials Characterization* 51 (5): 335-40.

- [38] Li J., Zong B.Y., Wang Y.M., Zhuang W.B., 2010, "Experiment and modeling of mechanical properties on iron matrix composites reinforced by different types of ceramic particles", *Materials Science and Engineering: A* 527 (29): 7545-51.
- [39] Teja M.S., Ramana M.V., Sriramulu D., Rao D.C., 2016, "Experimental Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Sisal Fibre Reinforced Composite and Effect of Sic Filler Material", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 149 (Eylül): 012095.
- [40] Kaman M.O., 2011, "Effect of fiber orientation on fracture toughness of laminated composite plates $[0^\circ/\theta^\circ]$ s", *Engineering Fracture Mechanics* 78 (13): 2521-34.
- [41] Song M., 2009, "Effects of volume fraction of SiC particles on mechanical properties of SiC/Al composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 19 (6): 1400-1404.
- [42] Pawar M.J., Patnaik A., Nagar R., 2017, "Investigation on Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of Granite Powder Filled Treated Jute Fiber Reinforced Epoxy Composite", *Polymer Composites* 38 (4): 736-48.
- [43] Choupani N., 2008, "Experimental and Numerical Investigation of the Mixed-Mode Delamination in Arcan Laminated Specimens", *Materials Science and Engineering: A* 478 (1-2): 229-42.
- [44] Ahmed K. S., Mallinatha V., Amith S.J., 2011, "Effect of Ceramic Fillers on Mechanical Properties of Woven Jute Fabric Reinforced Epoxy Composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 30 (15): 1315-26.
- [45] Alkılıçgil Ç., 2006, "Development of a new method for mode I fracture toughness test on disc type rock specimens", Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara.
- [46] İnternet: Alsaran A., "Hasar Analizi", <http://www.metaluzmani.com/wp-content/uploads/2015/07/hasar-analizi-03-yorulma-9421.pdf>.
- [47] Arasan Ş., 2014, "Hibrit kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye.
- [48] Sönmez M., 2009, "Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye'den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [49] Jamali J., Mourad A-H.I., Fan Y., Wood J.T., 2016, "Through-Thickness Fracture Behavior of Unidirectional Glass Fibers/Epoxy Composites under Various in-Plane Loading Using the CTS Test", *Engineering Fracture Mechanics* 156 (Mayıs): 83-95.
- [50] Erişir E., 2003, "Malzemelerin Mekanik Davranışı", *Kocaeli Üniversitesi*, 28.

- [51] Franke B., Quenneville P., 2014, “Analysis of the Fracture Behavior of Radiata Pine Timber and Laminated Veneer Lumber”, *Engineering Fracture Mechanics* 116 (1): 1-12.
- [52] Uğuz A., 1996, “Kırılma Mekaniğine Giriş”, *Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı*, Bursa, Yayın No: 118.
- [53] Güler C., 2012, “Alüminyum matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, Türkiye.
- [54] Aricasoy O., 2006, “Kompozit Sektör Raporu”, *İstanbul Ticaret Odası*, İstanbul.
- [55] Kalemtaş A., 2014, “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış”, *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi*, Muğla.
- [56] Güneş A. 2013, “Üzerinde yüzey çatlakları bulunan hibrid tabakalanmış kompozit levhaların dinamik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- [57] Canan F., 2007, “Açılı yüzey çatlaklı cam epoksi kompozit malzemelerin kırılma davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 125.
- [58] Wang C.H., 1996, “Introduction to Fracture Mechanics”, *Defence Science and Technology Organisation*.
- [59] Jamali J., Fan Y., Wood J.T., 2015, “The Mixed-Mode Fracture Behavior of Epoxy by the Compact Tension Shear Test”, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 63 (12): 79-86.
- [60] Başer İnci., 2002, “Elyaf Bilgisi”, Marmara Üniversitesi yayın no: 687.
- [61] Karabulut Narin., Aktaş M., 2015, “Jüt Lifi Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Yüzey Modifikasyon İşlemiyle İyileştirilmesi”, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, 16 Ekim 2015.
- [62] Köse Ü., 2013, “Birleştirilmiş Kompozit Parçaların Kırılma Mekaniği Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.
- [63] Balcıoğlu H.E., Aktaş M., 2013, “An investigation on lateral buckling of laminated composites with delamination”, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 20 (Ekim): 367-75.
- [64] Mir A., Aribi C., Bezzazi B., 2014, “Study of the Green Composite Jute/Epoxy”, 8 (2): 5.
- [65] Dato M.H., 1991, “Mechanics of Fibrous Composites”, *Dordrecht: Springer Netherlands*.

- [66] Ay, İ., “Kırılma mekaniğinin gelişimi”. *Balıkesir Üniversitesi*, 21.
- [67] İnternet: <http://www.duratek.com.tr/>
- [68] İnternet: <http://www.jutsanambalaj.com.tr/>
- [69] Eker A.A., 2008. “Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri”, 43.
- [70] İnternet: Fırat, K., “Kompozit Malzemeler”,
<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ha/lecture5.pdf>.
- [71] Sorucu A., 2007, “Orthotropic malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [72] Balcioğlu H.E., 2012, “Lateral buckling of laminated composites with delamination”, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye.
- [73] Kaya A.İ., 2016, “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri”, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi.
- [74] Faruk O., Bledzki A.K., Fink H-P., Sain M., 2012, “Biocomposites Reinforced with Natural Fibers: 2000–2010”, *Progress in Polymer Science* 37 (11): 1552-96.
- [75] İnternet: <http://docplayer.biz.tr/35201009-Mak-4087-kompozit-malzeme-mekanigi.html>.
- [76] İnternet: “Particle Size Conversion Chart - FEPA - Washington Mills”,
<https://www.washingtonmills.com/guides/grit-sizes-fepa/particle-size-conversion-chart-fepa/>.
- [77] Arasan Ş., Aktaş M., Balcioğlu H.E., 2018, “Fracture Toughness of Woven Glass and Carbon Reinforced Hybrid and Non-Hybrid Composite Plates”, *Polymer Composites* 39 (3): 783-93.
- [78] Özcan M., 2010, “Polimer-talaş kompozitlerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [79] Srinivasan M., Seetharamu S., 2012, “Fracture Toughness of Metal Castings”, *Science and Technology of Casting Processes*, Editör Malur Srinivasan. InTech.
- [80] Sağır H.O., 2016, “Jüt ve keten takviyeli karma kompozitlerin mekanik özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
- [81] Yan L., Chouw N., Jayaraman K., 2014, “Flax Fibre and Its Composites – A Review”, *Composites Part B: Engineering* 56 (Ocak): 296-317.

- [82] Kalemtaş A., 2015, “Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler”, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
- [83] Onat A., 2015, “Kompozit malzemeler ders notu”, Sakarya Meslek Yüksekokulu, Sakarya.
- [84] İnternet: http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66618/46059/5_kirilma.pdf
- [85] İnternet: <http://docplayer.biz.tr/11873459-4-kompozit-uretim-yontemleri.html>
- [86] İnternet: http://kisi.deu.edu.tr/mehmet.zor/composite%20materials/2-Genel_bilgiler.pdf
- [87] İnternet: <http://www.turkchem.net/kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri.html>
- [88] İnternet: <http://slideplayer.biz.tr/slide/11641716/>
- [89] İnternet: http://www.saykar.net/silisyum_karbur
- [90] Şahin Y., 2005, “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Seçkin Yayıncılık*.
- [91] İnternet: <http://slideplayer.biz.tr/slide/11475148/>
- [92] İnternet: <http://www.kossecomposite.com/sistemkurma.html>
- [93] Zhou Y., Liu J., Han D., Chen X., Wang G., Zhai Q., 2017, “Reduced Fracture Toughness of Metallic Glass at Cryogenic Temperature”, *Metals* 7 (4): 151.
- [94] Moore P., Hutchison E., 2016, “Comparison of J Equations for SENT Specimens”, *Procedia Structural Integrity* 2: 3743-51.
- [95] İnternet: http://ans2.vm.stuba.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-181.htm
- [96] İnternet: <http://ansys.deu.edu.tr/>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : BORAZAN Kamil Seçkin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 04.01.1987 / Uşak
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (506) 310 76 48
Faks : -
e - mail : seckinborazan@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2010
Lise	: Uşak Orhan Deniz Anadolu Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2015	Uşak Küresel Yapı Den. Ltd. Şti.	Kontrol Elemanı
2015-2016	Üçer Müşavirlik	Mühendislik
2016-2018	Ege Linyitleri İşletmesi / Soma	Mühendislik

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

-

Hobiler

Spor branşları, kitap okumak, bilgisayar, satranç, seyahat etmek, film izlemek, yüzmek