

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON FİBER ESASLI POLİMERİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Mümtaz DOKUR**

Anabilim Dalı : Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Programı : Seramik Programı

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON FİBER ESASLI POLİMERİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mehmet Mümtaz DOKUR
(506071303)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 23 Ocak 2009**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Gültekin GÖLLER (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN (İTÜ)
Prof. Dr. Müzeyyen MARŞOĞLU (YTÜ)**

OCAK 2009

ÖNSÖZ

Bana inanan ve güvenen, fikirlerimi ve çalışmalarımı destekleyen, her zaman bir yol gösterici olarak gördüğüm ve örnek kabul ettiğim değerli bilim adamı, tez danışmanım Doç. Dr. Gültekin GÖLLER'e teşekkür ederim.

Çalışmalarımı hevesle takip eden, fikir, öneri ve tavsiyelerini esirgemeyen Araş. Gör. İpek AKIN, Araş. Gör. Berk ALKAN ve Hüseyin SEZER'e, bana her zaman değerli vakitlerini ayıran ve bu çalışmanın tamamlanmasında büyük rolü olan Talat Tamer ALPAK, Canhan ŞEN, Özden ORMANCI, Elif YILMAZ ve desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2009

Mehmet Mümtaz Dokur

Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SEMBOL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xv
1.GİRİŞ.....	1
2.FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER.....	4
2.1. Sürekli Fiber Takviye.....	7
2.2. Süreksiz Fiber Takviye.....	8
3.KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER.....	9
3.1. Polimer Matrisli Kompozitler.....	9
3.1.1. Ön kurlama ve kurlama işlemi.....	11
3.2. Metal Matrisli Kompozitler.....	13
3.3. Seramik Matrisli Kompozitler.....	13
3.4. Karbon Matrisli Kompozitler.....	13
4.KARBON FENOLİK AŞINIR KOMPOZİTLER.....	15
4.1. Karbon Fiber.....	16
4.2. Fenolik Reçine.....	18
5.FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	21
5.1. Spreyleme Prosesi.....	21
6.KISA FİBERLİ POLİMERİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MODELLENMESİ VE TASARIMI.....	25
6.1. Fiber Uzunluk Dağılımı.....	25
6.2. Fiber Yönelim Dağılımı.....	26
6.3. Isıl İletimin Modellenmesi.....	28
6.4. Elastisite Modülünün Hesaplanması.....	30
6.5. Termal İletkenliğinin Hesaplanması.....	40
6.5.1. Karbon/Fenolik Kompozitlerin Isıl İletim Katsayısının Belirlenmesi	40
7.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
7.1. Amaç.....	43
7.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme, Alet ve Cihazlar.....	43
7.3. Kompozitlerin Üretilmesi.....	44
7.3.1. Karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitlerin üretimi.....	44
7.4. Karakterizasyon Çalışmaları.....	48
7.4.1. Fiber oranının belirlenmesi.....	48
7.4.2. Kompozitlerin ısı karakterizasyonu.....	49
7.4.2.1. Dinamik ısı akısı testi ve sonuçları.....	49
7.4.2.2. Statik ısı akısı testi ve sonuçları.....	51
7.4.2.3. Isıl iletkenlik testi ve sonuçları.....	52
7.4.2.4. Termogravimetrik analiz ve sonuçları.....	53
7.4.3. Kompozitlerin mekanik testleri.....	53

7.4.3.1. Kayma dayanımı ve test sonuçları.....	53
7.4.4. Kompozitlerin mikroyapı incelemesi.....	55
8.SONUÇLAR.....	57
KAYNAKLAR.....	59
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Akma dayanımı
ρ	: Yoğunluk
E	: Elastisite modülü
k	: Isıl iletkenlik
θ	: Fiberin 1-2 düzlemindeki yönelim açısı
Φ	: Fiberin 2-3 düzlemindeki izdüşümünün yönelim açısı
r_f	: Fiber yarıçapı
V_f	: Fiber hacim oranı
E_f, E_m	: Fiberin ve matrisin elastisite modülü

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 : Bazı fiber takviyeli malzemelerin özellikleri [6].....	5
Çizelge 4.1 : Termoset reçine özellikleri [4].....	18
Çizelge 6.1 : Karbon/Fenolik kompozitlerin elastikiyet modülleri.....	38
Çizelge 6.2 : Karbon/fenolik kompozitlerin ısı iletim katsayıları.....	40
Çizelge 7.1 : Karbon fiberin özellikleri.....	43
Çizelge 7.2 : Fenolik reçinenin özellikleri.....	44
Çizelge 7.3 : Üretilen kompozitler ve üretim parametreleri.....	48
Çizelge 7.4 : Kompozitte fiber-reçine oranının kül tayini yöntemi ile belirlenmesi sonucu elde edilen veriler.....	49
Çizelge 7.5 : Dinamik ısı akısı test sonuçları.....	50
Çizelge 7.6 : Statik ısı akısı test sonuçları.....	52
Çizelge 7.7 : Isıl iletkenlik test sonuçları.....	53
Çizelge 7.8 : Termogravimetrik analiz sonuçları.....	53
Çizelge 7.9 : Kayma dayanımı test sonuçları.....	54

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 :	Kompozit malzemenin genel tanımı.....	1
Şekil 1.2 :	Kompozit malzemede matris ve takviye fazı.....	2
Şekil 1.3 :	Kompozit Malzeme Çeşitleri: (a) Fiber takviyeli kompozit (b) Parçacık takviyeli kompozit (c) Katmanlı kompozit.....	2
Şekil 2.1:	Fiberlerin özellikleri: (a) Tek fiber için gerilim gerinim eğrisi (b) Metal ve polimerlere göre fiberlerin özgül dayanım ve özgül modüllerinin kıyaslanması [5].....	6
Şekil 2.2 :	Kompozit malzemede takviye tipi: (a) Sürekli fiber takviye (b) Süreksiz fiber takviye [4].....	6
Şekil 2.3 :	Fiber takiye edilmiş kompozitlerin farklı morfolojileri. a) Sürekli tek yönlü fiberler b) Rastgele yönelenmiş sürekli fiberler c) Ortogonal fiberler d) Açılı yerleştirilmiş fiberler [5].....	7
Şekil 2.4 :	Fiber takviyeli kompozit için gerçek gerilim-deformasyon eğrisi [5]	8
Şekil 3.1 :	Fenolik reçenin kurlenmesi sırasında oluşan çapraz bağlar [9].....	12
Şekil 3.2 :	Fenolik reçinenin bozunması [9]	12
Şekil 4.1 :	Aşınır kompozitte meydana gelen reaksiyonların şematik gösterimi.	16
Şekil 4.2 :	12K karbon fiber (7.5 μ)	17
Şekil 4.3 :	Fenolik reçine: (a) Fenol (b) Formaldehit [7].....	19
Şekil 5.1 :	Spreyleme prosesinin şematik görünümü [4].....	21
Şekil 5.2 :	Spreyleme prosesi [4].....	23
Şekil 6.1 :	Süreksiz fiberlerin 1 doğrultusunda dizildiği kompozit modeli.....	25
Şekil 6.2 :	Süreksiz fiberin yönelimi üç eksenli koordinat sisteminde θ ve Φ koordinatlarıyla tanımlanabilir.....	27
Şekil 6.3 :	İki boyutlu uzayda rastgele yönelim gösteren süreksiz fiber takviyeli kompozitin modeli.....	28
Şekil 6.4 :	Fiberlerin yönelmesi.....	30
Şekil 6.5 :	Fiber yönelmesi: (a) Tek doğrultuda yönelenmiş (b) Rastgele yönelenmiş.....	30
Şekil 6.6 :	Fiber yönelim olasılığı fonksiyonun $0,5 < p = q < 0,57$ aralığındaki değişimi.....	36
Şekil 6.7 :	Fiber yönelim olasılığı fonksiyonun $0,58 < p = q < 1$ aralığındaki değişimi.....	37
Şekil 6.8 :	Karbon/fenolik kompozitlerin 11 yönündeki elastikiyet modülü....	39

Şekil 6.9 :	Karbon/fenolik kompozitlerin 22 yönündeki elastikiyet modülü.....	40
Şekil 6.10 :	Karbon/fenolik kompozitlerde ısı iletim katsayısı fiber matris oranından yaklaşık doğrusal olarak etkilenmektedir.....	41
Şekil 7.1 :	Kırpıcıklı spre y sistemi.....	45
Şekil 7.2 :	Yük altında kü rleme iş lemi akış diyagramı.....	46
Şekil 7.3 :	Vakum altında kü rleme iş lemi akış diyagramı.....	47
Şekil 7.4 :	Vakum aparatlarıyla sarılmış numune.....	47
Şekil 7.5 :	Dinamik ısı akısı test dü zene ğ i.....	50
Şekil 7.6 :	Dinamik ısı akısı test sonucu K06 kompozitinin yüzeyinde kö mürleş en böl ge gri tonlarda, pirolize uğ rayan bö lgeler ise parlak olarak gö zükme kte ve birbirinden ayrı lmaktadır.....	51
Şekil 7.7 :	Statik ısı akısı test dü zene ğ i.....	51
Şekil 7.8 :	Kayma dayanımı testi için tek yüzeyden yapış tırma türü.....	54
Şekil 7.9 :	K04 kayma dayanımı numunesi.....	54
Şekil 7.10 :	Dinamik ısı akısına maruz kalmış kompozit numunenin yüzey görüntüsü: (a) Kö mürleş miş bö lgenin yüzey görüntüsü (b) Piroliz tabakasının yüzey bö lgesi.....	55
Şekil 7.11 :	Dinamik ısı akısına maruz kalmış kompozit numunenin kesit görüntüsü.....	56
Şekil A.1 :	K01 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.....	62
Şekil A.2 :	K02 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.....	63
Şekil A.3 :	K03 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi a) Numune 1 b) Numune 2 c) Numune 3.....	64
Şekil A.4 :	K04 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.....	65
Şekil A.5 :	K05 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.....	66
Şekil A.6 :	K06 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değ iş imi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.....	67

KARBON FİBER ESASLI POLİMERİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitler düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve sıcaklık altında mükemmel ablatif davranışları gibi özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen mühendislik malzemeleridir. Bu çalışmada, karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklık altında ısıl davranışları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda takviye elemanı olarak karbon fiber, polimerik matris olarak da fenolik reçine kullanılmıştır. Kompozit parçanın üretilmesi, spreyleme prosesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu proste 1/8 oranında etanol ile çözülmüş fenolik reçine, parça üzerine spre edilmiştir. Fiberler boyları, 15 mm olacak şekilde spre tabancasında kırılarak altlık üzerine reçine ile birlikte püskürtülmüştür. Kompozit üretimi tabakalar halinde gerçekleştirilmiştir. Her bir tabaka kalınlığı 0,5 mm olup 135 °C’de ön kurlama yapılmıştır. Daha sonra tabaka sayısı tamamlanan kompozit 165 °C’de kurlanmıştır. Kurlama, yük altında ve vakum altında olmak üzere iki şekilde yapılmıştır.

Üretilen kompozitler, dinamik ve statik ısı akısı testlerine tabi tutulmuştur. Dinamik ısı akısı testleri sonucu 0,5 1,5 2,5 4,0 ve 5,0 mm kalınlığındaki tabakalı kompozitlerde ağırlık kaybı sırasıyla % 30 % 25 % 25 % 25 ve % 31 olarak bulunmuştur. Ayrıca vakum altında kurlama yönteminde 5 mm kalınlık için ağırlık kaybı % 14 olarak hesaplanmıştır. Statik ısı akısı testlerinde kompozit malzeme 400 kW/m² kızılötesi ısı akısına 20 saniye boyunca maruz bırakılması sonucu kupon arkası sıcaklıklar sırasıyla 135 °C, 90 °C, 34 °C, 28 °C, 225 °C ve vakum numunesi için 75 °C olarak bulunmuştur. Üretilen karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitlerin ısıl davranışları bu iki test sonuçları dikkate alındığında kompozit malzemelerde tabaka sayılarının artması ile kupon arkası sıcaklıklarının düştüğü ve ağırlık kaybının da azaldığı görülmektedir.

Termogravimetrik analiz sonuçları sırasıyla 180, 200, 160, 160 ve 190 °C bulunmuştur. Ayrıca 900 °C’de bozunmayan miktar sırasıyla % 73, % 66, % 69, % 73, 78 ve 89 olarak belirlenmiştir. Kayma dayanımları yine aynı kalınlıktaki kompozitler için sırasıyla 7, 11, 6, 8, 7 ve 8 MPa bulunmuştur.

Kısa fiberli kompozit malzemelerin elastisite modülü ve termal iletkenlik özelliklerin modellenmesi için Cox ve Halphin-Tsai tasarımlarından yararlanılmıştır.

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMERIC MATRIX COMPOSITES

SUMMARY

Carbon fiber reinforced polymeric matrix composites are engineering materials which are preferred for high temperature applications because of their low density, high strength and excellent ablative properties. In this study, the temperature on the back of coupon, weight loss, first decomposition temperature and shear strength of carbon fiber reinforced polymeric matrix composites were investigated. In experimental studies, carbon fiber and phenolic resin were used as reinforcement and matrix. Laminated composite was produced by spray-up process. Average length of 15 mm chopped fiber was sprayed with phenolic resin, which was solved in ethanol with a ratio of 1/8, on substrate and laminated composite was produced by spray-up process. The production of the composite was carried out in the form of laminated texture. The thickness of each layer was 0,5 mm and pre-curing process was applied at 135 °C. After gained total layer amount, composite was subjected to final curing process at 165 °C. Curing was performed by using two ways; under pressure and vacuum.

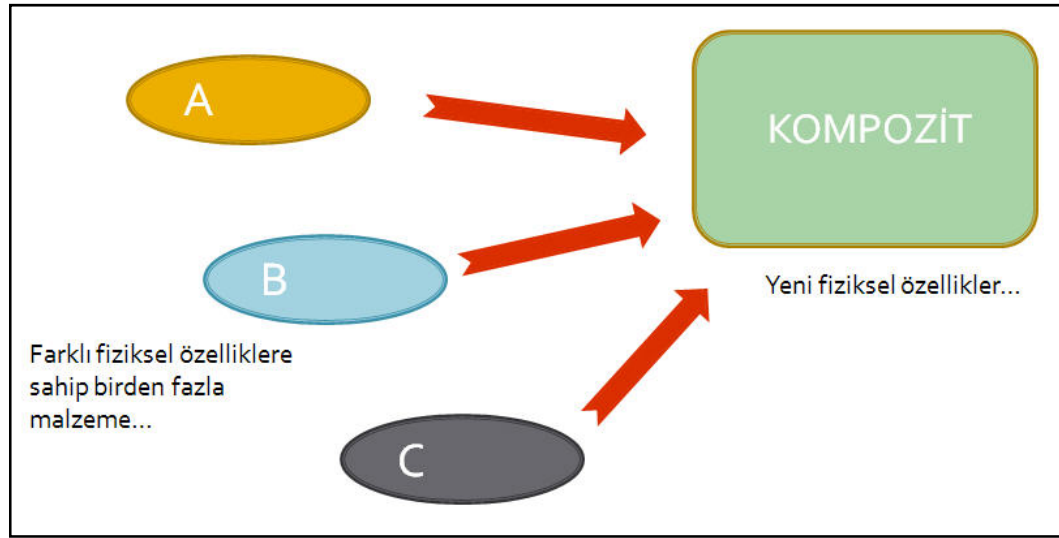
Composites were tested with dynamic and static heat flux, thermogravimetric analysis (TG) and shear strength test methods. Results of weight loss for dynamic heat flux test method were % 30, % 25, % 25, % 25 and % 31 for thicknesses of the 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 4,0 mm and 5,0 mm. The temperature on the back of coupon was determined with static heat flux test under 400kW/m² infrared heat flux for 20 seconds. The temperatures of the back of coupons were determined as 135 °C, 90 °C, 34 °C, 28 °C and 225 °C, respectively. Considering of these two methods, thermal behavior of carbon fiber reinforced polymeric composites showed that, the temperature on the back of coupon and weight loss decreased with increasing thicknesses of composite materials.

The first decomposition temperatures of the composites were determined as 180, 200, 160, 160 and 190 °C for the thicknesses of the 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, 4,0 mm and 5,0 mm. The weight loss of composites at 900 °C was calculated as 73, 66, 69, 73, 78 and 89 %, and the shear strength of composites was determined as 7, 11, 6, 8, 7 and 8 MPa for thicknesses of layers given above. It was observed that increasing thickness of composites results in increased weight loss, shear strength and first decomposition temperature.

Cox and Halpin-Tsai modeling studies were used for Young's modulus and thermal conductivity prediction of short-fiber reinforced composites.

1. GİRİŞ

Birden fazla ve farklı fazlar içeren malzemelerin fiziksel olarak birbirine bağlanmasıyla oluşan yapılar kompozit malzemeler olarak tanımlanır. Bu farklı fazların birbirleri arasında, doğal olarak meydana gelen herhangi bir reaksiyon ya da faz dönüşümleri görülmez [1]. Kompozit malzeme tanımı şematik olarak Şekil 1.1'de görülmektedir.

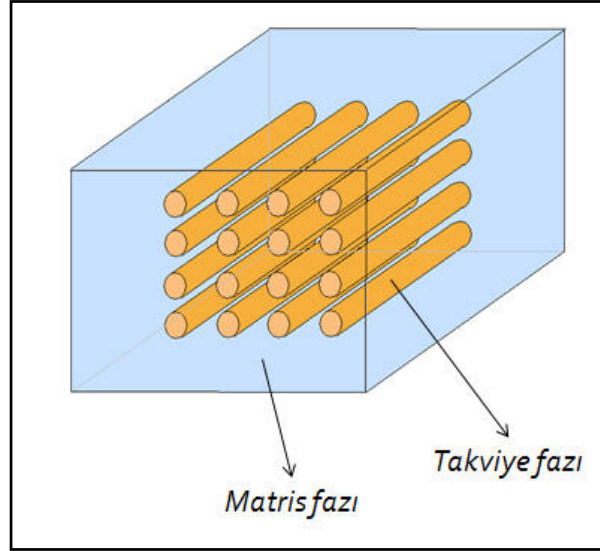


Şekil 1.1 : Kompozit malzemenin genel tanımı

Farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin, aralarında fark edilebilir bir ara yüzey bulunan ve bu malzemelerin makroskobik kombinasyonu sonucu, orijinal malzemelerde elde edilemeyen yeni bir özelliği elde etmek için kompozit malzemeler üretilir. Kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında seçilmesinin en büyük nedeni diğer malzemelere göre alışılmışın dışındaki bükülmezlik, mukavemet, ağırlık, yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve iletkenlikten oluşan özelliklerin bulunmasıdır [1]. Genel anlamda son ürün olan kompozit malzeme, kendisini oluşturan malzemelerin tek başlarına gösterdikleri yapısal davranışlardan daha iyi sonuçlar gösterir.

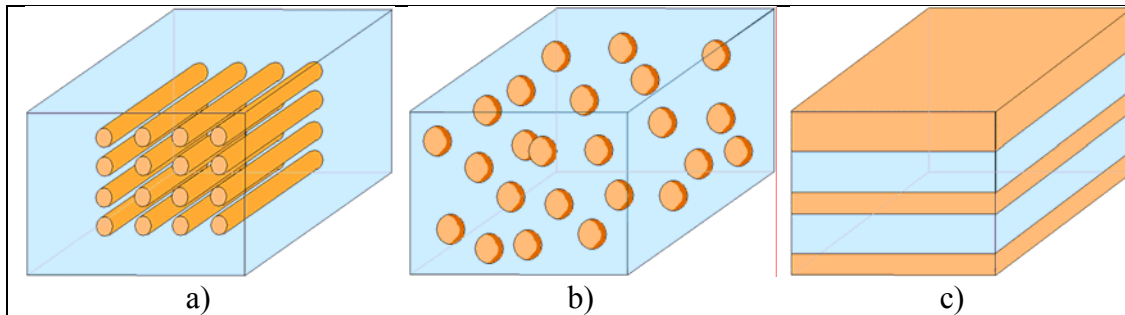
En az iki malzemedan oluşan aralarında herhangi bir kimyasal bağ oluşturmaksızın oluşturdıkları yeni malzeme grubunun temel mantığı yüksek elastiklik modüllü ve yükü taşıyan takviye fazını dokusunda bulunduran, takviye fazına göre düşük

elastiklik modüllü, darbeleri absorbe eden matris fazının birlikte bulunmasıdır [2]. Matris ve takviye fazından oluşan bir kompozit malzeme şematik olarak Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.2 : Kompozit malzemedeki matris ve takviye fazı

Kompozitler, ana faz olan matris içerisinde takviye elemanlarının bulunmasıyla üretilmiş malzemelerdir. Bu tür malzemeleri takviye elemanlarının şekline göre parçacık, fiber ve katmanlı olarak sınıflandırmak mümkündür (Şekil 1.3) [3]. Ayrıca takviye elemanları ile matrisin birleştirilmesi için çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar el yatırması yöntemi, püskürtme yöntemi, reçine enjeksiyonu, soğuk pres yöntemi, sıcak pres yöntemi, hazır kalıp bileşeni, elmas sarma yöntemi ve savurma döküm olarak sıralanabilir.



Şekil 1.3 : Kompozit Malzeme Çeşitleri: (a) Fiber takviyeli kompozit (b) Parçacık takviyeli kompozit (c) Katmanlı kompozit

Kompozit malzemeler elektriksel, termal ve çevresel uygulamalarda da kullanılabilir. Bu malzemelerin geniş uygulama alanları vardır ve uygulama alanına yönelik belirli özellikleri elde etmek için optimize edilirler.

Bu çalışma ile karbon fiber takviyeli polimerik matrisli aşınır kompozitlerin ısı davranışlarının incelenmesi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla öncelikli olarak ısı akısı altında kompozitte meydana gelen ağırlık kaybı ve kupon arkası sıcaklığı belirlenecektir. Daha sonra ısı iletim değerleri ölçülecek ve kompozitin ilk bozunma sıcaklığı, ayrıca mekanik özelliklerden biri olan kayma dayanımı bulunacaktır.

İkinci bölümde, sürekli ve süreksiz fiber takviyeli kompozitlerin özelliklerinden bahsedilmektedir. Kompozitin oluşturulması sırasında fiberin ve matrisin yeni malzemeye kazandırdığı özellikler belirtilmektedir.

Üçüncü bölümde, karbon fiber takviyeli kompozit çeşitleri belirtilmekte ve bu tezin konusu olan polimer matrisli kompozitlerin özellikleri ve uygulama alanlarından bahsedilmektedir. Diğer kompozit çeşitleri olan metal, seramik ve karbon matrisli kompozitler hakkında bilgi verilmektedir.

Dördüncü bölümde, polimer matrisli bir kompozit olan karbon fiber takviyeli fenolik aşınır kompozitlerin aşınma özellikleri incelenmiştir. Ayrıca takviye elemanı ve matris malzemesi olarak kullanılan karbon fiber ve fenolik reçine hakkında detaylı bilgi verilmekte ve bu iki malzemenin kompozite kazandırdığı özellikler incelenmektedir.

Beşinci bölümde, üretim yöntemlerinden biri olan spreyleme prosesinden bahsedilmektedir. Bu prosesinin kompozit üretimindeki avantaj ve dezavantajları belirtilmektedir.

Altıncı bölümde, kısa fiber takviyeli kompozitlerin elastik modülü ve termal iletkenliğinin modellenmesi için *Halpin Tsai*, *Nielsen* ve *Cox* modelleri incelenmiş olup, *Fu* ve *Mai* tarafından tanımlanan model kullanılmıştır.

Yedinci bölümde, kompozit üretim yöntemlerinden biri olan spreyleme prosesi ile üretimi gerçekleştirilen kompozitlerin test ve karakterizasyon işlemleri ile ilgili bilgi ve sonuçlar verilmiştir.

2. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Bir kompozit malzeme belirgin bir matris içerisinde bir ya da birden fazla takviye elemanı içerir. Fiberlerin kullanıldığı kompozit malzemelerde takviye elemanın tipi kısa veya uzun, tek yönlü ya da çok yönlü ve dokuma şeklinde olabilir. Matris ise polimer, metal, seramik ya da birkaç malzemenin kombinasyonundan oluşan bir kompozit olabilir [1].

Kompozit yapısını ve davranışını anlamak için fiber ve matrisin rolünü kavramak gerekir. Fiber ve matrisin, kompozit malzemedeki önemli fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir.

Kompozit yapısındaki fiberin rolü [4];

- Yapısal bir kompozitte yükün % 70-90'ı fiberler tarafından taşınır.
- Sertlik, dayanım, termal denge ve diğer özellikleri sağlar.
- Kullanılan fiber tipine göre termal iletkenliği ve yalıtımı kompozite kazandırır.

Matris malzemesi birçok fonksiyonu yerine getirir. Bu fonksiyonların birçoğu yapının performansı için önemli derecedeki özelliklerdir.

Kompozit yapısındaki matrisin rolü [4];

- Matris malzemesi fiberleri birbirine bağlar ve kompozite uygulanan yükün fiberlere aktarılmasını sağlar. Yapıya rijitlik ve şekil kazandırır.
- Matris, fiberleri izole eder. Böylece her bir fiber farklı davranış gösterir. Bu da kompozitteki bir çatlağın ilerlemesini yavaşlatır ya da durdurur.
- Matris, kompozite iyi bir yüzey özelliği kazandırır.
- Fiberleri kimyasal ve mekanik zararlara karşı korur.
- Matris malzemesinin seçimine bağlı olarak süneklik, darbe dayancı gibi performans karakteristik özellikleri etkiler. Sünek bir matris yapının sertliğini artırır. Yüksek sertlik ihtiyaçlarında termoplastik malzemeler tercih edilir.

Fiber malzeme güçlü, bükülmez, hafif ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalıdır. Özgül dayanım ve özgül elastisite modülü aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [5].

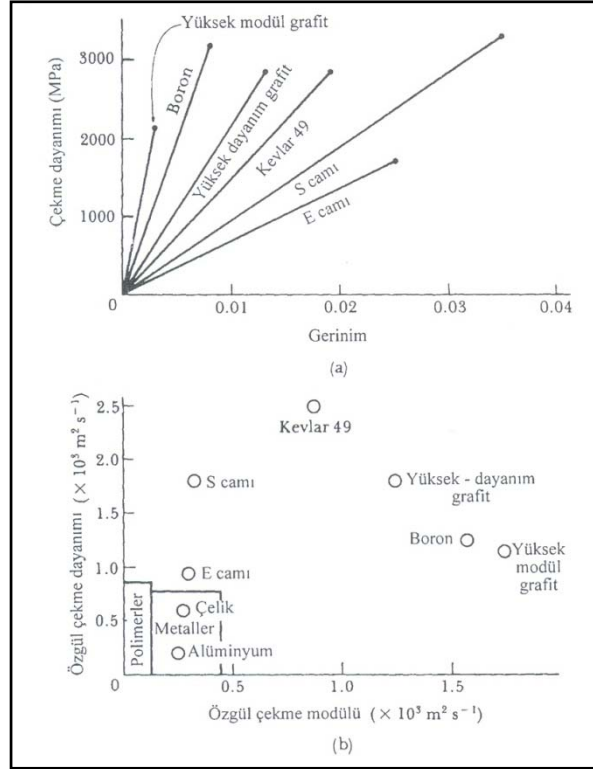
$$\text{Özgül dayanım} = \frac{\sigma}{\rho} \quad (2.1)$$

$$\text{Özgül modül} = \frac{E}{\rho} \quad (2.2)$$

Burada σ akma dayanımı, ρ yoğunluk ve E elastisite modülüdür. Yüksek özgül dayanım ve özgül elastisite modüllü malzemelerde fiber kullanımı tercih edilmektedir. Fiberler için bazı tipik veriler Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1’de verilmiştir. En yüksek özgül elastisite modül, genellikle karbon ve boron gibi düşük atom numarası ve kovalent bağlı malzemelerde bulunmaktadır. Bu iki element aynı zamanda yüksek dayanım ve ergime sıcaklığına sahiptir. Bunlar bir kompozit malzemede kullanılabilir ancak çok gevrek ve reaktif olduklarından tek başına kullanılamazlar [5].

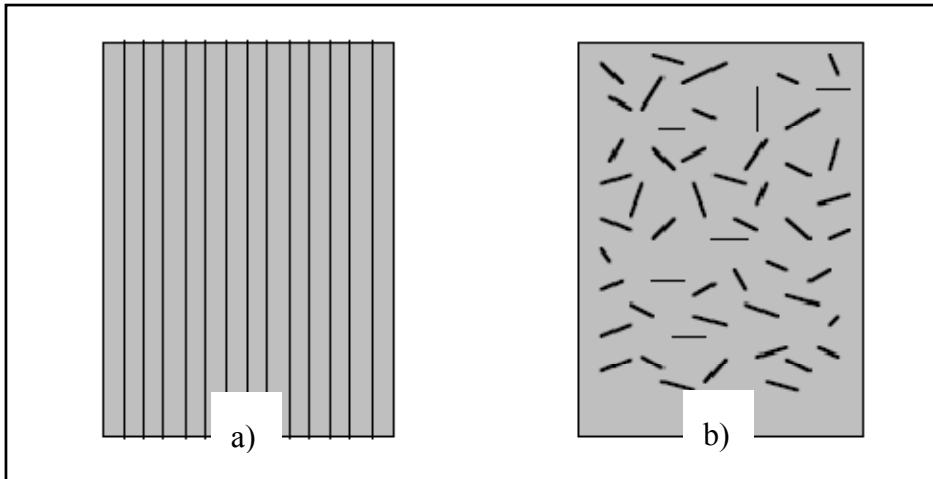
Çizelge 2.1 : Bazı fiber takviyeli malzemelerin özellikleri [6].

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Özgül Modül (x10 ⁶ m ² /s ²)	Özgül Dayanım (m ² /s ²)
E-camı	2,55	3448	72,4	<1725	28	1,35
S-camı	2,50	4483	86,9	<1725	35	1,79
Yük. Day. Grafıt	1,50	2759	276	3700	184	1,84
Yük. Mod. Grafıt	1,50	1862	531	3700	354	1,24



Şekil 2.1: Fiberlerin özellikleri: (a) Tek fiber için gerilim gerinim eğrisi (b) Metal ve polimerlere göre fiberlerin özgül dayanım ve özgül modüllerinin kıyaslanması [5]

Genel olarak takviye tipi fiber olan kompozitlerde sürekli ya da süreksiz fiberler kullanılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Kompozit malzemede takviye tipi: (a) Sürekli fiber takviye (b) Süreksiz fiber takviye [4].

2.1. Sürekli Fiber Takviye

Fiber takviye edilmiş kompozitlerin farklı morfolojileri Şekil 2.3’de görülmektedir. Karışım kuralı ile her zaman fiber takviye edilmiş kompozitlerin yoğunluğu belirlenmektedir [5].

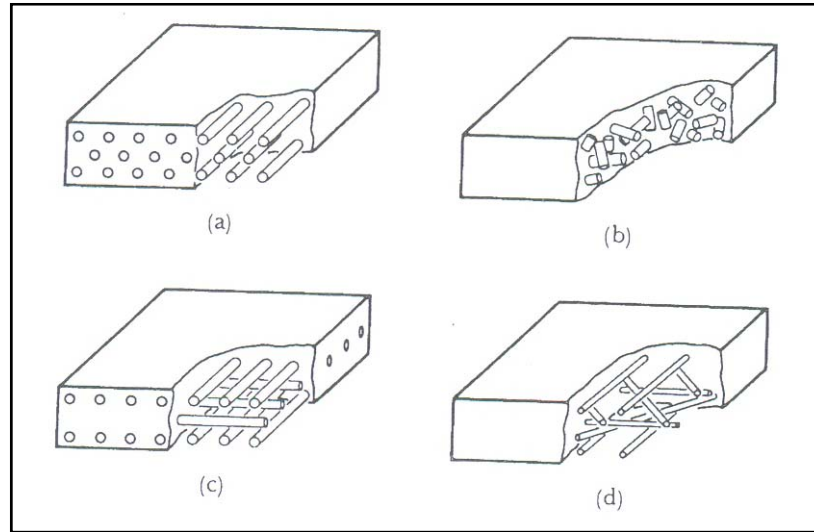
$$\rho_c = f_m \cdot \rho_m + f_f \cdot \rho_f \quad (2.3)$$

Burada m ve f indisleri sırasıyla matris ve fibere karşılık gelmektedir. Ayrıca fiberler sürekli ve tek yönlü ise, karışım kuralı ile fiber yönüne elektrik ve ısıl iletkenlik tutarlı şekilde tahmin edilmektedir [5].

$$k_c = f_m \cdot k_m + f_f \cdot k_f \quad (2.4)$$

$$\sigma_c = f_m \cdot \sigma_m + f_f \cdot \sigma_f \quad (2.5)$$

Burada k ısıl iletkenlik ve σ elektrik iletkenliğidir.



Şekil 2.3 : Fiber takviye edilmiş kompozitlerin farklı morfolojileri. a) Sürekli tek yönlü fiberler b) Rastgele yönlenmiş sürekli fiberler c) Ortogonal fiberler d) Açılı yerleştirilmiş fiberler [5].

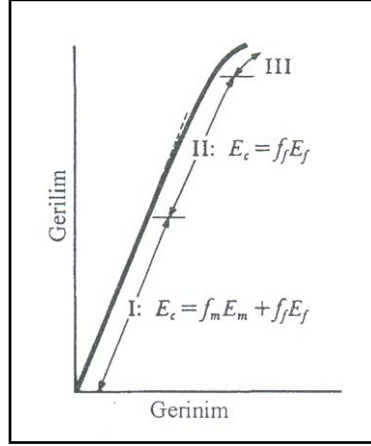
Sürekli tek yönlü fiberlere yük uygulandığı zaman karışım kuralı ile elastisite modülü tutarlı olarak tahmin edilmektedir [5].

$$E_c = f_m \cdot E_m + f_f \cdot E_f \quad (2.6)$$

Buna karşın uygulanan yük çok büyük olduğu zaman matris deforme olmaya başlar ve gerilim-gerinim eğrisi (Şekil 2.4) daha fazla doğrusal olarak devam etmez. Matris,

kompozitin bükülmezliğine çok az katkıda bulunduğundan modül aşağıdaki formül ile tahmin edilebilir [5].

$$E_c = f_f \cdot E_f \quad (2.7)$$



Şekil 2.4 : Fiber takviyeli kompozit için gerçek gerilim-deformasyon eğrisi [5]

Düşük gerilmelerde elastik modül karışım kuralı ile verilmektedir. Yüksek gerilmelerde matris deforme olmakta ve karışım kuralı geçerli olmamaktadır.

Bir kompozitin dayanımı, fiberler ile takviye arasındaki bağlanmaya bağlıdır ve matrisin deformasyonu ile sınırlıdır. Sonuç olarak dayanım hemen hemen daima karışım kuralından tahmin edilen değerden daha azdır.

Süneklik, darbe direnci, yorulma, sürünme gibi diğer özelliklerin tahmin edilmesi çekme özelliklerinin tahmin edilmesinden çok daha güçtür.

2.2. Süreksiz Fiber Takviye

Kompozit özelliklerini, fiberler süreksiz olduğu zaman tahmin etmek zordur. Çünkü her fiberin ucu fiberin geri kalan kısmından daha az yük taşır.

Kompozitin dayanımı, karışım kuralı ile tahmin edilenden daha azdır. Hatta fiberin gerçek boyu (l) kritik fiber boyundan l_c , uzun olursa veya daha hassas olarak fiber boyunun çapa oranı l/d kritik değeri aşarsa azalır. Boyun çapa oranı olarak adlandırılan oran kompozitin özelliklerini oldukça etkiler [5].

3. KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER

Karbon fiberin takviye elemanı olarak kullanıldığı birçok kompozit çeşidi bulunmaktadır. Bunlar;

- Polimer Matrisli Kompozitler
- Metal Matrisli Kompozitler
- Seramik Matrisli Kompozitler
- Karbon Matrisli Kompozitler

3.1. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimerler, en basit tanımıyla monomer denilen küçük moleküllerin birbirlerine eklenmesiyle oluşan uzun zincirli, doğal sonucu olarak büyük molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimerler düşük üretim maliyetleri, kolay şekil almaları ve amaca uygun üretilibilmeleri nedeniyle her alanda yaygınlaşmıştır. PVC (Polyvinylchloride), Teflon (Politetrafloroetilen – PTFE) polimer malzemeler tipik örneklerdir. Fiziksel özelliklerine göre polimerler termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç farklı gruba ayrılırlar [7].

Polimer matrisli kompozitlerin üretimi, metal, seramik ve karbon matrisli kompozit çeşitlerine göre üretimi daha kolaydır. Bunun en önemli nedeni, kompozitlerin üretimi için gerekli olan sıcaklığın düşük olmasıdır. Termoset çeşitlerinden olan epoksi ve fenolik reçinelerinde işlem sıcaklığı genelde oda sıcaklığından 200 °C arasında değişmektedir. Termoplastikler çeşitlerinden olan polyimide (PI), polyethersulfone (PES) ve polyether-etherketone (PEEK) reçineler için ise işlem sıcaklığı 300 °C ile 400 °C arasında değişmektedir [1].

Termosetler (özellikle epoksi reçine) çok uzun zamandan beri karbon fiber kompozitler için polimer matris olarak kullanılmaktadır. Isı ve basınç altında gerçekleşen kütleme esnasında termoset reçine, polimer molekülleri arasında çapraz bağların oluşması ve polimerizasyonun tamamlanması için katılır. Süneklik

özellikleri mükemmel olan termoplastikler, termosetlere göre daha yüksek işlem hızlarına sahiptir [1].

Karbon fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler genelde iki sınıfa ayrılır. Bunlar, matris olarak seçilen polimerin çeşidine göre belirlenir. Termoset ve termoplastik olarak sınıflandırılan polimer matrisli kompozitlerde ayrıca takviye elemanı olan karbon fiberin kısa (süreksiz) ya da sürekli olmasına bağlı olarak da sınıflandırmak mümkündür. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikler, elektriksel özdirenç ve termal iletkenlik daha iyidir.

Kısa fiberli kompozitlerin üretiminde genellikle fiber ile sıvı reçine karıştırılıp kalıplanır. Birçok üretim çeşidi vardır. Termoset durumundaki sıvı reçineler polimerize olmamış matris malzemeleridir. Termoplastikler ise bir çözücü içinde çözünmüş polimer ya da erimiş polimerlerdir.

Termosetler için basınçlı kalıplama ya da çift kalıp üretim yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntemlerde termoset malzemenin katılaşması için karışım bir kalıba doldurulup yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında katılaştırılması sağlanır. Fiber ve reçinenin yoğunluğunun farklı olması nedeniyle döküm yöntemi tercih edilmez. Fiber karışım içinde ya yüzer ya da dibe çöker. Bu nedenle reçinenin viskozitesinin iyi ayarlanması gerekir. Eğer kısa fiberli kompozit bir kaplama yapılmak isteniyorsa fiber-reçine karışımı kalıplama yerine sprey edilebilir.

Polimer matrisli karbon fiber kompozitlerin özellikleri aşağıda verilmektedir [1].

- Düşük yoğunluk (alüminyumdan % 40 daha düşük yoğunluğa sahiptirler)
- Yüksek mukavemet (yüksek mukavemetli çelikler kadar)
- Yüksek rijitlik (titanyum kadar)
- İyi yorulma ve sürünme dayanımı
- Düşük sürtünme katsayısı ve iyi aşınma dayanımı (karbon fiber-naylon kompozitleri teflon kadar düşük sürtünme katsayısına sahiptirler)
- Tokluk ve darbe toleransı (metallerden daha iyi darbe toleransına sahiptirler)
- İyi kimyasal ve korozyon dayanımı
- Boyut kararlılığı (karbon fiberin termal genleşme katsayısı sıfırdır)
- Metallere oranla mükemmel vibrasyon azaltıcı özelliği
- Düşük elektriksel direnç
- Yüksek termal iletkenlik

- Yüksek elektromanyetik enterferans (EMI) koruma etkisi (High Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness)

Fiberlerin dağılımı ve yapı hataları fiber takviyeli polimerik kompozitlerin özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. Hataları beş ana başlıkta toplamak mümkündür.

- Matris hataları (boşluk, porozite)
- Fiber çatlakları
- Ara yüzey çatlakları
- Delaminasyon
- Safsızlıklar

Metalografik işlemler, mikroskopik inceleme, ince bölgelerin geçirimli elektron mikroskop (TEM) yöntemi ile incelenmesi, düşük voltajlı X-ışını radyografisi, sürekli fiberler için uygun olan kızılötesi termal görüntüleme ve C-scan tekniği kullanılarak malzeme muayenesi mümkündür.

3.1.1.Ön kürleme ve kürleme işlemi

Kompozitin her tabakasında bağ yapısının oluşması için reçine katılaştırma ve kürleme işlemleri gereklidir. Kompozite uygulanan yükü taşıyan takviye elemanın matris ile olan bağlantısı eksiksiz olmalıdır. Bu iki proses kompozit malzeme üretiminde en önemli aşamalarıdır. Termoset bir kompozit parça kürleme sırasında şekillendirilirken malzemede kimyasal ve morfolojik değişimler görülür. Bir çok aşama arka arkaya gerçekleşir. Bu aşamaların bazıları doğrudan bazıları da dolaylı olarak kontrol edilebilir. Birçoğu da birbirini etkileyebilir. Takviye elemanlarının matrise ilavesi sırasında oluşan boşluklar ve yer değiştirmeler kürlenmiş kompozitin özelliklerinde büyük değişiklikler meydana getirebilir [8].

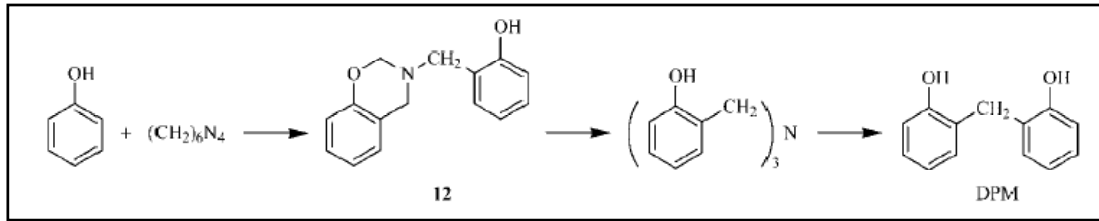
Termoplastik matrisli kompozitlerde katılaştırma işleminde matris, kimyasal bir değişime uğramaz. Ancak zincir kırılmaları malzemede boşlukların oluşumu ile sonuçlanabilir.

Fenolik reçinenin başlangıçtaki moleküler ağırlığı 150'den 1500'e kadardır. Fenolik sistemlerde son çapraz bağ yoğunluğu 150-300 amu arasında değişir. Kürleme sırasında % 25 - 75 arasında halka birleşmeleri meydana gelir [9].

Resol reçinelerin kürlenmesi reçine hazırlama işlemlerindeki reaksiyon adımlarına benzer. pH 9 veya üzeri ve reaksiyon sıcaklığı 180 °C'yi geçmemelidir. Metilol grupları dibenzil eterleri bırakmak ve fenolde orto-para pozisyonlarda reaksiyon göstermek için diğer metiloller ile yoğunlaşır [9].

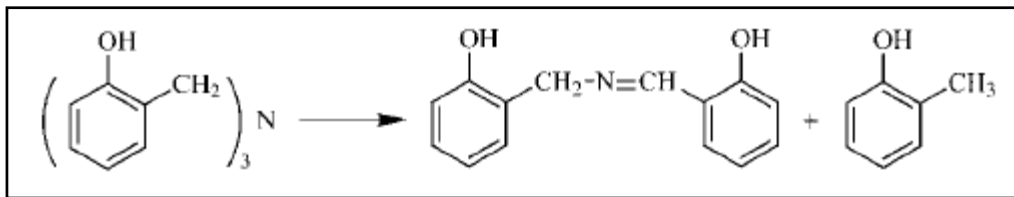
Köpük ve döküm kapları gibi bazı reçine uygulamalarında sıvı reçinenin oda sıcaklığında hızlı kürlenmesi güçlü bir asit ile sağlanır. pH'ın 4 - 6 olduğu durumlarda kürlenme, pH'ın 8 ve üzeri olduğu durumlara göre yavaş; pH'ın 1 - 3 olduğuna göre daha yavaş gerçekleşir [9].

Novolak reçineler çapraz bağlayıcı olarak % 5 - 15 hexa ile kürlenir. Fenolik reçinenin çapraz bağlanması Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 : Fenolik reçenin kürlenmesi sırasında oluşan çapraz bağlar [9]

Kürlenmiş reçinenin ayrışması 250 °C'de, tam bozunma ise 300 °C üzerinde başlar. Oksijen varlığında metilen köprü grubu hidroperoksite çevrilir ve bu bozunma sırasında alkol ve ketonlar açığa çıkar[9]. Fenolik reçinenin bozunması Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Fenolik reçinenin bozunması [9]

Bozunma 600 °C'ye kadar devam eder. Yan ürünler genel olarak su, CO, CO₂ ve fenollerdir. Bozunmanın ilk aşamasında minimum çekilmeye sahip poroz bir yapı oluşur. İkinci aşama yaklaşık 600 °C'de başlar. CO₂, H₂O, metan ve aromatiklerin devamlı oluşumu ve büzülme ikinci aşamayı oluşturur [9].

3.2. Metal Matrisli Kompozitler

Karbon fiberler termal genleşme katsayısını düşürücü etkisi olduğundan dolayı karbon fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerde kullanımının önemini arttırmıştır. Ayrıca dayanım ve modülü arttırırken yoğunluğu da düşürmektedir [1].

3.3. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisin iyi oksidasyon direncine sahip olmasından dolayı yüksek sıcaklık uygulamaları (havacılık ve motor parçaları) için karbon fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler tercih edilmeye başlamıştır. Fiberler, kompozitin sertlik ve dayanımını arttırdığı gibi elektriksel öz direnci düşürür. Termal olarak yalıtkan olan seramiğe karbon fiber takviyesi ile kompozitin termal iletkenliği artar [1].

3.4. Karbon Matrisli Kompozitler

Karbon fiber takviyeli karbon matrisli kompozitlerde (Karbon-Karbon Kompozitler) karbon fiber, kompozitin dayanımı, tokluğunu arttırır. Ayrıca termal şoklara karşı daha iyi dayanım gösterir. Karbonun düşük yoğunluğundan dolayı spesifik dayanım, modül ve termal iletkenlik değerleri kompozit çeşitleri arasında en yüksek değerdedir. Ayrıca termal genleşme katsayısı yaklaşık sıfırdır [1].

Karbon-karbon kompozitlerin en önemli dezavantajları üretim maliyeti, zayıf oksidasyon direnci ve tabakalar arası zayıf özellikler gösterilebilir. Karbon-karbon kompozitlerin dünya pazarındaki oranı şu şekildedir; ABD % 79, AB ve Rusya % 20 ve Japonya % 1. Ayrıca pazarın tamamı havacılık ve uzay uygulamalarına (atmosfere geri girme (reentry) termal koruma uygulamalarında % 37, roket nozüllerinde % 31, uçak frenlerinde % 31) yöneliktir. Diğer uygulamalar olarak fırın ısıtma elemanları, uzay gemisi ve uçak parçaları ve ısı değiştiricileridir.

Karbon-karbon kompozitlerin üretimi dört ana yöntemle bağlıdır. Bunlar, sıvı reçine emdirme (LPI), sıcak izostatik basınç ve emdirme karbonizasyonu (HIPIC), sıcak pres ve kimyasal buhar filtrasyonudur (CVI).

4. KARBON FENOLİK AŞINIR KOMPOZİTLER

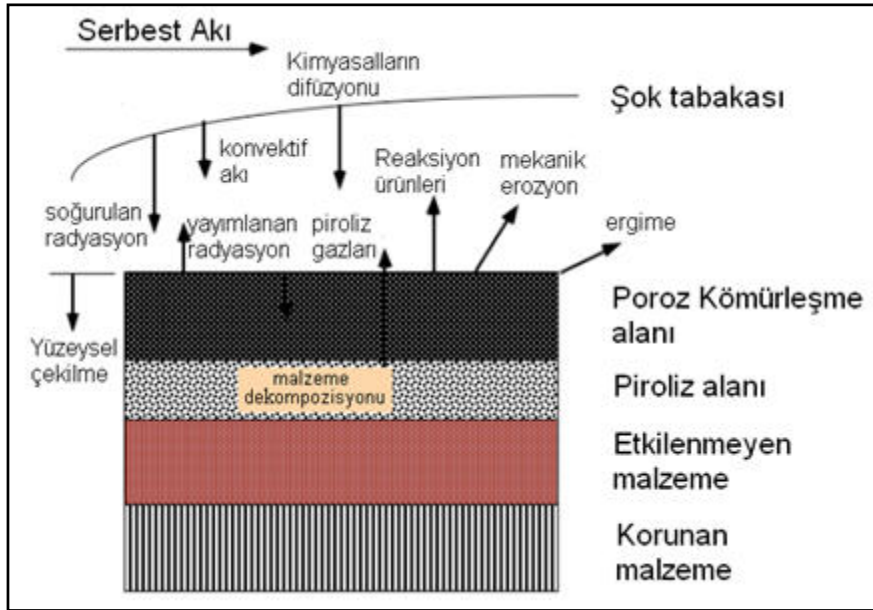
Aşınır kompozitler, polimerik bir reçinenin içerisine gömülmüş sürekli veya süreksiz pekiştiricilerden meydana gelirler. Atmosfere giren sistemler, yüzeylerine yüksek bir hızla çarpan parçacıklardan kaynaklanan bir ısı akısıyla karşılaşır. Yüksek sıcaklıklarda reçine pirolize uğrar ve kütle kaybıyla oluşan piroliz gazı ısı akısını bloke ederek büyük miktarda ısıнын yüzeyden uzaklaşmasını sağlarlar [7].

Ticari üretimi en fazla yapılan fenolik reçine, fenol ve formaldehitten hazırlanandır. Fenolik reçineler, diğer termosetler gibi kırılğandır. Fiberlerle yapılan takviye, polimerin gevrekliğini azaltırken diğer bazı mekanik özelliklerini geliştirir. Ayrıca takviye elemanı olarak katılan fiberlerin, kimyasal yapıları gereği ısı ve alev karşı dayanıklı olan polimerin ısıya dayanımını daha da artırır. Bu nedenle fenolik kompozitler daha çok alev ve ısıya dayanımının arandığı yerlerde kullanılır [10].

Bunlar arasında fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler hafif olmaları ve birim kütleleri başına yüksek yük taşıma kapasiteleri nedeniyle tercih edilirler. Bu kompozitler takviyesiz malzemelerle kıyaslandığında elastik modülü, aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklara dayanma gibi mekanik özelliklerde önemli ölçüde üstünlüğe sahiptirler [11].

Aşınan kompozitler organik reçinelerin bağlayıcı olarak kullanıldığı kompozitlerdir. Üretim ve uygulama kolaylığı, düşük maliyet, tamamen aşınana kadar etkili kullanılabilmeleri ve kullanımdan sonra değiştirilebilmeleri kullanım avantajları olarak sıralanabilir. Aşınan kompozitler yüzeye çarpan sıcak gaz tabakasını sistemin dış duvarından, ortamdaki daha soğuk bir ara yüzey oluşturarak uzaklaştırır. Aşınma kütle ve ısı transferi işlemidir ve sisteminin katmanlarında kömürleşme, ergime ve süblimleşmeye neden olur. Bu olay piroliz olarak adlandırılır. Tüm bu reaksiyonlar endotermik reaksiyonlardır (buharlaşma, süblimleşme gibi) ve çevreden ısı alarak daha soğuk ara katmanların oluşmasına neden olurlar. Piroliz ile oluşan gazlar konvektif ve katalitik ısı akısını durdururlar. Büyük miktarda ısı enerjisi yüzeysel ve hacimsel aşınma olmak üzere iki temel işlemle uzaklaştırılır. Yüzeysel aşınma deformasyona neden olmaz. Aşınma esnasında özkütle sabit kalırken hacim azalır.

Buharlaşma, süblimleşme, termokimyasal reaksiyonlar, termomekanik erozyon yüzey aşınması sırasında oluşan reaksiyonlardır. Hacimsel aşınmada ise hacim korunurken özkütle kaybı termo-dekompozisyon (piroliz) ve termo-oksidatif dekompozisyon reaksiyonlarıyla meydana gelmektedir. Hacimsel aşınma sırasında faz geçişleri ve kompozit içerisinde kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Reçine pirolize uğrar ve genellikle hidrokarbonlardan oluşan gaz fazından ürünler meydana gelir. Piroliz gazı yüzeyden süzölerek şok tabakasıyla karşılaşır. Reçinenin pirolizi tahkimatın üzerinde biriken karbonlu kalıntılar meydana getirir ve yüzey kömürleşir. Piroliz gazının şok tabakasına girişiyle bu tabakanın özellikleri konvektif ısınmayı azaltıcı yönde değişir. Özet olarak kütle kaybıyla oluşan piroliz gazı ısı akısını bloke eder ve büyük miktarda ısının yüzeyden uzaklaşmasını sağlar. Aşınan kompozit malzemede meydana gelen reaksiyonlar ve tabakalar Şekil 4.1’de verilmektedir. Şok tabakasının türleriyle yüzey arasındaki kimyasal reaksiyonlar yüzey malzemesinin tüketilmesine neden olabilir ve yüzeyin net enerjisi üzerinde etkilidir [12-14].



Şekil 4.1 : Aşınır kompozitte meydana gelen reaksiyonların şematik gösterimi

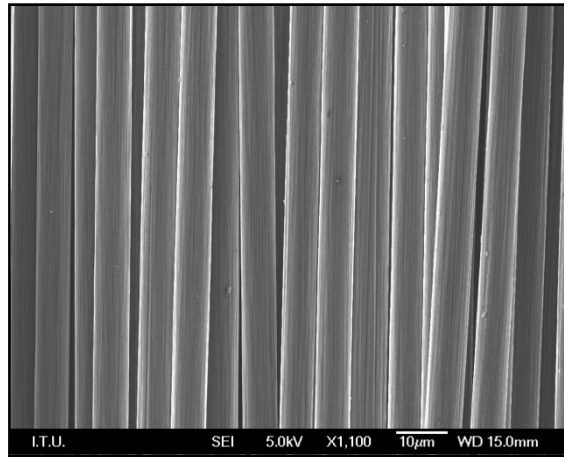
4.1. Karbon Fiber

Takviye elemanlarının ilavesindeki amaç, kompozit malzemenin dayanımını ve sertliğini mükemmel seviyelere çıkarmaktır. Sürekli fiber takviyeli bir kompozit malzemede tüm dayanımı ve sertliği fiberler sağlar.

Karbon fiberler, normalde gevrek özellik gösteren polimer, metal ve seramiklere takviye elemanı olarak katılarak bu malzemelerin dayanım özelliklerini artırır [15].

Elektriksel ve termal olarak iletken olan karbon fiberlerin takviye elemanı olarak iletken olmayan polimer matrise katılması ile üretilen kompozitin elektriksel ve termal iletkenliği artırılmış olur. Aynı zamanda karbon fiberlerin termal genleşme katsayısı yaklaşık sıfır olduğundan malzemenin termal genleşmesini düşürür. Yüksek termal iletkenlik ve genleşmenin kombinasyonundan dolayı karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitler boyut kararlılığının gerekli olduğu elektronikte ısı uygulamalarında ve uzay araçlarında kullanımı mümkündür [1].

Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitler, uzay araçları, otomobil, inşaat, biyomedikal ve diğer endüstrilerde geniş çapta kullanılmaktadır. Bu durumdan dolayı bu tür kompozitlerin araştırma ve geliştirilmesinde büyük bir talep görülmektedir [15].



Şekil 4.2 : 12K karbon fiber (7.5 µ)

Yaklaşık 7.6 µm çapındaki karbon fiberler, ince ve sürekli şekilde kolaylıkla çekilebilen veya sarılabilen organik bir flamentin karbürlenmesi veya ısı etkisi ile eritilerek üretilmektedir. Bir flaman içindeki karbon fiber sayısı 3, 6, 12 ve 24 bin olarak değişmektedir. 12K karbon fiber Şekil 4.2’de görülmektedir. Ön malzeme olarak bilinen organik flament genellikle naylon (bir selülozik polimer), poliakrilonitril (PAN) veya ziftir (farklı aromatik organik bileşikler). Yüksek sıcaklıklar, karbon hariç diğer elementlerin giderilmesine neden olacak şekilde organik polimerlerin ayrışmasını sağlar. Karbonlama sıcaklığı 1000 °C’den 3000 °C’ye yükseltildiğinde, elastisite modülü artarken çekme dayanımı azalmaktadır. Karbonlama sırasında kritik zamanlarda karbon flamentlerin çekilmesi, son karbon

flamentde arzu edilen tercipli yönlenme oluşturulabilir. Flamentler yüzlerce veya binlerce flamentleri içeren gevşek bir şekilde iplik veya kırıkt haline getirilebilir [5].

Karbon Fiber Özellikleri [1];

- düşük yoğunluk
- yüksek çekme modülü ve dayanımı
- düşük termal genleşme katsayısı
- 3000 °C üzerinde oksijen varlığında termal kararlılık
- mükemmel sürünme dayanımı
- güçlü asitlerde daha iyi kimyasal kararlılık
- biyouyumluluk
- yüksek termal iletkenlik
- düşük elektrik özdirenç

4.2. Fenolik Reçine

Matris malzemeler genellikle tok ve sünektir, yükü fiberlere iletir ve kırılan fiberlerdeki çatlağın kompozit boyunca yayılmasını önler. Matrisin aynı zamanda, tüm kompozitin dayanımına katkı sağlayabilecek sağlamlıkta olması gerekir.

Matris, fiberi çevreler böylece fiberleri kimyasal ve çevresel etkilere karşı korur. Fiberlerin maksimum yükü taşıyabilmesi için matrisin fibere göre düşük modüle ve iyi uzamaya sahip olması gerekmektedir. Matris seçimi kimyasal, termal, elektriksel, alev alabilirlik, çevresel, fiyat, performans, üretim ihtiyaçlarına göre yapılır[4].

Ergime sıcaklığı genellikle kompozitin yüksek sıcaklık kullanımını sınırlamaktadır. Polimerler 80 °C, polyesterler 315 °C ve polyamid reçineler 315 °C'ye kadar kullanılabilir. Metal matrisler yüksek sıcaklıklarda kullanım imkanı sağlar [5].

Çizelge 4.1 : Termoset reçine özellikleri [4]

Reçine	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü GPa	Çekme Dayanımı MPa (10 ⁶ psi)
Epoksi	1.2-1.4	2.5-5.0	50-110
Fenolik	1.2-1.4	2.7-4.1	35-60
Polyester	1.1-1.4	1.6-4.1	35-95

Fenolik reçineler çok iyi kalıplanabilir malzemelerdir. Fenol ile formaldehit arasında kondensasyon polimerizasyon reaksiyonu ile üretilirler. Fenol katı bir malzeme olup,

kömür katranının destilasyonundan veya benzenden sentetik olarak elde edilir. Formaldehit normal olarak bir gazdır fakat formalin isimli bir çözelti vermek üzere suda çözünür. Metil alkolün oksidasyonu ile elde edilir [16].



Şekil 4.3 : Fenolik reçine: (a) Fenol (b) Formaldehit [7]

Fenolik reçinelerin ticari amaçlar için üretiminde ilk kademe düşük molekül ağırlıklı bir polimer üretimidir. Bu polimere daha sonra gerekli maddeler ilave edilerek ve tekrar bir işleme tabi tutularak yüksek molekül ağırlıklı çapraz bağlı malzeme elde edilir. İlk elde edilen düşük molekül ağırlıklı malzemelere resol veya novalak adı verilir [16].

Resol; fenolün, alkali koşullarda fazla miktarda formaldehit ile reaksiyonu ile hazırlanır. Düşük molekül ağırlıklı bir polimer olup, basitçe sadece ısıtılarak çapraz bağlı hale getirilir. Ticari reçine elde etmek için eğer resol kullanılacaksa tek yapılacak işlem hepsini bir reaksiyon kabına koymak ve sürekli olarak ısıtmaktır. Sonuçta *tek basamaklı reçineler* elde edilir [16].

Novalak; formaldehitin fazla miktarda fenol ile asidik koşullarda reaksiyonu ile elde edilir. Düşük molekül ağırlıklı polimerlerde çapraz bağlar sadece ısıtılarak elde edilemez. Isıtma sırasında fazla miktarda formaldehite gereksinim vardır. Basit novalaklar dolgu maddeleriyle birlikte ve diğer gerekli katkılarla karıştırılır ve ticari reçine elde edilmesi için daha fazla formaldehit eklenerek ısıtılır (*İki basamaklı reçine*) [16].

Bu işlemler sonucu elde edilen reçineler çok miktarda çapraz bağlı olmakla beraber, halen sıcaklık ve basınç altında dağılacak bir durumdadır. Bu nedenle bu reçineler sıcak ortamda kalıplamaya çok elverişlidirler. Bu sıcak kalıplama, çapraz bağlanmada son aşamayı yaparak, kalıplama sonucu dağılmayan bir termoset oluşturur. Reçineler içinde çapraz bağlanma (CH_2) gruplarının yakın benzen

halkalarına bağlanması sonucu meydana gelir. Benzen ile bağlanma zincirin değişik noktalarında meydana geldiği için üç boyutlu bir ağ molekül oluşur [16].

Fenolik reçineler sert ve oldukça gevrek olup, iyi elektriksel yalıtkanlığına sahiptirler.

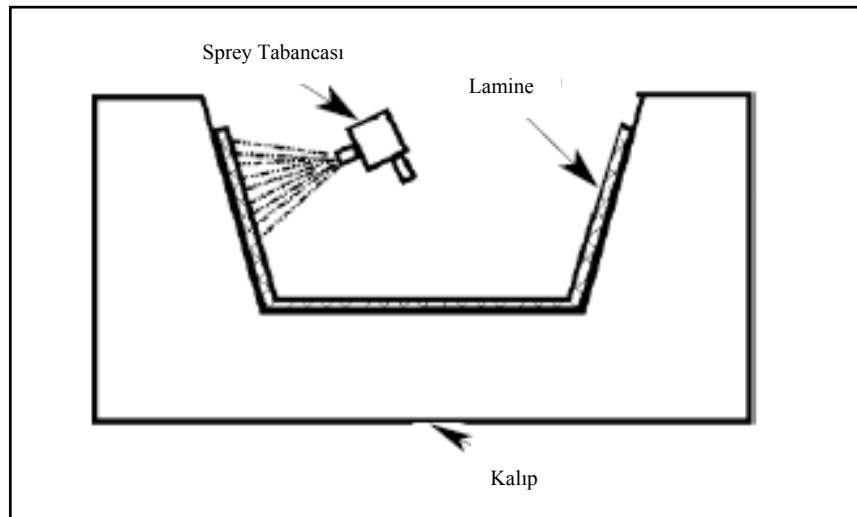
Fenolikler, RTM, enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kalıplama gibi çeşitli kompozit üretiminde kullanılırlar. Ayrıca malzemeye işlenebilirlik, düşük toleranslar ve yüksek dayanım kazandırır. Yüksek sıcaklık dayancından dolayı fenolikler, egzoz bileşenlerinde, füze parçalarında, elektrik düğmeleri ve fren balatalarında kullanılırlar [4].

5. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Fiber takviyeli kompozitlerin için çeşitli üretim yöntemleri vardır. Bunlar, spreyleme prosesi, ıslak yatırma, filament sarma, profil çekme ve reçine transfer kalıplama yöntemleridir.

5.1. Spreyleme Prosesi

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biri olan spreyleme prosesi diğer üretim yöntemlerine göre daha ekonomik ve daha hızlıdır. Spreyleme prosesinde takviye elemanı ve reçineyi püskürtmek için spreylama tabancası kullanılır. Kalıp içerisine püskürtülen takviye elemanı malzemeleri olarak cam fiber ya da karbon fiber kırılmış olarak eklenebilir. Ayrıca reçinenin daha hızlı katılaşması için katalist ilavesi spreyleme işlemi esnasında yapılabilir. Spreylama tabancası kompozit malzeme üretimi sırasında kullanılan fiberleri daha önceden belirlenmiş uzunluklarda (10-40 mm) eş zamanlı olarak kırarak reçinenin içinden itilmesini sağlar [4]. Spreyleme prosesinin şematik gösterimi Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Spreyleme prosesinin şematik görünümü [4]

Takviye malzemesi olarak en çok E-camı, bunun yanı sıra da karbon fiber ve kevlar da kullanılmaktadır. Bu proste takviye elemanın ağırlık oranı, kompozit malzemenin toplam ağırlık oranına göre yaklaşık % 20-40 arasında olmalıdır.

Spreyleme sırasında sıvı reçine atomize olarak ince partikül parçalarına ayrılması gerekmektedir. Bu şekilde düzgün spreyleme deseni oluşturulabilir. Bunun içinde gerekirse çözücü ile karıştırılır [17].

Spreyleme prosesinde kalınlık, spreyleme desenine ve operatör yeteneğine göre değişebilir. Malzeme kalıba spreylendikten sonra fiberin iyi ıslanması ve içindeki havanın çıkarılması için fırça ya da merdaneler kullanılır.

Temel İşlem Aşamaları [4];

- 1- Kurutulmuş parçanın kalıptan rahatlıkla çıkarılması için kalıp yüzeyi mumlanır ya da parlatılır.
- 2- Jelatinli koruyucu tabaka kalıp yüzeyine uygulanır. Tabakalar spreylene meden önce kurutulması sağlanır.
- 3- Reçine, katalist ve kırılmış fiber kalıp yüzeyine spre y tabancası ile püskürtülür. Kompozitin her bölgesinde aynı kalınlığı yakalamak için spreyleme belirli bir şekle göre yapılır.
- 4- Fiberin reçine tarafından iyi ıslatılabilmesi için merdane kullanılır.
- 5- Tabaka fırında kürlenir.
- 6- Elde edilen parça kalıptan ayrılır ve gerekiyorsa son işlemler yapılır.



Şekil 5.2 : Spreyleme prosesi [4]

Spreyleme prosesinin avantajları;

- ❖ Küçük ve büyük parçalar için ekonomik bir prosestir.
- ❖ Kullanılan cihaz ve hammaddeler ucuza mal edilecek malzemelerdir.

Spreyleme prosesinin sınırlamaları;

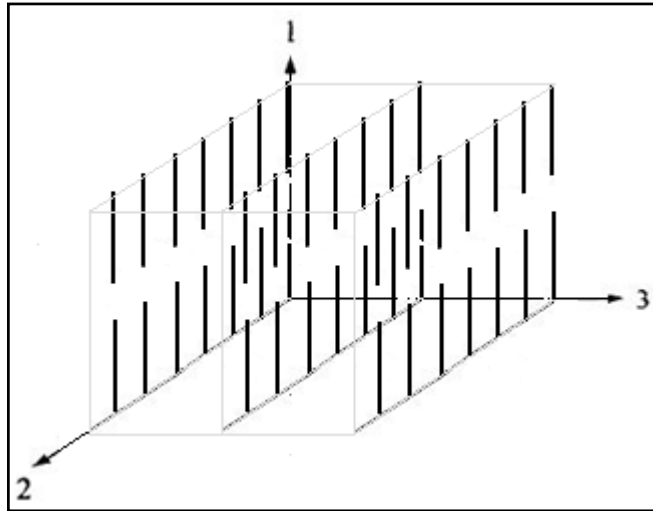
- ❖ Yüksek yapısal dayanımın gerekli olduğu parçaların yapımı için uygun değildir.
- ❖ Proses sırasında kalınlık ve fiber hacim oranını kontrol etmek zordur. Bu parametre operatörün yeteneğine bağlıdır. Ayrıca homojen kalınlık ve sabit püskürtme hızı için otomasyon sisteminden de yararlanılabilir (Şekil 5.2)
- ❖ Prosesin sonunda parçanın bir yüzeyi çok düzgün olmasına rağmen diğer yüzeyi bu kadar düzgün olmayabilir.
- ❖ Boyutsal hassasiyetin önemli olduğu durumlarda tercih edilmez.

6. KISA FİBERLİ POLİMERİK MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MODELLENMESİ VE TASARIMI

Kısa fiber takviyeli kompozitlerin elastik modülü ve termal iletkenliğinin modellenmesi için *Halpin Tsai*, *Nielsen* ve *Cox* modelleri incelenmiş olup, *Fu* ve *Mai* tarafından tanımlanan model kullanılmıştır. Bu model değişik boylardaki kısa fiberlerin matris içerisinde rastgele dağıldığı bir kompoziti tanımlamaktadır. Bu kompozitin elastik modülü ve termal iletkenliği, kısa fiberlerin düzgün olarak sıralandığı bir sistem için ele alınabilecek modellerin fiber boy dağılımının katkısı ve fiber yönelim dağılımının katkısını ifade eden iki adet fonksiyonla modifiye edilmesiyle modellenmiştir.

6.1. Fiber Uzunluk Dağılımı

Tasarım ilkelerinde de ifade edildiği kompozitin her tabakası iki boyutlu olarak ele alınmaktadır. Tek doğrultuda sıralanmış kısa fiberli bir kompozit için oluşturulmuş koordinat eksenleri Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Süreksiz fiberlerin 1 doğrultusunda dizildiği kompozit modeli

Bu kompozitin 1 yönündeki elastik modülü E_{11} Cox modeline göre aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$E_{11} = E_f \left[1 - \frac{\tanh\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\frac{\beta l}{2}} \right] V_f + E_m(1 - V_f) \quad (6.1)$$

$$\beta = \left[\frac{2\pi G_m}{E_f(\pi r_f^2) \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)} \right]^{1/2} \quad (6.2)$$

Bu kompozitin 2 yönündeki elastik modülü E_{22} Halpin-Tsai modeline göre aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$E_{22} = E_m(1 + 2\eta_1 V_f)/(1 - \eta_1 V_f) \quad (6.3)$$

$$G_{12} = G_m(1 + \eta_2 V_f)/(1 - \eta_2 V_f) \quad (6.4)$$

$$\eta_1 = (\frac{E_f}{E_m} - 1)/(\frac{E_f}{E_m} + 2) \quad (6.5)$$

$$\eta_2 = (\frac{G_f}{G_m} - 1)/(\frac{G_f}{G_m} + 1) \quad (6.6)$$

Fiber boyunca olan poisson oranı;

$$v_{12} = v_f V_f + v_m(1 - V_f) \quad (6.7)$$

Çapraz yönde olan poisson oranı;

$$v_{21} = v_{12} E_{22}/E_{11} \quad (6.8)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} \\ Q_{11} & Q_{22} & Q_{26} \\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (6.9)$$

$$Q_{11} = E_{11}/(1 - v_{12}v_{21}) \quad (6.10)$$

$$Q_{12} = v_{21} Q_{11} \quad (6.11)$$

$$Q_{16} = 0 \quad (6.12)$$

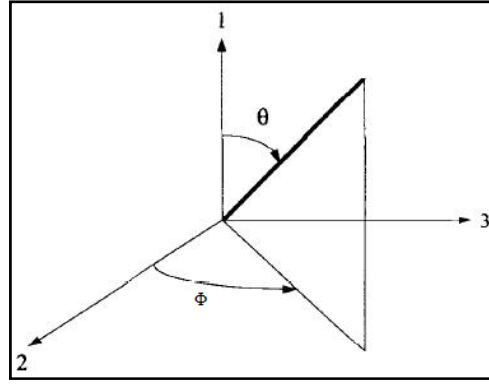
$$Q_{22} = E_{22}/(1 - v_{12}v_{21}) \quad (6.13)$$

$$Q_{26} = 0 \quad (6.14)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (6.15)$$

6.2. Fiber Yönelim Dağılımı

Süreksiz fiberlerin kompozit içindeki yönelimleri küresel bir koordinat sistemi içerisinde ifade edilebilir. Tek fiberin tanımlandığı koordinat sistemi Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Süreksiz fiberin yönelimi üç eksenli koordinat sisteminde θ ve Φ koordinatlarıyla tanımlanabilir

Süreksiz fiberlerin yönelim dağılımının bu modele katkısını hesaba katabilmek için yukarıda tanımlanmış matrisin söz konusu küresel koordinatlara geçirilmesi gerekmektedir, ancak temel tasarım ilkelerinde de belirtildiği gibi kompozit tabakası iki boyutlu kabul edilmiştir, sadece θ yönelimi hesaba katıldığında;

$$\begin{Bmatrix} \sigma'_1 \\ \sigma'_2 \\ \tau'_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon'_1 \\ \epsilon'_2 \\ \gamma'_{12} \end{Bmatrix} \quad (6.16)$$

$$\begin{Bmatrix} Q'_{11} \\ Q'_{22} \\ Q'_{12} \\ Q'_{66} \\ Q'_{16} \\ Q'_{26} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m^4 & n^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ en^4 & m^4 & 2m^2n^2 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & m^4 + n^4 & -4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^2n^2 & -2m^2n^2 & (m^2 - n^2)^2 \\ m^3n & -mn^3 & mn^3 - m^3n & 2(mn^3 - m^3n) \\ mn^3 & -m^3n & m^3n - mn^3 & 2(mn^3 - m^3n) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{22} \\ Q_{12} \\ Q_{66} \end{Bmatrix} \quad (6.17)$$

$$m = \cos\theta \text{ ve } n = \sin\theta \quad (6.18)$$

Modelin başında belirtildiği gibi fiberlerin farklı yönlerde dağılımının tek yönde düzgün sıralanmış fiberler modeline katkısını ifade eden fonksiyon; fiber yönelim olasılık dağılımı fonksiyonudur. Fiber yönelim olasılığı fonksiyonu $g(\theta)$, bir yöndeki yönelimleri θ ile $\theta+d\theta$ açısı arasında değişen fiberlerin olasılık yoğunluklarına bağlıdır. Buna göre fiber yönelim olasılığı fonksiyonu aşağıdaki denklemle ifade edilir;

$$g(\theta) = \frac{(\sin\theta)^{2p-1}(\cos\theta)^{2q-1}}{\int_{\theta_{min}}^{\theta_{maks}} (\sin\theta)^{2p-1}(\cos\theta)^{2q-1} d\theta} \quad (6.19)$$

Denklemdeki p ve q şekil parametreleridir.

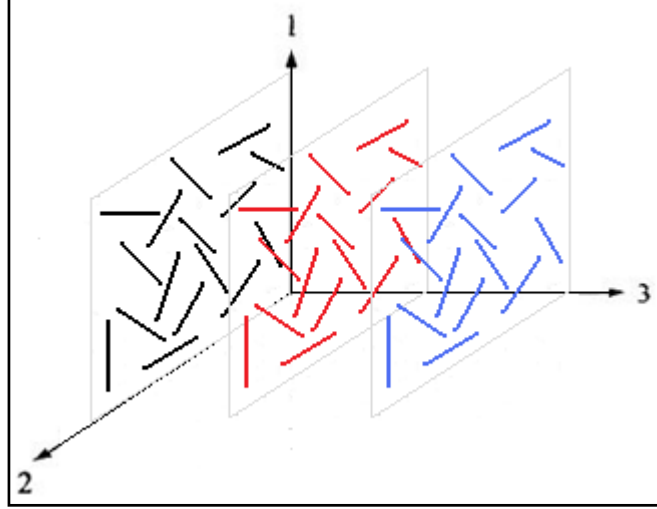
Fiberin ortalama yönelim açısı;

$$\theta_{ortalama} = \int_0^\infty \theta g(\theta) d\theta \quad (6.20)$$

En olası fiber yönelim açısı;

$$\theta_{mod} = \arctan \left\{ \left[\frac{2p-1}{2q-1} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (6.21)$$

Burada tek doğrultulu düzgün fiber dizilimi modelinden, Şekil 6.3'te gösterilen, fiberlerin iki boyutlu uzayda rastgele yönlendiği kompozit katmanı modeline geçilebilir.



Şekil 6.3 : İki boyutlu uzayda rastgele yönelim gösteren süreksiz fiber takviyeli kompozitin modeli

Kompozit katmanının sertliği;

$$\bar{A}_{ij} = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{maks}} Q'_{ij} g(\theta) d\theta \quad (6.22)$$

$$0 \leq \theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{maks} \leq \pi/2 \quad (6.23)$$

Kompozit katmanının 11 yönündeki elastik modülü;

$$\bar{E}_{11} = \frac{\bar{A}_{11} \bar{A}_{22} - \bar{A}_{22}^2}{\bar{A}_{22}} \quad (6.24)$$

Kompozit katmanının 22 yönündeki elastik modülü;

$$\bar{E}_{22} = \frac{\bar{A}_{11} \bar{A}_{22} - \bar{A}_{22}^2}{\bar{A}_{11}} \quad (6.25)$$

6.3. Isıl İletimin Modellenmesi

Isıl iletimin modellerken elastik modülün modellenmesi için kullanılan yöntem takip edilmiş, tek doğrultuda düzgün dizilmiş süreksiz fiber ile takviye edilmiş kompozit

model alınarak 11 ve 22 yönlerindeki ısı iletkenlik Halpin Tsai modelinden alınmıştır.

Fiber dizilim doğrultusun yönündeki ısı iletkenlik;

$$K_1 = \frac{1+2\alpha\mu_1 V_f}{1-\mu_1 V_f} K_m \quad (6.26)$$

Fiber dizilim doğrultusuna dik yöndeki ısı iletkenlik;

$$K_2 = \frac{1+2\mu_2 V_f}{1-\mu_2 V_f} K_m \quad (6.27)$$

$$\mu_1 = \frac{\frac{K_{f1}}{K_m} - 1}{\frac{K_{f1}}{K_m} + 2\alpha} \quad (6.28)$$

$$\mu_2 = \frac{\frac{K_{f2}}{K_m} - 1}{\frac{K_{f2}}{K_m} + 2} \quad (6.29)$$

Kompozit tabakasının herhangi bir eksenini doğrultusundaki ısı akısı;

$$q_i = -K_i \Delta T_i \quad i = 1, 2 \quad (6.30)$$

Kompozit tabakası tasarımı gereği iki boyutlu uzayda rast gele yönellimlere dağılmış süreksiz fiber takviyeleri muhteva etmektedir. Tanımlanan bu modele geçebilmek için yukarıda verilen Halpin Tsai modeli fiber yönelim olasılık dağılımı fonksiyonu ile modifiye edilerek 1 ve 2 yönündeki ısı iletkenlik bulunabilir. Fiber yönelimi θ ve ϕ koordinatlarıyla ifade edilmektedir ancak dağılım iki boyutlu uzayda olduğu kabul edildiğinden sadece θ koordinatı kullanılmalıdır. Öncelikle, 1 yönündeki ısı iletim iki boyutlu uzayda küresel koordinatlarla tanımlanmalıdır;

$$K'_1 = K_1 \cos^2 \theta + K_2 \sin^2 \theta \quad (6.31)$$

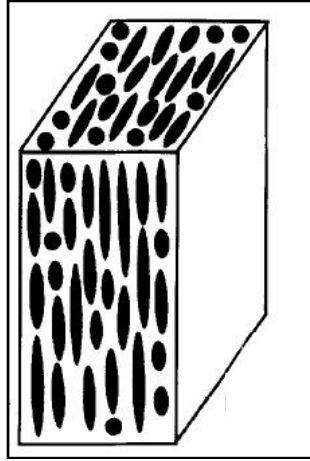
Bu ifade fiber yönelim olasılık dağılımı fonksiyonu ile modifiye edilerek kompozitin 1 yönündeki ısı iletkenliğine ulaşılır;

$$K_c = \sum_{k=1}^M K'_1 h_k = \int_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} K'_1 g(\theta) d\theta \quad (6.32)$$

Aşınır kompozitin 3 yönündeki ısı iletkenliği de önemlidir. Fiber yönelimi ne olursa olsun 3 eksenini, fiber eksenine normal doğrultuda olacaktır. Bu durumda 1 doğrultusunda yönlenmiş fiberlerden oluşan kompozit için 2 doğrultusunda belirlenen ısı iletim modeli, rastgele yönlenmiş fiberlerden oluşan iki boyutlu kompozitin 3 doğrultusu için de uygun olacaktır. Bu doğrultudaki ısı iletim için Halpin Tsai modelinde tanımlanan K_2 kullanılabilir.

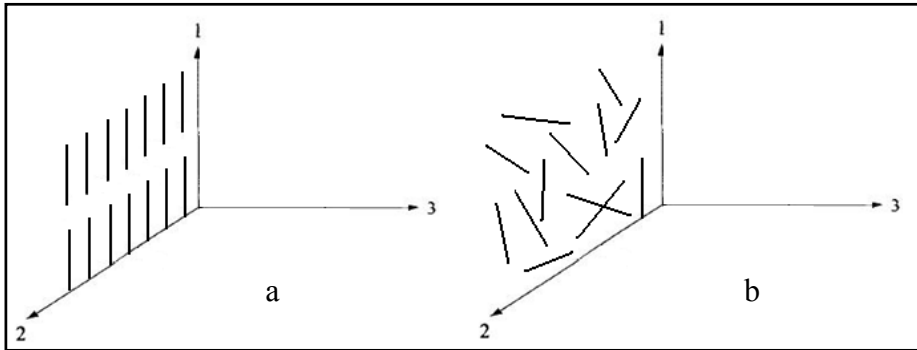
6.4. Elastisite Modülünün Hesaplanması

Spreyleme prosesi ile üretilen kompozit katmanlı yapıdır. Kompozit katmanları yaklaşık 0,5 mm kalınlığında kaplanabilmektedir. Kırpılan fiber boyu ise sabit bir uzunluk olup, fiberler 15 mm boyundadır. Bu durumda kompozit, iki boyutlu geometride kabul edilebilir. Bu kompozitlerin modellemesi yapılırken yönelim dağılımının $g(\theta)$ tek düzlem içerisinde olduğu değerlendirilmektedir. Şekil 6.1'e göre fiberler sadece 1-2 düzlemine göre yönelirler. Φ açısı 0 olarak alınır. Bu nedenle Şekil 6.2'de görülen tabaka kesitine göre modelleme yapılır.



Şekil 6.4 : Fiberlerin yönlenmesi

Tek doğrultuda sıralanmış kısa fiberli kompozitler için *fiber yönündeki modül*, E_{11} , fiber aç oranına $(l/2r_f)$ bağlıdır. Burada r_f , fiber çapıdır. Şekil 6.3'de 1-2 düzlemine göre tek doğrultuda ve rastgele yönlenmiş fiberler görülmektedir.



Şekil 6.5 : Fiber yönlenmesi: (a) Tek doğrultuda yönlenmiş (b) Rastgele yönlenmiş

Fiber yönelim olasılığı fonksiyonun çözümlenmesi;

Terimler değiştirilerek; $2p-1=mm$; $2q-1=nn$;

$$g(\theta) = \frac{(\sin \theta)^{2p-1} (\cos \theta)^{2q-1}}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{2p-1} (\cos \theta)^{2q-1} d\theta}$$

Paydanın hesaplanması:

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{mm} (\cos \theta)^{nn} d\theta$$

Bu integrali alabilmek için u , du değişken dönüşümü yapalım;

$$u = \sin \theta$$

$$du = \cos \theta \cdot d\theta$$

Ayrıca;

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

$$\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$$

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{mm} (\cos \theta)^{nn} d\theta = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{mm} (\cos \theta)^{nn-1} \cos \theta \cdot d\theta = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{mm} (\cos^2 \theta)^{(nn-1)/2} \cos \theta \cdot d\theta$$

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (\sin \theta)^{mm} (1 - \sin^2 \theta)^{(nn-1)/2} \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (u)^{mm} (1 - u^2)^{(nn-1)/2} \cdot du$$

Yukardaki integralde $(1 - u^2)^{(nn-1)/2}$ terimi açıldığında:

$$(1 - u^2)^{(nn-1)/2} = a_1 u^0 - a_2 u^2 + a_3 u^4 - a_4 u^6 + a_5 u^8 \dots + a_{nn} u^{nn-1}$$

Parantezin katsayılarının bulunması için binom açılımı kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} & \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (u)^{mm} (1 - u^2)^{(nn-1)/2} \cdot du = \\ & = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (u)^{mm} (a_1 u^0 - a_2 u^2 + a_3 u^4 - a_4 u^6 + a_5 u^8 \dots + a_{nn} u^{nn-1}) du \end{aligned}$$

$$g(\theta) = \frac{(\sin \theta)^{mm} (\cos \theta)^{nn}}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} (u)^{mm} (a_1 u^o - a_2 u^2 + a_3 u^4 - a_4 u^6 + a_5 u^8 \dots + a_{nn} u^{nn-1}) du}$$

Kavramsal tasarımda matematiksel olarak modellenen elastikiyet modülünün bulunması için gerekli tüm kavramların hesaplanmasında kullanılan MATLAB 7.7.0 program kodu;

```
% -----  
% - E L A S T I K İ Y E T   M O D Ü L Ü -  
% -----  
clear all;      %degiskenlerin icerigini temizler  
clc;           %clear screen: ekrani temizler  
p=;  
q=;  
mm=2*p-1;  
nn=2*q-1;  
  
Vf=;          %kompozitin fiber/matris hacim oranı  
Em=2.18;      %matrisin elastikiyet modülü  
Ef=240;       %fiberin elastikiyet modülü  
Gm=1.03;      %matrisin kayma modülü  
Gf=27.6;      %fiberin kayma modülü  
  
vm=0.35;      %matrisin poision oranı  
vf=0.22;      %fiberin poision oranı  
rf=0.005;     %fiber yarıçapı  
  
%Fiber yönelim olasılık fonksiyonunun hesaplanması  
  
%payda  
payda=0;  
for i=1:90      % fiberlerin yönelim açılarının değişimi  
    aci=i*2*pi/360; %radyan olarak aci degeri  
    payda=payda+(sin(acı)^mm)*(cos(acı)^nn);  
end  
  
aci_mean=0;  
for i=1:90  
    aci=i*2*pi/360; %radyan olarak aci degeri  
    radd(i)=aci;    %grafigi çizerken yatay ekseni radyana çevirir.  
    pay=(sin(acı)^mm)*(cos(acı)^nn);  
    g(i)=pay/payda;
```

```

        aci_mean=aci_mean + i*g(i);           %Ortalama açı değeri
end
aci_mean_rad=aci_mean*2*pi/360               %Radyan cinsinden ortalama
değeri
aci_mean                                     %Derece cinsinden ortalama
değeri

%Fiber yönelim olasılık fonksiyonunun fiber yönelim açısına göre
olan davranışının grafiği
plot(g);   %yatay eksenini derece cinsinden çizdirir.
           %default olarak i'ye bağlı çizer.

title({'p ve q=', p, q});
xlabel('Fiber Yönelim Acisi, Theta [derece]');
ylabel('Fiber Yönelimi Olasilik Yogunluk Fonksiyonu, g(theta)');

% -----
% Halpin-Tsai modeline göre elastikiyet modülünün hesaplanması

lnnR_rf = 0.5*log( 2*pi / (Vf*sqrt(3)) );
beta = sqrt( 2*pi*Gm / (Ef*pi*rf*rf*lnnR_rf) );
aci_hiper = beta*15/2;                       %derece cinsinden
aci_hiper_rad = aci_hiper*(2*pi/360);       %radyan cinsinden

E11 = Ef*(1 - (tanh(aci_hiper_rad))/aci_hiper)*Vf + Em*(1 - Vf);

nu1 = (Ef/Em - 1) / (Ef/Em + 2);
nu2 = (Gf/Gm - 1) / (Gf/Gm + 1);

E22 = Em*(1 + 2*nu1*Vf) / (1 - nu1*Vf);
G12 = Gm*(1 + nu2*Vf) / (1 - nu2*Vf);

v12 = vf*Vf + vm*(1 - Vf);
v21 = v12 * (E22/E11);

Q11 = E11 / (1 - v12*v21);
Q12 = v21 * Q11;
Q16 = 0;
Q22 = E22 / (1 - v12*v21);
Q66 = G12;

```

```

% -----
%Matrisin küresel koordinatlara çevrilmesi

A11=0; A22=0; A12=0;
for i=1:1:90
    aci = i*2*pi/360;    %radyan olarak aci degeri
    m=cos(aci);
    n=sin(aci);

    Q11_u = Q11*(m^4) + Q22*(n^4) + Q12*2*(m^2)*(n^2) +
Q66*4*(m^2)*(n^2);
    Q22_u = Q11*(n^4) + Q22*(m^4) + Q12*2*(m^2)*(n^2) +
Q66*4*(m^2)*(n^2);
    Q12_u = Q11*(m^2)*(n^2) + Q22*(m^2)*(n^2) + Q12*((m^4)+(n^4))
- Q66*4*(m^2)*(n^2);

%Fiber yönelim açısının dağılımının elastikiyet modülüne etkisi.

A11 = A11 + Q11_u*1*g(i);
A22 = A22 + Q22_u*1*g(i);
A12 = A12 + Q12_u*1*g(i);
end

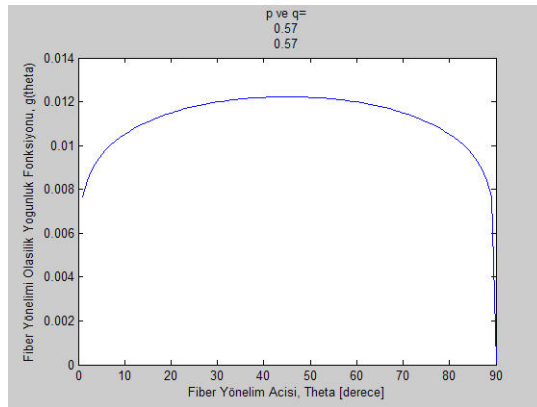
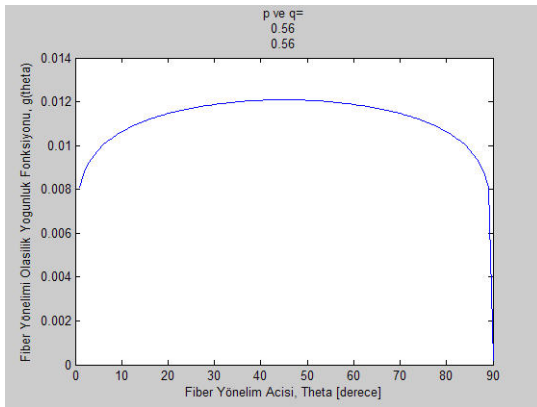
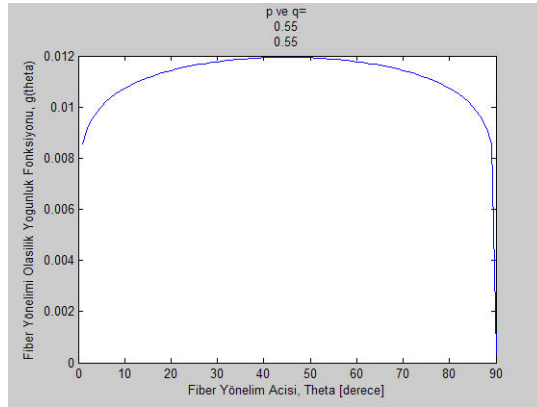
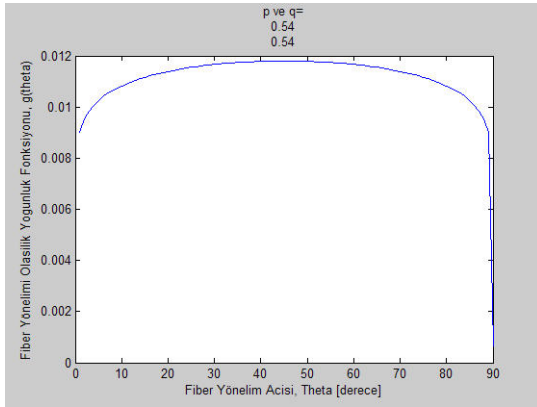
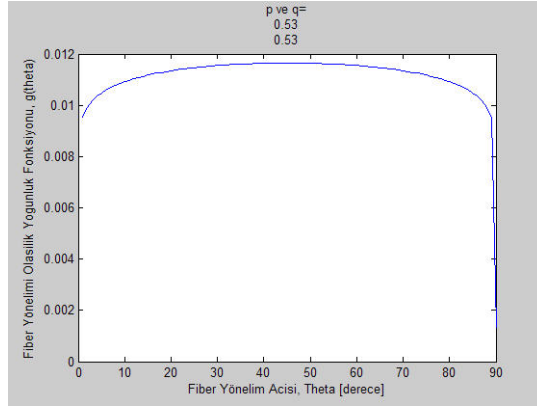
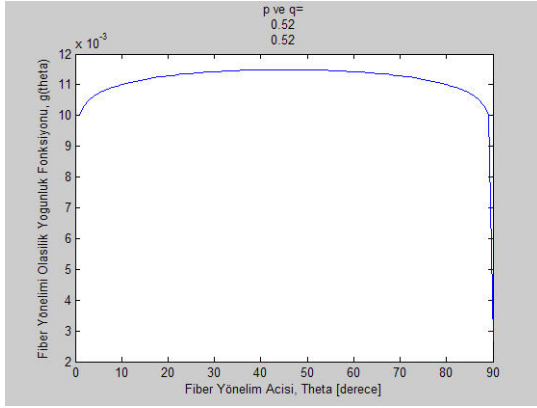
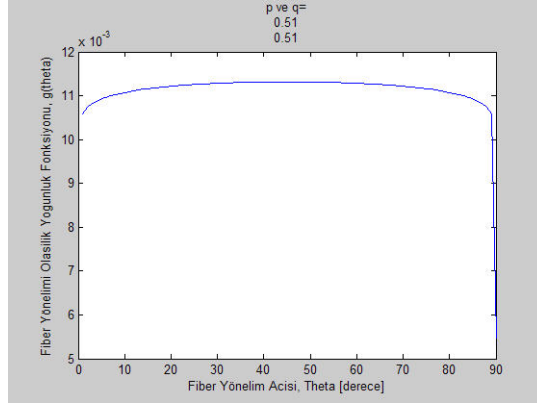
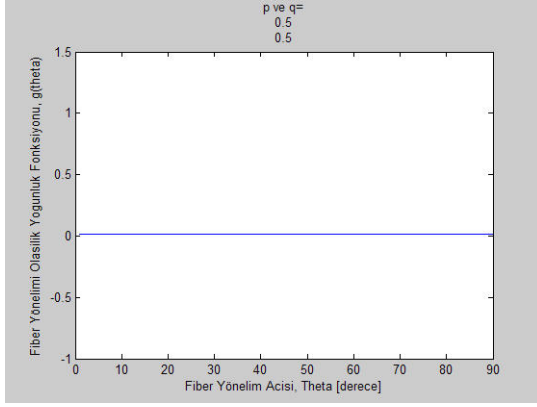
A=[A11 A22 A12]

E11_u = (A11*A22 - A12*A12) / A22;
E22_u = (A11*A22 - A12*A12) / A11;

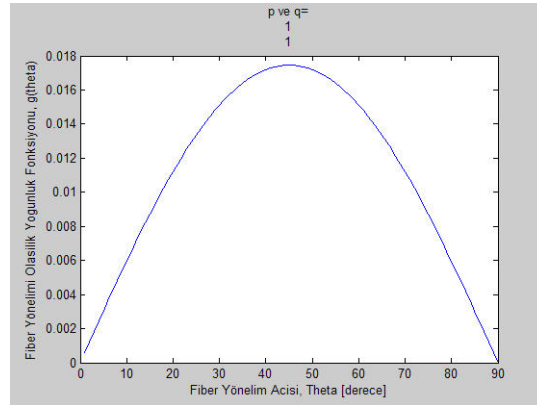
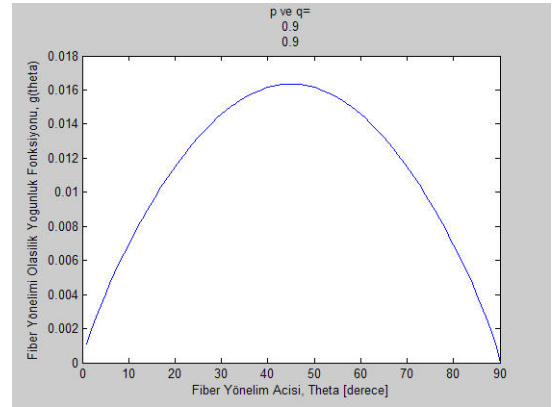
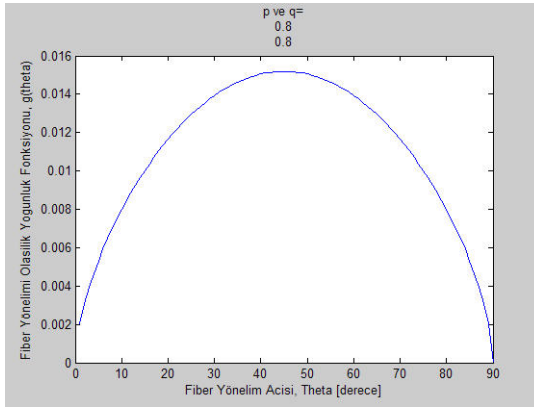
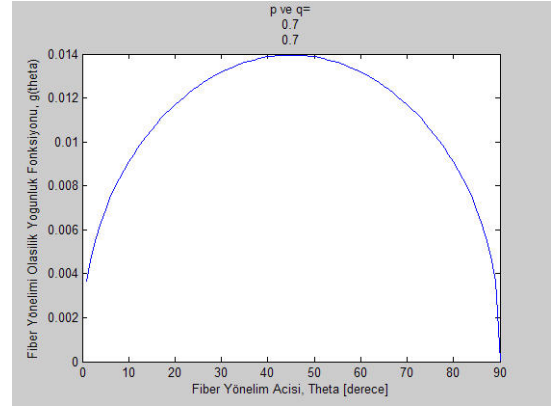
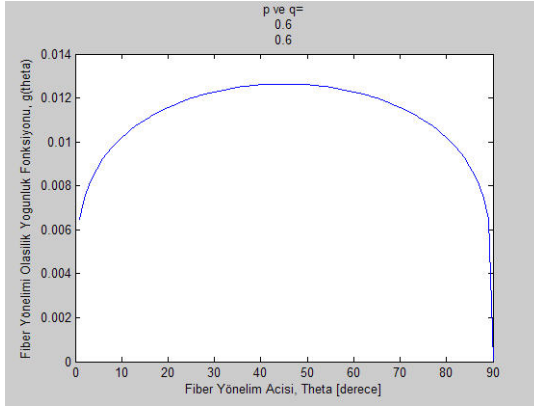
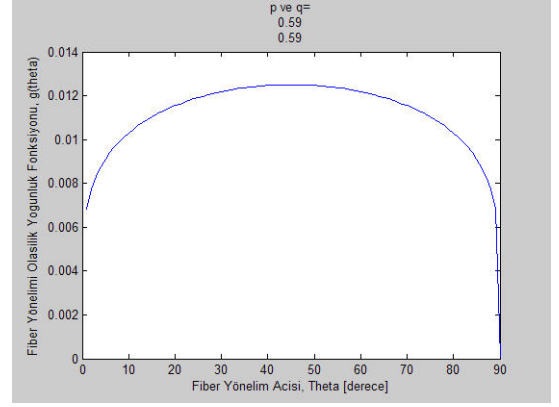
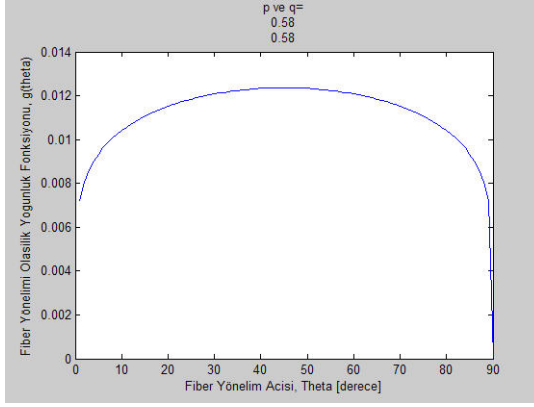
%Elastikiyet modülü;

E=[E11_u E22_u]

```



Şekil 6.6 : Fiber yönelim olasılığı fonksiyonun $0,5 < p = q < 0,57$ aralığındaki değişimi



Şekil 6.7 : Fiber yönelim olasılığı fonksiyonun $0,58 < p = q < 1$ aralığındaki değişimi

Kavramsal tasarım gereği fiberler her yönde (2 boyutlu uzayda) rastgele olarak dağılmıştır, her açı değeri için fiber yönelim yoğunluğunun eşit olması beklenir. Şekil parametreleri p ve q fiber yönelim olasılığı fonksiyonun şeklini belirlemektedir. Bu parametrelerin farklı değerleri denenerek (0,5 değerinin altında olamazlar) fonksiyonun grafikleri çizdirilir. Grafiklerden, açı eksenine paralel bir çizgiye en yakın olanı kavramsal tasarımı destekleyen şekil parametrelerini verecektir. Bu parametreler kullanılarak yüzeye paralel yönlerdeki elastikiyet modüllerine ulaşılır.

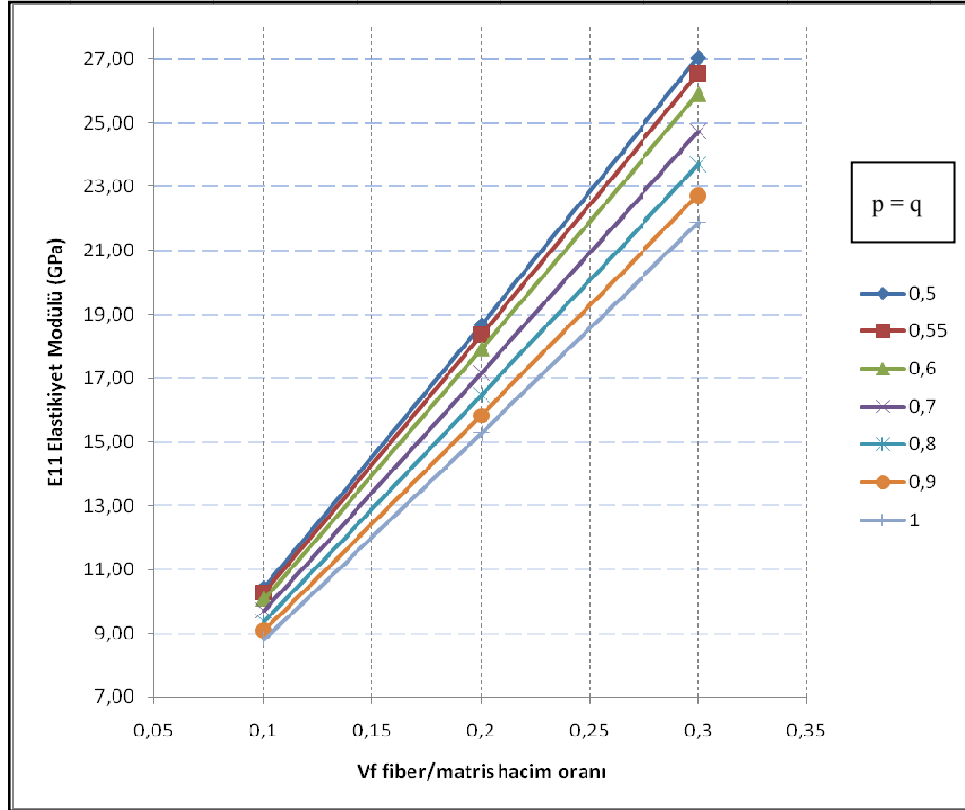
Matris malzemesi olarak SC1008 resol tipi fenolik reçine ve takviye malzemesi olarak karbon fiber seçilerek oluşturulabilecek karbon/fenolik kompozitlerin, farklı fiber/matris hacim oranları için hesaplanan elastikiyet modüllerinin şekil parametreleriyle değişimi Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Karbon/Fenolik kompozitlerin elastikiyet modülleri

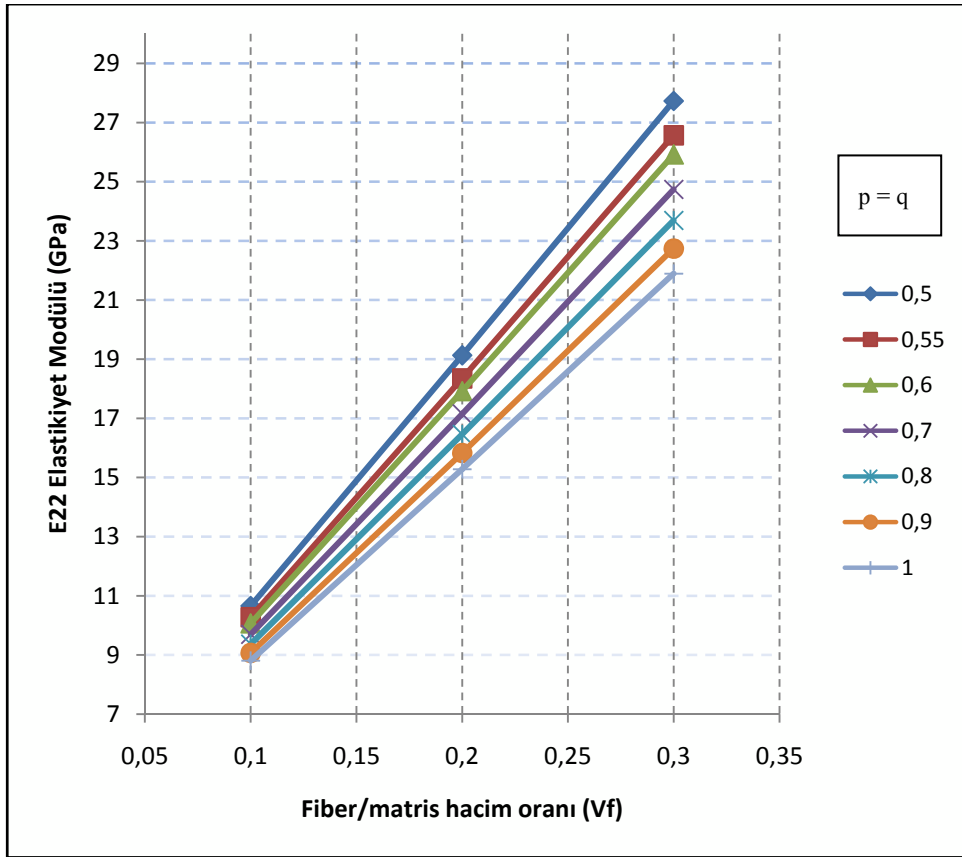
Şekil Parametreleri		$(V_f) = 0,1$		$(V_f) = 0,2$		$(V_f) = 0,3$	
p	q	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)
0,50	0,50	10,43	10,66	18,67	19,13	27,05	27,73
0,51	0,51	10,41	10,53	18,64	18,86	27,00	27,34
0,52	0,52	10,39	10,44	18,58	18,69	26,91	27,07
0,53	0,53	10,35	10,38	18,51	18,56	26,80	26,88
0,54	0,54	10,31	10,33	18,42	18,45	26,68	26,72
0,55	0,55	10,27	10,28	18,34	18,35	26,55	26,57
0,56	0,56	10,23	10,24	18,26	18,26	26,42	26,43
0,57	0,57	10,19	10,19	18,17	18,18	26,30	26,30
0,58	0,58	10,15	10,15	18,09	18,09	26,17	26,17
0,59	0,59	10,11	10,11	18,01	18,01	26,04	26,04
0,60	0,60	10,07	10,07	17,92	17,92	25,92	25,92
0,70	0,70	9,70	9,70	17,15	17,15	24,74	24,74
0,80	0,80	9,37	9,37	16,46	16,46	23,69	23,69
0,90	0,90	9,07	9,07	15,83	15,83	22,74	22,74
1,00	1,00	8,81	8,81	15,28	15,28	21,89	21,89

Fiber hacim oranının karbon/fenolik kompozitlerin 11 yönlerindeki (kompozit yüzeyine paralel) elastikiyet modülüne olan etkisi, farklı şekil parametreleri ($0,5 < p = q < 1,0$) için Şekil 6.8'te gösterilmiştir.

Fiber hacim oranının karbon/Fenolik kompozitlerin 22 yönlerindeki (kompozit yüzeyine paralel) elastikiyet modülüne olan etkisi, farklı şekil parametreleri ($0,5 < p = q < 1,0$) için Şekil 6.9'te gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Karbon/fenolik kompozitlerin 11 yönündeki elastikiyet modülü



Şekil 6.9 : Karbon/fenolik kompozitlerin 22 yönündeki elastikiyet modülü

6.5. Termal İletkenliğinin Hesaplanması

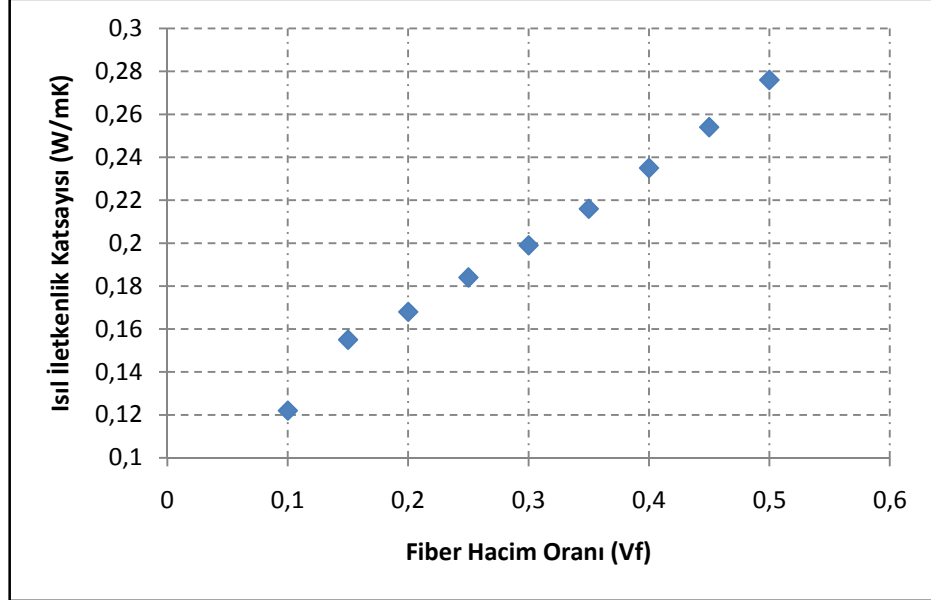
Kavramsal tasarımda tanımlanan kompozitler için Halpin-Tsai modeli kullanılarak yüzeye normal doğrultudaki ısı iletkenlik katsayısı karbon fiber ve cam fiber takviyeli kompozitler için hesaplanması aşağıda verilmiştir.

6.5.1. Karbon/Fenolik Kompozitlerin Isıl İletim Katsayısının Belirlenmesi

Çizelge 6.2 : Karbon/fenolik kompozitlerin ısı iletim katsayıları

Fiber Hacim Oranı (V_f)	Isıl İletkenlik Katsayısı (k_c) ($W m^{-1} K^{-1}$)
0,10	0,122
0,15	0,155
0,20	0,168
0,25	0,184
0,30	0,199
0,35	0,216
0,40	0,235
0,45	0,254
0,50	0,276

Kavramsal tasarıma uygun, karbon fiber takviyeli fenolik matrisli kompozitler için yüzeye normal doğrultudaki ısı iletim katsayısının fiber hacim oranı ile değişimini Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10 : Karbon/fenolik kompozitlerde ısı iletim katsayısı fiber matris oranından yaklaşık doğrusal olarak etkilenmektedir

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Amaç

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitlerin üretimi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında kompozit üretim yöntemlerinden biri olan spreyleme prosesi uygulanmıştır. Bu prosesin ardından yapılan ön kürleme ve kürleme işlemleri ile nihai ürün elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ile bu tür kompozitlerin yüksek sıcaklık altındaki davranışları incelenmiştir. Dinamik ve statik ısı akısı testleri ile kompozit malzemelerin ağırlık kayıpları ve kupon arkası sıcaklıkları belirlenmiştir. Termal iletkenlik ölçümü yapıp, termogravimetrik analiz ile 900 °C'deki bozunmayan miktar ve ilk bozunma sıcaklıkları bulunmuştur.

7.2. Deneylerde Kullanılan Malzeme, Alet ve Cihazlar

Polimerik matrisli kompozitlerin üretimi sırasında takviye elemanı olarak karbon fiber kullanılmıştır. Kullanılan karbon fiberin özellikleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Karbon fiberin özellikleri

Lineer Yoğunluk (tex)	800
Filament Sayısı	12000
Twist (t/m)	0/Z10
Filament Çapı (µm)	7
Kg'daki uzunluk (m/kg)	1250
Yoğunluk (g/cm ³)	1.77
Çekme Dayanımı (MPa)	4300
Çekme Modülü (GPa)	240
Kopma Uzunluğu (%)	1.8
Spesifik Isı Kapasitesi (J/kgK)	710
Termal İletkenlik (W/mK)	17
Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	-0.1
Spesifik Elektrik Dayanımı (Ω cm)	1.6 x 10 ⁻³

Matris malzemesi olarak fenolik reçine kullanılmıştır. Reçine, spreyleme prosesine uygun olması için etanol ile 1/8 oranında çözülmüştür. Reçinenin özellikleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 : Fenolik reçinenin özellikleri

Özellikler	Test Yöntemi	Birim	Değer
Katılaşma, 135 ⁰ C	IR-063	%	60-64
Viskozite	IR-111	cps	180-300
pH, 25 ⁰ C	IR-034		7,9 – 8,5
Spesifik yerçekimi	IR-026		1,07 – 1,10

Karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitin üretiminde fiberlerin kırılması ve reçineyle beraber spreyleme edilebilmeleri için GS Manufacturing marka spreyleme sistemi kullanılmıştır. Kompozitlerin kürlenmesi ve post-kürlenmesi için Binder marka ısıtma fırını, numune hazırlama işlemlerinde CNC torna tezgahı ve Bosch marka diskli kesme cihazı kullanılmıştır. Kayma dayanımı testleri sırasında INSTRON 1195 çekme cihazı ile çalışılmıştır. Kompozitlerin termogravimetrik analizleri için Perkin Elmer TG/DTA, numunelerin yüzey ve kesit incelemesi için ise JEOL JSM 7000F alan emisyonlu tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır.

7.3. Kompozitlerin Üretilmesi

7.3.1. Karbon fiber takviyeli polimerik matrisli kompozitlerin üretimi

Açık kalıp üretim yöntemlerinden biri olan spreyleme prosesi ile karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi yapılmıştır. Bu süreçte kullanılan kırıcı spreyleme tabancası sistemi Şekil 7.1’de görülmektedir. Bu spreyleme sisteminde reçine, tabancadan pnömomatik bir pompa yardımıyla püskürtülür, kırıcı bıçaklar da pnömomatik bir motor tarafından döndürülürler. Sistem, 120 psi basıncında bir kompresör tarafından basınçlı havayla beslenmektedir. Karbon fiber ancak 90 psi basınçla etkin bir şekilde kırılabilir. Kesici bıçakların oryantasyonu fiberleri 15 mm boyunda kırpmak için uygundur. Reçinenin pompalanması için ise 30 psi basıncındaki hava reçine pompasını beslemektedir.



Şekil 7.1 : Kırpıcılı sprej sistemi

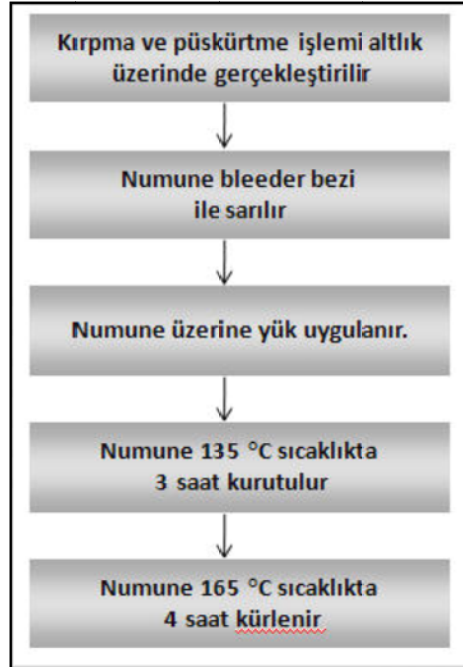
Sprej edilebilir kompozit üretimi; spreyleme, kürleme ve post-kürleme işlemlerini içermektedir. Aşınır kompozitler tabakalar halinde üretilmiştir. Tabakalar arasındaki bağlanma kürleme işlemi esnasında oluşur. Spreylenen her bir tabaka kürlendikten sonra bu tabaka üzerine tekrar spreyleme yapılmıştır. Tabakalı yapı elde edildikten sonra, en son olarak kompozit post-kürlemeye maruz bırakılarak, üretimi tamamlanmıştır.

Spreyleme sırasında reçinenin püskürtülebilmesi için bir çözücü ile çözülmesi gerekmektedir. Çözücü/reçine oranının belirlenmesi için 1/2, 1/4 ve 1/8 oranında karışımlar hazırlanarak püskürtülmüştür. 1/8 oranındaki karışımın atomizasyona uygun olduğu görülmüştür. Tüm üretimlerde bu oran ile çalışılmıştır. Reçineyi çözücü olarak teknik etanol kullanılmıştır.

Ön kürleme ve kürleme işlemleri sırasında numune yüzeyinde kabarmaya bağlı şekil bozukluğu meydana geldiği gözlenmiştir. Bu duruma kompozitten açığa çıkan su ve çözücü buharının neden olduğu anlaşılmıştır. Bu olumsuzluğun giderilmesi amacıyla yük altında kürleme ve vakum altında kürleme yöntemleriyle üretime geçilmiştir. İzlenen bu yöntemler aşağıda belirtilmiştir;

Yük altında kürleme yöntemi; sprej edilmiş numune ıslak halde kalıptan ayırma beziyle kaplanmıştır. Numune düzgün bir yüzeye yerleştirilerek kompozit yüzeyi boyunca yük uygulanmış, 135 °C’de ön kürleme ve 165 °C’de kürleme işlemine tabi

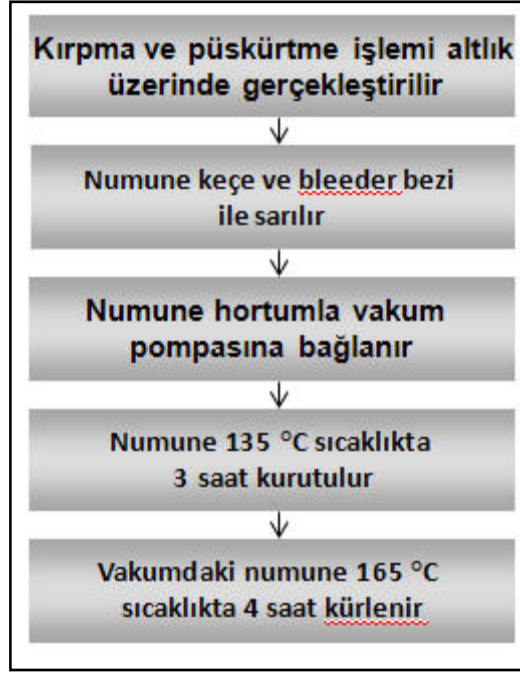
tutulmuştur. Katılaştırma ve kürleme sırasında $2,5 \text{ kgf/cm}^2$ yük uygulanmıştır. Çizelge 7.3’de verilen kalınlıklardaki tüm kompozitlerin her tabakası $135 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 3 saat süreyle ön kürlemeye maruz bırakılıp, sonrasında da 4 saat süreyle $165 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de kürlenmiştir. Şekil 7.2’de yük altında kürleme akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 7.2 : Yük altında kürleme işlemi akış diyagramı

Vakum altında kürleme yöntemi; spreylenmiş numune ıslak halde, vakumlama işlemi sırasında reçinenin vakum sistemine ilerlemesini engelleyen keçe ve kalıptan ayırma beziyle kaplanarak etrafı vakum aparatıyla kapatılmıştır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı hortum vasıtasıyla rotary tipi vakum pompasına 0,8 atm altında bağlanmıştır.

Bu yöntemle üretilmiş kompozitin parametreleri Çizelge 7.3’de gösterilmiştir. Üretilen kompozitlerin her bir katmanı $135 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de kürlenmiş, sonrasında da $165 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de 4 saat süreyle post kürleme uygulanmıştır. Şekil 7.3’de vakum altında kürleme akış diyagramı ve Şekil 7.4’de vakum aparatıyla sarılmış numune görülmektedir.



Şekil 7.3 : Vakum altında kürleme işlemi akış diyagramı



Şekil 7.4 : Vakum aparatlarıyla sarılmış numune

Her iki yöntem ile tabakalar halinde üretim yapılmıştır. Tabaka kalınlığı üretimin bir parametresi olup 0,5 - 1,5 - 2,5 - 4,0 ve 5,0 mm kalınlıkta numuneler üretilmiştir. Çizelge 7.3’de üretim yöntemine bağlı olarak tabaka kalınlıkları verilmiştir.

Çizelge 7.3 : Üretilen kompozitler ve üretim parametreleri

Üretim No.	Kürleme Metodu	Tabaka Sayısı	Kompozit Kalınlığı (mm)
K01	Yük Altında	1	0,5
K02	Yük Altında	3	1,5
K03	Yük Altında	5	2,5
K04	Yük Altında	8	4,0
K05	Yük Altında	10	5,0
K06	Vakum Altında	5	2,5

7.4. Karakterizasyon Çalışmaları

7.4.1. Fiber oranının belirlenmesi

Fiber/reçine ağırlık oranının belirlenmesi için kül tayini yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, 600 °C sıcaklığın üzerinde tüm organik yapıların uzaklaşarak sadece karbon fiberlerin geriye kalacağı ve bu sıcaklıkta karbon fiberlerin herhangi bir reaksiyon vermeyeceği fikrinden hareket etmektedir. Bu yöntemde uygulanan adımlar sırasıyla aşağıda verilmiştir;

- Alümina krozenin darası hassas terazide alınır.
- Ağırlığı en fazla 5 gr olacak şekilde numune, alümina krozenin içine yerleştirilir.
- Numune 600 °C sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilir.
- Bekleme süresinin ardından soğumaya bırakılır.
- Sıcaklık 300 °C'ye geldiğinde, alümina kroze ile birlikte desikatöre yerleştirilerek nem alması engellenir.
- Soğuyan numune oda sıcaklığında tartılarak kompozitten arta kalan fiber ağırlığı bulunur.

Arta kalan fiber ağırlıkları, kompozitin başlangıçtaki ağırlığına oranlanarak fiberin kompozit içerisindeki ağırlıkça oranları bulunmuştur. Kül tayini yönteminden elde edilen fiber oranları Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4 : Kompozitte fiber-reçine oranının kül tayini yöntemi ile belirlenmesi sonucu elde edilen veriler.

Numune no	Ağırlık Kaybı (%)	Fiber/reçine ağırlık oranı (%)
K01	58,85	41,15
K02	66,66	33,34
K03	64,82	35,18
K04	71,52	28,48
K05	67,11	32,89
K06	63,50	36,50

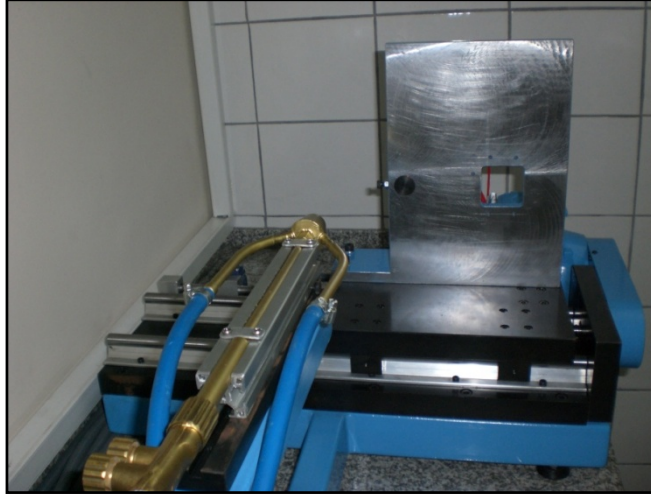
Yük altında kürlenme yöntemi ile üretilen çok tabakalı kompozitlerin, vakum altında kürlenerek üretilen kompozitlere nazaran tasarım aşamasında belirlenmiş fiber ağırlık oranı olan 0,3 değerine daha fazla yaklaştıkları görülmüştür. Bu sonuç değerlendirilirken, numunelerin aynı spreyleme şartları ve kürlenme sıcaklıklarında üretilmiş olmalarına rağmen, vakum altında kürlenene numunelerde bir miktar reçinenin kullanılan keçe tarafından emilerek kayba neden olduğu göz önüne alınmalıdır.

7.4.2. Kompozitlerin ısı karakterizasyonu

Dinamik ısı akısı ve statik ısı akısı testleri, kompozitlerin ısı iletkenlik ve ilk bozunma sıcaklıklarının bulunması ısı karakterizasyon faaliyetlerini oluşturmaktadır. Bu karakterizasyon çalışması kompozitlerin aşınma karakteristiğinin değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır.

7.4.2.1. Dinamik ısı akısı testi ve sonuçları

Dinamik ısı akısı test düzeneği, ASTM-E285-80 standardına göre hazırlanmıştır. Kompozitler 100 x 100 mm boyutlarında kuponlar halinde kesilerek hazırlanmıştır. Kuponlar 20 sn boyunca, 6,62 m³/saat debili oksiasetilen alevinden kaynaklanan yüksek hızlı parçacık akısına maruz bırakılmıştır. Kompozitlerin test öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı belirlenmiştir. Kompozit yüzeyine ulaşan ısı akısı yaklaşık 7.500 kW/m² olarak ölçülmüştür. Dinamik ısı akısı test düzeneği Şekil 7.5’de görülmektedir.



Şekil 7.5 : Dinamik ısı akısı test düzeneği

Dinamik ısı akısı testi için her bir üretimden üçer numune test edilmiş, sonuçların ortalamaları alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.5 : Dinamik ısı akısı test sonuçları

Üretim No.	1	2	3	Ortalama (%Ağırlık Kaybı)
K01	32,2	31	26,24	29,8
K02	33,92	21,49	20,08	25,16
K03	21,3	26,88	26,01	24,73
K04	22,27	29,08	24,5	25,28
K05	28,28	34,28	X	31,28
K06	14,72	15,68	11,61	14

Yük altında kürlleme yöntemiyle üretilen kompozitlerde ağırlık kaybının tabaka sayısına bağlı olarak büyük bir değişim göstermediği gözlenmiştir. Ancak vakum altında kürlenen numune ile karşılaştırıldıklarında, tüm seriye göre ağırlık kaybında belirgin bir düşüş olduğu gözükmemektedir.

Teste tabi tutulan kuponlar yüzeyinde doğrudan oksiasetilen alevine maruz kalan ve kömürleşen alanla, pirolize uğrayan alan açıkça görülebilmektedir. Şekil 7.6’da K06 numunesinin dinamik ısı akısı testi sonrası yüzeyi görülmektedir.



Şekil 7.6 : Dinamik ısı akısı test sonucu K06 kompozitinin yüzeyinde kömürleşen bölge gri tonlarda, pirolize uğrayan bölgeler ise parlak olarak gözükmekte ve birbirinden ayrılmaktadır.

7.4.2.2. Statik ısı akısı testi ve sonuçları

Statik ısı akısı test düzeneği ısı akısını sağlayan, 4 adet 750 Watt gücündeki kızıl ötesi kuartz lamba ve sıcaklık ölçümü için numune arkasına temas halindeki ısı çifti ile gerekli ölçüm elektroniğinden oluşmaktadır. Işık kaynağı haznesi sıcak ayna ile kaplanarak en yüksek ısı akısı değerine ulaşılmaktadır. Statik ısı akısı test düzeneğinin temel komponentleri Şekil 7.7’de gösterilmiştir.



Şekil 7.7 : Statik ısı akısı test düzeneği

Yük altında ve vakum altında kürlenmiş kompozit numuneleri 55 x 55 mm boyutlarında olacak şekilde kesilmiştir. Hazırlanan kuponlar 20 sn zaman zarfında,

450 kW/m² kızıl ötesi ısı akısına maruz bırakılmış ve 120 sn boyunca kupon arkası sıcaklıklar ölçülerek kaydedilmiştir.

Statik ısı akısı testi için her bir üretimden üçer adet numune test edilerek bu sonuçların ortalamaları alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 7.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 7.6 : Statik ısı akısı test sonuçları

Üretim No.	1	2	3	Ortalama Sıcaklık (°C)
K01	253,73	162,63	259,69	225,35
K02	270,94	91,17	44,56	135,56
K03	82,23	99,33	88,34	89,97
K04	40,41	33,08	29,88	34,46
K05	29,11	23,99	32,22	28,44
K06	131,23	49,97	43,34	74,85

Statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi grafikleri EK 1’de verilmiştir. Vakum altında kürlen numunenin ilk ve diğer iki ölçümü arasında oldukça büyük bir dağılım söz konusudur. Bu durum, deney hatası olarak değerlendirilmektedir ve gerçekte ortalamanın 50 °C civarındaki bir sıcaklıkta olacağı beklenmektedir.

Test sonucunda, kupon arkası sıcaklığın kompozit tabaka sayısı ve dolayısı ile kompozitin kalınlığı ile ters orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. Bu veriler, yük altında ve vakum altında kürlen numunelerin ısı iletimlerinin karşılaştırılması imkânını da vermektedir. Vakum altında kürlenmiş numunenin kupon arkası sıcaklığı muhtemel bir deney hatasına rağmen (daha düşük bir sıcaklık beklenmektedir) aynı tabaka sayısı ve kalınlıktaki yük altında kürlenmiş numuneye göre daha düşüktür.

7.4.2.3. Isıl iletkenlik testi ve sonuçları

Kompozitlerin ısı iletkenliği ASTM E1461 standardına uygun olarak lazer flaş sistemi kullanılarak oda sıcaklığında belirlenmiştir. Ölçümler, numunenin bir yüzeyine kısa süreli uygulanan lazer demetinin diğer yüzeyde meydana getirdiği sıcaklık değişimi tespit edilerek yapılmaktadır. Kompozitler, CNC torna tezgahı kullanılarak 15,86 mm çapında daireler şeklinde kesilmiştir. Isıl iletkenlik test sonuçları Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7 : Isıl iletkenlik test sonuçları

Üretim No.	Isıl iletkenlik (W/ m °C)
K01	0,38
K02	0,52
K03	X
K04	X
K05	0,53
K06	0,7

7.4.2.4. Termogravimetrik analiz ve sonuçları

Termogravimetrik analiz, sıcaklıkla maddenin ağırlığının değişiminin ölçüldüğü bir yöntemdir.

Kompozitlerin termogravimetrik analizleri ASTM E1131 standardına uygun olarak argon atmosferi altında yapılmıştır. Yaklaşık 30 mg ağırlığındaki numune 10°C/dk ısıtma hızı ile oda sıcaklığından 1000 °C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Numunede ağırlık kaybının başladığı sıcaklık ilk bozunma sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Termogravimetrik analiz sonuçları Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8 : Termogravimetrik analiz sonuçları

Üretim No.	İlk Bozunma Sıcaklığı	900 °C’de bozunmayan miktar (%)
K01	160	77,80
K02	180	73,06
K03	200	65,80
K04	160	68,80
K05	160	73,17
K06	190	88,79

İlk bozunma sıcaklığı reçinenin kürleme şartlarına bağlıdır. Kürleme sıcaklığı ve süresi reçinenin çapraz bağların kurulması gibi polimerizasyon reaksiyonlarının başlayıp, tamamlanması için yeterli olmalıdır.

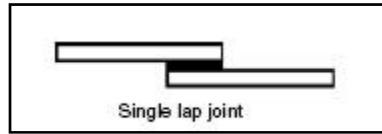
7.4.3. Kompozitlerin mekanik testleri

7.4.3.1. Kayma dayanımı ve test sonuçları

Bir yüzeyinden yapıştırılmış iki kompozit malzemenin çekme işlemi sırasında kompozitlerin birbirine yapıştığı alanda kopma meydana gelmektedir. Kopma anında

ölçülen değer kompozitin kayma dayanımı değerini vermektedir. Ayrıca yapıştırma alanında gerçekleşen kopmanın tipine bakılarak kompozit davranışı belirlenmektedir.

Kayma dayanımı test yöntemi için aynı üretim yöntemleri ile elde edilmiş iki kompozit, bir yüzeyden epoksi yapıştırıcı (BISON EPOXY) ile yapıştırılmıştır. Yapıştırma tipleri ve numune boyutları standartlara göre değişmektedir. Yapıştırma alanının ölçüleri ve numune boyutları için ASTM D 1002 standardından yararlanılmıştır. Bu standarda göre hazırlanan numuneler Şekil 7.8’de görülen tek yüzeyden (*single lap joint*) yapıştırma tipine göre yapıştırılmıştır.



Şekil 7.8 : Kayma dayanımı testi için tek yüzeyden yapıştırma türü

K04 üretimine ait kayma dayanımı test numunesi Şekil 7.9’da gösterilmiştir. Bu kompozit INSTRON 1195 marka çekme cihazında standartta belirtilen çekme hızı (1 mm/sn) ile çekilmiştir.



Şekil 7.9 : K04 kayma dayanımı numunesi

K04 ve diğer üretilere ait kayma dayanımı test sonuçları Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9 : Kayma dayanımı test sonuçları

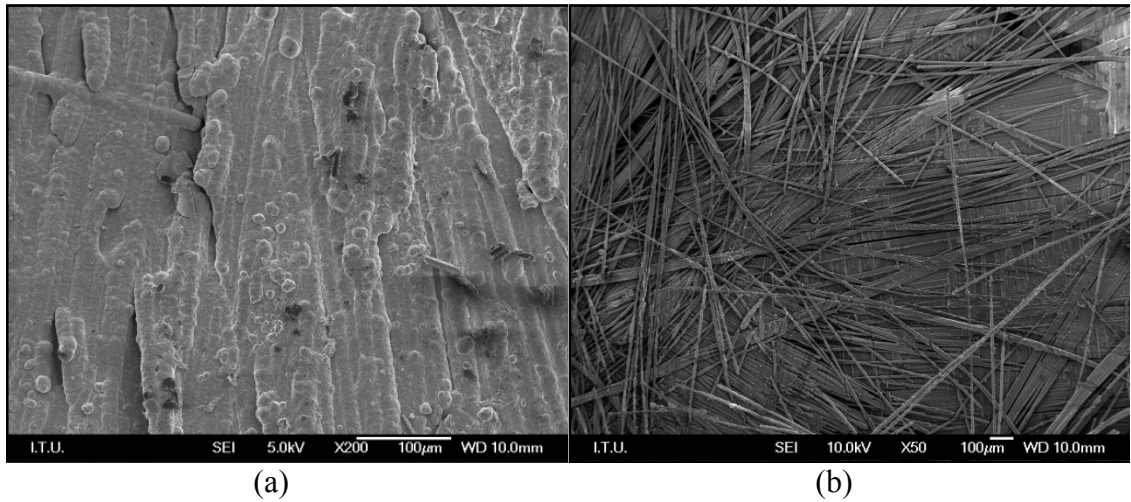
Üretim No.	1	2	3	Ortalama (MPa)
K01	6,19	9,61	5,10	6,97
K02	4,46	6,20	10,23	6,96
K03	8,83	11,16	12,09	10,69
K04	3,57	7,84	7,68	6,36
K05	6,56	7,89	8,62	7,69
K06	8,35	11,21	5,41	8,32

Test edilen kompozitlerin kalınlığa bağı olarak kayma dayanımlarında büyük bir farkın olmadığı görülmektedir. Ayrıca yük altında ve vakum altında kütleme yöntemleri için K03 ve K06 numuneleri karşılaştırıldığında her iki üretimden de birinci ve ikinci numune değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak üçüncü test numunelerinin değerleri arasında çok büyük bir fark olması üretim ya da test hatası olarak düşünülmektedir.

7.4.4. Kompozitlerin mikroyapı incelemesi

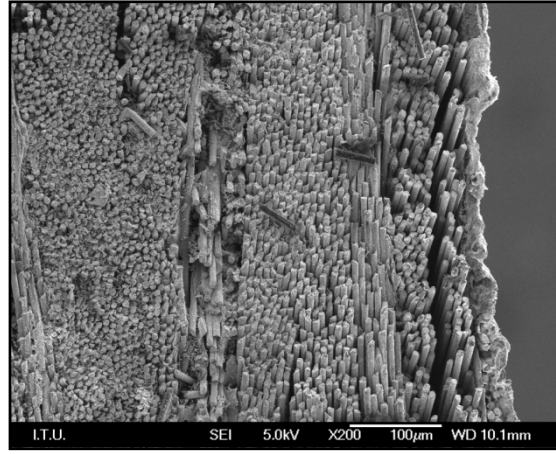
Dinamik ısı akısı testine 20 saniye boyunca tabi tutulmuş K06 numunesinin yüzey ve kesit görüntüleri alan emisyonlu tarama elektron mikroskopu kullanılarak incelenmiştir. Kompozit yüzeyinin oksiasetlen alevine doğrudan maruz kalan ve kalmayan alanlarının 200 büyütmede ikincil elektron görüntüleri **Şekil 7.10**'da verilmiştir.

Oksiasetlen alevine doğrudan maruz kalan alanda fiberlerin bozunumaya uğradığı görülmektedir. Bu alan, aşınır kompozitlere dair literatürde kömürleşme alanı olarak belirtilmiştir. Diğer alanlarda ise ısı iletiminden kaynaklanan sıcaklık artışıyla piroliz söz konusu olmuştur. Literatürde de piroliz alanı olarak belirtilen bu bölgede fiberlerin bozunmadan kaldığı gözlenmiştir.



Şekil 7.10 : Dinamik ısı akısına maruz kalmış kompozit numunenin yüzey görüntüsü: (a) Kömürleşmiş bölgenin yüzey görüntüsü (b) Piroliz tabakasının yüzey bölgesi

Kompozit kesitin 200 büyütmede ikincil elektron görüntüsü Şekil 7.11'de verilmiştir. İnce bir kömürleşme katmanının olduğu bununla beraber numunenin geri kalanının tamamen pirolize uğradığı görülmektedir. Ayrıca tabakalar içindeki fiber oryantasyonu da açıkça görülmektedir.



Şekil 7.11 : Dinamik ısı akısına maruz kalmış kompozit numunenin kesit görüntüsü

8. SONUÇLAR

Karbon fenolik aşınır kompozitler, ısı iletimin aşınma özelliklerine olan doğrudan katkısı göz önüne alınarak, karbon fiberin ısı iletiminin eksenı boyunca yüksek olmasından dolayı, iki boyutlu tabakalar halinde ve tabakalara paralel yöndeki ısı iletimin de azaltılabilmesi için sürekli fiberler yerine kırılmış fiber takviye ile tasarlanmış, spreyleme prosesleri ve yüzey düzgünlüğü [4] için uygun iki farklı kürlleme yöntemiyle (yük altında ve vakum altında kürlleme) imal edilmiştir.

Kompozitlerin yüzeyine normal yönde yapılan ısı iletkenlik ölçümlerinde vakum altında kürlenen numunenin ısı iletkenliği diğer numunelere göre daha yüksek ve tasarlanan değere daha yakındır. Bunun nedeni yük altında kürlleme sırasında özellikle tabakaların birleşme bölgelerinde daha fazla hava boşluğu bulunmasıdır.

Dinamik ısı akısı ve statik ısı akısı testleri karbon fenolik kompozitlerin aşınma özelliklerini ortaya koymaktadır. Her iki test sırasında da kompozitlerde piroliz meydana gelmiş ve reçinenin bozunma ürünlerinden oluşan piroliz gazının sızması sonucu ağırlık kaybı söz konusu olmuştur. Oluşan piroliz gazının bir miktar ısı enerjisini soğurduğu literatürde belirtilmektedir [7], ancak aşınır kompozitlerin dinamik ısı akısı (yüzeye çarpan yüksek hızlı parçacıklar) altındaki en önemli davranışı, bozunma ürünlerinin yüzeyin hemen önünde bir gaz tabakası oluşturarak yüzeye ulaşan yüksek hızlı parçacıkların sayısını azaltmasıdır. Bu durum kızıl ötesi radyasyon kullanılan statik ısı akısı testinde meydana gelmez. Bu sebeplerden dolayı statik ısı akısı testinde uygulanan ısı akısı, dinamik ısı akısına göre çok daha düşüktür. Dinamik ısı akısı testlerinin sonunda yük altında kürlleme yöntemiyle imal edilmiş 1,5 - 2,5 ve 4,0 mm kalınlığındaki kompozitlerin yüzde ağırlık kütle kaybının yaklaşık olarak aynı olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şartlar altında üretilmiş bu numunelerin ısı iletkenliklerinin farklılaşması beklenmemektedir. Bu durumda 20 sn zaman zarfında ısı akısı altında kompozitin tümünün pirolize uğradığı, bozunmamış bir katman bulunmadığı düşünülebilir ki teste tabi tutulan bu numunelerin kesit resimleri de bunu desteklemektedir. Aynı durum 2,5 mm kalınlığındaki vakum altında kürlenmiş numune için de geçerlidir. Bu numunenin ısı iletkenliği diğer

seriye göre daha yüksek olmasına rağmen yüzde ağırlık kaybında kayda değer bir azalma görülmektedir. Bu numunede daha önce açıklanan, kütleme prosesinden dolayı matrisin ağırlık oranı yaklaşık yüzde 3 kadar daha düşük olduğu kül tayininden anlaşılmaktadır. Bununla beraber termogravimetri analizleri bu kompozitin ilk bozunma sıcaklığının daha yüksek olduğunu göstermiştir ki bu; 190 °C sıcaklığın altındaki bölgelerde piroliz olayının gerçekleşmeyeceği anlamına gelmektedir. Ancak kompozitin tümünün pirolize uğramış olması bu durumun kütle kaybı farkının açıklanmasına katkı sayılamayacağını ortaya koyar. Bu durumda küçük matris oranı farkından arta kalan kütle kaybı farkının nedenleri, pirolize uğrayan matristen sonra bozunan tek bölge olan kömürleşme alanında aranmalıdır. Fenolik polimerin pirolizi sonucu yanıcı ve yanmayan gazlar, sıvı ürünler ve toplam katı kömür oluşurken bu ürünlerin oksijenle reaksiyon vermesi sonucu yanma ürünleri meydana geldiği literatürde açıklanmıştır [12]. Kömürleşme alanında bu artıkları görmek mümkündür.

KAYNAKLAR

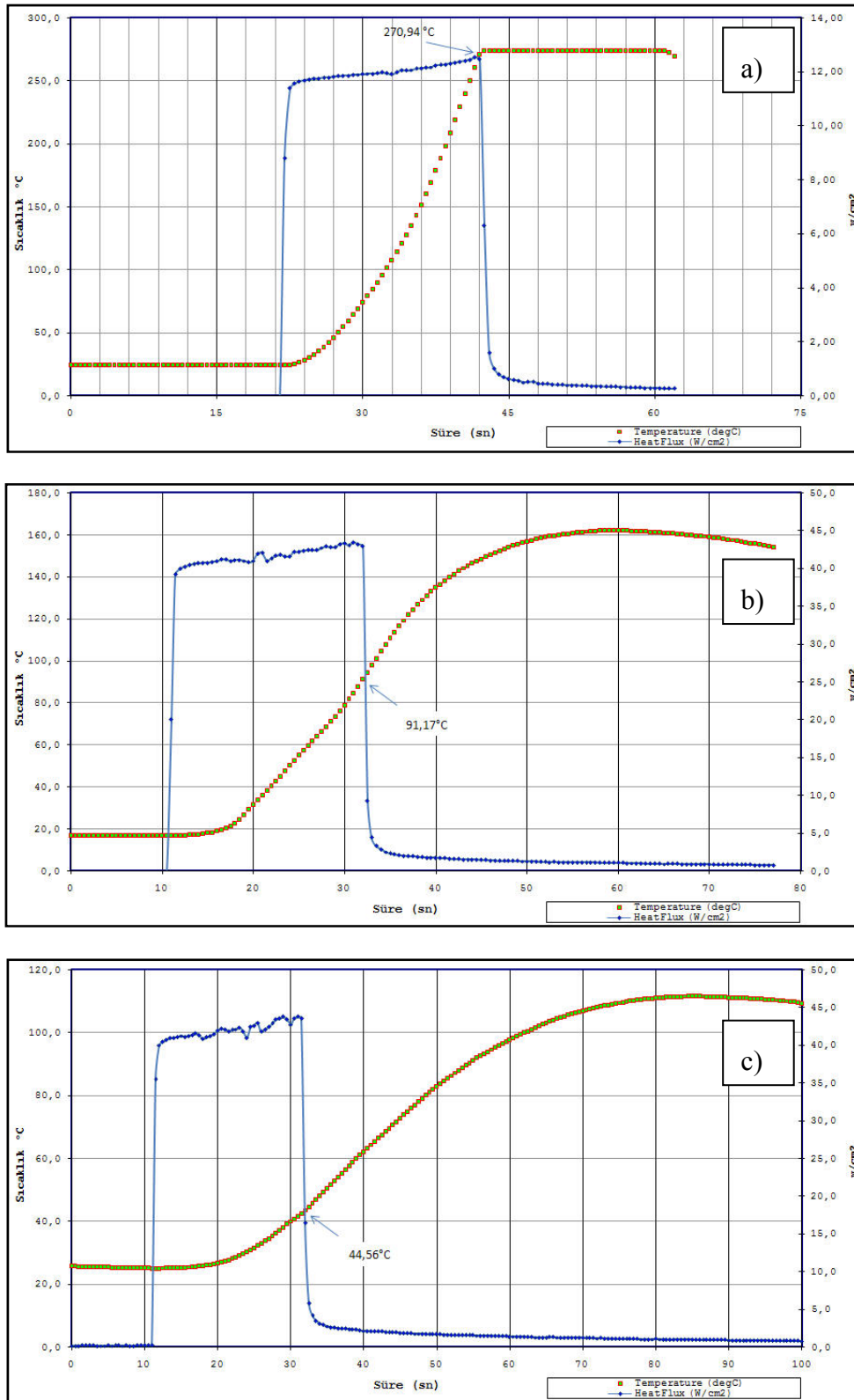
- [1] **Chung, Deborah D. L.** 1994: *Carbon Fiber Composites* : Butterworth – Heinemann.
- [2] **Ünal, Ahmet.** *Kompozit Ders Notları.*
- [3] **John, V.B.** *Mühendislik Malzemeleri* : MACMILLAN.
- [4] **Mazumdar, Sanjay K.** 2002: *Composites Manufacturing. Composites Manufacturing - Materials, Product and Process Engineering* : CRC Press.
- [5] **Askeland, Donald R.** 2002: *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri.*
- [6] **Broutman, L. J.** 1969: *Mechanical Properties of Fiber Reinforced Plastics* : The M.I.T. Press.
- [7] <http://tr.wikipedia.org/wiki/Polimer>, alındığı tarih 20.12.2008
- [8] **Handbook, Department Of Defense** 2002: *Composite Materials Handbook Volume 3 Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design and Analysis.*
- [9] *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* : John Wiley & Sons.
- [10] **Saçak, Prof. Dr. Mustafa** 2005: *Polimer Teknolojisi* : Gazi Kitabevi.
- [11] **Schwartz, M. M.** 1984 : *Composite Materials Handbook.* New York : McGraw-Hill.
- [12] **Acurex UM 87-13/ATD Acurex Corporation, Aerotherm Division** 1987 : *Aerotherm Charring Material Thermal Response and Ablation Program.* Mountain View, California.
- [13] **Katsikas, C.J., Castle, G.K., Higgins, J.S.** 1966 : *Ablation Handbook Entry Materials Data and Design.* Dayton, Ohio : Air Force Base.
- [14] **Incropera, F.P., Dewitt, D.P.** *Introduction to Heat Transfer, 2nd ed.* New York : Wiley, 1990.

- [15] **Walsh, Paul J.** 2001 : Carbon Fiber. *ASM Handbook Vol 21*
- [16] **Marşoğlu, Prof. Dr. Müzeyyen.** *Plastik Malzemeler.*
- [17] **American Composites Manufacturers Association** 2004 : *Controlled Spraying Handbook.*

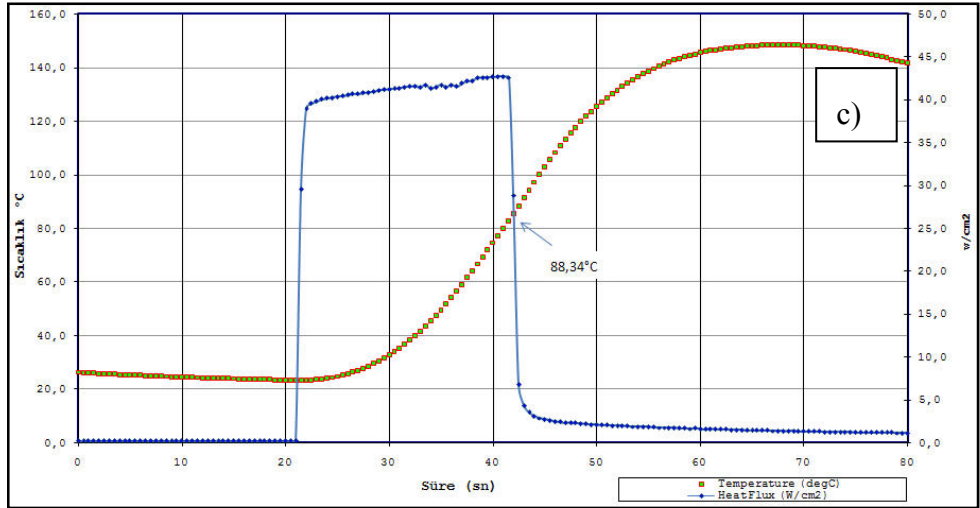
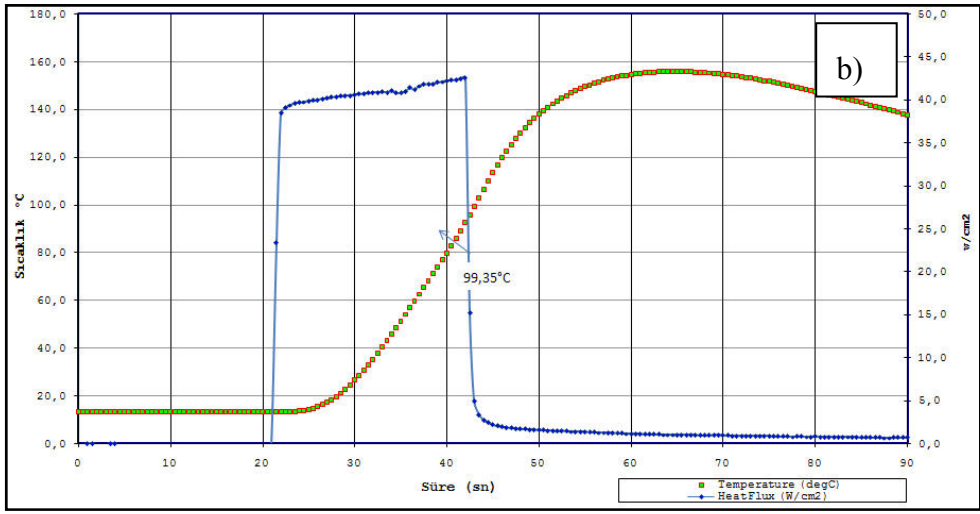
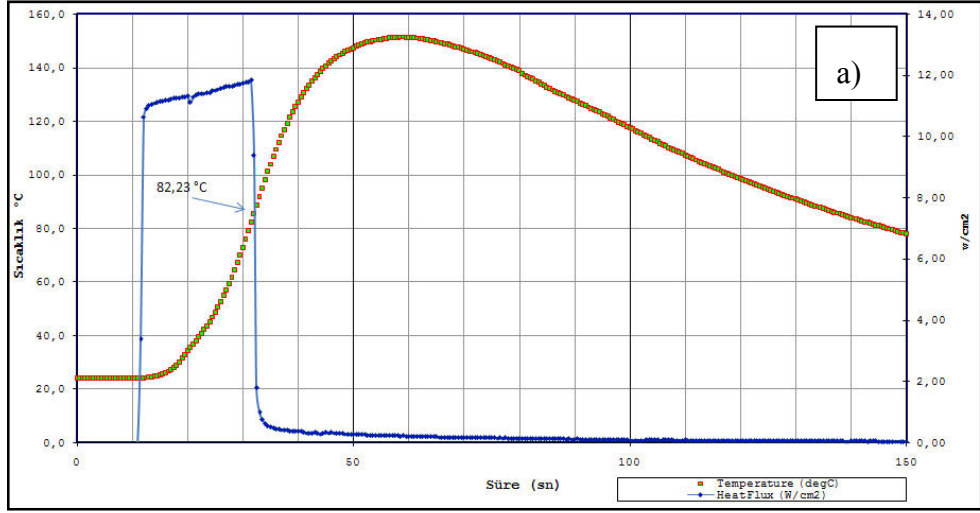
EKLER

EK A.1: Statik ısı akısı test sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi grafikleri

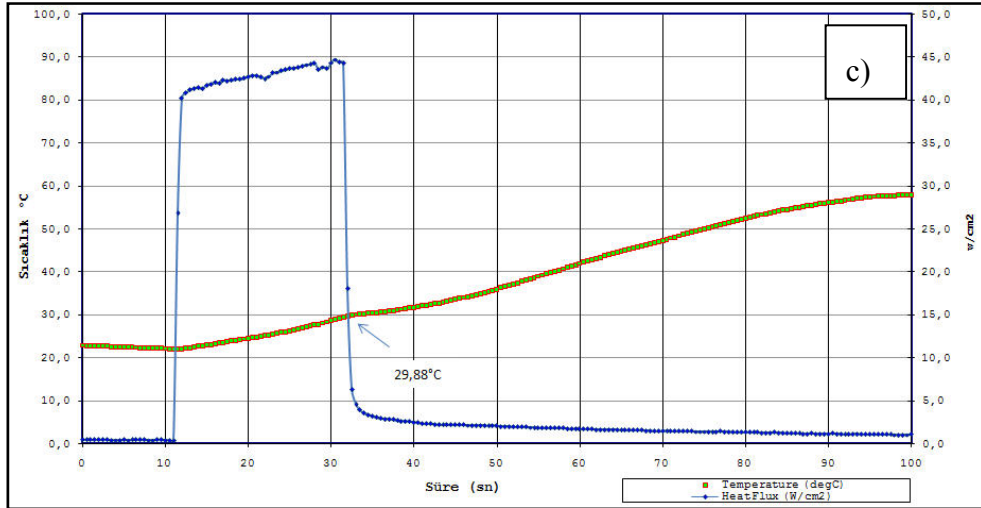
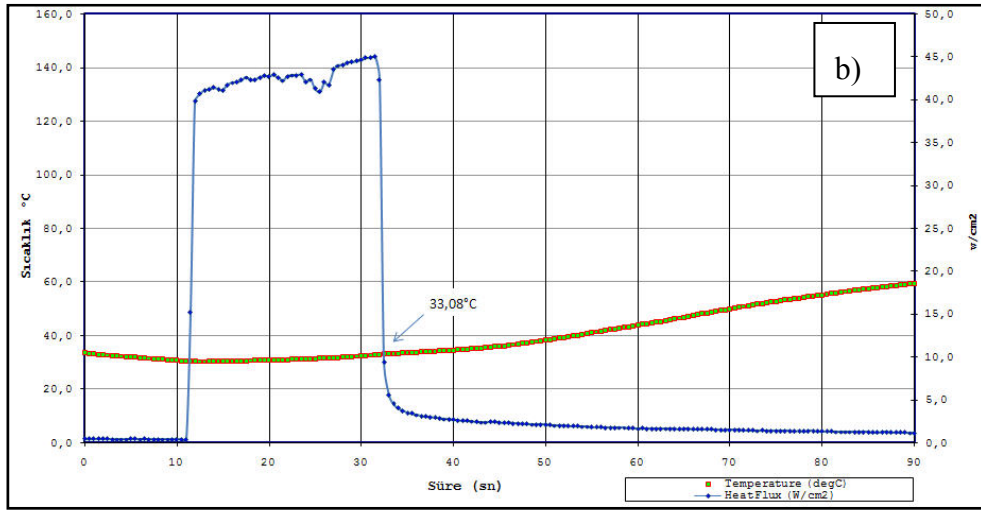
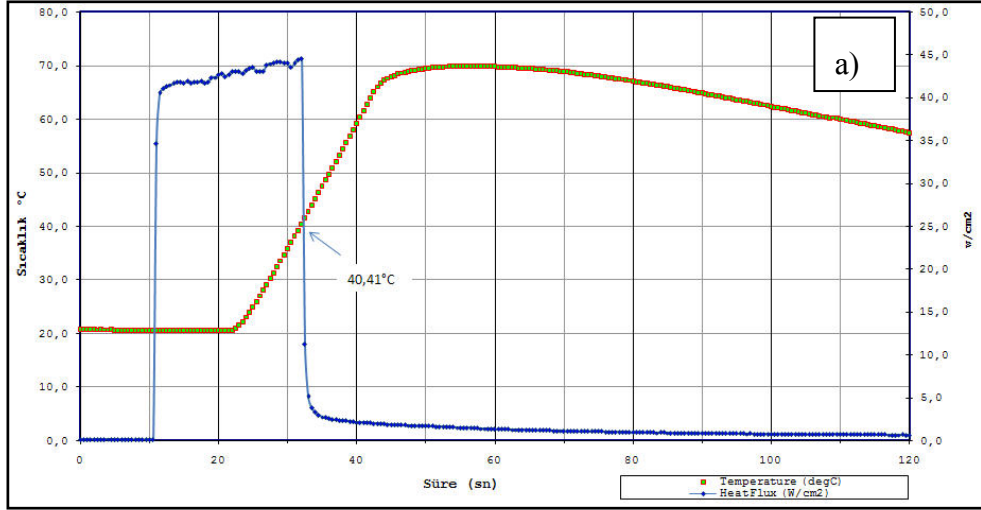
EK A.1



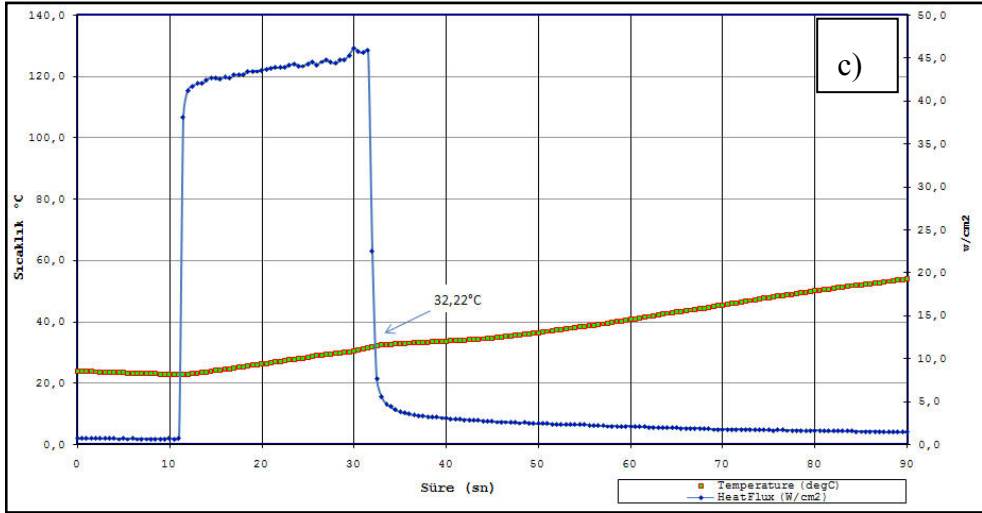
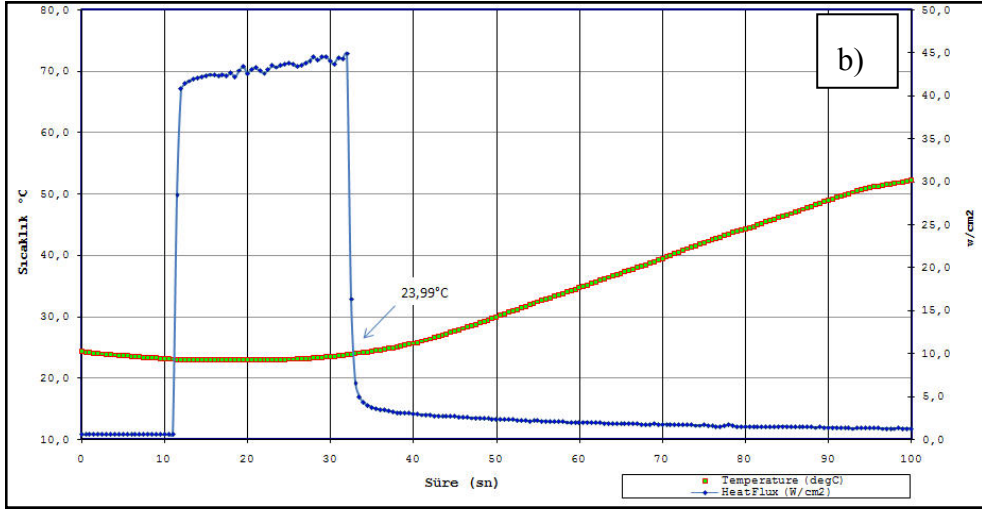
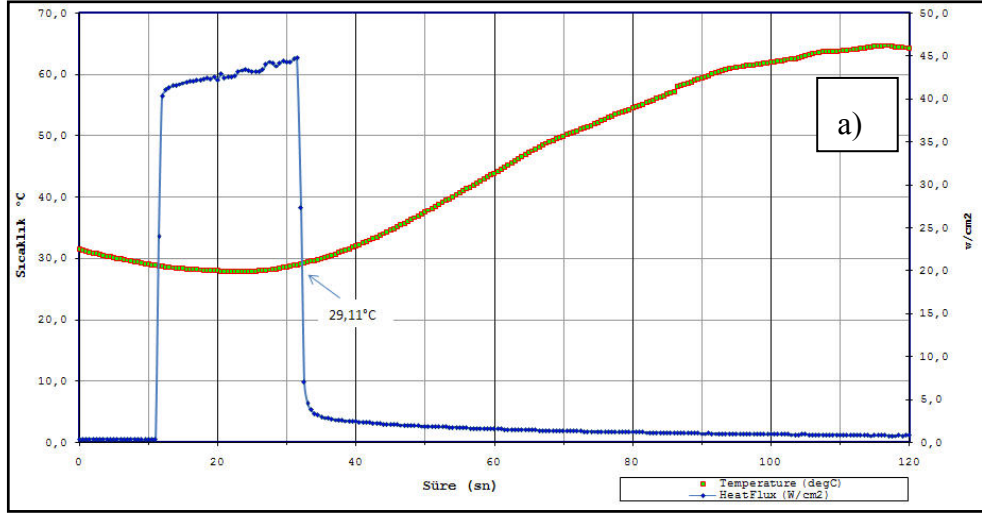
Şekil A.1 : K01 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3.



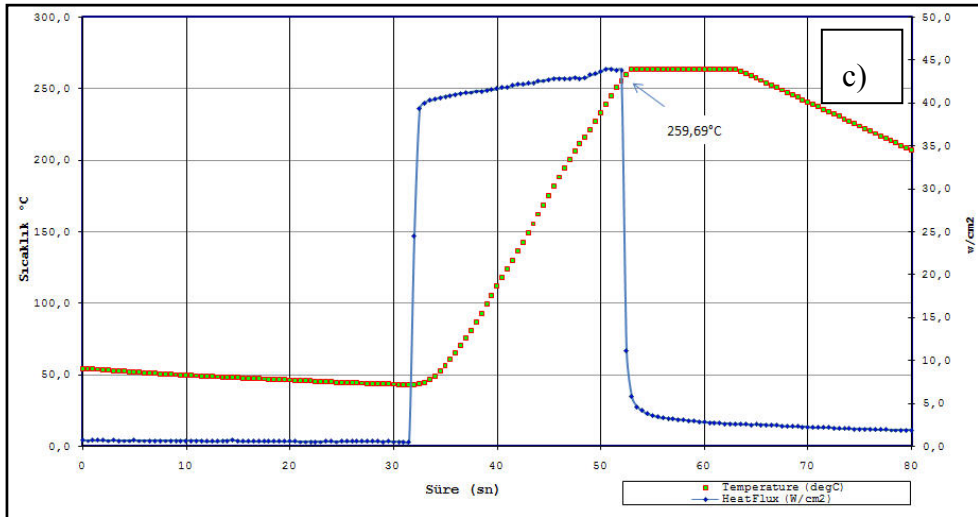
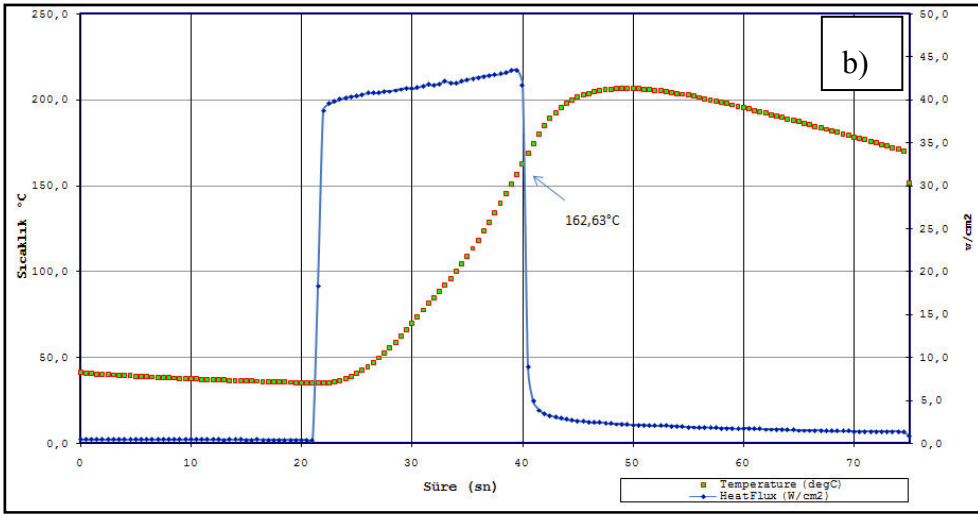
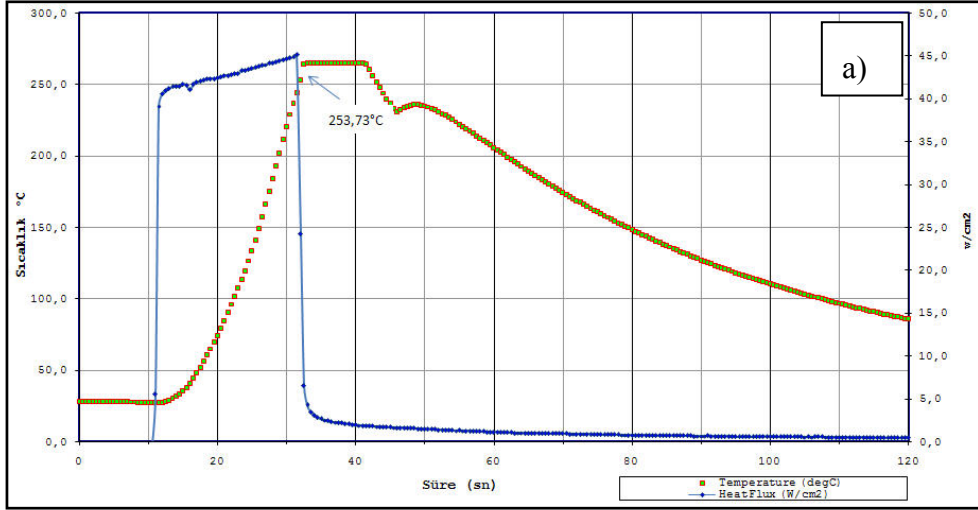
Şekil A.2 : K02 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3



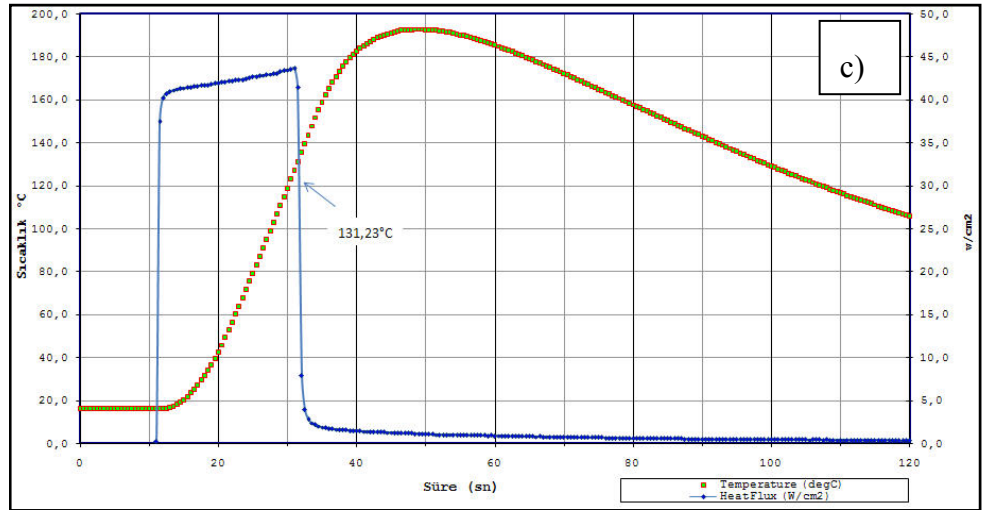
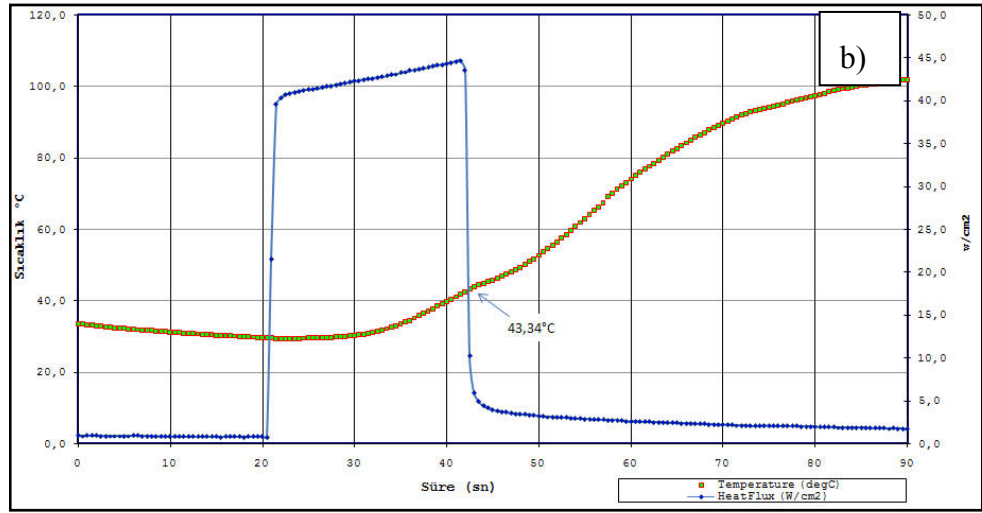
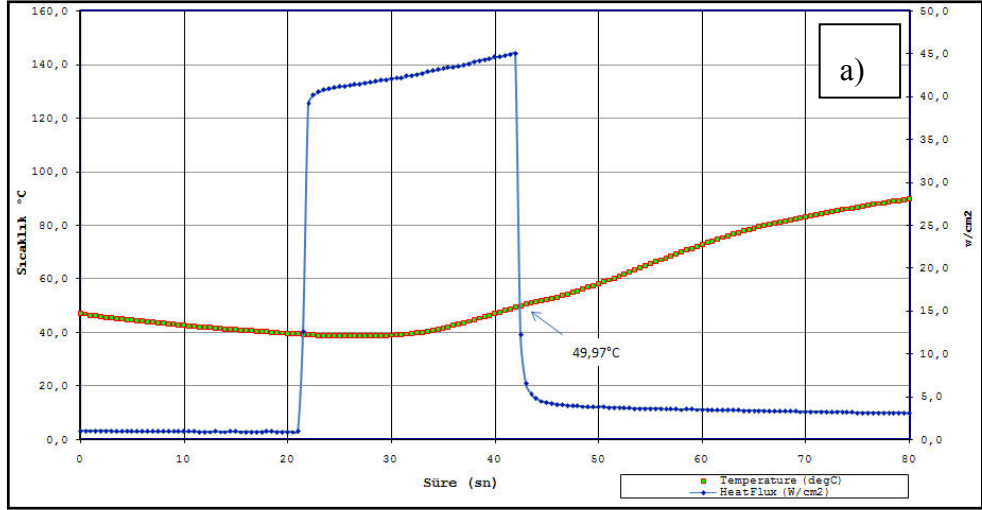
Şekil A.3 : K03 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi a) Numune 1 b) Numune 2 c) Numune 3



Şekil A.4 : K04 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3



Şekil A.5 : K05 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3



Şekil A.6 : K06 üretim numaralı kompozitin statik ısı akısı testi sonucu elde edilen sıcaklık-süre değişimi: (a) Numune 1 (b) Numune 2 (c) Numune 3

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mehmet Mümtaz Dokur

Doğum Yeri ve Tarihi: Elazığ – 30.08.1983

Adres: Şemsettin Günaltay Caddesi İntaş Sitesi B Blok Daire 19 Erenköy İstanbul

Lisans Üniversitesi: Yıldız Teknik Üniversitesi