

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SERAMİK KATKILI POLİMER MATRİSLİ KARBON FİBER KOMPOZİT  
YAPILARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. NİLGÜN KUŞKONMAZ**

**İSTANBUL, 2016**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI SERAMİK KATKILI POLİMER MATRİSLİ KARBON FİBER KOMPOZİT  
YAPILARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ebru BARUT tarafından hazırlanan tez çalışması 18.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erdem DEMİRKESEN  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Bu çalışma, Birlik Ticaret Türk A.Ş. (Carbomid-Carbon and Aramid Solutions) ve Yıldız Teknik Üniversitesi Alternatif Enerjili Sistemler Kulübü tarafından desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans tez çalışmamı gerçekleştirmem süresince fikir ve önerileriyle yanımda olan, yapıcı eleştirileriyle bana yol gösteren, tecrübelerinden faydalandığım değerli hocam Sayın Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, gerek tez yazma sürecim gerek deneysel çalışmalarım esnasında bana her zaman öğretici ve yol gösterici olan, laboratuvar imkanlarını kullanmama yardımcı olarak beni destekleyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet ÜNAL'a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarımı gerçekleştirmem konusunda beni teşvik ederek destekleri ile yanımda olan Birlik Ticaret Türk A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sayın Dara RİZVANI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Lisans öğrenimimden itibaren bünyesinde yer aldığım, kompozit malzemeler konusunda hem teorik hem uygulamalı çalışmalar yapma imkanı bularak kendimi geliştirmeme katkı sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Alternatif Enerjili Sistemler Kulübü'ne ve kulüp içinde bana inançlarıyla her zaman yanımda olan, motive eden ekip arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her anında fiziken yanımda olamasalar da desteklerini hep yanıbaşımnda hissettiğim, tüm olumsuz koşullarda anlayışları ile beni yüreklendiren, motivasyonumun daima yüksek olmasını sağlayan çok kıymetli annem, babam ve kardeşlerime sonsuz saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Ekim, 2016

Ebru Barut

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                     |      |
|-----------------------------------------------------|------|
| SİMGE LİSTESİ.....                                  | viii |
| KISALTMA LİSTESİ.....                               | ix   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                  | x    |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                               | xiii |
| ÖZET .....                                          | xiv  |
| ABSTRACT.....                                       | xvi  |
| BÖLÜM 1                                             |      |
| GİRİŞ.....                                          | 1    |
| 1.1    Literatür Özeti .....                        | 1    |
| 1.2    Tezin Amacı .....                            | 2    |
| 1.3    Orjinal Katkı.....                           | 2    |
| BÖLÜM 2                                             |      |
| KOMPOZİT MALZEMELER .....                           | 4    |
| 2.1    Kompozit Malzeme ve Türleri.....             | 6    |
| 2.1.1    Metal Matrisli Kompozitler.....            | 8    |
| 2.1.2    Seramik Matrisli Kompozitler .....         | 9    |
| 2.1.3    Polimer Matrisli Kompozitler.....          | 9    |
| 2.2    Kompozit Malzemelerin Mikro Mekanığı .....   | 10   |
| 2.3    Kompozit Malzemelerin Makro Mekanığı .....   | 15   |
| BÖLÜM 3                                             |      |
| POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....                   | 17   |
| 3.1    Matris Malzemeleri.....                      | 19   |
| 3.1.1    Termoplastik Malzemeler.....               | 19   |
| 3.1.1.1    Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ..... | 19   |

|                                                                        |                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.1.2                                                                | Polioksimetilen (POM) .....                                          | 21 |
| 3.1.1.3                                                                | Poliamidler (Naylon) .....                                           | 22 |
| 3.1.1.4                                                                | Polikarbonatlar (PC) .....                                           | 23 |
| 3.1.1.5                                                                | Polietilen Teraftalat (PET) .....                                    | 24 |
| 3.1.2                                                                  | Termoset Malzemeler .....                                            | 25 |
| 3.1.2.1                                                                | Doymamış Polyester Reçineler .....                                   | 26 |
| 3.1.2.2                                                                | Fenolik Reçineler .....                                              | 27 |
| 3.1.2.3                                                                | Vinil Ester Reçineler .....                                          | 27 |
| 3.1.2.4                                                                | Epoksi Reçineler .....                                               | 28 |
| 3.2                                                                    | Takviye Malzemeleri .....                                            | 29 |
| 3.2.1                                                                  | Fiberler.....                                                        | 29 |
| 3.2.1.1                                                                | Karbon Fiberler .....                                                | 30 |
| 3.2.1.2                                                                | Cam Fiberler .....                                                   | 32 |
| 3.2.1.3                                                                | Aramid Fiberler .....                                                | 33 |
| 3.2.1.4                                                                | Boron Fiberler .....                                                 | 34 |
| <b>BÖLÜM 4</b>                                                         |                                                                      |    |
| ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ ..... |                                                                      | 35 |
| 4.1                                                                    | El Yatırması (Hand Lay-Up) .....                                     | 35 |
| 4.2                                                                    | Vakum Yardımıyla Reçine Aktarmalı Kalıplama (İnfüzyon) Yöntemi ..... | 36 |
| 4.3                                                                    | Reçine Aktarmalı Kalıplama (RTM) .....                               | 37 |
| 4.4                                                                    | Emprenye Kumaş ile İmalat (Prepreg) .....                            | 38 |
| 4.5                                                                    | Pultrüzyon.....                                                      | 39 |
| 4.6                                                                    | Elyaf Sarma (Filament Winding) .....                                 | 40 |
| 4.7                                                                    | Sac/Kitlesele Kalıplama Bileşği (SMC/BMC).....                       | 41 |
| <b>BÖLÜM 5</b>                                                         |                                                                      |    |
| ALEV İLERLETMEYEN DOLGU MALZEMELER.....                                |                                                                      | 43 |
| 5.1                                                                    | Yanma Teorisi.....                                                   | 44 |
| 5.2                                                                    | Mineral Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri .....               | 45 |
| 5.2.1                                                                  | Metal Hidroksitler.....                                              | 46 |
| 5.2.2                                                                  | Hidroksikarbonatlar .....                                            | 46 |
| 5.2.3                                                                  | Boratlar .....                                                       | 47 |
| 5.3                                                                    | Halojen Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri .....               | 47 |
| 5.4                                                                    | Silikon Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri .....               | 48 |
| 5.5                                                                    | Alev İlerletmeme Test Metodları .....                                | 49 |
| 5.5.1                                                                  | Limit Oksijen Testi (LOI) .....                                      | 49 |
| 5.5.2                                                                  | UL 94.....                                                           | 51 |
| 5.5.3                                                                  | Konik Kaloriölçer Testi .....                                        | 52 |
| <b>BÖLÜM 6</b>                                                         |                                                                      |    |
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                              |                                                                      | 54 |
| 6.1                                                                    | Kullanılan Malzemeler, Cihazlar ve Yardımcı Gereçler .....           | 54 |
| 6.2                                                                    | Deneyisel Yöntem .....                                               | 55 |
| 6.2.1                                                                  | Fiber Takviyesiz Numunelerin Üretimi .....                           | 55 |

|                         |                                                          |    |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|----|
| 6.2.2                   | Fiber Takviyeli Numunelerin Üretimi .....                | 57 |
| 6.2.3                   | Karakterizasyon İşlemleri için Numune Hazırlanması ..... | 59 |
| 6.3                     | DeneySEL Sonuçlar .....                                  | 64 |
| 6.3.1                   | Çekme Testi Sonuçları .....                              | 64 |
| 6.3.2                   | Darbe Testi Sonuçları .....                              | 67 |
| 6.3.3                   | Barcol Sertlik Deneyi Sonuçları .....                    | 69 |
| 6.3.4                   | Yanma Testi Sonuçları .....                              | 70 |
| BÖLÜM 7                 |                                                          |    |
| SONUÇ VE ÖNERİLER ..... |                                                          | 73 |
| KAYNAKLAR .....         |                                                          | 76 |
| ÖZGEÇMİŞ .....          |                                                          | 81 |



## SİMGE LİSTESİ

---

|            |                        |
|------------|------------------------|
| $\alpha$   | Çeliğin Ferrit Fazı    |
| $\epsilon$ | Gerinim, Kopma Uzaması |
| $\eta$     | Yön Etki Faktörü       |
| $\nu$      | Poisson oranı          |
| $\rho$     | Özgöl ağırlık          |
| $\sigma$   | Çekme Mukavemeti       |
| $E$        | Elastisite Modülü      |
| $G$        | Kayma Modülü           |
| $M$        | Modül (Özgöl Özellik)  |
| $V_f$      | Fiber hacim oranı      |
| $V_m$      | Matris Hacim Oranı     |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|       |                                    |
|-------|------------------------------------|
| ABS   | Akrilonitril Bütadien Stiren       |
| AFM   | Atomik Kuvvet Mikroskobu           |
| ATH   | Alüminyum Trihidroksit             |
| BADGE | Bisfenol A-diglisidil Eter Tipi    |
| BMC   | Kütlesel (Bulk) Kalıplama Bileşigi |
| CVD   | Kimyasal Buhar Biriktirme          |
| EPDM  | Etilen Propilen Dien Monomeri      |
| EPN   | Epoksi Fenol Novolak Tipi          |
| GPa   | GigaPascal                         |
| HBCD  | Hegza Bromosiklo Dodesan           |
| LOI   | Limit Oksijen İndeksi              |
| MDH   | Magnezyum Dihidroksit              |
| MMK   | Metal Matrisli Kompozit            |
| MPa   | MegaPascal                         |
| PA    | Poliamid                           |
| PAN   | Poliakrilonitril                   |
| PBDE  | Polibromo Difenilen                |
| PC    | Polikarbon                         |
| PE    | Polietilen                         |
| PET   | Polietilen Teraftalat              |
| PMMA  | Polimetil Metakrilat               |
| POM   | Polioksimetilen                    |
| PP    | Polipropilen                       |
| PS    | Polistiren                         |
| PVC   | Polivinil Klorür                   |
| RTM   | Reçine Aktarmalı Kalıplama         |
| SAN   | Stiren Akrilonitril                |
| SMC   | Sac Kalıplama Bileşeni             |
| TBPA  | Tetrabromoftalik Anhidrit          |

## ŞEKİL LİSTESİ

|             | Sayfa                                                                                                                      |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Şekil 2. 1  | Kompozit Malzeme Bileşenleri ..... 6                                                                                       |
| Şekil 2. 2  | Küresel Çelik Mikroyapısı ..... 7                                                                                          |
| Şekil 2. 3  | Otomobil Lastiği Mikroyapısı ..... 7                                                                                       |
| Şekil 2. 4  | a) Partikül Takviyeli b) Pul Takviyeli c) Fiber Takviyeli Kompozitler ..... 7                                              |
| Şekil 2. 5  | a) Silisyum Karbür Partiküllerle Takviye Edilmiş Alüminyum b) Sürekli Seramik Fiberlerle Takviye Edilmiş Alüminyum ..... 8 |
| Şekil 2. 6  | Birim Hücre Oryantasyonu ..... 10                                                                                          |
| Şekil 2. 7  | Eşit Gerinim Koşulunda Fiber-Matris Görüntüsü ..... 11                                                                     |
| Şekil 2. 8  | Eşit Gerilme Koşulunda Fiber-Matris Görüntüsü ..... 13                                                                     |
| Şekil 2. 9  | Fiberlerin Yönlenme Doğrultuları ..... 15                                                                                  |
| Şekil 2. 10 | Fiberlerin İzotropik Yönlerinin Gösterilmesi ..... 15                                                                      |
| Şekil 2. 11 | Fiber-Matris Yapısından Çok Katmanlı Yapıya Geçiş ..... 16                                                                 |
| Şekil 3. 1  | Monomerlerden Polimer Oluşumu ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                    |
| Şekil 3. 2  | (a) Lineer yapı (b) Dallantılı Yapı (c) Çapraz bağlı yapı ... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                          |
| Şekil 3. 3  | Termoplastik Yapı (Solda), Termoset Yapı (Sağda) ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                 |
| Şekil 3. 4  | ABS Yapısı ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                       |
| Şekil 3. 5  | ABS Polimerizasyonu ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                              |
| Şekil 3. 6  | ABS Üretim Adımları ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                              |
| Şekil 3. 7  | POM Yapısı ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                       |
| Şekil 3. 8  | POM Üretim Şeması ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                |
| Şekil 3. 9  | Naylon 6,6 Yapısı ..... 16                                                                                                 |
| Şekil 3. 10 | Naylon 6,6 Üretim Şeması ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                         |
| Şekil 3. 11 | Naylon 6 Yapısı ..... 17                                                                                                   |
| Şekil 3. 12 | Naylon 6 Üretim Şeması ..... 17                                                                                            |
| Şekil 3. 13 | PC Yapısı ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                        |
| Şekil 3. 14 | PC Üretim Şeması ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                 |
| Şekil 3. 15 | PET Yapısı ..... 19                                                                                                        |
| Şekil 3. 16 | PET Üretim Şeması ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>                                                                |
| Şekil 3. 17 | a) Reaktif viskoz yapı b) Jelleşme aşamasının başlangıcı c) Kür işlemi bitişi d) Termoset yapı ..... 20                    |
| Şekil 3. 18 | Epoksi Yapısı ..... 22                                                                                                     |
| Şekil 3. 19 | Fiber Türleri ..... 23                                                                                                     |

|             |                                                                       |                                |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Şekil 3. 20 | Farklı Takviye Malzemelerinin Gerilme-Gerinim Diyagramı.....          | 24                             |
| Şekil 3. 21 | Karbon Fiber İplik ve Karbon Fiber Dokuma .....                       | 26                             |
| Şekil 3. 22 | Cam Fiber İplik ve Cam Fiber Dokuma .....                             | 26Error! Bookmark not defined. |
| Şekil 3. 23 | Aramid Fiber İplik ve Aramid Fiber Dokuma.....                        | 27Error! Bookmark not defined. |
| Şekil 4. 1  | El Yatırması Yöntemi ile İmalat .....                                 | 30                             |
| Şekil 4. 2  | Vakum İnfüzyon Yöntemi Şematığı .....                                 | 30                             |
| Şekil 4. 3  | Vakum İnfüzyon Yöntemi Uygulama Örneği.....                           | 31                             |
| Şekil 4. 4  | RTM Yöntemi Uygulanışı .....                                          | 32                             |
| Şekil 4. 5  | Prepreg Üretim Yöntemi .....                                          | 33                             |
| Şekil 4. 6  | Pultrüzyon Ürünü Profiller .....                                      | 34                             |
| Şekil 4. 7  | Elyaf Sarma Yöntemi Uygulanışı .....                                  | 34                             |
| Şekil 4. 8  | Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretilen Basıncılı Kap .....                  | 41                             |
| Şekil 5. 1  | Yanma Mekanizması .....                                               | 39                             |
| Şekil 5. 2  | TBBPA ve PDBE yapısı .....                                            | 42                             |
| Şekil 5. 3  | HBCD ve TBPA yapıları .....                                           | 42                             |
| Şekil 5. 4  | Polimerlerde Alev Oluşumu .....                                       | 43                             |
| Şekil 5. 5  | LOI Testi Düzeneği.....                                               | 44                             |
| Şekil 5. 6  | UL 94 V Test Düzeneği .....                                           | 46                             |
| Şekil 5. 7  | Konik Kalorimetre Test Cihazı .....                                   | 47                             |
| Şekil 6. 1  | Matris İçerisine Antimon Trioksit İlavesi.....                        | 55                             |
| Şekil 6. 2  | Matris İçerisine Sodyum Borat İlavesi.....                            | 56                             |
| Şekil 6. 3  | Matris İçerisine Çinko Borat İlavesi.....                             | 56                             |
| Şekil 6. 4  | Seramik Toz İlaveli Numunelerin Fırında İleri Kürleme İşlemi .....    | 56                             |
| Şekil 6. 5  | Kalıba Karbon Kumaşın Yerleştirilmesi .....                           | 57                             |
| Şekil 6. 6  | Soyma Kumaşı ve Akış Fılesı Yerleştirilmesi .....                     | 57                             |
| Şekil 6. 7  | Spiral Reçine Hortumları ve Bağlantı Elemanlarının Sabitlenmesi ..... | 58                             |
| Şekil 6. 8  | Sistemin Vakum Altına Alınması .....                                  | 58                             |
| Şekil 6. 9  | Sodyum Borat Katkılı Reçinenin Sisteme Verilmesi .....                | 59                             |
| Şekil 6. 10 | Antimon Trioksit Katkılı Reçinenin Sisteme Verilmesi .....            | 59                             |
| Şekil 6. 11 | Çekme Testi için Hazırlanan Numuneler.....                            | 61                             |
| Şekil 6. 12 | Çekme Testi Cihazı .....                                              | 61                             |
| Şekil 6. 13 | Charpy Darbe Cihazı ve Test Numuneleri .....                          | 62                             |
| Şekil 6. 14 | Barcol Sertlik Cihazı ve Sertlik Ölçümü .....                         | 62                             |
| Şekil 6. 15 | UL 94 Standardına göre Hazırlanan Yanma Testi Düzeneği.....           | 63                             |
| Şekil 6. 16 | PMAT1 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı .....               | 64                             |
| Şekil 6. 17 | PMAT2 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı .....               | 65                             |
| Şekil 6. 18 | PMCFAT2 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı .....             | 65                             |
| Şekil 6. 19 | Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Çekme Mukavemeti Değişimi .....   | 67                             |
| Şekil 6. 20 | Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Çekme Mukavemeti Değişimi .....    | 67                             |
| Şekil 6. 21 | Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Darbe Mukavemeti Değişimi .....   | 69                             |
| Şekil 6. 22 | Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Darbe Mukavemeti Değişimi .....    | 69                             |
| Şekil 6. 23 | Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Barcol Sertliği Değişimi .....    | 71                             |
| Şekil 6. 24 | Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Barcol Sertliği Değişimi .....     | 71                             |
| Şekil 6. 25 | Yanma Testi Numuneleri .....                                          | 72                             |
| Şekil 6. 26 | Antimon Trioksit Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu .....       | 72                             |

|             |                                                             |    |
|-------------|-------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6. 27 | Sodyum Borat Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu ..... | 73 |
| Şekil 6. 28 | Çinko Borat Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu .....  | 73 |



## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

|              |                                                                                                                   |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2. 1 | Farklı Bileşenlerden Oluşan Kompozit Yapıların Çeşitli Metal Alaşımlarıyla Özelliklerinin Karşılaştırılması ..... | 5  |
| Çizelge 5. 1 | Bazı Polimerlere Ait LOI Değerleri .....                                                                          | 51 |
| Çizelge 6. 1 | Deney Numunelerinin Adlandırılması .....                                                                          | 60 |
| Çizelge 6. 2 | Çekme Testi Uygulanan Numune Özellikleri .....                                                                    | 66 |
| Çizelge 6. 3 | Darbe Testi Numune Boyutları ve Test Sonuçları .....                                                              | 68 |
| Çizelge 6. 4 | Barcol Sertlik Deneyi Sonuçları .....                                                                             | 70 |
| Çizelge 6. 5 | Numunelerin Alev Sönümleme Süreleri.....                                                                          | 74 |

## FARKLI SERAMİK KATKILI POLİMER MATRİSLİ KARBON FİBER KOMPOZİT YAPILARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ebru BARUT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Gelişen teknoloji ile birlikte alternatif enerji kaynaklarının kullanılması konusunda artış gözlenmiş, enerjiyi en verimli şekilde değerlendirebilmek amacıyla kullanıldığı yere göre istenen özellikleri gösterebilen ileri teknoloji malzemelerin geliştirilmesi önem kazanmıştır. Günümüz ihtiyaçlarına göre şekillenerek, sistemlerde harcanan enerjiyi en aza indirmek için bu ileri teknoloji malzemelerden beklenen en önemli özellikler; yüksek mukavemet, hafiflik ve düşük maliyettir.

Kompozit malzemeler, beklenen bu özelliklere cevap olabilecek, iki veya daha fazla sayıda fazın makro seviyede arayüzey oluşturarak bir araya gelmesi ile oluşmuş heterojen yapılardır. Matris ve takviye olarak adlandırılan iki ana bileşeni bünyesinde bulunduran kompozit malzemeler bu iki fazın ayrı ayrı sahip olduğu avantaj olarak nitelendirilen özellikleri tek malzemeye indirgemesi açısından önem arz etmektedir. Rijitlik, yüksek yorulma ve korozyon dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler uzay ve havacılık, savunma sanayi, otomotiv, denizcilik sektörü gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. Özellikle otomotiv sektöründe karbon emisyonunu azaltmak, çevre kirliliğini önlemek amacıyla elektrik motorlarının kullanılmaya başlanması ile birlikte harcanan enerji miktarını en aza indirmek ve araçları hafifletmek suretiyle kat edilen menzili artırabilmek için polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzeme laminasyonları kullanımı konusunda çalışmalar halen yürütülmektedir.

İçten yanmalı motora sahip araçların yerini elektrik motoru ile çalışan çevre dostu araçların alması bu araçlarda bulunan elektrik bataryaları, kablolar gibi parçaların

yanma riskini de beraberinde getirmiştir. Herhangi bir kaza ve yangın durumunda araçlarda bulunan lityum tabanlı bataryaların söndürülmesi ancak özel yöntemlerle mümkün olabilmektedir. Bu sebeple mevcut çalışmada otomotiv sektörüne yönelik imal edilen kompozit malzemelere alev iletmemeye özelliği kazandırılması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, alev iletmemeye ve sönmeye kabiliyetine sahip çinko borat ( $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3,5H_2O$ ), antimon trioksit ( $Sb_2O_3$ ) ve sodyum borat ( $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) seramik tozları; vakum infüzyon imalat yöntemiyle üretilmiş karbon fiber takviyeli kompozit levhaların matris bileşenine ilave edilmiştir. Elde edilen kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile çekme ve darbe testleri ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kompozit yapıların alev iletmemeye kabiliyetleri ise UL-94 standartlarına göre hazırlanan deney düzeneğinde test edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Polimer matris, karbon fiber, seramik katkı, alev sönmeye



**INVESTIGATION OF PROPERTIES CARBON FIBER REINFORCED POLYMER  
MATRIX COMPOSITE WITH DIFFERENT CERAMIC FILLER**

Ebru BARUT

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Nilgün KUŞKONMAZ

Nowadays, using alternative energy resources is being increased with improving technology and on the purpose of forming an estimate of energy usefully, it is become even more important that developing new advanced technology materials have different properties at different area. These advanced technology materials should have some important properties like high strength, low cost and low density to reduce spent energy in systems.

Composite materials are heterogeneous materials that are combined with two or more component with an interphase at macroscale. Composite materials have incorporated two components called matrix and reinforced. These two components have totally different advantages from each other but their composite form have advantages all the properties. Composites are used in various industry like aerospace, automotive, marine industry due to their high strenght, rigidity, resistance of fatigue and corrosion, low density and wear resistance. Especially, in the automotive industry researches are being continuoud today about using polymer matrix composite materials reinforced with carbon fibers with the aim of reducing carbon emission, prohibiting environmental pollution and lighting vehicle's weight.

Vehicle's with electricity are taken vehicle's, with fuel-injection engine, place and result of this, man faced with a risk about flammability of cables, electric batteries or

electric motors. To extinguish of lithium based batteries is just possible with special methods at vehicles when an accident is happened. Due to these reasons, it is aimed to earn flame retardancy properties to composite materials in this study.

In this study, polymer matrix composite materials reinforced with carbon fibers are produced by vacuum infusion technique and three fillers are added to matrix component called antimony trioxide ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ), zinc borate, sodium borate. Mechanical properties of produced composite materials were analysed with barcoll hardness tester, charpy impact testing device and tensile strength machine. Flame retardancy properties of produced composite materials were investigated flame tester has prepared according to UL-94 test standarts.

**Keywords:** Polymer matrix, carbon fiber, ceramic filler, flame retardation



#### 1.1 Literatür Özeti

Kompozit malzemeler; iki veya daha fazla bileşenin makro boyutta bir araya gelmesi ile oluşan ve özel yapısal özellikler gösteren malzemelerdir [1], [2]. Kompozit malzeme bileşenleri birbiri içinde çözünerek değil, fiziksel olarak arayüzey oluşturma suretiyle bir araya gelirler ve tek bir malzeme gibi davranırlar [3].

Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek mukavemetin yanında düşük yoğunluk, yüksek korozyon ve aşınma direnci, yüksek yorulma mukavemeti, uzun ömürlü olması gibi özelliklerinden dolayı diğer malzemeler yerine tercih edilebilirler. Mukavemet-hafiflik oranının diğer mühendislik malzemelerine göre iyi olduğu göz önüne alınarak kompozit malzemeler; uzay ve havacılık, denizcilik, otomotiv, yapı ve inşaat gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur [4].

Kompozit malzemenin birçok sektörde kullanımına olanak sağlayan avantajlarının yanında, çeşitli katkıların ilave edilmesiyle bu malzemelere farklı özellikler kazandırabilmek, üzerinde çalışılan konulardandır. Bu özelliklerden biri ve özellikle otomotiv ile savunma sanayiinde önemli sayılabilecek bir tanesi alev ilerletmeme özelliğidir. Literatür incelendiğinde kompozit malzemelere alev ilerletmeme özelliği kazandırabilmenin “*filler*” adı verilen seramik katkı malzemeler kullanılarak mümkün olacağı düşünülmektedir [5].

Alev ilerletmeme özelliğini kazandırmak için sıklıkla kullanılan malzemeler metal oksitler, hidroksikarbonatlar ve boratlardır. Sentetik olarak yüksek saflıkta elde edilebilen magnezyum hidroksit seramiği sahip olduğu morfoloji ve yüzey özellikleri

sayesinde özellikle etilen vinil asetat, polipropilen ve poliamid içeren polimerler ile birlikte kullanıldığı zaman alev ilerletmeme özelliği göstermektedir [6]. Magnezyum hidroksit tek başına kullanılacağı gibi borik asit, çinko borat gibi malzemelerle de birlikte kullanılarak polimer yapılarda alev durdurma kabiliyeti incelenmiştir [7].

Alev ilerletmeme deneylerinde sıklıkla kullanılan bir diğer malzeme de çinko borat seramiğidir. Düşük maliyetli, inorganik bir malzeme olan çinko borat yanan yüzeyde camsı yüzey oluşturur ve yapısındaki kristal bağlı suyun ayrışması sayesinde mevcut alevin ilerleyişini engellemiş olur. Silikon elastomerler, polidimetil siloksan ile birlikte çinko borat, poliolefinlerde alev geciktirici olarak kullanılmıştır [5].

Kompozit malzemelerin yapısına farklı oranlarda alev ilerletmeme özelliğine sahip dolgu maddeleri katıldıktan sonra karakterizasyon için çeşitli testler uygulanır. Limit oksijen indeksi, UL-94 ve konik kaloriölçer testi alev ilerletmeme özelliğini incelemek için literatürde yer alan yöntemlerdir [8].

## **1.2 Tezin Amacı**

Mevcut pazarda, kullanım amacına göre seçilen kimyasal direnci yüksek, yüksek sıcaklıklara dayanıklı gibi farklı özelliklere sahip termoset reçineler bulunmakta olup polimer matrisli kompozitlerin üretiminde bu reçineler kullanılmaktadır. Herhangi bir kaza veya yangın durumunda bu reçineler alev alarak kompozit malzemeye ve çevreye zarar verebilirler. Bu nedenle mevcut tez çalışmasında üretilcek kompozit malzemelere halojen içermeyen ve alev sönmüleme kabiliyetine sahip seramik katkıları eklenerek kompozit malzemeye farklı özellikler kazandırmak amaçlanmıştır. Aynı hedef doğrultusunda elde edilen kompozit malzemelere çeşitli testler yapılarak özellikleri tespit edilecektir.

## **1.3 Orjinal Katkı**

Tez amacı doğrultusunda; polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozit yapılara farklı seramik katkılarıyla alev sönmüleme kabiliyeti başta olmak üzere yeni özellikler kazandırılması planlanmış ve değişik konsantrasyonlarda seramik katkıları, üretim esnasında kompozit malzeme yapısına eklenmiştir.

Piyasada var olan alev sönümlleme kabiliyetine sahip reçineler kullanmak yerine seramik katkıları sayesinde vinilester bir reçinenin alev sönümlleme kabiliyeti kazanacağı, bunun yanısıra daha düşük maliyet ile elde edilebileceği ve çekme-darbe dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanacağı düşünülmektedir.



## BÖLÜM 2

---

### KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler; farklı özellikler gösteren iki veya daha fazla bileşenin aralarında arayüzey oluşturarak meydana getirdikleri yeni bir malzeme grubudur. Oluşan yeni malzemenin meydana geldiği bileşenlerden üstün özellikler göstermesi kompozit malzemelerin en önemli avantajlarından biridir [1], [9].

Kompozit malzemeler yeni bir malzeme grubu değildir, araştırmalar sonucu oluşturulan mühendislik kompozitlerinin yanı sıra insan hayatında yüzyıllardan beri yer alan doğal kompozitler veya insanlığın ilk zamanlarından beri kullanılan kompozit yapılar da mevcuttur [2].

Doğal kompozitler daha çok hayvan ve bitkilerin yapısında bulunur. Uzun selüloz fiberlerinin (polimer bileşen) lignin adı verilen bileşen ile takviye edilmesi sonucu oluşan odun doğal bir kompozit yapıdır. Selüloz kotonun da yapısında bulunur ve zayıf özellik gösterir, bu şekilde lignin ve selüloz tek başına zayıf özelliklere sahip olsa da birlikte dayanıklı ve yeni bir malzeme oluşturmuşlardır [10].

İnsan vücudunda bulunan kemik de doğal kompozit malzemedir. Kemik yapısı; sert ve kırılğan bir kalsiyum fosfat seramiği olan hidroksiapatit kristalleri ve sünek özelliğe sahip bir protein olan kolajen liflerinden oluşmaktadır [11].

Antik çağlardan beri kullanılagelen bir diğer kompozit malzeme betondur. Yapısında çakıl, kum ve çimento barındıran beton iyi basma mukavemeti değerlerine sahiptir. Matris bileşeninin takviye bileşeni ile desteklenmesi sayesinde oluşan modern

kompozit malzemelere en genel örnek plastik takviyeli cam elyaf fiberli kompozit malzemelerdir [10].

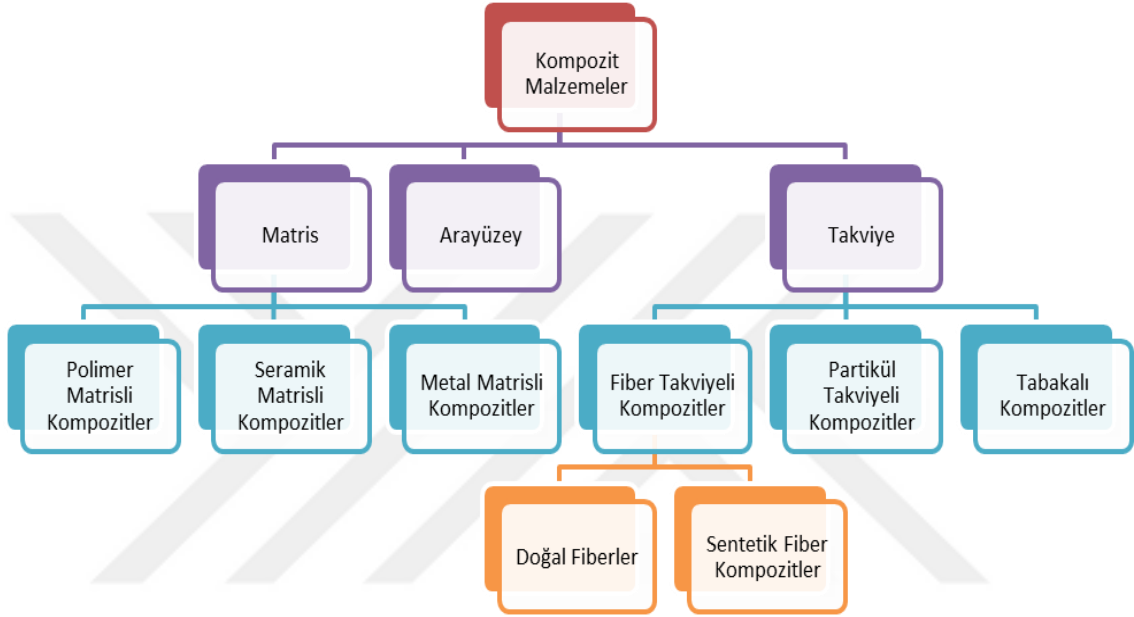
Çizelge 2. 1’ de çeşitli kompozit malzeme örneklerinin metal alaşımlarıyla özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır [12].

Çizelge 2. 1 Farklı Bileşenlerden Oluşan Kompozit Yapıların Çeşitli Metal Alaşımlarıyla Özelliklerinin Karşılaştırılması [12]

| Malzeme Cinsi                   | Özgül<br>Ağırlığı<br>( $\rho$ ,<br>g/cm <sup>3</sup> ) | Çekme<br>Dayanımı<br>( $\sigma$ ,Mpa) | Elastisite<br>Modülü<br>(E, Gpa) | Özgül<br>Çekme<br>Dayanımı<br>( $\sigma/\rho$ ) | Özgül<br>Modülü<br>(E/ $\rho$ ) | Uzama<br>(%) |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| <b>Al alaşımı</b>               | 2.8                                                    | 600                                   | 71                               | 210                                             | 25                              | -            |
| <b>Titanyum</b>                 | 4.51                                                   | 700                                   | 117                              | 192                                             | 25.1                            | 20           |
| <b>Ni Alaşımı</b>               | 8.18                                                   | 450-1200                              | 204                              | 147                                             | 24.9                            | 26-45        |
| <b>Düşük Alaşımlı<br/>Çelik</b> | 7.8                                                    | 600                                   | 207                              | 80-250                                          | 26.5                            | 20-30        |
| <b>Dökme Demir</b>              | -                                                      | 275                                   | 138                              | -                                               | -                               | 0.6          |
| <b>Pirinç %30Zn</b>             | 8.5                                                    | 550                                   | 100                              | 60                                              | 12                              | -            |
| <b>Karbon/Epoksi</b>            | <b>1.62</b>                                            | <b>1400</b>                           | 220                              | <b>865</b>                                      | 135                             | 0.8          |
| <b>Kevlar/Epoksi</b>            | <b>1.38</b>                                            | <b>1310</b>                           | 83                               | <b>950</b>                                      | 60                              | -            |
| <b>Cam/Epoksi</b>               | <b>1.66</b>                                            | <b>1510</b>                           | 165                              | <b>910</b>                                      | 99                              | -            |
| <b>Cam/Polyester</b>            | <b>1.9</b>                                             | <b>750</b>                            | 38                               | <b>390</b>                                      | 19.8                            | 1.8          |

## 2.1 Kompozit Malzeme ve Türleri

Kompozit malzemeler genel itibariyle yük taşıyıcı takviye fiberlerin belli bir lokasyon ve oryantasyon ile sürekli faz olan matris bileşeni tarafından çevrelenmesi sayesinde oluşmuş olup; takviye bileşen, matris bileşen ve arayüzey olmak üzere üç ana bileşenden meydana gelmişlerdir [13].

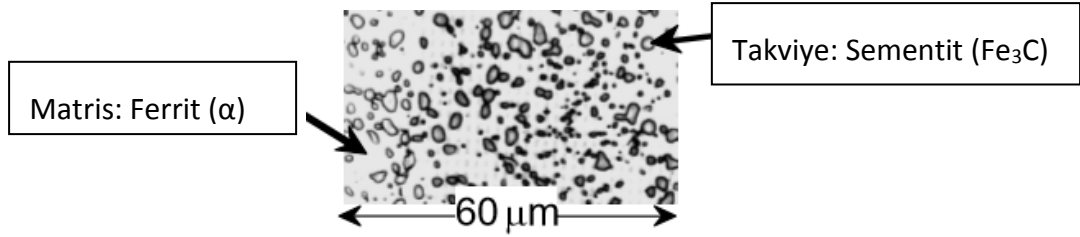


Şekil 2. 1 Kompozit Malzeme Bileşenleri [13]

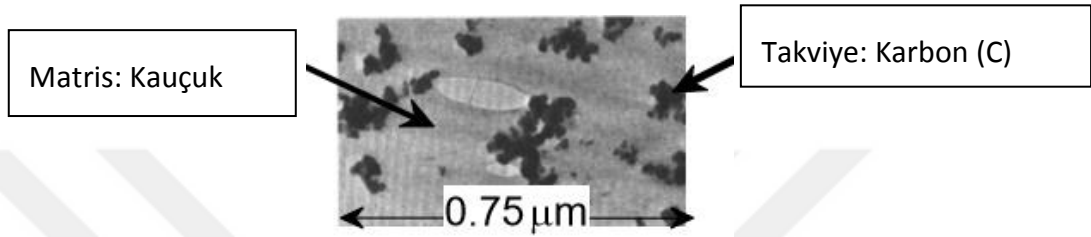
Şekil 2. 1’de görüldüğü gibi matris bileşeni referans alınarak kompozit malzemeler sınıflandırıldığında metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak üç grupta sınıflandırma yapılabilir [13] ,[14].

Kompozit malzemeleri oluşturan bir diğer ana bileşen olan takviye bileşeni referans alındığında ise kompozitler; fiber takviyeli kompozitler, partikül takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler, pul takviyeli kompozitler ve dolgu yapıli kompozitler olarak sınıflandırılabilir [13], [14]. En sık karşılaşılan grup fiber takviyeli bir diğer adıyla lifli kompozitlerdir. Mühendislikte bu malzemeler fiber (lif) şeklinde üretildiğinde kütle halinden daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu için daha fazla tercih edilirler [15]. Partikül takviyeli kompozitler; alaşım veya seramik matris içinde çeşitli partiküllerin rasgele dağılmasıyla oluşur. Bu nedenle genellikle izotropik yapıdadırlar.

Gelişmiş mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı, oksidasyon direnci gibi avantajları vardır. Betonarme yapımında kullanılan çakıl, kum ve çimento örnek olarak verilebilir [16].



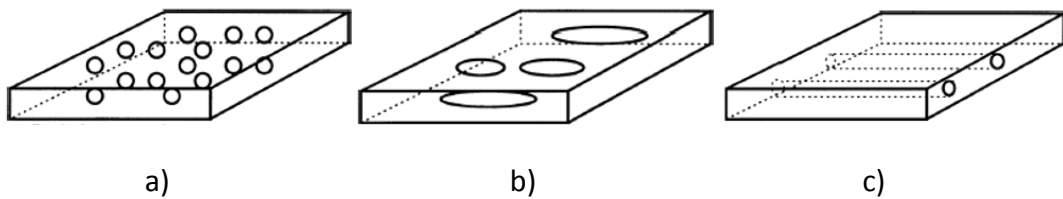
Şekil 2. 2 Küresel Çelik Mikroyapısı [16]



Şekil 2. 3 Otomobil Lastiği Mikroyapısı [16]

Şekil 2. 2’de küresel sementitlerin; ferrit yapıda partiküller şeklinde dağıldığı görülmektedir. Şekil 2. 3’de ise bir otomobil lastiği mikroyapısından alınmış görüntü verilmektedir [16].

Pul takviyeli kompozitler, matrisler içindeki düz takviyelerden oluşur. Tipik pul malzemeleri cam, mika, alüminyum ve gümüşdür. Yüksek mukavemet ve düşük maliyet gibi avantajlar sağlarlar. Ancak, yönlendirilmeleri zordur ve kullanılabilecek malzemeler sınırlıdır [15].



Şekil 2. 4 a) Partikül Takviyeli b) Pul Takviyeli c) Fiber Takviyeli Kompozitler [15]

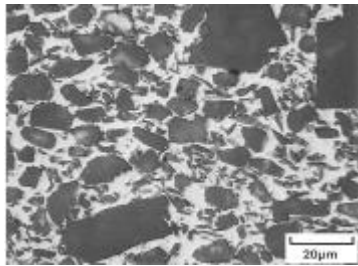
Kompozit malzemelerin bir diğer bileşeni de arayüzeydir. Arayüzey ne kadar güçlü olursa kompozit malzemeler o kadar üstün mekanik özellikler gösterirler. Arayüzey sayesinde matris molekülleri takviye yüzeyi üzerine kimyasal reaksiyon veya adsorbsiyon oluşturmak suretiyle bağlanırlar. Özellikle atomik kuvvet mikroskobu

(AFM) ile kontrol edilebilirliği sayesinde arayüzeyde olan gelişmeler ve değışiklikler son zamanlarda takip edilebilir düzeydedir [14].

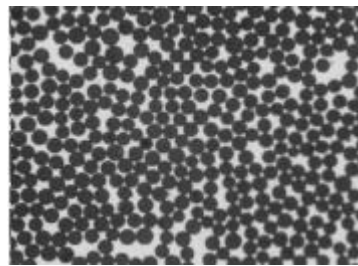
### 2.1.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler genellikle alüminyum, magnezyum gibi düşük yoğunluklu metallerin bir seramik malzeme tarafından partikül veya fiberler ile desteklenmesi sayesinde oluşan kompozit yapılardır. Silikon karbür, grafit gibi malzemeler seramik takviye olarak sıklıkla tercih edilir. Diğer metallerle karşılaştırıldıkları zaman, metal matrisli kompozitler yüksek mukavemet ve sertlik, daha yüksek çalışma sıcaklığı, çok iyi aşınma mukavemeti gösterirler [17].

Metal matrisli kompozitler ilk olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanmış, nikel kaplı grafitlerin argon gazı ile birlikte alüminyum matris içine enjekte edilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma partikül takviyeli MMK üzerine yapılan ilk çalışma niteliğindedir, bundan sonra 1968 yılında Hindistan Teknoloji Enstitüsü  $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum kompozit dökümünü gerçekleştirmiştir. 1970'li yıllarda Masachusetts Teknoloji Enstitüsü, katı ve sıvı arasındaki belli bir sıcaklık değeriinde yarı katı alaşımlara partikül takviyesi yapmayı denemiştir. Bu çalışmaların devamında Rooke Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda, sıvı-katı aralığında yine yarı katı malzemeye partikül ilavesi yapılmaya çalışılmıştır [18].



a)



b)

Şekil 2. 5 a) Silisyum Karbür Partiküllerle Takviye Edilmiş Alüminyum b) Sürekli Seramik Fiberlerle Takviye Edilmiş Alüminyum [19]

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan başlıca yöntemler toz metalurjisi ve sıvı metal alaşımları ile poröz seramik yapı içine sıkıştırmak suretiyle yapılan döküm yöntemidir. Bu yöntemlerle üretilen metal matrisli kompozitler uçak

teknolojileri, elektronik mühendisliği, taşıt teknolojileri gibi alanlarda sergilediği iyi fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilirler [20].

### **2.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramikler yüksek ergime noktası değerlerine sahip olup iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahip oldukları için metallerden üstün özelliklere sahiptirler. Bunların yanında gevrek olmakla birlikte termal şoklar karşısında yetersizdirler [21].

Seramik matrisli kompozitler, seramik fiberlerin seramik matris içine gömülmesiyle elde edilirler. Oksit veya oksit olmayan çeşitli seramik malzemeler; seramik fiber ve seramik matris olarak kullanılabilirler. Çok çeşitli fiber yapıları mevcut olduğundan dolayı seramik matrisli kompozitlerin termal ve mekanik özellikleri, özel konstrüksiyonlar için farklılık gösterebilir [22].

Borosilikatlar ve alüminosilikatlar gibi cam seramik matris, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> gibi geleneksel seramik matris; seramik matrisli kompozitlerde kullanılan seramik matris çeşitlerine örnek olarak verilebilir [23].

### **2.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer kompozitler yirminci yüzyılda kullanılan en ehemmiyetli malzeme gruplarından biridir. Uzay, otomotiv, yapı, denizcilik ve spor uygulamalarında düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özelliklerinden dolayı tercih edilir. Polimer matrisli kompozitler; organik polimer matris içerisinde çeşitli kısa veya sürekli fiberlerin yer almasıyla oluşur. Seramik matrisli kompozitlerde kırılma tokluğunu geliştiren destekleyici bileşenin aksine polimer matrisli kompozitlerde destekleyici bileşen yüksek mukavemet ve sertliği artırır [24].

Polimer matrisli kompozitler desteklenmiş plastikler ve ileri kompozitler olmak üzere iki kategoride incelenebilir. İki kategori arasındaki ayrım ancak mekanik özellikler genellikle mukavemet ve sertlik açısından yapılabilir bunun dışında farklılık yoktur. Desteklenmiş plastikler, genellikle cam fiberlerle desteklenmiş polyster reçineden meydana gelmektedir. Son on beş yılda kullanılmaya başlanan ve yüksek mukavemet ve sertlik özelliklerine sahip ileri kompozitler nispeten daha pahalıdır. Bu malzemelerin

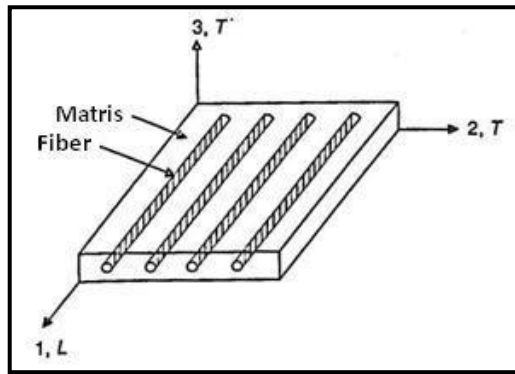
en önemli avantajı hafif olduğu halde yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olmasıdır. Metallerle karşılaştırıldığında korozyon dayanımı ve yorulma direnci daha iyidir [24].

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Mikro Mekanik

Kompozit malzemelerde mikromekanik; fiber, matris ve arayüz bileşenleri düzeyinde kompozit malzemenin mekanik ifade eder. Mikromekanik, kompozit malzemelerdeki fiberlerin farklı yükleme koşulları dikkate alındığında göstermiş olduğu davranışların gerilme- gerinim değerlerine etkisini anlamak için kullanılabilir [25].

Kompozit malzemelerin fiziksel davranışları sahip oldukları anizotropik özellikten dolayı homojen ve izotropik özelliğe sahip olan metallerden farklılık gösterir. Metaller genel olarak tek bir örneğin her yerinde aynı oryantasyona sahip iken kompozit malzemeler farklı eksenlerde birbirinden farklı lokasyon ve oryantasyonlara sahip olacağı için, farklı yönlerde uygulanan testlerde aynı özelliği göstermeyen anizotropik malzemeler olarak adlandırılırlar [26].

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri hem mikro boyutta hem de makro boyutta homojensizlikleri dikkate alınarak analiz edilip, yorumlanabilir. Mikromekanik; neredeyse tek bir fiber çapına eşit mikro ölçeklerde fiber ve matris ilişkilerini incelerken, makromekanik kompozit malzemeyi bütün olarak ele alır [26].

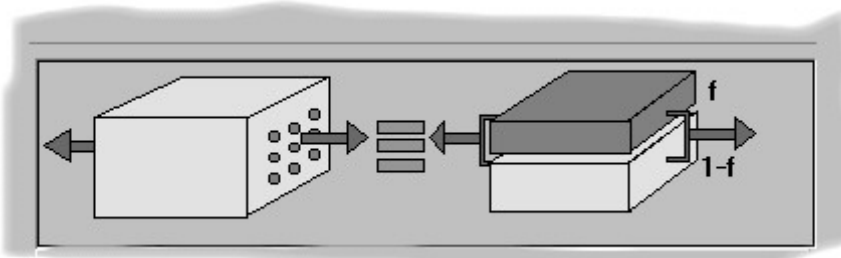


Şekil 2. 6 Birim Hücre Oryantasyonu [9]

Eş yönlü fiberlerde fiberlerin paralel yön (1, //, L), dik yön (2,  $\perp$ , T) notasyonları ile yöne bağlı olarak kullanımı Şekil 2. 6'da şematik olarak gösterilmiştir. Düzlemsel 1 ve 2

yönündeki plakalar kalınlığı boyunca incelenmeye alındığında gösterim 3 nolu notasyondaki gibi olur [9].

Şekil 2. 6 'da görüldüğü gibi fiberlerin 1 nolu yönde yani elastik alanda zorlanması durumunda fiber, matris ve kompozit malzeme üzerindeki gerinimler eşittir ve bu koşula "Eşit Gerinimler (izostrain) koşulu" denir [27], [28].



Şekil 2. 7 Eşit Gerinim Koşulunda Fiber-Matris Görüntüsü [29]

Kompoziti 'c', matrisi 'm', fiberi 'f' harfi ile tanımlayarak kompozit malzemelere çeşitli matematiksel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Fiberlerin elastiklik modülleri matrisinkinden daha büyükse  $E_f \gg E_m$ ;

(2.1)

şeklinde gösterilir. Böylece kompozit malzemelerin 1 yönündeki elastiklik modülü (2.2)'de gösterildiği gibidir;

(2.2)

Eşitlikte  $V_f$  fiberin,  $V_m$  matrisin hacim oranıdır. Buna göre fiber ve matris arasındaki bağıntı (2.3)'de olduğu gibi;

(2.3)

veya (2.4) eşitliğindeki gibi;

(2.4)

gösterilir.

Yukarıda belirtilen (2.2) eşitliği "Karışımlar Kuralı" olarak da bilinir. n bileşenli bir kompozit malzeme için Elastiklik Modülü ise aşağıdaki gibidir;

(2.5)

ya da (2.6)'da verildiği gibi;

(2.6)

şeklinde genelleştirilebilir. Yukarıda verilen eşitlikler göz önüne alındığında, elastiklik modülü yalnızca fiber hacim oranı cinsinden yazmak istediğinde (2.7)'de olduğu gibi;

(2.7)

şeklinde yazılabilir. Verilen bu eşitlikte fiberlerin eş yönlü olarak hatasız biçimde dizildiği ve arayüzeyin mükemmel olduğu öngörüldüğü takdirde doğru sonuçlar elde edilebilir. Bu durumda; çekme dayanımı ve poisson oranı (2.8) ve (2.9)'da verildiği gibi olacaktır;

(2.8)

(2.9)

şeklinde dir. Ancak arayüzeyin yapışması çok iyi olmasa ve fiberlerin dizilişinde hata olsa bile aşağıda yoğunluk cinsinden verilen karışımlar kuralı (2.10) her zaman doğru sonuçlar vermektedir [27], [28];

(2.10)

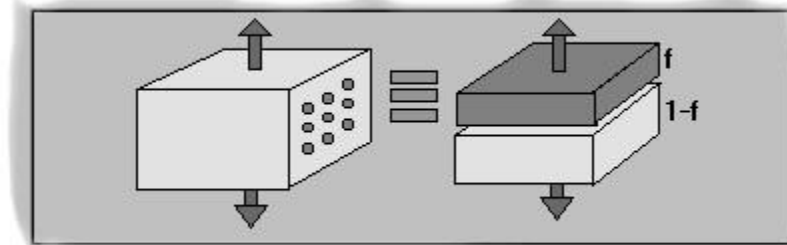
(2.2) ve (2.7) eşitlikleri  $y=mx +n$  şeklinde olup  $V_f =0$  ile  $V_f =1,0$  arasında değişim göstermektedir [27].

Çizelge 2. 2'de yukarıda verilen eşitliklerden yola çıkılarak hesaplanmış farklı takviye fiberlerin elastisite modülü, gerilim-gerinim değerleri, yoğunluk ve bunlara bağlı olarak maliyet değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 2. 2 Çeşitli Takviye Fiberlerin Özellikleri [30]

| Malzeme   | $E$<br>(GPa) | $\sigma$<br>(GPa) | $\epsilon$<br>(%) | $\rho$<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | Maliyet<br>(\$/kg) |
|-----------|--------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|
| E-Camı    | 72.4         | 2.4               | 2.6               | 2.54                           | 1.1                |
| S-Camı    | 85.5         | 4.5               | 2.0               | 2.49                           | 22-33              |
| Aramid    | 124          | 3.6               | 2.3               | 1.45                           | 22-33              |
| Boron     | 400          | 3.5               | 1.0               | 2.45                           | 340-440            |
| HS Grafit | 253          | 4.5               | 1.1               | 1.80                           | 66-110             |
| HMGrafit  | 520          | 2.4               | 0.6               | 1.85                           | 220-660            |

Şekil 2. 8’de Eşit gerilme koşulunda fiber-matris görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2. 8 Eşit Gerilme Koşulunda Fiber-Matris Görüntüsü [29]

Fiberlere Şekil 2. 8’ de görüldüğü gibi (2 yönünde) bir kuvvet uygulandığında ise elastik alanda fiberler, matris ve kompozit üzerinde meydana gelen gerilmeler eşit olur. Buna “Eşit Gerilme Koşulu” (izostres) denir ve bu koşulda elastiklik modülü aşağıdaki (2.11) eşitliğinde olduğu gibidir [9];

$$(2.11)$$

2 yönünde yani dik yönde zorlama; kompozit malzeme konstrüktif açıdan düşünüldüğünde istenmez. Ancak farklı yönlenmiş yapılarda ve çok katlı tabakalarda önemli olan bu durumun uygulamalarına bakıldığında göreceli olarak yüksek sıcaklık ve sürekli yük altında çalışan termoplastik matrisli kompozitlerde görülebilir [9].

2 yönünde zorlamalar için Halpin-Tsai olarak anılan ve çok amaçlı kullanılabilen eşitlik geliştirilmiştir (2.12). Eşitlik;

(2.12)

Olup, burada;

(2.13)

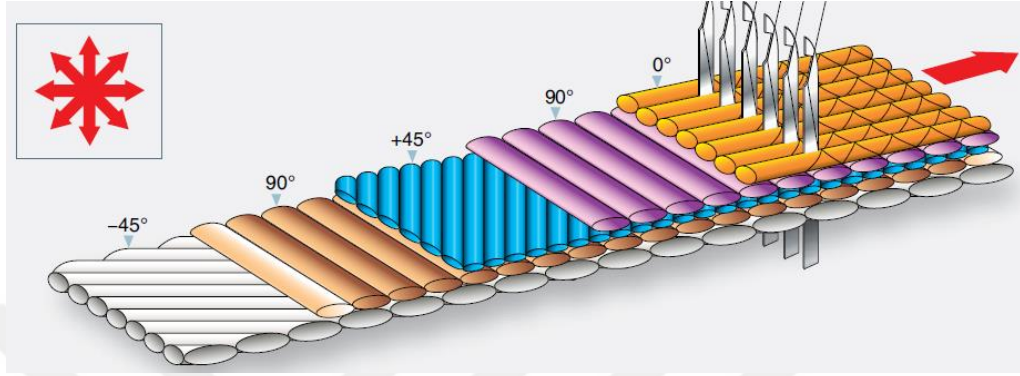
şeklinde. Eşitlikte M genel anlamıyla modül (özgül özellik) olarak tanımlanır. Ve

- $M \Rightarrow E_2, G_2, \nu_2$
- $M_f \Rightarrow E_f, G_f, \nu_f$
- $M_m \Rightarrow E_m, G_m, \nu_m$

yukarıda gösterilen özelliklerin bulunması için kullanılmaktadır. Belirtilen  $G$  Kayma Modülüdür. (2.13) eşitliğinde belirtilen en önemli parametre  $\xi$  olup Halpin ve Tsai tarafından polimer matrisli kompozitlerde  $\xi = 0,2$  olarak bulunmuştur. Bu tür durumlarda fiberlerin matriste dizilimi dolayısı ile ortaya çıkan gerinim yığılması ikincil olarak kendini göstermektedir [9].

Kompozit malzemelerin gerilme ve gerinim özellikleri, kompozit malzemenin içerisinde bulunan fiberlerin farklı doğrultularda yönlenme göstererek farklı oryantasyonlar oluşturması ile değişiklik gösterir. Özellikle ileri kompozit malzemelerde en verimli

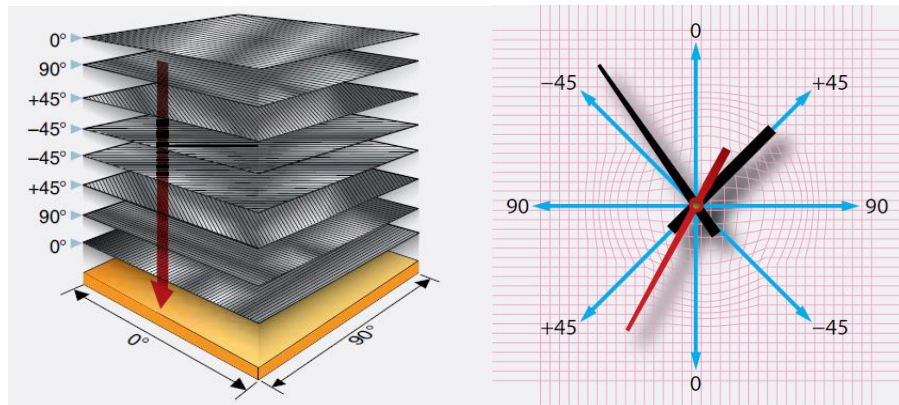
şekilde yapısal dizaynın oluşturulabilmesi için fiber oryantasyonunun seçilmesi önem arz etmektedir. Aynı zamanda bir kompozit malzeme hasara uğradığı takdirde tamir edilmesi için yapıdaki oryantasyonunun bilinip ona göre hasarın aynı doğrultuda giderilmeye çalışılması gerekmektedir. Örneğin,  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  tek yönlü fiberler olduğu gibi Şekil 2. 9'da görülen farklı doğrultularda da fiberler yönlenebilir [3].



Şekil 2. 9 Fiberlerin Yönlendirme Doğrultuları [3]

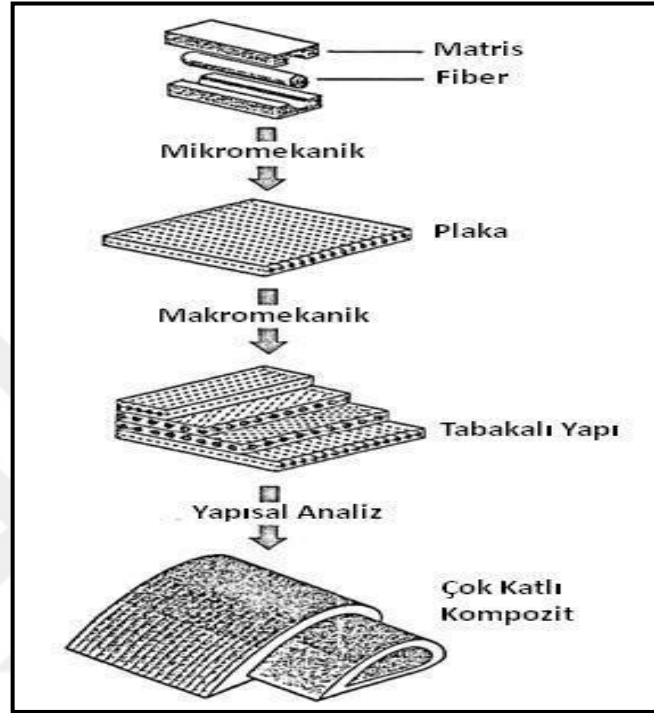
### 2.3 Kompozit Malzemelerin Makro Mekaniği

Bölüm 2. 2'de verilen bilgiler ve denklemler kompozit malzemelerin mikro mekaniği incelenirken geçerlidir ve bu denklemlerden yola çıkılarak çok katmanlı, izotropik veya ortotropik plakalar söz konusu olduğunda; kompozit malzemelerin makro boyuttaki mekanik davranışının incelenmesi gereklidir [9]. Şekil 2. 10'da fiberlerin doğrultulara göre izotropik yönleri gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Fiberlerin İzotropik Yönlerinin Gösterilmesi [3]

Kompozit malzemeler ile gerçekleştirilen uygulamalarda öncelikle fiber-matris-arayüzey bileşimi ile kompozit plakalar, daha sonra bu plakaların çok sayıda ve birlikte kullanılması ile tabakalı çok katlı yapılar elde edilebilir. Bunun sonucunda elde edilen yapının izotropik özellikler göstermesi nedeni ile elastik özelliklerinin belirlenebilmesi için çeşitli matematiksel modeller kullanılabilir [9].

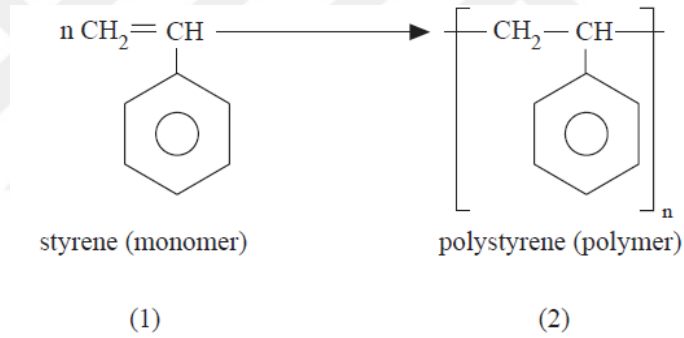


şekil: 2.11 Fiber-Matris Yapısından ok Katmanlı Yapıya Geçiş [9]

## BÖLÜM 3

### POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimer kelimesi Yunanca birkaç anlamına gelen ‘poli’ ve parçalar anlamına gelen ‘mer’ kelimesinin birleşmesiyle oluşmuş makromoleküllere verilen addır. Polimerler, küçük kimyasal ünitelerin tekrarlı olarak birleşmesiyle oluşmuştur. Şekil 3. 1’de tek bir monomerden polimer yapının oluşması gösterilmiştir [31].

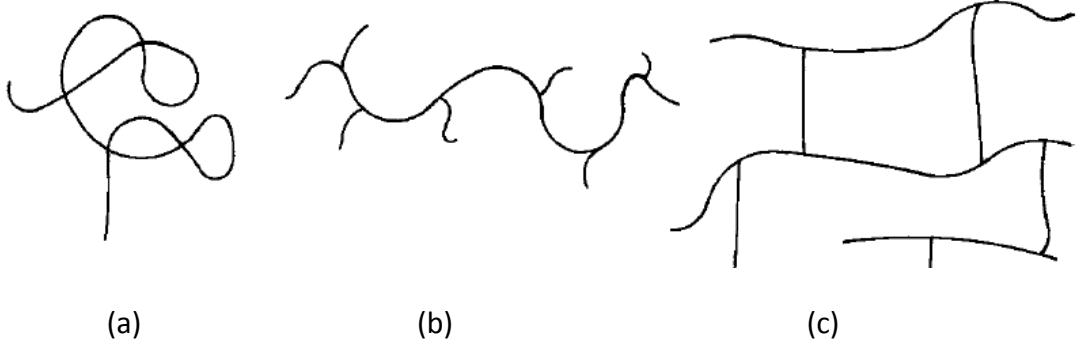


Şekil 3. 1 Monomerlerden Polimer Oluşumu [31]

Stiren molekülü yapısında çift bağ bulundurur ve polimer yapının oluşması esnasında bu çift bağ açılarak stiren molekülleri tekrarlı şekilde sıralanırlar, böylece polistiren yapısı oluşmuş olur [31].

Polimerler birçok farklı şekilde sınıflandırılabilirler ancak en temel haliyle doğal ve sentetik polimerler olarak gruplara ayrılmıştır. Bunlar dışındaki sınıflandırmalar; polimer yapısı, polimerizasyon mekanizması, hazırlanma tekniği ve termal davranışları göz önüne alınarak yapılabilir [31].

Polimerlerin yapısı; içerdiği moleküllerin bağlanma şekillerine göre farklılık gösterebilir. Şekil 3. 2’de bağ yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 (a) Lineer Yapı (b) Dallantılı Yapı (c) Çapraz Bağlı Yapı [31]

Polimerlerin bütün yapı olarak gösterdiği özellikler, içerdiği moleküllerin bağ yapısına göre farklılık gösterebilir [31].

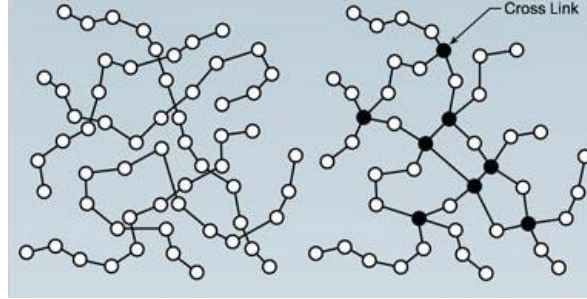
Polimer matrisli kompozitler; gösterdikleri yüksek performans ve düşük yoğunluk özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık, otomotiv, spor uygulamaları, denizcilik gibi birçok sektörde kullanım alanı bulan yirminci yüzyılın önemli bir malzeme grubudur [32].

Polimer matrisli kompozitler polimerlerin geleneksel üretim yöntemi olan enjeksiyon ile kalıplama, ekstrüzyon gibi yöntemler dışında el yatırması gibi kolay yöntemler ile üretileceği gibi yüksek maliyet gerektiren otoklav prosesleri ile de üretilabilirler [32].

Polimer matrisli kompozitlerin yapısında matris malzeme olarak organik polimer yapı ve destekleyici takviye olarak fiberler bulunur. Fiberlerin sahip olduğu dayanım değerleri matris bileşeninden fazladır. Bu nedenle kompozit yapıda fiberler ana yük taşıyıcı bileşendir. Bunun yanında, matris malzemesinin fiberler ile birlikte iyi yapışma özellikleri göstererek ara yüzey oluşturması gerekmektedir. Aynı zamanda; matris yapısı maruz kaldığı yükü homojen şekilde fiberlere aktarmalıdır. Bu nedenle kompozit malzemenin sahip olduğu özelliklerin bazıları direkt olarak matris malzemesinin karakteristik özelliklerine bağlıdır. Sonuç olarak, kompozit malzemelerde; fiber, matris ve arayüzey bileşenlerinin özellikleri kompozit malzemenin özelliklerinin oluşmasında direkt olarak etkindir [33].

### 3.1 Matris Malzemeleri

Polimer matrisli kompozitlerin matris bileşeni; termoplastik matris ve termoset matris olarak iki ana grupta incelenir. Şekil 3. 3’de bu matrislerin bağ yapısı gösterilmiştir [33].



Şekil 3. 3 Termoplastik Yapı (Solda), Termoset Yapı (Sağda) [33]

#### 3.1.1 Termoplastik Malzemeler

Termoplastik malzemeler, birbirlerine zayıf Van Der Waals bağları ile bağlanmış uzun zincirlerden oluşan molekül yapılarıdır [34].

Termoplastikler; ısıtıldıklarında yumuşayarak akışkan hale gelirler. Kimyasal yapılarında her hangi bir değişiklik olmaksızın sadece fiziksel yapılarında değişikliğe sebebiyet veren bu özellikleri sayesinde termoplastikler geri dönüştürülebilir malzemelerdir [34].

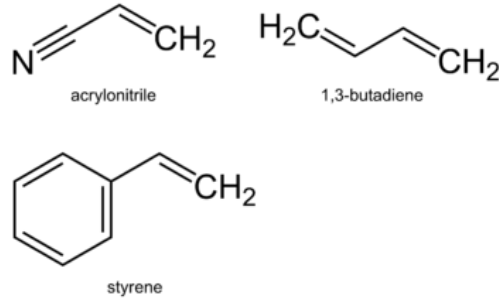
Termoplastik malzemeler; yapı-inşaat, havacılık, otomotiv, uzay sanayisi gibi çeşitli sektörlerde kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde kullanılan plastik malzemeler içinde termoplastik malzemelerin kullanımı %80 oranındadır [35].

Birçok termoplastik malzeme türü olmasına rağmen en çok kullanım alanı bulan ve mühendislik polimerleri olarak da adlandırılan türler; polipropilen (PP), polietilen (PE), yüksek yoğunluklu polietilen, düşük yoğunluklu polietilen, polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), etilen propilen dien monomeri (EPDM), stiren akrilonitril (SAN), poliamid 6 (PA6), polikarbonat (PC), polietilen teraftalat (PET), polibütilen teraftalat, akrilonitril bütadien stiren ve polimetil metakrilat (PMMA) içeren polimerlerdir [35].

##### 3.1.1.1 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)

Akrilonitril bütadien stiren; akrilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinin polimerizasyonu ile oluşan mühendislik polimerine verilen genel isimdir [25].

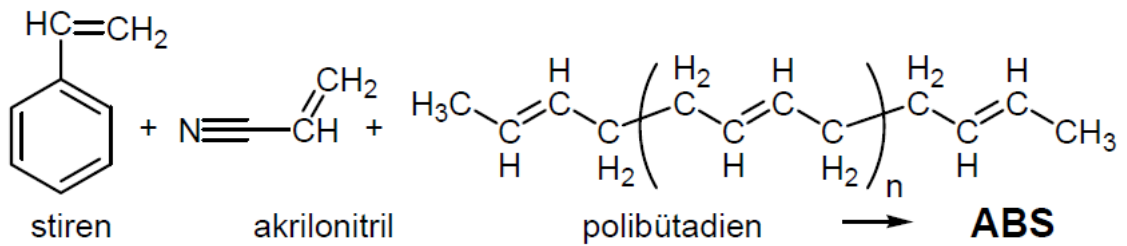
Yoğunluğu 1,05 g/cm<sup>3</sup>'tür. Şekil 3. 4'de görüldüğü gibi çift fazlı amorf yapıda olmasından ötürü gösterdiği mukavemet, tokluk değerleri sayesinde mühendislik polimerleri arasında önemli bir yere sahiptir [34], [36].



Şekil 3. 4 ABS Yapısı [36]

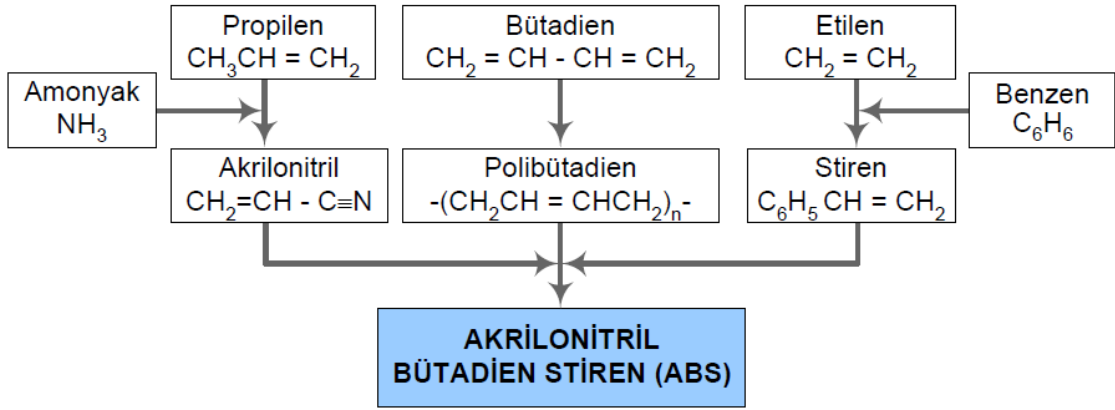
1940'lı yılların ortalarında kullanılmaya başlanan ABS, yüksek rijitlik, tokluk özelliklerinin yanı sıra ısı, çevre ve kimyasal etkiler altında gerilim çatlaması direncine de sahip olduğu için birçok farklı alanda kullanım alanı bulmuştur [36]. Naylon veya farklı malzemeler ile karıştırılarak maliyetin düşürülmeye çalışıldığı uygulamalarına da rastlanabilir. En yaygın örnekleri TV setleri, telefonlar, saç fırçaları, bavullar, baretler, oyuncaklar, spor gereçleri gibi günlük hayatta sıklıkla kullanılan eşyalardır [34], [36].

ABS polimerinin özellikleri moleküler veya morfolojik parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Matris kompozisyonu ve moleküler ağırlığı, sürekli fazın hacim oranı, partikül boyutu gibi parametreler ABS özelliklerinin belirlenmesinde etkili olabilir. Şekil 3. 5'de ABS polimerinin polimerizasyon adımları verilmiştir [36].



Şekil 3. 5 ABS Polimerizasyonu [36]

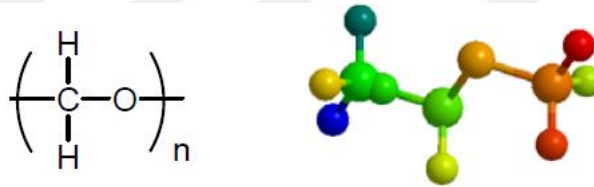
ABS polimerinin tok ve mukavim olarak çalışabildiği optimum sıcaklık aralığı -30°C ile +60°C arasındadır. Diğer termoplastik malzemeler ile karşılaştırıldığında sıfır derecenin altında en iyi çalışma özellikleri gösteren polimer malzeme ABS'dir [37].



Şekil 3. 6 ABS Üretim Adımları [38]

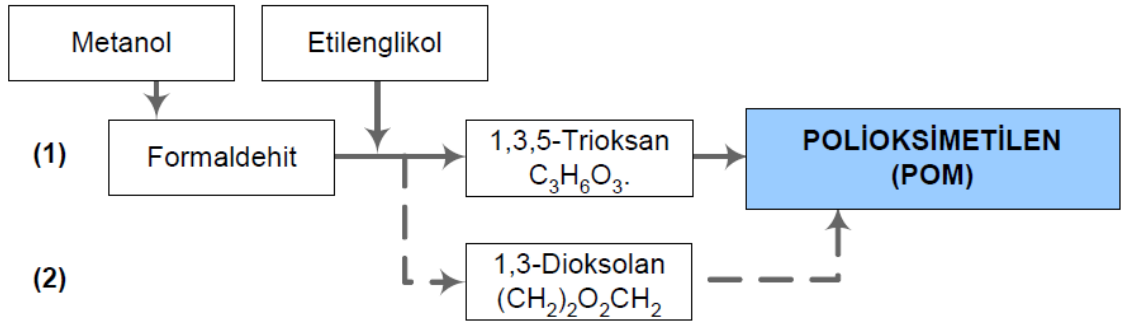
### 3.1.1.2 Polioksümetilen (POM)

Polioksümetilen;  $-\text{CH}_2\text{O}-$  merlerinin birleşmesi ile oluşan mühendislik polimerleri içerisinde yüksek aşınma ve mekanik özellikler ile iyi kırılma direnci, kalıplanabilirlik özellikleri gösteren önemli bir termoplastik grubudur. Elektrik, otomotiv, konstrüksiyon, biyomedikal uygulamalar gibi alanlarda kullanılabilir [39]. POM yapısı Şekil 3. 7’de gösterilmiştir:



Şekil 3. 7 POM Yapısı [38]

POM yapısı yüksek kristalin bir yapıdır, çok iyi sürtünme özelliklerine sahip olduğu için dişlilerde, rulmanlarda kullanımı yaygındır. Gösterdiği iyi mekanik özellikler yanında bazı dezavantajları mevcuttur [40], [38]. Yapısındaki metilen- oksijen bağları zayıf ve kolay kırılacak bağlar olduğu için formaldehit içerisinde depolimerizasyon görülebilir, bunu önlemek amacıyla yapı dioksan veya dioksolan gibi komonomerler ile modifiye edilebilir [39]. Bu durumda başlangıçta POM homopolimeri ile karşılaştırıldığında, POM kopolimer daha iyi ısısal stabilite ile uzun ömürlü mekanik mukavemet gösteren bir yapı olduğu söylenebilir [39]. Şekil 3. 8’de POM üretim şeması yer almaktadır.



Şekil 3. 8 POM Üretim Şeması [38]

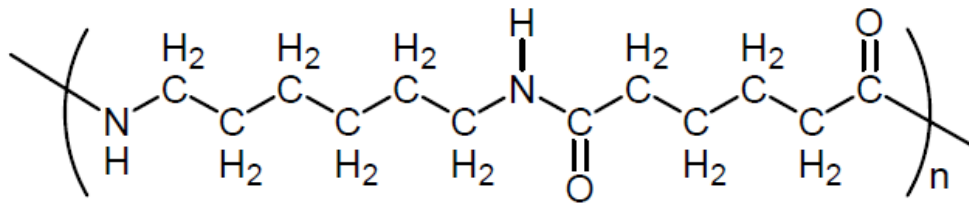
POM; yukarıda belirtildiği gibi dişli ve rulman malzemesi olarak, ayrıca nipeller, sıhhi tesisat bağlantıları, elektrik bağlantıları ve anahtarları yapımında sıklıkla kullanılır. Yoğunluğu diğer polimerlere göre yüksek olduğundan dolayı otomotiv sanayiinde kullanımı sınırlıdır, bazı uygulamalarda üretim yöntemi kolay olmadığından maliyeti yüksek olabileceğinden tercih edilmeyebilir [38].

### 3.1.1.3 Poliamidler (Naylon)

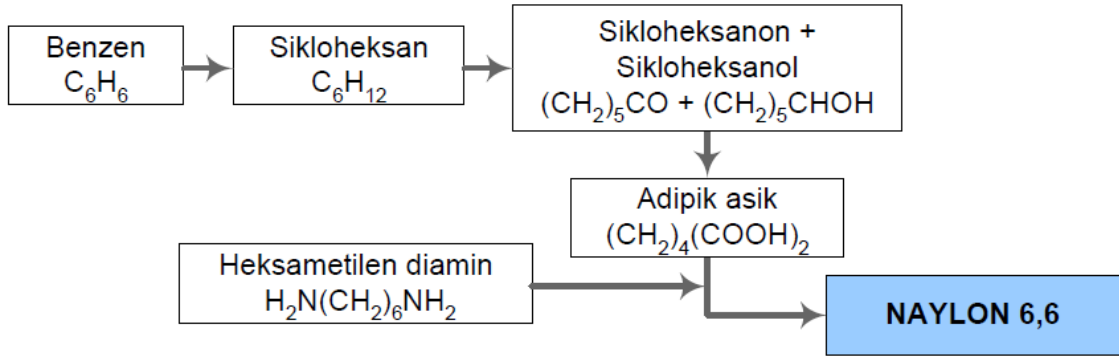
Poliamidler veya ticari adıyla naylonlar; amid (-CONH-) monomerlerinin polimerizasyonu ile oluşan 1930'lu yıllarda geliştirilmiş mühendislik polimerlerine verilen isimdir [25], [38].

Naylonlar, kullanım alanı çok geniş olan bir termoplastiktir, yiyecek kapları, kablolar, naylon dokumalar, halılar, halatlar gibi malzemelerde kullanılabilir [38].

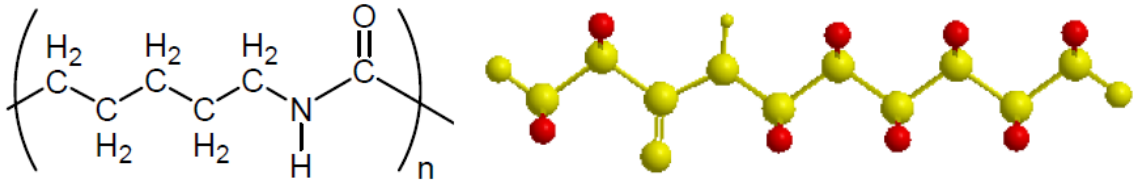
Ticari olarak naylon 6 ve naylon 6,6 olmak üzere iki ayrı kategoride incelenebilir. Naylon 6,6 yapısı Şekil 3. 9'da verilmiştir [38].



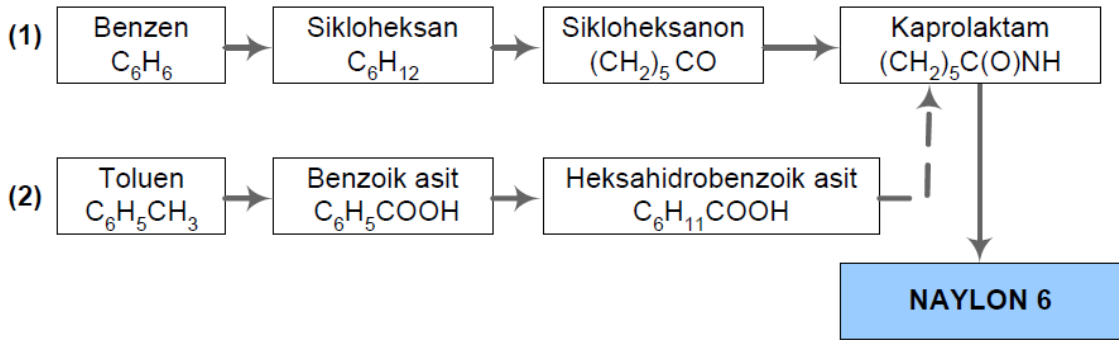
Şekil 3. 9 Naylon 6,6 [38]



Şekil 3. 10 Naylon 6,6 Üretim Şeması [38]



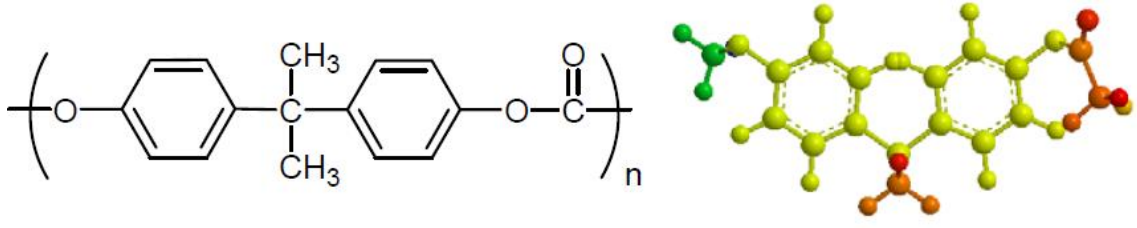
Şekil 3. 11 Naylon 6 Yapısı [38]



Şekil 3. 12 Naylon 6 Üretim Şeması [38]

#### 3.1.1.4 Polikarbonatlar (PC)

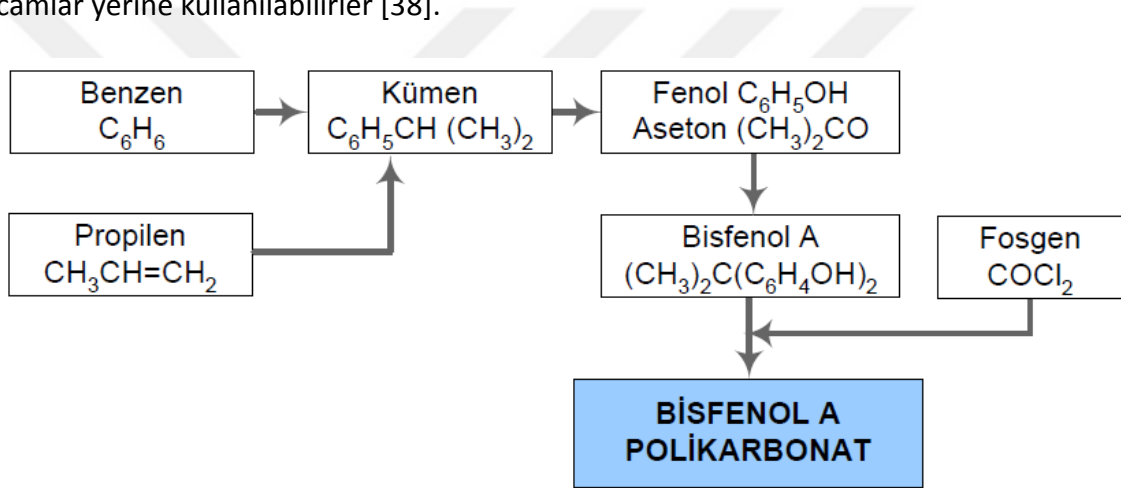
Polikarbonatlar; yüksek Young modülüne sahip ve mükemmel mekanik, optik özellikler gösteren amorf yapıda bir termoplastiktir. Askeri, balistik uygulamalar, spor malzemeleri yapımı, yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda son yıllarda sıklıkla tercih edilen bir malzeme grubudur [41]. Polikarbonatlar; karbonat gruplarının (-O-COO-) bağlanması ile oluşurlar [25]. Şekil 3. 13'de PC yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3. 13 PC Yapısı [38]

En bilinen polikarbonatlar; Bisfenol A ve metilen klorür içindeki fosgenin polikondenzasyonu ile oluşurlar. Bunun sonucunda meydana gelen hidrojen klorür, sodyum hidroksit veya farklı bir malzeme kullanılarak uzaklaştırılabilir [25].

Bu polimer grubu transparan olduğu için ışık geçirgenliği iyidir ve bazı durumlarda camlar yerine kullanılabilirler [38].



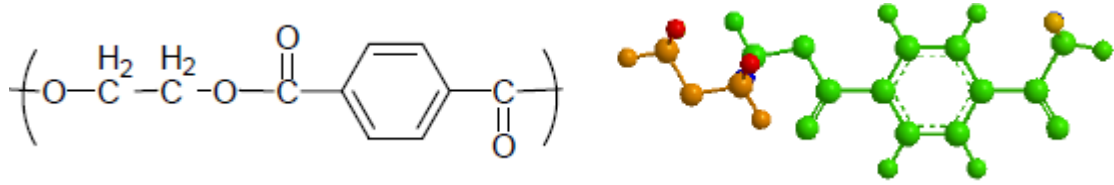
Şekil 3. 14 PC Üretim Şeması [38]

### 3.1.1.5 Polietilen Teraftalat (PET)

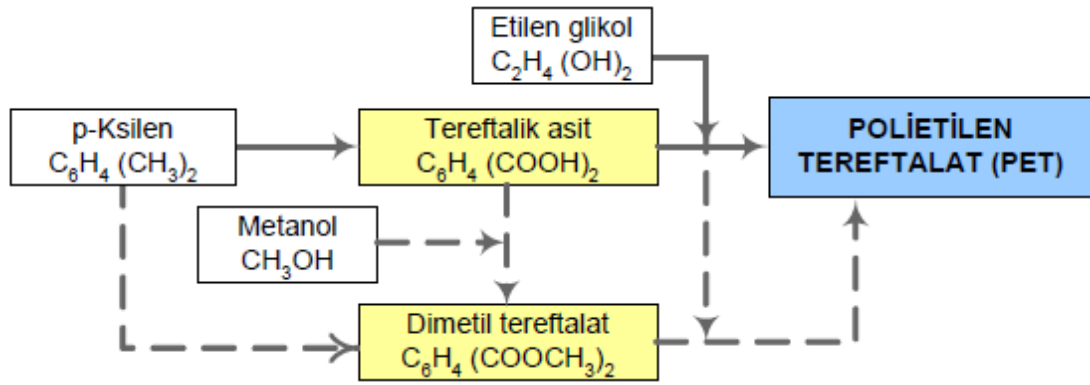
Polietilen teraftalat, düşük maliyet ve yüksek performans özelliklerinden dolayı özellikle yiyecek- içecek endüstrisinde olmak üzere dünya üzerinde çok geniş bir kullanım alanı bulmuş termoplastik bir malzemedir. PET'in yavaş kristalleşmesi ve 290°C olan diğer polimerlere göre yüksek ergime sıcaklığı bu malzemenin paketlenme endüstrisi için kullanımını artıran avantajlarından olmuştur [42], [43].

Yüksek mekanik özellikler ve kırılma tokluğu değerlerine sahip olan PET, 150°C ile 175°C'ye kadar iyi kimyasal direnç sergileyen bir termoplastik polimerdir. Bu nedenle; içeceklerin paketlenmesi, eczacılık uygulamaları, fotografik uygulamalar, X-ray filmleri,

elektrik- elektronik uygulamalar gibi birçok farklı uygulamada kullanılabilir. Bazı uygulamalarda özelliklerini geliştirmek için; silikon, grafit veya teflon ile birleştirilerek kullanılabilir [43]. Şekil 3. 15’de PET yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3. 15 PET Yapısı [38]



Şekil 3. 16 PET Üretim Şeması [38]

### 3.1.2 Termoset Malzemeler

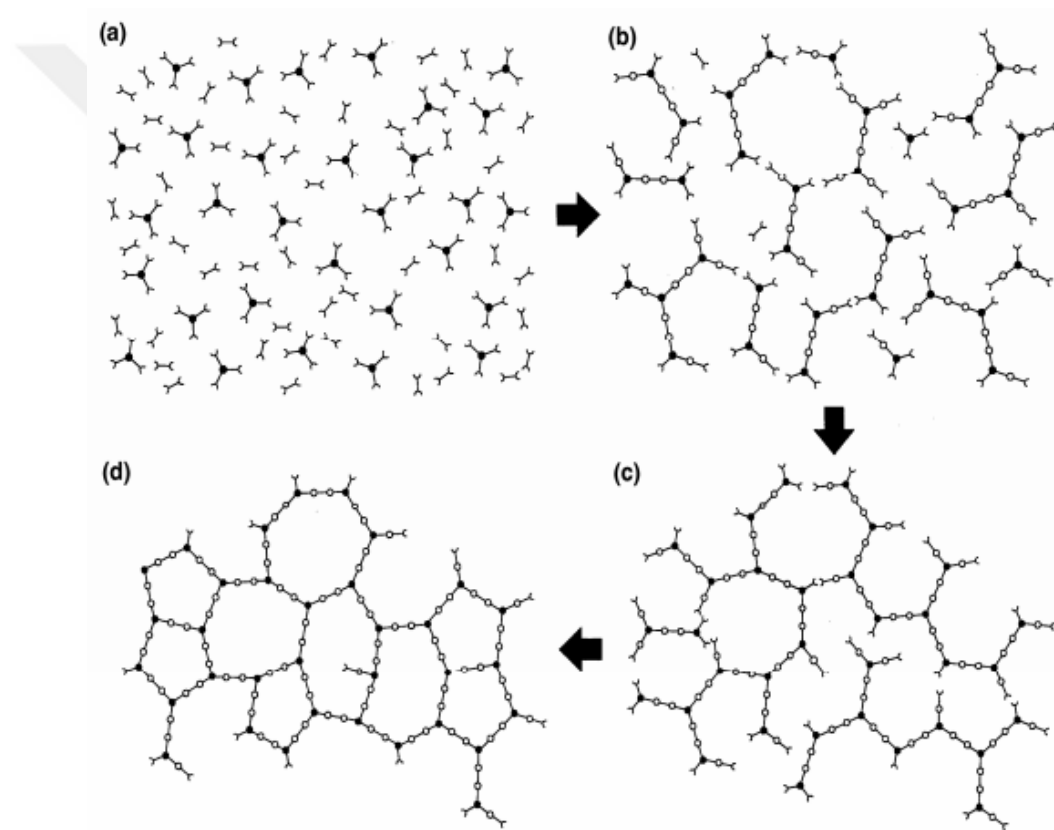
Isı ile ergiyen termoplastik polimer malzemelerin aksine termoset malzemeler; ısı ile karşılaştırıldıklarında sertleşen ve bu nedenle geri dönüşümü mümkün olmayan bir malzeme grubudur. Epoksi, fenolik, doymamış polyester, poliüretan, disiyanat, poliimid, akrilat ve daha birçok reçine grubu termoset malzeme grubunda yer alır [44], [45].

Termoplastiklerin aksine, gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar onların kullanım koşulları ile alakalıdır. Isı veya ışık ile aktivasyonu ile termoset malzemede kür mekanizması başlamış olur ve bu aşamadan sonra viskozitesinde artış gözlenirken çapraz bağlar oluşur. Kürlenme öncesinde termosetler; monomerler gibi küçük reaktif moleküllerin karışımı halinde bulunur ve çeşitli katalistlerin eklenmesi ile kür mekanizması başlatılır. Birçok termoset malzeme çeşitli katkılar veya fiber destekleri ile birlikte kullanılarak maliyet azaltılmaya veya alev iletmemeye gibi çeşitli özellikler yapıya kazandırılmaya

çalışılır. Termosetler genellikle iyi boyutsal ve ısısal stabilite, iyi kimyasal direnç ve elektriksel özellikler gösterirler [44].

Termosetler; sahip oldukları özellikler sayesinde bir çok alanda kullanılma imkanı sağlar. Yapıştırıcı olarak uzay ve havacılık sektöründe birincil ve ikincil yapısal elemanların yapıştırılmasında, iletken polimerler olarak elektronik uygulamalarda, dişçilik malzemelerinde, yine yapıştırıcı olarak tenis raketleri ve bisikletler gibi spor gereçlerinde kullanılabilirler [44].

Şekil 3. 17'de termosetlerin jelleşme aşamasından kürlenme sonrası aşamaya kadar olan sürede yapısında meydana gelen değişiklikler gösterilmiştir.



Şekil 3. 17 a) Reaktif viskoz yapı b) Jelleşme aşamasının başlangıcı c) Kür işlemi bitişi d) Termoset yapı [44]

### 3.1.2.1 Doymamış Polyester Reçineler

Doymamış polyester reçineler; diol (1,3- propilen glikol gibi), doymuş asit (fitalik anhidrit asit gibi) ve doymamış asidin (maleik asit/anhidrit gibi) kondenzasyon polimerizasyonu ile meydana gelen makromoleküllerdir. Doymamış polyester

reçineler, ester bağlarında asit bileşenleri barındıran polyester gruplarına verilen genel isimdir [45], [32].

Doymamış polyester reçinelerde bulunan çift bağlar ile çapraz bağlanmayı sağlayıcı, monomer ilavesi yapılabilir [45]. Özellikle viskozite değerlerini azaltmak amacıyla stiren ilavesi, alev iletmemeye özelliği kazandırmak amacıyla kloromalik asit ilavesi yapılabilir. Stiren dışında vinil tolüen, dialil ftalat veya metil metakrilat gibi aktif vinil monomerler polimerlerden çeşitli özellikler elde etmek için kullanılabilir [45], [32].

Doymamış polyester reçinelerin kürleşme mekanizmasını başlatmak için metil etil keton peroksit veya benzoin peroksit gibi katalistler, kimyasal reaksiyonu aktive etmek için ise kobalt naftalat, kobalt oktanoat gibi aktivatör kimyasallar kullanılır [45].

Bu reçine grubunun diğer termoset reçinelere göre tercih sebebi düşük maliyet özellikleridir [32].

### **3.1.2.2 Fenolik Reçineler**

Fenolik reçineler; alkalın ortam koşullarında bir aldehit grubunun (genellikle formaldehit) fenol ile reaksiyonu sonucu kondenzasyon polimerizasyonu ile oluşan makromoleküllerdir [45], [32]. Fenolik reçine matrisli kompozitler çok iyi alev direnci, yüksek sıcaklıklarda iyi çalışma performansı, uzun ömürlü olması ve kimyasallara karşı direnci olan yapılardır [32].

Fenolik reçineler yüksek sıcaklığa maruz kalınan uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Roketlerin nozüllerinde, uzay roketinin burun kısmında kullanılmaktadır. Fenolik reçineler boyutsal ve ısısal stabiliteye sahip oldukları için iyi dielektrik özellikler gösterirler [45].

### **3.1.2.3 Vinil Ester Reçineler**

Vinil ester reçineler; epoksi sistemlerin mükemmel fiziksel özellikleri üzerine inşa edilen, vinil monomerlerinin ( $\text{CH}_2=\text{CH}$ ) bağlı bulunduğu doymamış polyester reçinelerin oluşturduğu epoksi bazlı reçinelerdir [32], [47]. Polyester reçineler ile benzer uygulamalarda ve genellikle daha yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılabilirler [47]. Vinil ester reçinelerin temel iki tipi mevcuttur;

### Bisfenol A-diglisidil eter tipi (BADGE)

Bu tip reçineler; BADGE epoksi sisteminin metakrilik asit ile reaksiyonu sonucu oluşurlar. Sonuçta oluşan reçine katı oranının en az %50 olarak üretilmesi için stiren içinde seyreltilir. BADGE tipi vinil ester reçineler; kimyasal tanklar veya borular gibi yüksek performans gerektiren birçok uygulamada kullanılabilirler [47].

### Epoksi Fenol Novolak Tip (EPN)

Bu tip reçineler EPN ve metakrilik asit reaksiyonu ürünüdür ve stirende seyreltilmiş katı içeriği %30 ile %36 aralığındadır [47].

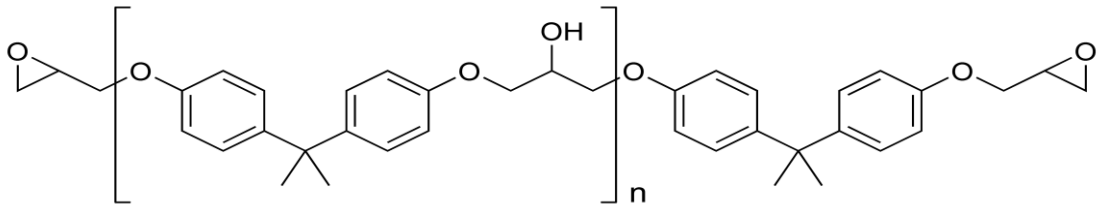
Vinil ester reçineler moleküler yapıları ve yapılarında ihtiva ettikleri çapraz bağlar sayesinde kimyasal tepkimelerde polyesterlerden daha aktif davranış gösterirler. Yapılarından dolayı bu reçineler; su ve kimyasallara karşı da daha dirençlidir [47].

#### 3.1.2.4 Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler; 1950'li yılların başlarında kullanılmaya başlanmış ve günümüzde de endüstriyel uygulamalarda çok geniş kullanım alanına sahip reçinelerdir [47].

Epoksi reçineler; her molekülünde iki veya daha fazla epoksi grubu bulunduran düşük moleküler ağırlıklı oligomerler olarak tanımlanabilir [45].

Epoksiler; plastik endüstrisinde kürleşme ajanı eklenmesi ile tokluk ve sertlik gibi özellikleri aktifleştirilen termoset bir reçine grubudur [47]. Epoksi zinciri ile oligomerler katalizörler sayesinde çapraz bağlar oluştururlar ve bu durum da yapıya çözücü ve kimyasallara karşı direnç, sertlik, iyi yapışma özellikleri gibi çeşitli özellikler kazandırır [45].



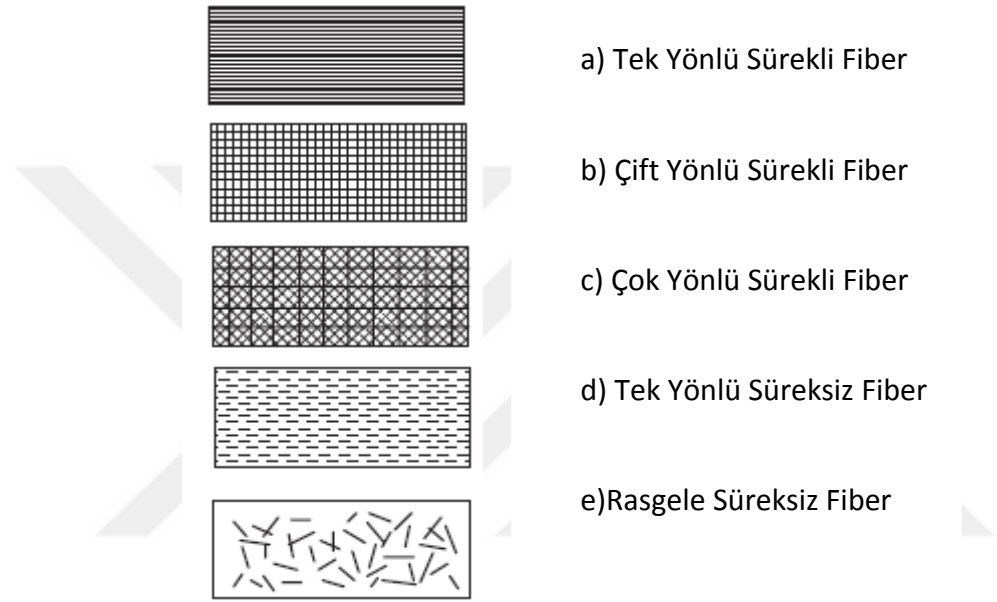
Şekil 3. 18 Epoksi Yapısı [47]

### 3.2 Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemeler; matris fazı ile birlikte arayüz oluşturup yük taşıyıcı faz olarak görev yapan takviye malzemelerin bir araya gelmesi ile oluşmuştur [24].

#### 3.2.1 Fiberler

Polimer matrisli kompozitlerde, kısa (süreksiz) veya sürekli olmak üzere fiberler destekleyici takviye bileşeni olarak kullanılırlar [48].



Şekil 3. 19 Fiber Türleri [48]

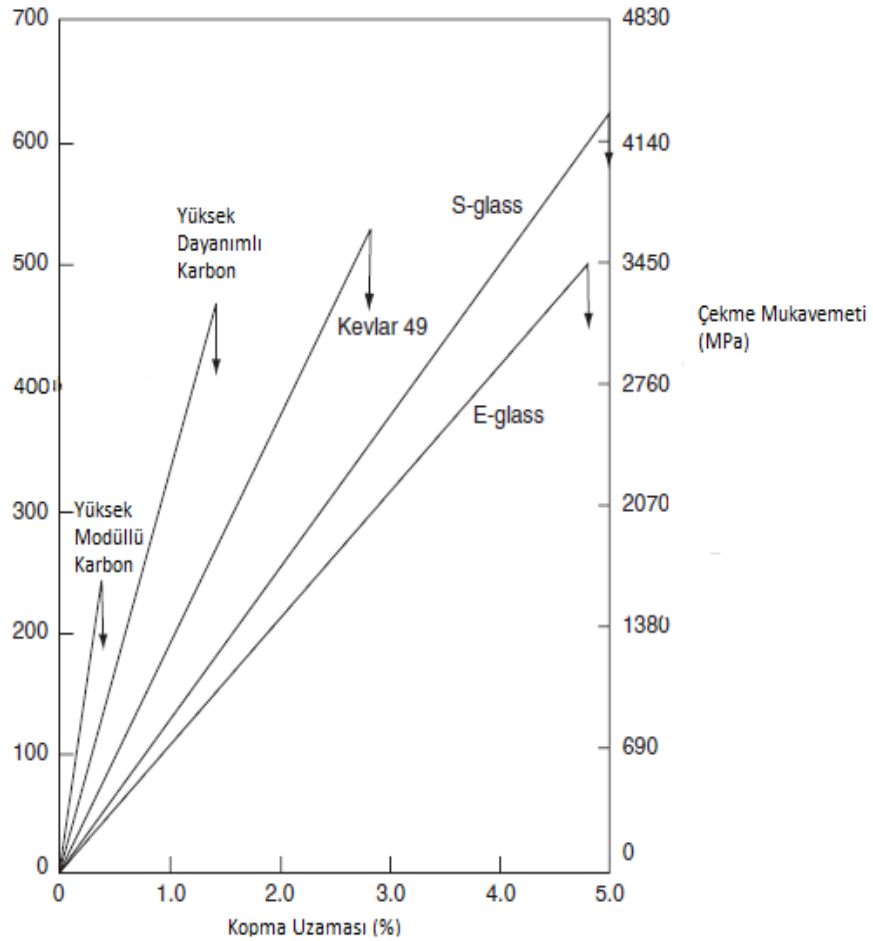
Fiberler; kompozitlerin yapısında destekleyici bileşen olarak bulunurlar ve kompozit malzeme davranışının iyi bir şekilde analiz edilebilmesi için, matris-takviye bileşenleri ilişkisinin ve bu bileşenlerin yapı içindeki görevlerinin de iyi bilinmesi gerekir [49].

Takviye bileşeninin kompozit yapıdaki görevleri;

- Yük taşımak. (Kompozit yapının maruz kaldığı yükün %70 ile %90'lık bölümü takviye bileşeni tarafından taşınır.)
- Yapıya mukavemet, termal stabilite ve diğer yapısal özellikleri sağlamak.
- Kullanılan fiber tipine göre elektrik iletkenliği veya yalıtım sağlamak [49].

Fiberler, kompozit lamine malzemenin büyük oranda yük taşıyıcısı ve yapı belirleyicisi olduğu için fiberlerin tipi, hacim oranı, fiber uzunluğu, fiber oryantasyonu çok

önemlidir. Bu özellikler direkt olarak kompozit yapının yoğunluk, çekme dayanımı ve elastisite modülü, bası mukavemeti, kırılma tokluğu, elektriksel ve termal özellikler ve maliyet gibi karakteristik özelliklerini belirler [48]. Şekil 3. 20’de farklı takviye malzemelerinin gerilme gerinim diyagramı üzerinde özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 3. 20 Farklı Takviye Malzemelerinin Gerilme-Gerinim Diyagramı [48]

Polimer matrisli kompozitlerde sıklıkla kullanılan fiberler; karbon fiber, aramid fiber, cam fiber, seramik fiber ve boron fiberler olarak en genel şekilde gruplandırılabilir [48].

### 3.2.1.1 Karbon Fiberler

Karbon ve grafit fiberler Poliakrilonitril (PAN) veya zift bazlı başlangıç maddeleri kullanılarak üretilirler. Bu başlangıç maddeleri bir seri operasyon geçirdikten sonra nihai ürün elde edilir. İlk olarak, başlangıç maddeleri çok yüksek sıcaklıklarda oksidasyon işlemine tabi tutulurlar. Daha sonra, karbonizasyon ve grafitizasyon prosesi gerçekleştirilir. Bu prosesler esnasında başlangıç maddeleri yüksek sertlik-ağırlık oranı

veya dayanım-ağırlık oranı gibi özellikleri konusunda kimyasal değişikliklere uğrarlar. Özellikle yüzeylerinde ve yapılarında meydana gelen değişiklikler sayesinde reçine ile ıslanabilirlik ve uyumluluk açısından olumlu yönde değişiklikler kazanırlar. Fiberlerin kimyasal ve elektrolitik oksidasyonu sonucu kazanılan bu özellikler fiber ve matris arasındaki adhezyonu artırdığı için reçine ile ıslanabilirlik ve uyum artmış olur. Proses koşullarına bağlı olarak (yapısal değişiklikler kontrol altında olmak koşuluyla) çok iyi mekanik özelliklere sahip fiberler de elde edilebilir [49], [50].

Poliakrilonitril, tekstil kökenli polimer bir fiberdir. Poliakrilonitril bazlı fiberler genellikle karbon fiberlerin üretilmesi için başlangıç maddesi olarak kullanılırlar. Karbon fiberlerin maliyeti ham maddenin ve üretim prosesinin maliyetine bağlı olduğu için diğer fiberlere göre nispeten fazladır. PAN bazlı başlangıç maddelerinin kilogram fiyatı yaklaşık olarak 3\$ ile 4\$ arasında değişmektedir. Oksidasyon ve karbonizasyon prosesleri esnasında orijinal ağırlıktan yaklaşık %50 oranında bir kayıp gözlenir bu durumda ham madde maliyeti yaklaşık iki kat artmış olur. Bu nedenlerden dolayı karbon fiberlerin üretimi oldukça yavaş ilerleyen ve sermaye-yoğun bir durumdur [49].

Karbon fiberlerin maliyeti bir lif demetindeki liflerin sayısına bağlı olarak da değişir çünkü bu durum fiberin mukavemet ve sertlik değerlerini doğrudan etkiler. Örneğin; 12K (bir lif demetinde 12,000 lif) 6K (bir lif demetinde 6,000 lif) demetinden daha pahalıdır [49].

Karbon fiberlerin temel bazı özellikleri aşağıda belirtilmiştir;

- Yüksek mukavemet- ağırlık oranı
- Rijitlik
- İyi korozyon direnci
- İyi elektriksel iletkenlik
- İyi kırılma direnci
- İyi çekme mukavemeti (aynı zamanda gevrek olması dezavantaj olarak söylenebilir)
- Yüksek alev direnci, yanmazlık

- Yüksek termal iletkenlik (bazı formları için)
- Biyolojik olarak inertlik
- X-Ray geçirgenliği

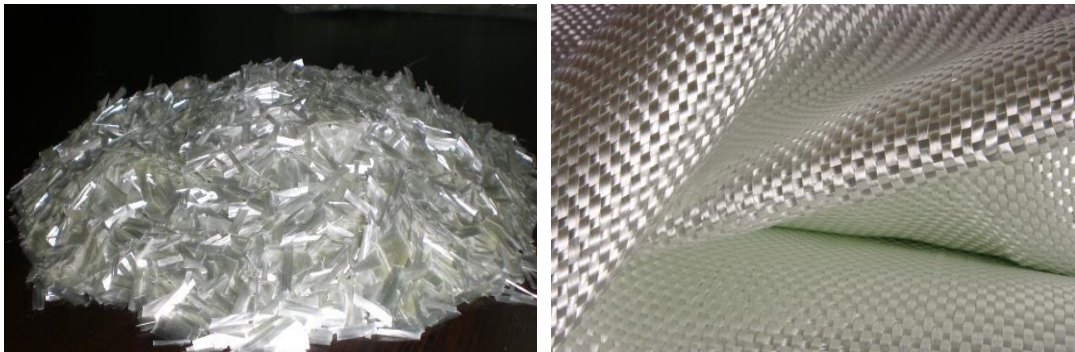
gibi özellikler karbon fiberlerin en bilinen özellikleridir [51].



Şekil 3. 21 Karbon Fiber İplik ve Karbon Fiber Dokuma [52]

### 3.2.1.2 Cam Fiberler

Cam fiberler silika ( $\text{SiO}_2$ ) bazlı ergimiş oksitlerden oluşan, yüksek mukavemetin yanında düşük maliyet değerlerine de sahip oldukları için polimer matrisli kompozitlerin ana dayanak noktası olan fiberlerdir. Yüksek mukavemet değerlerinden dolayı basınçlı kaplar, roket parçaları gibi yapısal uygulamalarda 1960'lı yılların başlarından beri kullanım alanı bulmuşlardır [53].



Şekil 3. 22 Cam Fiber İplik ve Cam Fiber Dokuma [54]

Cam fiberlerin özellikleri nasıl üretildiğine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Örneğin; E camı üretmek için kullanılan ham maddeler silika tuzu, kireçtaşı, flüorit, borik asit ve kildir. Silika oranı içindekilerin %50'sinden daha fazladır. Üretim esnasında kullanılan

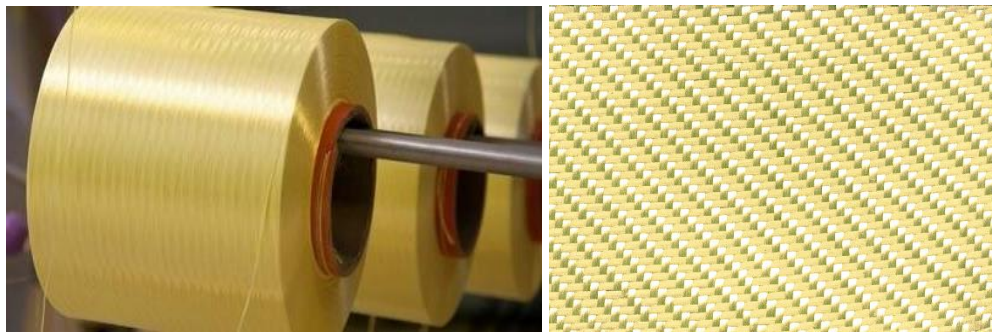
ham maddelerin miktarlarını veya proses parametrelerini değiştirerek farklı tiplerde cam fiberler elde edilebilir. Üretim sırasında ham maddeler karıştırılarak 2,500 ile 3,000°F arasında ergitilirler. Cam lifler elde edilir ve bunlar saatte 50 mil hız ile çekilir. Farklı boyutlarda elde edilebilen cam fiberler farklı özelliklere sahip olarak kullanılırlar, örneğin reçine ile ıslanabilirlik özellikleri birbirinden farklı olabileceği için epoksi reçine ile polyester reçine için farklı boyutlardaki cam fiberler farklı özellik gösterebilirler [49].

Cam fiberler bazı inorganik fiberlerden daha güçlü yapıda olmalarına rağmen moleküler yapılarından dolayı daha az rijitlik gösterebilirler. Cam fiberin özellikleri kimyasal yapısına bağlı olarak değişebilir. E-camı (borosilikat esaslı fiberler), S-camı (Fransa'da R-camı olarak adlandırılır) ve C-camı cam fiber çeşitlerine örnektir. S-camı; E-camına göre daha yüksek termal stabiliteye sahip olmasına karşın yüksek maliyeti açısından kullanımı kısıtlıdır. Yüksek mekanik değerlere sahip olduğu bilinen kalsiyum alüminat cam fiberlerin mukavemeti 180 Gpa değerlerinde ölçölmüştür [50].

### 3.2.1.3 Aramid Fiberler

Aramid fiberler; diğer fiberler içinde en yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip fiberler olarak bilinirler. Çok iyi darbe direnci değerlerine sahiptirler. Tek dezavantajları, kesilip makine ile işlenebilirlikleri zordur [49].

Aramid fiberler; asidik bir solösyon olan tereftalik klorür ve fenilen diamine polikondenzasyonunun ekströzyon işlemleri ile elde edilirler [49].



şekil 3. 23 Aramid Fiber İplik ve Aramid Fiber Dokuma [55]

Aramid fiberler; ticari olarak Kevlar (Du Pont tarafından geliştirilmiştir) diye adlandırılırlar. Kevlar aramid fiberler cam fiberlere göre özel mukavemet ve sertlik değerleri gösterirler. Aramid fiberler ile takviye edilmiş polimer matrisli kompozitler de

400°C'ye kadar iyi çekme özelliklerine sahip olmalarına rağmen, bası özellikleri çok iyi değildir [53].

Aramid fiberlerin en büyük avantajı kırılma esnasında enerjinin büyük kısmını absorbe edebilme yeteneğidir. Bu nedenle aramid fiberler balistik uygulamalarda, honeycomb içeren panellerde, dielektrik özellikleri sayesinde dielektrik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen fiberlerdir [53].

Kevlar fiberler; aromatik poliamid (poli parafenilen terfalamid; PPD-T) polimer zincirinden oluşur. Yapıdaki güçlü kovalent bağlar ve zayıf hidrojen bağları yapıya yüksek anizotropik özellikler kazandırır [53].

#### **3.2.1.4 Boron Fiberler**

Boron fiberler; karbon fiberlerin 10 µm çapı ile karşılaştırıldığında 125-140 µm çapında monoliflere sahip fiberlerdir. Neredeyse elmas kadar sert oldukları için delmek veya makine ile işlemek çok zordur. Bu nedenle polimer matrisli kompozit uygulamalarında diğer fiberlere göre pahalı olduğu düşünülen karbon fiberin bile işlenebilirliği daha az maliyete sahip ve daha kolaydır. Ancak F-14, F-15 ve B-1 gibi bazı hava taşıtlarında boron-epoksi komponentler yer almaktadır [53].

Boron fiberler alüminyum metal matrisli kompozitlerde de destekleyici bileşen olarak kullanılabilir [53].

Boron fiberler kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile üretilirler [53].

### ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

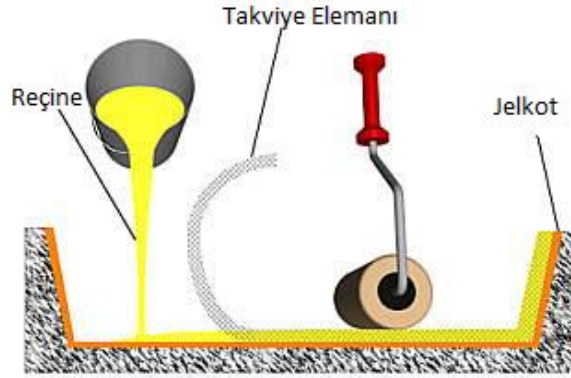
Üretim yöntemi; kompozit malzemelerin nihai ürün özelliklerini belirlemede doğrudan etkili yöntemlerdir. Son yıllarda; polimerik matrisli kompozit malzemeler otomotiv, uzay, enerji ve spor gibi çok farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bu alanlarda talep yüksek performans sergileyen, yüksek kalitede ancak düşük maliyetli ürünler için artmaktadır. Bu nedenle, bu malzemelerin üretimi esnasında insan müdahalesi en aza indirilip endüstriyel üretim yöntemleri geliştirilmektedir. Bu durum, stiren gibi kür prosesi sırasında ortaya çıkan zararlı kimyasal maddeleri solumaktan kaynaklanan çeşitli sağlık sorunlarının da önüne geçmektedir [56].

#### 4.1 El Yatırması (Hand Lay-Up)

En eski, en basit ve küçük parçaların üretiminde en yaygın kullanılan yöntemdir. Düz veya girintili yüzeylerde, ahşap, metal, plastik veya bunların kombinasyonundan oluşan kalıplarda el yatırması yöntemi kullanılarak üretim yapılabilir [14].

El yatırması yönteminde, kullanılacak kalıp temizlenir ve kullanım öncesi kalıba kalıp ayırıcı uygulanır. İsteğe bağlı olarak jelkot uygulanabilir. Kalıp ayırıcı sonrasında kullanılacak dokuma kalıba yerleştirilir. Fırça veya rulo yardımıyla hazırlanan reçine kullanılarak dokuma ıslatılır. Kullanılan reçinenin türüne bağlı olarak kürleşme süresi bitene kadar beklenir. Kür süresi sonrası elde edilen ürün kalıptan çıkarılabilir [57].

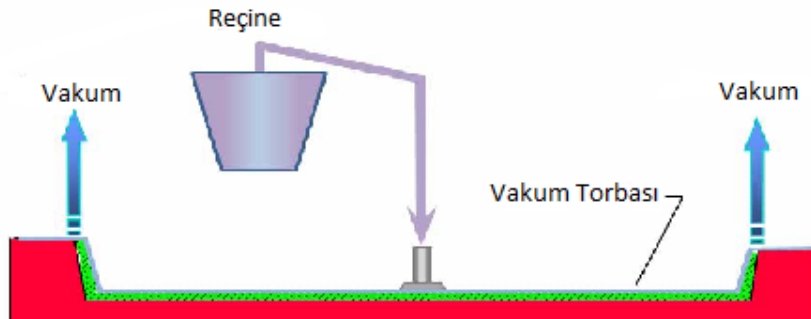
Yöntem el ile uygulama yapılarak gerçekleştirildiği için kullanılan reçinenin viskozitesi düşük seçilmelidir. Ayrıca bu yöntemin en büyük dezavantajı uygulama el ile yapıldığı için ürün kalitesinde ve sürekliliğinde olumsuz durumlar gözlenebilir [58].



Şekil 4. 1 El Yatırması Yöntemi ile İmalat [58]

#### 4.2 Vakum Yardımıyla Reçine Aktarmalı Kalıplama (İnfüzyon) Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi olarak da bilinen bu yöntem kompozit malzemelerin imalat yöntemleri arasında çok yönlü ve birçok farklı parçanın üretiminde kullanılabilen çok amaçlı bir yöntemdir. Yöntemde kullanılacak kalıp temizlenir, kalıp ayırıcı uygulanır ve kullanılacak dokuma kalıba yerleştirilir. Vakum infüzyon yöntemi için kullanılan çeşitli sarf malzemeler; sırasıyla soyma kumaşı (peel ply), reçine akış filesi (flow mesh), spiral reçine hortumları (uygun bağlantı elemanları ile birlikte), vakum sızdırmazlık macunu ve vakum naylonu kalıba yerleştirilir. Isı ve basınç yardımıyla kürleme işlemi gerçekleştirilir [14], [57]. Şekil 4. 2’de vakum infüzyon yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 Vakum İnfüzyon Yöntemi Şematığı [58]

Reaksiyon ekzotermik bir reaksiyondur ve ısınma oranları (yaklaşık olarak 2-5°C/dk) kontrol altında tutulmalıdır. Isınma oranları son ürünün mekanik ve termal özelliklerini etkileyebileceği için önemlidir [57].



Şekil 4. 3 Vakum İnfüzyon Yöntemi Uygulama Örneği

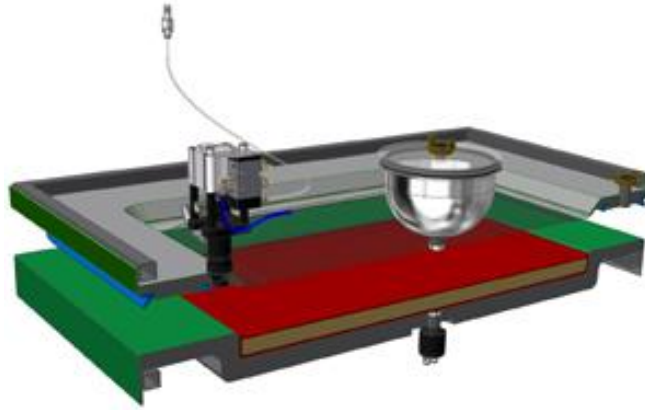
#### 4.3 Reçine Aktarmalı Kalıplama (RTM)

Reçine aktarmalı kalıplama yöntemi, bütünleşik, büyük boyutta fabrikasyon uygulamaları için yüksek performanslı ürünlere imkan veren düşük maliyete sahip bir yöntemdir. Dişi ve erkek olmak üzere iki parçalı kalıp kullanıldığından dolayı ürünün yüzey özelliklerinin iyi olması beklenir [14].

Bu yöntemde kullanılacak dokuma, kalıbın ve elde edilmek istenen nihai ürünün şeklinde kesilir hazırlanmış kalıba yerleştirilir. Reçine kalıbın en alçak noktasından kalıba enjekte edilir. Reçine; reçine tuzağına sızmaya başladığı anda reçine kaybını en aza indirmek için reçine girişi kapatılır. Kür işlemi tamamlandıktan sonra ürün kalıptan çıkarılır ve ileri kürlenme işlemi yapılır [14].

RTM makineleri; yüksek kalitede ürünler elde edebilmek için genellikle uygulama süresi uzun reçineler kullanılarak düşük basınçlarda (1 Mpa'dan daha düşük) ve düşük

hızlarda yapılır. Düşük enjeksiyon basınçları kompozit malzeme için daha düşük maliyetlere sahip ürünler anlamına gelir [58].



Şekil 4. 4 RTM Yöntemi Uygulanışı [58]

RTM yönteminin avantajları;

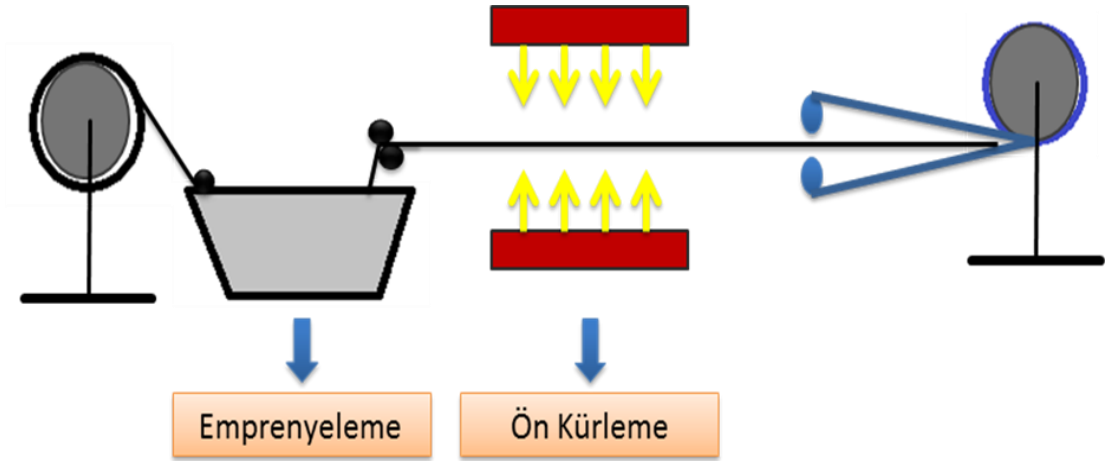
- Kısa kür zamanları,
- Fiber hacminin hassas kontrol edilebilmesi,
- Kompleks parçaların kolaylıkla imal edilebilmesi,
- Soğutma sistemine ihtiyaç duyulmaması,
- Yüksek kalitede ürünlerin üretilebilirliği,
- Nihai ürün için iyi boyutsal kontrol yapılabilmesi gibi özellikler sıralanabilir [59].

#### 4.4 Emprenye Kumaş ile İmalat (Prepreg)

Prepreg ifadesi, 'pre' ve 'impregnation' kelimelerinden türeyen polimerize olmuş reçinenin destekleyici malzemeye emprenye edilmesi ile oluşan yeni ürünün adıdır [57], [60].

Prepreg üretiminde kullanılacak reçinenin yüksek viskozite değerlerine sahip, el ile uygulanabilirliği ve kalıba işlenebilirliği kolay olan bir reçine olması gerekmektedir. Prepreg kumaşlar ile imalat yapılırken hazırlanmış kalıba prepreg yatırılır ve 80 ile 120° C arasında ısı ve basınç yardımıyla kütleme yapılır [58], [59].

Bu yöntem ile imal edilen ürünler; boşluksuz, yüksek kalitede ürünler olup havacılık ve uzay endüstrisinde sıklıkla tercih edilen ürünlerdir [58].



Şekil 4. 5 Prepreg Üretim Yöntemi [60]

Şekilde görüldüğü gibi prepreg kumaş kalıba yatırıldıktan sonra hava akışını sağlayan üzerinde deliklerin bulunduğu bir ayırıcı film soyma kumaşı olarak kullanılır. Kapalı sistem içindeki havanın sistem dışına çıkışına yardımcı olacak vakum battaniyesi serilir. Ardından vakum sızdırmalılık macunu ile yüksek sıcaklığa dayanıklı vakum naylonu ile kalıp kapatılır. Belli sıcaklıklarda kırleme ve ileri kırleme işlemleri yapıldıktan sonra ürün kalıptan alınabilir [60].

Prepreg kullanımının avantajları;

- Maksimum mukavemet özellikleri (reçine-fiber hacim oranları sabit olduğundan dolayı) elde edilebilir.
- Kumaşın reçine oranı belirli olarak üretildiği için reçine kaybı önlenir.
- Daha düşük kırleşme sürelerine sahip olması diğer yöntemlere göre zamandan tasarruf sağlar [61].

#### 4.5 Pultrüzyon

Pultrüzyon metodu; sürekli ve ara kesitsiz (sabit kesit) kompozit profiller üretiminde kullanılan otomatik bir yöntemdir [14], [58]. Reçine emdirilmiş fiberlerin çekilmesi esasına dayanarak, ısıtma ve kırleme ile rijit profiller elde edilebilir [58]. Bu teknik ile çubuk, boru profiller ve farklı yapılarda ürünler üretilebilir [14].



Şekil 4. 6 Pultrüzyon Ürünü Profiller [62]

Pultrüzyon yönteminde fiberler cağıktan gelirken reçine banyosundan geçerler ve kalıba yerleştirilirler ardından reçinenin polimerize olması için ısıtılırlar. Sonrasında reçine kürlenir. Bu teknik, ara kesitli, sabit ürünler için çeşitli kısıtlamalara sahiptir. Yüksek maliyet gerektiren bir yöntemdir [59].

Pultrüzyon yöntemi ile imal edilen kompozit ürünler ilave işlem gerektirmezler. Yöntem ekstr zyon yöntemine benzese de ekstr zyon yönteminde kalıba ürün itilirken pultrüzyon yönteminde çekilmek suretiyle üretim gerçekleşir [59].

#### 4.6 Elyaf Sarma (Filament Winding)

Prepreg teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş birçok kompozit malzeme üretim tekniği bulunmaktadır ve elyaf sarma da bu tekniklerden biridir. Borular ve silindirik kapların üretimi için elyaf sarma en efektif ve uygulanışı kolay olan yöntemdir.  retilebilecek  r n çapları 25 mm'den ba layarak 6 m'ye kadar ulaşabilir [57].



Şekil 4. 7 Elyaf Sarma Yöntemi Uygulanı ı [63]

Elyaf sarma yöntemi ile üretimde aşağıdaki adımlar izlenir:

- Kalıbın elyaf ile sarılmaya başlanması
- Mandrel ile sarılan kalıbın kullanılan reçinenin polimerizasyon derecesine ısıtılması
- Kürleme işlemi
- Soğutma işlemi
- Kalıptan ürünün çıkarılması

Elyafın kalıba sarılması esnasında fiberin tansiyonu iyi ayarlanmalıdır. Bu değer nihai ürünün mukavemet ve sertlik değerlerini etkileyebilir [57].

Hava taşıtları gibi yüksek performans uygulamalarında epoksi bazlı reçine sistemleri tercih edilmektedir. Silikonlar, fenolikler ve poliimidler özel yüksek sıcaklık uygulamalarında sınırlı kullanım alanına sahiptir. Termoset bir reçine olan epoksi reçineler elyaf sarma yönteminde sıklıkla kullanılmasına rağmen son yapılan araştırmalar termoplastik reçinelerin de kullanılmasına yönelik geliştirilmektedir [57].



Şekil 4. 8 Elyaf Sarma Yöntemi ile Üretilen Basınçlı Kap [64]

#### 4.7 Sac/Kitlesel Kalıplama Bileşiği (SMC/BMC)

Sac/Kitlesel Kalıplama için basınç altında dişi ve erkek olmak üzere iki kalıp parçası gereklidir. İndüklenmiş basınç sayesinde ham madde kalıp boşluklarına doldurulur. Bu yöntem sayesinde yüksek üretim miktarlarında iyi yüzey kalitesi ile boyutsal hassasiyet kazanılabilir [56].

Kalıplama yöntemi ile kısa fiberler kullanılarak termoplastik malzemeler ile de üretim yapılabilir. Ancak bu durumda sistem soğutulmalı veya oda sıcaklığının altında çalışma ortamı sağlanmalıdır [56].

Uygulama aşağıdaki adımlar izlenerek gerçekleştirilir:

- Uygun miktarda ham madde önceden ısıtılmış erkek kalıp üzerine yerleştirilir. Kullanılan; fiber ve dolguları içeren ham madde kesilmiş levha şeklinde ise SMC (*Sheet Moulding Compound*), kütle şeklinde ise BMC (*Bulk Moulding Compound*) olarak adlandırılır.
- Kalıp kapatılır. Malzemenin akışını ve tüm boşluklara dolmasını sağlayan bir basınç uygulanmalıdır (1-35 Mpa). Prosesin uygulanma sıcaklığı 130-160°C aralığında değişmektedir.
- Malzeme kürleme işlemi yapılır. Isı ile reçinenin ekzotermik reaksiyonu gerçekleştirilir.

Soğutma yapılarak ürün kalıptan çıkarılır [56].

### ALEV İLERLETMEYEN DOLGU MALZEMELER

İçinde bulunduğumuz 21. yüzyılda doğal ve sentetik polimerler sahip oldukları düşük yoğunluk ile kolay şekil alabilirlik özelliklerinden dolayı birçok farklı alanda kullanılabilmektedirler. Bu olumlu özelliklerinin aksine polimerler yüksek yanıcılık özellikleri olduğu için kullanım alanları kısıtlanmaktadır. Ancak alev ilerletmeme kabiliyeti kazandıkları takdirde polimerler birçok uygulamada kullanılmak için daha fazla tercih edilebilirler [65], [66].

Alev geciktiriciler; yapı inşaat, elektrik-elektronik komponentler, taşımacılık gibi sektörlerde büyük öneme sahiptir. Özellikle uzay endüstrisinde yeni gelişen malzemeler metallerin yerini almaya başlamıştır. Geliştirilen bu ileri teknoloji malzemelerden, düşük korozyon özelliği, iyi kırılma tokluğu, hafiflik gibi beklenen özellikler dışında yanma konusunda malzemenin gösterdiği direnç bu malzemenin diğer özelliklerinin önüne geçmekte ve malzeme seçiminde tercih sebebi olmaktadır [66].

Alev geciktiriciler polimer malzemeler ile birlikte kullanılarak, polimerlerin en büyük dezavantajlarından biri olan yanma davranışı bertaraf edilebilir. Bilimsel ve teknik literatür çalışmalar incelendiğinde polimerin doğal ve kimyasal yapısına göre alev geciktirici seçilebileceği ancak bu konuda alev geciktiricinin çevreye etkilerine dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Örneğin, halojen bazlı alev geciktirici malzemelerin çevreyi olumsuz etkilediği bilinmektedir [65].

Alev geciktirici malzemelerin geliştirilmek istenmesi ve önem kazanmasının başlıca sebepleri son kullanıcıların güvenlik konusunda bilinçlenmesi, çevresel etkiler ve uygulamaların daha çok evlerde kullanılması ile birlikte insana olan etkileri sayılabilir [66].

### 5.1 Yanma Teorisi

Yapılarında ihtiva ettikleri karbon ve hidrojenden dolayı polimerler yüksek yanıcılık özelliği gösterirler. Yanma reaksiyonları iki faktörden kaynaklanır. Bunlardan ilki yanıcı (redükleyici) ajanlar, ikincisi yakıcı (oksitleyici) ajanlardır. Yanma olayı genellikle havadaki oksijenden kaynaklanır. Yanma reaksiyonunu başlatan etki ise ısıdır, ısı artışı sayesinde polimer zincirinde yer alan bağlar birbirinden ayrılmaya başlarlar. Uçucu kısımlar sayesinde gaz çıkışı gerçekleşir ve bu gaz karışımı havaya salınır. Bu gaz karışımı yanma için gerekli aktivasyon enerjisini harekete geçirir. Ve alev oluşumu gerçekleşir [65].

Yanma mekanizması bir kaç reaksiyonu bünyesinde barındıran karmaşık bir prosestir. Katı içerisinde gaz ve ara fazların taşınması ile oluşur. Isınma sayesinde radyasyon, konveksiyon ve iletim gibi termal olaylar gerçekleşir. Bu proses aynı zamanda malzemelerin fermantasyon, oksidasyon gibi reaksiyonlarını içeren kimyasal bir prosestir. Polimerlerde, malzemenin fiziksel karakteristiği üzerinde alev başlaması için bir miktar enerji gereklidir. Örneğin, termoplastik yarı iletkenlerin ısınması sırasında polimerler yumuşar ve ergir. Polimerlerin bu esnada enerji depolaması polimer malzemenin kristallik derecesine, ısı tutma kapasitesine bağlıdır [65].

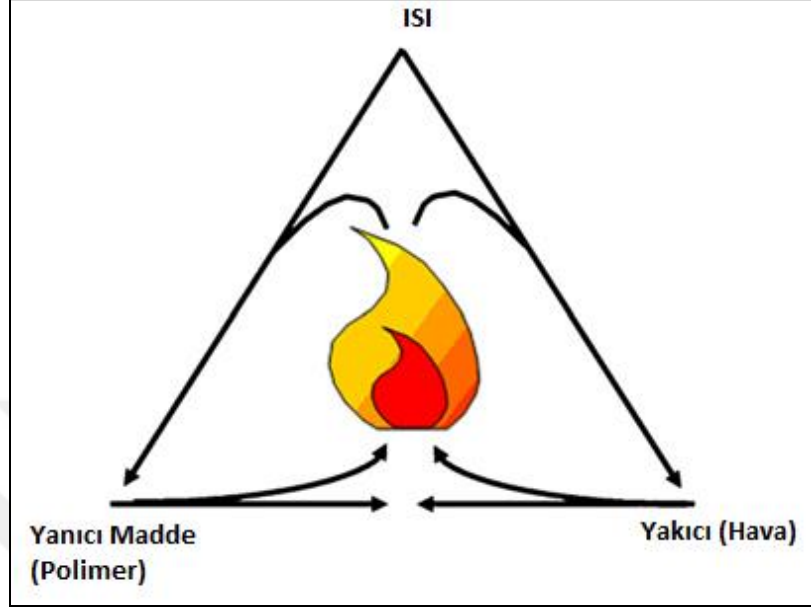
Polimerlerin termal dekompozisyonu (kovalent bağların ayrılması) enerji gerektiren endotermik bir reaksiyondur. Dekompozisyon mekanizması yapıdaki zayıf bağlara ve katı veya gaz fazdaki oksijen bulunup bulunmama durumuna bağlıdır. Genellikle, termal dekompozisyon ısı ve oksijenin birlikte etkilerinin bir sonucudur [65].

Polimerlerin bölünmesi bir kaç faktöre bağlanabilir. Oksijen atomlarının polimer zincirindeki durumu, katalistler atıklar, oksidasyon atıkları, polimer zincirdeki kimyasal hatalar, ve zincirdeki zayıf olan bağlar depolarizasyon üzerinde etkilidir [65].

Zincirlerin bölünmesi iki şekilde gerçekleşir:

-Serbest radikal grupların formasyonu şeklinde gerçekleşebilir.

-Hidrojen atomlarının yer değıştirmesi vebir tanesi aktif karbon-karbon çift bağlarına sahip iki stabil molekülün formasyonu şeklinde gerçekleşebilir [65].



Şekil 5. 1 Yanma Mekanizması [65]

Belirtilen bilgiler göz önüne alınarak alev geciktirme sistemlerinin fiziksel (koruyucu katmanların formasyonu gibi) ve kimyasal (gaz fazın reaksiyonları) olarak etki gösterebildiklerini söylemek mümkündür. Bu reaksiyonlar polimerlerde ısınma, piroliz, tutuşma ve termal bozunma gibi olaylarla birlikte gerçekleşirler [65].

## 5.2 Mineral Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri

Mineral bazlı alev geciktiriciler; genellikle inorganik dolgu maddeleri olup, inerttirler.

Aşağıda belirtildiği gibi polimerlerde bazı reaksiyonların gerçekleşmesini sağlarlar:

-Yanıcı ürünlerin hacmini/miktarını azaltırlar.

-Son malzemenin termal iletkenliğini ve termofiziksel özelliklerini modifiye ederler.

-Nihai malzemenin viskozitesi üzerinde değışikliğe sebebiyet verebilirler.

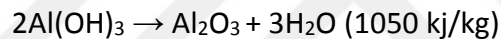
Sayılan bu etkiler polimer malzemelerin yanma davranışı üzerinde direkt olmasa bile dolaylı olarak etkili olurlar [65].

Bazı mineraller yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri davranışlardan ötürü alev geciktirici olarak tercih edilirler. En sık tercih edilen alev geciktirici mineraller metal hidroksitler (özellikle alüminyum ve magnezyum), hidrokarbonatlar ve boratlardır. Ayrıca bahsi geçen etkiler sayesinde bu inorganik dolgular, alev söndürme üzerinde direkt etkiye sahiptirler. Bu mineraller enerji absorbe ederler. Ayrıca H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> gibi salınımlar yaparak alev söndürmeye katkıda bulunurlar [65].

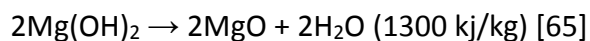
### 5.2.1 Metal Hidroksitler

Polimerlerde alev geciktirici olarak kullanılan metal hidroksitler; endotermik olarak ayrışmaya ihtiyaç duyarlar ve polimerlerin ayrışma sıcaklığında ortama su salınımı yaparlar. En fazla kullanılan alev geciktirici metal hidroksit mineraller alüminyum trihidroksit (ATH) ve magnezyum dihidroksit (MDH) mineralleridir [65].

Alüminyum trihidroksitin ayrışma sıcaklığı 180 ile 200°C civarındadır. Alüminyum hidroksitin su açığa çıkardığı parçalanma reaksiyonu aşağıdaki gibidir:



Magnezyum dihidroksit (Mg(OH)<sub>2</sub>) de alüminyum trihidroksit gibi endotermik reaksiyon göstererek yaklaşık olarak 300°C den yüksek sıcaklıklarda bozulmaya başlar. Magnezyum hidroksit için parçalanma ve su açığa çıkma reaksiyonu aşağıdaki gibi verilmiştir:



### 5.2.2 Hidroksikarbonatlar

Bütün karbonatlar yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub> salınımı yaparlar fakat sadece magnezyum ve kalsiyum karbonatlar 1000°C'nin altında salınım yaparlar. Hidroksikarbonatlar; geleneksel alev geciktiriciler içinde en az kullanım alanı bulan minerallerdir, metal hidroksitlere alternatif olarak kullanılabilirler. Doğal magnezyum karbonatlar ve sentetik magnezyum hidroksikarbonatlar yüksek sıcaklıklarda endotermik olarak parçalanıp H<sub>2</sub>O ve CO<sub>2</sub> salınımı yaparlar [65].

### 5.2.3 Boratlar

Boratlar, inorganik alev geciktirici ailesinin bir diğ er grubudur. Özellikle ç inko borat ( $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3,5H_2O$ ) bu grubun en bilinen mineralidir. Boratların termodinamik parçalanması 290 ile 450°C arasında gerç ekleş ir ve ortaya su, borik asit ve boron oksit ( $B_2O_3$ ) ç ıkar [65].

Polimerler oksijen atomları iç ermesine rağ men borik asit salınımı dehidrasyona sebep olur ve karbonize olmuş tabakalar ortaya ç ıkar. Bu tabakalar polimeri ısı ve oksijenden korur [65].

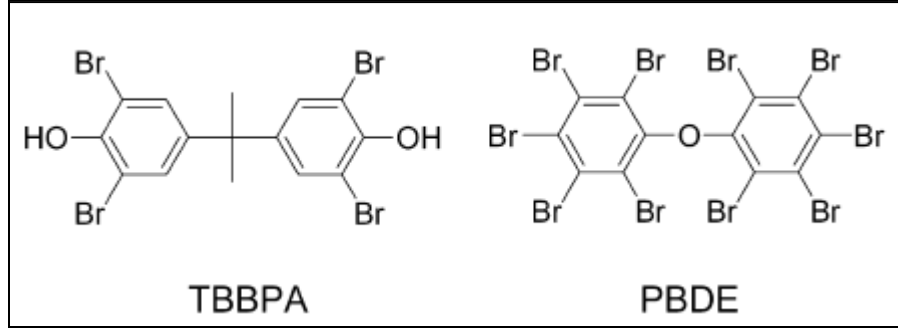
### 5.3 Halojen Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri

Halojen bazlı bileş iklerin özellikleri yapıda serbest kalmış halojenlerin türüne bağı lı olarak değı şir. Halojen atomu iç eren gruplar; yanma sırasında karbon-halojen oranı ve karbon-halojen bağı larındaki enerjiyi belirledikleri iç in önemlidir. Genel olarak, alifatik ve alisilik halojen bileş ikleri düşük karbon- halojen bağı enerjilerinden dolayı aromatik halojen bileş iklerinden daha efektifirler [67].

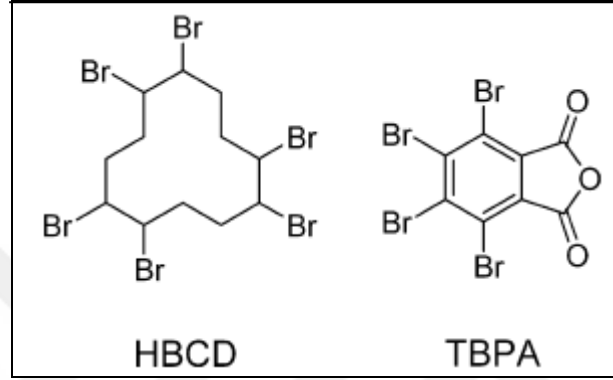
Halojenlerin alev geciktirme kabiliyeti halojen türüne göre farklılık gösterir. Florin ve iyodin bazlı bileş ikler alev geciktirici olarak tercih edilmezler. Florin bazlı bileş ikler termal olarak polimerlerden daha stabil oldukları iç in aynı sıcaklıkta halojen radikal grupları salınımı yapmazlar. İyodin bazlı bileş ikler ise polimerlerden daha az termal stabiliteye sahiptir. Bromin ve klorür bazlı bileş ikler; karbon atomlarının sahip olduğı düşük bağı enerjileri sayesinde alev geciktirici olarak kullanılırlar [65].

Tetrabromobisfenol (TBBPA) en fazla kullanılan halojen bazlı alev geciktiricidir. Özellikle epoksi reç ineler ile birlikte kullanıldıklarında iyi sonuçlar alınabilir. İkinci olarak sık kullanılan alev geciktirici polibromodifenilen eterdir (PBDE). Bu mineraller yapılarında bir difenil eter molekülüne bağı lanmış 10 bromür atomu ihtiva ederler [65].

Hegzabromosiklododesan (HBCD) halojen bazlı sikloalifatik bir alev geciktiricidir. Tetrabromoftalik anhidrit (TBPA) ise doymamış polyesterler ve üretim esnasında ham maddeler iç in kullanılabilircek halojen bazlı alev geciktiricilere örnek olarak verilebilir [65].



Şekil 5. 2 TBBPA ve PBDE yapısı [65]



Şekil 5. 3 HBCD ve TBPA yapıları [65]

#### 5.4 Silikon Bazlı Alev Geciktirici Dolgu Malzemeleri

Araştırmalara göre, az bir miktarda silikon bazlı bileşikler çeşitli polimer malzemelerin yapılarına eklendiklerinde alev geciktirme kabiliyetini büyük oranda artırmışlardır. Ayrıca silikon bazlı alev geciktiriciler çevreye zarar vermedikleri için çevre dostu olarak nitelendirilirler [66] .

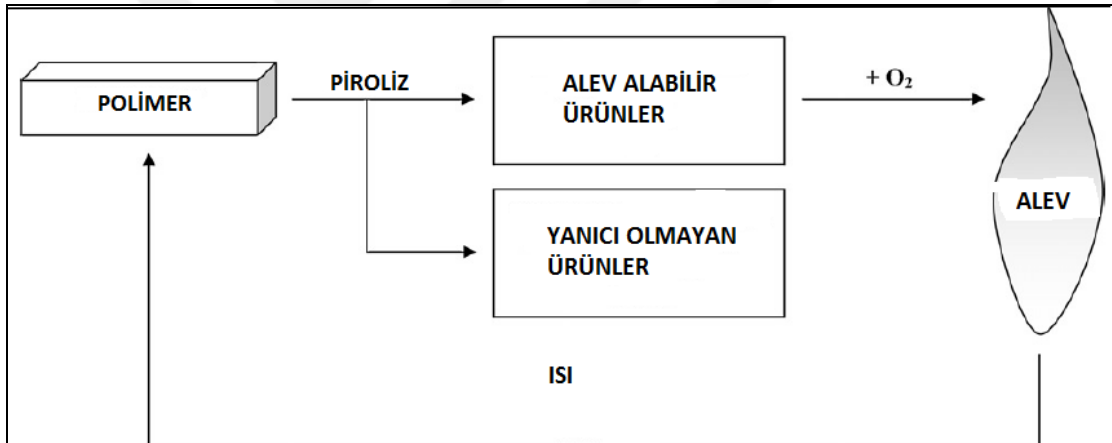
Silikon-oksijen bazlı polimerler dielektriksel olarak güçlü, termal stabiliteye sahip, düşük korozyon özellik gösteren polimer malzemelerdir. Silikon bazlı polimerlerin bir diğer önemli avantajları ise darbe mukavemetini mükemmel bir şekilde artırmalarıdır. Ayrıca geleneksel silikonların kullanılması sayesinde kalıplanabilirlik, proses edilebilirlik, elektriksel yalıtıcılık kazanılan özelliklerdendir [68].

Silikon bazlı alev geciktiricilere örnek olarak; silikatlar, düz zincirli silanlar, siloksanlar örnek verilebilir [68].

## 5.5 Alev İlerletmeme Test Metodları

Polimerlerin yanma davranışları; onların tutuşabilirlik, alev yayılma oranı ve ısı yayması gibi özelliklerine bakılarak karakterize edilebilir. Polimer malzemelerin hedeflenen uygulamalarına bağlı olarak alev ilerletmeme test metodlarının bir veya bir kaçını aynı anda yapılabilir. Endüstriyel uygulamalarda ve akademik çalışmalar için laboratuvarlarda; üretim veya ürün geliştirme aşamalarında küçük ölçekliden başlayarak orta boyutta veya büyük ölçekli alev söndürme testleri yapılabilir. Bunlardan en sık kullanılanları Limit Oksijen İndeksi Testi (LOI), UL-94 Testi ve Konik Kaloriölçer Testi olarak sıralanabilir [65].

Polimerler yeterli ısıya maruz kaldıkları zaman, piroliz olurlar ve yanıcı gaz salınımı yaparlar. Tutuşma gerçekleşir ve alev oluşur. Aşağıdaki şekilde polimerlerin yanma mekanizması gösterilmiştir [69].

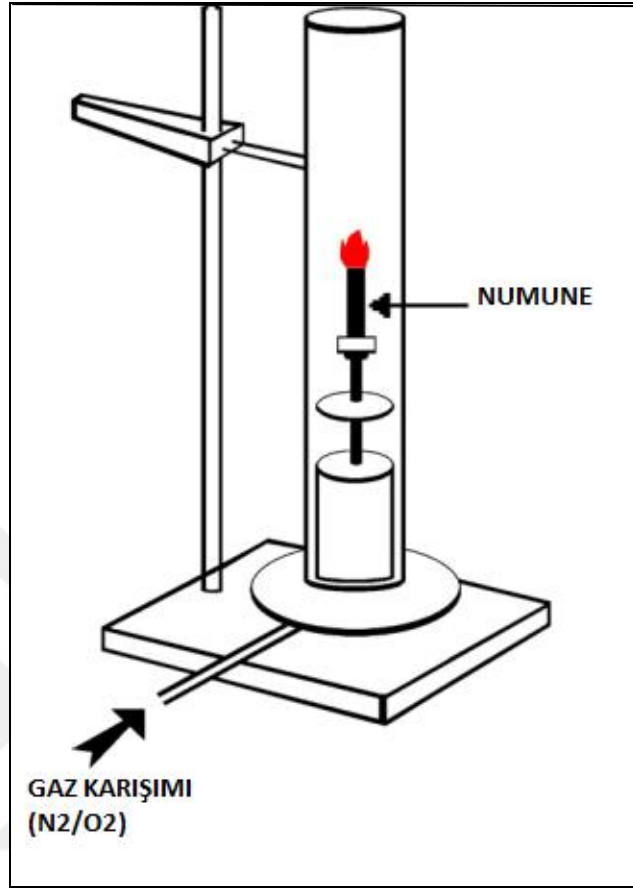


Şekil 5. 4 Polimerlerde Alev Oluşumu [69]

### 5.5.1 Limit Oksijen Testi (LOI)

Bu test metodu ilk olarak 1966'da Fenimore ve Martin tarafından ileri sürülmüş ve malzemelerin yanabilirliklerini göstermek için kullanılmaya başlanmıştır. Limit oksijen indeks testi Fransız standartlarında NF T 51-071, Amerikan standartlarında ASTM D 2863 olarak bilinirken Uluslararası standartlara göre ISO 4589 olarak tanımlanır. Limit oksijen indeksi, oksijen/nitrojen karışımındaki asgari oksijen konsantrasyonunun 5 cm uzunluğundaki bir numunenin 3 dakikalık dikey pozisyonda yanması sonucunda elde

edilmesinin bir ölçüsüdür. Bu indeks aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi bir düzenek ile uygulanır [65]:



Şekil 5. 5 LOI Testi Düzenegi [65]

ISO 4589 standartına göre, LOI testi  $80 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$  boyutundaki numunelerin cam fanus tarafından kapatılıp çevrelenmiş dikey bir düzenek içinde gerçekleştirilebileceğini belirtmektedir. Nitrojen (Azot) /Oksijen gaz karışımı düzenegin altında bir girişten verilir ve 30 saniye boyunca numune bir mum gibi yakılır. Hava %21 oranında oksijen içerdiği için %21 oranının altında bir değer veriyorsa malzeme yanabilir, üzerinde bir değere sahipse LOI testine göre malzemeye kendi kendini sönmüleyebilir denir. LOI değeri ne kadar yüksek çıkıyorsa malzeme o kadar iyi alev sönmüleme kabiliyetine sahiptir denebilir [65].

Aşağıdaki Çizelge 5. 1’de bazı polimer malzemelere ait LOI değerleri verilmiştir:

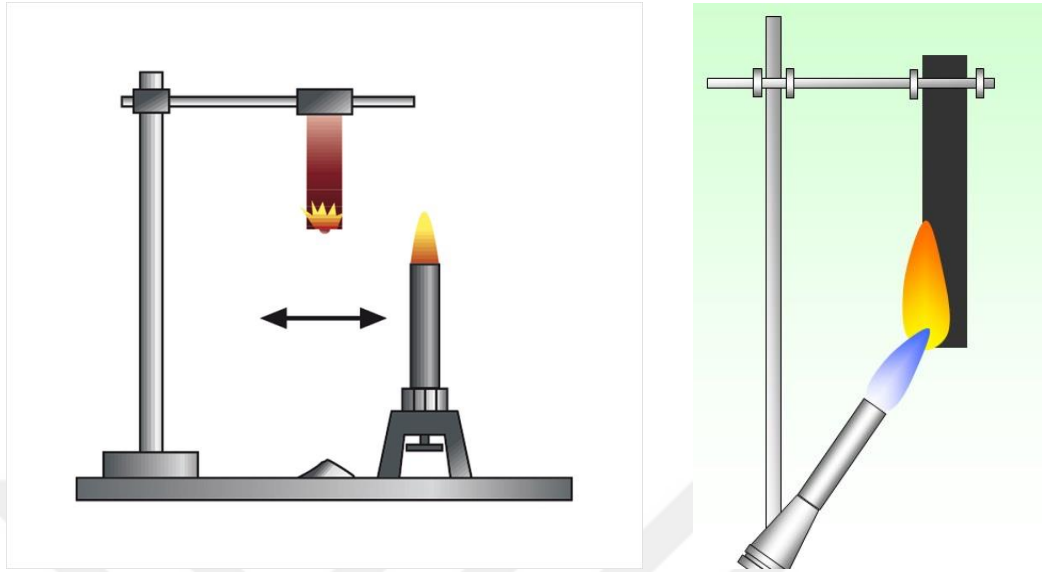
Çizelge 5. 1 Bazı Polimerlere Ait LOI Değerleri [65]

| Polimer Malzeme Adı | Tutuşma Sıcaklığı<br>(°C) | LOI Değeri |
|---------------------|---------------------------|------------|
| Polietilen          | 340                       | 18         |
| Polipropilen        | 320                       | 18         |
| Polistiren          | 350                       | 18         |
| Polivinilklorür     | 390                       | 42         |
| Politetrafloetilen  | 560                       | 95         |
| ABS                 | 390                       | 19         |
| Polimetilmetakrilat | 300                       | 18         |
| Poliakrilonitril    | 480                       | 27         |
| Poliamid 6          | 420                       | 25         |
| Poliamid 66         | 490                       | 24         |

### 5.5.2 UL 94

UL 94 Testi sigortacılar anlamına gelen ‘Underwriters’ ve ‘Laboratories’ kelimelerinin baş harflerinden oluşan, elektronik cihazlar ve bazı aygıtların plastik malzemeden oluşan kısımlarının yanmazlık kabiliyetini ölçmek için geliştirilen bir test metodudur. UL 94 test metodu küçük ve büyük boyutta dikey testler, kütle halindeki veya köpük malzemelerin yatay testleri ve radyant (ışınım yapan) panellerin alev yayma davranışlarının belirlenmesi için kullanılabilir. UL-94 V (dikey) testi kütle halinde malzemelerin tutuşabilirlik ve alev yayma özelliğini belirlemek için daha sık kullanılır. Bu dikey yanma testi uluslararası standartlarda IEC 60695-11-10 olarak belirlenmiştir [65].

UL 94 V testi ile V-0, V-1 ve V-2 olmak üzere üç ayrı sınıfta malzemeler incelenebilir. Bu test düzeneği Şekil 5. 6'da verilmiştir.



Şekil 5. 6 UL 94 V Test Düzeneği [70]

Deney düzeneğinde görüldüğü gibi alev numunenin alt kısmından uygulanır. Alev kaynağı numuneye ilk olarak 10 saniye uygulanır ve geri çekilir. Alev çekildikten sonra numunenin sönme süresi  $t_1$  olarak not edilir. Aynı uygulama tekrar yapılarak  $t_2$  ve  $t_3$  süreleri de not edilir. Uygulama boyunca alev hızı, numunenin alev kaynağına ve düzeneğe yere yakınlığı gibi parametreler sabit olmalıdır. Deney esnasında numunenin yanarak parçalanıp düşme ihtimaline karşı yere koton yerleştirilmesi gereklidir. Standartlara göre hazırlanıp testleri yapılan 5 adet numune sonucunun ortalaması alınarak sonuçlar not edilir [65].

### 5.5.3 Konik Kaloriölçer Testi

Konik kaloriölçer testi orta boyutta polimer numuneler için en etkili alev söndürme kabiliyeti ölçme testidir. Konik kaloriölçer testi; numunenin oksijen konsantrasyonu, gaz akışı, CO ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonları değerlerini ölçer. Amerikan Standartlarına göre ASTM E 1354, uluslararası standartlara göre ISO 5660 olarak belirlenmiştir. Bu test için kullanılan numuneler; 100x100x4 mm<sup>3</sup> boyutlarında hazırlanmalıdır [65].

Şekil 5. 7'de konik kalorimetre cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5. 7 Konik Kalorimetre Test Cihazı [71]

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 6.1 Kullanılan Malzemeler, Cihazlar ve Yardımcı Gereçler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak bisfenol-A epoksi bazlı, orta-yüksek reaktiviteli vinil ester bir reçine olan POLİVES™ 701 kullanılmıştır. Yüksek ısı dayanımı ve yüksek korozyon direncine sahip bu reçinenin yoğunluğu  $1,044 \text{ g/cm}^3$  olmakla birlikte, çekme mukavemeti 80 Mpa değerindedir. Reçine vinilester reçine olduğundan dolayı sertleştirici olarak metil etil keton peroksit Akperox A1 ve reçineyi aktifleştirmek için kobalt naftalat kullanılmıştır.

Takviye malzemesi olarak 12K-600 gsm 2x2 plain dokuma CM CT 600 karbon elyaf kullanılmıştır. Karbon elyaf dokumada kullanılan fiberler 4900 Mpa çekme dayanımı ve 240 Gpa elastisite modülü değerlerine sahiptir.

Deneyler kapsamında kullanılan seramik tozlar; antimon trioksit ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ )-(AT), sodyum borat ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )-(SB) ve çinko borat ( $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ )-(ZB) tozlarıdır. Bu seramik tozlar deneylerde %3 ve %10 olmak üzere iki farklı konsantrasyonda kullanılmışlardır.

Seçilen üretim yöntemi vakum infüzyon yöntemi olduğu için deneyler sırasında vakum infüzyon sarf malzemeleri kullanılmıştır. Kalıp ayırıcı olarak sıvı kalıp ayırıcı, soyma kumaşı (peel ply), reçine akış filesi (flow mesh), spiral reçine hortumu, vakum bağlantı elemanları, vakum sızdırmazlık macunu ve vakum naylonu kullanılmıştır. Ek olarak, sistemi vakum altına almak için vakum motoru ve vakum tankı ve kürleşme işlemleri için fırın kullanılmıştır.

## 6.2 Deneysel Yöntem

Mevcut tez çalışması kapsamında; polimer matris ile karbon elyaf takviyesi kullanılarak vakum infüzyon yöntemiyle kompozit yapılar üretilmiştir. Bu yapılarda kullanılan matris içerisine %3 ve %10 oranlarında AT, SB ve ZB seramik tozları eklenerek matris karışımı matkap yardımı ile 3100 devir/dakika karıştırılmış ve bu katkıların yapıya etkileri incelenmek istenmiştir.

### 6.2.1 Fiber Takviyesiz Numunelerin Üretimi

Deneysel çalışmalar kapsamında kullanılan karbon fiber dokumanın deney sonuçlarına etkisini incelemek amacıyla deneylerin başlangıcında fiber ihtiva etmeyen numunelerin üretilmesi kararlaştırılmıştır. Kullanılacak seramik katkı malzemelerinin etkisini de görmek için öncelikle yalnızca matris bileşeninden oluşan bir adet numune üretilmiş ve ardından kullanılan üç seramik tozun her birinin iki ayrı konsantrasyonunu içeren altı adet numune üretilmiştir. Şekil 6. 1’de antimon trioksit ilavesi ile üretilen matris gösterilmiştir.



Şekil 6. 1 Matris İçerisine Antimon Trioksit İlavesi

Deneylerin ilk aşamasında kalıba dökülecek reçine terazide tartılmış ve reçine miktarının %3’ü ile %10’u oranında antimon trioksit tartılan reçinelere ilave edilmiştir. Kobalt naftalat ve metil etil keton peroksit ilavesi de yapılan reçine, önceden sıvı kalıp ayırıcının uygulandığı kalıplara dökülmüş ve kürleşmeye bırakılmıştır (Şekil 6. 1).

Sodyum borat tozunu %3 ve %10 oranında içeren vinil ester reçineler hazırlanmış ve sıvı kalıp ayırıcı sürülmüş kalıplara dökülmüştür ve Şekil 6. 2’de bu numuneler gösterilmiştir.



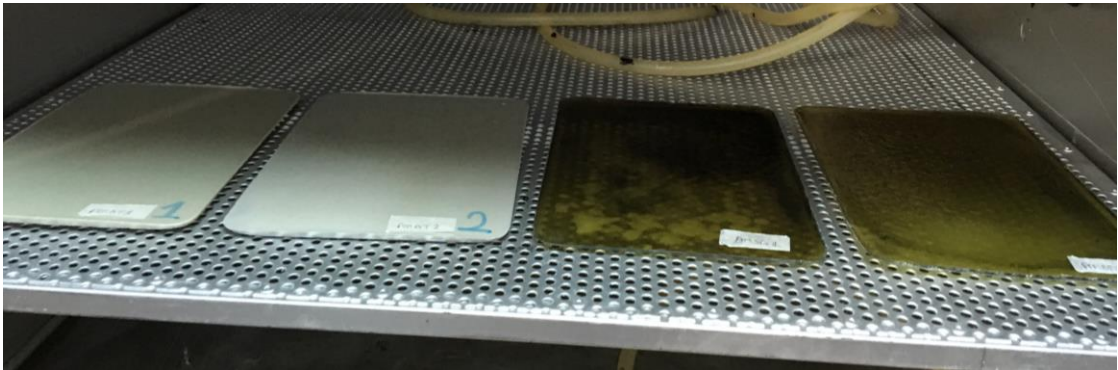
Şekil 6. 2 Matris İçerisine Sodyum Borat İlavesi

Son olarak çinko borat tozunun %3 ve %10 konsantrasyonunu içeren vinil ester reçineler hazırlanarak sıvı kalıp ayırıcının uygulandığı kalıplara dökülmüştür ve Şekil 6. 3'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 3 Matris İçerisine Çinko Borat İlavesi

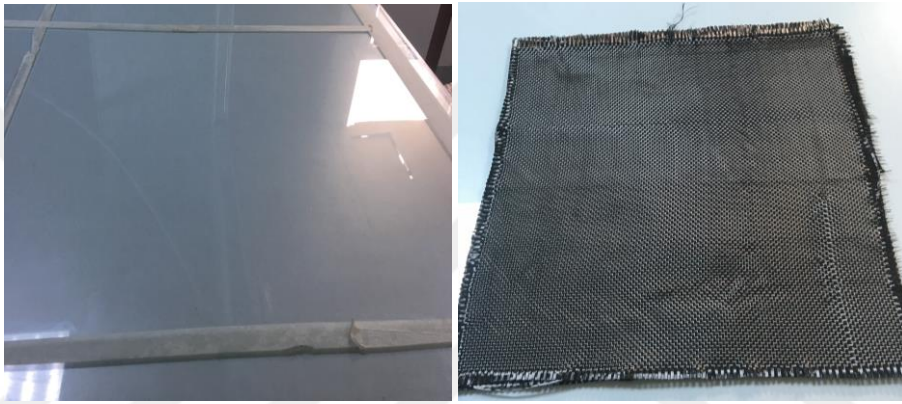
Kürleşme işlemi sonrası kalıptan çıkarılan numuneler kürleşme sonrası işlemi için fırına alınmıştır. Fırında 80°C'de 4 saat ileri kür işlemi uygulanan numuneler; sonrasında yapılacak testler için numune hazırlanma kriterlerine göre hazırlanmıştır. Şekil 6. 4'de numunelerin fırında kür işlemi gösterilmiştir.



Şekil 6. 4 Seramik Toz İlaveli Numunelerin Fırında İleri Kürleme İşlemi

### 6.2.2 Fiber Takviyeli Numunelerin Üretimi

Deney sonuçlarına seramik katkıların etkisini incelemek adına bu grupta ilk üretilen numune polimer matris içeren karbon elyaf takviyeli numune olmuştur. Numunelerin üretimi için cam levha kalıp olarak kullanılmıştır. İlk olarak cam levha üzerinde çalışılacak alan maskeleme bandı ile çevrelenmiş ve belirlenmiştir. Üretim yapılacak alana 15'er dakika ara ile sıvı kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Sıvı kalıp ayırıcı uygulanmasının ardından kullanılacak karbon fiber dokuma kumaşlar 400mmx400mm olacak şekilde kesilip hazırlanmıştır. Hazırlanan kumaşlar kalıp üzerine Şekil 6. 5'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 6. 5 Kalıba Karbon Kumaşın Yerleştirilmesi

Deneysel çalışmalar kapsamında tercih edilen vakum infüzyon yöntemine göre karbon kumaşın üzerine sırasıyla soyma kumaşı (peel ply), reçine akış filesi (flow mesh) Şekil 6. 6'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir.



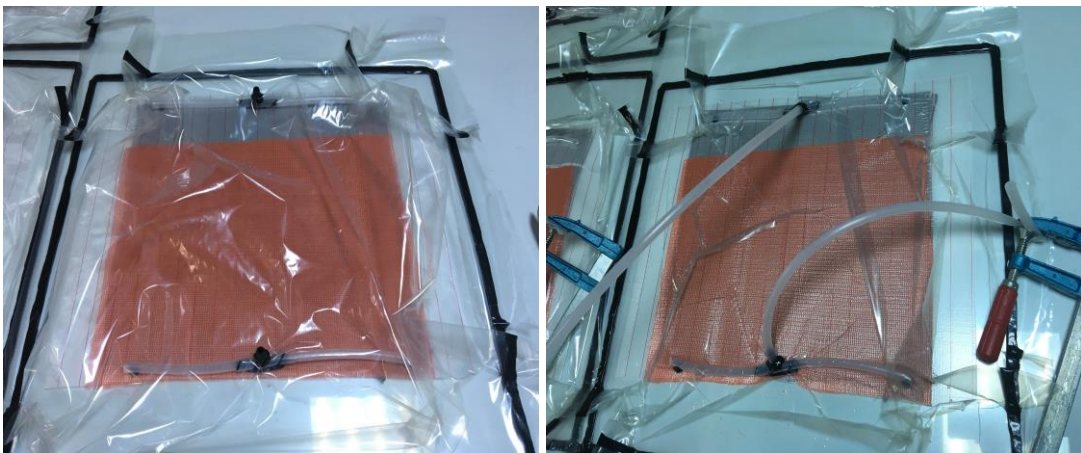
Şekil 6. 6 Soyma Kumaşı ve Akış Filesini Yerleştirilmesi

Reçine akış filesinin reçine verilecek kısmına, reçinenin yayılarak ilerlemesini sağlayan spiral reçine hortumu ve karşısına reçinenin sistemden tahliye edilmesine yardımcı olacak spiral reçine hortumları sabitlenmiştir. Spiral reçine hortumlarına reçine giriş çıkışını yapacak reçine hortumlarının bağlanabilmesi için t bağlantı elemanları Şekil 6. 7’de gösterildiği gibi bağlanmıştır.



Şekil 6. 7 Spiral Reçine Hortumları ve Bağlantı Elemanlarının Sabitlenmesi

Spiral reçine hortumları da sabitlendikten sonra sistemin etrafı vakum sızdırmazlık macunu ile çevrelenmiştir. Vakum sızdırmazlık macunu üzerine vakum naylonu kapatılarak sistem içindeki hava vakum motoru yardımı ile tahliye edilmiştir. İçerisindeki hava alınmış sisteme, hazırlanan reçine Şekil 6. 8’de görüldüğü gibi ilave edilmiştir.

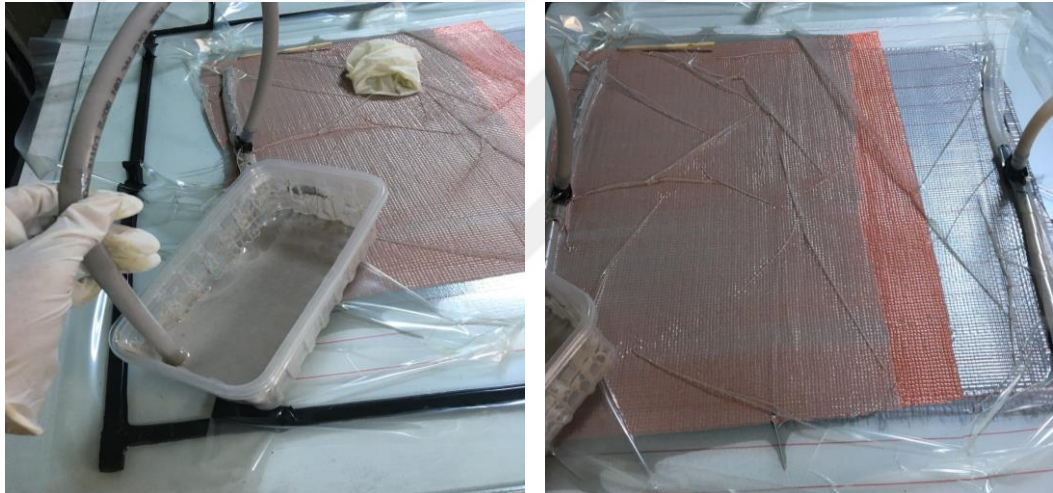


Şekil 6. 8 Sistemin Vakum Altına Alınması

Aynı işlemler sırasıyla; farklı konsantrasyonlarda antimon trioksit, sodyum borat ve çinko borat ilaveleri ile Şekil 6. 9 ve Şekil 6. 10'da görüldüğü gibi tekrarlanmıştır.



Şekil 6. 9 Sodyum Borat Katkılı Reçinenin Sisteme Verilmesi



Şekil 6. 10 Antimon Trioksit Katkılı Reçinenin Sisteme Verilmesi

### 6.2.3 Karakterizasyon İşlemleri için Numune Hazırlanması

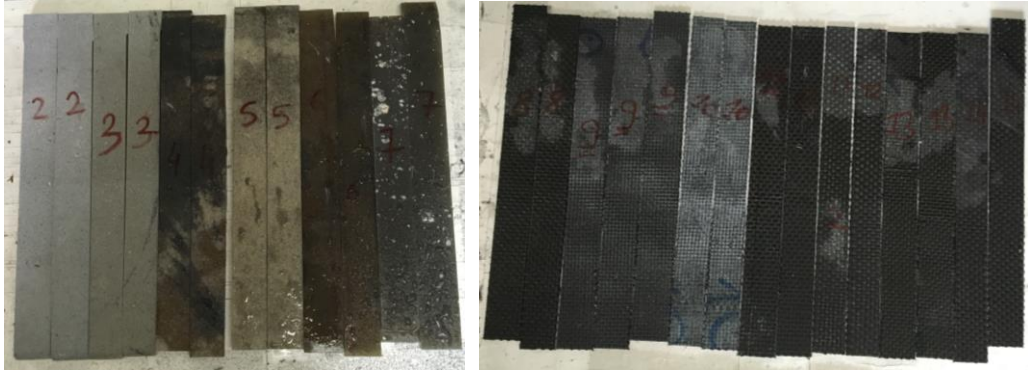
Üretimi tamamlanan fiber takviyesiz ve fiber takviyeli olmak üzere iki grup numune karakterizasyon işlemleri için hazır duruma gelmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen numunelerin isimlendirilmesi ve numaralandırılması aşağıdaki Çizelge 6. 1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Deney Numunelerinin Adlandırılması

| Numune No | Numune Adı          | Numune No | Numune Adı                              |
|-----------|---------------------|-----------|-----------------------------------------|
| 1         | PM (polimer matris) | 8         | PMCF (karbon fiber takviyeli numuneler) |
| 2         | PMAT1               | 9         | PMCFAT1                                 |
| 3         | PMAT2               | 10        | PMCFAT2                                 |
| 4         | PMSB1               | 11        | PMCFSB1                                 |
| 5         | PMSB2               | 12        | PMCFSB2                                 |
| 6         | PMZB1               | 13        | PMCFZB1                                 |
| 7         | PMZB2               | 14        | PMCFZB2                                 |

Deneyssel çalışmalar kapsamında numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için Çekme Testi, Darbe Testi ve Barcol Sertlik Testi yapılmıştır. Numunelerin alev söndürme kabiliyetlerinin incelenmesi için ise UL 94 standartlarına göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler yapılırken her numune için 3 ayrı test yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalamaları deney sonucu tablolarında gösterilmiştir.

Numuneler çekme testleri için Şekil 6. 11’de görüldüğü gibi TS EN ISO 527-4 standardına göre hazırlanmış ve Şekil 6. 12’de gösterilen INSTRON marka 3369 model ‘50 kN Elektromekanik Çekme Eğme Basma Test Cihazı’nda test edilmiştir.



a)

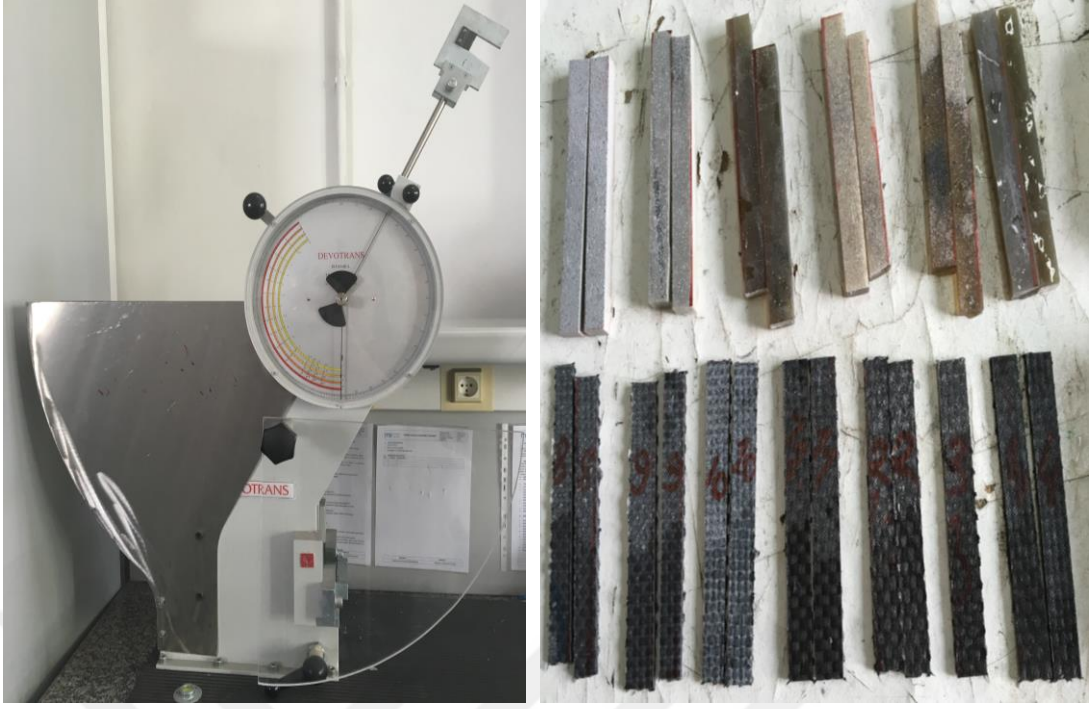
b)

Şekil 6. 11 Çekme Testi için Hazırlanan a) Fiber Takviyesiz b)Fiber Takviyeli Numuneler



Şekil 6. 12 Çekme Testi Cihazı

Numunelerin Darbe Testleri Şekil 6. 13’de görülen 6 joule çekiç takılı Charpy Darbe Cihazı’nda TS EN ISO 179-1 Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini standartlarına göre tamamlanmıştır.

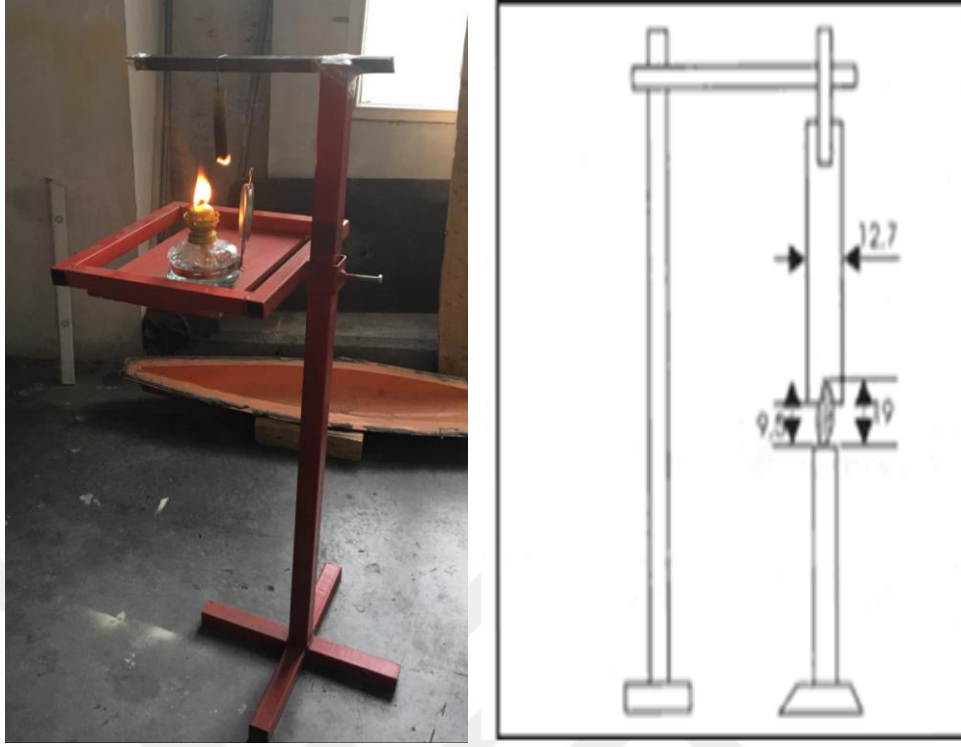


Şekil 6. 13 Charpy Darbe Cihazı ve Test Numuneleri

Numunelerin Sertlik Ölçümleri ise Barcol Sertlik Cihazı'nda Şekil 6. 14'de gösterildiği üzere gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. 14 Barcol Sertlik Cihazı ve Sertlik Ölçümü



Şekil 6. 15 UL 94 Standardına göre Hazırlanan Yanma Testi Düzeneği

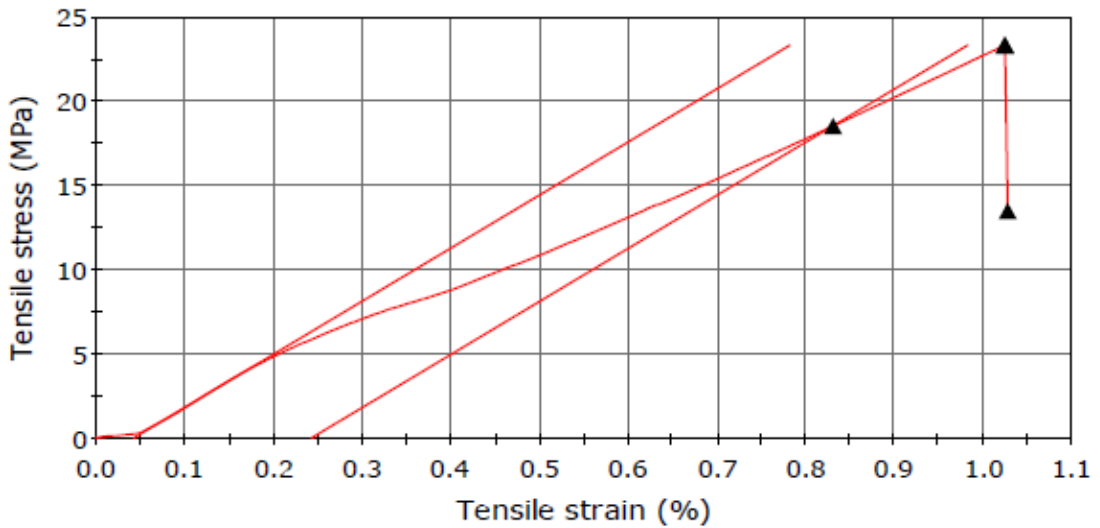
Numunelerin alev söndürme kabiliyetlerini tespit etmek amacı ile UL 94 standartlarına göre şekil 6. 15’de görüldüğü gibi laboratuvar ortamında bir düzenek oluşturulmuş ve numuneler bu düzenekte teste tabi tutulmuştur.

### 6.3 Deneysel Sonuçlar

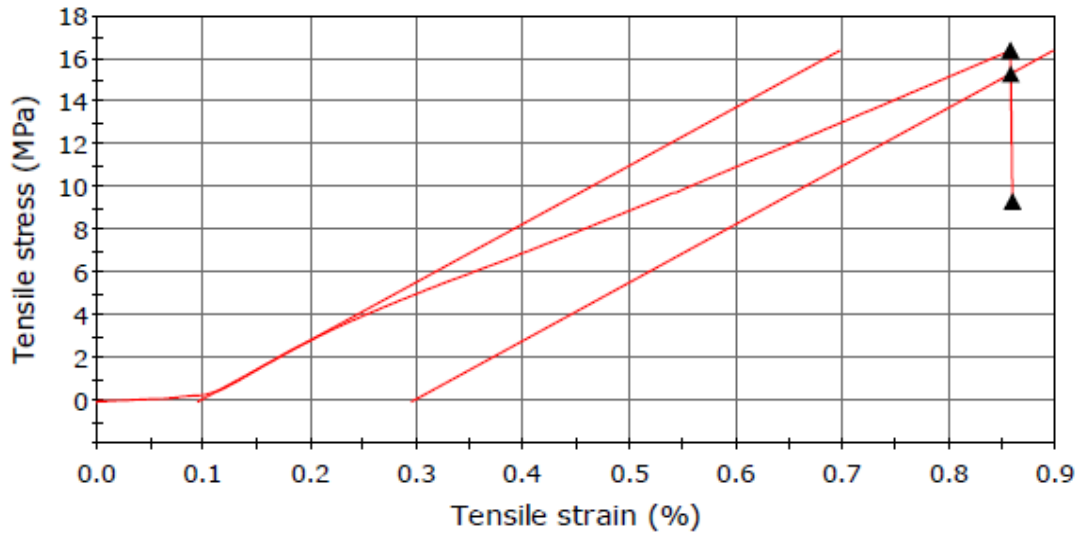
Tez çalışması kapsamında, farklı seramik katkıların elyaf fiber takviyeli ve fiber takviyesiz deney grupları üzerinde etkileri incelenmek istenmiş bu doğrultuda seramik katkılar içeren 7 adet fiber takviyeli ve 7 adet fiber takviyesiz olmak üzere toplamda 14 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretilen 14 adet numunenin her biri için 3'er adet deney numunesi hazırlanarak teste tabi tutulmuştur. Üretimi tamamlanan numunelere mekanik testler ve numunelerin alev sönmüleme kabiliyetlerini ölçmek için yanma testi uygulanmıştır.

#### 6.3.1 Çekme Testi Sonuçları

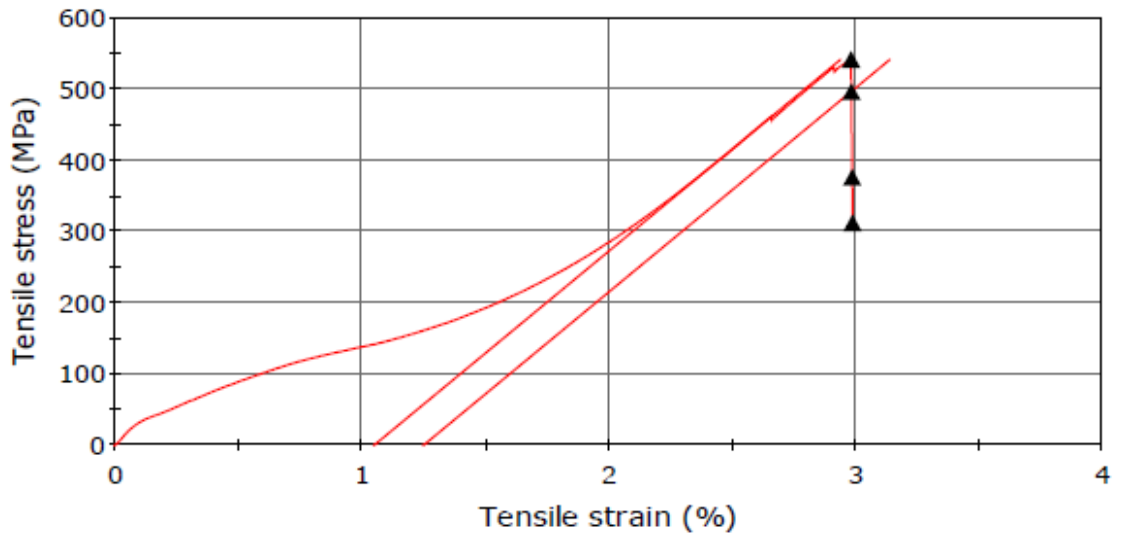
Çekme testi yapılırken programdan elde edilecek Gerilme-Gerinim diyagramlarında düşey eksen çekme mukavemetini Mpa cinsinden, yatay eksen ise kopma uzaması değerlerini % olarak göstermektedir. Bu doğrultuda 14 adet numune için programdan Gerilme-Gerinim diyagramları elde edilmiştir. Şekil 6. 16'da PMAT1 adlı numuneye ait diyagram, Şekil 6.17'de PMAT2 numunesine ait diyagram ve Şekil 6. 18'de PMCFAT2 adlı numuneye ait Gerilme-Gerinim diyagramları gösterilmektedir.



Şekil 6. 16 PMAT1 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı



Şekil 6. 17 PMAT2 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı



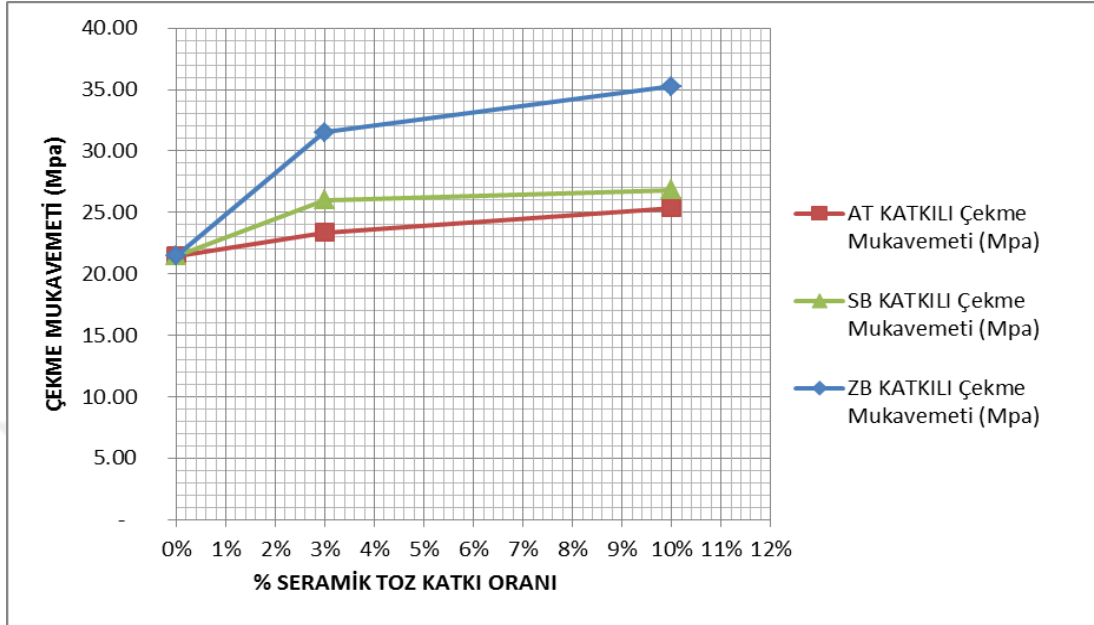
Şekil 6. 18 PMCFAT2 Adlı Numuneye ait Gerilme-Gerinim Diyagramı

Çekme testi için kullanılan numunelerin genişlik, kalınlık gibi ölçülen değerleri ve çekme testi sonucu ölçülen çekme mukavemeti değerleri Çizelge 6. 2’de verilmiştir.

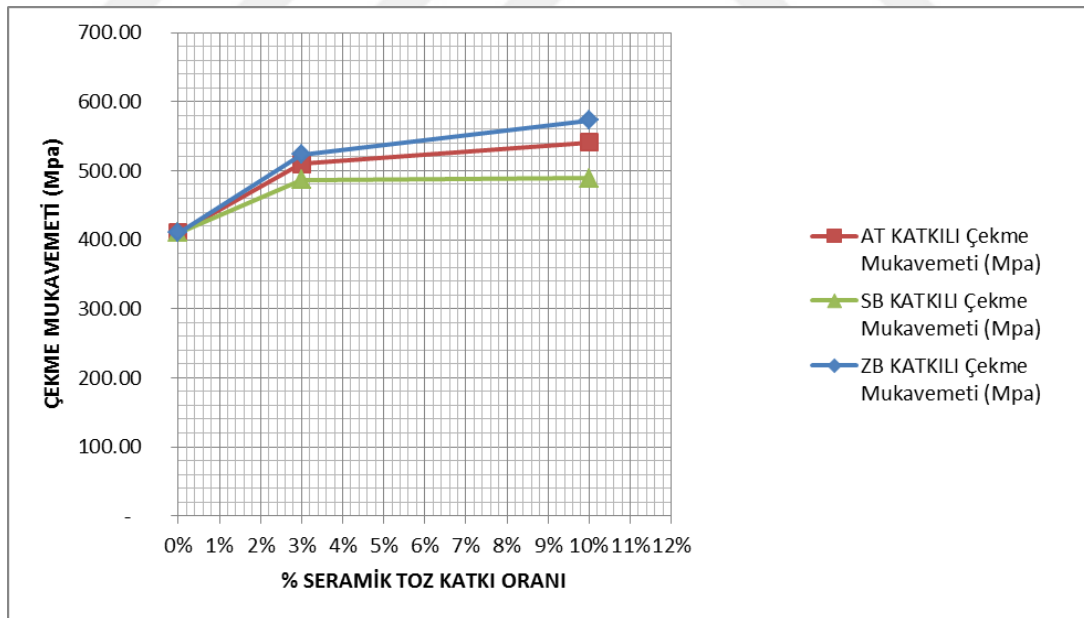
Çizelge 6. 2 Çekme Testi Uygulanan Numune Özellikleri

| Numune No | Numune Adı | Genişlik (mm) | Kalınlık (mm) | Çekme Mukavemeti (Mpa) | Yük (N)   |
|-----------|------------|---------------|---------------|------------------------|-----------|
| 1         | PM         | 23,54         | 5,84          | 21,468                 | 3104,569  |
| 2         | PMAT1      | 25,15         | 6,75          | 23,342                 | 3510,625  |
| 3         | PMAT2      | 23,45         | 6,70          | 25,369                 | 2540,729  |
| 4         | PMSB1      | 23,55         | 5,09          | 26,015                 | 3233,660  |
| 5         | PMSB2      | 23,99         | 5,63          | 26,808                 | 3512,279  |
| 6         | PMZB1      | 25,46         | 5,67          | 31,529                 | 3953,330  |
| 7         | PMZB2      | 25,88         | 6,91          | 35,245                 | 3545,469  |
| 8         | PMCF       | 24,91         | 1,71          | 409,791                | 18416,132 |
| 9         | PMCFAT1    | 26,17         | 1,88          | 509,500                | 23128,470 |
| 10        | PMCFAT2    | 24,25         | 1,87          | 541,166                | 24136,908 |
| 11        | PMCFSB1    | 26,16         | 2,02          | 486,471                | 25014,373 |
| 12        | PMCFSB2    | 22,65         | 1,81          | 489,086                | 20676,219 |
| 13        | PMCFZB1    | 26,30         | 2,05          | 523,645                | 25818,654 |
| 14        | PMCFZB2    | 25,34         | 1,82          | 572,785                | 26383,143 |

Çekme testi uygulanan numunelerin içerdği seramik toz miktarı ve çeşidine göre çekme mukavemetlerinde meydana gelen değişimler Şekil 6. 19'da ve Şekil 6. 20'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 19 Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Çekme Mukavemeti Değişimi



Şekil 6. 20 Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Çekme Mukavemeti Değişimi

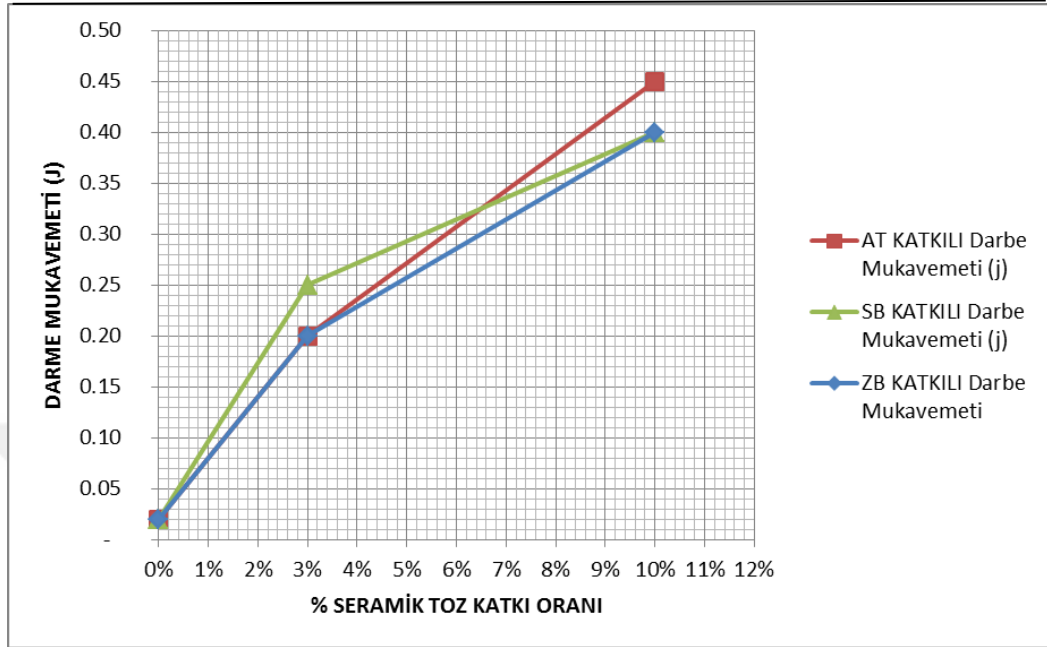
### 6.3.2 Darbe Testi Sonuçları

Darbe Testleri 6 joule çekiç takılı olan Charpy Darbe Testi cihazında tamamlanarak deney sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 6. 3’de verilmiştir.

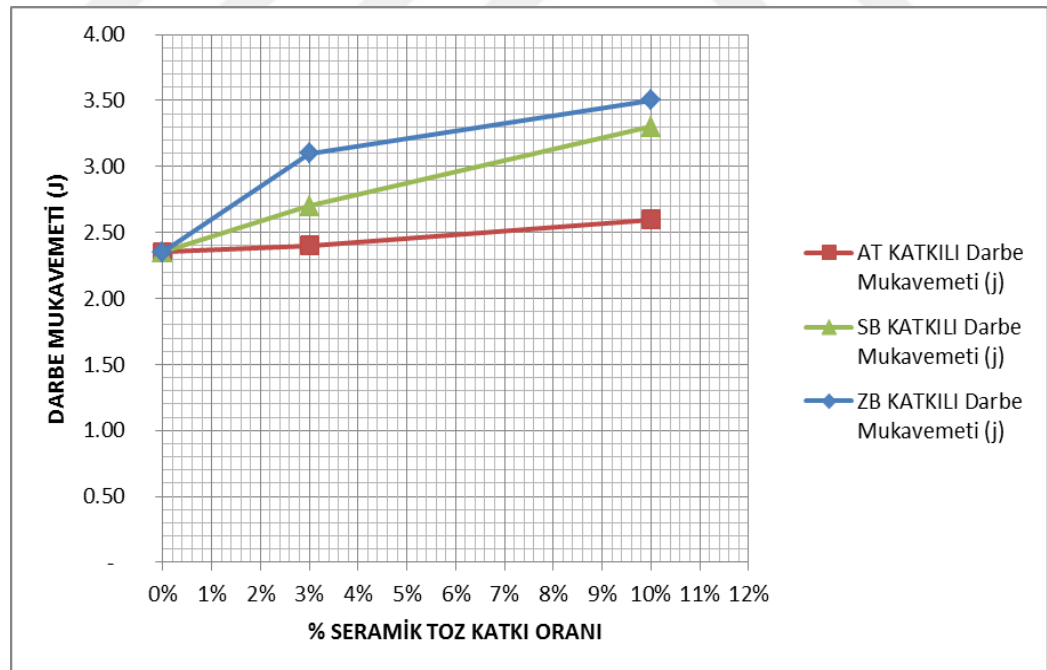
Çizelge 6. 3 Darbe Testi Numune Boyutları ve Test Sonuçları

| Numune No | Numune Adı | Genişlik (mm) | Kalınlık (mm) | Darbe Mukavemeti (j) |
|-----------|------------|---------------|---------------|----------------------|
| 1         | PM         | 9,56          | 5,87          | 0,02                 |
| 2         | PMAT1      | 9,15          | 6,35          | 0,20                 |
| 3         | PMAT2      | 9,52          | 6,15          | 0,45                 |
| 4         | PMSB1      | 10,56         | 5,74          | 0,25                 |
| 5         | PMSB2      | 9,52          | 6,68          | 0,40                 |
| 6         | PMZB1      | 9,71          | 5,18          | 0,20                 |
| 7         | PMZB2      | 9,52          | 6,25          | 0,40                 |
| 8         | PMCF       | 9,22          | 1,77          | 2,35                 |
| 9         | PMCFAT1    | 9,84          | 1,85          | 2,40                 |
| 10        | PMCFAT2    | 9,53          | 1,85          | 2,60                 |
| 11        | PMCFSB1    | 10,37         | 1,94          | 2,70                 |
| 12        | PMCFSB2    | 9,97          | 1,71          | 3,30                 |
| 13        | PMCFZB1    | 11,34         | 1,81          | 3,10                 |
| 14        | PMCFZB2    | 10,62         | 1,82          | 3,50                 |

Darbe testi uygulanan numunelerin içerdği seramik toz miktarı ve çeşidine göre darbe mukavemetlerinde meydana gelen değişimler Şekil 6. 21'da ve Şekil 6. 22'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 21 Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Darbe Mukavemeti Değişimi



Şekil 6. 22 Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Darbe Mukavemeti Değişimi

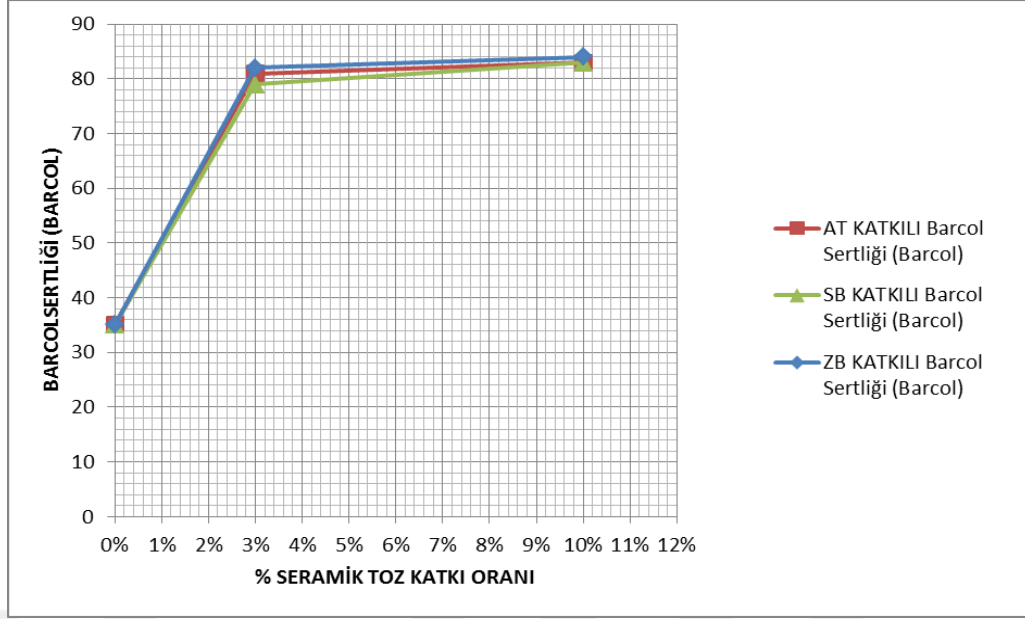
### 6.3.3 Barcol Sertlik Deneyi Sonuçları

Barcol Sertlik Cihazı'nda ölçülen sertlik değerleri Çizelge 6. 4'de verilmiştir. Barcol Sertlik Ölçümleri ASTM D2583 standartları ile belirlenir.

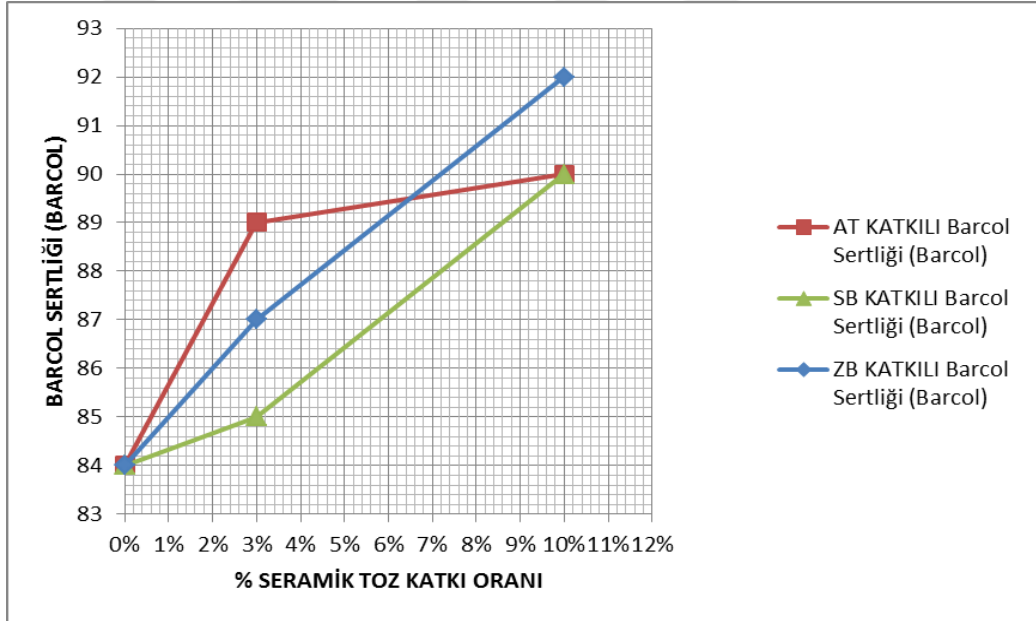
Çizelge 6. 4 Barcol Sertlik Deneyi Sonuçları

| Numune No | Numune Adı | Barcol Sertliği (Barcol) | Numune No | Numune Adı | Barcol Sertliği (Barcol) |
|-----------|------------|--------------------------|-----------|------------|--------------------------|
| 1         | PM         | 35                       | 8         | PMCF       | 84                       |
| 2         | PMAT1      | 81                       | 9         | PMCFAT1    | 89                       |
| 3         | PMAT2      | 83                       | 10        | PMCFAT2    | 90                       |
| 4         | PMSB1      | 79                       | 11        | PMCFSB1    | 85                       |
| 5         | PMSB2      | 83                       | 12        | PMCFSB2    | 90                       |
| 6         | PMZB1      | 82                       | 13        | PMCFZB1    | 87                       |
| 7         | PMZB2      | 84                       | 14        | PMCFZB2    | 92                       |

Barcol sertlik testi uygulanan numunelerin içerdiği seramik toz miktarı ve çeşidine göre sertlik değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 6. 23'da ve Şekil 6. 24'de gösterilmiştir.



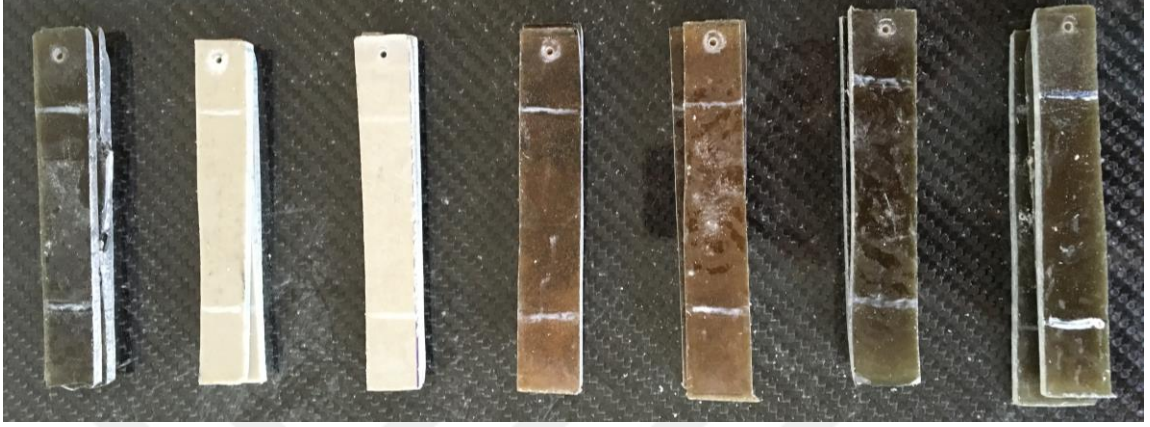
Şekil 6. 23 Karbon Fiber Takviyesiz Numunelerin Barcol Sertliği Değişimi



Şekil 6. 24 Karbon Fiber Takviyeli Numunelerin Barcol Sertliği Değişimi

#### 6.3.4 Yanma Testi Sonuçları

Numunelerin yanma testlerini yapabilmek için Şekil 6. 25’de görüldüğü gibi UL 94 standartlarına göre numuneler hazırlanmış ve bu numuneler laboratuvar ortamında hazırlanan düzenekte yanma testlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 6. 25 Yanma Testi Numuneleri

Şekil 6. 26, Şekil 6. 27 ve Şekil 6. 28’de ise yanma testine tabi tutulan numunelerin tutuşması ve kendi kendini sönmemesi sonucu durumları verilmiştir.



a) PMAT1

b) PMAT2

Şekil 6.26 Antimon Trioksit Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu



a) PMSB1

b) PMSB2

Şekil 6.27 Sodyum Borat Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu



a) PMZB1

b) PMZB2

Şekil 6.28 Çinko Borat Katkılı Numunelerin Yanma Sonrası Durumu

Yanma deneyleri yapılırken UL 94 standartlarında olduğu gibi numuneler ilk olarak 10 saniye alev maruz bırakılıp daha sonra alev kaynağı uzaklaştırılmıştır. İlk 10 saniye sonrasında numunenin kendi kendini sönmüleme süresi  $t_1$  olarak ölçülür. Ancak bütün numunelerde yapılan deneylerde ilk 10 saniyede numunelerin tutuşmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle tüm numuneler için  $t_1 = 0$  ölçülmüştür. UL 94 standardına göre aynı numuneler ikinci bir 10 saniye alev maruz bırakılmış sonra alev kaynağının uzaklaştırılması ile numunenin kendi kendini sönmüleme süresi  $t_2$  olarak ölçülmüştür.

Çizelge 6. 5’de yanma testine tabi tutulan numunelerin  $t_2$  zamanları belirtilmiştir. PM numunesi 250 saniyeden fazla süre yandığı için dışarıdan yapılan müdahale ile söndürülmüştür.

Çizelge 6. 5 Numunelerin Alev Sönümlleme Süreleri

| Numune Kodu | Numune Adı | t <sub>2</sub> (sn) | Numune Kodu | Numune Adı | t <sub>2</sub> (sn) |
|-------------|------------|---------------------|-------------|------------|---------------------|
| <b>1</b>    | PM         | ≥250                | <b>8</b>    | PMCF       | 35                  |
| <b>2</b>    | PMAT1      | 243                 | <b>9</b>    | PMCFAT1    | 30                  |
| <b>3</b>    | PMAT2      | 174                 | <b>10</b>   | PMCFAT2    | 22                  |
| <b>4</b>    | PMSB1      | 145                 | <b>11</b>   | PMCFSB1    | 21                  |
| <b>5</b>    | PMSB2      | 96                  | <b>12</b>   | PMCFSB2    | 17                  |
| <b>6</b>    | PMZB1      | 134                 | <b>13</b>   | PMCFZB1    | 12                  |
| <b>7</b>    | PMZB2      | 113                 | <b>14</b>   | PMCFZB2    | 10                  |

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında; çeşitli sektörlerde kullanılabilecek karbon fiber takviyeli kompozit yapıların bileşiminde önemli bir yere sahip polimer matris yapısına, alev geciktirme özelliği kazandırılarak mevcut piyasada satılan alev geciktirici polimerlere daha düşük maliyetli bir alternatif oluşturmak hedeflenmiştir. Kazandırılan alev geciktirme özelliğinin yanında bu özelliği kazandırmak için kullanılan seramik katkıların; kompozit yapıda süreksizliğe veya gevrekliğe neden olup mekanik özellikleri olumsuz etkilememesi için uygun konsantrasyonlarda kullanılması üzerinde çalışılmış ve bu doğrultuda numuneler üretilmiştir.

Tez kapsamında elde edilen numuneler; elyaf destekli kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla tercih edilen vakum infüzyon imalat tekniği ile üretilmiştir. Polimer matrisli seramik katkılı numunelerin karbon fiber takviyeli ve karbon fiber takviyesiz üretimlerinin tamamlanması sonrasında ilgili standartlara göre hazırlanmış numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme, darbe ve sertlik ölçüm testleri ile yanma davranışlarını belirlemek için UL-94 standartlarına göre incelemeler yapılmıştır.

1. Deney sonuçlarını karşılaştırmak amacı ile kontrol grubu olması için seramik katkı içermeyen 1 numaralı PM isimli numune üretilmiştir. İlk olarak fiber ilavesiz numuneler incelendiğinde çekme mukavemeti 1 numaralı numunede 21,46 MPa ölçülürken bu değer AT ilavesi ile 25,36 MPa, SB ilavesi ile 26,80 MPa ve ZB ilavesi ile 35,24 MPa değerlerine ulaşmıştır. Fiber ilaveli numunelerde ise 7 numaralı kontrol numunesi

PMCF için çekme mukavemeti değeri 409,79 MPa iken bu değer AT ilavesi ile 541,16 MPa, SB ilavesi ile 489,08 MPa ve ZB ilavesi ile 572,78 MPa değerlerine artış göstermiştir. Deney sonucuna bakarak çekme mukavemeti değerlerini diğer katkılara göre daha fazla artıran seramik katkının çinko borat olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla sodyum borat ve antimon trioksit ilaveli numuneler izlemiştir. Ayrıca çekme mukavemeti değerlerini olumlu yönde değiştiren seramik katkı oranı %10 olarak belirlenmiştir. Genel olarak seramik katkı yapılmasının çekme mukavemetini artırdığı da söylenebilir.

2. Darbe deneyi sonuçlarına bakılacak olursa, PM isimli 1 numaralı numunenin ISO 0180 standartlarına göre yapılan darbe testi sonucu ile 0,02 joule darbe mukavemetine sahip olduğu bilinirken, %10 AT ilavesi ile bu değer 0,45 joule, %10 SB ilavesi ile 0,40 joule ve %10 ZB ilavesi ile 0,40 joule olarak ölçülmüştür. Ayrıca fiber takviyeli numuneler incelendiğinde 7 numaralı PMCF numunesi için darbe mukavemeti değeri 2,35 joule olarak ölçülmüştür. %10 AT ilavesi ile 2,60 joule, %10 SB ilavesi ile 3,30 joule ve %10 ZB ilavesi ile bu değer 3,50 joule olarak saptanmıştır. Deney sonuçlarına göre seramik katkılar ile darbe mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. %10 seramik toz içeren PMAT2, PMSB2 ve PMZB2 numunelerinin %3 seramik toz katkı içeren PMAT1, PMSB1 ve PMZB1 numunelerinden daha yüksek darbe direncine sahip olması yüzde seramik toz konsantrasyonunun artışının darbe direncini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

3. ASTM D 2583 standartlarına göre polimer matrisin ölçülen Barcol değeri 35 Barcol olarak belirlenmiştir. Tez kapsamında üretilen numunelerin sertlik ölçümlerine bakacak olursak fiber takviyesiz numunelerde maksimum sertlik değeri 84 Barcol olarak PMZB2 numunesinde ölçülmüştür. Fiber takviyeli numunelerde ise maksimum sertlik değeri 92 Barcol ile PMCFZB2 numunesinde gözlenmiştir. Bu sonuçlar da göstermektedir ki seramik katkılar yapının sertlik değerlerini olumlu yönde etkilemektedir.

4. UL-94 standartlarına göre numunelere yanma testleri uygulanmıştır. PM numunesi alevle birlikte hemen tutuşma gösterip yanmaya başladığı anda sönme süresi 250 saniyeden fazla sürdüğü için dışarıdan yapılan müdahale ile söndürülmüştür. Ancak ilave edilen seramik katkılar sayesinde numunelerin belli bir süre sonunda kendi

kendini sönümlendiği gözlenmiştir. Fiber takviyesiz numuneler için AT ilavesi ile 174 saniye, SB ilavesi ile 96 saniye ve ZB ilavesi ile de 113 saniyeye kadar sönme süresi gerilemiştir. Fiber takviyeli numunelerde takviye malzemesi olarak yanmaz özelliğe sahip karbon fiberin kullanılması numunelerin tutuştuktan sonra sönme süresini belirgin şekilde düşürmüştür. Bu durumda karbon fiber takviyeli numunelere bakıldığı zaman 8 numaralı PMCF numunesi için alev sönümleme süresi 35 saniye olarak ölçülürken; AT ilavesi ile bu değerin 22 saniyeye, SB ilavesi ile 17 saniyeye ve ZB ilavesi ile 10 saniyeye kadar gerilediği gözlemlenmiştir. İki grup için de ZB ilavesinin diğer katkılara göre numunelerin alev sönümleme özelliği üzerinde daha fazla etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca seramik katkı oranının %3'ten %10 değerlerine çıkması alev sönümleme sürelerini düşürerek alev sönümleme kabiliyetlerini olumlu yönde etkilemiştir.

5. Her üç farklı seramik katkı numuneler için yapılan mekanik ve yanma testleri sonuçları karşılaştırıldığında görülmektedir ki AT, SB ve ZB seramik katkıları arasında çok büyük farklılıklar gözükmemektedir. Ancak seramik tozların kilogram maliyetleri düşünüldüğünde sodyum boratın; bu çalışmanın amacı olan alev iletmemeyen polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozit malzeme üretiminde maliyeti diğer tozlarla karşılaştırıldığında tavsiye edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan yüksek lisans çalışması laboratuvar ölçekli olup, elde edilen veriler ile günümüzde önemli bir gelişme gösteren kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yapılacak çalışmalara yön verici olması hedeflenmiştir. Mevcut pazarda bulunan ve halojen içerikli olduğu için kullanımının zararlı olduğu düşünülen reçineler yerine seramik katkılar sayesinde alev iletmemeye özelliğine sahip reçinelerin kullanımının yaygınlaşması için tez kapsamında yapılan deneyler ve sonuçları önem arz etmektedir. Bundan sonraki aşamada farklı fiber takviyeleri veya farklı özellikte matris malzemeleri kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Army, MR., (2012). "Composite Materials Handbook (CMH-17) Volume 3, Polymer Matrix Composites: Materials Usage, Design, and Analysis", Canada.
- [2] Aysu, E., (2011). Şehir Planlamasında Yoğunluk, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 214, İstanbul (baskıda).
- [3] Laurenzi, S. ve Marchetti, M., (2012). Advanced Composite Materials, Chapter 7, Department of Astronautic Electrical and Energy Engineering, Sapienza Università di Roma, Italy .
- [4] Aström, T. B., Manufacturing of Polymer Matrix Composites, Department of Aeronautics, KTH, Sweden.
- [5] Yang, S., Lv, G. ve Liu, Y., (2013). "Synergism of PolySiloxane and Zinc Borate Flame Retardant PolyCarbonate", Polymer Degredation and Stability 98, 2795-2800, China.
- [6] Rotheron, R. N. ve Hornsby, P. R., (1996). "Flame Retardant Effects of Magnesium Hydroxide", Polymer Degradation and Stability 54 ( IYYh) 383-385, Manchester, United Kingdom.
- [7] Sain, M., (2004). "Flame Retardant and Mechanical Properties of Natural Fibre-PP Composites Containing Magnesium Hydroxide", Polymer Degredation and Stability 83, 363-367, Toronto, Canada.
- [8] Feng, C., (2015). "Influence of Zinc Borate on the Flame Retardancy and Thermal Stability of Intumescent Flame Retardant Polypropylen Composites", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 115, 224-232, China.
- [9] Baydar, D. G., (2011). "Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu", Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.
- [10] RSC, Advancing the Chemical Sciences. "Composite Materials", (Index 4.3.1)
- [11] Barut, E., Girgin, M. ve Candan, E. G., (2014). "Hidroksiapatit Sentezinde Tane Boyutu ve Geometriye Etki Eden Parametlerin İncelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi, Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.

- [12] Crawford, R. J., (2002). Plastics Engineering, 3rd Edition, Butterworth, Heinemann, 168-182, London, United Kingdom.
- [13] Soy, U., (2014). "1000 Soruda Malzeme Bilimi", 978-605-4925-38-4, 1. Basım, Değişim Yayınları, Sakarya, Türkiye.
- [14] Jose, J. P., (2012). Introduction to Polymer Composites, Polymer Composites, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [15] Ataş, A. Balıkesir Üniversitesi, Kompozit Malzemeler ve Mekaniği, Balıkesir, Türkiye.
- [16] Alsaran, A. Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Malzeme Bilimi Notları, Erzurum, Türkiye.
- [17] Chapter 4, Metal Matrix Composites, <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880107.PDF>, (13 Mayıs 2016)
- [18] Şahin, E., (2011). "AlMg<sub>3</sub>/SiCp Kompozit Malzemelerinin Darbe Davranışının Takviye Oranı ile Değişiminin İncelenmesi", Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne, Türkiye.
- [19] Metal Matrix Composite- Structural Composite Components, <http://www.alsic.com/metal-matrix-composite-mmc.html> (13 Mayıs 2016)
- [20] Kaczmar, J. W., (2000). " The production and application of metal matrix composite materials", Journal of Materials Processing Technology 106,58-67, Wroclaw, Poland.
- [21] Mukerji, J., (1993). Ceramic Matrix Composites, Central Glass and Ceramic Research Institute, Defence Science Journal, 43 (4): 385-395, Jadavpur.
- [22] Technology Insights, (2013). Ceramic Matrix Composites—an Alternative for Challenging Construction Tasks, CERAMIC APPLICATIONS.
- [23] Hull, D. ve Clyne, T. W., (1996). An Introduction to Composite Materials, Cambridge Solid State Science Series, Second Edition, Melbourne, Australia.
- [24] Polymer Matrix Composites, Advanced Materials by Design, Chapter 3 , <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF> ( 14 Mayıs 2016)
- [25] Warnet, L. ve Akkerman, R., (2009). "Micromechanics", University of Twente, Composite Course, Eng & Tech, 2.1.2.
- [26] North, R. C., (1997). "Design Guide for Marine Applications of Composites", Ship Structure Committee, SSC-403, Washington.
- [27] Sabiston, T., (2016). " Micromechanics for a long fibre reinforced composite model with a functionally graded interphase", Composite Part B, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [28] Alkış, A., Isdale, M. ve Sarbanoglu, H., (1993). "Landinformationssystem in Türkei am Beispiel der Stadt Istanbul", Proceedings of 16th Urban Data Management Symposium, 6–10 September 1993, Wien, 159–167.

- [29] Clyne, B., "Mechanics of Composite Materials, University of Cambridge, Version 2.1, Cambridge, United Kingdom.
- [30] Roylance, D., (2000). "Introduction to Composite Materials", Massachusetts Institute of Technology, Materials Science and Engineering, Cambridge, United Kingdom.
- [31] Ebewe, R., (2000). "Polymer Science and Technology", University of Benin, Department of Chemical Engineering, Benin City, Nigeria.
- [32] Adams, R. C., (2001). Composites: Volume 21, ASM International, The Materials Information Company.
- [33] Wang, R., Zheng, S. ve Zheng, Y. "Polymer Matrix Composites and Technology", Woodhead Publishing in Materials, Science Press.
- [34] Crawford, R., J., (2002). Plastic Engineering, Third Edition, The Queen's University of Belfast, United Kingdom.
- [35] Adeniyi, A., (2016). "Thermoplastic-Thermoset Nanostructured Polymer Blends", Tshwane University of Technology, Republic of South Africa.
- [36] Polystyrene and Styrene Copolymers, ABS Polymers, 6.
- [37] ABS Material, 3, Eurapipe Duraflor.
- [38] Termoplastikler, Mühendislik Plastikleri, [http://compositesturkey.org.tr/pdf/Composites\\_Turkey\\_07.pdf](http://compositesturkey.org.tr/pdf/Composites_Turkey_07.pdf) , (18 Ekim 2016)
- [39] Pielichowska, K., (2015). "Preparation and Characterization of Polyoxymethylene Nanocomposites", AGH University of Science and Technology, Krakow, Poland.
- [40] Handbook of Polymers, (2012). "Polyoxymethylene", Chemtech Publishing.
- [41] Waleed, Fahad, A., (2012). "Performance of Polycarbonate Nanocomposites at High Strain Rates", Loughborough University, Department of Materials, Doctoral Thesis, United Kingdom.
- [42] Bandyopadhyay, J., (2007). "Thermal and Thermomechanical Properties of Polyethylene terephthalate Nanocomposites", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 13.
- [43] Venkatachalam, S., (2012). "Degradation and Recyclability of Polyethylene terephthalate", Chapter 4.
- [44] Bruce, R. "An Introduction to Thermosets", IBM (Retired)/ Consultant. [www.primethermosets.com](http://www.primethermosets.com) (10 Eylül 2016)
- [45] Akay, M., (2015). "An Introduction to Polymer Matrix Composites", 1st Edition, 978-87-403-0980-5.
- [46] Scott Bader, Crystic Composites Handbook, Performance Resins in Composites.

- [47] Mallick, P., K., (2007). "Fiber Reinforced Composites-Materials, Manufacturing and Design", University of Michigan Dearborn, Department of Mechanical Engineering, The United States.
- [48] Mazumdar, S., K., (2001). "Composite Manufacturing-Materials, Product and Process Engineering", 0-8493-0585-3, The United States.
- [49] Harris, B., (1999). "Engineering Composite Materials", The Institute of Materials, London, United Kingdom.
- [50] Peacock, A., J., (2000). "Handbook of Polyethylene Structures, Properties and Applications", Exxon Chemical Company, Baytown, Texas.
- [51] <http://www.christinedemerchant.com/carboncharacteristics.html> (15 Eylül 2016)
- [52] <https://yandex.com.tr/gorsel/search?text=karbon%20fiber%20dokuma> (16 Eylül 2016)
- [53] Kelly, D., (2004). "Composites Materials for Aircraft Structures", Second Edition, University of New South Wales, Australia.
- [54] [http://silissanayikumlari.com/cam\\_elyaf\\_kumu.html](http://silissanayikumlari.com/cam_elyaf_kumu.html) (16 Eylül 2016)
- [55] <http://123coolpictures.com/aramid+fiber> (16 Eylül 2016)
- [56] McIlhagger, A., Archer, E. ve McIlhagger, R., (2015). "Manufacturing Processes for Composites Materials and Components for Aerospace Applications", University of Ulster, Newtownabbey, United Kingdom.
- [57] Tucker, N., Lindsey, K., (2002). "An Introduction to Automotive Composites", Rapra Technology Limited, Shawbury, United Kingdom.
- [58] Advanced Composites Materials and their Manufacture Technology Assessment, (2015).
- [59] Comparative Cost Study of a 35m Wind Turbine Blade using Infusion and Prepreg Materials Technology, WE Handbook- 6- Blade Cost Analysis: Prepreg vs Infusion Material Technology.
- [60] Hexcel Prepreg Technology, [http://www.hexcel.com/resources/datasheets/brochure-datasheets/prepreg\\_technology.pdf](http://www.hexcel.com/resources/datasheets/brochure-datasheets/prepreg_technology.pdf) (18 Eylül 2016)
- [61] <http://www.compositesworld.com/products/camx-2014-preview-c-a-litzler-> (18 Eylül 2016)
- [62] <http://www.designinsite.dk/htmsider/pb0102.htm> (19 Eylül 2016)
- [63] [http://composite-integration.co.uk/product\\_tooling\\_page.php](http://composite-integration.co.uk/product_tooling_page.php) (19 Eylül 2016)
- [64] [http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center) (19 Eylül 2016)
- [65] Laoutid, F., Bonnaud, L. ve Alexandre, M., (2008). "New Prospects in Flame Retardant Polymer Materials: From Fundamentals to Nanocomposites", Materials Science and Engineering R 63 100–125, Belgium.

- [66] Lu, S. ve Hamerton, I., (2002). "Recent Developments in the Chemistry of Halogen-free Flame Retardant Polymers", School of Physics and Chemistry, University of Surrey, Department of Chemistry, Guildford GU2 7XH, United Kingdom.
- [67] Liu, J., Yu, Z. ve Chang, H., (2014). "Thermal Degradation Behavior and Fire Performance of Halogen-free Flame-retardant High Impact Polystyrene Containing Magnesium Hydroxide and Microencapsulated Red Phosphorus", Polymer Degradation and Stability, 103-83-95.
- [68] Zhang, S. ve Horrocks, A., R., (2003). "A Review of Flame Retardant Polypropylene Fibres", Progress in Polymer Science, 28-1517-1538.
- [69] Kiliaris, P. ve Papaspyrides, C., D., (2010). "Polymer/layered Silicate (clay) Nanocomposites: An overview of Flame Retardancy", Progress in Polymer Science 35-902–958.
- [70] [http://www.fibox.com/132/UL%252094:%2520V-O,%2520V-1%2520and%2520V-2\\_ENG3.html](http://www.fibox.com/132/UL%252094:%2520V-O,%2520V-1%2520and%2520V-2_ENG3.html) (06 Kasım 2016)
- [71] <http://www.plastik-ambalaj.com/tr/roportaj/119-plastik-ambalaja-makale/948-termoplastik-poliueretan-tpu-malzemelerin-ul-94-ve-konik-kalorimetre-ile-yanma-davranslarnn-incelenmesi> (08 Kasım 2016)

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Ebru BARUT  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :08.03.1991, MALATYA  
**Yabancı Dili** :İNGİLİZCE  
**E-posta** :barutebru@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                              | Okul/Üniversite            | Mezuniyet Yılı |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2016           |
| Lisans    | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2014           |
| Lise      | Fen Bilimleri                     | Turgut Özal Anadolu Lisesi | 2009           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl  | Firma/Kurum                                 | Görevi                         |
|------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| 2015 | Birlik Ticaret Türk A.Ş./Carbomid Solutions | Metalurji ve Malzeme Mühendisi |

## **YAYINLARI**

### **Ulusal Bildiri**

Barut, E., Ünal, A., Kuşkonmaz, N., (2016). “Farklı Seramik Katkılı Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler ve Kor Malzemeler ile Oluşturulan Sandviç Yapıların Özelliklerinin İncelenmesi”, 12. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.

