



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

**TEKRARLANAN YÜKLER ALTINDAKİ KOMPOZİT YAPILARIN
İNCELENMESİ İÇİN DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI**

FIRAT YASTIMOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. Arif ÖZKAN**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Tekrarlanan Yükler Altındaki Kompozit Yapıların İncelenmesi İçin Deney
Düzeneği Tasarımı

Fırat YASTIMOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojisi Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Arif ÖZKAN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. (tez danışmanınızın ismi tekrar yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. (jüri üyesinin ismi yazılmalıdır)

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: .../.../2017

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

02 Ağustos 2017

FIRAT YASTIMOGLU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Arif ÖZKAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

02 Ağustos 2017

FIRAT YASTIMOGLU

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|-----------------|
| ŞEKİL LİSTESİ | XI |
| ÇİZELGE LİSTESİ | XIII |
| KISALTMALAR..... | XIV |
| SİMGELER..... | XV |
| ÖZET | XVI |
| ABSTRACT | XVII |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2.KOMPOZİT MALZEMELER | 3 |
| 2.1. KOMPOZİT MALZEME İMALATI | 4 |
| 2.2. KOMPOZİT MALZEME TÜRLERİ..... | 4 |
| 2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMC)..... | 4 |
| 2.2.2. Seramik Kompozitler (SMC) | 5 |
| 2.2.3. Polimer Kompozitler (PMC)..... | 5 |
| 2.3.KOMPOZİT YAPIMINDA KULLANILAN MADDELER | 6 |
| 2.3.1. Matris Faz | 6 |
| 2.3.2. Matrisin İşlevi..... | 7 |
| 2.3.3. Metal Matrisler | 7 |
| 2.3.4. Seramik Matrisler | 8 |
| 2.3.5. Polimer Matrisler | 8 |
| 2.3.5.1. Termoplastik Malzemeler | 9 |
| 2.3.5.2. Termoset Malzemeler | 9 |
| 2.4. MATRİS FAZINDA İSTENİLEN ÖZELLİKLER..... | 10 |
| 2.5. YOĞUN OLARAK KULLANILAN MATRİS MALZEMELERİ | 10 |
| 2.5.1. Epoksi Reçineleri..... | 11 |
| 2.5.2. Polyesterler | 11 |
| 2.5.3. Üretan Reçineleri | 12 |
| 2.5.4. Fenolik Reçineler..... | 12 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.5. Vinil Ester | 12 |
| 2.5.6. Bismaleimid | 12 |
| 2.5.7. Silikon..... | 12 |
| 2.5.8. Cynate Ester | 13 |
| 2.6. MONOMERLER | 13 |
| 2.7. TAKVİYE EDEN FAZ..... | 13 |
| 2.8. PARÇACIK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER | 14 |
| 2.9. DAĞINIMLA MUKAVETLENDİRİLMİŞ KOMPOZİTLER..... | 14 |
| 2.10. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER | 14 |
| 3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI..... | 17 |
| 3.1. ARA FAZ | 18 |
| 3.1.1. Tutunma Kavramı | 19 |
| 3.1.2. Bağ Yapı oluşturma Davranışı..... | 19 |
| 3.1.3. Adhezyon veya Yapışma Teorisi..... | 21 |
| 3.1.3.1. İslatma ve Çözünme Bağı | 21 |
| 3.1.3.2. Difüzyon Bağı | 21 |
| 3.1.3.3. Mekanik Bağ | 22 |
| 3.1.3.4. Elektrostatik Çekim Bağları | 22 |
| 3.1.3.5. Kimyasal Bağlar | 22 |
| 3.1.3.6. İyonik Bağlar | 23 |
| 3.1.3.7. Kovalent Bağ | 23 |
| 3.2. ARA BAĞ YAPI MUKAVEMETİNİN ÖLÇÜLMESİ..... | 23 |
| 3.2.1. Deneysel Ölçüm Yöntemleri..... | 23 |
| 3.3. FİBER MATRİS ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ..... | 25 |
| 3.4. KOMPOZİTLERDE KÜR İŞLEMLERİ..... | 28 |
| 4. ELYAF ÇEŞİTLERİ VE ÖZELLİKLERİ..... | 30 |
| 4.1. KULLANILAN BAŞLICA ELYAF TÜRLERİ | 30 |
| 4.1.1. Cam Elyaf lar | 30 |
| 4.2. CAM ELYAFLARIN BAZI ÖZELLİKLERİ..... | 31 |
| 4.2.1. S+R Cam Elyafi..... | 31 |
| 4.2.2. A Tipi Cam (Alkali) | 32 |
| 4.2.3. C Tipi Korozyon Cami | 32 |
| 4.2.4. E Tipi Cam (Elektrik)..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.5. S Tipi Cam (Mukavemet) | 32 |
| 4.3. DİĞER ELYAF TÜRLERİ..... | 33 |
| 4.3.1. Aramid Elyaf lar | 33 |
| 4.3.2. Bor Elyaf ı..... | 34 |
| 4.3.3. Karbon Grafit Elyaf lar..... | 34 |
| 4.3.4. Ekzotik Takviye Elemanları | 35 |
| 4.3.5. Silisyum Karbür | 35 |
| 4.3.6. Alümina Elyaf lar | 36 |
| 4.4. DOLGU MADDELERİ | 36 |
| 4.4.1. Dolgu Malzemesi Kullanımında Dikkat Edilecek Hususlar | 36 |
| 4.4.2. Dolgu Malzemesi Türleri..... | 37 |
| 4.4.2.1. Kalsiyum Karbonat..... | 37 |
| 4.4.2.2. Alümiyum Silikat ve Kil | 37 |
| 4.4.2.3. Alümiyum Trihidrat | 37 |
| 4.4.2.4. Kalsiyum Sülfat..... | 38 |
| 4.4.2.5. Diğer Dolgu Malzemeleri | 38 |
| 4.5. Dolgu Malzemesi Kullanımı..... | 38 |
| 4.6. REÇİNE KATKI MALZEMELERİ | 38 |
| 4.6.1. Katalizörler | 39 |
| 4.6.2. Hızlandırıcılar (Promötörler) | 39 |
| 4.6.2.1. Kobalt Hızlandırıcılar | 39 |
| 4.6.2.2. Vanadyum Hızlandırıcılar | 39 |
| 4.6.2.3. Amin Hızlandırıcılar..... | 40 |
| 4.6.3. İnhibitörler | 40 |
| 4.6.4. Diğer Katkı Malzemeleri | 40 |
| 4.6.4.1. Renklendiriciler | 40 |
| 4.6.4.2. Kalıp Ayırıcılar..... | 40 |
| 4.6.4.3. Vaks Kalıp Ayırıcılar | 40 |
| 4.6.4.4. Silikon Kalıp Ayırıcılar..... | 40 |
| 4.7. KULLANILAN KATKI MALZEMELERİNİN GÖREVLERİ..... | 41 |
| 4.7.1. Düşük Boyutsal Çekme..... | 41 |
| 4.7.2. Alev Dayanımı | 41 |
| 4.7.3. Hava Kabarcığı Engelleme..... | 41 |
| 4.7.4. Emisyon Kontrolü | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 4.7.5. Reçine Akışkanlık Kontrolü..... | 42 |
| 4.7.6. İletkenlik Kontrolü | 42 |
| 4.7.7. Mukavemet Kontrolü | 42 |
| 4.7.8. Antioksidantlar..... | 43 |
| 4.7.9. Antistatik Özellik Kontrolü..... | 43 |
| 4.7.10. Köpürme Kontrolü | 43 |
| 4.7.11. Plastifiyanlar..... | 43 |
| 4.7.12 Kaydırıcılar..... | 43 |
| 4.8. TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÖZEL KATKILARI | 43 |
| 4.8.1. Isı Sabitleyiciler | 44 |
| 4.8.2. Ultraviyole Işın Koruyucuları..... | 44 |
| 4.9. BİLEŞİK OLUŞTURMA DURUMLARI..... | 44 |
| 4.9.1. Mikroskobik Bileşim..... | 44 |
| 4.9.2. Makroskobik Bileşim..... | 44 |
| 5. TASARIMDA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSULAR | 45 |
| 5.1. Gerilim Uygulama Şartları | 45 |
| 5.2. Isı ve Elektrik Yüklemelerinin Malzeme Üzerine etkileri..... | 46 |
| 5.3. Malzemenin Çalışma Ömrü ve Boyutsal Kararlılık | 47 |
| 5.4. Ani Darbe Etkisi (Çarpma)..... | 48 |
| 5.5. Kimyasal Etkileşim | 48 |
| 5.6. Parçaların Birleştirilmesi | 49 |
| 5.7. ÜRETİMDE KAŞILAŞILAN PROBLEMLER..... | 52 |
| 5.7.1. Yüzey ve Köşelerde Jelkot Çatlağı Oluşumu | 52 |
| 5.7.2.Elyaf – Matris Yerleşim Hataları | 53 |
| 5.7.3. Kalıp İmalatında Radüs Ölçüsünün Önemi | 53 |
| 5.7.4. Hasar Başlangıcı (Çatlak Oluşmu)..... | 54 |
| 5.7.5. Takviye Malzemelerinde Hasar Oluşumu | 54 |
| 5.7.6. Kalıplama Sonrası Şekil Değişimi (spring-in) | 55 |
| 5.7.7. Kuru Kalan Bölgeler ve Hava Kabarcığı Oluşumu | 56 |
| 5.7.8. Gaz Salınımı (pin hole) | 56 |
| 6. YENİ TAHRİBATSIZ MUAYENE (NDT) YÖNTEMLERİ | 58 |
| 6.1 TAHRİBATSIZ MUAYENE | 58 |
| 6.1.1. Görsel Muayene..... | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1.2. Shearografi | 59 |
| 6.1.3. Eddy Akımlarıyla Muayene | 59 |
| 6.1.4. Ultrasonik Muayene..... | 60 |
| 6.1.5. Akustik yayılım | 62 |
| 6.1.6. Radyografik İnceleme..... | 62 |
| 6.1.7 Geçici Termografi | 63 |
| 6.1.8. Isı Transferi Yöntemleri..... | 64 |
| 6.1.9. Tomografi Yöntemiyle Hasar Analizi..... | 64 |
| 6.1.10. Deneysel Çalışmalar | 64 |
| 7. KOMPOZİTLERİN HASAR MEKANİZMALARI | 65 |
| 7.1. NUMUNE HAZIRLAMA DÜZENEK TASARIMI | 67 |
| 7.2. YORULMA..... | 68 |
| 7.2.1. Yorulma ve Mukavemet Sınırlarının Belirlenmesi | 69 |
| 7.2.1.1. Malzeme Ömrü..... | 71 |
| 7.2.1.2. Yorulma Mukavemeti..... | 72 |
| 7.2.1.3. Sonsuz Ömür..... | 72 |
| 7.3. YORULMA DAVRANIŞININ ANALİZİ | 72 |
| 7.3.1. Kapalı Döngü Yorulma Testi..... | 74 |
| 7.3.2.WÖHLER Eğrileri..... | 75 |
| 7.4. KOMPOZİTLERİN YORULMA DAVRANIŞI..... | 76 |
| 7.5. KOMPOZİT MALZEMENİN YORULMA ETKENLERİ..... | 78 |
| 7.5.1. Takviye Malzemesinin Özelliklerinin Etkileri | 78 |
| 7.5.2. MATRİS MALZEMESİNİN ÖZELLİKLERİNİN ETKİSİ..... | 79 |
| 7.5.3. Fiber Yerleşiminin Etkileri | 79 |
| 7.5.4. Fiber Oranı | 80 |
| 7.5.5. Tabaka Ayrışması (delemation) | 80 |
| 8. DENEY DÜZENEGİ TASARIMI | 81 |
| 8.1. KIZAK YUVASI..... | 83 |
| 8.2. KIZAK | 84 |
| 8.3. MAFSAL..... | 85 |
| 8.4. KABİN..... | 86 |
| 8.5. KONTROL PANELİ | 88 |
| 8.6. İKLİMLENDİRME MODÜLÜ..... | 90 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 8.7. UV ÜNİTESİ | 91 |
| 9. SONUÇ VE TARTIŞMA..... | 94 |
| 10. KAYNAKLAR..... | 97 |
| ÖZGEÇMİŞ | 103 |



ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|------------------------|
| Şekil 2.1. Dolgu türlerine göre Kompozit Malzemeler [12]. | 15 |
| Şekil.2.2. Kompozit malzeme içerisine elyafların yerleşim şekilleri [13]. | 16 |
| Şekil 3.1. Kompozitlerin yükleme durumları [15]. | 18 |
| Şekil 3.2. Arafaz oluşumu (tek elyaf). | 19 |
| Şekil 3.3. Tek Elyafı Deney Numuneleri. | 23 |
| Şekil 3.4. Üç Noktadan eğme testi. | 24 |
| Şekil 3.5. Çok uzun ve gelişi güzel yerleştirilmiş elyaf. | 27 |
| Şekil 3.6. Kritik uzunlukta düzgün yerleştirilmiş elyaf. | 27 |
| Şekil 3.7. Reçinenin kurlenmesine ait sıcaklık zaman grafiği [33]. | 29 |
| Şekil 4.8. Cam elyafı üretim prosesi [32]. | 31 |
| Şekil 5.1. Kompozit malzemelerin mekanik yöntemlerle birleştirilmesi. | 50 |
| Şekil 5.2. Elyaf hasar oluşumu durumları ve yerleşim hataları. | 55 |
| Şekil 5.3. Kompozit kalıplamada spring in etkisi. | 56 |
| Şekil 6.1. Dijital shearoğrafi [42]. | 59 |
| Şekil 6.2. Girdap akımlarıyla muayene (Eddy akımları) [37]. | 60 |
| Şekil 6.3. Ultrasonik ses dalgalarıyla muayene cihazı. | 61 |
| Şekil 6.4. Osiloskop ekran analizi. | 61 |
| Şekil 6.5. Network yerleşimli karbon-fiber kompozitin radyolojik incelemesi [84]. | 63 |
| Şekil 7.1. Kompozit malzeme deney numunesi. | 67 |
| Şekil 7.2. Kompozit malzeme deney numunesi. | 67 |
| Şekil 7.3. Eksen doğrultusunda periyodik yüklemeli ve sabit genlik değerine sahip düzenek [78]-[80]. | 70 |
| Şekil 7.4. Dört noktadan etkili dönme hareketli deney aygıtı (Schenk) [78]-[80]. | 70 |
| Şekil 7.5. Eğme gerilmesinin düzlemsel olarak uygulanışı(Sonntag) [78-80] | 71 |
| Şekil 7.6. Sinusoidal çevrim. | 73 |
| Şekil 7.7. Metalik malzemelere uygulanan yorulma deney düzenegi. | 74 |
| Şekil 7.8. Farklı dalga modelleri. | 75 |
| Şekil 7.9. WÖHLER Diagramı | 76 |
| Şekil 7.10. Kompozit malzemelerde çatlak oluşumu ve gelişimi. | 77 |
| Şekil 7.11. Kompozitlerde çatlak oluşumu ve gelişimi. | 78 |
| Şekil 7.12. Çatlak gelişiminin önlenmesi (körleştirme). | 78 |
| Şekil 7.13. Kompozitlerde delaminasyon durumları. | 80 |
| Şekil 8.1. Deney düzenegi tasarımı. | 82 |
| Şekil 8.2. Kızak yuvası. | 83 |
| Şekil 8.3. Deney düzenegi kızak yuvası montaj durumu. | 84 |
| Şekil 8.4. Kızak (Çene). | 84 |
| Şekil 8.5. Kızak montajı (patlatılmış görüntü). | 84 |
| Şekil 8.6. Çene bağlantı parçası. | 85 |
| Şekil 8.7. Çene bağlantı gurubu. | 85 |
| Şekil 8.8. Kompozit malzeme test sistemi. | 86 |

| | |
|--|----|
| Şekil 8.9. Üst yapı montajı..... | 87 |
| Şekil 8.10. Deney düzeneği kabin gurubu. | 88 |
| Şekil 8.11. Kontrol paneli. | 89 |
| Şekil 8.12. Dış kullanıcı seti. | 89 |
| Şekil 8.13. Kontrol panelinin test sistemine uygulanması..... | 90 |
| Şekil 8.14. İklimlendirme ve nem alma ünitesi. | 90 |
| Şekil 8.15. Tam sistem kurulum durumu..... | 91 |
| Şekil 8.16. Deney düzeneği montajı (patlatılmış görünüm). | 92 |
| Şekil 8.17. Düzenek montajı (Hidrolik sistem)..... | 93 |



ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| Çizelge 2.1. Çeşitli takviye elemanları ve kullanım şekilleri [4]..... | 3 |
| Çizelge 2.2. Takviye elyaflarının özellikleri [15]..... | 5 |
| Çizelge 2.3. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri [8]..... | 8 |
| Çizelge 2.4. Termoplastik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri [8]..... | 9 |
| Çizelge 2.5. Termoset malzemelerin özellikleri[8]. | 10 |
| Çizelge 4.1. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [15]. | 33 |
| Çizelge 4.2. Aramid elyafların mekanik özellikleri [37]. | 34 |
| Çizelge 4.3. Bazı Bor elyaflarının özellikleri [37]..... | 34 |
| Çizelge 4.4. Karbon ve Grafit elyafların özellikleri[15]..... | 35 |
| Çizelge 5.1. Mühendislik malzemelerinin tipik özellikleri[85]..... | 51 |
| Çizelge 7.1. Yorulma davranışını tetikleyen faktörler[6]. | 69 |

KISALTMALAR

| | |
|--------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | Alüminyum oksit |
| BMC | Bulk molding compound (sıcak pres kalıplama hamur) |
| CTP | Cam elyaf takviyeli polyester |
| HFC | Yüksek yorulma çevrim frekansı |
| LFC | Düşük yorulma çevrim frekansı |
| MMC | Metal matrisli kompozit malzemeler. |
| NDI | Non-destructive inspections (Honeycomb) |
| NDT | Non-destructive testing temassız muayene yöntemi |
| PAN | Poliakrilonitril |
| PMC | Polimer matrisli kompozitler. |
| RTM | Reçine transfer metodu |
| SMC | Sheet molding compound (sıcak pres kalıplama pestil) |
| SMC | Seramik matrisli kompozitler . |

SİMGELER

| | |
|-------------|---|
| E_m | Matrisin elastisite modülü |
| E_f | Fiberin elastisite modülü |
| $^{\circ}E$ | Maksimum çalışma sıcaklığı |
| F | Kuvvet |
| N | Yük değişim (çevrim) sayısı |
| R | Mesnet tepki kuvveti |
| S | Gerilme genliği |
| σ/q | Spesifik dayanım |
| q | Yoğunluk |
| W | Ağırlık |
| V_f | Liflerin hacimsel oranı |
| T_k | Paralel doğrultulu yüklemelerde komp. elastisite modülü |
| T_m | Liflerin kopma anınsaki şekil değiştirme gerilmesi |

ÖZET

TEKRARLANAN YÜKLER ALTINDAKİ KOMPOZİT YAPILARIN İNCELEMESİ İÇİN DENEY DÜZENEGİ TASARIMI

FIRAT YASTIMOĞLU

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Arif ÖZKAN

Ağustos 2017, 120 sayfa

Kompozit malzemeler malzeme biliminin gelişmekte olan dallarından biridir. Geleneksel üretim metotlarına uygunluğu ve özel üretim metotlarına izin vermesi nedeniyle otomotiv, denizcilik, havacılık, tekstil ve savunma sanayinde oldukça tercih edilir hale gelmiştir. Dolgu yani takviye malzeme, kompozit malzemelerde mekanik mukavemetin sağlanmasında önemli rol oynar. Kompozit malzemelerde takviye elemanı lif, partikül, tabaka formunda olabilir. Matris malzemesi ise kompozit yapıyı bir bütün halinde tutar. Aynı zamanda matris formu yapının fiziksel, kimyasal, ısı özelliklerini ve mukavemetini belirler. Matris malzemesi olarak seramikler, metaller ve bunların alaşımları kullanılabilirdiği gibi yaygın olarak reçineler tercih edilmektedir. Reçinenin tercih edilmesinin temel nedenlerinden biri imalat kolaylığı ve üretim maliyetidir. Bu çalışmada sürekli titreşim ve sürünme olayına maruz kalan kompozit malzemelerin yapılarının ve oluştukları ara bağ yüzeyinin analizi ve yapının ömrünün analitik olarak hesaplanabilmesini amaçlayan deney düzeneğinin tasarımı hedeflenmiştir. Deney düzeneği tasarımımda SOLIDWORKS® programı kullanılmıştır. Deney numunelerinin tasarımı ve eldesi sürecinde, kompozit dolgu malzemesinin geometrisi ve yerleşim yönleri araştırılmış ve hangi şartlar altında çalışması gerektiğinin uygun olduğu araştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Tasarım, Kompozit, Kompozit matris, Kompozit test düzeneği tasarımı, Fiber.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL DESIGN FOR REVIEW OF COMPOSITE STRUCTURES UNDER REPEATED LOADING

FIRAT YASTIMOGLU

Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Materials
Technologies

Supervisor: Assoc.Prof. Dr. Arif ÖZKAN

August 2017, 120 pages

Composite materials are one of the emerging subjects of the materials science. Due to the special production methods and to compatibility allowance with traditional/conventional production methods composite materials have become highly preferred on automotive, marine, aviation, textile and defense industry. Reinforcing material has an important role in providing mechanical strength of composite materials. Reinforcing element in composite materials can be fibers, particles or sheet forms. The matrix structure in composite materials keeps the structure as an intact form. Therewithal, matrix structure determined the physical structure, chemical, and thermal properties and strength of composite materials. Matrix material commonly preferred resins and also limited preferred ceramics, metals and their alloys. One of the main reasons for the preferred resins is the ease of manufacture and production method and costs. This study aimed to constant vibration and the design of the structure of the rest of composite materials subjected to creep events and experiments aimed at the intermediate surface where they form analysis and the mechanical life of composite structure can be calculated analytically. The experimental setup designed in SOLIDWORKS® software. In composite materials testing unit design and obtaining the test specimen geometry and orientation of the composite filling material it was researched and which appropriate working conditions that investigated in this study.

Keywords: Design, Composite Material, Composite matrix, Fiber, Composite Testing Device Design, Fiber.

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında ev aletlerinden uzay teknolojisine kadar geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunan kompozit malzemelerin geçmiş son birkaç yüzyıl öncesine dayandırılmak istense de ilk kompozit örneklerin tarihçesi çok eski dönemlere dayanmaktadır. Birden fazla bileşenin kullanıldığı basit kompozit malzemelerin hikayesi insanoğlunun doğada bulunan malzemelere müdahale etmesi ve ihtiyacına uygun hale getirmesiyle başlamıştır. Antik çağlardan başlayarak kırılğan malzemelerin içerisine bitkisel veya hayvansal lifler ekleyerek kırılğanlık olumsuzluğunun önüne geçmeye çalışmıştır. Kerpiç bu konuda en güzel örnektir. Bilindiği gibi kerpiç üretiminde killi toprak içerisine eklenen saman ve diğer lifler malzemeye üretim kolaylığı sağlarken dayanımını da önemli ölçüde arttırır. Bugün kullanılan kompozit malzemelerin takviye edilmesinde yoğun olarak kullanılan elyaflar ise değişik formlarda olabildiği gibi dokuma şeklinde de olabilmektedir. Bu konuda en eski ve en çok kullanılan elyaflar cam lifleridir. M.Ö. 1600 de Mısırda kullanılmaya başlandığı, tarihi eserlerin incelenmesiyle anlaşılmıştır. Sanayide kullanımına dair ilk kayıt ise 1877 yılına aittir. Yüzyılın başında kompozit malzeme imaline ilişkin çeşitli patentlerin alındığına dair kayıtlar bulunmaktadır. Bununla beraber kompozit malzeme kavramının mühendislik alanı içerisinde ciddi olarak 1940 lı yıllarda kabul görmüştür.

Kompozit malzemeler belirli bir kullanım amacına dönük iki veya daha fazla farklı özelliklere sahip malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmesi şeklinde tanımlanabilen malzeme gurubudur. Malzemelerin eksik ve zayıf yönlerinin giderilerek üstün özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı doğal malzemelerin ara yüzeylerle birbirinden ayrılacak şekilde üç boyutlu olarak birleştirilmesiyle meydana getirilirler. Kompozit malzeme bileşenlerinin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özelliklerdedir. Mikroskobik olarak heterojen ve makroskobik olarak homojen özellik gösterirler. Kompozit malzeme imalinde bağlayıcı (matris) malzeme ile elyaf (takviye elemanı) seçimi önemli yer tutmaktadır. Matris seçiminde metaller, seramikler ve sentetik polimerler kullanım yeri

ve amacına göre tercih edilebilir. Kompozitler kullanılan matris malzemesi ile adlandırılırlar. Hayatımızın her alanında kendine yer bulan kompozitlerde kullanılan takviye elemanları seçiminde özen gösterilmelidir. Her ne kadar üstün özelliklere sahip olsa da özellikle asbest lif kullanımı insan sağlığına büyük zararlar verebilmektedir.

Makromolekül kuramının H. Staudinger tarafından keşfinin ardından, 1930 lu yıllardan sonra polimerik malzemeler alanında büyük gelişmeler olmuştur. 1950 ve 60 lı yıllardan itibaren elyaflarla takviye edilen sentetik reçineler sanayide yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır. Büyük oranda geleneksel malzemelerin yerine tercih edilir hale gelmiştir. Kolay şekillendirilebilme, düşük yoğunluk, korozyon dayanımı ve mükemmel yüzey kalitesi tercih edilmelerinin önemli nedenlerindedir. Bütün bu iyi özelliklerin yanı sıra zayıf noktaları olan sertlik ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Özellikle 1950 li yıllarda yapılan bu çalışmalar, kompozit malzeme kavramının yeniden doğmasına neden olmuştur. Polimer esaslı kompozit malzemelerin gelişimiyle polimer malzemelerin sertlik ve mukavemet gibi sorunlarının düzeltilmesi sağlanmıştır [1].

Malzemelerde kullanım yerine bağlı olarak birçok özelliğin aynı anda bulunması istenebilir. Çoğu malzemede istenilen özelliklerin saf hallerinde bulunması mümkün değildir. Bu durum metalik malzemeler alaşım malzemelerinin kompozit malzemelerde ise takviye elemanlarının geliştirilmesine yol açmıştır. Yüksek teknolojik özelliklere sahip malzemelerde kullanım yer ve amacına göre; mukavemet, aşınma direnci, boyutsal stabilite darbe dayanımı, ısı ve elektriksel direnç, gibi özelliklerden biri veya bir kaçını aynı zamanda istenebilir. Bu özelliklerin hepsinin bir arada metaller, seramikler ve polimer malzemelerde bulunması zordur. Bu eksikliklerin giderilmesi ve kıt kaynakların korunabilmesi için kompozit malzemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu durum kompozit malzemeler üzerinde daha fazla çalışma ve deneylerin yapılmasını, kompozit malzemelerle ilgili standartların oluşturulmasını zorunlu kılmaktadır. Kompozit malzemelerin var olan avantajlarının artırılması sağlanırken dezavantajlarının azaltılması sağlanmalıdır. Günümüzde gelişen teknoloji yeni malzemelerin oluşturulmasına neden olurken bu malzemelerin bütün teknik özelliklerinin bilinmesi konusunda çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmaktadır.

2.KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit ismi Fransızca karma anlamına gelen kompozit (kompozit) kelimesinden türetilmiştir. Malzeme içeriği olarak birbirinden şekilleri ve kimyasal özellikleriyle ayrılmış bileşenlerin mikro ve makro karışımlarıyla meydana gelen yapılardır [1]-[2]. Uygulamada kompozit malzemeler genel olarak bileşenlerin makro düzeyde bir araya geldiği malzemeler olarak tanımlanır [3]. Kompozit malzemeler birbirinin eksik ya da yetersiz yönlerini tamamlayacak şekilde bir araya getirilen malzemelerden oluşmuştur. Birbiri içerisinde pratikte çözünmeyen bu maddeler kompozit malzemeyi oluşturan fazları meydana getirir. Kompozit yapıyı oluşturan her bir fazın farklı görevi vardır. Fazlar birbiri içerisinde çözünmeyen maddelerden oluştuğu için, malzeme fazları ve bir araya gelen fazların meydana getirdiği ara yüzeyler gözle görülebilir haldedir. Fazlar arasındaki yüzeyler ve fazı oluşturan malzemelerin özellikleri tespit edilebilir. Polimer kompozitlerin yüksek dayanım, boyutsal kararlılık, ısı ve elektriksel direnç, aşınma, korozyon dayanımı, sertlik özellikleri gibi birçok avantajları vardır. Metalik malzemelere yakın dayanım ve sertlik gibi özelliklerinin yanı sıra birim ağırlıklarının düşük olması gibi özellikleri vardır [1]. Kompozit malzemeleri oluşturan iki temel faz ve bunların bir araya gelmesi sonucu oluşan bağ yapısı (ara faz) mevcuttur. Çizelge 2.1 de çeşitli kompozit malzemelerinin takviye elemanları ve bulunduğu formlar görülmektedir.

Çizelge 2.1. Çeşitli takviye elemanları ve kullanım şekilleri [4].

| Matris Malzemeleri | Takviye Elemanları | Kompozit Yapı Şekli |
|--------------------|--------------------|--|
| Polimerler | Lifler Whiskers | Tabakalar Film – Folyo |
| Metaller | Pudra Yonga | Honeycomb (Bal Peteği) Sürekli elyaf sarma |
| Seramikler | Granül | Kaplamalar (Laminant) |

Matris ve takviye fazının kompoziti oluşturma sürecinde meydana gelen ara fazın malzeme-nin mekanik karakteristiğini belirlediği bilinmelidir.

2.1. KOMPOZİT MALZEME İMALATI

Takviye elemanı ve ana yapıyı oluşturan reçinenin (matris) birlikte kalıplanması şeklinde oluşturulur. Uygulama için çok farklı yöntemler kullanılmaktadır. El yatırma, püskürtme, elyaf sarma, devamlı levha, pultruzon, santrfuj kalıplama, reçine enjeksiyonu, SMC, BMC

gibi yöntemler düşük veya yüksek kapasitede üretime olanak sağlarlar [5],[6],[7]. Kullanılan yöntemlerin hemen hemen tamamının temeli takviye elemanının yeteri kadar ıslatılmasına dayanmaktadır. Sıvı haldeki reçinenin akışkanlık direnci (viskozite) önemli yer tutmaktadır. Akışkanlık direnci ile elyafın ıslatılabilirliği arasında ters orantı durumu söz konusudur. Viskozite değeri ne kadar düşerse elyafın ıslatılma hızı o oranda artar. Bazı reçineler de viskozite değeri sıcaklığın yükseltilmesi ile ayarlanabilir. Termoplastik reçine ergime noktasına kadar ısıtıldığında hal dönüşümüne uğrayarak viskoz sıvı haline geçer. Basıç etkisiyle kalıplanması mümkün hale gelir [4]. Takviye elemanı ve reçine arasında oluşan bağ yapısı (ara yüzey) kompozitin dayanımını, mekanik özelliklerini ve kalitesini belirler. Takviye elemanının yerleşim şekli ve matris malzemesine oranı diğer önemli faktörlerdir [7].

2.2. KOMPOZİT MALZEME TÜRLERİ

Metal Matrisli kompozit malzemeler (MMC)

Seramik Matrisli kompozitler (SMC)

Polimer Matrisli kompozitler (PMC)

2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMC)

Metallik matris elemanının takviye ve dolgu malzemeleriyle eritme, vakum emdirme, difüzyon kaynağı ve sıcak presleme gibi yöntemlerin uygulanması ile metal matrisli kompozitler üretimi yapılmaktadır. Metallik malzemeler saf hallerinde düşük mukavemetli ve yumuşak yapıdadır. Diğer metallerle alaşım yapılması ve çeşitli biçimlendirme yöntemleriyle istenilen mukavemet ve sertlik değerlerine ulaşması sağlanmaktadır. Alaşım halindeki malzeme izotropik yapıdadır. Üzerlerine etki eden yük veya kuvvet sonucu hemen kırılmazlar. İzotropik yapıları nedeniyle yük ve kuvveti

malzeme genelinde dağıtma özellikleri vardır. Malzemede tokluk ve mukavemet özelliklerinin uygun değerlerde olması istenilen alanlarda metallere, makine ve malzeme mühendisliğinde yoğun olarak tercih edilir. Bununla birlikte bazı metallere lif, tanecik veya tabaka yapılı takviye elemanlarıyla geliştirilerek kompozit malzeme imalinde kullanılmaktadır. Bu şekilde alaşım malzemelerin yerine tercih edilmektedirler. Bu tip kompozitler jet motorları yüksek mukavemet gerektiren yerlerde ve imalat kolaylığı istenen yerlerde geniş bir kullanım alanına sahiptir [8].

2.2.2. Seramik Kompozitler (SMC)

Seramik malzemeler düşük yoğunluğa sahip mukavemeti ve sertliği yüksek değerlerde olan gevrek malzemelerdir. Seramiklerin kırılma özeliğine sahip olması güvensiz malzeme olarak nitelendirilmesine yol açmıştır. Termal ve kimyasal dayanımları çok iyi olsa da sert olmaları işlenmelerini güçleştirmektedir. Seramik malzemelerden imal edilecek iş parçalarının çok iyi tasarlanmasını gerektirir. Bu durum maliyeti yükselmesine neden olur. Maliyet açısından yapısal ve işlevsel niteliği daha elverişli olan ileri teknoloji seramikleri tercih edilmektedir. Bazı ileri teknoloji seramikleri SiC, SiN₄, B₄C, CbN, TiC, TiN, Al₂O₃ olarak sıralanabilir. Bu bileşik yapıdaki seramikler değişik morfolojilere sahiptir. Kullanım yeri ve amacına göre takviye elemanlarının birlikte kullanımı sayesinde seramik kompozitler geliştirilmiştir. Askeri amaçlı olarak kurşun geçirmez zırh yapımında, uzay ve havacılık sanayinde yoğun olarak tercih edilmektedirler [8].

2.2.3. Polimer Kompozitler (PMC)

Elyaf liflerle takviye edilmiş polimer kompozitlerin sanayide geniş bir kullanım alanı vardır. Takviye elemanı kullanımıyla plastiklerin sahip olduğu dezavantajların giderilmesi amacıyla üretilen yapılardır. Takviye elemanı olarak karbon- kevlar, boron ve cam elyafların kullanımı yaygındır. Çizelge 2.2 de takviye elyafların özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.2. Takviye elyaflarının özellikleri [15].

| MALZEME | Özgül ağırlık gr/cm ³ | Çekme mukavemeti N/mm ² | Elastik mukavemet N/mm ² |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Cam elyafı | 2, 54 | 2410 | 70000 |
| Karbon elyafı | 1, 75 | 3100 | 220000 |
| Kevlar | 1, 46 | 3600 | 124000 |

Polimer kompozitlerde bağlayıcı malzeme olarak polyester ve epoksi yoğun olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak kullanılan liflerin oranı arttıkça malzemenin dayanımı da aynı oranda artış göstermektedir. Takviye elemanının malzemesinin kompozit yapıda bulunma oranının sınırı vardır. Bu sınır aşıldığında takviye elemanı matris malzemesinden daha sert yapıda olduğundan gevrek malzeme özellikleri göstermeye başlar. Polimer kompozitlerin en büyük özelliği yüksek özgül mukavemetin özgül ağırlığa oranı ve yüksek özgül elastisite modülüne sahip olmasıdır. Bu nedenle diğer malzemelerden daha üstün özelliklere sahiptir. Örneğin; Yüksek mukavemete sahip çeliklerde özgül mukavemet 110 Nm/gr civarındayken Cam lifli polyesterde 620 Nm/gr karbon lifli epoksi de 700Nm/gr, Kevlar lifli epoksidede 886 Nm/gr gibi yüksek değerlere ulaşmaktadır. Karbon liflerin elastisite modülü Alüminyum malzemenin 5 katı değere sahiptir. Savunma ve havacılık alanında polimer kompozitler gün geçtikçe Alüminyum un yerini almaktadır [9].

2.3.KOMPOZİT YAPIMINDA KULLANILAN MADDELER

2.3.1. Matris Faz

Matris faz kompozit malzemelerde temel olarak 3 önemli işlevi yerine getirmektedir. Bunlar:

- Elyafı bir arada ve istenilen formda tutmak,
- Malzeme üzerine etki eden yükü transfer etmek,
- Elyafı çevresel, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı korumak, olarak sıralanabilir.

İdeal yapıdaki matris malzemesinin viskozitesi düşük değerlerde olmalı ve takviye elemanlarını iyice ıslatma yeteneği bulunması istenir. Uygulama sonrasında katı hale geçerek takviye elemanlarını sabitleyebilmeli ve malzemenin istenilen formu almasını sağlamalıdır. Matris malzemenin özellikleri elyafın görevlerini yerine getirebilmesi için önemlidir. Matris fazı malzeme üzerine etki eden yükü eşit olarak dağıtmalı, heterojen bir malzeme olan kompozit malzemeye homojen malzeme özelliği kazandırmalıdır. Kesme kuvvetleri altındaki malzemenin dayanımı elyaflarla matris malzeme arasında iyi bir bağ yapı oluşmasına bağlıdır. Elyaf yönlenmelerinde kuvvet yönüne dik doğrultuda elyaf ile matris arasındaki bağ yapı ve matrisin mekanik özellikleri kompozit malzemenin mukavemet sınırlarını belirlemektedir. Matris malzeme elyaf takviyeye göre zayıf ve esnek yapıya sahiptir. Matrisin kesme dayanımı

ve bağ kuvvetleri yüksek değerlerde olduğundan gevrek malzeme özellikleri göstermektedir. Bu durumda elyaf veya matriste oluşacak çatlak yön değiştirmeden gelişerek sonuçta kırılma olayının meydana gelmesine yol açacaktır. Kırılma yüzeyi temiz ve parlak yapıdadır (Aynalanma) [2]. Kompozit malzemenin mukavemet değerinin düşük olduğu durumlarda, elyaflar matris içerisinde boşlukta hareket eder haldedir. Bu durum kompozitin zayıflamasına neden olur. Ortalama bağ değerine sahip kompozitlerde ise kuvvet yönüne dik doğrultuda oluşan bir çatlak elyaf- matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda sünek malzemelerin kopma hasarına benzeyen saçaklı bir yüzey görülür. Polimer matrisli kompozitlerde matris olarak sentetik reçineler kullanılmaktadır. Polimerlerin termoset, termoplastik ve elastomer olarak üç farklı türü bulunmaktadır. Günümüzde elastomer reçineler de bu amaçla kullanılmaktadır. Termoset reçinelerden doymamış polyester ve epoksi, termoplastik reçinelerden ise poliamid, polipropilen, polistiren, ve doymuş polyester en çok tercih edilen reçineler olarak sıralanabilir. Matris malzemesi belirlenirken takviye elemanının özellikleri dikkate alınmalıdır. Örneğin kimyasal bileşiminde hidrojen bulunan poliamid gurubu reçinelerin su ve nem tutma özelliği bulunmaktadır [7].

2.3.2. Matrisin İşlevi

Kompozit malzemeye etki eden kuvvetlerin yapı içerisinde dağılımını sağlamak, takviye elemanlarını bir arada ve istenilen formda tutmak matrisin başlıca görevidir. Matrisin kırılma ve gevrek yapıya sahip takviye elemanlarını çevresel ve kimyasal etkilerden koruması istenir. Yüksek plastiklik ve süneklik değerlerine sahip matris malzeme tercih edilmesiyle plastik deformasyon ve çatlakların önlenmesi sağlanabilmektedir. Çarpma ve ani darbe durumlarında kuvvetlerin malzeme tarafından absorbe edilmesi beklenebilir. Kompozit malzemeler matris malzemelerinin isimleriyle anılırlar. Bunlar; Polimer matrisli kompozitler, Seramik matrisli kompozitler ve Metal matrisli kompozitler olarak sıralanabilir [8].

2.3.3. Metal Matrisler

Makine ve Metalürji Mühendisliği alanında yoğun olarak kullanılmaktadır. Metalik malzemeler orta ve yüksek yoğunluğa sahip olmakla, birlikte tokluk ve mukavemet özellik çiftinin en uygun değerlerde olduğu malzemedir. Metalik malzemeler saf halde yumuşaktır ve mukavemet değerleri düşüktür. Tek başlarına saf halde kullanımı tercih edilmez. Bu olumsuzluk alaşım yapılarak giderilmektedir, soğuk ve sıcak

biçimlendirmeye uygunluğu sağlanmaktadır. Isıl işlemler uygulanarak mukavemet ve sertlik değerleri arttırılabilir. Metalik malzemeler yoğun yüklemelerin tesiri altında kaldığında, kırılmadan akma eğilimi göstererek üzerine etki eden yükü malzeme geneline yayarlar. Ayrıca metalik malzemeler dökme ve dövme işlemlerine elverişli olup kaynaklı ve mekanik birleştirmeye uygundur. En büyük dezavantajları korozif ortamların oluşturduğu olumsuzluklardan büyük ölçüde etkilenmeleridir [2].

2.3.4. Seramik Matrisler

Düşük yoğunluğa sahip gevrek malzemelerdir. Mukavemet değerleri yüksek ve aşırı sert yapıya sahiptir. Yüksek ergime sıcaklıkları ve sertlikleri nedeniyle işlenmeleri zordur [2]. Refrakterlik özelliği kazandırılabilen seramik matrisli kompozitler uzay ve havacılık sanayinde, sanayi kesici takım üretiminde yoğun olarak tercih edilirler.

2.3.5. Polimer Matrisler

Düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Polimer malzemeler ile tıpkı metallerde olduğu gibi döküm, kalıplama gibi yöntemlerle karmaşık yapılar üretilebilmektedir. Mekanik birleştirme elemanları ile birleştirme işlemi yapılabilmekte, kaynak ve yapıştırma işlemleri uygulanabilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde seramik ve metalik matrisli kompozitlere göre maliyeti düşüktür. Çizelge 2.3 te elyaf takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.3. Elyaf takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri [8].

| MALZEME | Özgül ağırlık gr/cm ³ | Çekme mukavemeti N/mm ² | Elastik mukavemet N/mm ² |
|-------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Camli polteter | 1, 5- 2, 1 | 200 -340 | 55000 - 130000 |
| Karbonlifi epoksi | 1, 5 -1, 8 | 1860 | 145000 |
| Kevlar epoksi | 2, 36 | 2240 | 76000 |
| Boronlifi epoksi | 1, 4 | 1240 | 176000 |

Talaş kaldırarak işlemeye yatkın malzemelerdir. Sık kullanılan polimer matrisler Termoplastik ve Termoset olarak ikiye ayrılır. Günümüzde kullanılan kompozit malzemelerin %90 kadarı polimer esaslı matris malzemelerin kullanımıyla gerçekleştirilmektedir [2]. Elastomerler ise esnek yapıları nedeniyle yüksek şekil değişimi istenilen alanlarda tercih edilmektedir.

2.3.5.1. Termoplastik Malzemeler

Geniş bir ürün yelpazesine sahip olan termoplastiklerde matris olarak kullanılabilen ürün sayısı sınırlıdır. Oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklarda katı halde bulunurlar. Isıl yüklemelere karşı hassas yapıdadırlar ve ısıtıldıklarında yumuşamaya başlarlar. Isı artışının devam etmesi sıvı hale dönüşmelerine ve son olarak yanarak kalıcı hasara uğramalarına yol açar. Isıl yüklemelere karşı zayıflığı nedeniyle matris malzemesi olarak kullanımı tercih edilmez. Buna karşın tokluk, uzun ömür, geri dönüşüm proseslerine uygunluk, sertleşme işleminde katalizör veya ek kütleme işlemlerine ihtiyaç duyulmaması gibi avantajları bulunmaktadır. Talaşlı imalata uygundur. Yüksek sertlik ve çarpma değerlerine sahip olan termoplastiklerin ani yükleme ve darbeleri absorbe etme yeteneği vardır. Günümüzde kullanılan termoplastik malzemelerin hammadde maliyetleri yüksektir [1]. Çizelge 2.4'te bazı termoplastik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.4. Termoplastik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri [8].

| Malzeme Özellikleri | Polietilen | Polipropilen | PA 6.6 |
|--|------------|--------------|--------|
| Yoğunluk (g/cm ³) | 0,95 | 0,90 | 1,14 |
| Elastik modül (MPa) | 1000 | 1400 | 700 |
| Çekme dayanımı (MPa) | 30 | 35 | 70 |
| Kopma uzaması (%) | 10-1200 | 10-500 | 300 |
| Isıl iletkenlik | 0,48 | 0,12 | 0,25 |
| Isıl genişleme katsayısı α (1/°C) | -- | 175 | 260 |

2.3.5.2. Termoset Malzemeler

Matris malzemesi olarak en çok tercih edilen malzemelerdir. Isıtma ve kimyasal tepkimeler gibi kütleme yöntemleri uygulanarak katı hale dönüşüp sağlam yapı özellikleri kazanması sağlanabilir. Termoset plastiklerin polimerizasyon işlemi başlatıldığında sürecin geri dönüşü yoktur. Yüksek sıcaklıklarda malzeme yapısında değişim olmazken (genleşme durumu hariç), ısı arttırıldıkça yanarak bozulma gerçekleşebilmektedir. Termoset matris malzemeleri sertleşmelerini önlemek amacıyla soğuk ortamlarda depo edilirler. Soğutulmuş ortamdan kullanım için çıkartıldığında 1-4 hafta süresince özelliklerini kaybetmezler. Bu süre sonunda özelliklerini yitirerek katı

hale dönüşürler. Soğuk ortamda özelliklerini kaybetmeden 1-15 ay kadar depolanabilmektedirler. Bu durum imalatta pregpreg (ön hazırlık yapılmış malzeme) malzemelerin hazırlanarak depolanması ve sürekli imalat prosesleri için ön hazırlık yapılmasına olanak sağlamaktadır Çizelge 2.5'te bazı termoset malzemelerin özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.5. Termoset malzemelerin özellikleri[8].

| Malzeme Özellikleri | Epoksi Reçine | Polyester Reçine | Fenolik Reçine |
|--------------------------------|---------------|------------------|----------------|
| Yoğunluk g/cm ³ | 1, 11 | 1, 04-1, 46 | 1, 24-1, 32 |
| Çekme dayanımı (MPa) | 70 | 41-90 | 34-62 |
| Kopma uzaması (%) | 3-6 | 4, 2 | 1, 5-2, 0 |
| Isıl iletkenlik | 0, 19 | 0, 19 | 0, 15 |
| Isıl genleşme katsayısı (1/°C) | 45-65 | 55-100 | 68 |

2.4. MATRİS FAZINDA İSTENİLEN ÖZELLİKLER

Kompozit yapıların imalinde kullanılan matris malzemelerde kullanım yeri ve amacına göre bir veya daha fazla özelliğin bir arada bulunması istenebilir. Bu özellikler

- Yüksek mukavemet,
- Elastik uzama,
- Kayma mukavemeti,
- Isıl ve boyutsal stabilite,
- Çevresel dayanım,
- Kimyasal dayanım, elektriksel direnç,
- Düşük nem absorpsiyonu,
- Kütleme zamanı,
- Hammadde ve işlem maliyeti, olarak sıralanabilir [10].

2.5. YOĞUN OLARAK KULLANILAN MATRİS MALZEMELERİ

Günümüzde en çok kullanım alanı bulan malzeme CTP nin üretiminde doymamış polyester reçineler kullanılmaktadır. Katalizöre ihtiyaç duyan bu reçine polkarboksilli asit ve bir polialkolün reaksiyonu ile elde edilmektedir. Katalizör kullanımı ile oda sıcaklığı veya ısı etkisiyle katılaşma durumu oluşturulur. En fazla tercih edilen diğer reçine ise epoksi reçinelerdir. Polyester reçinelerden kimyasal bileşim ve polimerizasyon yöntemleriyle ayrılırlar. Polyester reçineler gibi katalizöre ihtiyaç

duyarlar ve katalizör kullanımıyla ağ yapı (cross link) meydana getirirler. Katılma sürecinde gaz salınımı yoktur. Çekme oranı (kalıplama sonrasında boyutsal büzüşme) polyestere göre düşük değerlerde olmaktadır. Vinil ester reçineler ise diğer bir tür olmakla beraber polyester reçinenin sertleşebilme ve epoksi reçinenin kimyasal özelliklerini taşımaktadır. Doymamış asit ve epoksi reçine kullanımı ile polyester reçine üretimi mümkün olmaktadır. Üretilen polimerin stiren içerisinde çözündürülmesiyle polyester ve epoksinin üstün özelliklerinin bu reçinede bulunması sağlanabilmektedir [5],[6].

Polyester reçineler iki ana grupta incelenmektedir.

- Doymamış polyesterler
- Doymuş polyesterler

Doymamış polyester reçineler katılma ve uygun bir yapı oluşturmak için katalizöre ihtiyaç duyan termoset özelliği taşıyan malzemelerdir. Değişik kullanım amaçlarına yönelik değişik özelliklere sahip polyester reçineler geliştirilmiştir [9]. Ticari olarak yoğun şekilde kullanılan bu reçineler ve özellikleri Jelkot reçineleri, kimyasal dayanımı yüksek reçineler, stiren gaz salınımı düşük reçineler, düşük boyutsal çekme değerine sahip reçineler, alev geciktirme özellikli reçineler şeklinde sıralanabilir [5],[6],[11].

Doymuş polyester reçinelerde durum farklıdır. Doymuş omurgaya sahiptir ve doymamış polimerler gibi reaksiyona açık değildir. Bu nedenle moleküler bazda bileşik oluşturma eğiliminde olmazlar. Moleküler ağırlığı düşük plastifiyanlar olarak kullanımı yaygındır.

2.5.1. Epoksi Reçineleri

Epoksi reçineleri bisfenol A ile epiklorhidrinin reaksiyonu sonucu oluşan ürünler olup katalizör ile karıştırıldığında oda sıcaklığında veya otoklav da kütleme işlemi sonucu (70-90°C) sertleşerek plastikleşir. Düşük vizkozite değerlerine sahip olan çeşitlerinin yanı sıra katı halde bulunabilmeleri ısı, elektriksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yüksek değerlerde olması tercih edilmelerine neden olmaktadır. Epoksi reçinelerinin depolama ömrü oda sıcaklığında 24 aydır.

2.5.2. Polyesterler

Denizcilik sektörü ve inşaat sanayinde en çok tercih edilen malzemedir. Ortoflatik ve İsoflatik olarak adlandırılan iki türü vardır. Özellikle suya dayanım konusunda daha iyi özelliklere sahip olan isoflatik polyesterlerin denizcilik sektöründe kullanımı yaygındır. Polimerizasyon sürecinde katalizör ve hızlandırıcı malzemelere gerek duyulmaktadır.

Reçinelerin kolay uygulanma ve düşük maliyet avantajlarını oluştururken uygulama sonrasında da devam eden stiren gazı salınımı ve kısa raf ömrüne sahip olması zayıf yönlerini oluşturmaktadır. Sıvı polyester malzeme katalizör ilavesi ile kürlleme işlemine tabi tutularak katılaştırılması sağlanmaktadır. Katılaştıklarında hava koşullarına ve darbelerle karşı dayanım kazandıkları görülmektedir.

2.5.3. Üretan Reçineleri

İzosiyanat oda sıcaklığında birleştirilmesi sonucu ortaya çıkan malzemedir. Meydana gelen malzeme köpük formundadır. Yan ürün olarak gaz çıkışı meydana gelmektedir. Kimyasal dirençleri yüksek değerlere sahiptir. Yalıtım özelliği nedeniyle tercih edilen bir malzemedir.

2.5.4. Fenolik Reçineler

Fenol formaldehitin kondenzasyon polimerizasyonu sonucu oluşan bir üründür. Çeşitli türevleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Katı ve sıvı formda olabilmektedir. Sıvı reçine üretimi ülkemizde yapılmaktadır.

2.5.5. Vinil Ester

Çevresel ve kimyasal yüklemelere karşı polyester reçinelere göre daha yüksek dayanıma sahiptir. Yüksek mekanik özellikleri nedeniyle tercih edilse de maliyetinin yüksek oluşu ve stiren gazı salınımı dezavantajlarını oluşturmaktadır. İkincil kürlleme işlemleri sonucu daha iyi özellikler kazanması sağlanabilmektedir. Sertleşme sürecinde boyutsal kararlılığa sahip olmaması en büyük olumsuz yönünü oluşturmaktadır.

2.5.6. Bismaleimid

Yüksek ısısal dayanımı sayesinde uçak motorlarında ve ısıyla temas halindeki parçalarda kullanılmaktadır. Sıvı halde 230 °C katı halde 250°C ye kadar dayanıklıdır. Maliyeti nedeniyle kullanım alanı sınırlıdır.

2.5.7. Silikon

Düşük maliyeti ve ısısal direnci nedeniyle tercih edilen matris malzemelerindendir. Kürlleme işleminde yüksek ısıya ihtiyaç duyulması malzemenin en büyük dezavantajını teşkil etmektedir.

2.5.8. Cynate Ester

Havacılık sanayinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yalıtkanlık özelliği çok yüksek bir malzemedir. Sıvı halde 200 °C ye kadar özelliklerini yitirmediği görülmektedir.

2.6. MONOMERLER

Reçine içerisine ilave edilen monomerlerin iki görevi bulunmaktadır. Reçinenin akışkanlık direncini düşürerek çözücü özellik göstermesi ve polimer zincirlerinin düzgün şekilde bağ yapı (cross link) oluşturarak birbirlerine bağlanmasını kolaylaştırmaktır. Düşük akışkanlık direnci nedeniyle en fazla stiren tercih edilmektedir. Özellik olarak berrak, ultraviyole day-anımı yüksek reçinelerde ise metil-metakrilat ve n-butil metakrilat tercih edilmektedir [5],[6].

2.7. TAKVİYE EDEN FAZ

Kompozit malzemelerde takviye elemanı matrisin (reçinenin) özelliklerinin gelişmesini sağlayan her türlü elyaf ve malzemeyi kapsayan bir olgudur. Takviye eden faz, kompozitlerde iskelet yapıyı oluşturan ve malzeme üzerine etki eden yükün %70 - %80 kadarını taşıyan birimdir. Matris ve takviye elemanının uyumuna ve oluşturdukları bağ yapının kalitesine göre kompozitin mukavemet değeri değişim gösterir. Kompozit malzemelerin mukavemeti aynı zamanda takviye oranına ve yönlenmesine bağlı olmaktadır. Takviye elemanının mukavemet değerlerine etkisi matris malzemesi tarafından ıslatılması ve sarılması olayı ile ilgilidir. Matrisin ıslatabileceği takviye elemanının miktarı sınırlayıcı rol oynamaktadır. Islatılabilecek elyaf miktarını belirleyen bu sınır değerine kadar kompozit malzemenin mukavemeti artış gösterir. Bu sınırın aşılması matrisin yeteri kadar ıslatma işlevini yerine getiremediği durumlarda ise mukavemet değerlerinde düşüşler meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerde matris ve takviye elemanının birleşmesinden meydana gelen ara yüzey alanı büyüdükçe mukavemet değeri artar. Kompozit malzemelerde ara yüzeyin alanını büyütme için elyaflar üzerinde çeşitli yüzey işlemleri yapılmaktadır. Elyaf malzeme ile üzerine etki eden kuvvet ile aynı doğrultuda olması mukavemeti etkileyen diğer bir faktördür. Yük elyaflara dik doğrultuda uygulanırsa istenilen mukavemet değerlerine ulaşılması

mümkün olamaz ve hasar oluşumu durumu oluşur. Kullanım yerlerine göre kuvvetler birkaç yönde aynı anda etkiyebilir. Bu durumda elyafların 2 ya da 3 boyutlu yerleşim düzeninde olması olumsuzluğun giderilmesinde önemli rol oynadığı görülmektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan elyaf türleri az sayıdadır. Özellikle takviye için kullanılan elyafların boyu 3mm den başlayarak metrelerce uzunluğa sahip olabilir [5],[6]. Elyaf türlerine karbon elyafı, akrilik polyester, pamuk, yün, ve naylon elyaf lar örnek verilebilir. Ayrıca kullanımı sağlık açısından tehlike oluştursa da asbest de bu grupta sayılabilir.

2.8. PARÇACIK TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

Matris malzeme içerisine takviye malzemesinin partiküller halinde yerleştirilmesi ile meydana getirilen yapılardır. Oluşturulan yapının dayanımı kullanılan parçacıkların sertliğine bağlıdır. Yaygın olarak polimer matris içerisine metal ve seramik parçacıkların kullanılması tercih edilir. Özellikle metal parçacıkların kullanılması ısı ve elektriksel iletkenliği sağlarken, metal matris içerisine kullanılan seramik parçacıklar kompozit malzemenin sertliğini ve ısı direncinin artmasına neden olur.

2.9. DAĞINIMLA MUKAVETLENDİRİLMİŞ KOMPOZİTLER

(Dsipersiyon malzemeler) Yüksek ısı kararlılığına sahip ve boyutları mikrondan küçük parçacıkların homojen bir dağılım halinde metal matris içerisinde bulundurulmasıyla oluşturulan yapıdır. Diğer takviye elemanlarının kullanıldığı kompozit malzemelere göre dayanımı daha yüksektir. Metal alaşımlarında görülen izotropik yapıya benzer homojen dağılımın meydana gelmesi sağlanabilmektedir.

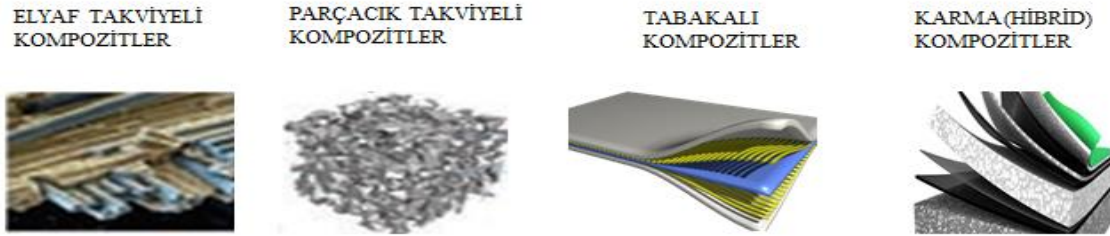
2.10. ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELER

Çekme, eğilme, çarpma dayanımları düşük değerlere sahip olan kırılma matris malzeme-lerin zayıf teknolojik özelliklerinin iyileştirilmesi, malzemenin tokluk ve süneklik değerlerinin artırılması gibi amaçlarla elyaf larla takviye edilmesiyle üretilen yapılardır. Elyaf, kesiti boyuna göre oranı en az 1:100 olan ve katı olmasına rağmen kalıplanabilecek kadar esnek malzemeler olarak tanımlanır. Değişik tür ve çeşitleri vardır. Dışarıdan etki eden yük ve kuvvetleri karşılayan ana birim elyaf tır [1],[3]. Matris

malzeme tarafından istenilen biçim ve yapıda tutulur. Belirli tasarım prensipleri dahilinde malzemenin teknolojik yapısını oluşturmaktadır. Özellikle polimerik kompozitler hazırlanırken bazı önemli noktalar malzemenin karakterini belirler.

- Elyafın mekanik özellikleri,
- Elyafın matris malzemeye miktar olarak oranı,
- Elyafın kalınlığı,
- Elyafın uygulanan yük ve kuvvetlere göre yönelme biçimi, bu temel noktaların en önemlileridir.

KOMPOZİT MALZEMELER

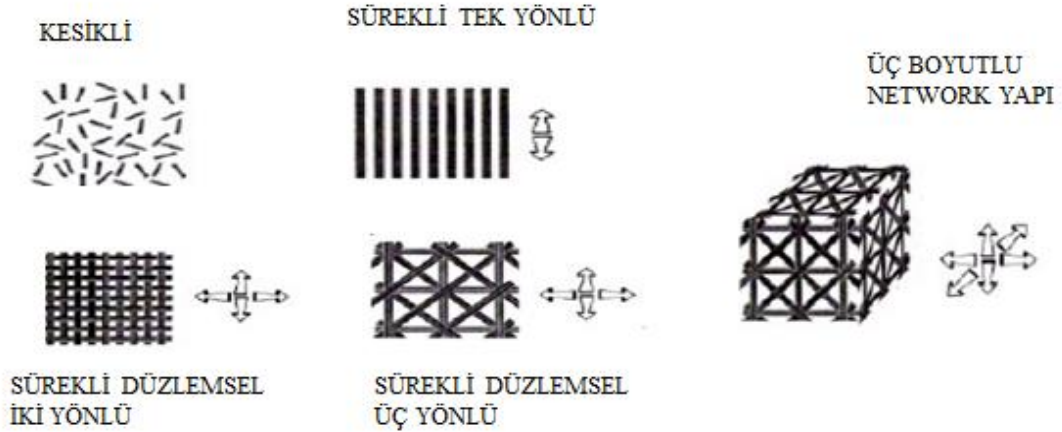


Şekil 2.1. Dolgu türlerine göre Kompozit Malzemeler [12].

Elyafın dağılımı kompozit malzemenin mukavemetini belirlemektedir. Elyafın çap ve uzunluğu arttıkça, matrisin elyaf liflere ilettiği yük miktarının arttığı görülmektedir. Elyafın hatasız olması malzemeye homojen davranış kazandırmaktadır. Belli bir oranın üzerinde kullanılan takviye malzemeleri, takviye eleman miktarının matris malzeme miktarına göre fazla olması teknolojik özelliklerde azalmalara neden olmaktadır. Polimer matrisin işlevini tamamen veya kısmen kaybetmesi kompozit malzeme içerisinde bulunan elyafı bir arada tutamayacağından, malzemeyi işlevlerini yerine getiremez hale getirecektir [3],[13]. Kompozitlerin özelliklerini elyaf kalınlığı da direkt olarak etkilediği görülmektedir. İnce liflerle oluşturulan kompozitlerde polimer matris tarafından ıslatılan alan daha büyük olmaktadır. Polimerin elyaf eğme yüzeyinin artması elyaf–matris etkileşiminin artmasına neden olduğu görülmektedir. Bu şekilde kompozit yapı içerisinde yük ve kuvvet dağılımının daha sağlıklı gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Elyaf bir araya getirilerek oluşturulan demetler elyafın imal edildiği polimerin blok halinde olan formuna göre daha mukavemetli yapıya sahiptir. Demet halindeki elyafı etkilenen yük ve kuvvetler elyafı kopma ve çatlama gibi kusurlar oluştursa bile, zarar sadece etkilenen elyafı sınırlı kalmaktadır [13]. Demeti

oluşturan diğer elyaflara bu olumsuzluklar aktarılmaz. Yığın halindeki malzemelerden, özellikle büyük parçacıklardan oluşturulan kompozitlerde ise hasar malzeme içerisinde ilerleyerek malzemede kalıcı hasarlar oluşmasına neden olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitler bu nedenle daha fazla tercih edilir. Elyafların malzeme içerisindeki dağılımı da yapının mukavemetini etkileyen bir diğer unsurdur. Uzun elyafların birbirine paralel şekilde yerleştirilmesi elyaf doğrultusunda etki eden kuvvetlere karşı yüksek çekme dayanımı sağlarken elyaf doğrultusuna dik etki eden kuvvetler karşısında mukavemetinin yetersiz olduğu görülmektedir. İki boyutlu elyaf yerleştirmeleri sonucu iki yönde de eşit dayanım sağlanır. Böylelikle boyutsal olarak kısa elyafların kullanıldığı kompozitlerde izotropik bir yapı oluşturulabilmektedir [9],[14]. Çarpma, vurma, ısıl iletkenlik, ısıl genleşme gibi davranışlar elyafların yönlendirme eksenine bağlıdır. Kompozit malzemelerde elyafların yapı içerisindeki yönlendirilmesi ile teknolojik özelliklerde gelişme sağlanabilmektedir. Mukavemet değerlerinin maksimum olduğu yerleşim şekilleri ve mekanik dayanımın yüksek olduğu yönler Şekil 2.2 de görülmektedir.

ELYAF YERLEŞİM KONFİĞÜRASYONLARI



Şekil.2.2. Kompozit malzeme içerisine elyafların yerleşim şekilleri [13].

Kesikli elyaf kullanılarak meydana getirilen yapı tıpkı partikül takviyeli kompozitlerde olduğu gibi izotropik yapıya sahip malzeme özelliklerine benzer özellikler göstermektedirler. Sürekli elyaf kullanımında ise elyafların kuvvet doğrultusuna paralel yerleştirilmesi mukavemet konusunda iyi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Network yani uzay yapı ise malzemede istenilen bir durumdur. Bütün yönlerden ve değişken açılardan uygulanan kuvvet yüklemelerine karşı mukavemeti yüksek yapıları oluşturmaktadır.

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞI

Malzemelerin sabit yükleme şartları, gerilme durumu ve ısı etkileşim sonucu yapısında meydana gelen plastik deformasyonun zamana bağlı değişimini belirten olgudur. Sürünme ve yorulma davranışı, kompozit malzemede kullanılan yapıların tür ve türevlerine, kullanım ortamı, kullanım sıcaklığı, yükleme cinsi, yükleme miktarı gibi değişkenlere bağlıdır. Malzemelerde meydana gelen sürünme olayı istenmeyen bir durumdur. Sıcaklık ve yükleme miktarındaki artış sürünme olayındaki artışı tetiklemektedir. Kullanım yerinde sıcaklık, basınç ve yüklemelerden dolayı sürünme etkisine maruz kalan malzemelerin içyapılarında değişiklikler yapılması yaygın bir yöntemdir [15]. İçyapı üzerinde yapılan revizyonlarla kullanım yerine uygun özelliklere sahip malzeme geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Çok rijit yapıya sahip metal malzemelerde olduğu gibi karbon liflerle güçlendirilmiş plastikler de gevrek ve kırılğan bir yapıya sahiptir. Karbon lifli kompozitler darbe karşısında bir direnç göstermezler ve darbe dirençleri oldukça düşüktür. Kompozit malzemelerde lifler kuvvet yönüne dik, paralel veya geliş güzel yerleştirilebilirler. Lifler yönlenmiş durumdayken kompozit anizotropik yapıdadır. Liflerin rastgele dağıtılmasıyla kompozit malzemenin düzlemsel boyutta izotropik yapı alması sağlanır. Malzemeye uygulanan kuvvet ve lifler birbirine paralel ise yapıda bulunan lifler ve matris malzemesi aynı oranda şekil değiştirir. Buna eş şekil değiştirme durumu denir ve '3.1' numaralı formül ile ifade edilir [15].

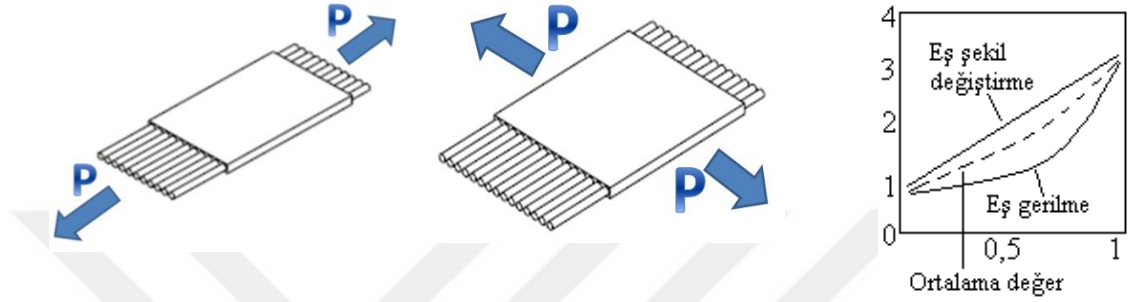
$$E_k = E_f \times V_f + (1 - E_m) \quad (3.1)$$

- Eş şekil değiştirme durumu

Kompozit malzemelerin çekme mukavemeti yapıyı oluşturan liflerin mukavemeti kadardır. Liflerin kopması malzemenin özelliklerini yitirmesi anlamına gelmektedir. Malzeme yapısında kullanılan liflerin kuvvet yönüne dik şekilde bulunduğu durumda matris ile lifler aynı oranda yük taşır. Eş gerilme hali diye bilinen bu yükleme durumunda elastikiyet modülü (2) numaralı formül ile ifade edilebilir [15],[16].

$$E_k = \frac{E_m - E_f}{E_m \times V_f + (1 - V_f) \times E_f} \quad (.3.2)$$

- Eş gerilme halinde elastikiyet modülü formülü



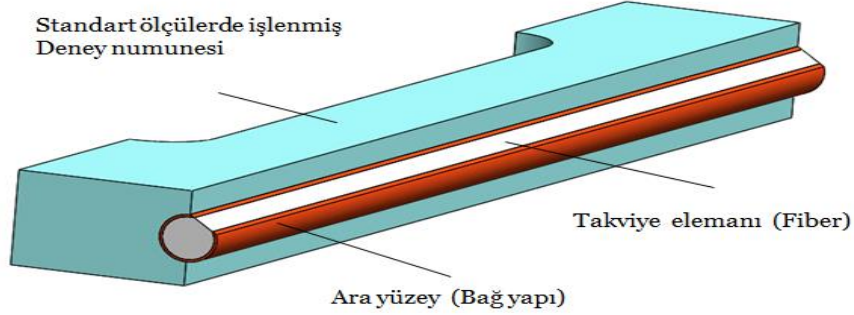
Şekil 3.1. Kompozitlerin yükleme durumları [15].

Kompozit malzemelerin yapısında liflerin kuvvet doğrultusuna paralel olarak yerleştirilmesiyle maksimum mukavemet değeri elde edilmiş olur. Kompozit malzemelerin mukavemetini etkileyen diğer bir unsur da matris ve elyaf arasında oluşan bağın yapısıdır. Taramalı elektron mikroskopisi kullanılarak, kompozit malzemelere uygulanan deneylerde meydana gelen kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle malzemenin içyapısı, reçinenin ıslatma kabiliyeti ve bağ yapının oluşumuyla ilgili veriler elde edilebilmektedir.

3.1. ARA FAZ

Kompozit malzemelere kuvvet uygulanması durumunda fibere etki eden yük ara yüzey (bağ yapı) vasıtasıyla matrise (reçine) yansıtılmaktadır. Bu sayede etki eden kuvvet bütün kompozit yapı tarafından karşılanmış olmaktadır. Kompozit malzemelerin birçok fiziki ve mekanik davranışlarının tespit edilebilmesi fiber - matris gerilim transferlerinin doğru şekilde analiz edilmesine bağlıdır. Bu analizin daha kompozitin tasarım aşamasındayken yapılması ve malzemelerin uygunluğunun belirlenmesi gerekmektedir. Ara yüzeyi güçlü bir yapıya sahip olan kompozitlerin mukavemetleri yüksek elastisite modülleri düşük değerlerdedir. Bu durumun tersine bağ yapının zayıf olduğu hallerde mukavemetin düşük, kırılma direncinin yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Kompozit malzemenin ara yüzey özellikleri korozyon dayanımı ve su içerisindeki

davranışlarını da etkilemektedir. Şekil 3.2’de Arafaz oluşumu görülmektedir. Fiber ve matris arasında oluşan mekanik bağ kompozitin korozyon direncinin yükselmesini sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin ara yüzey özelliklerinin belirlenmesi sayesinde mekanik özelliklerinin doğru biçimde hesaplanması mümkün olmaktadır [17],[18].



Şekil 3.2. Arafaz oluşumu (tek elyaf).

3.1.1. Tutunma Kavramı

Ara yüzey bağının (tutunma) bir çok değişkene bağlı olduğu görülmektedir. Mekanik etkileşim, fiberin matrisi (reçineyi) yeterince absorbe ederek iyi bir ıslanma durumu oluşması, elektrostatik çekim, değişim bağı ve kimyasal reaksiyon bağı, gibi mekanizmalardan fazlasıyla etkilenmektedir. Ayrıca Van Der Waals kuvvetleri ve diğer düşük enerjiye sahip kuvvetler de göz önünde tutulmalıdır [9],[19].

3.1.2. Bağ Yapı Oluşturma Davranışı

Kompozit malzemelerde ara yüzey oluşumunda elyaf ve matris arasında uyumluluğun yakalanması temel problemdir. Matrisin elyaf üzerine kolayca yayılması ve iyi bir ıslatma özelliğinin olması karmaşık parçaların imal edilebilmesine, boşluksuz yapılar üretilmesine olanak sağlamaktadır. Islatabilme özelliğini arttırabilmek için elyaflara yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Kompozit imalatında elyaflar yüksek sıcaklığa maruz kaldığından (MMC) elyaf matris arasında farklı bir etkileşim olduğu görülmektedir. Bu durum intermetalik bileşiklerin oluşumuna ve dayanımın azalmasına neden olmaktadır. Örnek olarak karbon elyaflar alüminyumun ergime noktasının altındaki değerlerde reaksiyona girerek alüminyum karbür (Al_4C_3) yapıyı oluşturmaktadır [20].

Kompozit malzemelerde arabirim kavramı bağ yapısı oluşumuyla ortaya çıkmaktadır. Arabirim takviye, diğer dolgu elemanları ve matristen sonraki en önemli unsurdur. Arabirimin sahip olduğu bağ kuvvetini kompozitin mekanik özelliklerini

belirlemektedir. Tutunma veya arabirim bağının yüksek değerlerde olması dayanımı yüksek sert yapılar oluşmasını sağlarken, düşük değerler dayanımın düşmesine ve sertlik yönünden zayıf yapılar oluşturulmasına neden olmaktadır. Takviye elemanlarının geometrisi ve yerleşimi arabirimin temel özelliklerini meydana getirmektedir. Farklı kimyasal ve mekanik bağların oluşumu takviye ve dolgu elemanlarının geometrisine bağlıdır. Bağ yapı tutunma özellikleri:

- Elyafın yüzey kalite ve şekline
- Malzemelerin kimyasal bileşimine
- Temas açısı ve basınçlarına
- Elyaf yüzeyindeki kimyasal ve imalat kalıntılarına
- Kalmış ve birleşmiş gerilimlere
- İmalat ve kullanım sıcaklığı, gibi değişkenlere bağlıdır.

Reçinenin (matris) takviye elemanını (elyaf) iyi derecede ıslatabilmeli ve demet halindeki elyafın arasına nüfuz edebilecek özelliklere sahip olması istenmektedir. Bilinmelidir ki kompozit malzemenin kalitesi arabirime yani fiber- matris etkileşimine bağlıdır. Reçine için ıslatılabilirlik önemli bir kavram olup ve kompozitin yapısını belirlese bile yine reçineden kaynaklı kompozit malzeme imalatında meydana gelebilecek bazı süreksizlikler (reçinenin ani dökülmesi, ani katılaşması, hava kabarcığı oluşumu v.b.) zayıf ara faz oluşumuna ve giderek kalıcı hasar oluşumuyla sonuçlanabilecek durumlara neden olabilmektedir. Kendiliğinden oluşan yapı olan arabirim yeterli sağlamlığa ulaşamadığında bir takım modifikasyonların uygulanması yoluna gidilmektedir. Mekanik bağın artırılması, takviye elemanlarının yüzey pürüzlülüğünün artırılması ve sürtünme özelliklerinin geliştirilmesiyle ara faz yapısında gelişmeler sağlanabilir. Diğer bazı modifiye işlemleri:

- Takviye elemanının yüzeyi olumsuzluk yaratan kimyasallardan arındırılabilir,
- Bağ yapma davranışını arttıracak ilave katkıları kullanılabilir,
- Kimyasal buhar kullanılarak bağ yapma özelliği geliştirilebilir,
- Fiziki yollar denenebilir,
- Reçine modifiyesi, şeklinde sıralanabilir.

Bağ yapının kuvvetlendirilmesinde kullanılan en yaygın yöntem birleştirme maddeleri kullanımını yöntemidir. Matris ve fiber malzemesine uygun olarak belirlenen bu maddeler kimyasal ajan olarak tanımlanmaktadır. Fiber- matrisin tek başına mekanik bağın oluşmasında yeterli olmadığı, delaminasyon ve kopmaların meydana gelmesini

engellemekte yetersiz kaldığı durumlarda kullanılırlar. Kullanılacak modifiye elemanında bağ yapma oranında gelişme, takviye elyaflarında hasar oluşumunun önlenmesi ve iyi çekme mukavemet değerlerinin sağlanması gibi nitelikler aranmalıdır.

3.1.3. Adhezyon veya Yapışma Teorisi

Ara yüzey fazı matris ve elyaf arasında oluşan tutunma nedeniyle meydana gelmektedir. Tutunma için gerekli temel koşul matris malzemesinin iyi ıslatma özeliğine sahip olmasıdır. Konuyla ilgili polimer ve metalik kompozitler üzerinde araştırmalar yapılmış ve bunun çeşitli koşulların yerine getirilmesine bağlı olduğu görülmüştür.

Matrisin vizkositesinin ve takviye elemanının kritik yüzey geriliminden düşük değerlerde olması gerekmektedir. Oksitli, nitrürlü ve seramik takviye elemanlarının yüzey gerilim değerleri çok yüksektir. Kompozitlerde oluşan bağyapı mekanizmaları aynıdır [20].

- Islatma bağı ve çözünme
- Difüzyon bağı
- Mekanik bağ
- Elektrostatik çekim kuvveti
- Kimyasal bağ

3.1.3.1. Islatma ve Çözünme Bağı

Elyaf ve matris arasında meydana gelen enerji değişimine bağlı bir olgudur. Nötr değerlikli iki elektiriksel yüzeyin birbirine yaklaşması sonucu fiziksel çekim kuvveti oluşur. Bu durum katı bir yüzeyin sıvı ile ıslatılması ile daha net görülmektedir. Bir elyaf yüzeyinin etkili biçimde ıslanması için sıvı reçinenin katı yüzeyin her noktasına nüfuz etmesi sağlanmalıdır [20].

3.1.3.2. Difüzyon Bağı

Polimer yüzeyler arasında polimer molekülünün diğer yüzey üzerinde yayılım reaksiyonuyla bağ oluşturması durumudur. Oluşan bağın dayanımı molekül dolaşım miktarı ve molekül yayılım sayısına bağlıdır. Difüzyon özelliği plastikleşmeyi arttıran çözücülerin matrise eklenmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Difüzyon miktarı molekül yayılımı gerekli bileşenler ve molekül hareketinin büyüklüğüne bağlıdır. Polimer kompozit malzemelerde difüzyon bağı elyaf ve matris içerisine yerleştirilmeden önce polimerle kaplanması ile oluşturulabilmektedir. Bu durum adhesiv otomatik tutunma

diye adlandırılmaktadır. Metal matrislerde ise oksitlerin, karbürlerin ıslatılması ve yüzeye sızma temeline dayanmaktadır. Fakat soğuma sonucu oluşan büzülme croslink oluşumunu ve polimerizasyonu engellemektedir. Gözenekli yapı ve ara yüzeyde çatlaklara neden olmaktadır. Mikro boşluklarda artan gerilim sebebiyle kalıcı hasara varan olumsuzluklara neden olmaktadır. Matrisin hal değişimi kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar faz sınırında farklı büzülme veya ara fazın üzerinde istenmeyen gerilme birikimlerine neden olmaktadır. Elyaf yüzeyinin kirli olması yüzey enerjisinin esas malzemeye göre düşük olması ve diğer gazların katı yüzeye karışmış durumda olması başka bir olumsuzluktur. Islatma değeri düşük olan kompozitlerde takviye elemanlarına özel yüzey işlemleri yapılması gerekmektedir [20].

3.1.3.3. *Mekanik Bağ*

İki yüzeyin birbirine mekanik olarak tutunması veya kilitlenmesi sonucu meydana gelen bağ türüdür. Kayma gerilmesinde dayanım, pürüzlülük değerlerine bağlıdır. Elyaf yüzeyin kabalığı ara yüzey bağının dayanımını arttırmaktadır. Basit geometrik özelliklere ek olarak imalat sürecinde meydana gelen iç gerilmeler ve mekanik zorlamalar ara yüzeyi etkileyen diğer bir faktördür. Polimer ve metal matrislerin ısıl değişimler sonucu büzülerek çekmesi elyaf ve matrisin farklı ısıl özelliklere sahip olması çekme, basma ve kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum elyaf geometrisine göre değişiklik göstermektedir.

3.1.3.4. *Elektrostatik Çekim Bağları*

Van der Waals bağları olarak anılan bu kimyasal bağ türü, atom gurupları veya moleküller arasında oluşan elektrostatik çekim nedeniyle oluşurlar ve oldukça zayıf bağlardır. Su, polimer ve seramik molekülleri sürekli kutuplaşma eğilimindedir. Moleküllerin bir kısmı pozitif değerlikli yüklenirken diğer kısmı negatif yüklenmektedir. Tıpkı mıknatısta olduğu gibi moleküller arasında zıt kutuplarda elektrostatik çekim meydana gelir ve moleküller arasında zayıf bağ oluşumu gözlenir. Van der Waals bağları polimerizasyon aşamasında malzeme özelliklerine büyük ölçüde tesir eder. Polimer zincirlerini oluşturan atomlar birbirine kovalent bağ ile bağlanırken zincirler ise Van der Waals bağları ile bağ yaparlar. Van der Waals bağları kuvvet uygulandığında kopar ve şekil değişimine izin verir [20].

3.1.3.5. *Kimyasal Bağlar*

İyonik ve kovalent bağlar olarak iki kısımda incelenir [83].

3.1.3.6. İyonik Bağlar

Elektronegatiflik farkı çok büyük olan atomlar arasında dış yörüngede bulunan elektronların alışverişi sonucu meydana gelmektedir. Elektrostatik çekime dayanan bağda bir elektron alıcı (anyon) diğer elektron verici (katyon) durumundadır.

3.1.3.7. Kovalent Bağ

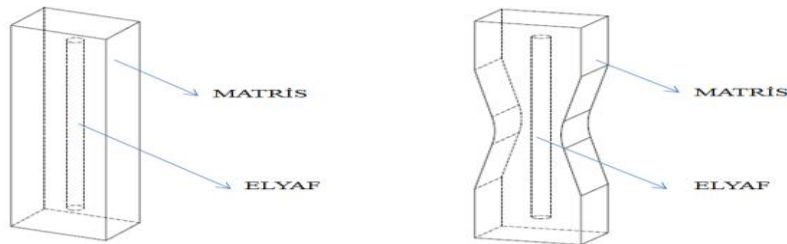
İyonize olmamış bileşiklerin moleküllerindeki atomlar arası kohezyonu kovalans sağlamaktadır. Atomların bir ya da daha fazla elektron çiftini alarak kullanması sonucu oluşan bağdır. Atomlar elektronları eşit veya eşit olmayan şekilde kullanırlar.

3.2. ARA BAĞ YAPI MUKAVEMETİNİN ÖLÇÜLMESİ

Matris ve elyaf arasındaki bağın dayanımını tam olarak ölçebilen bir metot bulunmamaktadır. Bununla beraber kompozit özelliklerinin belirlenmesi, doğal olarak kaliteli bir ara yüzey oluşturabilmek için bu değerlerin bilinmesi gereklidir. Elyaf ve matrisin oluşturduğu ara yüzeyin dayanımında deneylerle belirlenen değerler, yüzeylerdeki gerilim durumlarına, matris özelliklerine, elyafların yerleşimine ve mikro yapı değerlerine bağlıdır.

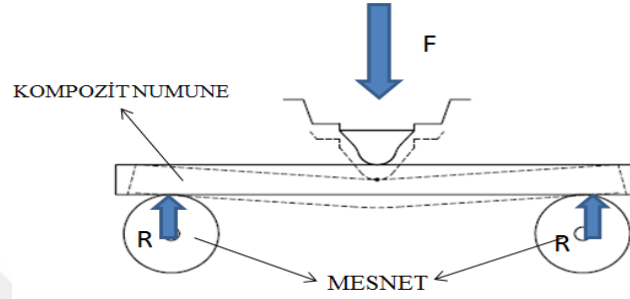
3.2.1. Deneysel Ölçüm Yöntemleri

Bağ yapı değerinin belirlenmesi için iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bu deneyler tek elyafli kompozit veya yönlendirilmiş elyaflardan oluşturulmuş tabakalı kompozit yapılara uygulanmaktadır. Tek elyafa uygulanan teste ait numuneler Şekil 3.3'te görülmektedir. Numune içerisinde tek elyaf bulunan paralel kenarlı reçine matrisli yapıdır. Elyaf boyunca kuvvet yüklemesi uygulanır. Eksen boyunca basma gerilmesi uygulanırsa numune uçlarında kayma gerilmesi oluşur. Bu nedenle ara yüzey kayma gerilmeleri elyaf uçlarında ilk ayrılmanın görülmesinden sonra belirlenebilmektedir.



Şekil 3.3. Tek Elyafli Deney Numuneleri.

Ara yüzey dayanımının tespitinde kullanılan diğer yöntem ise yönlendirilmiş elyaf takviyeli tabakalı kompozit yapının test edilmesidir. Kırılma olayı elyaflara paralel doğrultuda kayma veya dik doğrultuda çekme yüklemeleri sonucunda oluşmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde kayma yüklemesi testi üç noktadan eğme şeklinde yapılması basit ve kolay bir işlemdir [20]. Şekil 3.4’de üç noktadan eğme testi görülmektedir.



Şekil 3.4. Üç Noktadan eğme testi.

Literatür araştırmasında kompozit malzemelerin dayanımı ile ilgili değişik çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Elyaf – matris, dolgu malzemeleri ve bağ yapı ayrı ayrı ve bir arada araştırmalara konu olmuştur. Sonlu elemanlar metodu sonuçların analizi ve kıyaslanmasında yoğun olarak kullanılmıştır. Davis kompozit malzeme içerisinde elyaf ve matrisi ayırarak bağ yapıyı farklı bir malzeme olarak kabul etmiş ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak değişik bir model oluşturmuştur [21]. Huesch Kompozit malzeme ara yüzeyinin geniş tanımını yapmış ve çek bırak yüklemeleri sonucu ara yüzeyde meydana gelen değişimleri, yapışma davranışlarını moleküler seviyede araştırmıştır. Ayrıca kuvvet yüklemeleri sonunda elyaf üzerindeki gerilimin etkilerini incelemiştir [22]. Genel olarak yapılan deneylerde tek fiber kullanılan kompozit deney numuneleri kullanımı tercih edilmektedir. Konuyla ilgili Sun isimli araştırmacı tek fiber kullanılan kompoziti sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Elde edilen verileri analitik yolla yapılan deneylerin sonuçlarıyla kıyaslamıştır [23]. Numuneler üzerinde genellikle çek bırak yüklemeleri uygulanmıştır. Konuyla ilgili Zhang çek bırak şeklinde uygulanan yüklemeler üzerinde yeni teoriler geliştirmiştir. Teorisini sonlu elemanlar yöntemi ile desteklemiştir. Karbon fiber ve epoksinin reçinenin mükemmel etkileşimde olduğunu varsayarak çek bırak yükleme oranlarını ve artıgerilmelerin etkilerini belirlemeye çalışmıştır [24]. Yapılan bir başka araştırmada Song isimli araştırmacı termoplastik matrisli kompozit malzemelerde elyaf ve reçine arasında gerilimin transfer şeklini mikro grid yöntemini kullanarak analiz etmiştir. Çalışma

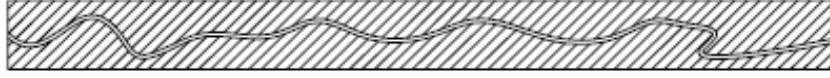
sonucunda elde edilen veriler ışığında bağ yapının mekanik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır [25]. Xiayou isimli araştırmacı ise malzemeye etki ettirilen çek- bırak yüklemeleri kullanarak matris ve matristen ayrılan elyaf arasında oluşan sürtünme kuvvetlerinin etkilerini incelemiştir. Yaptığı analiz sonunda kayma ve normal gerilme değerlerini sürtünme temas elemanı metoduyla bağ yapının mekanik özelliklerini mikro düzeyde belirlemeye çalışmıştır [26]. Yu fun ise tek elyaf ile meydana getirilen deney numuneleri ve farklı olarak birden fazla elyaf ile desteklenen numuneler üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çek bırak şeklindeki kuvvet yüklemeleri neticesinde oluşan gerilmeler sonucu oluşan gerilme transferinin mikro mekanik analizini yapmıştır. Çok sayıda elyaf ile takviye edilen deney numunelerinin analizinde elyafın yerleşim biçimleri, yerleştirme sıklığı ve elyaf boyutlarının yüklerin transferindeki etkileri incelemiştir [27]. Turgut ve arkadaşları bağ yapının dayanım değerlerinin ısı yüklemeler altında gösterdiği değişimlerini analiz etmişlerdir [28].

3.3. FİBER MATRİS ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler elyaf ve elyafı kaplayan, istenilen formda tutan reçineden meydana gelmektedir. Elyaf ve matrisin kompozit malzemeyi oluşturması için mekanik bağlar meydana getirmeleri gerekmektedir. Ara yüzey bu bağ sonucu oluşur [28]. Ara yüzey kompozitlerde reçinenin elyaf ve elyaf kaplamalarıyla oluşturduğu etkileşim sonucu meydana gelen çok ince bir yüzey halindeki tabakadır. Metal matrisli kompozitlerde ergiyik haldeki matrisin ve elyafın dış yüzeyinin difüzyonu sonucu ortaya çıkan farklı bir malzemedir. Bağ yapının mekanik özelliklerinin bir çok mühendislik malzemesi ile benzeşmemesi nedeniyle büyük oranda çalışılmaz. Elyaf ve matrisin değişik bileşim oranlarında kullanımıyla kompozit malzeme üretiminin sonucu olarak kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Monolitik malzeme olarak değerlendirildiğinden çalışılmazlar ve çözülmezler [29]. Kompozit malzemelerin ara yüzeylerinde görülen diğer durum ise elyaf ile matrisin reaksiyonu sonucu farklı bir malzeme meydana gelmesi değil mekanik bir bağ olarak davranan yapı oluşturması şeklindedir [30]. Deneysel çalışmalarda ara yüzey özelliklerini tesbit edebilmek amacıyla reçine içerisine tek elyaf yerleştirilerek basit tek tabakalı kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir. Elyaf üzerine etliyen pull- out yükünün matris üzerine transferi incelenerek bağ yapısı özellikleri hakkında veriler elde edilmeye çalışılmıştır. Araştırmacılar bu çalışmayı yaparken bazı ön kabuller yapmak zorunda kalmışlardır.

- Elyaf ve reçine elastik özelliğe sahip olmalıdır,
- Ara yüzey sonsuz incelikte bir yapıdır,
- Elyaf ve reçine arasındaki yapışma ara yüzey kesitinde form değişikliğine izin vermeyen yapıda olmalıdır,
- Elyaf kaplaması elyafla aynı özelliklere sahip olmalıdır,
- Elyaf lar düzgün bir dizilime sahip olmalıdır,
- Elyaf ve reçine ideal plastik malzeme, olarak kabul edilmektedir

Kompozit malzemeler farklı mekanik özelliğe sahip malzemelerin birleştirilmesiyle meydana getirilen yapılardır. Özellikle kompozit tabakalar arasında kimyasal, fiziksel ve mekanik bağların farklı değerlerde olması nedeniyle malzeme enine kesitine dik uygulanan kuvvetlere karşı çekme mukavemeti çok düşük değerlerdedir. Elyaf boyuna dik doğrultuda uygulanan kuvvetlere karşı kompozit yapıyı oluşturan tabakaların elastisite modülü kadar şekil değişimi meydana gelmesi beklenmektedir. Tasarım konusu tabakalı kompozit malzemelerde daha fazla önemli yer tutmaktadır. Tabakaların birleşimi sırasında kuvvetli bir yapışma durumu sağlanmalı veya görece zayıf tutunma durumlarında mekanik birleştirmeye yönelik tasarımlar yapılmalıdır. Tabakalı kompozitlerde uygulanan yükü bütün tabakaların karşılaması sağlanmalıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyafa etki eden kuvvetler bağ yapı tarafından reçineye oradan da malzeme geneline transfer edilmektedir. Bu durum incelendiğinde bağ yapıda kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler şeklinde gerilmelerin oluştuğu görülmektedir [31]. Ara yüzeyin üzerine etkiliyen yükü iletim oranı fazlaştıkça malzemenin dayanımında da aynı oranda artış meydana geldiği görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu elde edilen verilerin analizlerine göre elyafın uç kısımlarında maksimum değere sahip olan kayma gerilmeleri elyafın orta noktasına yaklaşıldıkça azalma göstererek sıfırlanmakta ve aynı degerde paralel olarak devam etmektedir. Fiberin son kısmında çekme yüklemesini tam olarak iletmeyen bir bölgenin olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu kısımda sadece kayma gerilmesi meydana gelmektedir. Elyaf boyunun uzaması, takviye elemanının mukavemet değerinde azalma meydana getirmesine yol açar. Elyaf boyunun büyük bir bölümü yük taşıyamamaktadır. Şekil 3.5'te kritik uzunluğun üzerinde elyaf kullanımı görülmektedir.



Şekil 3.5. Çok uzun ve geliş güzel yerleştirilmiş elyaf.

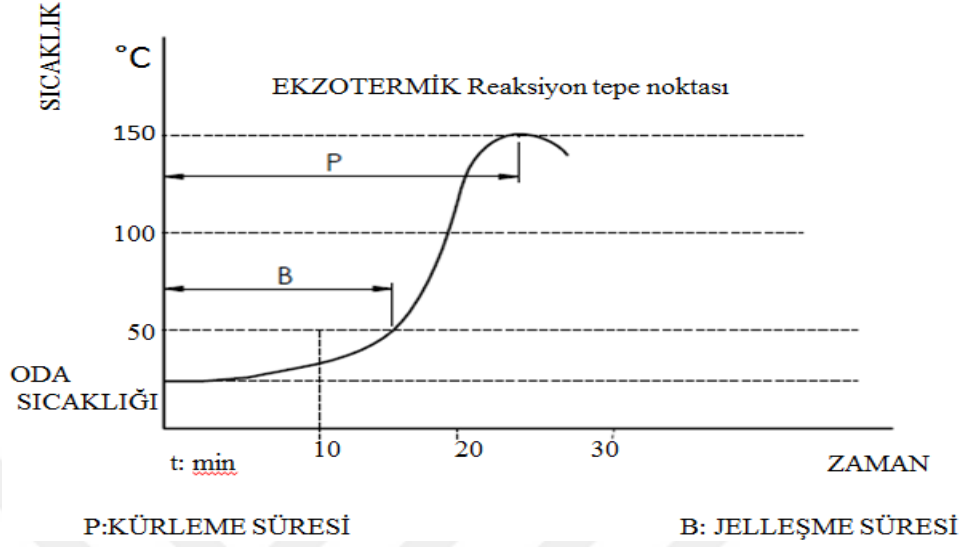


Şekil 3.6. Kritik uzunlukta düzgün yerleştirilmiş elyaf.

Maksimum gerilme değerlerine ulaşmak için elyaflar kritik uzunluk değerinden daha uzun olmak zorundadır. Elyaf uzunluğunun değişimiyle ara yüzey gerilim transfer değerleri de değişmektedir. Şekil 3.6'da kritik uzunlukta düzgün yerleştirilmiş elyaf kullanımı görülmektedir. Yapılan araştırmalarda zayıf arayüzey ile güçlü bir arayüzey arasındaki farklar izlenebilmektedir. Kullanılan elyaf boyu ile çapının artmasıyla arayüzeyin mukavemetinde yükseldiği görülmektedir. Arayüzeyin oluşturduğu birim yüzey alanının büyüklüğü istenilen bir özelliktir. Kompozit malzemelerin tasarımında küçük çaplı ve demetler halindeki elyafların kullanımı yaygın bir uygulamadır. Elyaf boyutları arayüzeyin kalitesini belirlemektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri arayüzeyin özelliklerinde oluşacak değişimlerden sorumludur. Elastisite modülü yüksek bileşenlerden meydana getirilen kompozit malzemelerin arayüzey mukavemet değerleride yüksek olmaktadır. Tek elyaf kullanılan deney numunelerinde, elyaf boyu ve çapı arttıkça matrise transfer edilen kayma ve çekme gerilmelerinin miktarında artışlar gözlemlenmiştir. Uygulanan çekme kuvvetinin çekme gerilmesi olarak transfer edilebilmesi ve yükün tüm kompozit yapı tarafından taşınması güçlü bir bağ yapının ve kompozitin yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğuna işaret etmektedir. Elastisite modülü arayüzeyde oluşan kayma gerilmeleriyle ters, çekme gerilmeleriyle doğru orantıya sahiptir. Aynı cins elyaf ve farklı reçine kullanımındaki gerilim dağılımlarının ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir. Geometrik özellikleri ve mekanik özellikleri aynı olan elyafların farklı matris malzemeleri ile kullanıldığında meydana gelen değişimler incelenmelidir [30].

3.4. KOMPOZİTLERDE KÜR İŞLEMLERİ

Yüksek performansa sahip kompozit malzemeler ve kalın kompozit yapılar oluşturabilmek için başlangıç enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Kürleme işlemi olarak tabir edilen bu durum için yüksek ısı veren araçlar (otoklav) kullanılmaktadır. Bu zorunluluk mikrodalga yönteminin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Mikrodalga yöntemi kullanılarak yapılan uygulamalarda kompozit yapının çok hızlı ve çok yönlü şekilde oluşumuna olanak sağladığı görülmektedir. Mikrodalga yöntemindeki enerji kontrolü, kalıcılık ve doğal esneklik sağlama özelliği diğer farklı yöntemlerde bulunmamaktadır. Polimer malzemelerin düşük ısı iletkenliği kürleme işleminde önemli rol oynamaktadır. Kompozit malzemenin özellikleri elyaf ve reçine arasında uygun bir bağ yapısı oluşumuna bağlıdır. Kürleme esnasında reçine ve elyaf arasında sağlam bir bağ oluşumu sağlanmalıdır. Mikrodalga'nın birleştirme etkisi elyafların, reçinenin ve kompoziti oluşturan diğer bileşimlerin dielektrik özelliklerinin farklılığıyla değişiklik göstermektedir. Farklı şekillerde meydana gelen değişimler arafaz bölgesinde incelenebilmektedir. Bu farklı şekiller yeni bir takım çoğalmalar, kimyasal guruplarda değişme ve polimerik reçinelerle reaksiyona girme yatkınlığının artması, bağ yapıda kürleme morfolojisi değişimleri olarak belirlenmiştir. Polimer reçine takviye elemanı bünyesinde ve kompozit malzeme ara yüzeyinde nem bulunmaktadır. Kompozit yapı içerisinde bulunan nem miktarı az olsa da bağ yapısındaki %1 lik nem miktarı boşluk oluşumu (çekirdeklenme) veya boşluk gelişimine ve kompozitin düzenli olması gereken yapısında bozulmalara yol açabilmektedir. Grafit ve cam elyaf takviyelerde nem elyaf yüzeyinde bulunurken polimerik elyaflarda ise elyaf bünyesinde bulunmaktadır. Mikrodalga yönteminin uygulanmasıyla nem buharlaştırılır. Elyaf - reçine bağ yapısındaki serbest radikaller (enerjiler) su moleküllerinin ara yüzeyde toplanmasına ve çekirdeklenmesine neden olmaktadır. Takviye elyafının yüzeyi, yüzey kimyasalları veya yüzeye doğru yönelmiş bileşenleri içermektedir. Bu bileşimler mekanik, termal ve çevresel etkilerin stabil hale getirilmesinde etkilidir. Mikrodalga uygulamasıyla karboksilik, fenolik, karbonil laktan ve hidroksil yüzeyden atılabilmektedir veya değişik başka yöntemlerle reçine ile tepkimeye girebilmektedir [32],[34]. Şekil 3.7'de reçinenin ekzotermik sıcaklık grafiği görülmektedir.



Şekil 3.7. Reçinenin kürlenmesine ait sıcaklık zaman grafiği [33].

Kürleme tekniğinde belli bir zaman diliminde verilen ısı etkisiyle işlem yapılmaktadır. Yüksek üretim ve yüksek verimlilik için uygun kürleme tekniği seçilmelidir. Termal kürleme tekniği en eski ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Son yıllarda gelişmeler kaydedilen MD ve RF, kür teknikleri içinde hızla yerini almaktadırlar. Bu sistemlerde düşük kürleme zamanı, yüksek verim, yüksek imalat oranları ve homojen ısı yayılımı gibi imkanlar bulunmaktadır. Yüksek frekans sistemleri olarak adlandırılan bu sistemler zamandan ve enerjiden tasarruf sağlamaktadır [35].

4. ELYAF ÇEŞİTLERİ VE ÖZELLİKLERİ

Kompozit malzemelerde takviye elemanları mukavemeti etkileyen ana unsurlardandır. Takviye elemanının, düşük yoğunluk, yüksek elastisite modülü ve yüksek sertliğe sahip olması istenmektedir. Her ne kadar matris malzemesi tarafından korunsa da korozyona karşı dirençli olmalıdır. Modern kompozit malzemelerin oluşturulması gelişmiş özelliklere sahip elyafların kullanımı ile mümkün olmaktadır. Cam elyaflar uzun yıllardır yoğun olarak kullanılmaktadır [36]. Özellikle sürekli elyafların kompozit malzeme teknolojisinde önemli yeri vardır. Günümüzde yüksek teknolojik özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi için bor, karbon, silisyum karbür, aramid esaslı elyaflar kullanılmaktadır. Takviye elemanlarının küçük lifler halinde üretilmeleri ile büyük demetler halinde düzenlenen malzemelere göre hata oranı daha küçük değerlere indirilebilmektedir. İnce lifli kompozitler kütleli yapılara göre daha iyi teknolojik özelliklere sahiptir. Elyaplardan yüksek performans elde edilmesi şu özelliklere bağlıdır. Küçük çaplarda veya küçük tane boyutuna sahip şekilde üretilmeleri veya üstün mikro yapısal özelliklere sahip olması. Elyafın boy / çap oranının artması ile matrisin elyaflara daha fazla yük iletmesi, yüksek elastisite modülüne sahip olması olarak sıralanabilir.

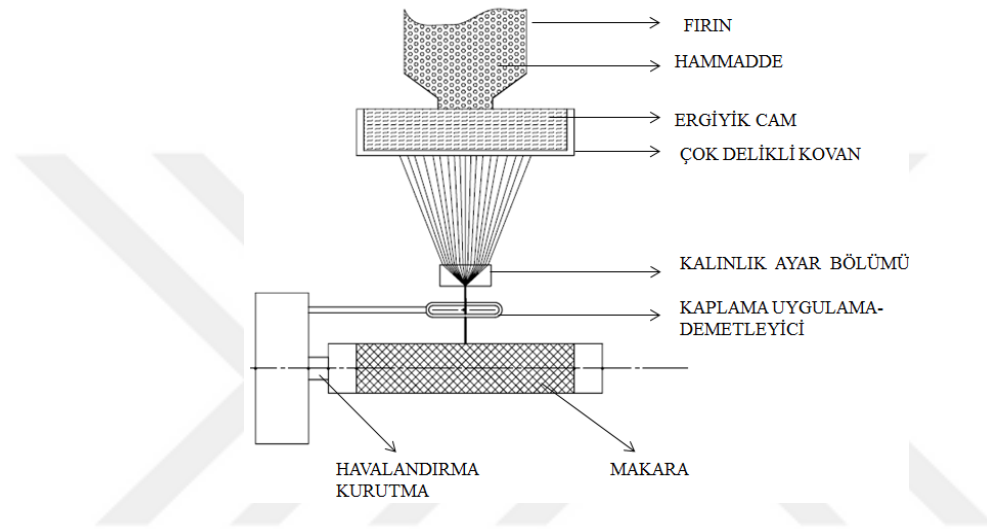
4.1. KULLANILAN BAŞLICA ELYAF TÜRLERİ

Cam elyafı, karbon (grafit) elyafı, (pan –poliakrilonitril-zift kökenli) aramid elyaflar (aromatik polyamid-kevlar dupont), bor elyafı oksit elyafı, yüksek yoğunluklu polietilen elyafı, polyamid elyafı, polyester elyafı, doğal organik elyaflar, seramik elyaflar olarak sıralanabilir [36].

4.1.1. Cam Elyaflar

Cam elyafı en fazla tercih edilen dolgu malzemesidir. Hammadde maliyeti oldukça düşüktür, bu nedenle emsallerine göre tercih edilmektedir. Fakat yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip aramid ve karbon elyaflar yüksek maliyetli olmasına rağmen

havacılık ve uzay sanayinde yüksek kullanım oranına sahiptir. Normal bir şişe camından veya yüksek kalitedeki kuartz camına kadar çok çeşitli tipte üretilebilirler. Cam yapısı gereği amorf bir malzeme olup polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yani silisyum atomunun dört oksijen atomuyla çevrilmesi sonucu oluşmuş uzay yapıda bir malzeme olarak tanımlanabilir. Metalik malzeme olmayan silisyum doğada genellikle Silis (SiO_2) şeklindeki bileşikler olarak bulunur. Kum formunda olan silis $1260\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklara kadar ısıtılarak ergitilir. Sıcaklığın düşürülmesiyle tekrar katı forma dönüşür. Şekil 4.8’de cam elyafı üretimi görülmektedir [36].



Şekil 4.8. Cam elyafı üretim süreci [32].

4.2. CAM ELYAFLARIN BAZI ÖZELLİKLERİ

Çekme dayanımı ve birim ağırlık başına düşen dayanım miktarının çelikten daha fazla olduğu görülmektedir. Isıl dirençleri düşüktür ve yüksek ısıda yanmazlar fakat vizkoz bir sıvıya dönüşürler. Kimyasal malzeme etkilerine dayanıklıdırlar. Yapılarında hidrojen bulunmadığından nem absorpsiyonu yoktur. Matrisin nemle etkileşimi sonucu bağ yapıda bozulma meydana gelebilmektedir. Bu durum kimyasal kaplamalar sayesinde bertaraf edilebilmektedir. Elektrik iletimi yoktur ve elektrik yalıtımında yoğun olarak kullanılmaktadır. Silis kumuna ilave edilen çeşitli katkı malzemeleri sayesinde malzeme farklı özellikler kazanması sağlanabilmektedir. Cam elyafları 4 farklı türde üretilir. Çizelge 4.1 cam elyaf tipleri ve katkı maddelerinin özellikleri görülmektedir.

4.2.1. S+R Cam Elyafı

Maliyeti ve performansı yüksek bir malzemedir. Havacılık sanayinde kullanılan bir

malzemedir. Elyaf içindeki tellerin çapları E Camın yarısı kadar olması sayesinde elyaf sayısının fazlaşması ve birleşme özelliklerinin daha iyi olmasıyla oldukça sert yüzeyler elde edilebilmektedir. Cam elyaflara kullanım yerlerine göre farklı elyaf sarma şekilleri uygulanabilir. Elyafın çapı ve demet bulunan lif sayısı farklı olabilir. Cam elyafı şekillendirildikten sonra dayanımının artırılması için kimyasal uygulamalarla iyileştirme işlemleri yapılmaktadır. Uygulanan bu kaplama elyafın kompozit malzeme içerisinde kullanılmadan önce kolaylıkla temizlenebilen, suda çözünen polimerik malzemelerden oluşmaktadır. Bu temizleme işlemi kompozit malzemenin mukavemeti açısından önem taşımaktadır. Kullanılan matris malzemesinin elyafa iyi yapışmaması, malzemenin teknolojik özelliklerinde azalma meydana getirir. Bu durumun önüne geçebilmek için elyaflar farklı kimyasal işlemlerin uygulanmasıyla iyi bir bağ yapısı oluşması sağlanabilmektedir [36].

4.2.2. A Tipi Cam (Alkali)

Yüksek oranda alkali madde içeren bir malzemedir. Elektrik yalıtımı kötü yani iletken bir malzemedir. Kimyasal direnci oldukça iyi olan A tipi cam elyafı en yaygın kullanılan cam türüdür.

4.2.3. C Tipi Korozyon Camı

Özellikle kimyasal çözeltilere karşı gösterdiği dayanım oldukça yüksektir.

4.2.4. E Tipi Cam (Elektrik)

A tipi camın aksine alkali oranı düşüktür. Bu nedenle elektrik yalıtım özelliği diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Dayanımı, suya karşı dirençleri oldukça iyidir. E tipi Camın genellikle nemli ortamlarda kullanımı tercih edilmektedir.

4.2.5. S Tipi Cam (Mukavemet)

Yüksek dayanıma sahip bir malzemedir. Çekme dayanımının %33 oranında E tipi camdan fazla olduğu görülmektedir. Yorulma direnci yüksek sıcaklıklarda bile oldukça iyidir. Uzay ve havacılık sanayinde bu özellikleri nedeniyle tercih edilir. Cam elyaflarla takviye edilen kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle epoksi veya polimer malzemeler kullanılmaktadır [36].

Çizelge 4.1. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri [15].

| Özellikler | Cam Tipi | | | |
|-------------------------------------|----------|-------|-------|------|
| | A | C | E | S |
| Özgül ağırlık (gr/cm ³) | 2.5 | 2.49 | 2.54 | 2.4 |
| Elastik modül (GPa) | - | 69.0 | 72.4 | 85.3 |
| Çekme Dayanımı, (MPa) | 303 | 3033 | 3448. | 458 |
| Isıl genleşme katsayısı | 8.6 | 7.2 | 5.0 | 5.6 |
| Yumuşama katsayısı sıcaklığı | 727 | 749.0 | 841.0 | 970 |

4.3. DİĞER ELYAF TÜRLERİ

4.3.1. Aramid Elyaf lar

Yüksek teknoloji ürünü olan Aramid elyaflar 90 lı yıllardan başlayarak kullanımda olan ve gelişmeye devam eden bir üründür. Kısaca Aromatik polyamid olarak tanımlanmaktadır. Aramid polimerleri uzun zincirleri halinde bulunurlar. Moleküler yapısında 6 karbon atomu bulunur ve hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. Düşük yoğunlukta yüksek modül ve yapışma değerine sahip olan polimer yüksek oranda yönlendirilmiş bir yapıdadır. Aramid liflerin kolay ıslatılabilirliği ve darbe dayanımının iyi olması çok tercih edilmesinin nedenidir. Çok çeşitli reçinelerle birarada kullanılabilir. Isıl yayılmanın önemli olduğu yerlerde negatif ısıl genleşme katsayısı nedeniyle kullanılmaktadır. Piyasada yoğun olarak kullanılan iki farklı tip aramid elyaf bulunmaktadır. Bunlar Dupont firmasının geliştirdiği bu elyaflar Kevlar 29 ve Kevlar 49 dur[37]. Ayrıca yapılan çalışmalar yeni tip aramid elyafların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Çizelge 4.2’de piyasada yoğun olarak tercih edilen aramid elyeflere ait değerler görülmektedir. Fiyat ve performans değerlerini iyileştirmek amacıyla Cam ve Karbon elyaflarıyla hibrid (karma) malzeme oluşturularak kullanılması yaygın bir uygulamadır.

Çizelge 4.2. Aramid elyafların mekanik özellikleri [37].

| ÖZELLİKLER | Kevlar 29 | Kevlar 49 | Kevlar 149 | Twaron | Technora |
|--------------------------------|-----------|-----------|------------|--------|----------|
| Yoğunluk, (g/cm ³) | 1, 44 | 1, 45 | 1, 47 | 1, 44 | 1, 39 |
| Çap, (mm) | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Elastiklik Modülü, (GPa) | 60 | 120 | 160 | 60 | 90 |
| Spesifik Modül, (MNm/kg) | 42 | 82 | 110 | 42 | 65 |
| Çekme Dayanımı, (MPa) | 3000 | 3000 | 2400 | 2600 | 2800 |
| Spesifik Dayanım, (kNm/kg) | 2080 | 2070 | 1630 | 1800 | 2010 |
| Maksimum Uzama, % | 3, 6 | 1, 9 | 1, 5 | 3 | 4 |

4.3.2. Bor Elyafı

Ticari amaçla kullanılan en yüksek teknolojiye sahip elyaf çeşitidir. Bor minerali kimyasal buharının Tungsten teli üzerine kaplanması biçiminde üretilir. 0,01 mm kalınlığındaki tungsten tel hidrojen ve bortriklorür (BCl₃) gazından geçirilerek 0, 05 ve 0,2 mm kalınlıklarında elyaf üretimi sağlanır. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastisite modülüne sahiptir. Yüksek yoğunluk değerleri ve maliyetleri nedeniyle tungsten yerine karbon elyaf kullanımına başlanmıştır. Silisyum karbür veya bor karbür ile kaplanan bor elyafların yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı büyük oranda artışlar göstermektedir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip olmaları özellikle havacılık sanayinde kullanım alanı bulmasına neden olmaktadır. Çizelge 4.3’de bazı bor elyafların özellikleri görülmektedir [37].

Çizelge 4.3. Bazı Bor elyaflarının özellikleri [37].

| Özellik | Bor | Bor+ B ₄ C | SiC |
|-------------------------------|---------|-----------------------|---------|
| Yoğunluk (g/cm ³) | 2, 6 | 2, 6 | 3 |
| Çap (mm) | 100-150 | 100-150 | 100-150 |
| Elastiklik Modülü (GPa) | 430 | 430 | 410 |
| Spesifik Modül (MNm/kg) | 165 | 165 | 140 |
| Çekme Dayanım (MPa) | 3800 | 4000 | 3900 |
| Spesifik Dayanım (kNm/kg) | 1460 | 1540 | 1300 |

4.3.3. Karbon Grafit Elyaflar

En çok kullanılan yüksek teknoloji ürünü elyaflardır. Bir çok farklı üretim yöntemi kullanılarak üretilirler. Ticari olarak kullanılan ilk elyaflar yanma (piroliz) ve yüksek ısı işleme tutma uygulamaları ile üretilmiştir. Bu sayede sentetik liflerin karbon ve

grafit elyafına dönüşmesi sağlanmıştır. Günümüzde sentetik elyafların çoğu temel olarak poli akrilonitril (PAN) kullanımıyla üretilmektedir. Sentetik liflerin dönüştürülmesi sürecinde gerilim ve sıcaklık değerlerinin değiştirilmesiyle elastik modül ve dayanım değerleri kontrol edilebilmektedir. Başka bir yöntem ise zift kullanımını esas alan üretim yöntemidir. Proseste petrol türevi olan zift öncelikle sıvı kristal hale (mesophase) dönüştürülür. Elde edilen ürün daha sonra yanma ve ısı işlemlere tabi tutulur. Yüksek elastik modül ve mukavemet değerlerine sahip elyaf elde edebilmek için ısı etkisinden faydalanılarak ziftin elyafa dönüşmesi sağlanır. Elyaf, düşük kopma uzaması, yüksek elastik modül değerleri, ısı mukavemet ve yorulma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Karbon elyafının da yapısından kaynaklanan bazı sınırlılıklara sahip olduğu görülmektedir. Düşük kopma uzaması değerlerine sahip olması ani darbe veya çarpma gibi olumsuz durumlarda kalıcı hasar oluşumlarına neden olmaktadır. İletken bir malzemedir ve bu durum tasarım yapılırken gözönünde bulundurulmalıdır. Özellikle grafit elyaflar bakırdan 4 kat fazla iletim oranına sahiptir. Nemden ve çevresel koşullardan etkilenmezler. Çeşitli plastik matrislerle ve özellikle epoksi reçinelerle birarada kullanılırlar. Çizelge 4.4 te karbon ve grafit elyafların özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.4. Karbon ve Grafit elyafların özellikleri[15].

| ÖZELLİK | | GRAFİT | KARBON |
|--------------------|-----|--------|--------|
| Saflık | % | 99 | 93-95 |
| İşlem sıcaklığı | °C | >1700 | <1700 |
| Elastikiyet Modülü | Mpa | >345 | <345 |

4.3.4. Ekzotik Takviye Elemanları

İnorganik liflerin polimer kompozit malzeme imalatında çok fazla kullanım alanı bulamayacağı öngörülse de ürün geliştirme çabaları devam etmektedir. Metal ve Seramik matrislerde kullanımının uygun olacağı düşünülmektedir. Alümina, silikon nitrit, silisyum karbür, kuartz gibi türleri bulunmaktadır.

4.3.5. Silisyum Karbür

Bor elyafının üretim şeklindeki gibi tungsten çekirdek üzerine silisyum karbürün kaplanması şeklinde üretilirler. 0,1 ile 0,14 mm çapta üretilirler. Yüksek ısı yüklemelerde bor elyafına göre daha iyi özelliklere sahip olduğu tespit edilmiştir. Silisyum karbür elyafın 1370 °C de mukavemet değerinin sadece %30 unu kaybettiği

gözlenmiştir. Teknolojik özellikleri nedeniyle kıyaslandığı bor elyafına göre yüksek yoğunluk değerlerine sahiptir. Bu olumsuzluk tungsten yerine karbon çekirdek kullanımıyla çözüme yoluna gidilmektedir.

4.3.6. Alümina Elyafı

Kısaca alüminyum oksit olarak tanımlanan malzemedir. Elyaf formunda 0,02 mm çapın-daki alümina flamanın silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile üretilir. Alümina elyafı nispeten düşük çekme dayanımına sahipken yüksek oranda basma dayanımına sahiptir. Yüksek ısı dayanımları sayesinde havacılık sanayinde uçak motorlarının imalinde kullanılır.

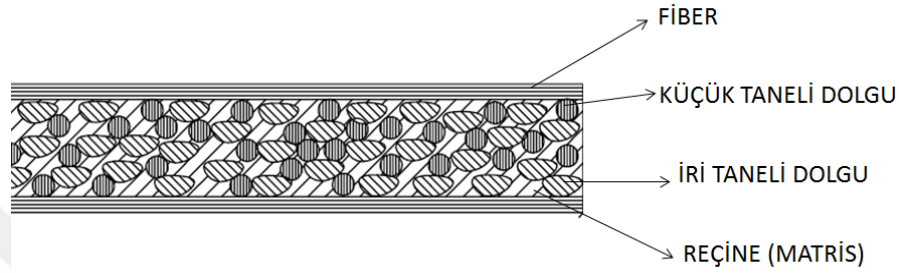
4.4. DOLGU MADDELERİ

İnorganik dolgu malzemelerinin kompozit üretiminde kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Tasarlanan ürünlerin performansını artırırken aynı zamanda maliyette önemli düşüşler sağlamaktadır. Özellikle laminant kompozitlerin yapılarında bulunan organik madde içeriğinin azaltılmasında ve alev geciktirici olarak kullanılmaktadır. Dolgu malzemesi kullanılan reçinelerin dolgusuz reçinelere göre mekanik özellikleri düşüktür. Bununla beraber boyutsal stabilite, sertlik, düşük yüzey pürüzlülüğü, çevresel koşullara dayanım gibi özelliklerde önemli artışlar sağlanmaktadır.

4.4.1. Dolgu Malzemesi Kullanımında Dikkat Edilecek Hususlar

Kompozit malzemelerde dolgu malzemesi kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Maliyet – performans arasında istenilen ters orantı dolgu malzemesi kullanımındaki temel nedendir. Sanayide düşük maliyetle yüksek performans elde edilmesi amaçlanmaktadır. Özellikle kullanım alanı gittikçe genişleyen inorganik dolgu malzemesi kullanımı kompozit yapı içerisinde daha az organik dolgu kullanımını sağlayarak malzeme özelliklerinin gelişmesine yardımcı olmaktadır. Dolgu malzemesi kullanımıyla, alev dayanımı, ölçüsel stabilite, ısı direnç, su direnci, kalıplama sonunda çekme direnci ve bu gibi özelliklerde gelişmeler sağlanabilmektedir. Termoset matris kullanımında dolgu malzemesi kullanımı uzun zamandır kullanılan ve tercih edilen bir yöntemdir. Termoplastik matrislerde de dolgu malzemesi kullanımı son yıllarda gelişme göstermektedir. Kimyasal işlemlerin uygulanmaları sonucu dolgu malzemesi kullanım

alanı oldukça genişlemiştir. Kompozit malzeme imalinde yüksek performans elde edebilmek için dolgu malzemesi daha yüksek oranda kullanılmaya başlanmıştır. Küçük hacimli ve görece daha büyük hacimli dolgu malzemeleri bir arada kullanımını en çok uygulanan yöntemlerdir. Kompozit yapı olan beton bu duruma örnek verilebilir. Kum çakıllar arasındaki boşluklara girer ve kalan hacim ise çimento tarafından bağlanarak doldurulur. Temel takviye malzemesi demirler kullanılmaktadır. Şekil 4.6 da dolgu malzemesi kullanımı görülmektedir. Kompozit yapı imalinde kullanılan bazı dolgu malzemeleri şu şekilde sıralanabilir.



Şekil 4. 6. Dolgu malzemelerinin birlikte kullanımı.

4.4.2. Dolgu Malzemesi Türleri

4.4.2.1. Kalsiyum Karbonat

Yoğun şekilde kullanılan inorganik dolgu malzemesidir. Kireç taşı ve mermer tozundan elde edilmektedir. PVC cam profillerinin imalinde en fazla tercih edilen dolgu malzemesidir. Uv ışın dayanımı, ısı direnç ve boyutsal stabilitenin sağlanması gibi özellikleri bulunmaktadır.

4.4.2.2. Alüminyum Silikat ve Kil

Kompozit sanayinde kil olarak ifade edilen ve yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Maden killeri su ile yıkanarak veya hava ile işlenerek çok farklı partikül boyutlarında üretilmektedir. Kaolen, bentonit, arduvaz, mika ve sünger taşı gibi çeşitleri bulunmaktadır.

4.4.2.3. Alüminyum Trihidrat

Bileşiminde bulunan hidrojenden dolayı su ve nem tutma özelliği vardır. Bu durum yüksek alev dayanımı ve duman çıkışının istendiği yerlerde tercih edilmektedir.

4.4.2.4. *Kalsiyum Sülfat*

Molekül yapısında az miktarda su bulunan bu dolgu maddesi daha düşük sıcaklık değerlerinde etkilidir. Düşük maliyetli alev ve duman geciktirici malzeme olarak tercih edilir.

4.4.2.5. *Diğer Dolgu Malzemeleri*

Silika ve silikatlar, Alüminyum silikatlar, Cam esaslı dolgu malzemeleri, metal oksit dolgu maddeleri, metalik tozlar, alev geciktiriciler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

4.5. Dolgu Malzemesi Kullanımı

Kalıplama yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin ağırlık olarak % 45 ile % 65 ini inorganik dolgu malzemeleri meydana getirmektedir. Reçine ve taviye malzemesine göre maliyetinin düşük olması bu durumun ana nedenidir. Kullanım yerine göre istenilen performans değerlerinin elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanabilir:

- Laminant kompozit malzemeler içerisindeki hidrokarbon miktarını azaltarak alev mukavemetinin gelişmesi sağlanır.
- Maliyetin azaltılması sağlanır.
- Dolgu malzemesi reçinenin mekanik direncinin artmasını sağlar.
- Ana yapı bileşenleri arasındaki yük dağılımının dengelenmesine yardımcı olur.
- Malzemenin homojen yapı oluşturmasına hizmet eder.
- Çatlak ve ani darbe direnci artar.
- Farklı partikül yapılarına sahip dolgu malzemeleri yüksek ısı ve basınç ortamlarında iyi sonuçlar verir.
- Düşük ağırlığa sahip dolgu malzemelerinin kullanımı kompozit ağırlığını kontrol edilmesine olanak verir.

4.6. REÇİNE KATKI MALZEMELERİ

Çok farklı özelliklere sahip katkı malzemeleri kompozitleri istenilen özelliklere ulaştırmak için kullanılmaktadır. Bu tür malzemeler düşük miktarlarda reçineye (matris) karıştırılmaktadır. Bu katkı malzemeleri katalizör, hızlandırıcılar (promötörler) ve inhibitörler olarak adlandırılmaktadır. Kullanılan bu katkı malzemeleri reçinenin reaksiyon hızının ve şeklinin belirlenmesinde önemli roller üstlenmektedir. Kullanılan

katkılar sonucu ekzotermik (dışarıdan ısı alımı) veya endotermik (dışarıya ısı yayılımı) reaksiyon oluşumu belirlenebilmektedir.

4.6.1. Katalizörler

Polyester reçinelerde yoğun olarak kullanılan en önemli katkı malzemesidir. Kimyasal reaksiyonun bir parçası değildirler. Polimerizasyon prosesinin başlangıç enerjisini kazandırmak için kullanılırlar. Oda sıcaklığında veya sıcak kalıpta sertleşmeyi sağlayan türleri bulunur. Doymamış polyester reçinelerin sertleştirilmesinde kullanılan katalizör malzemeler 7 ana grupta incelenir. Bunlar peroksitler, hidroperoksitler, alkilperoksitler, presterler, açılperoksitler, ketalperoksitler ve ketonperoksitler olarak sıralanabilir.

4.6.2. Hızlandırıcılar (Promötörler)

Isı etkisinde veya kobalt naftanat gibi bir hızlandırıcı ile birlikte kullanımında peroksitlerin reaktif hale dönüşmesini sağlayan malzemelerdir. Doymamış polyeesterin reaksiyona girerek ağ yapı (network) oluşturmasını ve katılaşmasını sağlar. kobalt naftanat, kobalt oktanat, dimetilnilin ve dietilanilin kullanılan başlıca hızlandırıcılarıdır. Doymamış polyeesterlerin katılaştırılmasında kobalt, vanadyum ve azotlu bileşikler kullanılır. Piyasada kobalt hızlandırıcı, vanadyum hızlandırıcı ve amin hızlandırıcı olarak isimlendirilirler.

4.6.2.1. Kobalt Hızlandırıcılar

Organik kobalt tuzları formundadır. Piyasada yumuşatıcılarda veya stiren içerisinde çözdürülmüş halde bulunurlar. Reçineye %1 - %3 oranında ilave edilirler. Peroksit ve kobalt miktarı değiştirilerek işleme süresi ayarlanabilir. Kobalt hızlandırıcı kullanılan malzemelerin kalıptan çıkarılma süresi amin hızlandırıcı kullanılan malzemelerden daha uzun olmaktadır. Kobalt yüzeylerde kurutucu etki yaparken ince tabakalarda bile yapışkan yüzeyler oluşmamasını sağlar [37].

4.6.2.2. Vanadyum Hızlandırıcılar

Vanadyum hızlandırıcıların naftanat veya oktanat gibi ticari çeşitleri bulunmaktadır. Kobalt hızlandırıcılara göre daha etkili olmakla beraber zamanla bozunma ve stabil olmama gibi olumsuz yönleri bulunmaktadır. Vanadyumlu hızlandırıcıların depolama ömrü düşüktür. Ketonperoksitler ve daha az aktif peroksitlerle birlikte kullanılabilirler.

4.6.2.3. *Amin Hızlandırıcılar*

Yumuşatıcılar veya stiren içersinde % 10 çözeltiler halinde piyasada bulunurlar. En çok dietilanilin ve dimetilanilin cinsleri kullanılmaktadır. Normal jelleşme sürecine göre hızlı bir sertleşme durumu oluştururlar. Amin hızlandırıcı ilave edilen polyesterler sarı bir renk alırlar [37].

4.6.3. **İnhibitörler**

Reaksiyon hızını yavaşlatmak için kullanılan katkı malzemeleridir. TBC (tersinirbütıl katekol) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır, bakır tuzları, kuerterner amonyum gibi türleri de bulunmaktadır.

4.6.4. **Diğer Katkı Malzemeleri**

4.6.4.1. *Renklendiriciler*

Kompozit malzemelerin tamamında veya sadece yüzeyinde renklendirme sağlamak amacıyla kullanılan takviye malzemeleridir. Bu tür malzemeler direkt olarak reçineye ilave edilebileceği gibi kalıplama esnasında kalıp yüzeylerinede uygulanabilmektedir. Ayrıca boya gibi proses sonunda malzemeye uygulanabilen türleri de vardır [37].

4.6.4.2. *Kalıp Ayırıcılar*

Özellikle CTP kompozitlerin kalıptan kolayca çıkartılması için gereklidir. Reçineye, kalıba veya ikisine birlikte uygulanabilmektedir. Yaygın olarak Çinko sterat reçine içersine katılarak kullanılır. Ayrıca kalıba uygulanan vakslar, silikonlar ve teflon gibi kalıp ayırıcılar da bulunmaktadır. Polivinilalal, film kalıp ayırıcı, selüloz asetat, nitroselüloz, v.b farklı kalıp ayırıcıları da kullanılmaktadır [37].

4.6.4.3. *Vaks Kalıp Ayırıcılar*

Piyasada sert, orta sert, ve yumuşak cila formunda bulunurlar. Parlak son yüzeylerin oluşturulabilmesi için kalıp yüzeylerine uygulanmaktadırlar. Fazla girintili kalıplarda vaks birikimi sıvı cila kullanımıyla engellenebilmektedir. Yüksek oranda Carnuba vaksından imal edilirler.

4.6.4.4. *Silikon Kalıp Ayırıcılar*

Epoksi reçine uygulamalarında silikon kalıp ayırıcıların kullanımı yaygındır. Sıcak kalıplama işlemi dışında polyester reçinelerde kullanılmazlar. Poliüretan reçinelerin

köpürmesini engellemek gibi olumsuz yanı vardır. Piyasada sprey veya yağ şeklinde bulunurlar.

4.7. KULLANILAN KATKI MALZEMELERİNİN GÖREVLERİ

Kompozitlerde performans ve verimlilik oranında artışların sağlanabilmesi için dolgu malzemeleri çeşitli varyasyonlarda kullanımı tercih edilmektedir. Küçük hacimli ve görece daha büyük hacimli dolgu malzemeleri bir arada kullanımı en çok tercih edilen yöntemlerdir. Kompozit yapı olan beton bu duruma örnek verilebilir. Kum çakıllar arasındaki boşluklara girer ve kalan hacim ise çimento tarafından bağlanarak doldurulur. Temel takviye malzemesi demirler kullanılmaktadır. Dolgu malzemelerinin kalıplama sırasında kalıbın tam olarak dolmasını sağlamak, düzgün yüzey ve sert yüzeyler elde edilmesi de bu görevlerdendir. Kompozit malzeme imalinde kullanılan dolguların görevleri şu şekilde sıralanabilmektedir.

4.7.1. Düşük Boyutsal Çekme

Düzgün yüzeylerin ve hassas boyutsal stabilitenin istendiği kompozitlerde reçine çekmesini sınırlayan termoplastik veya termoset reçinelere ilave edilen katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Renk katkılı SMC ve BMC kalıplama yöntemlerinde çekme değerini düşürmek için termoplastik reçineler dağılımı engellemeyen katkılarla birlikte kullanılmaktadır [37].

4.7.2. Alev Dayanımı

Yanmaya ve ısı şoklarına karşı alev geciktirici dolguların, uygun reçinenin ve katkı malzemelerinin kullanımıyla önlem alınabilmektedir. Bazı katkı malzemelerinin yapılarında su bulundurduğu bilinmektedir. Reçineye ilave edilecek katkı malzemeleriyle dumanlanma durumu artırılabilir. Organik boron, klor veya fosfor bileşikleri bu kategoridedir [37].

4.7.3. Hava Kabarcığı Engelleme

Kompozit malzemelerde yapısal sorunlardan biridir. Reçinenin kalıba giriş hızı ve yönemi, reçinenin elyaf ve katkı maddeleriyle reaksiyona girmesiyle oluşmaktadır. Pinhol diye tabir edilen bu durum malzemenin dayanım değerlerini düşürerek kalıcı hasar oluşumuna sebep olmaktadır. Matrisin elyafları yeterince ıslatmamasına ve

özellikle radüslerde kuru alan oluşmasına neden olan bu durum katkı malzemesi kullanımıyla önlenmektedir [37].

4.7.4. Emisyon Kontrolü

Kompozit malzemeler kullanılan reçineye ilave edilen katkıları nedeniyle gaz salınımı eğilimindedirler. İş sağlığı ve güvenliği açısından stiren emisyonunun azaltılması yönünde sınırlayıcı tedbirler alınmaktadır. Açık kalıplama yöntemi kullanılarak CTP üretimi yapılırken daha az gaz oluşumu ve daha az stiren bazlı kimyasalların kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [37].

4.7.5. Reçine Akışkanlık Kontrolü

Kompozit malzeme imalatında reçinenin iyi bir ıslatma kabiliyeti olması istenmektedir. Bu durum reçinenin akışkanlık direnci ile ilgilidir. Kullanılan katkı malzemeleri düşük vizkosite değerleri sağlayarak dolgu malzemelerinin dağılmasını ve ıslanmasını kolaylaştırmaktadır. Bununla beraber SMC (hazır kalıplama) yöntemiyle yapılan üretimde ise macun kıvamındaki hammadde için yüksek akışkanlık direnci istenmektedir. Bu durum için uygun özel kalınlaştırıcı katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Uygulama kolaylığı açısından spreya veya fırça kullanılarak yapılan uygulamalarda reçinenin vizkosite değerinin düşük olması istenir. Reçinelerin akışkanlık direnci, kullanılan yöntemlere göre modifiye malzemesi kullanılarak belirlenebilmektedir [37].

4.7.6. İletkenlik Kontrolü

Çoğu kompozit iletken değildir. Kompozit malzemelere iletkenlik özelliği karbon elyafları, metal partikülleri veya iletken liflerin ilave edilmesiyle kazandırılmaktadır. Kalıplama sürecinde iletken malzemelerin katılması ile elektromanyetik maskeleme işlemi gerçekleştirilmiş olmaktadır [37].

4.7.7. Mukavemet Kontrolü

Takviye malzemeleri sayesinde geliştirilebilen bir özelliktir. Kauçuk veya elastomerlerin ilavesiyle çevresel etkilere karşı dayanım büyük oranda artmaktadır [37].

4.7.8. Antioksidantlar

Polimer kompozitler oksitlenmenin önlenmesi veya geciktirilmesi amacıyla antioksidant katkı malzemelerinin kullanılması gerekmektedir. Malzemelere uygulanan işlemlerin neticesinde oksidasyonun önüne geçilirken bazı özelliklerde azalamalar meydana gelebilmektedir. Özellikle yapılarında hidrojen atomu bulunan malzemeler oksijenle reaksiyona girerek nem oluşturabilmektedir [37].

4.7.9. Antistatik Özellik Kontrolü

Polimer malzemelerin statik elektrik ile yüklenmesini önlemek için kullanılan katkı malzemeleridir. Statik elektrik son üründe veya malzemenin işlenmesi sürecinde sorun oluşturabilmektedir. Plastikler yüklendikleri statik yükler yüzünden elektrik şoku oluşturabilir. Yangın tehlikesi ve toz toplama gibi olumsuzluklar meydana gelebilir. Özellikle elektronik ürünlerde statik elektrik yükü önem arz etmektedir [37].

4.7.10. Köpürme Kontrolü

İşleme sırasında polimerler içerisine katılan ve reçineyi küçük hücrelere bölmek amacıyla kullanılan kimyasal maddelerdir. Düşük yoğunluğa ve iyi yalıtkanlık özelliğine sahiptirler. Kalıplamada reçinenin çekmesini engelleyerek parçada oluşabilecek deformasyonları sınırlar. Maliyeti düşüktür [37].

4.7.11. Plastifiyanlar

Plastikleştiriciler kompozit malzemelerin işlenebilme kabiliyetinin geliştirilmesi amacıyla eklenen maddelerdir. Malzemelerin fiziki ve mekanik özelliklerinde iyileştirme işlemlerinde kullanılmaktadır [37].

4.7.12 Kaydırıcılar

Kompozit malzeme yüzeyinin pürüzsüz kaygan bir hal almasını sağlamaktadır. Çalışan parçalarda sürtünme katsayısı azalırken özellikle malzemenin kalıptan kolayca çıkması amaçlanmaktadır [37].

4.8. TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN ÖZEL KATKILARI

Termoplastiklerin fiziki, kimyasal ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için tıpkı termoset malzemelerde olduğu gibi katkı malzemeleri kullanılmaktadır.

4.8.1. Isı Sabitleyiciler

Isı oluşumu sonucu termoplastik polimerin yapısında oluşabilecek bozulmaların önlenmesi amacıyla kullanılan katkı malzemeleridir. Termoplastik malzemeler ısı yüklemelere karşı hassas yapıdadır ve çok çabuk deforme olabilmektedir. Termoplastiklerin özelliklerini kaybetmeden sınır değerlere kadar ısı mukavemet göstermesi için modifiye edilerek, matrisi ve elyaf tarafından oluşturulan sistemin çalışma ömrü arttırılabilmektedir [37].

4.8.2. Ultraviyole Işın Koruyucuları

Kızıl ötesi ışınlarını absorbe ederek termoplastik polimerleri koruyan malzemeler ultraviyole ışın stabilizatörü olarak tanımlanır [37]. Özellikle son ürün aşamasında ve ürün kullanımında güneş ışığı nedenli problemlerin önlenmesi amacıyla yoğun olarak kullanılan malzemelerdir.

4.9. BİLEŞİK OLUŞTURMA DURUMLARI

Kompozit malzemeler birbirlerinin eksik noktalarını tamamlamak amacıyla bir araya getirilmiş malzemelerden oluşmaktadır. Bu nedenle çok fazlı malzemeler olarak adlandırılırlar. Yapılarında her zaman bir ana faz ve onun içerisine yerleştirilmiş pekiştirici fazdan oluşan sistemlerdir. Bu iki fazın etkileşimi Mikroskobik veya Makroskobik bileşim şeklinde olmaktadır [38].

4.9.1. Mikroskobik Bileşim

Matris ve takviye elemanın mikroskobik düzeyde homojen bileşimi ile meydana gelen yapıdır. Genellikle mikroskobik bileşime kompozit malzemelerde nadiren rastlanır. İzotropik malzeme özelliklerine yakın özellikler göstermektedirler [38].

4.9.2. Makroskobik Bileşim

Boyutları 0,1 mm üzerinde ve gözle görülebilir nitelikte dolgu elemanlarının kullanımı sonucu meydana getirilen bileşimlerdir. Üstün mekanik özelliklere sahip malzemelerin oluşturulması mümkün olmaktadır [38].

5. TASARIMDA DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSULAR

Kompozit malzeme kullanarak üretimi yapılacak makine elemanının tasarımında dikkat edilecek çok fazla değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler iki ana başlıkta incelenebilir.

Çalışma koşulları:

- Isıl, mekanik gerilim yüklemeleri,
- Çarpma, ani darbe durumları,
- Kimyasal yüklemeler ve çevre şartları,
- Elektrik ve manyetik yükleme,

İş parçası tasarım koşulları:

- Takviye şekli ve niteliği, yükleme doğrultusuna göre durumu,
- Makina elemanının ağırlığı,
- Birleştirme yerlerinin seçimi ve birleştirme şekli,

olarak sıralanan bu değişkenler dikkatle analiz edilmelidir[39]-[41]. Tasarım sırasında makine elemanının ne şekilde imal edileceği, kompoziti meydana getiren malzemelerin neler olduğu gibi diğer faktörler de göz önünde tutulmalıdır.

5.1. Gerilim Uygulama Şartları

Kompozit malzemeler gerilim yüklemelerine karşı geleneksel malzemelere göre farklı tutum sergilmektedirler. Malzeme üzerine etkiyen yüklerin yönü, doğrultusu, şiddeti ve uygulama frekansı malzemenin dayanımında ve çalışma ömründe belirleyici rol oynamaktadır. Fiber yönüne dik doğrultuda kuvvet etkiyen kompozit malzemelerin dayanımı matris ve malzeme içyapısıyla ilişkilidir. Metal ve alaşımlarının aksine anizotropik yapıya sahip olan kompozit malzemeler yapılarını oluşturan elyafların, dolgu malzemelerinin ve matrisin yerleşim konumlarına, geometrilerine, özel yüzey işlemlerine bağlı olarak farklı özellikler taşımaktadır. Mukavemet, sürtünme ve sürtünme dayanımı, rijitlik, yorulma gibi fiziksel yüklerle, asidik ve tuzlu su ortamlar gibi kimyasal yükler, yüksek ve düşük ısı ortamlara ve elektriksel yüklemelere karşı gösterdiği direnç bu değişkenlerle ilişkilidir. Kompozit malzemelerin en fazla etkiye maruz kalan kısmını matris oluşturmaktadır. Matris kompozit malzeme üzerine etkiyen

yükleri ve titreşimleri temas halinde bulunduğu diğer makine elemanlarına iletmektedir. Yapı içerisinde elyafların konumlandırılması, malzeme üzerine etkiyen kuvvetlerin transfer edilmesi ve elyafların dış etmenlerden korunması matrisin temel işlevini oluşturmaktadır. Örneğin; partikül dolgulu kompozitler heterojen yapıya sahip olmalarına rağmen homojen davranış sergilemektedirler. Matris ile iyice karışmış olan partiküller izotropik malzeme özelliklerine yakın özellik taşımaktadır. Bununla beraber elyaf takviyeli kompozitlerde herhangi bir nedenle elyaf üzerinde meydana gelen çatlak ve kusurların büyümesini önleme görevini de yerine getirmektedir. Yapılan araştırmalar sonunda kompozit malzemenin çalışma ömrünün hemen başında çatlak ve benzeri hasara uğradığını ve çalışma ömrünün büyük bölümünde işlevini bu şekilde yerine getirdiğini göstermektedir. Bu durum matris malzemesinin kuvvet yükleme şartlarının belirlenmesinde önemli rol üstlendiğinin ispatı niteliğindedir.

5.2. Isı ve Elektrik Yüklemelerinin Malzeme Üzerine etkileri

Diğer akışkanlarda olduğu gibi ısı ve elektrik akımları direncin az olduğu yerlerden akma eğilimindedirler. Bu durum kompozit malzemelerde direnci yüksek elyafların tercih edilmesiyle önlenmektedir. Özellikle ısı ve elektriksel yüklemelere dayanıklı olduğu bilinen cam, seramik ve aramid elyaflar kullanılması durumunda matris malzeme özelliklerine yakın özelliklerin kompozit malzemeye kazandırılmasını sağlamaktadır. Bunun tersine karbon ve metalik elyafların kullanılması halinde kompozit malzeme elyaf özelliklerine yakın özellikler sergilemektedirler. Polimerik matrisler metalik matrislere oranla sadece %1 lik değerlerde iletim kapasitesine sahipken bu durum kullanılan elyaflar için farklılık göstermektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan elyafların takviye biçimi, yerleşim doğrultusu ile kuvvetin akış yönü arasında meydana gelen açı büyük önem taşımaktadır. İzotropik yapıya sahip olan cam elyaflarında bu durum daha net izlenebilmektedir. Cam elyafların aksel ve eksene dik yönde enerji iletim katsayılarında %30 a varan değişimler tespit edilmiştir. Bu durum kullanılan elyafların türüne ve özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir (karbon elyaflarda bu değişim oranı % 2 kadardır).

Isıl yüklemeler karşısında kompozit malzemeler hassas ve kırılğan bir davranış gösterirler. Bu durumun temel nedeni kompozit imalinde kullanılan takviye elemanı, dolgu malzemeleri, matris ve diğer katkı malzemelerinin farklı ısı değerlere sahip olmasıdır.

Bu noktada kompozit malzemeleri oluşturan malzemelerin kendi özelliklerini yitirmediği kuralının her zaman hatırlanması gerekmektedir. Isıl yüklemeler altında farklı uzama ve genleşme değerlerine sahip olan bileşenler herhangi bir dış yüke maruz kalmadan malzemede kalıcı hasar oluşturabilirler. Isıl yüklemeler tabakalı kompozit yapılarda farklı hasar mekanizmalarının gelişmesine neden olmaktadır. Farklı ısıl özelliklere sahip tabakalar takviye doğrultularındaki değişiklikler nedeniyle burulma veya çarpılma gibi hasarlanmalara uğrarlar. Metal ve alaşımlarında ısıl yükler sebebiyle oluşan olumsuzlukların telafisi uygulanacak ısıl işlemler sonucu mümkündür. Ancak kompozit malzemelerde böyle bir olasılık bulunmamaktadır. Kompozit malzeme kullanarak yapılacak tasarımlarda ısıl yükler ve kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin ısıl özellikleri dikkatle üzerinde durulması gereken konudur. Tasarımda genleşme payları, uzama doğrultuları ve özellikle tabakalı kompozitlerde yerleşim doğrultusu önemle üzerinde durulması gereken konulardır.

5.3. Malzemenin Çalışma Ömrü ve Boyutsal Kararlılık

Kompozit malzemeler anizotropik yapıya sahiptir yani malzeme her yerinde aynı özellikleri taşımazlar. İzotropik malzemeler ise yapılarının her noktasında aynı özelliği taşıyan malzemelerdir. Bu farklı yapı özelliği nedeniyle kompozit malzemelerin yorulma mekanizması diğer malzemelerden farklılık göstermektedir. İzotropik yapıya sahip malzemeler üzerinde yorulmayla ilgili yapılan araştırmalar sonunda tanımlanabilir, gözlenebilir ve hesaplanabilir verilerin elde edilmesi sağlanmıştır. Metalik malzemelerde bu durum çatlağın tespitiyle başlayan başlangıç evresi, çekirdeklenme süreci (çatlak gelişimi) ve kalıcı hasarlanma (kırılma –kopma) olarak sıralanabilir. Elde edilen veriler malzeme ömrü ve yükleme koşullarıyla ilgili fikir verebilmektedir. Kompozit malzemelerde ise yorulma davranışı büyük farklılıklar göstermektedir. Çatlağın oluştuğu eleman ve kompozit yapıyı oluşturan bileşenlerin meydana getirdiği bağ yapının dayanımına bağlı olarak değişik durumlar izlenebilmektedir. Kompozit malzemelerde matris malzemesinin elyafta oluşan hasarın diğer elyaflara ulaşmasını önlemesi nedeniyle çatlak başlangıcı ve gelişiminin belirlenmesi zordur. Kompozit malzemeler farklı şekilde yorulma hasarlanmasına maruz kalırlar. Malzemeye etki eden kuvvetin ve yapıyı oluşturan takviye elemanının doğrultusundaki farklılık temel yorulma nedenidir. Bu durumda oluşan çatlak elyaf boyunca gelişme gösterir ve kalıcı hasarlara yol açar.

Dokuma formundaki elyaf malzemelerin kullanımında bu tip hasarların oluşmadığı gözlenmektedir. Yüksek yorulma mukavemeti malzemeye etki eden kuvvet ile elyafların aynı doğrultuda olduğu durumlarda sağlanabilmektedir. Yapıyı meydana getiren bileşenlerin hacimsel oranı da yorulma mukavemetinde belirleyicidir. Elyaf miktarı arttıkça dayanımda artmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerin mukavemetleri diğer kompozitlerden daha yüksektir. Yorulma tabakalı kompozitlerde kuvvet yüklemesinin en fazla olduğu tabakadan başlamaktadır. Kompozit malzemelerin yorulma davranışı ayrıca incelenecektir

5.4. Ani Darbe Etkisi (Çarpma)

Ani ve hesaplanamayan yüklerin malzeme üzerine etki etmesi sonucu sert malzemelerde elastik sünek malzemelerde ise plastik deformasyon oluşur. Malzemelerde genel olarak bu durum absorbe edilen enerji miktarı ile ifade edilmektedir. Bileşenlerin meydana getirdiği bağ değeri, kompozit malzemelerde çarpma sonucu meydana gelebilecek değişikliklerin oluşumunu ve gelişme sürecini belirlemektedir. Ara yüzey bağ değerinin düşük olduğu durumlarda kompozit malzemenin mukavemetinin düşük değerlerde olmasıyla ani yüklemeleri daha iyi absorbe ettiği izlenmektedir. Ara yüzey bağının yüksek değerlerde olması malzemeye gevrek malzeme özelliği kazandırır ve ani yüklemeler sonucu kalıcı hasarların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum takviye elemanı (elyaf) yüzeyine uygulanacak işlemlerle kontrol altına alınabilmektedir ve istenilen nitelikler malzemeye kazandırılabilir. Tokluk malzemenin kırılma ve kopma dayanımının ölçüsü olarak tanımlanan olgudur. Kompozitlerin ani yüklemeler ve çalışma ömürlerinin belirlenmesinde temel unsurlardan biridir.

5.5. Kimyasal Etkileşim

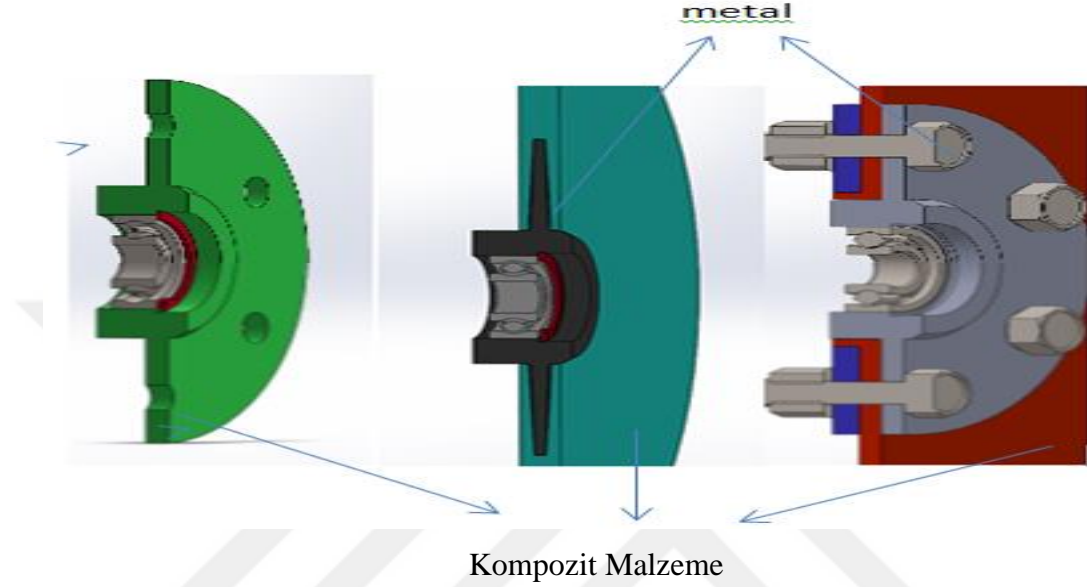
Kompozit yapıyı oluşturan takviye elemanları, dolgu malzemeleri ve katkı malzemelerinin matris tarafından paketlenmesi ile meydana gelen yapıdır. Dolayısıyla matrisin görevi bütün yapıyı bir arada tutarken aynı zamanda zorlayıcı faktörlerden de korumaktır. Kimyasal ve çevresel etmenler bu faktörlerin başında gelmektedir. Bu olumsuz etkileri karşılayan matrisin korozif ortamlara dayanımı ve nemli ortamlarla ilişkisi dikkatle incelenmelidir. Matrisin nem absorbe etmesi istenmeyen bir durumdur ve malzemenin teknolojik özelliklerini belirlemektedir. Polimerik malzemeler kimyasal maddelere ve çevresel etmenlere karşı büyük ölçüde direnç göstermesine rağmen, yapısında hidrojen bulunduran bazı polimerlerin nemden etkilenebildiği bilinmektedir.

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler 60°C üzerinde boyutsal stabilitesini kaybederek sürünme davranışı sergilerken nem sebebiyle %20 oranında dayanımında azalma yaşanabilir. Metalik matrisli kompozit malzemelerde kimyasal yükler ve hava şartlarından kaynaklı korozyon olayı gelişimi görülmektedir

5.6. Parçaların Birleştirilmesi

Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de kompozit malzemelerden imal edilen iş parçasının diğer iş parçalarıyla birleştirilmesidir. Malzemelerin birleştirme yerleri, uygulanan yöntem ve bağlama şekilleri kullanılacak malzeme kompozit- kompozit veya kompozit-farklı malzeme olsa bile dikkatle belirlenmelidir. Metalik malzemeler için öngörülen sökülebilir veya sabit birleştirme yöntemleri kompozitler için her zaman tercih edilmez. Kompozit malzemeler kullanılarak yapılan imalatlarda ya tek parça imalat tercih edilir veya kompozit yapı içerisine özel insert birleştirme elemanları yerleştirilerek önceden delik, pim, somun ve kama kanalı oluşturulması tercih edilir. Kompozitler sanayide çok sayıda parçanın birleştirilerek tek parça halinde imalatına izin vermesi nedeniyle yoğun olarak tercih edilmektedirler. Ayrıca birleşme yerlerinin bulunmaması gürültü ve titreşiminde azaltılmasına olanak sağlamaktadır. Aynı durum döküm yoluyla imalat içinde geçerli olsa da kompozit malzemenin hafiflik gibi bir avantajı bulunmaktadır. Kompozit malzemelerde talaşlı imalat yöntemlerinin kullanılması pekiyi sonuç vermemektedir. Yapılacak talaşlı imalat malzeme yapısında bozulmalara ve malzeme dayanımında düşmeler meydana gelmesine sebep olmaktadır. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi konusundaki yetersizliklerinin giderilmesi için kaynaklama ve yapıştırma yöntemleriyle ilgili araştırma. geliştirme çalışmaları sürmektedir. Özellikle termoplastik matrisli kompozit malzemelerin kaynaklanabilmesi için direnç kaynağı, sıcak gaz kaynağı, titreşim ve sürtünme kaynağı gibi metotlar bulunmaktadır. Basınç altında yapıştırıcılar yetersiz kalmaktadırlar. Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanılacak yüzey alanı mümkün olduğunca büyük tutulmalı, kademeler oluşturarak kenetlemeler meydana getirilmelidir. Metal ve metal alaşımları kompozit malzemelere göre ağırdır. İzotropik yapıda olan bu malzemeler yerine daha hafif ve anizotropik yapıda olan kompozit malzemelerin ağırlık açısında değiştirilmesi her zaman tercih edilmemektedir. Maksimum gerilme ve şekil değiştirme kriterleri dikkate alınarak birbirini yerine kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

Makine elemanlarında en çok kullanılan çekme çubuğu, plaka ve kirişler için ağırlığa bağlı karşılaştırmalar yapılabilir. Bu durum da bile esnek imalata izin veren kompozitlerin zayıf yönleri iyileştirilirken ağırlığın bu özelliklere oranı belirleyici bir faktör olarak görülmektedir. Şekil 5.1’de kompozit malzemelerin diğer malzemelerle birleştirilme yöntemleri görülmektedir.



Şekil 5.1. Kompozit malzemelerin mekanik yöntemlerle birleştirilmesi.

Yapıştırıcıların basınç gerilmesi altında çok zayıf olmaları, yapıştırıcılarla birleştirmenin uygulama alanını daraltmaktadır [52]. Ağırlık nedeniyle çelik gibi izotropik malzemelerin yerine kompozit malzeme kullanımında, çelikten yapılmış olan makina elemanının sökülüp yerine daha hafif olan kompozit malzemedan yapılmış olanının monte edilmesi şeklinde bir uygulama doğru sonuçlar vermemektedir. Kompozit veya çeliğe göre daha hafif olan alüminyum alaşımları birbiri yerine kullanılırken tercihi tayin edecek karşılaştırmalar maksimum gerilme veya maksimum şekil değiştirme kriterleri kullanılarak yapılmalıdır. Makina elemanı olarak en çok karşılaşılan çekme çubuğu, kiriş ve plakalar için karşılaştırma kriterleri ağırlığa bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 5.1’de kompozit imalinde kullanılan bazı malzemelerin teknolojik özellikleri görülmektedir. Çeşitli kombinasyonlar yapılarak amaca en uygun kompozitin elde edilmesi mümkündür. Belirli özelliklerin ağırlıkla oranı önemli ve sınırlayıcı bir faktördür.

Çizelge 5.1. Mühendislik malzemelerinin tipik özellikleri[85].

| Malzeme | Yoğunluk (ρ) (g/cm ³) | Elastisite modülü (GPa) | Çekme muk. (GPa) | Spesifik modül (E) | Spesifik muk. (σ) ρ | Maks. çalışma sıcaklığı (°C) |
|---------------------------------------|--|-------------------------------|------------------------|--------------------------|---|---------------------------------------|
| METALİK MALZEMELER | | | | | | |
| East iron, grade 20 | 7, 0 | 100 | 0, 14 | 14, 3 | 0, 02 | 230-300 |
| Steel, AISI 1045h. rolled | 7, 8 | 205 | 0, 57 | 26, 3 | 0, 073 | 500-650 |
| Aluminyum 2024-T4 | 2, 7 | 73 | 0, 45 | 27, 0 | 0, 17 | 150-250 |
| Aluminyum 6061-T6 | 2, 7 | 69 | 0, 27 | 25, 5 | 0, 10 | 150-250 |
| PLASTİK MALZEMELER | | | | | | |
| Nylon 66 | 1, 15 | 2, 9 | 0, 082 | 2, 52 | 0, 071 | 75-100 |
| Polypropylene | 0, 9 | 1, 4 | 0, 033 | 1, 55 | 0, 37 | 50-80 |
| Epoxy | 1, 25 | 3, 5 | 0, 069 | 2, 8 | 0, 055 | 80-215 |
| Phenolic | 1, 35 | 3, 0 | 0, 006 | 2, 22 | 0, 004 | 70-120 |
| SERAMİK MALZEMELER | | | | | | |
| Alumina | 3, 8 | 350 | 0, 17 | 92, 1 | 0, 045 | 1425-1540 |
| MgO | 3, 6 | 205 | 0, 06 | 56, 9 | 0, 017 | 900-1000 |
| KISA LİFLİ KOMPOZİT MALZEMELER | | | | | | |
| Cam dolgulu (35%) Epoxy | 1, 90 | 25 | 0, 30 | 8, 26 | 0, 16 | 80-200 |
| Cam dolgulu(60%) Epoxy | 2, 00 | 15, 7 | 0, 13 | 7, 25 | 0, 065 | 80-125 |
| Nylon dolgulu(35%)Epoxy | 1, 62 | 14, 5 | 0, 20 | 8, 95 | 0, 12 | 75-110 |
| Nylon dolgulu(60%)Epoxy | 1, 95 | 21, 8 | 0, 29 | 11, 18 | 0, 149 | 75-110 |
| TEK YÖNLÜ KOMPOZİT MALZEMELER | | | | | | |
| S- Glass Epoxy (45%) | 1, 81 | 39, 5 | 0, 87 | 21, 8 | 0, 48 | 80-215 |
| Karbon Epoxy (61%) | 1, 59 | 142 | 1, 73 | 89, 3 | 1, 08 | 80-215 |

Diğer taraftan, kompozit malzemeler birim ağırlığın çok fazla olması gerektiği problemler için de bir çözümdür. Örnek olarak dengeleme ağırlığı, radyasyon yalıtımı, direnç kaynağı elektrotu gibi yerlerde birim hacimdeki ağırlığın çok yüksek olması istenir. Bu sayede, daha az yer kaplayarak daha kolay kontrol edilme imkânı sağlamaktadırlar. Söz konusu malzemeler çeşitli kombinasyonlarla ısı yalıtıcısı, radyasyon yalıtıcısı, titreşim söndürücü, döküm ve ekstrüzyon kalıbı olarak da kullanılabilir. Toz metalürjisi ile üretilen bu malzemeler, bakır tungsten, gümüş-tungsten, gümüş-nikel, gümüş- kadmiyum oksit, tungsten-nikel-bakır, tungsten nikel-demir-molibden gibi çeşitli kompozisyonlarda üretilmektedir.

Kompozit (karma) malzemelerin kusurlarının analizi için yeni test ve deneylerin uygulanmasını gerektirmektedir. Bölümden bölüme ve aynı bölüm içinde önemli yoğunluk değişimi yaygın görülen ve istenmeyen durumdur. Katmanlar arasında yapraklar halinde ayrılma oluşabilir ve fark edilemeden kolayca gelişmeye devam edebilir. Fakat kompozit malzemeler metallere farklı özelliklerinin doğal sonucu olarak, kusurların bir matristen diğerine veya bir takviye elemanından diğerine doğru geçerek ilerlemesine izin vermezler. Kusurun parça çalışması üzerindeki etkisinin incelenmesi, kusurların tipi ve ölçülerinin sınırlanmasıyla tanımlanan standartlara referans oluşturmaktadır. Çalışma ömrünün belirlenen düzeyin altına düşmesine engel olmaktadır. Buna rağmen çoğu standart eksiksiz değildir ve kabul edilebilir kusurun belirlenmesini güçleştirmektedir. Çatlak mekaniği, çatlak ve benzeri kusurların incelenmesine yardımcı metotlara sahiptir. Bu metotların iki esas amacı vardır. Kararsız ilerlemesi olmayan, kabul edilebilir çatlak ölçüsünün miktarının belirlenmesi (Genellikle yüksek yoğunluklu bir yükleme için) ve devri yüklemelerde çatlak ilerleme oranının hesaplanması için kullanılmaktadır [55].

5.7. ÜRETİMDE KAŞILAŞILAN PROBLEMLER

Kompozit malzeme imalatında genel olarak imalat prosesinde ve bileşenlerin kimyasal yapılarında meydana gelen süreksizlikler nedeniyle problem yaşanmaktadır. İmalat prosesinde kullanılan bazı yöntemlerin tekrarlanabilirlik oranı düşüktür ve uygulamayı yapan elemanın becerisine bağlıdır. Bu yöntemler açık kalıpta yapılan uygulamaları kapsamaktadır. Kimyasal problemler, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler birbirleriyle reaksiyona girerken meydana gelen süreksizlikler sonucu meydana gelmektedir. Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerden biri olan matris endotermik (dışarıdan ısı alımı) veya ekzotermik (dışarıya ısı salınımı) reaksiyonlar sonucu katılaşmaktadır. Katılaşma sürecinde gaz salınımı da oluşabilmektedir. Bütün bu olumsuzluklar uygun proses ve malzeme seçimi ile önlenmektedir.

5.7.1. Yüzey ve Köşelerde Jelkot Çatlağı Oluşumu

Jelkot, imal edilen kompozit malzemenin yüzey kalitesini belirleyen bileşendir. Jelkotun fırça ile kalıp yüzeyi üzerine uygulanması yaygın bir uygulamadır ve çoğu zaman yeterli özenin gösterilmemesi nedeniyle sıkça sorun yaşanmaktadır. Jelkot kalınlığının max 0.5 mm olması veya bu değer altında kalması istenmektedir.

Bu kalınlık şartını sağlayabilmek için spreyleme ile yapılan uygulamalar geliştirilmeye çalışılmaktadır. Spreyleme yöntemi ile yapılan uygulamalarda kalıp yüzeyinde 0.3 mm ile 0.45 mm aralığında kaplama yapılması sağlanmaya çalışılmaktadır. Buna rağmen dik duvar ve dip köşelerde akıntı ve yığılmalar oluşması gözlenmektedir. Bu yığılma ve akıntılar temizlenmeli ve jel kot uygulamasından sonra fazla zaman geçirmeden kalıplama işlemi gerçekleştirilmelidir. Bilinmelidir ki içerisinde herhangi bir dolgu veya katkı malzemesi bulunmayan jel kot gerek çevresel koşullar gerekse yerçekimi nedeniyle istenilen niteliğini kaybedecektir. İmalatı yapılan iş parçası kalıptan çıkarılırken esnetme ve gerilme gibi yüklemelere maruz bırakılmamalıdır. Malzemenin çıkartılması sürecinde çatlak ve çiziklerin oluşmayacağı şekilde kalıp tasarımı yapılmalıdır [56].

5.7.2.Elyaf – Matris Yerleşim Hataları

Kompozit malzemelerin imalat sürecinde kalıp köşelerinde görülen elyaf ve reçinenin tam olarak karışmaması durumu olarak tanımlanan durumdur. Reçine ve elyafın homojen olarak dağılmadığı bu durum en çok reçine transfer metodunda (RTM) görülmektedir. Bu hata genellikle imalat süreci sonunda parça kalıptan çıkarıldığında tespit edilebilir ve geri bu dönüşü olmayan bir durumdur. Konu üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda radüs değerinin olması gerekenden düşük değerlerde olması, kekin (hamur halindeki malzeme) köşe tasarımı dolduramaması ve büyük kesit değişimlerinin neden olduğu görülmektedir. Bu nedenlerle elyaf ve reçine aynı esneklikle tam olarak yüzeyleri dolduramamaktadır [56].

5.7.3. Kalıp İmalatında Radüs Ölçüsünün Önemi

Sanayide özellikle seri imalatta RTM metodu yoğun olarak tercih edilmektedir. Reçine transfer metodunda kalıbın radüs ölçüleri verilirken imalatı yapılacak parça kalınlığının 3-5 katı kadar olması koşulu bulunmaktadır. Bu nedenle kalıp imalatı sürecinde radüslü bölgelere denk gelen parça kalınlığında artışlar meydana gelmektedir. polyster matriste çatlaklar oluşmasına yeterince takviye ve dolgu elemanı kullanılmadan meydana getirilen kalınlık artışları sebep olmaktadır. Bu olumsuzluk radüs ölçülerinden kaynaklanan kalınlık farkının malzemenin tamamında kullanılmasıyla önlenmektedir. Tasarımın bu olasılığı kısıtlaması durumunda şartlar zorlanarak radüs ölçülerinin maksimum değere yaklaşması sağlanmalıdır.

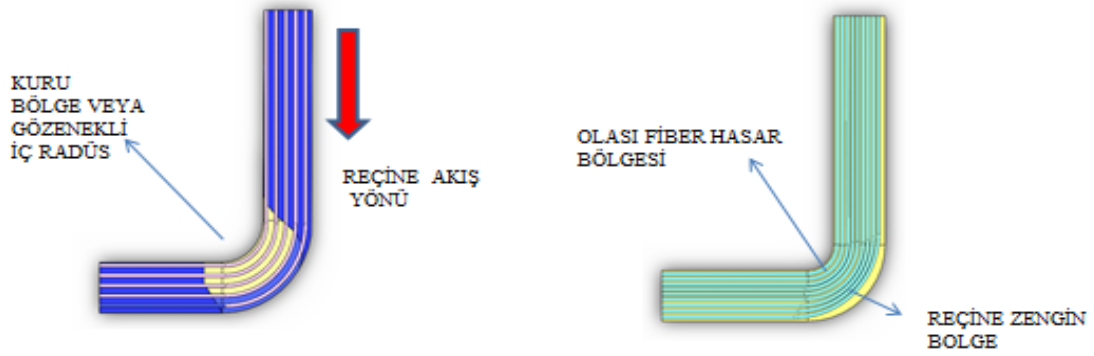
Radüs ölçülerinin değiştirilemediği durumlara ise kalıp içerisinde imalata dönük ön hazırlık yapılmalıdır. Ek takviyeler yapılarak elyaf ve reçinenin tam olarak kalıbı doldurması sağlanmalıdır [56].

5.7.4. Hasar Başlangıcı (atlak Oluşmu)

Kompozit malzemelerde çatlağın çok hassas şekilde araştırılması gereken bir sorun olduğu bilinmektedir. Parça tasarımında yapılan hatalar ve montaj esnasında malzemeye etki eden n gerilmeler çatlaklara neden olmaktadır. Tasarım aşamasında parçanın üzerine etki eden kuvvetler, kullanım yeri ve kullanım şartları dikkate alınmadan çalışma yapılması parçanın ihtiyaç duyulan dayanım değerlerine ulaşamamasına neden olmaktadır. Malzemenin maruz kalacağı etkenler dikkate alınarak belli bir emniyet katsayısı üzerinden üretim yapılmalıdır. Kompozit malzemelerde çatlak oluşumu bu etkenler sonucu elyafıta veya matris malzemesinde ayrı veya her ikisinde aynı zamanda oluşabilir. Bir elyafıta meydana gelen çatlağın matris tarafından diğer elyafılara sirayet etmesi önlenir ve iş parçası özelliğini yitirmeden uzun süre bu şekilde çalışmaya devam edebilir. Çatlağın matris üzerinde meydana gelmesi özellikle ani darbe yüklemeleri sonucu oluşması sık karşılaşılan bir durumdur. Matriste meydana gelen çatlaklar zamanla elyafılara da zarar vermekte ve parça ömrünü kısıltmaktadır. Elyaf ve matris üzerinde aynı anda meydana gelen çatlaklar ise kalıcı hasar nedenidir. İş parçasının montajı sırasında zorlama ve gerilmenin malzemenin mukavemet değerini aşmamasına dikkat edilmelidir.

5.7.5. Takviye Malzemelerinde Hasar Oluşumu

Kompozit malzeme ile yapılacak imalatta kalıbın küçük radüs değerlerine sahip olması preformun-hamurun kalıp içerisini doldurmasını zorlaştırmaktadır. Kalıp kapandığında düşük eğrilik değerine sahip radsler elyafılarda hasar oluşumuna ve kalıbın tam olarak dolmamasına neden olur. şekil 5.2’de köşe radslerinden kaynaklanan kuru kalan bölgeler ve reçine birikimi olan alanlar görülmektedir. Reçine bakımından zengin bölgeler tıpkı metallerin işlenmesinde olduğu gibi deformasyon sertliğine benzer bir alan oluşturarak malzemenin geri kalanından farklı özellikler göstermektedirler. Gevrek bir yapıda olan bu bölge çatlak oluşumu konusunda hassastır.

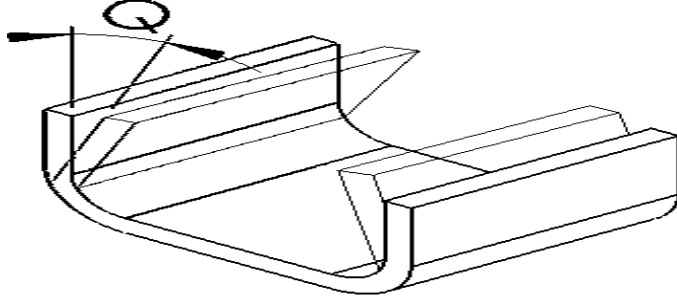


Şekil 5.2. Elyaf hasar oluşumu durumları ve yerleşim hataları.

Reçine bu bölgede rahat ilerleyemezken, radüs değerinin büyük olduğu bölgede reçine bakımından zengin alanlar meydana getirir. Literatürde iç bölgedeki radüs değerinin 3mm-12mm arasında olması, dış bölgede ise bu değerın kesit kalınlığını 3-5 katı kadar olması gerektiği belirtilmiştir.

5.7.6. Kalıplama Sonrası Şekil Değişimi (spring-in)

Kalıplanan malzemelerde kalıplama etkisinden sonra eski haline dönme eğilimi bulunmaktadır. Bu durum kompozit malzemeler içinde geçerlidir. Meydana gelen bu distorsiyonların belli sınırlar içinde olması normal karşılanmaktadır. Özellikle eğrisel yani açısız değere sahip yüzeylerin oluşturulmasında spring in olarak tanımlanan distorsiyonların meydana geldiği görülmektedir. Bu şekil değişimleri iki büyük soruna neden olmaktadır. Bunlardan ilki iş parçası üzerinde meydana gelen yüzeysel ve işlevsel bozukluklardır. Malzemenin ölçüsel değerlerinde ve parça formunda değişimler meydana gelmektedir. Diğer sorun ise malzeme üzerinde kalıntı gerilmeler oluşturmasıdır. Metalik malzemelerde bu olumsuzlukların giderilmesi sağlanabilirken kompozit malzemelerde kalıplama sürecinde yapılan post kür işlemi dışında bir işlemin yapılması mümkün olmamaktadır. Estetik kaygıların giderilememesi, boyutsal stabilitenin sağlanamaması ve gerekli mukavemet değerlerine ulaşamaması iş parçasının kullanılamaz olduğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle kalıp imal edilirken hassas çalışmalar yapılmalı ve öncelikler belirlenmelidir. Bilinmelidir ki kalıp imalatı maliyetli bir konudur. Şekil 5.3 te kalıplanarak üretilmiş parçada meydana gelebilecek şekilsel geri dönüş (distorsiyon) görülmektedir [56].



Şekil 5.3. Kompozit kalıplamada spring in etkisi.

İmalat sürecinde meydana gelecek yüzey çökmeleri parçanın ve prosesin tamamını derinden etkilemektedir. Takviye elemanı ve reçinenin yeterli miktarda bulunmaması veya karışımın homojen olmaması durumunda meydana gelen kısmi çökmeler malzemenin kullanılmadan hurda haline gelmesine neden olmaktadır.

5.7.7. Kuru Kalan Bölgeler ve Hava Kabarcığı Oluşumu

Kompozit malzemelerin imalatında reçinenin takviye ve dolgu malzemelerini yeterince ıslatamaması nedeniyle meydana gelen olumsuzluktur. Islatılmayan elyaf bölgeleri ve reçine içerisinde oluşan hava kabarcıkları bu olumsuzluğun temelini oluşturmaktadır. Hava kabarcıkları kompozit malzeme imalinde bileşenlerin birbiriyle girdikleri reaksiyonlar sonucu ve yapılarında bulunan nemin buharlaşması nedeniyle meydana gelebilmektedir. Bazı durumlarda gaz salınımı bitmeden meydana gelen katılma sonucu malzeme içerisinde kabacıklar görülmektedirler. Parçaya post kür işlemi uygulanırken ısının etkisiyle hava kabarcıklarının genişmesi, parça yüzeyinde şişme ve kabarcıklar oluşması ve parçaya kalıcı hasar (patlama) vermesi şeklinde olumsuzluklara yol açmaktadır.

5.7.8. Gaz Salınımı (pin hole)

Kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı sırasında kullanılan takviye malzemesi, dolgu malzemesi ve matrisin reaksiyona girmesi sonucu gaz salınımı oluşur. Özellikle polyester ürünlerinin stiren gazı salınımı malzeme ömrü boyunca devam etmektedir. Malzemeye uygulanacak post kür işlemiyle gaz salınımında azalmalar meydana gelse de bu olumsuzluğun devam ettiği izlenmektedir. Malzeme üzerine boya ve diğer yüzey işlemlerinin uygulanması durumunda gaz çıkışı nedeniyle yüzeylerde bozulmalar oluşabilmektedir. Boya veya yüzey işlemlerinden sonra uygulanacak post kür işlemleri

yüzeylede meydana gelecek hasarların daha belirgin hale gelmesine neden olmaktadır [56]. Kompozit yapılarda ortaya çıkan hasarların, yapının dayanım ve yorulma ömürlerine etkilerini ortaya koymak ve kritik hasar boyutunu belirlemek için birçok bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar her zaman tahribatsız muayene değerlendirme ve test (NDI, NDT) yöntemlerindeki gelişmelerle paralel şekilde yürütülmektedir [57]. Kompozit malzemelerdeki hasarın tespiti, hasar bölgesinin belirlenmesi ve hasarın karakterize edilmesi için güvenilir bir tahribatsız muayene yöntemini bulmak çok çaba gerektirmektedir. Modern tahribatsız test teknikleri literatürde; görsel inceleme yöntemleri, optik metotları, eddy-current akımlarıyla inceleme (elektro-manyetik testler), ultrasonik incelemeler, lazer ultrason incelemeleri, akustik yayılım testleri, titreşim analizi, radyografi, termografi ve ışık dalgalarıyla muayene olarak sıralanmaktadır [57].

6. YENİ TAHRİBATSIZ MUAYENE (NDT) YÖNTEMLERİ

Kusurların hasar oluşumu için önemli bir rol oynadığı düşünüldüğünde, kusurun sezilmesindeki belirsizlikler malzeme muayenesi için çıkış noktasını oluşturmaktadır. Ses dalgaları, x-ışını, penetrant boya nüfuzu ve karışık akım gibi tahribatsız muayene yöntemleri kritik parçaların hata araştırılmasında kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemin güvenilirliği ve hassasiyeti üzerinde çalışılması gereken temel problemlerdir [55].

6.1 TAHRİBATSIZ MUAYENE

Tahribatsız muayene (Non-destructive testing, kısaca: NDT) ile inceleme yapılacak olan malzeme ya da parçanın bütünlüğüne zarar vermeden yapılan muayene türüdür. Bu muayenenin geçerliliği ise daha önceden yapılmış olan tahribatlı muayenelerin sonuçlarına dayanmaktadır ve birbirleriyle kıyaslanabilmektedirler.

Tahribatsız muayene yöntemleri malzemelerin içerisinde görünmeyen süreksizliklerin veya malzeme yüzeyine açık süreksizliklerin tespitinde kullanılmaktadır. Hata ve kusur tespiti dışında kapalı bir malzemenin içinde bulunan bir diğer malzemenin miktarını ölçmede, metal yüzeylerdeki boya kalınlığının belirlenmesinde, montajı yapılmış parçaların durum tespitlerinde, radar sistemlerinde kullanılmaktadır. Ultrasonik muayene'de ve endüstriyel radyografi'de genel olarak incelenecek olan bölgeye ultrasonik ses dalgaları ve X veya gamma gibi çok küçük dalga boyuna sahip yüksek enerjili ışınlar gönderilerek testler yapılır [57].

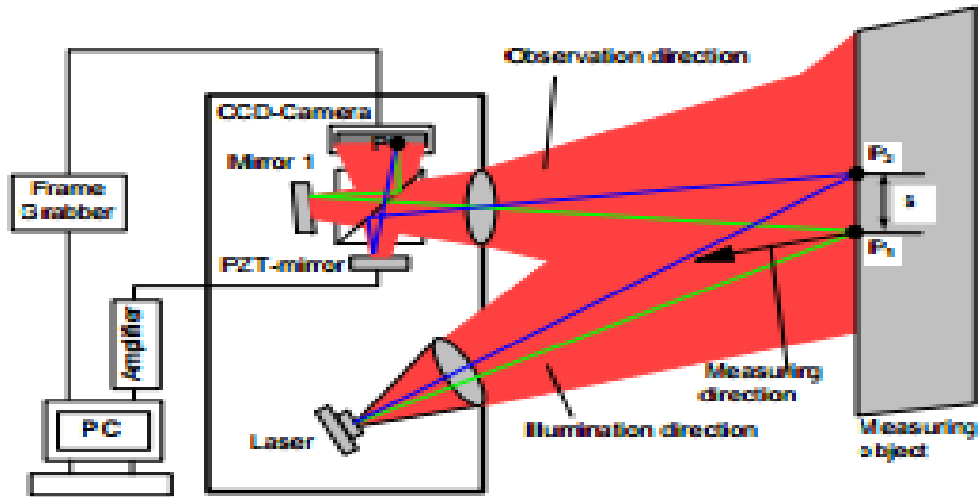
6.1.1. Görsel Muayene

Çıplak gözle yapılan muayenedir. Bir ürünün yüzeyindeki süreksizlikler, yapısal bozukluklar, yüzey durumu gibi kaliteyi etkileyen parametrelerin optik bir yardımcı araçlar (büyüteç gibi) kullanarak veya kullanmaksızın muayene edilmesi işlemidir. Gözle muayene çok basit bir metot olarak görünse de kendine özgü incelikleri vardır. Genellikle bir başka tahribatsız muayene metodunun uygulanmasından önce yapılması gereken bir çalışmadır.

Diğer tahribatsız muayene yöntemleri için hazırlanmış uygulama standartlarının çoğunda da öncelikle gözle muayene yapılması ve bulguların kaydedilmesi istenmektedir.

6.1.2. Shearografi

Malzeme yüzeyinde yapılan bir analiz çalışmasıdır. Noktasal yer değişim interferometresi kullanılarak yer değiştirme gradyanlarının ölçümü yöntemi olarak tanımlanan işlemdir. [58]. Malzeme noktasal ışık kaynağıyla aydınlatılan parçanın yüzeyinden özel kameralar yardımıyla alınan görüntülerin analiz edilmesi temeline dayanan yöntemdir. Malzemeye ait yükleme uygulanmadan ve kuvvet yüklemesi sonrası resimlerinde meydana gelen farklılıklar incelenerek (benek deseni olarak bilinen görüntü) bir görüntü oluşturulmakta ve meydana gelen değişimler tespit edilmektedir. Meydana gelen kılcal çatlaklar, hasar etrafındaki alanlarda meydana gelen gerilim birikimleri şeklinde belirlenmektedir. Vakum gerilmesi en yaygın rastlanan yükleme şeklidir. Yöntemin kompozit malzemelerde meydana gelen ayrışmaların analizinde kullanımı basit ve kolaydır. Hasarlı bölgenin malzeme içindeki yeri veya çapı değiştiğçe oluşturulan desen ve türevlerinde gözlemlenen farklılıklar azlacaktır [57].

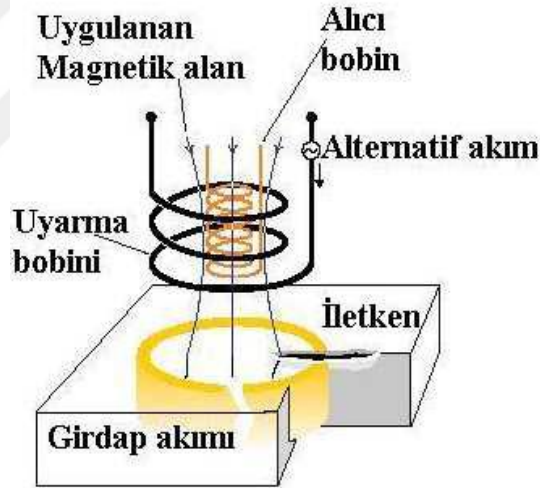


Şekil 6.1. Dijital shearografi [42].

6.1.3. Eddy Akımlarıyla Muayene

Yaygın olarak yüzeydeki ve yüzeye yakın bölgelerdeki çatlakların, korozyon sonucu oluşan hasarların, elyaf ayrışması ve diğer yapısal kusurların incelenmesi için kullanılan elektromanyetik analiz biçimidir. [59].

Daha önceden belirlenmiş empedans (elektriksel direnç)değerleri ile kusurlu bölgeden elde edilen değerlerin kıyaslanmasıyla çatlak ve hasarların tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Yalnız iletken malzemelerde kullanılabilen bir yöntemdir. Elektrik akımını ileten tüm malzemelerin yüzey ve yüzey altı süreksizliklerinin tespiti için kullanılabilir. Elektromanyetik metot olarak da adlandırılan bu metodun prensibi, probun malzeme de indüklediği girdap akımlarında olası hatalar sonucu meydana gelen değişiminin tespit edilmesi temeline dayanmaktadır. Girdap akımı metodunda belirli malzeme test edilirken bu ürünlere yönelik oluşturulmuş standartlar esas alınarak testler yapılmaktadır. Kaynak dikişlerinden, alüminyum uçak parçalarına kadar pek çok malzeme için güvenle uygulanabilen çok hızlı bir metottur. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Şekil 6.2 de girdap akımlarıyla yapılan muayene yöntemi görülmektedir. Portatif olarak kullanılabilmesi uygulama alanını genişletmektedir. Sahada kontrol gerektiren tüm işlerde, gezici ekibiyle yerinde çalışma yapılmaktadır.

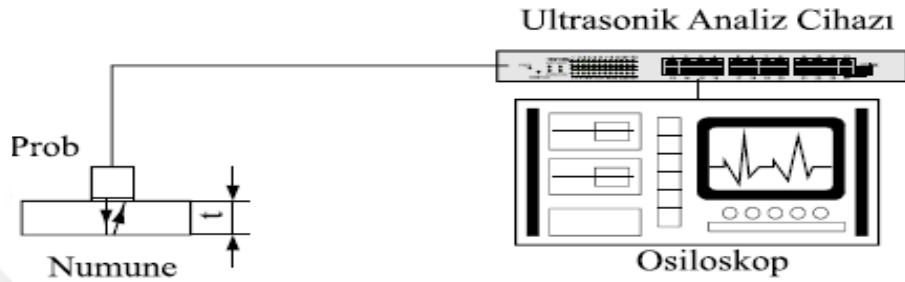


Şekil 6.2. Girdap akımlarıyla muayene (Eddy akımları) [37].

6.1.4. Ultrasonik Muayene

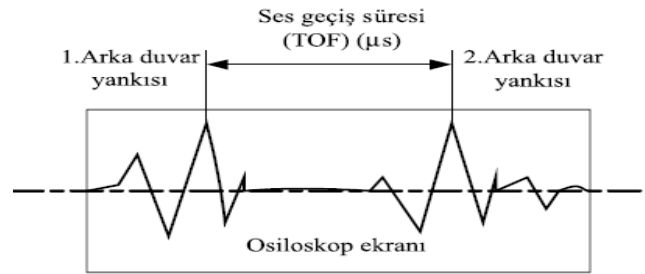
Çatlak oluşumunu ve çatlakların geometrik sınırlarını belirlemek ve malzeme özelliklerinin analizi için, yüksek yoğunluklu akustik dalgalar üreten bir sinyal üretici ve algılayıcı çifti kullanılmaktadır. Elde edilen sinyaller 1- 50 MHz arasında frekans üreten dönüştürücüler yardımıyla işlenmektedir [60]. C-taraması yöntemi kullanılarak hasar bölgesinin yeri ve boyutu hakkında çok hassas ölçümler yapılabilmektedir. Numunenin üst yüzeyinden, malzeme çatlağının ve numunenin alt yüzeyinden elde edilen ses yansımaları arasındaki sinyal geçiş zamanı belirlenerek (B-taraması), hasarın

kalınlık eksenindeki yeri bulunabilir. Yöntemin bir başka uygulaması şekli malzemenin suya daldırılarak yapılmasıdır. Suyu daldırarak yapılan test yöntemi test parçasının bağlı bulunduğu yerden sökülmesi zorunluluğu ve ana bağlı bulunduğu sistemin çalışmasını kesintiye uğratmaktadır. Diğer bir uygulamada ise parçanın sabitlenebilmesi için gerekli bağlantıların sadece bölgesel olarak veya havalı bağlantıların yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu yöntemin hassasiyetleri daha düşüktür. Numunenin iki boyutta tarama gerekliliği uzun test süreleri ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.



Şekil 6.3. Ultrasonik ses dalgalarıyla muayene cihazı.

Hassas test sonuçlarının elde edilebilmesi için numunenin su içine daldırması zorunluluğu, lazer kaynaklı yankıların kullanımıyla ortadan kaldırılmıştır [61]. Lazer kullanımı sonucu yüksek hassasiyet elde edilmektedir. Probu yüzeye dik açıda durma zorunluluğunun ortadan kalkmasıyla karmaşık geometri yapılar incelenebilmektedir. Şekil 6.4'de ses yankı analizi görülmektedir.



Şekil 6.4. Osiloskop ekran analizi.

Lazer kullanarak yapılan deney yönteminin olumsuz tarafları da bulunmaktadır. Lazer yöntemi kullanarak elde edilen sinyaller piezo-elektrik dönüştürücülerin ürettiği sinyallere göre düşük genlik değerlerindedir. Yüksek maliyetli bu yöntem iki boyutlu taramaya ihtiyaç duyulması nedeniyle daha az tercih edilmektedir.

6.1.5. Akustik yayılım

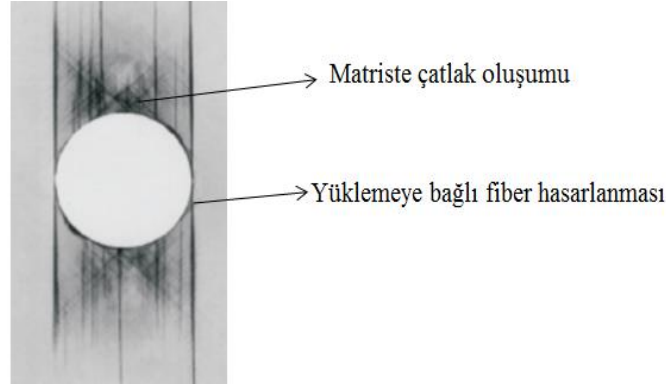
Yüksek gerilimli ses dalgaları kullanarak, katıların içindeki kusurların büyümesiyle ortaya çıkan hasarların tespit edilmesi sağlanmaktadır [62]. Diğer yöntemler geometrik hataları algılamak için akustik yayılım tabakalı kompozitler de fiber kırılmaları, fiber ayrılmaları, matris çatlakları ve delaminasyonlar gibi malzeme içi hareketleri tespit edebilmektedir. Yöntemin gelişimi ve kullanım alanlarını belirleyebilmek için, kompozit malzemelerin darbe hasarları ve kırılma davranışları araştırma çalışmaları yapılmaktadır [63],[64]. Test sırasında malzemeye gerilme yüklemesi uygulanması zor bir işlemdir ve gürültülü çevre şartları hatalı sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. Metal parayla vurma testi en çok bilinen ve en kolay uygulanan analiz yöntemidir. Malzemenin kusurlu ve kusursuz bölgelerinden çıkan sesler arasındaki fark, kusurun varlığının kanıtı olarak nitelendirilir. Metodun hassasiyeti kusurun malzeme içersinde bulunduğu derinliğin artmasıyla düşüşler göstermektedir [65]. Başka bir titreşimle analiz metodu ise yüksek frekanslı ses dalgaları kullanımından veya radyografik incelemelerden daha verimli olan doğal frekansların ölçümüdür. Bu inceleme yöntemi özellikle sürekli elyaf sarma yöntemiyle üretilen karbon fiber takviyeli plastik boruların yapısal analizinde, yanlış elyaf sarma işlemi yapılan veya tabakaların yanlış yerleştirilmeleri nedeniyle oluşan hataların bulunmasında kullanımı gelecekte daha fazla artacağı düşünülmektedir [66].

6.1.6. Radyografik İnceleme

Radyografik inceleme yöntemi izotropik malzemelerin muayenesinde yoğun olarak kullanılmaktadır. Karbon fiber-epoksi kullanarak üretilen kompozitlerde geleneksel x-radyografi tekniğinin kullanımı x ışını emme kabiliyetinin sınırlı olması nedeniyle sağlıklı sonuçlar alınmasına izin vermemektedir. Penetrant sıvıların kullanımı kompozit malzemelerin bu yöntemle incelenebilmesine olanak sağlamaktadır. Metodun hassasiyetini arttırmak için çinko iyodür solüsyonu kullanımını içeren alternatif teknikler bulunmaktadır.

Penetrant sıvısının malzeme içerisine nüfuz etmesi ve kusurun yeterince ıslatması için yüzey zımparalanarak çizikler oluşturulmalıdır. Ayrıca matris özelliklerini etkilemeyecek penetrant sıvılar seçilirler [67]. Şekil 6.5'te basma-basma gerilim yüklemesi etkisine kalmış karbon fiber-epoksi tabakasının incelenmesinde, delik etrafında meydana gelmiş aksel ayrılma, reçine (matris) çatlaması ve delaminasyon hasarı tespit edilmiştir. Aksel ve aksel dışı matris çatlaklarının delaminasyonlarla

çevrelenmiş olduğu net şekilde izlenmektedir. Meydana gelen bu tip kusurlar içyapı hasarları olarak adlandırılmaktadır. İç yapı hasarlarının gözle veya farklı optik araçlarla tespiti mümkün değildir [68].



Şekil 6.5. Network yerleşimli karbon-fiber kompozitin radyolojik incelemesi [84].

6.1.7 Geçici Termografi

Uygulanan giriş enerjisi sadece bu uygulama yüzeyi üzerinden aktığından, test numunesinin sadece bir yüzeyinin termal görüntülerini oluşturulabilmektedir. Isı akışı da diğer akışkanlarda olduğu gibi direncin düşük olduğu yerlerden akmaktadır. Mükemmel homojen bir yapıya sahip malzemeler tarafından düzgün şekilde iletilebilmektedir. Kusurlar ve yapısal hatalar yüksek termal dirençler oluşturarak ısının geçişine karşı engeller meydana getirirler. Kusurun yüzeyden olan derinliği arttıkça metodun hassasiyetinde azalmalar meydana gelmektedir. Mümkün olan en büyük enerji seviyesinde ısı depolanması halinde en iyi sonuçları vermektedir. Termal hasarın oluşmamasına dikkat edilmeli malzeme bütünlüğü ve özellikleri bozulmamalıdır. Bu yöntemin ayrıca bal peteği yapılarda kullanım alanı da bulunmaktadır. Genel olarak malzemenin test edilebilmesi için demonte halde olması zorunluluğu vardır. Uzun deney zamanlarına ihtiyaç duyan pahalı yöntemlerdir ve uygulama hassasiyetine ihtiyaç duyulmaktadır. Isıl gerilimin uygulanması sonucu elde edilen veriler değişik yöntemlerle işlenebilmektedir [69]. Darbeli termografi, kilitlemeli termografi ve özellikle mikro çatlakların tespiti için kullanılan titreşim termografisi bu yöntemlere örnek olarak sıralanabilir.

6.1.8. Isı Transferi Yöntemleri

Isı enerjisi, üç yöntemden herhangi biri vasıtasıyla transfer edilebilmektedir. Bunlar iletim, taşınım veya ışınım olarak sıralanabilmektedir. Her yöntem, ya sürekli hal ya da geçici hal olarak tanımlanmaktadır. Bir sürekli hal transferi esnasında transfer değeri, zaman içinde sabittir ve aynı yöndedir. Örneğin, sabit yük altındaki tamamen ısınmış bir makina, çevresine ısıyı sürekli hal değerinde transfer eder. Gerçekte mükemmel olan sürekli hal ısı akışı gibi bir durum bulunmamaktadır. Küçük geçici dalgalanmalar her zaman vardır, fakat pratik nedenlerle genellikle yok sayılmaktadır. İletim, termal enerjinin doğrudan temas yoluyla, bir nesnenin bir diğerine transferi durumudur. Taşınım, hava, gaz veya sıvının sıcak ve soğuk bölgeleri arasında, moleküller hareket ettiğinde veya akım halinde dolaştığı zaman gerçekleşen ısı transferidir. Işınım, ışıyan enerji dalgalarının (elektro-manyetik dalgalar) doğrudan bir iletim ortamı olmaksızın hareket ederken ortaya çıkan ısı hareketidir. Bir makina ısınırken veya soğurken, ısı geçici haller içinde transfer edilir. Bu ilişkileri anlamak, termografi uzmanları için önemlidir. Isının hareketi bir nesnenin sıcaklığıyla yakından ilişkilidir [70].

6.1.9. Tomografi Yöntemiyle Hasar Analizi

Düşük hızlı darbe yüklemesi sonrası ortaya çıkan içyapı hasarlarını ortaya koymak için klasik inceleme yöntemlerinden farklı olarak bilgisayarlı tomografi cihazıyla incelemeler gerçekleştirilmiştir. Tıp alanında yaygın olarak kullanılan bilgisayarlı tomografi cihazı ile görüntüleme tekniğinin malzeme içyapısını ve hasar mekanizmalarını görmek için de uygun olabileceği düşünülmektedir. Deneysel çalışma sonucunda araştırmacılar deneysel görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerden malzeme içyapısında ortaya çıkan delaminasyon ve hasar konisi oluşumunun geometrisi hakkında önemli veriler elde edilebileceğini belirtmişlerdir [71].

6.1.10. Deneysel Çalışmalar

Kompozit malzemelerin yapısal muayeneleri konusunda bazı deneysel çalışmalar da yapılmaktadır. Bu konuda Sinan FİDAN ve arkadaşları düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasar mekanizmaları konulu çalışmalarında tomografi cihazı kullanmışlardır.

7. KOMPOZİTLERİN HASAR MEKANİZMALARI

Kompozit malzemelerde tekrarlanan yükler etkisinde meydana gelen hasar mekanizmaları ve kalıcı deformasyonları (kırılmaları) incelendiğinde karmaşık bir konu olduğu görülmektedir. Kalıcı deformasyonlar, matris çatlaması, fiber kopması, fiber matris ara yüzey hasar oluşumları, katmanlar arasındaki ayrışma (delamination) gibi çeşitli şekillerde meydana gelebilmektedir. Tekrarlanan yüklere karşı dayanıklı yapı oluşturmak, emniyetli ve pratik tasarım için malzemenin yorulma ve hasar oluşumu davranışlarının bilinmesi hayati önem taşımaktadır [72]-[75].

Gündelik uygulamalarda birçok kompozit malzeme çekme dayanımının altında periyodik yüklemelere maruz kalmaktadır. Malzemelerin yorulma dayanımları ile kullanım ömürleri, üzerlerine etki eden yüklerin analizi tayin edilebilmektedir. Malzemelerin yorulma dayanımına ilişkin özellikleri genellikle S-N Wöhler eğrileri kullanılarak incelenmektedir [72]-[75]. Malzemelerin yorulma davranışlarının incelenmesi için yapılan çalışmalarda en büyük kısıtlılıklardan birini uygulama (deney) zamanı oluşturmaktadır. Yorulma davranışının incelenmesinde dayanma sınırı değerine yakın deney verilerinin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Dayanma sınırı reel zaman ölçeğine göre hasar oluşumunun gerçekleşmediği, gerilme değerinden düşük bir gerilme durumudur. Dayanma sınırı için ulaşılması gereken çevrim sayısı malzemenin malzemeye farklılık göstermektedir. Bu sınır değerinin 1 milyon ile 10 milyon çevrim sayısı arasında olduğu düşünülmektedir. Yorulma deneyleri sonuçlarının geniş dağılımlı olma eğilimi vardır. İstatistiksel ve güvenilir sonuçlar için çok sayıda numune deneye tabi tutulmalıdır. Bütün bu nedenlerle güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için oldukça uzun zamana ihtiyaç duyulmaktadır [77].

Yorulma deneyinde yükleme frekansının (Hz) arttırılması deney zamanını kısaltabilir. Bu durum deney numunesinde yanlış simülasyon, ısıl hassasiyet (yapıda ısı birikimi hysteric heating) ve mekanik özelliklerde bozulma gibi hasar oluşumlarına neden olabilmektedir. Polimerik malzemelerde bu durum daha net görülmektedir. Deney koşullarının gerçek kullanım koşullarına benzer olması sonuçların güvenilirliği için önemlidir [77]. Yorulma deneyi sonuçları tamamen malzemenin özelliklerinden değil, deney numunesinin özelliklerinden de etkilenecek değişiklik göstermektedir.

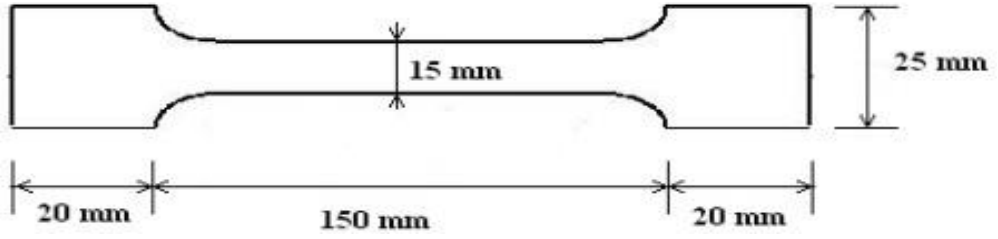
Numunenin işlenme sürecinde meydana gelen olumsuzluklar (mikro boşluklar ve yüzey kusurları) yorulma deney sonuçlarını etkilemektedir [72],[77].

Havacılık, denizcilik ve otomotiv sanayinde ileri kompozit malzemelerin kullanımı iş parçasının performans değerleri, ağırlığı, yakıt tasarrufu gibi avantajları nedeniyle gün geçtikçe artar hale gelmiştir. Bu durum tasarımlar yapılırken malzemenin mekanik özelliklerinin tam olarak bilinmesini zorunlu kılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerin düşük yoğunlukları, yüksek mukavemet değerleri nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Bu durum başlangıç tasarımında kullanılan statik mukavemetin son tasarım aşamasında yorulma analizini de içerecek şekilde yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır [74]. Yorulma hasarı genellikle çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve çatlak dağılımı aşamalarından oluşmaktadır. Metalik malzemelerde (izotropik) genellikle çatlak meydana gelmeden önce malzeme ömrünü tamamlamış olur. Çatlak başlangıcından sonra kalıcı deformasyona uğrama süreci hızlı bir şekilde gelişmektedir. Kompozit malzemelerde düşük çevrim sayılarında ve düşük gerilme yüklemelerinde bile bir miktar hasar olduğu görülmektedir. Malzeme ömrünün büyük bir bölümünde çatlak hasarı ile çalışmaya devam edebilir [73]. Cam elyafı takviyeli kompozit malzemelerin yapısal özellikleri gereği tekrarlanan yüklemeler karşısında çok karmaşık mekanik özellikler gösterdikleri görülmektedir. Bu durum üç eksenli gerilme yaratan anizotropik yapısından (matris ve fiberin poison oranının farklı olması) kaynaklanmaktadır. Bu mekanizmaların analizi ve kompozitin yapısal tasarımı için sınırların tanımlanması gereklidir. Yorulma sonucu oluşan hasarlar genellikle büyük ölçekli kayıplara yol açmaktadır. Başlangıç durumundaki tek çatlak matris boyunca fiber doğrultusuna dik biçimde çoğalarak devam etmektedir. Laminant kompozitlerde matris çatlağı, delamination, ara yüzey ayrışması ve fiber kırılması şeklinde yorulma hasar oluşumu gelişmektedir [74].

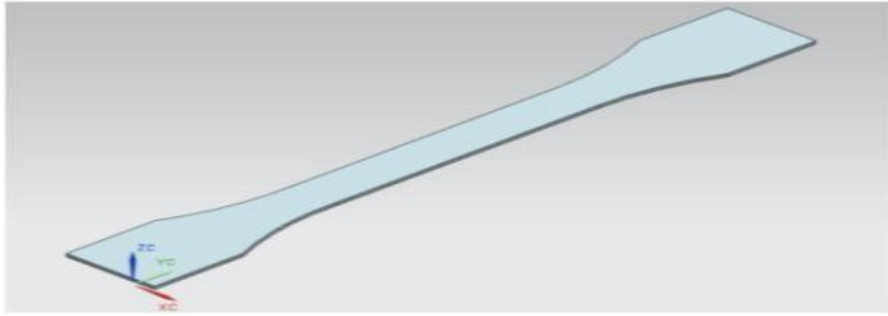
İdeal koşullarda hazırlanıp test edilen deney numunelerinin mekanik özellikleri dikkatle incelenmesi gereken sonuçlar ortaya koymaktadır. Emniyet katsayılarındaki değişim nedeniyle özellikle malzeme yapısını meydana getiren bileşenlerin mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana gelmektedir. Kritik parçaların analizinde, uygulanan yük sıklığının (frekans) çalışma frekansı değerlerine yaklaştırılmasının daha gerçekçi hasar oluşumu koşullarının sağlanmasının, yük ve malzeme mukavemetinin istatistiksel değerlerinin belirlenmesinin, tasarım kriterlerinin tanımlanmasında önemi büyüktür.

7.1. NUMUNE HAZIRLAMA DÜZENEK TASARIMI

Kompozit malzemelerde yorulma davranışını gözlemleyebilmek kırılma ve öncesinde malzemenin yapısında meydana gelen değişimleri tespit etmek amacıyla deney düzeneği tasarlanmaya çalışılmıştır. Standart çekme numunelerinin kullanılması öngörülmüş bu aşamada dolgu malzemelerinin çeşitli varyasyonlarının (lif takviyeli, parçacık takviyeli, tabaka takviyeli) kullanılabileceği düşünülmüştür. Şekil 20’de görülen Çekme ve deneylerinde kullanılacak numunelerin genişlik ve uzunluk ölçüleri plastik malzemeler için çekme standardı olan ISO 527-2 belirlenmiştir. Plaka üretimi gerçekleştirildikten sonra standartlara göre belirlenen ölçülerde her bir üretim yöntemi ile üretilen plakalardan çekme numunesi su jeti ile kesilerek elde edilmelidir.



Şekil 7.1. Kompozit malzeme deney numunesi.



Şekil 7.2. Kompozit malzeme deney numunesi.

Literatürde karbon fiber içerikli kompozit malzemeler konusunda yapılan çalışmaların sayısı sınırlı olmakla birlikte genellikle karbon fiberin örgü şeklinin, sayısının ve kullanılan reçine tipinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır [75],[76]. Deneylerde kullanılacak numuneler malzeme özelliklerini yansıtacak şekilde hazırlanmalıdır. Numuneler belirtilen standart ölçülerinde işlenirken talaşlı imalat uygulamalarının malzeme yapısında hasarlar (elyaf kopması, işleme sürecinde ısıl ve

artık gerilme yığılmaları oluşumu, delik ve yüzey işlemlerinde çapak oluşumu v.b.) meydana gelebilmektedir. Su jeti ile malzemeye gerekli formun verilmesi bu hasar oluşumlarının minimum düzeyde gelişmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir. Talaşlı imalat yöntemiyle numunelere form verilirken elyaflara zarar verilmemeye çalışılmalı en azından taşıyıcı elyafların malzeme niteliklerini taşıması sağlanacak şekilde işleme yapılması sağlanmalıdır. Malzemenin bu iş için özel kalıplara dökülmesi ile numune üretimi bir başka üretim seklidir. Kalıplama yolu ile numune üretiminde karşılaşılan en büyük olumsuzluk ise elyaf yerleşimindeki hatalar nedeniyle reçine bakımından zengin alanlar ve kuru kalan bölgelerin oluşmasıdır. Kalıp yüzeylerine yakın kısımlarda deformasyon sertleşmesine benzer yüzeylerin oluştuğu görülmektedir. Bütün bu olumsuzlukların literatür çalışmalarına benzer şekilde tek elyaf takviyeli numunelerin oluşturulmasıyla önlenilebileceği ve daha sağlıklı sonuçların alınmasını sağlanacağı öngörülmektedir. Çekme deneyi numunelerinin kullanılmasının öngörüldüğü deney düzeneği tasarımında malzemelerin tasarım özelliklerini belirlemek için kullanılan pull-out test yöntemidir. Bu deneylerde belirli standartlara göre hazırlanmış olan deney numunelerine sabit frekans değerinde tek ekseninde periyodik kuvvet uygulanmaktadır. Kullanılan numunelerin sadece çekme, basma ve yorulma limitleri dışında da veriler üretilebileceği öngörülmektedir. Su çekme miktarının, yoğunluk değişiminin, çekme direncinin, bileşenlerin elastik özelliklerinin, ultraviyole ışın ve sıcaklığın malzeme yapısında ne tür değişimler yaratacağının ve malzeme ömrünü nasıl etkileyebileceğinin tespit edilebileceği düşünülmektedir.

7.2. YORULMA

Tekrarlanan kuvvet yüklemeleri sonucu malzeme iç yapısından başlayarak kopma ve kırılmalar şeklinde kalıcı hasarlara yol açan değişikliklere yorulma denir. Değişken kuvvet yüklemelerinin, darbeleri veya dinamik zorlamalardan farklı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Değişken zorlama periyodik olarak zamana göre yönü ve kuvvet değerinin değişiklik gösterdiği yüklemeye biçimidir. Darbeleri ve dinamik zorlama ise çarpma benzeri ani yüklemeye durumudur. Malzeme iç yapısı üzerindeki etkileri farklılık göstermektedir [79]. Tekrarlanan yüklemeler altında malzeme iç yapısında değişiklik oluşturan kuvvet yüklemeye sayısı N ile ifade edilen logaritmik bir değerdir. Kuvvet yüklemeleri değişken alçak ($N \leq 10^4$) ve yüksek ($N > 10^4$) kuvvet yüklemeye sayılarını kapsamaktadır. Alçak yük değişim sayılarında meydana gelen hasar

oluşumlar statik hasar gibidir. Buna göre malzemede gelişecek yorulma durumu yüksek yük değişim sayılarında meydana geldiği görülmektedir [79]. Malzemelerde yorulma davranışının nasıl geliştiği tam olarak bilinmemekle beraber plastik şekil değişimlerinin önemli yer tuttuğu kabul edilmektedir. Yorulmanın üç aşamada meydana geldiği düşünülmektedir. Çatlagın oluşumu, çatlagın malzeme yapısında gelişimi ve kalıcı hasar oluşumu şeklinde sıralanabilmektedir. Atomik boyutta bir hata ile başlayan ve hata etrafında gelişen plastik deformasyonlar kayma şeritlerinin oluşmasına sebep olmaktadır. Mikroskobik düzeyde çatlak oluşumu, tersinir olmayan periyodik yüklemeler sonucu meydana gelmektedir. Değişken yüklemelerin devam eden etkileri sonucu çatlak oluşumu görülmektedir ve malzeme kesit alanının yükü taşıma sınırı üzerinde bir değere ulaştığında kalıcı hasar oluşumu meydana gelmektedir. Çizelge 7.1’ de kompozit malzemelerde yorulma davranışını tetikleyen faktörler görülmektedir.

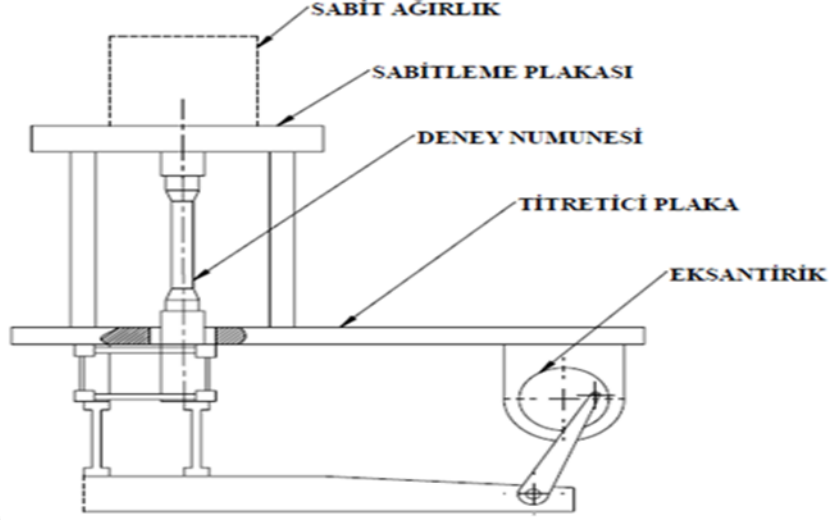
Çizelge 7.1. Yorulma davranışını tetikleyen faktörler [6].

| Atomik faktörler (kompozit malzemesi) | Mikroskobik faktörler (ortam) | Makroskobik faktörler (periyodik yükleme) |
|---|--|---|
| Dislokasyon hareketleri Dislokasyon çoğalması Bağ hataları Enine kayma | Kayma oluşumu Kayma gelişimi İç yapı hata oluşumu Enerji faz değişimi Çatlak oluşumu | Çatlak gelişimi Kararlı alan Kararsız bölge Kritik uzunluk Kalıcı hasar oluşumu |

Tekrarlanan kuvvet yüklemelerine maruz kalan makine elemanlarının tasarımında yorulma davranışı önemli yer tutmaktadır.

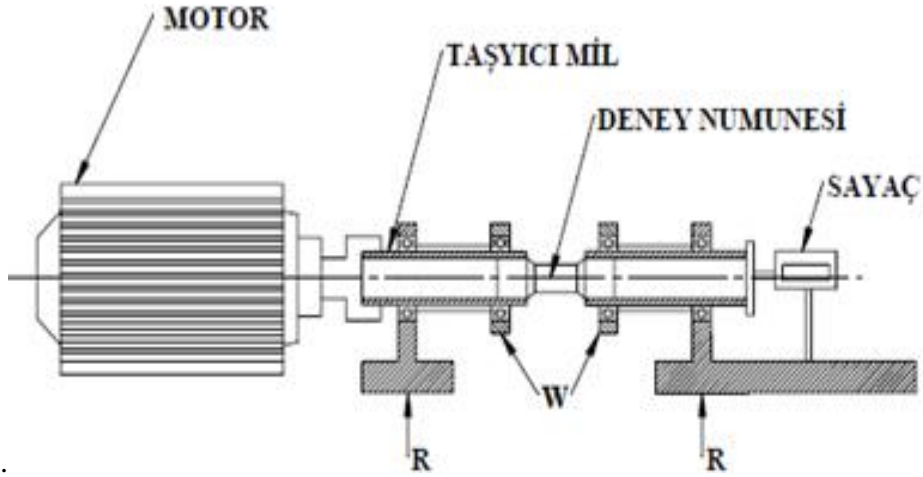
7.2.1. Yorulma ve Mukavemet Sınırlarının Belirlenmesi

İlk olarak 1852-1858 yılları arasında WÖHLER tarafından incelenen ve üzerinde deneyler yapılmış bir alandır. Statik zorlamalar da olduğu gibi çalışan malzemelerin yorulma ve mukavemet sınırları deneyler yoluyla tespit edilmeye çalışılmıştır [79]. Yorulma deneyleri çekme-basma, eğilme, burulma ve bileşik gerilime yüklemeleri şeklinde uygulanan deneylerdir. Pratikte en çok aksenal zorlamalar şeklinde, özel deney makinelerinde simüle edilmektedir. Bu makineler çekme - basma ve eğilme türü zorlamalar uygulayan deney düzenekleri olarak ikiye ayrılır. Eğilme deneyleri dönme hareketi yapan, standart deney numuneleri kullanan eğilme ve rezonanslı eğilme deney düzeneklerinde uygulanmaktadır.



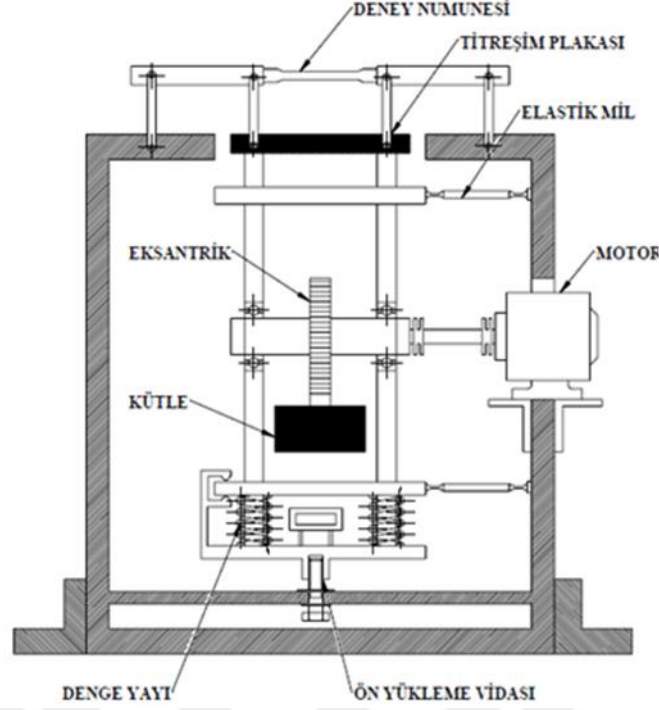
Şekil 7.3. Eksen doğrultusunda periyodik yüklemeli ve sabit genlik değerine sahip düzenek [78]-[80].

Dönme hareketi yapan standart numuneli eğilme deney düzeneklerine uygulanan testler dönme hareketi etkisinde olan deney numunesinin kesit alanında yükleme miktarı sabit olsa da tam değişken kuvvet yüklemesinin olduğu temeline dayanmaktadır. Bu nedenle dönmekte olan deney numunesi sabit bir ağırlıkla zorlanmaktadır [78]-[80]



Şekil 7.4. Dört noktadan etkili dönme hareketli deney aygıtı (Schenk) [78]-[80].

Uygulanan yüklemenin değişimine göre en çok periyodik yüklemeler tercih edilmektedir. Çekme-basma ve titreşimli deney düzeneklerinin yükleme tarzı değiştirilebilmektedir. Dönme hareketi yapan deney düzeneklerinde ise tam değişken yükleme durumu oluşturulabilir.



Şekil 7. 5. Eğme gerilmesinin düzlemsel olarak uygulaması(Sonntag) [78-80]

Deney numunelerine sabit bir değere sahip ortalama değerinde farklı yükleme değerlerinde kalıcı hasar oluşumuna kadar N sayıda yük değişimi uygulanmaktadır. S genlik değeri N ise yükleme sayısını ifade eden grafik oluşturulur. Oluşturulan bu grafiklere WÖHLER diagramı denilmektedir. Wöhler diagramında yatay eksen logaritmik ölçekte çizilir. N yerine $\log N$ konulduğunda sonuçlar daha iyi analiz edilebilmektedir [79]. Değişken kuvvet yüklemelerinin etkileri $N \geq 10^3$ yük değişim sayısından sonra ortaya çıkmaktadır. $N=0$ ile $N \geq 10^3$ statik zorlama olarak nitelendirilmektedir. Yorulma hasar oluşumu malzemenin kesme sınırından düşük gerilme durumlarında meydana gelmektedir [79]. Gerilme genliği değeri azaldıkça yük değişim sayısı büyüme özelliği gösterir. Belirli bir gerilim değişim sayısı $N = 10^6$ için malzemenin hasara uğramadan dayanabileceği en düşük gerilme genliği değerine malzemenin sonsuz ömrü adı verilir. Wöhler diagramlarının analizi ile yorulma değerleri ve malzeme ömürleri tayin edilebilmektedir.

7.2.1.1. Malzeme Ömrü

Tekrarlı değişken kuvvet yüklemelerine maruz kalan malzemede kalıcı hasar oluşuncaya kadar geçen süre malzeme ömrü diye tanımlanır. Malzeme ömrü yorulma davranışında yük değişim sayısı N ile ifade edilmektedir [79].

7.2.1.2. Yorulma Mukavemeti

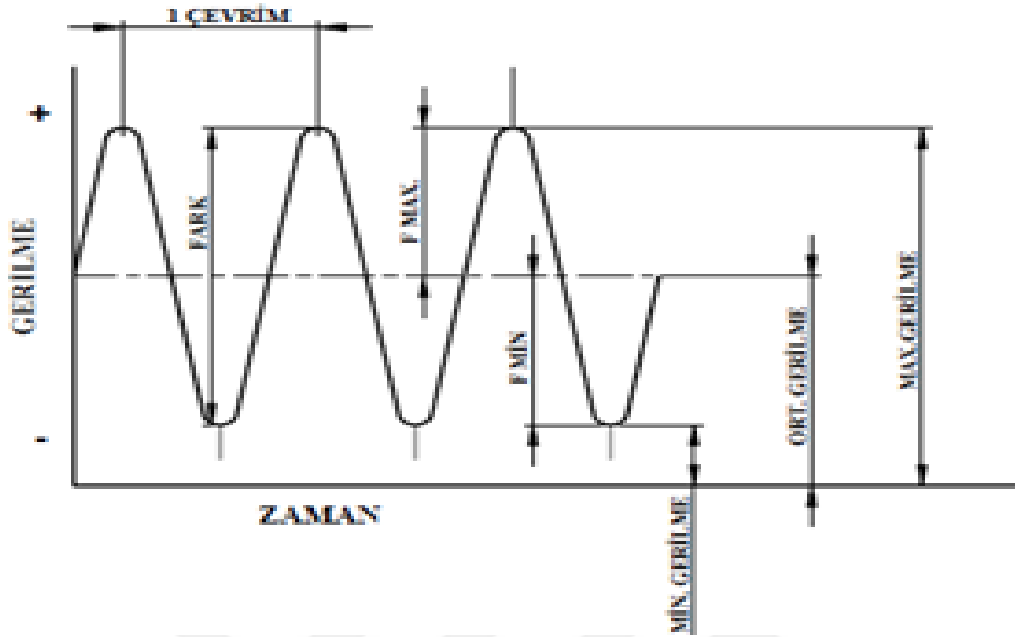
Malzemede kalıcı deformasyon oluşmaması koşuluyla belirli bir yükleme sayısında (N) malzemeye uygulanabilecek maksimum gerilme genliği olarak tanımlanır. (S) ile ifade edilmektedir [79].

7.2.1.3. Sonsuz Ömür

Kalıcı hasar oluşmaksızın $N=10^9$ yükleme değişim sayısında malzemeye tatbik edilebilecek maksimum gerilme genliğidir. Çelik malzemelerde bu değer $N \geq 10^6$ ile $N \leq 10^8$ civarındadır. Pratik olarak $N < 10^9$ Sonlu ömür $N > 10^9$ Sonsuz ömür olarak kabul edilmektedir.

7.3. YORULMA DAVRANIŞININ ANALİZİ

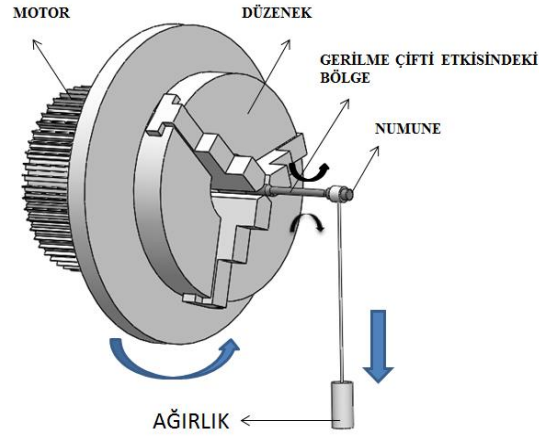
Metalik malzemelerin çevrimsel yüklemeler karşısında meydana getirdikleri tepki yorulma olarak tanımlanmaktadır. Statik mukavemet değerinden daha düşük yüklemeler sonucunda yorulma meydana gelir. Büyük ölçülerdeki yorulma hasar oluşumlarının belirsiz ve küçük deformasyonlar ile başladığı görülmektedir. Yorulma sonucu oluşan kalıcı hasar oluşumları sonucu meydana gelen yorulma yüzeyleri mikroskobik olarak incelendiğinde plastik deformasyon izleri ortaya çıkmaktadır. Yorulma ömrünün, ürün tasarımı, malzeme seçimi, yükleme miktarı, kuvvet çevrim sayısı ve çevresel şartlardan etkilendiği görülmektedir [81]. Malzemelerin yorulma ömrünün tespiti için kullanılan deneylerde genel olarak sinüsoidal yüklemeler kullanılmaktadır. Şekil 7.5 te kuvvet uygulanma çevrimi ve frekansların gerilime etkilerinin hesaplanması yöntemleri görülmektedir. Yorulma yüklemesinin durumu birkaç formül yardımıyla belirlenebilir. Gerilim dağılımı, maksimum ve minimum değerlerinin bilinmesi ile hesaplanabilmektedir. Gerilme genliği ortalama gerilme değerine ve gerilme oranı da maksimum ve minimum gerilme değerlerine bağlıdır [81].



Şekil 7.6. Sinusoidal çevrim.

Problem temel olarak kompozit malzemelerin periyodik kuvvet uygulamaları karşısında gösterecekleri mukavemetin incelenmesi ve bu araştırmanın yapıma şeklidir. Anizotropik yapıya sahip olan kompozit malzemelerden hazırlanacak deney numunesi üzerinde yapılacak sürünme ve yorulma testleri dikkatle analiz edilmelidir. Homojen malzemelere uygulanan yorulma ve sürünme deneyleri net ve ölçülebilir sonuçlar verirken aynı malzemeden yapılsa bile kompozit malzemelerde farklı ve değişken sonuçlar alınabilmektedir. Bu durumun en önemli nedenleri malzemenin anizotropik yapıya sahip olması, tekrarlanabilirlik oranı ve imalat sürecinde meydana gelen süreksizliklerdir. Metal ve alaşımlarından meydana getirilen numunelere yorulma ve sürünme testleri yapılarak malzeme ömrü belirlenebilirken yerine kullanılması düşünülen kompozit malzemelerde bu ömrü tespit etmek zordur. Kuvvet yönü elyafların yerleşim biçimi elde edilecek verilerde belirleyici rol oynamaktadır. Ancak yine de metal malzeme yerine ağırlık ve imalat kolaylığı açısından tercih edilmesi uygun tasarım ve malzeme konfigürasyonunun düzenlenmesi yapılarak sağlanabilmektedir. Malzemenin kullanım yerine ve kuvvet yönüne göre iş parçası üzerine takviyeler yapılarak kompozit malzemelerin olumsuz yanları giderilebilmektedir. Kompozit malzemelerin yorulma ömrü tesbitinde genellikle metal ve alaşımlarına uygulanan deneyler dışında çekme deneyinin sürekli tekrarı şeklinde yüklemeler yapılarak

uygulanen deneyler söz konusu olmaktadır. Periyodik olarak uygulanan yüklemeler eş gerilme durumu oluşturmazken $f +$ ve “0” değerleri arasında yapılmaktadır. Metal ve alaşımlarına uygulanan deneylerde ise eş gerilme hali oluşmaktadır.

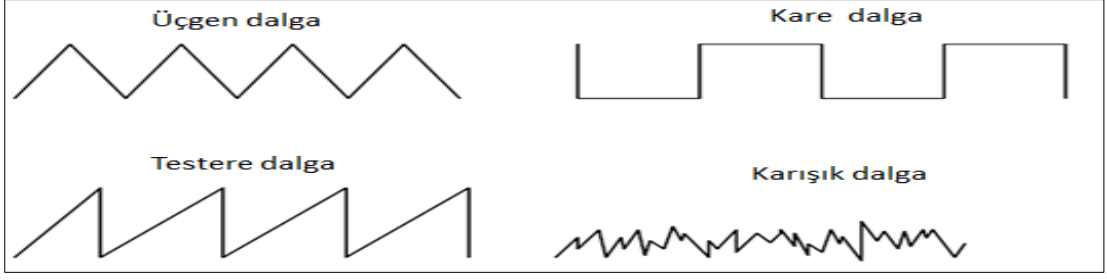


Şekil 7.7. Metalik malzemelere uygulanan yorulma deney düzenegi.

Malzeme basma ve çekme kuvvetlerinin etkisindedir. Kompozit malzemelerde bu durum elyaf ve matris etkileşimine bağlıdır. Elyaf çekme doğrultusunda gerilime uğrarken basma kuvveti uygulandığında yapıda delaminasyon durumunun oluşması beklenebilir. Bağ yapıda bileşik gerilmenin sınırları aşıldığında bozulmalar meydana gelebilir. Metallerde uygulanan deneylerin sonuçları Wöhler diagramında yorumlanırken özellikle demir dışı metallerde farklı sonuçların alındığı; örneğin alüminyum alaşımlarının bir yorulma sınırının olmadığı, belli bir gerilme sınırından sonra da hasara uğradığı görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar Wöhler ve Smith diagramları ile incelenerek Gerber, Goodman ve Soderberg kriterleri kullanılarak yorumlanabilmektedir.

7.3.1. Kapalı Döngü Yorulma Testi

Tasarımda kullanılan yorulma verileri sinüsoidal yüklemeler sonucu elde edilmektedir. Yorulma deneylerinin yapıldığı makinelerin döner hareketli olması, döner kütleler kullanması nedeniyle sinüs dalgalarının kullanılması zorunluluktur. Şekil 7.7 de sinüs dalgaları yerine kullanılan farklı dalga modelleri görülmektedir. Günümüzde sinuodial dalgaların deneylerde kullanımına devam edilmekle beraber çeşitli dalga modelleri üreten deney makineleri de geliştirilmiştir. Elektro – hidrolik kapalı döngü yüklemesi yapan makineler bu düzeneklere örnektir.

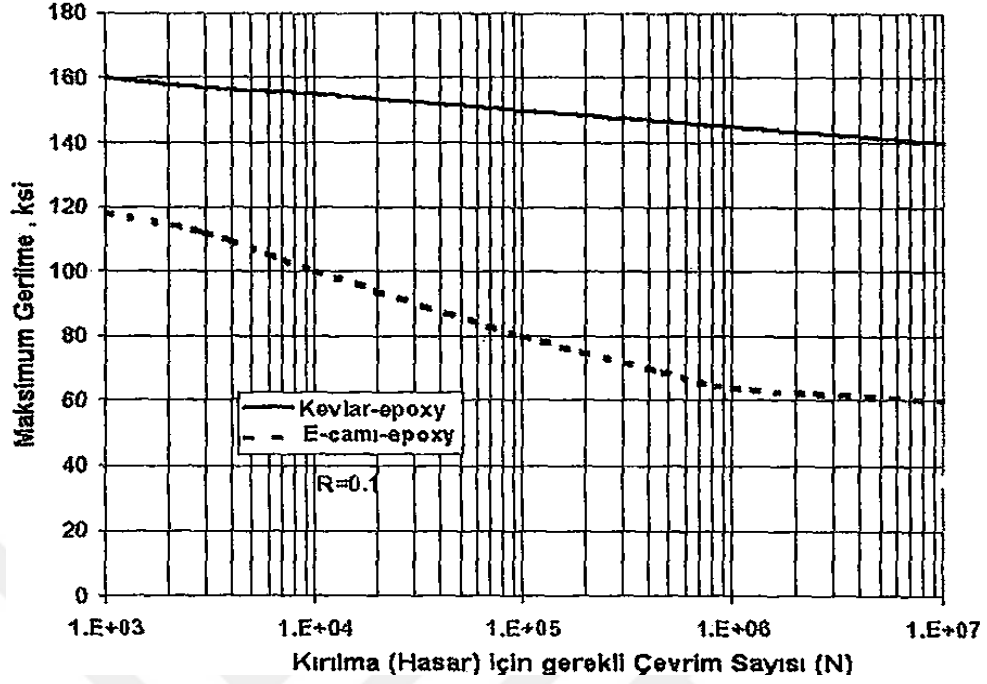


Şekil 7.8. Farklı dalga modelleri.

Bu makinelerde kompozit malzemelere uygulanan deneylerde farklı yükleme frekansları oluşturmakla beraber ısı yük oluşumunu engelleyebilmek için 10 Hz ve daha aşağı frekans değerleri tercih edilmektedir. Kapalı döngü yorulma deneylerinde sabit bir gerilme genliği sağlanarak yükleme ve şekil değiştirme değerleri kontrol edilebilmektedir. Yorulmaya bağlı hasar oluşumlarının gelişmesiyle birlikte malzemenin zayıflaması ve şekil değişimi artarak devam etmektedir [81].

7.3.2.WÖHLER Eğrileri

Kompozit malzemelerin yorulma davranışı maksimum gerilme yüklemeleri sonucu kalıcı deformasyona uğraması için gerekli çevrim sayısı olarak tanımlanmaktadır. Bu tip deneylerin sonuçları 10 tabanına göre logaritmik ölçek üzerindeki hasar çevrimleri olarak belirtilmektedir. Bu veriler ile oluşturulan grafiklere S-N eğrisi denilmektedir. Düşük gerilme değerlerinde yorulma ömrü, sonsuz ömür veya sonlu ömür değerine yakın sınırları arasında olmaktadır. Böylesi durumlarda yorulma davranışı yüksek çevrim sayılarına bağlı olarak (HFC) gelişir. Yorulma dayanım sınırı için düşük gerilim, yüksek çevrim sayısı bağıntısından bahsedilmektedir. Şekil 7.8'de görülen eğriler analiz edildiğinde, kevlar/epoksiden üretilen kompozit malzemenin S-N eğrisinin yüksek dayanımlı metallerin grafiğiyle benzerlik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7.9. WÖHLER Diagramı

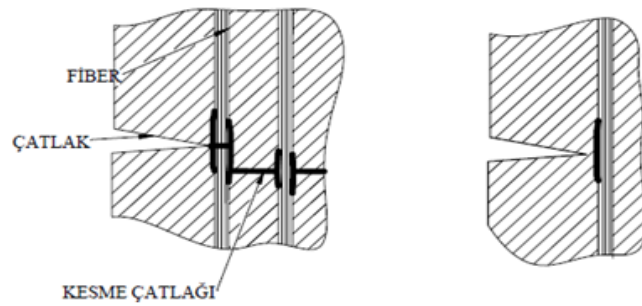
7.4. KOMPOZİTLERİN YORULMA DAVRANIŞI

Tek tabakadan oluşan ve tek yönlü tasarlanan kompozitlerde yorulma hasarı üç aşamada gelişir. Bu durum:

- Matris çatlağı,
- Fiber kopması,
- Fiber- matris ayrışması

olarak sıralanmaktadır. Fiber kopması fiber malzemesinin dayanımına bağlıdır. Fiberler rijit bir yapıya sahipse üzerine etki eden yükün bir bölümünü matris üzerine transfer edebilir. Bu durumda malzemede oluşabilecek çatlak daha uzun zamanda gelişebilir. Arayüzeyde meydana gelebilecek hasar oluşumları ise fiber-matris bağ değerinin düşük olmasına bağlıdır. Bağ değeri fiber malzemeler üzerinde yapılacak yüzey işlemleri ve kaplamaları ile arttırılabilmektedir. Tek tabakalı kompozitlerden farklı olarak çok katmanlı kompozitlerde delaminasyon (tabaka ayrışması) durumu gelişebilmektedir. S-N eğrisi üzerinde bu hasar modları ifade edilebilir. Bazı uygulamalarda bu durumlar aynı zamanda gelişebilir (tabaka hasarı) . Dikkat edilmesi gereken hususlardan biride matrisin veya fiberin malzemesidir. Nem tutma etkisinden dolayı fiber matris hasar oluşumlarının da meydana geldiği görülmektedir [81].

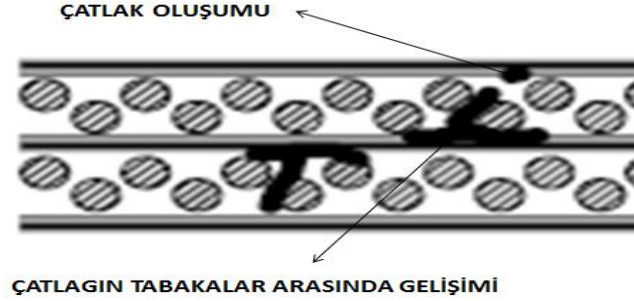
Yorulma prosesi iki kısımda incelenebilir. Çatlak oluşumu ve çatlak gelişimi olarak tanımlanabilir. Yüksek gerilme değerlerinin uygulandığı durumlarda düşük çevrim sayılarına başvurulmaktadır (LFC). Çatlak oluşumu hemen ilk çevrim neticesinde meydana gelir ve malzeme ömrünün büyük bölümü hasarın gelişme süreci şeklinde tamamlar. Yüksek çevrim sayılarında (HFC) ise toplam çevrim sayılarının büyük bölümünde çatlağın oluşması beklenmektedir. Metalik malzemelerde yorulma çatlağı malzeme yüzeyinde ve tespit edilebilir şekilde meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerde ise bu durum farklıdır. İmalat sırasında yaşanan süreksizlikler ve kendi iç yapıları gereği fiber – matris ara yüzeyinde oluşan hatalar potansiyel hasar neden olarak görülmektedir. Metallerin aksine yorulma başlangıcının alt katmanlarda bulunması olağan bir durumdur. Kompozit malzemelerde oluşan yorulma durumu çatlağın gelişmesi aşamasında olduğu düşünülmektedir. Malzeme yorulma dayanımı sınırına kadar hasarlı halde çalışabilmektedir. Fiber kopması durumunda matris çatlaklarının oluşturduğu kesme (shear) yüzeylerinin etkisi büyüktür. Kesme çatlakları yorulma sonucu oluşan çatlaklar ile birleştiğinde sanılan aksine yorulma yüklemelerini absorbe ederek yorulma prosesinin yavaşlamasına neden olmaktadır. Kesme çatlakları poisson oranı (şekil değişim farkı) nedeniyle yorulma çatlağından farklı yerlerde meydana gelmektedir. Bu durum rijit fiberin gevrek matrisle kıyaslandığında daha az şekil değişimine uğradığından çatlak oluşan yerden farklı bir yerde hasara uğramasıyla açıklanabilmektedir. Aynı durum gevrek bir matris ve sünek takviye malzemesi için fiber ayrışması şeklinde hasara neden olmaktadır.



Şekil 7.10 Kompozit malzemelerde çatlak oluşumu ve gelişimi.

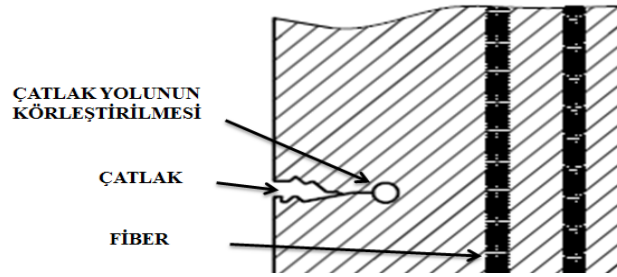
Çatlak oluşumu ve gelişiminde çok katmanlı tabakaların fiber açılarının, tabaka sayısının, kalınlık değerlerinin, dikkate alınması gerekmektedir. Çatlak ilerlemesi fiber doğrultusunda küçük engellemeler ile sınırlanabilir.

Katmanlı kompozit yapıda fiber kesitine dik yüklemelerle zorlanan fiberlerin statik ve yorulma yüklerinin etkisi ile ilk olarak hasar oluşumu beklenen bileşen olduğu görülmektedir.



Şekil 7.11. Kompozitlerde çatlak oluşumu ve gelişimi.

Fiber kesitine dik yüklemeler sonucu meydana gelen çatlaklar, kesme çatlakları oluşturularak veya ilerleme yönü körleştirilerek durdurulabilmektedir [81].



Şekil 7.12. Çatlak gelişiminin önlenmesi (körleştirme).

7.5. KOMPOZİT MALZEMENİN YORULMA ETKENLERİ

Kompozit malzemelerin yorulma davranışında bağ yapısı, tabaka özellikleri, fiber - matrisin kimyasal ve mekanik özellikleri, uygulanan kuvvetin doğrultusu ve şiddeti önemli rol oynamaktadır.

7.5.1. Takviye Malzemesinin Özelliklerinin Etkileri

Tek yönlü yüksek rijitlik ve yüksek dayanım değerlerine sahip kompozitlerin yorulma mukavemeti en üst seviyededir. Yüksek rijitlik değerine sahip elyaflar matris içerisinde şekil değiştirmezler. Bu tür rijit fiberler, matrise destek görevi göstermektedir ve gerilimin artmasına neden olan matris çatlaklarının oluşumuna engel olmaktadır [81]. Partiküller halindeki takviye elemanları ise kompozit malzemenin izotropik yapı

özellikleri göstermesini sağlamaktadır. Tabakalı kompozitlerde malzemeye uygulanacak kuvvet doğrultusuna göre tasarım yapılması zorunludur.

7.5.2. Matris Malzemesinin Özelliklerinin Etkisi

Matris malzemesinin görevi, elyafları birarada tutarken aynı zamanda malzeme üzerine etki eden kuvvetlerin malzeme geneline transfer edilmesi şeklinde açıklanabilmektedir. Matris malzemesinin iyi bir ıslatıcılık özelliği olması istenmektedir. Demetler halindeki elyafların arasına tam ve eşit şekilde yayılmalıdır. Matris miktarındaki yetersizlik tekrarlanan yüklemeler nedeniyle yapıda hasar oluşumuna neden olmaktadır [74]. Matris malzemelerinin sadece malzeme üzerine etki eden kuvvetleri değil aynı zamanda yüklemeler nedeniyle yapıda oluşan ısı yükü de dağıtması gerekmektedir [81]. Matris malzemelerinde yüksek dayanımlı kompozitlerin üretilebilmesi için sürekli geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. En düşük yorulma mukavemeti silikon esaslı matrislerde görülmektedir. Polyester ortalama yorulma ve mukavemet değerine sahipken, toklaştırılmış epoksinin mukavemet ve yorulma dayanımları üst seviyelerdedir. Mukavemet ve aynı zamanda ısı yüklemeler karşısındaki yüksek dayanımı nedeniyle E cam takviyeli fenolik reçineler tercih edilmektedir [81].

7.5.3. Fiber Yerleşiminin Etkileri

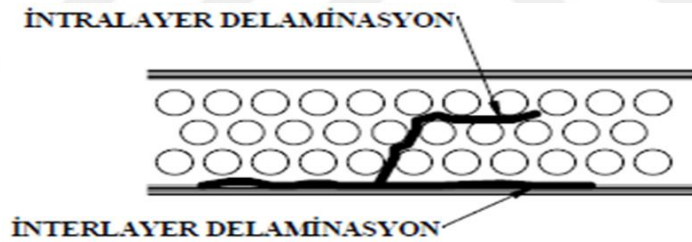
Tasarım aşamasında fiber yerleşimi malzeme mukavemetinde ve şekil değişiminde önemli rol oynamaktadır. Yüksek çevrimli yorulma deneylerinde aksel yüklemeler uygulanırken farklı açılarda değerlerin kullanımıyla büyük yorulma dayanımının sağlandığı görülmektedir. Fiberlerin yerleşim açılarındaki çok az farklılık bile malzemenin N aksenindeki eğrisini paralel hale getirmekte ve sonsuz ömür sınırına yaklaştırmaktadır. Elyaf doğrultusunda çatlak oluşumu, çatlak gelişiminde azalma ve yorulma ömrünün uzamasında etkili olmaktadır. Daha büyük değerlerdeki yerleşim açıları için de bu durum geçerli olmakla beraber malzemenin komple yorulma mukavemetinin olumsuz etkilenmesi beklenmelidir. Elyaf doğrultusunda boyuna çatlak oluşumu tabakalar şeklinde gelişebilir. Kompozit iş parçalarının imalinde parça kalınlığının 3-5 katı oranında yarıçap ölçülerinin kullanılması kalıp içerisindeki fiberlerin kırılmasını ve kuru kalmasını önleyici tedbirdir.

7.5.4. Fiber Oranı

Kompozit malzemelerde yorulma mukavemeti fiber miktarına bağlıdır. İyi şekilde ıslatılıp paketlenen fiber miktarı ne kadar fazla ise yorulma mukavemeti de o oranda artmaktadır [81]. Fiber malzemesinin matris malzemedan fazla olması durumunda, matris malzemesine göre daha sert ve rijit yapıya sahip olan fiberler yüklemeler karşısında yapının deformasyona uğramasına neden olmaktadır.

7.5.5. Tabaka Ayrışması (delemination)

Çeşitli yönlerde üst üste yığılarak basınç ve sıcaklığın etkisiyle tabakalı kompozit yapılar meydana getirilmektedir. Bazı durumlarda malzemenin farklı katmanları arasında sınır çatlakları şeklinde süreksizlikler oluşmaktadır. Şekil 7.12 de Tabaka ayrışması durumu görülmektedir. İnterlayer delaminasyon olarak tanımlanan bu durum tabakalar arasında kırılma hasarı oluşmadan arayüzey ayrışması şeklinde gelişmektedir. İnterlayer delaminasyon durumunda iki tabakanın arasında gelişen çatlakların büyük bir olasılıkla yavaşlayarak durması ve iş parçalarının işlevlerini bir süre daha devam ettirmesi beklenmektedir [82].



Şekil 7.13. Kompozitlerde delaminasyon durumlar

8. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

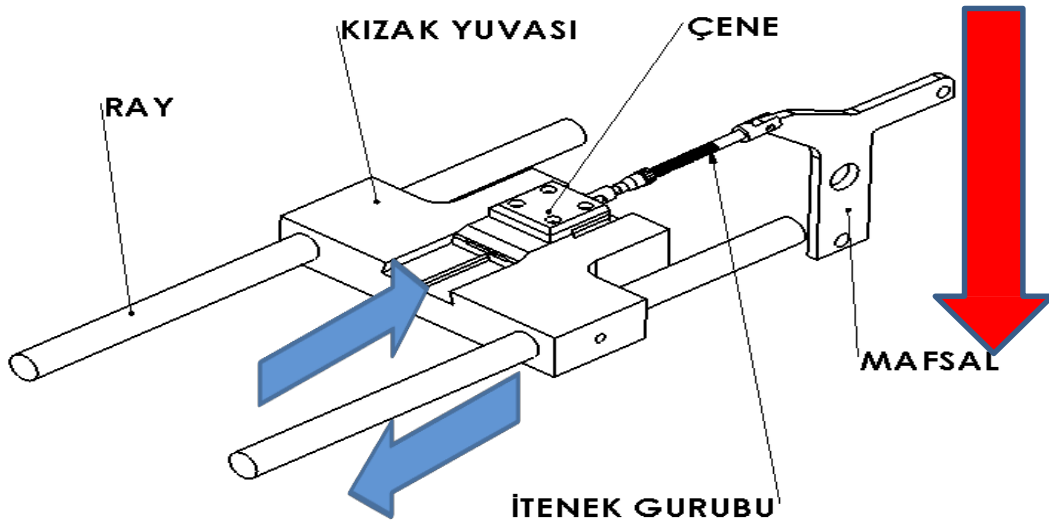
Kompozit malzemeler gelişen malzeme teknolojisi sayesinde geleneksel malzemelerin yerine tercih edilir hale gelmiştir. Alternatifi olduğu malzemelerin eksik yönleri ve dezavantajlarını gidererek farklı ve üstün özellikler göstermektedirler. Kompozit malzemeler doğadan kaynaklanmalarına karşın, nitelikleri değiştirilmiş, farklılaştırılmış, olumlu özellikler kazandırılmış olan ve daha kolay biçim verilebilen malzemelerdir. Bu malzemeler birçok alanda yeni ölçülerin, yeni boyutların, yeni kavramların, yeni yaşam tarzlarının ve yeni fikirlerin oluşmasında araç olmuşlardır. Yapay malzemelerin içyapıları ve özellikleri bilimsel yöntemlere dayanılarak tasarımlar yapılmıştır. Çeşitli kimyasal katkılarla ve teknik olanaklarla, amaçlanan değerlere ulaşılmaya yönelik olarak üretim yapılmaktadır.

Kompozit malzeme üretiminde malzemenin bazı özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanırken sonuçta yeni ve üstün özelliklere sahip bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu özellikler: mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklığa dayanıklılık, ısı iletkenliği veya ısıl direnç, elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç, akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu, rijitlik, ağırlık, görünüm şeklinde sıralanabilir. Kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ancak hemen hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Günümüzde kompozit malzemeler üzerinde birçok araştırma ve geliştirme çalışması yapılsa da genellikle metallere uygulanan testler ve deney numune formları kullanılmaktadır.

Deney düzeneği tasarlanırken kompozit malzemenin yapısını oluşturan matris ve takviye elemanının dayanımı değil, kompozit malzemenin karakteristik özelliğini belirleyen ara bağ yapının yüklemeler karşısında gösterdiği değişimlerin izlenebilmesinin gerektiği öngörülmektedir. Bilindiği gibi metaller saf halleri ile kullanılmadığı için alaşım elementleri ile birlikte kullanılırlar. Ergitme işlemi uygulanan saf haldeki metal ve diğer elementlerinde ilave edilmesiyle izotrop bir yapıda yeni malzeme meydana getirilmesi sağlanmaktadır. Oluşturulan malzemenin her noktasında kimyasal ve mekanik olarak aynı özellikleri göstermektedir. Kompozit

malzemelerde bu durum tamamen farklıdır. Matris içersine yerleştirilen takviye, dolgu ve modifiye malzemeleri yer yer farklı özellikler gösteren bir yapıya dolayısıyla anizotropik yapıya sahiptir. Bu durum bileşenlerin homojen yapı oluşturmaları ve üzerine etki eden kuvvetleri matris malzemeye yansıtması sonucu izotropik malzeme davranışı sergilemesiyle değişiklik göstermektedir.

Tasarım aşamasında değişik olasılıklar düşünülmüştür. Malzemeye belli bir frekansta rezonans uygulamak veya hareketli çeneleri hidrolik piston ile tahrik etmek gibi değişik olasılıklar araştırılmış ve sonuç olarak mekanik sistemde karar kılınmıştır. Mekanik sistemde serbest çalışma ortamı sağlanarak malzemenin iç direnci sayesinde dayanabileceği çevrim sayısının ve kaçınıcı çevrim sayısı sonucu ara bağ yapısının çözülmeye başlayacağını (bozulmaya başlama) araştırılabileceği öngörülmektedir. Deney numunesi üzerine monte edilen strain gage (gerilim ölçer) ve düzenek üzerinde bulunana ekstansiyometre ile boyutsal değişimin de tesbit edilebileceği unutulmamalıdır. Tasarımda SOLİWORKS® 2016 üç boyutlu çizim programı kullanılmıştır.

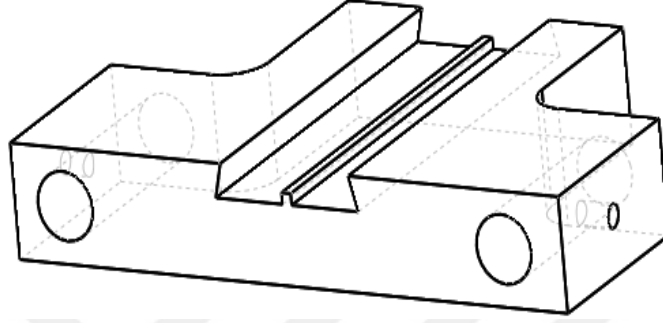


Şekil 8.1. Deney düzeneği tasarımı.

Sistem karşılıklı hareket eden ve deney numunesinin, bağlı olduğu iki çene ile mafsal parçası üzerinden etki ettirilen kuvvete maruz bırakılması sonucu meydana getirilen gerilme yüklemesi temeline dayanmaktadır. Deney düzeneğinin tasarımında belirli bir frekansta yükleme yapılması, bu yükleme işleminin sabit bir ağırlıkta olması deney sonucunun daha sağlıklı olacağını düşündürmektedir. Sinusoidal dalgalar şeklinde

uygulanacak gerilimlerde, yükleme değeri (ağırlık), yükleme çevrimi (frekans) gibi değişkenler ayarlanabilmektedir.

Düzenek çekme doğrultusunda (pozitif yönde) sıfır ve F_{max} değerinde (çekme) yükleme yapabildiği gibi gerektiğinde sıfır ve $-F_{max}$ (negatif yönde) değerinde de (basma) yükleme yapabilecek şekilde tasarlanması öngörülmüştür. Bu sayede özellikle pull-out türü yüklemelerin uygulandığı deneylerde kullanımı sağlanabilecektir.

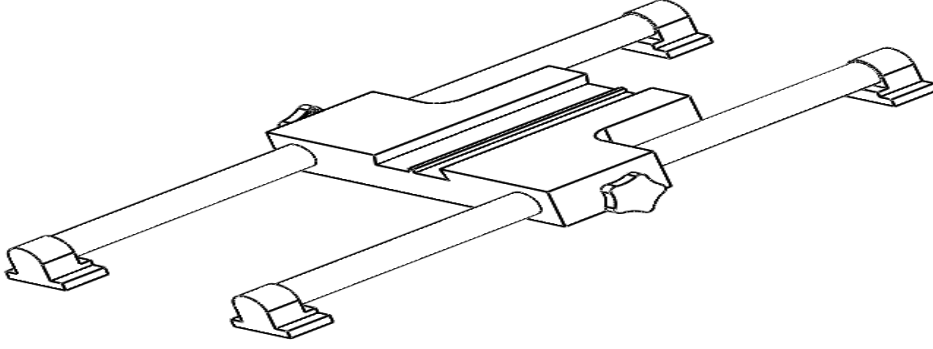


Şekil 8.2. Kızak yuvası.

8.1. KIZAK YUVASI

Deneylerde kullanılacak numunelerin boyutlarının standartlara ve malzemelere göre değiştiği bilinmektedir. Konuyla ilgili ASTM ve ISO standartlarında deney numunelerine ait değişik form ve boyutlar tanımlanmıştır. Bu nedenle kızıağı taşıyan yuva isimli parçanın hareketli olması ve değişik ölçülerdeki deney numunelerinin kullanımına olanak sağlayacak biçimde tasarlanması amaçlanmıştır.

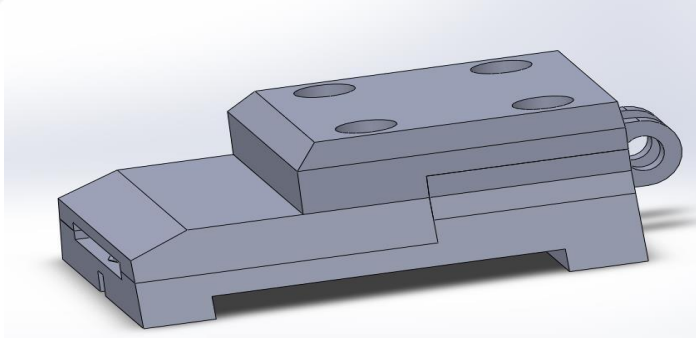
Kızak yuvası kullanılacak deney numunesi boyuna göre ray üzerine sabitlenebilecektir. Kızak yuvası kırılmaç kuyruğu biçiminde form verilmiş ve kanal ortasında kılavuzluk yapması istenilen bir yiv bulunması düşünülmektedir. Sürtünmeyi azaltmak, sürtünme kuvvetlerinin deney sonuçlarına etki etmesini önlemek amacıyla yüksek yüzey kalitesi sağlanmalı ve iyi bir yağlama yapılmalıdır.



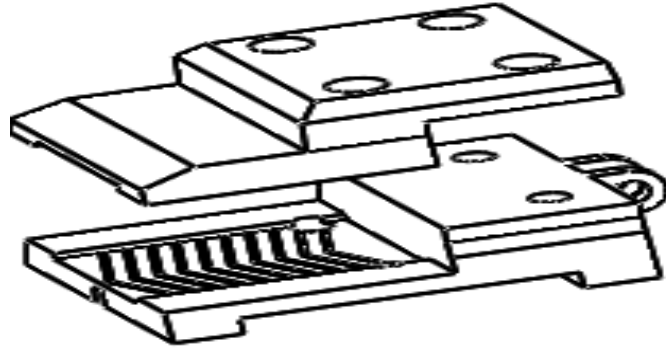
Şekil 8.3. Deney düzeneği kızak yuvası montaj durumu.

İki adet ray üzerine monte edilmesi düşünülen kızak yuvası, deneyde kullanılacak olan numunenin uzunluk ölçüsüne göre ayarlanarak sabitlenebilmektedir. Kızak üzerinde meydana gelecek sürtünmeden ve ortamdan kaynaklanan ısı değişimlerinden etkilenmeyecek şekilde yağlama yapılmalı ve gerekli hava akışı sağlanmalıdır.

8.2. KIZAK



Şekil 8.4. Kızak (Çene).

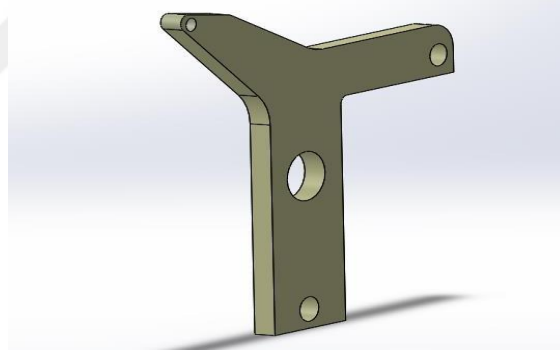


Şekil 8.5. Kızak montajı (patlatılmış görüntü).

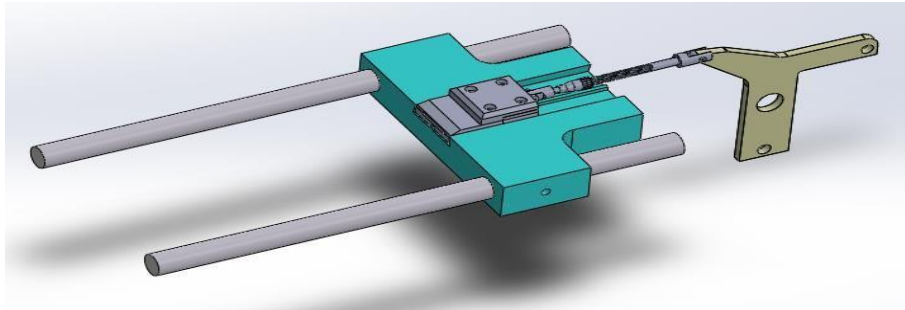
Kızak iki birimden oluşan bir parçadır. Kızak kırlangıç kuyruğu formu verilmiş kanalda kızak yuvası ile aynı formda ve rahat çalışabilecek biçimde tasarlanmalıdır. Deney numunesi kızak ağzına sıkıştırılmaktadır. Deney numunesinin çok iyi şekilde kavrayabilmesi için çene içerisine yivler oluşturulmalı ve kuvvet yüklemeleri sırasında herhangi bir olumsuzluğun oluşmaması sağlanmalıdır. Deney numunesine yükleme yapılırken oluşacak boşluğun sağlıklı sonuçlar alınmasını önleyeceği unutulmamalıdır.

8.3. MAFSAL

Mafsal kendisine bağlanan deney ağırlığı sistemin hamonik hareket ettirilmesiyle itenek gurubuyla kızak parçasına ileten parçadır. Deney ağırlığının etkisini doğrusal hareket eden kızak parçasına aktarmakta ve deney numunesi üzerine kuvvet etki etmesini sağlamaktadır



Şekil 8. 6. Çene bağlantı parçası.

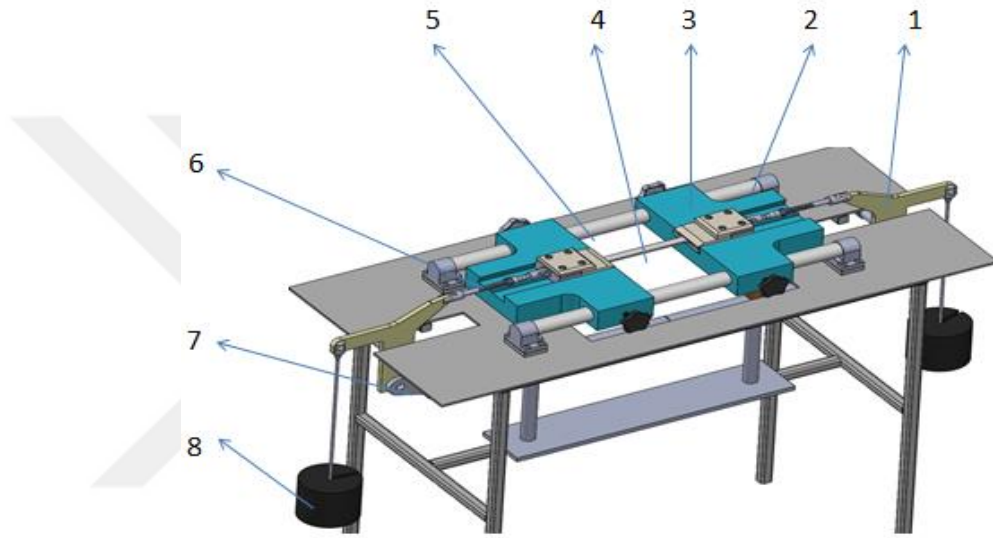


Şekil 8.7. Çene bağlantı gurubu.

Test edilecek numune ISO 527-2 standard ölçü ve özelliklerine göre hazırlanır.

Numuneye gereken form sujeti ile verilmeli ve işlemeden dolayı oluşacak süreksizliklerin (kılcal çatlak) önüne geçilmiş olunmalıdır

Hazırlanan numune cihaz çenelerine sıkıca bağlanır. Hareketli kızak çenelerin rahatça hareketine izin verecek şekilde bar üzerine sabitlenir. Kızığın hareketli olması değişik ölçülerde numunelerin test edilmesine olanak sağlayabileceğini düşündürmektedir. Elektrik motoru ile tahrik edilerek kam vasıtasıyla dairesel hareketi dönüştürerek harmonik hareket yapması sağlanan ana şaft, mafsallı destek sayesinde hareketi çenelere iletmektedir.



- | | | | |
|--------------------|--------------------|------------------|------------|
| 1. Mafsallı destek | 2 .Hareketli kızak | 3. Çene | |
| 4.Kompozit numune | 5. Bar | 6. Ayarlı itenek | 7.Ana şaft |

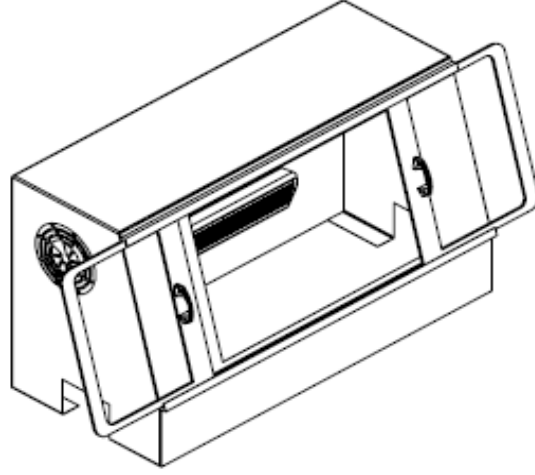
Şekil 8.8. Kompozit malzeme test sistemi.

Tasarlanan sisteme bağlanan ASTM ve İSO normlarına göre form verilen deney numunesine iki hareketli çene tarafından kuvvet etki ettirilir. Deney sırasında deney numunesine bağlanan strain gage yardımıyla boyutsal değişim izlenebilir.

8.4. KABİN

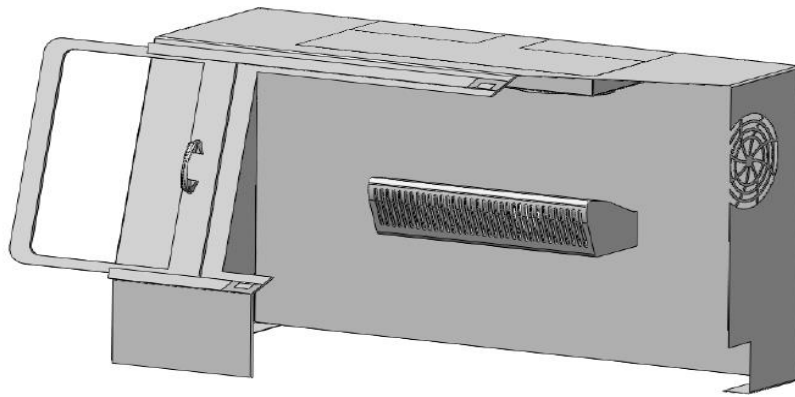
Kabin deney düzeneğinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından düzenek üzerinde deney yapılırken malzemenin ve kullanıcının güvenliğini sağlamaktadır. Test sonunda deformasyona uğrayarak kırılan deney numunesinin çevreye ve kullanıcıya zarar vermesinin önlenmesi amaçlanmıştır.

Uygulanacak deneylerde numunenin ve deney prosesinin kontrol altında tutulabileceği ve birleşik gerilme durumunun da sağlanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 8.9. Üst yapı montajı.

Malzemeye uygulanan çekme ve basma gerilmeleri sonucu malzeme bünyesinde elyaf ve matris arasında uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak ısı yığılması (hysteric heating) oluşabileceğinden havalandırma veya soğutma yapılarak sağlıklı bir deney ortamı sağlanması mümkün olabilmektedir. Kabin içerisine monte edilebilecek uv ışın kaynağı ile deney numunesinin çekme ve basma gerilmeleri ile birlikte uv etkisi altındaki davranışları ve etkilenme miktarı belirlenebilecektir. Kompozit malzemelerin çok farklı kullanım alanlarında ve ortamlarında değişik gerilmelere ayrı ayrı veya aynı zamanda maruz kalabilecekleri bilinmelidir. Mekanik gerilmelere ek olarak ısı, uv, kimyasal yüklemelere aynı zamanda maruz kalabilirler ve bütün bu yüklemeler malzemenin yorulma ve hasar oluşumu ömrünü direkt olarak etkileyebilir.



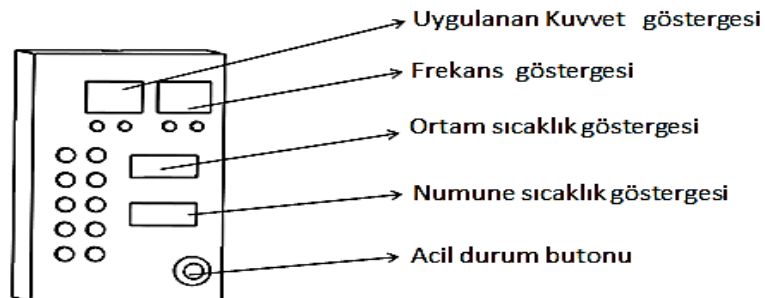
Şekil 8.10. Deney düzeneği kabin gurubu.

Tasarlanmaya çalışılan deney aygıtının kabini içerisine ısıtma-soğutma ve uv modülünün monte edilebileceği ve gerekli hallerde deneylerde kullanılabilceği öngörülmektedir. Kabin içerisine monte edilecek Ekstansiyometre ile deney numunesi boyutlarında meydana gelebilecek değışimleri anlık olarak takip etmek mümkün olabilecektir. Kabinin bütün bu donanımların monte edilebileceği şekilde, kullanım kolaylığı açısından cam kapakları olan ve deney düzeneğine monte edilen birim olarak tasarlanması gerekmektedir. Üzerine monte edilen kontrol paneli tarafından kumanda edilebilir olması ve elde edilen verilerin bilgisayar tarafından işlenebilecek şekilde olması tasarlanmaya çalışılmıştır.

Deney sonunda (malzeme yapısında nihai bozulma) malzeme ömrü belirlenirken, ara fazın durumu taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile izlenebilmektedir.

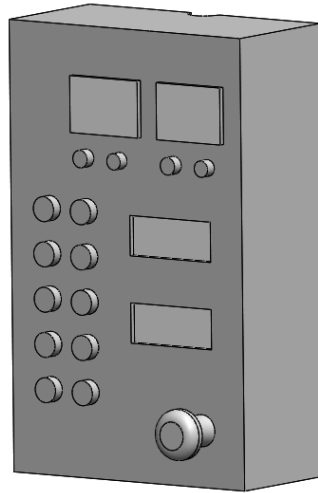
8.5. KONTROL PANELİ

Kontrol paneli deney düzeneğinde numuneye tatbik edilen deney uygulamasının kontrol edilebilmesini sağlayan parçadır. Numuneye uygulanan testler sırasında geçerli ve sağlıklı sonuçlar elde edilmesi amaçlanmaktadır. Kontrol paneli üzerindeki göstergelerde deney ortamı sıcaklığı, uygulama sırasında malzemenin verdiği tepki sonucu numune bünyesinde oluşan sıcaklık değeri, numuneye uygulanan kuvvetin değeri ve kuvvetin uygulama frekans değeri kontrol edilebilmesi öngörülmüştür. Acil durum stop düğmesi de kontrol paneline ilave edilmelidir. Kontrol paneli sayesinde kabin içerisnde bulunan iklimlendirme modülü kullanılmaktadır. Deney sırasında uygulanan kuvvetler nedeniyle matris ve elyaf arasındaki etkileşim sonucu ısı oluşumu gözlenmektedir. Oluşan bu ısıya ek olarak ortam ısısında fazla olması deney sonuçlarını olumsuz yönde etkileyebilir.



Şekil 8.11.Kontrol paneli.

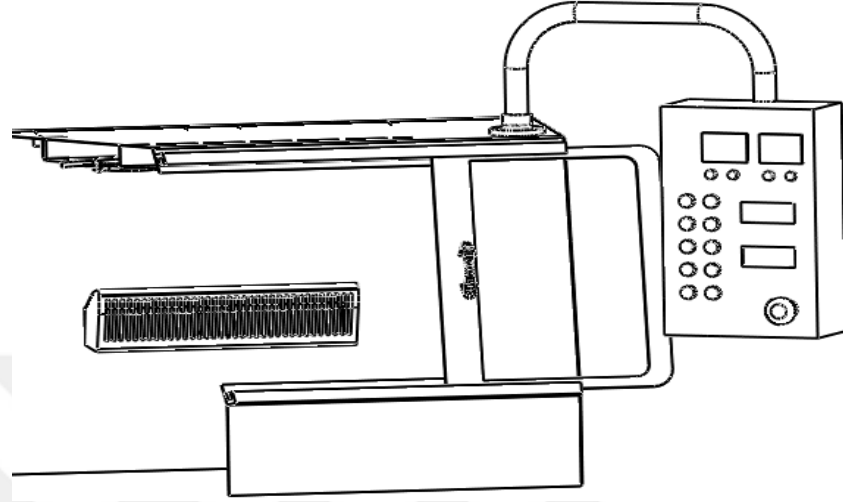
Kontrol paneli vasıtasıyla kabin içerisinde bulunan uv ışın kaynağında kontrol edilebilir olmalıdır. uv ışınları çalışan iş parçaları üzerinde artı bir yük oluşturduğu bilinmekle beraber etkilerini zaman içerisinde malzeme yapısında bozulma şeklinde göstermektedir. Kompozit malzemelere uygulanacak gerçek zamanlı deneylerde numuneye uygulanacak kuvvet yüklemeleriyle beraber uv ışınları da kullanarak gerilme çiftleri oluşturulmalıdır. Uygulanan kuvvetin frekans değeri deneyden geçerli ve doğru sonuçlar alınabilmesi için dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli faktördür. Frekans değeri birim sürede uygulanan kuvvet yüklemesi olarak basitçe tarif edilebilmektedir. Frekans değeri direkt olarak deney zamanını etkilediğinden çoğunlukla gözardı edilebilmektedir. Bilinmelidir ki periyodik yüklemeler altında malzemeler üzerinde yorulma davranışı gelişmektedir. Yorulma belli bir malzeme ömrü sonunda meydana gelmektedir. Bu nedenle yorulma deneyleri uygulama süresi oldukça uzun zaman gerektirmektedir. Bu durum nedeniyle gerekenden daha küçük frekans değerleri seçilerek deney zamanından kazanmak istenebilir. Frekans değerinde meydana getirilen artış numune bünyesinde ısıl yükler oluşumuna neden olmaktadır



Şekil 8.12. Dış kullanıcı seti.

Deney sırasında uygulanan kuvvet miktarı da ayrıca dikkat edilmesi gerekli bir parametredir. Deney numunesine çalışma ortamında üzerine etki eden kuvvetten daha az veya çok kuvvet yüklemesi yapıldığında hatalı deney sonuçlarının elde edileceği bilinmelidir. Düşük kuvvet uygulaması sonsuz ömre doğru sonuçlar verirken daha fazla kuvvet uygulamaları ise çekme deneyi gibi hasar oluşumları oluşturarak malzeme ömrü

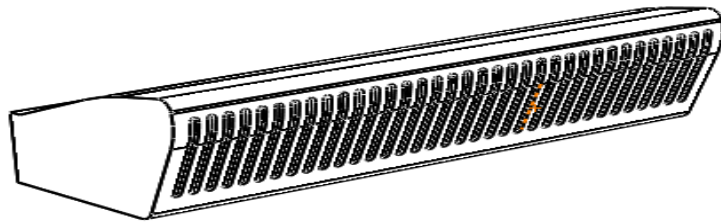
hakkında yanlış veriler elde edilmesine neden olur. Esas olan malzeme çalışma yüküne ve yine malzeme öz direnci ile dayanabilceği sınırın araştırılması, belirlenmesidir. Elde edilen veriler sisteme bağlı bilgisayar tarafından işlenerek kayıt altına alınması gerekmektedir.



Şekil 8.13. Kontrol panelinin test sistemine uygulanması.

8.6. İKLİMLENDİRME MODÜLÜ

Deney numunesine gerçek kullanım alanında maruz kalabilecekleri gerilimlerin simülasyonu uygulanarak gerçek yorulma ömrü tespit edilmelidir. Yapılan deney sırasında birleşik gerilme hallerinin oluşturulabilmesi amaçlanarak tasarım yapılmaya çalışılmıştır.



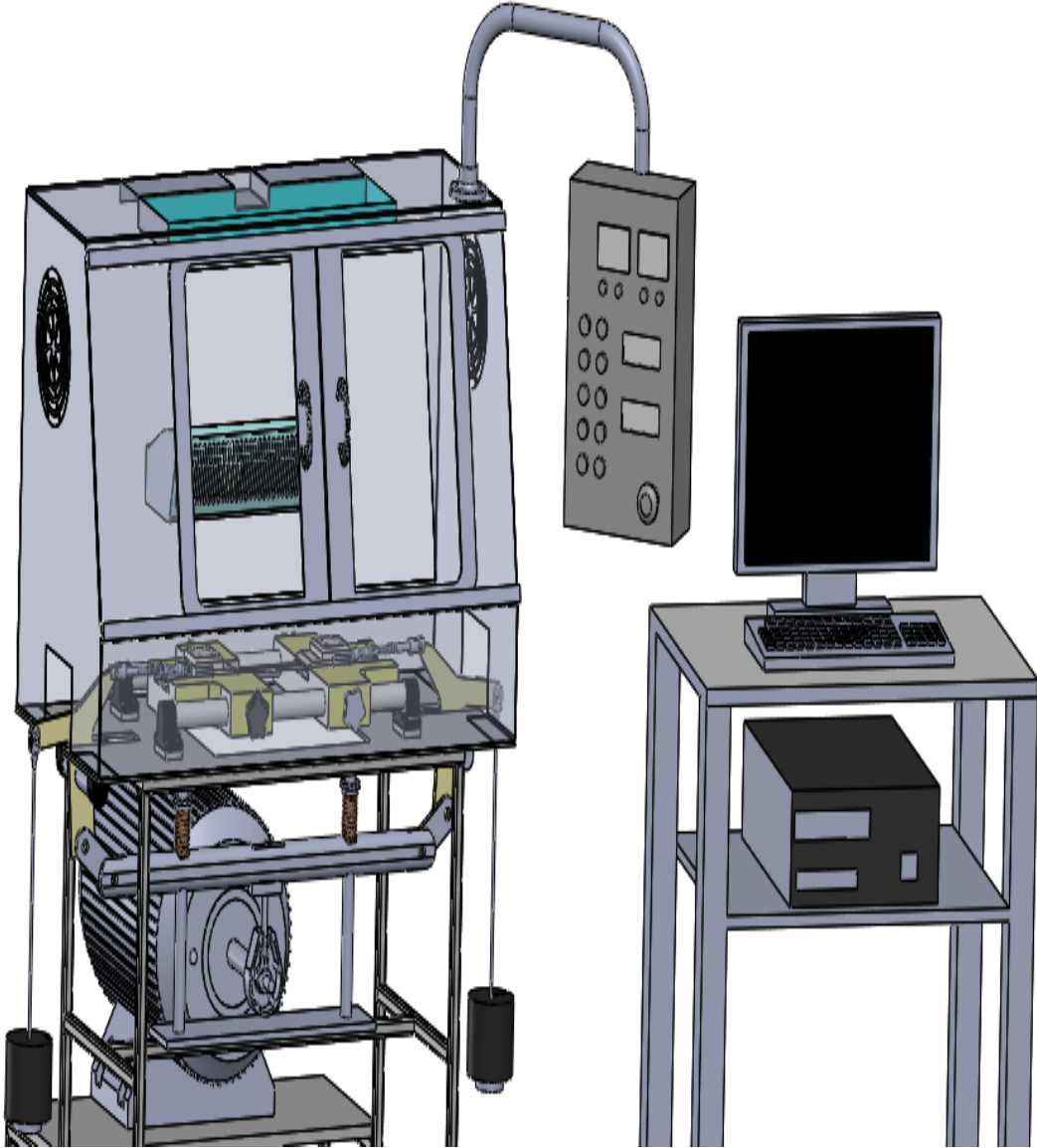
Şekil 8.14. İklimlendirme ve nem alma ünitesi.

Yapılarında hidrojen bulunan malzemeler havada bulunan oksijen ile reaksiyona girerek ve malzeme bünyesinde nem ve su tutma davranışı geliştirmektedirler. Bu olumsuzluğun önlenmesi için deney düzeneği içerisinde monte edilen iklimlendirme modülü kullanımıyla deney numunesi belli bir sıcaklık ortamında sabit tutulması ve kurutulması sağlanabilecektir. Mekanik gerilmelere ek olarak sıcaklığın artırılıp düşürülmesini sağlayan modül kabine monte edilip kontrol panelinden kontrol

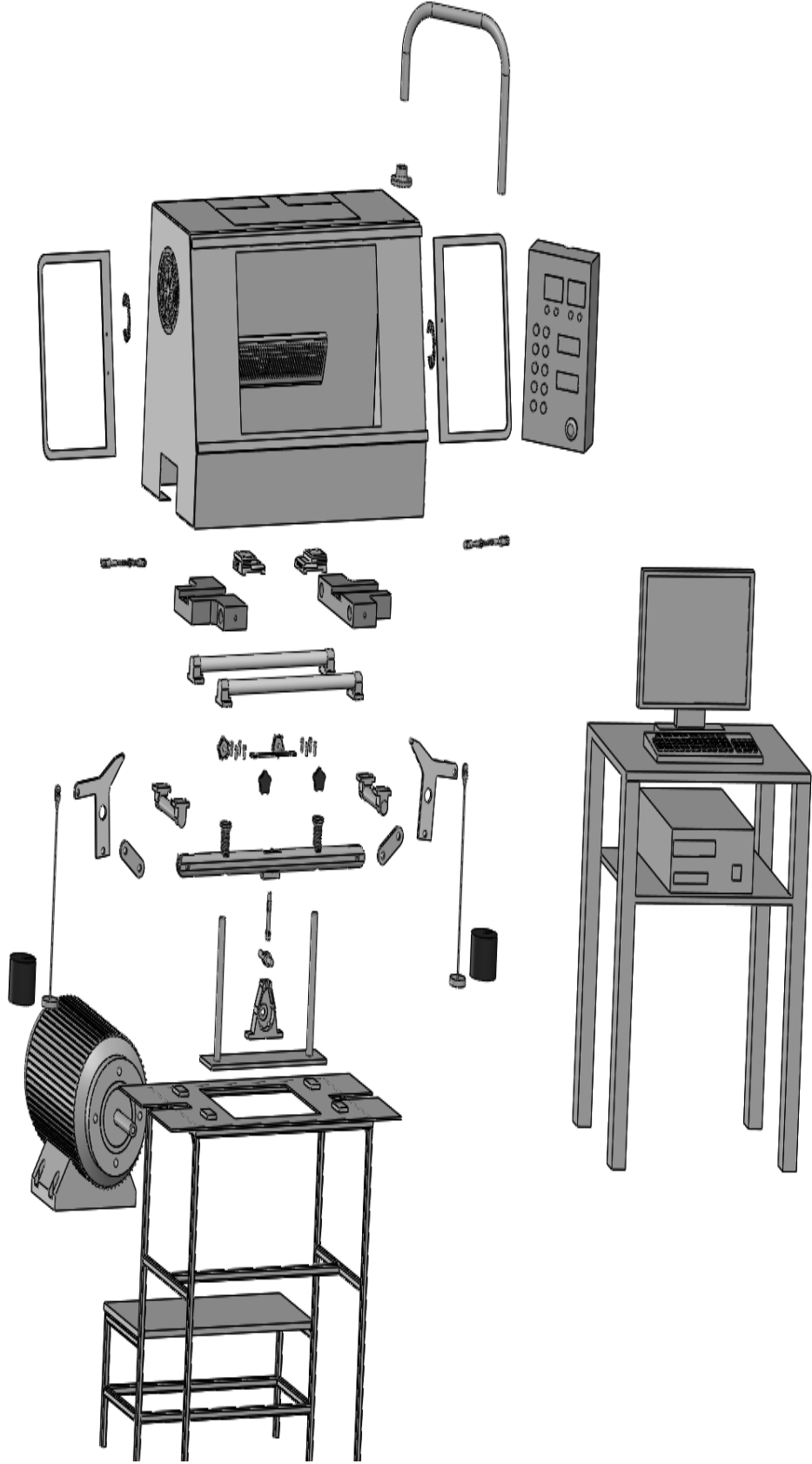
edilebilmesi sağlanmalıdır.

8.7. UV ÜNİTESİ

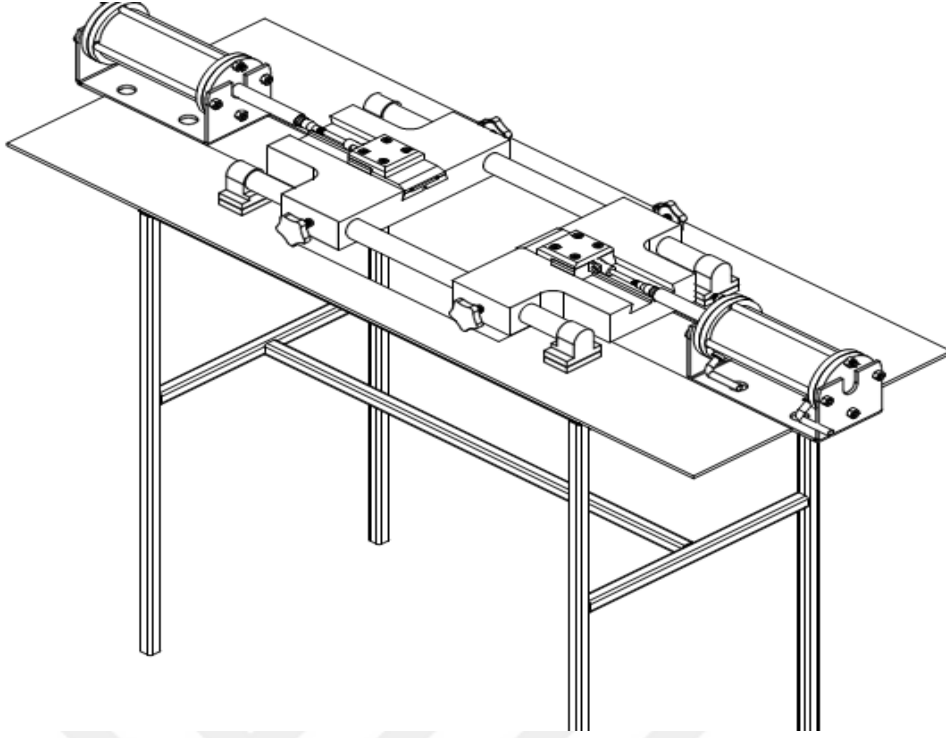
Deney düzeneğinin kabin bölümünün içerisine uv ışın kaynağının da monte edilmesi öngörülmektedir. Çalışan iş parçalarına kuvvetlerin mekanik etkileriyle birlikte güneşin uv ışınlarının da etki ettiği bilinmekte ve bu durum malzemenin yorulma ömrünü belirlemektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin en büyük avantajı olan kullanım yerine göre malzeme oluşturulması sürecinde uv dayanımı da dikkate alınmalıdır. Sisteme infrared ısıtıcı ve ultraviyole ışın kaynağı da akuple edilebilmelidir.



Şekil 8.15. Tam sistem kurulum durumu.



Şekil 8.16. Deney düzeneği montajı (patlatılmış görünüm).



Şekil 8.17. Düzenek montajı (Hidrolik sistem).

Tasarlanmaya çalışılan sisteme alternatif olarak ağırlık vasıtasıyla etki ettirilecek kuvvet yerine hidrolik pistonlar sayesinde çene parçaları tahrik edilebilir. Tasarım olasılıkları içerisinde sistemin mekanik yolla tahrik edilmesi yanın da elektro rezonans, hidrolik ve pnomatik sistemlerinin kullanımı araştırılmıştır. Pnomatik sistemlerin en büyük dezavantajı havanın sıkıştırılabilme özelliğidir. Hidrolik sistemlerde ise verilen kuvvet değeri kurs boyunca etki ettirilmesi durumudur. Mekanik sistemde malzeme kendi öz direnci sayesinde çalışma ortamındaki yüklemelere benzer etkilere maruz kalacağı öngörülmüştür.

9. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bütün malzemeler tekrarlanan yüklemeler altında hemen hemen aynı tepkileri vermektedirler. Elastik deformasyon, plastik deformasyon ve kalıcı hasar oluşumu olarak sıralayabileceğimiz bu durum üzerine kuvvet etki ettirilen tüm malzemelerde görülmektedir. Çalışma ömrü boyunca meydana gelen bu durum yorulma durumu olarak adlandırılmaktadır. Kompozit malzemelerde de meydana gelen bu durumun analizinde farklı yaklaşımların kullanıldığı görülmektedir. Tek elyaf takviyeli numuneler, farklı dokuma oryantasyonlarına sahip çok elyaflı numuneler, çekme, basma, eğme ve burulma deneyleri ve bu gibi daha birçok uygulamalar yapılmaktadır. Araştırmaların temelini ise ara bağ yapı teşkil etmekte olup çalışmalar bu alanda yoğunlaşmaktadır. Bağ yapının dayanımının hesaplanması ve malzemenin kalitesinin belirlenmesi noktasında genellikle sonlu elemanlar analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemin en büyük kusuru kompoziti oluşturan elyafın, matrisin ve oluşturdukları bağ yapının mükemmel yapıda olmaları olarak ön kabul edilmesidir. Bu şekilde yapılan araştırmalar sonucu elde edilen veriler ışığında malzemenin özelliklerinin belirlenebileceği düşünülmektedir. Ancak kompozit malzemeler bir imalat prosesi sonucunda elde edilmektedirler. Üretim aşamasında herhangi bir parametrede değişiklikler olması, bileşenlerin ve ara bağ yapının mükemmel yapıda olduklarının kabul edilmesiyle yapılan analiz sonuçlarını geçersiz ve hatalı hale getirebilmektedir.

Üretimi yapılan malzemedan alınan veya aynı bileşenler kullanılarak imal edilen deney numuneleri bu konuda daha kesin verilere ulaşılmasını sağlayacaktır. Deney düzeneginin tasarımında bu kritik noktalar göz önünde tutulmaya çalışılmış özellikle çalışan metal ve alaşımları yerine kullanılacak iş parçalarının mekanik yüklemeler dışında diğer yüklemelere de maruz kaldığı görülmüştür. Malzemeye etki eden bu yükler tek tek olabildiği gibi aynı anda birarada da bulunabilmektedirler.

Deney sırasında malzemeye çalışma yükü ve emniyet katsayıları kadar yüklemeye uygulanması malzemenin dayanımı ve yorulma ömrü hakkında sağlıklı veriler elde edilmesine olanak sağlayacağı düşünülmektedir. Genellikle büyük mekanik yüklemeler

kullanılarak yapılan deneyler (çekme, basma, burulma, eğme) yorulmayla ilgili fikir vermemektedir. Yüklemeler sırasında malzeme kendi öz direnci ile dayanım göstermeli ve daha sonra plastik deformasyon ve kalıcı hasar oluşumu durumu izlenmelidir. Deney sırasında matrisin ve elyafın farklı poison oranına sahip olduğu bilindiğinden tekrarlanan yüklemeler altındaki boyut değişimi mikron ile milimetre değerleri arasında gerçekleşmesi beklenmelidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus mekanik yüklemeler dışındaki yüklemelerinde (ısı, uv ışınları, nem v.b.) sonucu büyük ölçüde etkileyebileceğinin bilinmesidir. Bu durum düşünülerek deneylerde gerilim çiftleri meydana getirilmelidir. Günümüzde gittikçe artan gereksinim ve kullanım alanlarındaki artış kompozit malzemeler üzerinde daha fazla çalışmalar yapılmasını gerektirmektedir. Kendisi de kompozit yapı olan insan gerek tıbbi alanda gerekse gündelik yaşamda bu alanda daha fazla gelişmeye ihtiyaç duymaktadır.

Deney düzeneği tasarlanırken değişik seçenekler (hidrolik, pnomatik, elektro rezonans) düşünülmüş, deney numunesinin özellikleri ve uygulanacak kuvvet büyüklüğü göz önünde tutularak mekanik sistemde karar kılınmıştır.

Tasarlanmaya çalışılan düzenek gerilme çifti (basma ve çekme gerilmesi) uygularken çevrim ömrü boyunca malzemenin yapısal ve boyutsal değişimlerinin gözlemlenebilmesini amaçlamaktadır. Çevrim ömrü sonunda (kırılma) malzemeyi oluşturan matris, takviye elemanı ve ara fazın durumları incelenebileceği öngörülmektedir. Deney düzeneği kompozit malzemelerin yapısal bozulma ömürlerinin tesbiti ve uygulanan yükleme değerleri sonucunda, ne büyüklükte bir boyutsal sapma gösterdiklerinin tesbiti amacıyla tasarlanmaya çalışılmıştır. Deney sonucunda kullanım yeri ve özelliklerine göre hangi form ve yerleşim düzeninde takviye malzemesi seçilmesi gerektiği konusunda yol gösterici veriler üretilebileceği düşünülmektedir. Tasarımı tamamlanan deney düzeneği düşük frekans ve düşük kuvvet yüklemeleriyle polimer matrisli kompozit malzemelerde kullanılabileceği ön görülmektedir. Bu deney düzeneği ile elde edilecek deney sonuçları ile malzemeye ait WÖHLER diagramı (S-N) elde edilecektir. Böylelikle deney konusu olan kompozit yapının mekanik özelliklerine ait verilerin elde edilmesi sağlanacaktır. Buradan ulaşılan veriler bir grafik olarak veya girdi Çizelgesu halinde bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi gibi yapısal simülasyonlarda kullanılmak üzere oluşturulacak malzeme dosyasına veriler oluşturulabilecektir. Deney çeşitliliği ve malzeme geometri, boyut ve yapı değişikliği ile yapılacak deneyler için esnek bir test düzeneğinin gerekli olduğu tespit edilmiştir. Deney düzeneginin kullanımı sonucu elde edilecek veriler ışığında

malzeme yapısı revize edilebilir. Malzemenin zayıf yönleri geliştirilirken yeni özellikler kazanması sağlanabilmektedir. Malzemenin tekrarlanan yüklere göstereceği tepki ve çalışma ömrünün bilinmesi daha iyi ve gelişmiş tasarımlar yapılmasına olanak sağlayacaktır.



10. KAYNAKLAR

- [1] O. Aricasoy, “Kompozit Sektör Raporu”, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, Türkiye Rap. 2, 2006
- [2] W. F. Smith, çev. N. G. Kınıkoğlu “*Material Science and Engineering*”, 3. baskı, İstanbul, Türkiye, Literatür yayınevi, 2001, böl.2, ss.18-25
- [3] K. Onaran, , Kompozit malzemeler,“ *Malzeme Bilimi*”, 11.baskı, İstanbul, Türkiye, Bilim teknik yayınevi, 2012.
- [4] Enşici, A., (14, Nisan, 2015) “Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları,” Erişim: <http://www.turkcadcamlar.net/rapor/kompozit-malzemeler/>
- [5] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., “CTP Teknolojisi-Cam Elyafı Takviyeli Reçine Sistemleri”, *Cam Elyaf Sanayii A.Ş.*, İstanbul, Türkiye, 1984.
- [6] R. Sakin, “Düzlemsel rastgele dağılımlı keçe elyaf takviyeli kompozit malzemede kırılma tokluğunun elyaf hacmi, elyaf yönlendirilmesi ve deformasyon hızı ile değişiminin saptanması”, Yüksek lisans, Tezi, BAU. F. B. E., Balıkesir, Türkiye,1994.
- [7] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., “*Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri*”, Cam Elyaf Sanayii A.Ş., Kocaeli, Türkiye, 1997.
- [8] Y. Şahin, “Kompozitlerin Mekanik Özellikleri,” *Kompozit Malzemelere Giriş*, 2. baskı. İstanbul, Türkiye, Seçkin yayınevi, 2015, böl.1-2, s.19-27.
- [9] Anonim, Kompozit malzemelerin yapısı Teknolojik araştırmalar http://teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/icerik/kompozit.htm.
- [10] N. L. Hancox, - R. M. Mayer, “Design Data for Reinforced Plastics”, Chapman & Hall, London, 1994.
- [11] E. Ateş, “Epoksi polimer betonun makine yapım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması,”Doktora Tezi, *B.A.U. F.B.E., Balıkesir*, Türkiye, 1994.
- [12] V. Vasiliev, E. Morozov, “Mechanics and analysis of composite materials” *Elsevier Publ.* 2001.
- [13] M.Saçak, “Polimer,” *Polimer Kimyası*, Ankara, Türkiye, 3. baskı Gazi kitabevi 2002, ss.210-217.

- [14] G. Demircioğlu, "Kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyutunun etkisi," Yüksek lisans tezi *GAZİ Üniversitesi, F.B.E. Makine mühendisliği*, Ankara, Türkiye, 2006.
- [15] O. Ünsal, (02 Şubat 2016), D.E.Ü. Yard. Doç. O.Ünsal yapı malzemeleri ders notları Erişim:www.haddemetal.com/tr/Download/Kompozit%20Malzemeler.pdf tr
- [16] A. Aran, (12, Haziran,2016), Polimer, Mal 201 Malzeme Bilgisi Ders Notları 2007-2008, Erişim: <http://www2.isikun.edu.tr/personel/ahmet.aran/mal201.pdf>
- [17] V. Ceyhun, M.Turan , "Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı", *Mühendis ve makina*, c. 44, s. 516, ss.35-41, 2003.
- [18] S. Şahin, (23,Mart,2016), Yorulma ve Aşınma Malzeme Bilgisi, Erişim: <http://docplayer.biz.tr/12772304-Doc-dr-salim-sahin-yorulma-ve-asinma.html>
- [19] S. Erden, H. Yıldız, Karbon Lif İslanabilirliği Ve Yüzey Enerjisinin Plazma Oksidasyonu Yoluyla Değiştirilmesi,"*Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi* c. 3, No: 2, ss. 11-19, 2009.
- [20] Y. Şahin, "Kompozitlerin Mekanik Özellikleri," *Kompozit Malzemelere Giriş*, 3. baskı. İstanbul, Türkiye, Seçkin yayınevi, 2015, böl. 8, s. 190-220.
- [21] J. Davis, J. Qu, "numerical analysis of fiber fragmentation in SiC composite specimen," *Composites science and technology*, vol. 60, pp. 2297 - 2307, 2000.
- [22] C. H. Hsueh, "Interfacial debonding and fibre pul – out stresses of fibre – reinforced composites," *Materials science and engineering*, vol. A165, pp. 189 – 195, 1996.
- [24] W. Sun, F. Lin, "Computer modelling and fea simulation for fiber pull – out, journal of thermo plastic," *Composite materials*”,vol. 14, pp. 327 – 343, 2001.
- [25] D. Y. Song, N. Takeda, "A method of stress analysis for interfacial property evaluation in thermo plastic composites," *Materials science and engineering*, vol. A267, pp.242–224, 2000.
- [26] J. Xiaoyu, "Micro - mechanical characteristics of fiber matriks interfaces in composite materials," *Composites science and technology*”, vol. 59, pp. 635 – 642, 1999.
- [27] S. Yun Fu, C. Yue, "Analyses of Micro Mechanics of Stress Transfer in a Single and Multi Fiber Pull – Out tests," *Composites Science and Technology*”, vol.60, pp. 569 – 579, 2000.
- [28] A. Turgut, M. Gür, N. Arslan, "Kompozit malzemelerde arafazın mukavemet özelliklerinin ısıtma şartlarına bağlı olarak araştırılması,”, 6. *Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, s.149-157, 1994.
- [29] M. Kaman, "Kısa fiberlerle takviye edilmiş kompozitlerde çekme etkisi ile fiberin matriksden ayrılması ve kırılma tokluğunun araştırılması”, Doktora Tezi, Makine Mühendisliği, Fırat Üniv. Fen Bil. Ens., Elazığ, Türkiye, 2002.

- [30] K. Turan, "Kompozit levhalarda fiber-matriks ara yüzeyinde gerilme analizi", Yüksek Lisans Tezi, , Fırat Ün. Fen. Bil. Ens., Elazığ Türkiye, 2003.
- [31] M. F. Ashby, "Engineering materials, an introduction to their properties and application", Pergamon Press Ltd, 1980.
- [32] D. C. Phillips, "Effects of radiation on polymers. *Materials science and technology*", vol. 4, pp. 85-91, 1988.
- [33] Kınayyigit, F., (2006,24,Kasım), Cam elyaf takviyeli plastik kompozitler ders notları, Erişim: <http://www.kompozit.org.tr/wp-content/uploads/2017/03/BULTEN-5.pdf>
- [34] W. H. Sutton, (Guest Editor). Microwave Processing of Material. MRS bulletin, pp.22-24, Pittsburg, USA, 1993.
- [35] Y. Ulcay, M. Akyol, R. Gemci, *Uludağ Üniversitesi f.b.e. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, c. 7, Sayı 1, 2002.
- [36] O. Arıcasoy, "Kompozit Sektör Raporu," *İstanbul Ticaret Odası*, Türkiye, Rap.: 2006.
- [37] Cam Elyaf Sanayii A.Ş., "CTP. Teknolojisi – CTP sektöründe gelişen teknolojilere uygulama alanları," *Cam elyaf sanayii A.Ş Sektör raporu*, Kocaeli, Türkiye, 2016.
- [38] O. Ünsal, (14, Mayıs, 2016) "Yapı malzemeleri ders notları," www.haddemetal.com/tr/Download/Kompozit%20Malzemeler.pdf
- [39] M. Topçu, A. R. Tarakçılar, S. Taşgetiren, "Mühendislik Malzemesi Olarak Kompozitler ve Özelliklerini Belirleyen Faktörler", *Mühendis ve Makina*, c. 36, s. 420, ss. 23-27, 1995.
- [40] E. A. Gandhi, "Manufacturing-process-driven design methodologies for components fabricated in composite materials", *Composites Manufacturing*, vol.1, pp. 40, 1990.
- [41] M. Topçu, A. R. Tarakçılar, S. Taşgetiren, "Kompozit malzeme kullanımında tasarım esasları", *Mühendis ve Makina*, c. 36, s. 422, ss. 21-24, 1995.
- [42] J. D. Hughes, "Fibres for reinforcement," *Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, s. 69, Denizli, Türkiye, 1991, pp. 365, June 1986.
- [43] N. L. Hancocks, "Matrices for composite materials", *Metals and Materials* pp. 435, 1986.
- [44] R Davidson, "Performance Characteristics of Composite Materials", *Metal and Materials*, Vol. 67 pp. 651, 1986.
- [45] T. Aksoy, "Kırılma mekaniği", *DEÜ, F.B.E. Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, Yayın no: 43, 1984.
- [46] J. R. Vinson, T. W. Chou, "Composite materials and their use in structures", *Applied Sci. Publ. Ltd.*, 1975.

- [47] J. E. King, "Failure in composite materials", *Metals and materials*, pp. 720, 1989.
- [48] R. M. Caddell, "Deformation and fracture of solids", Prentice-Hall, Inc., 1980.
- [49] M. F Ashby, "Engineering materials, an introduction to their properties and application", Pergamon Press Ltd, 1980.
- [50] M. Topçu, "The elasto-plastic stress analysis on the transmission roller chain link plates," Research Reports, *D.E.Ü, F.B.E., Makine Mühendisliği*, İzmir, Türkiye, 1991.
- [51] N. S. Taylor, "The feasibility of welding of composite materials," *Construction and Building Materials*, vol.3, pp. 213, 1989.
- [52] S. Tandon, "Investigation into machining of composite materials," *Precision Engineering*, vol.12, pp. 227, 1990.
- [53] I. Visconti, C. Etali, "Forecast on structural behaviour for a composite city bus in GFRP", *Composites Manufacturing*, vol.1, pp. 50, 1990.
- [54] E. P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser, "Materials and processes in manufacturing", Macmillan Comp., 1984.
- [55] A. Çolakoğlu, "Yapısal hasarlara sebep olan faktörler", *Mühendis ve Makina*, c. 36, s. 421, ss. 24-27, 1995.
- [56] TMMOB. Kimya Mühendisleri Odası (2010,26-28 Kasım) "Otomotiv skktöründe kompozit malzemeler ve sorunları" *Uluslararası Katılımlı Polimerik Kompozitler Sempozyum. Sergi ve Proje Pazarı* www.kmo.org.tr 2.
- [57] S. Fidan, E. Avcu, Kompozit uçak yapılarında gömülü tahribatsız muayene sensörleriyle eş zamanlı hasar izleme," *Mühendis ve Makina*, c.52, s. 614 ss. 94-102, 2011.
- [58] Y. Y. Hung, "Shearography, a new optical method for strain measurement and nondestructive testing, " *Optical Engineering*, vol. 21, Iss. 3, pp. 391-395, 1982.
- [59] R. Grimberg, D. Premel, A. Savin, Y. LeBihan, , D.Placko, "Eddy current holography evaluation in carbon epoxy composites, " *Insight (UK)*, vol. 4, Iss.3, pp. 260-264, 2001.
- [60] J. L. Rose,. "Ultrasonic Waves In Solid Media," Cambridge univercity press. vol.4 pp.140-150, 1999.
- [61] M. C. Bhardwaj, "Evolution of piezoelectric transducers to full scale non-contact ultrasonic analysis mode, " *In:Proceedings of the 16'world conference in NDT*, Montreal, Canada, 2006.
- [62] A. A. Pollock, "Acoustic emission inspection", Physical Acoustics Corporation. Princeton, USA, 1995.

- [63] M. Bolduc, C. Roy, W. W. Stinchcomb, N. E. Ashbaugh, "Evaluation of impact damage in composite materials using acoustic emission," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, Volume 4, Philadelphia, ASTM STP 1156, pp. 127-138,1993.
- [64] Y. Z. Pappas, V. Kostopoulos "Toughness characterization and acoustic emission monitoring of a 2d carbon/carbon composite," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 68, Iss. 14, pp. 1557-1573, 2001.
- [65] P. Cawley, R. D. Adams, "Sensitivity of the Coin-Tap Method of Nondestructive Testing," *Materials Evaluation*, vol. 47, Issue 5, pp. 558-563, 1989.
- [66] P. Cawley, A. M. Woolfrey, II.D. Adams, "Natural frequency measurements for production quality control of fibre composites," *Composites*, vol.16, Iss. 1, pp. 23-27, 1985.
- [67] R. Halmshaw, "Development of industrial radiography technique over the last 50 years," *Insight*, vol. 37, Iss. 9, pp. 684-687, 1995.
- [68] C. Soutis, N.A. Fleck, P. A. Smith, "Compression fatigue behaviour of notched carbon fibre-epoxy laminates," *International Journal of Fatigue*," vol.13, Iss. 4, pp. 303-312, 1991.
- [69] C. Meola, G. M. Carlomagno, "Recent advances in infrared thermography," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, pp. 27-58, 2004.
- [70] Netes Mühendislik / Fluke, (2016, 20, Kasım) Kızılötesi Termografi, Erişim: <http://www.makinatek.com.tr/arsiv/yazi/119-kizilotesi-termografi>
- [71] S. Fidan, T. Sınmazçelik, M. Ö. Bora, O. Çoban, "Düşük hızlı darbe yüklemeleri sonucu kompozit malzemelerde ortaya çıkan hasar mekanizmaları," *Mühendis ve Makina*, c. 51, s. 611,s.2-6, 2010.
- [72] Y. Tomita, K. Morioka, M. Iwasa, "Bending fatigue of long carbon fiber-reinforced epoxy composites," *Materials Science and Engineering, A*, vol.319-321, pp. 679-682, 2001.
- [73] M. H. Abdallah, E. M. Abdin, A. I. Selmy, U. Khasliaba, "Short communication effect of mean stress on fatigue behaviour of GFRP pultruded rod composites", *Composites - Part A. Applied Science and Manufacturing*, vol.28, No.I, pp. 87-91, 1997.
- [74] U. A. Khashaba, "Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP composites under rotating bending loads", *Journal of Composite Materials*, vol. 37, No. 4, pp. 317-331, 2003.
- [75] W. Van Paeppegem, J. Degrieck, "Experimental set-up for and numerical modelling of bending fatigue experiments on plain woven glass/epoxy composites", *Composite Structures*, vol. 51, No.I, pp. 1 -8, 2001.

- [76] G. Caprino, G. Giorleo, “Fatigue lifetime of glass fabric/epoxy composites”, *Composites Part A: Applied Science and manufacturing*, vol. 30, No. 3, pp. 299-304, 1999.
- [77] H. Y. Kim, T.R. Marrero, H.K. Yasuda, O.A. Pringle, , “A simple multi-specimen apparatus for fixed stress fatigue testing” *Journ.at of Biomedical Materials Research* vol. 48, No. 3, pp. 297-300, 1999.
- [78] E. Ateş, “Epoksi polimer betonun makine yapım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 1994.
- [79] M. Akkurt, “Makine konstrüksiyonunda Güvenirliğin Esasları”, *Makine Müh. Odası Yayını*, No. 106, İstanbul, Türkiye, 1977.
- [80] E. S. Kayalı, C.Ensari, F.Dikeç, “Metalik malzemelerin mekanik deneyleri”, *I.T.U. yayınları*, İstanbul, Türkiye, 1978.
- [81] A. P. Vassilopoulos, (2016, Mayıs, 15), Fatigue lifeprediction of composite materials and structures, Woodhead Yayıncılık Erişim: <https://www.elsevier.com/.../fatigue...composites...composite>.
- [82] A. L., Stratton, A. A. Pelegri, "Investigation of interlayer and intralayer delaminations", Rutgers University, Piscataivay, NJ, USA, 1999.
- [83] Ö. Keleş, (25, Mart, 2015),”Malzeme bilimi ders notları. Bölüm :5”, Metalurji-Malzeme Mühendisliği İ.T.Ü - Erişim: web.itu.edu.tr/ozgulkeles/ders.html.
- [84] C. Soutis, N. A. Fleck, P.A. Smith, “Compression fatigue behaviour of notched carbon fibre-epoxy laminates, ” *International Journal of Fatigue*, vol.13, Iss. 4, pp. 303-312,1991.
- [85] M. BELEVİ, G. İNANÇER, “Darbe ve ortam şartlarının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri.” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Erişim: <http://www.teknolojikarastirmalar.com> ISSN:1304-4141, pp.19-31, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı Fırat YASTIMOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri :04/07/1974 İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :firatyastimoglu@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|-----------|------------------------|-----------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Kompozit Malzeme Tek. | Düzce Üniversitesi | 2017 |
| Lisans | Tasarım Konst. Öğrt. | Marmara Üniversitesi | 2013 |
| Lise | Makine Ressamlığı Böl. | Haydarpaşa End. Mes. Lisesi | 1992 |

