T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI

DÜŞÜK SICAKLIK VE ODA SICAKLIĞI KOŞULLARI ALTINDA DARBE YÜKLERİNE MARUZ KALAN YAPIŞKANLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN MOD I / KIRILMA TOKLUĞU DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Ufuk GÜLER

Danışman
Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK



MANİSA–2025

UFUK

GÜLER

DÜŞÜK SICAKLIK VE ODA SICAKLIĞI KOŞULLARI ALTINDA DARBE YÜKLERİNE MARUZ KALAN YAPIŞKANLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN MOD I / KIRILMA TOKLUĞU DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Ufuk GÜLER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK SICAKLIK VE ODA SICAKLIĞI KOŞULLARI ALTINDA DARBE YÜKLERİNE MARUZ KALAN YAPIŞKANLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KOMPOZİT BAĞLANTILARIN MOD I / KIRILMA TOKLUĞU DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

UFUK GÜLER

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:
Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

Bu tez çalışmasında düşük sıcaklık ve oda koşulların altında darbe yüklerine maruz bırakılan ve yapışkan ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların Mod I kırılma tokluğu davranışları incelenmiştir. Çalışmanın hedefi farklı sıcaklıklar altında ve darbe yüklerinin yapıştırıcı ile gerçekleşen bağlantıların kırılma mekanizması ve enerji salınımlarını incelemektir. Deneysel araştırmalar ile kompozit malzemelerin numuneleri üretilerek ASTM D5528 test standardına göre yapışkan bağlantılar oluşturulmuştur. Sonrasında yine bu standarda göre farklı sıcaklıklar ve enerji seviyeleri altında darbeler uygulanmıştır. Uygulanan darbelere göre çatlak yayılma hızı ve kırılma enerjisi incelenmiştir. Çıkan verilere göre yapışkan malzemenin davranışı ve sıcaklık etkisinde iken gösterdiği performans incelenmiştir. Özellikle düşük sıcaklıklardaki malzeme performansında gerçekleşen değişiklikler ve darbe yüklemesinin kırılma tokluğuna olan etkisi deneysel sonuçlar ile incelenmiştir. Literatür incelenerek teorik çalışmalar ve yapılan deneysel çalışmalar yorumlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, düşük sıcaklık ve darbe etkisi altında yapışkan ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların mekanik dayanımını arttırmak için tasarım çalışmalarına, malzeme seçimine katkı sağlamak ve teknik çalışmalara destek vermektir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit bağlantılar, DCB testi, kırılma tokluğu

2025, 77 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MODE I / FRACTURE TOUGHNESS OF ADHESIVELLY BONDED COMPOSITE JOINTS SUBJECTED TO IMPACT LOADS UNDER LOW TEMPERATURE AND ROOM TEMPERATURE CONDITIONS

UFUK GÜLER

Manisa Celal Bayar University
Graduate Education Institute
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering

Supervisor:
Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK

In this thesis study, the mode I fracture toughness behavior of composite joints bonded with adhesive and exposed to impact loads under low temperature and room conditions was examined. The aim of th study is to examine the fracture mechanism and energy releases of adhesive connections under different temperatures and impact loads. Through experimental research, samples of composite materials were produced and adhesive connections were created according to the ASTM D5528 test standard. Afterwards, impact were applied under different temperatures and energy levels according to this standard. Crack propagation speed and fracture energy were examined according to the applied impacts. According to the obtained data, the behavior of the adhesive material and its performance under the influence of temperature were examined. The changes in material performance, especially at low temperatures and the effect of impact loading on fracture toughness were examined with experimental results. The literature was examined and theoetical studies and experimental studies were interpreted. The aim of this study is to contribute to design studies, material selection and support technical studies to increase the mechanical strength of adhesive joined composite connections under the influence of low temperature and impact.

Keywords: Composite connections, DCB testing, fracture toughness

2025, 77 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışma ile birlikte tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İbrahim Fadıl SOYKÖK'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmanın her aşamasında desteğini gösteren Sayın Dr. Hamza TAŞ'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın ilk anından beri yanımda olan, beni her zaman maddi manevi destekleyen değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Ufuk GÜLER
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

J	Joule
P (N)	Kuvvet
δ	Yer Değiştirme
RT	Room Temperature (oda sıcaklığı)
CT	Cold Temperature (soğuk-düşük sıcaklık)
HT	Hot Temperature (Yüksek sıcaklık)
K_{IC}	Kırılma Tokluğu
G_I	Enerji Salınım oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Fiber ve matristen oluşan kompozit yapı 16
Şekil 2.2 Kompozit Malzemelerin Türlerine Göre Sınıflandırılması 18
Şekil 2.3 Cam Elyafı 30
Şekil 2.4 Karbon elyafı 31
Şekil 2. 5 Aramid elyafı 32
Şekil 2. 6 Elle yatırma yöntemi 33
Şekil 2. 7 Filament sarma yöntemi 34
Şekil 2. 8 Pultruzyon yöntemi 35
Şekil 2. 9 Püskürtme Yöntemi 35
Şekil 2. 10 Reçine transfer kalıplama yöntemi 36
Şekil 2. 11 Reçine infüzyon yöntemi 37
Şekil 2. 12 Çatlak ilerleme modları 47
Şekil 2. 13 SENT numunesi 49
Şekil 2. 14 DCB numunesi 50
Şekil 2. 15 SENB numunesi 51
Şekil 2. 16 Mekanik birleştirme yöntemi 53
Şekil 2. 17 Yapıştırma bağlantı yöntemi 54
Şekil 2. 18 Yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı 55
Şekil 2. 19 Çift pimli ve yapıştırıcılı karma birleştirme 56

Şekil 3. 1 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi 58
Şekil 3. 2 700x700x3 mm boyutlarında plaka halde üretilmiş kompozit malzeme ... 59
Şekil 3. 3 Üretilen kompozit plakanın istenilen boyutlara kesme makinası ile getirilmesi 59
Şekil 3. 4 150x25x3 mm boyutundaki numuneler 60
Şekil 3. 5 Epoksi yapıştırıcı 61
Şekil 3. 6 Epoksi ile yapıştırılmış numune örneği 61
Şekil 3. 7 Düşük hız darbe testinin ucunun torna tezgahında üretimi ve darbe ucu .. 62
Şekil 3. 8 Düşük hız darbe testi uygulanması 63
Şekil 3. 9 Oda sıcaklığı ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü 63
Şekil 3. 10 Oda sıcaklığı ve 45 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü 65
Şekil 3. 11 0°C ye ulaşmak için kullanılan soğutucu sprey 66
Şekil 3. 12 0°C ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü 67
Şekil 3. 13 80°C ye ulaşmak için kullanılan ısıtıcı cihaz 68
Şekil 3. 14 80°C ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü 69
Şekil 3. 15 Darbe uygulanmamış numuneler 70
Şekil 3. 16 RT_30J, RT_45J, CT_30J, HT_30J numunelerine ait ön ve arka yüzey ortalama hasar izi çapları 72
Şekil 3. 17 Darbe türlerine göre sırasıyla test numuneleri ve yaprak menteşeler 73
Şekil 3. 18 Kompozit numune çekme testi 73
Şekil 3. 19 En küçük kareler yöntemi grafiği 74

Şekil 4. 1 RT_45J numunesine ait oluşturulmuş "$C^{1/3}$ – a" grafiği..... 75
Şekil 4. 2 Oda sıcaklığında Darbesiz, 30J ve 45J enerjilerinde darbeler uygulanmış DCB numunelerinin "P- δ" grafikleri 76
Şekil 4. 3 Farklı sıcaklıklarda 30J enerji seviyesinde darbe uygulanmış DCB numunelerinin "P- δ" grafikleri..... 78
Şekil 4. 4 DCB Testinden Delaminasyon Direnç Eğrisi (R-Curve)..... 79
Şekil 4. 5 Oda sıcaklığında Darbesiz, 30J ve 45J enerjilerinde darbeler uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon Direnç Eğrileri (R-Curve)..... 80
Şekil 4. 6 Farklı sıcaklıklarda 30J enerji seviyesinde darbe uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon Direnç Eğrileri (R-Curve)..... 81
Şekil 4. 7 Oda sıcaklığı ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü 82
Şekil 4. 8 Oda sıcaklığı ve 45J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü 83
Şekil 4. 9 Sıfır derece ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü ... 83
Şekil 4. 10 80°C ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü 84
Şekil 4. 11 Darbesiz numunenin çekme testi sonrası hasar görünümü 85

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1 Metal, seramik ve polimer matrislerinin özellikleri 19
Tablo 2. 2 Takviye türlerine göre kompozit malzemelerin özellikleri..... 22
Tablo 2. 3 Kompozit malzemelerde kullanılan reçinelerin genel özellikleri..... 26
Tablo 2. 4 Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların genel özellikleri 29

Tablo 3. 1 Oda sıcaklığı ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar..... 64
Tablo 3. 2 Oda sıcaklığı ve 45 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar..... 65
Tablo 3. 3 0°C ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar..... 67
Tablo 3. 4 80°C ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar..... 69
Tablo 3. 5 Uygulanan darbe ve sıcaklık koşullarına göre numune grupları..... 71

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ... 3
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ... 4
ŞEKİLLER DİZİNİ ... 5
TABLOLAR DİZİNİ ... 7
İÇİNDEKİLER ... 8
1. GİRİŞ ... 11
1.1 Literatür Taraması ... 11
2. GENEL BİLGİLER ... 15
2.1 Kompozit Malzemeler ... 15
2.1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı ... 15
Şekil 2.1 Fiber ve matristen oluşan kompozit yapı Recep İ. (2015) ... 16
2.1.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Termal ve Kimyasal Özellikleri ... 16
2.1.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ... 18
2.1.3.1 Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ... 19
2.1.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler (MMC) ... 20
2.1.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC) ... 21
2.1.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler (PMC) ... 21
2.1.3.2 Takviye Türlerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ... 22
2.1.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler ... 23
2.1.3.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler ... 23
2.1.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler ... 24
2.1.3.2.4 Karma Yapılı Kompozitler ... 25
2.1.4 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Reçineler ... 25
2.1.4.1 Epoksi Reçineler ... 26
2.1.4.2 Polyester Reçineler ... 27
2.1.4.3 Vinil Ester Reçineler ... 27
2.1.4.4 Fenolik Reçineler ... 28
2.1.4.5 Poliüretan Reçineler ... 28
2.1.5 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Elyaflar ... 29
2.1.5.1 Cam Elyafı (Glass Fiber) ... 29
2.1.5.2 Karbon Elyafı (Carbon Fiber) ... 30
2.1.5.3 Aramid Elyafı (Aramid Fiber) ... 31
2.1.6 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ... 32
2.1.6.1 Elle Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi ... 33
2.1.6.2 Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi ... 33
2.1.6.3 Profil Çekme / Pultruzyon (Pultrusion) Yöntemi ... 34
2.1.6.4 Püskürtme (Spray-up) Yöntemi ... 35
2.1.6.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi ... 36
2.1.6.6 Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC, BMC) Yöntemi ... 36
2.1.6.7 Vakum Yapıştırma / Torbalama (Bonding / Vakum Bagging) Yöntemi ... 37

2.1.6.8 Vakum Desteği ile Reçine İnfüzyon Yöntemi 37
2.1.7 Kompozit Malzemelerin Kullanıldığı Alanlar 38
2.2 Kırılma Mekaniği 39
2.2.1 Kırılma Mekaniğinin Temeli 39
2.2.2 Kırılma 40
2.2.2.1 Gevrek Kırılma 40
2.2.2.1.1 Gevrek Kırılma Mekaniği 41
2.2.2.1.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü (K) ve Kırılma Tokluğu (K_{IC}) 42
2.2.2.1.3 Düşük Sıcaklık Kırılmaları 42
2.2.2.1.4 Çarpma veya Darbe Kırılmaları 42
2.2.2.1.5 Çatlak Yayılımı ve Enerji Salınımı 42
2.2.2.1.6 Gevrek Kırılmanın Önlenmesi 43
2.2.2.2 Sünek Kırılma 43
2.2.2.2.1 Sünek Kırılma Mekaniği 44
2.2.2.2.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü (K) ve Kırılma Tokluğu (K_{IC}) 44
2.2.2.2.3 Sıcaklık Etkisi 45
2.2.2.2.4 Çarpma veya Darbe Kırılmaları 45
2.2.2.2.5 Çatlak Yayılımı ve Enerji Salınımı 45
2.2.2.2.6 Sünek Kırılmanın Önlenmesi 45
2.2.3 Kırılma Mekaniği Teorileri 46
2.2.3.1 Griffith Teorisi 46
2.2.3.2 Irwin Teorisi 46
2.2.4 Kırılma Modelleri 47
2.2.4.1 Çatlak Açılma Tipi / Mod I 47
2.2.4.2 Çatlak Kayma Tipi / Mod II 48
2.2.4.3 Çatlak Yırtılma Tipi / Mod III 48
2.2.5 Kırılma Tokluğu Deney Çeşitleri 49
2.2.5.1 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi (SENT) 49
2.2.5.2 Çift Ankastre Kiriş Deneyi (DCB) 50
2.2.5.3 Üç Nokta Eğme Deneyi (SENB) 50
2.3 Kompozit Malzemelerin Bağlantı Yöntemleri 51
2.3.1 Kompozit Bağlantıları Hakkında Genel Bilgiler 51
2.3.1.1 Mekanik Bağlantı Yöntemi 52
2.3.1.2 Yapıştırma Bağlantı Yöntemi 53
2.3.1.3 Karma (Hibrit) Bağlantı Yöntemi 55
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER 57
3.1 Test Numunelerinin Hazırlanması, Test Yöntemi ve Uygulanması 57
3.1.1 Numune Üretimi 57
3.1.2 Düşük Hız Darbe Testleri 62
3.1.2.1 Birinci Numune Grubu 63
3.1.2.2 İkinci Numune Grubu 64
3.1.2.3 Üçüncü Numune Grubu 66

3.1.2.4 Dördüncü Numune Grubu 68
3.1.2.5 Beşinci Numune Grubu 70
3.1.2.6 Tüm Numune Grupları Ortalama Darbe İz Çapları 71
3.1.3 Çift Ankastre Kiriş Çekme Deneyinin Uygulanması (DCB) 73
3.1.4 Modifiye Edilmiş Kiriş Teorisi 74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI 75
4.1 Numunelerin Çatlak Boylarının En Küçük Kareler Grafiği ile Hesaplanması 75
4.2 Kuvvet "P"– Yer Değiştirme "δ" Grafikleri 76
4.3 Enerji Salınım Oranı "G_I"– Çatlak Uzunluğu "a" Grafikleri (Delaminasyon Direnç Eğrileri) 78
4.4 Numunelerde Oluşan Hasarlar 81
5. SONUÇ VE ÖNERİ 86
KAYNAKLAR 88

1. GİRİŞ

1.1 Literatür Taraması

Kompozit malzemeler kısaca, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile ortaya çıkan ve malzeme özelliklerini arttıran malzemelerdir (Campbell, 2010). Yapılan bu tez çalışmasında kompozit malzemelerde kullanılan yapıştırma ile birleştirme tekniği kullanılarak Mod I kırılma tokluğu tepkileri incelenmiştir. Kompozit malzemeler, Yüksek mukavemetleri ve hafif yapıları ile öne çıkarlar. Bu özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadırlar ve bilimsel araştırmalarda da sık sık çalışılan konuların başında gelirler. Kompozit malzemelerin birleştirilmeleri, malzemenin mekanik özelliklerini olumlu yönde etkiledikleri için akademik ve endüstriyel olarak her zaman araştırma konusu olmuştur. Yapılan bu tez çalışmasında farklı sıcaklıklar ve farklı darbeler altında yapıştırma tekniği ile birleştirilmiş kompozit malzemelerin kırılmaya karşı verdiği tepkileri incelenmiştir. Yapıştırma tekniği ile birleştirilen kompozit malzemelerin Mod I kırılma toklukları, yapılan bağlantılardaki dayanıklılık davranışlarını önemli kılmaktadırlar. Literatüre baktığımızda yapıştırma tekniği kullanılarak birleştirme sağlanan kompozit malzemelerin özelliklerinin artışına katkı sağlayan birçok çalışma mevcuttur. Yapılan tez çalışmasındaki amaç, yapışkan (tutucu) malzeme ile birleşimi sağlanmış kompozit malzemelerin düşük sıcaklık, yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığında birbirinden farklı enerji seviyelerinde darbeler uygulandıktan sonra çift kiriş ankastre çekme deneyi ile kırılma tokluğu incelenmiştir. Böylelikle literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Darbe yükleri altındaki kompozit malzemelerin çift kiriş ankastre çekme testi uygulanarak malzemedeki tabakaların kırılma tokluğu ölçümü ve buna bağlı olarak oluşan çatlakların yayılımını gözlemlemek sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Bahsedilen testin üst versiyonu ise klavuzlu çift konsol kiriş testidir. Genelde daha yüksek hız ve aynı zamanda dinamik yük altındaki şartlarda gerçekleşen çatlak ilerlemesinde gerçekçi sonuçlar vermektedir. Medina ve arkadaşları (2023) çalışmalarında, yüksek hızlarda çalışan makinalara uyum sağlayan tasarımları ile birlikte dinamik yüklerin olumsuz yönlerini düşürerek malzemenin kırılma tokluklarını ölçmüşlerdir.

Çift kiriş ankastre çekme testlerinde çatlağın ilerleme anında malzemenin gösterdiği elastisitesi, çatlak ilerlemesi ve kırılması olarak değerlendirilir. Valvo ve

arkadaşları (2015) yaptığı çalışmalarında, düşük hız altındaki çatlak ilerlemesi doğrusal elastik kırılma mekaniği davranışı ile uygun olması fakat yüksek hıza geldiklerinde oluşan dinamik yüklerden dolayı malzemenin olumsuz etkilendiğini savunmuşlardır.

Chen ve Ifju (2009) yaptıkları çalışmalarda çift kiriş ankastre testi üzerinde biraz değişiklik yaparak çatlak yayılımını incelemişler. Bu çalışmalarında normal çift kiriş ankastre testine göre kırılma tokluğu değerlerinin daha yüksek olduğunu savunmuşlardır. Ray yardımı ile bir mekanizma kullanarak çatlağın ilerlemesini daha hassas takip ederek dinamik yüklerin oluşturduğu hasarların sebep olduğu olumsuzlukları minimize etmişlerdir.

Liu ve arkadaşları (2019), hopkinson çubuk mekanizması gibi ileri seviye olarak kabul edilen test enstrümanları da darbeye maruz kalan çift kiriş ankastre test yönteminde karşımıza çıkmaktadır. Liu ve arkadaşları, elektromanyetik Hopkinson çubuk sistemini kullanmışlardır. Bu çubuk ile yüksek hızlardaki çatlakların ilerlemesi ve çatlakların verdiği tepkileri incelemişlerdir. Sistem sayesinde sürtünmeyi minimize etmeyi başarmışlar. Böylece hassas ölçüm raporları elde etmişlerdir.

Blackman ve arkadaşları (1995), yüksek frekansa sahip yüklerin sebep olduğu ölçüm problemlerini minimize edebilmek için optik yüksek hızı görüntüleme tekniğini ortaya atmışlardır.

Çevresel etkilerin uygulanan testlerin çıktılarına olumsuz etkileri mevcuttur. Zhou ve arkadaşları (2016), nem ve sıcaklık gibi parametrelerin önemli olduklarını belirtmişlerdir. Bu faktörler kompozitlerdeki interlaminar kırılma tokluğu davranışlarını doğrudan etkilediğini ve ciddi seviyede değişiklikleri olduğunu tespit etmişlerdir.

Baillie ve Jenning (2001) yaptığı çalışmalarda, çift kiriş ankastre testlerindeki kompozit malzemelerin kalınlıklarının oluşan çatlaklardaki ilerleme hızına dikkat çekmişlerdir. Kalınlık faktörünün kırılma enerjisinde ciddi etkilerinin olduğunu savunmuşlardır.

Patel ve Sharma (2020) yaptığı çalışmalarında, üzerinde değişiklik yapılan test cihazlarının enerji tüketimine odaklanmıştır. Test cihazının enerji tüketimi ve verimliliği yönünden daha doğru sonuçlara imkan verdiğini gözlemlemişlerdir.

Kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini araştıran diğer bir çalışma da İ.F. Soykök'ün doktora tez çalışmasıdır (Soykök, 2012). Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda cam elyaf ve epoksi kompozit bağlantıların mekanik davranışları ve yük taşıma kapasiteleri incelenmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki reçine matristen kaynaklı hasarların mekanik bağlantıların yük taşımasındaki olumsuz etkiler araştırılmıştır. Düşük sıcaklıklarda ise malzemenin rijitliğinin artması sayesinde mekanik bağlantıların mukavemetinin nispeten daha yüksek olduğunu gösterilmiştir. Diğer yandan mekanik bağlantılarda sıkma torkunun bağlantıda meydana getirdiği etkiler incelenmiştir.

Kompozitlerin maruz kaldığı darbeler ile tepkilerini incelemek amacıyla çift kiriş ankastre testi kullanılarak birçok araştırmacı incelemelerde bulunmuştur. Jones ve Callinan (2003), Mod I ve Mod II kırılmalarını saf yükleme yapılarak çift kiriş ankastre çekme testinde incelemişlerdir. Bu testte karmaşık haldeki yüklemelerin laminantlardaki görülen zararları incelediler. Yapılan çalışmada genel olarak hasar mekanizmalarına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Martin ve Davidson (1999), çift kiriş ankastre testindeki modellemelerin gerçekliğe ne kadar yakın olduğunu ve kırılma enerjilerindeki çalışmalarına odaklanmışlardır. Tabakalarda gerçekleşen çatlakların ilerlemesini incelemişlerdir.

Wang ve Chalkley (2000), kompozitlere darbe uygulanmış yüklerin yoruma davranışları üzerine çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca kırılma ile birlikte yükleme anında meydana gelen frekansların malzemedeki çatlak ilerlemesine odaklanmışlardır. Yapılan bu çalışmada malzemelerin yorulma anındaki tepkilerini gözlemlemişlerdir.

Dillard ve Bucinell (2008), yaptıkları çalışmalarında yapışkan ile birleştirmesi sağlanmış kompozit malzemelerin kırılma tokluklarını incelemişlerdir. Kırılma tokluğunun kompozit malzemedeki tabakaların birbirleri arasındaki çalışma uyumunu incelemişlerdir. Bu çalışmada yapıştırma sürecine yoğunlaşılmıştır. Çalışma sonucuna göre yapıştırma prosesinin malzeme tasarım aşamasındaki önemine değinilmiştir.

Tserpes ve Papanikos (2005), çift kiriş ankastre testini kullanmak yerine bu testi bilgisayar ortamında simule etmişlerdir. Simuleyi yaparken sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada farklı yükleri tercih ederek kompozit malzemedeki tabakaları incelemişlerdir. Bu çalışma nümerik çıktıları ile literatüre katkı sağlamıştır.

Yapılan tüm bu çalışmalarda çift kiriş ankastre testlerinin kompozit malzemelerin mukavemeti ile birlikte çevresel etkiler, farklı yapısal etkiler ve sıcaklıklar malzeme performansını ölçmede önemli bir faktör olduğu anlaşılmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Kompozit Malzemeler

2.1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzemeler, birden çok malzemelerin bir araya getirilerek oluşturulan yeni malzemelerdir. Bu malzemeler, genelde mühendislik uygulamalarında önemlidir. Kompozit malzemelerin ana özellikleri, birbirinden farklı malzemeleri birleştirerek, içinde bulunan malzemelerin sağladığı avantajlı kısımların birlikte kullanılmasına olanak sağlamasıdır. Bunun sonucunda farklı malzemelerin istenilen özellikleri kullanılır ve daha mukavemetli, hafif ve zorlu şartlar altında çalışabilecek şekilde uygun malzemeler üretilebilmektedir.

Kompozit malzemeler genel olarak iki ana bölümden oluşur. Bunlar, matris ve takviye edici lifler olarak adlandırılır. Matris, kompozit malzemelerin ana yapı taşı olarak görülebilir ve takviye edici lifleri bir arada tutmasını sağlayarak, oluşan yeni malzemenin bir bütün olarak çalışmasını sağlamaktadır. Diğer yandan, takviye edici liflerin malzeme içindeki dağılımını düzenleyerek oluşan yeni malzemenin genel hatlarının oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir. Matris malzemeleri genel olarak polimerler, seramikler veya metal malzemelerden oluşmaktadır. Polimer matrisler, örnek vermek gerekirse epoksi reçineleri daha hafif ve daha dayanıklı yanları ile karşımıza çıkmaktadır. Bu özellikler çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Örneğin, otomotiv ve havacılıkta çok büyük avantajlar sağlamaktadır.

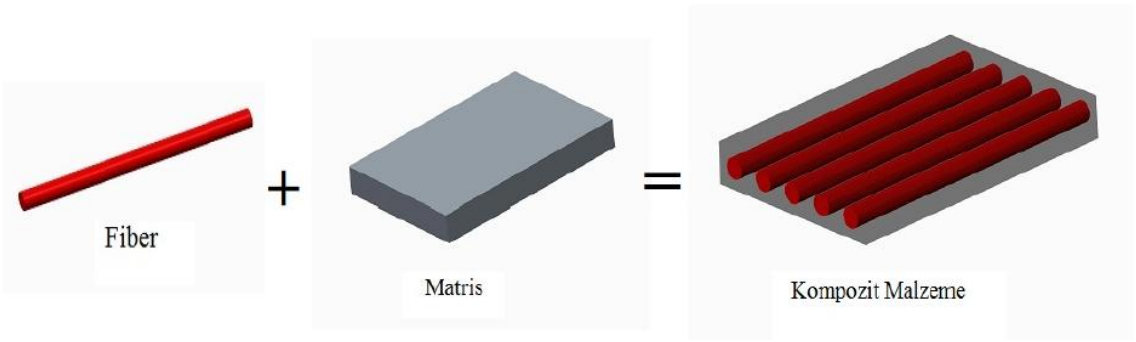
Seramik matrisler ise daha yüksek ısılara ve kimyasal dirençlere karşı oldukça dayanıklı olmaktadır. Cam veya karbon seramik malzemeler, genel olarak çok yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu kompozitler, uzay araçları ya da endüstriyel fırınlar gibi aşırı şartlara maruz kalan alanlarda kullanılmaktadır. Metal matrisler, yüksek mukavemet ve dayanıklılık ihtiyacından dolayı genellikle alüminyum ya da titanyumdan oluşan malzemelerden yapılmaktadır. Metal matris kompozitler, genel olarak ağır yük taşıma gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Takviye lifleri, genel olarak kompozit malzemelerin mekanik yapısını geliştirmek için matris içerisinde yer almaktadır. Bu lifler cam, karbon, aramid gibi

malzemelerden bazen de doğal elyaflardan üretilmektedir. Cam elyaf takviyeleri, uygun maliyetli olup diğer yandan çürümeye karşı daha dirençli yapıları ile öne çıkarlar. Bu sebeple, inşaat ve otomotiv endüstrilerinde genellikle tercih edilmektedir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler ise, daha hafif ve yüksek mukavemetleri ile bilinmektedir. Bu özellikler ile birlikte, spor ekipmanlarından uzay araçlarının yapımına kadar geniş bir uygulama alanı sunar.

Ayrıca, doğal elyaflar da son zamanlarda kompozit malzemelerde karşımıza çıkmaya başlamıştır. Bu kompozit malzemeler, çevre dostu ve yenilenebilir olmaları nedeni ile sürdürülebilirliğe de katkı sağladığından dolayı oldukça sık tercih edilmektedir.

Sonuç olarak, kompozit malzemeler, mühendislik çalışmaları için oldukça önemli bir yere sahiptir ve yapılan yeni tasarımlarda bir devrim niteliğindedir. Farklı malzemeleri birleştirerek, farklı endüstrilerde yüksek mukavemetli, çok daha hafif ve kendine has özelliklere sahip yeni ürünlerin elde edilmesini kolay ve ulaşılabilir hale getirmiştir.



Şekil 2.1 Fiber ve matristen oluşan kompozit yapı Recep İ. (2015)

2.1.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Termal ve Kimyasal Özellikleri

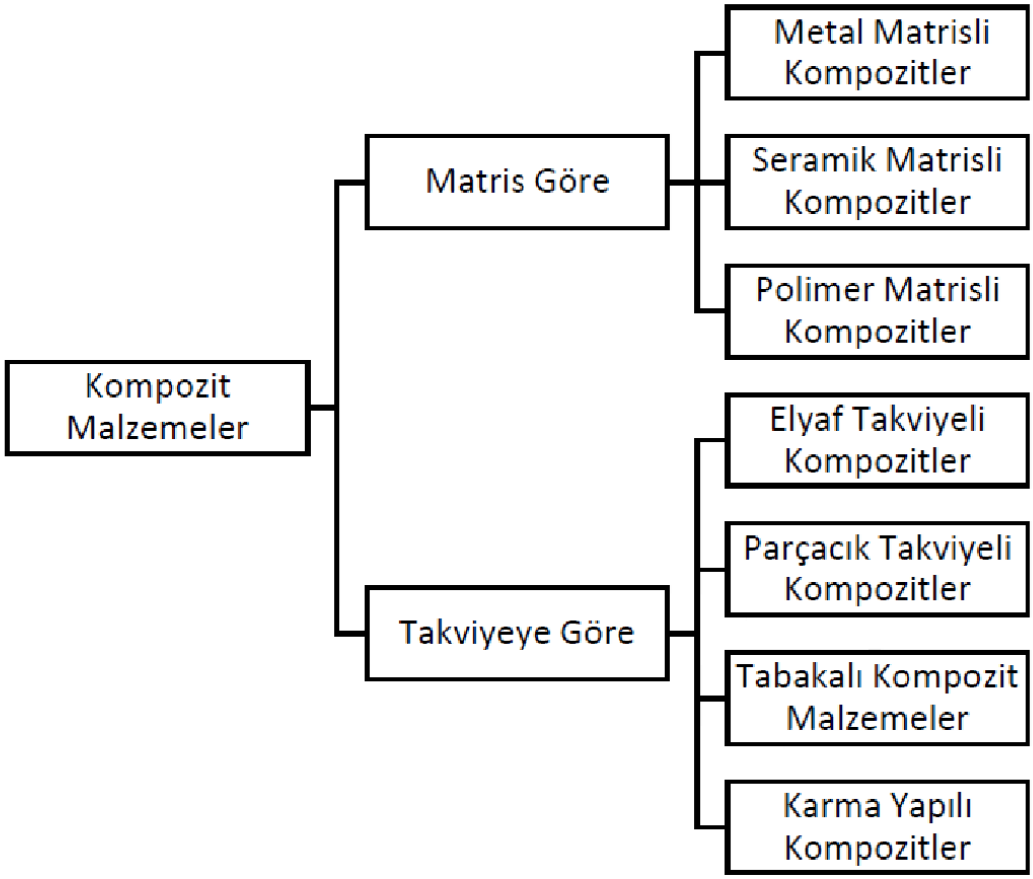
- Mukavemet: Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan elyafların yüksek dayanımlara sahip olmasından dolayı, çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilirler.

- Modülasyon (Elastisite Modülü): Kompozit malzemelerin çok yüksek modülasyon değerleri vardır. Bu sayede malzemenin kuvvetli bir yapısı vardır. Ayrıca deformasyonlara karşı direnci oldukça yüksektir.
- Darbe Dayanımı: Kompozit malzemeler genel olarak yüksek tokluğa sahip yapıdadırlar. Bu sebeple darbe dayanım performansları çok iyidir.
- Yorulma Dayanımı: Kompozit malzemelerin sürekli tekrar eden yükler altındaki performansları iyidir. Bu nedenler yüksek yorulma direncine sahiptirler.
- Kırılma Davranışı: Kompozit malzemeler genellikle sünek yapıdadırlar. Böylece kırılma gerçekleşmeden önce çok fazla deformasyon görmezler ve kırılma dirençleri iyidir.
- Sertlik ve Dayanıklılık: Kompozit malzemeleri ayıran özelliklerden biri de yüksek sertlik ve dayanıma sahip olmalarıdır. Sertlik ve dayanım, takviye elemanının şekline ve boyuna göre değişir.
- Termal İletkenlik: Kompozit malzemelerin ısıl iletkenlik durumu, kompozitin içindeki matris ve takviye elemanının özelliklerine doğrudan bağlıdır. Genellikle, seramik takviyeli olan kompozit malzemelerin yüksek ısı iletkenliği vardır. Seramik takviyeli malzemeler yüksek sıcak altında çalışacak koşullar için tercih edilir.
- Termal Genleşme Katsayısı: Kompozit malzemelerde termal genleşme katsayısı, malzemelerin ısı değişimine nasıl tepki vereceğini belirler. Metal matris yapısına sahip kompozit malzemeler, genelde yüksek sıcaklıklarda boyutsal stabiliteyi korurlar ve düşük bir termal genleşme katsayısına sahip olurlar.
- Kimyasal Dayanıklılık: Kompozitler malzemeler kimyasal ortamlara dayanıklı olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Örnek olarak, cam elyaf takviyeli polimerler çeşitli kimyasallara karşı oldukça dayanıklıdır.
- Termal Kararlılık ve Korozyon Direnci: Kompozit malzemelerin yüksek sıcaklık ve kimyasallara karşı olan direnci iyidir. Fakat, çok uzun süre bu koşularda kaldıklarında termal olarak bozulma ve kimyasal erozyona uğrama riskleri artar.

2.1.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, en az iki farklı türden malzemenin birleştirilmesi ile oluşan ve her malzemenin özelliklerinin birbirleri ile birleştirilmesiyle daha üstün mekanik özellikler sağlayan malzemelerdir. Kompozit malzemelerin ana bileşenleri matrisler ve takviyeler, malzemenin performansını arttırmak için itinayla seçilip birleştirilirler. Kompozit malzemeler içindeki bileşenlere göre sınıflandırılmaktadırlar. Kompozitin sınıflandırılmasında, içerdikleri bileşen türü, yapısal düzeni ve kullanılan matrislerin türleri önemlidir (Campbell, 2010).

Kompozit malzemelerin matris ve takviye tiplerine göre sınıflandırılması Şekil 2.2 de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Kompozit Malzemelerin Türlerine Göre Sınıflandırılması (Campbell, 2010)

2.1.3.1 Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris türlerine göre kompozit malzemeler üç ana başlığa ayrılmıştır. Metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olarak tanımlanır. Tablo 2.1 de metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitlerin özelliklerinin belirtildiği tablo yer almaktadır. Bu tabloda farklı matris yapılarına göre olan kompozitler hakkında genel olarak bilgi verilmiştir.

Tablo 2. 1 Metal, seramik ve polimer matrislerinin özellikleri

Özellikler	**Metal Matrisli Kompozitler (MMC)**	**Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)**	**Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)**
Kullanılan Malzemeler	Magnezyum, alüminyum, titanyum	Alümina, Silikon	Polyester, epoksi
Yoğunluk	Orta	Yüksek	Düşük
Mekanik Dayanımı	Orta-yüksek	Çok yüksek	Orta
Sıcaklık Dayanımı	500°C-1000°C	1500°C den yüksek	150°C-300°C
Darbe Dayanımı	Orta	Düşük	Yüksek
Aşınma Dayanımı	Yüksek	Çok yüksek	Orta
Korozyon Direnci	Orta-yüksek	Yüksek	Yüksek

2.1.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler (MMC)

Metal matris yapısına sahip kompozit malzemeler, takviye malzemesinin metal matris içerisinde bulunan bir kompozit türüdür. Öne çıkan özellikleri arasında, yüksek sıcaklıklara olan dayanımı, yüksek mukavemet sağlaması ve yüksek sertliklere olan direnci ile metal matris yapısına sahip kompozit malzemeler endüstride sıklıkla tercih edilmektedir.

Metal matrisli kompozit malzemelerin en yaygın hali alüminyum matrisli olan kompozitlerdir. Alüminyum matris yapısına sahip kompozit malzemeler, oldukça hafiftirler. Aynı zamanda yüksek dayanımları nedeni ile otomotiv ve havacılıkta yüksek oranda kullanıma sahiptirler. Metal matrisli malzemeler, bahsedilen sektörlerde yakıt tasarrufu sağlarken diğer yandan da yüksek mukavemet sağlamaktadır. Alüminyumun tercih edilme sebeplerinden biri de işlemesi kolay olması ve yüksek çekme mukavemetine sahip bir metal olmasıdır.

Başka önemli nedeni ise magnezyum matrisli olan kompozit malzemelerdir. Magnezyum matrise sahip kompozit malzemeler, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri ile otomotiv ve havacılıkta tercih sebebi olmuştur. Alüminyum malzemelerde olduğu gibi hafiftirler ve bu sebeple yakıt verimliliği sağlarlar. Yapısal bütünlüğü korumada ise oldukça başarılıdırlar. Böylece yüksek performans istenilen çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedirler.

Oldukça önemli bir diğer malzeme ise titanyum matris yapısına sahip kompozit malzemelerdir. Bu malzemeler çok yüksek sıcaklık dayanımı ve üstün mukavemet özellikleri ile havacılık ve uzay alanında en çok kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Ek olarak titanyum matrisli kompozit malzemeler, yüksek korozyon direnci ve hafif yapısı ile en zorlu koşullarda çalışması beklenen parçaların tasarımında kullanılmaktadır.

2.1.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)

Seramik matris yapısına sahip kompozit malzemeler oldukça yüksek performanslı malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklara iyi direnç göstererek mekanik özelliklerini kaybetmedikleri için havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Korozyon ve aşınmalara karşı yüksek mukavemet sağlarlar. Kullanım ömürleri uzundur.

Seramik kompozit malzemeler düşük yoğunlukları nedeni ile yapısal uygulamalarda öne çıkmaktadır. Düşük ağırlıkları, enerji verimliliği açısından çok önemlidirler. Mekanik dayanımları güçlü olmasının yanı sıra yüksek sertliğe sahiptirler.

Kimyasal istikrarları oldukça iyidir. Seramik kompozit malzemeler kimyasal yüklere karşı yüksek dirence sahiptir. Bu özelliği sayesinde zorlu ortamlarda çalışabilmektedirler. Düşük termal genleşme katsayısı sayesinde yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda ve ani sıcaklık değişimlerine karşı tercih edilirler. Ek olarak çok iyi bir elektrik yalıtımı sağladıkları için elektronik çalışmalarda ve yüksek gerilim sistemlerinde kullanılarak öne çıkmaktadır.

2.1.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)

Polimer matris yapısına sahip kompozit malzemeler, polimer matris ve takviye malzemesinin birleşimini içermektedir. Polimer matrisli kompozitler, genel olarak, polyester, polietilen ya da epoksi gibi farklı türde polimer malzemelerden oluşmaktadır. Takviye malzemeleri ise karbon, cam veya aramid elyaflarından oluşan yüksek mukavemetli malzemelerden tercih edilir. Oluşan yeni yapı hafif ve mukavemetli bir malzeme ortaya çıkarır.

Polimer matris yapısına sahip kompozit malzemelerin en önemli yanlarından biri düşük yoğunlukta yüksek mekanik özellikler sağlarlar. Diğer matris yapılarında olduğu gibi havacılık ve otomotiv endüstrisi bu kompozit malzemeleri tercih ederler. Zorlu çalışma şartlarında korozyon dayanımı ve hafiflikleri öne çıkan en önemli özellikleridir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin tercih edilme sebeplerinden biri de zor tasarımlarda esneklik sağlamasıdır. Bu malzemeler kullanılırken matris ve elyaf yapısı farklılaştırılarak istenilen mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Örnek vermek gerekirse, daha yüksek mukavemet ya da daha yüksek esneklik istenildiği takdirde farklı elyaf ve matris kombinasyonları oluşturulabilir. Üretim süreçleri de farklı olduğundan dolayı hem daha küçük hem de büyük boyutlardaki uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlar.

2.1.3.2 Takviye Türlerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Takviye türlerine göre kompozit malzemeler dört ana başlığa ayrılmıştır. Elyaf takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozit malzemeler ve karma yapılı kompozitler olarak tanımlanır. Tablo 2.2 de takviye türlerine göre kompozit malzemelerin genel özellikleri belirtilmiştir.

Tablo 2. 2 Takviye türlerine göre kompozit malzemelerin özellikleri

Özellikler	**Elyaf Takviyeli Kompozitler**	**Parçacık Takviyeli Kompozitler**	**Tabakalı Kompozitler**	**Karma Yapılı Kompozitler**
Yoğunluk	Düşük	Orta	Orta-yüksek	Düşük
Mekanik Dayanım	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Dayanımı	300°C-600°C	250°C-500°C	Yüksek	Yüksek
Darbe Dayanımı	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek
Aşınma Dayanımı	Yüksek	Orta-yüksek	Orta-yüksek	Yüksek
Korozyon Direnci	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek

2.1.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler önemli bir yapısal malzeme olarak bilinirler. Genel özelliklerinin başında önemli bir yapısal malzeme olarak gelirler. Yüksek mukavemetli yapıya sahip fiberlerin metal, seramik ve polimer matrisle birleştirilmesi ile ortaya çıkarlar. Lifler karbon, cam, doğal lifler veya aramid gibi malzemelerden yapılmaktadırlar. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler malzemenin mekanik özelliklerine olumlu etkilere sahiptirler. En önemli avantajlarından biri, düşük ağırlıklarda çok yüksek sertlik ve dayanım göstermeleridir. Bu nedenle birçok alanda kullanılarak tercih sebebi olmaktadırlar.

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yapısı matris ve fiber arasında oluşan güçlü bağlar ile sağlamlaşır. Matris, lifleri olması gereken yerde kalmasına yardımcı olurken dış etkenlere karşı da koruyucu görevini üstlenir. Bu durumda, kompozit malzemelerin mukavemetlerini arttırlar. Fiberler ise mekanik stresin minimize edilmesinde ve yapısal istikrarın oluşmasında çok önemlidirler. Zorlu çevre koşullarında çalışabilmeleri için oldukça düşük ısı iletkenliği ve korozyona karşı olan dayanımı ile öne çıkarlar. Bütün bu özellikleri ise uzun ömürlü olmalarına olanak sağlarlar.

Fiber kompozitler farklı üretim yöntemleri ile üretilmektedirler. Farklı üretim yöntemlerinin olması, birbirinden farklı endüstrilerde kullanılmasına neden olmuştur.

2.1.3.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler önemli bir yapısal malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu malzemeler genel olarak bir matrisin küçük parçaların bir araya getirilmesi ile meydana gelir. Matris malzeme olarak metal, seramik ya da polimer malzemeler kullanılır. Takviye parçacıkları için ise metal, seramik veya cam gibi farklı malzemeler seçilmektedir. Parçacık takviyeli kompozitlerin en önemli avantajı, malzemenin mekanik yapısını daha iyi hale getirerek mukavemetli ve hafif yapıların oluşmasını desteklerler. Diğer yapılarda olduğu gibi havacılık ve otomotiv endüstrisinde tercih sebebidir.

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, parçacıkların matris içine homojen bir şekilde dağılarak sağlam bir yapı ortaya çıkmasına yardımcı olurlar. Bu homojen dağılım, malzemenin yük kapasitesini ve mukavemetini arttırarak sağlam yapılar oluştururlar. Bu malzemelerin aşınma direnci ve korozyon dayanımı oldukça iyidir.

Üretim süreçlerinde ise farklı yöntemlerde rahatlıkla kullanılabilmektedir. Bu da üretim esnekliği sağlar ve özel tasarımlarda yardımcı olurlar.

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler hafif yapıları ve yüksek dayanımları ile oldukça önemlidir ve yenilikçi mühendislik çözümlerinde kullanılırlar.

2.1.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, birbirinden farklı katmanların birbirleri üzerine getirilmesi ile oluşan ve fark türdeki malzemelerden oluşan yapısal bir malzeme türüdür. Genel olarak bir matris ve takviye katmanlarından oluşmaktadır. Hafif bir yapıya ve yüksek mukavemete sahiptirler. Bu yapılar, metal, seramik veya polimer matrislerden meydana gelmektedir. Takviye katmanları ise aramid, karbon ya da cam elyaflardan oluşurlar.

Bu takviyeler yüksek mekanik özelliklerin oluşmasını sağlarlar ve çevreden gelecek etkilere karşı dayanım sağlar.

Tabakalı kompozit malzemelerin en önemli avantajı özel uygulamalar için kullanılabilir olmalarıdır. İstenilen mekanik özelliklere göre katmanların kalınlıkları, malzemelerin türleri değiştirilebilir. Bu özelliği sayesinde tercih edilen bir kompozit türü haline gelmiştir ve birçok alanda kullanılarak karşımıza çıkmaktadırlar.
Tabakalı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri farklı şekillerde üretime olanak sağlarlar. Farklı üretim yöntemleri ile, malzemenin çalışma esnasında optimum performansa olanak sağlaması için malzemelerin katmanlar haliyle birleştirilmesi ve işlenebilmesine yardımcı olur. Zorlu çalışma şartlarına dayanabilmeleri için yüksek korozyon dayanımı, aşınma ve ısı dayanımı gibi özellikleri içinde barındırır.

2.1.3.2.4 Karma Yapılı Kompozitler

Karma yapılı kompozit malzemeler, farklı türlerdeki malzemelerin birleştirilmesi ile ortaya çıkan ve birden fazla katmana sahip yapısal malzemelerdir. Karma yapılı kompozit malzemeler, içerisinde kullanılan her malzemenin önemi özelliklerini birleştirerek yüksek çalışma performansı ve dayanıklılık sağlarlar. Genel olarak matris malzemesi olarak metal, seramik ve polimer kullanılır. Takviye katmanlarında ise karbon fiber, cam ya da aramid gibi yüksek dayanımlı malzemeler kullanılmaktadır. Oluşan bu yeni yapıda malzemenin mekanik özelliklerinde olumlu yönde artışlar gözlemlenir.

Karma yapılı kompozit malzemelerin en iyi avantajlarından bir tanesi katmanların istenilene göre uygulanmasına olanak sağlamasıdır. Her katmanın kalınlığı, kullanılan malzemeye göre ve performans beklentilerine göre uyarlanabilir. Bu nedenle esnek uygulama ve esnek tasarımlarda çalışma kolaylığı sağlaması ile diğer malzemelere göre öne çıkmaktadır.

Üretim yöntemi olarak birçok üretim metoduna uygundur. Bu sebeple birçok endüstrinin tercihi halindedir. Diğer yandan karma yapılı kompozit malzemeler, yüksek korozyon, aşınma ve ısı dayanıklılığı sağlayarak zor koşullara karşı yapının uzun ömürlü olmasını destekler.

2.1.4 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Reçineler

Kompozit malzemelerin üretiminde birçok reçine malzemesi kullanılır. Reçineler, kompozit malzemedeki takviye malzemelerini bir arada tutmak için çok önemlidir. Böylece, kompozit malzemenin yüksek mekanik özellik sergilemesine yardımcı olurlar ve dayanımlarını arttırırlar. Tablo 2.3 de kompozit malzemelerde kullanılan reçineler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Tablo 2. 3 Kompozit malzemelerde kullanılan reçinelerin genel özellikleri

Özellikler	Epoksi Reçineler	Polyester Reçineler	Vinil Ester Reçineler	Fenolik Reçineler	Poliüretan Reçineler
Yoğunluk	Orta	Orta	Orta	Orta	Orta
Mekanik Dayanım	Yüksek	Orta	Yüksek	Yüksek	Orta-yüksek
Sıcaklık Dayanımı	120°C-180°C	100°C-130°C	120°C-150°C	150°C - 200°C	100°C-120°C
Darbe Dayanımı	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Aşınma Dayanımı	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Korozyon Direnci	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta	Orta

2.1.4.1 Epoksi Reçineler

Epoksi reçineler iki parçadan oluşan sistemlerdir. Epoksi polimer ve kürleme için gerekli olan bir sertleştirici. Bu iki madde karıştırıldığı zaman kimyasal reaksiyon meydana gelir ve reçine güçlü bir hal alır. Epoksi reçinelerin kürleme süreleri bulunduğu ortamın sıcaklığı ve karışıma göre değişir. Kürleme genelde 24 saat içinde gerçekleşir.

Epoksi reçineler 80 ile 120 MPa'lık bir çekme mukavemeti değer aralığına sahiptir. Ayrıca, 100 ile 160 MPa'lık eğilme mukavemeti vardır. Elastik modülü ise 2-4 GPa aralığındadır. Epoksi reçineler bu değerler ile yüksek darbe dayanımı sayesinde yapısal olarak oldukça sağlamdırlar. Kürleme gerçekleştikten sonra termoset özelliği ile birlikte 150°C'ye kadar dayanırlar.

Epoksi reçinelerin kimyasal dirençleri iyidir. Asit, alkaliler ve solvent gibi kimyasal maddelere karşı dayanımları iyidir. Genelde yüksek performans istenen sektörlerde tercih edilir. Havacılık ve denizcilik gibi sektörlerde sıklıkla kullanılır. Epoksi reçinelerin diğer reçine malzemelerine göre maliyet dezavantajı bulunur. Fakat uzun ömrü ve sağladığı yüksek performans nedeni ile tercih edilmektedir.

2.1.4.2 Polyester Reçineler

Polyester reçineler genellikle plastik endüstrisinde kullanılır. Kompozit malzeme üretiminde oldukça önemlidir. Polyester reçinelerin termoset özellikleri bulunur. Bu nedenle sertleştikten sonra yumuşatılamazlar. Polyester reçine malzemesi oda sıcaklığında katalize edildiği için katı bir yapıdadır. Epoksi reçineler gibi güçlü değillerdir fakat mekanik ve kimyasal dayanım için başka bir alternatif olurlar. Ekonomik olmaları ve üzerinde işleme yapılması kolaydır. Bu sebeple, otomotiv, beyaz eşya gibi sektörlerde kullanılırlar.

Çekme mukavemetleri 40 ile 90 MPa değer aralığındadır. Yapıları hafiftir ve maliyet açısından daha uygundur. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra 80-100°C gibi sıcaklıklarda dayanım gösterebilirler. Fakat, aşındırıcı olan kimyasal maddelere karşı zayıflıkları bulunur. Karbon elyafı ya da cam elyafı ile takviye edilerek mukavemet artışı sağlanır.

2.1.4.3 Vinil Ester Reçineler

Vinil ester reçineleri yüksek performanslı termoset polimerler olarak bilinirler. Epoksi ve polyester reçinelerin özelliklerinin birleşimidirler. Kimyasal dirençleri ve mekanik dayanımları yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı zor endüstrilerde kullanılırlar. Yüksek nem ve korozyona karşı dayanımları yüksektir. Vinil ester reçineleri, polyester reçinelere oranla daha esnek yapıda bulunurlar ve darbe dayanımları daha iyidir.

Vinil ester reçinelerinin çökme mukavemetleri 70 ile 100 MPa değerlerindedir. Eğilme mukavemetleri 120 ile 150 MPa değer aralığındadır. Sıcaklık dayanımları iyidir ve 120°C sıcaklığa kadar dayanım gösterirler. Yüksek kimyasal dirençleri sayesinde asit ve baz gibi maddelere dayanırlar. Bu özellikleri ile koruyucu görevi görmesi gereken işlemlerde kullanılır. Örneğin su arıtma ve petrokimya tesisleri. Vinil ester reçineler, epoksilere göre uygun fakat polyester reçinelere göre yüksek maliyetlidir.

2.1.4.4 Fenolik Reçineler

Fenolik reçine malzemeleri, fenol ve formaldehininlerin polimer hale getirilmesi ile elde edilirler ve termoset bir malzemedir. Yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal direnci ve mekanik özellikleri bulunur. En önemli avantajları yapışma özellikleridir. Bu sebeple birçok endüstri tercih eder. Otomotiv ve havacılıkta tercih edilirler.

Çekme mukavemetleri 50 ile 80 Mpa değer aralığındadır. Eğilme mukavemeti 80 ile 150 MPa aralıklarındadır. Termal dirençleri iyidir. 180 ile 250°C de dayanım gösterirler. Bu sıcaklıklarda yapıları bozulmazlar ve yapısal olarak kararlılıklarını korumaya devam ederler. Elektrik yalıtımı olarak iyidirler. Bu nedenle elektrikli cihazların üretiminde tercih edilirler. Mukavemetleri, cam elyaf gibi takviyelerle arttırılır. Üretim aşaması pahalıdır. Sergiledikleri yüksek performansları sayesinde zor şartlarda çalışacak parçalarda kullanılırlar.

2.1.4.5 Poliüretan Reçineler

Poliüretan reçine malzemeler esneklikleri ve dayanımları ile öne çıkarlar. Bu malzeme, termoplastik ve termoset malzemelerin formundan oluşur. Üretim formüllerine bağlı olarak sertlik ve esneklik özellikleri belirlenir. Yüksek mekanik dayanımları, aşınma direnci ve kimyasal dirence sahiptir. Bu nedenle farklı endüstrilerde karşımıza çıkarlar. Otomotiv, tekstil ve mobilya sektörleri kullanırlar. Yüksek yapışkan özellikleri bulunan poliüretan reçineler birçok yüzeyde etkin bir halde çalışırlar. Genelde kaplama ve astar gibi yüzey koruması gibi işlemlerde

kullanılır. Poliüretan reçinelerin çekme mukavemetleri 20 ile 80 MPa arasındadır. Sıcaklık dayanımları 80-120°C'dir. Ayrıca maliyet avantajı sağlarlar.

2.1.5 Kompozit Malzemelerde Kullanılan Elyaflar

Elyaflar kompozit malzemelerde çok önemli görev üstlenirler. Kompozit malzeme içerisinde takviye malzemesi olarak çalışırlar. Elyaflar, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin arttırılması için destek verirler. Aşağıda yaygın olarak kullanılan elyaf malzemelerinden bahsedilmiştir. Tablo 2.4 de kompozit malzemelerde kullanılan elyafların genel özelliklerinden bahsedilmiştir.

Tablo 2. 4 Kompozit malzemelerde kullanılan elyafların genel özellikleri

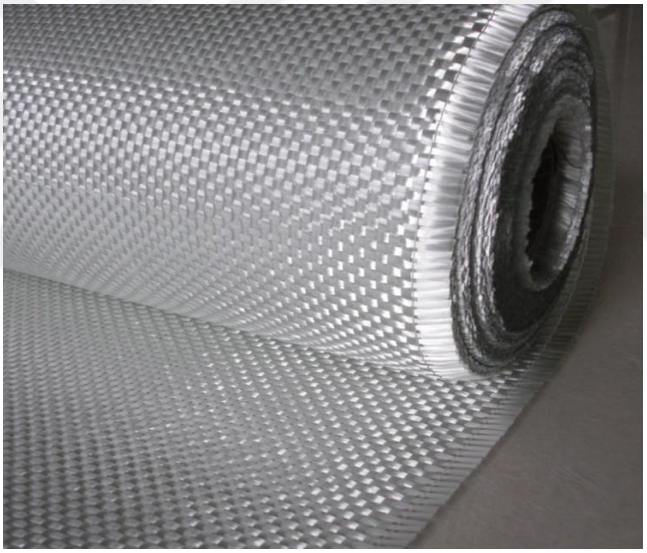
Özellikler	**Cam Elyaf**	**Cam Elyaf**	**Aramid Elyafı**
Yoğunluk	Düşük	Çok düşük	Orta
Mekanik Dayanım	Orta	Yüksek	Yüksek
Sıcaklık Dayanımı	300°C	500°C	200°C-300°C
Darbe Dayanımı	Orta	Yüksek	Yüksek
Aşınma Dayanımı	Orta	Yüksek	Orta
Korozyon Direnci	Yüksek	Yüksek	Orta

2.1.5.1 Cam Elyafı (Glass Fiber)

Cam elyafı, ince halde bulunan cam elyaflarının birleştirilmesi ile meydana gelen yüksek mukavemet, hafiflik ve korozyon dayanımı olan bir malzeme türüdür. Kompozit malzemelerin üretiminde en çok tercih edilen takviye türüdür. Kompozit üretiminde genel olarak epoksi reçineler ile kullanılırlar. Cam elyaflar birçok endüstride kullanılmakta birlikte daha çok otomotiv, havacılık ve denizcilik sektörlerinde kullanıldıkları görülür.

Cam elyafın birçok avantajı bulunmaktadır. Öne çıkan avantajlardan bir tanesi yüksek dayanıklılıkları ile ağır yükleri iyi bir şekilde desteklerler. Çekme mukavemetleri çok iyi performans verir. Ayrıca ısıl iletkenlikleri düşük olmasından kaynaklı ısı yalıtımı sağlarlar. Nem ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdır. Buna bağlı olarak termal direnci oldukça iyidir. Bu sebeple dış mekânda çalışacak parçalarda tercih edilirler. Ayrıca cam elyaflar, düşük yoğunlukları ile hafif bir malzemelerdir.

Cam elyaf tabaka ya da kumaş olarak üretilmektedirler. Tabaka ya da elyaf olarak üretilmesi farklı uygulamalar için değişiklik gösterebilir. Bu noktada üretilecek kompozit malzemenin hangi ortamda ve koşullar altında çalıştığı önemlidir. Hafif olmaları ve yüksek dayanım sağlamaları ile cam elyaflar, yapı malzemelerinde, çeşitli otomotiv parçalarında kullanılırlar. Diğer yandan geri dönüştürülebilir malzeme olmasından kaynaklı çevreye dostudurlar.



Şekil 2.3 Cam Elyafı

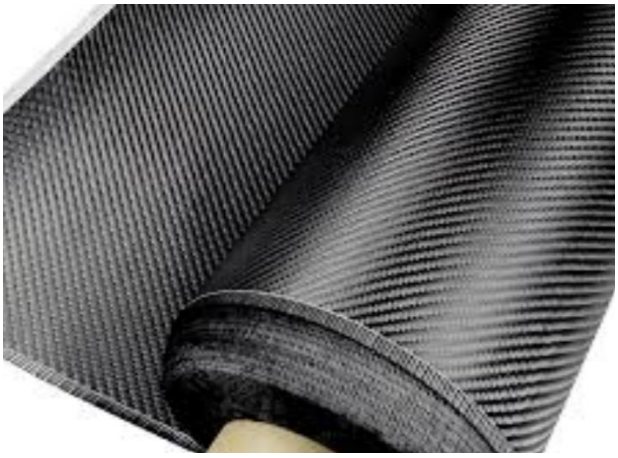
2.1.5.2 Karbon Elyafı (Carbon Fiber)

Karbon elyaflar, hafif yapıları ve yüksek dayanımları ile karşımıza çıkan kompozit malzemelerde sıklıkla tercih edilen takviye malzemeleridir. Genel olarak polyester ve epoksi gibi reçineler ile kompozit malzemelerin üretiminde kullanılırlar. Karbon elyaflar, içinde bulunan karbon atomlarının liflerinin uzun bir şekilde düzenlenmesi ile oluşur. Karbon elyafların bu yapıda üretilmesi, yüksek mekanik özellik sergilemesine katkıda bulunur. Karbon elyaflar, otomotiv ve havacılıkta yüksek oranda kullanılırlar.

Karbon elyaf çok yüksek çekme mukavemeti ve sertliğe sahip bir malzemedir. Normal metal ve plastiklere göre daha fazla dayanıklıdırlar. Ayrıca düşük yoğunluğa sahip olmaları ve hafiflikleri olumlu yanlarından bir tanesidir. Bu da lojistik için çok büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Karbon elyafların ısıl dirençleri ve ısı yalıtımları çok iyidir. Kimyasal dirençleri asit ve organik çözücü maddelere karşı çok yüksek düzeydedir. Karbon elyaflar çoğunluklar kumaş olarak üretilirler. Zaman zaman levha olarak da üretimi tercih edilirler. Ek olarak, çalışma koşullarına göre levha ya da kumaş olarak üretilmesi değişkenlik göstermektedirler.

Karbon elyafları hafif yapısından dolayı çoğu endüstriler tercih eder. Bu endüstrilerin başında havacılık ve daha sonra otomotiv gelir. Karbon elyaflar pahalıdırlar fakat yüksek performans sergiledikleri için ve uzun ömürlü olmalarından dolayı tercih sebebi olurlar. Cam elyafta olduğu gibi geri dönüşümü mevcuttur. Böylece çevre dostu bir kompozit malzeme takviyesidir.



Şekil 2.4 Karbon elyafı

2.1.5.3 Aramid Elyafı (Aramid Fiber)

Kompozit malzeme yapımında takviye malzemesi olarak kullanılan aramid elyafı özel bir sentetik yapıya sahip elyaf türüdür. Yüksek mukavemet ve ısı direncine sahiptir. Aramid elyafları poliamid malzemelerden meydana gelir ve hafiftirler. Darbelere karşı olan dayanımı çok iyi koruma sağlar. Zorlu koşullar altındaki çalışma

performansları tercih edilme sebeplerindendir. Bu nedenle, askeri ve havacılıkta sıklıkla kullanılır.

Aramid elyafları yüksek gerilme mukavemeti değerlerine sahip takviye malzemeleridir. Diğer yandan düşük yoğunluklarından dolayı hafif yapılar yapılmasına imkan verir. Aramid elyafların ısıl dirençleri çok iyi olduğundan dolayı itfaiyecilerin kullandığı özel kıyafetlerin üretiminde ya da astronot kıyafetlerinin üretiminde kullanılmaktadır.

Aramid elyafları genelde dokuma olarak üretilmektedir. Araçların fren balataları ya da lastiklerin üretiminde tercih edilirler. Askeriye için de kurşun geçirmez zırhlı araçlarda ya da yeleklerin üretilmesinde kullanılır. Geri dönüşüm açısından cam elyaf ve karbon elyafı gibi çok uygun değildir. Fakat dayanıklı ve yüksek performans sağlamaları nedeniyle tercih edilirler. Ek olarak, maliyeti yüksektir ve pahalı projelerde kullanılır.



Şekil 2. 5 Aramid elyafı

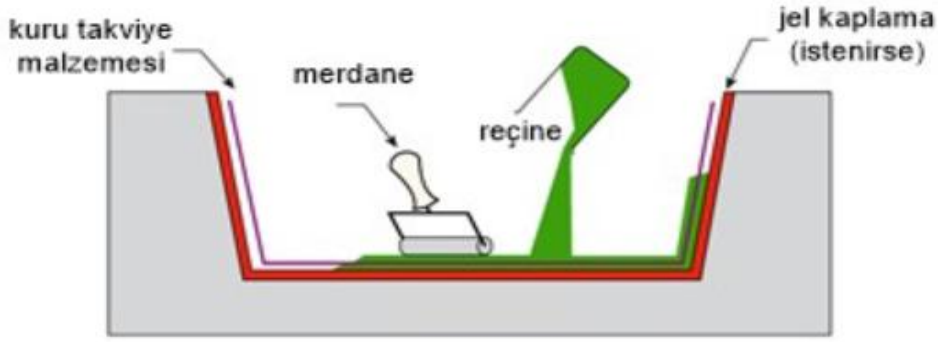
2.1.6 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklere ve forma uygun kompozit malzeme üretimi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Aşağıda üretim yöntemlerinden bazıları anlatılmıştır.

2.1.6.1 Elle Yatırma (Hand Lay-Up) Yöntemi

Kompozit malzemeleri üretmenin en eski ve en kolay yollarından biri elle yatırmadır. Bu teknikle, takviye görevi gören malzeme (cam elyafı, karbon elyafı vs) el ile kalıba yerleştirilir ve elyaf malzeme kalıp üzerine bir fırça ile reçinenin sıvı formu uygulanır. İstenilen kalınlık ve mukavemete göre uygulanan işlem tekrarlanır ve katman sayısı arttırılır. Bu noktada en önemli nokta ise kalıp içindeki bütün katmanların homojen bir şekilde reçine ile kaplanmasıdır. Son olarak kürleme için uygun sıcaklık gereklidir. Genellikle oda sıcaklığında bekletilir.

Elle yatırma tekniği küçük çaplı seri üretimlerde veya özel üretim parçalarda tercih sebebidirler. Bu yöntem ile küçük kayıklar, spor ekipmanları ve araba parçaları üretilebilir. Fakat üretim süresi yavaş olduğundan dolayı büyük çaplı seri üretime uygun bir teknik değildir. En büyük dezavantajı ise üretilen ürün operatörün elinin hassasiyetine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle kalite problemleri ile görülebiliyor. Diğer yandan bu teknikte vakum ve basınç olmadığından kalıp içerisinde küçük hava kabarcıkları kalabiliyor. Böylece malzeme mukavemeti olumsuz etkileniyor.



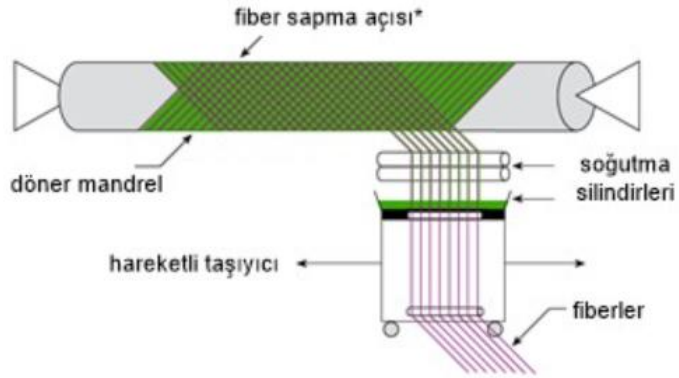
Şekil 2. 6 Elle yatırma yöntemi

2.1.6.2 Elyaf Sarma (Filament Winding) Yöntemi

Elyaf sarma yöntemi, silindirik ya da şeklinde üretilmek istenen kompozit parçaların üretimi için kullanılır. Filament geliştirmede, cam elyaf veya karbon elyaf reçine ile kaplandıktan sonra dönen bir kalıp üzerine düzgün bir şekilde sarılır. Sarılan liflerin sarım açısı ve kalınlığı, ortaya çıkacak ürünün mukavemeti ve mekanik

özellikleri açısından önemlidir. Bu sebeple, çıkan parçalar yüksek mukavemet sunarlar.

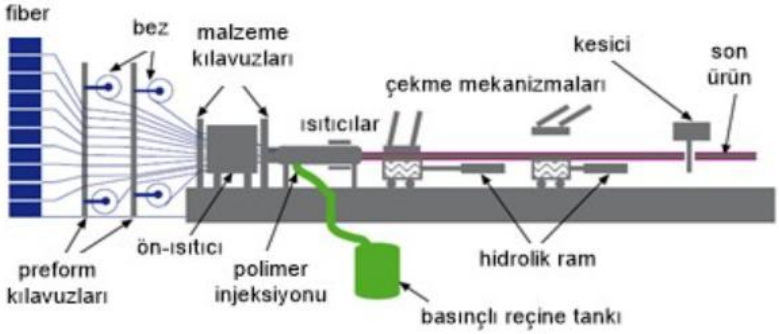
Elyaf sarma işlemi tamamlandıktan sonra parça ısıtılır ve reçinenin düzgün bir şekilde sertleşmesi sağlanır ve kalıptan ayrılır. Bu teknik, havacılıkta ve denizcilikte yaygın olarak kullanılır. Fiber sarma işlemi, diğer tekniklere göre daha hızlıdır ve seri üretime ve uygundur. Fakat bu yöntemin olumsuz yönlerinden biri de sadece simetrik ve yuvarlak şekildeki parçalar için uygun olmasıdır.



Şekil 2. 7 Filament sarma yöntemi

2.1.6.3 Profil Çekme / Pultruzyon (Pultrusion) Yöntemi

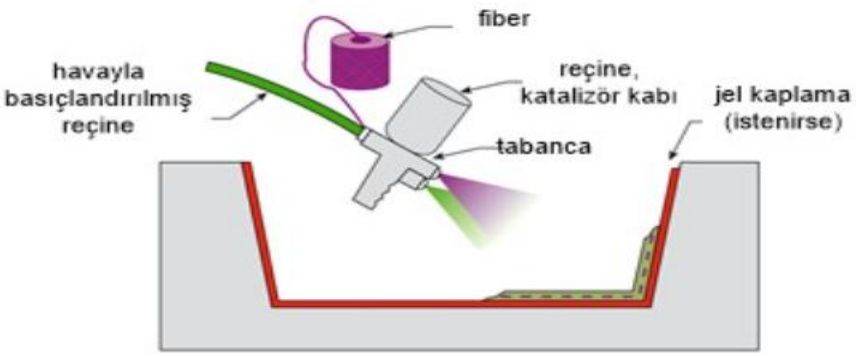
Profil çekme işlemi, kompozit profillerin seri üretiminde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, takviye malzemesi olan elyaflar (cam veya karbon) devamlı bir şekilde reçine banyosundan geçirilir ve güzelce ıslatılır. Sonraki aşamada ise profil şeklini alması için ekstrüde edilir ve malzeme kalıpta sertleştirilerek mukavemetli ve uzun profiller ortaya çıkar. Üretim esnasında kullanılan kalıplar genelde krom kaplı çeliktir. Seri üretime oldukça uygun bir yöntemdir. Bu proses, yüksek dayanıklılık, hafiflik ve korozyon direnci sağlar. Profil çekme, duruş olmadan üretim devamlılığı sağlar ve üretim aşamasında verimliliği arttırır.



Şekil 2. 8 Pultruzyon yöntemi

2.1.6.4 Püskürtme (Spray-up) Yöntemi

Püskürtme yöntemi, fazla yüzey alanına sahip kompozit malzemelerin üretimi için kullanılmaktadır. Üretimi oldukça basittir. Bu teknikte, elyaf ve reçine daha önceden hazırlanır ve püskürtme tabancasına konulur. Kısa şekilde olan cam elyaflar ve reçine malzemesi, püskürtme tabancası yardımıyla kalıba püskürtülerek uygulanarak kalıba eşit bir şekilde dağıtılır. Bu işlem bittikten sonra malzeme sıkıştırılır. Böylece yoğunluk ve mukavemet arttırılır. Püskürtme tekniği, maliyeti ve kolay uygulanması sebebiyle endüstriler tercih ederler. Genelde otomotiv ve denizcilikte kullanılırlar. Ayrıca bu teknik maliyet avantajı sağlar.

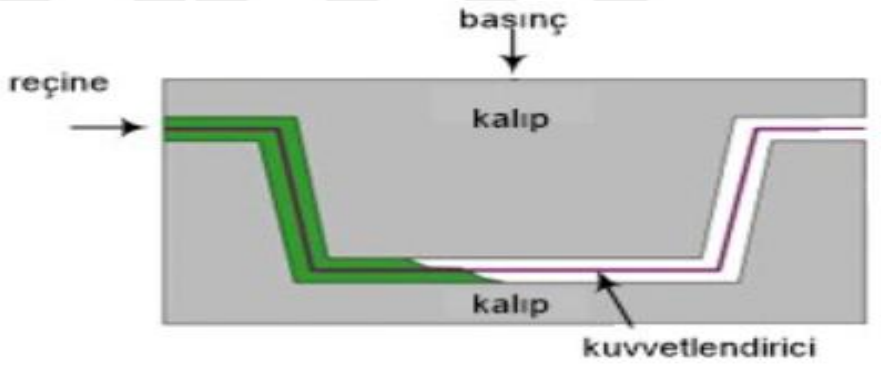


Şekil 2. 9 Püskürtme Yöntemi

2.1.6.5 Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi

Reçine transfer kalıplama tekniği, yaygın bir kompozit malzeme üretme tekniğidir. Kalite, uzun parça ömrü avantaj sağlar. Takviye edici elyaf malzeme olarak cam veya karbon kullanılır. Bu elyaflar kalıba yerleştirildikten sonra basınç ile vakum oluşturularak sıvı formdaki reçine kalıba aktarılır. Reçine kalıba eşit bir şekilde dağıtılır. Daha sonra kalıp yaklaşık 60ºC ye kadar ısıtılır ve kürleme sağlanır.

Reçine transfer kalıplama, otomotiv, havacılık ve denizcilikte kullanılmaktadır. Yüksek mukavemete sahip kompozit parçalar üretilebilir. Üretimi zor olan parçaların üretilebilir. Seri üretime uygun bir yöntemdir ve çok yüksek adetlerde üretim sağlanabilir.



Şekil 2. 10 Reçine transfer kalıplama yöntemi

2.1.6.6 Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC, BMC) Yöntemi

Hazır kalıplama yöntemi yaygın olarak kullanılır. Reçine ve elyaflar ilk önce karıştırılır ve SMC panel şeklinde oluşturulur. BMC ise yoğun bir halde bulunan elyaf reçine karışımı direkt kalıba eklenir. İki tekniğinde kürlenmesi için basınç gereklidir. Otomotiv, yapı malzemeleri gibi sektörler bu yöntemi kullanmaktadırlar. Üretim süresi oldukça hızlıdır ve fire oranı düşüktür. Yüksek mekanik özellik beklenen parçaların üretimi için bu teknik kullanılır. Karmaşık yapıya sahip parçaların üretimi için uygundur.

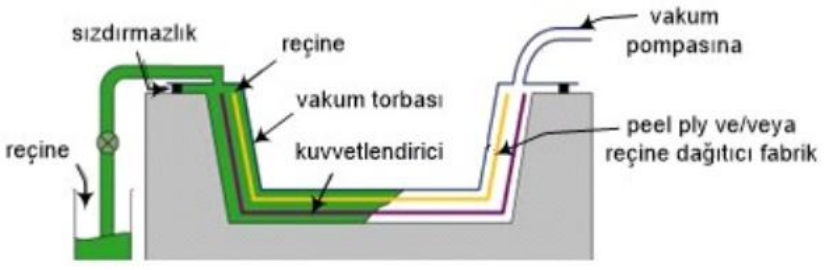
2.1.6.7 Vakum Yapıştırma / Torbalama (Bonding / Vakum Bagging) Yöntemi

Vakumlu yapıştırma/paketleme tekniği kompozit malzeme üretiminde genellikle kullanılmaktadır. Vakumun gücü sayesinde kompozit malzemenin katmanları daha güçlü ve dayanıklı olur. Bu teknikte çoğunlukla karbon fiber ya da cam elyaflar, bir fiber matris ile birleştirildikten sonra kalıplanır. Daha sonra vakum torbası serilerek kalan hava yüksek basınçta vakumlanır. Böylece oluşan kompozit malzeme yüksek mekanik özelliklere sahip olur.

Ağırlık başına düşen mukavemet beklentilerine göre daha çok havacılık, denizcilik gibi önemli alanlarda kullanılır. İşlemi süresi diğer yöntemlere göre uzundur. Fakat çıkan parçanın malzeme özellikleri ve kalitesi oldukça iyidir.

2.1.6.8 Vakum Desteği ile Reçine İnfüzyon Yöntemi

Kompozit malzemelerin üretiminde sıklıkla tercih edilir. Bu yöntemde vakum kullanıldığı için reçine, fiber katmanların arasına homojen bir şekilde dağılım gösterebilmektedir. Bu doğrultuda oluşan malzemede yüksek dayanım gözlenir. İlk önce elyaflar kalıba yerleştirilir. Yerleştirilen elyafların vakum torbası ile üzeri örtülür ve torbanın kenarları kapatılarak hava ile teması kesilir. Vakum ile kalıptaki tüm hava emilir ve havasız bir ortam sağlanır. Vakum yüzünden oluşan negatif basınç ile reçine malzemesi, serilen elyaf katmanlara hücum etmeye başlar. Son aşamada ise kürlenmeye bırakılır. Bu teknikle hafif ve güçlü yapılar üretilebilir. Havacılık ve rüzgâr enerjisi gibi alanlarda kullanılır. Olumsuz yanlarından biri ise işlem süresi uzundur ve seri üretime uygun değildir.



Şekil 2. 11 Reçine infüzyon yöntemi

2.1.7 Kompozit Malzemelerin Kullanıldığı Alanlar

Kompozit malzemeler üstün mekanik özelliklerinden dolayı birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet, hafif yapıları, korozyon dayanımı ve tasarım kolaylığı gibi avantajları ile bu malzemeler, birçok endüstrinin vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

- Otomotiv: Araçları daha hafif üreterek yakıt tasarrufu sağlamak ve daha uzun menzil elde edebilmek için kompozit malzemeler sıklıkla tercih edilir. Araç gövdeleri, panelleri ve çarpışma anında yüksek mukavemet gereken parçalarda kullanılmaktadır. Daha hafif ve dayanıklı malzeme kullanımıyla birlikte hem çevreci hem de ekonomik olarak avantajlara sahiptir.
- Havacılık: Kompozit malzemeler uzay araçları, helikopter ve uçakların yapımında kullanılmaktadır. Genel olarak karbon fiber takviyesine sahip kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve hafif bir yapıya sahip olduğu için sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca kullanılan hafif kompozitler hava araçlarının yakıt tüketiminde, menzil artışında ve yüksek performans sağlamasında çok önemlidir.
- Denizcilik: Denizcilik sektöründe önemli olan su ve neme dayanıklı malzeme kullanımıdır. Bu nedenle gemi ve tekne inşasında kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Genellikle fiberglas malzemeler tercih edilir. Ayrıca fiberglas malzeme kullanımı deniz araçlarının uzun ömürlü ve bakımını daha kolay hale getirmektedir.
- İnşaat ve Yapı: Kompozitler inşaat sektöründe de yüksek mukavemeti, bakım kolaylığı ve esnek yapılarından dolayı tercih sebebi olmaktadırlar. Binaların dış cepheleri, kolon ve kiriş yapıları, tüneller ve köprülerde uzun ömürlü bir yapı malzemesi olarak sıklıkla kullanılırlar.
- Spor: Sporcuların kullanımına uygun, hafif ve dayanıklı ekipmanlar için kompozit malzemeler geçmişten beri tercih sebebi olmuştur. Spor ekipmanlarında kompozit malzeme kullanımı, sporcuların performans artışına ve sakatlanmaların önlenmesine yardımcı olmaktadır.
- Tıp: Ortopedik tedavileri ve protezler başta olmak üzere kompozit malzemeler sıklıkla tıp alanında kullanılır. Diğer yandan, bazı cerrahi aletler kompozit malzemeler ile üretilmektedir.

2.2 Kırılma Mekaniği

2.2.1 Kırılma Mekaniğinin Temeli

Kırılma, herhangi bir malzemenin dışarıdan gelen kuvvetlere ve çevre şartlarının oluşturduğu etkileri de beraberinde getirerek malzemenin dayanabileceği sınırları aşarak bütünlüğünü yitirmesidir. Mühendislikte bu bilime kırılma mekaniği denir. Bu durum mühendislikte ve akademide geniş alanda takip edilerek incelenir. Böylece yapılan tasarımlarda iyileştirme sağlanması amaçlanır. Kırılmalar genel olarak gevrek kırılma ve sünek kırılma olarak kendi içinde ayrılır. İki kırılma tipide ayrı ayrı incelenmektedir. Kısaca özetlemek gerekirse, gevrek kırılma malzemede aniden gelişen kırılma olarak incelenir. Sünek kırılmada ise malzeme aniden kırılmaz fakat kırılma anına kadar önemli bir deformasyon görür. Malzemede deformasyon gerçekleşir ve dayanımın bittiği yerde kırılma gerçekleşir. Kırılmanın türü birkaç etkene göre değişir. Bu etkenler sırasıyla malzeme yapısı, malzemeye uygulanan yüklerin büyüklüğü, çevreden gelen etkiler ve sıcaklık etkisi.

Mühendislikte yapısal tasarımlar kırılma mekaniğine göre şekillenir. Kırılma mukavemetine dikkat ederek yapılan tasarımlar daha güvenli, dayanıklı ve uzun ömürlü parçaların ortaya çıkmasına yardımcı olur. Kırılma mekaniği alanında ortaya bazı teoriler atılmıştır. Bu teoriler, kırılma sürecinin analizi ve tahmininde mühendislere destek olur. Örnek vermek gerekirse, Griffith teorisine göre kırılmalar, mikroskobik çatlak yolu ile ilerlediğini ortaya atmıştır. Bu ilerlemeye bağlı olarak çatlağın çok fazla büyüdüğü noktada malzemenin kırıldığını savunur. Ayrıca, malzemenin çatlak ilerlemesine karşı oluşturduğu direnci tanımlarken kırılma tokluklarını geliştirmektedirler.

Mühendisler tasarım yaparken birçok test ve analiz yaparlar. Bu analizlerden biri de kırık analizidir. Kırık analizi yapılırken birkaç dikkat edilmesi gereken kriterler mevcuttur. Bu kriterlerden biri gerilim yoğunluk faktörüdür (K). Çatlağın çevresinde oluşan gerilimi belirler ve malzemede gerçekleşen kırılmanın hangi şartlarda başladığını tahmin eder. Malzemedeki dayanım sınırı aşıldığında çatlat iyice büyük ve malzemede kırılma gerçekleşir. Ek olarak, malzemedeki çatlak yayılımı ve kırılma mukavemeti hakkında bilgi alabilmek için çatlağın malzeme üzerindeki enerji

yoğunluğu önemlidir. Mühendislikte kırılmanın önemli olduğu nokta ise, malzemenin zaman içinde tekrarlı yükler altında çalışmasına bağlı olarak yorulma kırılmasının gerçekleştiği olayları incelerler.

Mühendislikte sadece tasarımın yapılması yeterli değildir. Yapılan tasarım kadar, tasarımın ileride karşılaşacağı durumlar da önemlidir. Mühendisler yaptıkları tasarımın analizini yapabilmek ve malzemenin çalıştığı ortama göre sergileyeceği davranışı ve bunun sonucunda oluşacak mekanik kırılmayı önlemek için bazı yöntemler kullanmaktadırlar. Bu yöntemlere örnek olarak, sonlu elemanlar analizinden bahsedebiliriz (FEA). Bu analiz yöntemi ile oluşturulan tasarımların ileride malzeme üzerinde doğurabileceği riskler belirlenir ve parça tasarımı bu analize göre şekillenir. Bu analiz yöntemi birçok alanda kullanılır. Kritik noktalarda çalışan parçaların tasarımında güvenli yapıların ortaya çıkmasına destek olurlar.

Özetlemek gerekirse, kırılma mekaniği malzeme biliminde çok önemli bir yer tutar. Tasarımı yapılmış malzemenin dayanıklılığının değerlendirilmesi ve öngörü oluşturulması bunun sonucunda yapılan tasarımların daha güvenli olması açısından çok önemlidir.

2.2.2 Kırılma

Kırılma yukarıda da bahsedildiği gibi iki ana kısımdan oluşur. Bunlar, çatlak ilerlemesi ve çatlağın gerçekleşmesidir. Aşağıda kırılma tipleri olan gevrek kırılma ve sünek kırılma anlatılmıştır.

2.2.2.1 Gevrek Kırılma

Gevrek kırılma, malzemede çok az oluşan plastik deformasyonun aniden kırılmasına denir. Diğer bir deyişle gevrek kırılma durumunda malzeme, dışarıdan gelen yüklerde çok az deformasyona uğraması ya da hiç deformasyona uğramadan birden kırılmanın gerçekleşmesi durumudur. Bu tipte gerçekleşen kırılmalar cam ya da seramik gibi malzemelerde sıklıkla oluşur. Fakat bazı metallerde de gevrek kırılma düşük sıcaklık ya da yüksek hızlarda gözlemlenebilir. Mühendislikte gevrek kırılma

çok istenen bir durum değildir. Çünkü malzeme üzerinde önceden görülebilecek bir işaret olmadan aniden meydana gelir. Böylece ciddi durumlar ile karşılaşılabilir.

Gevrek kırılmayı daha iyi gözlemlemek ve anlayabilmek için malzemenin yapısı ile ilgili analiz ve değişkenler göz önünde bulundurulur. Böylelikle, malzemenin kırılmaya karşı verdiği tepkiyi görebiliriz ve malzeme tasarımı yapılırken yardımcı olur. Endüstriyel yapılarda güvenli ve dayanıklı tasarımların yapılabilmesi için gevrek kırılmayı iyi anlamak gereklidir.
Gevrek kırılmanın bazı özellikleri mevcuttur:

- Ani Kırılma: Gevrek kırılmada malzemeye dışarıdan aniden yükler gelir. Böylece malzemede çok az esneklik olur. Bu durumda çok hızlı bir şekilde kırılma gerçekleşir.
- Düşük Deformasyon: Gevrek kırılmada malzeme üzerinde çok az ya da hiç plastik deformasyon olmaz ve kırılır. Dolayısıyla malzemenin elastik sınırı çok hızlı aşılır.
- Düz ve Parlak Kırılma Yüzeyi: Gevrek kırılma gerçekleştiğinde kırılmanın oluştuğu yüzey pürüzsüz ve parlak haldedir. Kırılmanın yüzeyinde düz çizgiler gözlemlenir.
- Düşük Sıcaklık ve Yüksek Hız Etkisi: Gevrek kırılmada malzeme üzerinde düşük sıcaklık ve yüksek hızın etkisi gözlemlenir.

2.2.2.1.1 Gevrek Kırılma Mekaniği

Malzemede oluşan küçük boyutlardaki çatlaklar hızlı bir şekilde büyüdüklerinde gevrek kırılma oluşur. Bu büyüme ile birlikte malzemedeki elastik enerji serbest kalır ve kırılmanın önü açılır. Griffith kırılma teorisine göre gevrek kırılma oluşumunda çatlağın büyüklüğü malzemenin dayanamayacağı bir noktaya geldiğinde kırılma gerçekleşir.

2.2.2.1.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü (K) ve Kırılma Tokluğu (K_{IC})

Gevrek kırılmada, çatlağın ucundaki gerilme (K) faktörü ile ifade edilir. Malzemenin kırılma tokluğu ise (K_{IC}) faktörü ile ifade edilir. Kırılma tokluğu malzemenin mukavemetini gösterir. Dolayısıyla bu faktörler çok önemlidir ve mühendislikte kullanılır. Malzeme üzerinde oluşan gerilmenin şiddeti malzemenin sahip olduğu kırılma tokluğunu aştığı takdirde çatlağın büyümesi gözlemlenir ve sonunda kırılma gerçekleşir.

2.2.2.1.3 Düşük Sıcaklık Kırılmaları

Bazı malzemeler düşük sıcaklarda daha kırılgan yapıda olabilirler. Örneğin çeliklerde düşük sıcaklıklar altında gevrek kırılmalar meydana gelebilir. Düşük sıcaklıklarda malzemenin sahip olduğu tokluk azaldığı için düşük sıcaklık kırılması olarak isimlendirilirler. Bu sebeple düşük sıcaklık altında çalışacak metallerde özel alaşımlar yapılır.

2.2.2.1.4 Çarpma veya Darbe Kırılmaları

Malzeme dışarıdan bir darbe etkisi altında kaldığı durumlarda da gevrek kırılma olarak tanımlanır. Malzemelerin maruz kaldığı yüksek hızdaki yükler yüzünden elastiklik sınırı çok hızlı bir şekilde aşılır ve malzemede oluşan çatlaklar malzemenin ani bir şekilde kırılmasına sebep olurlar.

2.2.2.1.5 Çatlak Yayılımı ve Enerji Salınımı

Gevrek kırılmada oluşan enerji çatlağın büyüyerek ilerlemesi ile meydana gelir. Oluşan çatlağın enerji yoğunluğu ise malzeme kırıldıktan sonra ortaya çıkan enerjidir. Oluşan bu yoğunluk kritik olan enerji yoğunluğunu (Gc) geçtiği takdirde çatlak büyümesi devamlı hale gelir. Özellikle dinamik ve stres kırıklarında çok önemlidir.

2.2.2.1.6 Gevrek Kırılmanın Önlenmesi

Mühendislikte tasarım aşamasında gevrek kırılmayı önleyebilmek çok önemlidir. Gevrek kırılmayı önleyebilmek için kullanılan yöntemler aşağıda anlatılmıştır.

- Malzeme Seçimi: Kırılmanın gerçekleşmemesi için tasarım sırasında seçilen malzemeler kritik önem taşırlar. Bu nedenle kırılmaya karşı dayanımı yüksek malzemeler tercih edilir. Örneğin yüksek tokluk değerine sahip malzemeler ilk sıralarda gelir.
- Çatlak Tespiti ve İzleme: Malzemede oluşan çatlakların yayılımını düzenli periyotlarda takibinin yapılması çok önemlidir. Düzenli periyotlarda yapılan bakımlar kırılma riskini yüksek düzeyde azaltır.
- Darbe Dayanımı Testleri: Malzeme tasarımı gerçekleştikten sonra yapılan prototipler üzerinde darbe dayanım testleri yapılır. Böylece malzemenin davranışı gözlemlenir ve kırılma riskini düşürmek için yardımcı olur.
- Sonlu Elemanlar Analizi (FEA): Gevrek kırılma riskini önlemede ilk sırada gelirler. Yapılan tasarımların bilgisayar ortamında yapısal analizleri gerçekleşir. Böylece malzemenin kırılma davranışları üretime geçmeden önce gözlemlenebilir. Tasarımların güvenli bir hale gelmesine destek olur.

2.2.2.2 Sünek Kırılma

Malzemeler çok yüksek strese maruz kaldıklarında önce elastik daha sonra plastik deformasyon görürler. Bu süreçlerden sonra sünek kırılma gerçekleşir. Malzemeler ilk önce elastik olarak deforme olmaya başlarlar. Bu durumda, gevşeme gerçekleştiğinde malzeme eski haline dönebilmektedir. Fakat malzeme üzerindeki gerilim artmaya devam ettiğinde akma sınırı aşılır ve bu noktadan sonra plastik deformasyon başlar. Bu aşamada malzemede şekil değişikliği görülmeye başlar ve eski haline geri dönemez. Sünek malzemeler kırılma gerçekleşmeden çok ciddi deformasyona uğrarlar. Deformasyona kaldığı süreçte ise enerji emilir ve absorbe edilir.

Sünek kırılma daha çok metal malzemelerde gözlemlenir. Bu malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde mikro düzeyde çatlaklar oluşur. Oluşan bu çatlaklar yavaşça malzeme içinde yayılım gösterir ve zaman içinde kırılma gerçekleşir. Bu nedenle bu tarz sünek kırılma gerçekleşen malzemelerde ani kırılmalar görülmez. Mühendislikte güvenli ve sağlam yapılar için sünek kırılmaların iyi anlaşılması ve araştırılması önem arz eder. Örneğin, yapısal tasarım sürecinde malzeme yük altında çalışırken yüksek strese maruz kalabilir. Bu durumda aniden bir kırılma istenmez ve sünek kırılma tercih edilir. Böylece malzeme yüke maruz kaldığı durumda sünek kırılma dayanıklılığı arttırmaya yardımcı olur.

Sünek kırılmanın bazı özellikleri mevcuttur:

- Plastik Deformasyon: Malzemede çok ciddi plastik deformasyon görünür. Böylece kırılma önceden fark edilebilir.
- Çatlak Yayılan Enerji: Sünek kırılmada çatlak yayılması anında malzemedeki enerjinin salınım hızı artmaktadır. Bu durumda kırılma gerçekleştiği anda biriken fazla enerjiyi de absorbe eder.
- Darbeye Dayanıklılık: Darbe dirençleri iyidir. Genelde malzemenin sahip olduğu elastik sınırı geçmeden deformasyona uğrarlar.

2.2.2.2.1 Sünek Kırılma Mekaniği

Sünek kırılma, malzeme üzerindeki çatlakların büyüyerek ve oluşan yüklerin artmasıyla gerçekleşir. Sünek kırılmada malzeme yüke maruz kaldığı anda elastik deformasyon görürken, oluşan çatlaklar yavaşça ilerler ve malzemedeki iç enerji ortaya çıkar. Son aşamada malzeme kırılma anına ulaşır ve kırılma gerçekleşir.

2.2.2.2.2 Gerilme Yoğunluk Faktörü (K) ve Kırılma Tokluğu (K_{IC})

Sünek kırılmada, gerilme yoğunluğu (K) ile ifade edilir. Kırılma tokluğu ise K_{IC} dir. Bu faktörler sünek kırılma için çok önemlidir. Kırılma tokluğu basitçe, malzemelerin kırılmalara karşı gösterdiği dirençtir. Sünek yapıya sahip malzemelerin tasarımında büyük önem taşır. Malzemeye uygulanan gerilme kuvveti belirli bir değere

gelene kadar çatlak ilerlemesi görünmez. Eğer belirli bir değerden fazla olduğu anda malzemenin tokluğu aşılır ve kırılma gerçekleşir.

2.2.2.2.3 Sıcaklık Etkisi

Malzemeler maruz kaldığı sıcaklığa göre değişiklik gösterirler. Malzeme yüksek sıcaklık etkisi altında sünek davranışları artar. Bu doğrultuda sıcaklık etkisi plastik deformasyonun gerçekleşmesine yardımcı olur. Bu sebeple tasarım yapılırken malzeme seçimi önemlidir ve sıcaklık faktörüne dikkat edilmesi gerekir.

2.2.2.2.4 Çarpma veya Darbe Kırılmaları

Sünek yapıdaki malzemeler dış kuvvetler etkisinde kaldıklarında elastik sınırlarını aşarlar ve plastik deforme yaşarlar. Bu durumda çatlak ilerlemesi yavaşlar ve malzeme kırılmaya başlamadan önce deformasyon sinyali vermeye başlar.

2.2.2.2.5 Çatlak Yayılımı ve Enerji Salınımı

Sünek malzemelerde, çatlak yayılma hızı malzeme içindeki enerji salınımı ile bağlantılıdır. Malzeme kırılmaya doğru ilerlerken belirli bir enerji seviyesine çıkar. Bu ilerleme ne kadar yavaş olursa çatlak ilerlemesi de yavaşça büyümeye devam eder.

2.2.2.2.6 Sünek Kırılmanın Önlenmesi

Mühendislikte tasarım aşamasında sünek kırılmayı önleyebilmek önemlidir. Sünek kırılmayı önleyebilmek için kullanılan yöntemler aşağıda anlatılmıştır.

- Malzeme Seçimi: Kırılmaya karşı dayanımı yüksek malzemeler tercih edilir. Örneğin yüksek tokluk değerine sahip malzemeler ilk sıralarda gelir.
- Darbe Dayanımı Testleri: Prototip parçalarda darbe dayanım testleri sayesinde malzemenin vereceği tepki gözlemlenebilir. Bu doğrultuda tasarım şekillenir ve daha dayanıklı yapılar ortaya çıkar.

- Çatlak Tespiti ve İzleme: Malzeme üzerindeki çatlak ilerlemelerinin düzenli takibi ile sünek kırılma önlenebilir. Tahribatsız testler ile düzenli periyotlarda malzemede izleme yapılır. Böylece sünek kırılma riski minimize edilir.
- Sonlu Elemanlar Analizi (FEA): Yapısal tasarımlar bilgisayar yardımı ile simüle edilir ve tasarım güvenliği sağlanır.

2.2.3 Kırılma Mekaniği Teorileri

2.2.3.1 Griffith Teorisi

Griffith teorisine göre kırılma mekaniğindeki enerji temelli olan ilk teorik çalışmaları yapmıştır. Griffith teorisini, 1920 yılında bilim dünyasına atmıştır. Teoriye göre, çatlak olan bir malzemede kırılmanın gerçekleşmesi için çatlağın büyüme anında elastik gerilme enerjisi ve yüzey enerjisi denge halinde olmalıdır. Çatlak ilerlemesinin devamını, malzemedeki elastik enerji, yeni yüzeyler oluşturduğunda ve enerjiyi karşılama noktasına gelmesiyle olacağını savunur.

Teori, bir çatlak ilerlemesine sahip malzemenin, çatlağın ilerlemesinin devamı için gerekli olan minimum gerilme kuvvetini belirlemek için kullanılır. Örneğin, gevrek olan cam malzemelerde geçerli olur. Cam malzemede elastik deformasyon dominanttır ve çatlağın ilerlemesi için olan direnç daha azdır. Bu teoriye göre, kırılma sadece çatlağa bağlı değildir. Çatlak ilerlemesi ve büyümesi için belli bir miktar enerjiye ihtiyaç olduğunu savunur.

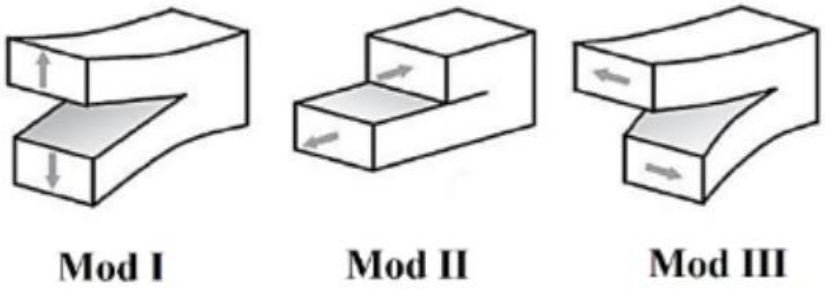
2.2.3.2 Irwin Teorisi

Irwin teorisi, Griffith ortaya attığı enerji yaklaşımını daha da ilerletti ve çatlağın uç kısmındaki gerilimin doğrudan kırılma mukavemeti ile bağdaştırdı. Irwin, malzemenin kırılmaya karşı olan tepkisini daha iyi analiz etmek için (K) faktörünü buldu. Bu faktör ile çatlağın ucunda gerçekleşen gerilme dayanımı ölçülür. Bu faktör kırılma analizi için oldukça önemli bir yere sahiptir. Irwin bu değeri üç modda kullanmıştır. Mod I, mod II ve mod III olarak adlandırılır. Kırılma analizlerinde en çok kullanılan ise Mod I olarak karşımıza çıkar.

Bu teori ile, çatlağın ucunda gerçekleşen gerilimi hesaplamada kullanılmaktadır. Örneğin, sünek malzemelerde plastik deformasyona uğramış malzemelerin kırılmaya karşı olan tepkilerini incelemek için kullanılır. Bu teori ile sünek yapıdaki malzemelere kırılma analizinin mümkün olmasını sağladı. Irwin'in çalışmaları, birçok malzemede mukavemet analizi yapmak için destek vermektedir.

2.2.4 Kırılma Modelleri

Kırılma tokluğu için üç model bulunur. Bunlar, Mod I, Mod II ve Mod III olarak adlandırılır.



Şekil 2. 12 Çatlak ilerleme modları Korkut, S (2017)

2.2.4.1 Çatlak Açılma Tipi / Mod I

Çatlak açılma yani Mod I, çatlakların ucundaki dik yönde açılmasını tarif eden mekanik terim olarak kullanılır. Mühendislikte çeşitli yön ve açılarda çatlakların oluşması farklı mod tiplerine göre adlandırılmaktadırlar. Mod I, çatlak oluşumunun en çok görülen halidir. Tasarımlarda mekanik dayanımların değerlendirilmesi ve mühendislik hesaplarında önemlidir. Bu modda yük altında olan çatlakların ilerlemelerini öngörebilmek için kullanılır.

Bu tarzdaki çatlakların oluşumu malzemedeki mekanik yapıyı direkt etkiler ve malzemenin dayanımında olumsuz etkileri olur. Çatlak açılmasının analizi, malzeme tercihi, üretim şekli ve tasarım anında dikkat edilmelidir. Bu modda çatlak kontrolü, yapılan tasarımlarda dayanıklılık ve güvenlik için önemlidir. Mühendisler malzemelerin Mod I davranışlarını dikkate alırlar.

2.2.4.2 Çatlak Kayma Tipi / Mod II

Çatlak kayma yani Mod II, çatlak açılma durumudur. Oluşan çatlakların uçlarında yatay olarak kayma halidir. Çatlak ucunda devam eden gerilmelere kayma gerilmesi adı verilir. Çatlaklar, iki parçanın kayma hareketi göstermesi ile açılmaya başlarlar.

Mod II çatlakları genel olarak dışarıdaki yüklerin ve içeride oluşan gerilmelerin malzemelere olan davranışları sonucu meydana gelir. Malzemeler yük altında çalıştıklarında, malzeme üzerindeki gerilim çatlak ucunun civarında yoğunluk gösterir ve çatlak kaymasına neden olur.

Bu tipteki çatlaklar genellikle metal veya kompozit yapıdaki malzemelerde gözlemlenir. Mod II çatlak kaymasının incelenmesi malzemelerin seçimi, imalat aşaması, malzeme tasarımı gibi süreçlerde oldukça dikkat edilmelidir. Malzemelerin Mod II davranışları dikkate alınarak yapılan tasarımlarda yapısal güvenlik ve kullanılan malzemenin performans artışı sağlamaktadır.

2.2.4.3 Çatlak Yırtılma Tipi / Mod III

Çatlak yırtılma tipi olan Mod III, malzemede oluşan çatlak ucunun dışa doğru dönerek ve sonrasında kırılarak açılan bir çatlaktır. Çatlak yırtılmasında, dönme halindeki gerilimler çatlak ucunda hareket halindedir. Çatlak, dairesel halde yüzeyde belirir. Mod III, malzemedeki döner çekme kuvvetinin çatlakların oluşumunda önemli bir durumdur.

Mod III de genel olarak bazı malzemelerde gerçekleşen dönme hareketleri sonucu ve gerçekleşen kayma gerilmeleri ile oluşur. Yük altında olan malzemede oluşan gerilimler çatlak ucunda çoğalır ve çatlakların dış tarafa doğru dönme hareketi göstermesine sebep olur. Mod III, karmaşık yapıdaki yük altındaki malzemelerde mukavemeti olumsuz etkilemesi muhtemeldir. Bu sebeple, yapılan tasarımlarda malzemelerin Mod III davranışları dikkat edilmelidir.

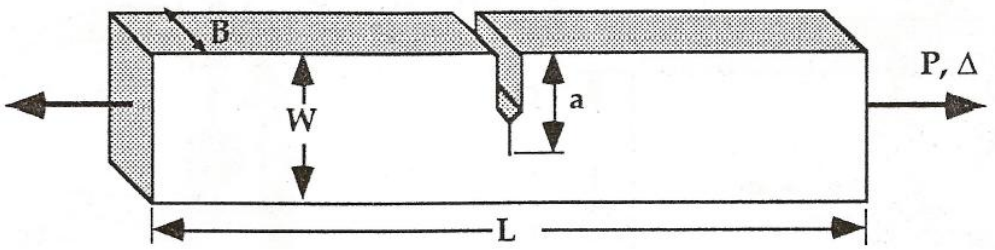
Bu tarz çatlaklar fazla görünmez fakat bazı kompozit malzemelerde görülebilmektedir. Malzemelerin Mod III davranışları dikkate alınarak yapılan tasarımlarda yapısal güvenlik ve kullanılan malzemenin performans artışı sağlamaktadır.

2.2.5 Kırılma Tokluğu Deney Çeşitleri

Malzemelerin kırılma mukavemetlerini gösteren K_{IC} değerinin doğruluğu, çatlak ucunda gerçekleşen gerilmeler ve deformasyonların seviyesinin doğruluğu ile bağlantılıdır. Çatlak ucu, dengesiz bir şekilde büyüyen çatlakların tetiklediği kritik ve önemli bir alandır. Kırılma tokluğu deneyleri uygulanırken numune boyutları önemlidir. Numune boylarının çentik ucunda oluşan çentiğin plastik alanından büyük olması tercih edilir. Böylece plastik bölgedeki gerilimin yoğunluğu önemsenmeyebilir ve düzlemsel olarak deforme gerçekleşir. Numunenin sahip olduğu en, çatlağın uzunluğu ve çentik ucundaki alan numunelerde çok önemlidir.

2.2.5.1 Tek Çentik Kenarlı Çekme Deneyi (SENT)

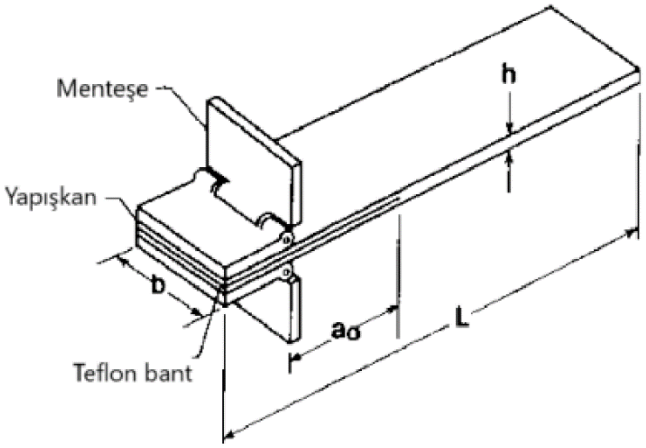
Tek çentik kenarlı çekme deneyi, malzemelerdeki kırılma tokluğunun belirlenmesinde ve çatlağın yayılmasını incelemek için kullanılır. Numunenin bir tarafında çentik bulunur. Numunenin iki tarafından da çekme kuvveti uygulanır. Numuneye uygulanan kuvvetin yarattığı stres ile çentik çevresinde gerilme oluşturur. Oluşan gerilme sonucunda malzemede kırılma gerçekleşir. Malzemelerin mukavemetlerinin doğruluğunun belirlenmesinde ve güvenilirlik açısından önemli bir yöntemdir.



Şekil 2. 13 SENT numunesi, ASTM E 1290-93 (2013)

2.2.5.2 Çift Ankastre Kiriş Deneyi (DCB)

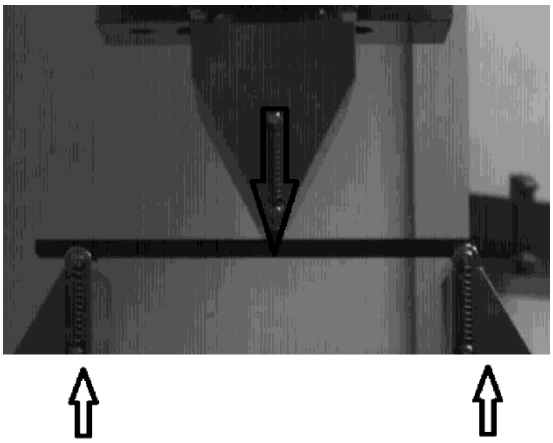
Çift ankastre kiriş testi, malzemelerin Mod I kırılma tokluk değerlerinin belirlenmesi için sıklıkla tercih sebebi olan bir test yöntemidir. Numuneler, çatlak ucundan çekilirler ve çatlağın ilerlemesi ile birlikte açılır. Böylece malzemenin kopma mukavemeti belirlenir. Çift ankastre kiriş testinde kuvvet-deplasman grafiği ile çatlağın yayılma hızı ve enerji salınımın hızını elde edebiliriz. Yapışkan ile birleştirilmiş kompozit malzemelerin mukavemet hesabında önemli bir yer tutar.



Şekil 2. 14 DCB numunesi, ASTM D 5528-01 (2013)

2.2.5.3 Üç Nokta Eğme Deneyi (SENB)

Üç nokta eğme deneyi, malzemenin kırılma tokluğunun ölçümünde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu deneyde, çentiğe sahip olan bir numune iki destek tarafından sabitlenir ve numunenin tam ortasından aşağı doğru kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvet numunede stres meydana getirir ve kırılma gerçekleşir. Bu işlem sonucunda ise malzemenin kırılma tokluğu bulunur. Test sonucunda kuvvet-deplasman grafiği elde edilir. Bu test genel olarak sert ve kırılgan malzemeler için kullanılır ve kırılma değerlerinin ölçülmesi açısından önemlidir.



Şekil 2. 15 SENB numunesi, ASTM D 7264 (2015)

2.3 Kompozit Malzemelerin Bağlantı Yöntemleri

2.3.1 Kompozit Bağlantıları Hakkında Genel Bilgiler

Kompozit malzemeler, birbirlerinden farklı malzemelerin bir araya getirilerek ve birleştirilerek yüksek mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip malzemelerdir. Fakat kompozitlerin veriminin arttırılması için uygun şekilde birleştirilmeleri gerekebilir. Birleştirme işlemleri de çok önemlidir. Kompozit malzemelerin birleştirme teknikleri yapılan tasarımı doğrudan etkilemektedir. Birleştirme tekniği ve kalitesine göre malzemelerin mukavemetleri de etkilenir. Bu bağlantıların yapılabilmesi için mühendislerin zaman içinde geliştirdiği birbirinden farklı teknikler vardır. Kompozit malzemelerin bağlanma tekniğinin seçimi malzemenin ömrünü, verimliliğini ve uzun ömürlü olmasına destek verir.

Kompozit malzemelerde birleştirme yöntemi olarak genellikle kullanılan teknikler arasında mekanik bağlantı elemanları ile birleştirme, yapıştırarak birleştirme ve karma (hibrit) bağlantılar olarak karşımıza çıkarlar. Üç tekniğinde kendi içinde farklı özellikleri mevcuttur. Uygulandıkları yere göre avantaj ya da dezavantajları vardır. Örneğin, mekanik bağlantılar ile kompozit malzemeleri daha güçlü bir yapıda birleştirebiliriz. Yapıştırma işlemi ile de kompozitlerin birbiri ile daha homojen bir yapıya sahip olmasına olanak sağlar. Hibrit teknik ile de mekanik bağlantı yöntemi ve yapıştırma yöntemlerinin avantajlarını kullanmaktadır. Hibrit bağlantılar ile hem

dayanıklı hem de esnek yapılar ortaya çıkarır. Bu üç yöntemde kompozit malzemelere göre, malzemenin yapısına göre değişiklik gösterirler.

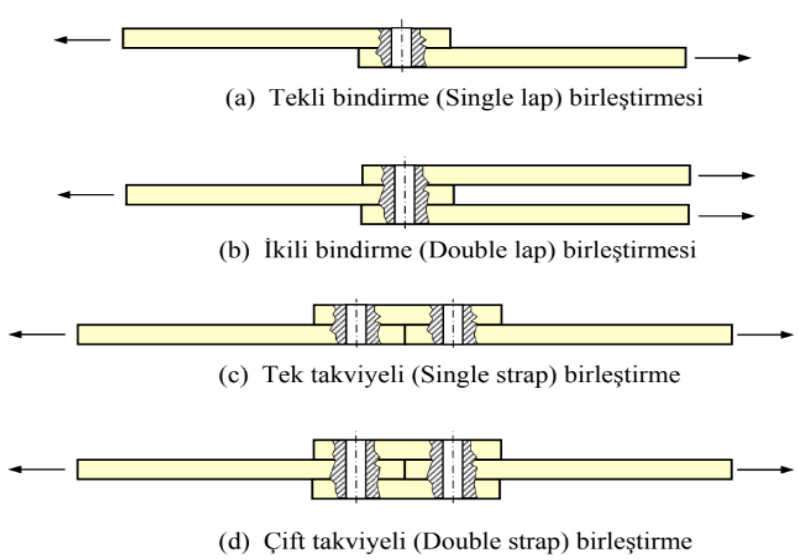
Mekanik bağlantı yöntemi, kompozit malzemelerin genelde vida ve civata gibi bağlantı elemanları ile bağlanmasıyla oluşur. Bu yöntem yüksek mukavemet gereken uygulamalarda tercih edilir. Yapıştırma tekniği ise, güçlü yapıştırıcılar kullanılarak kompozit birleşimi sağlar. Daha esnek yapıların oluşumuna destek verir. Karma bağlantı ise iki yönteminde mekanik ve yapıştırma tekniklerinin eksik kaldığı noktaların iyileştirilmesini sağlar. Bu üç yöntemde mühendislik istemlerine, ortam şartları veya malzemeden beklenen performansa göre değişiklik gösterir.

Bu bölümde, kompozit malzemeler birleştirilirken kullanılan teknikler ve bu tekniklerin özelliklerine yer verilecektir. Bağlantı tiplerinin kompozit malzemelerdeki önemi, sağladığı yararlar, verimlilikleri gibi noktalara değinilecektir. Doğru bağlantı tekniği dayanıklılığı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle tasarım aşamasında seçilen bağlantı yöntemi, kompozit malzemenin iyi performansta ve güvenilir halde çalışmasına sebep olacaktır. Kompozit malzemelerin birleştirme yöntemleri genel olarak üçe ayrılmıştır. Bunlar, mekanik bağlantı yöntemleri, yapıştırarak bağlantı yöntemi ve karma (hibrit) bağlantı yöntemidir. Aşağıda bu üç yöntem incelenmiştir.

2.3.1.1 Mekanik Bağlantı Yöntemi

Mekanik bağlantılar, kompozit malzeme birleşiminde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biridir. Mekanik bağlantı yöntemi ile kompozit malzemeler perçin, vida ya da cıvata gibi mekanik bağlantı elemanları ile bağlantı sağlanır. Bu tip bağlantılar, genelde yüksek mukavemet altında çalışacak kompozit malzemelerde uygulanır. Mekanik bağlantı yöntemi kompozit malzemelerin maruz kaldığı kesme ve çekme mukavemetlerini arttırırlar. Kompozit malzemelerde mekanik bağlantılar yapılırken dikkatli olunmalıdır. Aksi takdirde kompozit malzemenin iç yapısına zarar verilebilir. Örneğin malzeme üzerinde kırılmaların gerçekleşmemesi için perçin ve vida gibi uygulamalarda dikkatli olunmalıdır. Bu sebeple birleştirilecek kompozit yapıların tasarım aşaması ve mühendislik süreci çok kıymetlidir.

Bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Örneğin uzun süren montaj süresi ve işçilik maliyeti. Kompozit malzemelerin yapısına göre uygun bağlantı elemanı seçilmelidir. Örneğin birbirinden farklı yapıda kompozit malzemelerin birleşiminde tercih edilen birleştirmelerde iki kompozit yapısına da uygun bağlantı elemanı seçimi yapılmalıdır. Bu yöntem genelde zor koşullar altında çalışan parçalarda kullanılır. Örneğin büyük endüstriyel yapılar, gemiler, uçaklar örnek olarak gösterilebilir. Mekanik bağlantı noktaları malzemelerin zayıflık sergilediği noktaların başında gelir. Bu nedenle, mekanik bağlantı yöntemi ile birleştirilmiş kompozit malzemelerin düzenli aralıklar ile bakımları yapılmalıdır.



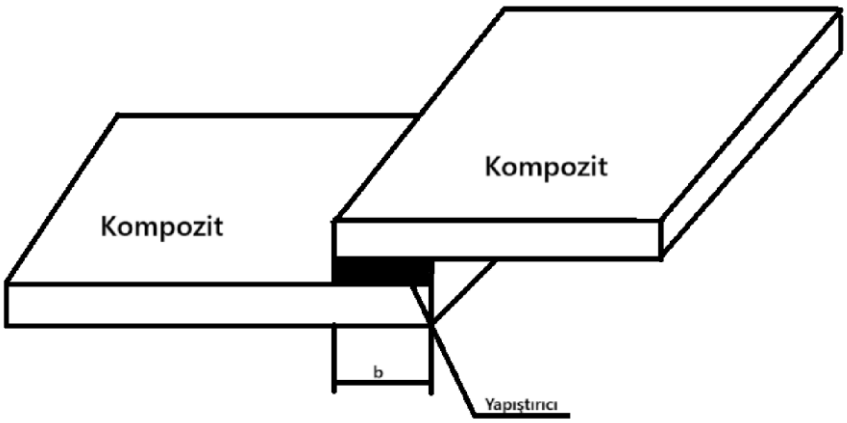
Şekil 2. 16 Mekanik birleştirme yöntemi

2.3.1.2 Yapıştırma Bağlantı Yöntemi

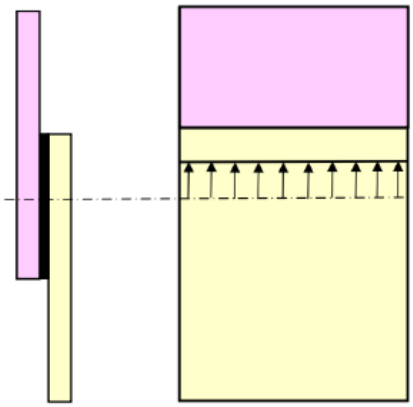
Kompozit malzemelerin bağlantı yöntemlerinden biri de en az iki malzemenin birbirine yapıştırılmasıdır. Yapıştırma tekniği yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kompozit malzemelerin yapıştırılmasında özel yapıştırıcı malzemeler kullanılır. Yapıştırma işlemi yapılırken, kompozit malzemelerin mukavemetini arttırmak için farklı yüzeyleri arasında yapıştırma sağlanır. Böylelikle malzemede minimum seviyede deforme gerçekleşir. Mekanik birleştirme yöntemlerine göre hafif çözümler sunarlar. Yapıştırma yönteminin, mekanik birleştirmeye göre daha düzgün görünümü

vardır. Mekanik bağlantılara göre titreşim çok azdır. Titreşimin az olması sebebiyle ortaya çıkan gerilimde oldukça azdır. Böylelikle kompozit malzeme tasarımlarında tercih sebebi olurlar.

Diğer yandan yapıştırma yönteminde kullanılan yapıştırıcıya göre malzemenin mukavemetinde değişiklikler gözlemlenir. Tasarım aşamasında yapışmayı en optimum seviyeye ve dayanıklılığa çıkarabilmek için bağlayıcı malzemenin mekanik yapısı çok önemlidir. Yapıştırma işlemini gerçekleştirmeden önce yüzey temizliği çok önemlidir. Yüzey temizliği iyi olan kompozit malzemelerin birleşiminde bağlayıcı malzeme homojen olarak parça yüzeyine dağılır. Böylelikle parçada minimum seviyede zayıf nokta oluşur. Böylece yapışma yüzeylerindeki dayanıklılık yüksek olur. Olumsuz yönlerinden bazıları ise çevre koşullarına olan tepkileridir. Örneğin yüksek sıcaklık farklılıkları altında çalışan kompozit malzemelerde zayıflık gözlemlenir. Ani sıcaklık değişimine tepkileri iyi değildir. Fakat doğru yapıştırıcı malzeme tercihi ile bu olumsuzluklar minimize edilebilir.



Şekil 2. 17 Yapıştırma bağlantı yöntemi

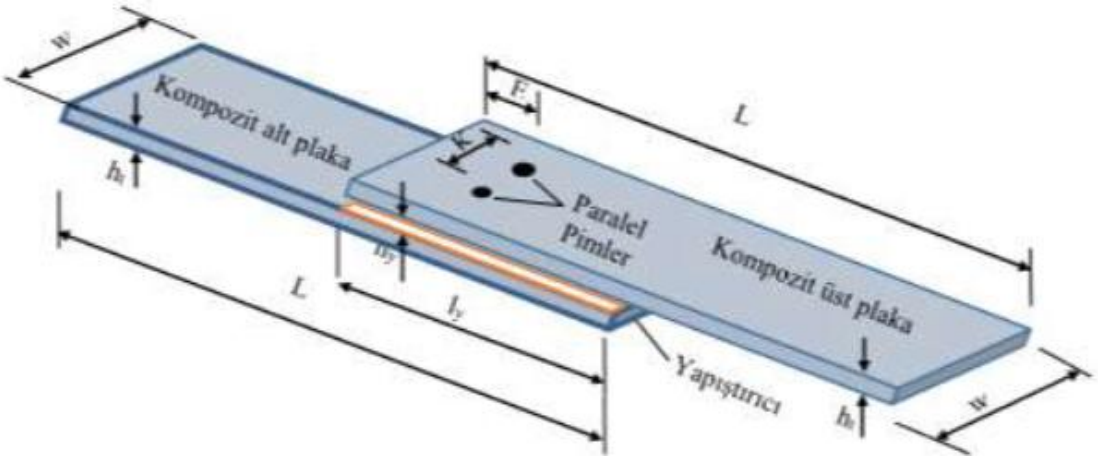


Şekil 2. 18 Yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı (Altan, 2009)

2.3.1.3 Karma (Hibrit) Bağlantı Yöntemi

Karma bağlantı yöntemi kısaca iki yöntemin birleştirilmesi ile ortaya çıkmıştır. Mekanik bağlantı ve yapıştırma yöntemlerinin birleşimidir. Karma bağlantılarla yok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilir. Bu yönteme hibrit birleştirme de denilmektedir. Hibrit birleştirme ile mekanik bağlantı ve yapıştırarak bağlantılarda sağlanan olumlu çıktıları tek bir çatı altında toplanması amaçlanmıştır. Bu bağlantı tipinde yüksek dayanıklılık sağlanırken diğer yandan yapıştırmanın etkisi ile parça üzerindeki esnekliklerinde artması gözlemlenmektir. Hibrit yöntem tercih edildiğinde ilk önce yapıştırılma işlemi gerçekleşir. Yapıştırma işlemi gerçekleştikten sonra mekanik bağlantı yapılmaktadır. Böylece sağlam bir yapıya sahip birleştirilmiş kompozit malzeme ortaya çıkar. Bu yöntemde parça güvenilirliği optimum seviyeye çıkar. Yapıştırıcı malzeme, kompozite gelen yüklerin dağılımını sağlarken mekanik bağlantılar ise parçanın yük taşıma seviyesini arttırır.

Karma yöntemler, Havacılık ve uzay uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Bu alanlarda çok yüksek dayanıklılık gerektirdiği için zor tasarımlarda tercih edilir. Karma yöntemler ile birleştirilmiş kompozit malzemeler çok zor koşullar altında malzemenin dayanım sınırlarını aşmadan güvenilir bir şekilde çalışırlar. Kompleks tasarımların yapılmasına destek olurlar. Karma bağlantı yönteminin olumsuz yönlerinden biri de uzun süren işçiliklerdir. Ayrıca diğer tekil yöntemlere göre maliyeti fazladır. Bu sebeple mühendislik aşamasında bu özelliklerin değerlendirilmesi önemlidir.



Şekil 2. 19 Çift pimli ve yapıştırıcılı karma birleştirme Alyanak ve Şen, (2015)

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1 Test Numunelerinin Hazırlanması, Test Yöntemi ve Uygulanması

3.1.1 Numune Üretimi

Tez çalışmasında kullanılan numunelerin üretim yöntemi olarak vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu yöntem, hafif ve mukavemetli kompozit malzemelerin üretimi için uygun bir yöntemdir. Bu üretim yönteminde, katman katman olan cam elyafı malzemeler reçine ile birleştirilerek homojen bir kompozit malzeme elde edilmiştir. Öncelikle üretilen malzemenin yüzeyinin kalıba yapışmasını önlemek amacıyla ayırıcı film serilir. Serilen film sayesinde üretilen kompozit malzeme kalıptan kolay bir şekilde çıkarılabilir ve malzemenin yüzeyinin bozulmasını engeller.

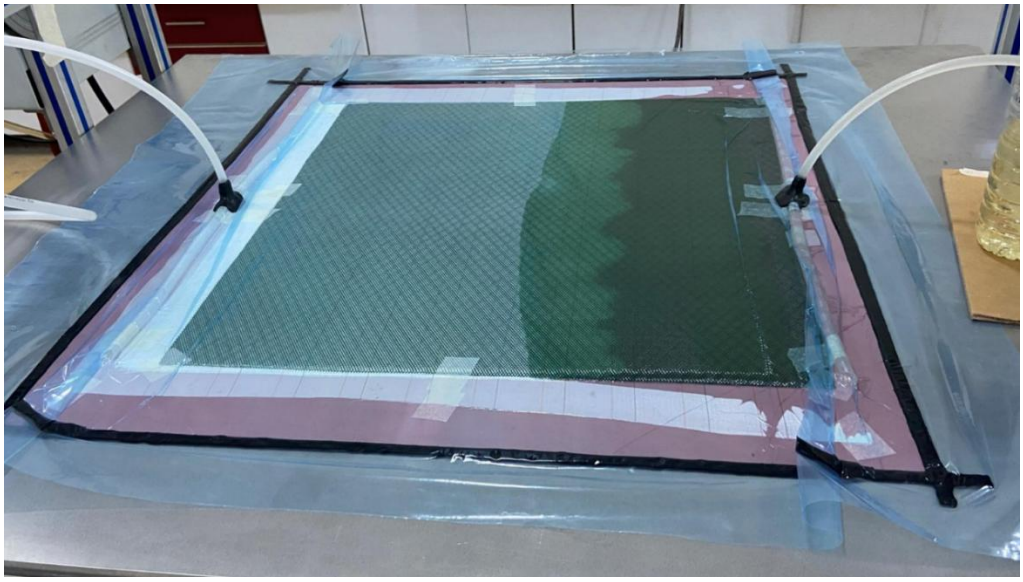
İkinci aşama olarak, boyutu 700x700 mm olan toplamda 12 adet cam elyafı üst üste uygun bir şekilde serilir. 12 adet cam elyaf ile 3 mm kalınlığında kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde cam elyaf tercih edilmesinin sebebi, sağlam ve rijit bir yapı sağlaması için kullanılmıştır. Elyaflar serildikten sonra üzerlerine sıyırma kumaşı konulmuştur. Elyafların üzerine serilen sıyırma kumaşı sayesinde reçinenin, cam elyafının bütün yüzeylerine eşit ve homojen bir halde nüfuz etmesine destek verir. Aynı zamanda kullanılan fazla reçinenin kontrolüne sağlamamıza yardımcı olur. Böylece üretilen kompozit malzemenin düzgün ve kaliteli bir yüzey çıkması sağlanır. Sıyırma kumaşı serildikten sonra üzerine file serilir. Serilen bu file, reçinenin cam elyafı katmanlarına homojen dağılımına destek verir. Tüm bu işlemler homojen malzeme yapısı elde etmek için çok önemlidir ve dikkatlice uygulanmalıdır.

Üçüncü aşama olarak, vakum torbası yerleştirilir. Serilen vakum torbası ısıya dayanıklı olmalıdır. Vakum torbası sayesinde, cam elyaflar ve reçinenin hava ile temasının kesilmesi sağlanır. Bu durum, üretilen kompozit malzemenin kalitesi için çok önemlidir. Vakum torbası serildikten sonra torbanın iki kenarına spiraller yerleştirilir. Yerleştirilen bu spiraller sayesinde reçinenin elyaf katmanlarının her

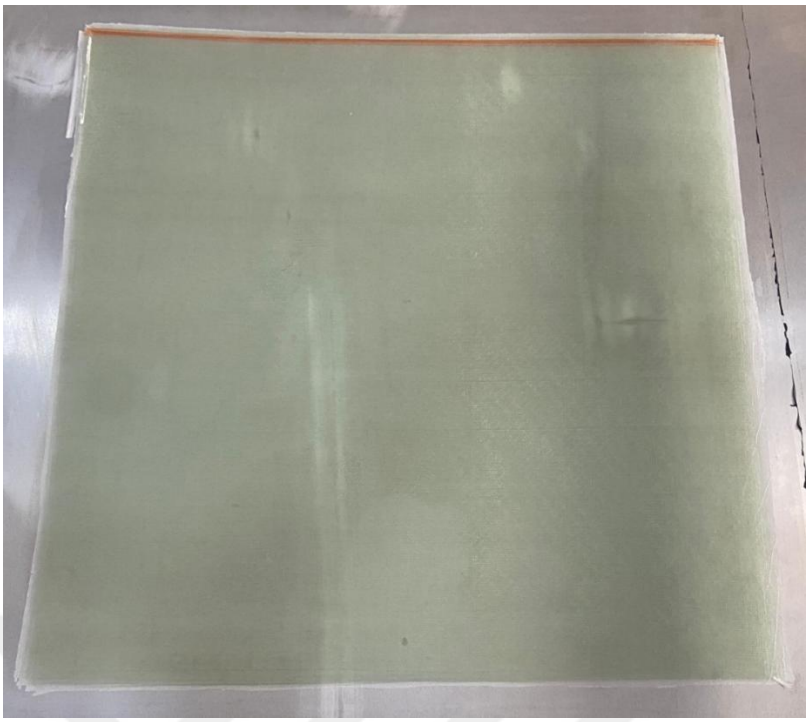
tarafına eşit bir şekilde yayılması sağlanır. Sonrasında vakum pompası desteği ile serilen elyaf ve reçine 0,80 bar basınca maruz bırakılır ve vakumlama işlemi başlar. Öncelikle 30 dakika süren hava kaçak testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sonrasında vakum torbasında hava kalmaması oldukça önemlidir.

Dördüncü işlemde, reçine ve sertleştirici karıştırılır. Yapılan reçine ve sertleştirici karışımının oranı kompozit malzemenin dayanıklılığını doğrudan etkiler. Bu nedenle 1/3 oranında karışım hazırlanmıştır. Bu karışım vakum ile birlikte serilen cam elyaflarına enjekte edilmiştir. Vakumlama işlemi, reçinenin bütün katmanlara ve yüzeylere kolaylıkla ulaşmasını sağlar. Vakum desteği ile cam elyaflara ulaşan reçine malzemesi homojen bir yapı oluşturur. Reçine bütün katman ve yüzeylere ulaştıktan sonra kürleme aşamasına geçilir. Kürleme için malzemeler 60°C ve 4 saat kalıpta bekletilmiştir. Kürleme işlemi, üretilen kompozit malzemenin sertleşmesinin sağlanması ve mukavemeti için çok önemlidir.

Son aşamada kürleme tamamlanır. Vakum torbası uygun bir şekilde malzemeden çıkarılır ve kompozit malzeme kalıptan çıkarılır. Bu üretim yöntemi ile Vakum ile birlikte oluşturulan basıncın, cam elyafları içerisinde hiçbir boşluk kalmaması sağlanır ve mukavemetli malzeme elde edilir. Vakum destekli reçine infüzyon tekniği ile kaliteli ve her yüzeyi eşit numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

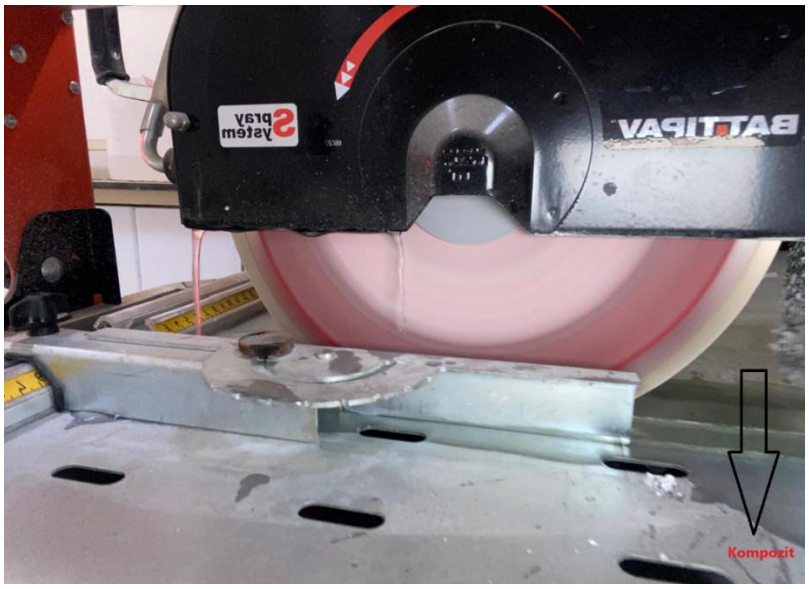


Şekil 3. 1 Vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi



Şekil 3. 2 700x700x3 mm boyutlarında plaka halde üretilmiş kompozit malzeme

Üretilen kompozit malzeme ASTM D5528 (2013) standardındaki numune boyutlarına kesme makinası kullanarak getirilmiştir. Numune boyutları 150x25x3 mm'dir.



Şekil 3. 3 Üretilen kompozit plakanın istenilen boyutlara kesme makinası ile getirilmesi

Üretilen kompozit plakada toplamda 40 adet 150x25x3 mm ölçülerinde kompozit malzeme numunesi elde edilmiştir. Standart test boyutlarına getirilen numunelerin bazıları Şekil 3.4 de gösterilmiştir.

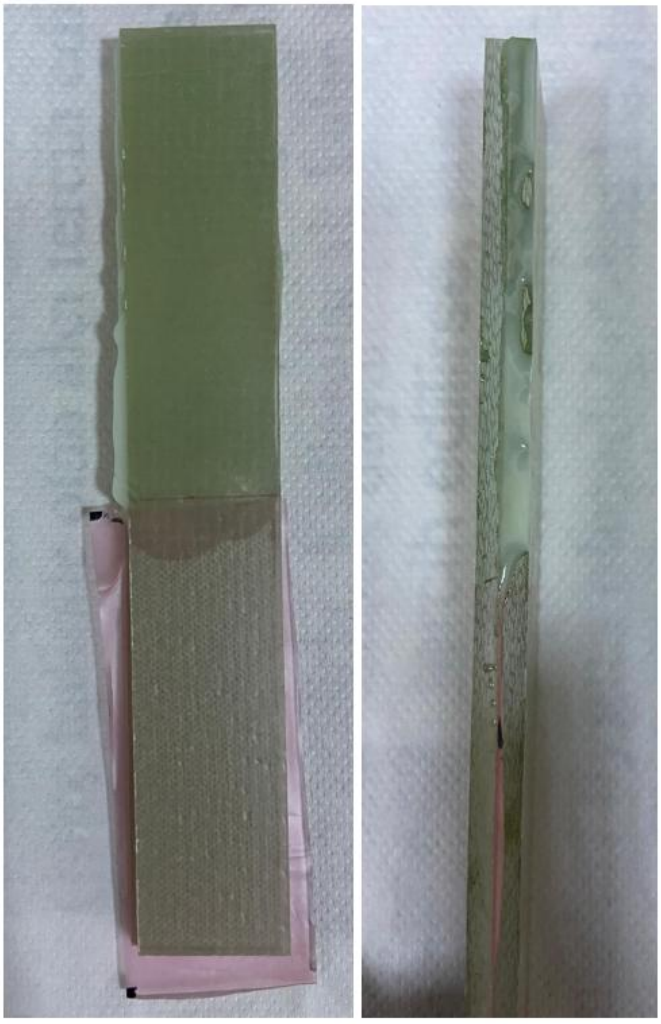


Şekil 3. 4 150x25x3 mm boyutundaki numuneler

ASTM D5528 (2013) standardındaki numune boyutlarına getirilen numuneler düşük hız darbe testi uygulanmadan önce yapıştırma işlemi uygulanmıştır. Yapıştırma işlemi için epoksi yapıştırıcı malzemesi kullanılmıştır. Yapıştırma işlemi gerçekleştirilmeden önce yapışma yüzeyleri düzgün bir şekilde aseton ile temizlenmiştir. Temiz yüzeyin amacı yapıştırma işleminin tüm yüzeylerde eşit ve homojen şekilde olmasını sağlamaktır.



Şekil 3. 5 Epoksi yapıştırıcı



Şekil 3. 6 Epoksi ile yapıştırılmış numune örneği

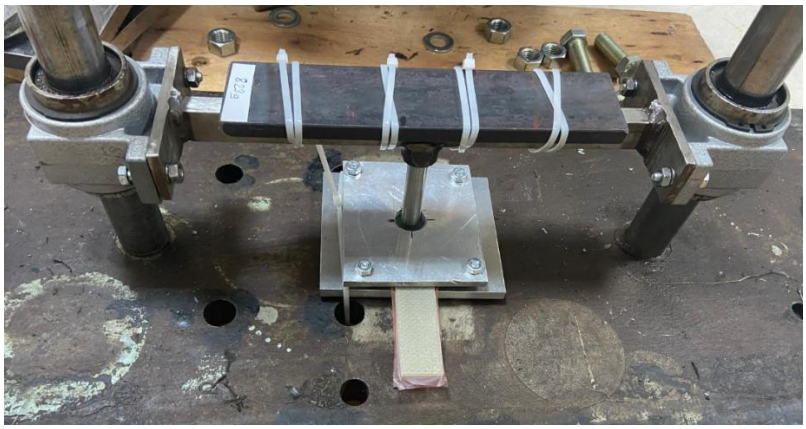
3.1.2 Düşük Hız Darbe Testleri

Bu tez çalışmasında üretilen kompozit malzeme numunelerine düşük hız darbe testi uygulanmıştır. Düşük hız darbe testini kısaca özetlemek gerekirse, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede ve performanslarını ölçmek için kullanılmaktadır. Uygulanan darbe sonrasında malzeme üzerinde meydana gelen hasarları incelemeye olanak sağlar. Düşük hız darbe testi, malzemelere farklı enerjilerde uygulanabilir. Böylece malzemenin farklı enerji seviyelerinde maruz kaldığı darbe ile uygulanan düşük hız testine verdiği tepkiler ölçülebilir. Kompozit malzemelerde düşük hızlarda uygulanan darbeler, yüzeyde çatlama, tabakalarda gerçekleşen delaminasyon veya liflerin kırılması gözlemlenebilir. Malzeme performansı için oldukça önemlidir. Düşük hız darbe testi ile malzemelerin tasarım süreci şekillenebilir. Bu çalışmadaki numunelere, düşük hız darbe testinden sonra çift kiriş ankastre çekme testi uygulanacaktır. Böylece kompozit malzeme numunelerinde daha detaylı bir inceleme yapılarak literatüre ve mühendisliğe katkı sağlanacaktır.

Düşük hız darbe testinin ucu ASTM D5528 (2013) standardına göre özel olarak üretilmiştir.



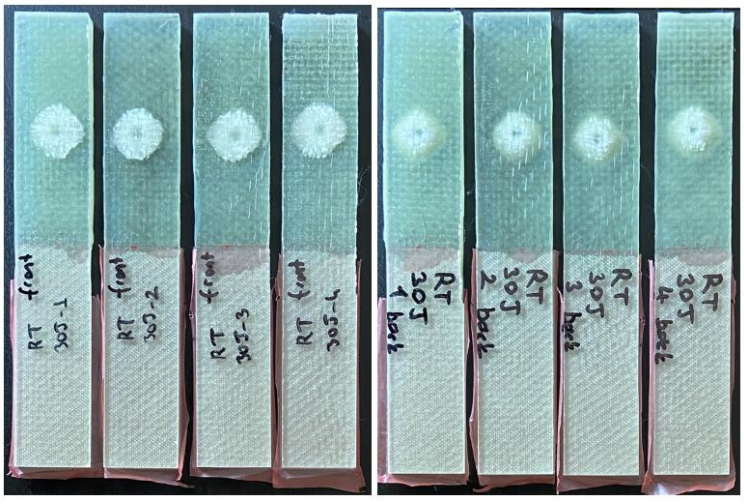
Şekil 3. 7 Düşük hız darbe testinin ucunun torna tezgahında üretimi ve darbe ucu



Şekil 3. 8 Düşük hız darbe testi uygulanması

3.1.2.1 Birinci Numune Grubu

Birinci test grubu olarak dört adet kompozit malzeme numunesine oda sıcaklığı ve 30 joule enerji seviyesinde düşük hız darbe testi uygulanmıştır. Oda sıcaklığında uygulanan darbe ile malzemede gerçekleşebilecek standart koşullara karşı verdiği tepkiler gözlemlenmiştir. Bu test ile malzeme üzerinde enerji absorbe yeteneği ve malzeme yüzeyindeki hasar incelenmiştir. Ortaya çıkan hasarın daha detaylı incelenmesi amacı ile sonraki aşama olan çift kiriş ankastre çekme testi uygulanmıştır. Böylece malzemenin yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3. 9 Oda sıcaklığı ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü

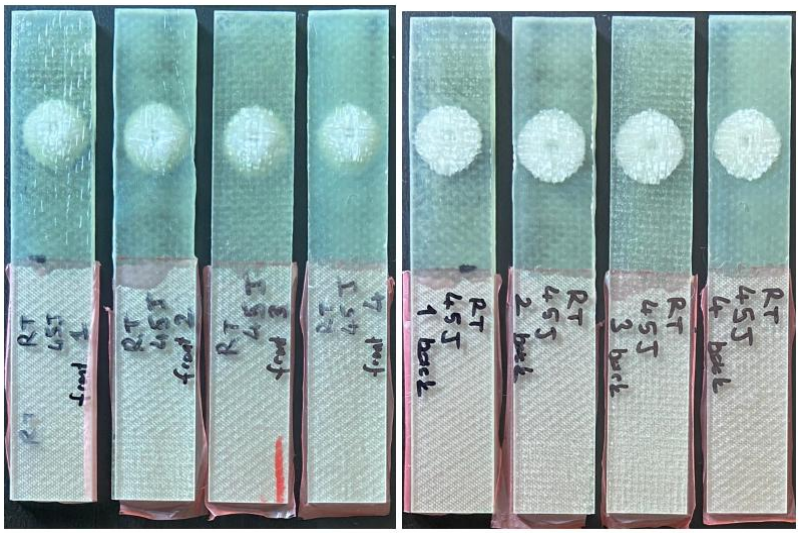
Tablo 3. 1 Oda sıcaklığı ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar

Numune No	Ön Yüzey Uzunluğu (mm)	Ön Yüzey Genişliği (mm)	Arka Yüzey Uzunluğu (mm)	Arka Yüzey Genişliği (mm)
1	18.0	18.3	10.3	11.0
2	17.2	17.5	13.0	13.0
3	18.0	18.8	13.0	11.2
4	18.2	18.6	12.6	12.5

Cam elyaf ve epoksi ile elde edilen kompozitlere oda sıcaklığı ve 30J enerji seviyesinde uygulanan darbelerin, numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşturduğu hasarların birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Arka yüzeyde oluşan hasarlar, ön yüzeye göre daha küçük boyutlarda gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, kompozit malzeme darbe enerjisini emerek enerji dağılımını engellemiştir.

3.1.2.2 İkinci Numune Grubu

İkinci test grubunda dört adet kompozit malzeme numunesine oda sıcaklığı ve 45 joule enerji seviyesinde artış sağlanarak düşük hız darbe testi uygulanmıştır. Artan enerji seviyesi ile kompozit malzemenin daha yüksek mekanik şartlar altındaki tepkisi gözlemlenmiştir. Teste maruz kalan numunelerin kırılma ve tabaka ayrılması incelenmiştir. İkinci test grubu da birinci test grubu gibi çift kiriş ankastre çekme testi uygulanarak malzeme yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3. 10 Oda sıcaklığı ve 45 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü

Tablo 3. 2 Oda sıcaklığı ve 45 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar

Numune No	Ön Yüzey Uzunluğu (mm)	Ön Yüzey Genişliği (mm)	Arka Yüzey Uzunluğu (mm)	Arka Yüzey Genişliği (mm)
1	18.4	17.6	21.1	21.3
2	20.4	18.5	22.1	20.7
3	19	19.2	22	21.8
4	18.2	18	21	20.3

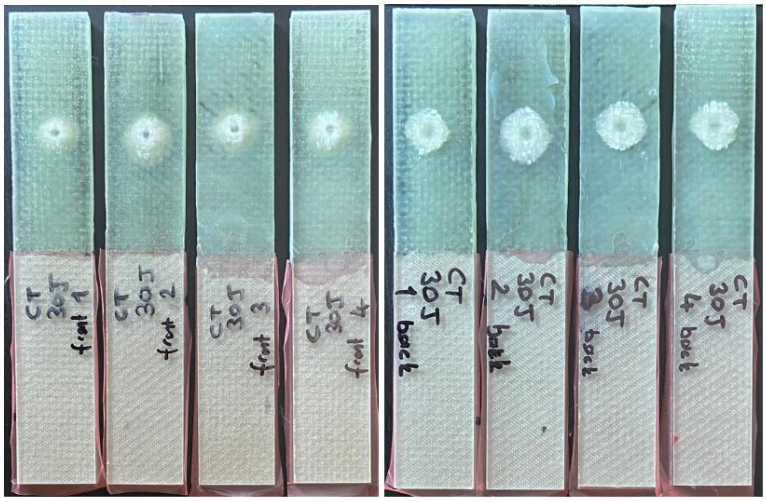
Kompozit numunelere uygulanan darbeler neticesinde ön yüzeylerde gözlemlenen hasarlar daha homojen gerçekleşirken arka yüzeylerde hasar alanları daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, darbenin oluşturduğu enerjinin malzeme tarafından emildiği fakat enerjinin bir kısmını arka yüzeye aktardığını sergilemiştir.

3.1.2.3 Üçüncü Numune Grubu

Üçüncü test grubunda, kompozit malzeme numunelerinin düşük sıcaklık altındaki davranışlarının gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu test grubunda dört adet kompozit malzeme numunesine 0°C ve 30 joule enerji seviyesinde düşük hız darbe testi uygulanmıştır. Düşük sıcaklıklarda malzemenin verdiği tepki gözlemlenmiştir. Malzemede oluşan hasar birinci ve ikinci test grubuna göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelere uygulanan darbe sonucunda meydana gelen kırılmalar ve başka hasarlar, çift kiriş ankastre çekme testi uygulanarak malzeme yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3. 11 0°C ye ulaşmak için kullanılan soğutucu sprey



Şekil 3. 12 0°C ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü

Tablo 3. 3 0°C ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar

Numune No	Ön Yüzey Uzunluğu (mm)	Ön Yüzey Genişliği (mm)	Arka Yüzey Uzunluğu (mm)	Arka Yüzey Genişliği (mm)
1	9.8	9.3	13.5	13.2
2	12	10.7	17.8	16.4
3	9.7	10.1	15.1	16.4
4	11.8	11.3	15.3	16.1

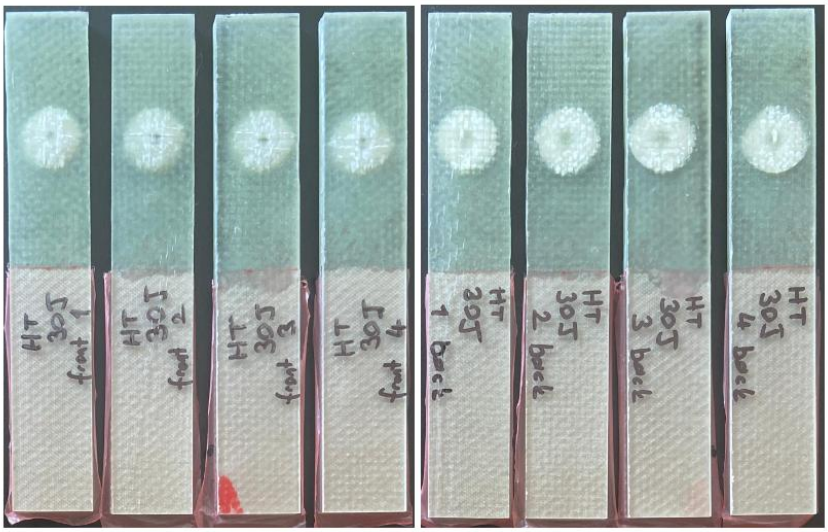
Üçüncü numune grubunda oluşan hasarları incelediğimizde, numunelerin ön yüzeylerinde birbirine yakın ve küçük hasarların oluştuğu gözlemlenmiştir. Arka yüzeylerde gerçekleşen hasarlar ön yüzeylere göre biraz daha fazla oluşmuştur. Sonuç olarak, kompozit malzeme darbe enerjisini güzel bir şekilde emmiştir.

3.1.2.4 Dördüncü Numune Grubu

Dördüncü ve son test grubunda, dört adet kompozit malzeme numunesine 80°C ve 30 joule enerji seviyesinde düşük hız darbe testi uygulanmıştır. Malzemede oluşan hasar diğer test gruplarına göre bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu grupta numunelerin yüksek sıcaklığa karşı vereceği tepkiler incelenmiştir. Yüksek sıcaklık altında malzemenin dayanıklılığına karşı olan etkisi, çift kiriş ankastre çekme testi uygulanarak malzeme yapısı detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 3. 13 80°C ye ulaşmak için kullanılan ısıtıcı cihaz



Şekil 3. 14 80°C ve 30 joule enerji seviyesinde uygulanan darbelerin sırasıyla ön-arka görünümü

Tablo 3. 4 80°C ve 30 Joule enerji seviyesindeki darbelerin numunelerde oluşturduğu hasarlar

Numune No	Ön Yüzey Uzunluğu (mm)	Ön Yüzey Genişliği (mm)	Arka Yüzey Uzunluğu (mm)	Arka Yüzey Genişliği (mm)
1	18	17.2	18.6	19.1
2	18	17.4	19.4	19.1
3	18.2	16.5	20	19.8
4	17.4	17.6	19.9	19.5

Yüksek sıcaklıkta darbe uygulanan kompozit numunelerde ön yüzeylerde, arka yüzeylere göre daha küçük hasarlar meydana gelmiştir. Darbe enerjisi etkin şekilde emilmiş ve oluşan enerjinin çoğunluğu malzemenin arka yüzeyine aktarılmıştır.

3.1.2.5 Beşinci Numune Grubu

Beşinci gruba düşük hız darbe testi uygulanmamıştır. Bu gruba direkt çift kiriş ankastre çekme testi uygulanacaktır. Böylece darbe uygulanmış numuneler ile bir kıyaslama yapma sağlanacaktır. Bütün test gruplarına çift kiriş ankastre testi uygulandıktan sonra her grup birbirleri arasında kıyas olacaktır.



Şekil 3. 15 Darbe uygulanmamış numuneler

Sonuç olarak, düşük hız darbe testlerinden gözlemlenen bulgular sayesinde çift kiriş ankastre testi sonuçları doğrudan etkilenecektir. Gerçekleştirilen bu test sayesinde kompozit malzemelerin, darbe uygulandıktan sonra çekme mukavemetleri ve mekanik davranışlarının incelenmesi sağlanacaktır. Böylece, kompozit malzemelerin mukavemetlerinin geliştirilmesine katkı sağlanacaktır.

Tablo 3. 5 Uygulanan darbe ve sıcaklık koşullarına göre numune grupları

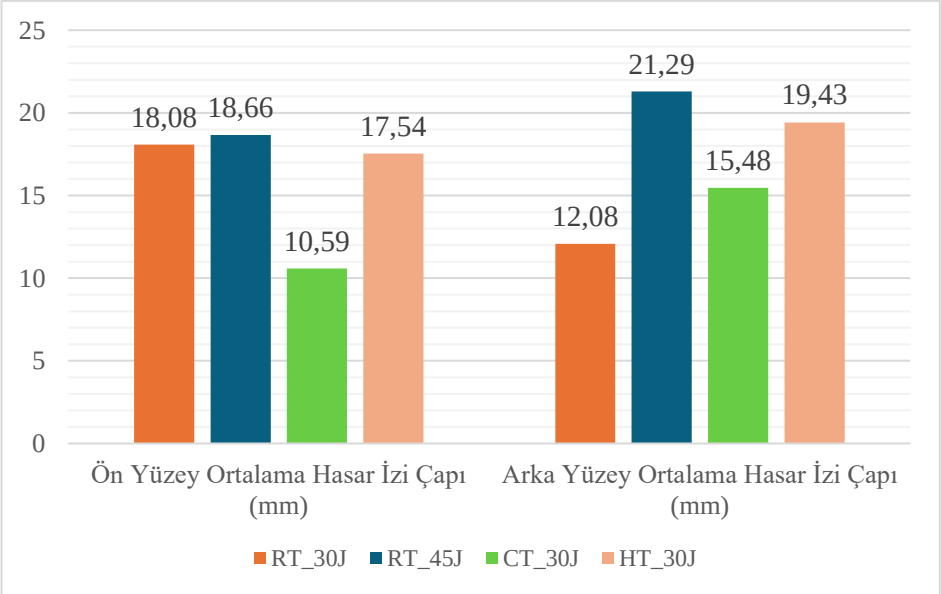
Grup No	Sıcaklık Koşulu (°C)	Darbe Enerjisi (J)	Numune Sayısı
1	25 (Oda Sıcaklığı)	30	4
2	25 (Oda Sıcaklığı)	45	4
3	0	30	4
4	80	30	4
5	Kontrol Grubu (Darbesiz)	0	4

3.1.2.6 Tüm Numune Grupları Ortalama Darbe İz Çapları

Şekil 3.17 de numunelerin çift ankastre kiriş (DCB) testleri uygulanmadan önde farklı sıcaklık koşulları altında maruz bırakıldığı farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşen ağırlık darbe testleri neticesinde kompozit plakalarda darbenin tatbik edildiği ön yüzeyindeki ve arka yüzeydeki yani yapıştırılan kompozit plakalardan darbe anında üstte ve altta kalan üzerindeki ortalama iz çaplarının durumu verilmektedir. Düşük hız darbe etkileri sonucu oluşan bu izler aslında tabakalı kompozit plakaların iç kısımlarında kalınlık boyunca oluşan matris çatlaması ve delaminasyon hasarından kaynaklanmaktadır. Harris ve arkadaşları (2020).

Oda sıcaklığında 30J ve 45J enerji seviyelerinde darbeler uygulanan (sırasıyla RT_30J ve RT_45J) numunelerin ortalama hasar alanları karşılaştırıldığında yüksek enerjili darbe uygulanan numunede üst plakadaki hasarın bu enerji artışına karşılık nispeten hafifçe yükseldiği (%3,2) görülmektedir. Buna karşın, darbe enerjisinin yükselmesi ile alt tabakada meydana gelen hasarın çapının ise oldukça arttığı (%76,2) görülmektedir. Dolayısıyla yüksek enerjili çarpışmada darbe enerjisinin çoğu üst tabakadan alt tabakaya iletilerek deformasyon enerjisine dönüşmektedir.

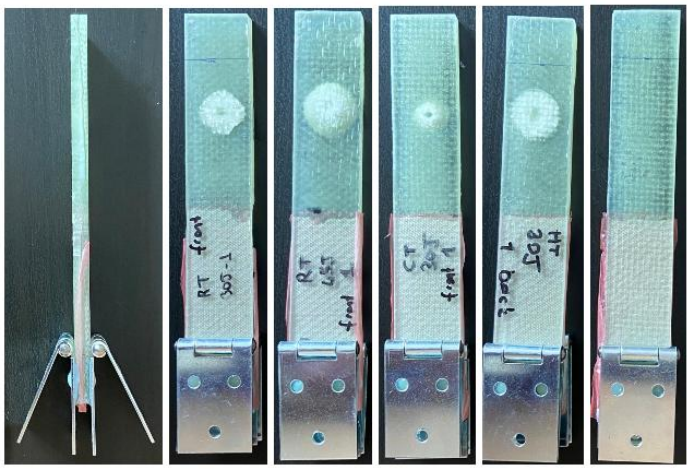
30J enerji seviyesinde özdeş yapıştırmalı bağlantı numunelerine 25ºC (Oda sıcaklığı), 0ºC ve 80 ºC olmak üzere toplam üç farklı sıcaklık kademesinde darbe testleri gerçekleştirilmiş olup bunlar sırasıyla RT_30J, CT_30J ve HT_30J olarak anılmaktadır. Bunlardan düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen darbe olayında numunenin üst tabakasında oluşan hasar iz çapı oda sıcaklığındakine nazaran %41,4 düşerken, alt tabakadaki hasar izi çapı %28,1 artmıştır. Yani genel olarak bakıldığında düşük sıcaklıkta gerçekleştirilen deneydeki darbe enerjisinin deformasyon enerjisine dönüşümü daha düşük mertebededir. Bu durumun düşük sıcaklıklarda epoksi matrisli tabakalı kompozit plakaların darbe etkilerine karşı daha gevrek davranış sergilemelerinden kaynaklandığı söylenebilir. Sreekantha Reddy ve arkadaşları (2019). Diğer yandan, yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen darbe olayında numunenin üst tabakasında oluşan ortalama hasar izi çapı ise oda sıcaklığındakine nazaran sadece %3'lük bir azalma gösterirken, alt tabakadaki hasar izi çapı %60,8 oranında ciddi bir artış sergilemiştir. Her ne kadar Suvarna ve arkadaşları (2014) tarafından tek tabaka üzerine uygulanan darbe testlerinde oda sıcaklığına kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha düşük hasar alanları rapor edilse de bu farklılığın şimdiki çalışmanın birbirine yapıştırılmış iki ayrı plaka üzerinde gerçekleştirilmiş olması ve bu nedenle darbe enerjisinin daha geniş bir alanda hasar enerjisine dönüşebilme imkanı bulabilmesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. 16 RT_30J, RT_45J, CT_30J, HT_30J numunelerine ait ön ve arka yüzey ortalama hasar izi çapları

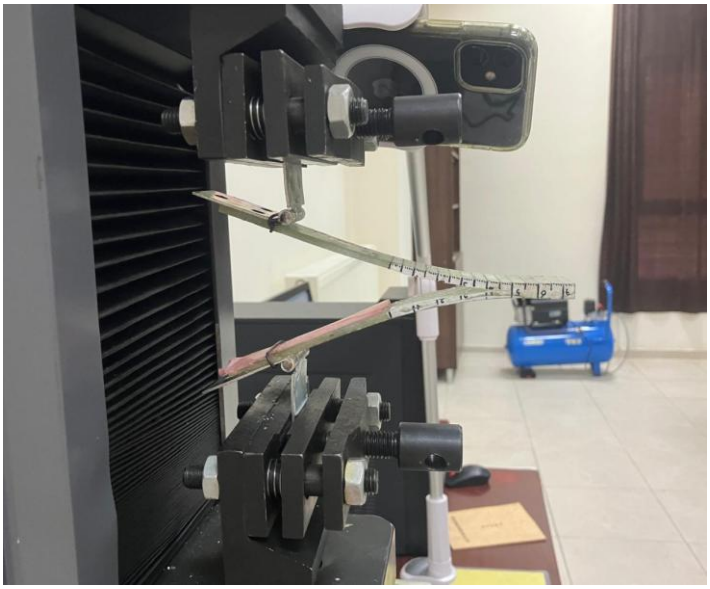
3.1.3 Çift Ankastre Kiriş Çekme Deneyinin Uygulanması (DCB)

Yapıştırılan numuneler çift kiriş ankastre çekme deneyine bağlantısı yapılması için iki tarafına yaprak menteşeler yapıştırılmıştır. Bu deneyde, üretilen kompozit malzemelerin kuvvet-deplasman grafiği elde edilerek mekanik performansları incelenmiştir.



Şekil 3. 17 Darbe türlerine göre sırasıyla test numuneleri ve yaprak menteşeler

Hazırlanan numuneler, 5mm/dk hız ile çekme cihazında test edilmiştir. Test esnasında video kayıt alınarak çatlak ilerlemesi kayıt altına alınmıştır. Tüm testler oda sıcaklığında gerçekleşmiştir.



Şekil 3. 18 Kompozit numune çekme testi

3.1.4 Modifiye Edilmiş Kiriş Teorisi

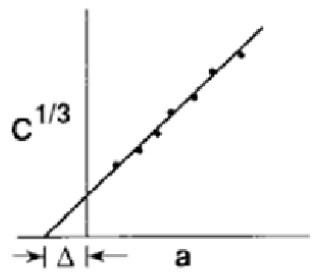
Mükemmel bir şekilde konumlandırılmış bir çift konsol kirişin (Double Cantilever Beam DCB) enerji salınım oranı hesaplama yöntemi aşağıdaki gibidir (Denklem 3.1).

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \tag{3.1}$$

Burada "P" kuvvet (N), "δ" kuvvet uygulama noktası yer değişimi, "b" numune genişliği ve "a" ise çatlak boyudur. Gerçek uygulama şartlarında ise bu ifade enerji salınım oranını "G_I" olması gerekenden fazla tahmin edecektir. Çünkü çatlak ucunda dönme olayı meydana gelmektedir. Bu dönüş olayını hesaba katabilmek için modifiye edilmiş kiriş teorisinde çatlak boyuna |Δ| ilave edilerek "a + |Δ|" şeklinde uygulanır. Burada "|Δ|" deneysel olarak çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olarak Uygunluğun (Compliance "C") küp kökünün en küçük kareler yöntemi ile grafiğini oluşturarak belirlenebilir. Burada Uygunluk "C" kuvvet uygulama noktası yer değiştirmesinin uygulanan kuvvete oranıdır "δ/P". Şekil 3.19 de en küçük kareler yöntemi grafiği örnek olarak verilmiştir.

Bu grafik için doğrusal kısmın yatay çatlak uzunluğu eksenini kestiği noktanın mutlak değeri Denklem 3.2 de yerine konularak modifiye edilmiş kiriş teorisine göre Mod I "modifiye edilmiş enerji salınım oranı" hesaplanmıştır.

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \tag{3.2}$$



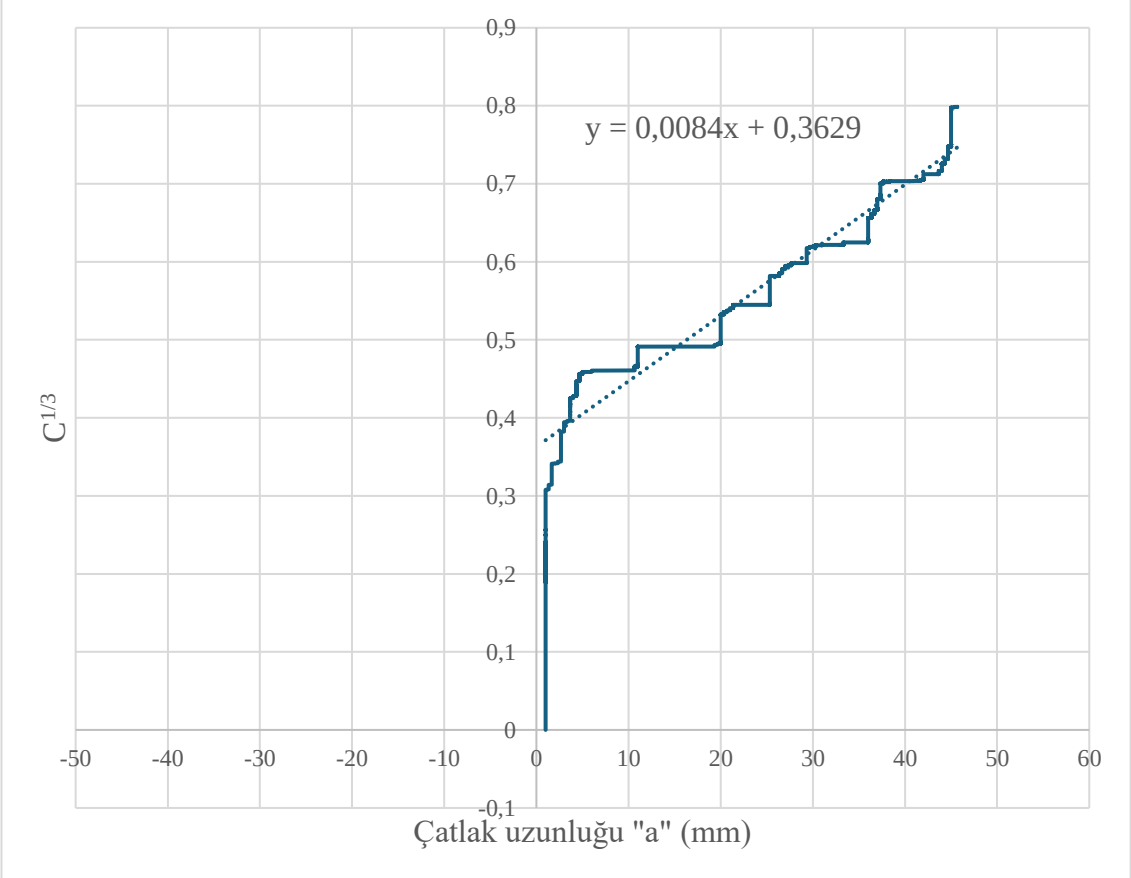
Modifiye Edilmiş Kiriş Teorisi

Şekil 3. 19 En küçük kareler yöntemi grafiği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Numunelerin Çatlak Boylarının En Küçük Kareler Grafiği ile Hesaplanması

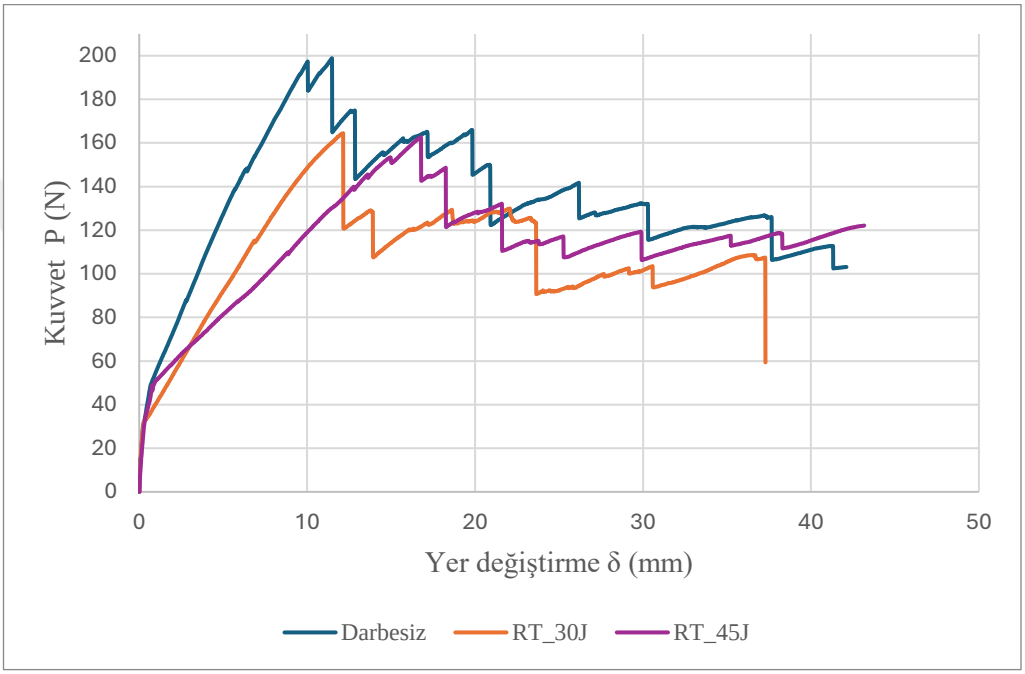
Şekil 4.1'de RT_45J numunelerine ait en küçük kareler yöntemi grafiği örnek olarak verilmiştir. Bu grafik için doğrusal kısmın yatay çatlak uzunluğu eksenini kestiği noktanın mutlak değeri 43,2 olarak bulunmuş ve |Δ|=43,2 mm olarak Denklem 3.2' de yerine konularak modifiye edilmiş kiriş teorisine göre Mod I "modifiye edilmiş enerji salınım oranı" hesaplanmıştır. |Δ| her bir parametreye ait grafik için ayrı ayrı hesaplanmış ve formülde yerine konmuştur.



Şekil 4. 1 RT_45J numunesine ait oluşturulmuş "$C^{1/3}$– a" grafiği

4.2 Kuvvet "P"– Yer Değiştirme "δ" Grafikleri

ASTM D5528' e (2013) göre incelenmesi gereken grafiklerden bir tanesi Kuvvet "P" – Yer değiştirme "δ" grafikleridir. Her bir parametre değeri için elde edilen kuvvet – yer değiştirme verilerinin ortalama değerleri hesaplanarak bu grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.2'de oda sıcaklığında farklı enerjilerde darbe uygulanmış DCB numunelerinin "P-δ" grafikleri yer almaktadır.

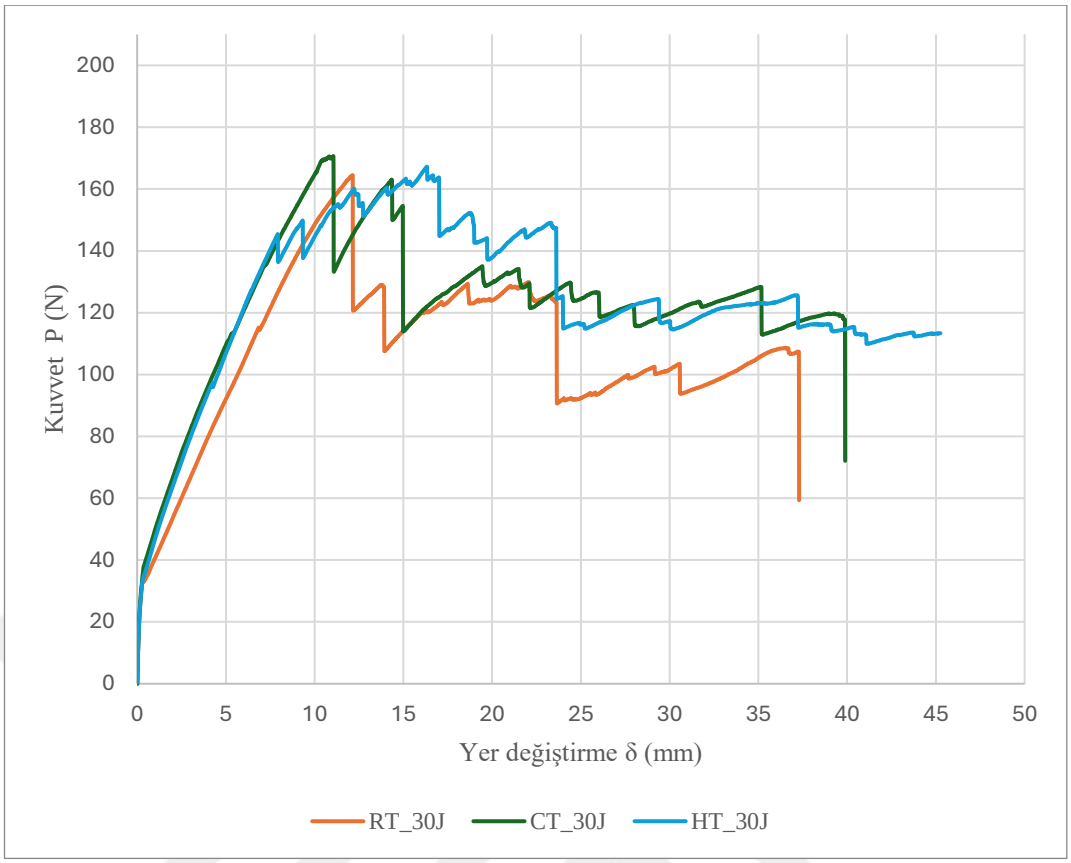


Şekil 4. 2 Oda sıcaklığında Darbesiz, 30J ve 45J enerjilerinde darbeler uygulanmış DCB numunelerinin "P- δ" grafikleri

Burada darbe alan numunelere ait RT_30J ve RT45J eğrilerinin doğrusallığını kaybettiği kuvvet seviyelerinde kritik açılma darbesize göre ortalama 38 N'luk düşüşlerin kaydedildiği görülmektedir. Ayrıca her iki numune tipinde de Mod I bağlantı rijitliklerinde değişen oranlarda darbesiz numuneye göre düşüşlerin yaşandığı, eğrilerin doğrusal kısımlarının eğimlerinden anlaşılmaktadır. Bu durum, darbe yükünün her ne kadar noktasal bir tarzda uygulansa da yerel olarak oluşan hasarın tahmin edilenden daha geniş bir alanı etkilediği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Uygulanan darbe hasarları yapıştırma bağlantılarının kuvvet taşıma kapasitelerini önemli oranlarda düşürmüştür. Kritik açılma noktalarının ardından tüm

grafiklerde ani kuvvet boşalmaları görülmesi, çatlak ilerlemesinin kesintili olarak gerçekleşmesinin bir sonucudur. Bu durumun kullanılan yapıştırıcının deney koşulları altında ve DCB testi sırasında gevrek bir davranış sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca numune kenarında delaminasyonların yani çatlak ilerlemesinin görüldüğü delaminasyon başlangıç noktaları, her bir numuneye ait eğrinin 1. Lineer bölgesinden 2. Lineer bölgeye geçtiği ve eğimlerde hafif bir düşüşün de gözlemlendiği noktalara tekabül etmektedir. 1. Lineer bölgenin eğiminin, tamamen yapıştırılan kompozit plakaların yapıştırılmayan kısmının elastik rijitliği ile alakalı olduğu anlaşılmakta ve test edilen özdeş tüm numuneler için hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.

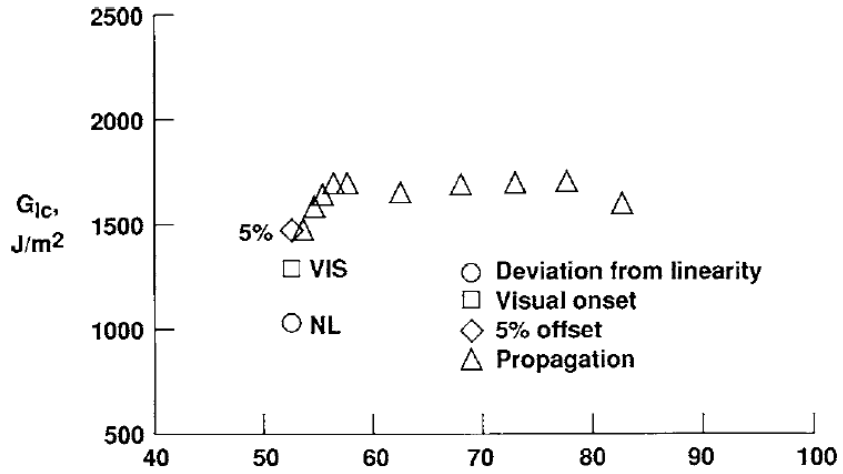
Aynı enerji seviyesinde (30J) farklı sıcaklıklarda darbeler uygulanmış olan DCB test numunelerine ait kuvvet-yer değiştirme (P-δ) grafikleri ise Şekil 4.3 de verilmiştir. Eğrilerin doğrusallıktan saptığı kritik açılma noktaları incelendiğinde, yüksek sıcaklıkta darbe işlemi uygulanmış numuneye (HT_30J) ait grafikteki noktanın kuvvet seviyesinin, oda sıcaklığı (RT_30J) ve düşük sıcaklıkta (CT_30J) uygulananlara kıyasla yaklaşık olarak 25 N daha düşük değerde olduğu görülmektedir. Bu durum DCB testi öncesinde uygulanmış olan 80 ºC lik sıcaklık seviyesinin yapıştırıcı malzemesi üzerinde kısmen de olsa bir bozucu etki gösterdiğine işaret etmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta işlem gören bu numune tipinde kuvvet boşalmalarının daha düşük adımlarla gerçekleşmesi, diğer numunelerden farklı olarak kritik açılma noktasından itibaren kuvvet seviyesinin belirli bir yer değişimi değerine kadar artışa devam etmesi ve böylece kısmen sünek bir davranış sergilemesi de dikkat çekicidir. Dikkate değer diğer bir durum ise yüksek ve düşük sıcaklık maruziyetlerinin DCB testlerinden elde edilen "P-δ" grafiklerindeki doğrusal bölgenin eğimi üzerinde pozitif bir etkisi olmasıdır ki, oda sıcaklığında darbe almış RT_30J numunesininkine kıyasla önemli ölçüde artış görülmektedir.



Şekil 4. 3 Farklı sıcaklıklarda 30J enerji seviyesinde darbe uygulanmış DCB numunelerinin "P- δ" grafikleri

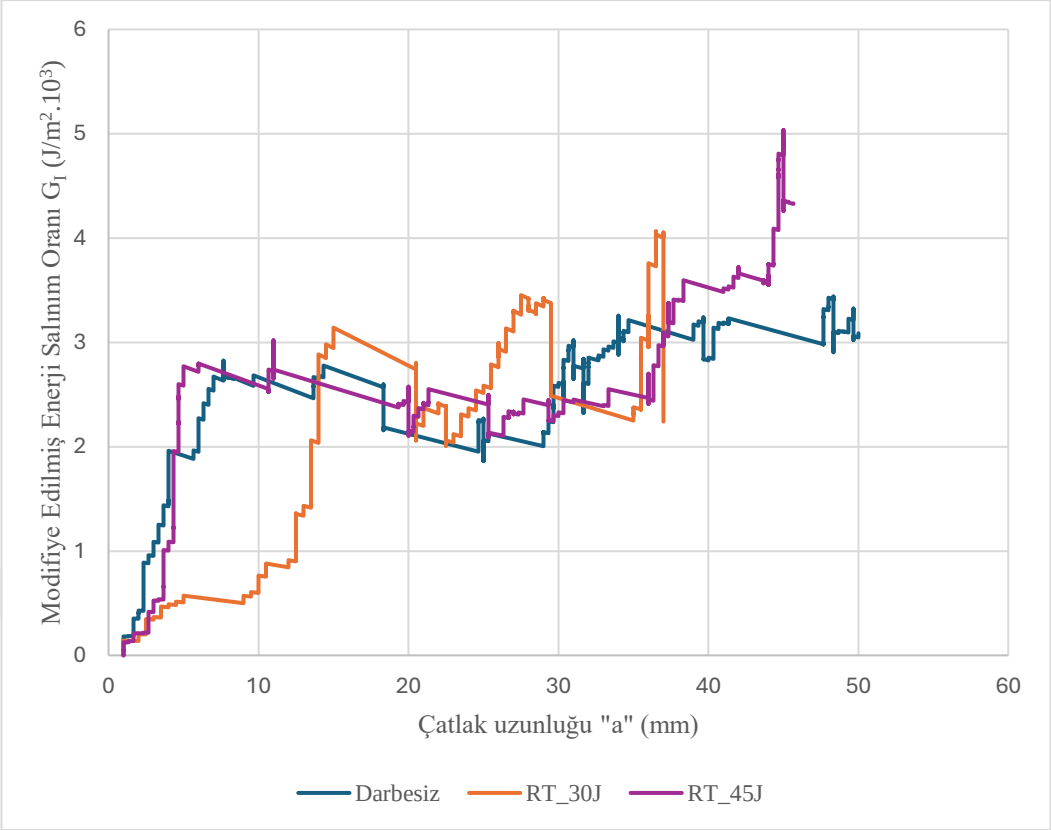
4.3 Enerji Salınım Oranı "G_I"– Çatlak Uzunluğu "a" Grafikleri (Delaminasyon Direnç Eğrileri)

Enerji salınım oranı "G_I"– Çatlak uzunluğu "a" grafikleri literatürde Delamination Resistance Curve (R-Curve) - Delaminasyon Direnç Eğrisi olarak anılmaktadır. Her numune için delaminasyon direnci eğrisinin, NL (Doğrusallıktan sapma), VIS (numune kenarında delaminasyonun görsel olarak gözlemlendiği nokta) ve G_{IC} 'nin %5 maksimum değerleri dahil olmak üzere Şekil 4.4'te gösterilen noktaları içerdiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 4. 4 DCB Testinden Delaminasyon Direnç Eğrisi (R-Curve) (ASTM D5528, 2013)

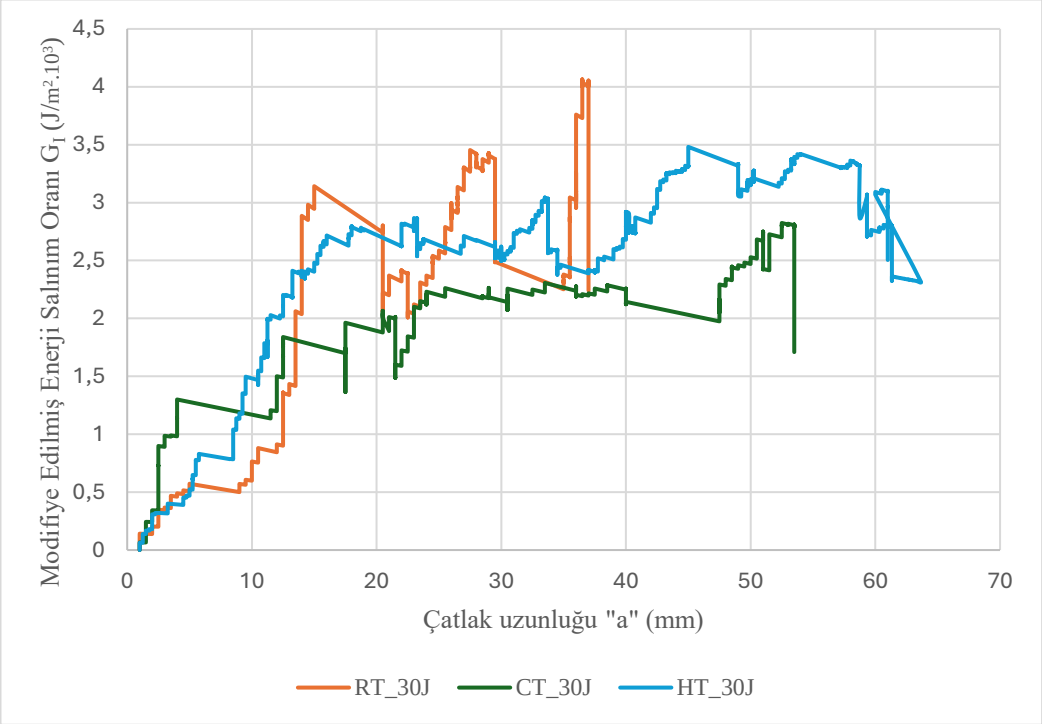
Modifiye Edilmiş Enerji Salınım Oranı (G_I), tüm parametrelere ait test verilerine Denklem 3.2'nin uygulanması suretiyle her bir numune için oluşturulmuş "$C^{1/3}$ – a" grafiğinden elde edilen |Δ| hesaba katılarak elde edilmiştir. Böylece Delaminasyon direnç eğrileri (R-Curve) üretilmiştir. (Şekil 4.5-4.6). Oda sıcaklığında Darbesiz, 30J ve 45J enerjilerinde darbeler uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon direnç eğrileri (R-Curve) Şekil 4.5 de verilmiştir. Darbesiz ve oda sıcaklığında 45J darbeli RT_45J numuneleri için yaklaşık $2{,}8x10^3$ J/m^2 enerji salınım oranlarına ve yaklaşık 5 mm çatlak boylarına kadar hemen hemen doğrusala yakın ve benzer eğimli artışlar gözlemlenmiştir. NL (Deviation from linearity) olarak isimlendirilen bu noktada bağlantı şekil değişimi enerjisi tepe noktasına ulaşmıştır. Belirtilen bu NL noktalarından itibaren enerji salınım oranları bu seviyelerini koruyarak ve tam ayrışma hasarı öncesi bir miktar yükselerek devam etmiştir. Yayılma direnci olarak isimlendirilen eğrinin bu bölgesi yapıştırma bağlantısının ayrışma başladıktan sonra ne kadar dirençli olduğunu gösterir. Oda sıcaklığında 30J darbe uygulanmış numunede (RT_30J) ise doğrusala yakın artış $3x10^3$ J/m^2 enerji salınım oranı ve 15 mm çatlak boyuna kadar sürmüş ve ortalama eğimin diğerlerine nazaran daha düşük olduğu görülmüştür. Burada darbenin uygulandığı nokta olan 35. mm de izlenmesi beklenen enerji salınım oranındaki ani düşüşlerin çok hafif şekilde gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 4. 5 Oda sıcaklığında Darbesiz, 30J ve 45J enerjilerinde darbeler uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon Direnç Eğrileri (R-Curve)

Farklı sıcaklıklarda 30J enerji seviyesinde darbe uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon Direnç Eğrileri (R-Curve) Şekil 4.6'da verilmiştir. Eğrilerin her birinde tepe enerji seviyesi olan NL noktalarını gözlemlemek mümkündür ki bu noktalara kadar doğrusala yakın kırılma tokluğu artışları görülmektedir. Ardından belirli bir yayılma enerji seviyesinde çatlak ilerleyişi boyunca eğriler yatay olarak devam etmektedir. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık da darbelerin uygulandığı sırasıyla RT_30J ve HT_30J numunelerine ait eğrilerde darbe uygulama noktası olan 35. mm de yaklaşık 1x10^3 J/m^2 ye varan belirgin kırılma tokluğu düşüşleri gözlemlenebilmektedir. Ancak bu düşüşlerin sadece darbenin etki alanı ile sınırlı kalıp, çatlak boyu ilerledikçe çatlak yayılma direncinin tekrar yükseldiği gözlenmektedir. Düşük sıcaklık etkisi altında darbe uygulanan CT_30J numune eğrisinde ise bu şekilde belirgin bir darbe etkisi hissedilmemektedir. Diğer yandan, yapıştırma bağlantılarının mekanik bir etkiye oda sıcaklığı dışındaki yüksek ve düşük sıcaklıklarda maruz kalmış olmasının da etkileri Direnç (R) eğrilerinde bariz bir şekilde görülmektedir. Özellikle 80 ºC sıcaklık etkisi altında kalmış olan HT_30J numunelerinin ortalama eğrisindeki

çatlak uzunluğuna bağlı enerji dalgalanmalarının daha küçük aralıklarla ve genliklerle gerçekleşmesi yapıştırıcının sıcaklık etkisiyle daha sünek yapıya dönüşmüş olmasına atfedilebilir. 0 ºC de düşük sıcaklığa maruz bırakılmış ve mekanik hasar görmüş CT_30J numunelerinin Direnç (R) eğrisinin ise doğrusallıktan sapma ve yatay doğrultuda yayılma direnç bölgesine geçtiği NL noktasının RT_30J ve HT_30J numunelerinkinden sırasıyla $1{,}2x10^3$ J/m^2 ve $0{,}8x10^3$ J/m^2 daha düşük seviyede olduğu ve kırılma tokluğunda belirgin bir düşüş görüldüğü söylenebilir. Genel olarak gerek yüksek gerekse düşük sıcaklık maruziyetlerinin yapıştırma bağlantılarının Kritik Enerji Salınım Oranı ve kırılma toklukları üzerine olumsuz bir etki yaptığı sonucunu çıkarmak mümkündür. Düşük sıcaklıklarda da darbe olayının Enerji Salınım Oranı üzerindeki etkisinin minimum düzeyde olduğu söylenebilir.



Şekil 4. 6 Farklı sıcaklıklarda 30J enerji seviyesinde darbe uygulanmış DCB numunelerinin Delaminasyon Direnç Eğrileri (R-Curve)

4.4 Numunelerde Oluşan Hasarlar

ASTM D5573 (2005) standardına göre sınıflandırılmış altı farklı hasar türü bulunmaktadır. Bu hasar tipleri sırasıyla; yapıştırıcı hasarı (ADH), kohezif hasar (COH), ince tabaka kohezif kırılma (TLC), ana malzeme kırılması (SB), lif yırtılma kırılması (FT) ve hafif fiber yırtılmasıdır (LFT). (Soykök, 2015) makalesindeki hasar modlarındaki gibi farklı tip hasarlar numuneler üzerinde gözlemlenmiştir.

Birinci numune grubu olan oda sıcaklığında ve 30 Joule enerji seviyesinde darbeye maruz kalan numunelerde Şekil 4.7 de görüldüğü gibi hasarlar meydana gelmiştir. Şekil 4.7 de kompozit malzemenin çekme testi sonucunda yüzey kısmında ve darbe noktasında hasar ve ayrılma oluşmuştur. Numune yüzeyinde fiber malzemelerin belirginleşerek matris malzemesinin ayrıştığı bölgeler mevcuttur. Bu netice, hafif fiber yırtılması (LFT) olarak değerlendirilebilmektedir. Hafif fiber yırtılmasında, uygulanan darbe sonrası çekme testi sonucunda, kompozitin matris yapısında yırtılmalar meydana gelir ve az miktarda fiber yapışkan yüzeye geçer. Şekil 4.7 de olduğu gibi benzer bir durum mevcuttur. Matrisler kompozitten ayrılarak kısmı olarak fiberler açığa çıkması söz konusudur.



Şekil 4. 7 Oda sıcaklığı ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü

İkinci numune grubu olan oda sıcaklığında ve 45 Joule enerji seviyesinde darbeye maruz kalan numunelerde Şekil 4.8 de görüldüğü gibi hasarlar meydana gelmiştir. Çekme testi sonucu kompozit malzemenin yüzeyi incelendiğinde darbe alanında birinci numune grubuna göre daha geniş ve belirginleşmiş hasar alanı oluşmuştur. Fiberlerin yoğun olarak açığa çıktığı ve matris malzemesinin büyük ölçüde ayrıldığı bölgeler mevcuttur. (Soykök, 2015) çalışmasına göre bu durum fiber yırtılması (FT) olarak değerlendirilebilir. Artan darbe enerjisi ile birlikte matrisin yüksek hasar görmesine ve fiberlerin daha belirgin olmasına sebep olmuştur.



Şekil 4. 8 Oda sıcaklığı ve 45J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü

Üçüncü numune grubu olan sıfır derece ve 30 Joule enerji seviyesinde darbeye maruz kalan numunelerde Şekil 4.9 da görüldüğü gibi hasarlar meydana gelmiştir. Bu grupta darbe alanında net bir hasar izi ve ayrılma olmuştur. Fiberler yer yer belirginleşerek ve matrisin çatladığı alanlar oluşmuştur. Bu durumda hafif fiber yırtılması (LFT) olarak değerlendirilebilir. Çekme testi sonucu matris hasar alırken, az sayıda fiber yapışkan yüzeye geçer. Şekil 4.9 da görüldüğü gibi matrisin ayrılması ve kısmi olarak fiberin açığa çıkması görülmüştür.



Şekil 4. 9 Sıfır derece ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü

Dördüncü numune grubu olan 80°C derece ve 30 Joule enerji seviyesinde darbeye maruz kalan numunelerde Şekil 4.10 da görüldüğü gibi hasarlar meydana gelmiştir. Kompozit numunenin darbe alanında net hasar ve ayrılma izi mevcuttur. Bu hasar tipi hafif fiber yırtılması olarak (LFT) yorumlanabilir. Yüksek sıcaklık sonucu matrisin daha yumuşak yapıya geçmesi ve darbenin etkisi ile kolay hasar alabilmesine neden olabilmektedir. Hasarlı alanda matrisin ayrılması ve fiber yapının belirgin hale gelmesi bu hasar tipini doğrulamaktadır.



Şekil 4. 10 80°C ve 30J enerji seviyesi çekme testi sonrası hasar görünümü

Beşinci numune grubu olan darbe uygulanmamış numunelerde Şekil 4.11 de görüldüğü gibi hasarlar meydana gelmiştir. Bu gruba darbe uygulanmadığı için malzeme yüzeyinde oluşan ayrılma düzgün bir yapıdadır. Malzeme yüzeyinde fiberler belirginleşmiş ve matrisin ayrıldığı alanlar oluşmuştur. Bu hasar tipi de hafif fiber yırtılması olarak (LFT) değerlendirilebilmektedir. Darbe olmamasına rağmen, malzeme çekme kuvvetine maruz kaldığı için matris hasar görerek az miktarda fiber açığa çıkmıştır.



Şekil 4. 11 Darbesiz numunenin çekme testi sonrası hasar görünümü

5. SONUÇ VE ÖNERİ

Bu çalışmada, düşük sıcaklık ve oda sıcaklığı koşullarında darbe yüklerine maruz bırakılarak yapışkan ile birleştirilmiş kompozit bağlantıların Mod I kırılma tokluğu davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde sıcaklığın ve darbe hızlarının kırılma tokluğuna uyguladığı etki gözlemlenmiştir. Araştırma bulgusunda, kompozit malzemelere uygulanan darbelerin yapıştırma bağlantısının yük taşıma kabiliyetini ve rijitliğini büyük ölçüde azalttığı görülmüştür.

Özellikle darbe yüklü numunelerde doğrusal elastik davranıştan sapma noktasında kuvvetin önemli ölçüde azalması, noktasal darbe yüklemesine rağmen yerel hasarın beklenenden daha geniş bir alana yayıldığını ve bağlantının genel mukavemetini olumsuz etkilediğini doğrulamaktadır. Bulgular ayrıca yüksek enerjili darbeler sırasında enerjinin büyük bir kısmının üst katmandan alt katmana aktarıldığını ve deformasyon enerjisine dönüştüğünü gösteriyor.

Sıcaklığın yapıştırıcı bağların performansı üzerindeki önemli etkileri de bu çalışmada açıkça gösterilmiştir. Yüksek sıcaklıkta darbe işlemine tabi tutulan numuneler, oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıktaki numunelere kıyasla daha düşük kuvvet seviyelerinde doğrusallıktan sapma göstermiştir. Bu, yüksek sıcaklıkların yapıştırıcı malzemenin yapısını zayıflattığını ve onu darbe hasarına karşı daha duyarlı hale getirdiğini açıkça göstermektedir. Düşük sıcaklıkların, özellikle kritik enerji salınım hızı ve kırılma tokluğu üzerinde olumsuz etkileri olmuştur. Düşük sıcaklıklarda yapılan darbe testlerinde, darbe enerjisinin gerinim enerjisine daha düşük bir dönüşümü gözlemlenmiştir. Bu, epoksi matrisli lamine panellerin düşük sıcaklıklarda daha kırılgan darbe davranışı sergilemesiyle ilgili olabilir. Yüksek sıcaklıkta, bu çalışmadaki iki ayrı yapıştırılmış panel üzerinde gerçekleştirilen tek katmanlı darbe testlerinin aksine, alt tabakadaki hasar izinin çapında önemli bir artış gözlemlenmiştir. Bu, yüksek sıcaklıklarda darbe enerjisinin daha geniş bir alanda hasar enerjisine dönüşme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Delaminasyon direnç eğrileri (R eğrileri) incelendiğinde, bağlantı noktalarında kırılma tokluğunda geçici bir azalma gözlendi. Ancak bu azalma genellikle eklem bölgesi ile sınırlı kalmış ve çatlak ilerledikçe direnç yeniden artmıştır. Yüksek sıcaklıkla işlem gören numunelerde daha kısa aralıklarla enerji dalgalanmaları gözlemlendi, bu durum yapıştırıcının sıcaklığın etkisi altında daha sünek davranışı göstermesine bağlandı.

Sonuç olarak, yapıştırıcı bağlantıları tasarlarken ve kullanırken darbe ve çevresel faktörleri (özellikle sıcaklığı) dikkate almak önemlidir. Darbe hasarının olumsuz etkilerini en aza indirmek için, daha sünek yapıştırıcı malzemeler kullanılması veya darbe direncini artıran tasarım çözümleri geliştirilmesi önerilir. Ayrıca, değişen sıcaklık koşullarında çalışan yapıştırıcı bağlantıları için sıcaklığa dayanıklı yapıştırıcılar seçilmeli ve yapıştırma alanları çevresel etkilerden korunmalıdır. Gelecekteki çalışmalarda farklı darbe enerjilerinin ve sıcaklık seviyelerinin, ayrıca farklı yapıştırıcı türlerinin ve bağlama geometrilerinin etkilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, yapıştırıcı teknolojilerinin daha güvenilir ve dayanıklı hale getirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunacaktır. Özellikle, farklı sıcaklıklarda darbeden sonra oluşan hasar alanlarındaki delaminasyon mekanizmalarının araştırılması, bağlantıların uzun vadeli kullanımı için kritik bilgiler sağlayabilir.

KAYNAKLAR

Medina, S. A., et al. Guided Double Cantilever Beam test method for intermediate and high loading rates in composites. International Journal of Solids and Structures. 2023, 264, 1–15.

Blackman, B., et al. Using high-speed imaging for fracture toughness in composites under dynamic loading. Journal of Composite Materials. 1995, 29(6), 741–751.

Liu, W., et al. Electromagnetic Hopkinson bar systems for DCB tests in dynamic conditions. Journal of Mechanics of Materials. 2019, 134, 103–115.

Jones, R., & Callinan, R. Failure analysis of laminated composites under mixed-mode loading. Composite Structures. 2003, 59(1), 69–76.

Martin, R. H., & Davidson, B. D. Mode I fracture toughness testing of composites: Analysis and design considerations. Composite Materials Handbook. 1999, 3(4), 112–124.

Valvo, P. S., et al. Crack propagation under low and high speeds: Effects on interlaminar fracture toughness in composites. Composite Science and Technology. 2015, 118, 12–21.

Chen, J., ve Ifju, P. Modified DCB tests for analyzing crack propagation in composites. Experimental Mechanics. 2009, 49(3), 299–307.

Wang, C. H., & Chalkley, P. Fatigue and fracture in composite materials. International Journal of Fatigue. 2000, 22(9), 693–707.

Dillard, D. A., & Bucinell, R. B. Adhesive and interfacial fracture toughness in composites. Journal of Adhesion Science and Technology. 2008, 22(5–6), 415–432.

Altan, G. Değişik sıcaklık ve nem etkisinde çalışan birleştirilmiş kompozit malzemelerin yorulma mukavemetlerinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 2009, 190 s. (Doktora Tezi).

Aydın, Ö. F. Çevresel koşulların yapıştırılmış kompozitlerin mekanik performanslarına etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2014, 145 s. (Yüksek Lisans Tezi).

İpek, G. Tabakalı kompozit malzemelerin burkulma davranışına çoklu süreksizlik bölgesinin etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2015, 210 s. (Yüksek Lisans Tezi).

Pekbey, Y. Effect of preload moment and geometrical parameters to failure behavior of pin-loaded laminated composite plates. Proceedings of 8th International Fracture Conference, 25-27 Mayıs 2007, İzmir, Türkiye, 273–281.

Kavur, K. H. Heart Flowerpot. US Patent No. D518,755. Washington DC, US Patent and Trademark Office, 2006.

Tserpes, K. I., & Papanikos, P. Finite element modeling of delamination in composite beams under static and fatigue loading. Engineering Fracture Mechanics. 2005, 72(6), 965–982.

Kinloch, A. J. Adhesion and adhesives: Science and technology. Journal of Adhesion Science. 1987, 9(3), 451–471.

Hart-Smith, L. J. Mechanically-fastened joints for advanced composites. Composite Structures. 1985, 3(1), 1–16.

Campbell, F. C. Structural Composite Materials. ASM International, Ohio, 2010, 352 s.

Kelly, G. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. Composite Science and Technology. 2004, 64(2), 247–256.

Chan, W. S., & Vedhagiri, S. Analysis of composite bonded/bolted joints used in repairing. Journal of Composite Materials. 2001, 35(6), 509–526.

Arman, Y. Effect of washer type on bearing strength of bolted-joint laminated composites. Advanced Composite Letters. 2013, 22(5), 117–123.

Soykok, İ. F. (2015). End geometry and pin-hole effects on axially loaded adhesively bonded composite joints.

Harris, W., Soutis, C., & Atkin, C. Impact response of curved composite laminates: Effect of radius and thickness. *Applied Composite Materials*, 2020, **27**, 555–573. https://doi.org/10.1007/s10443-020-09826-2.

Sreekantha Reddy, T., Rama Subba Reddy, P., & Madhu, V. Low velocity impact studies of E-glass/epoxy composite laminates at different thicknesses and temperatures.*DefenceTechnology*,2019,**15**(6),897–904. https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.02.003.

Suvarna, R., Arumugam, V., Bull, D. J., Chambers, A. R., & Santulli, C. Effect of temperature on low velocity impact damage and post-impact flexural strength of CFRP assessed using ultrasonic C-scan and micro-focus computed tomography. *Composites PartB:Engineering*,2014,**66**,58–64. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.028.

ASTM. (2013). *ASTM D5528-01(2013) – Standard test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites*. ASTM International.

ASTM. (2013). *ASTM E1290-93(2013) Standard test method for fracture toughness of metallic materials under plane-strain conditions). ASTM International.*

ASTM. (2015). *ASTM D7264/D7264M–15 Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials). ASTM International.*

Recep, İ. (2015). *Kompozit malzemelerde kırılma mekaniği uygulamaları* (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

Korkut, S. (2017). *Yapıştırılmış kompozit levhaların kırılma tokluğu davranışı üzerine deneysel bir çalışma* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Alyanak, Z., & Şen, F. (2015). Kompozit yapışma bölgelerinde kırılma tokluğu karakterizasyonu. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 200–210.