



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

**FARKLI SICAKLIKLARIN KARBON FİBER KATKILI EPOKSİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN BAĞLANTI PERFORMANSINA
ETKİSİ**

RIDVAN ONGUN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İLYAS UYGUR**

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI SICAKLIKLARIN KARBON FİBER KATKILI EPOKSİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN BAĞLANTI PERFORMANSINA
ETKİSİ

Rıdvan ONGUN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Cihat TAŞCIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatih Ertuğrul ÖZ

İstanbul Şehir Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/02/2019

BEYAN

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

05 Şubat 2019

Rıdvan ONGUN

TEŞEKKÜR

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

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTÇİOĞLU ve Arş. Gör. Yakup Okan ALPAY'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

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

05 Şubat 2019

Rıdvan ONGUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
KISALTMALAR	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1.GİRİŞ	1
1.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE YAPIŞTIRMA	1
1.2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	2
1.3. TEZİN AMACI	6
2.KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ	7
2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	8
2.2.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .8	
<i>2.2.1.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler</i>	<i>9</i>
<i>2.2.1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler</i>	<i>10</i>
<i>2.2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler</i>	<i>11</i>
2.2.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler	11
<i>2.2.2.1. Elyaf Destekli Kompozit Malzemeler</i>	<i>12</i>
2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ	15
2.3.1. El Yatırma Yöntemi	15
2.3.2. Vakum Torbalama İle Üretim	17
2.3.3. Otoklav ile Üretim	18
2.3.4. Pres Yardımı ile Üretim	20
2.3.5. Reçine İnfüzyon İle Üretim	21
2.3.6. Vakum İnfüzyon Üretim Metodu	22
2.3.7. Pultrüzyon	22

2.3.8. Sarma Yöntemi	23
2.3.9. Enjeksiyon ile Üretim	23
2.4.POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEME PARÇALARININ BİRLEŞTİRİLMESİ	24
2.4.1. Mekanik Birleştirmeler	25
2.4.2. Yapıştırıcı Kullanılan Birleştirmeler	26
2.4.2.1. <i>Polimer Matrisli Malzeme Birleştirmede Kullanılan Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri</i>	28
2.4.2.2. <i>Yapışma Kalitesini Etkileyen Faktörler</i>	29
2.4.2.3. <i>Yapıştırıcı kullanılan Bağlantılarda Hasarlar</i>	31
3.MALZEME VE YÖNTEM	32
3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ	32
3.2. DENEY DÜZENEĞİ VE DENEY YÖNTEMİ	36
4.DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	39
4.1. KESME GERİLMESİ-UZAMA EĞRİLERİ	39
4.1.1. Permabond PT326 İçin Kesme Gerilmesi-Uzama Eğrileri.....	39
4.1.2. Epoksi Yapıştırıcı İçin Kesme Gerilmesi -Uzama Eğrileri	41
4.2. TARTIŞMA	42
4.2.1. Sıcaklık Ve Yapıştırıcı Malzemelerin Kesme Gerilmesine Etkileri	42
4.2.2. Kopma Yüzeylerinin Karşılaştırılması	47
5.DEĞERLENDİRMELER	52
6.KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	57

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Örülmüş tek yönlü cam elyaf [25].	12
Şekil 2.2. Karbon elyaf [25].	14
Şekil 2.3. Karbon elyaf iç yapısı [22].	14
Şekil 2.4. El yatırma yöntemi [29].	16
Şekil 2.5. Püskürtme yöntemi ile üretim [24].	17
Şekil 2.6. Vakum yardımı ile üretim [29].	18
Şekil 2.7. Otoklav [24].	19
Şekil 2.8. Pres ile üretim [29].	20
Şekil 2.9. Reçine infüzyon ile üretim şeklinin şematik görünümü [22].	21
Şekil 2.10. Vakum infüzyon metodu [29].	22
Şekil 2.11. Pultrüzyon şematik görünümü [22].	23
Şekil 2.12. Mekanik birleştirme örnekleri [22].	25
Şekil 2.13. Mekanik birleştirmelerde hasar tipleri. [22] a. Sıkma hasarı b. Çekme hasarı	26
Şekil 2.14. Kullanılan değişik yapıştırma bağlantıları [22]. a. Tek bindirmeli b. Çift bindirme c. Tek takviyeli alın bağlantısı d. Çift takviyeli alın bağlantısı e. Pah bindirme	27
Şekil 2.15. Farklı parça ve yapıştırıcı geometrileri [20].	29
Şekil 2.16. Farklı geometrilerin karşılaştırılması a. Standart tek bindirmeli bağlantı. b. Dalgalı tek bindirmeli bağlantı [30].	30
Şekil 2.17. Yapıştırıcı kullanılan kompozit malzeme bağlantılarında hasar tipleri [20].	31
Şekil 3.1. Sıcak pres tezgahında üretilen kompozit parçalar .	33
Şekil 3.2. Üretilen tipik bir CFRP levha (300x300x2.5 mm ³)	34
Şekil 3.3. ASTM D5868 standartına göre numune boyutları (boyutlar mm'dir).	34
Şekil 3.4. Yapıştırma numuneleri.	34
Şekil 3.5. Birleştirme yapılmış tipik birkompozit-kompozit deney numunesi.	36
Şekil 3.6. Deneysel test cihazı.	36
Şekil 3.7. Sıcak deneyler için kullanılan deney düzeneği.	37
Şekil 3.8. Numunelerde kullanılan destekleyici parça.	37
Şekil 3.9. Çekme testi sırasında eğilme yüklerinin etkisi. a. Test öncesi numune. b. Test sırasında numune.	38
Şekil4.1. PT326 yapıştırıcı için farklı sıcaklıklarda kesme gerilmesi-uzamagrafikleri;	40
Şekil4.2. Epoksi yapıştırıcı için farklı sıcaklıklarda kesme gerilmesi-uzama grafikleri;	42
Şekil 4.3. a.PT326 yapıştırıcı kullanılan numunelerde ortalama kesme gerilmeleri.	43
Şekil4.4. Farklı sıcaklıklar için kesme gerilmelerinin karşılaştırılması; a. 23°C b. 80°C ve c. -80°C	45
Şekil4.5. Partikül katkısının kesme gerilmesine etkisi.	46
Şekil4.6. PT326 yapıştırıcı için oda sıcaklığında kopma yüzeyi. a Kompozit-kompozit b.Kompozit-alüminyum	47

Şekil 4.7. PT326 yapıştırıcı için 80°C sıcaklığında kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b.Kompozit-alüminyum.....	48
Şekil 4.8. PT326 yapıştırıcı için -80°C kopma yüzeyleri. a. Kompozit-kompozit b.Kompozit-alüminyum.....	49
Şekil 4.9. Epoksi yapıştırıcı için oda sıcaklığında (23°C) kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b.Kompozit-alüminyum.....	50
Şekil 4.10. Epoksi yapıştırıcı için -80°C sıcaklığında kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b. Kompozit-alüminyum.....	51
Şekil 4.11. Partikül katkılı numunelerin kopma yüzeyleri. a. Kütlece %2, b. Kütlece %4 c. Kütlece %6.....	51



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Bazı yaygın kullanılan reçinelerin mekanik özellikleri	10
Çizelge 2.2. Farklı metal matrisli kompozit malzemelerin özellikleri	11
Çizelge 2.3. Bazı elyafların özellikleri	12
Çizelge 2.4. Farklı cam elyafların içeriği.	13
Çizelge 2.5. Bazı karbon elyafların mekanik özellikleri.	15
Çizelge 2.6. Farklı yapıştırıcıların özellikleri.	27
Çizelge 3.1. CM11 kürlenmiş matris mekanik özellikleri ve matris kürlenme özellikleri.	32
Çizelge 3.2. 2024 Alüminyum mekanik özellikleri.	32
Çizelge 3.3. PT326 yapıştırıcının özellikleri.	35
Çizelge 3.4. Deney tasarımı.	35

KISALTMALAR

BMC	Bulk Molding Compound (Hamur kalıplama bileşigi)
C-Al	Kompozit-Alüminyum birleştirme
C-C	Kompozit-kompozit birleştirme
CFRP	Carbon fiber reinforced polimer (Karbon fiber takviyeli polimer)
SMC	Sheet Molding Compound (Levha kalıplama bileşigi)
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı



ÖZET

FARKLI SICAKLIKLARIN KARBON FİBER KATKILI EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN BAĞLANTI PERFORMANSINA ETKİSİ

Rıdvan ONGUN

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlyas UYGUR

Şubat 2019, 56 sayfa

Küresel ısınma tehdidi ve çevresel sorunların artması birçok üreticiyi önlem almaya itmiştir. Karbon salınımının azaltılması en önemli tedbirlerden biri olarak düşünülmektedir. Yakıt tasarrufu için daha hafif malzemeler kullanmak tercih edilen çözümlerden biridir. Günümüzde özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde karbonfiber katkıli kompozit malzemeler (CFRP) hafif ve dayanıklı olduğu için tercih edilmektedir. Birçok sanayi sektöründe CFRP-Al ve CFRP-CFRP birleştirmeleri sıklıkla kullanılmakta ve birleştirmeler perçin, vida, cıvata veya yapıştırıcı maddeler kullanılarak yapılmaktadır. Perçin kullanılan bağlantılarda birleştirilen malzemelerin mekanik özellikleri olumsuz olarak etkilendiği için yapıştırma yöntemi daha çok tercih edilmektedir. Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda yapışma yüzeyinin performansının belirlenmesi zorunludur. Bu çalışmada CFRP-CFRP, CFRP-Al, birleştirmelerinin yapışma yüzeylerinin performansı üç farklı sıcaklıkta (-80°C, oda sıcaklığı (23°C), 80°C) yapılmıştır. Bağlantıların kesme yükleri tek bindirmeli test numuneleri üretilerek çekme deneyi ile belirlenmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi ve poliüretan bazlı iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Poliüretan yapıştırıcı için kesme gerilmesinin oda sıcaklığında en yüksek değerinde olduğu ve ekstrem sıcaklıklarda düştüğü görülmüştür. Epoksi yapıştırıcı için aynı etki görülmüş sıcaklık 80°C olduğunda ise yapışma kabiliyetinin yok olduğu görülmüştür. Kesme gerilmesinin CFRP-Al parçalarda CFRP-CFRP çiftlerine göre yaklaşık olarak %20 düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Kompozit malzeme, Yapışma, Birleştirme, Sıcaklık

ABSTRACT

THE EFFECT OF DIFFERENT TEMPERATURES ON BONDING PERFORMANCE OF CARBON FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Rıdvan ONGUN

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

February 2019, 56 pages

The threat of global warming and increasing environmental problems have led many producers to take measures. Reduction of carbon emissions is considered as one of the most important measures. Using lighter materials to save fuel has been used by automotive and aviation industry for a long time. Due to lightweight and superior strength carbonfiber reinforced composite materials (CFRP) are used in automotive and aviation industry. In automotive industry these composite materials are commonly bonded with aluminum and similar or dissimilar composite materials by using rivets, adhesives , bolts and screws. In aviation industry composite materials are bonded with titanium for engine-wing assembly. Adhesive bonding is commonly preferred because rivet bonding has negative effect on mechanical performance. In this study, bonding performance of CFRP-CFRP, CFRP-Al, joints were determined under three different temperatures (-80°C, room temperature (23°C), 80°C). The shear stresses of the joints were determined by single lap specimens. Two different adhesives, epoxy and polyurethane based, are used.. For polyurethane adhesive, the shear stress was highest at room temperature and decreased with increasing or decreasing temperature. For epoxy adhesive, when the temperature is increases to 80°C, the adhesion ability gradually decreases. The shear stress was found to be approximately %20 lower in CFRP-Al than in CFRP-CFRP specimens.

Keywords: Composite materials, Adhesion, Bonding, Temperature

1. GİRİŞ

1.1. KOMPOZİT MALZEMELER VE YAPIŞTIRMA

Tarih boyunca insanlığın ihtiyaçlarının değişmesi her zaman daha iyi ve kullanışlı aletlerin yapılmasına sebep olmuştur. Tarihin akışını değiştiren olayların başında kullanılan malzemeler vardır. Taş, bronz, demir ve çelik insanlığın gelişmesinde büyük rol almış malzemelerdir. Her daim daha iyi malzeme kullanma isteği çeşitli bilim ve mühendislik dallarının doğmasına sebep olmuştur.

Son yüzyılda sanayileşmenin hızla artmasıyla karbon salımı artmış ve küresel ısınma tehdidi ortaya çıkmıştır. Bu durum dünya genelinde büyük üretici ülkelerin önlemler almasına sebep olmuştur. Bu önlemlerden biri de otomotiv sektöründe ve havacılık sektöründe yakıt tasarrufu sağlayacak şekilde geliştirmelerdir. Kompozit malzemeler bu noktada kullanım alanı bulmuştur. Özellikle hafif olması ve yüksek dayanım özelliği bu sektörlerde geniş şekilde kullanılmasına sebep olmuştur. Elektrikli araçların şasi ve kaporta aksamalarında, uçakların gövde kanatlarında kullanılan bu malzemeler hafifleme sağlamış ve ani sıcaklık değişimlerine daha iyi tepki vererek havacılık sektörünün vazgeçilmez malzemesi olmuştur.

Kompozit malzemelerin üretimi için farklı üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler malzemenin kullanılacağı yere göre değişiklik göstermektedir. Daha çok dayanım istenilen alanlarda otoklav ile üretim yapılırken düşük dayanım istenilen uygulamalar için el yatırma, vakum infüzyon gibi yöntemler kullanılmaktadır. Üretim tekniği ne olursa olsun büyük parçaların üretim zorluğu, metallere birleştirme isteği yapıştırma ile bağlantıların kullanılmasına sebep olmuştur.

Yapıştırma bağlantıları özellikle Kompozit malzemelerin birleştirilmesi için önemli bir konudur. Havacılık sektöründe yoğun şekilde kullanılan bu yöntem son zamanlarda daha çok önem kazanmıştır. Yapılan araştırmalarda yapıştırıcı özelliği, geometrik özellikler, çevresel şartlar, yapıştırma tekniği, yapışma yüzeyi hazırlama gibi konular çalışılmış ve matematiksel modeller geliştirilmiştir. Son zamanlarda çatlak oluşumu ve kırılmanın tahmin edilmesi önem kazanmıştır ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır.

Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda en önemli parametre kuşkusuz ki yapıştırıcı özelliğidir. Yapıştırıcının hizmet koşullarına en iyi şekilde dayanması hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple yapıştırıcı özelliklerinin çeşitli testlerle belirlenmesi çalışma konusu olmuştur.

1.2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Da Silva ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yapıştırıcı özelliklerini belirlemek için farklı bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde standart kullanılan testlerin aksine deformasyonu ölçmek için basit bir ataçman kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda kullanılan metot eski deformasyon ölçme metotları ile aynı sonuçları vermiştir. sonuçlar vermiştir [1]. Saldanha ve arkadaşları çalışmasında genel olarak kullanılan epoksi ve poliüretan yapıştırıcılarının özelliklerini taşıyan yeni bir yapıştırıcı üreterek bu yapıştırıcının özelliklerini test etmişlerdir. Sonuç olarak kesme dayanımı 40 MPa, kopma dayanımı 60 MPa bulunmuştur [2].

Chamis ve Murthy çalışmalarında farklı yapıştırma geometrilerini inceleyerek, her geometri için matematik modeller geliştirilip bu bağlantılarda oluşan gerilmeler teorik olarak hesaplanmıştır [3]. Moya-Sanz ve arkadaşları ise çalışmalarında farklı geometrilerin soyulma ve kesme yüklerine dayanımlarını belirlemişlerdir. Çalışmada farklı geometriler oluşturulmuş ve deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak her geometri için optimum yapışma açısı 15° bulunmuştur [4]. Zeng ve arkadaşları yeni bir bağlantı tipi geliştirmişlerdir. Dalgalı tip bağlantıda uçlarda oluşan soyulma stresi %90 azaltılmıştır fakat karmaşık geometri bağlantısının üretiminde zorluklar çıkarmıştır [5].

Banea ve Da Silva çalışmalarında epoksi ve poliüretan yapıştırıcılar kullanılmış, -40°C , oda sıcaklığı, 80°C sıcaklıklardaki kesme dayanımları test etmişlerdir. Bunun için yapıştırıcılar çekme testine tabi tutulup mekanik özellikleri belirlendikten sonra tek bindirme bağlantısı yapılarak dayanımı ölçülmüştür. Sonuç olarak sıcaklığın artması kesme dayanımını poliüretan yapıştırıcı için %20 düşüğü, epoksi yapıştırıcı için %30 düşürdüğü görülmüştür. -40°C 'deki sıcaklıklar için kesme dayanımı poliüretan yapıştırıcı için %115 artmış, epoksi yapıştırıcı için %10 düşmüştür [6].

Fernandes ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sıcaklığın Mod I ve Mod II çatlak ilerleme mekanizmasına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda test

yapılmış ve 0°C ve 25°C sıcaklıklarında çok değişiklik olmadığı görülmüş 50°C sıcaklığında ise kırılma enerjisinin belirli oranda düştüğü gözlemlenmiştir [7].

Nardone ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada farklı sıcaklıkların cam elyaf takviyeli Kompozit malzeme ve karbon elyaf takviyeli Kompozit malzemelere etkisi araştırılmıştır. Soğuk tavlama yöntemi kullanılan numunelerde yüksek sıcaklıklarda kayda değer bir iyileşme görülmemiştir. Sıcaklığın artması mekanik özelliklerin kötüleşmesine sebep olmuştur [8].

Grant ve arkadaşları otomobil sektöründe kullanımı artan T bağlantılarının sıcaklık ile değişimini incelemiştir. -40°C ve 90°C arasında yapılan testlerde diğer çalışmalara paralel olarak sıcaklık artması ile çekme dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir [9].

Arouche ve arkadaşları nemin yapışma ara yüzeyine etkisini incelemiştirlerdir. 40 ve 150 gün süre ile metal-kompozit bağlantıları tuzlu su ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler soyuma testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda 40 güne kadar belirli bir etki görülmemiş 150 gün bekletilen numunelerde nem etkisi görülmüştür. 150 gün bekletilen numunelerde soyulma yükü belirli derecede düşmüştür [10].

Fernandes ve arkadaşları farklı nem oranlarının Mod I ve Mod II çatlak ilerleme mekanizmasına etkilerini incelemiştirlerdir. Yapıştırıcı ile bağlanan kompozit numuneler %55, %75 bağıl neme sahip ortamlarda ve tamamen suda bekletilmiştir. Daha sonra testler yapılmış ve nemin artmasının kırılma enerjisini %33 oranında düşürdüğü ve yapışkanın kırılmasını artırdığı görülmüştür [11]. Araştırmacıların eğildiği diğer konu ise tek bindirmeli testlerde farklı iki yapıştırıcının kullanılmasıdır. Bu teknik sayesinde yapışma alanının uç bölgelerinde görülen stres konsantrasyonu engellenmiş olmaktadır. Bir çalışmada uçlarda esnek yapıştırıcı merkezde ise sert yapıştırıcının kullanıldığı test numuneleri düşük (-30°C) ve yüksek (80°C) sıcaklıklarda kesme ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlara göre yüksek ve düşük sıcaklıklarda iki yapıştırıcının kullanıldığı durumlarda istenilen performans artışı elde edilememiştir [12]. Bir diğer çalışmada iki farklı yapıştırıcı kullanımının farklı ısıl genleşme katsayısına sahip malzemeleri yapıştırmadaki etkisi incelenmiştir. Çalışmada Kompozit-kompozit, kompozit-metal ve metal-metal birleştirmeleri iki yapıştırıcı ile yapılmış ve sıfırın altında (-55°C) ve 200°C sıcaklıkları arasında test edilmiştir. Farklı özellikte yapıştırıcı kullanımının termal genleşme katsayısı farklı olan malzemelerin kullanıldığı birleştirmelerde dayanımı olumlu yönde etkilediği görülmüştür [13].

Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda dikkat edilmesi gereken parametrelerden bir diğeri ise yapışma yüzeyinin hazırlanmasıdır. İyi bir yapışma elde edebilmek için yüzeylerin yapıştırma öncesi mekanik ve kimyasal olarak hazırlanmasıdır. Bu işlemler ile yüzey enerjisi arttırma, yüzey ıslama bilirliliğinin artması gibi yapışma için olumlu etki gösteren parametreler elde edilmiş olur. Schweizer ve arkadaşları yaptıkları çalışmada lazer uygulanan yüzeylerin yapışma performansını geleneksel olarak kullanılan taşlama yöntemi kullanılan numuneler ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlarda lazer kullanılarak hazırlanan numunelerin dayanımı diğer numunelere %140 oranında yüksek çıkmıştır. En yüksek dayanım kızılötesi lazer ile yüzey hazırlığı yapılan numunelerde gözlemlenmiştir [14].

Diğer bir çalışmada ise soyma kumaşının (peel-ply) yüzey yapışma kabiliyetine etkisi incelenmiştir. Yapılan çekme testlerinin sonucunda yüzey pürüzlülüğünü arttırması sebebiyle bu yöntemin yüzey enerjisini normal yüzeylere göre %33 oranında arttırdığı rapor edilmiştir [15].

Sorrentino ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı yapıştırıcılar ve farklı yüzey işlemlerinin yapışma bağlantılarının performansına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada; soyma kumaşı, kumlama ve zımparalama teknikleri kullanılmıştır. Tek bindirmeli numuneler hazırlanmış ve çekme cihazında kesme dayanımına bakılmıştır. Sonuç olarak farklı yapıştırıcılar için farklı yüzey işleme tekniklerinin olumlu sonuç verdiği gözlemlenmiş tek bir işlemin her yüzey ve yapıştırıcı için olumlu sonuç vermeyeceği belirtilmiştir [16].

Wang ve arkadaşları alüminyum ve kompozit malzeme bağlantılarının performansını inceledikleri çalışmalarında yapıştırıcının yapışma yüzeyine dağılmasının dayanıma etkisini belirlemişlerdir. Çalışmada yapıştırıcı ultrasonik titreşim verilerek yapışma yüzeyine yayılması sağlanmış ve klasik yöntemle yapıştırılan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak dayanımın %40-%60 civarında arttığı sonucuna varılmıştır [17].

Meneghetti ve arkadaşları kompozit malzemelerin fiber oryantasyonunun yapıştırma bağlantılarındaki etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmada farklı oryantasyona sahip malzemeler farklı yapıştırma uzunlukları denenmiştir. Sonuç olarak katmanların açılarının dayanıma çok etkisi olmadığı belirtilmiştir [18].

Wernik ve Meguid epoksi yapıştırıcının performansını arttıracak yöntem üzerinde

çalışmışlardır. Yayınladıkları çalışmada epoksi yapıştırıcıya karbon nano tüp ekleyerek yapıştırıcının çekme dayanımı belirlenmiştir. Daha sonra bu yapıştırıcı çift bindirmeli bağlantıda denenmiştir. Sonuç olarak karbon nano tüp katkısının yapıştırıcının gerilim dayanımını %25 artırdığı görülmüştür [19].

Diğer bağlantı şekillerinde de olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da dayanımın tahmin edilmesi büyük önem taşır. Bu sayede istenilen özelliklerde bağlantılar dizayn edilebilir ve zaman alan testlere gerek kalmaz. Bu konuda pek çok çalışma sonucunda farklı analitik yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler Banea ve Da Silva'nın yayınladıkları çalışmada bahsedilmektedir [20].

1.3. TEZİN AMACI

Yapılan literatür çalışmalarında genellikle yüksek dayanımlı epoksi, poliüretan, akrilik, polaymid, silikon, saynoakrilit esaslı ve yüksek maliyetli yapıştırıcılar kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; 3M tarafından üretilen scotch-weld epoksi yapıştırıcı litresi 1600 TL civarında, Henkel tarafından üretilen Loctite 3430 epoksi yapıştırıcı litresi 5833 TL civarındadır. Ayrıca bu malzemelerin aşırı şartlardaki davranışlarına ilişkin deneysel çalışmalara rastlanmamıştır. Bu bağlamda, bu çalışmada daha düşük fiyatlı olan PT326 poliüretan yapıştırıcı (800 TL) ve epoksi yapıştırıcı (500 TL) kolay ve ucuz olarak elde edilebilen yapıştırıcılar kullanılarak, farklı sıcaklıklarda (-80°C, oda sıcaklığı (23°C), 80°C) yapışma yüzey performansları, mekanik testler ve optik resimler ile belirlenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ

Kompozit malzemeler genelde en az iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya gelerek özellik olarak daha iyi malzeme oluşturması olarak tanımlanabilir. Bu özellikler; mekanik dayanım, elektriksel özellikler vb. olarak açıklanabilir. Kompozit malzemeler genelde sert güçlendirici malzemeler olan fiberler, tanecikler ve bunları bir arada tutan matris malzemelerinden oluşmaktadır [21]. Matris malzemeleri takviye malzemelerini dış etkenlerden korumak, takviye elemanlarını bir arada tutmak ve yükün iletilmesi için kullanılmaktadır. Destekleyici malzemeler ise; matris malzemelerin rijitliğinin artırılması ve yükün kaldırılması için kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajları; hafif olmaları, yüksek özgül sertlik, yüksek özgül mukavemet, kolay şekilde karmaşık şekil verebilme, düşük ısıl genleşme olarak tanımlanabilir. Dezavantaj olarak ise; pahalı olması, üretiminin uzun olması ve dikkat gerektirmesi, düşük süneklik olarak sıralanabilir [22], [23].

Kullanılacak alana göre matris malzemesi ve fiber malzemesi değişiklik göstermektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan malzemeler de göz önüne alınmaktadır. Örnek olarak; beton verilebilir burada çimento matris malzemesi görevi görerek içindeki demir telleri bir arada tutar demir teller ise fiber görevi görmektedir. Sonuçta teller eğilme ve çekmeye karşı dayanıklı iken beton ise basmaya dayanıklıdır. Bir diğer örnek olarak ise kemikte kompozit yapıdan oluştuğu söylenebilir.

Bu malzemeler havacılık sektörünün gelişmesi sebebiyle son 50 yıldır çok hızlı gelişme görmüştür. Bu süreç içerisinde farklı malzeme türleri ve farklı birleştirme yöntemleri kullanılmıştır.

Önceden belirtildiği gibi kompozit malzemeler sundukları yüksek performanstan dolayı özellikle havacılık sektörü olmak üzere otomotiv, spor, denizcilik, enerji sektörü gibi alanlarda tercih edilmektedir. Çizelge 2.1'de yoğun olarak kullanılan karbon fiberlerin diğer malzemelerle karşılaştırması verilmiştir. Burada görüldüğü gibi karbon- fiberin çelik ve titanyumdan daha iyi dayanıma sahip olduğu ve buna rağmen yoğunluğunun

düşük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.1’de ise kompozit malzemelerin alüminyum ve çeliğe göre özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı fiber ve metallerin modüllerinin karşılaştırılması [24].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Young modülü (GPa)	Özgül modül (GPa g/cm ³)
Çelik	7,9	200	25,3
Alüminyum	2,7	76	28
Titanyum	4,5	116	25,7
Cam (fiber)	2,5	72	27,6
Karbon (yüksek dayanımlı fiber)	1,8	295	164
Karbon (çok yüksek dayanımlı fiber)	2,16	830	384
Kevlar 49 fiber	1,45	135	93
Zylon fiber	1,56	280	180

2.2. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeleri incelerken farklı özelliklerine göre sınıflandırmak çalışmayı kolaylaştıran bir faktördür. Kompozit malzemeler birçok özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Örneğin; kullanılan matris malzemesine göre, fiber malzemesine göre, fiber yönüne göre vb. Genelde kompozit malzemeler; matris malzemesine göre polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırılır [25], [26]. Elyaf türlerine göre ise; karbon elyaf katkılı kompozit malzemeler, cam elyaf katkılı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilirler.

2.2.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris; kompozit malzemelerde destekleyici malzemeleri bir arada tutan ve bu malzemelerin dış şartlardan korunmasını sağlayan malzemelerdir. Kompozit malzeme seçiminde matris malzemesinin türü önemli bir parametredir.

Matris malzemeleri kompozit malzemenin sıcaklık çalışma aralığını, kimyasal direncini ve aşınma direncini doğrudan etkilerler. Aynı zamanda ısı ve elektrik geçirgenliği özelliğini de etkilerler. Bir diğer özelliği ise kozmetik olarak kompozit malzemelerin özelliklerini belirlemeleridir.

Matris malzemeleri; polimer, metal ve seramik olabilir. Üretim kolaylığı, düşük maliyeti ve yüksek işlenebilirliği ile polimer malzemeler kompozit sektöründe geniş

olarak kullanılırlar. Polimer matrisli malzemeler bu çalışmada da kullanılmıştır ve ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak işlenecektir.

Polimer malzemeler ise termoset polimerler ve termoplastik polimerler olarak ikiye ayrılırlar. Bu özellikler malzemenin kullanılacağı alanı etkilemektedirler.

2.2.1.1. *Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler*

Polimerler birden çok 'mer' adı verilen yapıdan meydana gelmektedirler. Merler zincir şeklinde birbirine kovalent bağlarla bağlanarak bu yapıyı oluştururlar. Kovalent bağlardan dolayı polimerlerin mukavemetleri ve erime noktaları düşüktür. Polimer tek tip merlerden oluşabileceği gibi farklı çeşit merlerden de oluşabilir. Polimerler bu zincirlerin birbiri ile bağlanması ile meydana gelirler.

Polimerler hâlihazırda en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Daha önce belirtildiği gibi üretimi kolaylığı, düşük maliyetli olması ve şekil vermenin kolay olması bunun sebebidir.

Polimerler sıcaklık ile ilişkili olarak davranışlarına göre termoset polimerler ve termoplastik polimerler olarak sınıflandırılırlar. Termoset polimerler ısıtılıp şekil verildikten sonra tekrar şekli değiştirilemeyen malzemelerdir. Gevrek yapıda fakat dayanımı yüksektir. Oda sıcaklığında polimerleşme sağlanabildiğinden geniş şekilde kompozit malzeme üretimi de kullanılır. Polimerleşme süresi dakikalar veya saatler alabilmektedir. Bu esnada tepkime reçine tipine göre endotermik veya egzotermik olarak gerçekleşebilir. Yaygın kullanılan termoset reçineler ise; epoksi, polyester ve fenoliktir. Çizelge 2.2' de genel kullanımı olan reçinelerin bazı özellikleri verilmiştir.

Epoksi kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın termoset reçinedir. Yüksek mekanik özelliklerine ve korozyon direncine sahiptir. Küçülme oranı düşük olduğundan yapıştırıcı olarak kullanılabilir. Kürlenme sıcaklık aralığı geniş olması diğer bir avantajıdır. Geniş olarak havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan sandviç honeycomb malzemelerde yapıştırıcı olarak kullanılırlar. Yüksek elektrik yalıtımı sayesinde elektrik elektronik parçalarında kullanılırlar.

Fenolik reçineler düşük alev alma özelliğine sahiptir. Sıcaklık dalgalanmalarında geometrik stabilitesi yüksektir. Sheet molding compound (SMC) parçaların reçinesi, pultrüzyon ile üretimde, sarma ile üretim yöntemlerinde kullanılırlar.

Çizelge 2.2. Bazı yaygın kullanılan reçinelerin mekanik özellikleri [25].

Reçine adı	Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)	Gerilme Dayanımı (MPa)
Epoksi	Termoset	1,1-1,4	2100-5500	40-85
Fenol formaldehit	Termoset	1,2-1,4	2700-4100	35-60
Poyester	Termoset	1,1-1,4	1300-4100	40-85
Asetal	Termoplastik	1,4	3500	70
Naylon	Termoplastik	1,1	1300-3500	55-90
Polikarbonat	Termoplastik	1,2	2100-3500	55-70
Polietilen	Termoplastik	0,9-1	700-1400	20-35
Polyester	Termoplastik	1,3-1,4	2100-2800	55-60

Termoplastik polimerler oda sıcaklığında katı halde bulunan ve ısıtılıp şekil verildikten sonra yeniden eski haline getirilebilen malzemelerdir. Geri dönüşümü yapılabilir. Yüksek viskoziteli olduğu için işlemesi zordur. Başlıca termoplastikler; polietilen, polipropilen, akrilik ve polyamid.

Kompozit üretiminde kullanılan reçineler sıvı polimerlerdir. Pek çok reçine şekli kullanılmaktadır. Reçine türleri kullanılacak alana göre seçilir. Bu reçineler termoset veya termoplastik özelliği gösterirler.

2.2.1.2. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozitler metal malzemelerin matris malzeme olarak kullanıldığı ve destekleyici olarak metal veya metal olmayan malzemelerin kullanıldığı malzemelerdir. İlk olarak uzay mekiği üretiminde kullanılmıştır [22]. Genel olarak alüminyum, magnezyum, nikel, bakır, titanyum matris malzeme olarak kullanılmıştır. Güçlendirici malzeme olarak; seramikler, oksitler ve karbürler kullanılmaktadır. Metal matrisli malzemeler; parçacık takviyeli, whisker takviyeli, kırık lif takviyeli, sürekli lif takviyeli olarak sınıflandırılabilir [26].

Metal matrisli kompozit malzemeler diğer takviye edilmeyen metallere göre daha sert ve mukavemetli olmaktadır. Bunun yanı sıra yüksek sıcaklık dayanımı, polimer matrisli kompozit malzemelere göre aşınma dayanımı yüksek ve elektrik iletimi sağlamaktadır. Çizelge 2.3 farklı metal matrisli kompozit malzemelerin özelliklerini göstermektedir. Burada Al6061 matris malzemesinin tek başına ve farklı destekleyici malzemeler ile gösterdiği değişim görülebilmektedir. Destek elemanı kullanılan Al6061 de mukavemetin ve Young modülünün iki katına çıktığı ama yoğunluğun bu oranda

artmadığı görülmektedir. Fiber destekleyici kullanılan Al6061 de ise diğerlerine göre daha yüksek modül ve mukavemet görülmüştür. Bunun sebebi ise fiberlerin yük taşıma kapasitesinin partiküllerden yüksek olmasıdır.

Çizelge 2.3. Farklı metal matrisli kompozit malzemelerin özellikleri [22].

Matris	Destekleyici	Destekleyici Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Young Modülü (GPa)	Mukavemet (MPa)
Al6061	Yok	-	2,7	69	241
Al6061	30% SiC	Partikül	2,9	120,7	552
Al 7090	30% SiC	Partikül	3	127,5	772
Al 2124	20% SiC	Kırpık Fiber	2,9	124,1	745
Al 6061	Grafit	Tek Yönlü Fiber	2,5	335,1	827
MgAZ91C	Grafit	Tek Yönlü Fiber	2	359,9	807
Cu	SiC	Tek Yönlü Fiber	6,4	206,8	1034
Al	SiC	Tek Yönlü Fiber	2,8	206,8	1462
Ti	SiC	Tek Yönlü Fiber	3,9	213,7	1655

2.2.1.3. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları ile tanınırlar. Yüksek sıcaklık dayanımı istenen ve yüksek sertlik istenen uygulamalarda kullanılırlar. Bu yönlerine rağmen seramiklerin gevrek olmaları ve düşük darbe dayanımlarının olması istenmeyen yönleridir. Bu sebeple katkı maddeleri eklenmesi seramik malzemeler için önemli hale gelmiş ve sonuçta katkılı seramik malzemelerin daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu katkılı seramik malzemeler seramik matrisli kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklığın bulunduğu havacılık sektörü, uzay araçları ve otomotiv sektöründe motor kısımlarında kullanılmaktadır.

2.2.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemeler

Takviye elemanları; adından da anlaşıldığı gibi kompozit malzemelerde matris malzemesini desteklemek için ona daha iyi özellikler kazandırmak için kullanılırlar. Bu özellikler dayanım, sertlik, ısı ve ses yalıtımı olarak örneklendirilebilir. Farklı tipte ve farklı malzemedan yapılmış takviye elemanları bulunduğu için kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında bu malzemeler kullanılırlar. Genel olarak; elyaf (fiber) destekli, parçacık destekli, tabakalı kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Yaygın kullanılan elyaf takviyeli kompozit malzemeler ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı anlatılacaktır

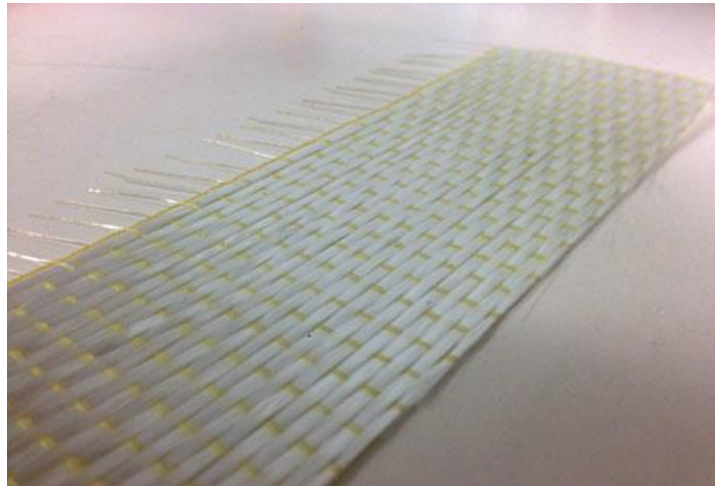
2.2.2.1. Elyaf Destekli Kompozit Malzemeler

Elyaf (fiber) malzemeler daha önceden de belirtildiği gibi kompozit malzemelerde yaygın şekilde kullanılır. Yüksek dayanıma ve düşük özgül ağırlığa sahiptirler. Isıl ve elektrik yalıtımı özelliklerine de sahiptirler. Kompozit malzemelerin kullanılma alanına göre farklı malzemeler olabilirler. En yaygın kullanılan elyaf malzemeleri; karbon, cam, aramid, boron elyaf olarak sayılabilir. Elyaf lar pek çok yapıda bulunabilirler. Örneğin; uzun şekilde, kısa şekilde, örülmüş şekilde. Çizelge 2.4’ de bazı elyaf ların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.4. Bazı elyaf ların özellikleri [22].

Elyaf Tipi	Yoğunluk g/cc	Gerilme Dayanımı MPa	Gerilme Modülü GPa	Kopma gerinimi %
Cam (E-Glass)	2,5	3447	69	4,9
Cam (S-Glass)	2,5	4585	83	5,7
Karbon	1,8	4137	228	1,8
Aramid	1,4	3606	83	4,0
Boron	2,5	3447	386	0,9

Cam elyaf; camdan üretilen içerisinde yüksek oranda silika (SiO_2) bulunduran malzeme çeşididir. Genelde polimer matrisli kompozit malzemelerde destekleyici olarak kullanılırlar. Yüksek dayanım sunması, ucuz olması, yalıtım özelliklerinin olması uzun sürelerdir tercih edilmesine sebep olmuştur. Farklı alanlarda kullanım için farklı cam elyaf lar üretilmiştir. Bunlar; E-Glass, C-Glass, ve S-Glass olarak sınıflandırılabilir. Çizelge 2.5 farklı cam elyaf ların içeriğini göstermektedir.



Şekil 2.1. Örülmüş tek yönlü cam elyaf [25].

E-Glass elyaf çoğunlukla elektrik yalıtımı uygulamalarında kullanılır. Yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. En yaygın kullanılan elyaf türüdür ve bu sebeple ucuzdur. Üretilen cam elyafların %90'ını oluşturmaktadırlar [27]. Pek çok elyaf türü gibi uzun, kırılmış, örülmüş şekilde bulunur. Asitli ortamlara dayanımı düşük olduğu için bu alanlarda kullanılamazlar.

Çizelge 2.5. Farklı cam elyafların içeriği [25].

Elyaf Tipi	Malzeme					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO
E	52-56	12-16	5-13	16-25	0-2	0.6
C	65	4	6	14	8	3
S	65	25	-	-	-	10

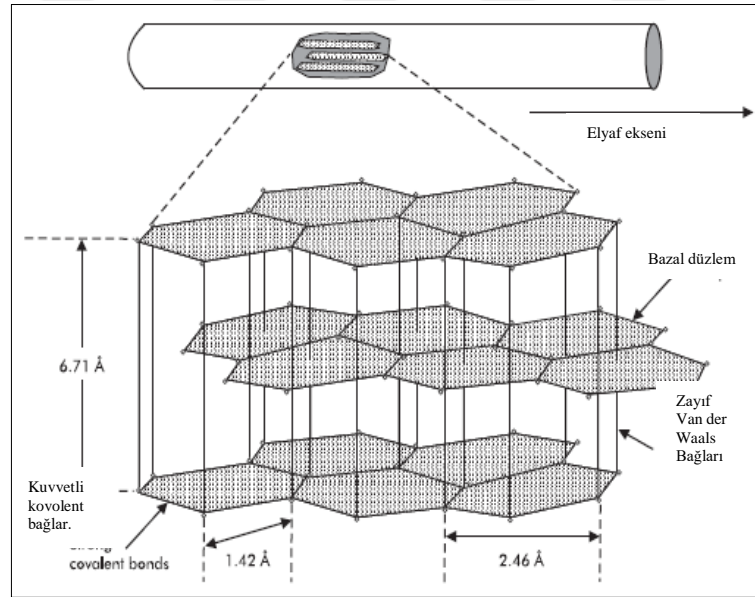
S-Glass tipi elyaf ise daha yüksek gerilim dayanıma sahiptir. Diğer cam elyaflara göre en yüksek gerilim dayanımı bu elyaftır. Çizelge 2.4'de S-Glass elyafların diğer elyaflara göre dayanımı karşılaştırılmıştır. Yüksek dayanımı sayesinde havacılık ve uzay araçlarında kullanılmaktadır. Yüksek fiyatından dolayı geniş uygulama alanı bulmamaktadır [25].

C-Glass elyaf ise E-Glass elyafa göre daha yüksek kimyasal dayanıma sahiptir. Bu nedenle kimyasal ortamlarda yaygın kullanılır [27].

Karbon elyaf; popüler olan elyaf türüdür. Dayanım ve sertliği yüksektir. Cam elyafların bazı uygulamalarda yetersiz kalması ve yüksek dayanım ihtiyacı karbon elyafların geliştirilmesine sebep olmuştur. Özellikle havacılık sektörünün ve uzay araçlarının geliştirilmesi esnasında vazgeçilmez malzeme haline gelmiştir. Üretilen malzemeler arasında en yüksek özgül dayanıma sahip olan karbon elyafların ısıl genleşme katsayısı cam elyafa göre düşüktür. Elyafın dayanıklılığı içyapısında bulunan kristal biçiminde bağlanmış karbon atomlarıdır [22]. Kristal yapı ne kadar büyükse dayanım okadar artmaktadır. Karbon elyaf, karbon tabakaların birbiri ile Van der Waals bağları oluşturması ile meydana gelmektedir. Bu tabakaların elyaf eksenine boyunca uzanmaları sayesinde eksen boyunca dayanım oldukça yüksektir [28]. Şekil 2.3'de karbon elyafların iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Karbon elyaf [25].



Şekil 2.3. Karbon elyaf iç yapısı [22].

Karbon elyaflar çoğunlukla iki farklı hammaddeden üretilmektedir. Bunlar; poliakrilonitrilin (PAN) ve zifttir [28]. PAN esaslı karbon elyaflar üretilmesi zor olsa da tercih edilen malzemelerdir. Çekme dayanımı yüksek olmakla beraber zift esaslı elyaflara göre düşük elastik modülüne sahiptir. Elektriksel ve termal yalıtım açısından zift esaslı karbon elyaflar daha avantajlıdır. Çizelge 2.6'da bazı karbon elyafların mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.6. Bazı karbon elyafların mekanik özellikleri [22].

Fiber Tipi	Gerilme Dayanımı MPa	Gerilim Modülü GPa	Kopma Gerinimi %
PAN esaslı karbon elyaf			
Standart modül	3447	228	1,6
Ultra yüksek modül	5378	276	2,1
Zift esaslı karbon elyaf			
Standart modül	1903	379	0,5
Ultra yüksek modül	3620	724	0,5

Karbon elyaflar üretimde birkaç aşamadan geçerler. Bu aşamaların her birinde farklı özellikler kazandırılır. Karbonizasyon, grafitizasyon gibi işlemlerden geçirilen hammadde daha sonra istenen özelliklere kavuşturulur.

2.3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

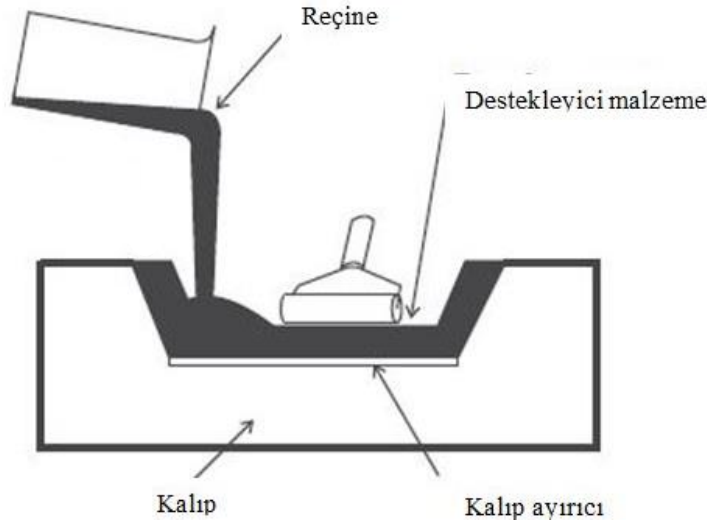
Önceki bölümlerde farklı sınıflandırma metotlarına göre kompozit malzemeler anlatılmıştır. Bu bölümde ise kompozit malzemelerin üretim metotları ele alınacaktır. Kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılacak üretim şekli malzemenin elyaf türüne, şekline ve malzemede kullanılacak matris çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Örneğin; üretilecek malzemenin dayanımı çok önemli değilse ve hızlı üretilmesi isteniyorsa el yatırma yöntemi ya da pres yardımıyla üretilebilir. Kullanılacak malzemeden yüksek dayanım bekleniyorsa belirli sıcaklık ve basınç altında kürlenmiş matrislerin kullanılması gerekecek ve bu malzemenin üretim şeklini değiştirecektir. Her üretim metodu kendi içerisinde avantaj ve dezavantajları vardır. Bunlar göz önünde bulundurularak malzeme tasarımı yapılmalıdır. Kompozit malzemelerin üretiminde son şekillendirme genelde üretim esnasında gerçekleşmekte ve sonrasında kırılma ve yüzey işleme gibi prosesler gerçekleştirilmektedir.

2.3.1. El Yatırma Yöntemi

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın ve basit üretim şeklidir. Büyük veya küçük parçaların üretilmesinde kullanılabilir. Maliyeti düşük bir üretim yöntemidir. Yüzey kalitesi yüksek ürünler üretilir. Bu yöntemle büyük karışık geometrilerde parça üretilir. İş yükü yüksek bir üretim türüdür ve parçanın sadece bir yüzü yüksek kalitede çıkar. Parçada eşit dağılımın elde edilmesi zordur. Karbon fiber takviyeli kompozit malzeme veya cam fiber takviyeli kompozit malzeme üretiminde kullanılabilir. Kürlenme fırınlarına gerek yoktur.

Bu üretim metodunda en yaygın olarak cam elyaf takviyeli polyesterdir. Kalıp malzemesi sert yüzeyi bulunan malzemelerden genelde polyester, epoksi reçine, beton, tahta, alüminyum ve metal gibi malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan kalıp malzemesi seçilirken parça üretiminde kullanılacak reçinenin kurlenme sıcaklığı ve basıncı göz önüne alınmalıdır. Kalıplar dişi ya da erkek olabilir.

Bu üretim şeklinde kuru elyaflar bir kalıba yerleştirilir. Kalıp üretilen malzemenin kolay ayrılması için kalıp ayırıcı malzeme ile kaplanır. Yüzey kalitesini arttırabilmek için genelde jel kot kullanılır. Matris malzemesi yerleştirilen elyafların üzerine dökülür ve rulo yardımıyla matris malzemesi eşit şekilde yayılır ve hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Daha kalın malzeme için bu yöntem tekrarlanır ve malzeme kurlenmeye bırakılır. Genelde bu yöntemde sıcaklık ve basınca gerek yoktur. Şekil 2.4'te elle yatırma metodu basit olarak gösterilmiştir.



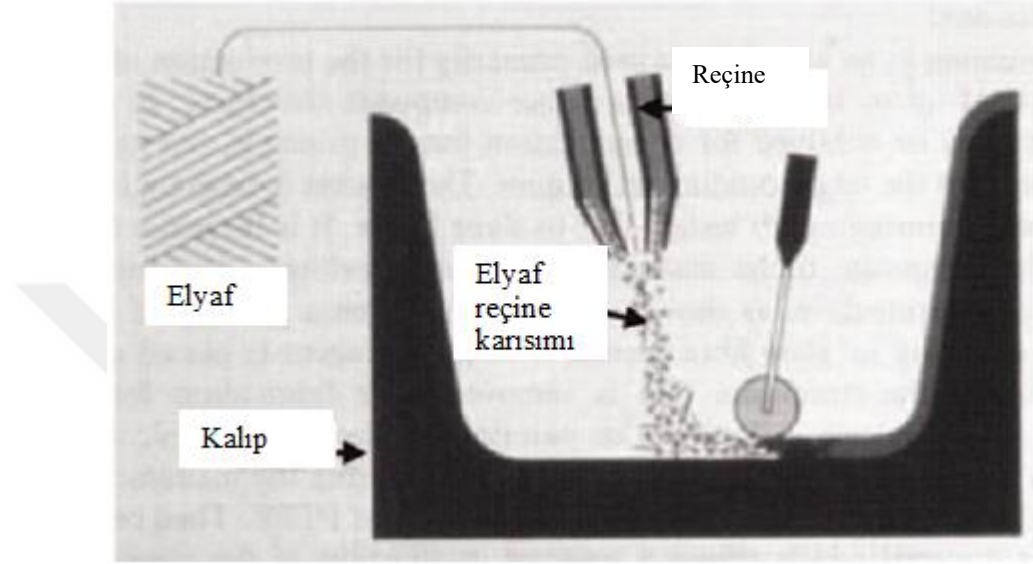
Şekil 2.4. El yatırma yöntemi [29].

El yatırma yönteminin farklı uygulaması da püskürtme yöntemidir. Bu yöntemde uzun elyaf kırpıcı tabanca ile kırılır ve yaklaşık 25 ve 75 mm uzunluğa getirilir. Kırılan elyaf reçine ile karışarak kalıba püskürtülür. Zaman açısından daha avantajlı olsa da pratik olmayan ve maliyetli bir işlemdir. El ile yatırma yönteminde olduğu gibi bu yöntemde elyafların yönleri kolay şekilde tayin edilemez. Diğer bölümlerde anlatıldığı gibi elyaf yönü malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen bir faktördür.

El yatırma yönteminde prepreg (pre-impregnated) malzemeler kullanılabilir. Burada kuru elyaf kullanılan yöntemde göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olan malzemeler üretilir. Bu yöntemde el yatırma işlemi sonlandığında kurlenme için vakum ya da otoklav

gereklidir.

El yatırma yöntemi ile botlar, havuzlar, tanklar üretilebilir. Havacılık sektöründe de bu yöntemle üretilen parçalar kullanılmaktadır. Günlük hayatta kullanılan spor malzemeleri, bisiklet parçaları, araç parçaları bu yöntemle üretilir. Şekil 2.5'te tipik el yatırma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Püskürtme yöntemi ile üretim [24].

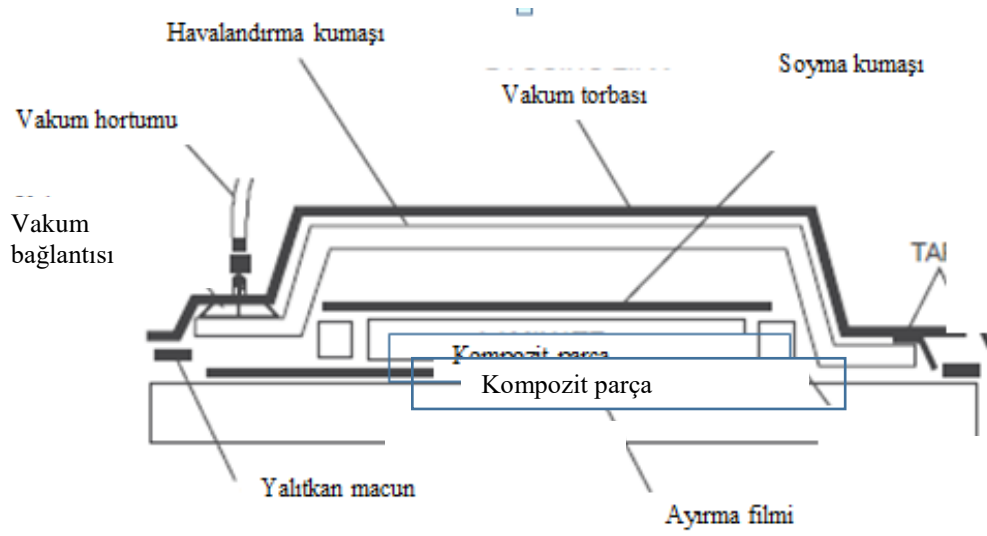
2.3.2. Vakum Torbalama İle Üretim

El yatırma ile üretim yönteminde üretilen parçalarda hava birikebilir. Havanın varlığı malzemenin kalitesini düşürmektedir. Bu sebeple üretim esnasında vakum uygulanır ve bunun önüne geçilmiş olur.

Bu yöntemde malzeme kalıba yerleştirilir. Kalıp daha önceden ayırıcı film ile kaplanır. Bu sayede malzemenin kalıba yapışması engellenir. Daha sonra yapıştırma yapılacak parçalar için yüzeyde yapışmayı arttıracak iz bırakması için ayırma kumaşı (peel-ply) parçanın üzerine serilir. Bunun üzerine ise havanın kolay tahliyesi için özel bir örtü serilir (breather). Vakum uygulanabilmesi için plastik bir torba ile üstü örtülür ve vakum bantları ile sızdırmazlık sağlanır. Son olarak vakum sağlanır. Vakum sağlandıktan sonra kullanılan malzeme türüne göre kürlenme işlemine bırakılır. Şekil 2.6'da vakum torbalama şematik olarak gösterilmiştir.

Bu üretim metodunda işçilik yüksektir ve dikkatli olunması gerekmektedir. Sızdırmazlığın iyi şekilde sağlanması önemlidir. Aynı zamanda vakum torbasının

seçimi yüksek sıcaklıklara dayanıklı olacak şekilde seçilmelidir. Vakum yardımı ile üretim metodunda üretilebilecek parçaların büyüklüğü kütleme fırını veya otoklav büyüklüğüne göre değişmektedir.

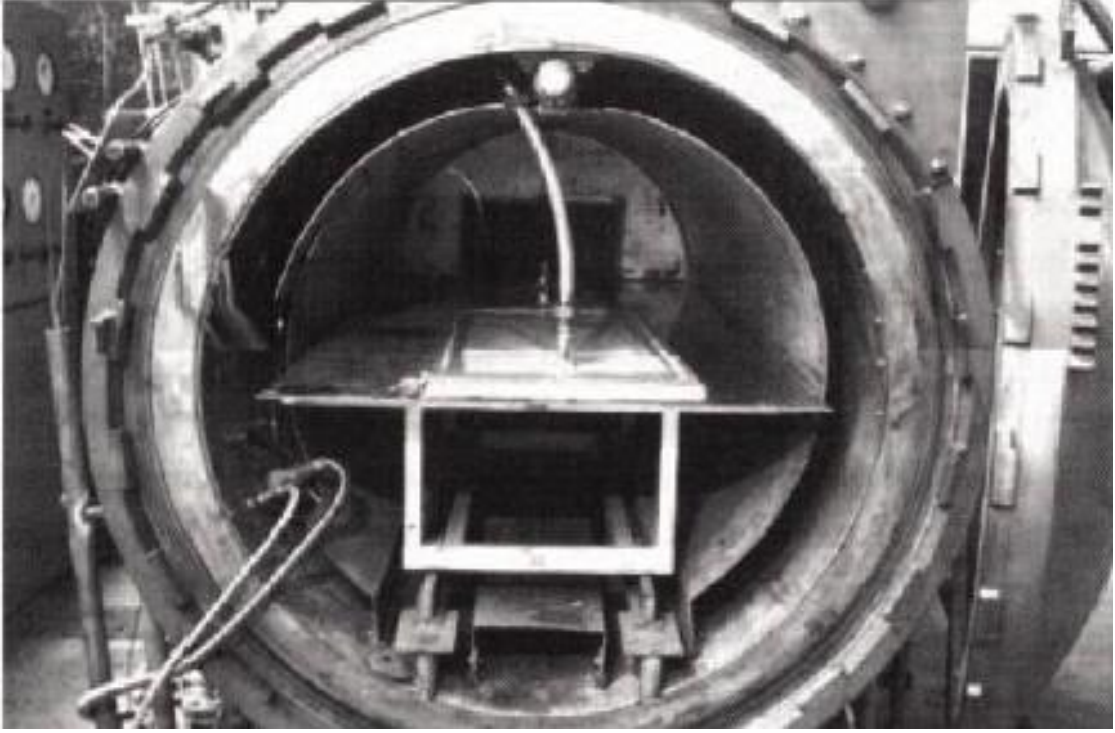


Şekil 2.6. Vakum yardımı ile üretim [29].

2.3.3. Otoklav ile Üretim

Otoklav basınçlandırılmış fırın olarak tarif edilebilir. Vakum ile üretim prosesine benzer bir üretim metodudur. Karmaşık ve yüksek kalitede parçaların üretilmesinde kullanılır. Üretim hızı olarak orta seviyelerdir. Vakum uygulanan parça otoklav fırınına koyulur ve yüksek basınç verilir. Basınç gaz ile sağlanır. Bu sayede parça içindeki uçucu maddeler çekilir ve destekleyici malzemenin reçine ile ıslanması artar. Bu esnada sıcaklık artırılır ve malzemenin kürlenmesi için gereken şartlar sağlanır.

Uygulanan yüksek basınç sayesinde malzeme içerisinde bulunan hava, uçucu maddeler ve partiküller vakum portlarına aktarılır. Bunun sonucunda ise destekleyici maddelerin ıslanması artırılır ve reçine malzemesinin akışkanlığı artar. Uygulanan sıcaklıkla ise reçinenin viskozitesini düşürerek destekleyici maddenin ıslatma performansını artırması sağlanır. Şekil 2.7’de otoklav gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Otoklav [24].

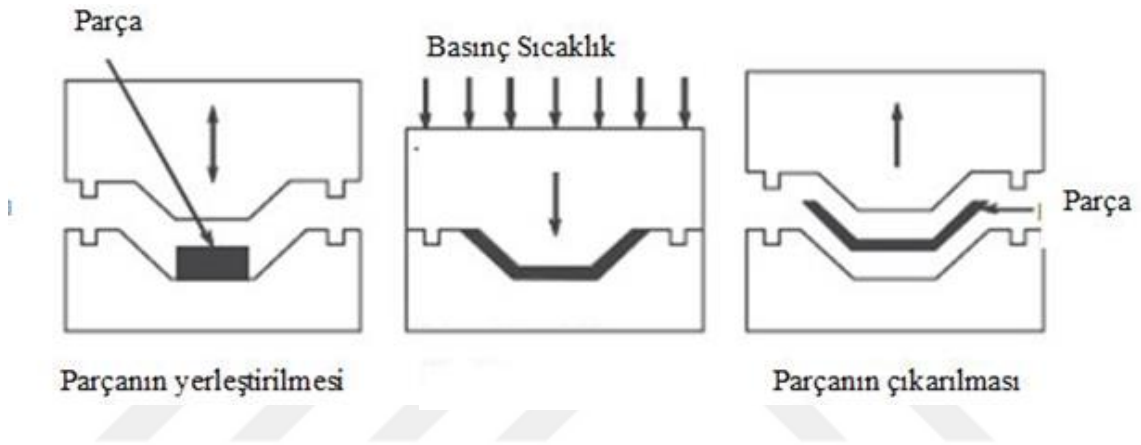
Otoklav silindirik şeklinde üretilir. Uç tarafları kubbe şeklinde tasarlanır. Yatay olarak yerleştirilir. Basınç ve sıcaklık kontrollü olan versiyonları üretilmektedir. Bu sayede kürlenme için gerekli olan şartlar kolayca sağlanabilir. Büyük parçaların üretimine uygundur.

Otoklav ile üretimde kullanılacak kalıplar genelde tek parça halinde dişi veya erkek kalıplardır. Kalıp ile temas eden malzeme yüzeyleri daha kaliteli olmaktadır. Kalıp malzemeleri üretilecek parçanın kürlenme sıcaklığı ve basıncına göre seçilmektedir. Genelde üretimde polyester, epoksi, alüminyum, çelik malzemedan yapılmış kalıplar kullanılmaktadır. Otoklav üretiminde yüksek enerji tüketimi bulunmaktadır. Basıncılı gaz olarak nitrojen gazı kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu üretim şekli uzun zaman almaktadır. Kalın parçaların üretilmesi gereken durumlarda kürlenme işlemi bir kaç kez yapılması gerekmektedir. Pres ile üretim için uygun olmayan büyük parçaların üretilmesi için ekonomiktir. Üretim hızı üretilecek parçanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Aynı zamanda malzemenin elle yatırılması zaman kaybına sebep olan bir diğer işlemdir. Kürlenme süreci de zaman kaybını arttıran etkenlerdendir. Bazı büyük parçaların kürlenmesi 16 saate kadar sürmektedir.

2.3.4. Pres Yardımı ile Üretim

Pres ile üretim yönteminde parça metal dişi ve erkek kalıplar ile pres tezgahında şekillendirilirler. Üretim sırasında basınç yanında sıcaklıkta uygulanır. Kürlenmiş parça kalıplardan çıkarılır. Şekil 2.8’de pres ile üretimin aşamaları gösterilmektedir.

Hızlı ve yüksek üretim adetlerine çıkılabilir. Basit bir üretim şeklidir. İşçilik oranı düşüktür. Üretilen parçalar arasında farklılıklar oluşmaz. Uzun elyafli kompozit malzemelerinin üretimi yapılamadığı için genelde üretilen parçalar yüksek dayanım istenen uygulamalarda kullanılamaz. Küçük parçalarda dakikada 15, büyük parçalarda ise saatte 24 parça üretilebilir.



Şekil 2.8. Pres ile üretim [29].

Pres ile üretimde kullanılan pres tezgâhları diğer tezgâhlarla aynıdır. Tezgâh 2 farklı metal parçadan oluşur. Parçalardan biri hareketli pistonların itmesiyle basınç sağlar. Pistonlara ise kuvvet hidrolik motor sayesinde verilir. Kullanılan kalıp malzemeleri çeliktir. Çelik yüksek basınca ve sıcaklığa dayanıklı olması bunun sebebidir. Kalıpların yüzeyleri üretilen malzemenin kolay ayrılması ve çizilmeye dayanıklı olması için krom kaplama yapılır.

Pres ile üretimde genelde iki tipte malzeme kullanılır. Bunlar SMC ve BMC (Bulk Molding Compound) olarak söylenebilir. Genelde bu iki malzeme polyester matris malzemesi ve cam elyaf destekleyici malzemesi kullanılarak üretilir.

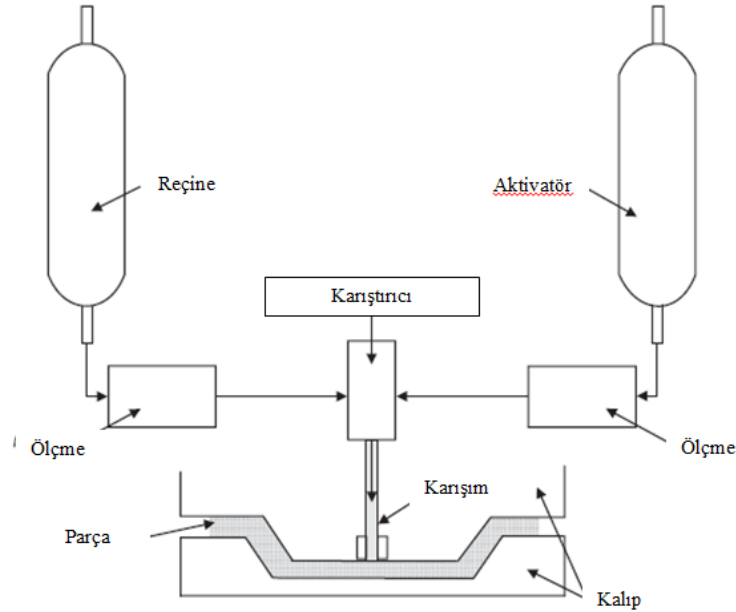
BMC hamur şeklinde reçine ve kırık fiber karışımıdır. Genellikle fiber oranı %20 ve %50 arasındadır. Karışım kalıp boşluğuna dökülür ve ardından kalıplar kapanarak kürlenmeye bırakılır. BMC kullanılan üretimde viskozite önemli bir parametredir. Yüksek viskozite malzemenin iyi dağılmasına sebep olurken düşük viskozitede ise elyaflar reçine malzemesi ile birlikte hareket etmeyebilir.

SMC malzeme BMC malzemeye göre daha uzun fiberler bulundurur. Taşıyıcı filmler arasında reçineye kırılmış fiberler eklenir ve sac şeklinde kullanıma sunulur. Pres öncesi filmler sökülür ve kalıplara yerleştirilir.

2.3.5. Reçine İnfüzyon İle Üretim

Reçine infüzyon yöntemi el yatırma yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Bu yöntemde dişi ve erkek kalıp kullanılmaktadır. Kuru elyaf dişi kalıba yatırılır. Erkek kalıp dişi kalıp üzerine kapanır ve reçine pompa vasıtasıyla kalıp içerisine verilir. Kalıpta havanın çıkarılması için havalandırma boşluğu bırakılır. Kalıp dolduğunda reçine transferi durdurulur. Reçine infüzyon üretim şekli termoplastiklerde kullanılan enjeksiyon sistemine benzerlik göstermektedir. Fark olarak ise burada reçine malzemesi önceden ısıtılıp sıvı hale getirilmektedir. İşlem tamamlandığında kullanılan reçine tipine göre oda sıcaklığında bırakılır ya da fırında kürlenmeye bırakılır. Kürlenme tamamlandıktan sonra çıkartma pimleri ile parça çıkarılır. Şekil 2.9'da Reçine infüzyon ile üretim şekli görülmektedir.

Reçine infüzyon üretiminde en önemli parametre kalıp tasarımıdır. Üretilecek parçanın son şeklini kalıp belirler bu hem avantaj hem de dezavantaj oluşturur. Kalıp üretiminde yapılacak hatalar üretim sırasında şekil bozuklukları meydana getirebilir.

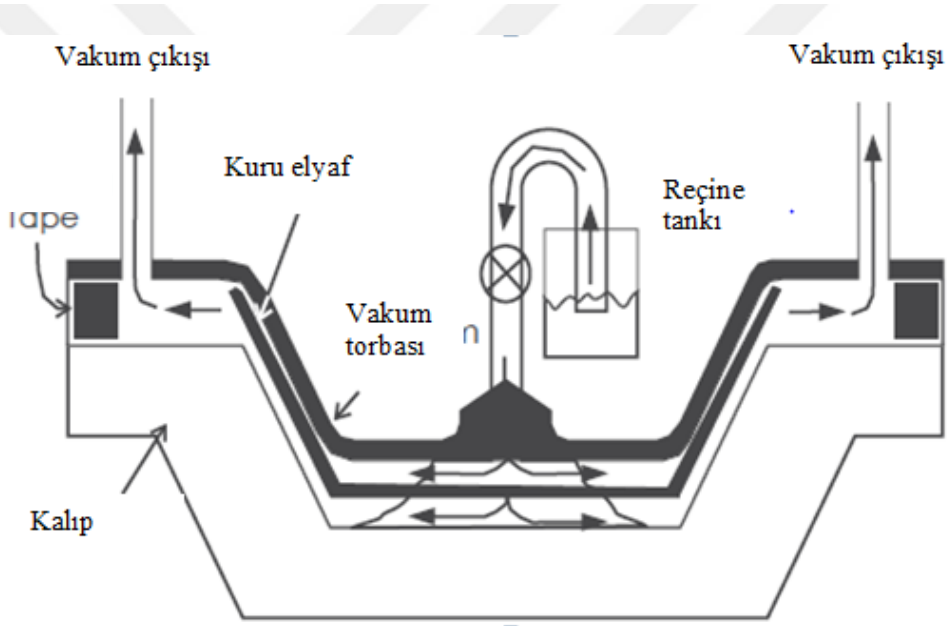


Şekil 2.9. Reçine infüzyon ile üretim şeklinin şematik görünümü [22].

2.3.6. Vakum İnfüzyon Üretim Metodu

Bu yöntemde diğer infüzyon yöntemine benzerlikler gösterir. Kuru elyaf dişi kalıba yatırılır üstü vakum torbası ile kapatılır ve vakum uygulanır. Tankın içinde bulunan reçine vakum hortumu ile kalıba çekilir ve kalıp dolduğunda süreç tamamlanır. Parça kürlenmeye bırakılır. Reçine infüzyon yöntemine göre kalıp maliyeti düşük ve işçilik maliyetleri azdır.

Kullanılacak kalıpların maliyeti düşük olmasının sebebi bu yöntemde kullanılan reçinelerin yüksek sıcaklık ve basınçta kürlenme gereksinimi bulunmamasıdır. Bunun aksi durumlarda ise kalıp maliyetleri artacaktır. Sızdırmazlık önemli olduğu için vakum torbasının yerleştirilmesi sırasında sızdırmazlık elemanlarının uygulanması önem taşımaktadır. Şekil 2.10'da vakum infüzyon ile üretimin şekli verilmiştir.



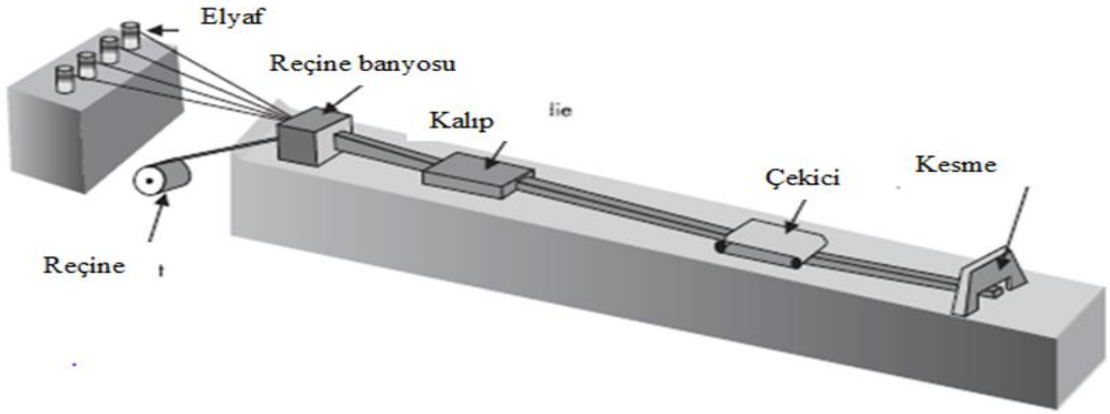
Şekil 2.10. Vakum infüzyon metodu [29].

2.3.7. Pultrüzyon

Sabit kesitli ve istenilen uzunlukta kompozit malzeme üretiminde kullanılır. Hızlı bir üretim yöntemidir ve yüksek üretim sayılarına ulaşılır. Metallerin şekillendirilmesinde kullanılan çekme yöntemine benzerdir. Reçine banyosundan geçen elyaflar çekilerek ısıtılmış kalıptan geçer ve burada kürlenerek istenilen şekilde çıkarlar ve daha sonra belirlenen uzunluklarda kesilirler. Şekil 2.11'de Pultrüzyon üretim şekli görülmektedir.

Bu yöntemde çalışma maliyetleri düşüktür. Maliyeti arttıran özellikler ise krom kaplı kalıplar ve besleme sistemleridir. İstenilen tipte elyaflar üretimde kullanılabilir fakat

cam elyaf yaygın kullanılır. Polyester, vinil ester, epoksi gibi reçineler kullanılabilir.



Şekil 2.11. Pultrüzyon şematik görünümü [22].

2.3.8. Sarma Yöntemi

Sarma yönteminde elyaflar reçine banyosundan geçirilerek silindirik, yuvarlak ya da farklı şekillerde olan mandrel üzerine sarılır. Sarma işleminde istenilen kalınlığa ulaşıldığında işlem bitirilir. Elyaf sarma işlemi mandrel eksenine boyunca, eksene dik ya da helisel biçimde yapılabilir. Parça kürlenmeye bırakılır. Kürlenme sağlandıktan sonra parça içerisindeki mandrel çıkarılır.

Mandreller birkaç farklı tipte üretilmektedir. Basit olanı; genelde basıncı kap yapımında kullanılan mandrellerdir. Bu tipteki mandreller gaz sızmasını engellemek için üretilen kompozit malzemenin içerisinde bırakılır. Diğer uygulamalarda mandrel parçalı dizayn edilir ve parça üretiminden sonra ise çıkarılır.

Elyaf sarma yöntemi ile borular, basınç tankları, su tankları, hava tankları, güç aktarma şaftları, rüzgâr türbini kanatları üretilir. Üretim hızı üretilecek parçanın boyutuna ve mandrel tipine bağlıdır.

2.3.9. Enjeksiyon ile Üretim

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemdir. Termoplastik malzemeler gerilim dayanımı ve esnekliği yüksek olduğu için bazı uygulamalar için mükemmel sonuçlar vermektedir. Termoplastik malzemelere eklenen destekleyici malzemelerin termoplastik özelliklerini %300'e kadar iyileştirdiği gösterilmiştir [22]. Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere bu doğal bir sonuçtur çünkü destekleyici maddeler yükün çoğunluğunu taşımaktadır. Destekleyici malzemenin

termoplastik malzemenin sünekliğini azalttığı da unutulmamalıdır.

Matris malzemesi paletler halinde besleyiciye konur ve buradan karıştırıcı vidaya yer çekimi vasıtasıyla iner. Vida polimer malzemenin ısıtılan bölmeğe aktarılmasını sağlar. Vidanın özel tasarımı sayesinde polimer malzeme aynı zamanda mekanik olarak sürtünme kuvvetleri sayesinde ısınır ve giderek genişleyen vida sayesinde basıncı yükseltilir. Eriyen malzemeye belirli bir noktadan sonra destekleyici malzeme eklenir ve vidanın hareketi durdurulur. Eriyik madde kalıba aktarılır. Belirli bir soğuma süresinden sonra çıkartma pinleri vasıtasıyla parça çıkartılır.

Kullanılan kalıplar tek boşluklu ya da üretilecek parçalara göre çoklu boşluklu olabilir. Çoklu boşluklu kalıplarda farklı parçaların üretilmesi mümkündür. Kalıplar istenildiği takdirde parçaların kolay çıkarılması için çıkarıcı pinler de eklenir. Çoklu üretim yapılacak kalıplar maliyet açısından yüksektir fakat yüksek üretim adetlerine çıkılması açısından önemlidir.

Enjeksiyon ile üretimde dikkat edilmesi gereken destekleyici malzemelerin yönleridir. Üretilecek malzemenin mekanik özellikleri destekleyici malzemenin yönünde daha iyi olduğu göz önüne alınırsa akış kanallarının dizaynı önemli hale gelmektedir. Tek yönlü dizilim isteniyorsa kanallar dar yapılmalıdır. Elyafın düzensiz olması isteniyorsa kanalların geniş olması ya da erime sıcaklığının artırılması çözüm olarak görülebilir.

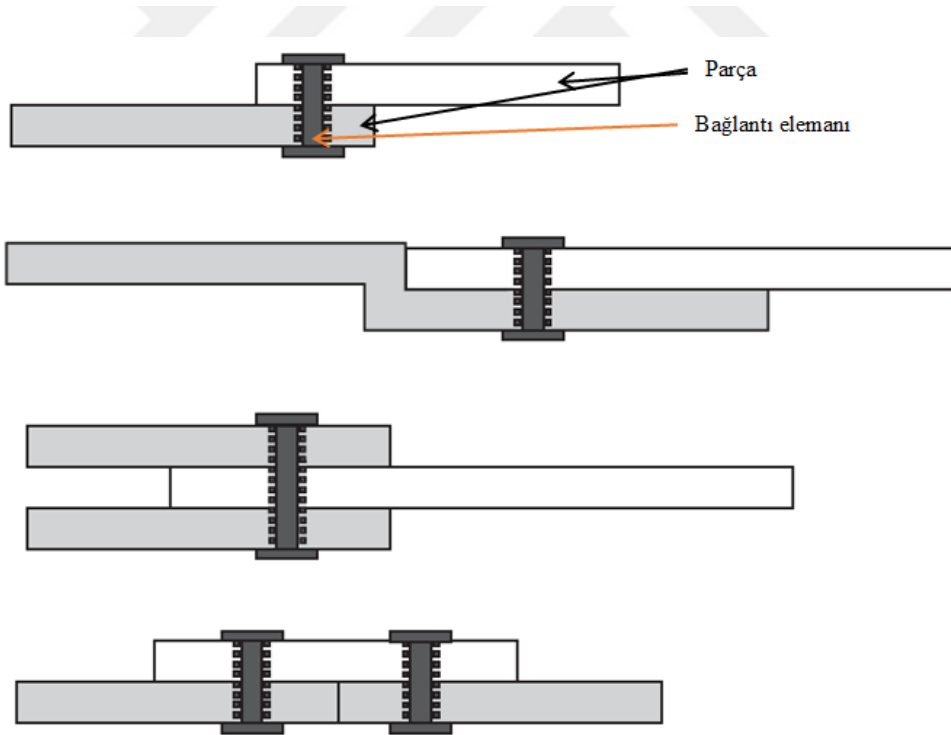
2.4. POLİMER ESASLI KOMPOZİT MALZEME PARÇALARININ BİRLEŞTİRİLMESİ

Önceden bahsedildiği gibi kompozit parçalar diğer malzemelere göre üstün özellikler sunmaktadır. Bu özellikler sayesinde pek çok sektörde kullanılmaktadırlar. Gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır. Bu sebeple özel olarak tasarlanan parçaların kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Geometrik olarak karmaşık parçaların üretilmesi, büyük parçaların üretilmesi bu parçaların tek seferde üretilmesini zor hale getirmiştir. Bundan dolayı üretilen malzeme birden fazla parçadan oluşmaktadır. Parçaların birleştirilmesi bu sebeple önemli hale gelmektedir. Kompozit malzemelerde metaller gibi farklı birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar; mekanik birleştirme ve yapıştırıcı ile birleştirme olarak özetlenebilir. Son zamanlarda kaynak birleştirmeler de kullanılmaktadır. Her iki birleştirme yönteminin aynı anda kullanıldığı hibrit birleştirmeler yaygın olarak kullanılır.

Kullanılacak alana göre birleştirme yönteminin belirlenmesi önemli bir konudur. Dış şartlar, kullanılacak parçaya gelecek yükler parçaların geometrisi gibi etkenler bu seçimde dikkat edilmesi gereken başlıklardır.

2.4.1. Mekanik Birleştirmeler

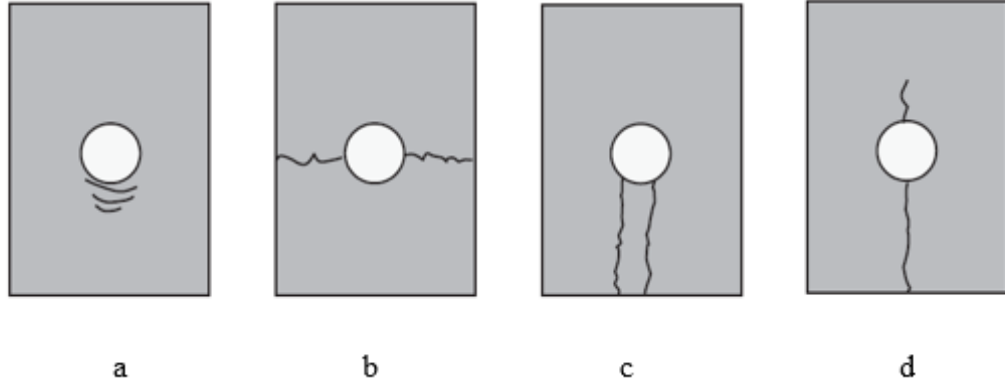
Mekanik birleştirme, iki kompozit parçanın ya da kompozit-metal birleştirmelerinde kullanılan birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde perçin, cıvata veya vida birleştirilecek parçalarda açılan deliğe oturtulur. Mekanik birleştirmelerin avantajları; kolay muayene edilebilmeleri, dış şartlardan etkilenmemeleri ve birleştirme için belirli süre beklemeye gerek olmaması sayılabilir. Bu listelenen avantajlara rağmen kompozit malzemelerden beklenen bazı özelliklerden dolayı mekanik birleştirmelere alternatif olarak yapıştırıcı kullanılan birleştirmeler geliştirilmiştir. Örneğin; mekanik birleştirmelerde açılan deliğin parçanın dayanımını azaltması çok önemli bir dezavantajdır. Diğer olumsuz yönü ise mekanik elemanın etrafında oluşan stres konsantrasyonu ve ağırlığın artmasıdır. Şekil 2.12’de farklı mekanik birleştirmeler gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Mekanik birleştirme örnekleri [22].

Mekanik bağlamalarda diğer bir önemli kısım ise mekanik bağlantı elemanıdır. Bu elemanlar cıvata, perçin veya vida olabilir. Bu elemanların ilk sıkımda parçaya zarar vermemesi için çapı büyük seçilir. Sıkma esnasında verilecek hasar paça dayanımı

azaltacaktır. Oluşan stres konsantrasyonları da çeşitlidir. Bunlar; kayma yükü altında oluşan hasarlar, çekme yükü hasarı, çatlama, sıkma hasarı olarak sıralanabilir [23]. Şekil 2.13’de bu hasarlar gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Mekanik birleştirmelerde hasar tipleri [22] a. Sıkma hasarı b. Çekme hasarı c. Kayma hasarı d. Çatlama

2.4.2. Yapıştırıcı Kullanılan Birleştirmeler

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi mekanik birleştirmelerin getirdiği kısıtlamalar yapıştırıcı kullanılan bağlantıların geliştirilmesine sebep olmuştur. Özellikle stres konsantrasyonu oluşması ve ağırlığın artması bu kısıtlamalardandır.

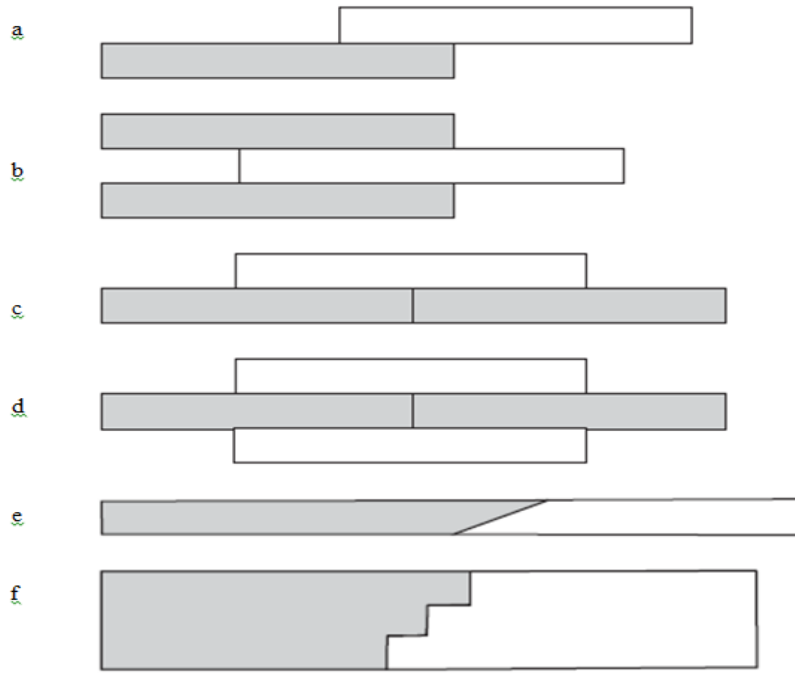
Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda yapışma yüzeyi boyunca eşit stres dayanımı göstermesi daha yüksek yüklerin taşınmasına olanak sağlar. Yapıştırıcının doğası gereği iyi bir sönümleme etkisi gösterirler. Farklı termal genleşme katsayısına sahip malzemeleri birleştirmede kullanılabilirler.

Yapıştırıcıların çevre şartlarından etkilenmesi, düşük soyma dayanımına sahip olmaları ve yapıştırıcı kullanılan birleştirmelerin sökülememesi olumsuz yönleri olarak adlandırılabilir.

Yapıştırıcı kullanılan parçalarda dikkat edilmesi gereken birçok durum söz konusudur. Tasarımcının bu konuları göz önünde bulundurması bağlantının kalitesi açısından önemlidir. Yapıştırıcının seçilmesi bir diğer önemli husustur. Kullanılacak yapıştırıcının ortam özelliklerine uyumu önemlidir. Piyasada birçok yapıştırıcı bulunmaktadır. Kullanılacak ortamdaki sıcaklık, nem gibi faktörler yapıştırıcı seçimini etkilemektedir.

Kompozit malzeme birleştirmede kullanılan yapıştırıcılar genelde termoset reçinelerdir. Bu reçineler; epoksiler, polyamidler, fenolikler ve silikonlar olarak dört ana başlıkta

toplanabilirler [27]. Çizelge 2.7’ de farklı yapıştırıcıların özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.14. Kullanılan değişik yapıştırma bağlantıları [22]. a. Tek bindirmeli b. Çift bindirme c. Tek takviyeli alın bağlantısı d. Çift takviyeli alın bağlantısı e. Pah bindirme f. Kademeli bağlantı

Çizelge 2.7. Farklı yapıştırıcıların özellikleri [20].

Yapıştırıcı ismi	Özellikleri	Çalışma sıcaklığı(°C)	Kürlenme mekanizması
Epoksi	Yüksek mukavemet, sıcaklık dayanımı, görece düşük kürlenme sıcaklığı	-40- +100	Sıcaklıkla veya oda sıcaklığında
Siyanoakrilat	Hızlı yapışma, düşük sıcaklık ve nem dayanımı	-30- +80	Nem ile oda sıcaklığında hızlı kürlenme
Akrilik	Hızlı kürlenme ve temiz olmayan hazırlanmamış yüzeylere yapışabilme	-40- +120	Serbest radikal mekanizma ile kürlenme
Poliüretan	Düşük sıcaklıklarda yüksek esneklik, çarpma dayanımı	-200- +80	Oda sıcaklığı
Silikon	Yüksek dolgu özelliği, yüksek esneklik, uzun kürlenme süresi	-60- +300	Oda sıcaklığı
Fenolik	Kısa süre için yüksek mukavemet, termal şoklara sınırlı dayanım	-40- +175	Yüksek basınç ve sıcaklık

2.4.2.1. Polimer Matrisli Malzeme Birleştirmede Kullanılan Bazı Yapıştırıcıların Özellikleri

- Epoksi Yapıştırıcılar

Epoksi yapıştırıcılar kullanılan en önemli yapısal yapıştırıcılar arasındadır. Güçlü ve kırılğan yapıya sahiptirler. Pek çok farklı malzemenin yapıştırılmasında kullanılırlar. Farklı karışımlarla yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve esnek türleri de üretilebilir. Genelde iki parçadan oluşurlar; epoksi ve sertleştirici. Sertleştirici parça epoksi ile karıştırılır ve kürlenmeye bırakılır.

Kaplama, kompozit yapıştırma, elektrik cihazları, bina malzemeleri gibi alanlarda kullanılırlar. Farklı eklentiler sayesinde termal ve elektrik yalıtımı özellikleri iyileştirilerek bu alanlarda da kullanılırlar. Havacılık sektöründe yapıştırıcı ve tamir işlemlerinde, metal parçaların yapıştırılmasında kullanılır.

- Polyamid Yapıştırıcılar

Yüksek termal dayanıma sahip olan yapıştırıcı malzemedir. Sıcaklığın yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilir. Sert olması, alev almasının düşük olması gibi özelliklere de sahiptirler.

Gelişmiş kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılırlar. Termoset polyamidlerin işlenmesi zordur. Otomotiv ve havacılıkta kullanılırlar. Radyoaktif yalıtım sağladıkları için bu alanlarda da tercih ediliriler.

- Poliüretan Yapıştırıcılar

Düşük sıcaklıklarda kullanılan yapıştırıcı çeşididir. Sertlik ve korozyon direnci istenilen uygulamalarda kullanılırlar.

- Silikon Yapıştırıcılar

Yüksek sıcaklık ve radyasyon yalıtımına sahiptir. Düşük mukavemeti vardır. Farklı reçinelerle karıştırılarak özellikleri iyileştirilebilir. Epoksi-silikon yapıştırıcılar yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler.

- Siyanoakrilat Yapıştırıcılar

Hızlı kürlenmeleriyle bilinen yapıştırıcılardır. Uygulandıktan sonra dakikalar içinde yâ da saniyeler içinde yapışma sağlarlar. Uygulama esnasında yapıştırılacak malzemelerin

hemen bir araya getirilmesi gerekmektedir.

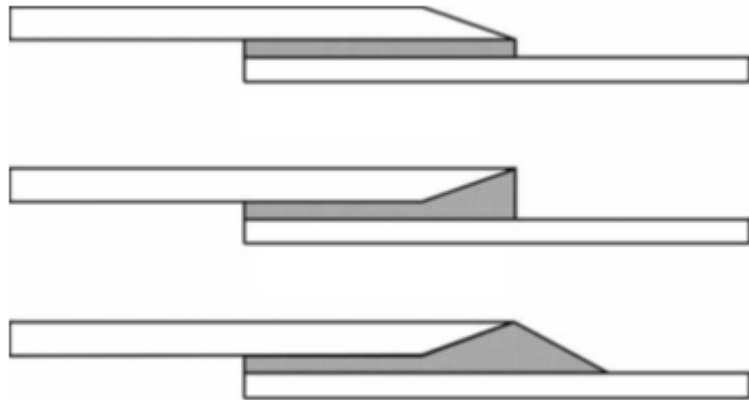
Yüksek maliyete sahiptirler. Düşük soyma direnci ve çalışma sıcaklığı aralığının düşük olması diğer olumsuz özellikleridir. Kürlendikten sonra kırılğan yapıya sahiptirler.

2.4.2.2. Yapışma Kalitesini Etkileyen Faktörler

Yapıştırıcı kullanılan bağlantıların geometrisi ve kullanılan belli yapıştırıcılar önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu başlık altında ise bağlantı kalitesini etkileyen gerek iç faktörler gerekse dış faktörler ele alınacaktır.

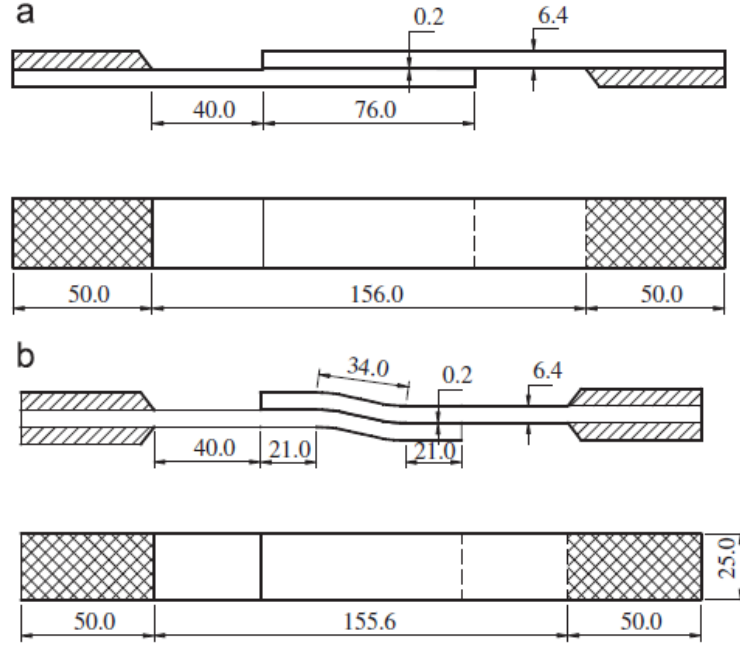
Yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda dayanımı etkileyen faktörler; bağlantı geometrisi, yapıştırıcı özellikleri, çevresel faktörler, yüzey hazırlama teknikleri olarak sıralanabilir.

Bağlantı geometrisi yapıştırıcı ile yapılan bağlantılarda çok önemli bir parametredir. Yapıştırma bağlantısının doğası gereği oluşan stresler yapışma alanının uçlarında yoğunlaşmaktadır. Birleştirilen parçaların birleşme yüzeyinin bulunduğu noktalarının maruz kalacağı yüklere göre tasarlanması gerekmektedir. Şekil 2.15'te sıkça kullanılan bağlantı geometrileri gösterilmiştir. Bu çeşitli dizayndaki parçalar soyma kuvvetlerinin azaltılması için tercih edilmektedir. Çift bindirmeli, pahlı ve kademeli bağlantılarda soyma direncinin arttığı görülmüştür [20].



Şekil 2.15. Farklı parça ve yapıştırıcı geometrileri [20].

Şekil 2.16.'da uçlarda çoğalan soyma ve kesme streslerini arttırmak için kullanılan yöntemler gösterilmiştir. Yapıştırılan parçaların uçlarındaki pah stres konsantrasyonunu azaltmaktadır. Bir diğer yöntem ise yapıştırılan bölgenin dalgalı olarak imal edilmesidir. Yapılan bir çalışmada dalgalı olarak imal edilen yapıştırma bağlantıların dayanımının %90 oranında yük kapasitesinin arttığı belirtilmiştir [30]. Bunun sebebinin tek bindirmeli bağlantılardaki eksantrik yükleme olduğu söylenebilir.



Şekil 2.16. Farklı geometrilerin karşılaştırılması a. Standart tek bindirmeli bağlantı. b. Dalgalı tek bindirmeli bağlantı [30].

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi yapıştırma alanı oluşan eğilme yüklerini azaltmak için dalgalı olarak imal edilmiştir.

Yapıştırıcı özellikleri bağlantı performansını etkileyen bir diğer etkidir. Seçilen yapıştırıcının özellikleri bağlantının ömrünü ve dolayısıyla bağlantı kalitesini belirler. Çoğu senaryoda bağlantı için seçilen yapıştırıcılar parçaların bulunacağı çevresel faktörlere göre ve yüklerle göre seçilmektedir. Bir diğer önemli konu ise bağlantıların fazla zarar görmeden ayrılabilmesidir. Seçilecek yapıştırıcının çevreye zararlı olmaması da göz önünde bulundurulacak diğer bir husustur. Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi bağlantı öncesi yapıştırıcının davranışlarının görülmesi için iyi olacaktır.

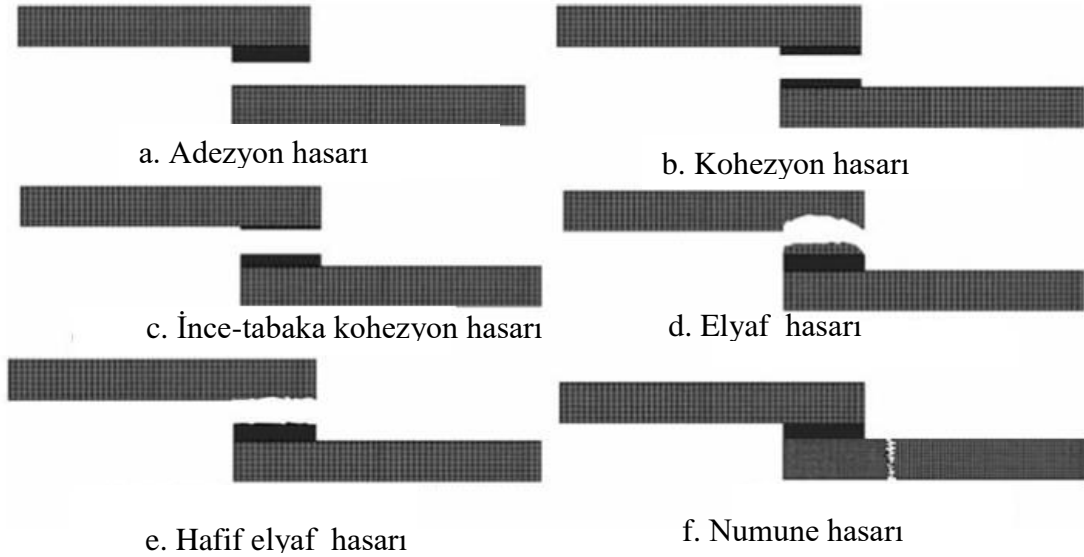
Çevresel faktörler mekanik bağlantı seçeneğine oranla yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda bağlantı performansını daha çok etkilemektedir. Genel olarak nem ve sıcaklık bağlantı performansını etkileyen çevresel faktörler olarak belirtilebilir [20]. Yükselen sıcaklık yapıştırıcının performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yapıştırıcının nem emmesi de performansını düşürmektedir. Aynı zamanda parçaların da neme maruz kalması ile yapıştırıcı ve yapışan parçaların oluşturduğu yapışma yüzeyindeki kuvvetleri de etkileyerek yapışma kalitesini düşürmektedir.

Yüzey hazırlama yöntemleri yapıştırma bağlantılarını etkileyen önemli parametrelerden biridir [14]–[16], [31]. Farklı malzemelerin birleştirilmesinde yüzey hazırlama önemli

yer tutar. Mekanik hazırlama, kimyasal hazırlama, lazer yöntemleri gibi farklı yüzey hazırlama yöntemleri bulunmaktadır. Yüzeyin kirden arındırılması mekanik özelliklerinin artırılması, yüzey enerjisinin artırılması gibi özellikler elde edilir. Genelde kullanılan yüzey hazırlama yöntemleri ise; zımpara kâğıdı, peel ply kullanımı, lazer yüzey uygulaması, asit ile dağlama olarak sıralanabilir.

2.4.2.3. Yapıştırıcı kullanılan Bağlantılarda Hasarlar

Yapıştırıcı kullanılarak bağlanan kompozit malzemelerde yapışma yüzeyinin kalitesini yüzeydeki hasarlar belirler. Bu hasarlar farklı şekillerde olabilir. Bunlar genel olarak yapışma yüzeyindeki hasarlar, yapıştırıcıdan kaynaklanan hasarlar ve yapışan parçalardan kaynaklanan hasarlar olarak gruplandırılabilir. Farklı koşullardan dolayı bu hasar tiplerinin bir arada bulunduğu hasarlarda görülebilir. Genel olarak yapışma performansı birçok parametreye bağlı olduğu için bağlantının kopması sonrası oluşacak hasar tipinin tahmin edilmesi gayet zordur. Şekil 2.17’de bu hasar tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.17. Yapıştırıcı kullanılan kompozit malzeme bağlantılarında hasar tipleri [20].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Yapılan deneysel çalışmalarda yapıştırılan malzemeler özellikle uçak sanayi, askeri donanım, savunma sanayi alanında kullanılan 2024 serisi alüminyum ve KordSA tarafından otomotiv sanayine yönelik üretilen CM11 prepreg seçilmiştir. Daha sonra prepreg kullanılarak üreticinin vermiş olduğu kurlenme şartlarına göre kompozit levhalar üretilmiştir. Yapıştırıcı olarak Permabond tarafından üretilen 2 parça PT326 poliüretan yapıştırıcı ve epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de CM11 prepreg için mekanik özellikleri ve kurlenme özellikleri verilmiştir. Çizelge 3.2’de kullanılan 2024 serisi alüminyum özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. CM11 matris mekanik özellikleri ve matris kurlenme özellikleri [32].

Gerilme dayanımı	39 MPa
Young’s modülü	3028 MPa
Maksimum uzama	%1,5
Basma dayanımı	107 MPa
Kurlenme sıcaklığı	150 -180 C <5 dakika@ 7 Bar
Kütlice reçine içeriği oranı	%37-48±2
Fiber örgü tipi	Düz, twill, tek yönlü

Çizelge 3.2. 2024 Alüminyum mekanik özellikleri [33].

Gerilme dayanımı	445 MPa
Young’s modülü	73,1 GPa
Maksimum uzama	%22
Akma dayanımı	326 MPa

Kompozit malzeme üretimi Düzce Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan ısıtmalı pres tezgâhı kullanılarak yapılmıştır. Üretim sırasında üretici firma tarafından verilen kurlenme bilgileri kullanılmıştır. Üretici firma tarafından önerilen kurlenme şartları; 5 dakika boyunca en az 7 bar basınçta 150°C’dir. Prepreg malzemler istenilen ölçülerde kesilerek 8 kat olacak şekilde üst üste [0/90] şeklinde yapıştırılmıştır. Üretim için herhangi bir ısınma veya soğuma hızı önerilmemektedir. Bu sebeple tezgâh kurlenme sıcaklığına ulaştığında parçalar yerleştirilmiştir. Şekil 3.1’de parça

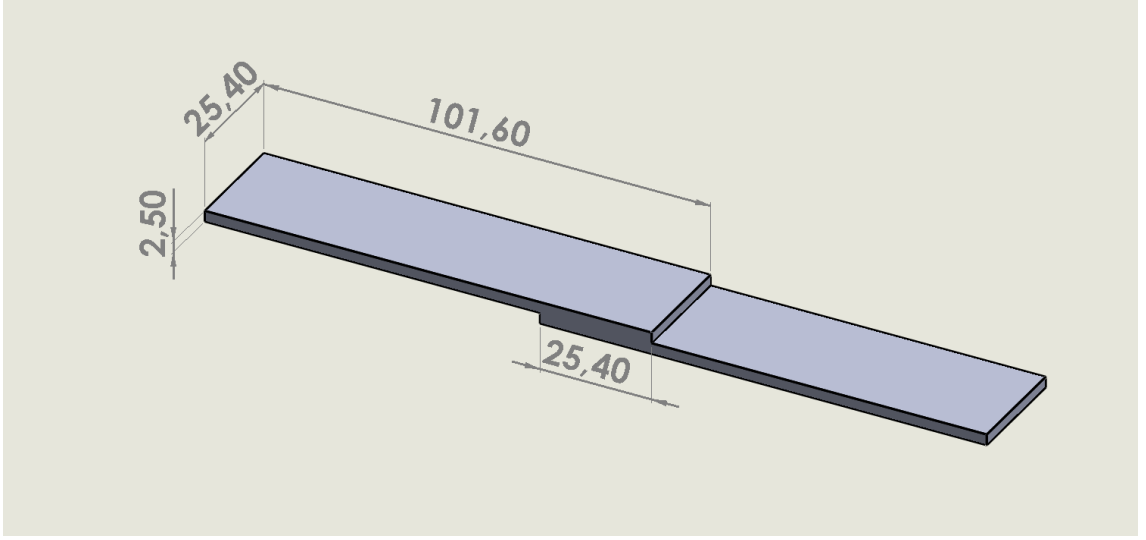
retiminden fotoğraflar yer almaktadır. Şekilde retim öncesi parçalar prese matris malzemesi sızması önlenmesi için yanmayan kağıtla kaplanmıŐtır. retimi tamamlanan parçalar pres içinde soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.2’de üretilen parçalardan biri görülmektedir. Parçaların lleri 300x300x2,5 mm’dir. retimi tamamlanan parçalar Promax 72057 model sulu testere ile standartlara uygun olarak kesilmiŐtir. Numuneler; ASTM D5868 ‘Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding’ standardına göre hazırlanmıŐtır. Standarda göre yapıştırma numunesinin boyutları Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1. Sıcak pres tezgahında üretilen kompozit parçalar .



Şekil 3.2. Üretilen tipik bir CFRP levha ($300 \times 300 \times 2.5$ mm³).



Şekil 3.3. ASTM D5868 standartına göre numune boyutları (boyutlar mm'dir).



Şekil 3.4. Yapıştırma numuneleri.

Yapıştırma için numunelerin yüzeyleri 60 numara zımpara kâğıdı ile zımparalanmış ve yüzeyler tiner ile temizlenmiştir. Bu işlem iki defa yapılmıştır. Bu işlemler sonunda numuneler yapıştırılmıştır. Kullanılan yapıştırıcılara göre kürlenme süreci farklılık göstermektedir. PT326 kullanılan bağlantılarda yapıştırma sonrasında üreticinin verdiği bilgiye göre numuneler 90°C sıcaklıkta 30 dakika süresince etüvde kürlenmeye

birakılmıştır. Daha sonrasında numuneler çekme deneyine alınmadan önce oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. PT320 için üreticinin vermiş olduğu özellikler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. PT326 yapıştırıcının özellikleri [34].

Tip	Poliüretan
Viskozite	4000-8000 mPa.s Tiksotropik
Tam kurlenme	@23°C: 4-5 gün @90°C: 30 dakika
Gerilme dayanımı	16-25 MPa
Soyulma dayanımı	150-170 N/25mm
Kesme dayanımı (ISO4587)	Çelik: 12-20 MPa FRP Cam epoksi: 5-7 N/mm ² FRP cam polyester : 12-14 N/mm ² Karbon fiber: 9-11 N/mm ²

Kullanılan epoksi yapıştırıcı iki parça yapıştırıcıdır. Sertleştiricinin 1:4 oranında katılmasıyla yapıştırıcı aktif hale getirilerek numuneler birleştirilmiştir. Karışım oranı hassas terazi kullanılarak yapılmıştır. Yapıştırılan parçalar 2 gün boyunca oda sıcaklığında kurlenmeye bırakılmıştır.

Yapılacak deneyler için her koşul için 3 adet numune üretilmiş ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Toplamda 36 adet deney yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Çizelge 3.4'te yapılan deneysel çalışmalar tablo halinde sunulmuştur. Burada CFRP-CFRP kompozit-kompozit birleştirmelerini, CFRP-Al ise kompozit-alüminyum birleştirmelerini temsil etmektedir. Şekil 3.5'te yapıştırılan deney numunesi görülmektedir.

Çizelge 3.4. Deney tasarımı.

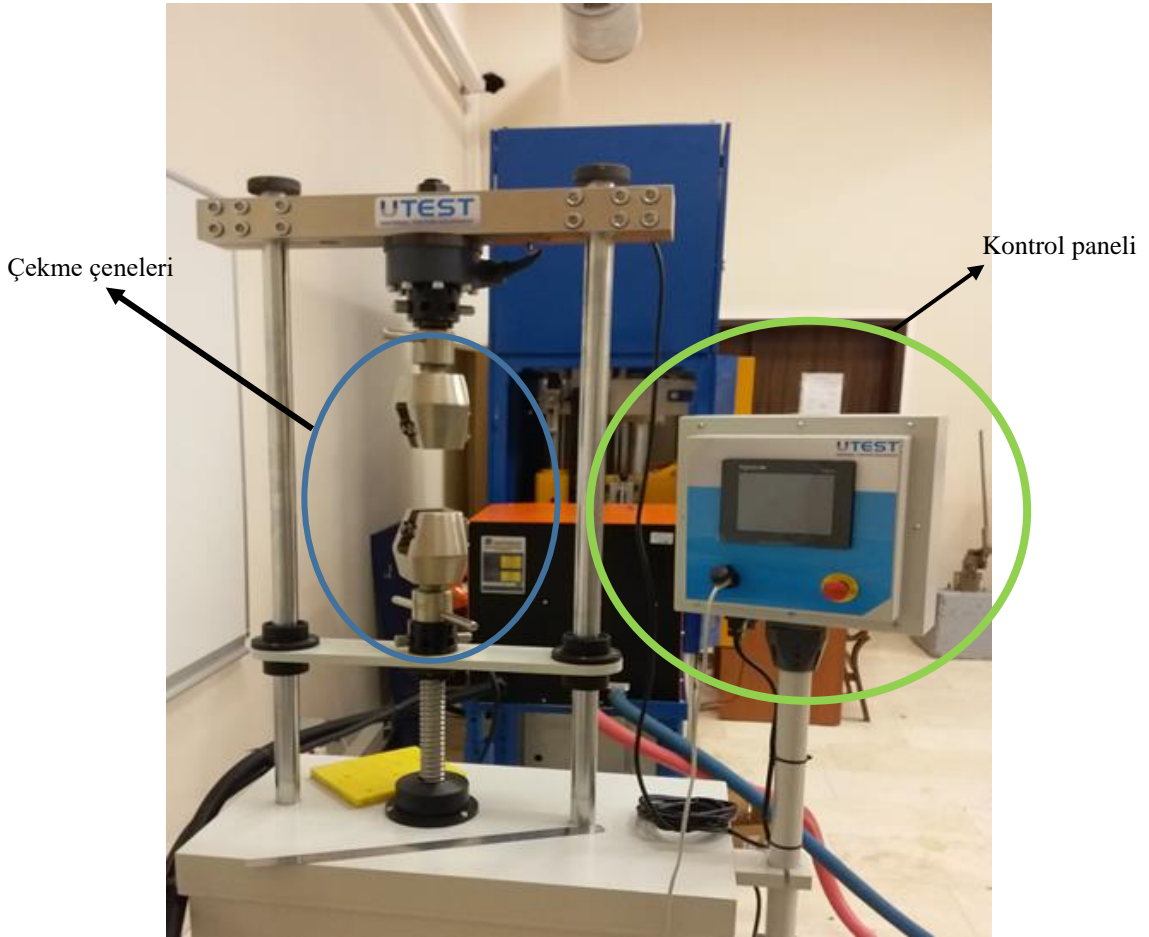
	-80°C	Oda sıcaklığı	80°C
PT326	CFRP-CFRP, CFRP-Al	CFRP-CFRP, CFRP-Al	CFRP-CFRP, CFRP-Al
Epoksi	CFRP-CFRP, CFRP-Al	CFRP-CFRP, CFRP-Al	CFRP-CFRP, CFRP-Al



Şekil 3.5 Birleştirme yapılmış tipik birkompozit-kompozit deney numunesi.

3.2. DENEY DÜZENEGİ VE DENEY YÖNTEMİ

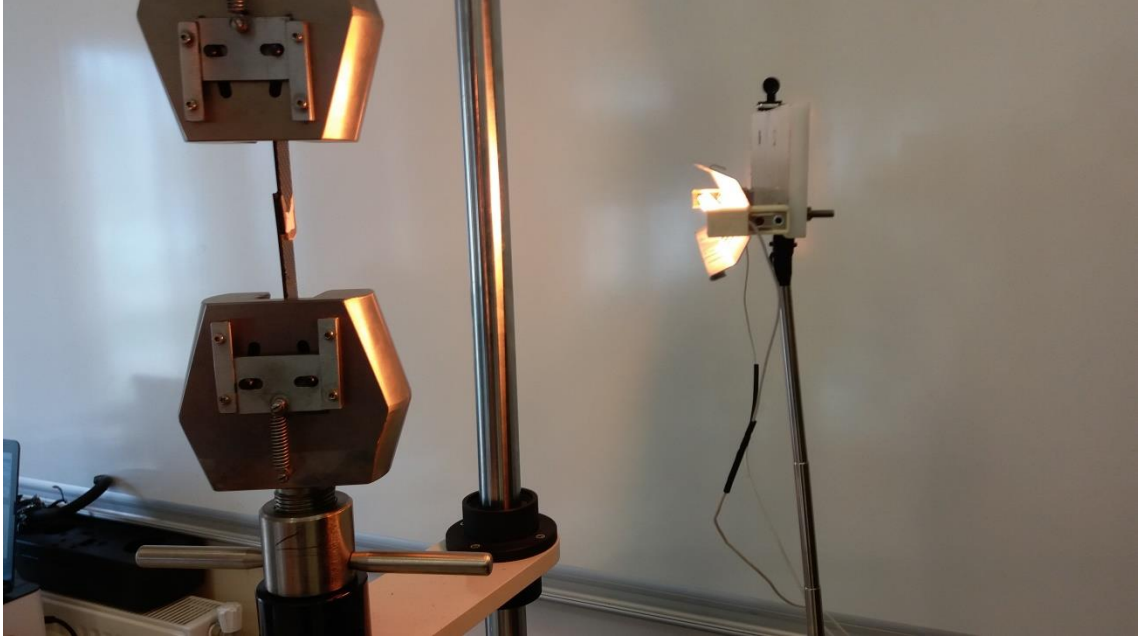
Tek bindirmeli bağlantıların test edilmesinde UTEST tarafından üretilen universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.6’da cihaz görülmektedir. Cihaz bilgisayara bağlanarak üretici tarafından verilen yazılım ile kontrol edilebilmektedir. Çenelere bağlanan test numuneleri 2mm/dk çekme hızı ile ön gerilme verilmeden çekilmiştir. 80°C sıcaklıkta yapılan testler için infrared ısı kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3.7’de sıcak deneyler için kurulan deney düzeneği görülmektedir. Bu düzenekte yapışma bölgesinin istenilen sıcaklığa geldiği anda çekme testi yapılmıştır. Yapılan denemelerde ısı kaynağının numuneden 20 cm kadar uzaklıkta olduğunda numunenin orta kısmının yani yapıştırıcının olduğu kısmın 80°C sıcaklığında olduğu tespit edilmiştir. Sıcaklık ölçümü ise CEM DT-610B dijital termometre ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Deneylerde kullanılan test cihazı.

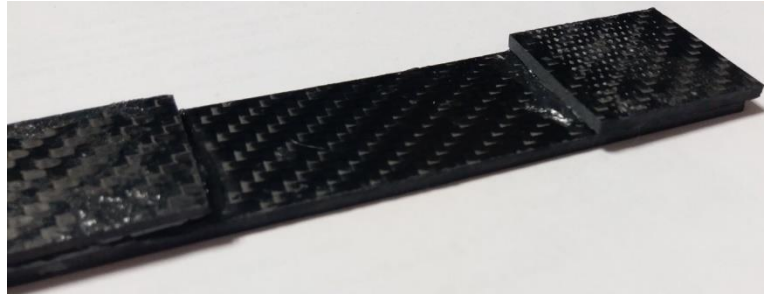
Şekil 3.7’de kızılötesi ısı kaynağı gösterilmektedir. Soğuk deneyler için ise numuneler

-80°C sıcaklıkta 16 saat soğutucuda bekletilmiş ve numuneler soğutucudan çıkarılarak test cihazına bağlanmıştır.



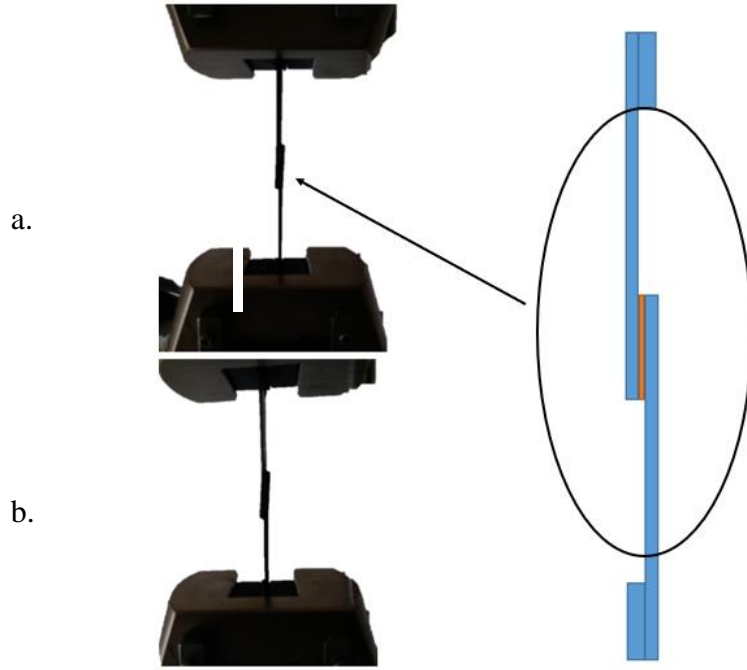
Şekil 3.7 Sıcak deneyler için kullanılan deney düzeneği.

Standarda göre çekme numunelerinin uçlarına eksantrik yüklemeyi önlemek için destekleyici parçalar eklenmiştir. Şekil 3.8’de eklenen parçalardan biri görülmektedir.



Şekil 3.8 Numunelerde kullanılan destekleyici parça.

Destekleyici parçaların işlevi kuvvetlerin aynı doğrultuda bulunmaması sebebi ile oluşturacağı eğilme yüklerinin azaltılmasıdır. Bu yüklerin varlığı gerçek kesme yükü ve kesme gerilmesinin belirlenmesinde sonucu değiştirecektir ve bunun sonucunda uçlarda basma ve çekme gerilmeleri oluşacaktır [35]–[38]. Bu destekleyicilerin varlığına rağmen çekme deneyi sırasında eğilme gerçekleştiği ve yapıştırılan malzemelerin bu yüke maruz kalarak eğildiği gözle farkedilebilmektedir. Şekil 3.9.a’da çekme deneyinin hemen öncesi numunede eğilme görülmezken deney esnasında özellikle hasara yakın durumda eğilme gözle görülebilir hale gelmektedir.



Şekil 3.9 Çekme testi sırasında eğilme yüklerinin etkisi. a. Test öncesi numune. b. Test sırasında numune.

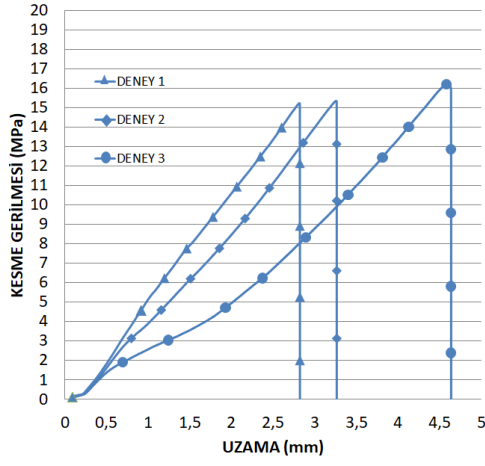
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar bu bölümde ele alınmış ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Burada verilen sonuçlar kompozit malzemelerin kendi arasında ve alüminyum malzeme ile yapıştırıcı ile bağlanmasıyla elde edilen numunelerin farklı yapıştırıcılar ve farklı sıcaklıklar için nasıl değiştiği gösterilmiştir. Sonuçlar kısmında kesme gerilmeleri, uzama ve kopma yüzeyleri karşılaştırılmıştır.

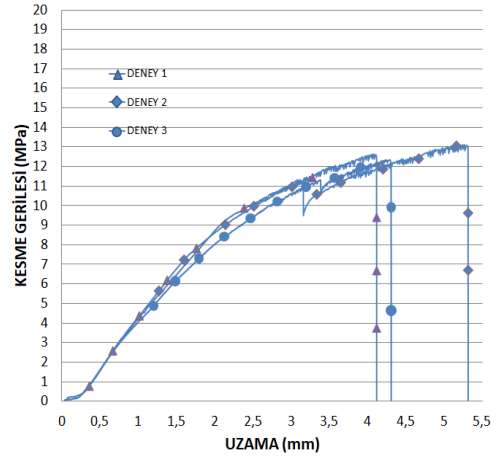
4.1. KESME GERİLMESİ-UZAMA EĞRİLERİ

4.1.1. Permabond PT326 İçin Kesme Gerilmesi-Uzama Eğrileri

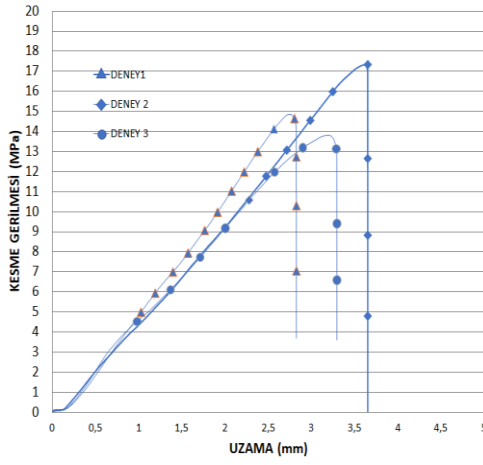
PT326 yapıştırıcı için farklı sıcaklık ve farklı malzemedeki numuneler için yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir. Sonuçlara göre; en yüksek kesme gerilmesinin kompozit-kompozit numunelerde 23°C'de 17 MPa olduğu, aynı numune için uzamanın ise 3,67 mm olduğu görülmüştür (Şekil 4.1.c). PT326 yapıştırıcı kullanılan numunelerde en düşük kesme gerilmesi Şekil 4.1.f'de görüldüğü gibi kompozit-alüminyum numune kullanılan 80°C'de yapılan deneyde görülmüştür. Aynı numune için uzama miktarı ise 2,1 mm'dir. Kompozit-kompozit numunelerde ortalama kesme gerilmeleri; -80°C'de 15,59 MPa, 23°C'de 15,33 MPa ve 80°C'de 9,90 MPa'dır. Ortalama uzama miktarları ise -80°C'de 3,46 mm, 23°C'de 3,13 mm ve 80°C'de 2,57 mm'dir. Kompozit-kompozit numunelerde -80°C'deki ortalama kesme gerilmesi 23°C'deki ortalama kesme gerilmesinden %2 fazla, 80°C'deki ortalama kesme gerilmesinden ise %36 fazla çıkmıştır. -80°C'deki ortalama uzama miktarı 23°C'deki ortalama uzama miktarından %10 fazla, 80°C'deki ortalama uzama miktarından %26 fazladır. Kompozit-alüminyum numunelerde ortalama kesme gerilmeleri; -80°C'de 12,68 MPa, 23°C'de 12,39 MPa ve 80°C'de 7,82 MPa'dır. Uzama miktarları ortalama; -80°C'de 4,56 mm, 23°C'de 4,3 mm ve 80°C'de 2 mm'dir. Ortalama kesme gerilmesi -80°C'deki ortalama kesme gerilmesi 23°C'deki ortalama kesme gerilmesinden %3 fazla, 80°C'deki ortalama kesme gerilmesinden ise %38 fazla çıkmıştır.



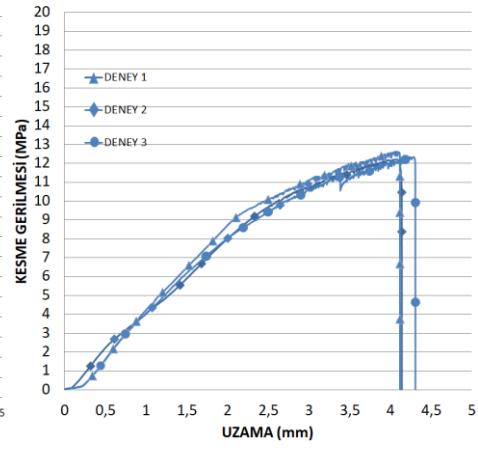
a



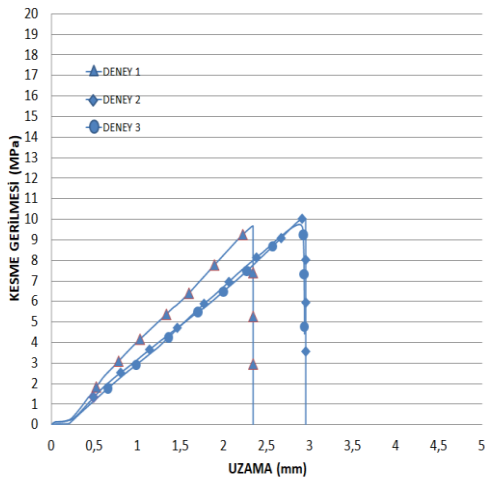
b



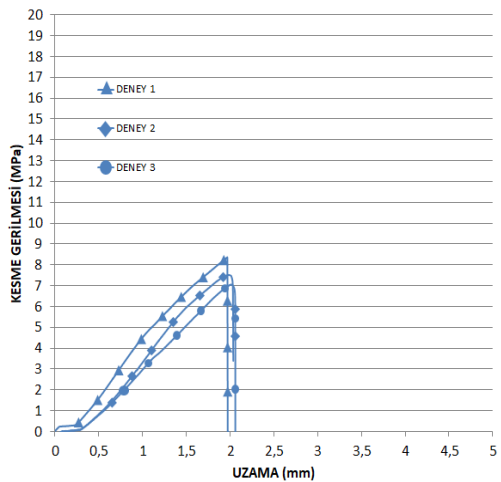
c



d



e



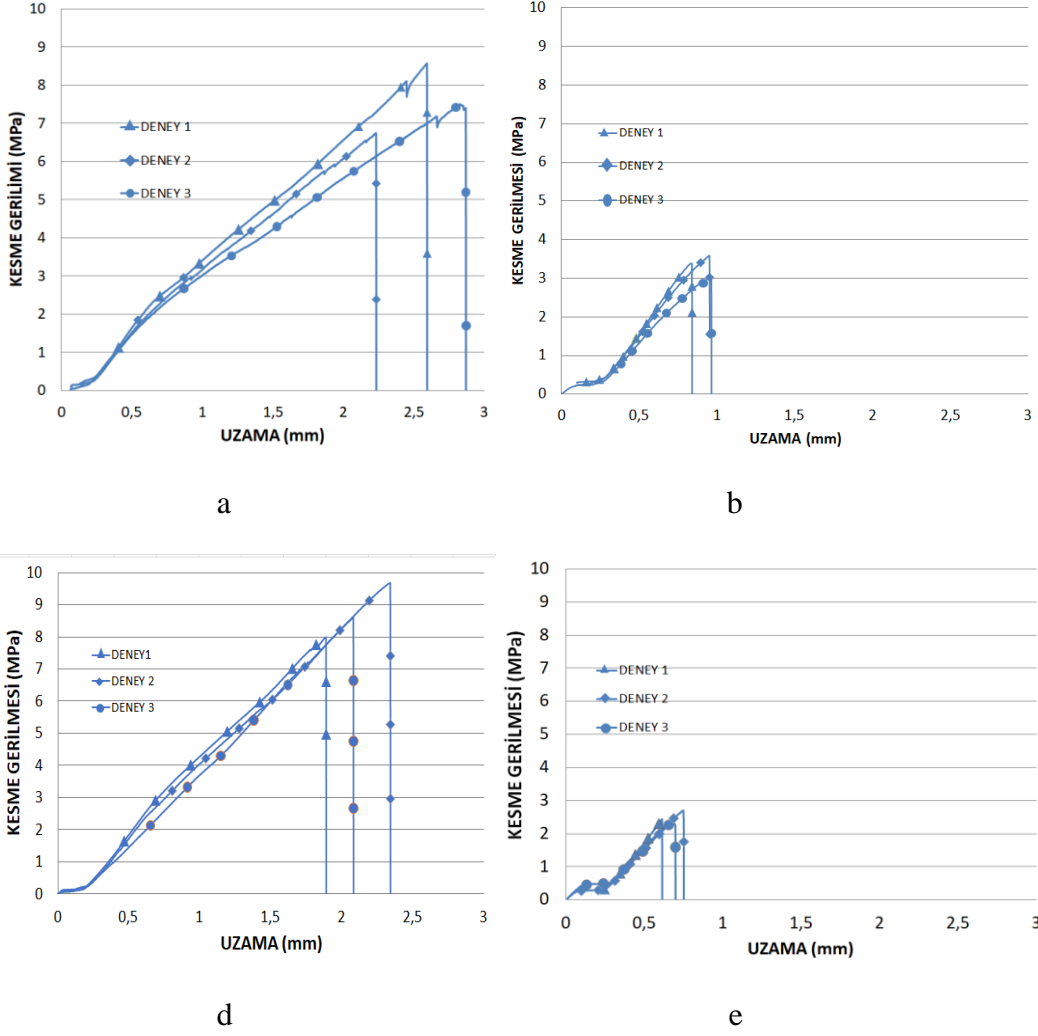
f

Şekil 4.1. PT326 yapıştırıcı için farklı sıcaklıklarda kesme gerilmesi-uzama grafikleri.
a. -80°C CFRP-CFRP b. -80°C CFRP-Al c. 23°C CFRP-CFRP d. 23°C CFRP-Al
e. 80°C CFRP-CFRP e. 80°C CFRP-Al

-80°C’de kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler karşılaştırıldığında ortalama en yüksek kesme gerilmesinin sırası ile 15,59 ve 12,68 MPa olduğu ve kompozit-alüminyum numunede bu değer %18 düşük olduğu görülmüştür. 23°C’de kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler karşılaştırıldığında ortalama en yüksek kesme gerilmesinin sırası ile 15,33 ve 12,39 MPa olduğu ve kompozit-alüminyum numunede bu değer %19 düşük olduğu görülmüştür. 80°C’de kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler karşılaştırıldığında ortalama en yüksek kesme gerilmesinin sırası ile 9,9 ve 7,82 MPa olduğu ve kompozit-alüminyum numunede bu değer %21 düşük olduğu görülmüştür.

4.1.2. Epoksi Yapıştırıcı İçin Kesme Gerilmesi -Uzama Eğrileri

Epoksi yapıştırıcı için sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Epoksi yapıştırıcı için 80°C sıcaklık için herhangi bir veri alınamamıştır. Bunun sebebi epoksi yapıştırıcının bu sıcaklıkta erimesi ve bağlantının kendiliğinden yük taşıma kapasitesinin olmamasıdır. Diğer sıcaklıklar için sonuçlar Şekil 4.2’de verilmiştir. Kompozit-kompozit numuneler için ortalama en yüksek kesme gerilmesi -80°C’de 7,60 MPa, 23°C’de 8,73 MPa’dır. Ortalama uzama miktarları ise; -80°C’de 2,5 mm, 23°C’de 2,1 mm’dir. Kompozit-alüminyum numuneler için ortalama kesme gerilmesi -80°C’de 3,33 MPa, 23°C’de 2,15 MPa’dır. Ortalama uzama miktarları ise; -80°C’de 0,9 mm, 23°C’de 0,7mm’dir. Kompozit-kompozit numunelerde -80°C’de kesme gerilmesi 23°C’deki ortalama kesme gerilmesinden %13 az, -80°C’deki uzama miktarı ise 23°C’deki uzama miktarından %16 fazladır. Kompozit-alüminyum numunelerde 80°C’de kesme gerilmesi 23°C’deki kesme gerilmesinden %36 fazla, -80°C’deki uzama miktarı ise 23°C’deki uzama miktarından %22 fazladır. -80°C’de kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler karşılaştırıldığında ortalama en yüksek kesme gerilmesinin sırası ile 7,60 ve 3,33 MPa olduğu ve kompozit-alüminyum numunede bu değer %56 düşük olduğu görülmüştür. 23°C’de kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler karşılaştırıldığında ortalama en yüksek kesme gerilmesinin sırası ile 8,73 ve 2,15 MPa olduğu ve kompozit-alüminyum numunede bu değer %75 düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2. Epoksi yapıştırıcı için farklı sıcaklıklarda kesme gerilmesi-uzama grafikleri.

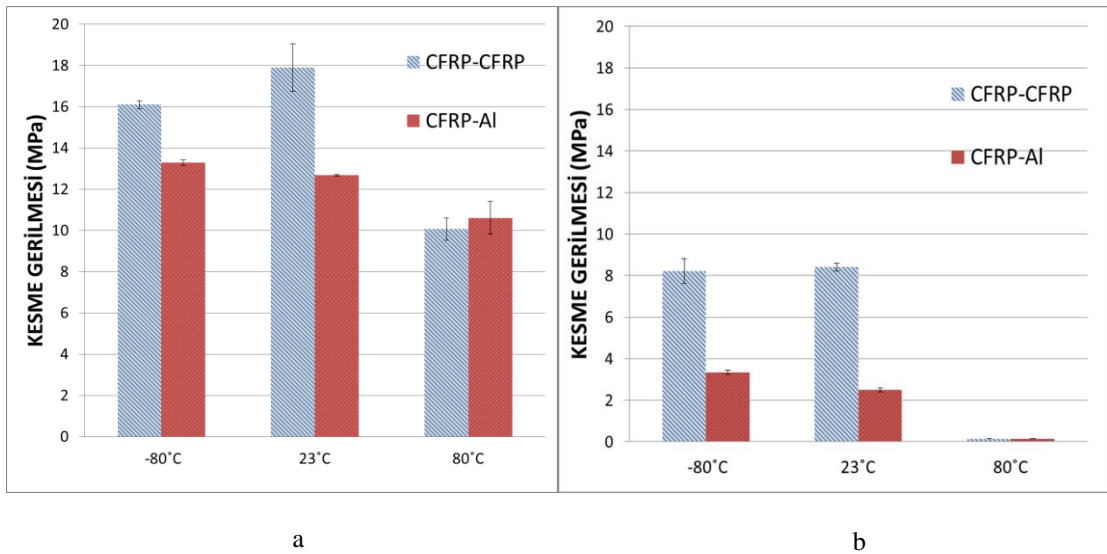
a. -80°C CFRP-CFRP b. -80°C CFRP-Al c. 23°C CFRP-CFRP d. 23°C CFRP-Al

4.2. TARTIŞMA

4.2.1. Sıcaklık Ve Yapıştırıcı Malzemelerin Kesme Gerilmesine Etkileri

Poliüretan yapıştırıcı kullanılan numunelerde farklı sıcaklıklar ve farklı numune malzemelerine göre ortalama kesme gerilmelerinin karşılaştırılması Şekil 4.3.a'da verilmiştir. 80°C'de ortalama kesme gerilmesinin düşme sebebinin sıcaklık arttıkça yapıştırıcının yük taşıma kapasitesinin azalması olarak ifade edilebilir. Banea ve Silva yaptıkları çalışmada oda sıcaklığında ve 80°C'de tek bindirmeli numuneler hazırlayarak sıcaklığın etkisinin kopma gerilmesine etkisini araştırmışlar ve epoksi yapıştırıcı için sıcaklık ile kopma gerilmesinin %32, poliüretan yapıştırıcı için ise kopma gerilmesinin %22 azaldığı belirtilmiştir [6] . Genel olarak kesme gerilmesinin kompozit-kompozit

numunelerde kompozit-alüminyum numunelere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç kesme gerilmesinin zayıf numune olan alüminyuma göre etkilendiği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Machado ve arkadaşları alüminyum ve kompozit malzemeleri tek bindirmeli şekilde yapıştırmış ve kompozit-kompozit numunelerin kesme gerilmesi kompozit-alüminyum numunelerin kesme gerilmesinden yüksek çıktığı ve bunun kopma gerilmesinin zayıf malzeme tarafından kontrol edilmesi olarak açıklamışlardır [39]. Aynı çalışmada tek bindirmeli numuneler; -30°C, 24°C ve 80°C’de test edilmiş ve sıcaklığın kopma gerilmesine etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Fakat çalışmada kullanılan yapıştırıcının cam geçiş sıcaklığı $T_g=100^\circ\text{C}$ olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Kompozit-kompozit numunelerde -80°C’de ortalama uzama miktarı oda sıcaklığında ortalama uzama miktarlarından %10 fazladır. Fakat bu iki sıcaklıkta yapılan deneyler için tek yönlü anova testi yapılmış ve anlamlı bir farklılığın olmadığı görülmüştür. 80°C sıcaklıkta uzamanın %26 azaldığı fakat kesme gerilmesi-uzama eğrisinin eğiminin de azaldığı, 80°C’de sünekliğin arttığı sonucu çıkmaktadır. Bu durum camsı geçiş sıcaklığına ($T_g=80^\circ\text{C}$) gelen PT326 için sünekliğinin artması olarak açıklanabilir. Camsı geçiş sıcaklığının üstüne çıktığında yapıştırıcılar sünek hale geldiği ve yük taşıma kapasitesinin azaldığı bilinmektedir [12], [6]. Kompozit-alüminyum numunelerde -80°C ve oda sıcaklığındaki kesme değerlerinde farklılık gözükmemekte olsa dahi yapılan tek yönlü anova testi ile anlamlı bir farklılığın olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.3. a.PT326 yapıştırıcı kullanılan numunelerde ortalama kesme gerilmeleri.

b. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelerde ortalama kesme gerilmeleri.

Şekil 4.3.b'de epoksi yapıştırıcı için yapılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Kompozit-kompozit numunelerde -80°C 'de elde edilen ortalama kesme gerilmesi, oda sıcaklığında elde edilen ortalama kesme gerilmesine göre %2 azdır fakat sonuçlar standart sapma içinde kalmıştır. Epoksi yapıştırıcı için kompozit-kompozit numunelerde -80°C 'den 23°C 'ye çıkılmasının kesme gerilmesini etkilemediği sonucu çıkarılabilir. 80°C sıcaklığında ise epoksi yapıştırıcının ortalama kesme gerilmesi 0,15 MPa olarak ölçülmüştür. Ortalama kesme gerilmesi düşmesinin sebebi yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığının oldukça üstüne çıkmasıyla yük taşıma kapasitesinin düşmesidir [39].

Şekil 4.4.a'da 23°C sıcaklıkta yapıştırıcıların etkisi gösterilmektedir. 23°C sıcaklığında yapılan deneylerde PT326 yapıştırıcının her iki numune tipinde de daha yüksek kesme gerilmesine sahiptir. Epoksi yapıştırıcıda ise kompozit-kompozit numunelerin kesme gerilmesi kompozit-alüminyum numuneye göre %400 daha fazladır.

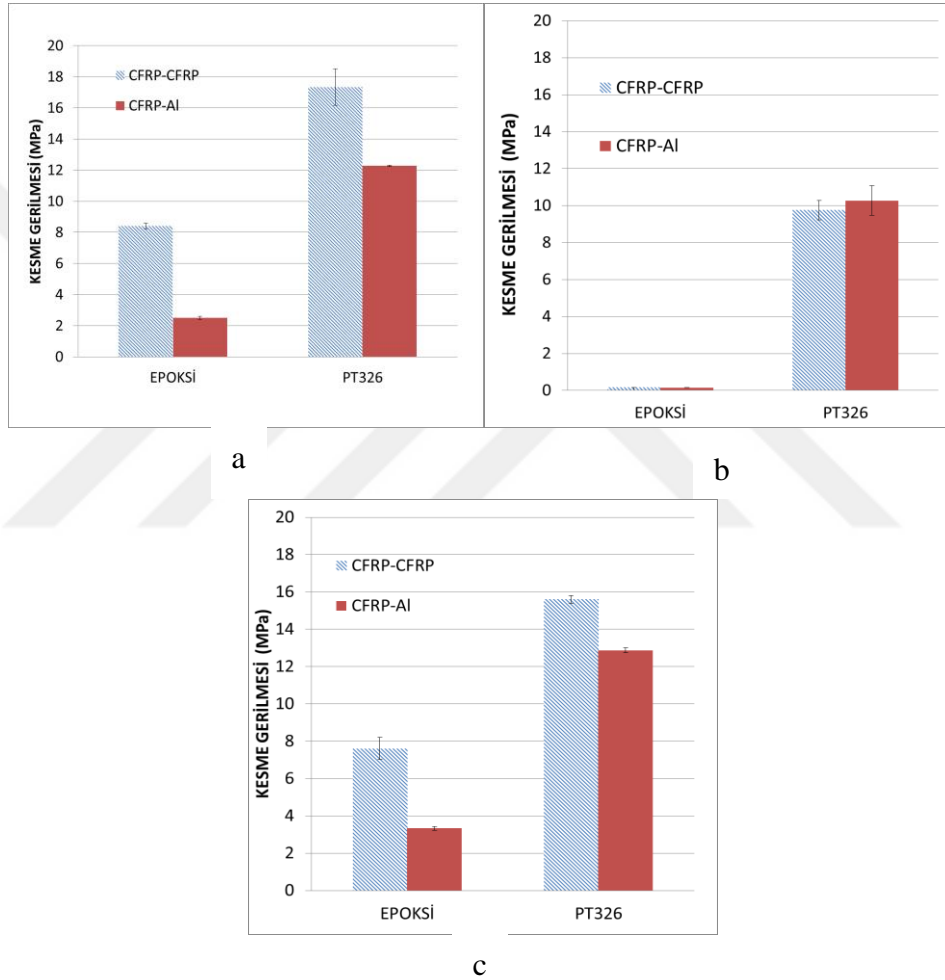
Şekil 4.4.b'de 80°C için farklı yapıştırıcıların karşılaştırılması verilmiştir. -80°C ve 23°C sıcaklıklarının aksine 80°C sıcaklıkta kompozit-kompozit numunelerin ortalama kesme gerilmesi kompozit-alüminyum numunelerin ortalama kesme gerilmesinden %10 azdır. Fakat sonuçlar standart sapma içinde kaldığı için kesme gerilmelerinin farklı olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

Burada kesme gerilmesinin azalmasının sıcaklığın artması ile kompozit malzemedeki matris malzemesinin yük taşıma kapasitesindeki azalma ile açıklanabilir. Bu durum sıcaklık etkisinin araştırıldığı araştırmalarda görülen bir sonuçtur [6], [39].

Şekil 4.4.c'de farklı yapıştırıcıların -80°C sıcaklık için karşılaştırılması verilmiştir. 80°C ve 23°C 'de olduğu gibi kompozit-kompozit numuneler için kopma yükü kompozit-alüminyum numunelere göre yüksektir. PT326 yapıştırıcının kompozit-kompozit numunelerinin ortalama kesme gerilmesi bu sıcaklıkta %21 fazla olduğu görülmüştür. Epoksi yapıştırıcı kullanılan numunelerde kompozit-kompozit numunelerin ortalama kesme gerilmesi kompozit-alüminyum numunelerin ortalama kesme gerilmesinden %200 fazladır.

Şekil 4.1.b ve şekil 4.1.d'de kompozit-alüminyum numunelerin kesme gerilmesi-uzama eğrisinde yaklaşık olarak 10 MPa üstünde dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bunun sebebi; alüminyum numunenin eğilme momentinin etkisi ile plastik deformasyona başlaması olarak açıklanabilir. Bu tip dalgalanmalar literatürde Portevin-Le Chatelier etkisi olarak adlandırılırlar. Özellikle alüminyum alaşımlarında görülen bu dalgalanma

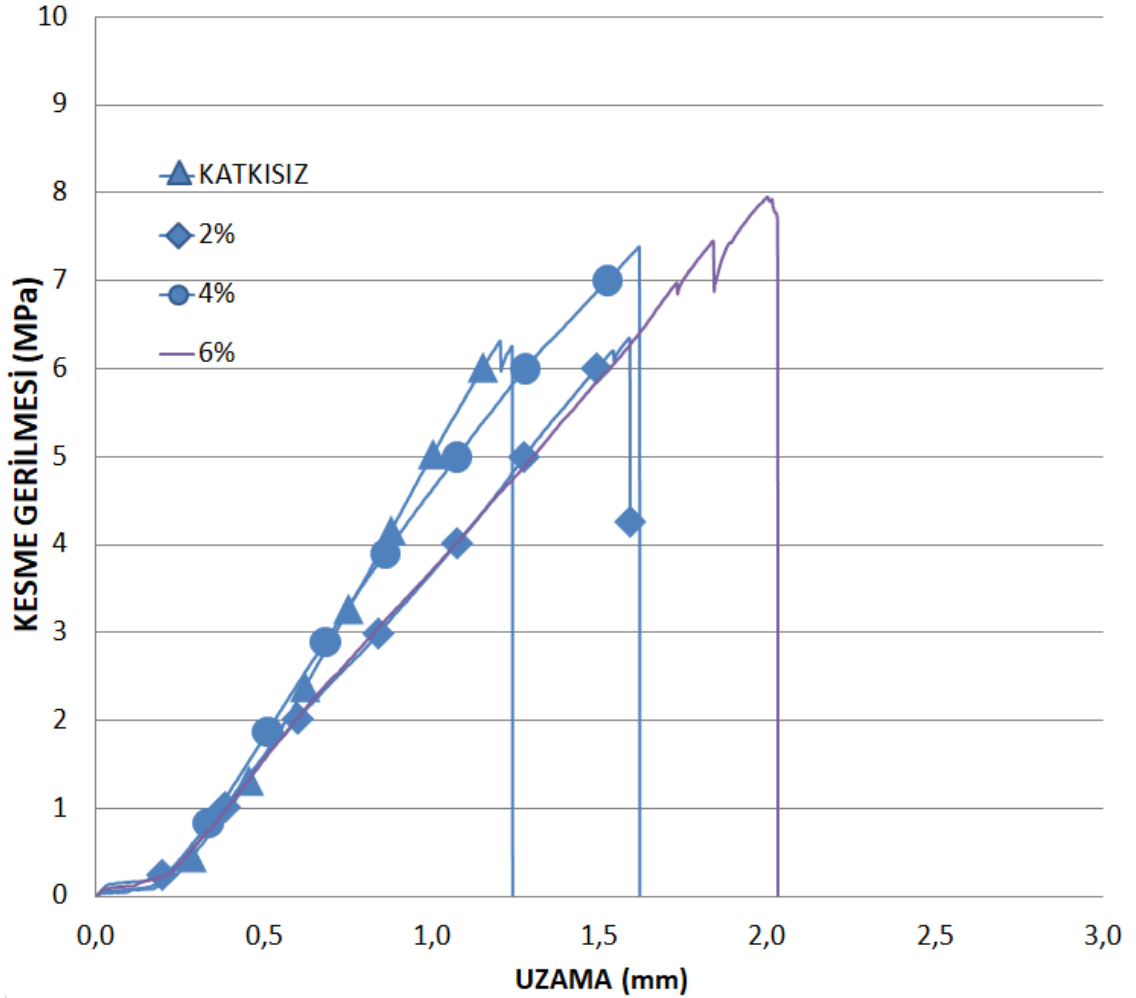
genellikle plastik şekil değiştirme esnasında ortaya çıkar. Malzeme içerisinde bulunan dislokasyonların engellere takılması yük arttıkça bu engelden kurtulması ve başka engele takılması şeklinde devam eder ve dalgalı bir eğri elde edilir. Machado ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada alüminyum 5754 alaşımı numuneleri epoksi yapıştırıcı ile birleştirmişler ve çekme deneyi sonucunda plastik deformasyona uğrayan alüminyum parçalarda bu etkiyi görmüşlerdir [39]. Bamberg ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada ise alüminyum 5083 alaşımı ve DP600 çelik epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve çekme deneyi sonucunda bu etki görülmüştür [40].



Şekil 4.4. Farklı sıcaklıklar için kesme gerilmelerinin karşılaştırılması. a. 23°C b. 80°C ve c. -80°C

Yapıştırıcı performansının artırılmasında yönelik literatürde çalışmalar mevcuttur. Genellikle ısıl işlem uygulama, yüzey hazırlama, farklı geometri tasarımları gibi yöntemler ve yapıştırıcıların içerisine nano partikül ilavesi ile kesme gerilmeleri artılmaktadır. Monteiro ve arkadaşları yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden ürettikleri numuneleri epoksi yapıştırıcı ile yapıştırmıştır.

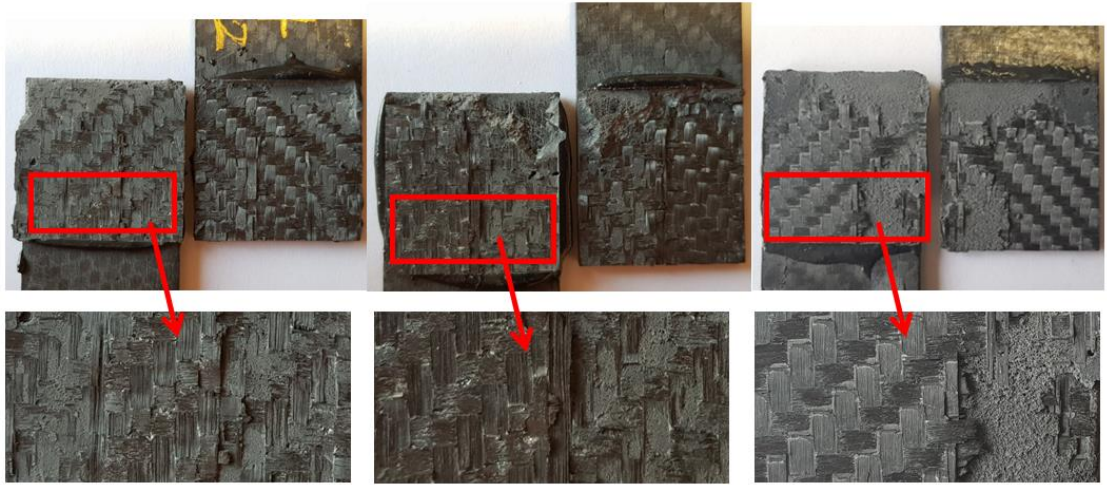
Çalışmada, ağırlıkça oranı %1 olan karbon nanütüp eklenen epoksi ile yapıştırılan numunelerin kesme gerilmesini %55 oranında artırmıştır [41]–[43]. Bu bağlamda, bu çalışmada epoksi yapıştırıcıya kütlece oranı %2, %4, %6 olan krom-manyezit tozları ilave edilmiş, Oda sıcaklığında (23°C) kompozit-kompozit tek bindirmeli numuneler yapıştırılmış ve deneyler yapılmıştır. Deney sonucunda kesme gerilmesinin %2 katkılı olan numunelerde katkısız yapıştırıcı numunelerin sonucu ile farkı olmadığı, %4 katkılı yapıştırıcı kullanılan numunelerde %17 arttığı, %6 katkılı yapıştırıcı kullanılan numunelerde ise katkısız yapıştırıcı kullanılan numunelere göre %23 arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.5'te kesme gerilmesi-uzama eğrisine bakıldığında katkısız yapıştırıcı kullanılan numuneler ile %2 oranında partikül katılan yapıştırıcı kullanılan numunelerin sünekliğinde değişme olmazken %4 ve %6 oranında partikül katılan yapıştırıcıların daha sünek oldukları gözlemlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere farklı tozların yapıştırıcıların içerisine optimum miktrada ve optimum toz büyüklüklerinde ilavesi ile kopma gerilmesi değerleri artırabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Partikül katkısının kesme gerilmesine etkisi.

4.2.2. Kopma Yüzeylerinin Karşılaştırılması

Kopma ara yüzeyleri sıcaklığa göre karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6’da PT326 yapıştırıcı kullanılan numunelerde kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum bağlantılarının kopma yüzeyindeki hasarlar gösterilmiştir. Burada alüminyum yapışma yüzeyinde



a

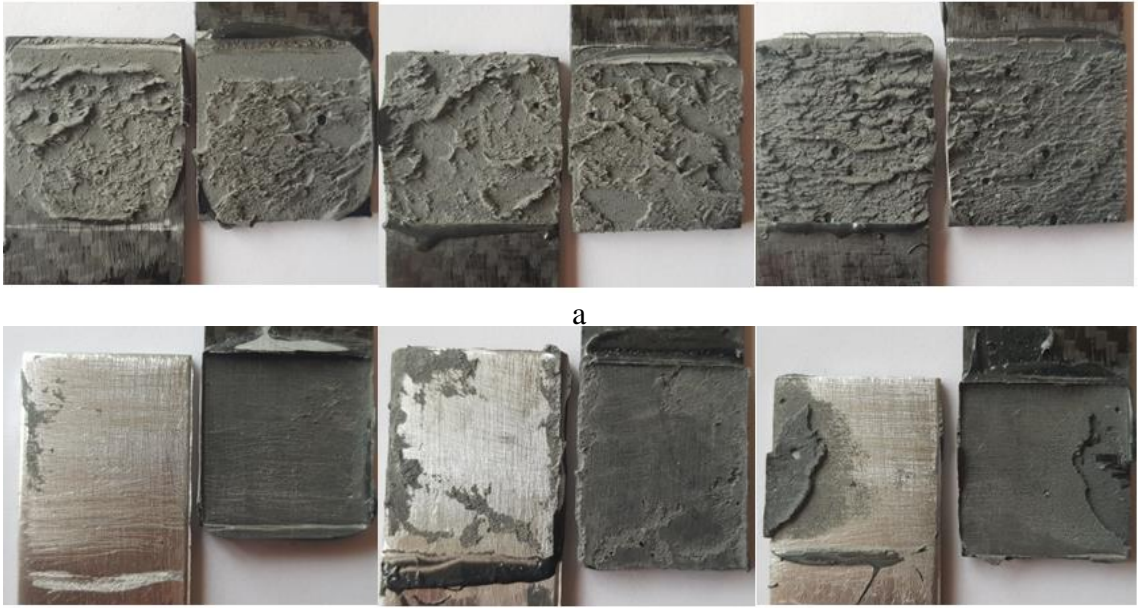


b

Şekil 4.6. PT326 yapıştırıcı için oda sıcaklığında kopma yüzeyi. a Kompozit-kompozit
b.Kompozit-alüminyum

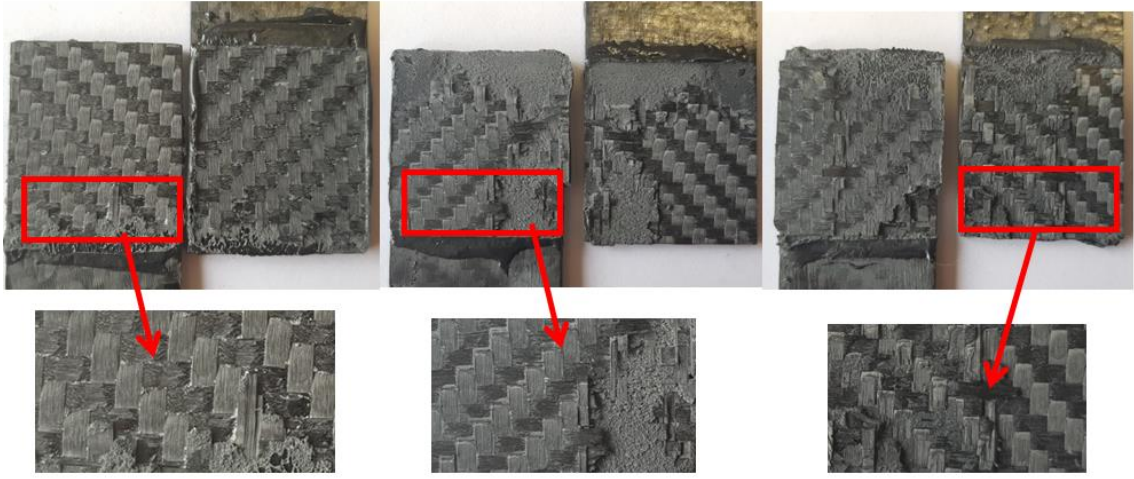
hasarlara bakıldığında bir bölümünün yapışma yüzeyinden bir bölümünün yapıştırıcıdan olduğu görülmektedir. Kompozit-kompozit numunede ise kopmanın numunenin kendisinden olduğu yani kohezyon hasarı olduğu görülmektedir. Kompozit-kompozit numunelerin kesme gerilmesinin yapıştırılan parçanın belirlediği sonucu çıkartılabilir. Kopma yüzeylerinin yakından bakıldığında fiber hasarları görülmektedir. Machado ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kompozit-kompozit numuneler epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve 23°C sıcaklığında yapılan testlerde kompozit malzemeden kopma olduğu görülmüş ve en yüksek kesme gerilmesinin bu numunelerde olduğu belirtilmiştir [39].

Şekil 4.7’de PT326 için 80°C sıcaklıkta yapılan deneylerdeki numunelerin kopma yüzeyi gösterilmektedir. Burada sıcakta yapılan deneylerde kompozit-kompozit numunelerde sıcaklığın etkisiyle yapıştırıcı etkilenmiş ve hasar yapıştırıcının kendisinden meydana gelmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı 80°C olan PT326 için bu sonuç normaldir. Bu sıcaklıkta yapıştırıcı hamur kıvamına gelmektedir. Alüminyum için yapışma kuvveti bu yüzeyde daha zayıf olduğu için hasar alüminyum yüzeyinden adezyon hasarı olarak meydana gelmiştir. Machado ve arkadaşları poliüretan yapıştırıcı ile yapıştırdıkları kompozit-kompozit numunelerde 80°C’de yaptıkları deneylerde yapıştırıcının T_g sıcaklığının üstünde yük taşıma kapasitesinin azaldığı ve kohesiv hasara uğradığı belirtilmiştir [12].

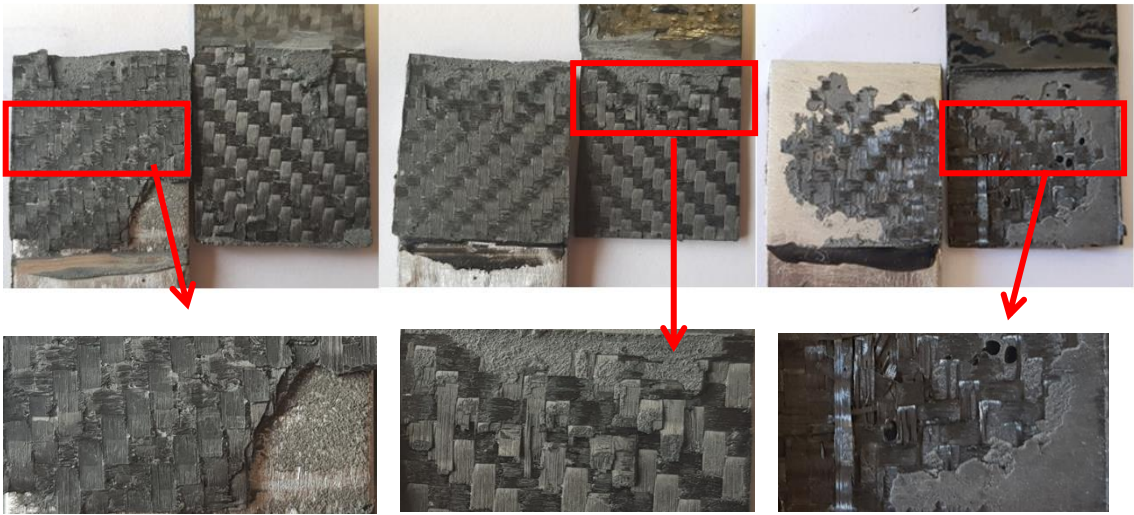


Şekil 4.7. PT326 yapıştırıcı için 80°C sıcaklığında kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b. Kompozit-alüminyum

Şekil 4.8’de PT326 yapıştırıcı ile bağlanan numunelerdeki -80°C’de yapışma yüzeyi hasarları gösterilmiştir. Bu sıcaklık için en önemli bulgu PT326 yapıştırıcının alüminyum yüzeye çok iyi yapıştığıdır. Şekilde görüleceği gibi hasar tamamen kompozit numuneden oluşmuştur. Yapışmanın çok iyi gerçekleştiği görülmüştür. Kompozit-kompozit numuneler için ise hasar tabaka kopması olarak meydana gelmiştir. Hem kohezyon hem de adezyon hasarı görülmektedir. -80°C’de kopma yüzeyinin diğer çalışmalarla benzeyen ve benzemeyen yönleri görülmüştür. Banea ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada -40°C’de deney yapılan alüminyum numunelerde hasar tamamen poliüretan yapıştırıcıdan meydana gelmiştir [12].



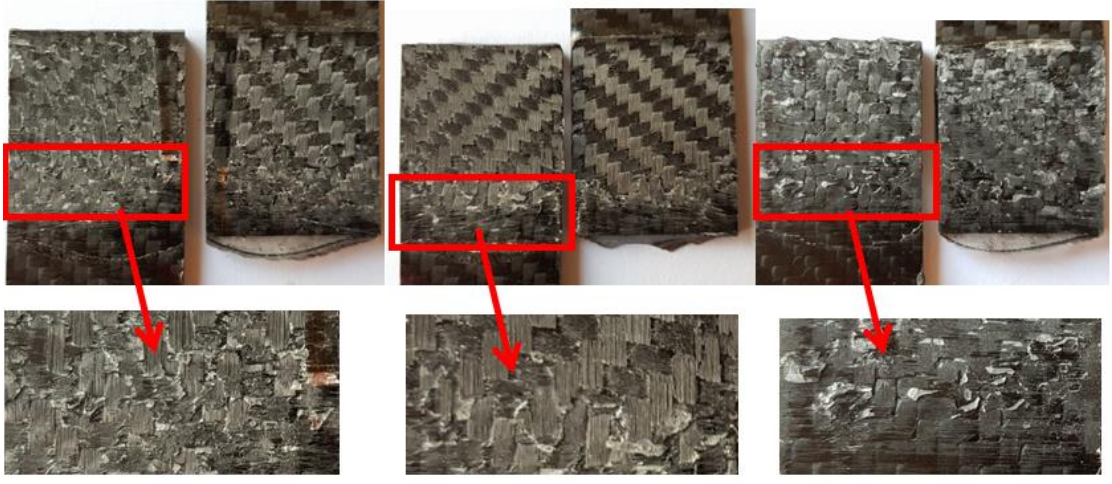
a



b

Şekil 4.8. PT326 yapıştırıcı için -80°C kopma yüzeyleri. a. Kompozit-kompozit
b. Kompozit-alüminyum

Şekil 4.9'da epoksi yapıştırıcı için oda sıcaklığında yapılan testler için kopma yüzeyleri verilmiştir. Alüminyum-kompozit numunelerde hasar tamamen adezyon şeklinde yani yapışma yüzeyinden gerçekleşmiştir. Kompozit-kompozit numunelerde ise hasar adezyon ve kohezyon olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.8.a'da kopma yüzeylerine yakından bakıldığında elyaf hasarları ve yapıştırıcı kalıntıları görülmektedir. Şekil 4.2'de çekme deneyi sonuçlarına bakıldığında kompozit-kompozit numunelerin ortalama kesme gerilmesinin %300 fazla olmasının sebebinin kompozit numunelerde tabaka hasarı olduğu sonucu çıkmaktadır.



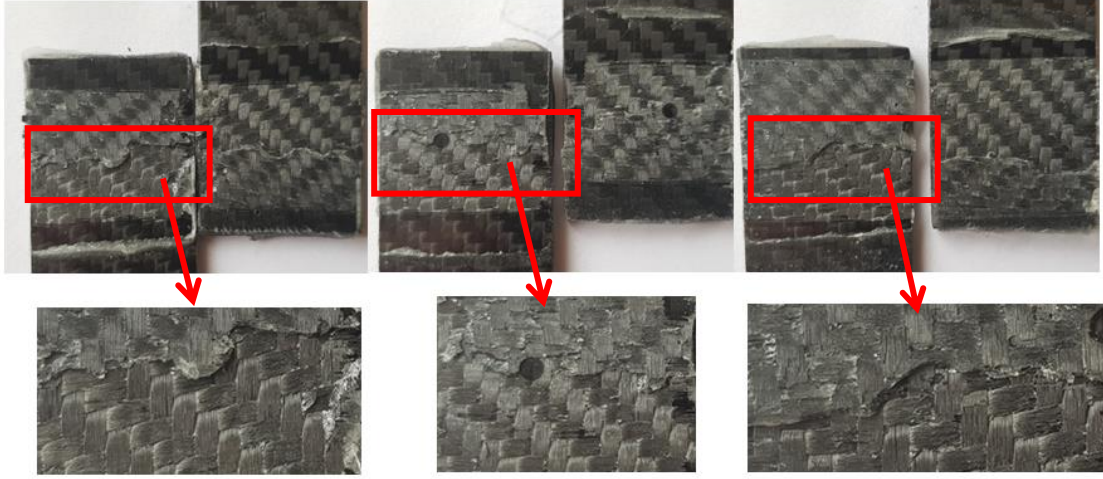
a



b

Şekil 4.9. Epoksi yapıştırıcı için oda sıcaklığında (23°C) kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b. Kompozit-alüminyum

Şekil 4.10'da epoksi yapıştırıcı -80°C sıcaklığında kopma yüzeyleri gösterilmiştir. Alüminyum-kompozit numuneler için hasar tamamen adezyon hasarı olmuştur. Yapıştırıcı alüminyum yüzeye iyi tutunamadığından bu sıcaklık için tamamen bu yüzeyden hasara uğramıştır. Kompozit-kompozit numunelerde ise adezyon ve kohezyon hasarının ikisi birlikte görülmektedir. Hasarların yapışma yüzeyine dağılımına bakıldığında yaklaşık olarak %50 oranında yapışma yüzeyinden meydana geldiği görülmektedir. Kompozit-kompozit numunelerin kullanıldığı 23°C 'de yapılan deneylerde ise kopma yüzeylerinde aynı şekilde kohezyon ve adezyon hasarları görülmüş ve kopma anındaki kesme gerilmeleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır.



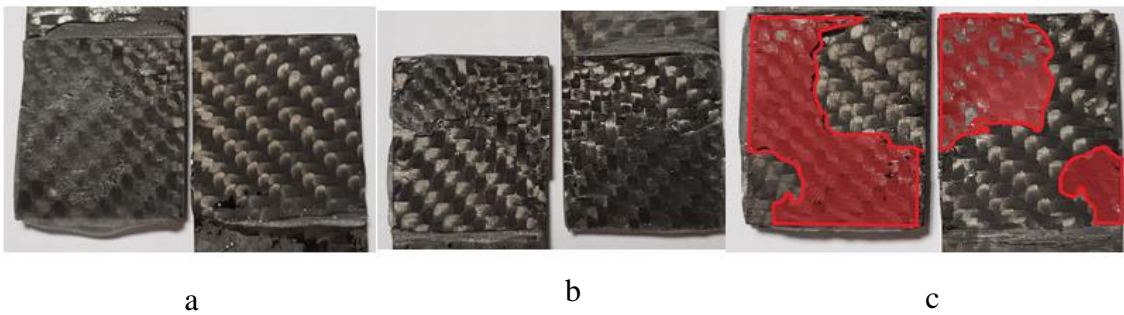
a



b

Şekil 4.10. Epoksi yapıştırıcı için -80°C sıcaklığında kopma yüzeyi. a. Kompozit-kompozit b. Kompozit-alüminyum

Şekil 4.11’de partikül katkılı numunelerin kopma yüzeyleri verilmiştir. Şekilde görüleceği gibi %2 katkılı numunede hasar yapışma yüzeyinden meydana gelmiştir. %4 katkılı numunede ise hasar yapıştırıcıdan meydana gelmiş fakat yapıştırıcı parçaları yapışma yüzeyinde kalmıştır. %6 katkılı numunede ise Şekil 4.11’de kırmızı ile gösterilen bölgelerde yapıştırıcı yapışma yüzeyinden kopmuştur.



a

b

c

Şekil 4.11. Partikül katkılı numunelerin kopma yüzeyleri. a. Kütlece %2, b. Kütlece %4
c. Kütlece %6

5. DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum numuneler tek tesirli şekilde yapıştırılarak kesme gerilmesine ve kopma yüzeylerine bakılmıştır. Testler için ASTM D5868 standardına göre numuneler hazırlanıp iki farklı yapıştırıcı ve üç farklı sıcaklık altındaki kesme gerilmesine incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Daha ekonomik yapıştırıcı türleriyle PMC birleştirilmesi mümkün olabileceği tespit edilmiştir.
- Yapılan çalışma şartlarında PT326 yapıştırıcı epoksi yapıştırıcıya göre kompozit-kompozit numunelerde %100 fazla, kompozit-alüminyum numunelerde %300 fazla yüksek kesme gerilmesi göstermiştir.
- Kompozit-kompozit numunelerde 80°C dışındaki sıcaklıklarda ve farklı yapıştırıcılarda kesme gerilmesine kompozit-alüminyum numunelere göre en az %100 en çok %400 fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin kompozit malzemelerin yüzeylerinin yapışma kabiliyetinin yüksek olması olduğu düşünülmektedir.
- Çalışmada kullanılan epoksi yapıştırıcının sıcaklığın artması ile kesme gerilmesine radikal bir şekilde düştüğü 80°C’de yük taşıyamayacak hale geldiği saptanmıştır.
- Epoksi yapıştırıcının alüminyum yüzeylere yapışma kabiliyetinin çok düşük olduğu ve bununda genel bağlantı performansını negatif yönde etkilendiği belirlenmiştir.
- En iyi yapışma sağlanan numunelerde yüksek kesme gerilmesinin oluştuğu ve hasarın yapıştırılan malzeme meydana geldiği görülmüştür. Buda yapıştırıcının yapışma yüzeyine iyi bağlanmasından kaynaklanmaktadır.
- Krom-manyezit partikül ilavesinin epoksi yapıştırıcının sünekliğini artırıp kesme gerilmesini artırdığı görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- [1] L. F. M. Da Silvaa, R. A. M. Da Silvaa, J. A. G. Chousala, and A. M. G. Pintob, “Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 15–29, 2008.
- [2] D. F. S. Saldanha *et al.*, “Mechanical characterization of a high elongation and high toughness epoxy adhesive,” *International Journal of Adhesion and Adhesives.*, vol. 47, pp. 91–98, 2013.
- [3] C. C. Chamis and P. L. N. Murthy, “Simplified Adhesively Procedures for Designing Bonded Composite Joints,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 10, no. 1, pp. 29–41, 1991.
- [4] E. M. Moya-Sanz, I. Ivañez, and S. K. Garcia-Castillo, “Effect of the geometry in the strength of single-lap adhesive joints of composite laminates under uniaxial tensile load,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 72, 2016, pp. 23–29, 2017.
- [5] Q.-G. Zeng and C. T. Sun, “Novel design of a bonded lap joint,” *AIAA J.*, vol. 39, no. 10, pp. 1991–1996, 2001.
- [6] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, “The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 224, no. 2, pp. 51–62, 2010.
- [7] R. L. Fernandes, M. F. S. F. De Moura, and R. D. F. Moreira, “Effect of temperature on pure modes I and II fracture behavior of composite bonded joints,” *Composites Part B Engineering*, vol. 96, pp. 35–44, 2016.
- [8] F. Nardone, M. Di Ludovico, F. J. De Caso, Y. Basalo, A. Prota, and A. Nanni, “Tensile behavior of epoxy based FRP composites under extreme service conditions,” *Composites Part B Engineering*, vol. 43, no. 3, pp. 1468–1474, 2012.
- [9] L. D. R. Grant, R. D. Adams, and L. F. M. da Silva, “Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 5, pp. 535–542, 2009.
- [10] M. M. Arouche, S. Budhe, L. A. Alves, S. Teixeira de Freitas, M. D. Banea, and S. de Barros, “Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [11] R. L. Fernandes, M. F. S. F. De Moura, and R. D. F. Moreira, “Effect of moisture on pure mode I and II fracture behaviour of composite bonded joints,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 68, pp. 30–38, 2016.
- [12] J. J. M. Machado, E. A. S. Marques, and L. F. M. da Silva, “Influence of low and

- high temperature on mixed adhesive joints under quasi-static and impact conditions,” *Composite Structures*, vol. 194, pp. 68–79, 2018.
- [13] L. F. M. da Silva and R. D. Adams, “Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 27, no. 3, pp. 216–226, 2007.
- [14] M. Schweizer, D. Meinhard, S. Ruck, H. Riegel, and V. Knoblauch, “Adhesive bonding of CFRP: a comparison of different surface pre-treatment strategies and their effect on the bonding shear strength,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, no. 23, pp. 2581–2591, 2017.
- [15] Q. Bénard, M. Fois, and M. Grisel, “Influence of fibre reinforcement and peel ply surface treatment towards adhesion of composite surfaces,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 25, no. 5, pp. 404–409, 2005.
- [16] L. Sorrentino, W. Polini, C. Bellini, and G. Parodo, “Surface treatment of CFRP: influence on single lap joint performances,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 85, pp. 225–233, 2018.
- [17] H. Wang, X. Hao, K. Yan, H. Zhou, and L. Hua, “Ultrasonic vibration-strengthened adhesive bonding of CFRP-to-aluminum joints,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 257, pp. 213–226, 2018.
- [18] G. Meneghetti, M. Quaresimin, and M. Ricotta, “Influence of the interface ply orientation on the fatigue behaviour of bonded joints in composite materials,” *International Journal of Fatigue*, vol. 32, no. 1, pp. 82–93, 2010.
- [19] J. M. Wernik and S. A. Meguid, “On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives,” *Materials and Design*, vol. 59, pp. 19–32, 2014.
- [20] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009.
- [21] T. W. Clyne, *An introduction to composite Materials*, 2nd edition, Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press, 1996, pp.1-8.
- [22] A. B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods, and Applications*, vol. 3, Michigan, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1992.
- [23] F. Aydın, “Çevresel koşulların yapıştırılmış kompozitlerin mekanik performanslarına etkisi,” Yüksek lisans tezi, Makina Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2014.
- [24] A. R. Bunsell and J. Renard, *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*, Bristol, Great Britain: Institute of Physics Publishing, 2005.
- [25] D. Brigante, *New composite materials: Selection, design, and application*, London, Great Britain: Springer International Publishing, 2014.
- [26] İ. Uygur and H. Saruhan, “Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt 8, no. 1, ss. 167–174, 2004.

- [27] X.-S. Yi and S. D. L. Zhang, *Composite Materials Engineering*, Beijing, China: Chemical Industry Press, 2018.
- [28] A. E. P. Gamzenur Özsin, “Zift esaslı karbon fiber üretimi (tarama),” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2018.
- [29] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*, Florida, USA: CRC Press, 2017.
- [30] A. N. Kishore and N. S. Prasad, “An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 35, pp. 55–58, 2012.
- [31] M. R. Gude, S. G. Prolongo, and A. Ureña, “Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: Correlation between surface and mechanical properties,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 207, pp. 602–607, 2012.
- [32] KORDSA. (2018, April 8). *Technical Data Sheet CM11* [Online]. Available: <https://composite.kordsa.com/en/images/pdf/product/CM11.pdf>
- [33] A. Gautam, P. K. Sarkar, R. Jangid, and K. P. Ajit, “Ductile and fatigue behaviour estimation of lightweight high- strength Al 2024,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 7873–7881, 2018.
- [34] PERMABOND. *PT326 Polyurethane Adhesive Technical Datasheet* [Online]. Available: https://www.permabond.com/wpcontent/uploads/2016/04/PT326_TDS-1.pdf
- [35] A. Ozel, B. Yazici, S. Akpınar, M. D. Aydın, and Ş. Temiz, “A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends,” *Composites Part B Engineering*, vol. 62, pp. 167–174, 2014.
- [36] L. F. M. da Silva, P. J. C. das Neves, R. D. Adams, and J. K. Spelt, “Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 3, pp. 319–330, 2009.
- [37] L. F. M. da Silva and R. D. Adams, “Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 27, no. 3, pp. 227–235, 2007.
- [38] R. D. Adams, “Strength predictions for lap joints, especially with composite adherends. A review,” *Journal of Adhesives*, vol. 30, no. 1–4, pp. 219–242, 1989.
- [39] J. J. M. Machado, P. D. P. Nunes, E. A. S. Marques, and L. F. M. da Silva, “Adhesive joints using aluminium and CFRP substrates tested at low and high temperatures under quasi-static and impact conditions for the automotive industry,” *Composites Part B Engineering*, vol. 158, 2018, pp. 102–116, 2019.
- [40] P. A. M. G. P. Bamberg, U. Reisinger, A. Schiebahn, J. D. V. Barbosa, B. Marx, and R. S. Coelho, “Digital image correlation analysis of the effects of the overlap length, adhesive thickness and adherends yield strength over similar and dissimilar joints of high strength steel and aluminum alloys,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 83, pp. 69–75, 2018.
- [41] I. A. Akpınar, K. Gültekin, S. Akpınar, H. Akbulut, and A. Ozel, “Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures,” *Composites Part B Engineering*, vol. 110, pp. 420–428, 2017.

- [42] E. C. Monteiro and A. F. Avila, “The carbon nanotubes effect into single-lap joint failure modes and load capacity: A macromechanical analysis,” *Materials Research*, vol. 20, pp. 143–152, 2017.
- [43] I. A. Akpınar, K. Gültekin, S. Akpınar, H. Akbulut, and A. Ozel, “Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints,” *Composites Part B Engineering*, vol. 126, pp. 143–152, 2017.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Rıdvan ONGUN
Doğum Tarihi ve Yeri : 12/02/1991 ESKİŞEHİR
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ridvanongun@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Makine Müh.	Selçuk Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Prof. Dr. Orhan Oğuz Anadolu Lisesi	2009