



**KARBON/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILAN UÇAK
YAPILARINDA YAPIŞMA BAĞLANTILARI**

Mehmet Erdem İRİŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2020

Mehmet Erdem İRİŞ tarafından hazırlanan “KARBON/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILAN UÇAK YAPILARINDA YAPIŞMA BAĞLANTILARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Elmas SALAMCI

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Doç. Dr. Şener KARABULUT

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 06/03/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Erdem İRİŞ
06/03/2020

KARBON/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERDEN YAPILAN UÇAK YAPILARINDA YAPIŞMA BAĞLANTILARI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Erdem İRİŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2020

ÖZET

Günümüz havacılık sektöründe kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek özgül modül ve özgül mukavemet özellikleri sayesinde hava araçları yapılarında kullanımı en yüksek orana sahip malzemelerdir. Kompozit malzemelerin sağladıkları avantajları yanında imalat ve montajında da çeşitli dezavantajlara sahiptir. Kompozit malzemelerin montajı mekanik bağlayıcı veya yapıştırma ile gerçekleştirilmektedir. Mekanik bağlayıcıların kullanımında kompozit malzemeye delik açılarak süreksizlik yaratması, bağlayıcıların neden olduğu ek ağırlık gibi dezavantajları, kompozit malzemelerin yapıştırma ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışma sayısının artmasını sağlamıştır. Yapıştırma bağlantılarının mekanik birleştirmeye göre avantajları olmasına rağmen yapışma kalitesini etkileyen birçok parametre olması, birleştirme işlemini mekanik birleştirmeye göre daha karmaşık hale getirmiştir. Bu tez çalışmasında da bu parametrelerin yapışma kalitesine etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiş, tasarımcı ve araştırmacılara rehber olacak nitelikte bir çalışma yapılmıştır.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Ortak kür, Ortak yapışma, Sonradan yapışma, Yapıştırıcılar, Kompozitler
Sayfa Adedi : 96
Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI

BONDING JOINTS IN AIRCRAFT STRUCTURES MADE OF CARBON/EPOXY
COMPOSITE MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Erdem İRİŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2020

ABSTRACT

In today's aviation, composite materials are the materials with the highest rate of use in aircraft structures thanks to their high specific modulus and specific strength properties. Besides the advantages of composite materials, they have various disadvantages in manufacturing and assembly. Composite materials are assembled by mechanical fastening or adhesive bonding. In the use of mechanical fasteners, the disadvantages such as creating a discontinuity by punching the composite material, the additional weight caused by the fasteners, increased the number of researches on the bonding of composite materials with adhesives. Although bonding joints have advantages over mechanical fastening, there are many parameters affecting the adhesion quality, making the joining process more complicated than mechanical fastening. In this study, the effects of these parameters on the quality of adhesion were examined extensively and a study was conducted to guide the designers and researchers.

Science Code : 91417

Key Words : Cocure, Cobond, Secondary bond, Adhesives, Composites

Page Number : 96

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın yapılmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen, çalışmalarımda bana daima yol gösteren,engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım değerli danışmanım Doç. Dr. Elmas SALAMCI hocama, çalışmalarımda her türlü imkânı ve desteği sağlayan, tecrübe ve katkılarıyla çalışmam üzerinde büyük emeği olan sayın Serkan DEHNELİLER'e ve bugünlere gelmemi sağlayan ve bu çalışma sırasında desteğini hep hissettiğim sevgili aileme saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ	3
2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları.....	3
2.1.1. Yapıştırma bağlantılarının avantajları.....	3
2.1.2. Yapıştırma bağlantılarının dezavantajları	3
2.2. Yapıştırma Bağlantılarında Görülen Hasar Modları	4
2.3. Güçlendirme Mekanizmaları	4
2.4. Yapıştırma Bağlantıları Üzerine Gelen Yükler	5
2.5. Bağlantı Türleri ve Gerilme Dağılımları	6
2.6. Yapıştırma Üretim Yöntemleri.....	6
2.6.1. Ortak kür	6
2.6.2. Ortak yapışma	7
2.6.3. Sonradan yapışma	7
2.7. Yapıştırıcılar	8
2.7.1. Film yapıştırıcı	8
2.7.2. Macun yapıştırıcı.....	9
2.7.3. Köpük yapıştırıcı.....	9

	Sayfa
2.8. Yüzey Hazırlama Teknikleri	9
2.8.1. Soyma Kumaşı	10
2.8.2. Aşındırma.....	10
2.8.3. Kumlama ve zımparalama.....	10
2.8.4. Plazma	11
2.8.5. Lazer eritme	11
3. LİTERATÜR TARAMASI	13
3.1. Kupon Testi için Parametreler.....	13
3.1.1. Yapıştırma üretim yöntemleri	13
3.1.2. Yüzey hazırlama.....	14
3.1.3. Geometrik parametreler	15
3.1.4. Malzeme parametreleri.....	18
3.1.5. Çevresel etkiler.....	18
3.2. Alt-Montaj Testi için Parametreler.....	23
3.2.1. Kiriş profil gövdesi yüksekliği.....	23
3.2.2. Kiriş yarıçapı	24
3.2.3. Kiriş flanş genişliği	24
3.2.4. Kiriş sayısı/iki kiriş arası mesafe/kabuk ölçüleri	25
3.2.5. Kiriş profili.....	25
3.2.6. Kabuk ve kiriş profil gövdesi kalınlıkları	27
3.2.7. Rijitlik	28
3.2.8. Omega (Ω) kirişler	28
4. TASARIM, ÜRETİM, TESTLER VE ANALİZ.....	31
4.1. Tasarım Faaliyetleri.....	31
4.1.1. Çevresel parametreler.....	31
4.1.2. Birleştirme yöntemi.....	31

	Sayfa
4.1.3. Yapıştırıcı kalınlığı.....	31
4.1.4. Yapıştırılan malzeme kalınlık ve dizilimi	31
4.1.5. Yapıştırıcı malzeme	33
4.1.6. Bindirme uzunluğu.....	33
4.2. Üretim Faaliyetleri.....	34
4.2.1. Kullanılan malzemelerin özellikleri	34
4.3. Test Faaliyetleri	41
4.3.1. Tek bindirmeli kayma testi.....	41
4.3.2. Çift ankastre giriş kırılma tokluğu testi (Mod I)	62
4.3.3. Çentikli bükme kırılma tokluğu testi (Mod II).....	66
4.4. Analiz Faaliyetleri	70
4.4.1. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin modellenmesi.....	70
4.4.2. Tek bindirmeli kayma analizleri	74
4.4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	94

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin geometrik boyutları	32
Çizelge 4.2. Kırılma tokluğu test numunelerinin geometrik boyutları	33
Çizelge 4.3. M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K malzemesinin fiziksel özellikleri	36
Çizelge 4.4. M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K malzemesinin mekanik özellikleri	36
Çizelge 4.5. AS4C/6K malzemesinin mekanik özellikleri	37
Çizelge 4.6. M91/34%/UD194/IM7-12K malzemesinin fiziksel özellikleri	37
Çizelge 4.7. M91/34%/UD194/IM7-12K malzemesinin mekanik özellikleri	38
Çizelge 4.8. IM7-12K malzemesinin mekanik özellikleri	38
Çizelge 4.9. BR 127 primerli FM300K malzemesinin mekanik özellikleri	39
Çizelge 4.10. FM300K'nın nem ve sıvı koşullardaki mekanik özellikleri	39
Çizelge 4.11. Nem çekmiş FM300K'nın yapışma öncesi mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.12. LOCTITE HYSOL EA9394 malzemesinin mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.13. AR numunelerine ait test sonuçları.....	42
Çizelge 4.14. BR numunelerine ait test sonuçları.....	44
Çizelge 4.15. CR numunelerine ait test sonuçları.....	45
Çizelge 4.16. DR numunelerine ait test sonuçları.....	47
Çizelge 4.17. ER numunelerine ait test sonuçları	48
Çizelge 4.18. FR numunelerine ait test sonuçları	50
Çizelge 4.19. GR numunelerine ait test sonuçları.....	51
Çizelge 4.20. HR numunelerine ait test sonuçları.....	53
Çizelge 4.21. Oda koşullarında yapılan test sonuçları	54
Çizelge 4.22. BC numunelerine ait test sonuçları.....	55
Çizelge 4.23. FC numunelerine ait test sonuçları	56
Çizelge 4.24. GC numunelerine ait test sonuçları.....	58
Çizelge 4.25. BH numunelerine ait test sonuçları.....	59

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.26. GH numunelerine ait test sonuçları	61
Çizelge 4.27 .Sıcak/nemli ve soğuk/kuru koşullarda yapılan test sonuçları.....	62
Çizelge 4.28. IR numunelerine ait test sonuçları	64
Çizelge 4.29. KR numunelerine ait test sonuçları.....	65
Çizelge 4.30. JR numunelerine ait test sonuçları	68
Çizelge 4.31. LR numunelerine ait test sonuçları	69
Çizelge 5.1. Oda sıcaklığı/kuru koşulda test edilen B, F ve G ‘nin karşılaştırılması ...	81
Çizelge 5.2. Diğer iklim koşullarında test edilen B, F ve G ‘nin karşılaştırılması	81
Çizelge 5.3. Yapışma yöntemlerine göre A-E, B-G ve C-H ‘nin karşılaştırılması.....	83
Çizelge 5.4. Farklı yapıştırıcı kalınlıklarına sahip A-B ve E-G ‘nin karşılaştırılması..	84
Çizelge 5.5. Farklı dizilime sahip B-C ve G-H serilerinin karşılaştırılması.....	85
Çizelge 5.6. Farklı yapıştırıcı türüne sahip F-G serilerinin karşılaştırılması.....	86
Çizelge 5.7. Farklı bindirme uzunluğuna sahip D-G serilerinin karşılaştırılması	86

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantılarında görülen hasar modları	4
Şekil 2.2. Yaygın kullanılan kiriş profilleri	5
Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantıları üzerine gelen yükler.....	5
Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantı türleri ve gerilme dağılımları	6
Şekil 2.5. Soyma kumaşı- kompozit parça ara yüzü.....	10
Şekil 3.1. Yapıştırma bağlantılarına etki eden çevresel parametreler.....	18
Şekil 3.2. Omega kiriş kesit alan- boyuna maksimum fiber gerilmesi grafiği	26
Şekil 3.3. Omega kirişlerin geometrik ölçülerinin optimizasyonu	28
Şekil 3.4. Omega kiriş gövde açısı- burkulma yükü grafiği	29
Şekil 3.5. Omega kiriş yüksekliği- burkulma yükü grafiği.....	29
Şekil 4.1. Tek bindirmeli yapışma bağlantılarında numune konfigürasyonları.....	32
Şekil 4.2. Tek bindirmeli kayma test numunelerinin geometrik boyutları	33
Şekil 4.3. Kırılma tokluğu testlerinde kullanılan numunenin lamina dizilimi.....	33
Şekil 4.4. ASTM D5868 standartlarına uygun tek bindirmeli kayma testi düzeneği ...	41
Şekil 4.5. AR numunelerine ait yük-uzama grafiği	42
Şekil 4.6. BR numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	43
Şekil 4.7. CR numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	45
Şekil 4.8. DR numunelerine ait yük-uzama grafiği	46
Şekil 4.9. ER numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	48
Şekil 4.10. FR numunelerine ait yük-uzama grafiği	49
Şekil 4.11. GR numunelerine ait yük-uzama grafiği	51
Şekil 4.12. HR numunelerine ait yük-uzama grafiği	52
Şekil 4.13. BC numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	54
Şekil 4.14. FC numunelerine ait yük-uzama grafiği	56
Şekil 4.15. GC numunelerine ait yük-uzama grafiği	57

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. BH numunelerine ait yük-uzama grafiği	59
Şekil 4.17. GH numunelerine ait yük-uzama grafiği	60
Şekil 4.18. ASTM D5528 çift ankastre kiriş kırılma tokluğu test düzeneği.....	62
Şekil 4.19. IR numunelerine ait yük-uzama grafiği	63
Şekil 4.20. KR numunelerine ait yük-uzama grafiği	65
Şekil 4.21. ASTM D7905 çentikli bükme kırılma tokluğu test düzeneği.....	66
Şekil 4.22. JR numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	67
Şekil 4.23. LR numunelerine ait yük-uzama grafiği.....	69
Şekil 4.24. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin üst ve izometrik görünüşü	70
Şekil 4.25. Master (altta) ve slave (üstte) yüzey seçimleri	71
Şekil 4.26. Tek yönlü ve dokuma tek bindirmeli kayma testi numune dizilimleri.....	71
Şekil 4.27. Numunelere mesh atılması ve düğümlerin tanımlanması.....	72
Şekil 4.28. Yapıştırıcının analiz veri tabanına tanımlanması	72
Şekil 4.29. Yapıştırılacak yüzeylerin seçimi ve tanımlanması	73
Şekil 4.30. Bağlantının analiz yazılımında sabitlemesi ve uzama tanımlanması	73
Şekil 4.31. BR numunesinin yük-uzama grafiği.....	74
Şekil 4.32. BR numunesinde oluşan kayma gerilmesi.....	75
Şekil 4.33. CR numunesinin yük-uzama grafiği.....	75
Şekil 4.34. CR numunesinde oluşan kayma gerilmesi.....	75
Şekil 4.35. DR numunesinin yük-uzama grafiği.....	76
Şekil 4.36. DR numunesinde oluşan kayma gerilmesi	76
Şekil 4.37. GR numunesinin yük-uzama grafiği.....	77
Şekil 4.38. GR numunesinde oluşan kayma gerilmesi	77
Şekil 4.39. HR numunesinin yük-uzama grafiği.....	78
Şekil 4.40. HR numunesinde oluşan kayma gerilmesi	78
Şekil 4.41. Film yapıştırıcının taşıyıcı fiberleri	79

Şekil	Sayfa
Şekil 4.42. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların kopma sonrası yüzeyleri.....	80
Şekil 4.43. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların kırılma sonrası fiber yüzeyleri .	80
Şekil 4.44. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların numune ile birleşme yüzeyi	80
Şekil 5.1. Sıcak/nemli koşullara maruz kalmış numunedeki çatlak ve boşluklar.....	82
Şekil 5.2. Soğuk/kuru koşullara maruz kalmış numunedeki mikro çatlaklar	82
Şekil 5.3. Aynı ölçekte G (üst) ve F (alt) ‘nin kusur miktarının karşılaştırılması	84

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Tek bindirmeli kayma numunesi	41
Resim 4.2. Instron 5985 test cihazı ve tek bindirmeli kayma test düzeneği.....	41
Resim 4.3. AR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	43
Resim 4.4. BR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	44
Resim 4.5. CR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	46
Resim 4.6. DR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	47
Resim 4.7. ER numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	49
Resim 4.8. FR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu.....	50
Resim 4.9. GR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	52
Resim 4.10. HR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	53
Resim 4.11. BC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	55
Resim 4.12. FC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu.....	57
Resim 4.13. GC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	58
Resim 4.14. BH numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu	60
Resim 4.15. GH numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu.....	61
Resim 4.16. Pişirici menteşeye sahip çift ankastre giriş kırılma tokluğu numunesi.....	62
Resim 4.17. Çift ankastre giriş test düzeneği.....	63
Resim 4.18. IR numunesinin ayrılma yüzeyi.....	64
Resim 4.19. KR numunesinin ayrılma yüzeyi	66
Resim 4.20. Çentikli bükme kırılma tokluğu numunesi	66
Resim 4.21. Çentikli bükme test düzeneği.....	67
Resim 4.22. JR numunesinin ayrılma yüzeyi.....	68
Resim 4.23. LR numunesinin ayrılma yüzeyi.....	69
Resim 4.24. SEM numunelerinin altın kaplama öncesi ve sonrası.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
°	Derece
C	Celsius
cm	Santimetre
cm ³	Santimetreküp
CO ₂	Karbondioksit
dk.	Dakika
E	Young Modülü
F	Fahrenheit
g	Gram
G	Kayma Modülü
GPa	Gigapascal
J	Joule
kN	Kilonewton
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
MPa	Megapascal
N	Newton
Nu	Poisson Oranı
Ω	Omega

Kısaltmalar	Açıklamalar
CoB	Ortak Yapışma
CoC	Ortak kürlenme
CTD	Soğuk/Kuru
DCB	Çift Ankastre Kiriş
ENF	Çentikli Bükme
ETD	Yüksek Sıcaklık/Kuru

Kısaltmalar**Açıklamalar****ETW**

Yüksek Sıcaklık/Nemli

FAW

Fiber Bölgesel Ağırlık

Gsm

Metrekaredeki ağırlık

IR

Kızılötesi

R/H

Bağıl Nem

RTD

Oda Sıcaklığı/Kuru

SeB

Sonradan Yapışma

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

SLJ

Tek Bindirmeli Bağlantı

UV

Ultraviyole

VCCT

Sanal Çatlak Kapama Tekniği

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, havacılık ve otomotiv endüstrisi başta olmak üzere tüm sanayi sektörlerinde gösterdiği yüksek özgül modül ve özgül mukavemet özellikleri ile kullanımı hızla artmaktadır. Kompozit malzemelerin üretimi kadar birleştirme işlemleri de bir hayli karmaşık ve zahmetlidir. Günümüzde mekanik birleştirmenin neden olduğu olumsuzluklardan dolayı yapıştırma ile birleştirme önem kazanmış ve bu alandaki çalışma sayısı bir hayli artmıştır. Buna rağmen yapıştırma bağlantılarında hala aydınlatılmayı bekleyen birçok parametre vardır.

Bu tez kapsamında uçak yapılarında kullanımı hızla artan kompozit malzemelerin yapışma bağlantılarını etkileyen parametreler kapsamlı olarak ele alınacaktır. Bu parametrelerin bağ mukavemetine ve yapışma kalitesine etkileri incelenecektir. Yapılan çalışmalar sonucunda mekanik birleştirmeye göre daha hafif ve daha mukavim birleştirme sağlanması hedeflenmektedir. Böylece üretim ve işletme maliyetlerinin azalması sağlanacaktır.

Kompozit malzemelerin yapıştırma ile birleştirilmesinde birleştirme türlerine göre, yüzey hazırlama türlerine göre, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin geometrik ölçülerine göre, yapıştırıcı türlerine göre ve çevresel koşullara göre birçok farklı parametre vardır. Bu parametreler bağ mukavemetinde doğrudan etkilidir ve optimize edilmesi gerekir. Bu tez çalışması kapsamında yapışma bağlantı parametreleri belirlenerek, tasarımı, analizi, üretimi ve testleri yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar ile literatürdeki mevcut boşluk doldurulacak ve yeni araştırmacılar için altyapı sağlanacaktır. Ayrıca hafifliğin çok önemli olduğu hava araçlarında, bu parametrelerin tam manasıyla anlaşılması halinde birincil ve ikincil yapısal uygulamalarda güvenle kullanılarak hafifleme sağlanacaktır.

2. KOMPOZİT MALZEMELERİN BİRLEŞTİRİLMESİ

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde mekanik ve yapıştırma olmak üzere iki yöntem kullanılır. Yapıştırma ile birleştirme mekanik birleştirmeye kıyasla bazı avantajlara sahip olsa da dezavantajları da mevcuttur. Bu avantaj ve dezavantajlar aşağıda listelenmiştir.

2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları

2.1.1. Yapıştırma bağlantılarının avantajları

1. Geniş yüzey alanında birleşme sağlandığı için yüksek yük taşıma kapasitesi vardır.
2. Birleşme bölgesindeki yükler homojen yayıldığı için düşük gerilme birikimleri oluşur.
3. Çok ince veya çok kalın malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir.
4. Yapıştırılacak parçaların kimyasında veya yapısında etkisi azdır veya hiç yoktur.
5. Benzer ya da benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir.
6. İstenmeyen bazı koşullar karşısında koruma sağlar.
7. Elektrik ve ısıya karşı yalıtıcıdır.
8. Benzer olmayan malzemeler arasında oluşabilecek galvanik korozyonu önler.
9. Titreşim ve darbe yüklerini sönümler.
10. Uygun yapıştırıcı ile yorulma ve hasar toleransı özellikleri iyileştirilebilir.
11. Mukavemet/Ağırlık oranı iyidir.
12. Mekanik birleştirme veya kaynakla birleştirmeye göre daha hızlı ve ucuz olabilir.

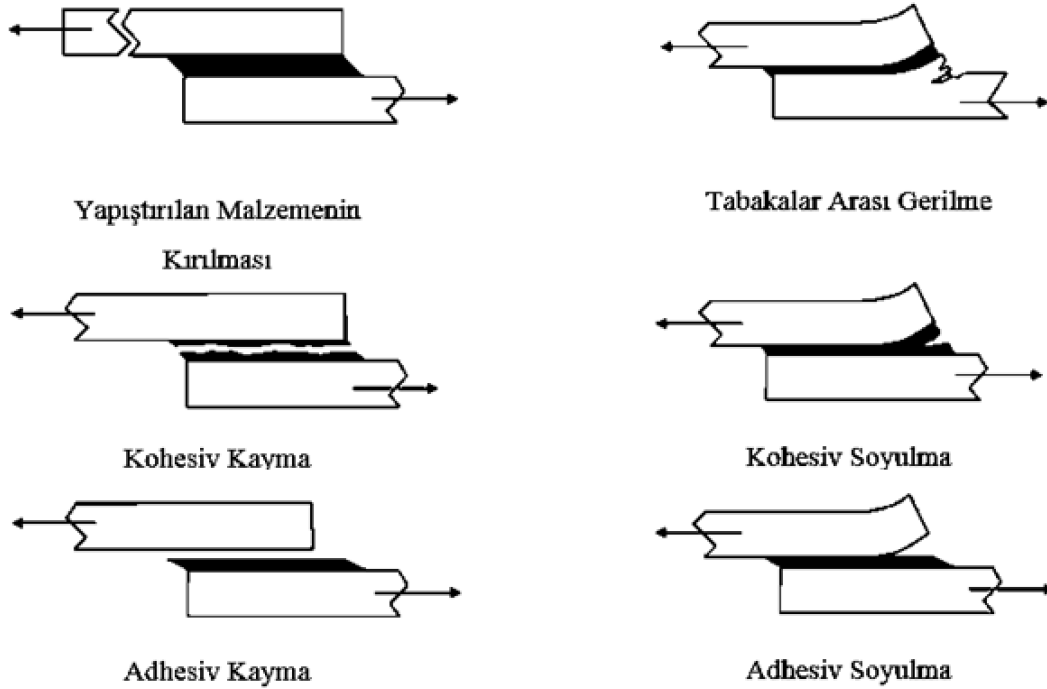
2.1.2. Yapıştırma bağlantılarının dezavantajları

1. Sade çekme ve kayma gerilmeleri karşısında soyulma ve ayrılmaya karşı hassastır.
2. Kritik uygulamalar için aşırı karmaşık gerilme analizleri gereklidir.
3. Yapıştırılacak yüzeylerde özenli bir yüzey hazırlama gereklidir.
4. Yapışma süreci özenle takip edilmelidir.
5. Bazı zamanlarda çalışma ömrü kısadır.
6. Kirlenme (yapışmada bağların oluşması) süreleri uzun olabilir.
7. Hasar tespitinde tahribatsız muayene yöntemlerine ihtiyaç duyulur.
8. Hatalı birleşmelerin onarılması neredeyse imkânsızdır.

9. Bağlantının ömrü çevreden etkilenir.
10. Yapıştırıcılarda kullanılan çözücülere karşı hassastır.
11. Özellikle doğal yapıştırıcılar bakteri, küf, kemirgen, haşerat tarafından zarar görür.

2.2. Yapıştırma Bağlantılarında Görülen Hasar Modları

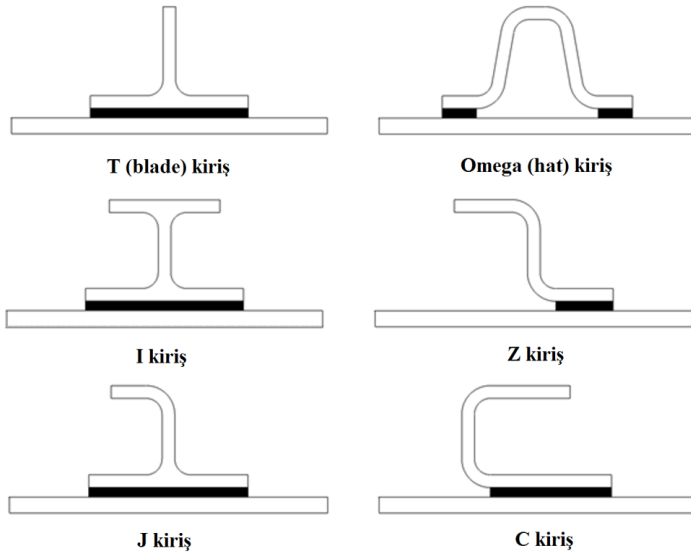
Yapılan araştırmalar [1] yapıştırma bağlantılarının en zayıf kısmının yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin arayüzü olduğunu belirtmektedir. Eğer iyi bir yapışma yüzeyi oluşturulduysa bağlantının en zayıf yerinin yapıştırıcının kendisinin olması beklenir. Şekil 2.1’de yapıştırma bağlantılarında meydana gelebilecek hasar modları görülmektedir.



Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantılarında görülen hasar modları

2.3. Güçlendirme Mekanizmaları

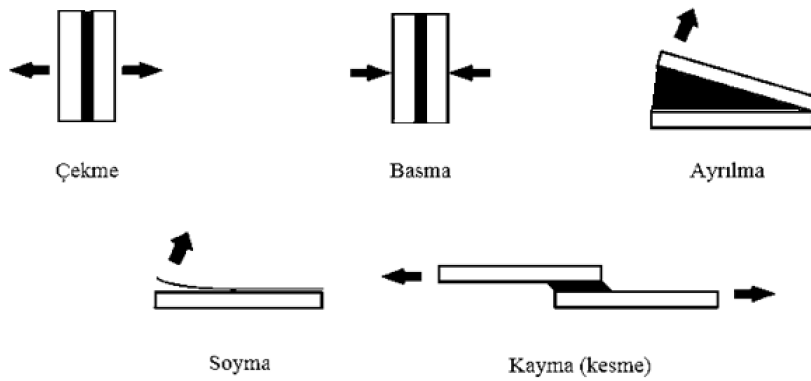
Eğilme, burkulma, kayma gerilmeleri altında çalışan yapısal elemanların dayanımını, yapının hafifliğini göz önünde bulundurarak çeşitli açık veya kapalı profillere sahip kirişlerle (yapısal takviye elemanlarıyla) güçlendirilmektedir. Şekil 2.2’de yaygın kullanılan kiriş profilleri gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yaygın kullanılan kiriş profilleri

2.4. Yapıştırma Bağlantıları Üzerine Gelen Yükler

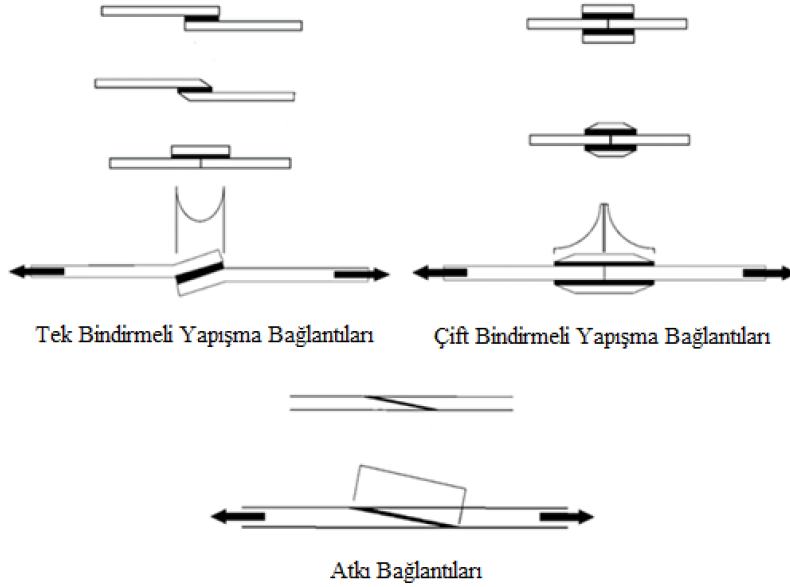
Yapılan araştırmalar yapıştırma bağlantıları tasarımı yaparken soyma ve ayrılma yükü alacak şekilde tasarım yapılmaması gerektiğini belirtmiştir. Çünkü yapıştırma bağlantılarının en çok yük çektiği koşul kayma (kesme) yüklemesi olmasıdır. Basma, kayma ve soyma yüklerine karşı dayanımları kıyaslandığında sırasıyla 1000:100:1 oranı görülmektedir [1,2]. Şekil 2.3’de yapıştırma bağlantıları üzerine gelen yükler gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantıları üzerine gelen yükler

2.5. Bağlantı Türleri ve Gerilme Dağılımları

Yapışma bağlantı çeşitleri ve bağlantı kısımlarında meydana gelen gerilme dağılımları Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantı türleri ve gerilme dağılımları

2.6. Yapıştırma Üretim Yöntemleri

2.6.1. Ortak kür

Kompozit laminatın başka bir kompozit laminatla ya da bir çekirdek malzemeyle aynı ve bir çevrimde kürlenmesidir.

Avantajları

1. En iyi yapısal performans.
2. Montajdaki parça sayısı azaltılarak yüksek oranda entegre yapılar yapılabilir. Böylece zaman ve iş maliyetlerinden kazanç sağlanır.
3. Yapışma yüzeyi yoktur.
4. İlave yapıştırıcı olmadığı için diğer yöntemlere göre daha hafiftir.
5. Tek çevrimde kürlenmesi üretim maliyetini düşürür.
6. En iyi yüzey uyumu sağlar.

Dezavantajları

1. Kalıp yapımı karmaşıktır.
2. Daha geniş tolerans aralığı vardır.

2.6.2. Ortak yapışma

En az bir tanesi daha önceden kürlenmiş ve en az bir tanesi daha önceden kürlenmemiş iki veya daha fazla kompozit malzemenin birlikte kürlenerek birleştirilmesidir.

Avantajları

1. İyi yapısal performans sağlar
2. İyi yüzey uyumu sağlar.
3. Daha az karmaşık kalıp tasarımı vardır.
4. Kürlenmiş parçalar kullanılabilir.
5. Daha az tolerans problemi vardır.

Dezavantajları

1. Daha önceden kürlenmiş malzeme için dikkatli yüzey hazırlığı gereklidir.
2. İki kürlenme çevrimi üretim maliyetlerini yükseltir.
3. İlave yapıştırıcı kullanımı ağırlığı artırır.
4. Kalite kontrol işlemleri gereklidir.

2.6.3. Sonradan yapışma

İki veya daha fazla daha önceden kürlenmiş kompozit malzemenin, yapıştırıcının kendisinde oluşan kimyasal ya da termal reaksiyonlar sonucunda birleştirilmesidir.

Avantajları

1. Çok önceden kürlenmiş parçaların birleştirilmesine olanak tanır.
2. En az karmaşık kalıp kullanımı bu yöntemdedir.

Dezavantajları

1. Her bir yapıştırılacak kompozit malzeme için dikkatli bir yüzey hazırlığı gereklidir.
2. Çevrim boyunca hizalama ve sıkıştırma için iyi tasarlanmış fikstürler gereklidir.
3. Önceden kürlenmiş kompozitlerin yeniden ısıtılması riskli olabilir.
4. İki veya daha fazla kürlenme çevrimi üretim maliyetlerini artırır.
5. İlave yapıştırıcı kullanımı ağırlığı artırır.
6. Soyulmayı önleyici mekanik bağlayıcı kullanmak gerekebilir.
7. Yüzey uyumu ve yapıştırıcı kalınlık kontrolü güçtür.
8. Yüksek yüklenen yapılar için uygulanabilir değildir.

2.7. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcıların seçimi birleştirmenin çalışacağı servis koşullarındaki mukavemet gereksinimine bağlıdır. Yapısal yapıştırma için yapıştırıcılar üç ana fiziksel formda kullanılırlar: (1) film, (2) macun, (3) köpük. Film yapıştırıcıların uygulanması ve yapıştırıcı kalınlık kontrolü kolay olmasına rağmen, parçanın otoklava veya fırına sığamayacak kadar büyük olması ya da soğutucu depolama ortamının yokluğu macun yapıştırıcı kullanımını gerektirmektedir. Köpük yapıştırıcılar ise bal petek parçalarını sabitlemek ve birleştirmek için kullanılır. Yapılan literatür araştırması [3] film yapıştırıcıların kalınlık kontrolü yapıştırıcı reçinenin taşıyıcısı olan keten ve keçenin kalınlığı ile sağlandığını belirtmektedir. Macun yapıştırıcıların kalınlık kontrolü ise istenen kalınlığı verecek çaptaki cam küreler ya da pul kullanılarak veya yapıştırılacak parça yüzeyi her kısımdan aynı basınç uygulanabilecek şekilde basitse basınç uygulayarak sağlanabilir.

2.7.1. Film yapıştırıcı

Literatür araştırmaları [3,4] polyester, cam ya da naylon malzemelerden yapılmış örgü ya da dokunmamış keçe üzerinde yapıştırma hattı kalınlık kontrolü sağlanmış şekilde buzdolabında muhafaza edildiğini belirtmektedir. Kullanmadan önce oda sıcaklığına inmesi beklenir. Yüksek sıcaklıklarda kürlendikleri için oda sıcaklıklarında kürlenen parçaların üretiminde kullanılamaz. Reçine, dolgu ve sertleştiriciden oluşan reçine bölümü, polyester, cam ya da naylondan oluşan ince dokunmuş kumaş bölümü ve en dışta bulunan kaplama bölümü olmak üzere üç bölümden oluşur. Film yapıştırıcıların macun yapıştırıcılar

karşısında çeşitli avantajları vardır. En önemli avantajı uygulamasının kolay olması ve bileşen karıştırma/birleştirme işlemlerinin olmamasıdır. En önemli dezavantajı ise depolama için dondurmak gereklidir. Ayrıca film yapıştırıcılar macun yapıştırıcılara göre daha pahalıdır ve gerekli bağ mukavemeti için sıcaklık ve basınç uygulamak gerekir.

2.7.2. Macun yapıştırıcı

Literatür araştırmasında [3] macun yapıştırıcıların spatula gibi ekipmanlar kullanılarak uygulandığı belirtilmiştir. Oda sıcaklığında veya ısıyla kürlenene bir ya da iki bileşenli yapıda olabilirler. İki bileşenli macun yapıştırıcılar, bir sıvı epoksi reçine ve bir çapraz bağ oluşumu sağlayan bileşenden oluşur. İki bileşenli macun yapıştırıcıların raf ömrü uzundur ve dondurulmaları gerekmez. Ancak uygulamadan önce karıştırılmaları gerekir, bu da işgücü maliyetini artırır ve eksik karıştırma veya uygun olmayan tartım gibi insan hatalarına yol açabilir. Günümüz teknolojisinde macun yapıştırıcılar, özellikle yüksek servis sıcaklıklarında film yapıştırıcılardan daha düşük mukavemete sahiptir.

2.7.3. Köpük yapıştırıcı

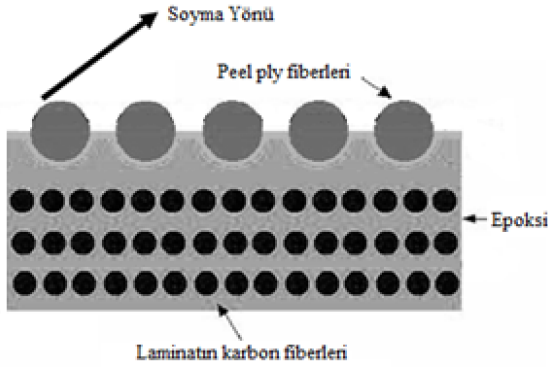
Yapılan literatür çalışmasında [3] yapısal birleştirmede kullanılan köpük yapıştırıcıların kürlenme çevrimi sırasında genleşmeyi sağlayan bir madde içeren epoksi reçine sistemlerinden oluştuğu belirtilmiştir. Farklı bal petek yapıların birleştirme kenarlarındaki boşluklarda veya bal petek yapıların onarılmasında kullanılır. Ayrıca birleştirme bölgelerinin neden olduğu nem yollarını ortadan kaldırmak ve boşluk doldurmak amacıyla kullanılırlar. Köpük yapıştırıcılar, macun veya bant (film) formunda olabilir.

2.8. Yüzey Hazırlama Teknikleri

Kompozit malzemelerin yapıştırarak birleştirilmesinde, malzemelerin yüzey hazırlama işlemlerine tabii tutularak yüzey enerjileri artırılır, yüzeydeki yapışmaya olumsuz etki yapabilecek maddelerden arındırılır ve yapıştırıcının tutunacağı yüzey alanı artırılır. Genelde mekanik ve kimyasal yüzey hazırlama işlemleri uygulanır.

2.8.1. Soyma Kumaşı

Yapılan literatür çalışmasında [5] soyma kumaşı olarak adlandırılan malzemelerin naylon, polyester veya cam kumaştan oluştuğu ifade edilmiştir. Bu malzemeler, kompozit laminatla birlikte kürlenir ve yapışma işlemi uygulanana kadar üzerinde kalır, çıkarılmaz. Çıkarıldıktan sonra zaman içerisinde yüzey enerjisi azalmaya başlar ve temas açısı artar. Soyma kumaşı kolay bir şekilde soyulamazsa ek temizleme işlemleri gerekir. Bu işlemler genellikle yüzey zımparalama ile yapılır. Kuru ve yaş prepreg türleri vardır. Yaş ve prepreg soyma kumaşlar daha iyi yapışma sağlar. Yaş soyma kumaşı tüm yüzey hazırlama yöntemleri içinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü sağlayan yöntemdir. Soyma kumaşlar yüksek sıcaklıklarda kürlenir bu yüzden düşük sıcaklıkta kürlenmiş parçalara uygulanamaz. Şekil 2.5’de soyma kumaşı – kompozit parça ara yüzü ve soyma kumaşı soyma yönü gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Soyma kumaşı- kompozit parça ara yüzü

2.8.2. Aşındırma

Kompozit malzemelerin yüzeyindeki reçine tabakasının aşındırılmasıyla oluşan çukurlar yüzey alanının artırılarak daha iyi yapışma gerçekleşmesini sağlar. Ancak yüzeyin aşındırılması sırasında oluşan kalıntı ve fiberlere zarar verilmesi tehlikesi yapışma kalitesini düşürür. Ayrıca bu yöntemde elde edilen sonuçlar tekrarlanabilir değildir.

2.8.3. Kumlama ve zımparalama

Bu yöntemler yüzeydeki yapışma kalitesini düşürecek kalıp ayırıcı vb. içeriklerin temizlenerek ve yüzeyde oluşturulan çukurlar ile yüzey alanının artırılmasıyla yapılan yüzey

hazırlama işlemleridir. İki yöntem de uzun süren ve tekrarlanabilir sonuçlar vermeyen yöntemlerdir. Bazı uygulamalarda soyma kumaşı soyulduktan sonra zımparalama ile yüzey kalitesi iyileştirilebilir. Zımparalama sonrası kalan artıkları vakumlama ya da uygun çözücü ile temizlenebilir. İki yöntem kıyaslandığında, yüzey hazırlama konusunda zımparalamanın, kumlamadan daha etkili olduğu bilinmektedir.

2.8.4. Plazma

Çeşitli gazların iyonize edilmesiyle oluşturulan plazma sayesinde yüzeye verilen enerji ile yüzey hazırlama işlemi atmosfer basıncı altında yapılır. Vakum sistemine ihtiyaç duymadığı için büyük parçaların yüzey hazırlama işlemlerinde kullanılabilir.

2.8.5. Lazer eritme

Çeşitli dalga boyu, güç, ışın çapı, frekans, atış sayısı, hız, atış mesafesine sahip lazerler kullanılarak kompozit malzemelerin yüzeyindeki reçine buharlaştırılarak oluşturulan çukurlar, yüzey alanının artırılarak daha iyi yapışma olmasını sağlar. Yüzey hazırlama işleminden sonra yağ içermeyen hava üflemesi ile malzeme artıkları temizlenir. Ultraviyole ve kızılötesi lazerler mevcuttur. Lazer ile yüzey hazırlama tekrarlanabilir sonuçlar verir ve otomasyona uygundur. Nd: YAG lazer tüm yüzey hazırlama yöntemleri arasında en yüksek tek bindirmeli kayma mukavemeti veren ve en küçük temas açısı olan yöntemdir.

Lazer, plazma ve diğer bazı mekanik yüzey hazırlama yöntemlerinde kompozit malzemenin en üstündeki reçine tabakasının altına geçip fiberlere hasar verme gibi istenmeyen durumlar oluşabilir. Bunun önüne geçmek için bazı uygulamalarda en üste film yapıştırıcı koyulup birlikte kürlenir. Böylece fiberlere zarar verme ihtimali azalır, ancak ek yapıştırıcı kullanımı ek ağırlığa neden olur.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Kompozit malzemelerin yapışma mekanizması oldukça karmaşıktır ve günümüzde aydınlatılmayı bekleyen birçok parametre vardır. Literatürde yapılmış çalışmaların kimi tek bindirmeli kayma mukavemetlerini kıyaslarken kimi ise Mod I, Mod II veya Karışık Mod kırılma tokluklarını incelemektedir.

3.1. Kupon Testi için Parametreler

3.1.1. Yapıştırma üretim yöntemleri

Song ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [6] en yüksek mukavemet ek yapıştırıcı kullanılmadan ortak kür yöntemi ile üretilen numunelerde görülürken, en düşük mukavemet ise ortak yapışma yönteminde görülmüştür. Sonradan yapışma yönteminde ise ortak kür yöntemine yakın bir mukavemet görülmüştür. Ayrıca ek yapıştırıcı kullanılarak ortak kür yöntemi denenmiş ve elde edilen mukavemet sonradan yapışma ile ortak yapışma yöntemleri arasında bulunmuştur.

Elaldı ve arkadaşları J profile sahip kiriş ve kabukları ortak kür ve sonradan yapışma yöntemleriyle birleştirmişler ve çalışmanın [7] sonucunda ortak kür yöntemi ile birleştirilen kabuk-kiriş çiftinin burkulma ve hasar yüklerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Ye ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [8] ortak kür, ortak yapışma ve sonradan yapışma yöntemleriyle birleştirilen T profile sahip kiriş-kabuk çiftine çekme testi uygulamış ve sonuç olarak en yüksek mukavemeti ortak kür yönteminde, en düşük mukavemeti sonradan yapışma yönteminde olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [9] ortak kür, ortak yapışma ve sonradan yapışma yöntemleriyle üretilen omega profile sahip kiriş kabuk çiftine çekme testi sonucunda en yüksek mukavemetin ortak kür yönteminde, en düşük mukavemetin sonradan yapışma yönteminde olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

3.1.2. Yüzey hazırlama

Leone ve Genna tarafından yapılan çalışmada [10] ortak yapışma yöntemiyle üretilmiş karbon numuneler için daha önceden kürlenmiş kısım üzerinde mekanik (soyma kumaşı, aşındırıcı) ve kimyasal (lazer) yüzey hazırlama tekniklerinin kayma mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Lazer ile yüzey hazırlamada tarama motifi, tarama hızı, atış gücü, tarama sıklığı gibi parametreler optimize edilerek yapılan testler sonucunda, lazer ile yüzey hazırlanmış numunelerin kayma mukavemeti soyma kumaşı veya aşındırıcı ile yüzey hazırlamaya göre iki kat yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Fischer ve arkadaşları farklı lazer kaynakları ve diğer yüzey hazırlama yöntemlerini kullanarak tek bindirmeli yapışma testi yaparak kayma mukavemetlerini kıyaslamışlardır. Çalışmada [11] lazer ile yüzey hazırlanmış numunelerin diğer yöntemlerden daha yüksek kayma mukavemeti verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Lazer yönteminin termal tehlike yaratmadığı ve lazerle hazırlanmış yüzeylerin fiberler ile doğrudan temas olarak daha iyi yapışma sağladığı gibi faydaları ortaya konulmuştur. Ayrıca CO₂ lazer kaynağında, ultraviyole (UV) lazer kaynağına göre daha düşük foton enerjisinden dolayı daha fazla ısı hapsediği, bu nedenle fiber hasarı ve tabakaları arası ayrılma riskinin arttığı raporlanmıştır.

Ancak lazer parametreleri optimize edilemediği zaman tam tersi sonuçlar da çıkabilmektedir. Zhan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [12] kızılötesi (IR) lazer ve soyma kumaşı ile yüzey hazırlanmış tek bindirmeli yapışma bağlantılarının kayma mukavemetlerini, yüzey enerjilerini ve yüzey pürüzlülüklerini kıyaslamış ve soyma kumaşı ile yüzey hazırlanmış numunelerin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Encinas ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [13] atmosfer basıncındaki plazma, zımparalama, kırmalı püskürtme gibi yüzey hazırlama yöntemleri ile yüzey hazırlanmış numunelerin çeşitli testler yaparak yüzeylerindeki flor ve oksijen yüzdeleri, yüzey enerjileri ve temas açılarını karşılaştırarak kırılma tokluklarını kıyaslamışlardır. Yüzeydeki flor miktarının yapışmada fark edilir bir etkisinin olmadığını ancak oksijen miktarının yapışma üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğunu raporlamışlardır. Çalışmada karbon malzeme için en etkili yüzey hazırlama yönteminin plazma, cam malzeme için ise kırmalı püskürtme yönteminin plazmaya göre daha yüksek kırılma tokluğu vermesine rağmen iki yöntemin birlikte uygulanması, ayrı ayrı uygulanmasına göre daha yüksek bulunmuştur.

3.1.3. Geometrik parametreler

Yapıştırıcı kalınlığı

Yapıştırıcı kalınlığının parametre olarak incelendiği çalışmalarda [14,15], yapıştırıcı kalınlığı arttıkça tek bindirmeli yapıştırma bağlantı mukavemetinin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada [16] bunun sebebini yapıştırıcı kalınlığı arttıkça boşluk ve mikro çatlakların artması ile ilişkilendirmişlerdir. Ancak bazı çalışmalar bu sonucu yapıştırıcı özelliğinin etkilediği sonucuna varmıştır. Liao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [17] eğer yapıştırıcı sünek ise yapıştırıcı kalınlığı arttıkça kırılma enerjisinin arttığını, eğer yapıştırıcı kırılgan ise bu durumun tam tersi olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Park ve arkadaşları yapıştırıcı kalınlığını inceledikleri çalışmalarında [18] belirli bir aralık için optimum hasar yükü ve mukavemet sağlanırken, bu değer aşıldığında ya herhangi bir iyileşme gözlenmemiş ya da hasar yükü ve mukavemet azalmıştır. Bunun sebebi ise yapıştırıcı kalınlığı arttıkça küçük boşlukların oluşma ihtimalinin artmasına dayandırılmıştır. Bu boşluklar kılavuz bloklar kullanılarak gerçekleştirilen birleştirmelerde gözle görülür şekilde azalmış, dolayısıyla hasar yükü artmıştır sonucunu raporlamışlardır.

Yapışma konfigürasyonu

Song ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [6] yapışma mukavemeti dizilime bağlı olarak değiştiğini görmüşlerdir. Bunun nedenini birleşme bölgesinin uç kısımlarındaki maksimum gerilmeler olduğunu belirtmişlerdir. Bu gerilmelerin düşük olması durumunda mukavemetin arttığını görmüşlerdir. Tasarım kurallarına uyularak yapılan düzlem için elastik modüllerin yüksek olduğu konfigürasyonlarda yapışma mukavemetinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yapışma bölgelerinin uç kısımlarında yapılacak modifikasyonların da yapışma bölgesindeki gerilmeleri düşürdüğü bildirilmiştir.

Hazimeh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [19] kırılgan yapıştırıcı kullanılarak üretilen yapışma numunelerinde yapıştırılan yüzeylerin fiber yönlenmelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, en yüksek kayma mukavemetinin yüzeydeki fiber yöneliminin yükleme yönüne paralel olduğu durumda, en düşük kayma mukavemeti ise fiberlerin yükleme yönüne dik olduğu durumda olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Özel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [20] tek bindirmeli yapışma numunelerinin fiber yönelimlerinin hasar yüküne etkisi incelenmiştir ve aynı tabaka sayısı için dizilim sanki-izotropik yapıya yaklaştıkça hasar yükünün arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca kayma ve soyma gerilmelerinin çekme yönü boyunca en yüksek olduğu yerlerin bindirme mesafesinin başlangıç ve bitiş kısımlarında olduğu ve orta kısımda neredeyse hiç yük taşınmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Matthews ve Tester yaptıkları çalışmada [21] tabakaların sıralamasının, dolayısıyla rijitliğin hasar yükünü etkilediğini bulmuşlardır. Laminattaki 0° oranı arttıkça hasar yükünün arttığını ve herhangi bir açıdaki tabakanın tarafsız eksenden uzaklaştıkça etkisinin arttığını raporlamışlardır.

Meneghetti ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [22] yapışma yüzeylerindeki tabakaların açılarının etkisini incelemişler ve sonuç olarak $\pm 45^\circ$ tabaka kullanımının çatlak oluşumuna gösterilen direnci önemli oranda artırdığını raporlamışlardır. Ayrıca tek bindirmeli kayma mukavemeti incelendiğinde ara yüz tabakaları aynı olan parçalarda, 0° 'lık tabakaların önem kazandığı görülmüştür.

Bindirme uzunluğu

Bindirme uzunluğunun parametre olarak incelendiği çalışmalarda [6,18,20] üretim yöntemine bakılmaksızın yapıştırılan parçaların bindirme uzunluğu arttıkça hasar yükü artarken mukavemetin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun nedeni yapışma yüzey alanının artış oranı hasar almadan taşınabilecek en yüksek yük oranından daha hızlı arttığı için lineer olmayan bir yük dağılımı olduğu şeklinde açıklanmıştır. Bu nedenle taşınabilen en yüksek yük artarken, mukavemet azalır.

Aksi bir görüş olarak yapılan bazı çalışmalar [14,15] bindirme uzunluğu arttıkça tek bindirmeli yapıştırma bağlantı mukavemetinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Meneghetti ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [22] bindirme miktarının artmasının ve yapışma köşe geometrisinin kare kenar yerine yapıştırıcı ile yapılan dolgu kenarın da kayma mukavemetine olumlu etkisi olduğu raporlamışlardır.

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [23] bindirme miktarı arttıkça rijitlik arttığı halde kayma mukavemetinin azaldığı, Reis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [24] bağlantı rijitliği arttıkça, yapıştırılan malzemenin dönme kabiliyeti azalıp yapıştırıcı üzerinde neredeyse aynı gerilme dağılımı sağladığı için kayma mukavemetinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Gültekin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [25] bindirme uzunluğunun etkisinin yanı sıra bindirme genişliğinin de etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda bindirme uzunluğu ve genişliği arttıkça bağlantının yük taşıma kapasitesinin arttığını, ancak genişliğin etkisinin uzunluktan daha fazla olduğunu ve hasar yükünün birleşme yüzey alanı geometrisinin dikdörtgenden kareye doğru döndükçe arttığını raporlamışlardır. Bu durumu bindirme bölgesinin orta kısmının dikdörtgen geometriden kareye dönüştükçe soyma gerilmelerini taşıyabildiğini belirterek açıklamışlardır.

Ayrıca, aynı bindirme alanına sahip birleştirmelerde bindirme uzunluğuna göre bindirme genişliğinin artışı birleştirmenin kenarlarında oluşan soyma gerilmelerini daha çok düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Yapıştırılan malzemenin kalınlığı

Song ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmaya [6] göre yapıştırma bağlantıları üzerine gelen eksantrik yüklemelerden dolayı yapıştırılan malzemelerin kalınlığı artarsa eğilme momenti de artar. Ancak yapıştırılan malzemelerin eğilme rijitliği kalınlığının küpü ile ilişkilidir ve eğilme momentine bakılmaksızın malzeme kalınlığı arttıkça yapıştırma bağlantılarında maksimum gerilmenin görüldüğü birleşme bölgesinin uçlarındaki gerilmeler azalır, mukavemet artar.

Li ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma da [23] yapıştırılan malzemenin kalınlığı arttıkça bağlantının rijitliği ve kayma mukavemetinin arttığı sonucunu desteklemektedir. Literatür araştırmaları yapıştırıcı kalınlığı inceldikçe tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının mukavemeti arttığını belirtmektedir. Bunun sebepleri, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça içerdiği kusur, boşluk ve mikro çatlakların artması ve çeki gerilmesi altında boyuna gerilmeler birleşme bölgesinde eğilme momenti yaratmasıdır. Yapıştırıcı kalınlığı arttıkça bu momentin etkisi de artar. Dolayısıyla yapışma mukavemeti azalır.

Birleştirme öncesi yapıştırılan malzemedeki nem etkisi

Budhe ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [27] yapışma öncesi, yapıştırılacak malzemelerin nem absorbe etmesinin üretim sürecinde (yaş aşındırma gibi yüzey hazırlama yöntemleri, su sızdırmazlığı testleri, taşınma işlemleri sırasında atmosferden), uzun süreli depolama ve tamir işlemleri gibi birçok farklı sebebi olabildiğini raporlamışlardır. Ayrıca yapılan literatür derlemesi nemin, yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerini etkilediğini ve bağlantı mukavemetini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Ayrıca yapılan bu çalışmada [27] kurutma işlemlerine rağmen kırılma tokluğunun eski değerine ulaşamadığını raporlamışlardır. Ayrıca kurutma sıcaklığı ve zaman, her ikisi de sırasıyla kabarma sorunu ve onarım süresini dikkate alarak, yapışmanın en yüksek performansına ulaşması için iyi tanımlanması gerektiğini bildirmişlerdir. Ancak Budhe ve arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada [28] yapıştırılacak malzemenin yapıştırma öncesi çektiği nemin etkisini kırılma tokluğu testi yaparak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda nem arttıkça kırılma tokluğunun azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca nem miktarı azaldıkça koheziv hasar modunun arttığını ve birleştirme öncesi kurutma işlemlerinin süresini uzatmanın kırılma tokluğunu artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Nemin, Mod I kırılma tokluğuna etkisinin incelendiği çalışmalarda [28-30], kırılma tokluğundaki azalmayı yapıştırıcıdaki boşluklara, yapıştırıcının plastikleşmesine ve ara yüzey yapışmasındaki azalmaya dayandırmışlardır. Ayrıca nemin bulunması, hasar modunun kohezivden ara yüz hasarına dönüşmesine neden olduğunu ve çeşitli çatlak hasarı oluşturduğunu raporlamışlardır.

Birleştirme sonrası yapıştırılan malzemedeki nem etkisi

Budhe ve arkadaşlarının yaptıkları literatür derlemesinde [27] kompozit malzemelerin çalışma süresince aldığı nemin sebeplerini yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme, yapıştırma yöntemi, çalışma koşulları ve zamanı, kürlenme sıcaklığı gibi birçok farklı parametreye bağlı olduğunu raporlamışlardır.

Mubashar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [31] yapıştırıcı ve reçine matrisin nemden en çok etkilenen kısım olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca nemin yapıştırıcıyı plastikleştirerek,

şışirerek, çatlak miktarını artırarak, hidroliz olarak ve camsı geçiş sıcaklığını düşürerek etkilediğini belirtmişlerdir. Öte yandan nemin sünekliği artırıp, elastik modülü ve mukavemeti düşürmesine rağmen çevrimsel neme maruz kalma koşullarında hem süneklik hem de elastik modülün düştüğü sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sebebini ise suyun reçineyi plastikleştirme ve yapıştırıcı sünekliğinin çevrimsel neme maruz kalma koşullarından sonra düşmesine dayandırmışlardır.

Sciolti ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [32] nemin matris özelliklerini etkileyerek, matriste gerilme oluşturduğunu, bu gerilmelerin matrisi fiberden ayıracak kadar büyük olduğunu ve matris-fiber ara yüzüne hasar verdiğini bildirmişlerdir. Bu nedenle tabakalar arası kayma mukavemeti gibi reçine baskın özellikler, çekme mukavemeti gibi fiber baskın özelliklere göre neme karşı daha hassas olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Mohan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [33] ek yapıştırıcı kullanarak ortak kür yöntemi ve iki farklı sıcaklıkta kürlenene sonradan yapışma yöntemi ile üretilen karbon/epoksi numunelerin kırılma tokluklarını incelemiş ve en yüksek kırılma tokluğunu veren yöntemin düşük sıcaklıkta kürlenene sonradan yapışma olduğunu en düşük kırılma tokluğunu veren yöntemin ise ek yapıştırıcı kullanılan ortak kür yöntemi olduğu sonucuna ulaşmıştır. Yapılan çalışmada prepreg ve yapıştırıcı malzemedeki serbest ve bağlı suyun çıkışı gözlemlenmiştir ve yüksek sıcaklıkta kürlenene malzemelerde hem bağlı hem serbest su açığa çıkarken, düşük sıcaklıkta kürlenene yapıştırıcıda sadece bağlı su açığa çıkmaktadır. Bu bilgiler ışığında en çok su çıkışı hem prepregden hem yapıştırıcıdan olduğu için ortak kür yöntemde, en az su çıkışı ise düşük sıcaklıkta sadece yapıştırıcıdan olduğu için sonradan yapışma yöntemde olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çıkan su yapıştırıcıda hapsolup boşluklar yarattığı için en az su çıkışı olan yöntemde en yüksek kırılma tokluğu olduğu sonucuna varılmıştır.

Sıcaklık etkisi

İncelenen literatür derlemesi [27] geniş sıcaklık aralığında kullanılan kompozit malzemelerin yapıştırma mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerin kürlenme sırasındaki çekme, termal genişleme katsayısı ve sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösteren yapıştırıcının gerilme-gerinim eğrisi ve tokluğu gibi mekanik özellikleri olduğunu belirtmektedir. Aynı çalışmada negatif sıcaklıklarda kompozit malzemenin matrisinde

kırılma, sertleşme, mikro çatlaklar ve fiber/matris bağ bozunması gibi etkiler görülebildiğini belirtmiş, bunun nedeni ise düşük sıcaklıklarda matris ve fiberin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk olarak bildirmişlerdir. Bu nedenle matris ve fiberin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumun önemini vurgulamışlardır.

Yapılan çeşitli çalışmalar [27,34] özellikle epoksi gibi yapısal yapıştırıcılar sıcaklığın artışıyla ve azalmasıyla mukavemette azalma gösterdiklerini ve yüksek sıcaklıklardaki bu düşüşün nedeni düşük yapıştırıcı mukavemeti, düşük sıcaklıktaki bu düşüşün nedeni ise yüksek termal gerilmeler ve yapıştırıcının kırılma olarak bildirmişlerdir.

Cao ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [35] yüksek sıcaklıklarda reçinenin ve yapıştırıcının yumuşadığı ve viskoelastik tepkide artışa neden olduğu fakat fiberlerde herhangi bir değişim olmadığı sonucuna ulaşmışlardır, ancak sıcaklığa maruz kalma koşullarındaki istenmeyen etki reçineyle sınırlı olduğu, sonuç olarak tabakalar arası kayma mukavemeti gibi matris baskın özellikler genellikle fiberlere göre çok daha fazla azalır.

Hollaway [36] ise sıcaklıktaki dalgalanmaların yapışma bölgesinde ayrılma ve zayıflamaya neden olduğunu bunun nedeninin ise fiber ve reçinenin termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk olduğunu belirtmiştir.

Sıcaklığın kırılma mod I tokluğuna etkisinin incelendiği çalışmalarda [37-39], sıcaklık artışıyla kırılma tokluğunun arttığı ve oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda ise kırılma tokluğunun azaldığını raporlamışlardır. Yüksek sıcaklıklarda kırılma tokluğundaki artışın nedenini matrisin sünekleşmesine ve fiberlerdeki kenetlenmeye dayandırmışlardır. Ancak bu artışa rağmen camsı geçiş sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda kırılma tokluğu, fiber-matris arasındaki yapışmanın kaybolmasından dolayı düştüğünü belirtmişlerdir. Ancak mod II kırılma tokluğunun sıcaklıkla değişimi incelendiğinde [38], sıcaklık arttıkça mod II kırılma tokluğunun azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedenini ise artan sıcaklıkla fiber/matris ara yüzündeki tokluğun azalmasına dayandırmışlardır.

Palmieri ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [40] lazer ve yaş soyma kumaşı ile yüzey hazırlanmış numunelerinin sıcaklıkla olan ilişkisi incelenmiş ve sıcaklık arttıkça bağ mukavemetindeki düşüş yaş soyma kumaşı yönteminde daha fazla olduğu görülmüştür.

Karma etki

Literatür araştırmaları [27] nem ve sıcaklığın birlikte etki ettiği koşullar her birinin ayrı ayrı etki ettiği koşullardan daha hasar verici olduğunu ortaya koymuştur.

Palmieri ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada [40] numuneler hem nem hem sıcaklık etkisinde yaşlandırılmış, kayma mukavemetleri incelenmiştir. Nem ve sıcaklık etkisinde olmadan yapılan yaşlandırma işlemi sonucunda kayma mukavemetinde ve hasar modunda önemli bir değişim gözlenmemiştir. Nem ve sıcaklık etkisinde yaşlandırılan numunelerin kayma mukavemeti önemli ölçüde azalmıştır ve ayrı ayrı hem nemin hem sıcaklığın yapışma bağlantılarının kayma mukavemeti üzerinde olumsuz etki ettiği raporlanmıştır.

Shufeng ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [41] nem alma hassasiyetinin, yüksek sıcaklıklarda arttığı ve yapının zarar görmesini hızlandırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca plastik karakteristik dikkate değer olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklarda hem elastik modül hem de çekme mukavemetinde önemli düşüş görüldüğü belirtilmiştir.

Zhang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [42] hidrotermal yaşlandırılmış ve kurutulup test edilen numunelerin mekanik özellikleri tamamen eski haline gelmemiştir ve kayma mukavemetinde tersine dönmeyen düşüşler görülmüştür. Ayrıca hasar modu kohezivden fiber ayrılması şekline döndüğü belirtilmiştir.

Park ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [43] yüksek sıcaklık (71 °C) / yaş, oda sıcaklığı/kuru ve soğuk (-54 °C) / kuru iklim koşullarında ortak kür, ortak yapışma ve sonradan yapışma yöntemiyle üretilen numunelerin kayma mukavemeti ve hasar yüklerini karşılaştırmışlardır. Tüm çevresel koşullarda ek yapıştırıcı kullanılmadan ortak kür yöntemiyle üretilen numune en yüksek mukavemeti sağlarken en düşük mukavemet ortak yapışma yönteminde görülmüştür. En yüksek mukavemet yüksek sıcaklık/yaş koşullarda yapılan testlerde elde edilirken bunları sırasıyla oda sıcaklığı/kuru ve soğuk/kuru koşullar takip etmektedir. Ancak ortak yapışma yönteminde soğuk/kuru koşullardaki mukavemet oda sıcaklığı/kuru koşullardakinden daha yüksek bulunmuştur. Çalışma sonucunda sıcak/yaş koşullar tabakalar arası ayrılma mukavemetini artırırken yapıştırıcının kayma mukavemetini düşürdüğü, soğuk/kuru koşullar ise yapıştırıcının ve bağ kuvvetlerinin mukavemetini artırırken tabakalar arası ayrılma mukavemetini düşürdüğü bulunmuştur.

Yaşlandırma etkisi

Segovia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [44] özel lambalar kullanarak cam- polyester kompozit malzemeleri güneş ışığı radyasyonuna maruz bırakarak kompozit malzemeler üzerinde radyasyon ile yaşlandırmanın mekanik özelliklere olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda radyasyona maruz kalınan zaman arttıkça mekanik özelliklerin azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca tokluk özelliklerinin çekme mukavemetine göre daha çok etkilendiği sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sebebinin ise kırılabilirliğin artması olarak belirtmişlerdir. Kompozit malzemede kullanılan reçine türünün çok az etkisi olduğunu, kumaş türünün ise hiç etkisi olmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Yüksek kürlenme sıcaklıklarının ise mekanik özelliklerdeki düşüşü azalttığını raporlamışlardır.

Startsev ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [45] çeşitli polimer kompozitleri 10 yıl sıcak/nemli iklim koşullarına maruz bırakmış ve tabakalar arası kayma mukavemetini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yüzeyde güneş radyasyonuna maruz kalan tabakaların laminat merkezindekilere göre çok daha fazla hasar aldığı ve bu iklimlendirme koşulları altında zamana bağlı olarak yaşlandırılan numuneler ve kontrol numuneleri kıyaslandığında eğilme mukavemetinin yaşlandırılan numunelerde daha çok azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak yaşlandırmanın ilk aşamalarında mukavemetin arttığını gözlemlemiş ve bunun nedenini epoksi yapıştırıcının kürlenmenin devam etmesi olarak raporlamışlardır.

3.2. Alt-Montaj Testi için Parametreler

Yapılan çalışmaya [46] göre uçak parçalarının alt montajında mekanik birleştirme yerine ortak kür ya da ortak yapışma gibi birleştirme yöntemleri kullanılarak ağırlık ve maliyetten kazanç sağlanmaktadır. Uçak gövdesi veya kanadı eksenel bası, kayma ya da kombine bası-kayma yüküne maruz kaldığı zaman kabuktaki muhtemel hasar burkulma olmaktadır.

3.2.1. Kiriş profil gövdesi yüksekliği

Huang ve Hsu yaptıkları çalışmada [47] ortak kür yöntemiyle üretilmiş kabuk-kiriş bağlantısına bası testi uygulayarak profil gövdesi yüksekliğinin etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda profil gövdesi uzunluğunun artması sürekli olarak bası mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca yapılan testler sonucunda kabuk-kiriş bağlantısının köşe

yarıçap kısımlarında oluşan üçgensel boşlukların film yapıştırıcı ile doldurulmasının bası mukavemetinin artmasını sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Pevzner ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [48] kirişin profil gövdesi yüksekliğinin burkulma yüküne olan etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak aynı kiriş profili ve sayısına sahip testlerde profil gövdesi yüksekliğinin artması burkulma yükünün artmasını dolayısıyla burkulma mukavemetinin artması sağlamıştır.

Jin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [49] omega kirişin geometrik parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kiriş yüksekliğinin en çok etki eden parametre olduğunu görmüşlerdir.

Guo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [50] kiriş yüksekliği ve kabuk kalınlığı arasındaki orana göre eksenel burkulmayı incelemişlerdir. Çalışma sonucunda kiriş yüksekliği/kabuk kalınlığı oranı arttıkça bir noktaya kadar burkulma yükünün arttığını bu değerden sonra en yüksek değerden daha düşük bir değerde neredeyse sabit devam ettiğine ulaşmışlardır. Petersen ve Hühne omega profile sahip kirişleri inceledikleri çalışmada [51] kiriş yüksekliği arttıkça burkulma yükünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

3.2.2. Kiriş yarıçapı

Huang yaptığı çalışmada [52] ortak kür yöntemiyle üretilmiş kabuk-kiriş bağlantısına çekme testi uygulayarak köşe yarıçapının etkisini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda köşe yarıçapının bir noktaya kadar artması çekme mukavemetinin artmasını sağlarken, bu noktadan sonra köşe yarıçapının artışı çekme mukavemetinin azalmasına yol açmıştır. Ayrıca kabuk-kiriş bağlantısının köşe yarıçap kısımlarında oluşan üçgensel boşlukların film yapıştırıcı ile doldurulmasının çekme mukavemetine önemli fayda sağladığı görülmüştür.

3.2.3. Kiriş flanş genişliği

Kim ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [9] çeşitli yapıştırma yöntemleriyle üretilen omega profile sahip kiriş kabuk çiftine çekme testi sonucunda kabuk genişliği sabitken kiriş genişliğinin artması hasar yükünün azalmasına neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Elaldı ve arkadaşları J profile sahip kiriş ve kabuk üzerinde yaptıkları çalışmada [47] aynı takımlar ve üretim yöntemi kullanılarak üretilen farklı flanş genişliğine sahip kirişlerde flanş genişliği azaldıkça burkulma ve hasar yükünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Bunun nedenini ise kenarlardaki reçine birikmesinin azalmasına dayandırmışlardır.

Petersen ve Hühne omega profile sahip kirişleri inceledikleri çalışmada [51] kiriş genişliği arttıkça yükün kabuğa ve kirişe eşit dağılmasını sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Huang yaptığı çalışmada [52] ortak kür yöntemiyle üretilmiş kabuk-kiriş bağlantısına çekme testi uygulayarak flanş genişliğinin etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda flanş uzunluğunun artması ise bir noktaya kadar çekme mukavemetinin artmasını sağlamış, bu noktadan sonra kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.

3.2.4. Kiriş sayısı/iki kiriş arası mesafe/kabuk ölçüleri

Pevzner ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [42] kiriş sayısının burkulma yüküne olan etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak aynı profil gövdesi yüksekliği ve kiriş profiline sahip testlerde kiriş sayısının artması burkulma yükünün artmasını sağlamıştır.

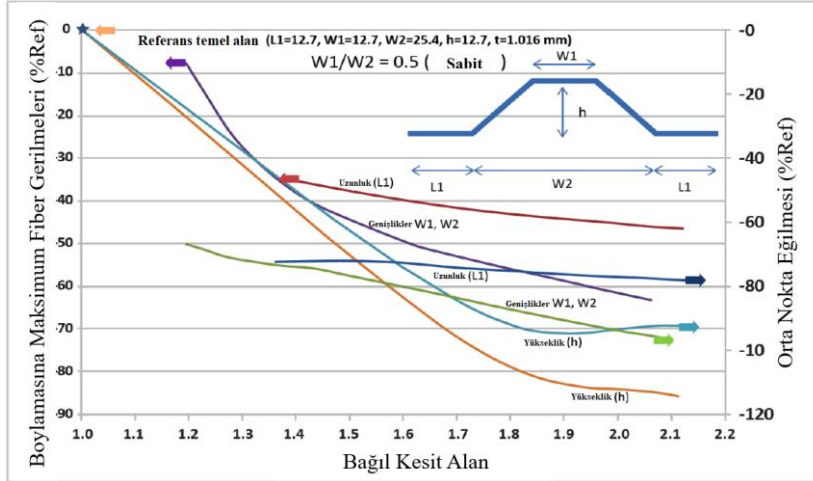
Jin ve arkadaşları omega profile sahip kiriş kullanarak yaptıkları çalışmanın sonucunda [49] kirişler arası mesafenin lokal deformasyonu etkilediği bu nedenle bir kural olarak bu mesafenin omega kiriş genişliğinin üç katını aşmaması gerektiğini bildirmişlerdir.

Guo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ise [50] kirişe paralel kabuk uzunluğu/kirişe dik kabuk genişliği oranı 0-2 iken burkulma yükünün azalmış, 2-2,75'e kadar ise artmıştır.

Jain ve Upadhyay yaptıkları çalışmada [53] kiriş profiline bakılmaksızın kirişler arası mesafe azaldıkça burkulma yükünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

3.2.5. Kiriş profili

Jin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [49] kirişin yüksekliği, genişliği, flanş uzunluğu gibi parametrelerin kesit alan olarak değerlendirilip, fiberlerde oluşturduğu gerilme değerlerine göre oluşturulan grafik Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Omega kiriş kesit alan- boyuna maksimum fiber gerilmesi grafiği

Jain ve Upadhyay yaptıkları çalışmada [53] aynı kabuk, aynı kalınlık ve dizilime sahip ancak farklı profildeki kirişler ile yaptıkları çalışmada en yüksek burkulma yüküne sahip profilin omega olduğu, T, açılmalı ve I profillerin ise hemen hemen aynı olduğu ve omeganın yaklaşık %40'ı kadar olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Rahimi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [54] aynı kesit alanına sahip dolayısıyla aynı ağırlıktaki, farklı kiriş profilleri ile güçlendirilmiş kabukların burkulma yükü karşısındaki yük taşıma kabiliyetlerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak kapalı profillerin (omega) açık profillere (T ve C) oranla daha yüksek yük taşıma kabiliyeti olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Elaldı, J ve omega profile sahip kirişleri eksenel bası yükü altında burkulmaya karşı yapısal etkinliklerini ölçen bir çalışma [55] yapmıştır. Çalışmanın sonucunda omega profilinin J profiline göre daha fazla burkulma ve hasar yüküne dayandığına ulaşılmıştır. Ağırlık ve kesit alan dikkate alınarak yapılan çalışma sonucunda omega profile sahip kirişin yapısal etkinliği, J profile sahip kirişin yapısal etkinliğinin 1,25 katı olduğu bulunmuştur.

Kong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [56] bir tane T ve iki farklı kep uzunluğuna sahip I profilili kiriş-kabuk bağlantısına uygulanan eksenel basının burkulma yükü taşımasına etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak T profile sahip kirişin eksenel rijitliği ve burkulma yükü I profile göre daha küçük bulunmuştur ve kep genişliği arttıkça eksenel rijitlik ve burkulma yükünün arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca aynı lamina dizilimine sahip omega, I ve T profile sahip kirişlerde en yüksek burkulma sonrası yük taşıma kabiliyeti omega, en düşük yük taşıma kabiliyeti T profilde olduğu görülmüştür.

SudhirSastry ve arkadaşları düz, T ve I profile sahip kirişlerin profil ve sayısının parametre olarak burkulma yüküne olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda [57] kiriş sayısı arttıkça burkulma yükünün arttığını ve profil olarak en yüksek burkulma yüküne sahip I profil, en düşük ise düz kiriş profili olduğunu görmüşlerdir.

Chen ve Soares yaptıkları çalışmada [58] aynı dizilime ve kalınlığa sahip kabuk-kiriş bağlantısında I profile sahip kirişin bası burkulma dayanımının bıçak profile göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Frostig ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [59] J ve I profile sahip kirişlerin burkulma davranışlarını incelemişlerdir. J profile sahip kirişler için kep bölgesinin sürekli/sürekli tabaka olmasını değerlendirmişler ve sonuç olarak sürekli olmasının hasar yükünü %10 artırdığını görmüşlerdir. Bunun nedenini ise hasarın kep bölgesindeki delaminasyon ve çatlaklardan oluşmasıdır. Bu bölgenin süreklilik oranına göre hasar yükünün arttığını raporlamışlardır. Ayrıca J ve I profile sahip kirişleri kıyasladıklarında I profilin %20 daha ağır olmasına rağmen yük taşıma kapasitesinin %100 arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

3.2.6. Kabuk ve kiriş profil gövdesi kalınlıkları

Huang ve Hsu yaptıkları çalışmada [47] ortak kür yöntemiyle üretilmiş kabuk-kiriş bağlantısına bası testi uygulayarak profil gövdesi kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda profil gövdesi kalınlığının artması bası mukavemetinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca yapılan testler sonucunda kabuk-kiriş bağlantısının köşe yarıçap kısımlarında oluşan üçgensel boşlukların film yapıştırıcı ile doldurulmasının bası mukavemetinin artmasını sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Chen ve Soares yaptıkları çalışmada [58] aynı dizilime ve kalınlığa sahip kabuk-kiriş bağlantısında bir laminanın kalınlığı arttıkça hem kabuğun hem kirişin bası burkulma dayanımının arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Zhu ve arkadaşları yaptıkları deneysel çalışmada [60] son hasar yükü ve burkulma yükü üzerinde büyük öneme sahip olan parametrenin kabuk kalınlığı olduğu belirtilmiştir. Kabuk kalınlığı arttıkça burkulma yükü ve hasar yükü arttığını ve kabuk-kiriş ara yüzündeki lokal burkulmanın temel sebebi kabuk-kiriş rijitlikleri arasındaki dengesizlik olduğu belirtilmiştir.

3.2.7. Rijitlik

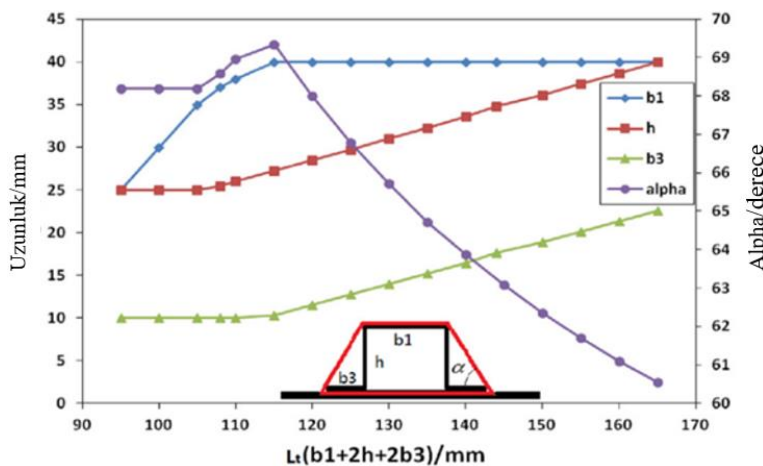
Guo ve arkadaşları yaptıkları çalışmanın [50] sonucunda yapının $E1/E2$ oranının artmasının burkulma yükünü artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Jain ve Upadhyay yaptıkları çalışmada [53] aynı profile ve dizilime sahip kiriş ile eksenel rijitlik/kayma rijitliği oranı farklı olan kabuk bağlantısının burkulma üzerindeki etkisini incelediklerinde bu oran arttıkça burkulma yükünün arttığını tespit etmişlerdir. Bu rijitliği etkileyen parametrelerin ise kabuğun kalınlığı ve dizilimi olduğu belirtilmiştir.

Zhu ve arkadaşlarının yaptıkları deneysel çalışmada [60] I şekilli kiriş ve kabuk bağlantısının bası yükü altındaki davranışı incelenmiştir. I şekilli kirişin rijitliğinin burkulma yüküne olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak kiriş rijitliğinin burkulma yükü ve hasar modu üzerinde büyük bir etkisi olmasına rağmen bağlantının hasar yükü üzerindeki etkisinin düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kiriş rijitliği arttıkça burkulma yükünün arttığı raporlanmıştır.

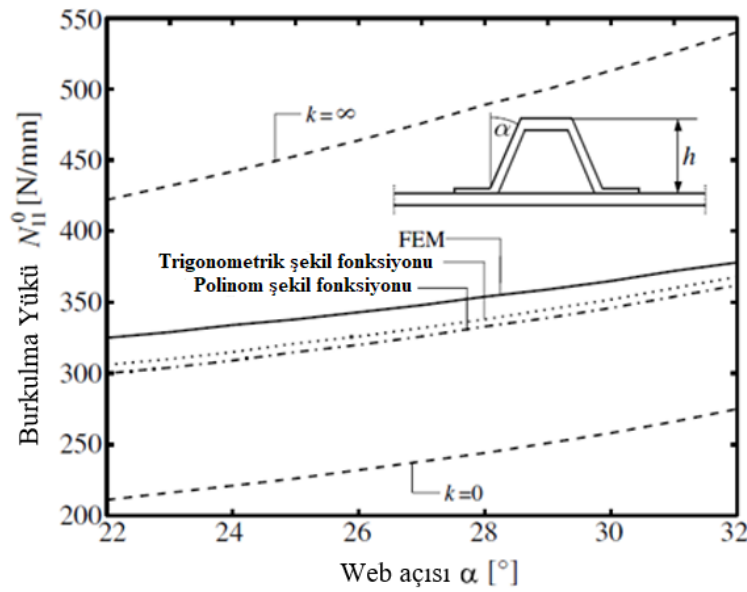
3.2.8. Omega (Ω) kirişler

Yapılan çalışmada [46] omega (Ω) veya diğer ismiyle şapka (hat) kiriş kullanılarak üretilen kabuk-kiriş parçası eksenel bası yüküne maruz bırakılarak test edilmiş ve kiriş kesit alanındaki parametreler (flanş uzunluğu, kiriş yüksekliği ve açısı) optimize edilmiştir. Bu parça için yapılan burkulma ve burkulma sonrası analizlerine göre burkulmayı engellemek için geometrik parametrelerin optimizasyonu Şekil 3.3’de gösterilmektedir.

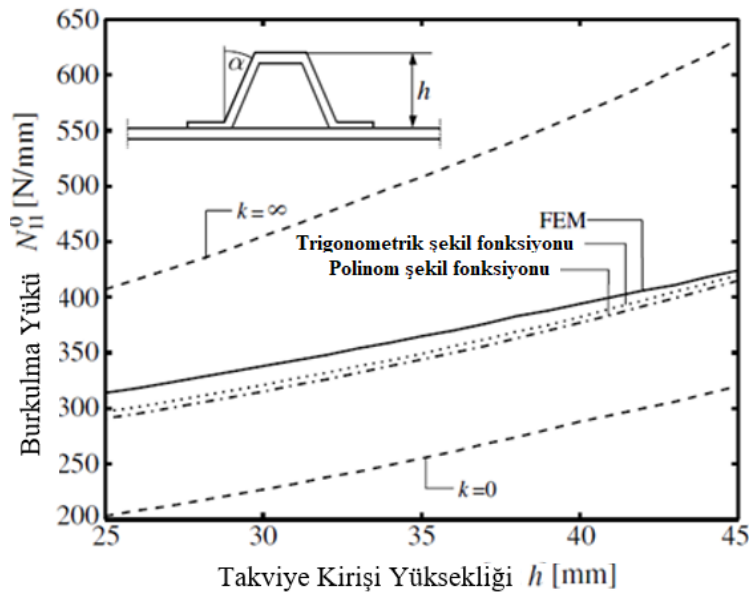


Şekil 3.3. Omega kirişlerin geometrik ölçülerinin optimizasyonu

Mittelstedt ve Beerhorst yaptıkları çalışmada [61] omega şekilli kiriş ve kabuk bağlantısının bası yükü altındaki burkulma analizini basit nümerik metotlar ve analiz yazılımları kullanarak karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada kirişler arası mesafe, kabuk genişliği, kiriş açısı ve yüksekliği parametre olarak belirlenip burkulma yükünün bu parametrelerle ilişkisi incelenip tasarım optimizasyonu için veriler elde etmişlerdir. Bu verilere göre omega profile sahip kirişin gövde açısının burkulma yüküyle olan ilişkisi Şekil 3.4’de, kiriş yüksekliğinin burkulma yüküyle olan ilişkisi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.4. Omega kiriş gövde açısı- burkulma yükü grafiği



Şekil 3.5. Omega kiriş yüksekliği- burkulma yükü grafiği

Elaldı ve Çolak yaptıkları çalışmada [62] omega kiriş için yaptıkları çalışma sonucunda aşağıdaki tasarım ve imalat çıktılarını bulmuşlardır.

1. En dıştaki laminalar tüm yapı elemanlarının kayma yükünü taşıyabilmesi için $\pm 45^\circ$ olmalıdır.
2. En dıştaki $\pm 45^\circ$ laminalara bitişik ve yüke paralel en az bir tane 0° lamina bulunmalıdır.
3. Burkulma ve burkulma sonrası mukavemeti iyileştirmek amacıyla, 0° laminaların hemen bitişğine 90° laminaların yerleştirilmesi daha etkilidir.
4. 0° laminaların kep ve kabuk kısımlarında kullanımı yapısal verimliliği artırır, ancak tasarım yüklerini karşılamasına dikkat edilmelidir.
5. Flanş-kabuk ara yüzündeki olası soyulma gerilmelerini azaltmak için profil gövdesi kısımları kabuğa olabildiğince dik olmalıdır.
6. Çarpılmayı en aza indirmek için, laminalar çeşitli yapı elemanlarının orta düzlemine göre simetrik konumlandırılmalıdır.

4. TASARIM, ÜRETİM, TESTLER VE ANALİZ

4.1. Tasarım Faaliyetleri

Yapılan çalışma, kompozit malzemelerde yapışma bağlantılarını etkileyen parametrelerin etkilerinin anlaşılabilir, uçak yapılarında kullanılmasını amaçlamıştır. Tezin bu bölümünde yapılan çalışmada ele alınan parametrelerin etkileri incelenmektedir. Aşağıda çalışmada kullanılan tüm parametreler alt başlık olarak verilmiştir.

4.1.1. Çevresel parametreler

Çalışma kapsamında üretilen parçalar üzerinde sıcaklık ve nemin etkisini görmek adına soğuk (-55 °C) /kuru, oda sıcaklığı/kuru ve sıcak (130 °C) /yaş olmak üzere üç farklı koşul altında iklimlendirilmiş ve test yapılmıştır.

4.1.2. Birleştirme yöntemi

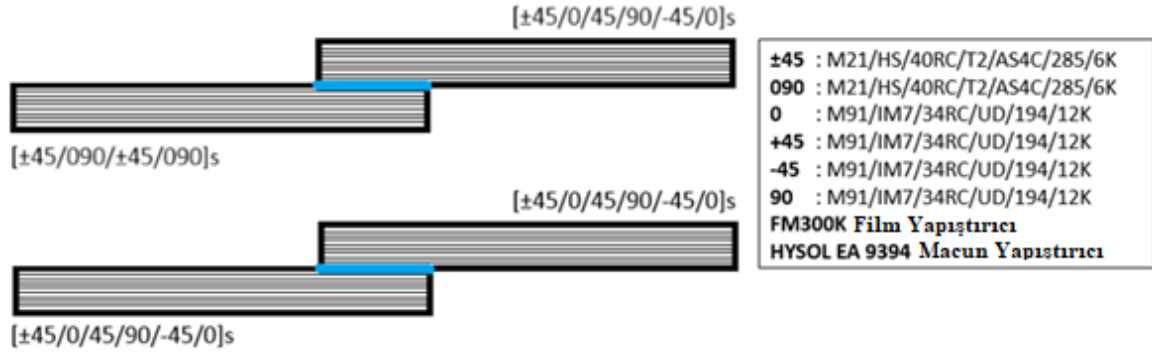
Çalışma kapsamında üretilen parçalar ortak yapışma ve sonradan yapışma olmak üzere iki farklı birleştirme yöntemiyle birleştirilmiş ve test edilmiştir.

4.1.3. Yapıştırıcı kalınlığı

Film yapıştırıcı için 0,4 mm (2 kat) ve 0,6 mm (3 kat) olmak üzere iki farklı kalınlık ve macun yapıştırıcı için 0,6 mm kalınlık seçilerek yapıştırıcı kalınlığının yapışma kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.1.4. Yapıştırılan malzeme kalınlık ve dizilimi

Tek bindirmeli kayma testi için iki farklı konfigürasyon kullanılmıştır. İlk konfigürasyonda yapıştırılan malzemelerden biri $[\pm 45/0/45/90/-45/0]_s$ dizilime sahip, diğer yapıştırılan malzeme $[\pm 45/0/90/\pm 45/0/90]_s$ dizilime sahiptir. İkinci konfigürasyonda ise tüm yapıştırılan malzemeler $[\pm 45/0/45/90/-45/0]_s$ dizilime sahiptir. Şekil 4.1’de test kapsamında kullanılan konfigürasyonlar gösterilmektedir.

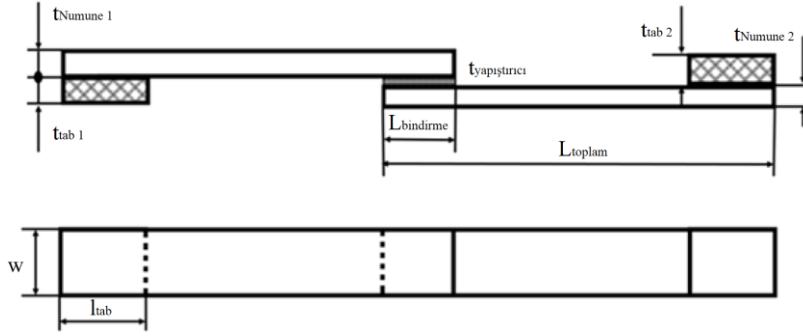


Şekil 4.1. Tek bindirmeli yapışma bağlantılarında numune konfigürasyonları

Tek bindirmeli kayma testi için kullanılan numunelere ait bilgiler Çizelge 4.1 ve Şekil 4.2’de görülmektedir. Ayrıca kırılma tokluğu testlerinde kullanmak üzere üretilen numune Şekil 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin geometrik boyutları

İsimlendirme				BAĞLANTI ÖLÇÜLERİ											
				Numune 1					Numune 2					Yapıştırıcı	
				t	w	Lbindirme	Ltoplam	Ltab	t	w	Lbindirme	Ltoplam	Ltab	Yapıştırıcı Türü	t
Yapıştırma	Dizilim	Çevre Koşulları	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)
AR	Birlikte Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,6
BC	Birlikte Yapışma	C1	CTD1	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
BR	Birlikte Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
BH	Birlikte Yapışma	C1	ETW1	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
CR	Birlikte Yapışma	C2	RTD	2,46	25,4	50,8	127	40	2,46	25,4	50,8	127	40	FM300K	0,4
DR	Sonradan Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
ER	Sonradan Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,6
FC	Sonradan Yapışma	C1	CTD1	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	HYSOL EA9394	0,4
FR	Sonradan Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	HYSOL EA9394	0,4
GC	Sonradan Yapışma	C1	CTD1	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
GR	Sonradan Yapışma	C1	RTD	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
GH	Sonradan Yapışma	C1	ETW1	2,48	25,4	25,4	101,6	40	2,46	25,4	25,4	101,6	40	FM300K	0,4
HR	Sonradan Yapışma	C2	RTD	2,46	25,4	50,8	127	40	2,46	25,4	50,8	127	40	FM300K	0,4



Şekil 4.2. Tek bindirmeli kayma test numunelerinin geometrik boyutları



Şekil 4.3. Kırılma tokluğu testlerinde kullanılan numunenin lamina dizilimi

Çift ankastre kiriş kırılma tokluğu testi ve çentikli bükme kırılma tokluğu testi için kullanılan numunelere ait geometrik boyutlar Çizelge 4.2' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Kırılma tokluğu test numunelerinin geometrik boyutları

					BAĞLANTI ÖLÇÜLERİ									
					Numune 1				Numune 2			Yapıştırıcı		
İsimlendirme	Test Türü	Yapıştırma Türü	Dizilim	Çevre Koşulları	h	b	a0	L	h	b	L	Yapıştırıcı Türü	Yapıştırıcı Tabaka Sayısı	t
					(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(mm)
IR	DCB	Birlikte Yapışma	C3	RTD	1,66	25	50	125	1,66	25	125	FM300K	2	0,4
KR	DCB	Sonradan Yapışma	C3	RTD	1,66	25	50	125	1,66	25	125	FM300K	2	0,4
JR	ENF	Birlikte Yapışma	C3	RTD	1,66	25	50	125	1,66	25	125	FM300K	2	0,4
LR	ENF	Sonradan Yapışma	C3	RTD	1,66	25	50	125	1,66	25	125	FM300K	2	0,4

4.1.5. Yapıştırıcı malzeme

Film ve macun yapıştırıcı olmak üzere iki farklı yapıştırıcı çeşidi kullanılarak yapışmaya olan etki incelenmiştir.

4.1.6. Bindirme uzunluğu

25,4 mm (1 inç) ve 50,8 mm (2 inç) olmak üzere iki farklı bindirme uzunluğu değerlendirilerek yapışma kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.2. Üretim Faaliyetleri

Üretim yapılırken Hexcel® M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K kumaş prepreg ve Hexcel® M91/34%/UD194/IM7-12K tek yönlü prepreg kullanılmıştır. Film yapıştırıcı olarak Cytec firmasına ait FM®300K ve macun yapıştırıcı olarak Henkel firmasına ait Loctite EA9394 kullanılmıştır.

4.2.1. Kullanılan malzemelerin özellikleri

M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K ve M91/34%/UD194/IM7-12K için kürlenme koşulları (kalınlık<15mm)

1. Tam vakum uygulanır (1 bar).
2. 7 bar otoklav basıncı uygulanır.
3. Otoklav basıncı 1 bara ulaştığında vakumu güvenlik değeri-0,2 bara düşürülür.
4. Isınma hızı 1-2 °C/dk. (2-4 °F/dk.) artış oranıyla oda sıcaklığından 180 °C ±5 °C (356 °F ±9 °F)'ye ayarlanır.
5. 180 °C ±5 °C (356 °F ±9 °F) 'de 120 dk. ± 5dk bekletilir.
6. 2-5 °C/dk. (4-9 °F/dk.) hız oranı ile soğutulur.
7. Parça 60 °C (140 °F) veya daha düşük değerlere ulaştığında otoklav basıncı boşaltılır.

M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K ve M91/34%/UD194/IM7-12K için kürlenme koşulları (kalınlık 15-48mm)

1. Tam vakum uygulanır (1 bar).
2. 7 bar otoklav basıncı uygulanır.
3. Otoklav basıncı 1 bara ulaştığında vakumu güvenlik değeri-0,2 bara düşürülür.
4. Isınma hızı 0,5-1 °C/dk. (1-2 °F/dk.) artış oranıyla oda sıcaklığından 150 °C ±5 °C (302 °F ±9 °F)'ye ayarlanır.
5. 150 °C ±5 °C (302 °F ±9 °F) 'de 180 dk. ± 5dk bekletilir.
6. Isınma hızı 0,5-1 °C/dk. (1-2 °F/dk.) artış oranıyla 150 °C±5 °C (302 °F ±9 °F)'den 180 °C ±5 °C (356 °F ±9 °F)'ye ayarlanır.
7. 180 °C ±5 °C (356 °F ±9 °F) 'de 120 dk. ± 5dk bekletilir.
8. 2-5 °C/dk. (4-9 °F/dk.) hız oranı ile soğutulur.

9. Parça 60 °C (140 °F) veya daha düşük değerlere ulaştığında otoklav basıncı boşaltılır.

M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K ve M91/34%/UD194/IM7-12K için kürlenme koşulları
(Bal petek ve köpük sandviç yapılar)

1. Maksimum -0,3 bar vakum uygulanır.
2. Otoklav basıncı uygulanmaz.
3. Isınma hızı 1-2 °C/dk. (2-4 °F/dk.) artış oranıyla oda sıcaklığından 135 °C $\pm$ 5 °C (275 °F $\pm$ 9 °F)'ye ayarlanır.
4. 135 °C $\pm$ 5 °C (275 °F $\pm$ 9 °F) 'de 60 dk. $\pm$ 5dk bekletilir.
5. 135 °C $\pm$ 5 °C (275 °F $\pm$ 9 °F) 'de 60 dk. $\pm$ 5dk bekletildikten sonra çekirdek yoğunluğuna bağlı olarak 2-3 bar otoklav basıncı uygulanır.
6. Otoklav basıncı 1 bara ulaştığında vakum kaldırılır.
7. Isınma hızı 1-2 °C/dk. (2-4 °F/dk.) artış oranıyla 135 °C $\pm$ 5 °C (275 °F $\pm$ 9 °F)'den 180 °C $\pm$ 5 °C (356 °F $\pm$ 9 °F)'ye ayarlanır.
8. 180 °C $\pm$ 5 °C (356 °F $\pm$ 9 °F) 'de 120 dk. $\pm$ 5dk bekletilir.
9. 2-5 °C/dk. (4-9 °F/dk.) hız oranı ile soğutulur.
10. Parça 60 °C (140 °F) veya daha düşük değerlere ulaştığında otoklav basıncı boşaltılır.

FM300K için kürlenme koşulları

1. Tam vakum uygulanır (0,81 bar).
2. 2,8 bar basınç uygulanır, boşaltma vakumu 1,4 bar.
3. Isınma hızı 1-3 °C/dk. (2-5 °F/dk.) artış oranıyla oda sıcaklığından 177 °C (350 °F)'ye ayarlanır.
4. 177 °C (350 °F) 'de 60 dk. bekletilir.
5. 1-3 °C/dk. (2-5 °F/dk.) hız oranı ile parça 60 °C (140 °F)'nin altına soğutulur.

HYSOL EA 9394 için kürlenme koşulları

1. Oda sıcaklığında 5 gün süreyle 0,4-0,6 bar basınçla kürlenebilir.
2. 750 °C sıcaklıkta en az 1 saat 0,4-0,6 bar basınçla kürlenebilir.

Çizelge 4.3.M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K malzemesinin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Birimler	M21/40%/285T2/AS4C-6K
Fiber	g/m ²	AS4C 2x2 TWILL 285
Kumaş/UD		
Fiber Ağırlığı		
Prepreg Ağırlığı	g/m ²	475
Hesaplanmış Teorik Kürlenmiş Tabaka Kalınlığı	mm (inch)	0,285 (0,0112)
Hesaplanmış Teorik Fiber Hacmi	%	55,8
Reçine Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1,28 (79,9)
Fiber Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1,78 (111,1)
Hesaplanmış Teorik Laminat Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1,56 (97,7)

Çizelge 4.4.M21/HS/40RC/T2/AS4C/285/6K malzemesinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Birimler	Sıcaklık	M21/40%/285T2/AS4C-6K
Camsı Geçiş Sıcaklığı	°C (°F)		195 (383)
Yöntem			EN 6032- DMA extrapolated onset E'
Çekme Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	885 (128)
Çekme Modülü	GPa (msi)	23 (73)	67,6 (9,8)
Yöntem			EN 2597 B
Basma Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	835 (121)
Basma Modülü	GPa (msi)	23 (73)	59,7 (8,6)
Yöntem			EN 2850 B
ILSS	MPa (ksi)	23 (73)	70 (10,1)
Yöntem			EN 2563
Aynı Düzlemdeki Kayma Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	97 (14)
Aynı Düzlemdeki Kayma Modülü	GPa (msi)	23 (73)	4,2 (0,61)
Yöntem			EN 6031
Açık Delik Çekme Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	340 (49)
Yöntem- (25/50/25) (büyük kesit)			EN 6035
Açık Delik Basma Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	330 (48)
Yöntem- (25/50/25) (büyük kesit)			EN 6063
CAI@ 30.0 J	MPa (ksi)	23 (73)	276 (40)
Yöntem- (25/50/25)			EN 6038

Çizelge 4.5. AS4C/6K malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	4619
Çekme Modülü (GPa)	231
Gerinme (%)	1,8
Yoğunluk (g/cm ³)	1,78

Çizelge 4.6.M91/34%/UD194/IM7-12K malzemesinin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Birimler	M91/34%/UD194/IM7-12K
Fiber	g/m ²	IM7
Kumaş/UD		UD
Fiber Ağırlığı		194
Prepreg Ağırlığı	g/m ²	294
Hesaplanmış Teorik Kurlenmiş Tabaka Kalınlığı	mm (inch)	0,184 (0,0072)
Hesaplanmış Teorik Fiber Hacmi	%	59,2
Reçine Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1.28 (80,2)
Fiber Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1,78 (111,1)
Hesaplanmış Teorik Laminat Yoğunluğu	g/cm ³ (lbs/ft ³)	1,57 (98,00)

Çizelge 4.7.M91/34%/UD194/IM7-12K malzemesinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Birimler	Sıcaklık	M91/34%/UD194/IM7-12K
Camsı Geçiş Sıcaklığı	°C (°F)		185-190 (365-374)
Yöntem			EN 6032- DMA extrapolated onset E'
Çekme Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	2980 (432)
Çekme Modülü	GPa (msi)	23 (73)	165 (23,9)
Yöntem			ASTM D3039
Basma Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	1860 (270)
Basma Modülü	GPa (msi)	23 (73)	150 (22)
Yöntem			ASTM D695
ILSS	MPa (ksi)	23 (73)	110 (16)
Yöntem			EN 2563
Açık Delik Çekme Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	505 (73)
Yöntem- (25/50/25) (büyük kesit)			ASTM D5766
Açık Delik Basma Mukavemeti	MPa (ksi)	23 (73)	315 (46)
Yöntem- (25/50/25) (büyük kesit)			ASTM D6484
CAI@ 30.0 J	MPa (ksi)	23 (73)	350 (51)
Yöntem- (25/50/25)			ASTM D7136 & D7137

Çizelge 4.8. IM7-12K malzemesinin mekanik özellikleri

Çekme Mukavemeti (MPa)	5688
Çekme Modülü (GPa)	276
Gerinme (%)	1,9
Yoğunluk (g/cm ³)	1,78

Çizelge 4.9. BR 127 primerli FM300K malzemesinin mekanik özellikleri

Özellikler	Test Sıcaklığı	FM300K 0,05 psf (244 gsm)	FM300K 0,08 psf (391 gsm)	Numune
Bindirme Kayma ASTM D1002	°F (°C)	psi (MPa)		0,063 in (1,60 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
	-67 (55)	-	5460(37,7)	
	75(24)	5340(36,8)	5850(40,3)	
	250(121)	3580(24,7)	4200(28,9)	
	300(149)	2970(20,4)	3160(21,8)	
Yüzer Merdane Soyma ASTM D3167	°F (°C)	lb/in (kN/m)		0,025 in (0,63 mm) ve 0,064 in (1,63 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
	-67 (55)	-	28(4,9)	
	75(24)	23(4,0)	28(4,9)	
	250(121)	-	-	
	300(149)	-	26(4,6)	
Balpetek Sandviç Soyma ASTM D1781	°F (°C)	in-lb/3 in (N/m)		0,020 in (0,51 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum kabuklar; 0,0025 in (0,65 mm) NP 5052, 0,1875 in (4,76 mm) hücre çekirdeği
	-67 (55)	25(37)	40(58)	
	75(24)	22(32)	45(66)	
	250(121)	-	-	
	300(149)	22(32)	28(41)	
Yatay Konumda Çekme ASTM C297	°F (°C)	psi (MPa)		0,020 in (0,51 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum kabuklar; 0,0025 in (0,65 mm) NP 5052, 0,1875 in (4,76 mm) hücre çekirdeği
	-67 (55)	-	1080(7,4)	
	75(24)	-	1030(7,1)	
	250(121)	-	-	
	300(149)	340(2,3)	470(3,2)	

Çizelge 4.10. FM300K'nın nem ve sıvı koşullardaki mekanik özellikleri

Özellikler	FM300K 0,08 psf (391 gsm)	Numune
Bindirme Kayma (120 °F/49°C ve 95- 100% RH1) 30 gün sonra ASTM D1002	psi (MPa) 6230(42,9)	0,063 in (1,60 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
Bindirme Kayma 7 gün sonra JP-4 Yakıt Anti-Buz Sıvısı Hidrolik Yağ Hidrokarbon Sıvısına maruz bırakıldığında	psi (MPa) 6240(43,0) 6280(43,3) 6130(42,3) 6095(42,0)	0,063 in (1,60 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
Bindirme Kayma 200 saat sonra Skydrol2 Hidrolik Sıvısı içinde 150°F(66°C)	psi (MPa) 6350(43,8)	0,063 in (1,60 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum

Çizelge 4.11. Nem çekmiş FM300K'nın yapışma öncesi mekanik özellikleri

Özellikler	Test Sıcaklığı	FM300K 0,05 psf (244 gsm)	FM300K 0,08 psf (391 gsm)	Numune
Bindirme Kayma ASTM D1002	°F (°C)	psi (MPa)		0,063 in (1,60 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
	75(24)	4800(33,1) 4700(32,4) 4650(32,4)	4900(33,8) 4800(33,1) 5200(35,9)	
	300(149)	3400(23,5) 3300(22,8)	2600(17,9) 2900(20,0)	
Yüzer Merdane Soyma ASTM D3167	°F (°C)	lb/in (kN/m)		0,025 in (0,63 mm) ve 0,064 in (1,63 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum
	75(24)	28(4,9) 29(5,1)	28(4,9) 29(5,1)	
Balpetek Sandviç Soyma ASTM D1781	°F (°C)	in-lb/3 in (N/m)		0,020 in (0,51 mm) 2024-T3 kaplı alüminyum kabuklar; 0,0025 in (0,65 mm) NP 5052, 0,1875 in (4,76 mm) hücre çekirdeği
	75(24)	75(110) 68(100)	75(110) 69(100)	

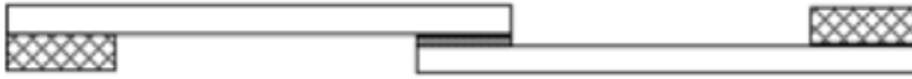
Çizelge 4.12. LOCTITE HYSOL EA9394 malzemesinin mekanik özellikleri

Özellikler	Test Sıcaklığı	LOCTITE HYSOL EA9394	Numune
Çekme Bindirme Kayma Mukavemeti ASTM D1002	°F (°C)	psi (MPa)	ASTM D3933 e göre Fosforik asitle anotlama ile 2024-T3 korumasız alüminyum
	-67 (-55)	3300(22,7)	
	77(25)	4200(28,9)	
	180(82)	3000(20,7)	
	200(93)	2900(20,0)	
	250(121)	2300(15,8)	
	300(149)	1600(11,0)	
	350(177)	1200(8,3)	
T Soyma Mukavemeti ASTM D1876	°F (°C)	lb/in (kN/m)	ASTM D3933 e göre Fosforik asitle anotlama ile 2024-T3 korumasız alüminyum
	77(25)	5(22)	
Bell Soyma Mukavemeti ASTM D3167	77(25)	20(89)	
Çekme Mukavemeti	°F (°C)	psi (MPa)	ASTM D638 e göre 0.125 in(3,18 mm) döküm
	77(25)	6675(46,0)	
Basma Mukavemeti	77(25)	10000(68,9)	ASTM D695 e göre 0,5in (12,7 mm) x 1,0in(25,4 mm) x 0,5in (12,7 mm) dikdörtgen numune
Çekme Modülü Kayma Modülü, Kuru Kayma Modülü, Yaş	0F (°C)	ksi(GPa)	ASTM D638 e göre 0,125 in(3,18 mm) döküm
	77(25)	615(4,237)	
	77(25)	212(1,461)	
	77(25)	149(1,027)	

4.3. Test Faaliyetleri

4.3.1. Tek bindirmeli kayma testi

Gerçekleştirilen testler ASTM D5868 standartlarına [63] uygun şekilde hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4’de test standardı ve Resim 4.1’de üretilen numuneler görülmektedir. Tek bindirmeli kayma testleri Resim 4.2’ de gösterilen Instron 5985 test cihazı üzerinde uygun test düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.4. ASTM D5868 standartlarına uygun tek bindirmeli kayma testi düzeneği



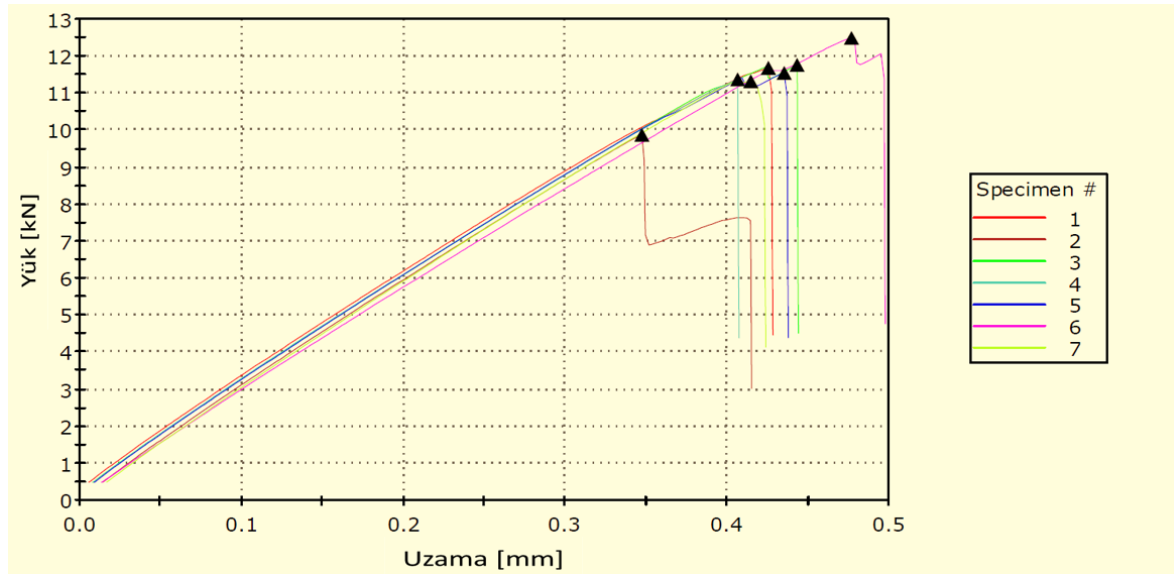
Resim 4.1. Tek bindirmeli kayma numunesi



Resim 4.2. Instron 5985 test cihazı ve tek bindirmeli kayma test düzeneği

Tek bindirmeli AR numuneleri kayma testi sonuçları

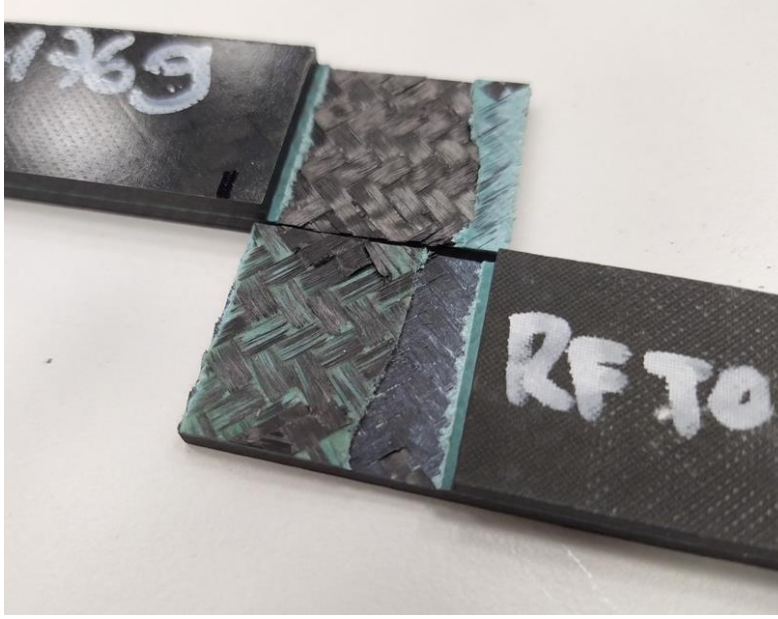
AR numuneleri 3 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.5. AR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.13. AR numunelerine ait test sonuçları

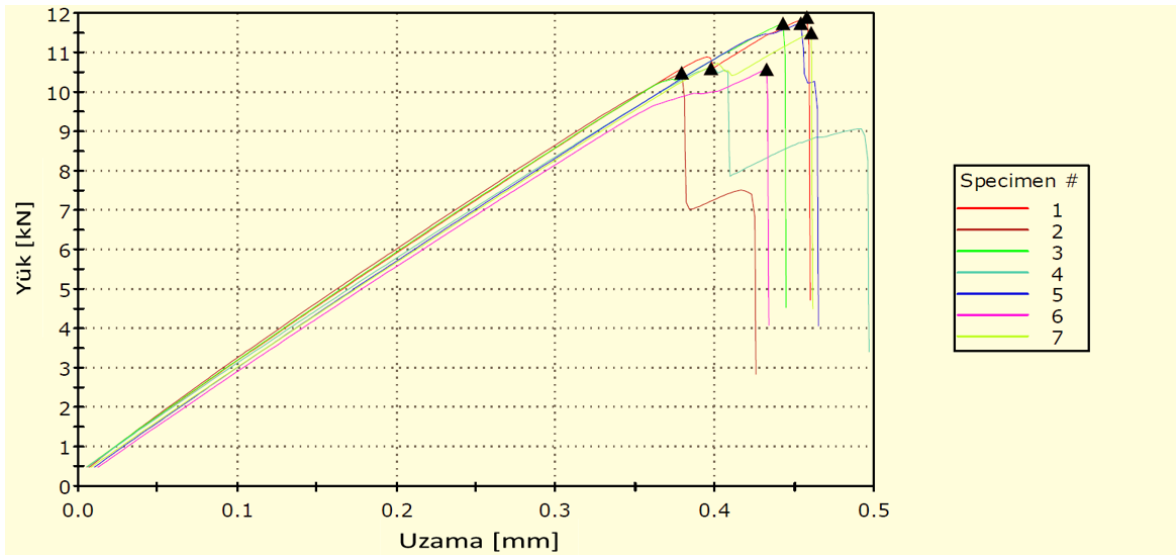
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,41	25,44	11,68	18,07
2	25,41	25,45	9,87	15,27
3	25,41	25,45	11,76	18,19
4	25,38	25,51	11,37	17,56
5	25,41	25,27	11,55	17,98
6	25,4	25,59	12,49	19,21
7	25,4	25,36	11,32	17,57
Maksimum	25,41	25,59	12,49	19,21
Minimum	25,38	25,27	9,87	15,27
Ortalama	25,4	25,44	11,43	17,69
Standart Sapma	0,01	0,1	0,79	1,2
Sapma Katsayısı	0,045	0,402	6,91	6,803



Resim 4.3. AR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli BR numuneleri kayma testi sonuçları

BR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.6. BR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.14. BR numunelerine ait test sonuçları

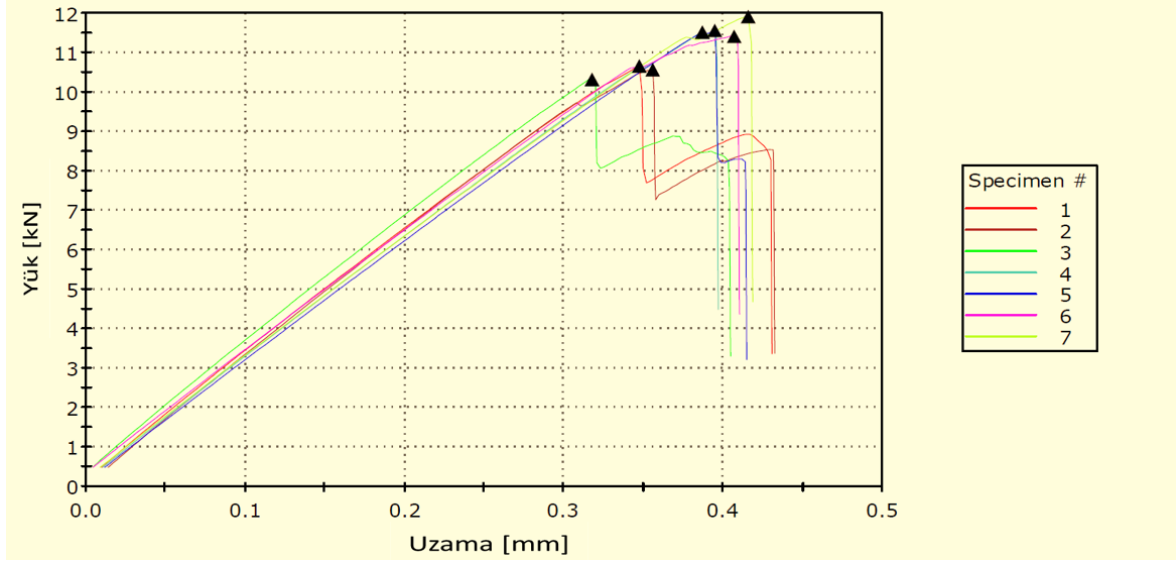
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,32	25,76	11,90	18,24
2	25,3	25,5	10,49	16,26
3	25,32	25,6	11,74	18,11
4	25,31	25,46	10,60	16,44
5	25,34	25,88	11,75	17,91
6	25,29	25,51	10,58	16,39
7	25,33	25,78	11,50	17,61
Maksimum	25,34	25,88	11,90	18,24
Minimum	25,29	25,46	10,49	16,26
Ortalama	25,32	25,64	11,22	17,28
Standart Sapma	0,02	0,16	0,64	0,88
Sapma Katsayısı	0,068	0,641	5,66	5,093



Resim 4.4. BR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli CR numuneleri kayma testi sonuçları

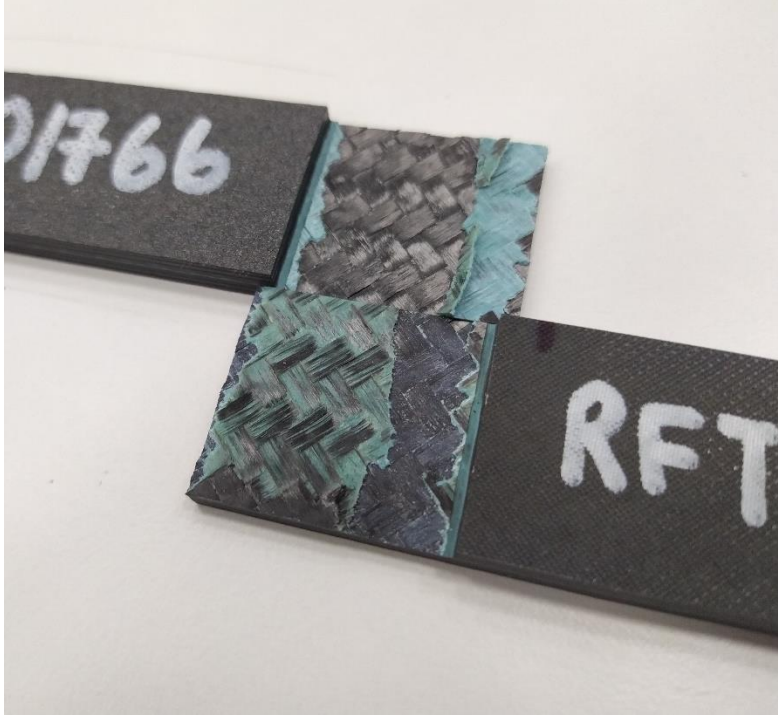
CR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C2 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.7. CR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.15. CR numunelerine ait test sonuçları

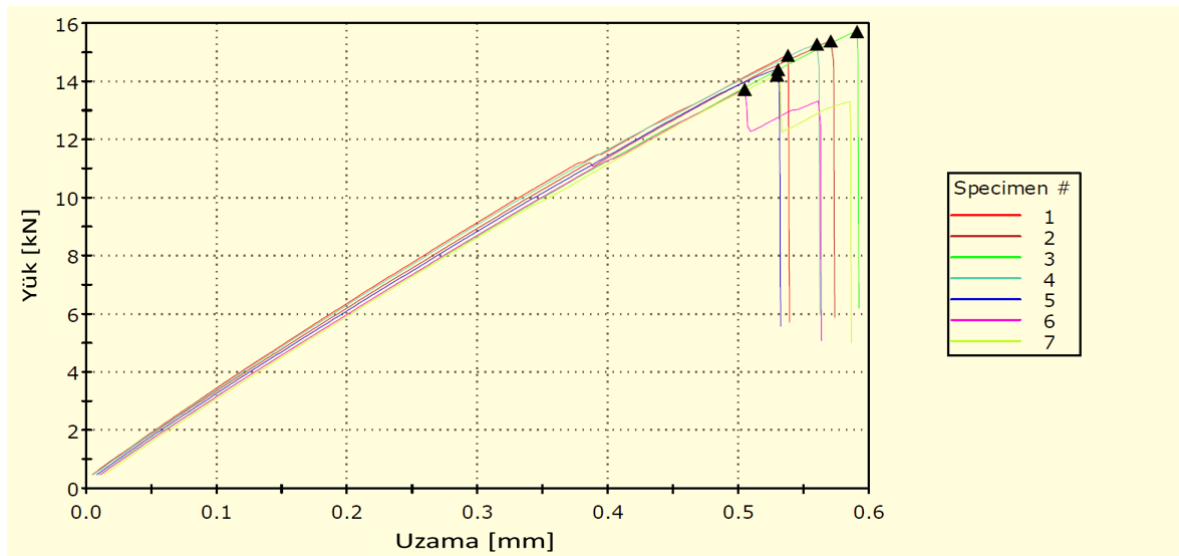
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,36	25,57	10,65	16,43
2	25,36	25,7	10,56	16,21
3	25,36	25,46	10,32	15,98
4	25,37	25,55	11,52	17,77
5	25,37	25,55	11,55	17,82
6	25,35	25,55	11,41	17,61
7	25,35	25,8	11,91	18,21
Maksimum	25,37	25,8	11,91	18,21
Minimum	25,35	25,46	10,32	15,98
Ortalama	25,36	25,6	11,13	17,15
Standart Sapma	0,01	0,11	0,61	0,91
Sapma Katsayısı	0,032	0,445	5,46	5,293



Resim 4.5. CR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli DR numuneleri kayma testi sonuçları

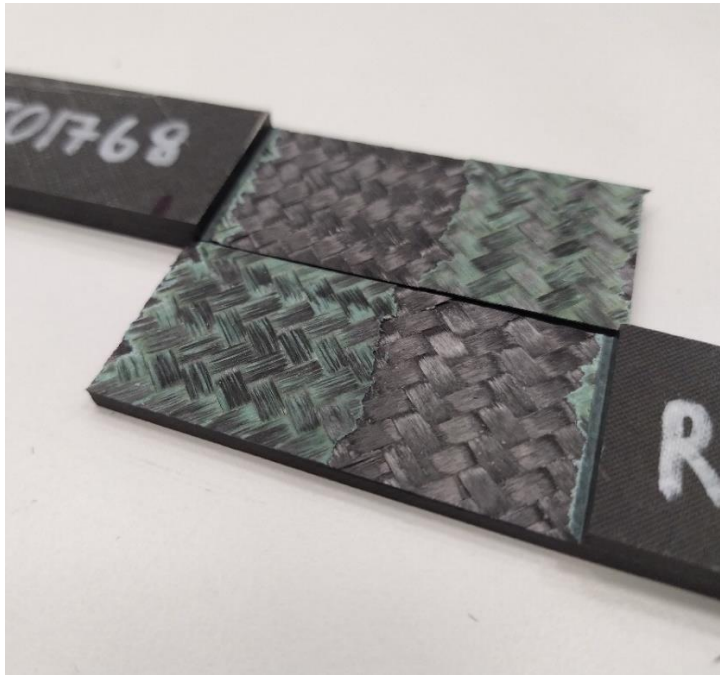
DR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 50,8 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.8. DR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.16. DR numunelerine ait test sonuçları

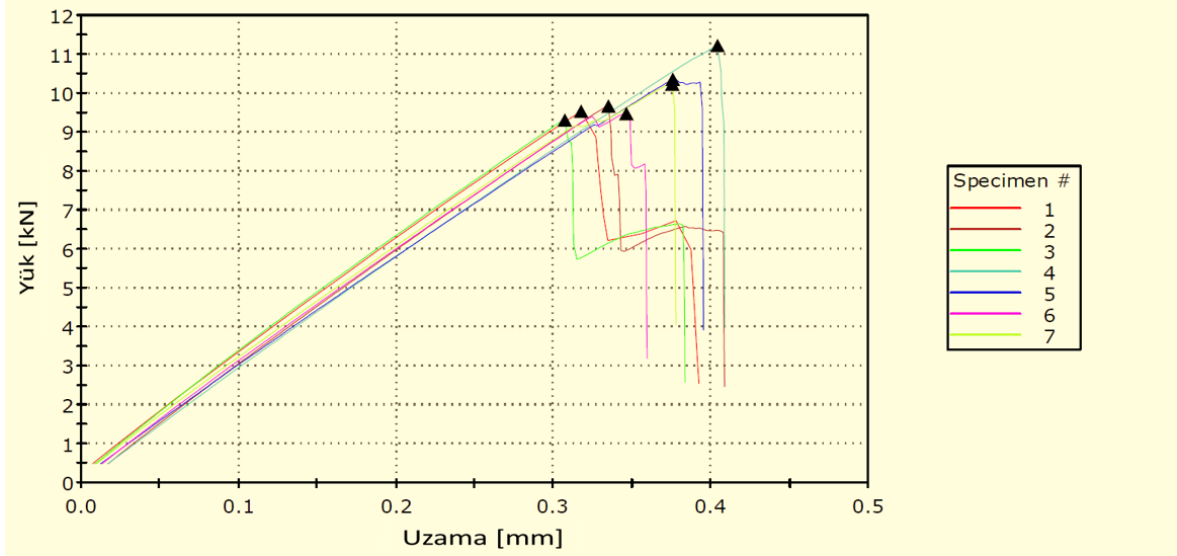
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,4	50,63	14,89	11,58
2	25,37	50,87	15,39	11,92
3	25,4	50,74	15,71	12,19
4	25,38	50,74	15,28	11,87
5	25,36	50,93	14,40	11,15
6	25,4	51,03	13,73	10,6
7	25,35	50,63	14,21	11,07
Maksimum	25,4	51,03	15,71	12,19
Minimum	25,35	50,63	13,73	10,36
Ortalama	25,38	50,8	14,80	11,48
Standart Sapma	0,02	0,15	0,71	0,57
Sapma Katsayısı	0,082	0,3	4,82	4,924



Resim 4.6. DR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli ER numuneleri kayma testi sonuçları

ER numuneleri 3 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.9. ER numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.17. ER numunelerine ait test sonuçları

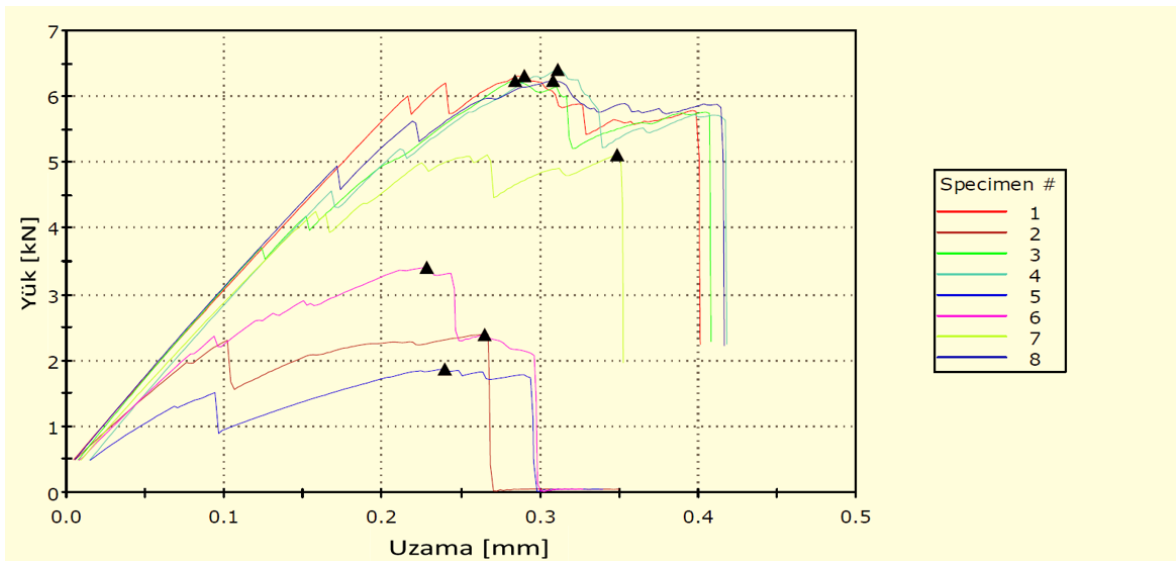
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,38	25,31	9,54	14,85
2	25,44	25,44	9,67	14,95
3	25,32	25,42	9,31	14,47
4	25,45	25,57	11,22	17,25
5	25,4	25,51	10,36	15,99
6	25,43	25,46	9,48	14,64
7	25,41	25,5	10,23	15,79
Maksimum	25,45	25,57	11,22	17,25
Minimum	25,32	25,31	9,31	14,47
Ortalama	25,4	25,46	9,97	15,42
Standart Sapma	0,04	0,08	0,68	0,99
Sapma Katsayısı	0,174	0,323	6,78	6,415



Resim 4.7. ER numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli FR numuneleri kayma testi sonuçları

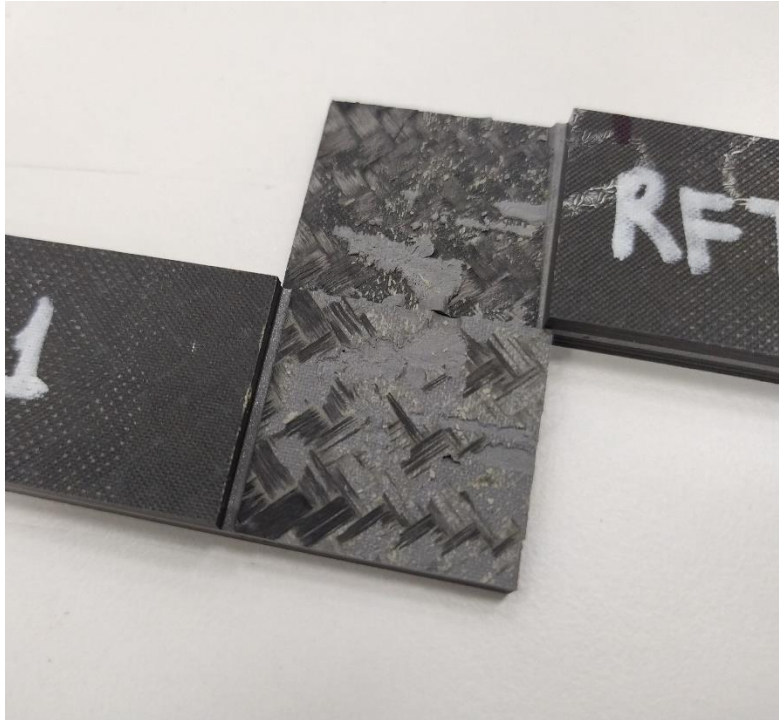
FR numuneleri 0.4 mm macun yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.10. FR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.18. FR numunelerine ait test sonuçları

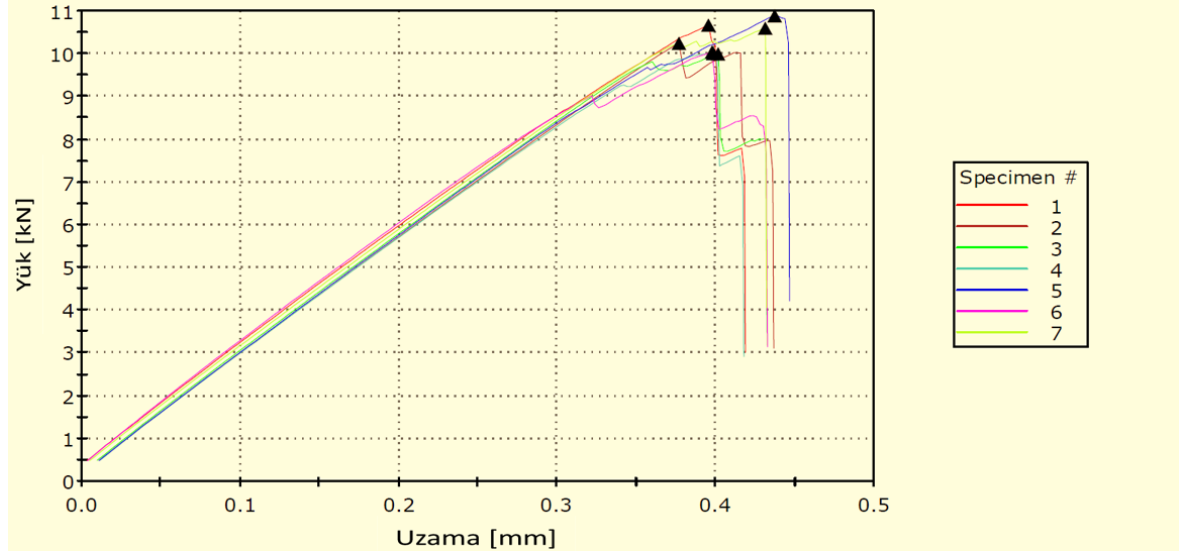
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,43	26,23	6,32	9,47
2	25,44	25,29	2,40	3,73
3	25,4	25,64	6,24	9,58
4	25,44	25,55	6,41	9,86
5	25,42	25,39	1,88	2,91
6	25,44	25,59	3,42	5,25
7	25,43	25,5	5,12	7,9
8	25,42	25,58	6,24	9,6
Maksimum	25,44	26,23	6,41	9,86
Minimum	25,4	25,29	1,88	2,91
Ortalama	25,43	25,6	4,75	7,29
Standart Sapma	0,01	0,28	1,90	2,88
Sapma Katsayısı	0,055	1,097	39,99	39,578



Resim 4.8. FR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli GR numuneleri kayma testi sonuçları

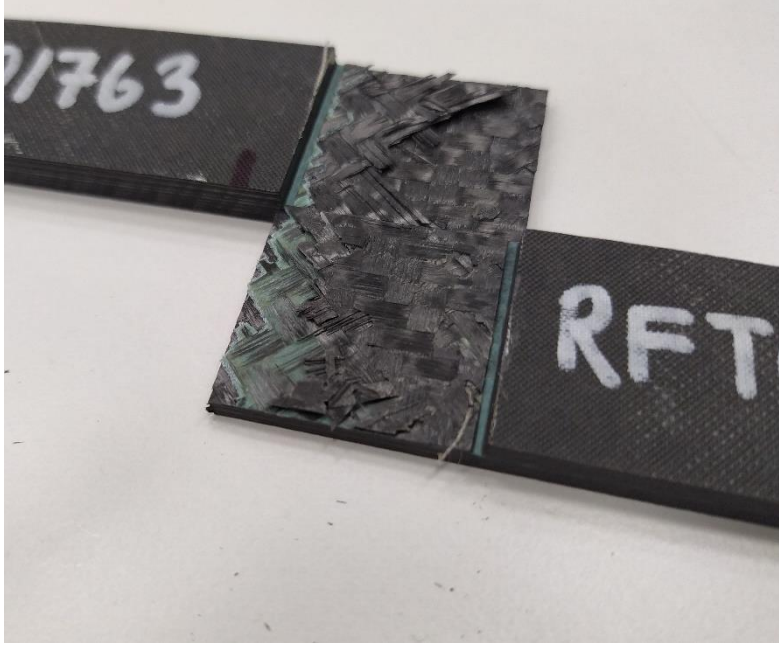
GR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.11. GR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.19. GR numunelerine ait test sonuçları

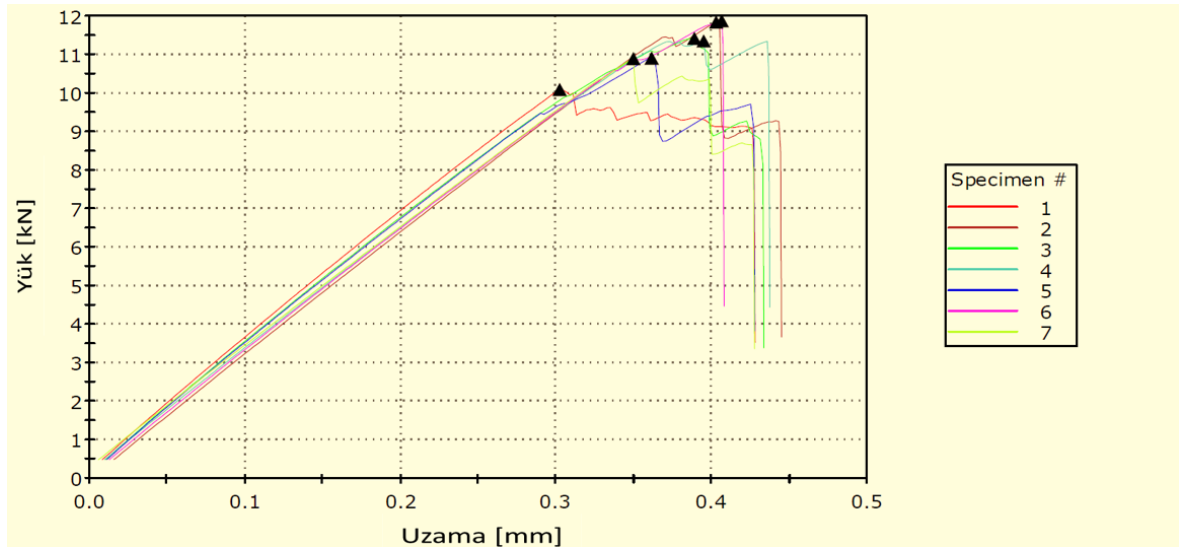
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,37	25,32	10,66	16,6
2	25,43	25,53	10,24	15,77
3	25,44	25,58	10,00	15,36
4	25,43	25,28	10,00	15,56
5	25,4	25,34	10,88	16,91
6	25,4	25,5	10,04	15,5
7	25,37	25,4	10,59	16,44
Maksimum	25,44	25,58	10,88	16,91
Minimum	25,37	25,28	10,00	15,36
Ortalama	25,41	25,42	10,34	16,02
Standart Sapma	0,03	0,12	0,36	0,62
Sapma Katsayısı	0,113	0,455	3,52	3,858



Resim 4.9. GR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli HR numuneleri kayma testi sonuçları

HR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C2 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.12. HR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.20. HR numunelerine ait test sonuçları

Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,41	25,43	10,09	15,62
2	25,31	25,45	11,84	18,39
3	25,33	25,48	11,41	17,68
4	25,33	25,44	11,35	17,61
5	25,38	25,41	10,90	16,91
6	25,31	25,62	11,87	18,31
7	25,34	25,46	10,89	16,87
Maksimum	25,41	25,62	11,87	18,39
Minimum	25,31	25,41	10,09	15,62
Ortalama	25,34	25,47	11,19	17,34
Standart Sapma	0,04	0,07	0,62	0,96
Sapma Katsayısı	0,147	0,274	5,58	3,858



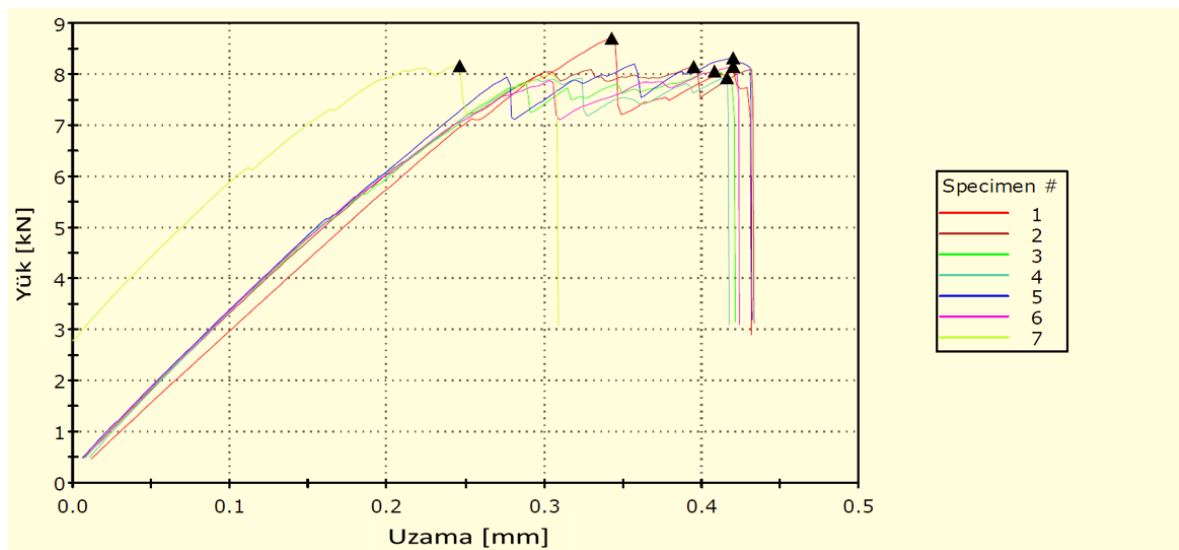
Resim 4.10. HR numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Çizelge 4.21. Oda koşullarında yapılan test sonuçları

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Kayma Dayanımı (MPa)
AR	Ortak Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	11430	17,69
BR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	11220	17,28
CR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11130	17,15
DR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	50,8	14800	11,48
ER	Sonradan Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	9970	15,42
FR	Sonradan Yapışma	HYSOL EA 9394 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	4750	7,29
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	16,02
HR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11190	17,34

Tek bindirmeli BC numuneleri kayma testi sonuçları

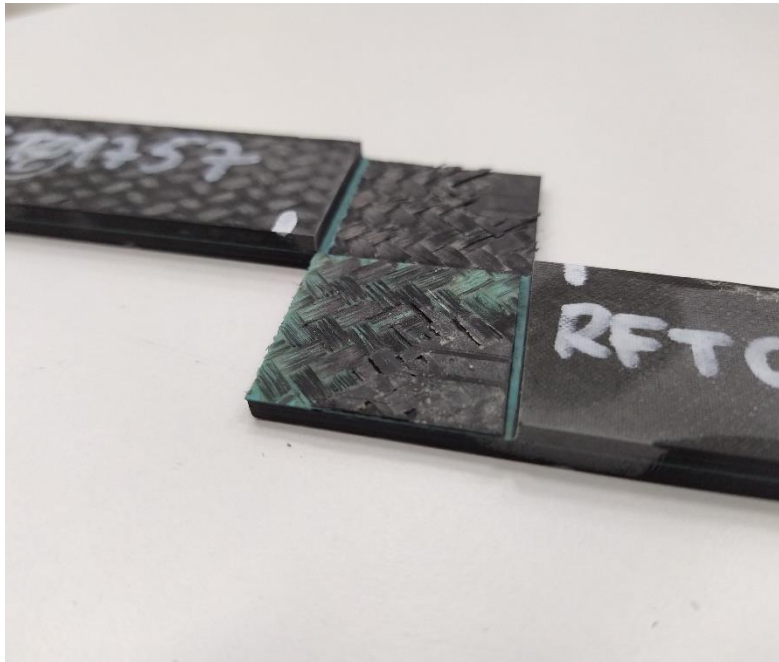
BC numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip soğuk (-55 °C) /kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.13. BC numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.22. BC numunelerine ait test sonuçları

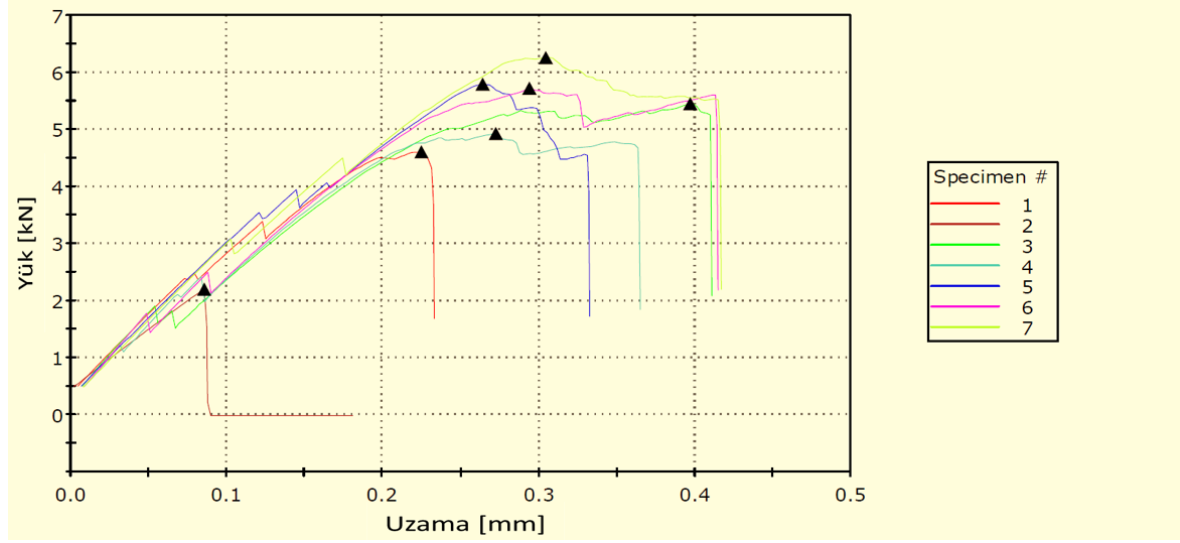
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,3	25,58	8,71	13,45
2	25,27	25,4	8,15	12,7
3	25,3	25,67	8,06	12,41
4	25,36	25,35	7,93	12,34
5	25,29	25,62	8,32	12,84
6	25,3	25,48	8,16	12,65
7	25,32	25,51	8,17	12,64
Maksimum	25,36	25,67	8,71	13,45
Minimum	25,27	25,35	7,93	12,34
Ortalama	25,31	25,52	8,21	12,72
Standart Sapma	0,03	0,12	0,25	0,37
Sapma Katsayısı	0,111	0,455	3,02	2,884



Resim 4.11. BC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli FC numuneleri kayma testi sonuçları

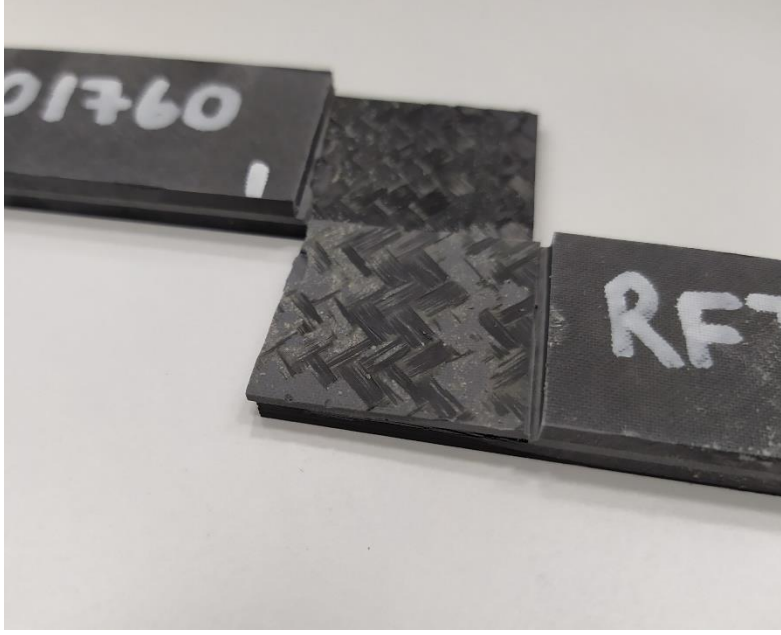
FC numuneleri 0.4 mm kalınlıkta macun yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip soğuk (-55 °C) /kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.14. FC numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.23. FC numunelerine ait test sonuçları

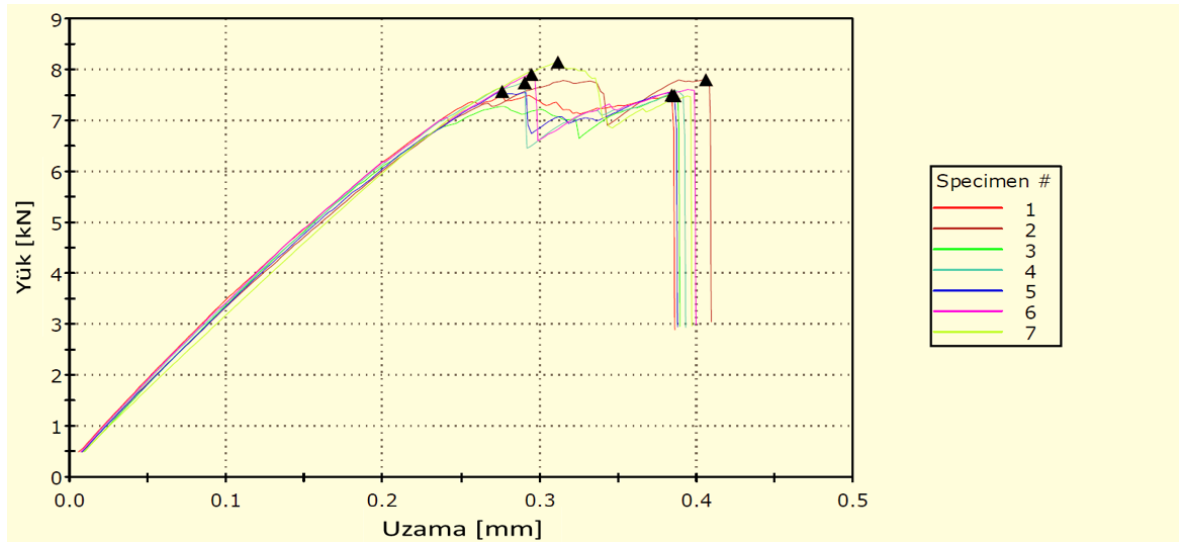
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,39	25,57	4,61	7,1
2	25,38	25,58	2,21	3,4
3	25,39	25,49	4,45	8,42
4	25,39	25,44	4,93	7,63
5	25,4	25,98	5,79	8,78
6	25,38	25,96	5,72	8,68
7	25,35	25,88	6,26	9,54
Maksimum	25,4	25,98	6,26	9,54
Minimum	25,35	25,44	2,21	3,4
Ortalama	25,38	25,7	5,00	7,65
Standart Sapma	0,02	0,23	1,35	2,04
Sapma Katsayısı	0,063	0,9	26,97	26,609



Resim 4.12. FC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli GC numuneleri kayma testi sonuçları

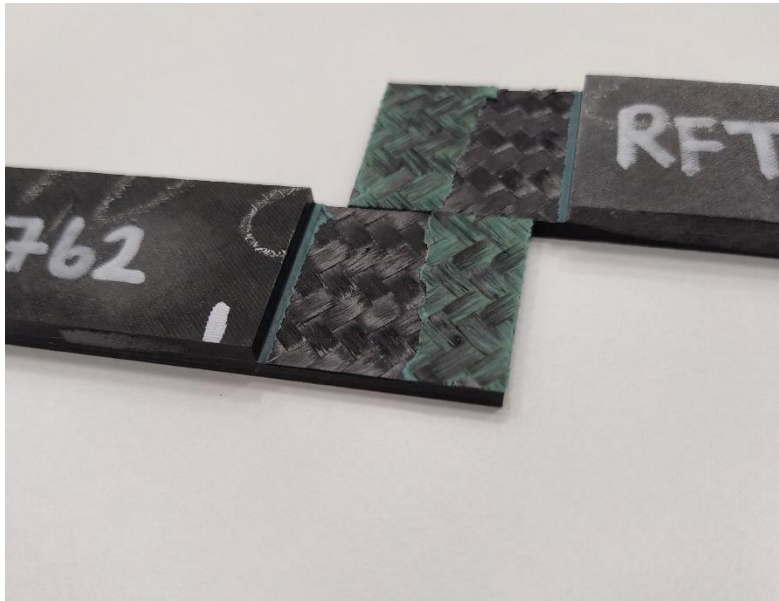
GC numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip soğuk (-55 °C) /kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.15. GC numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.24. GC numunelerine ait test sonuçları

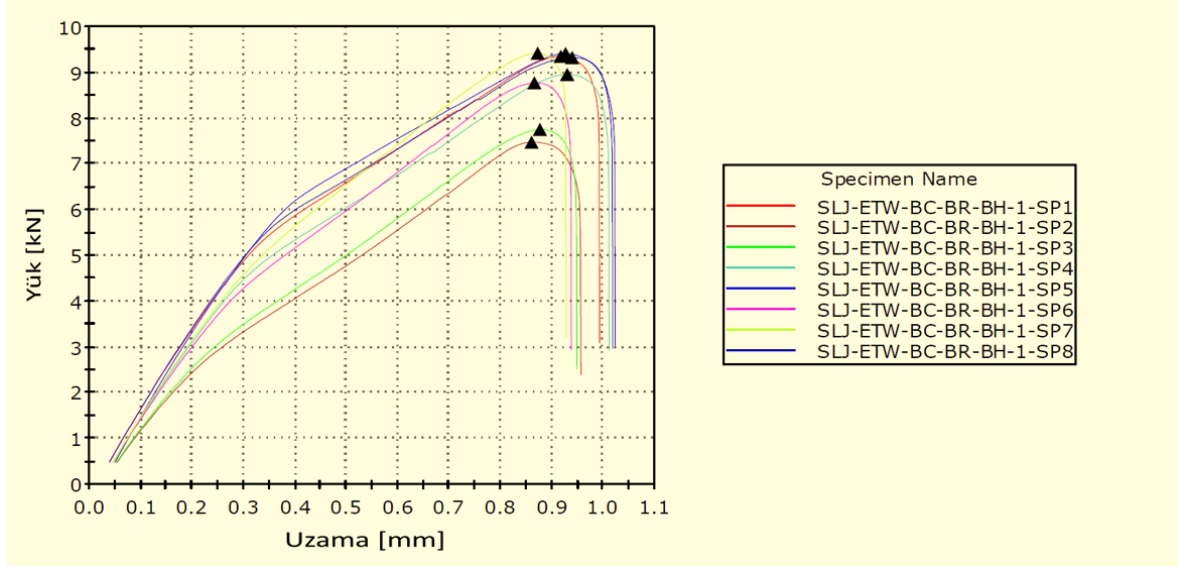
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,38	25,57	7,50	11,56
2	25,39	25,3	7,80	12,14
3	25,42	25,42	7,49	11,6
4	25,41	25,48	7,74	11,96
5	25,33	25,39	7,57	11,78
6	25,4	25,65	7,91	12,14
7	25,35	25,34	8,15	12,68
Maksimum	25,42	25,65	8,15	12,68
Minimum	25,33	25,3	7,49	11,56
Ortalama	25,38	25,45	7,74	11,98
Standart Sapma	0,03	0,13	0,25	0,39
Sapma Katsayısı	0,128	0,493	3,07	3,238



Resim 4.13. GC numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli BH numuneleri kayma testi sonuçları

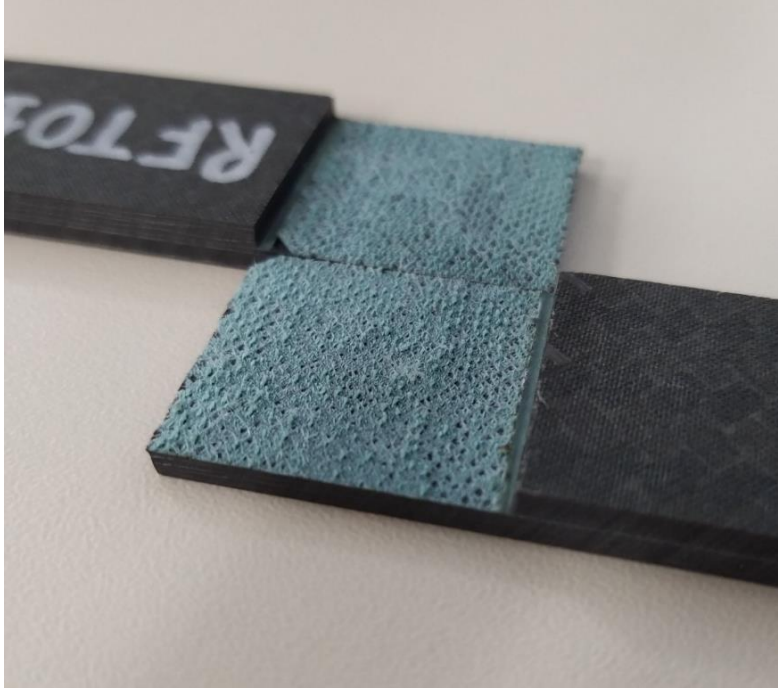
BH numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip sıcak (130 °C) /yaş ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.16. BH numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.25. BH numunelerine ait test sonuçları

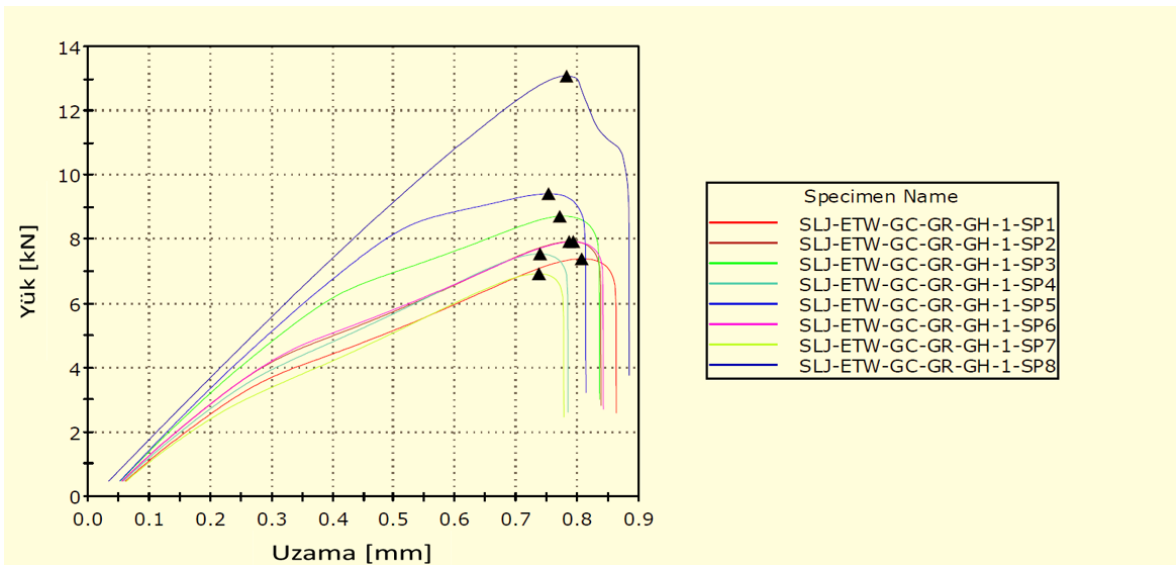
Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,31	25,54	9,34	14,45
2	25,33	25,41	7,47	11,61
3	25,37	25,51	7,75	11,98
4	25,36	25,50	8,95	13,84
5	25,32	25,43	9,41	14,61
6	25,63	25,32	8,77	13,51
7	25,64	25,34	9,41	14,49
8	25,35	25,47	9,32	14,43
Maksimum	25,64	25,54	9,41	14,61
Minimum	25,31	25,32	7,47	11,61
Ortalama	25,41	25,44	8,80	13,62
Standart Sapma	0,14	0,08	0,77	1,19
Sapma Katsayısı	0,543	0,314	8,792	8,729



Resim 4.14. BH numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Tek bindirmeli GH numuneleri kayma testi sonuçları

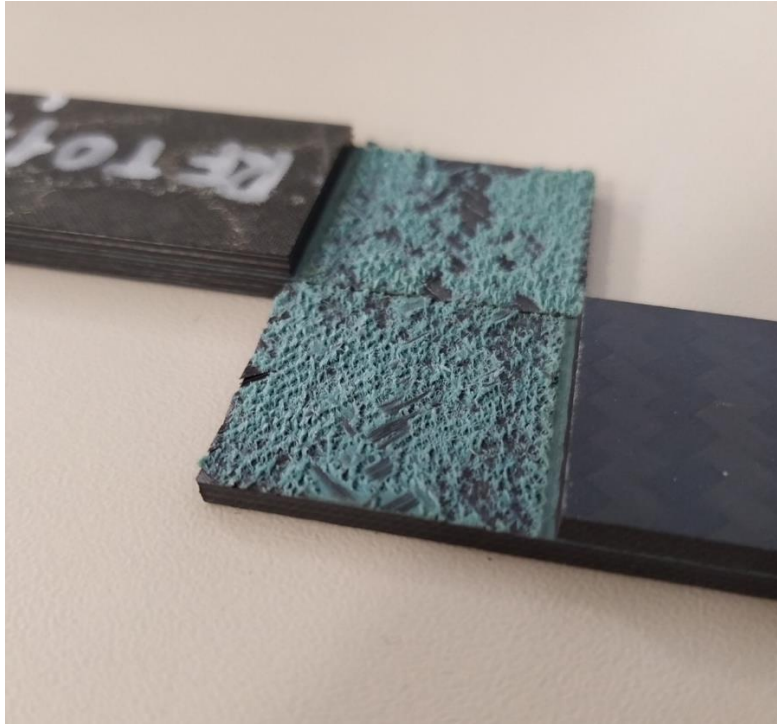
GH numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C1 dizilimine ve 25,4 mm lik bindirme uzunluğuna sahip sıcak (130 °C) /yaş ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.17. GH numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.26. GH numunelerine ait test sonuçları

Numune No#	Ölçülen Genişlik	Ölçülen Yapışma Uzunluğu	Maksimum Yük	Kayma Mukavemeti
	mm	mm	kN	MPa
1	25,39	25,43	7,41	11,47
2	25,39	25,37	7,94	12,33
3	25,37	25,64	8,73	13,41
4	25,36	25,34	7,56	11,76
5	25,25	25,64	9,43	14,56
6	25,38	25,52	7,94	12,25
7	25,25	25,54	6,94	10,77
Maksimum	25,39	25,64	9,43	14,56
Minimum	25,25	25,34	6,94	10,77
Ortalama	25,34	25,50	7,99	12,36
Standart Sapma	0,06	0,12	0,84	1,27
Sapma Katsayısı	0,25	0,476	10,513	10,26



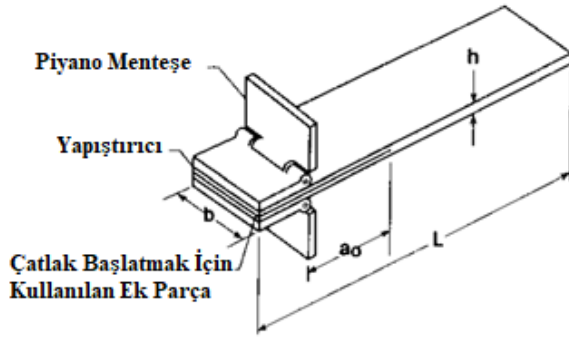
Resim 4.15. GH numunesinin ayrılma yüzeyi ve hasar modu

Çizelge 4.27 .Sıcak/nemli ve soğuk/kuru koşullarda yapılan test sonuçları

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Kayma Dayanımı (MPa)
BC	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	8210	12,72
FC	Sonradan Yapışma	EA9394 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	5000	7,65
GC	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	7740	11,98
BH	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	8800	13,62
GH	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	7990	12,36

4.3.2. Çift ankastre kiriş kırılma tokluğu testi (Mod I)

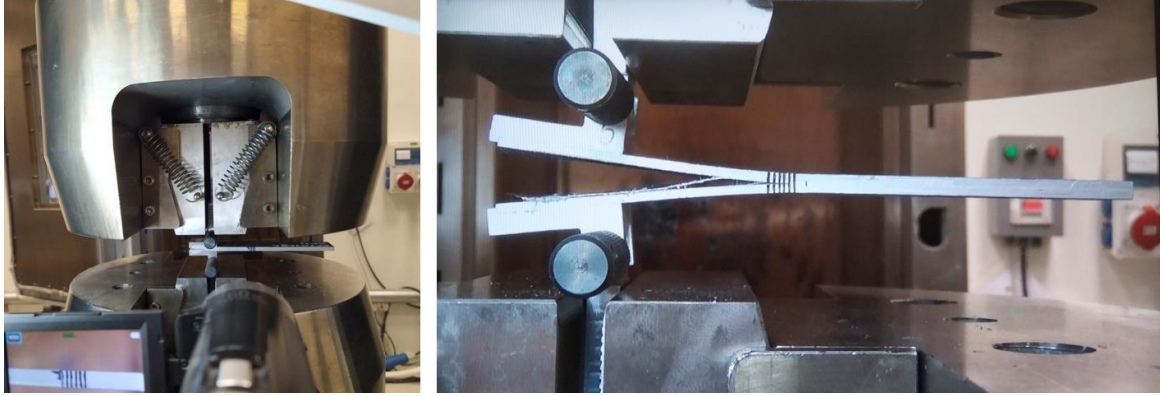
Gerçekleştirilen testler ASTM D5528 standartlarına [64] uygun şekilde hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.18’de test standardı ve Resim 4.16 ile Şekil 4.21’de üretilen numuneler görülmektedir. Çift ankastre kiriş kırılma tokluğu testleri Resim 4.17’de gösterilen Instron 5985 test cihazı üzerinde uygun test düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.18. ASTM D5528 çift ankastre kiriş kırılma tokluğu test düzeneği



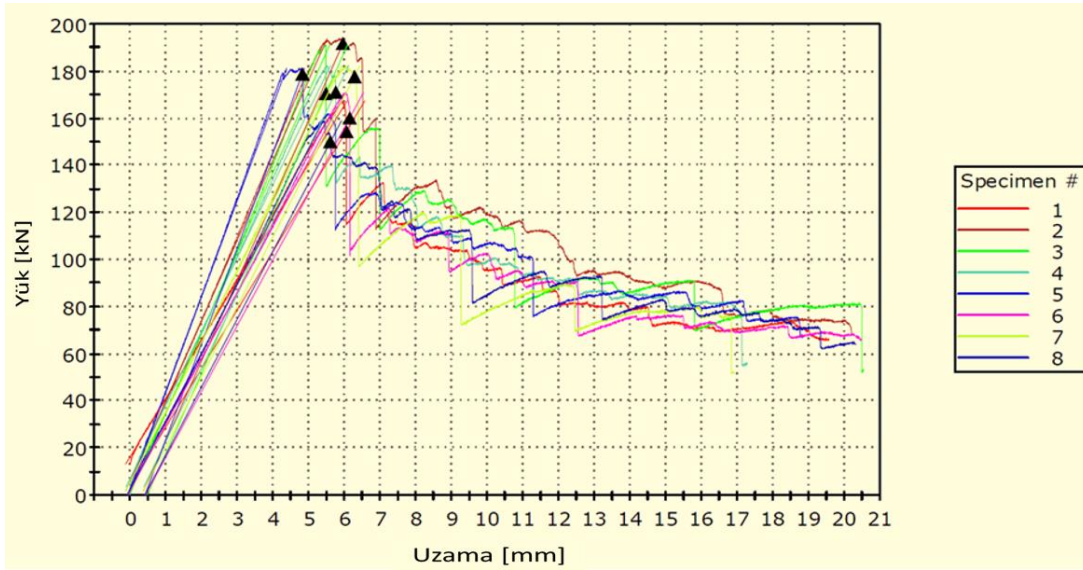
Resim 4.16. Piyano menteşeye sahip çift ankastre kiriş kırılma tokluğu numunesi



Resim 4.17. Çift ankastre kiriş test düzeneği

Çift ankastre kiriş IR numuneleri kırılma tokluğu testi sonuçları

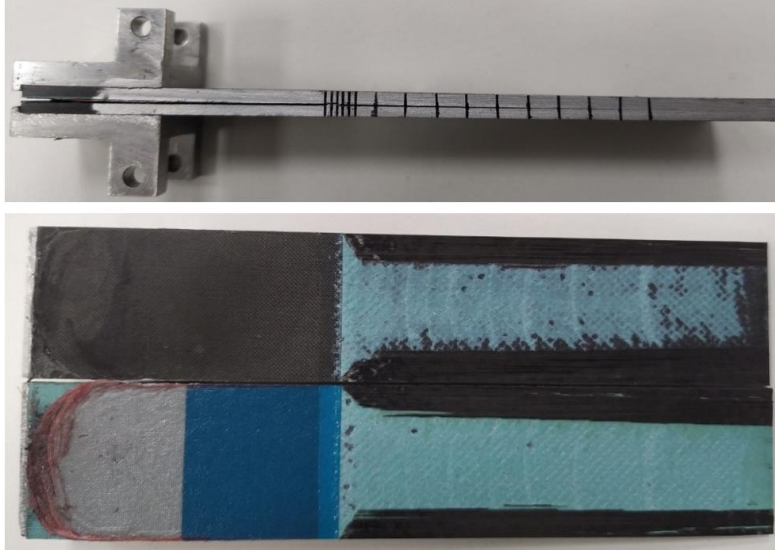
IR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C3 dizilimine sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.19. IR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.28. IR numunelerine ait test sonuçları

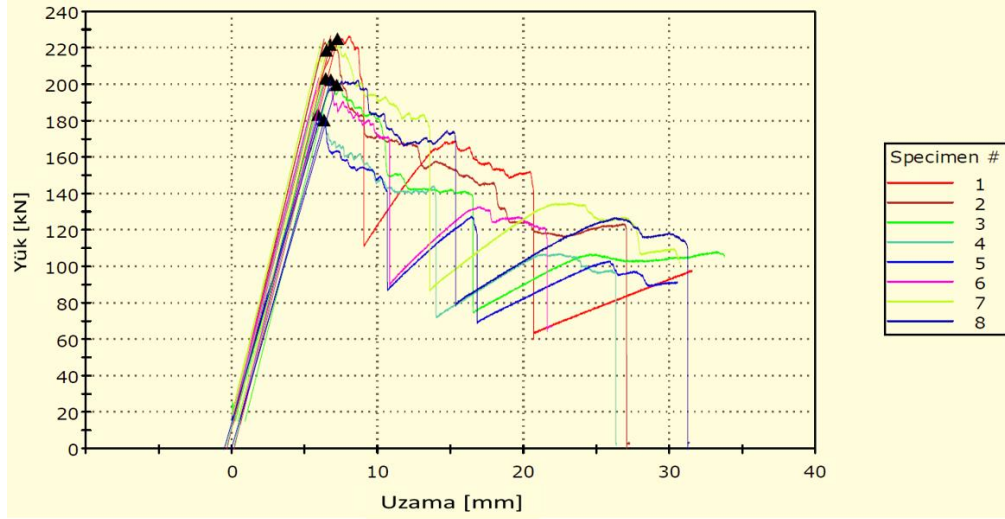
Numune No#	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	İlerletilmiş Çatlak Uzunluğu (mm)	GIC@NL_(CC) (J/m ²)
1	3,69	25,04	60	1143,4
2	3,64	24,99	55	1579,3
3	3,74	25,03	59,5	1258,5
4	3,7	25,03	59	1269,1
5	3,68	25,05	56,5	1183
6	3,72	25,04	59,5	1222,5
7	3,68	25,03	57	1401,9
8	3,67	25,06	56	1138,6
Ortalama	3,69	25,03	57,8	1274,5
Minimum	3,64	24,99	55	1138,6
Maksimum	3,74	25,06	60	1579,3
Standart Sapma	0,03	0,02	1,91	149,37
Sapma Katsayısı	0,8868	0,0825	3,29939	11,71959



Resim 4.18. IR numunesinin ayrılma yüzeyi

Çift ankastre kiriş KR numuneleri kırılma tokluğu testi sonuçları

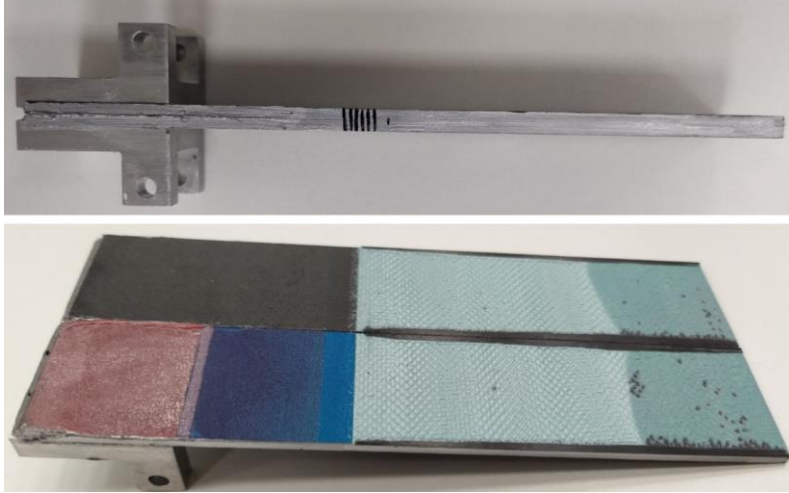
KR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C3 dizilimine sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.20. KR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.29. KR numunelerine ait test sonuçları

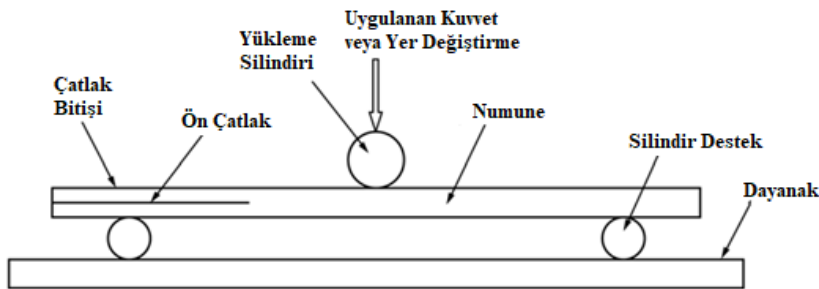
Numune No#	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	İlerletilmiş Çatlak Uzunluğu (mm)	GIC@NL_(CC) (J/m ²)
1	3,65	25,05	40	2623,9
2	3,74	25,05	39,5	2001,8
3	3,72	25,05	38,5	2284,2
4	3,64	25,05	38	1743,9
5	3,59	25,04	50	1629
6	3,68	25,08	38	1946,3
7	3,78	25,07	38,5	2125,7
8	3,73	25,07	39	2211,4
Ortalama	3,69	25,06	40,2	2070,8
Minimum	3,59	25,04	38	1629
Maksimum	3,78	25,08	50	2623,9
Standart Sapma	0,06	0,01	4,03	315,45
Sapma Katsayısı	1,691	0,0554	10,01839	15,23349



Resim 4.19. KR numunesinin ayrılma yüzeyi

4.3.3. Çentikli bükme kırılma tokluğu testi (Mod II)

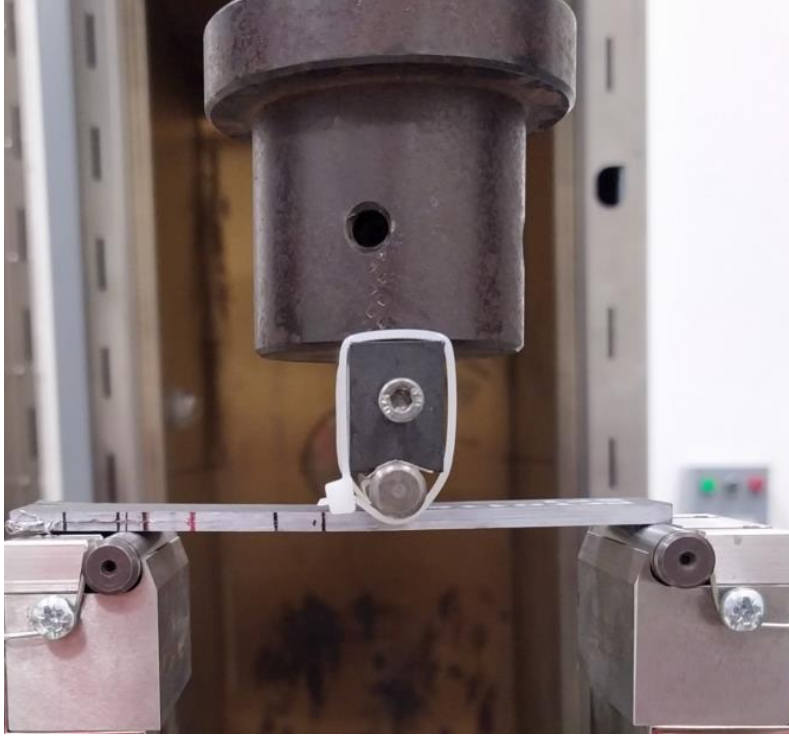
Gerçekleştirilen testler ASTM D7905 standartlarına [65] uygun şekilde hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.21’de test standardı ve Resim 4.20’de üretilen numuneler görülmektedir. Çentikli bükme kırılma tokluğu testleri Resim 4.21’de gösterilen Instron 5985 test cihazı üzerinde uygun test düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.21. ASTM D7905 çentikli bükme kırılma tokluğu test düzeneği



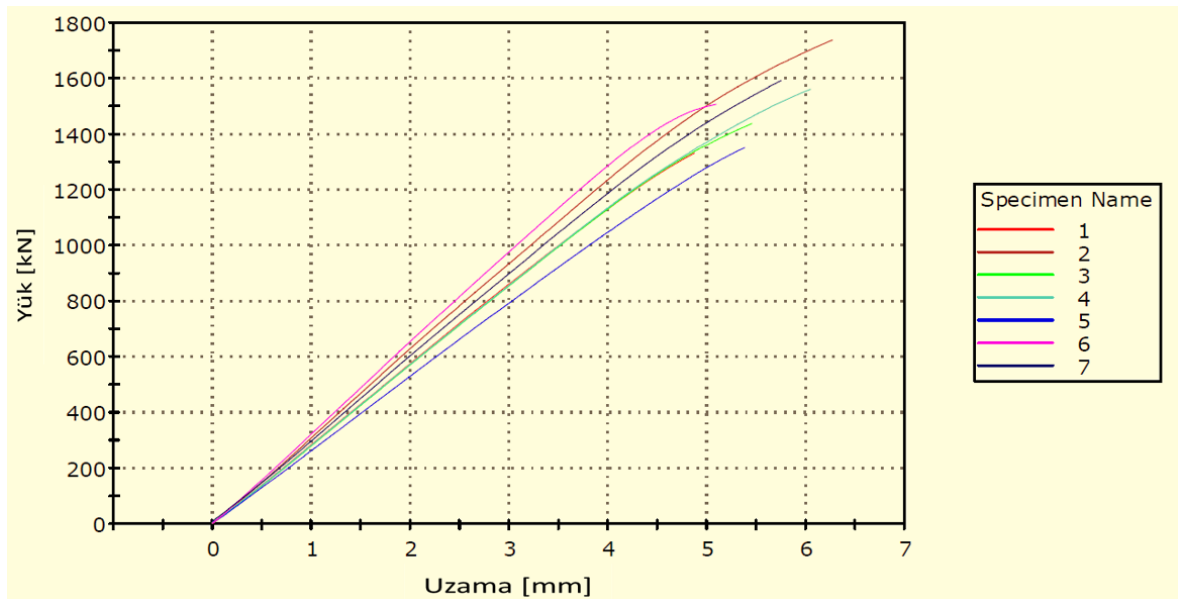
Resim 4.20. Çentikli bükme kırılma tokluğu numunesi



Resim 4.21. Çentikli bükme test düzeneği

Çentikli bükme JR numuneleri kırılma tokluğu testi sonuçları

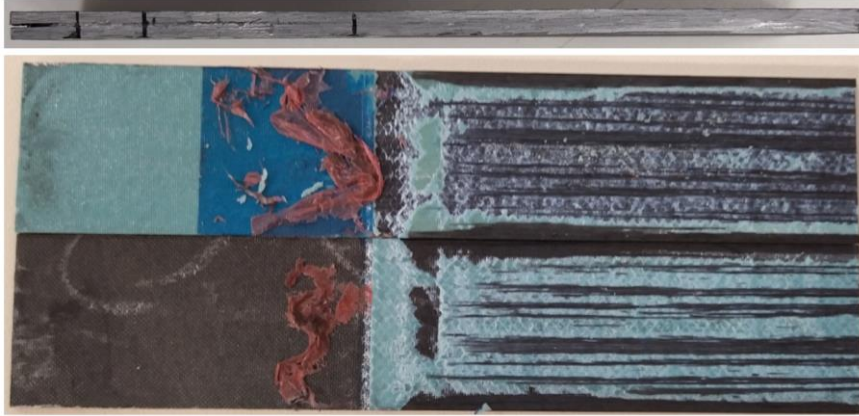
JR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve ortak yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C3 dizilimine sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.22. JR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.30. JR numunelerine ait test sonuçları

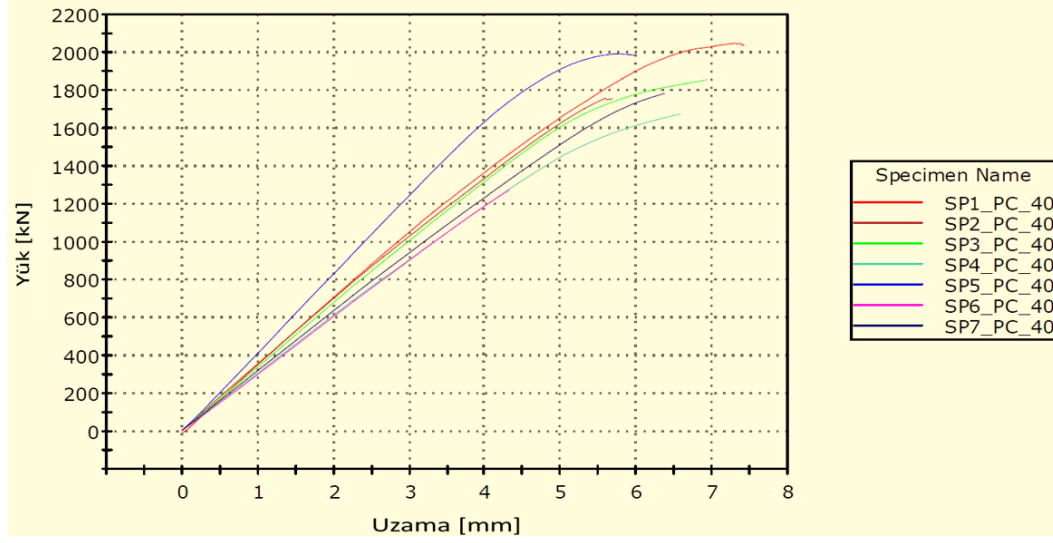
Numune No#	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GIIc@NL_(CC) (J/m ²)
1	3,70	25,08	40,0	2622
2	3,65	25,10	40,0	3712
3	3,73	25,08	40,0	2920
4	3,63	25,03	40,0	3181
5	3,69	25,08	40,0	2558
6	3,76	25,09	40,0	2900
7	3,75	25,08	40,0	3241
8	3,72	25,07	40,0	2512
Ortalama	3,70	25,08	40,0	2,56
Minimum	3,63	25,03	40,0	2512
Maksimum	3,76	25,10	40,0	3712
Standart Sapma	0,05	0,02	0	0,41
Sapma Katsayısı	1,24	0,08	0	13,86



Resim 4.22. JR numunesinin ayrılma yüzeyi

Çentikli bükme LR numuneleri kırılma tokluğu testi sonuçları

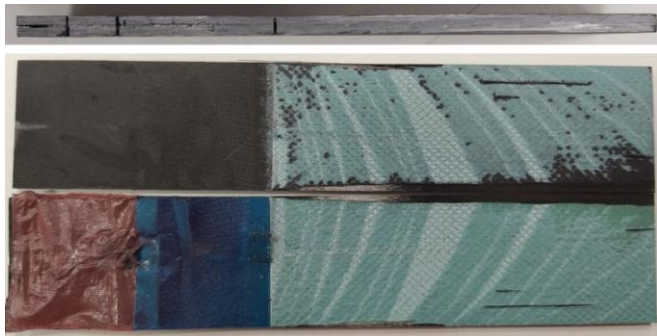
LR numuneleri 2 tabaka FM300K film yapıştırıcı ve sonradan yapışma birleştirme yöntemi kullanılarak, C3 dizilimine sahip oda sıcaklığı/kuru ortam koşullarında test edilen numunelerdir.



Şekil 4.23. LR numunelerine ait yük-uzama grafiği

Çizelge 4.31. LR numunelerine ait test sonuçları

Numune No#	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Çatlak Uzunluğu (mm)	GIIC@NL_(CC) (J/m ²)
1	3,78	25,09	40	4543
2	3,75	25,1	40	3811
3	3,73	25,1	40	4592
4	3,68	25,07	40	3452
5	3,68	25,08	40	3361
6	3,64	25,08	40	2134
7	3,71	25,1	40	3810
Ortalama	3,71	25,09	40	3672
Minimum	3,64	25,07	40	2134
Maksimum	3,78	25,1	40	4592
Standart Sapma	0,05	0,01	0	830
Sapma Katsayısı	1,28	0,05	0	22,66



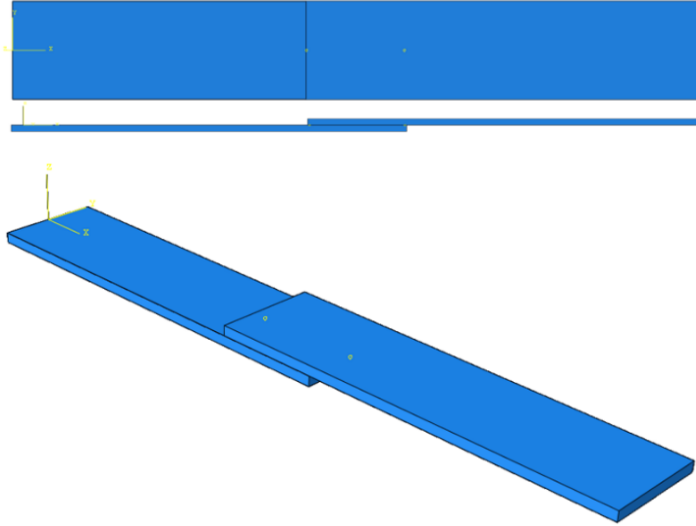
Resim 4.23. LR numunesinin ayrılma yüzeyi

4.4. Analiz Faaliyetleri

Yapılan tek bindirmeli kayma testlerinin analiz ile doğrulanması sürecinde Abaqus isimli analiz yazılımı kullanılmıştır. VCCT (Virtual Crack Closure Technique) ile modellenen numunelerin analiz sonuçları aşağıdaki gibi bulunmuştur. Bu yöntemde kullanılan malzemelerin değerleri “4.2. Üretim Faaliyetleri” bölümünde yer alan veriler kullanılarak tanımlanmıştır. Ayrıca VCCT yönteminde kullanılan yapıştırıcının kırılma tokluğu değerleri yapılan testler sonucu elde edilen veriler kullanılarak tanımlanmıştır.

4.4.1. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin modellenmesi

Tek bindirmeli kayma testi numuneleri dizilim ve bindirme uzunluğuna göre geometrik olarak modellenmiştir. Ortak yapışma ve sonradan yapışma ile ilgili tasarım girdisi, yapılan kırılma tokluğu testleri sonuçlarının modele yansıtılmasıyla uygulanmıştır. İlk olarak, yapıştırılacak parçaların her biri modellenirken 3D (Modelling Space), Deformable (Type), Shell (Shape) ve Planar (Type) seçilerek modellenmiştir. Şekil 4.24’de Abaqus yazılımında modellenmiş numuneler görülmektedir.

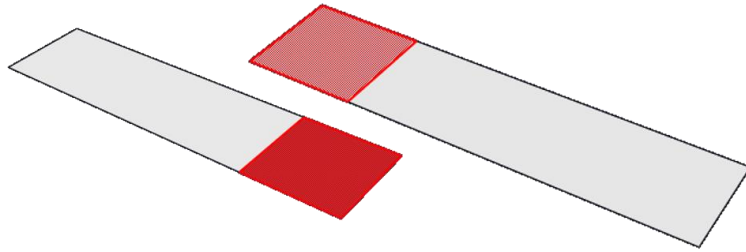


Şekil 4.24. Tek bindirmeli kayma testi numunelerinin üst ve izometrik görünüşü

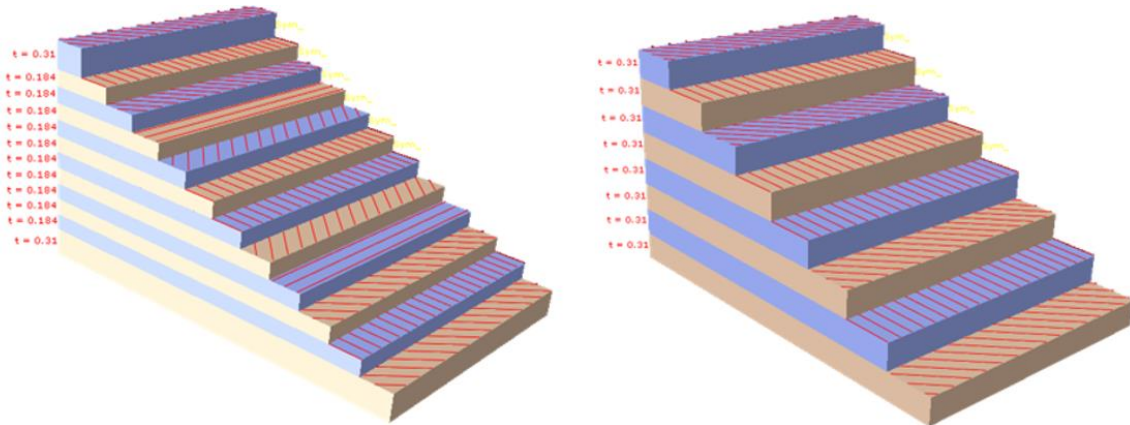
Ardından yapıştırılacak malzemelerin üretildiği karbon prepregler Hexcel firması tarafından sağlanan veri sayfalarına uygun olarak Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.8 arasındaki tüm çizelgelere göre yoğunluk, Hashin Hasar (Longitudinal tensile, compressive and shear strength,

Transverse tensile, compressive and shear strength) ve Elastik (Mühendislik Sabitleri) (E1, E2, E3, Nu12, Nu13, Nu23, G12, G13, G23) değerleri analiz yazılımının veri tabanına tanımlanmıştır.

Daha sonra modellenen parçaların yapışma yüzeyleri tanımlanır. Bunun için master ve slave yüzey seçimi yapılır. Seçilen yüzeyler Şekil 4.25’de görülmektedir. Bir sonraki adım yapıştırılacak malzemelerin dizilimlerini oluşturmaktır. Her bir dizilim için bir kesit (Section) oluşturulur ve bu kesitler ilgili numuneye atanır. C1 ve C2 dizilimlerine sahip numunelerin dizilim sıralaması Şekil 4.26’da görülmektedir.

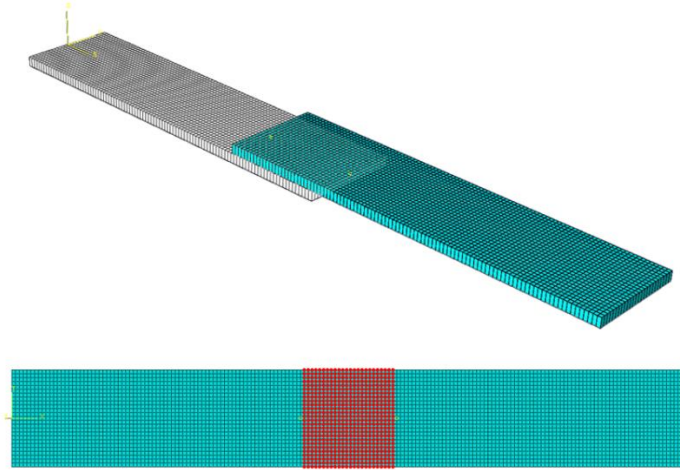


Şekil 4.25. Master (altta) ve slave (üstte) yüzey seçimleri



Şekil 4.26. Tek yönlü ve dokuma tek bindirmeli kayma testi numune dizilimleri

Sonraki adımda birleştirilecek parçaların her biri meshlenir ve master yüzey üzerine bağlanacak düğümler (node) slave yüzey üzerinden seçilir. Mesh atılmış parçalar ve seçilen düğümler Şekil 4.27’de görülmektedir.



Şekil 4.27. Numunelere mesh atılması ve düğümlerin tanımlanması

İleriki adımda step tanımlaması yapılır. Buradan analiz süresi ve adım artışları gibi değerler belirlenir. Diğer adımda birleştirilecek iki malzemenin etkileşime (Interaction Properties) girdiği kısmın özellikleri tanımlanır. Burada VCCT (Virtual Crack Closure Technique) tanımlamaları yapılır. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi yapıştırıcı malzemenin özellikleri malzemenin mühendislik sabitleri yerine mod I ve mod II kırılma tokluğu değerleri girilir (Fracture Criterion). Böylece yapıştırıcı analiz yazılım veri tabanına tanımlanmış olur.

Edit Contact Property

Name: IntProp-1

Contact Property Options

Fracture Criterion

Geometric Properties

Mechanical Thermal Electrical

Fracture Criterion

Type: VCCT

Direction of crack growth relative to local 1-direction: Maximum tangential stress

Note: Crack growth direction is applicable only for enriched region in Abaqus/Standard

Mixed mode behavior: BK

Tolerance: 0.2

Viscosity: 0

☒ Specify tolerance for unstable crack propagation:

☒ Default ☐ Specify value:

Benzeggagh-Kenane

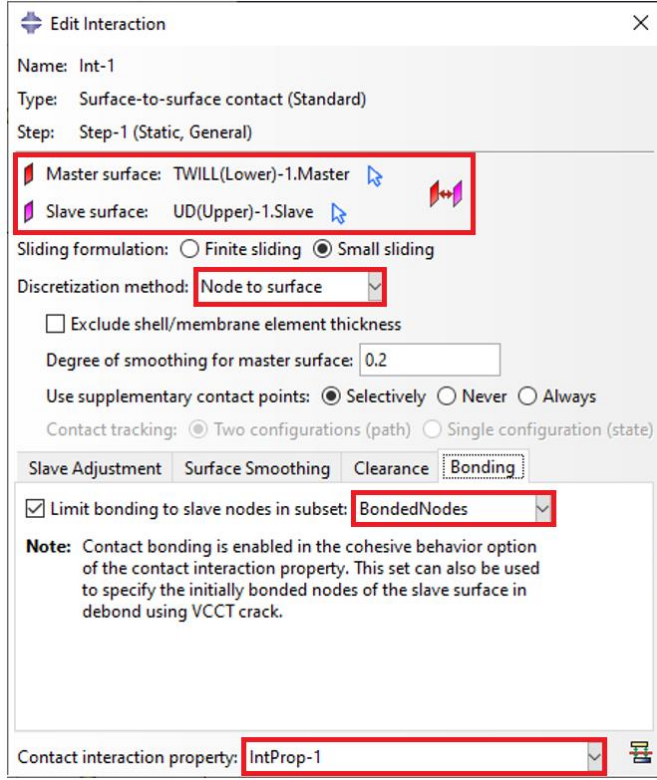
☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Critical energy release rate			Exponent
Mode I	Mode II	Mode III	n

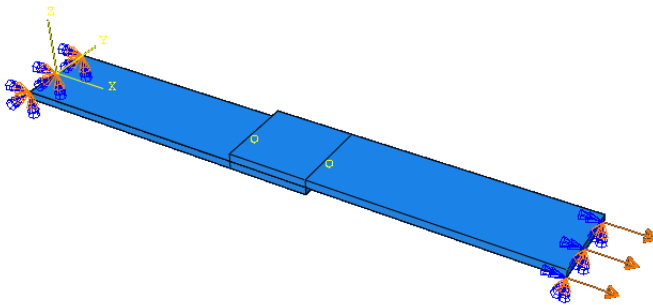
Şekil 4.28. Yapıştırıcının analiz veri tabanına tanımlanması

Yapıştırıcı malzeme tanımlaması yapıldıktan sonra yapıştırılacak yüzeyler (Interaction) tanımlanır. Master ve slave yüzeyleri seçimi ve slave yüzeydeki düğümlerin master yüzeye bağlanması Şekil 4.29'daki gibi tanımlanır.



Şekil 4.29. Yapıştırılacak yüzeylerin seçimi ve tanımlanması

Analiz başlatılmadan önce çatlak tanımlama işlemi yapılır. Ardından Field Output kısmından analiz sonucunda okunmak istenen değerler seçilir. Daha sonra Şekil 4.30'da görüldüğü gibi tek bindirmeli kayma testine uygun olarak analiz modeli bir tarafından sabitlenip diğer tarafından uzama tanımlanır. Bunun sonucunda oluşan tepki kuvveti okunur. Tepki kuvvetinin yapışma yüzey alanına bölünmesiyle de kayma mukavemeti tespit edilir.

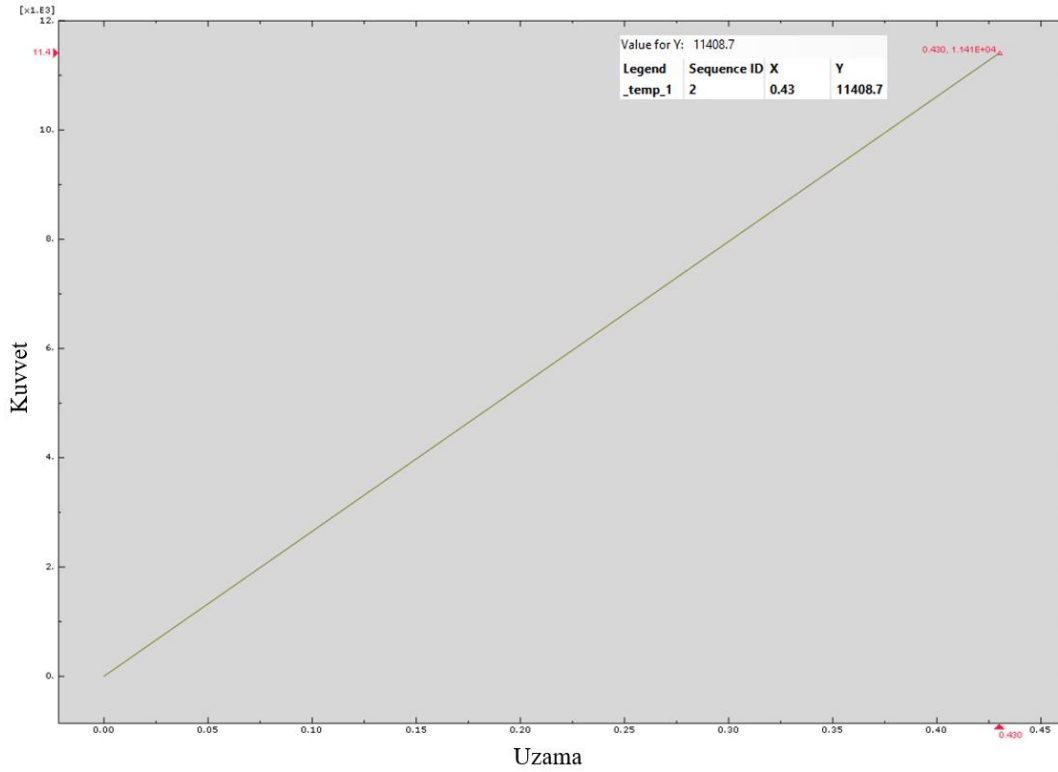


Şekil 4.30. Bağlantının analiz yazılımında sabitlemesi ve uzama tanımlanması

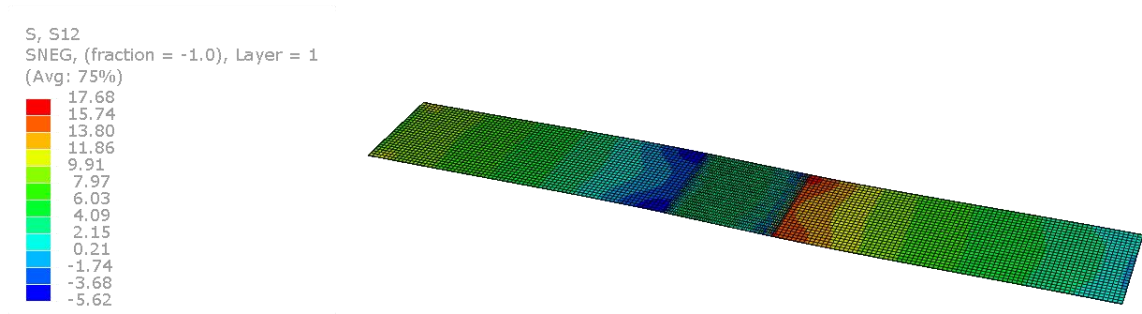
4.4.2. Tek bindirmeli kayma analizleri

Kullanılan VCCT yöntemi, tek yönlü ve dokuma karbon prepreg malzemelerin özelliklerinin ilgili analiz yazılımına tanımlanmasından sonra kırılma tokluğu testi sonucu elde edilen değerlerin yapıştırıcıya tanımlanmasıyla kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında yapılan kırılma tokluğu testleri sadece iki tabaka film yapıştırıcı içeren numuneler üzerinde yapıldığından AR, ER ve FR numunelerinin kırılma tokluğu değerleri elde edilemediği için analizleri gerçekleştirilememiştir. Yapılan tek bindirmeli kayma testlerinin analizle doğrulanması sürecinde, test sırasında hasara uğradığı uzama miktarının analiz programında girdi olarak verilmesiyle okunan kuvvet değerleri kıyaslanıp, testlerin tutarlı olup olmadığına bakılmıştır. Ayrıca analiz programı ile hesaplanmış düzlem içi kayma gerilmeleri (S12) test sonucu elde edilen kayma gerilmeleri kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar her numune için alt başlık olarak sonraki bölümde sunulmaktadır.

BR numunesinin analiz sonuçları

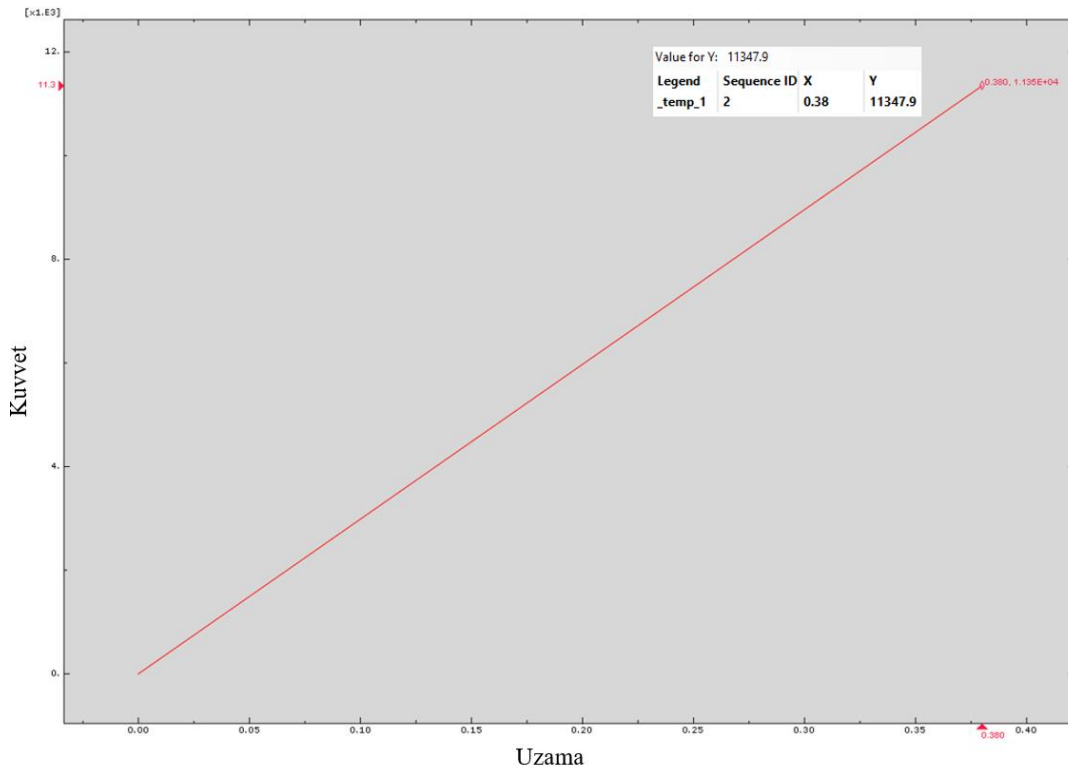


Şekil 4.31. BR numunesinin yük-uzama grafiği

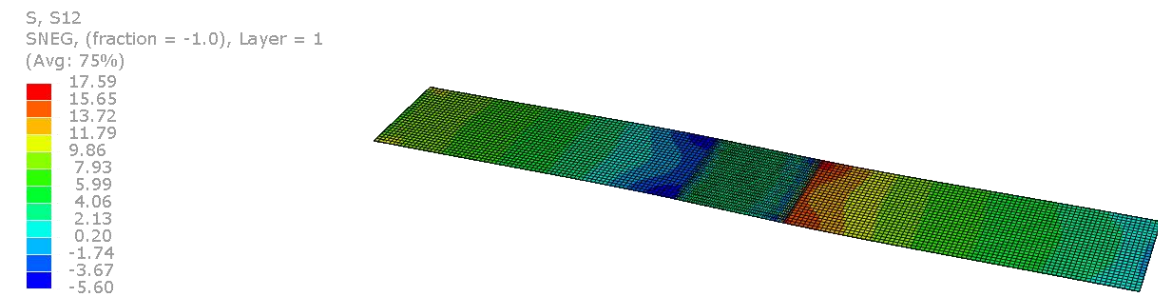


Şekil 4.32. BR numunesinde oluşan kayma gerilmesi

CR numunesinin analiz sonuçları

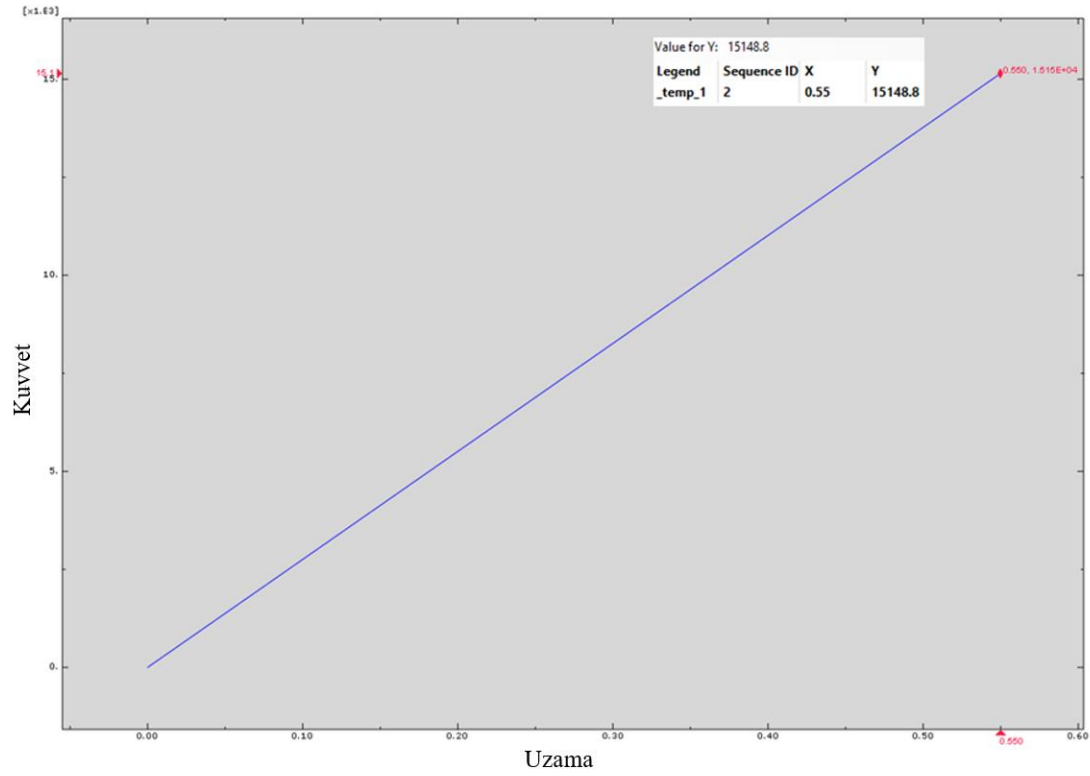


Şekil 4.33. CR numunesinin yük-uzama grafiği



Şekil 4.34. CR numunesinde oluşan kayma gerilmesi

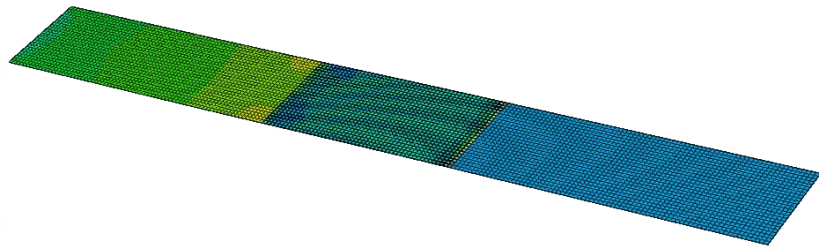
DR numunesinin analiz sonuçları



Şekil 4.35. DR numunesinin yük-uzama grafiği

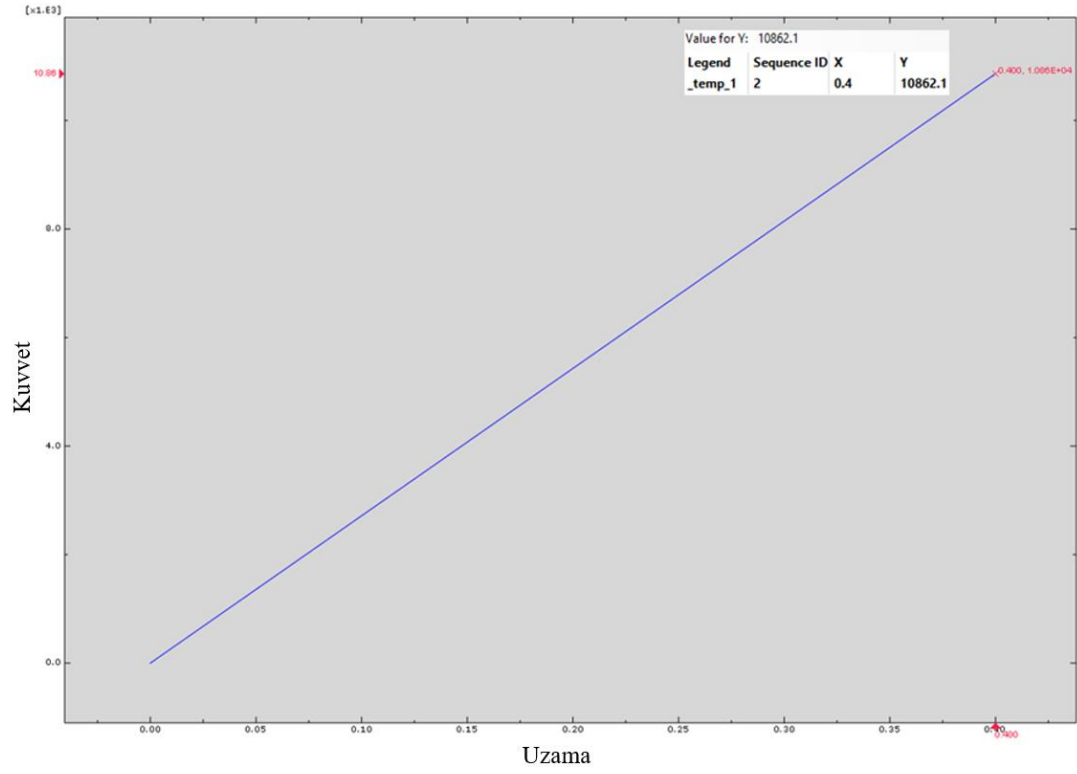
S, S12
SNEG, (fraction = -1.0), Layer = 1
(Avg: 75%)

11.74
10.52
9.31
8.10
6.88
5.67
4.46
3.25
2.03
0.82
-0.39
-1.61
-2.82

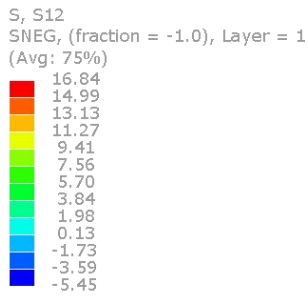


Şekil 4.36. DR numunesinde oluşan kayma gerilmesi

GR numunesinin analiz sonuçları

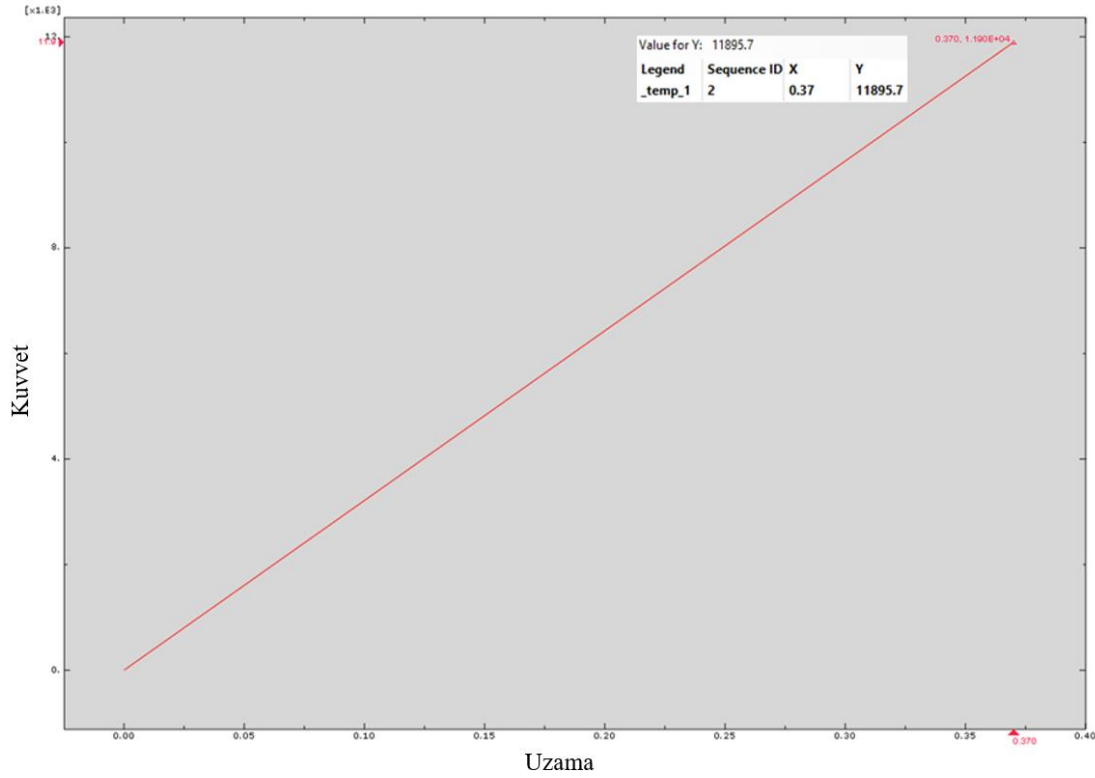


Şekil 4.37. GR numunesinin yük-uzama grafiği

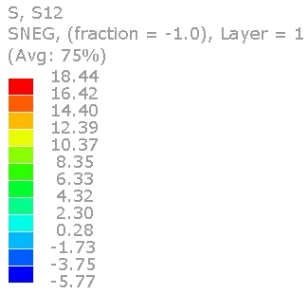


Şekil 4.38. GR numunesinde oluşan kayma gerilmesi

HR numunesinin analiz sonuçları



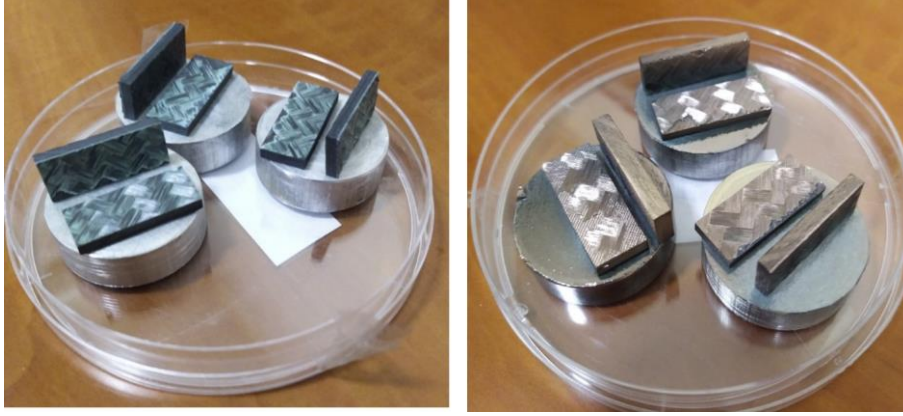
Şekil 4.39. HR numunesinin yük-uzama grafiği



Şekil 4.40. HR numunesinde oluşan kayma gerilmesi

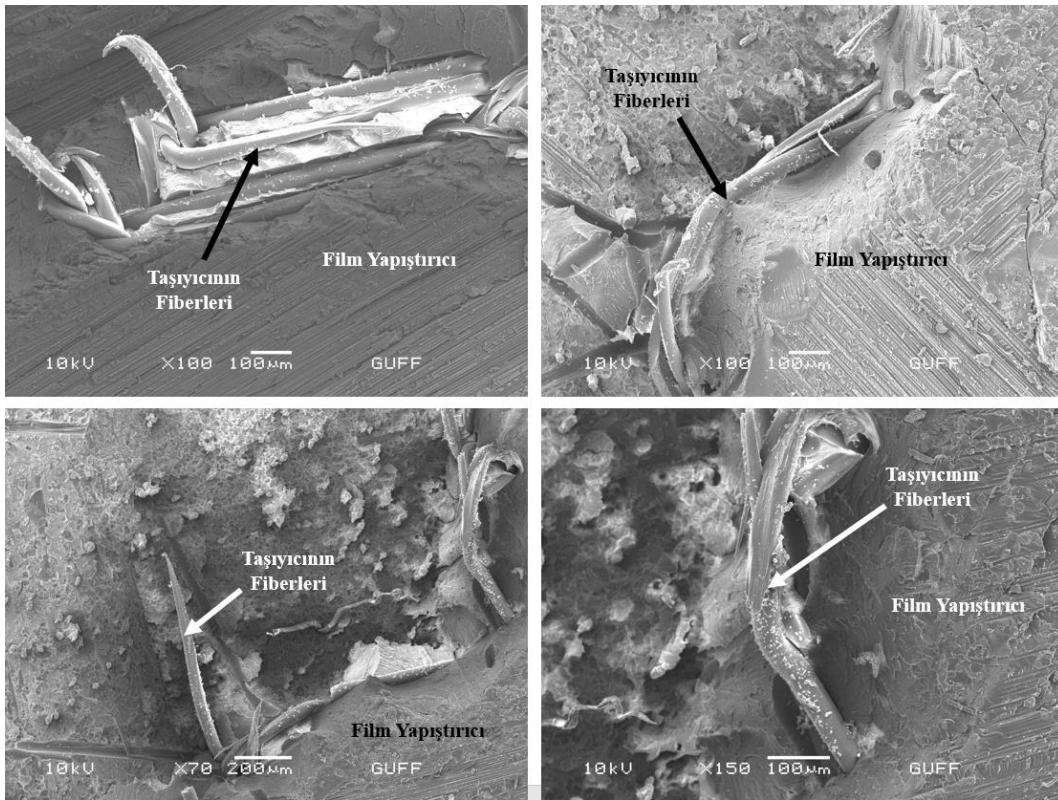
4.4.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri

Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler Jeol JSM-6060LV cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerden yapılan numuneler inceleme yapılabilmesi için gerekli iletkenliği sağlamak adına Polaron SC502 Sputter Coater cihazıyla altın kaplama yapılmıştır. Numunelerin kaplama öncesi ve sonrasındaki durumları Resim 4.24’de görülmektedir.



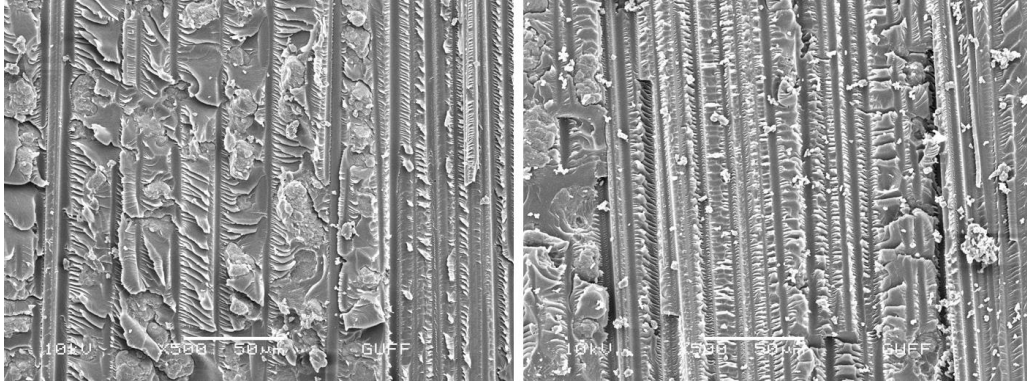
Resim 4.24. SEM numunelerinin altın kaplama öncesi ve sonrası

Film yapıştırıcılar taşıyıcı fiber üzerinde bulunurlar ve bu sayede yapışma yüzeyinde kalınlık kontrolü sağlanmış olur. Şekil 4.41’de taşıyıcıların fiberleri görülmektedir.



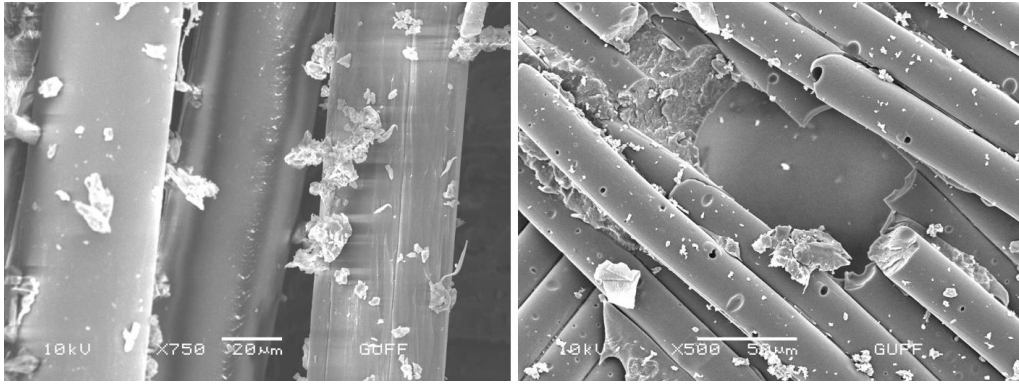
Şekil 4.41. Film yapıştırıcının taşıyıcı fiberleri

Film ve macun yapıştırıcılar ile birleştirilen numunelerin bindirme bölgesinin kırılma sonrası yüzey morfolojisi Şekil 4.42’de görülmektedir. Bu inceleme sonucunda kullanılan film ve macun yapıştırıcılar için benzer hasar modları (adhesiv kayma) olduğu görülmektedir.



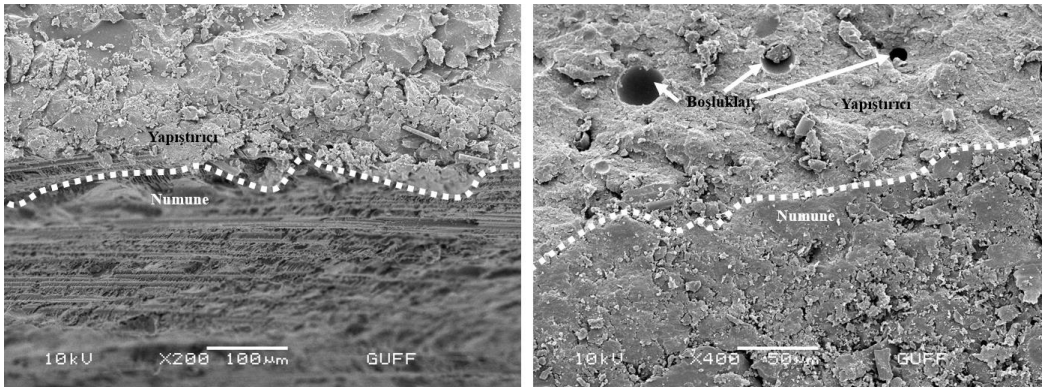
Şekil 4.42. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların kopma sonrası yüzeyleri

Film ve macun yapıştırıcılar ile birleştirilen numunelerin kırılma sonrası fiber yüzeyleri Şekil 4.43’de görülmektedir.



Şekil 4.43. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların kırılma sonrası fiber yüzeyleri

Film yapıştırıcılar numune ile kalınlık kontrolü sağlanmış ve uyumlu bir profil sergilerken macun yapıştırıcılar içerdikleri boşluk nedeniyle yapısal olarak daha düşük dayanımlı ve kalınlık kontrolü sağlanamamış yapıştırıcılar olduğu Şekil 4.44’de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.44. Film (sol) ve macun (sağ) yapıştırıcıların numune ile birleşme yüzeyi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışma sonucunda çıkarılan sonuçlar aşağıda detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

Çizelge 5.1. Oda sıcaklığı/kuru koşulda test edilen B, F ve G ‘nin karşılaştırılması

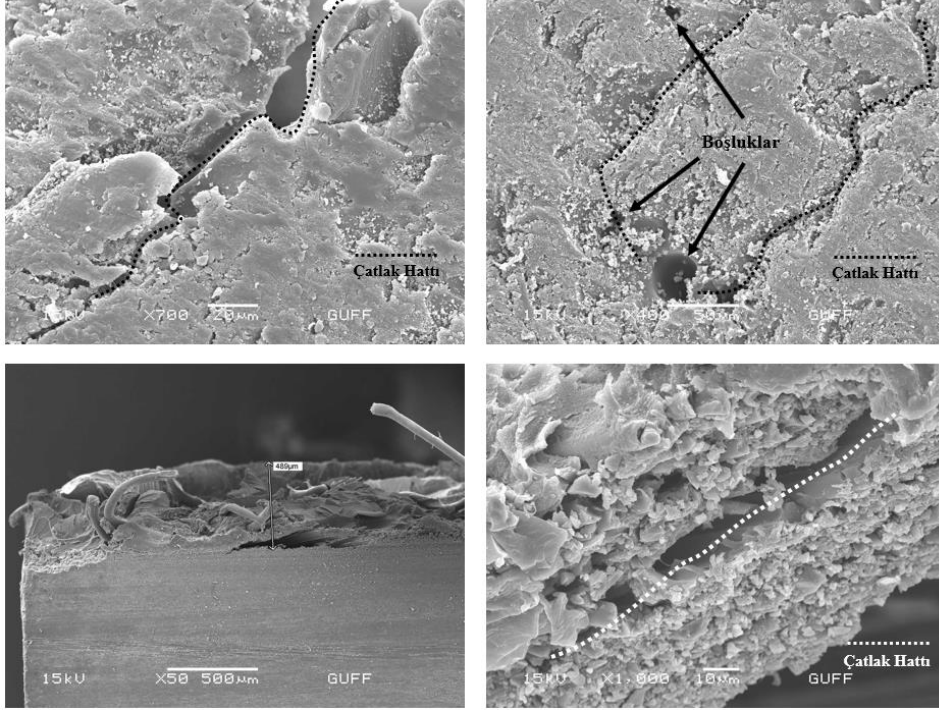
Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
BR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	11220	11408,7	17,28	1,68
FR	Sonradan Yapışma	HYSOL EA 9394 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	4750	-	7,29	-
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05

Çizelge 5.2. Diğer iklim koşullarında test edilen B, F ve G ‘nin karşılaştırılması

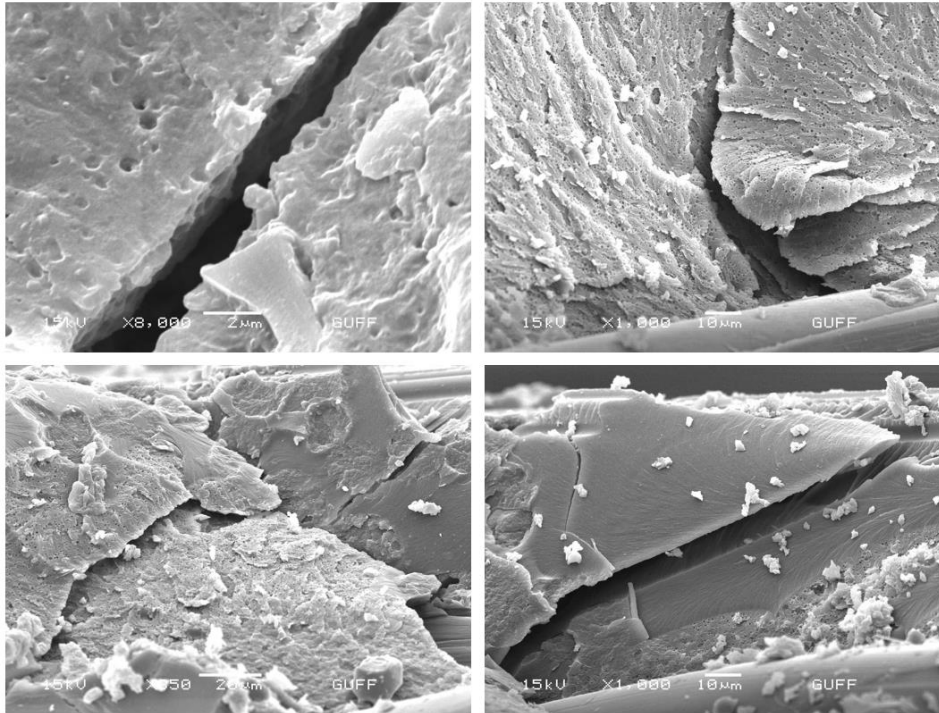
Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Kayma Dayanımı (MPa)
BC	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	8210	12,72
FC	Sonradan Yapışma	HYSOL EA9394 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	5000	7,65
GC	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	7740	11,98
BH	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	8800	13,62
GH	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	7990	12,36

Tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre BC-BR-BH serisi, FC-FR serisi ve GC-GR-GH serisi incelendiğinde, yapılan testler sonucunda çevresel parametrelerin film yapıştırıcı üzerinde olumsuz etkisinin olduğunu, macun yapıştırıcıda ise herhangi bir önemli etkinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sıcak/nemli koşullarda, yapıştırıcının nemden en çok etkilenen kısım olmasından dolayı nemin yapıştırıcıyı genişleterek çatlak miktarını artırması, camsı geçiş sıcaklığını düşürmesi ve sünekliğini artırmasından dolayı matris-fiber ara yüzeyine zarar verebilecek büyüklükte gerilmeler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 5.1’de görüleceği üzere yapıştırıcı olması gereken kalınlık olan yaklaşık 0,4 mm’den daha kalın olduğu ve çatlak/boşluk gibi kusurların olduğu görülmektedir. Soğuk/kuru koşullarda ise

matris-fiber arasındaki termal genleşme katsayısı farklılığına bağlı olarak oluşan termal gerilmelerin ve mikro çatlakların kayma mukavemetine zarar verdiği düşünülmektedir.



Şekil 5.1. Sıcak/nemli koşullara maruz kalmış numunedeki çatlak ve boşluklar



Şekil 5.2. Soğuk/kuru koşullara maruz kalmış numunedeki mikro çatlaklar

Çizelge 5.3. Yapışma yöntemlerine göre A-E, B-G ve C-H ‘nin karşılaştırılması

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
AR	Ortak Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	11430	-	17,69	-
BR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	11220	11408,7	17,28	1,68
CR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11130	11347,9	17,15	1,96
ER	Sonradan Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	9970	-	15,42	-
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05
HR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11190	11859,7	17,34	5,98

Birleştirme yönteminin ele alındığı tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre AR-ER ve BR-GR serileri incelendiğinde ortak yapışma yönteminin sonradan yapışma yönteminden daha yüksek yük taşıma kabiliyeti, dolayısıyla daha yüksek kayma mukavemeti sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yapıştırılan iki numunenin de tek yönlü fiberler olduğu CR-HR serisinde ise sonradan yapışma yönteminin ortak yapışma yöntemi kadar yüksek sonuç verebildiği gözlemlenmiştir.

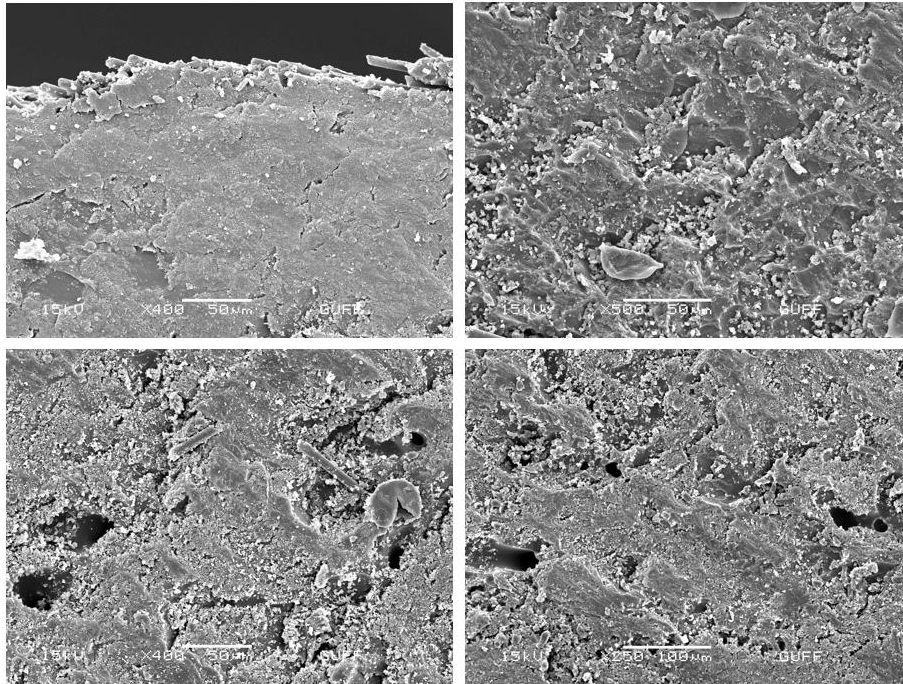
Ortak yapışma yönteminde ara yüzeyin bir tarafı numunelerden biri ile aynı anda kürlenerek tek bir malzeme gibi davranış gösterirken, sonradan yapışma yönteminde ise ara yüzeyin iki tarafı da ikinci kez kürendikleri için taşıma kabiliyetlerini bir miktar kaybederler. Ancak sonradan yapışma prosesi uygun yüzey hazırlama, birleştirilen malzemelerin rijitliklerinin birbirine yakın veya aynı olması ile ortak yapışma yöntemi kadar başarılı sonuçlar verebildiği gözlemlenmiştir.

Yapışma prosesi yüzey aktivasyonu ile doğrudan bağlantılıdır ve yapıştırılan malzemelerin benzer rijitlik değerleri yük akışının yapıştırıcı üzerinde homojen dağılmasını sağladığından dolayı sonradan yapışma yönteminin ortak yapışma yöntemi gibi başarılı sonuçlar verebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çizelge 5.4. Farklı yapıştırıcı kalınlıklarına sahip A-B ve E-G ‘nin karşılaştırılması

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
AR	Ortak Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	11430	-	17,69	-
BR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	11220	11408,7	17,28	1,68
ER	Sonradan Yapışma	FM300K 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	9970	-	15,42	-
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05

Yapıştırıcı kalınlığının incelendiği tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre AR-BR serisi ve ER-GR serisi incelendiğinde ele alınan film yapıştırıcı kalınlıkları göz önünde bulundurularak ortak yapışma yönteminde yapıştırıcı kalınlığının artması bağlantının taşıyabileceği yük miktarına neredeyse hiçbir etkisi olmamışken, sonradan yapışma yönteminde yapıştırıcı kalınlığının artması taşınabilecek yük miktarının bir miktar azalmasına neden olmuştur. Bu sonuç, sonradan yapışma yönteminde yapıştırıcı kalınlığı artışına bağlı olarak yapıştırıcı içindeki boşluk oluşma ihtimalinin artışı ile açıklanırken, ortak yapışma yönteminde ise seçilen iki kalınlık değeri de bu yapıştırıcı için optimum aralıkta olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 5.3. Aynı ölçekte G (üst) ve F (alt) ‘nin kusur miktarının karşılaştırılması

Çizelge 5.5. Farklı dizilime sahip B-C ve G-H serilerinin karşılaştırılması

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
BR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	11220	11408,7	17,28	1,68
CR	Ortak Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11130	11347,9	17,15	1,96
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05
HR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C2 2,46-2,46	25,4	11190	11859,7	17,34	5,98

Yapıştırılan malzemenin diziliminin incelendiği tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre BR-CR serisi ve GR-HR serisi incelendiğinde dizilimin etkisinin hasar modu ile doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Dizilim etkisi eğer birleştirilen malzemelerin kırılması veya tabakalar arası şeklinde olursa görülmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi adhesiv ya da koheziv kayma şeklinde hasar modu oluşursa dizilimin etkisi çok düşüktür.

Ortak yapışma yönteminde dokuma türünün yük taşıma kabiliyetine ve kayma mukavemetine neredeyse hiç etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sonradan yapışma yönteminde ise farklı rijitliğe sahip numunelerin aynı rijitliğe sahip numunelere göre daha düşük yük taşıma kabiliyeti ve daha düşük kayma mukavemetine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ortak yapışma yönteminde yapıştırılan malzemelerden bir tanesi, yapıştırıcı ile birlikte kürlendiği için farklı termal genleşme katsayısına bağlı gerilmeler oluşmamış, buna bağlı olarak kayma mukavemetinin, birleştirilen malzemelerin rijitliği, fiber dokuması veya yönlenmesi değil, yapıştırıcı baskın özelliklere bağlı olarak etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonradan yapışma yönteminde ise yapıştırılacak iki malzeme de daha önce kürlendikleri için farklı termal genleşme katsayılarına bağlı olarak oluşan termal gerilmeler ve farklı rijitliğe sahip numunelerin neden olduğu homojen olmayan yük akışı bağlantının kayma mukavemetini etkilediği görülmüştür.

Çizelge 5.6. Farklı yapıştırıcı türüne sahip F-G serilerinin karşılaştırılması

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
FR	Sonradan Yapışma	HYSOL EA 9394 0,6	C1 2,48-2,46	25,4	4750	-	7,29	-
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05

Yapıştırıcı türünün incelendiği tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre FR-GR serisi incelendiğinde film yapıştırıcı ile yapıştırmanın aynı kalınlığa sahip macun yapıştırıcıya göre daha yüksek yük taşıma kabiliyeti ve daha yüksek kayma mukavemeti sağladığı görülmüştür. Bunun nedeni film yapıştırıcıdaki örgü ya da dokuma taşıyıcılar sayesinde kalınlık kontrolünün macun yapıştırıcıya göre daha iyi yapılması, film yapıştırıcı ile birleştirmenin daha yüksek ve 3 boyutlu basınç ve sıcaklık altında olurken, macun yapıştırıcıda her yönden eşit olmayan basınçlandırma yapılması ve macun yapıştırıcının içerdiği boşlukların yük taşıma kapasitesini düşürmesidir.

Çizelge 5.7. Farklı bindirme uzunluğuna sahip D-G serilerinin karşılaştırılması

Numune İsmi	Birleştirme Yöntemi	Yapıştırıcı Türü ve Kalınlığı (mm)	Dizilim ve Numune Kalınlığı (mm)	Bindirme Uzunluğu (mm)	Okunan Ortalama Yük(N) (Test)	Okunan Yük(N) (Analiz)	Kayma Dayanımı (MPa)	Fark (%)
DR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	50,8	14800	15148,8	11,48	2,35
GR	Sonradan Yapışma	FM300K 0,4	C1 2,48-2,46	25,4	10340	10862,1	16,02	5,05

Bindirme uzunluğunun incelendiği tek bindirmeli kayma testi sonuçlarına göre DR-GR serisi incelendiğinde bindirme uzunluğunun artmasının yüzey alanını artırdığı için yük taşıma kabiliyetini artırırken, kayma mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Bunun nedeni yapışma yüzeyinin artarken yapışmadan kalan kısımların olmasından dolayı efektif taşıma yüzey alanı azalması ve buna bağlı olarak yük taşıma kabiliyeti düşmesidir.

Kompozit malzemeler için yapışma bağlantıları çalışacak tasarımcı, araştırmacı ve bilim insanları ele alınan parametreler başta olmak üzere kullanım alanlarına bağlı olarak birçok parametreyi göz önünde bulundurması gerekmektedir. Bağlantının daha fazla yük

taşıyabilmesi ve daha yüksek mukavemetli olması bu parametrelerin anlaşılmasına bağlıdır. Böylelikle mekanik birleştirme yöntemlerine göre birçok faydası olan yapıştırma ile birleştirmenin dezavantajları ortadan kaldırılabilir ve havacılık sektöründe önemli olan daha hafif ve daha dayanıklı yapılar tasarlanabilir. Bu alanda yapılacak yeni çalışmalar ortak kür yöntemine, farklı yapıştırıcı kalınlıklarına, farklı yüzey hazırlama yöntemlerine, farklı dizilimlere ve farklı karakterdeki yapıştırıcılar kullanarak yapılan çalışmayı genişletmesi kompozit malzemelerin yapıştırılmasındaki bilinmezliklerin aydınlatılmasında çok önemlidir.

KAYNAKLAR

1. Dorworth, L.C. and Dillingham, G. (2017, March). *Fundamentals of adhesive bonding of composite materials*. Paper presented at the Aerodef Manufacturing Symposium, Fort Worth, TX.
2. İnternet: Adhesive Bonding of Composites. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fcompositesuk.co.uk%2Fsistem%2Ffiles%2Fdocuments%2FAdhesive%2520bonding%2520of%2520composites_0.pdf&date=2019-03-03, Son Erişim Tarihi: 03.03.2019.
3. Baker, A.A. and Jones, R. (Editors). (1988). *Bonded repair of aircraft structures*, Victoria: Martinus Nijhoff Publishers, 9-11.
4. Wickmann, S., Senol, O., Schmidt-Freytag, U. and Ballot, G. (2013). *Henkel Aerospace-Film Adhesive*. Paper presented at the Henkel Presentation, Düsseldorf, Germany.
5. Flinn, B.D., Clark, B.K., Satterwhite, J. and Voast, P.J.V. (2007). *Influence of peel ply type on adhesive bonding of composites*. Paper presented at Society of Advancement of Materials and Process Engineering (SAMPE), Baltimore, MD.
6. Song, M.G., Kweon, J.H., Choi, J.H., Byun, J.H., Song, M.H., Shin, S.J. and Lee, T.J. (2009). Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints. *Composite Structures*, 92, 2194-2202.
7. Elaldi, F., Lee, S. and Scott, R.F. (1995). Manufacture of composite panels with J-shaped stiffeners. *Materials and Manufacturing Process*, 10, 27-36.
8. Ye, Y., Zhu, W., Jiang, J., Xu, Q. and Ke, Y. (2019). Computational modelling of postbuckling behaviour of composite T-stiffened panels with different bonding methods. *Composites:Part B*, 166, 247-256.
9. Kim, G-H., Choi, J-H. and Kweon, J-H. (2010). Manufacture and performance evaluation of the composite hat-stiffened panel. *Composite Structures*, 92, 2276-2284.
10. Leone, C. and Genna, S. (2018). Effects of surface laser treatment on direct co-bonding strength of CFRP laminates. *Composite Structures*, 194, 240-251.
11. Fischer, F., Kreling, S., Jäschke, P., Fraunhofer, M., Kracht, D. and Dilger, K. (2012). Laser surface pre-treatment of CFRP for adhesive bonding in consideration of the absorption behaviour. *The Journal of Adhesion*, 88(4-6), 350-363.
12. Zhan, X., Li, Y., Gao, C., Wang, H. and Yang, Y. (2018). Effect of infrared laser surface treatment on the microstructure and properties of adhesively CFRP bonded joints. *Optics and Laser Technology*, 106, 398-409.
13. Encinas, N., Oakley, B.R., Belcher, M.A., Blohowiak, K.Y., Dillingham, R.G., Abenojar, J. and Martínez, M.A. (2014). Surface modification of aircraft used composites for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50, 157-163.

14. Da Silva, L.F.M., Carbas, R.J.C., Critchlow, G.W., Figueiredo, M.A.V. and Brown, K. (2009). Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 621-632.
15. Lee, H.K., Pyo, S.H. and Kim, B.R. (2009). On joint strengths, peel stresses and failure modes in adhesively bonded double-strap and supported single-lap GFRP joints. *Composite Structures*, 87, 44-54.
16. Tang, J.H., Sridhar, I. and Srikanth, N. (2013). Static and fatigue failure analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints. *Composites Science and Technology*, 86, 18-25.
17. Liao, L., Huang, C. and Sawa, T. (2013). Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures*, 50, 4333-4340.
18. Park, J.H., Choi, J.H. and Kweon, J.H. (2010). Evaluating the strengths of thick aluminum-to-aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses. *Composite Structures*, 92, 2226-2235.
19. Hazimeh, R., Challita, G., Khalil, K. and Ortman, R. (2015). Experimental investigation of the influence of substrates' fibers orientations on the impact response of composite double-lap joints. *Composite Structures*, 134, 82-89.
20. Ozel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydin, M.D. and Temiz, S. (2014). A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Composites: Part B*, 62, 167-174.
21. Matthews, F.L. and Tester, T.T., (1985). The influence of stacking sequence on the strength of bonded CFRP single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 5, 13-18.
22. Meneghetti, G., Quaresimin, M. and Ricotta, M. (2010). Influence of the interface ply orientation on the fatigue behaviour of bonded joints in composite material. *International Journal of Fatigue*, 32, 82-93.
23. Li, J., Yan, Y., Zhang, T. and Liang, Z. (2015). Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57, 95-104.
24. Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M. and Antunes, F. (2011). Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 193-201.
25. Gultekin, K., Akpınar, S. and Ozel, A. (2014). The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: Experimental and numerical analysis. *Composites: Part B*, 60, 736-745.
26. Neto, J.A.B.P., Campilho, R.D.S.G. and da Silva, L.F.M. (2012). Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 96-101.

27. Budhe, S., Banea, M.D., de Barros, S. and da Silva, L.F.M. (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, 30-42.
28. Budhe, S., Rodríguez-Bellido, A., Renart, J., Mayugo, J.A. and Costa, J. (2014). Influence of pre-bond moisture in the adherents on the fracture toughness of bonded joints for composite repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 49, 80-89.
29. Markatos, D.N., Tserpes, K.I., Rau, E., Markus, S., Ehrhart, B. and Pantelakis, Sp. (2013). The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use. *Composites: Part B*, 45, 556-564.
30. Markatos, D.N., Tserpes, K.I., Rau, E., Brune, K. and Pantelakis, Sp. (2014). Degradation of mode-I fracture toughness of CFRP bonded joints due to release agent and moisture pre-bond contamination. *The Journal of Adhesion*, 90, 156-173.
31. Mubashar, A., Ashcroft, I., Critchlow, GW. and Crocombe, AD. (2011). A method of predicting the stresses in the adhesive joints after cycling moisture conditioning. *The Journal of Adhesion*, 87, 926-50.
32. Sciolti, MS., Frigione, M. and Aiello, MA. (2010). Wet lay-up manufactured FRPs for concrete and masonry repair: influence of water on the properties of composites and on their epoxy components. *Journal of Composites for Construction*, 14, 823-833.
33. Mohan, J., Ivankovic, A. and Murphy, N. (2014). Mode I fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51, 13-22.
34. Cooper, V., Ivankovic, A., Karac, A., McAuliffe, D. and Murphy, N. (2012). Effects of bond gap thickness on the fracture nano-toughened epoxy adhesive joints. *Polymer*, 53, 5540-5553.
35. Cao, S., Wu, Z. and Wang, X. (2009). Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures. *Journal of Composite Material*, 43, 315-330.
36. Hollaway, L.C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*, 24, 2419-2445.
37. Oliver, M.S. and Johnson, W.S. (2009). Effect of temperature on mode I interlaminar fracture if IM7/PETI-5 and IM7/977-2 laminates. *Journal of Composite Materials*, 43, 1213-1219.
38. Davidson, B.D., Kumar, M. and Soffa, M.A. (2009). Influence of mode ratio and hygrothermal condition on the delamination toughness of a thermoplastic particulate interlayered carbon/epoxy composite. *Composites: Part A*, 40, 67-69.

39. Coronado, P., Argüelles, A., Viña, J., Mollón, V. and Viña, I. (2012). Influence of temperature on a carbon-fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode-I delamination. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 2934-2940.
40. Palmieri, F.L., Belcher, M.A., Wohl, C.J., Blohowiak, K.Y. and Connel, J.W. (2016). Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 95-101.
41. Shufeng, L., Xiaoquan, C., Qian, Z., Jie, Z., Jianwen, B. and Xin, G. (2016). An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates. *Composites: Part B*, 91, 431-40.
42. Zhang, Y., Vassilopoulos, A.P. and Keller, T. (2010). Effects of low and high temperatures on tensile behaviour of adhesively-bonded GFRP joints. *Composite Structures*, 92, 1631-1639.
43. Park, Y.B., Song, M.G., Kim, J.J., Kweon, J.H. and Choi, J.H. (2009). Strength of carbon/epoxy composite single-lap joints in various environmental conditions. *Composite Structures*, 92, 2173-2180.
44. Segovia, F., Ferrer, C., Salvador, M.D. and Amigo, V. (2001). Influence of processing variables on mechanical characteristics of sunlight aged polyester-glass fibre composites. *Polymer Degradation and Stability*, 71, 179-184.
45. Startsev, O.V., Krotov, A.S. and Startseva, L.T. (1998). Interlayer shear strength of polymer composite materials during long term climatic ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 63, 183-186.
46. Mo, Y., Ge, D. and He, B. (2016). Experiment and optimization of the hat-stringer-stiffened composite panels under axial compression. *Composites: Part B*, 84, 285-293.
47. Huang, C.K. and Hsu, C.Y. (2005). Structural integrity of co-cured composite panels. *Materials and Manufacturing Process*, 20, 739-746.
48. Pevzner, P., Abramovich, H. and Weller, T. (2008). Calculation of the collapse load of an axially compressed laminated composite stringer-stiffened curved panel- An engineering approach. *Composite Structures*, 83, 341-353.
49. Jin, B.O., Li, X., Mier, R., Pun, A., Joshi, S. and Nutt, S. (2015). Parametric modeling, higher order FEA and experimental investigation of hat-stiffened composite panels. *Composite Structures*, 128, 207-220.
50. Guo, M-W., Harik, I.E. and Ren, W-X. (2002). Buckling behaviour of stiffened laminated plates. *International Journal of Solids and Structures*, 39, 3039-3055.
51. Petersen, E. and Hühne, C. (2016). Potential of cross section varying Ω stringer made of carbon fibre reinforced plastics. *Thin-Walled Structures*, 103, 253-262.
52. Huang, C.K. (2003). Study on co-cured composite panels with blade-shaped stiffeners. *Composites: Part A*, 34, 403-410.

53. Jain, H.K. and Upadhyay, A. (2010). Buckling behaviour of blade-,angle-,T- and hat-stiffened FRP panels subjected to in-plane shear. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 3614-3623.
54. Rahimi, G.H., Zandi, M. and Rasouli, S.F. (2013). Analysis of the effect of stiffener profile on buckling strength in composite isogrid stiffened shell under axial loading. *Aerospace Science and Technology*, 24, 198-203.
55. Elaldi, F. (2010). Structural efficiency and post-buckling strength of J and hat-stiffened composite panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 1590-1594.
56. Kong, C-W., Lee, I-C., Kim, C-G. and Hong, C-S. (1998). Postbuckling and failure of stiffened composite panels under axial compression. *Composite Structures*, 42, 13-21.
57. SudhirSastry, Y.B., Budarapu, P.R., Madhavi, N. and Krishna, Y. (2015). Buckling analysis of thin wall stiffened composite panels. *Computational Materials Science*, 96, 459-471.
58. Chen, N-Z. and Soares, C.G. (2007). Progressive failure analysis for prediction of post-buckling compressive strength of laminated composite plates and stiffened panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26, 1021-1042.
59. Frostig, Y., Sion, G., Segal, A., Sheinman, I. and Weller, T. (1991). Postbuckling behaviour of laminated composite stiffeners and stiffened panels under cyclic loading. *Journal of Aircraft*, 28, 471-480.
60. Zhu, S., Yan, J., Chen, Z., Tong, M. and Wang, Y. (2015). Effect of the stiffener stiffness on the buckling and post-buckling behaviour of stiffened composite panels- Experimental investigation. *Composite Structures*, 120, 334-345.
61. Mittelstedt, C. and Beerhorst, M. (2009). Closed-form buckling analysis of compressively loaded composite plates braced by omega-stringers. *Composite Structures*, 88, 424-435.
62. Elaldi, F. and Colak, L. (2009). Buckling and post-buckling behaviour of compression loaded composite panels with hat stiffeners. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28, 2501-2509.
63. ASTM D5868-01 (Reapproved 2014). *Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*, American Society for Testing and Materials.
64. ASTM D5528 – 01 (Reapproved 2007). *Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, American Society for Testing and Materials.
65. ASTM D7905/D7905M -14. *Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, American Society for Testing and Materials.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : İRİŞ, Mehmet Erdem
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 07.11.1993, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (553) 419 20 19
 E-mail : erdemiris@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2016
Lise	Gazi Şahin Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Türk Havacılık ve Uzay Sanayi	Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Iris, M.E. and Salamci, E. (2019). Review of parameters affecting the bonding quality of composite joints. *International Porous and Powder Materials*, 4, 122-127.

Hobiler

Basketbol oynamak, Gitar Çalmak



GAZİ GELECEKTİR..