
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KATMAN İÇİ GEÇİŞLİ KARMA KOMPOZİTLERİN BURKULMA VE DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İsmail Yunus KAHRAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

İsmail Yunus KAHRAMAN

19/07/2024

KATMAN İÇİ GEÇİŞLİ KARMA KOMPOZİTLERİN BURKULMA VE DARBE DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İsmail Yunus KAHRAMAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Fiber takviyeli karma kompozitlerin kullanım alanları her geçen gün artmakta ve çeşitli elyaf malzemelerinin üstün özelliklerini nihai kompozit malzemeye yansıtabilmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada cam ve karbon elyaflar arasında katman içi geçiş bölgesine sahip karma kompozitlerin burkulma ve charpy darbe davranışları incelenmiştir. Katman içi geçiş bölgesi sayesinde kompozitin bir ucu sadece karbon diğer ucu ise sadece cam elyaftan oluşmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen burkulma ve charpy darbe testleri ile katman içi geçiş bölgesinin kompozite olan etkileri saf karbon elyaftan ve saf cam elyaftan oluşan kompozitler ile kıyaslanmıştır. 3 farklı tipte katman içi geçişli karma kompozit ile saf karbon ve saf cam kompozitler epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Su jeti kullanılarak kesilen numuneler test boyutlarına getirilmiştir. Burkulma testlerinde saf karbon elyaf numune, charpy darbe testlerinde ise saf cam elyaf numune en iyi performansı göstermiştir. Katman içi geçişli numuneler burkulma testlerinde saf cam elyaf numuneye yakın performans göstermiştir. Charpy darbe testlerinde katman içi geçişli numuneler ile saf karbon numuneler karışık olarak sıralanmıştır. Her iki test için de katmanlar arası temas yüzeyi sayısı arttıkça iyileşme görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan katman içi geçiş tipleri için dış katmanlarda karbon elyaf tercih edilmesi hem burkulma hem de darbe testlerinde iyileşmeye sebep olmuştur. Taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen analizlerde charpy darbe testi sonuçlarına etki eden faktörler yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Karma Kompozit, Burkulma, Darbe, Charpy, Katman içi
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Çağrı TÜZEMEN

INVESTIGATION OF BUCKLING AND IMPACT BEHAVIORS OF INTRAPLY HYBRID COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

İsmail Yunus KAHRAMAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

The applications of fiber-reinforced hybrid composites are continuously expanding, and numerous studies are being conducted to transfer the superior properties of various fiber materials to the final product. In this study, the buckling and charpy impact behaviors of hybrid composites with an intraply transition zone between glass and carbon fibers were investigated. Thanks to the intraply transition zone, one end of the composite is pure carbon fiber while the other end is pure glass fiber. The effects of intraply transition zone for hybrid composites compared with pure carbon fiber and pure glass fiber specimens. Three different types of intraply hybrid composites, along with pure carbon and pure glass composites, were produced using the vacuum-assisted resin transfer moulding method with epoxy resin. Samples cut using a water jet were brought to test dimensions. In the buckling tests, the pure carbon fiber sample exhibited the best performance, while in the charpy impact tests, the pure glass fiber sample showed the best results. The intraply hybrid samples displayed performance close to pure glass fiber samples in terms of buckling. In the Charpy impact tests, the intra-layer transition samples and the pure carbon samples were ranked mixedly. For both tests, an increase in the number of contact surfaces between layers led to improvements. In the types of intraply transitions used in this study, the preference for carbon fiber in the outer layers resulted in improvements in both buckling and impact tests. Factors affecting the results of the charpy impact test were analyzed and interpreted using a scanning electron microscope.

Science Code : 91417
Key Words : Hybrid Composite, Buckling, Impact, Charpy, Intraply
Page Number : 73
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI
Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Mehmet Çağrı TÜZEMEN

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalışmam süresince desteklerini hiç eksik etmeyen, bilgi ve birikimleriyle beni yönlendiren değerli danışmanlarım Doç. Dr. Elmas SALAMCI'ya ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Çağrı TÜZEMEN'e teşekkürlerimi sunarım. Tez süresince yürütülen çalışmalarda çalışma ortamı sağlayan ve imkanlarından faydalandığım Gazi Üniversitesi'ne ve Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş'ye teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam süresince desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KOMPOZİT MALZEMELER 3

2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler 3

2.2. Tabakalı Kompozitler 3

2.3. Fiber Takviyeli Kompozitler 4

2.3.1. Cam fiber 6

2.3.2. Karbon fiber 7

2.3.3. Aramid fiber 9

2.3.4. Doğal fiber 10

2.4. Matris Malzemeleri 10

2.4.1. Epoksi reçineler 11

2.5. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri 12

2.5.1. Elle serme yöntemi 13

2.5.2. Püskürtme yöntemi 14

2.5.3. Prepreg yöntemi 14

Sayfa

2.5.4. Filament sarma yöntemi 15
2.5.5. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi 16
2.5.6. Vakum infüzyon yöntemi (VİY) 17
3. LİTERATÜR TARAMASI 19
3.1. Fiber Takviyeli Karma Kompozitler 19
3.2. Fiber Takviyeli Kompozitlerde Katman İçi Geçiş 23
3.3. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Burkulması 25
3.4. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Darbe Davranışları 27
4. MATERYAL VE YÖNTEM 31
4.1. Materyaller ve Numune Tipleri 31
4.2. Numune Üretimi 33
4.3. Burkulma Testi 39
4.4. Charpy Darbe Testi 41
4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 44
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 45
5.1. Burkulma Testi 45
5.2. Charpy Darbe Testi 50
5.3. Kırılma Yüzeyi Analizi 60
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 65
KAYNAKLAR 67
ÖZGEÇMİŞ 73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Elyaf Özellikleri..... 31

Çizelge 4.2. Reçine Özellikleri 31

Çizelge 4.3. Burkulma testi numune tipleri 32

Çizelge 4.4. Charpy darbe testi numune tipleri..... 33

Çizelge 5.1. Burkulma testi sonuçları 45

Çizelge 5.2. Charpy darbe testi sonuçları 50

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Parçacık takviyeli (a), fiber takviyeli (b) ve tabakalı (c) kompozit 3

Şekil 2.2. Farklı oryantasyonlarda elyaflar bulunduran fiber takviyeli kompozit 5

Şekil 2.3. Cam fiber üretimi 7

Şekil 2.4. Karbon fiberlerin kristal yapısı 8

Şekil 2.5. Karbon fiber ısıl işlem adımları 8

Şekil 2.6. Termoset ve termoplastik reçinelerin iç yapısı 11

Şekil 2.7. Bisfenol-A diglisidil eter'in kimyasal yapısı 12

Şekil 2.8. Elle serme yöntemi 13

Şekil 2.9. Püskürtme yöntemi 14

Şekil 2.10. Prepreg yönteminin otoklavda uygulanması 15

Şekil 2.11. Filament sarma yöntem 16

Şekil 2.12. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi…..... 16

Şekil 2.13. Vakum infüzyon yöntemi 17

Şekil 3.1. Farklı karbon-cam oranlarına sahip karma kompozitlerin Gerilme-Uzama-eğrisindeki davranış farklılığı (MC: Saf karbon, MG: Saf Cam, HA-HB-HC-HD-HE-HF-HG-HH: sırayla 1-1, 1-1, 2-1, 3-1, 5-1, 2-1, 3-1, 5-1-oranlarında karbon-cam katmana sahip karma kompozit) 21

Şekil 3.2. Tek yönlü karbon ve cam fiberler kullanılarak üretilen karma kompozit-numunelere ait çekme (a) ve basma (b) yükü altında yüzde uzama-miktarları. (R1:Sadece Karbon, R2: Sadece Cam, H1-H2-H3: Sırasıyla-1-1, 2-2, 3-3 Karbon-Cam çözgü lifi yan yana getirilerek üretilen intraply-kompozit, I1: Intraply kompozitler ile aynı oranda karbon-cam oranına-sahip katman içi kompozit) 22

Şekil 3.3. Katman içi geçişe sahip karma kompozit numunelerin (a) gerilme-uzama-(b) çekme mukavemeti-elastik modül grafikleri (COM:Katman içi geçiş-içermeyen numune, LID0-LID10-LID20-LID30-LID40: Sırasıyla katman-içi geçiş bölgeleri arasında 0-10-20-30-40 milimetre uzaklık bulunduran-numuneler) 23

Şekil 3.4. Zikzak (solda) ve merdiven (sağda) türündeki geçiş bölgeleri 25

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.5. Farklı ortam koşullarına maruz kalan karbon, aramid ve cam elyaftan-oluşan karma kompozitin burkulma yükü-deplasman grafiği 26

Şekil 3.6. Charpy darbe testi uygulanmış fiber takviyeli kompozitlere ait absorbe-edilen enerji(J) ve darbe dayanımı(kJ/m2) değerleri (C: Sadece karbon - A: Sadece aramid - A/C: Katman içi aramid ve karbon - HF: Katmanlar-arası aramid ve karbon fiber içeren kompozit) 28

Şekil 3.7. Fiber takviyeli kompozit numunelere ait elyaf oryantasyonuna göre-charpy kırılma enerjisi – çekme dayanımı değişim grafiği..... 29

Şekil 4.1. Burkulma testi numune boyutları 32

Şekil 4.2. Charpy darbe testi numune boyutları..... 33

Şekil 4.3. Kompozit plaka ve çıkartılacak test numuneleri 34

Şekil 4.4. Burkulma testi serbest cisim diyagramı..... 39

Şekil 4.5. Charpy darbe testi şematiği ……...……. 42

Şekil 5.1. Burkulma testlerine ait sonuçların grafik yardımı ile gösterimi..... 46

Şekil 5.2. KB-4 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği 47

Şekil 5.3. KB-5 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği 47

Şekil 5.4. KB-2 Numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği..... 48

Şekil 5.5. KB-1 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği 49

Şekil 5.6. Numune tiplerine göre ortalama absorbe edilen enerji değerleri..... 51

Şekil 5.7. KB-4 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği..... 52

Şekil 5.8. KB-5 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği..... 54

Şekil 5.9. KC-1 ve KC-3 numunelerine ait katman temas yüzeylerinin gösterilmesi 55

Şekil 5.10. KB-3 numunelerine ait absorbe edilen enerji – deplasman değerleri..... 56

Şekil 5.11. KC-3 numune tipi için hasara uğramış kısımların gösterimi..... 56

Şekil 5.12. KC-1 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği..... 58

Şekil 5.13. KC-2 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği..... 59

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Cam Elyaf 6

Resim 2.2. Karbon fiber 9

Resim 3.1. Formula-1 aracına ait karma kompozit 19

Resim 4.1. Vakum infüzyon tezgâhı, ayırıcı film ve sızdırmazlık bandı 34

Resim 4.2. Elyaf serim işlemi 35

Resim 4.3. Soyma kumaşı ve akış filesinin serilmesi 35

Resim 4.4. Spiral hortumların yerleştirilmesi ve vakum torbasının serilmesi 36

Resim 4.5. Reçine karışımının vakum altında bekletilmesi 37

Resim 4.6. Reçinenin sisteme verilmesi 38

Resim 4.7. Kesime hazır haldeki kompozit plaka 38

Resim 4.8. Kompozit plakaların su jeti yardımı ile kesilmesi 39

Resim 4.9. Burkulma testlerinde kullanılan çekme-basma test cihazı 40

Resim 4.10. Burkulma testlerinde kullanılan 5 farklı tip numune 40

Resim 4.11. Burkulma testi 41

Resim 4.12. Charpy darbe testlerinde kullanılan 5 farklı tip numune 42

Resim 4.13. Charpy darbe testi düzeneği 43

Resim 4.14. Charpy darbe testi düzeneğine yerleştirilmiş numune 43

Resim 4.15. Hasar mekanizmalarının incelenmesinde kullanılan SEM cihazı 44

Resim 5.1. Charpy testi numuneleri a) darbe b) arka yüzey görüntüsü 52

Resim 5.2. KC-4 numunesine ait makro görüntü 53

Resim 5.3. KC-4 numunesine ait mikroskop görüntüsü 53

Resim 5.4. KC-5 numunesine ait makro görüntü 54

Resim 5.5. KC-5 numunesine ait mikroskop görüntüsü 55

Resim **Sayfa**

Resim 5.6. KC-3 numunesine ait makro görüntü 57

Resim 5.7. KC-3 numunesine ait mikroskop görüntüsü 57

Resim 5.8. KC-1 numunesine ait makro görüntü 58

Resim 5.9. KC-1 numunesine ait mikroskop görüntüsü 58

Resim 5.10. KC-2 numunesine ait makro görüntü 59

Resim 5.11. KC-2 numunesine ait mikroskop görüntüsü 60

Resim 5.12. KC-1 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri..... 61

Resim 5.13. KC-2 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri..... 61

Resim 5.14. KC-3 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri..... 62

Resim 5.15. KC-4 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri..... 63

Resim 5.16. KC-5 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri..... 64

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
mm	Milimetre
%	Yüzde
°C	Derece Santigrat
°	Derece
N	Newton
kN	Kilonewton
J	Joule
Pa	Pascal
cps	Santipoise
F	Kuvvet
dk	Dakika
ms	Milisaniye

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
PAN	Poliakrilonitril
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
VİY	Vakum infüzyon yöntemi

1. GİRİŞ

Mühendislik gereksinimlerine cevap verebilecek malzemelerin geliştirilmesine olan ihtiyaç her geçen gün artarak sürmektedir. Bu ihtiyaca cevap verebilmek için birçok yöntem deneyen araştırmacılar birden fazla malzemenin birbirleri içerisinde çözünmeden birleştirilmesi yoluyla kompozit malzemeleri elde etmiştir. Bu yeni malzeme türünün istenen optimum özellikleri sağlamada ki başarısı nedeniyle kompozit malzemelere olan ilgi her geçen gün artmıştır. Günümüzde kompozit malzemeler çelikten sonra endüstride kullanılan en yaygın ikinci malzeme sınıfı olarak geçmekte ve 100 trilyon dolardan fazla piyasa değerine sahip olduğu tahmin edilmektedir [1].

Genel itibariyle matris ve takviye elemanlarından oluşan kompozitler; metaller, seramikler ve polimerler gibi birçok malzeme türüne uygulanmış ve uygulanmaya devam etmektedir. Matris malzemesi ile belirli oranlarda birleştirilen takviye elemanları sayesinde mekanik özellikler, darbe dayanımı, korozyon ve aşınma direnci gibi birçok konuda ana bileşenlerden daha üstün kompozit malzemeler elde edilmiştir.

Kompozit malzemelerin elde edilmesinde birçok zorlukla karşılaşılmıştır. Bunun sebebi hem matris ve takviye elemanlarının üretiminde sorunlar yaşanması hem de bu bileşenleri bir araya getirirken ek sorunlar yaşanıyor olmasıdır. Takviyelerin matris içerisinde istenen oranlarda ve homojen dağıtılamaması veya matrisin takviye elemanlarını yeterince ıslatamaması gibi sorunlarla uğraşılmıştır. Kompozit malzeme nihayet elde edildiğinde ise uygulamada kullanılabilmeleri için ihtiyaç duyulan mekanik özelliklerin elde edilmesi, farklı ortam ve çalışma şartlarına karşı tepkileri, üretim maliyetlerinin düşürülmesi gibi birçok farklı alanda çalışmalar yapılmıştır. Bunların yanında farklı kullanım tarzları ve tasarım çözümleri ile kompozitlerden maksimum düzeyde fayda sağlanmaya çalışılmıştır.

Kompozit malzemeler arasında en yaygın kullanılan çeşitlerden olan fiber takviyeli kompozitler farklı türlerdeki fiberlerin bir arada kullanılması ile karma kompozit haline getirilmektedir. Bu sayede optimum özelliklere sahip nihai kompozit malzeme oluşmaktadır. Özellikle cam elyaf ve karbon elyafların bir arada kullanılması sayesinde mukavemet ve darbe dayanımı konularında üstün kompozit malzemeler elde edilebilmektedir. Karbon elyafların sahip olduğu yüksek özgül dayanım özelliği tercih

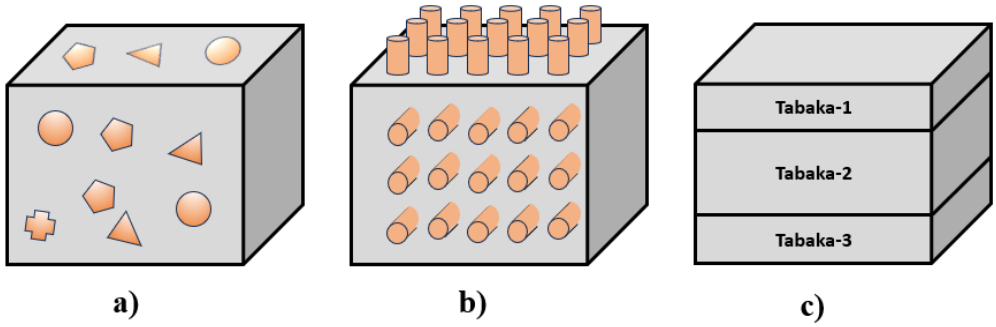
nedeni iken cam elyafın sunduğu yüksek hasar dayanımı ve ucuzluk bu iki elyaf türünün bir arada kullanılmasını teşvik etmiştir [2]. Yüksek miktarlardaki yüklere dayanabilen aynı zamanda darbelere karşı dayanıklı hafif yapısalların üretilebilmesine olanak sağlayan bu fiber takviyeli karma kompozit türü özellikle havacılık sektöründe vazgeçilmez hale gelmiştir [3].

Fiber takviyeli karma kompozit malzemelerin yapısal parçalarda kullanılabilmesi için mühendislerin ihtiyaç duyduğu bilgiler arasında şüphesiz en dikkat çekeni mekanik özelliklerdir. Fiber takviyeli kompozitlerin geleneksel malzemelerin aksine anizotropik özellikte olması mühendislik hesaplamalarında kullanılabilmelerini zorlaştırmaktadır. Geçmişte mekanik özelliklerin belirlenmesi konusunda birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen gelişen malzeme teknolojileri, yeni üretim yöntemleri ve yenilikçi tasarım yaklaşımları ile birlikte bu ihtiyaç tekrar tekrar ortaya çıkmakta ve araştırmacıları meşgul etmektedir. Çekme, basma ve eğme gibi yükleme koşulları altında çalışan yapısallar aynı zamanda çevreden gelebilecek hasarlara karşı da dayanıklı olmalıdır.

Bu tez çalışmasında yaygın kullanıma sahip fiber takviyeli karma kompozit yapılar incelenmiştir. Karma kompoziti oluşturan cam ve karbon elyaflar arasında oluşturulan farklı tipteki katman içi geçiş bölgelerinin burkulma ve charpy darbe dayanımları araştırılmıştır. Bu sayede karma kompozitlerin yenilikçi bir tasarım ile kullanıldığında sağlayacakları fayda ortaya çıkartılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

En az iki malzemenin birbirleri içerisinde çözünmeden belirli oranlarda birleştirilmesi ile elde edilen heterojen karışımlara kompozit malzeme adı verilmektedir. Kompozit malzemenin üstün özellikleri genelde takviye elemanından gelmekte, matris malzemesi ise yapıyı bir arada tutmaktadır. Kompozitleri takviye tiplerine göre en genel anlamda 3 gruba ayırabiliriz. Bunlar; parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı kompozitler ve fiber takviyeli kompozitlerdir.



Şekil 2.1. Parçacık takviyeli (a), fiber takviyeli (b) ve tabakalı (c) kompozit

2.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit türünde matris malzemesi içerisine parçacık haline getirilmiş takviye elemanları eklenmiştir. Metal ve seramik matris malzemeleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matrisli parçacık takviyeli kompozitlerde genel amaç yüksek sıcaklık performansı ve tribolojik geliştirmeler iken seramik matrislilerde matrisin kırılganlığını iyileştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler, fiber takviyelilerin aksine izotropik özellikler göstermeye yatkındır. Parçacık takviyelerin şekilleri, hacimsel oranları ve homojen dağıtılması gibi birçok farkı parametre bu kompozit türünün özelliklerini etkilemektedir [4, 5].

2.2. Tabakalı Kompozitler

Farklı özelliklere sahip katmanların üst üste istiflenmesi ile elde edilen kompozit türüdür. Bu kompozit türünde farklı özellikteki malzemeler birbirleri içerisine karıştırılmaz. Polimerlerin de sıklıkla kullanıldığı bu kompozit türünde elektromanyetik kalkanlama,

optik özellikler, enerji sönümleme ve biyotıp gibi alanlarda araştırmalar sürmektedir. Bu tipteki kompozitlerin istenen hiyerarşide istiflenmesi sayesinde katmanların spesifik özellikleri optimum şekilde nihai malzemeye kazandırılabilmektedir. Katmanlar arasındaki temas yüzeyleri ve üretim yöntemleri önemli araştırma alanlarıdır [6].

2.3. Fiber Takviyeli Kompozitler

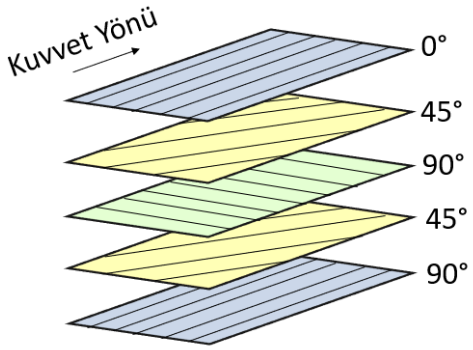
Kısa veya uzun fiber takviyelerin matris içerisine yerleştirilmesi ile elde edilen kompozit türüdür. Takviye fiberleri mukavemet ve rijitlik gibi özellikleri belirleyen bileşendir. Genellikle cam, karbon, aramid veya doğal fiberler kullanılır. Uygulamanın gereksinimine göre uygun takviye seçimi yapılabilir. Matris malzemesinin temel görevi ise takviye fiberlerini bir arada tutmak, fiberler arasında kayma gerilmesi transferine olanak sağlamak ve kompozit malzemenin burkulmasına engel olmaktır. Yaygın olarak kullanılan matris malzemelerine epoksiler ve polyester gibi polimerler örnek verilebileceği gibi metallerin veya seramiklerin matris olarak kullanıldığı durumlarda mevcuttur. Matris malzemesi nihai kompozitin mekanik, termal ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir.

Günümüzde yapısal uygulamalarda en yaygın kullanılan fiber takviyeli kompozit türü sürekli fiberlere sahip polimer matrisli kompozitlerdir. Cam, karbon veya aramid fiberler kullanılarak dokunan elyaflar sonrasında matris malzemesi ile birleştirilir. Kompozit yapıyı oluşturmak için birden fazla elyaf katmanı üst üste eklenir. Bu sayede kompozit yapının yük taşıma kapasitesi, darbe dayanımı ve çevre şartlarına uyumu iyileştirilmeye çalışılır.

Elyaf dokuma işlemi sırasında fiber yönleri istenen şekilde seçile bilinir. Tüm fiberlerin tek yönde yerleştirildiği elyaflar olduğu gibi 0° ve 90° yönlerinde eşit sayılarda fiber bulunduran elyaflar da mevcuttur. Fiberler uzunluk doğrultusunda çok yüksek değerlerde yük taşıyabildiğinden tasarımcılar fiber yönlenmelerini kendi uygulamalarına uygun şekilde düzenleye bilirler. Bu sayede kompozit yapıdan maksimum seviyede fayda sağlanabilmesi mümkün olmaktadır. Fiber yönlenmelerinin eşit olmayan bir şekilde seçilmesinin getirmiş olduğu dezavantaj ise yapının anizotropik hale gelmesidir.

Fiber takviyeli kompozitlerde fiberlerin yönü yük taşıma kapasitesini ve yük altında kompozitin davranışını etkilemektedir. Kuvvetin uygulandığı yön genelde 0° yönü olarak isimlendirilmektedir. Gerçek hayatta yapısal parçalara sadece tek yönde eksenel kuvvetler

uygulanmadığından diğer yönlerde de kompozitin dayanıklı olması gerekmektedir. Bu durum 45° ve 90° gibi yönlerde de fiberler serilmesini gerektirmiştir. 90° yönünde yerleştirilen fiberler enine yönde gelen kuvvetlerin taşınmasını sağlar. 45° yönündeki fiberler ise kesme kuvvetlerinin karşılanmasına yardımcı olur. Kompozit malzemeyi oluşturan elyaf katmanlarının hangi sıra ile dizildiği veya kaç adet elyaf katmanı kullanıldığı kompozitin çekme dayanımından darbe dayanımına kadar birçok farklı parametreyi etkilemektedir [7].



Şekil 2.2. Farklı oryantasyonlarda elyaflar bulunduran fiber takviyeli kompozit

Farklı malzemeler kullanılarak üretilen fiberlerin güçlü özellikleri de değişmektedir. Örneğin karbon fiberler yüksek dayanım özelliğinde iken düşük darbe dayanımına sahiptir. Cam fiberleri ise karbonlara oranla daha düşük dayanıma sahip iken darbe dayanımları daha iyidir. Aramid fiberleri sağlamış oldukları üstün balistik özellikler ile bilinmektedir. Araştırmacılar farklı fiber türlerini bir arada kullanarak nihai üründe optimum özellikleri elde etmeyi hedeflemiş ve bu konuda birçok çalışma yapmıştır. Meydana gelen kompozit türü fiber takviyeli karma kompozit olarak tanımlanmıştır [8].

Matris malzemesi fiberler kadar yüksek dayanım değerine sahip değildir. Temel amacı fiberleri bir arada tutmak ve yük aktarımını sağlamaktır. Matris malzemesinin sahip olduğu yüksek uzama miktarı sayesinde kuvvet altında çalışan fiberler arasında yük aktarımı sağlanabilmektedir.

2.3.1. Cam fiber

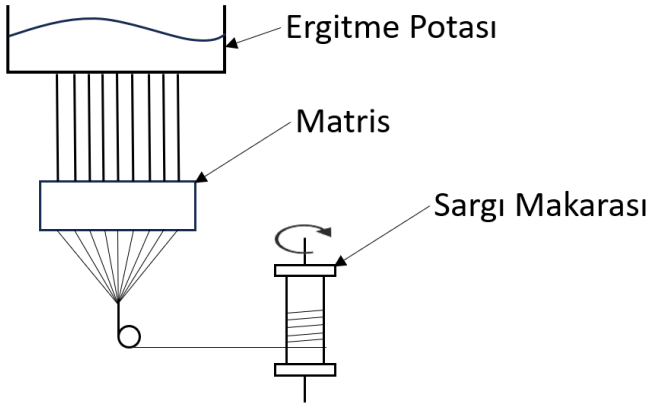
Temel bileşeni silikon dioksit olan cam fiberler polimer matrisli fiber takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye türüdür. Cam fiber türlerinden en yaygın olanları E-Cam, S-Cam ve C-cam olarak isimlendirilir. İlk olarak yalıtım malzemesi olarak üretilen E-Cam fiberler en ucuz tipteki takviye türüdür. Yapısal uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilen S-Cam en yüksek çekme dayanımına sahip cam türüdür. Özellikle havacılık sektöründe kullanılmak için geliştirilen bu türün üretiminin daha zor olması nedeni ile daha yüksek bir fiyata vardır. Yüksek kimyasal direncine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise C-Cam'ı tercih edilmektedir. Cam fiberlerin polimer matrisler ile iyi bir bağ kurabilmesi için uygun bir kaplama ile yüzeylerinin kaplanması gerekmektedir. Farklı yüzey kaplama uygulamalarına göre cam fiberlerin kullanım ömürleri değişkenlik gösterebilmektedir [9, 10].



Resim 2.1. Cam Elyaf

Cam fiberlerin kullanım alanlarına bakıldığında otomotiv, havacılık, denizcilik ve spor ekipmanları uygulamalarında sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Maliyet açısından çok uygun olan bu fiber türünün elle serme, reçine transfer kalıplama, otoklav ve püskürtme gibi birçok farklı üretim yöntemi ile de kullanılabiliyor olması endüstrideki kullanım oranını arttırmaktadır. Cam fiberler kullanılarak dokunan elyaflar sayesinde üretilen komponentlerin hafif ve ucuz olmasının yanında yüksek dayanım değerlerine sahip olması cam fiberlerin her geçen gün daha rekabetçi bir malzeme haline gelmesine neden olmaktadır.

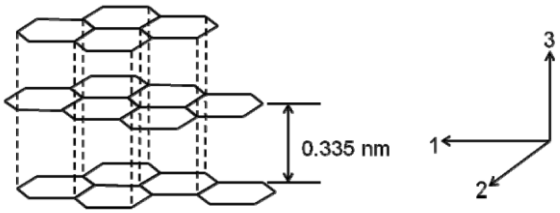
Farklı uygulamalarda kullanılmak üzere kısa(kırpılmış) veya uzun(sürekli) tipte üretilen cam fiberler bulunmaktadır. Kırpılmış fiberler yaygın olarak yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Püskürtme metodunda kullanıma uygun olan bu tipteki cam fiberlerin çap ve uzunlukları farklı değerlerde olmaktadır. Sürekli fiber olarak üretilen cam fiberler daha düşük çaplarda üretilebilmeleri ve nihai kompozit malzemenin çok daha yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmesi nedeni ile tercih edilmektedir. Ana bileşen olan silikon dioksit ile birlikte bir potada ergitilen ilave oksit türleri farklı türlerdeki cam elyafların üretimine olanak tanır. Elde edilen ara mamul matristen çekilerek makaralara sarılır. Bu sayede amorf yapıda ve izotropik özellikte dairesel fiberler elde edilir. Cam fiberlerin çapları 9 ila 25 μm arasında değişebilmektedir [9, 10].



Şekil 2.3. Cam fiber üretimi

2.3.2. Karbon fiber

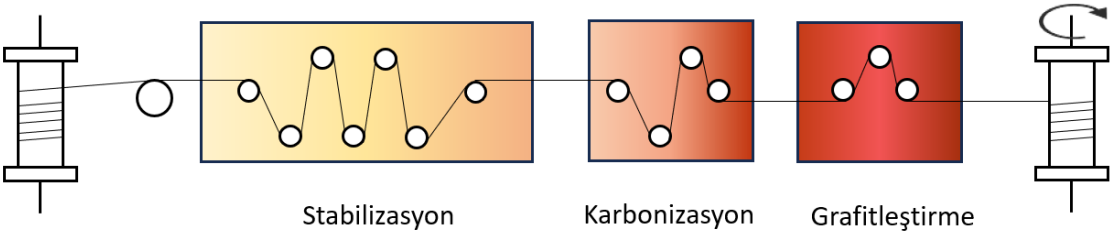
İçeriğinde ağırlık olarak en az %92 oranda karbon atomu bulunduran fiberlere karbon fiber adı verilmektedir. Karbonun atomik düzeydeki kristal yapısı sayesinde düzlemsel yönde yüksek dayanım göstermesi mümkündür. Uygun üretim teknikleri kullanılarak fiber doğrultusu ile kristal düzlemlerin doğrultuları aynı yöne denk getirilir. Bu sayede yüksek dayanım gösteren fiberler elde edilir. Kristal düzlemler arasında zayıf Van der Waals bağları bulunduğundan bu yöndeki dayanım daha düşüktür. Bu nedenle karbon fiberler anizotrop özellik göstermektedir [11, 12].



Şekil 2.4. Karbon fiberlerin kristal yapısı [11]

Karbon fiber üretimi için farklı hammaddeler kullanılabilir. PAN (Poliakrilonitril), zift veya selülozik malzemeler (pamuk, keten vb.) kullanılarak üretim yapmak mümkündür. Bu tipler arasında en yaygın kullanılanı PAN temelli üretimdir. PAN temelli karbonun elde edilmesi için birçok farklı yöntem denenmiş ve farklı parametreler değiştirilerek sonuçlar gözlenmiştir. Bu yöntemlerin ortak özellikleri oksidasyon ve karbonizasyon adımlarını içermeleridir.

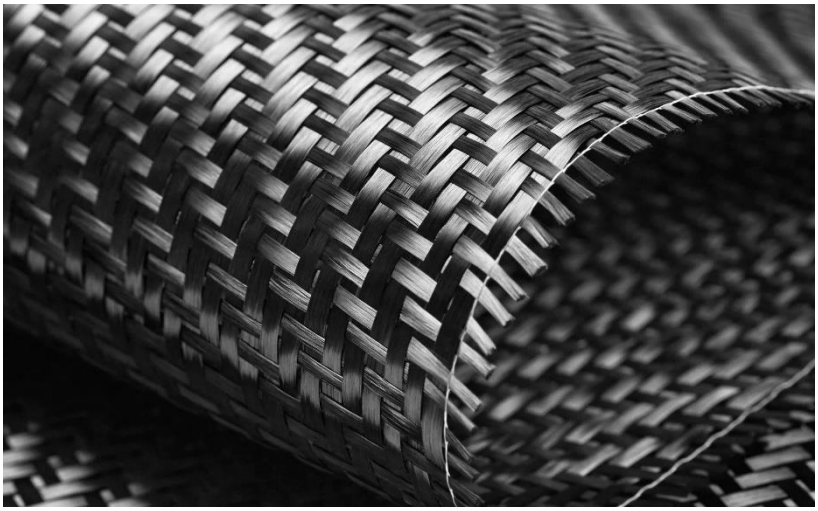
İçeriğinde %60 oranında karbon bulunduran PAN liflerinin 250 °C sıcaklıkta hava ortamında stabilizasyon adımına sokulması ile polimer zincirleri arasında çapraz bağlar oluşturulur. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda ergimenin önüne geçilir. Ardından karbon dışındaki atomlardan kurtulmak için inert gaz atmosferi altında karbonizasyon(piroliz) adımına geçilir. Bu işlem 1000°C ila 1500 °C sıcaklıklar arasında gerçekleştirilir. Bu işlem sonunda elde edilen fiber içeriğinde %90 dan fazla karbon atomu mevcuttur ve karbon fiber olarak adlandırılır. Karbon fiberlerin içeriğinde karbon oranını daha fazla arttırmak için grafitleştirme adımı uygulanabilir. Bu adımda 1700 °C üstüne ısıtılan fiberin içeriğindeki karbon dışı atomların neredeyse tamamı uzaklaştırılır ve %99 oranında karbondan oluşan fiber elde edilir. İşlem sıcaklığı arttıkça kristal yapıdaki dizilim düzlemselliği artar ve yapı içeriğindeki hatalar minimum seviyeye iner. Grafitleştirme işlemi sonunda fiberin elastik modülü artar ancak çekme dayanımı bir miktar düşer [11, 12].



Şekil 2.5. Karbon fiber ısıl işlem adımları

Karbon fiber üretimi tamamlanmadan önceki son adım yüzey işlemidir. Matris malzemesi ile karbon yüzeyinin yapışmasını sağlamak için bu adım olmazsa olmazdır. Yüzey işlemi sırasında karbon fiber yüzeylerin pürüzlülüğü arttırılabilir veya kimyasal reaksiyonlar sayesinde matris ile yapışma sağlanır [13].

Karbon fiberlerin sunmuş olduğu yüksek özgül dayanım, iyi elektrik ve ısı iletkenliği ile yüksek sıcaklık ve kimyasal direnci bu fiber türünün birçok alanda kullanımını kaçınılmaz kılmıştır. İnşaat sektöründen rüzgâr türbini kanatlarına, sağlık sektöründen otomotive kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe alüminyumun yerini hızla dolduran bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [14, 15].



Resim 2.2. Karbon fiber

2.3.3. Aramid fiber

Darbe dayanımı denildiğinde akla ilk gelen fiber türü aramid fiberlerdir. Tam adı aromatik poliamid olan bu fiber türünün kevlar, nomex, technora gibi üyeleri bulunmaktadır. Dupont firmasına ait bir ticari ürün olan kevlar aralarında en yaygın olarak kullanılan türdür. Poliamid zincirlerinin fiber uzunluğu yönünde yönlenmesi sonucu yüksek çekme dayanım değerlerine ulaşabilen bu fiber türü aynı zamanda sunmuş olduğu düşük yoğunluk ve yüksek tokluk özellikleri sayesinde havacılık, uzay ve zırh uygulamalarında tercih edilmektedir [16].

Yüksek sıcaklıklara da dayanıklı olan aramid fiberlerin dezavantajlarından ilki neme karşı hassas olmalarıdır. Organik bir fiber olması nedeni ile çevre şartlarına karşı uygun şekilde

korunmadığı takdirde çürümesi muhtemeldir. En önemli ikinci dezavantajları ise işlenebilirliğinin zor olmasıdır [16].

2.3.4. Doğal fiber

Çevre dostu malzemelere olan ilginin arttığı günümüzde bambu, muz, keten, pamuk vb. bitkilerden veya yün ve ipek gibi hayvansal ürünler kullanılarak üretilmeye çalışılan fiber türüdür. Geri dönüştürülebilir olmaları ve uygun maliyetleri ile birçok araştırmaya konu olmuşlardır. İnşaat, ulaşım ve bazı savunma sanayii uygulamalarında kullanılmaktadır. Reçineler ile uyumsuzluk, düşük çalışma sıcaklıkları ve çevre şartlarına olan hassasiyetleri dezavantajlarıdır [17, 18].

2.4. Matris Malzemeleri

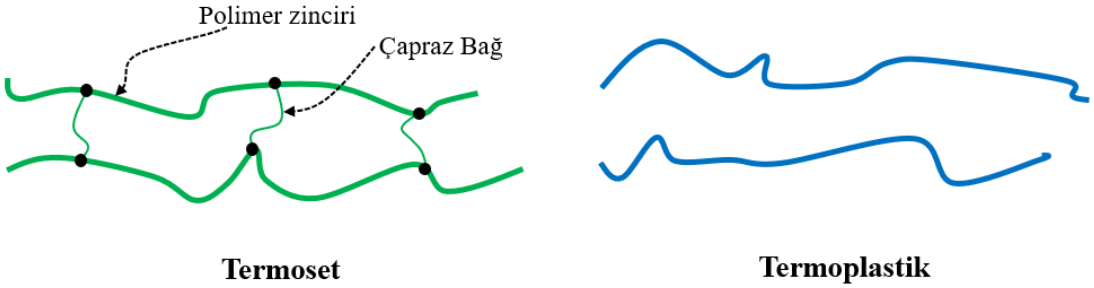
Kompoziti oluşturan temel iki bileşenden biri olan matris malzemeleri fiberleri bir arada tutmak, fiberlerin burkulmasını engellemek, kompozite tokluk kazandırmak ve kayma gerilmelerini transfer etmek gibi görevleri üstlenir. Kompozitin nihai özelliklerini doğrudan etkileyen matrislerin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi devam etmektedir.

Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri genel itibari ile reçine olarak isimlendirilmektedir. Reçinelerin kürlenmesi sırasında kimyasal reaksiyon ile çapraz bağlar oluşuyor ve geri dönüşü olmayan bir şekilde sertleşiyorsa bu reçinelere termoset adı verilmektedir. Termoplastik olarak isimlendirilen ikinci çeşit reçinelerde ise kürlenme sırasında çapraz bağ oluşumu gerçekleşmez. Sıcaklık altında tekrar form verilebilir hale gelen bu tipteki reçinelere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bunun sebebi termosetlerin aksine geri dönüştürülebilir olmalarıdır [19].

Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın reçine tipi termosetlerdir. Polimer zincirleri arasında oluşan bağlar nedeniyle termoplastiklere oranla daha iyi mekanik özelliklere sahip olan termosetlerin aynı zamanda daha kolay proses edilebilir olmaları yaygınlaşmalarına neden olmuştur. En yaygın kullanılan termosetlere polyester, epoksi, fenolik, poliimid ve bismaleimid örnekleri verile bilinir. Uygun maliyeti ve çevre şartlarına dayanıklı olmaları ile öne çıkan polyesterler en yaygın kullanılan termosetlerden biridir. Havacılık ve uzay sektörlerinde yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan

bismaleimidin maliyeti yüksektir. Çapraz bağ yoğunluğu yüksek olan bu reçine türünün dezavantajı kırılgan olmasıdır. Diğer termosetlere istinaden mekanik performansı daha iyi olan epoksiler kolay uygulanabilir olmaları sayesinde özellikle havacılık sektöründe yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [20].

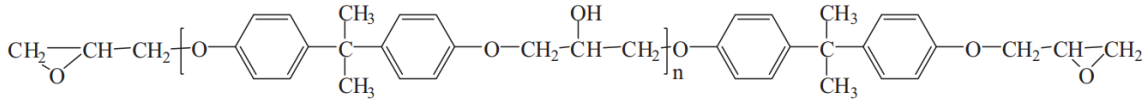
Sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir malzemelere olan ilginin artmasıyla termoplastik reçinelere olan ilgi de artmıştır. Molekül zincirleri arasındaki zayıf bağlar sayesinde sıcaklık etkisi altında tekrar form verilebilir hale gelebilen termoplastikler oda sıcaklığında tekrar sert hale gelir. Bu çevrimin tekrarlanabilir olması sayesinde de tekrar tekrar kullanılmaları mümkün olmaktadır. Bu esnekliğin getirmiş olduğu dezavantaj ise mekanik özelliklerin termosetlere kıyasla daha kötü olmasıdır. Fiber takviyeli kompozitlerde en yaygın kullanılan termoplastiklere örnek olarak polipropilen (PP), poliamit (PA), polietilen (PE) ve polieter eter keton (PEEK) sayılabilir [21].



Şekil 2.6. Termoset ve termoplastik reçinelerin iç yapısı

2.4.1. Epoksi reçineler

Boya, kaplama, yapıştırıcı ve kalıplama gibi birçok alanda kullanılan bu reçine çeşidinin yapı taşlarını iki karbon atomu ve bir oksijen atomundan oluşan epoksid halkaları oluşturur. Epoksi reçinelerin kullanılmaya başlanmasından günümüze kadar üretilen bu reçinelerin büyük bir bölümü bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) kullanılarak sentezlenmiş olsa da farklı yöntemler kullanılarak elde edilmeleri de mümkündür. Üretim sırasında seyrelticiler ve çeşitli katkı maddeleri takviyesi ile farklı özelliklere sahip reçineler elde edilmektedir. Reçine özelliklerine etki eden önemli faktörlerden biri de molekül zincirindeki tekrar eden bileşenlerin sayısıdır [22].



Şekil 2.7. Bisfenol-A diglisidil eter'in kimyasal yapısı [22]

Epoksi reçineler sıcaklık altında kürlenerek nihai özelliklerine kavuşurlar. Reçine bileşenleri doğru oranlarda kullanıldığı takdirde ve uygun şartlarda kürlendiği optimum özelliklere sahip epoksi reçine elde edilmektedir. Örneğin kürlenme işlemi sırasında ısının önerilenden fazla uygulanması sonucunda çapraz bağlar istenen seviyenin üzerinde oluşacaktır. Bu durum reçinenin kırılgan hale gelmesine ve işlevini yerine getirememesine sebep olur. Bu sebepler nedeni ile reçine üreticisinin önerdiği karışım oranları ve kür bilgilerine önem gösterilmelidir.

Kürlenme sırasında gerekli olan çapraz bağ kurma işlemi için çeşitli sertleştiriciler ve kür ajanları kullanılır. Bu ajanlar reaksiyonun başlaması için tetikleyici görevi görebilecekleri gibi hızlandırıcı olarak da davranabilirler. Bu işlemler sırasında polimer zincirinin bir parçası haline gelen ajanlar reçinenin nihai özelliklerine doğrudan etki eder. Bununla birlikte polimer zincirine karışmayan ajanlar da mevcuttur [23].

Epoksi reçinelerin fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en yaygın kullanılan reçine türlerinden olmasına etki eden avantajlara bakıldığında mekanik özelliklerde ki üstünlüğü göze çarpar. Bununla birlikte çevre şartlarına ve kimyasallara yüksek dayanıklılık, uygun çalışma sıcaklıkları diğer avantajları arasında sayılır. Bunların yanında yaygın kullanılan karbon, cam ve aramid gibi fiber çeşitleri ile iyi bir yapışma yüzeyi sağlaması da tercih nedeni olmasını sağlamaktadır.

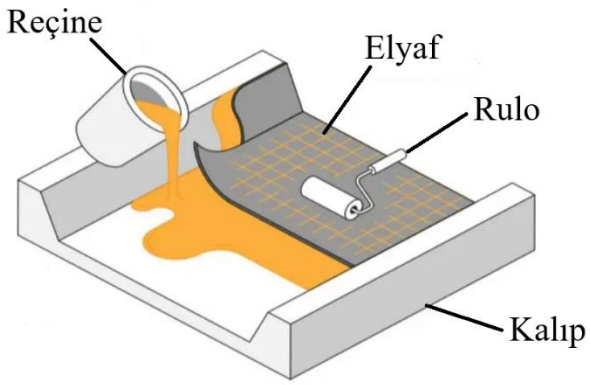
2.5. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Fiber takviyeli kompozitlerin en önemli avantajlarından biri de birçok alternatif üretim yönteminin bulunmasıdır. Fiberlerin ve reçinenin uygun oranlarda bir araya gelmesi ve sonrasında reçine sisteminin kürlenmesini temel alan bu üretim yöntemlerinde kozmetik uygulamalar için kullanılabilen parçalar üretilebileceği gibi uçak gövdelerini oluşturacak kalitede ve mukavemette yapısallar da üretilebilir. Her yöntemin kendine ait avantajları ve dezavantajları olmakla birlikte bu yöntemler günümüzde araştırılmaya ve geliştirilmeye

devam etmektedir. En yaygın kullanılan fiber takviyeli kompozitler hakkında genel bilgiler sonraki bölümlerde incelenmiştir.

2.5.1. Elle serme yöntemi

Kompozit üretim teknikleri arasında işçilik hassasiyeti en yüksek olan ancak ilk yatırım maliyeti açısından oldukça uygun olan kompozit üretim yöntemidir. Kompozit üretimi için kullanılacak kalıba reçinenin yapışmasını önleyici jel sprey sıkılır. Bu sayede kür işlemi tamamlandıktan sonra nihai kompozit malzeme kalıptan kolayca sökülebilir. Kuru elyaflar el ile kalıp içerisine serilir ve uygun miktarda reçine her bir katmana rulo yardımı ile emdirilir. Sonrasında reçinenin vakum, basınç ve sıcaklık gereksinimleri sağlanarak kürlenme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemin avantajı uygun maliyetli olması, kalifiye eleman ihtiyacı olmaması, esnek tasarımlara izin vermesi ve büyük boyutlu parçaların üretilebilir olmasıdır. İşçilik hassasiyetinin yüksek olması, tekrarlanabilirliğinin düşük olması, üretim hızının düşük olması gibi dezavantajları bu yöntemin kullanımını kısıtlamaktadır [24, 25].

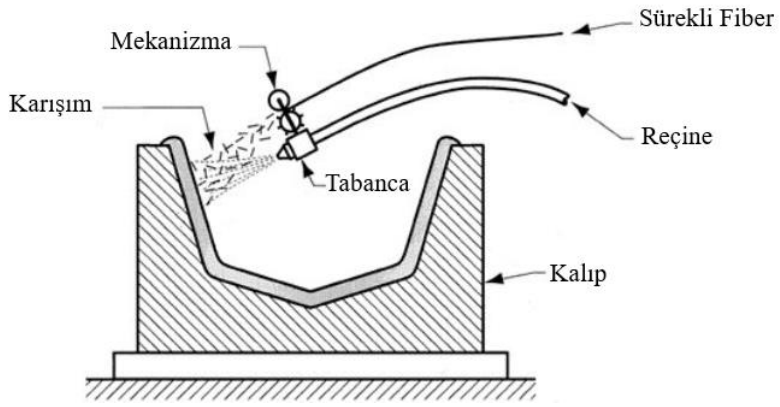


Şekil 2.8. Elle serme yöntemi

Elle serme metodu fiber takviyeli kompozit yapısalların tamir uygulamalarında da kullanılabilir. Örneğin bir uçak gövdesi üzerinde gerçekleştirilecek tamir işlemi için bölgeye uygun boyutlarda yamalar elle serme metodu kullanılarak yapıştırılır. Vakum altında ısı battaniyesi ile kürlenme sonucunda ana kompozit yapının yük taşıma kapasitesi restore edilmeye çalışılır [26].

2.5.2. Püskürtme yöntemi

Kırpılmış fiberlerin matris ile karıştırılarak kalıp üzerine püskürtülmesi esasına dayanan yarı otomatik üretim yöntemidir. Püskürtme tabancasını besleyen sürekli fiber rulosu ve reçine haznesi ile kalıp üzerinde istenen bölgeye istendiği kadar püskürtme sağlanır. Sürekli fiberler püskürtme tabancasındaki mekanizma yardımı ile kırpılır ve reçine ile karıştırılır. Uygulama tekrarı arttırılarak kalınlık kontrolü sağlanır. İşçilik hassasiyeti yüksek olan bu yöntemin en önemli avantajı kompleks geometrilerin ve büyük parçaların üretilebilir olmasıdır. Reçine miktarının fazla olması nihai kompozit malzemenin ağır olmasına neden olabilir. Otomotiv sektöründe ve gemicilik sektöründe basit yapısal uygulamalarda kullanımı yaygındır [27, 28].

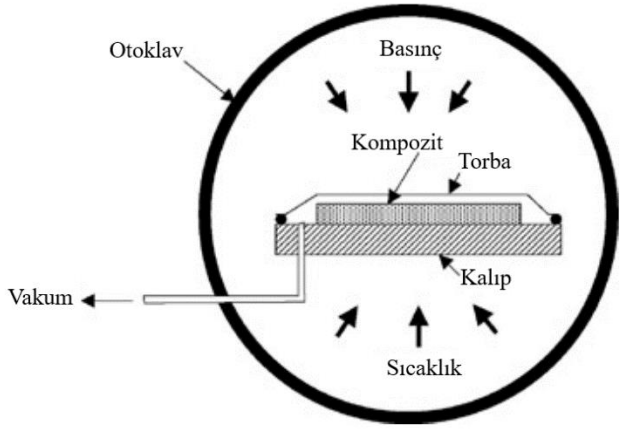


Şekil 2.9. Püskürtme yöntemi

2.5.3. Prepreg yöntemi

Elle serme yöntemine benzer şekilde elyafların kalıp üzerine serildiği yöntemdir. Ancak en önemli fark elyafların serme işleminden önce reçine ile ön emdirme işlemine tabii tutulmuş olmasıdır. Elyaf ve reçine birleşimi kontrollü bir proses olarak üretici firmada gerçekleştirilir. Bu sayede elyaf katmanı içerisindeki fiber ve reçine oranı istenen optimum seviyede tutulabilir. Üretici firmada üretilen prepreg elyafların kompozit üretiminde kullanımına kadar geçen sürede reçinenin kürlenmesini engellemek için prepreg elyaflar soğutucu dolaplarda tutulur. İşçilik hassasiyeti elle yatırma yöntemine göre daha düşük olan bu yöntem ile havacılık sektöründe kullanılabilecek kadar üstün kalite ve güvenirlilik sağlayan komponentler üretilebilir. Özellikle otoklav kullanılarak gerçekleştirilen prepreg

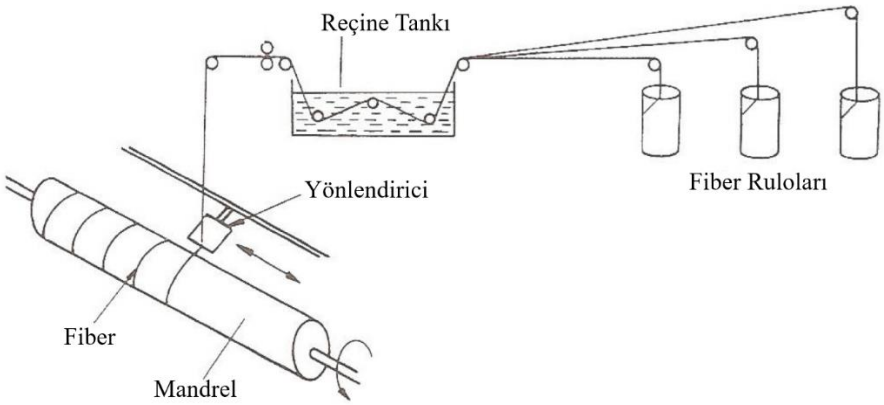
elyaf üretimi ile uçakların kanat ve gövdeleri gibi ana yük taşıyıcı komponentlerinin üretimi gerçekleştirilmektedir. İlk yatırım ve üretim maliyeti açısından diğer teknikler karşısında zayıf kalan bu yöntem ile üretilen kompozitlerin sağladığı üstün mekanik özellikler yöntemin bu dezavantajının görmezden gelinmesine neden olmuştur. Otoklavda kürlenme sürelerinin uzun olması, serim ve torbalama gibi süreçlerin zaman alması bu yöntemi seri üretim için uygun bir yöntem olmaktan uzaklaştırır. Bunun yanında otoklav kapasitesine bağlı olarak birden fazla komponent aynı anda kürlenebilir [29, 30].



Şekil 2.10. Prepreg yönteminin otoklavda uygulanması

2.5.4. Filament sarma yöntemi

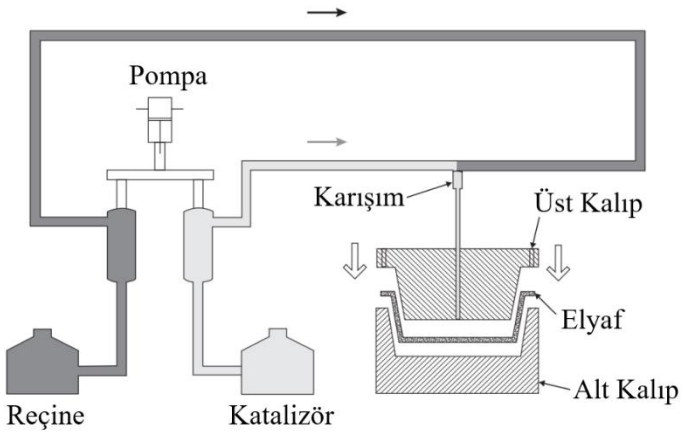
Dairesel parçaların üretiminde kullanılan bu yöntemde sürekli fiberler rulodan çekilerek reçine tankına daldırılır. Sonrasında dönen mandrel üzerine sarılarak kompozit üretimi gerçekleştirilir. Özellikle kompozit boruların üretiminde kullanılan bu yöntemin en önemli dezavantajı geometri kısıtıdır. Bunun yanında kompozitin mandrelden çıkartılması veya sarım sırasında fiber gerginliğinin değişkenlik göstermesi gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Boru, tüp, basınçlı ve basınçsız tank üretiminden helikopter palleri üretimine kadar birçok farklı alanda bu yöntem kullanılabilir [31, 32].



Şekil 2.11. Filament sarma yöntem

2.5.5. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

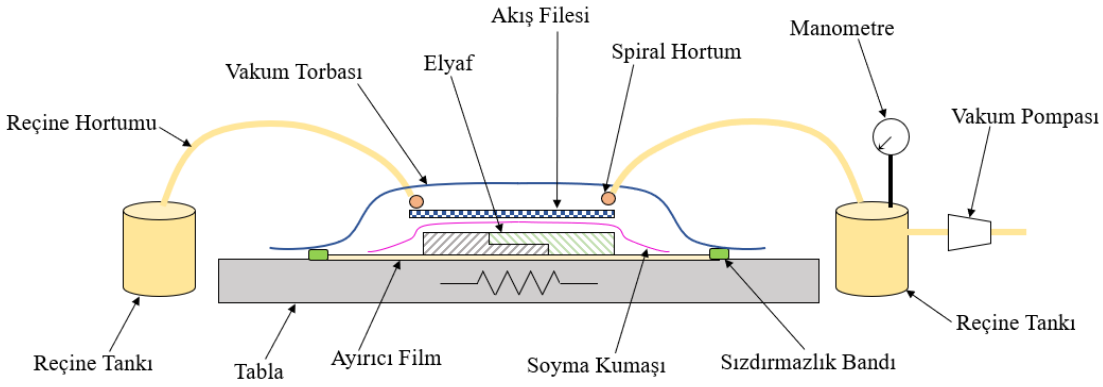
İki parçalı kapalı kalıpların kullanıldığı bu üretim yönteminde ilk olarak kalıp boşluğuna elyaflar yerleştirilir ve ardından kalıplar kapatılır. Sonrasında reçine karışımı elyafların bulunduğu kalıp boşluğuna basınç yardımı ile enjekte edilir. Reçinenin soğuk kalıp duvarlarına çarpıp hızla kürlenmesini engellemek amacıyla kalıp duvarları belirli sıcaklıklara kadar ısıtılabilir. Yöntemin uygulanabilmesi için gereken iki adet kalıp ve basınçlandırma sistemi gibi etmenler maliyet açısından bu üretim yönteminin dezavantajı olarak sayılabilir. Ancak üretimin hızlı olması seri üretim açısından bir avantajdır. Bununla birlikte reçinenin kalıp içerisinde akışını ve eşit ısı dağılımını kontrol etmek zor olabilmektedir. Bu durum nihai kompozitin içerisinde reçine ile ıslatılmamış boşluklar kalmasına ve artık gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır [33, 34].



Şekil 2.12. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) Yöntemi

2.5.6. Vakum infüzyon yöntemi (VİY)

İlk olarak 1980'lerin sonlarında Bill Seemann tarafından kullanılan ve patentlenen (SCRIMP) bu üretim yöntemi bir çeşit reçine transfer kalıplama tekniğidir. Reçine transfer kalıplama ile arasındaki en belirgin iki fark bu yöntemde tek kalıp kullanılması ve reçinenin vakum yardımı ile hareket ettirilmesidir. İsteğe göre ısıtılabilen kalıp üzerine uygun şekilde serilen elyaflar üzerine torbalama işlemi yapılır. Bu sayede reçinenin vakum altında transfer olacağı kapalı bir ortam elde edilir. Reçine akışını desteklemek ve homojen dağıtım yapabilmek için akış filesi kullanılır. Fazlalık reçine vakum pompası ile torba arasına yerleştirilen haznede toplanır [35, 36].



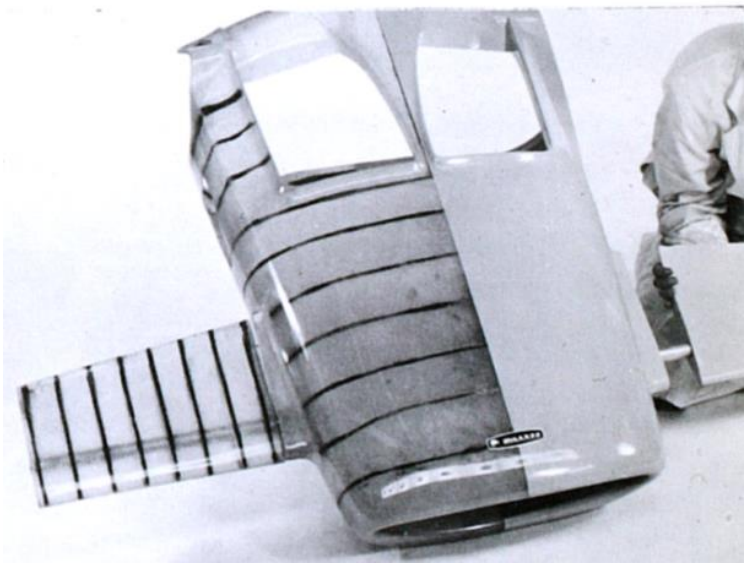
Şekil 2.13. Vakum infüzyon yöntemi

Uygun maliyetler ile üretim yapılmasına olanak sağlayan bu yöntemde işçilik hassasiyeti düşüktür. Bununla beraber nihai kompozit içerisinde düşük miktarlarda boşluk oranı sağlayabilmesi nedeni ile tercih sebebi olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda %65 seviyesine varan fiber hacim oranları raporlanmıştır. Ancak vakum miktarı, kalıp ısısı, elyaf boyutları ve kalınlığı gibi parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde nihai kompozitin içerisinde boşluklar kalabilir ve fiber-reçine oranı istenen seviyeden uzaklaşabilir. Otomotiv ve denizcilik sektöründe sıklıkla kullanılır [35, 36].

3. LİTERATÜR TARAMASI

3.1. Fiber Takviyeli Karma Kompozitler

Fiber malzemelerinin spesifik özelliklerini daha efektif bir şekilde kullanmayı amaçlayan araştırmacılar karma kompozitleri kullanarak optimum özelliklere sahip kompoziti elde etmeye çalışmıştır. Farklı malzemeden elde edilmiş elyafların farklı katmanlarda kullanılması ve çeşitli fiberler kullanılarak dokunan elyafların kullanılması sıklıkla karşılaşılan karma kompozit uygulamalarıdır. Bunun yanında katman içi geçişe sahip karma kompozitler ile ilgili literatürde kısıtlı bilgi mevcuttur. Çalışmaların çoğunluğu kompozitin mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik olmakla birlikte çevre şartlarına uyum gibi konular da araştırılmıştır. Cam ve karbon fiberlerin bir arada kullanıldığı ilk karma kompozit çalışmalarından birinde otomobil komponenti üretimi için sadece cam fiber yerine cam-karbon karma kompozit kullanımı sayesinde 27 kilogram ağırlık azaltılması sağlanmıştır. Bu iyileştirme aerodinamik anlamda bir dezavantaj oluşturmadığı gibi komponentin rijitliğini arttırarak yüksek hızlarda karşılaşılan titreşim problemlerini de ortadan kaldırmıştır [37]. Yalnızca bu örnek bile karma kompozit kullanımının ne kadar büyük bir avantaj sağlayabileceğini ortaya koymuştur.



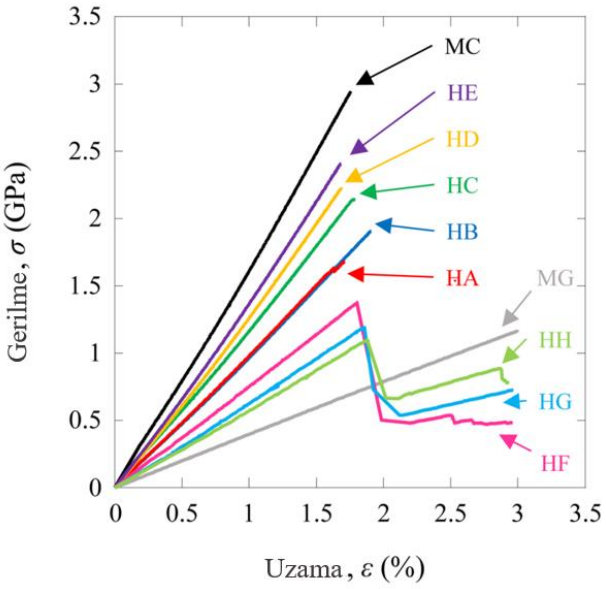
Resim 3.1. Formula-1 aracına ait karma kompozit [37]

Karbon ve cam elyafların bir arada kullanıldığında mekanik özellik anlamında sağladıkları avantajları göstermek isteyen Irina ve arkadaşları dokuma karbon elyaf, dokuma cam elyaf ve UD (tek yönlü) cam elyafları farklı katmanlarda kullanarak ürettikleri numunelere çekme ve eğme testleri uygulamışlardır. Numunelerde kullanılan cam ve karbon elyaf katman sayıları eşit tutularak elyaf oryantasyonu ve elyafın bulunduğu katmanın numunenin nihai özelliklerini etkilediğini göstermişlerdir. Kompozit tasarımı sırasında karma elyaf kullanımının maliyeti bir miktar arttırsa dahi avantajlı olacağını bildirmişlerdir [38].

Devi ve arkadaşları yaptıkları dinamik mekanik analiz çalışmalarında ananas yaprağından üretilen doğal fiberler ile cam fiberleri bir arada kullanmıştır. Fiberler homojen bir şekilde karıştırılarak katman içi karma kompozit numuneler üretilmiş ve testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin çıktıları katmanlar arası karma kompozit kullanılan numuneler ile karşılaştırılmıştır. Testler sonucunda bu iki malzeme kullanılarak uygun maliyetler ile üretilen karma kompozitlerden tatmin edici düzeyde rijitlik ve sönümleme kapasitesi elde edilebileceği sonucuna varılmıştır [39].

Santhanam ve arkadaşları yaptıkları çalışmada epoksi reçine ile birlikte kullandıkları muz ve cam fiber takviyeler ile katmanlar arası karma kompozit numuneleri elle serme metodunu kullanarak üretmişlerdir. Numunelerden elde edilen çekme ve eğilme testi sonuçları saf cam fiber ve saf muz fiberi kullanılarak üretilen numunelere ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karma kompozit kullanımı sayesinde çekme kuvvetinde gözle görülür artış olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada karma kompoziti oluşturan muz fiberlerine uygulanan yüzey işlemi sayesinde çekme mukavemeti değerinde %27 oranında artış sağlandığı rapor edilmiştir [40].

Naito cam ve karbon elyafları kullanarak yaptığı çalışmada aynı tipteki karma kompozitleri statik ve dinamik yükleme altında incelemiş ve karma kompozitin hasar mekanizmasını yorumlamıştır. Statik testlerde görülmüştür ki düşük uzama katsayısına sahip karbon elyaf hasara uğramaya başladığında cam elyaflar yükü devralmış ve numuneyi ani bir kopmadan korumuştur. Bu mekanizma gerilme-gerinim eğrisindeki dalgalanmalar sayesinde gözle görünür hale gelmiştir. Yorulma dayanımı testlerinde ise yüksek yük uygulanan testlerde karbon elyaf oranı artışı numenin dayanımını arttırırken düşük yük seviyesine sahip testlerde cam elyaf oranındaki artış numunenin ömrünü arttırmıştır [41].

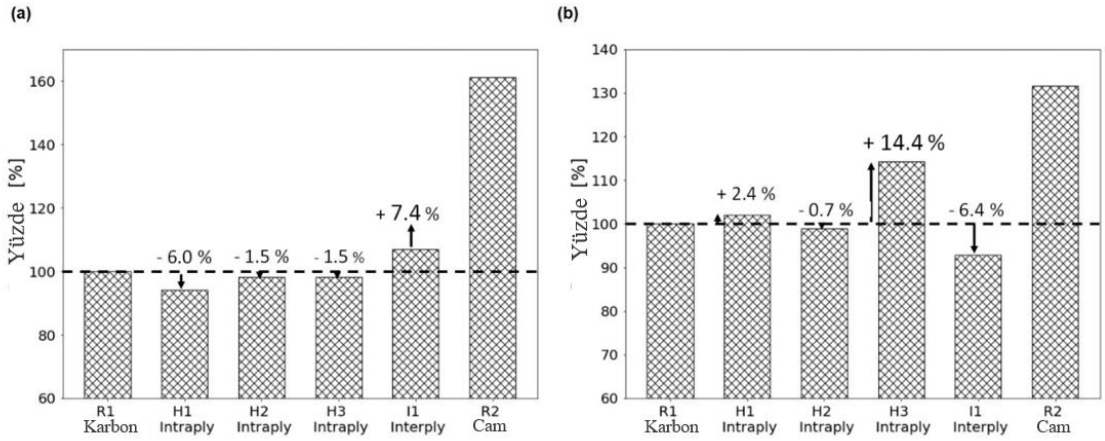


Şekil 3.1. Farklı karbon-cam oranlarına sahip karma kompozitlerin Gerilme-Uzama eğrisindeki davranış farklılığı (MC: Saf karbon, MG: Saf Cam, HA-HB-HC-HD-HE-HF-HG-HH: sırayla 1-1, 1-1, 2-1, 3-1, 5-1, 2-1, 3-1, 5-1 oranlarında karbon-cam katmana sahip karma kompozit) [41]

Aydın ve arkadaşları yaptıkları çalışmada cam-aramid, karbon-aramid ve karbon-cam fiberler kullanılarak dokunmuş intraply karma kompozitler üzerinde titreşim testleri gerçekleştirmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlar ile numerik model kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İntraply numunelerin yanında aynı cam, aramid ve karbon miktarına sahip katmanlar arası (çalışmada interply olarak isimlendirilmiştir) karma kompozit numuneler kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada farklı fiber özelliklerinin nihai kompozite yansıtılması amaçlanmıştır. Cam ve karbon içeren numunelere ait sonuçlar incelendiğinde intraply karma kompozitlerde fiber özelliklerinin nihai kompozite yansıtılmasının limitli kaldığı görülmektedir. Karbon veya cam fiberin hangi katmanda kullanıldığı sonuçları oldukça etkilemiştir. Katmanlar arası karma kompozitlerde yüksek rijitliğe sahip karbonların dış yüzeye yakın kullanımında elde edilen doğal frekans değerleri benzer özellikteki intraply kompozitlere göre daha üstün olarak gözlenmiştir. Benzer şekilde cam elyaflar dış yüzeye yakın kullanılarak elde edilen katmanlar arası karma kompozitlerin sönüm miktarları intraply karma kompozitlere göre daha üstün olmuştur [42]. Bu durum fiberlerin bölgesel olarak kullanılması durumunda spesifik özelliklerini nihai kompozite daha iyi yansıtabilecekleri sonucunu desteklemektedir.

Aydın farklı bir çalışmasında ise karbon ve cam elyaflardan oluşan katmanlar arası karma kompozitlerde farklı oryantasyonlara sahip elyaflar kullanarak testler gerçekleştirmiştir. Numunelere üç nokta eğilme, çekme ve titreşim testleri yapılmıştır. Araştırmacı reçine / fiber oranından ziyade kullanılan fiber malzemesi ve elyaf oryantasyonunun kompozitin davranışını belirleyen temel faktörler olduğunu belirtmiştir [43].

Karma kompozitlerin düzlemsel çekme ve basma yükü altındaki davranışlarını inceleyen Rajpurohit ve arkadaşları karbon ve cam fiberleri kullanarak dokudukları tek yönlü intraply ve katmanlar arası (interply) numuneleri sadece karbon ve sadece cam numunelerin test sonuçları ile kıyaslamıştır. Çalışmada çekme yükü altında test edilen intraply numunelerde karbon ve cam fiberler arasında ayrılmalar (delaminasyon) oluştuğu belirtilmiştir. Çalışma sonucunda katmanlar arası karma kompozitlerde çekme kuvveti altında kopma noktası uzama miktarı %7.4 iyileşirken basma yükü altında kopma noktası uzama miktarı %6.4 oranında düşmüştür. 3 Karbon-3 Cam lifin yan yana kullanılması ile dokunan numunelere ait sonuçlarda kopma uzaması %14.4 oranında iyileşme göstermiştir [44].

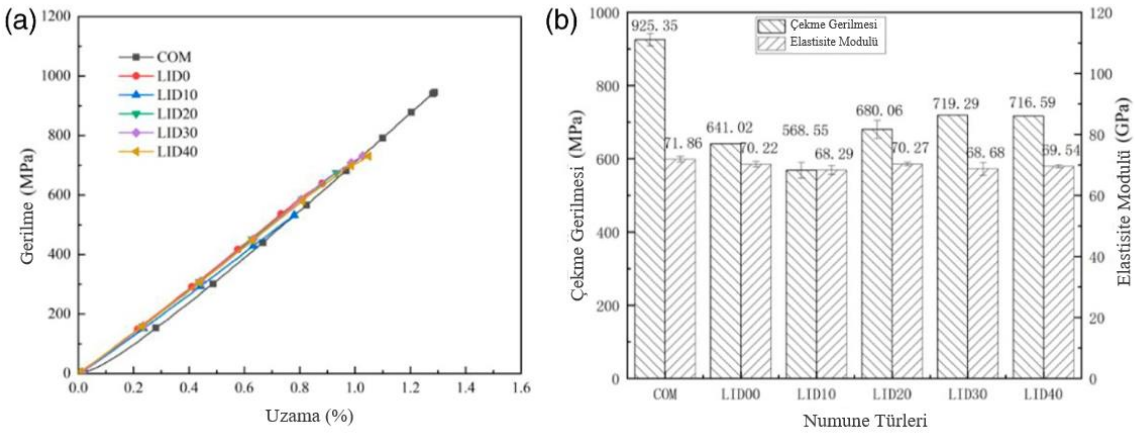


Şekil 3.2. Tek yönlü karbon ve cam fiberler kullanılarak üretilen karma kompozit numunelere ait çekme (a) ve basma(b) yükü altında yüzde uzama miktarları. (R1:Sadece Karbon, R2: Sadece Cam, H1-H2-H3: Sırasıyla 1-1, 2-2, 3-3-Karbon-Cam çözgü lifi yan yana getirilerek üretilen intraply kompozit-I1: Intraply kompozitler ile aynı oranda karbon-cam oranına sahip katman içi kompozit) [44]

3.2. Fiber Takviyeli Kompozitlerde Katman İçi Geçiş

Fiber takviyeli kompozitler ile üretim yapılmak istendiğinde belirli uzunluk ve genişliklere sahip elyaflar kullanılır. Potadan çekilerek sargı rulolarına sarılan fiberler kullanılarak oldukça uzun ancak kısıtlı bir genişliğe sahip elyaf elde edilir. Bu durum sonucunda boyutları elyaf boyutlarından daha fazla olan komponentlerin (Örneğin uçak kanatları) üretimi için elyaflar arasında bir geçiş bölgesi yaratılması ihtiyacı doğar. Bu çalışmanın amaçlarından biri de farklı tasarım tiplerine sahip geçiş bölgelerinin davranışlarını incelemektir.

Ayni tip karbon elyaflar arasında yaratılan katman içi geçiş bölgesinin çekme testi özelliklerini inceleyen Fang ve arkadaşları geçiş bölgelerinin çekme mukavemetini düşürdüğünü ancak nihai kompozitin elastik modulünün yalnızca %2 ila %5 arasında düştüğünü raporlamışlardır. Çalışmada kullanılan tüm numunelerde geçiş bölgesi sıralı iki elyaf katmanı arasında oluşturulmuş ancak numunedeki sürekli elyaf sayısı ve geçiş bölgesinin konumları değişken olarak belirlenmiştir. Çalışma çıktılarında kompozitin hasar başlangıcı olarak elyafların birleşim noktaları işaret edilmekle birlikte değişen katman içi geçiş parametreleri ile birlikte hasar mekanizmalarının da değiştiği belirtilmiştir [45].



Şekil 3.3. Katman içi geçişe sahip karma kompozit numunelerin (a) gerilme-uzama, (b) çekme mukavemeti-elastik modül grafikleri (COM: Katman içi geçiş içermeyen numune, LID0-LID10-LID20-LID30-LID40: Sırasıyla katman içi geçiş bölgeleri arasında 0-10-20-30-40 milimetre uzaklık bulunduran numuneler) [45]

Cam elyafları birbirleri ile birleştirmek için merdiven tipinde adımlı bir katman içi geçiş bölgesi oluşturan Wang ve arkadaşları farklı katman sayısına sahip numunelere çekme testi uygulamıştır. Sürekli cam elyaftan oluşan numuneler referans alınarak değerlendirilen test sonuçlarına göre sırasıyla toplamda 8, 10 ve 12 katmana sahip numunelerde geçiş bölgesi nedeni ile çekme mukavemeti %11,05; %9,37 ve %7,78 oranlarında düşüş göstermiştir. Bu çalışma göstermiştir ki katman sayısı arttıkça geçiş bölgesinin çekme dayanımına olan etkisi düşmektedir [46]. Bu doğrultuda ince yapılarda gerçekleştirilen katman içi geçiş tasarımı daha kritik rol oynamaktadır denilebilir.

İnce yapılarda katman içi geçiş bölgelerini araştıran Chen ve arkadaşları tek yönlü karbon fiber takviyeli kompozitler üzerinde çekme testleri gerçekleştirmişlerdir. Toplamda 4 katmandan oluşan numunelerde geçiş bölgesi lokasyonları farklılaştırılmıştır. Aynı zamanda katman içi geçiş bölgelerinin dış yüzeylerden 1 er kat elyaf ile güçlendirildiği numunelerin de test edildiği çalışmada lokasyon değişikliğinin kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak güçlendirilmiş geçiş bölgesine sahip numunelerde çekme mukavemetinin %21 oranında arttığı görülmüştür [47].

Farklı türdeki iki katman içi geçiş bölgesini (zikzak ve merdiven türünde) inceleyen Zhang ve arkadaşları geçiş bölgesindeki adım uzunluğunu da değiştirerek cam elyafların katman içi geçişlerdeki çekme ve eğilme davranışlarını yorumlamıştır. Çalışmada gerçekleştirilen testler sonucunda geçiş bölgesini yaratmak için kullanılan adım uzunluğu arttığında zikzak geçişli numunede eğilme mukavemeti düşerken merdiven türündeki geçişte neredeyse aynı kalmıştır. Adım uzunluğu her iki geçiş tipinde de çekme mukavemetini arttırmıştır. Katman içi geçişe sahip numunelerin sonuçlarını sürekli elyafa sahip numuneler ile kıyaslayan çalışmada zikzak yapıdaki geçiş için çekme mukavemeti %35,2 oranında düşerken merdiven tütündeki geçişte yalnızca %10,1 oranında düşüş görülmüştür. Bu çıktılar ile geçiş türünün kompozitin nihai özelliklerini büyük oranda etkilediği sonucuna varılmıştır [48].



Şekil 3.4. Zikzak (solda) ve merdiven (sağda) türündeki geçiş bölgeleri [48]

3.3. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Burkulması

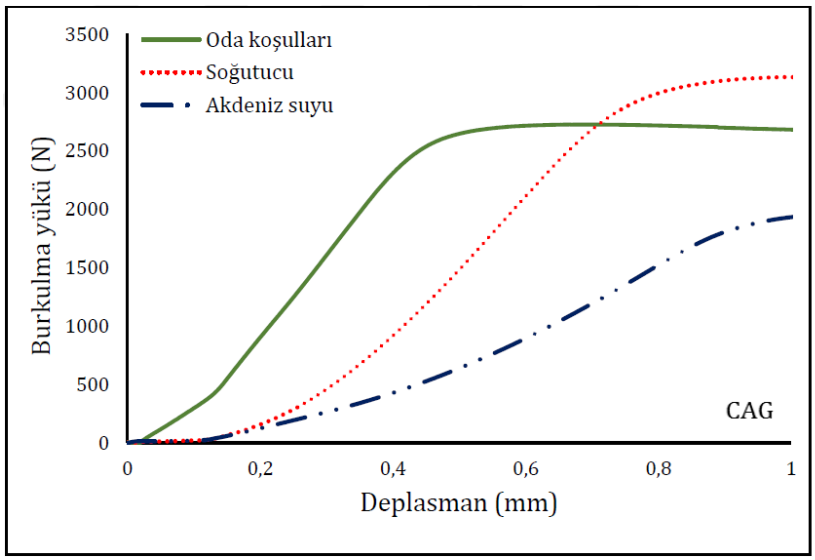
Diğer tüm yapısallar gibi fiber takviyeli kompozit yapısal parçalar da basma yüküne maruz kalmakta ve belirli bir sınır değer geçildiğinde burkulma söz konusu olmaktadır. Bu nedenle fiber takviyeli kompozitlerin burkulma davranışlarının araştırılması önem arz etmektedir [49]. Literatürde kompozitlerin burkulma davranışlarını inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Katman içi geçişe sahip fiber takviyeli kompozitlerin burkulma davranışlarını inceleyen çalışmalar ise genellikle tamir uygulamalarını kapsamaktadır.

Yeter, Erkliğ ve Bulut yaptıkları çalışmada cam, karbon ve aramid elyaflar kullanarak karma hale getirdikleri kompozit plakaların burkulma davranışlarındaki değişiklikleri incelemişlerdir. Elyaf oryantasyonu, uzunluk/kalınlık oranı ve farklı tiplerdeki deliklerin kritik burkulma kuvvetine olan etkisi araştırılmıştır. Numunenin dış yüzeyine yakın katmanlarda yüksek rijitliğe sahip karbon elyaf tercih edildiğinde kritik burkulma yükü artış göstermiştir. Aynı miktarda cam, karbon ve aramid içeren numunelerde oryantasyon ve elyaf konumu değişikliği nedeni ile kritik burkulma yükünde oluşan fark %119 seviyelerine kadar çıkmıştır. Numune kalınlığı ve genişlik/uzunluk oranı arttırıldığında burkulma yükünde artış olduğu gözlemlenmiştir [50].

Kirişler ile desteklenmiş bir kompozit plakada katman içi geçiş bölgesi oluşturarak burkulma testleri gerçekleştiren Geng ve arkadaşları elyaflar arasındaki süreksizliklerin burkulmaya olan etkilerini araştırmıştır. Test sırasında panelin burkulmaya başladığı yük değeri 580 kN olarak bulunmuş sonrasında panelin hasara uğradığı yük olan 767 kN a kadar yükleme devam etmiştir. Test sonuçlarının nümerik modellemeye yansıtıldığı çalışmada kullanılan katman içi geçiş tasarımı ve bölgesel güçlendirmeler sayesinde burkulma önleyici bir yapı elde edildiği bildirilmiştir. Özellikle burkulmanın başladığı

yükleme seviyelerinde test sonuçları ile nümerik sonuçlar arasında farklar gözlemlenmiştir. Elyafların arasındaki katman içi geçiş noktalarının kompozit panel üzerinde hasarın başladığı kısımlar olduğu ve burkulmanın devam etmesi ile hasarın büyüdüğü bildirilmiştir [51].

Kayıran yaptığı doktora tezi çalışmasında farklı çevresel koşullara maruz bırakılan karma kompozit yapıların burkulma davranışlarındaki değişiklikleri araştırmıştır. Karbon, cam ve aramid elyaflardan oluşturulan farklı oryantasyonlardaki numuneler çeşitli tuzlu su derişikliği ve sıcaklıklarda bekletilmişlerdir. Çalışma sonucunda soğuk ortamda bekletilen numunelerin kritik burkulma kuvveti değeri oda sıcaklığında bekletilen numunelere göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Tuzlu suda bekletilen numunelerin kritik burkulma kuvvetlerinin oda koşullarında bekletilen numunelere göre daha düşük olduğu bildirilmiştir [52].



Şekil 3.5. Farklı ortam koşullarına maruz kalan karbon, aramid ve cam elyaftan oluşan karma kompozitin burkulma yükü-deplasman grafiği [52]

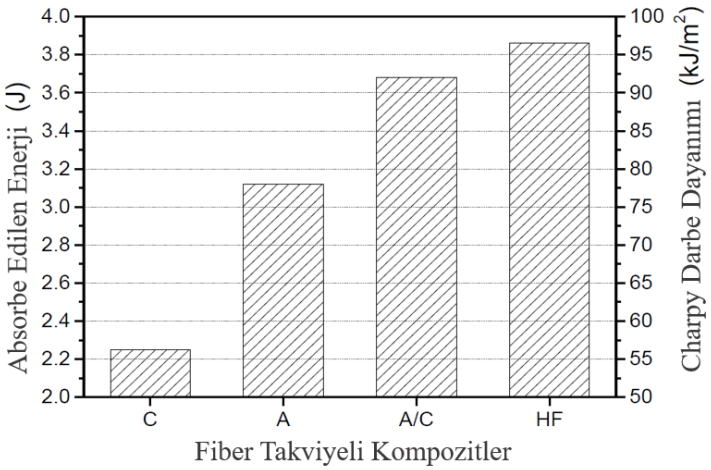
Erdem doktora tezinde karbon ve aramid fiberler kullanılarak dokunmuş elyaflar ile oluşturulan karma kompozitlerin lineer olmayan burkulma davranışlarını incelemiştir. Numunelerin üzerindeki çentik ve yama özelliklerinin burkulma davranışına etkisinin yanında matrise nano partikül katkısı da araştırılmıştır. Numunenin merkezine delik açılması durumunda kritik burkulma kuvvetinin 1048 N dan 825 N seviyesine düştüğü görülmüştür. Delikli numunenin 2 katman elyaf kullanılarak tamir edilmesi durumunda ise kritik burkulma kuvvetinin 1500 N seviyelerine çıktığı raporlanmıştır. İki farklı tipteki

nano partikül katkısının burkulma davranışına pozitif anlamda katkısının kısıtlı kaldığı ve buna ara yüzey ayrılmalarının sebep olduğu ifade edilmiştir [53].

3.4. Fiber Takviyeli Kompozitlerin Darbe Davranışları

Özellikle hava araçlarında sıklıkla kullanılan fiber takviyeli kompozitler gerek üretim aşamalarında gerekse servis ömürleri boyunca dış çevreden gelecek darbelere maruz kalabilir. Belirli seviyelerdeki darbelere karşı dayanıklı olması beklenen kompozit yapıların enerji sönümleme kapasitelerinin bilinmesi bu doğrultuda önemli bir hal almaktadır [54].

Uzay, Acer ve Geren'in yaptıkları karma kompozit çalışmasında karbon ve aramid fiberler kullanılarak oluşturulan karma kompozit numuneler üzerinde charp darbe testi gerçekleştirmiştir. Katmanlar arası karma ve katman içi karma (intraply) olarak üretilen numunelere ait sonuçlar sadece karbon ve sadece aramid numunelere ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Saf karbon ve saf aramid numunelere ait sonuçların darbe dayanımı karma numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Aramid fiberlerin üstün darbe özellikleri olmasına karşın matris sistemi ile iyi arayüz bağı kuramaması ve matrisi aramid fiberler arasına iyi nüfuz edememesi bu duruma sebep gösterilmiştir. Katman içi karma (intraply) kompozit numunelere ait ortalama absorbe edilen enerji miktarı 3,86 J ölçülürken katmanlar arası karma kompozitlere ait ortalama absorbe edilen enerji 3,68 J olarak ölçülmüştür [55].

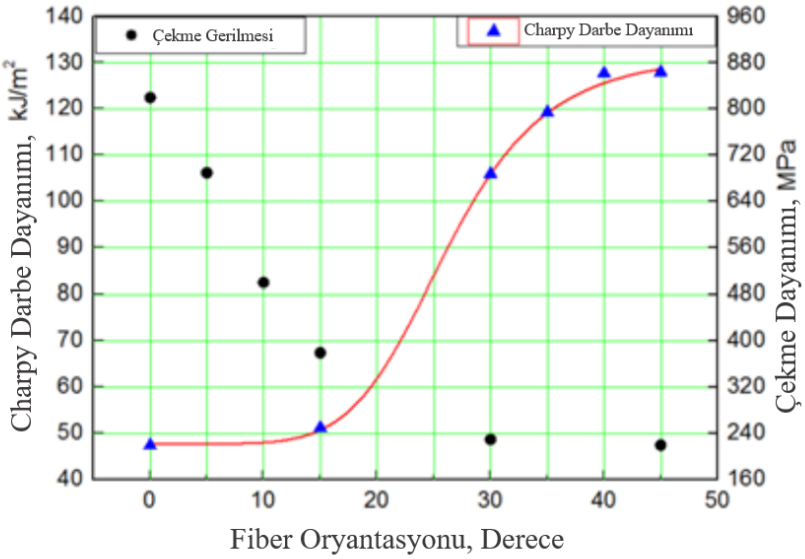


Şekil 3.6. Charpy darbe testi uygulanmış fiber takviyeli kompozitlere ait absorbe edilen enerji (J) ve darbe dayanımı (kJ/m2) değerleri (C: Sadece karbon - A: Sadece aramid - A/C: Katman içi aramid ve karbon - HF: Katmanlar arası aramid ve karbon fiber içeren kompozit) [55]

Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada fiber takviyeli kompozitlerin reçine yardımı ile tamir ve birleştirilme uygulamalarında kullanılan merdiven tipi katman içi geçiş yapılarının darbe davranışları incelenmiştir. Karbon fiberler kullanılarak üretilen iki ayrı adımlı yapı otoklav kürlenmesi sonrasında tamir uygulamalarına benzer şekilde reçine yardımı ile yapıştırılmıştır. Birleştirilen numunelere sonrasında farklı enerji seviyelerinde darbeler uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Çalışma sonundaki bulgulara göre hasar beklenenin aksine dış yüzeye uzak olan katmanlar arasındaki reçine yapışma bölgelerinden başlamıştır. 4 J üzerindeki darbe enerjisi seviyelerinde reçinede oluşan hasar mikroskop yardımı ile görülebilir hale gelmiştir. Reçinedeki hasarlar ani gerçekleştiği için sarkaç yükünde anlık düşüşler görülmüştür. Katman içi geçiş bölgesinde matris çatlakları, katman ayrılması(delaminasyon) ve matris-fiber arayüz çatlakları gibi birden fazla hasar mekanizması gözlenmiştir [56].

Hong ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada karbon fiber takviyeli kompozitlerin elyaf oryantasyonlarına ve farklı sıcaklık seviyelerine bağlı charpy darbe davranışları incelenmiştir. Çalışmada darbe genişlik yönünde uygulandığı için numunelere uygun ölçülerde çentik açılmıştır. Çalışma çıktılarına göre 0° ve 90° yönündeki elyaf sayısı arttıkça sönümlenen enerji miktarının düştüğü görülmüştür. Oryantasyon 40° ila 50° arasında olduğunda en yüksek sönüm miktarlarına ulaşılmıştır. Sıcaklığın düşmesiyle absorbe edilen enerjinin yavaş düştüğü ancak oda sıcaklığı ve üzerindeki sıcaklık seviyelerinde enerji miktarlarının hızlı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Fiber takviyeli

kompozitlerin çekme dayanımlarına etki eden oryantasyon ve sıcaklık parametrelerinin ters orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Fiber takviyeli kompozitlerin çekme dayanımına olumlu etki edecek oryantasyon ve sıcaklık değişikliklerinin darbe dayanımına ters orantılı etki ettiği sonucuna varılmıştır [57].



Şekil 3.7. Fiber takviyeli kompozit numunelere ait elyaf oryantasyonuna göre charpy kırılma enerjisi – çekme dayanımı değişim grafiği [57]

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyaller ve Numune Tipleri

Tez çalışması kapsamında cam ve karbon elyaflar kullanılmış ve numuneler üretilirken bu iki elyaf tipi arasında katman içi geçiş oluşturulmuştur. Çalışmada kullanılan elyaflar ve epoksi reçine KP Kompozit Pazarı A.Ş'den temin edilmiştir. Kullanılan elyaflar ve reçineye ait satıcı tarafından sağlanan bilgiler Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Elyaf Özellikleri

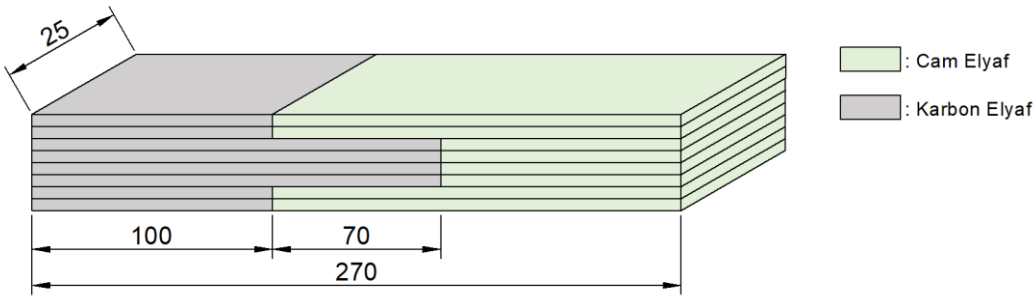
Elyaf Özellikleri			
Elyaf Tipi	Dokuma Türü	Çekme Gerilmesi	Uzama
Cam	Dimi (Twill) 2x2	2300 MPa	2.95 %
Karbon	Dimi (Twill) 2x2	3900 MPa	1.9 %

Çizelge 4.2. Reçine Özellikleri

Reçine Özellikleri				
Reçine	Vizkozite (25°C)	Çekme Gerilmesi	Uzama	Kopma Gerilmesi
KP 410	275 cps	70 Mpa	5 %	68 Mpa

Çalışmanın odaklandığı katman içi geçişe sahip karma kompozitlerin oluşturulması için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de gösterilen tiplerde geçiş bölgesi tasarımları belirlenmiştir. Çalışmada geçişe sahip numunelerin sonuçlarını karşılaştırabilmek için katman içi geçiş barındırmayan sadece karbon ve sadece cam elyaf numuneler de test edilmiştir.

Burkulma testlerinde kullanılan numuneler 8 katmandan oluşacak şekilde 0° oryantasyonundaki karbon ve cam elyaflardan oluşmaktadır. Numune uzunluğu 270 mm ve numune genişliği 25 mm'dir. Numunelerde katman içi geçiş bölgesi merkezdeki 70 mm'lik uzunlukta gerçekleştirilmiştir. 5 farklı tip burkulma testi numunesi bulunmaktadır. Her bir numune tipinden 3 adet ve toplamda 15 adet numune üretilmiştir. Burkulma testi numunesine ait örnek gösterim Şekil 4.1'de verilmiştir.

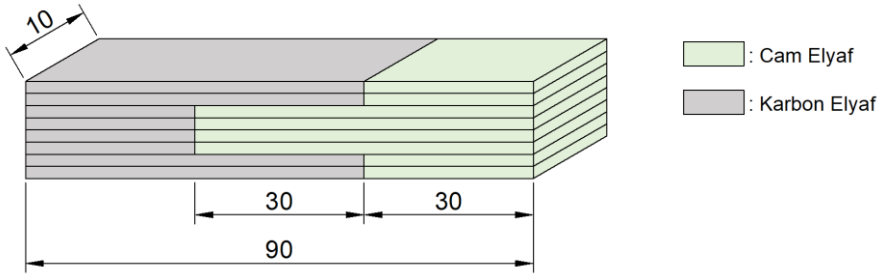


Şekil 4.1. Burkulma testi numune boyutları

Çizelge 4.3. Burkulma testi numune tipleri

Numune Adı	Numune Kesit Gösterimi
KB-1	
KB-2	
KB-3	
KB-4	
KB-5	
: Cam Elyaf : Karbon Elyaf	

Charpy darbe testlerinde kullanılacak numuneler 8 katmandan oluşacak şekilde 0° oryantasyonunda karbon ve cam elyaflardan oluşmaktadır. Numune uzunluğu 90 mm ve numune genişliği 10 mm'dir. Numunelerde katman içi geçiş bölgesi merkezdeki 30 mm'lik uzunlukta gerçekleştirilmiştir. 5 farklı tip charpy darbe testi numunesi bulunmaktadır. Her bir numune tipinden 5 adet ve toplamda 25 adet numune üretilmiştir. Crhapy darbe testi numunesine ait örnek gösterim Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Charpy darbe testi numune boyutları

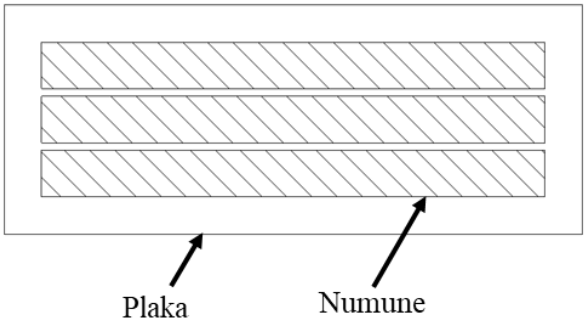
Charpy darbe testlerinde kullanılan numunelere ait katman içi geçiş tipleri burkulma numuneleri ile aynı seçilmiştir. Çizelge 4.4'de gösterilen numunelere testler sırasında üst yüzeylerinden darbe uygulanmıştır.

Çizelge 4.4. Charpy darbe testi numune tipleri

Numune Adı	Numune Kesit Gösterimi
KC-1	
KC-2	
KC-3	
KC-4	
KC-5	
: Cam Elyaf : Karbon Elyaf	

4.2. Numune Üretimi

Bu çalışmada kompozit üretimi için vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Kompozit üretimi sırasında her bir numune tipi için bir plaka üretilmiş ve bu plakalardan testlerde kullanılacak sayıda numune çıkartılmıştır. Plakaların elde edilmesi için ilk olarak elyaf kesimi gerçekleştirilmiştir. Her bir katmanı oluşturacak cam ve karbon elyaf boyutları hesaplanarak kesim yapılmıştır.



Şekil 4.3. Kompozit plaka ve çıkartılacak test numuneleri

Elyaf kesimi tamamlandıktan sonra serimin yapılacağı vakum infüzyon tezgâhı üzerine elyaf serimi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için tezgâh tablası üzerine ayırıcı film serilir. Bu sayede reçine ile ıslanmış elyaflar tezgâh yüzeyine yapışmaz. Ayırıcı filmi tablaya sabitlemek ve vakum torbasının sızdırmazlığını sağlamak için çift taraflı sızdırmazlık bandı ayırıcı film etrafına yapıştırılmıştır.



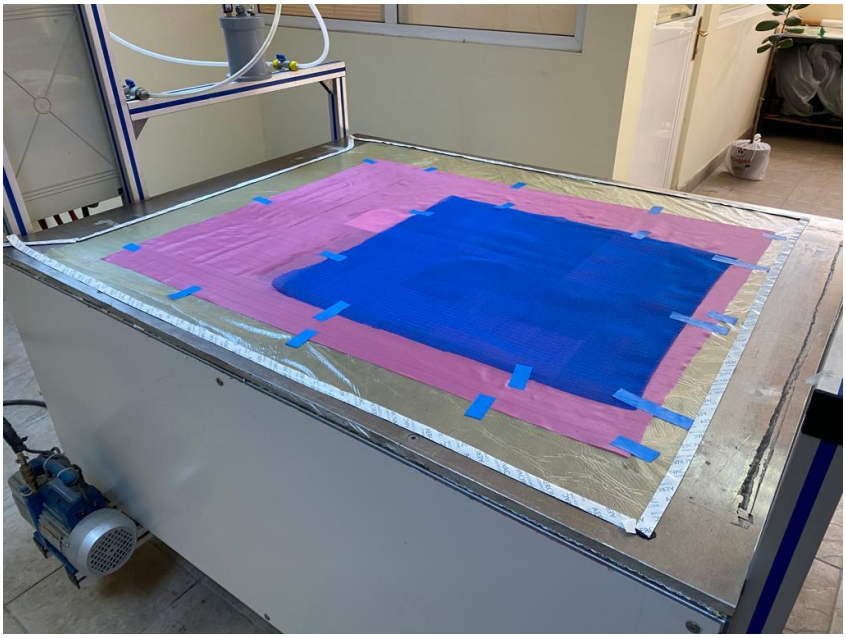
Resim 4.1. Vakum infüzyon tezgâhı, ayırıcı film ve sızdırmazlık bandı

Ayırıcı film serildikten ve bant yapıştırıldıktan sonra el ile elyaf serim işlemine başlanmıştır. Bu süreçte plakaların katman dizilimlerine dikkat etmek önem taşır.



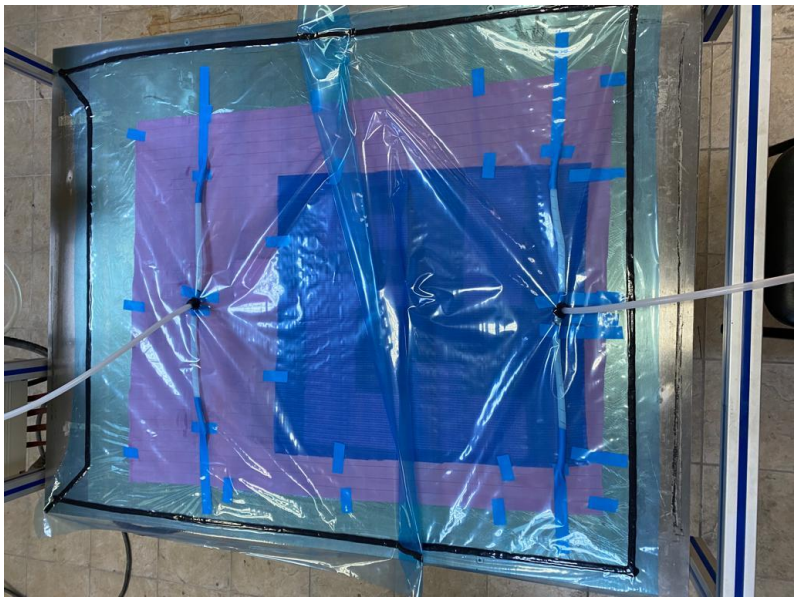
Resim 4.2. Elyaf serim işlemi

Elyaf serimi tamamlandıktan sonra elyafların üzerine uygun boyutlarda soyma kumaşı ve akış filesi serilmiştir. Bu katmanlar kâğıt bant yardımı ile sabitlenmiştir. Reçine geçirgenliği olan soyma kumaşı sayesinde akış filesi ve kompozit plakalar arasında bir katman oluşturulmuş ve akış filesinin plakalara yapışması önlenmiştir. Soyma kumaşı kürleme işlemi tamamlandıktan sonra plaka yüzeylerinden kolaylıkla ayrılabilmektedir. Akış filesinin temel görevi ise reçine akışını hızlandırmaktır.



Resim 4.3. Soyma kumaşı ve akış filesinin serilmesi

Reçinenin torbaya gönderilmesini ve tahliye edilmesini sağlayacak spiral hortumlar akış yönüne dik bir şekilde giriş ve çıkış yönlerinde yerleştirilerek sabitlenmiştir. Son olarak vakum torbası tüm üretim alanını kaplayacak şekilde serilerek torbalama tamamlanmış olur. Reçine sisteme verilmeden önce torbalama işleminde vakum kaçağının olmadığını doğrulamak için vakum pompası çalıştırılarak torba içerisindeki hava vakumlanır. Uygun bir süre beklenerek torbalamada sızdırma olmadığı doğrulanmıştır.



Resim 4.4. Spiral hortumların yerleştirilmesi ve vakum torbasının serilmesi

Reçine ve sertleştirici üreticinin verdiği yönerge doğrultusunda 100 birim reçineye karşılık 28 birim sertleştirici olacak şekilde bir kapta karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra hava kabarcıklarının karışımdan uzaklaştırılması amacıyla reçine vakum altında bekletilmiştir. Bu işlem sırasında Zerovac marka vakum cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.5. Reçine karışımının vakum altında bekletilmesi

Reçinedeki köpürme durduktan ve tüm hava tahliye edildikten sonra reçine sisteme verilmeye hazır hale gelir. Reçinenin elyafları daha hızlı ıslatmasını sağlamak için vakum infüzyon tablası 50°C sıcaklığa getirilmiştir. Sonrasında vakum altındaki elyafların üzerine havası alınmış reçine gönderilmiştir. Bu süreçte vakum uygulanmaya devam edilmiştir. Tüm elyaflar reçine ile ıslatıldıktan ve fazlalık reçine tahliye hortumuna ulaştıktan sonra reçine akışı durdurulur. Satıcının yönergeleri doğrultusunda tabla 100°C sıcaklığa ulaştıktan sonra 1 saat vakum altında kürlenme işlemi yapılır. Kürlenme tamamlandıktan sonra numunelerin oda sıcaklığına ulaşması için beklenmiştir.



Resim 4.6. Reçinenin sisteme verilmesi

Kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra torbalama sökülerek plakalar çıkartılmıştır. Kesim için hazır hale gelen plakalar su jeti yardımı ile kesilerek istenen boyutlarda numuneler elde edilmiştir.



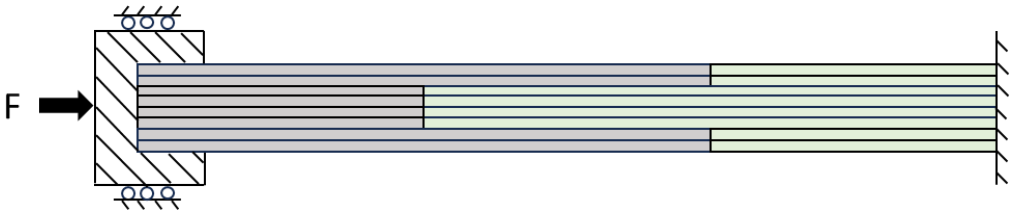
Resim 4.7. Kesime hazır haldeki kompozit plaka



Resim 4.8. Kompozit plakaların su jeti yardımı ile kesilmesi

4.3. Burkulma Testi

Burkulma, basma kuvvetine maruz kalan yapılarda meydana gelen ani şekil değişikliğidir. Yapının sahip olduğu boyutlar, sınır şartları ve kuvvet doğrultusu gibi birçok faktör burkulma davranışını etkilemektedir. Bu tez çalışmasında odaklanılan burkulma türü uzunluğu genişlik ve derinliğinden daha fazla olan yapısallarda görülen kolon burkulmasıdır. Her iki uçtan ankastre mesnet yardımı ile bağlanan yapısala eksenel basma kuvveti uygulanarak kritik burkulma kuvvetine ulaşılır ve sonrasında burkulma başlar.



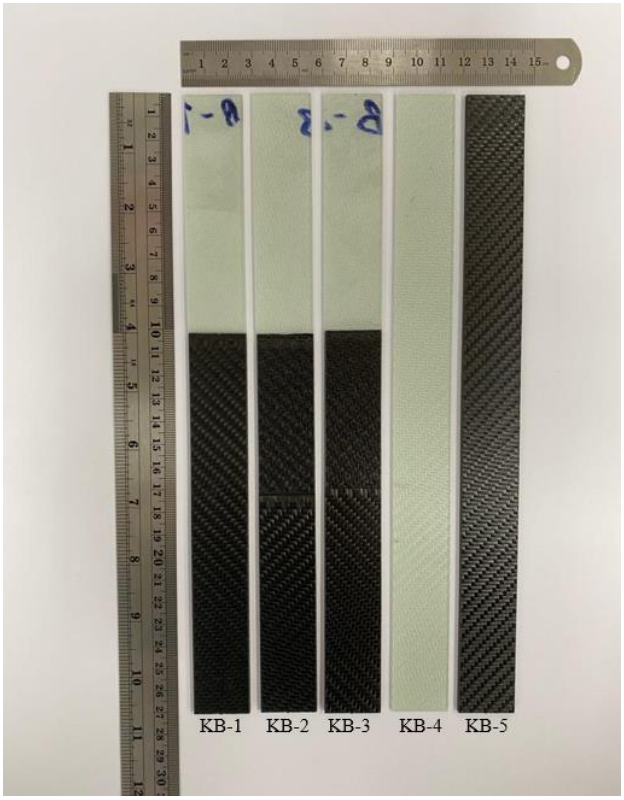
Şekil 4.4. Burkulma testi serbest cisim diyagramı

Bu çalışmada gerçekleştirilen burkulma testleri Instron marka 300kN kapasiteli üniversal çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin her iki ucundan 30 mm'lik kısım cihazın çeneleri arasında kalacak şekilde ankastre mesnet oluşturulmuştur.

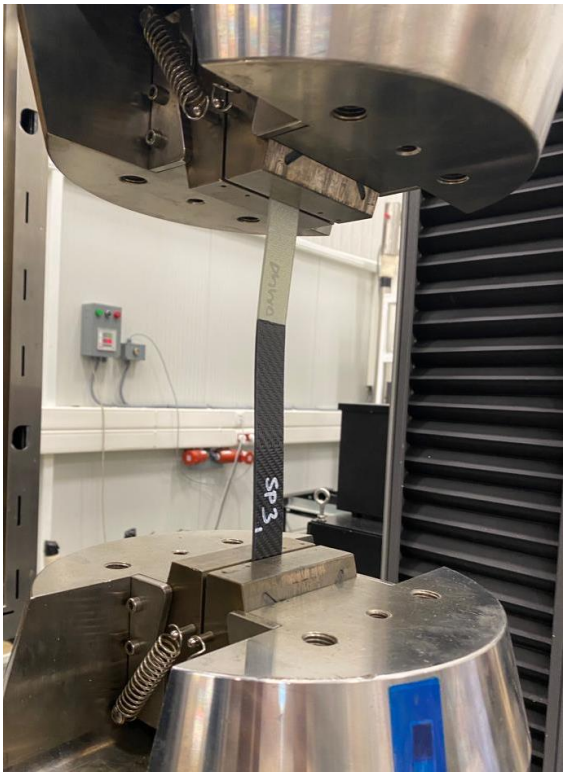
Numunelerde burkulma meydana gelene kadar 2mm/dk hızında eksenel basma kuvveti uygulanmış ve kuvvet ve deplasman verileri kaydedilmiştir.



Resim 4.9. Burkulma testlerinde kullanılan çekme-basma test cihazı



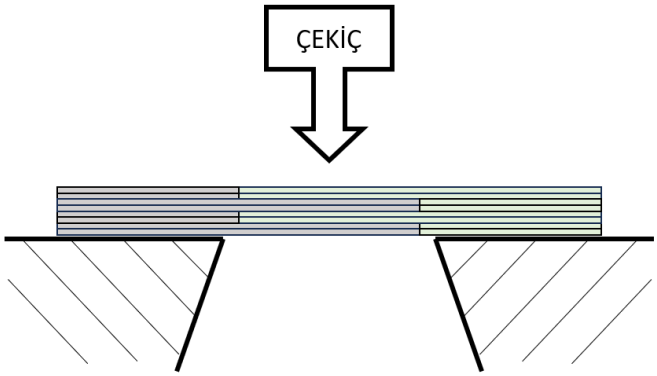
Resim 4.10. Burkulma testlerinde kullanılan 5 farklı tip numune



Resim 4.11. Burkulma testi

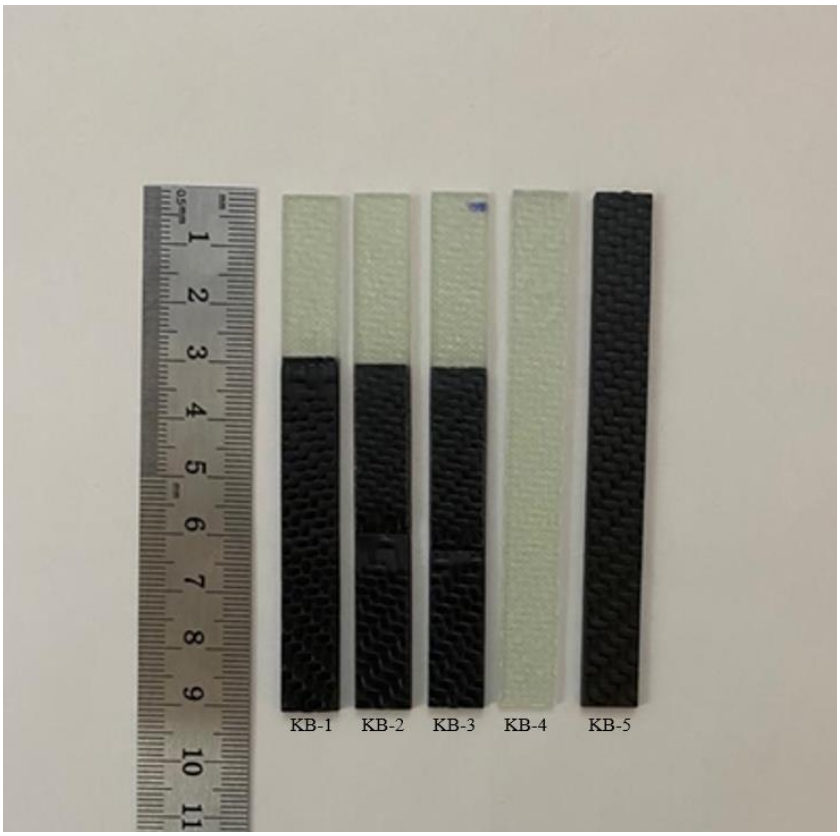
4.4. Charpy Darbe Testi

Malzemelerin kırılma sırasında absorbe ettikleri enerji miktarını ölçmek için charpy darbe testi kullanılır. Geleneksel yöntemde yüksekliği ve ağırlığı bilinen bir çekiç yardımı ile malzemeye darbe uygulanır. Malzeme kırıldıktan sonra çekicin ulaştığı ikinci yükseklik kaydedilir. Bu iki yükseklik seviyesi arasındaki potansiyel enerji farkı malzemenin absorbe ettiği enerji miktarına karşılık gelir. Bu çalışmada Instron Dynatup 9250HV charpy darbe test cihazı kullanılmıştır. ISO-179'a göre gerçekleştirilen testlerde uygulanacak enerji miktarı belirlenir ve sonrasında darbe ucunun(çekiç) kuvvet-zaman değişimi kaydedilir. Bu iki bilgi kullanılarak absorbe edilen enerji hesaplanır.



Şekil 4.5. Charpy darbe testi şematiği

Kullanılan yük hücresinin ağırlığı ve uygulanmak istenen enerji miktarı sisteme girildikten sonra cihaz kontrol paneli kullanılarak numune üzerinde darbenin uygulanacağı noktadan sıfır alma işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemler sonrasında yük hücresi istenen enerji miktarını uygulayacağı yüksekliğe otomatik olarak yükselmektedir. Bu tez çalışması için gerçekleştirilen testlerde tüm numunelere 10 J değerinde enerji uygulanmıştır. Tüm numunelere aynı şartlarda testler uygulanmış ve sonuçlar kaydedilmiştir.



Resim 4.12. Charpy darbe testlerinde kullanılan 5 farklı tip numune



Resim 4.13. Charpy darbe testi düzeneği



Resim 4.14. Charpy darbe testi düzeneğine yerleştirilmiş numune

4.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Darbe testlerinde kullanılan numunelere ait kırılma yüzeylerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile hasar analizi gerçekleştirilmiştir. Numunelerde oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. SEM analizlerinde Zeiss marka Sigma 300 model SEM cihazı kullanılmıştır.



Resim 4.15. Hasar mekanizmalarının incelenmesinde kullanılan SEM cihazı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

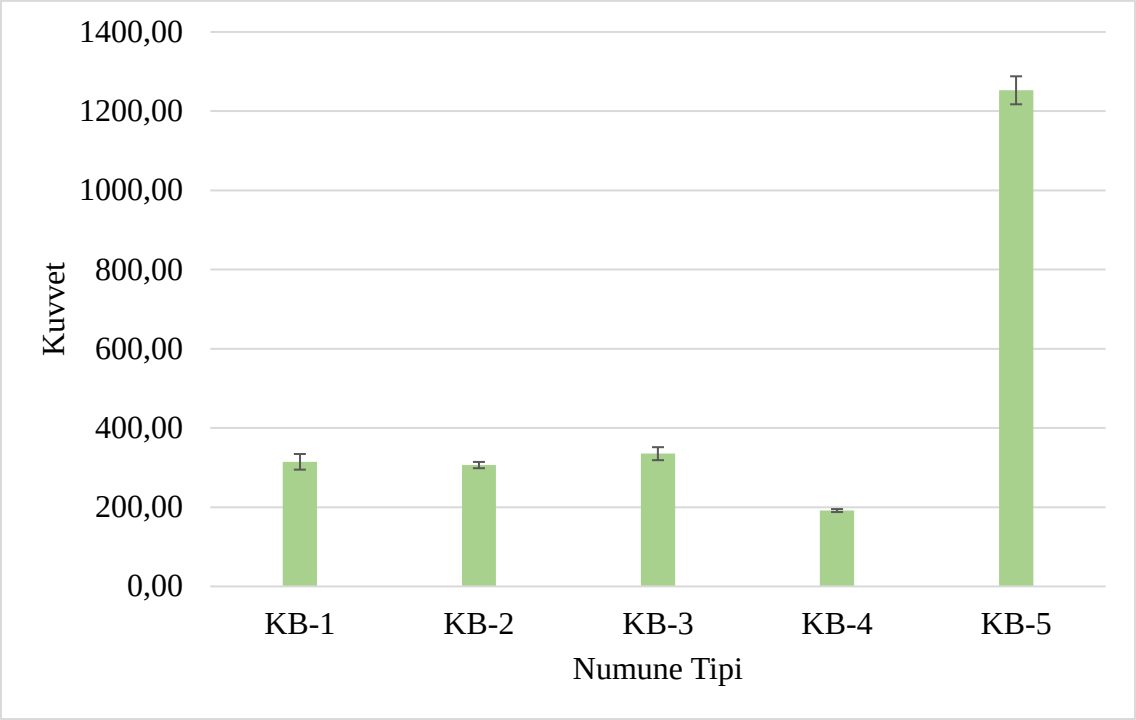
5.1. Burkulma Testi

Katman içi geçişe sahip numuneler ile geçiş bulundurmayan numunelere uygulanan burkulma testlerinde kuvvet-deplasman verileri kaydedilmiştir. Okunan en yüksek kuvvet değeri kritik burkulma kuvveti olarak kaydedilmiştir. 5 farklı numune tipi için gerçekleştirilen burkulma testlerinden elde edilen ortalama kritik burkulma kuvveti ve standart sapma değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Burkulma testi sonuçları

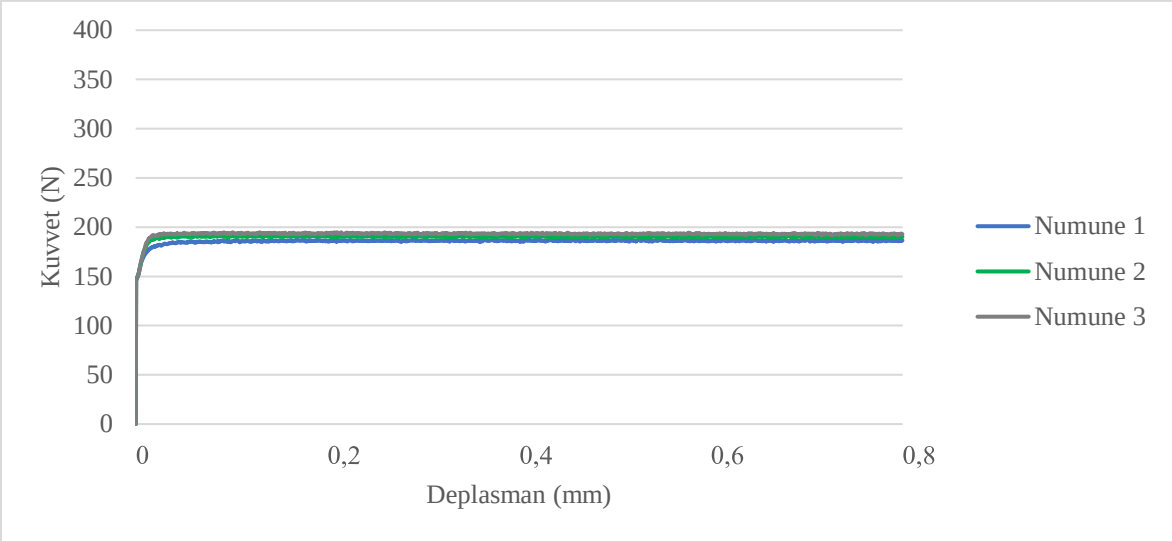
Numune Tipi	Ortalama Burkulma Kuvveti (N)
KB-1	314,57 ± 19,73
KB-2	306,37 ± 7,92
KB-3	335,12 ± 16,39
KB-4	191,51 ± 3,73
KB-5	1252,58 ± 35,33

Numunelere ait burkulma testlerine ait sonuçlar Şekil 5.1'de bir arada grafik üzerinde gösterilmiştir.

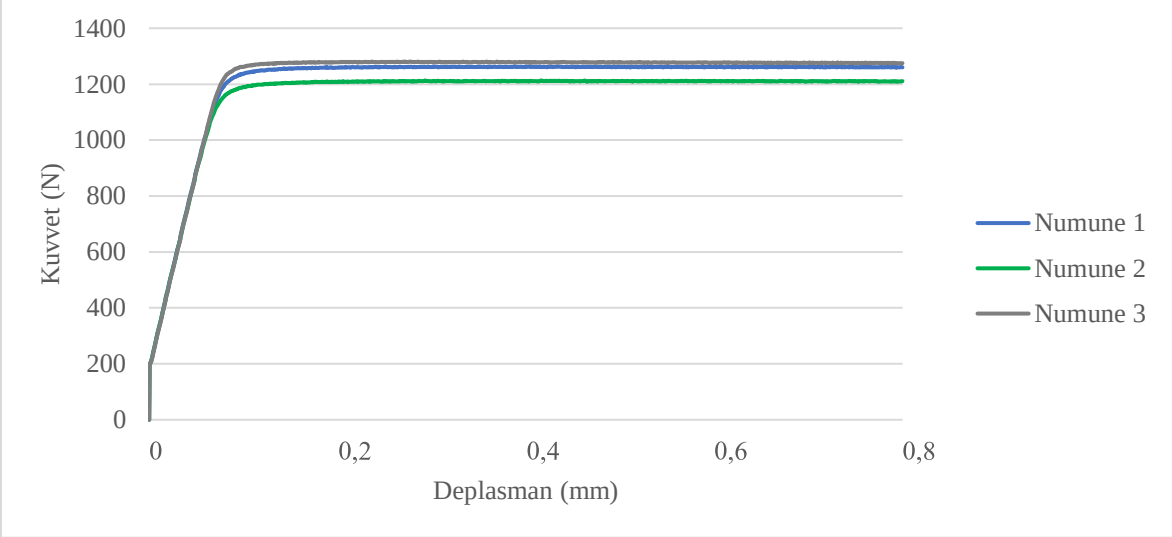


Şekil 5.1. Burkulma testlerine ait sonuçların grafik yardımı ile gösterimi

Burkulma testi sonuçları incelendiğinde saf karbon elyaflardan oluşan KB-5 numunesi en yüksek kritik burkulma kuvvetine sahip iken en düşük kuvvet değeri saf cam elyaftan oluşan KB-4 numune tipinde görülmüştür. Numuneler tek seferde grup olarak üretilmiş ve aynı boyutlarda kesilerek test edilmiştir. Bu nedenle kritik burkulma kuvvetini etkileyen temel unsur elyaf tipinin mekanik özellikleridir. Bu çalışmada kullanılan karbon elyaflar cam elyaflara oranla 2 kat daha yüksek elastisite modülüne sahip iken numunelerin burkulma kuvvetleri arasında 6,5 kat fark görülmüştür. KB-4 ve KB-5 numunelerine ait kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de verilmiştir.



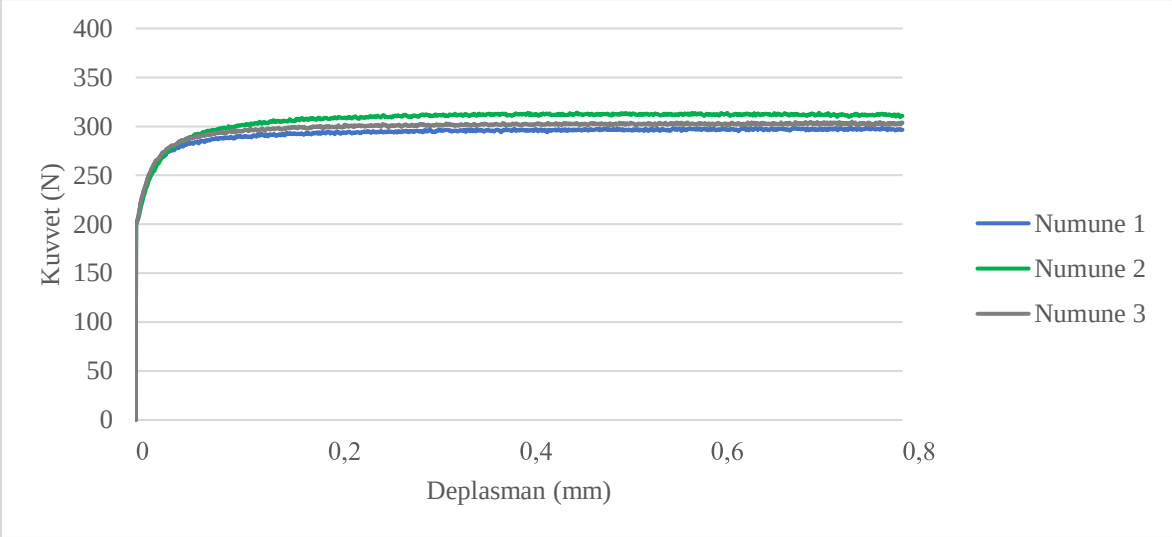
Şekil 5.2. KB-4 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği



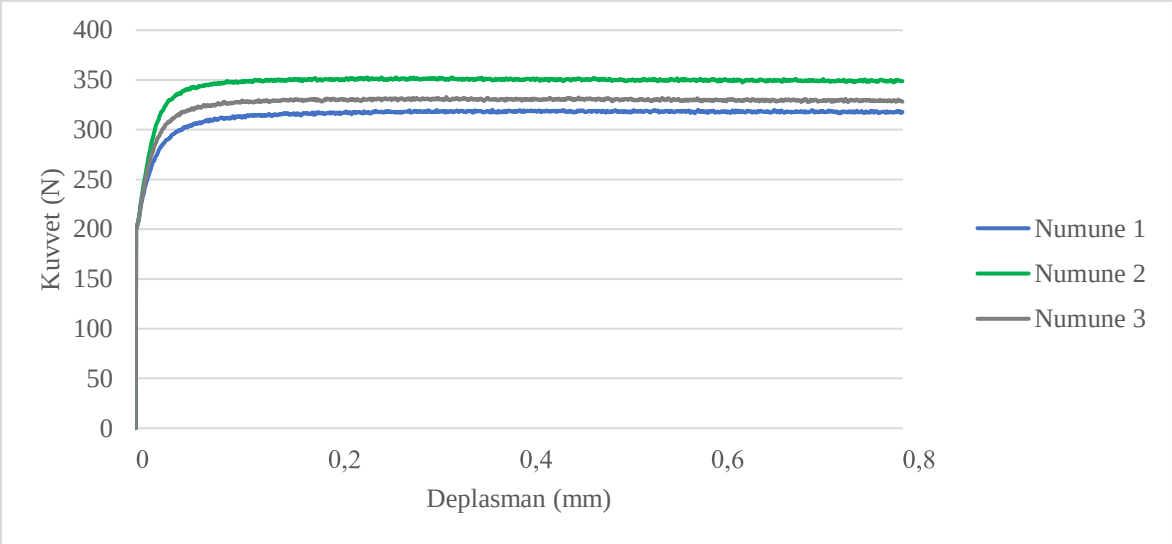
Şekil 5.3. KB-5 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği

Katman içi geçişe sahip numunelere ait sonuçlar incelendiğinde kritik burkulma kuvveti değerlerinin saf karbon ve saf cam elyaf numunelere ait değerlerin arasında kaldığı görülmektedir. Kompoziti oluşturmak için kullanılan karbon elyaf sayesinde numunelerin kritik burkulma kuvveti değerleri cam elyafa göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak katman içi geçişli numunelerden elde edilen değerlerin cam elyaf numuneye daha yakın olduğu açıkça görülmektedir. En yüksek kritik burkulma kuvveti ortalamasına sahip olan KB-3 numunesi saf cam elyaf numune KB-4 ten 1,7 kat daha yüksek kritik burkulma kuvvetine sahipken saf karbon elyaf numune KB-5 ten 3,7 kat daha düşük kuvvete sahiptir.

Tüm katman içi geçişli numuneleri oluşturmak için eşit oranda karbon ve cam elyaf kullanılmış olmasına karşın farklı geçiş tiplerine sahip numunelerin farklı kritik burkulma kuvvetine sahip olduğu görülmektedir. Katman içi geçişli numuneler arasında en düşük kritik burkulma kuvvetine sahip KB-2 numunesi ile en yüksek kritik burkulma kuvvetine sahip KB-3 numunesi arasında %9,4'lük bir fark gözlemlenmiştir. Bu durumda katman içi geçişleri oluşturmak için farklı tasarım tiplerinin kullanılmasının kritik burkulma kuvvetini arttırıp azaltabileceği söylenebilir. En yüksek kritik burkulma kuvvetine sahip KB-3 numunesinin diğer iki karma numuneden farkı cam ve karbon elyaflar arasında daha fazla katman temas yüzeyine sahip olmasıdır. KB-2 ve KB-3 numunelerine ait kuvvet-deplasman grafikleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de verilmiştir.

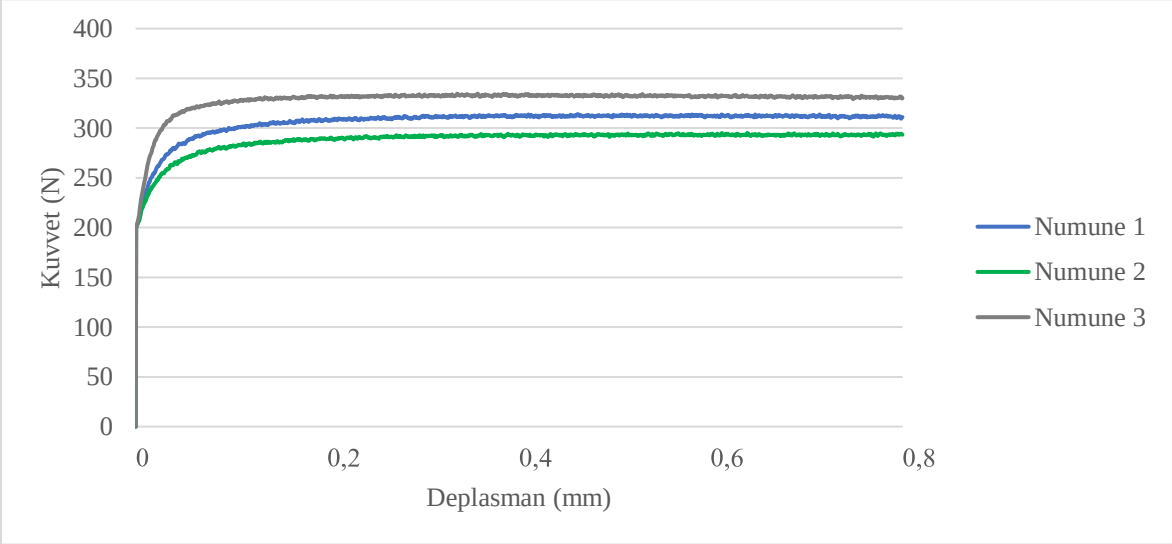


Şekil 5.4. KB-2 Numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği



Şekil 5.5. KB-3 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği

Birbirleri ile aynı tip geçişe sahip KB-1 ve KB-2 numunelerine ait sonuçlar karşılaştırıldığında aralarında %2,7'lik bir fark görülmektedir. Numunelerin arasındaki temel fark katman içi geçiş bölgesindeki karbon elyafların dış katmanlara daha yakın veya daha uzak yerleştirilmesidir. Katman içi geçiş bölgesi oluşturulurken yüksek kritik burkulma kuvvetine sahip karbon elyafın dış katmanlara yakın yerleştirilmesi KB-1 tipi numuneye ait kritik burkulma kuvvetine pozitif yönde katkı yapmıştır. KB-1 numunesine ait kuvvet-deplasman grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. KB-1 numune tipine ait kuvvet-deplasman grafiği

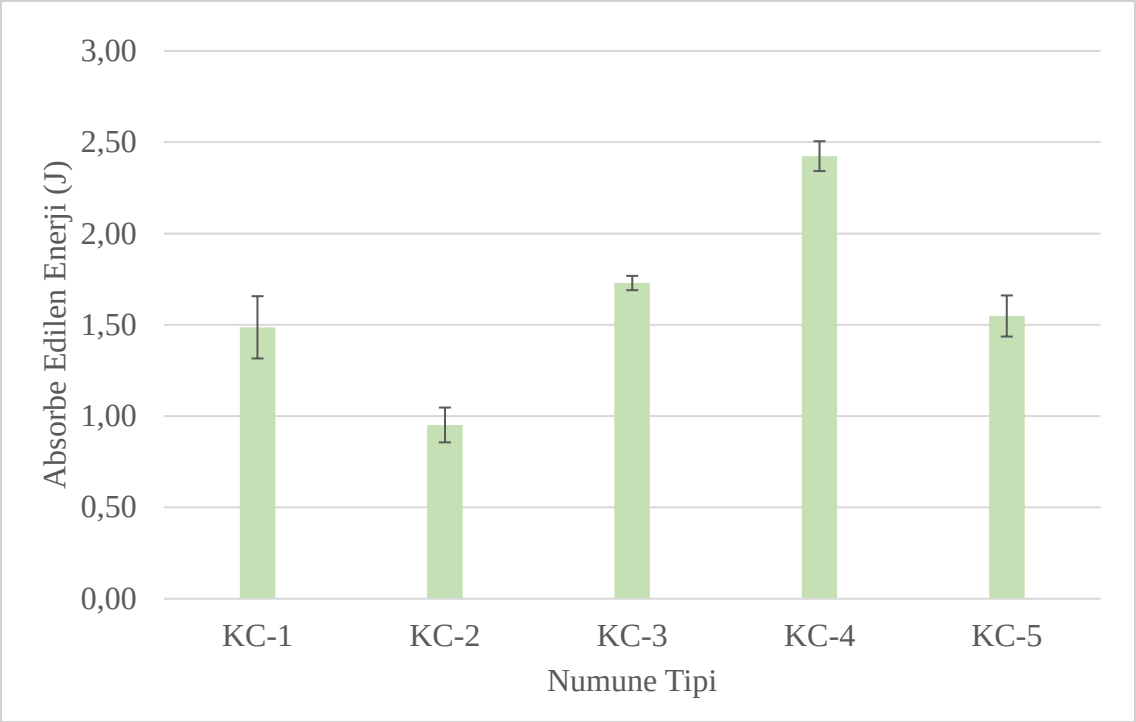
5.2. Charpy Darbe Testi

Charpy darbe testlerinde darbe çekicine ait kuvvet-zaman grafiği kaydedilir. Numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarları ilgili bağıntılar kullanılarak test cihazı tarafından otomatik olarak hesaplanır. 5 farklı numune tipi için gerçekleştirilen charpy darbe testlerinden elde edilen ortalama absorbe edilen enerji ve standart sapma değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Charpy darbe testi sonuçları

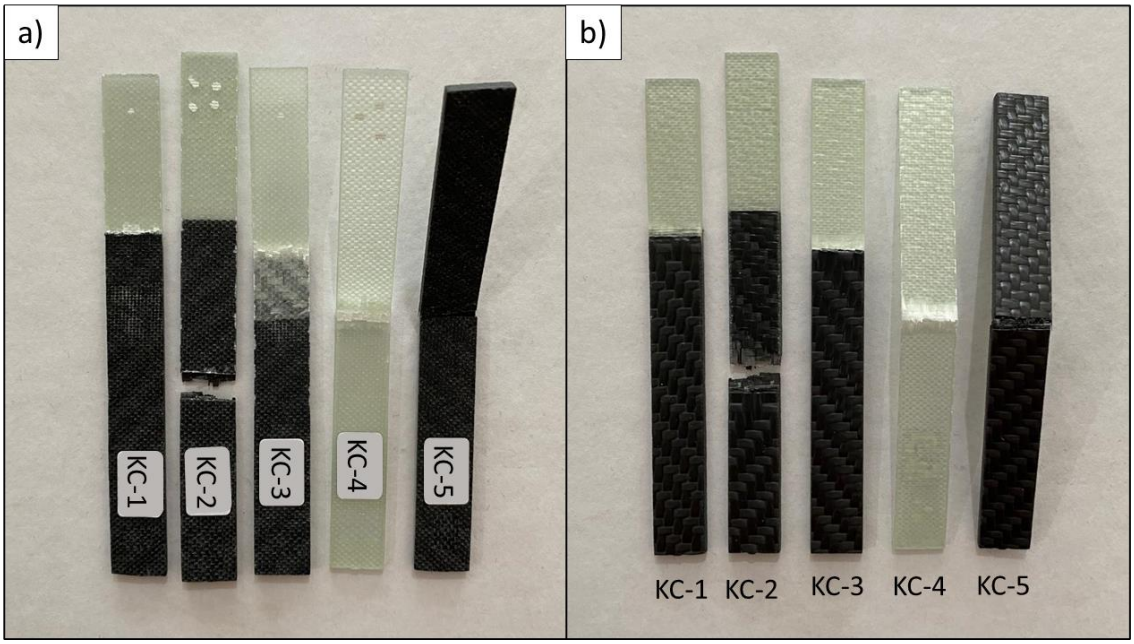
Numune Tipi	Ortalama Absorbe Edilen Enerji (J)
KC-1	1,49 ± 0,17
KC-2	0,95 ± 0,10
KC-3	1,73 ± 0,04
KC-4	2,42 ± 0,08
KC-5	1,55 ± 0,11

Numunelere ait ortalama absorbe edilen enerji değerleri ve standart sapma değerleri Şekil 5.7'de grafik üzerinde bir arada gösterilmiştir.



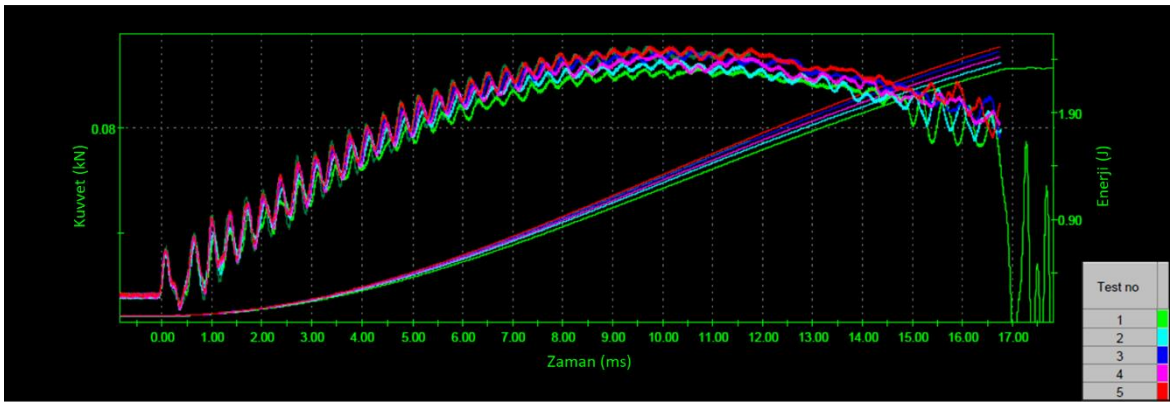
Şekil 5.7. Numune tiplerine göre ortalama absorbe edilen enerji değerleri

Her bir numune tipi için hasara uğramış numunelerin ön ve arka yüzeylerine ait görüntüler aşağıdaki resimde paylaşılmıştır. Numune tiplerin göre oluşan hasarların da farklılık gösterdiği görülmektedir. Karma numune tipleri KC-1 ve KC-3 numunelerinde cam elyafın bulunduğu tarafta ve katman içi geçişin başladığı arayüz de hasar oluşumu başlamıştır. KC-2 numune türü diğer numunelerden ayrışarak karbon elyafın bulunduğu taraftan hasara uğramıştır. Bu nedenle katman içi geçiş tasarımı değiştiğinde nihai kompozitin hasar mekanizmaları da değişir denilebilir. Saf numuneler KC-4 ve KC-5 karma numunelerin aksine darbenin uygulandığı orta noktadan hasara uğramıştır. Bu nedenle katman içi geçiş kullanılan kompozitlerde katman içi geçiş bölgesinin hasara uğramaya daha yatkın olduğu söylenebilir. Hasara uğramış numunelere ait darbe yüzeyi ve arka yüzey resimleri Resim 5.1'de verilmiştir.



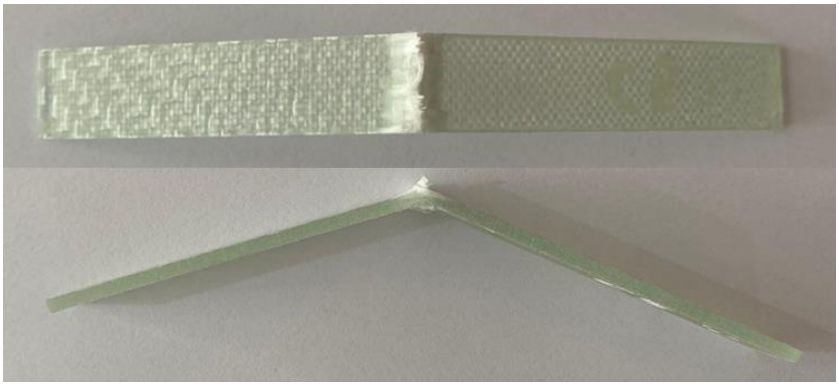
Resim 5.1. Charpy testi numuneleri a) darbe b) arka yüzey görüntüsü

Charpy darbe testlerinde en yüksek absorbe edilen enerji değeri saf cam elyaftan oluşan KC-4 numune tipinde görülürken en düşük absorbe edilen enerji değeri KC-2 geçişli numunesinde görülmüştür. Saf cam elyaftan oluşan KC-4 numune tipi karbon elyaf içeren diğer numune tiplerine göre daha yüksek enerji absorbe değerine ulaşmıştır. KC-4 numune tipi saf karbon elyaftan oluşan KC-5 numune tipine göre %56 daha yüksek enerji absorbe değerine sahiptir. KC-4 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği Şekil 5.8'de verilmiştir.

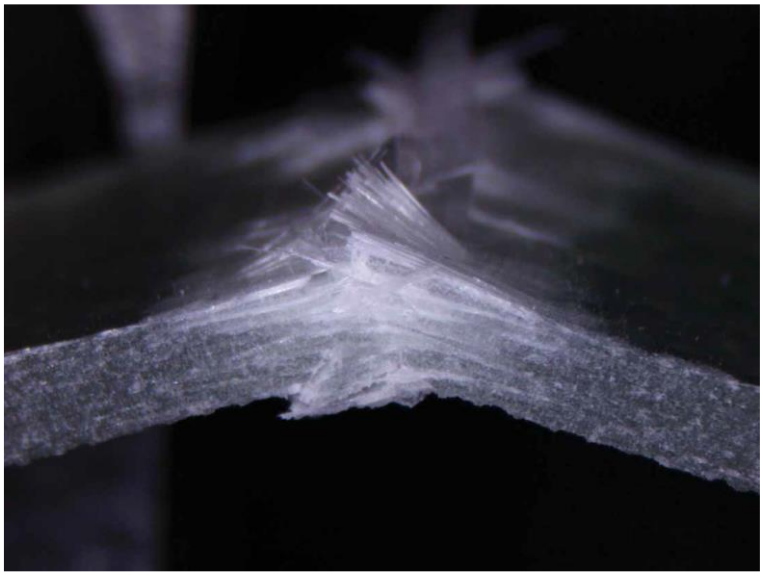


Şekil 5.8. KB-4 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği

Darbe testi sonrasında KC-4 numuneleri incelendiğinde kırılmanın numunenin orta noktasında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu nokta aynı zamanda darbenin uygulandığı noktadır. KC-4 numune tipine ait makro ve mikroskop görüntüsü Resim 5.2 ve Resim 5.3'de verilmiştir.



Resim 5.2. KC-4 numunesine ait makro görüntü



Resim 5.3. KC-4 numunesine ait mikroskop görüntüsü

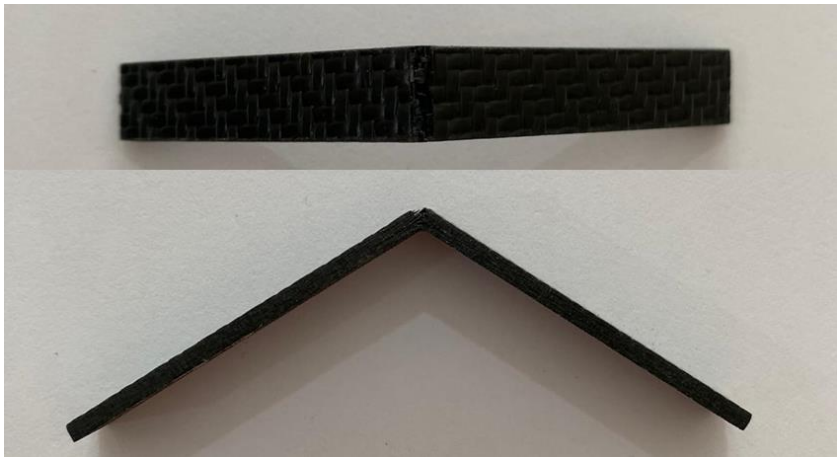
Saf karbon elyaftan oluşan KC-5 numune tipine ait absorbe edilen enerji değeri diğer numune tiplerinin ortasında konumlanmıştır. Saf cam elyaftan oluşan KC-4 numune tipi saf karbon elyaftan oluşan KC-5 numune tipinden daha yüksek absorbe edilen enerji değerine sahiptir. Benzer sonuçlara literatürde de rastlanmıştır [58]. KC-5 numune tipinin içerisinde cam elyaf bulunduran KC-1 ve KC-2 numune tiplerinden daha yüksek absorbe edilen enerji değerine sahip olması literatürdeki diğer karma kompozit çalışmalarından farklılaşmaktadır. Bu durumun oluşmasının ana sebebi KC-1 ve KC-2 numunelerinde

bulunan katman içi geçiş bölgesinin bu numune tiplerinin enerji absorbe edebilme özelliğini düşürmesidir. KC-5 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir.

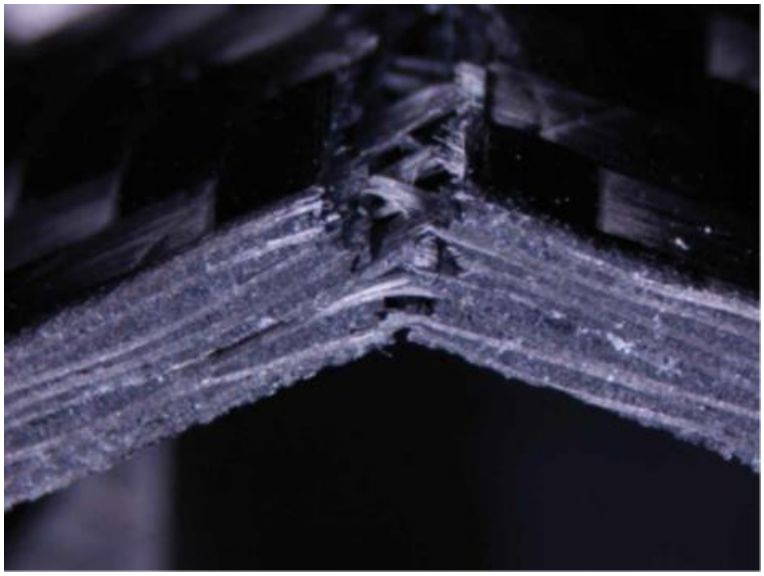


Şekil 5.9. KB-5 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği

Darbe testi sonrasında KC-5 numuneleri incelendiğinde kırılmanın KC-4 numune tipine benzer şekilde orta noktadan gerçekleştiği gözlemlenmiştir. KC-5 numune tipine ait makro ve mikroskop görüntüsü Resim 5.4 ve Resim 5.5'de verilmiştir.

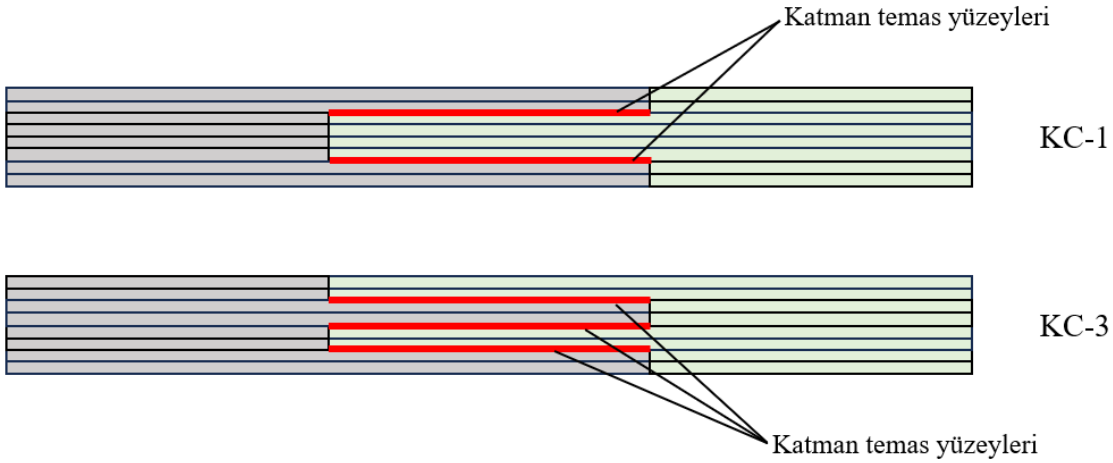


Resim 5.4. KC-5 numunesine ait makro görüntü



Resim 5.5. KC-5 numunesine ait mikroskop görüntüsü

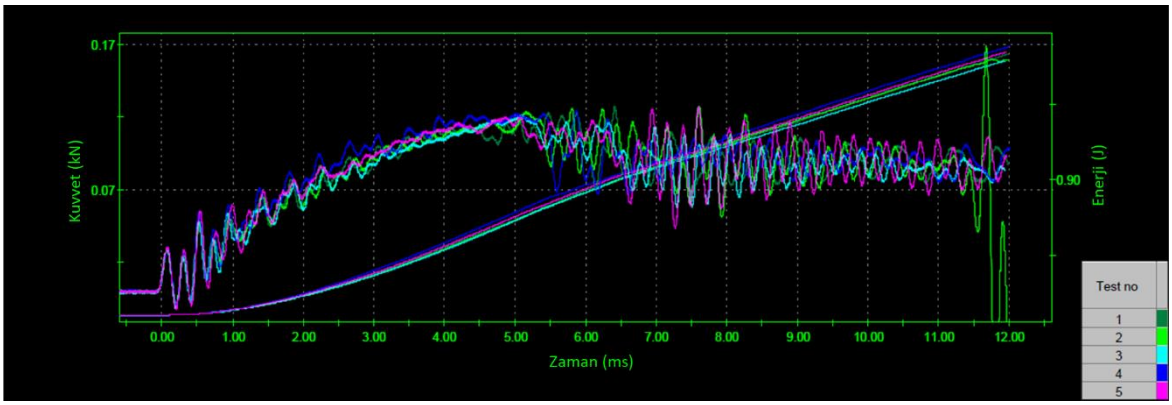
Geçişli numuneler arasında en yüksek absorbe edilen enerji değerine sahip olan numune KC-3 numunesidir. KC-3 numunesinde kullanılan geçiş türü KC-1 ve KC-2 numunelerinde kullanılan geçiş türüne göre farklı elyaf tipleri arasında daha fazla temas yüzeyine sahiptir. Bu durum KC-3 numunelerinin daha yüksek seviyede enerji absorbe etmesine sebep olmuştur. KC-1 ve KC-3 numunelerinde kullanılan farklı geçiş tiplerine ait temas yüzeyleri Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. KC-1 ve KC-3 numunelerine ait katman temas yüzeylerinin gösterilmesi

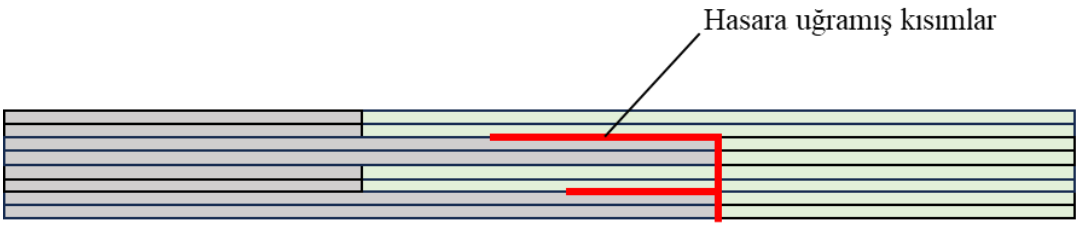
Katman içi geçişli KC-3 numune tipi saf karbon elyaftan oluşan ve katman içi geçiş bulundurmayan KC-5 numune tipine göre %12 daha yüksek absorbe edilen enerji değerine sahiptir. Bu durum katman içi geçiş tasarımlarının doğru bir şekilde kullanılması ile

kompozit malzemelerde enerji absorbe edebilme özelliğinin iyileştirilebileceğini göstermiştir. KC-3 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği Şekil 5.11'de verilmiştir.



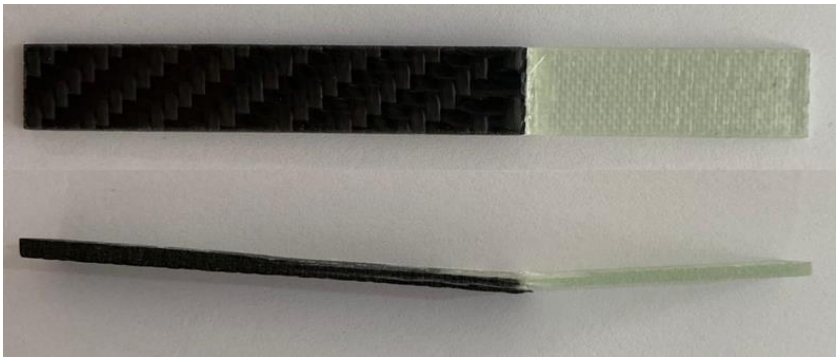
Şekil 5.11. KB-3 numunelerine ait absorbe edilen enerji – deplasman değerleri

Darbe testi sonrasında KC-3 numuneleri incelendiğinde kırılmanın katman içi geçiş bulundurmayan KC-4 ve KC-5 numunelerinden farklı şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Kırılma cam elyaf katmanların yoğun olduğu uçta ve katman içi geçişin başladığı noktada başlamış ve numunenin iç kısımlarına doğru katman ayrılması şeklinde devam etmektedir. KC-3 Numune tipinde gözlemlenen hasara uğramış kısımlar Şekil 5.12 üzerinde işaretlenmiştir.

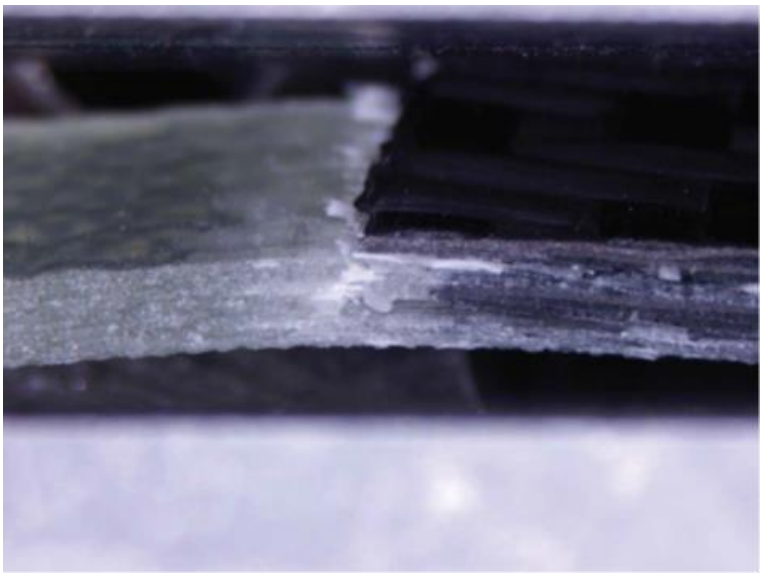


Şekil 5.12. KC-3 numune tipi için hasara uğramış kısımların gösterimi

KC-3 numune tipine ait makro ve mikroskop görüntüsü Resim 5.6 ve Resim 5.7'de paylaşılmıştır.

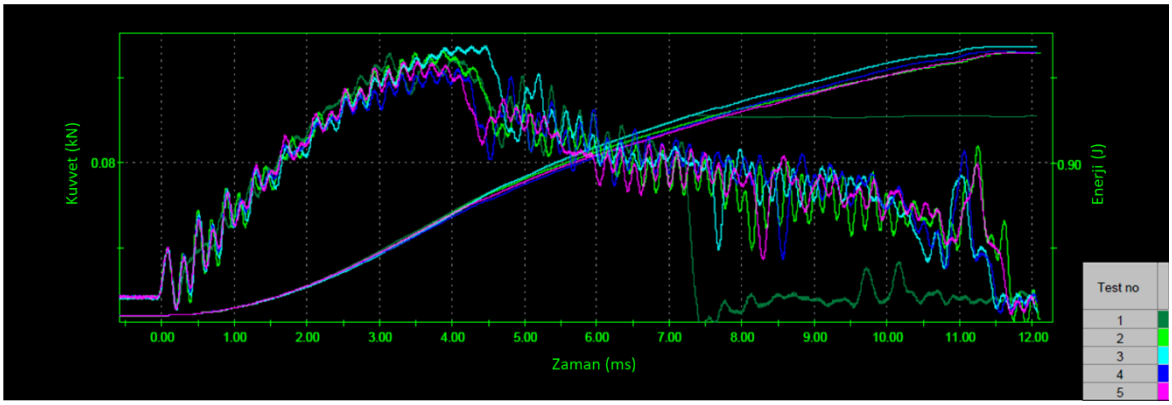


Resim 5.6. KC-3 numunesine ait makro görüntü



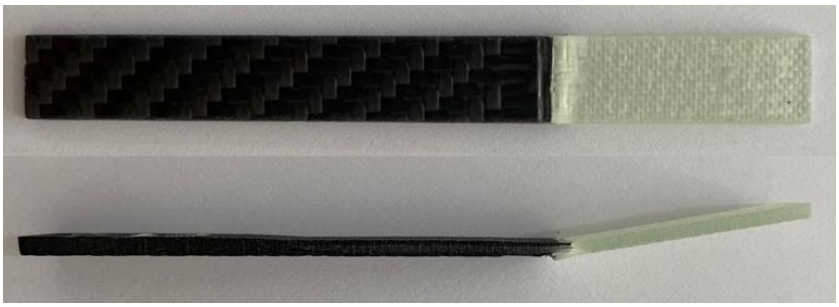
Resim 5.7. KC-3 numunesine ait mikroskop görüntüsü

KC-1 numune tipine ait sonuçlar incelendiğinde katman içi geçişli numunelerin ortasında konumlandığı görülmüştür. Bununla birlikte KC-1 geçişli numunesi ile KC-5 saf karbon elyaf numunelerinin sonuçları arasında %4 oranında fark çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum katman içi geçiş tasarımının doğru seçilmesi ile nihai karma kompozitin enerji absorbe etme özelliğinin değişmeden veya az miktarda değiştirilerek sürdürülebileceğini göstermektedir. KC-1 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği Şekil 5.13'de verilmiştir.

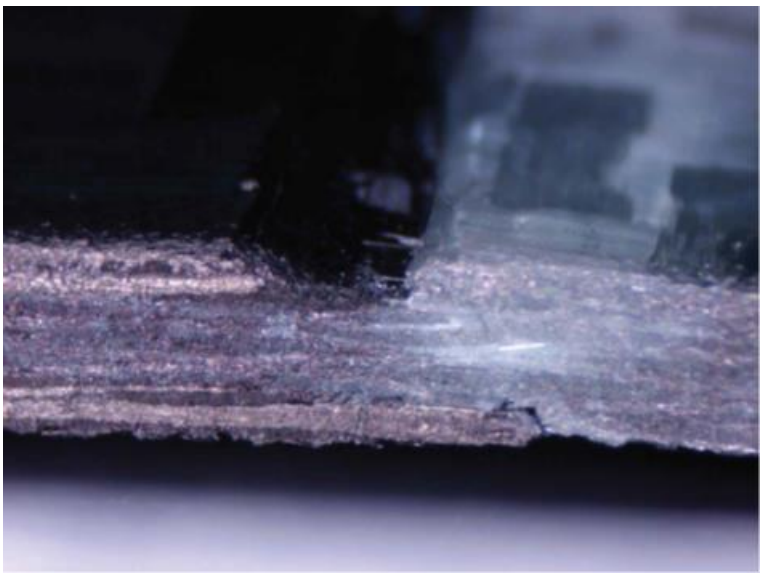


Şekil 5.13. KC-1 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği

Darbe testi sonrasında KC-1 numuneleri incelendiğinde kırılmanın cam elyaf katmanların yoğun olduğu tarafta ve katman içi geçişin başladığı noktada başlamış ve numunenin kalınlığı boyunca devam ettiği görülmüştür. KC-1 numune tipine ait makro ve mikroskop görüntüsü Resim 5.8 ve Resim 5.9'da paylaşılmıştır.

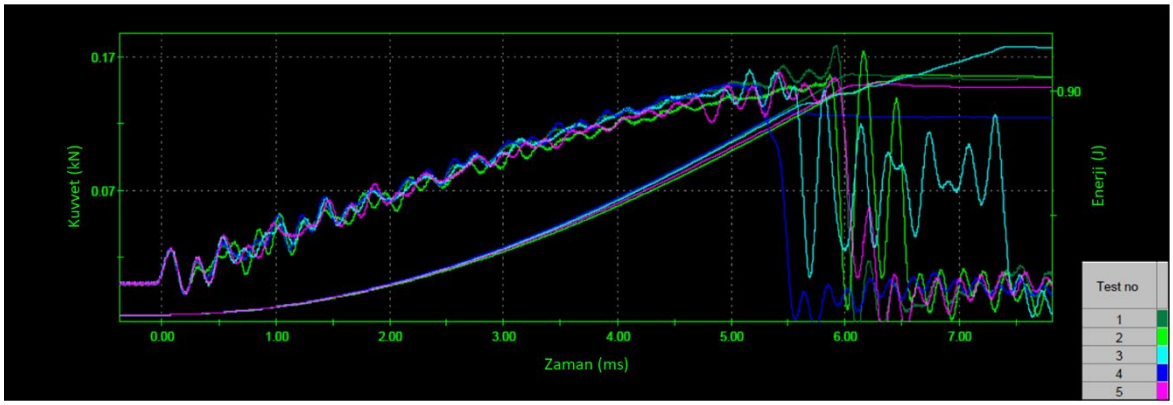


Resim 5.8. KC-1 numunesine ait makro görüntü



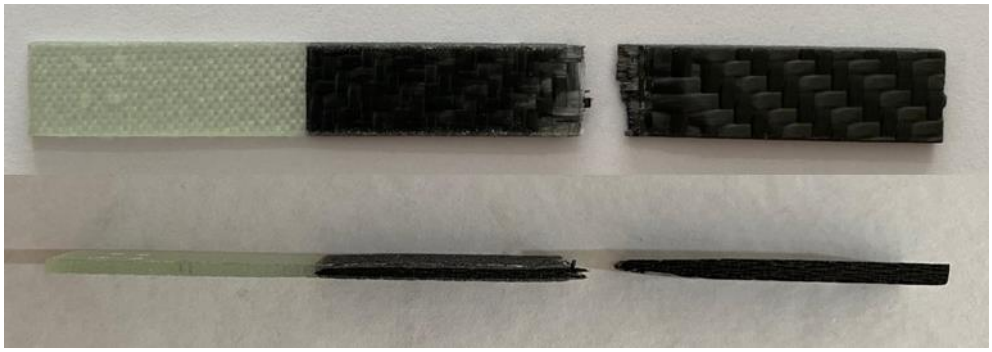
Resim 5.9. KC-1 numunesine ait mikroskop görüntüsü

KC-2 numunelerine ait sonuçlar incelendiğinde en düşük absorbe edilen enerji değerine bu numune tipinde rastlandığı görülmüştür. KC-2 numune tipi ile benzer katman içi geçiş tasarımına sahip KC-1 numune tipi arasında %57 fark oluşması katman içi geçiş tasarımı yapılırken elyaf katman yerleşimlerinin kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. KC-2 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği Şekil 5.14'de verilmiştir.

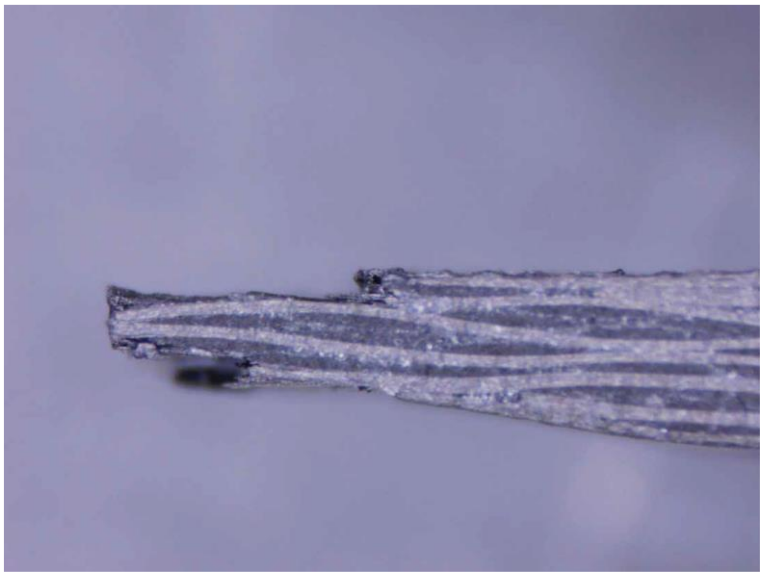


Şekil 5.14. KC-2 numunelerine ait kuvvet – zaman ve enerji grafiği

Darbe testi sonrasında KC-2 numuneleri incelendiğinde kırılmanın diğer katman içi geçişli numunelerden farklı olarak karbon elyafların yoğunlukta olduğu tarafta başladığı ve numune kalınlığı boyunca devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu numune tipinde numuneler katman içi geçiş bölgesinin başladığı arayüzden kırılarak ikiye ayrılmıştır. KC-2 numune tipine ait makro ve mikroskop görüntüsü Resim 5.10 ve Resim 5.11'de paylaşılmıştır.



Resim 5.10. KC-2 numunesine ait makro görüntü

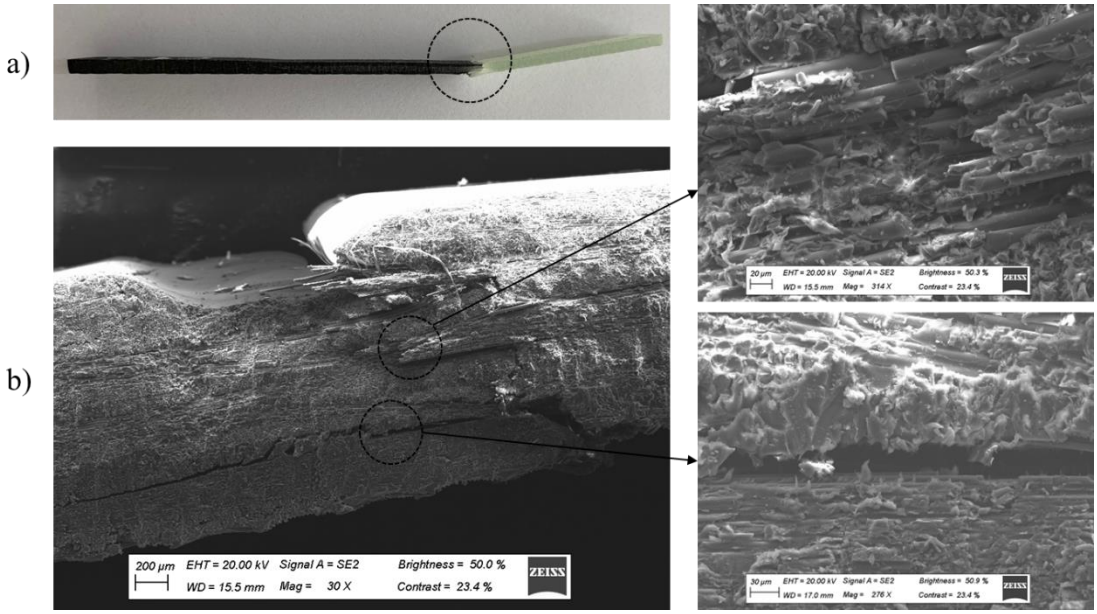


Resim 5.11. KC-2 numunesine ait mikroskop görüntüsü

5.3. Kırılma Yüzeyi Analizi

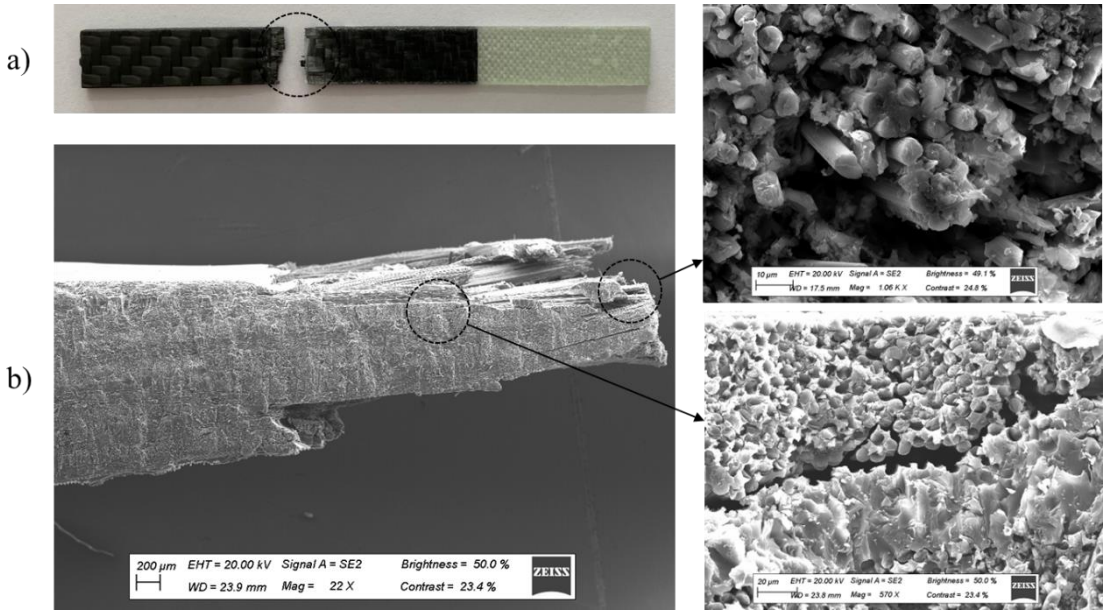
Charpy darbe testleri sonrasında kırılma yüzeylerinin incelenmesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin darbe testlerinde farklı miktarlarda enerji absorbe etmelerine neden olan ihtimaller yorumlanmıştır. Katman içi geçişe sahip numuneler ile saf numuneler arasındaki en belirgin fark kırılmanın gerçekleştiği bölge olarak gözlemlenmiştir. Tüm numunelerde darbe, numunenin merkezine uygulanmış olmasına karşın sadece saf numunelerde darbenin uygulandığı yüzeyde hasar oluşmuştur. Katman içi geçişli numunelerde hasar oluşumu farklı tiplerdeki elyafların uç uca geldiği geçiş bölgesinde gerçekleşmiştir.

KC-1 numune tipine ait SEM görüntüleri incelendiğinde kısıtlı bölgelerde katmanlar arası ayrılma ve kırılmanın gerçekleştiği arayüzde elyaf kırılmalarının gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Katmanlar arası ayrılmanın en belirgin olduğu bölge incelendiğinde karbon elyaf ve cam elyaf katmanları arasında ayrılma olduğu ancak ayrılmanın numunenin geneline yayılmadığı görülmüştür. Numunelerin orta katmanlarında yer alan cam elyaflarda kırılmalar gözlemlenmiştir. KC-1 numune tipinde katman ayrılmasının kısıtlı kalması ve cam elyaf katmanların kalınlık boyunca kırılması sonucu absorbe edilen enerji değeri KC-3 numunesinden düşük, KC-2 numunesinden yüksek çıkmıştır. KC-1 numune tipine ait makro ve SEM görüntüleri Resim 5.12’de verilmiştir.



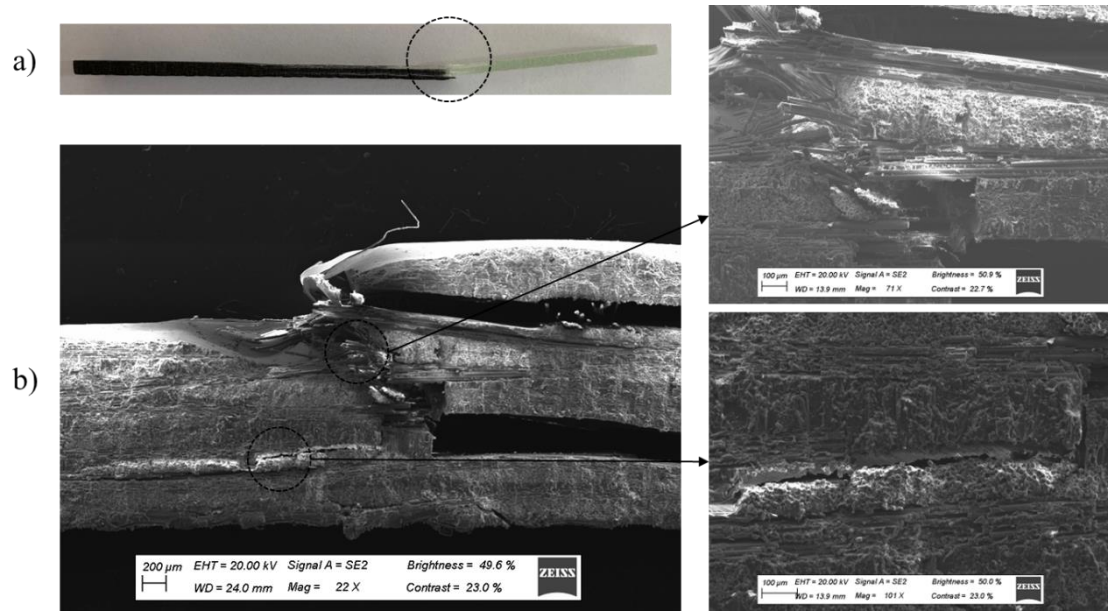
Resim 5.12. KC-1 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

KC-2 numune tipine ait SEM görüntüleri incelendiğinde kırılmanın karbon elyafların yoğun olduğu ve katman içi geçişin başladığı arayüzde kalınlık yönünde gerçekleştiği görülmüştür. Karbon elyaf kırılma yüzeyinde kırık fiberler belirgin şekilde görülmektedir. Karbon katmanları arasında bulunan matris ile fiberler arasında çok sınırlı ayrılma olduğu görülmüştür. KC-2 numune tipinde 4 kat karbon elyafın kırılması ve katman ayrılmasının kısıtlı olması sonucu en düşük absorbe edilen enerji değerine ulaşılmıştır. KC-2 numune tipine ait makro ve SEM görüntüleri Resim 5.13'de verilmiştir.



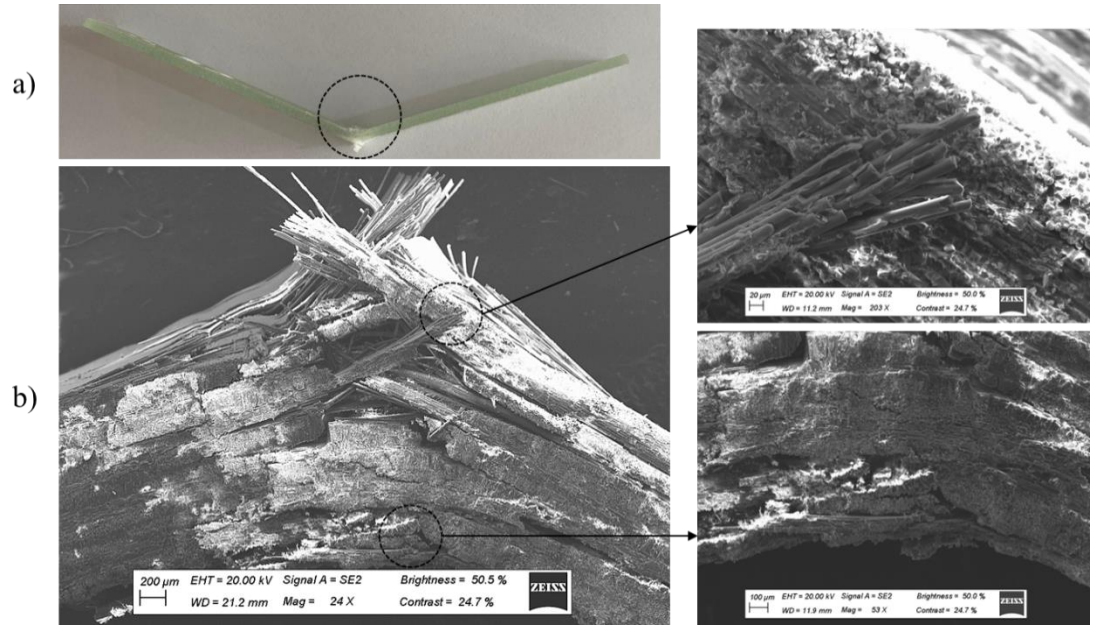
Resim 5.13. KC-2 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

KC-3 numune tipine ait SEM görüntüleri incelendiğinde katmanlar arası ayrılmanın baskın olduğu bir kırılma gerçekleştiği görülmüştür. Cam ve karbon elyaf katmanlarının numunenin geneline yayılan bir şekilde birbirlerinden ayrıldığı görülmektedir. Katman ayrılmasının yanı sıra iki cam elyaf katmanını tüm fiberlerinin kalınlık yönünde kırıldığı görülmüştür. KC-3 numune tipinde katman ayrılmasının baskın olması ve cam elyafların kopması nedeniyle katman içi geçişli numuneler arasında en yüksek absorbe edilen enerji değerine ulaşılmıştır. KC-3 numune tipine ait makro ve SEM görüntüleri Resim 5.14'de verilmiştir.



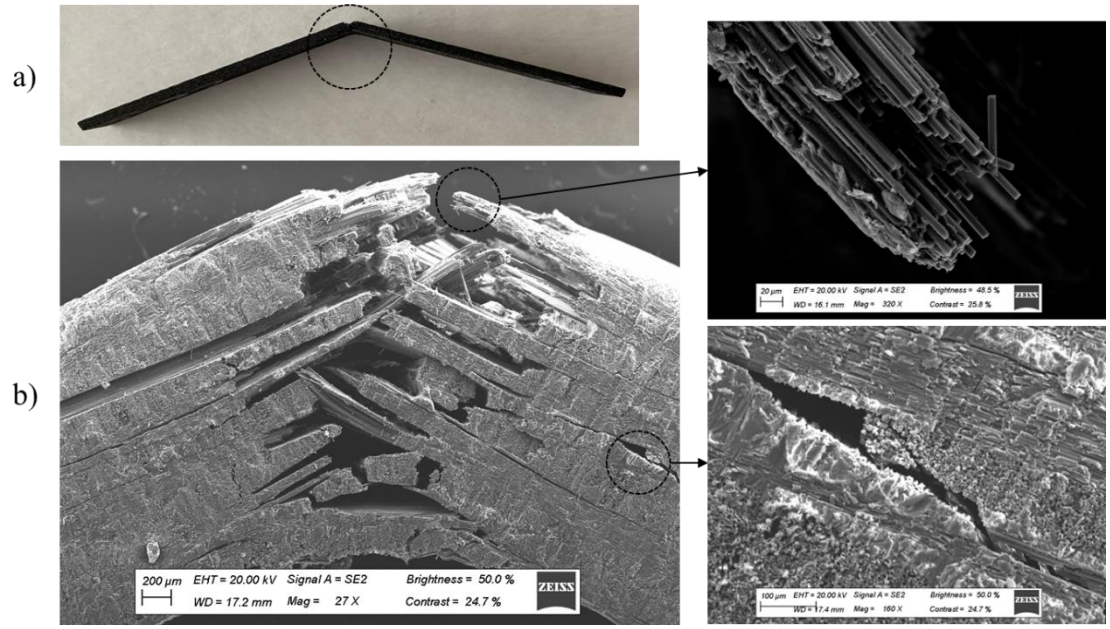
Resim 5.14. KC-3 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Saf cam elyaftan oluşan KC-4 numune tipine ait SEM görüntüleri incelendiğinde darbenin uygulandığı kesitteki tüm katmanlara yayılan ayrılmaların yanı sıra kırılmış fiberler görülmüştür. En yüksek absorbe edilen enerji değerine sahip KC-4 numunesinde kopmuş fiber uçlarının saçaklandığı gözlemlenmiştir. KC-4 numune tipine ait makro ve SEM görüntüleri Resim 5.15'de verilmiştir.



Resim 5.15. KC-4 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

Saf karbon elyaftan oluşan KC-5 numune tipine ait SEM görüntüleri incelendiğinde tüm katmanlarda fiberlerin kırıldığı görülmüştür. Darbenin uygulandığı kesite yakın bölgelerde katmanlar arası ayrılmalar gözlemlenmiştir. Ancak bu ayrılmalar KC-4 numune tipindeki kadar belirgin gerçekleşmemiş baskın hasar elyaf kopması olarak gözlemlenmiştir. KC-4 numunesinin aksine KC-5 numune tipinde kopan elyaflar saçaklanmamış ve bir arada kalmıştır. Bu durumun oluşmasının sebebi karbon elyafın gevrek bir şekilde kırılmasıdır. KC-5 numune tipine ait makro ve SEM görüntüleri Resim 5.16'da verilmiştir.



Resim 5.16. KC-5 numune tipine ait a) makro b) SEM kırılma yüzeyi görüntüleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karbon ve cam elyaflar arasında katman içi geçişe sahip karma kompozitlerin burkulma ve charpy darbe davranışları araştırılmıştır. 3 farklı tipte katman içi geçişli numuneye ek olarak saf karbon ve saf cam elyaftan oluşan numuneler test edilmiş ve sonuçlar kıyaslanmıştır.

Kompozit numunelerin üretimi için vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Elyaflar seçilen geçiş tasarımlarına sahip olacak şekilde serilmiş ve tüm kompozit paneller tek seferde kürlenmiştir. Elde edilen paneller su jeti ile kesilerek istenen ölçülere sahip test numuneleri çıkartılmıştır.

Her bir numune tipi için burkulma testlerinde 3 ve charpy darbe testlerinde 5 tekrar olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında charpy darbe testi numuneleri üzerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile hasar analizi yapılmıştır.

Burkulma testlerinde kullanılan numuneler her iki uçtan ankastre mesnet ile çekme-basma test cihazına yerleştirilmiştir. Eksenel basma kuvveti altında numunelere ait kuvvet-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Belirli bir deplasman değerine kadar numunelerin göstermiş olduğu direnç kuvveti artmış sonrasında sabit kalmıştır. Testler sırasında ölçülen maksimum kuvvet kritik burkulma kuvveti olarak isimlendirilmiştir.

Burkulma testlerinde en yüksek kuvvet değeri saf karbon numunede görülmüştür. Katman içi geçişli karma kompozit numunelere ait kuvvet değerleri, saf karbon numune ile saf cam numunelere ait kuvvet değerlerinin arasında konumlanmıştır. Aynı geçiş tipine sahip karma kompozit numunelerde karbon elyafların dış katmana yerleştirilmesi ile %2.7'lik iyileşme gözlemlenmiştir. Katmanlar arasındaki temas yüzeylerinin 2 temas yüzeyinden 3 temas yüzeyine çıkartılması ile %6.5'lik iyileşme gözlemlenmiştir.

Charpy darbe testlerinde merkezlenerek test cihazına yerleştirilen numunelere 10 J büyüklüğünde darbe uygulanmış ve numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri darbe çekicine ait kuvvet-zaman grafiği kullanılarak elde edilmiştir.

Charpy darbe testlerinde en yüksek absorbe edilen enerji değeri saf cam elyaf numunelerde gözlemlenmiştir. Burkulma testlerinin aksine darbe testlerinde katman içi geçişli karma kompozit numunelere ait absorbe edilen enerji değerleri saf numunelere ait değerler arasında konumlanmamıştır. Saf karbon numunelere ait absorbe edilen enerji değerleri 2 temas yüzeyine sahip katman içi geçişli numunelerin enerji değerlerinden daha yüksek gözlemlenmiştir. Bununla birlikte 3 temas yüzeyine sahip katman içi geçişli numuneler saf karbon numunelerden %11,5 daha yüksek enerji absorbe etmiştir. Aynı geçiş tipine sahip karma kompozit numunelerde karbon elyafların dış katmanlara yerleştirilmesi %57 oranında iyileşme sağlamıştır.

Söz konusu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Bu tez çalışmasında kullanılan katman içi geçiş tiplerinden farklı tasarımlara sahip geçiş tipleri test incelenebilir.
- Farklı elyaf malzemeleri kullanılarak oluşturulan katman içi geçişli karma kompozitlerin burkulma ve darbe davranışları araştırılabilir.
- Kompozitleri oluşturmak için kullanılan elyaf katmanı sayısı arttırılarak, katman sayısının burkulma ve darbe davranışına etkisi araştırılabilir.
- Katman içi geçişe sahip karma kompozitlere ait farklı özellikler (mekanik özellikler, sinyal geçirgenliği, kimyasal direnci vb.) araştırılabilir.
- Katman içi geçişli karma kompozit parçalar üretilerek komponent seviyesi testler gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Clyne, T. W. and Hull, D. (2019). *An introduction to composite materials*. Cambridge: Cambridge University Press.

2. Summerscales, J. and Short, D. (1978). Carbon fibre and glass fibre hybrid reinforced plastics. *Composites*, 9(3), 157-166.

3. Gururaja, M. and Rao, A. H. (2012). A review on recent applications and future prospectus of hybrid composites. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 1(6), 352-355.

4. Chawla, N. and Shen, Y. L. (2001). Mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites. *Advanced Engineering Materials,* 3(6), 357-370.

5. Kanta, D. D., Mishra, P. C., Sing, S. and Thakur, R. K. (2014). Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites—a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9, 1-12.

6. Zhang, X., Xu, Y., Zhang, X., Wu, H., Shen, J., Chen, R., Xiong, Y., Li, J. and Guo, S. (2019). Progress on the layer-by-layer assembly of multilayered polymer composites: Strategy, structural control and applications. *Progress in Polymer Science*, 89, 76-107.

7. Fuoss, E., Straznicky, P. V. and Poon, C. (1998). Effects of stacking sequence on the impact resistance in composite laminates - Part 1: parametric study. *Composite Structures,* 41(1), 67-77.

8. Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K., Sasaki, T. and Hamaguchi, Y. (2010). Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets. *Composites Part B: Engineering,* 41(5), 396-402.

9. Jones, F. R. and Huff, N. T. (2018). *Handbook of properties of textile and technical fibres*. Cambridge: Woodhead Publishing, 757-803.

10. Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. Boca Raton: CRC press.

11. Huang, X. (2009). Fabrication and properties of carbon fibers. *Materials,* 2(4), 2369-2403.

12. Newcomb, B. A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* 91, 262-282.

13. Jang, B. Z. (1992). Control of interfacial adhesion in continuous carbon and Kevlar fiber reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology,* 44(4), 333-349.

14. Khalil, Y. F. (2017). Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry. *Sustainable Production and Consumption,* 12, 16-26.

15. Han, X., Yang, D., Yang, C., Spintzyk, S., Scheideler, L., Li, P., Li, D., Geis-Gerstorfer, J. and Rupp, F. (2019). Carbon fiber reinforced PEEK composites based on 3D-printing technology for orthopedic and dental applications. *Journal of Clinical Medicine,* 8(2), 240.

16. Prasad, V. V. and Talupula, S. (2018). A review on reinforcement of basalt and aramid (Kevlar 129) fibers. *Materials Today: Proceedings,* 5(2), 5993-5998.

17. Chandramohan, D. and K. Marimuthu, *A review on natural fibers.* International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 2011. 8(2), 194-206.

18. Keleş, Ö. (2022). *Doğal fiber takviyeli hibrit kompozit üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.

19. Grigore, M. E. (2017). Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling,* 2(4), 24.

20. Hamerton, I. and Mooring, L. (2012). *Thermosets*. Cambridge: Woodhead Publishing, 189-227.

21. Vaidya, U. K. and Chawla, K. K. (2008). Processing of fibre reinforced thermoplastic composites. *International Materials Reviews*, 53(4), 185-218.

22. Jin, F. L., Li, X., and Park, S. J. (2015). Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry,* 29, 1-11.

23. Pham, H. Q. and Marks, M. J. (2000). Epoxy resins. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.*

24. Wittman, C. and Shook, G. D. (1982). *Handbook of composites*. Boston: Springer, 321-367.

25. Mourad, A. H., Zaaroura, N. and Cherupurakal, N. (2019). Wet lay-up technique for manufacturing of advanced laminated composites. *Karbala International Journal of Modern Science,* 5(1), 5.

26. Found, M. and Friend M. (1995). Evaluation of CFRP panels with scarf repair patches. *Composite Structures,* 32(1-4), 115-122.

27. Kikuchi, T., Tani, Y., Takai, Y., Goto, A. and Hamada, H. (2014). Mechanical properties of jute composite by spray up fabrication method. *Energy Procedia,* 56, 289-297.

28. Bhatt, A. T., Gohil, P. P. and Chaudhary, V. (2018). Primary manufacturing processes for fiber reinforced composites: History, development & future research trends. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.

29. Antonucci, V., Giordano, M., Imparato, S. I. and Nicolais, L. (2002). Autoclave manufacturing of thick composites. *Polymer Composites,* 23(5), 902-910.

30. Dong, C., Zhou, J., Ji, X., Yin, Y. and Shen, X. (2019). Study of the curing process of carbon fiber reinforced resin matrix composites in autoclave processing. *Procedia Manufacturing,* 37, 450-458.

31. Shen, F. C. (1995). A filament-wound structure technology overview. *Materials Chemistry and Physics,* 42(2), 96-100.

32. Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Syamsir, A., Amir, A. L., Nurazzi, N. M., Norrrahim, M. N. F., Asrofi, M., Rafidah, M., Ilyas, R. A. and Rashid, M. Z. A. (2023). Filament-wound glass-fibre reinforced polymer composites: Potential applications for cross arm structure in transmission towers. *Polymer Bulletin*, 80(2), 1059-1084.

33. Shojaei, A., Ghaffarian, S. R. and Karimian, S. M. H. (2003). Modeling and simulation approaches in the resin transfer molding process: a review. *Polymer Composites,* 24(4), 525-544.

34. Ageyeva, T., Sibikin, I., and Kovács, J. G. (2019). A review of thermoplastic resin transfer molding: Process modeling and simulation. *Polymers,* 11(10), 1555.

35. Dong, C. (2008). A modified rule of mixture for the vacuum-assisted resin transfer moulding process simulation. *Composites Science and Technology,* 68(9), 2125-2133.

36. Ekuase, O. A., Anjum, N., Eze, V. O., Okoli, O. I. (2022). A review on the out-of-autoclave process for composite manufacturing. *Journal of Composites Science*, 6(6), 172.

37. Phillips, L. (1969). Improving racing-car bodies. *Composites*, 1(1), 50-51.

38. Irina, M., Azmi, A., Tan, C., Lee, C. and Khalil A. (2015). Evaluation of mechanical properties of hybrid fiber reinforced polymer composites and their architecture. *Procedia Manufacturing*, 2, 236-240.

39. Devi, L. U., Bhagawan, S., and Thomas, S. (2010). Dynamic mechanical analysis of pineapple leaf/glass hybrid fiber reinforced polyester composites. P*olymer composites*, 31(6), 956-965.

40. Santhanam, V., Dhanaraj, R., Chandrasekaran, M., Venkateshwaran, N. and Baskar, S. (2021). Experimental investigation on the mechanical properties of woven hybrid fiber reinforced epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1850-1853.

41. Naito, K. (2022). Static and fatigue tensile properties of carbon/glass hybrid fiber-reinforced epoxy composites. *Scientific Reports,* 12(1), 6298.

42. Aydin, M. R., Acar, V., Cakir F., Gündoğdu, Ö. and Akbulut, H. (2022). Comparative dynamic analysis of carbon, aramid and glass fiber reinforced interply and intraply hybrid composites. *Composite Structures*, 291.

43. Aydın, M. R., Acar, V., Yapıcı F., Yıldız, K., Topçu, M. V. ve Gündoğdu Ö. (2018). Inter-ply Hibrit Kompozit Yapılarda Elyaf Diziliş Sıralamasının Mekanik ve

Dinamik Özelliklere Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(3), 255-263.

44. Rajpurohit, A., Joannés, S., Singery V., Sanial P., Laiarinandrasana, L. (2020). Hybrid effect in in-plane loading of carbon/glass fibre based inter-and intraply hybrid composites. *Journal of Composites Science*, 4(1), 6.

45. Fang, Q., Chen, L., Wang, W. and Zhang, C. (2022). Study on tensile properties of carbon fiber/epoxy laminated woven composites with ply splicing. *Journal of Industrial Textiles*, 52.

46. Wang, F. Y., Zhang, G. L., Chen, L., Chen, G. W. and Zhou, Q. (2010). Study on the tensile strength loss rate of glass fiber 2D woven fabric reinforced laminates with ladder splicing. *Applied Mechanics and Materials*, 34, 1855-1858.

47. Chen, D., Wang, M., Shen, Y. and Arakawa, K. (2017, 20-25 August). *Tensile properties of FRP ply splice structures.* 21st International Conference on Composite Materials, Xi'an.

48. Zhang, G. L., Wang, F. Y., Li, J. L., Chen, G. W. and Chen, L. (2010). Study on the mechanical performance of glass fiber 2D woven fabric laminated composites with different splicing shape and interval length. *Applied Mechanics and Materials*, 34, 1845-1849.

49. Baba, B. O. (2007). Buckling behavior of laminated composite plates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26(16), 1637-1655.

50. Yeter, E., Erkliğ, A. and Bulut M. (2014). Hybridization effects on the buckling behavior of laminated composite plates. *Composite Structures*, 118, 19-27.

51. Geng, X., Ji, F., Wang, J., Dou, W., Wang, P. and Yue, Z. (2017). Experimental and numerical investigations of compression stability of stiffened composite panel with ply interleaving. *Journal of Composite Materials*, 51(26), 3647-3656.

52. Kayıran, H. (2018). *Farklı ortam koşullarına maruz hibrit kompozit plakalarda burkulma davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

53. Erdem, S. (2020). *Vakum infüzyon yöntemiyle yama yapılmış hibrid kompozit plaklarda lineer olmayan burkulma analizi*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

54. Caminero, M., Rodríguez, G. and Muñoz, V. (2016). Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. *Composite Structures*, 136, 345-357.

55. Uzay, Ç., Acer, D. and Geren, N. (2019). *I*mpact strength of interply and intraply hybrid laminates based on carbon-aramid/epoxy composites. *European Mechanical Science*, 3(1), 1-5.

56. Liu, B., Han, Q., Zhong, X. and Lu, Z. (2019). The impact damage and residual load capacity of composite stepped bonding repairs and joints. *Composites Part B: Engineering*, 158, 339-351.

57. Hong, S. W., Ahn, S. S., Li, H., Kim, J. K., Ko, S. J., Koo, J. M. and Seok C. S. (2013). Charpy impact fracture characteristics of CFRP composite materials according to variations of fiber array direction and temperature. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14, 253-258.

58. Heimbs, S., Wagner, T., Viana Lozoya, J. T., Hoenisch, B. and Franke, F. (2019). Comparison of impact behaviour of glass, carbon and Dyneema composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(3), 951-966.



Gazili olmak ayrıcalıktır