
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HİBRİT VE GEÇİŞLİ YAPIDAKİ KARBON-CAM KOMPOZİTLERİN ÇEKME VE EĞME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Mehmet ÇOPUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2025

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.

Mehmet ÇOPUR
21/01/2025

HİBRİT VE GEÇİŞLİ YAPIDAKİ KARBON-CAM KOMPOZİTLERİN ÇEKME VE EĞME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet ÇOPUR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Havacılık ve otomotiv başta olmak üzere birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Takviye malzemesi olarak yaygın kullanımı olan karbon, cam, aramid, bazalt vb. fiberler katmanlar arası ve katma içi hibritleştirme yöntemleriyle malzemelerin sahip olduğu özgül dayanım, rijitlik, tokluk, termal genleşme, elektrik yalıtımı, korozyon direnci gibi mekanik, elektrik ve kimyasal anlamda farklı özellikler bir malzemede üstün performans sergileyecek şekilde birleştirilebilmektedir. Malzemelerde üretim yöntemlerinde görülen kısıtlar nedeniyle karmaşık geometriye sahip büyük ebatlı kompozit ürünlerin üretiminde fiber kumaşlar üzerinde kıvrılmalar ve kırışıklıklar görülebilmektedir. Çözüm olarak malzeme üretiminde fiber serimi sırasında kumaşlar kesilerek geçişli (eklemli) yapı oluşturulmaktadır ve kumaş büküm bölgelerinde kırışıklıkların oluşması önlenmektedir. Bu çalışmada hibritleştirme türüne ve geçişli-geçişsiz yapı türüne göre malzemenin çekme ve eğme kuvvetleri altında mekanik davranışlarının incelemesi amacıyla Vakum Destekli Reçine Transfer Yöntemiyle (VARTM) kompozit plakalar üretilmiştir. Sadece karbon, sadece cam, katmanlar arası hibrit karbon-cam ve katman içi hibrit karbon-cam plakalar geçişli ve geçişsiz yapıda üretilmiş ve plakalar kesilerek çekme ve eğme numuneleri elde edilmiştir. Sadece karbondan oluşan numuneler çekme ve eğme testlerinde en iyi performansı sergilemiştir. Hibrit numuneleri içinde ise katman içi hibrit numuneler daha iyi çekme ve eğme performansı sergilemiştir. Ayrıca geçişli yapılarda çekme ve eğme dayanımlarının hangi oranda düştüğü tespit edilmiş ve numune tipleri arasında düşüş oranlarında karşılaştırma yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Hibrit kompozitler, Geçişli kompozitler, Çekme, Eğme
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Doç. Dr. Elmas SALAMCI
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Çağrı TÜZEMEN

INVESTIGATION OF TENSILE AND BENDING PERFORMANCES OF HYBRID AND TRANSITIONAL STRUCTURE CARBON-GLASS COMPOSITES

(M. Sc. Thesis)

Mehmet ÇOPUR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

The use of composite materials is becoming widespread in many sectors, especially aerospace and automotive. Fibers such as carbon, glass aramid, basalt, etc., which are widely used as reinforcement materials, can be combined with different mechanical, electrical and chemical properties such as specific strength, stiffness, toughness, thermal expansion, electrical insulation, corrosion resistance in a material with superior performance by means of interlayer and intra-layer hybridization methods. Due to limitations in the production methods of materials, folds and wrinkles can be seen on fiber fabrics in the production of large-sized composite products with complex geometry. As a solution, the fabrics are cut during fiber laying in material production to form a transitional (articulated) structure and wrinkles are prevented in the fabric bending areas. In this study, composite plates were fabricated by Vacuum Assisted Resin Transfer Method (VARTM) in order to investigate the mechanical behavior of the material under tensile and bending forces according to the type of hybridization and the type of transition and non-transition structure. Carbon-only, glass-only, interlayer hybrid carbon-glass and interlayer hybrid carbon-glass plates were fabricated with and without transitions and the plates were cut to obtain tensile and flexural specimens. The specimens consisting only of carbon showed the best performance in tensile and flexural tests. Among the hybrid specimens, in-layer hybrid specimens exhibited better tensile and flexural performance. In addition, the rate at which the tensile and flexural strengths decreased in transitional structures was determined and the results were interpreted by comparing the decrease rates between the specimen types.

Science Code : 91417
Keywords : Hybrid composites, Transitional composites, Tensile, Bending
Page Number : 73
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Elmas SALAMCI
Second 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, kompozit plakaların üretiminde yardımları için Dr. Özge GENÇ'e, testlerin gerçekleştirilmesinde yardımları için TOBB ETÜ Teknoloji Merkezi Müdürü Fırat MEMU'ya teşekkürlerimi sunarım. Tez süresince yürütülen çalışmalarda çalışma ortamı sağlayan ve imkanlarından faydalandığım Gazi Üniversitesi'ne ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne 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 xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. KOMPOZİT MALZEMELER 3

2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler 3

2.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler 3

2.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler 4

2.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler 5

2.2. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler 6

2.2.1. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler 6

2.2.2. Takviye elemanı şekline göre kompozit malzemeler 8

2.3. Hibrit Kompozit Malzemeler 9

2.3.1. Katmanlararası (interply) hibrit kompozit malzemeler 10

2.3.2. Katmaniçi (intraply) hibrit kompozit malzemeler 10

2.3.3. Karışık (intermingled) hibrit kompozit malzemeler 10

2.4. Katmaniçi Geçişli Kompozit Malzemeler 11

2.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri 12

Sayfa

2.5.1. Elle yatırma yöntemi 12
2.5.2. Sprey yatırma yöntemi 13
2.5.3. Reçine transfer (RTM) yöntemi 14
2.5.4. Vakum torbalama yöntemi 14
2.5.5. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi 15
2.5.6. Presleme yöntemi 16
2.5.7. Pultrüzyon yöntemi 16
2.5.8. Filament sarma yöntemi 17
2.5.9. Otomatik fiber serme (AFP) yöntemi 17
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 19
4. MALZEME VE YÖNTEM 27
4.1. Malzemeler ve Numuneler 27
4.2. Numunelerin Hazırlanması 30
4.3. Uygulanacak Testler 35
4.3.1. Çekme testi 35
4.3.2. Üç nokta eğme testi 37
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA 39
5.1. Çekme Testi Sonuçları 39
5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları 52
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 67
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ 73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Hibrit kompozit türleri 11

Çizelge 3.1. Karbon-keten çekme dayanımları 24

Çizelge 3.2. Karbon-keten yorulma ömürleri 24

Çizelge 3.3. Çekme ve eğme dayanımları 26

Çizelge 4.1. Fiber özellikleri 27

Çizelge 4.2. Numune tipleri ve özellikleri 28

Çizelge 4.3. Malzeme birim maliyetleri 29

Çizelge 4.4. Numunelerin kalınlık değerleri 35

Çizelge 5.1. T-testiyle ilgili formüller 50

Çizelge 5.2. P değerinin yorumlanması 50

Çizelge 5.3. Geçişsiz karbon, geçişsiz karbon-cam ve geçişsiz hibrit dokuma çekme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları 50

Çizelge 5.4. Geçişli karbon, geçişli karbon-cam ve geçişli hibrit dokuma çekme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları 51

Çizelge 5.5. Geçişsiz karbon, geçişsiz karbon-cam ve geçişsiz hibrit dokuma eğme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları 62

Çizelge 5.6. Geçişli karbon, geçişli karbon-cam ve geçişli hibrit dokuma eğme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları 63

Çizelge 5.7. Ortalama değerlere göre geçişli yapılarda geçişsiz yapılara oranla dayanım düşüşü 64

Çizelge 5.8. Ortalama değerlere göre geçişli yapılarda geçişsiz yapılara oranla dayanım düşüşünün istatistiksel değerlendirilmesi 65

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Seramik matrisli kompozit sınıflandırma 5

Şekil 2.2. Fiber çeşitleri 7

Şekil 3.1. Vestas V90 3.0 MW rüzgar türbini malzeme oranları 21

Şekil 3.2. Karbon, cam, KCCK ve CKKC numunelerinin eğilme dayanımları 23

Şekil 5.1. Karbon ve karbon geçişli gerilme-gerinim grafiği 41

Şekil 5.2. Cam ve cam geçişli gerilme-gerinim grafiği 43

Şekil 5.3. Karbon-cam ve karbon-cam geçişli gerilme-gerinim grafiği 45

Şekil 5.4. Hibrit dokuma ve hibrit dokuma geçişli gerilme-gerinim grafiği 47

Şekil 5.5. Çekme dayanımları bar grafiği 48

Şekil 5.6. Geçişsiz yapıdaki numunelere ait gerilme-gerinim grafiği 48

Şekil 5.7. Geçişli yapıdaki numunelere ait gerilme-gerinim grafiği 51

Şekil 5.8. Karbon ve karbon geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği 54

Şekil 5.9. Cam ve cam geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği 56

Şekil 5.10. Karbon-cam ve karbon-cam geçişli eğme gerilme gerinim grafiği 58

Şekil 5.11. Hibrit dokuma ve hibrit dokuma geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği 60

Şekil 5.12. Eğme dayanımları bar grafiği 61

Şekil 5.13. Geçişsiz yapıdaki numunelere ait eğme gerilme-gerinim grafiği 61

Şekil 5.14. Geçişli yapıdaki numunelere ait eğme gerilme-gerinim grafiği 63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Al-SiC metal matrisli kompozit malzeme 4

Resim 2.2. Termoplastikler ve termosetlerin bağ yapısı 6

Resim 2.3. Takviye elemanı tipleri 9

Resim 2.4. Geçişli kompozitlerde geçiş tipleri 12

Resim 2.5. Elle yatırma yöntemi 13

Resim 2.6. Sprey yatırma yöntemi 13

Resim 2.7. Reçine transfer yöntemi 14

Resim 2.8. Vakum torbalama yöntemi 15

Resim 2.9. Vakum destekli reçine transfer yöntemi 15

Resim 2.10. Pultrüzyon yöntemi 16

Resim 2.11. Filament sarma yöntemi 17

Resim 2.12. Otomatik fiber serme yöntemi 18

Resim 3.1. Chevrolet Corvette C8 kompozit parçaları 20

Resim 3.2. Vestas V90 3.0 MW rüzgar türbini 21

Resim 3.3. Curvelle Quaranta katamaran 22

Resim 3.4. Geçiş tipleri 25

Resim 4.1. Çekme ve eğme numunelerindeki geçişli yapı temas aralığı 30

Resim 4.2. Döner kesici (rotary cutter) 30

Resim 4.3. Ayırıcı film üzerine yerleştirilmiş fiber kumaşlar 31

Resim 4.4. Akış filesi, soyma kumaşı ve spiral boru uygulaması 32

Resim 4.5. Reçine transferinin gerçekleştiği aşama 33

Resim 4.6. Geçişsiz yapıdaki numuneler 33

Resim 4.7. Geçişli yapıdaki numuneler 34

Resim **Sayfa**

Resim 4.8. Tab ölçüleri 34

Resim 4.9. Tab uygulaması yapılan çekme numunesi 35

Resim 4.10. Instron 3369 test cihazı 36

Resim 4.11. Çenelere yerleştirilmiş çekme numunesi 36

Resim 4.12. Test cihazına yerleştirilmiş eğme numunesi 37

Resim 5.1. Test sonrası karbon numuneler 39

Resim 5.2. Test sonrası karbon geçişli numuneler 40

Resim 5.3. Test sonrası cam numuneler 42

Resim 5.4. Test sonrası cam geçişli numuneler 42

Resim 5.5. Test sonrası karbon-cam numuneler 44

Resim 5.6. Test sonrası karbon-cam geçişli numuneler 44

Resim 5.7. Test sonrası hibrit dokuma numuneler 46

Resim 5.8. Test sonrası hibrit dokuma geçişli numuneler 46

Resim 5.9. Karbon numune ve kırılma anı görüntüleri 53

Resim 5.10. Karbon geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri 53

Resim 5.11. Cam numune ve kırılma anı görüntüleri 55

Resim 5.12. Cam geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri 55

Resim 5.13. Karbon-cam numune ve kırılma anı görüntüleri 57

Resim 5.14. Karbon-cam geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri 57

Resim 5.15. Hibrit dokuma numune ve kırılma anı görüntüleri 59

Resim 5.16. Hibrit dokuma geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri 59

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
°C	Santigrat Derece
dk	Dakika
F	Kuvvet
GPa	Gigapascal
kN	Kilonewton
mm	Milimetre
MPa	Megapascal
N	Newton
n1	Birinci Grubun Örneklem Büyüklüğü
n2	İkinci Grubun Örneklem Büyüklüğü
Pa	Pascal
s1	Birinci Grubun Standart Sapması
s2	İkinci Grubun Standart Sapması
$\bar{x}$1	Birinci Grubun Ortalaması
$\bar{x}$2	İkinci Grubun Ortalaması
%	Yüzde
°	Derece

Kısaltmalar	Açıklamalar
AFP	Otomatik Fiber Serme
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATL	Otomatik Bant Serme
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
TOBB	Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

1. GİRİŞ

İmalat sanayinin en önemli bileşenlerinden biri malzemedir. İmalat sanayi sektörlerinde metal, metal alaşımları, ahşap, seramik vb. birçok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Endüstrinin gelişmesiyle beraber imalat sanayide kullanılan geleneksel malzemelerin sahip olduğu mekanik, fiziksel, kimyasal, elektriksel özellikleri yetersiz kalmıştır. Bu durum alternatif malzeme arayışına, mevcut malzemelerin özelliklerini iyileştirme ve geliştirme çalışmalarına yönelimi arttırmaktadır. Son zamanlarda alternatif malzeme olarak kompozit malzemeler tercih edilmekte ve geleneksel malzemelerin yerini alacak çalışmalar sürdürülmektedir. Kompozit malzemeler, halihazırda mevcut olan malzemelerin kendi özelliklerini muhafaza ederek ve kimyasal bir çözünme olmadan farklı tiplerde ve oranlarda birleştirilerek oluşturulan malzemelerdir. Matris ve takviye malzemelerindeki farklılıklara göre sınıflandırılan kompozit malzemelerin arasında imalat sanayide en fazla kullanılan takviye malzemesi sürekli fiberlerden oluşan polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Mevcut polimer matrisli kompozitlerin de geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir ve henüz sanayide kullanımı düşük seviyelerde olmasına rağmen hibrit kompozit malzemeler üzerinde akademik çalışmalar giderek artmaktadır. Hibritleştirme ile genel olarak malzemeye yeni bir malzeme özelliği eklemek, daha üstün malzeme özelliği elde etmek veya üretim ve malzeme maliyetini düşürmek amaçlanmaktadır [1].

Hibritleştirme, sürekli fiberlerden oluşan kompozit malzemelerde temelde katman içi (Intraply) ve katmanlar arası (Interply) olarak ikiye ayrılır. Katmanlar arası hibrit kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek ve bu özellikleri iyileştirmek amaçlı birçok akademik çalışma bulunmasına rağmen katman içi hibrit kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar, uygun takviye malzemesine erişimin zor olmasından dolayı sınırlı sayıdadır [2].

Kompozit malzemeler uçak gövdesi, otomobil gövdesi ve şasisi, raylı sistem araçlarının bojileri, tekne ve yat karinaları, rüzgar türbini kanatları gibi malzeme boyutlarının yüksek olduğu komponentlerde kullanılabilmektedir. Üretim sırasında boyutları yüksek olan ve karmaşık geometriye sahip olan komponentlerde geçişli (eklemli) yapı oluşturularak üretim gerçekleştirilebilmektedir. Bu geçiş tipleri veya sayıları ile ilgili farklı uygulamalar ve akademik çalışmalar mevcuttur [3].

Bu tez çalışmasında katman içi ve katmanlararası hibrit kompozit malzemelerin geçişli ve geçişsiz olarak çekme ve eğme numuneleri hazırlanmış ve numuneler üzerinde çekme testleri ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir. Hibritleştirme tipine göre, geçişli ve geçişsiz malzeme yapısına göre, hibritleştirilmiş malzemenin geçişli ve geçişsiz malzeme yapısına göre kompozit numunelerin çekme ve eğme performansı incelenmiştir. Kompozit malzemeler hibritleştirildiğinde ve geçişli yapılar olarak imal edildiğinde mekanik özelliklerin nasıl ve ne oranda etkileneceği bu tez çalışmasında araştırılmıştır.

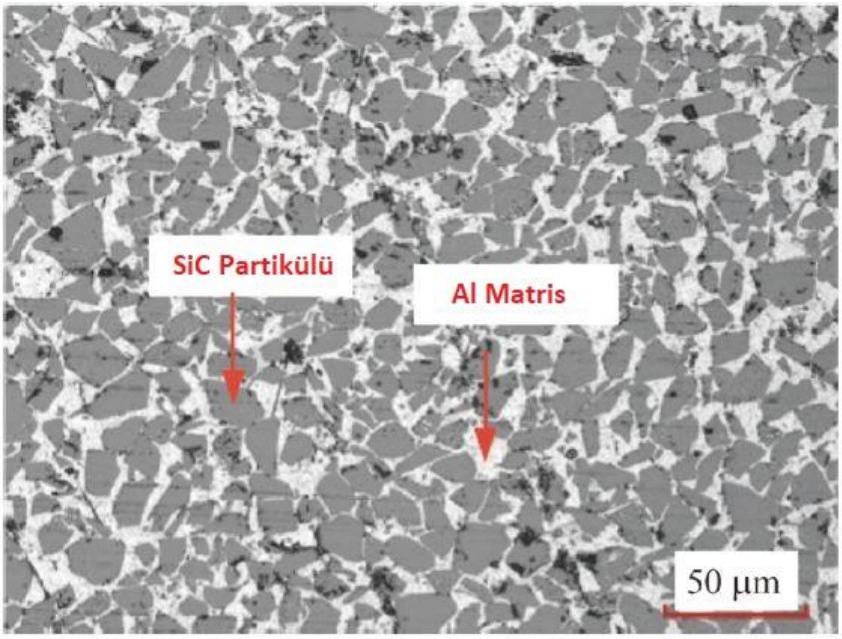
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin kendi özelliklerini kaybetmeden ve birbirleri içinde çözünmeden birleştirilerek yeni malzeme elde edilmesiyle oluşturulur. Kompozit malzemelerde dayanım, darbe direnci, tokluk, sıcaklık direnci vb. malzeme özellikleri yönünden daha iyi performans gösteren malzemeye takviye malzemesi denir. Takviye malzemesi olarak kullanılan fiberler, partiküller vb. arasında dolgu görevi görüp takviye elemanları arasındaki bağlantıyı sağlayan ve yapıyı bir bütün olarak tutan malzemelere matris malzemesi denir.

2.1. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

2.1.1. Metal matrisli kompozit malzemeler

Matris malzemesi olarak çoğunlukla alüminyum, magnezyum, kobalt, titanyum, bakır vb. metal veya bu metallerin alaşımları ve takviye malzemesi olarak SiC, TiC, B_4C, Si_3N_4, AlN, TiB_2, Al_2O_3, Y_2O_3, ZrO_2 gibi karbürler, oksitler, nitrürler, borürler ve diğer metaller tercih edilir. Takviye elemanları parçacık veya fiber halinde kullanılabilmektedir. Düşük dayanıma sahip matris malzemesinin dayanımını arttırma, korozyona karşı malzeme direncini arttırma, yüksek sıcaklıktaki malzemenin aşınma direncini iyileştirme amaçlı uygulamalara sıklıkla rastlanır. Alüminyum silikon karbür (Al-SiC), alüminyum bor karbür (Al-B_4C), nikel alümina (Ni-Al_2O_3) birer metal matrisli kompozit malzeme örneğidir [4].

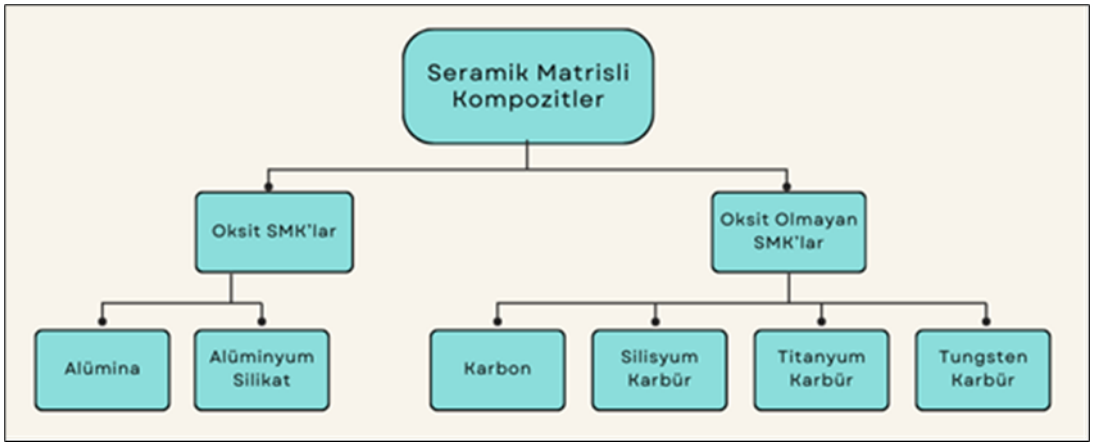


Resim 2.1. Al-SiC metal matrisli kompozit malzeme [4]

2.1.2. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramikler, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sertlik, kimyasal koruma, aşınma direnci gibi malzeme özelliklerine sahip malzemeler olarak bilinir. Bununla beraber aşırı kırılgan davranış sergilemesi, erken çatlak oluşumu meydana gelmesi, düşük kırılma tokluğu ve düşük termal şok direnci sergilemesi seramik malzemelerin doğrudan kullanımında engel teşkil etmektedir. Seramik matrisli kompozitler malzemedeki bu sorunların çözümü için geliştirilmektedir. Çok lifli takviye elemanlarıyla güçlendirilen seramik matrisli kompozitler çatlak oluşumunda köprü oluşturarak malzemenin dayanımını arttırmakta ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir [5].

Seramik matrisli kompozitlerde matris malzemesi temelde oksitler ve oksit olmayan malzemeler olarak ikiye ayrılır. Alümina, alüminasilikat oksit olanlara karbon, silicon karbür, bor karbür, silikon nitrür ise oksit olmayan matris malzemelerine örnektir. Karbon, SiC, Alümina (Al_2O_3), metal karbürler gibi malzemeler fiber, partikül veya whisker formda olacak şekilde takviye malzemelesi olarak kullanılabilmektedir [5].



Şekil 2.1. Seramik matrisli kompozit sınıflandırma [5]

2.1.3. Polimer matrisli kompozit malzemeler

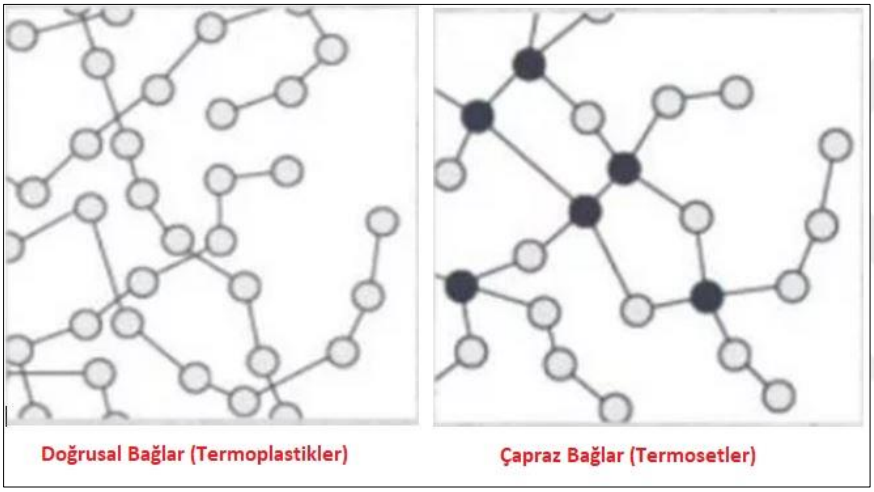
Metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında polimer matrisli kompozitlerin sanayide kullanımı daha yaygındır ve polimer matrisli kompozitler üzerinde yapılan akademik çalışma daha fazladır. Polimer matrisli kompozitler havacılık, otomotiv, denizcilik, enerji, inşaat başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır. Özgül dayanımlarının genel itibari ile yüksek olmasından dolayı havacılık sektörü polimer matrisli kompozitlerin kullanımında ve yaygınlaşmasında öncülük etmiştir. Polimerler kompozit malzemede ısıya, neme, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı direnç sağlar. İşlenebilmeyi ve şekillendirilebilmeyi kolaylaştırır. Hafiflik sağlar ve kompozit malzemenin özgül dayanımını arttırır. Kompozit malzemelerde kullanılan polimerler genel olarak termosetler ve termoplastikler olarak ikiye ayrılır [6].

Termosetler

Termosetlerin termoplastiklerle arasında en temel fark tekrar kullanılamamasıdır. Kürlenme gerçekleştikten sonra geri dönüştürülemezler. Termosetlerin yapısında güçlü çapraz kovalent bağlar mevcuttur. Termosetler daha yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Kürlendiklerinde kimyasal değişim meydana geldiği için yeteri kadar ısı verildiğinde erime meydana gelmez, yanarlar. Sertlik ve dayanımları, boyutsal kararlılıkları daha iyidir. Aynı zamanda daha kırılgandırlar ve daha uzun kürlenme sürelerine sahiptirler. Termoset polimerlere epoksiler, polyesterler, silikonlar, melaminler, vinilesterler, fenolikler örnek verilebilir [7].

Termoplastikler

Termoplastikler, zayıf doğrusal bağlardan oluşmaktadır ve kürlendikten sonra ısıtıldığında eski haline döner, tekrar kullanılabilirler. Daha esnektirler ve şekillendirilebilmeleri daha kolaydır. Termoplastiklerin darbe dayanımları da daha iyidir. Termosetlere göre daha yumuşak ve hafif malzemelerdir. Korozyon direnci ve elektrik yalıtımları yüksektir. Metal malzemelerle beraber gerçekleştirilecek uygulamalarda metallere yapışma kabiliyetleri daha iyi olduğu için tercih edilir. Termoplastiklere örnek olarak polietilen, polipropilen, poliamid, polivinil klorür, polikarbonat verilebilir [7].



Resim 2.2. Termoplastikler ve termosetlerin bağ yapısı [8]

2.2. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde takviye elemanının malzemesine göre ve şekline göre iki farklı sınıflandırma yapılabilir.

2.2.1. Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

Fiberler malzeme tipine göre doğal fiberler ve sentetik fiberler olarak ikiye ayrılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin yaygın olarak kullanılmaya başladığı ilk dönemlerde sentetik fiberler ağırlıklı olarak kullanılmaktaydı. Günümüzde doğal fiberler üzerinde yapılan çalışmaların artmasıyla beraber doğal fiberlere sahip kompozit malzemeli

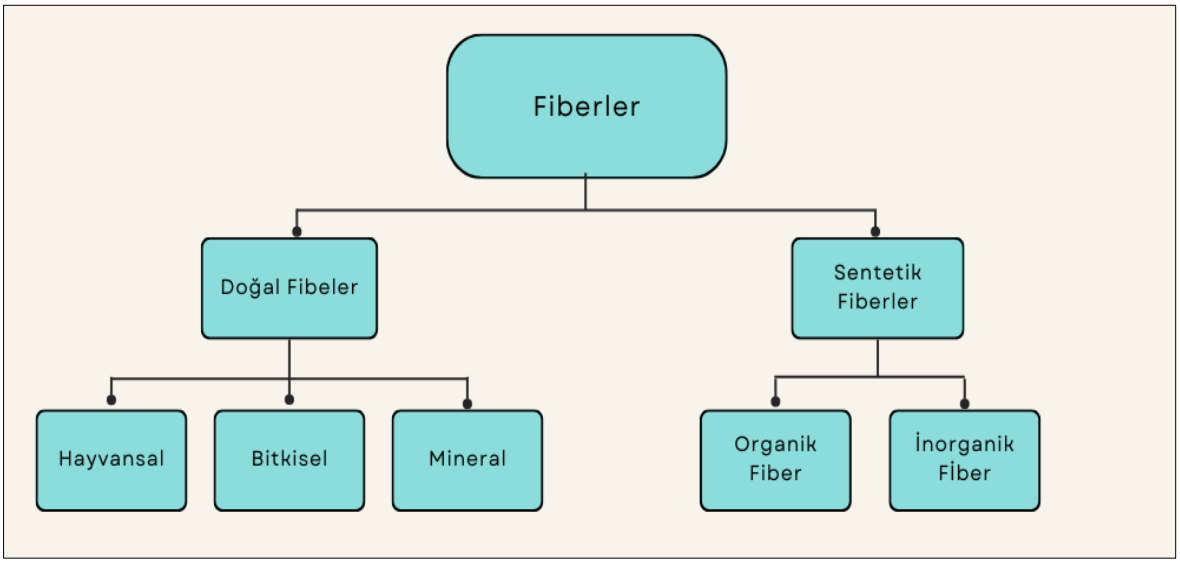
ürünler mevcuttur. Doğal fiber ve sentetik fiber karışımıyla oluşturulan hibrit kompozit malzemeler üzerinde yapılan çalışmaların sayısı da artmaktadır.

Sentetik fiberler

Sentetik fiberler yapay olarak üretilen fiberlerdir. Organik ve inorganik takviyelerle sentetik fiberler üretilir. Karbon, aramid, polietilen vb. organik takviyelere; cam, alümina, metaller vb. takviyeler ise inorganik takviyelere örnektir. Geleneksel lif çekimi, çözücüyle ayırma, kimyasal ayırma gibi yöntemlerle sentetik fiberler üretilebilir. Sentetik fiberler, üretim yöntemlerinden dolayı sentetik fiberlere göre daha maliyetlidir [9].

Doğal fiberler

Doğal yollarla elde edilebilen fiberlerdir. Asbest gibi kayaçlardan elde edilen mineral kaynaklı; jüt, keten, pamuk gibi bitkisel kaynaklı; yün, ipek vb. hayvansal kaynaklı doğal fiberler bulunmaktadır. Doğal fiberlerin sürdürülebilir, düşük maliyetli, çevreci ve üretimi sırasında düşük karbon emisyonuna sahip olması açısından avantajları bulunmaktadır. Bazı spor ürünlerinin, elektronik ürünlerin ve yapısal malzemelerin üretiminde doğal fiberler tercih edilmektedir[10].



Şekil 2.2. Fiber çeşitleri [1]

2.2.2. Takviye elemanı şekline göre kompozit malzemeler

Partiküller

Kompozit malzemede toz veya parçacık halinde bulunan takviye elemanlarıdır. Metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemelerde partikül takviye elemanı kullanımı daha fazladır. Partiküller matris içerisinde homojen dağılım gösterir ve malzemenin mekanik özellikleri yöne bağımlı olarak değişmez. Bazı metal matrisli kompozitlerde partiküller metal malzemenin dislokasyon boşluğuna yerleşerek mikro yapıda kayma hareketini engeller ve kompozit malzemenin daha iyi mekanik özellik göstermesine neden olur [11].

Süreksiz fiberler

Daha düşük boyutlarda bulunan fiberlerin süreksiz ve rastgele matris içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzeme türüdür. Süreksiz fiberler matris içerisinde partikül takviyeler kadar olmasa da homojen dağılır. Süreksiz fiberler, malzemenin yönüne göre mekanik özelliklerin değişmediği veya daha az oranda değiştiği için partikül takviyeli malzemelerle benzerlik gösterir [12].

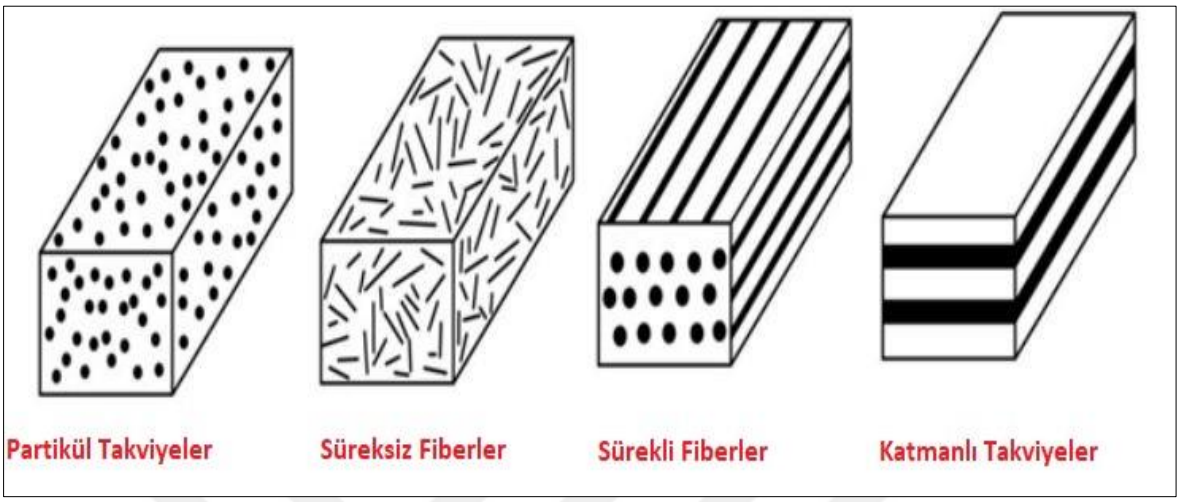
Sürekli fiberler

Takviye malzemesi kompozit malzeme boyunca tek yönde veya daha fazla yönde uzanan fiberlerden oluşur. Polimer matrisli malzemelerde daha sık görülmesiyle beraber sürekli fiberler, metal ve seramik matrislerle de uygulanabilmektedir. Kompozit malzeme fiberlerin boyuna yerleştirildiği düzlemde daha iyi mekanik performans gösterir. Fiberler ihtiyaca göre farklı yönlerde ve açılarda yerleştirilebilmektedir. Karbon fiberler, cam fiberler, aramid fiberler, metal fiberler en yaygın kullanılan takviye elemanlarıdır [12].

Katmanlı takviye elemanları

Katmanlı yapı kompozitlerde matris ve takviye malzemesi katmanlar halinde yer alır. Metal-metal, metal-seramik, seramik-seramik, polimer-metal gibi farklı tiplerde katmanlı kompozit yapı oluşturulabilmektedir. Matrisle takviye malzemesi arasında bağ oluşturmak için

presleme, yapıştırma, fırınlama, patlatma, difüzyon, yüzey kaplama vb. özel işlemler gerekebilmektedir [13].



Resim 2.3. Takviye elemanı tipleri [14]

Sandviç tipi takviye elemanları

İki dış katman ve iç katmandan oluşan kompozit malzeme türüdür. Katmanlar levha halindeki yapılardan oluşur. Genellikle dış katmanlar aynı malzemeden ve iç katman ise farklı malzemeden oluşur. Dış katmanların sertlik ve mukavemet açısından mekanik özellikleri daha iyidir. İç katman ise hafif ama daha kalın tabakadan meydana gelir ve iç katman levha yapısında olabildiği gibi altıgen arı peteği şeklinde yapılar da mevcuttur. Bu tür kompozit malzemelerde levha yapısından dolayı delaminasyon riski yüksektir [15].

2.3. Hibrit Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde hibritleştirme işlemi farklı malzeme özellikleri gösteren iki veya daha fazla takviye malzemesinin bir matrise yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Farklı tipte takviye elemanlarının sahip olduğu farklı üstün malzeme özellikleri tek bir malzemede toplanır. Sürekli veya süreksiz fiberler hibritleştirme uygulamalarında kullanılabilmektedir. Hibritleştirme uygulamaları maliyet düşürme, malzeme özelliklerini iyileştirme, daha çevreci malzeme meydana getirme amaçlarıyla gerçekleştirilmektedir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerde karbon ve cam fiberlerin birlikte kullanımı en çok görülen hibritleştirme örneklerindendir. Sadece karbon fiber kullanımıyla, karbon ve cam fiberlerin birlikte kullanımı arasında kullanım alanına göre malzeme yeterli mekanik özellikleri sağlamaya devam ederken maliyeti yüksek olan karbon fiberin kompozit malzeme içerisindeki oranı azaltılarak maliyet düşürülür. Yine aynı hibritleştirmeyle elektrik yalıtkanlığı yüksek olan cam fiber malzeme kompozit malzemenin elektrik yalıtımını iyileştirir. Malzemenin sertliği, tokluğu, mukavemeti vb. özellikleri de hibritleştirmeyle değişebilir.

Doğal fiberlerin doğrudan kullanılamadığı ama sentetik fiberlerle birlikte kullanımının mümkün olduğu durumlarda hibritleştirme sayesinde daha çevreci ve sürdürülebilir malzemeler elde edilebilir [16].

2.3.1. Katmanlararası (interply) hibrit kompozit malzemeler

Katmanlar halinde serilerek elde edilen kompozit malzemelerde katmanlar iki veya daha fazla sayıda farklı malzemeden oluşursa katmanlararası (interply) hibritleştirme yapılmış olur. Katmanlararası hibrit kompozitlerin malzeme temininin ve üretiminin kolay olması gibi nedenlerden dolayı hibrit kompozitler uygulamalarında daha sık tercih edilmektedir [16].

2.3.2. Katmaniçi (intraply) hibrit kompozit malzemeler

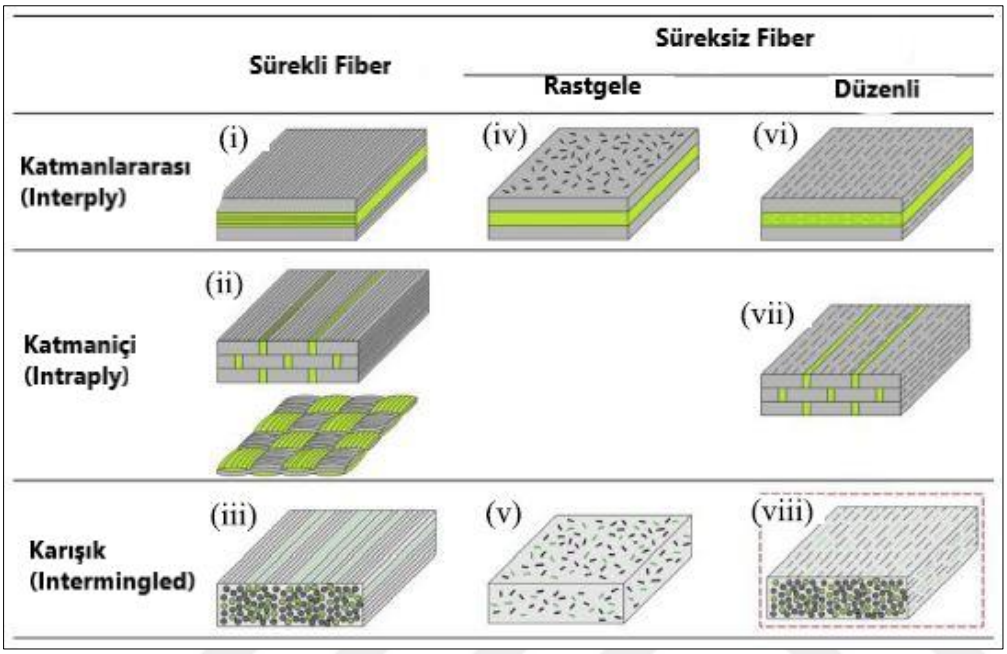
Aynı katman içerisinde farklı malzemelerin yerleştirilmesiyle katmaniçi (Intraply) hibrit kompozit malzeme elde edilir. Katmaniçi hibrit kompozitlerin kendi içerisinde farklı uygulamaları mevcuttur. Aynı katmanda farklı malzemelerden oluşan tek yönlü fiberlerin serilmesiyle, fiber kumaşın dokuma tezgahlarında doğrudan hibrit kumaş olarak üretilmesiyle, fiber kumaşların yan yana serilerek geçişli yapıların oluşturulmasıyla katmaniçi hibritleştirme yapılabilmektedir [2].

2.3.3. Karışık (intermingled) hibrit kompozit malzemeler

Katmanlar halinde üretilen kompozit malzemelerin aksine karışık (Intermingled) hibrit yapılarda katmanlar bulunmaz ve sürekli veya süreksiz fiberler tek bir bütün yapı içerisinde

düzenli veya rastgele olarak yerleştirilir. Çizelge 2.1'de hibritleştirme türlerine ait farklar yer almaktadır.

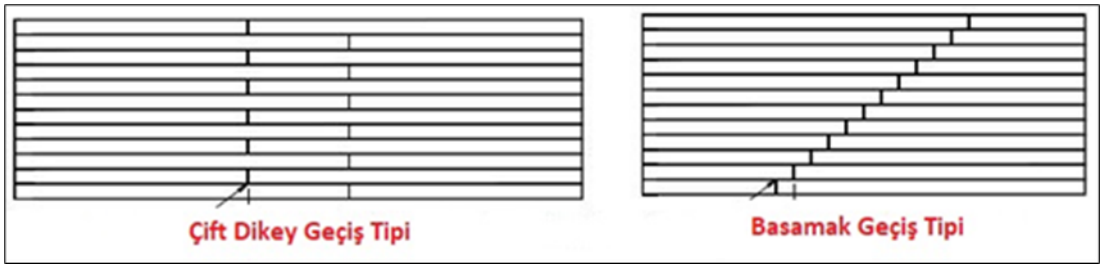
Çizelge 2.1. Hibrit kompozit türleri [2]



2.4. Katmaniçi Geçişli Kompozit Malzemeler

Kompozitler malzemelerde üretilen malzemenin veya parçanın boyutlarının artması üretimi zorlaştırır. Tek seferde bir bütün olarak üretilmesi mümkün olmayan karmaşık geometrili ve katmanlı yapılarda belirli bölgelerden katmanlar ayrılarak geçiş bölgeleri oluşturulur. Özellikle elyafların büküm bölgelerinden kesilerek geçişli yapının oluşturulması olası elyaf kırışıklıklarının da önüne geçmektedir [16]. Aynı zamanda geçişli (eklemli) yapıların kullanılması sayesinde kompozit malzemenin farklı bölgelerinde ihtiyaca uygun farklı malzeme veya yapılar yerleştirilerek kompozit malzemenin özellikleri geliştirilebilmektedir.

Geçişli kompozit malzemelerde eklemlerin bulunduğu bölgelerde mekanik özellikler farklılık göstermektedir. Eklemli yapıların doğası gereği geçiş bölgelerinde daha sık olarak malzeme kusurları meydana gelebilmektedir.



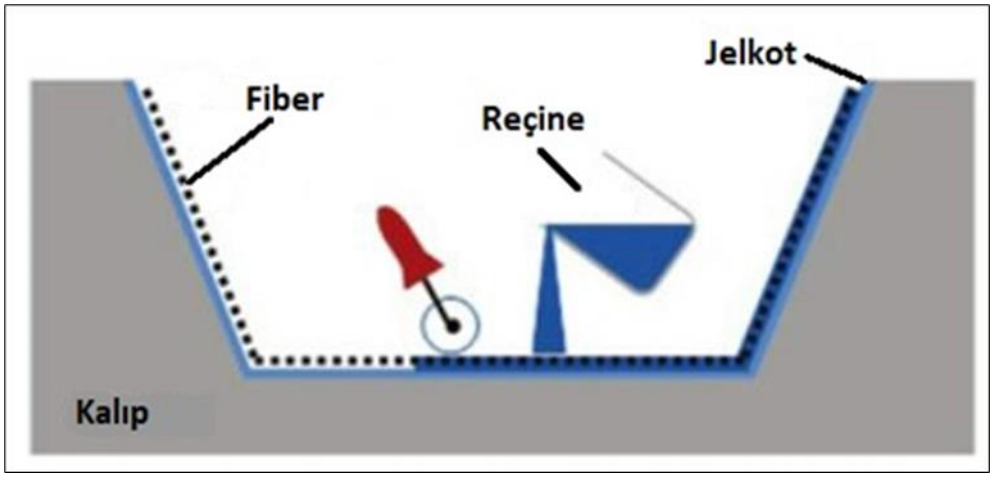
Resim 2.4. Geçişli kompozitlerde geçiş tipleri [17]

2.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretimin yönteminin tercihinde matris ve takviye malzeme türleri belirleyici rol oynar. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde eriyik metal infiltrasyonu, karıştırmalı döküm, toz metalürjisi, in situ yöntemi kullanılan yöntemler arasındadır. Seramik matrisli kompozitlerde ise sol-jel, slip dökme, reaksiyon bağlama, enjeksiyon kalıplama, sıcak presleme yöntemleri üretimde kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlere ait üretim yöntemleri aşağıda detaylandırılmıştır [1].

2.5.1. Elle yatırma yöntemi

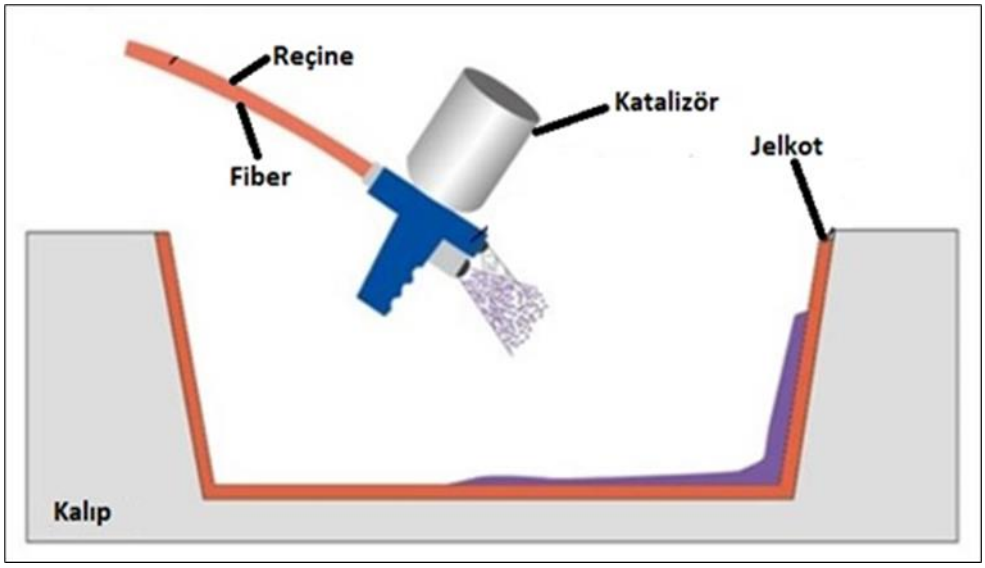
Literatürde açık temas kalıplama yöntemlerinden biri olarak geçen elle yatırma yönteminde ilk aşamada kalıp üzerine kalıp ayırıcı film yerleştirilir ve jelkot uygulaması yapılır. Takviye elemanı olan tek yönlü fiberler veya kumaşlar kalıba katmanlar halinde yerleştirilir. Her bir katmanın seriminden sonra reçine katman üzerine rulo, fırça vb. ile baskı yapılarak homojen bir şekilde dağıtılır. İşlem tamamlandıktan sonra malzeme ortam sıcaklığında kürlenmeye bırakılır. Bu yöntemde hava kabarcığı kalmaması için reçine uygulamasının dikkatli yapılması gerekir. İşçiliğe bağlı üretim yöntemidir ve ürün kalitesinde farklılıklar gözlenebilir. Az sayıda ve küçük boyuttaki parçaların üretiminde tercih edilir [1].



Resim 2.5. Elle yatırma yöntemi [18]

2.5.2. Sprey yatırma yöntemi

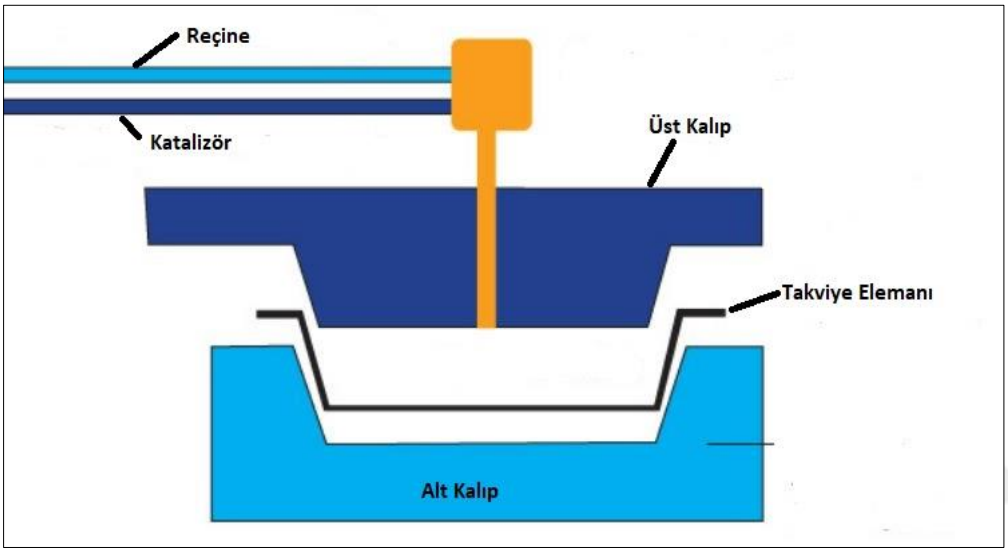
Sprey yatırma yönteminde, süreksiz fiberlerden oluşan takviye elemanlarıyla reçine karışımının kalıp üzerine spreyle püskürtülmesi şeklinde üretim yapılır. Püskürtme esnasında reçine ve fiberlerle beraber kürlenmeyi hızlandırmak amacıyla katalizör olarak sertleştirici de eklenir. Elle yatırma yönteminde olduğu gibi kalıplar üzerine püskürtme öncesi ayırıcı film ve jelkot uygulaması yapılır ve püskürtme sonrası homojenliği sağlamak ve hava kabarcığı oluşumunu önlemek için rulo veya fırçayla reçine dağıtılır. Elle yatırma yöntemine göre daha hızlı olmasına rağmen süreksiz fiberler için uygun bir üretim yöntemidir [19].



Resim 2.6. Sprey yatırma yöntemi [20]

2.5.3. Reçine transfer (RTM) yöntemi

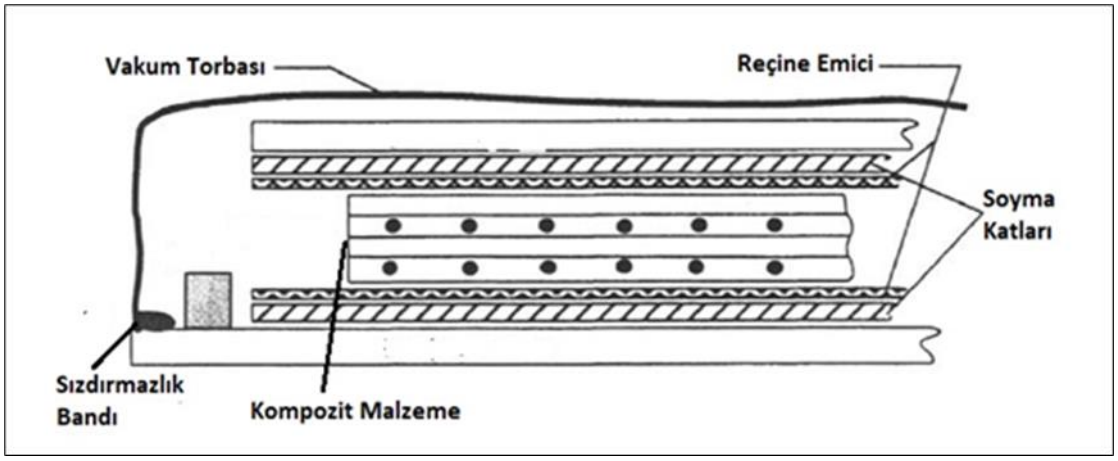
Reçine transferi yönteminde parçalı kalıplara takviye malzemesi kuru halde yerleştirilerek kalıplar sızdırmazlık sağlayacak şekilde birleştirilir. Kalıplar birleştirildikten sonra düşük basınçta reçine kalıp içerisine transfer edilir. Kürlenme, ortam sıcaklığında ve kalıp içerisinde gerçekleştirilir. Bu yöntem, reçine ve takviye elemanının birleştirilmesi işleminin hızlı olmasından dolayı seri üretime uygundur [21].



Resim 2.7. Reçine transfer yöntemi [22]

2.5.4. Vakum torbalama yöntemi

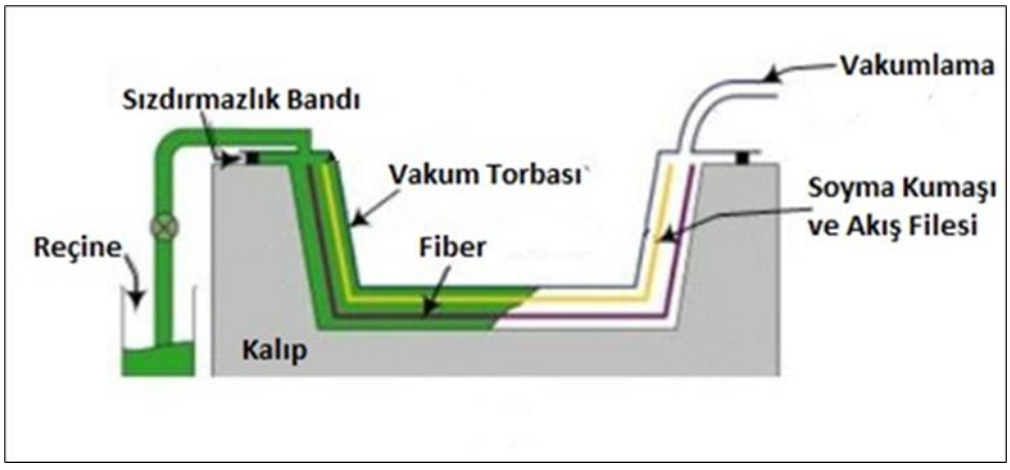
Elle yatırma yöntemine benzer şekilde takviye malzemesi kalıba serilir ve reçine takviye malzemesi üzerinde rulo, fırça vb. ile dağıtılır. Reçine uygulanmasından sonra yardımcı kumaşlar ve vakum torbası serilir, vakum torbası kenarlarına sızdırmazlık bandı yapıştırılır. Vakumlama sırasında bir miktar reçine artar ve artan reçinenin emilimi için reçine emici kullanılır. Kürlenme için malzeme vakumlanmış olarak ortam sıcaklığına bırakılır. El işçiliği yoğun bir yöntem olduğu için az adetli üretimlerde uygundur [14].



Resim 2.8. Vakum torbalama yöntemi [14]

2.5.5. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi

Vakum torbalama ve reçine transfer yönteminin birleştirilmesiyle oluşan bir üretim yöntemidir. Kuru halde takviye malzemesi serilir ve vakumlama, reçine transferine yardımcı kullanılarak vakum torbası yatırılır. Uygulama ortamındaki hava önce vakumlandıktan sonra yine vakumlama ile dışarıda bulunan reçine haznesinden takviye malzemesi üzerine reçine transfer edilir. Burada reçine ısıtılarak transfer edilebilmektedir. Serimin yapıldığı kalıp veya tablada da ön ısıtma yapılabilmektedir [1].



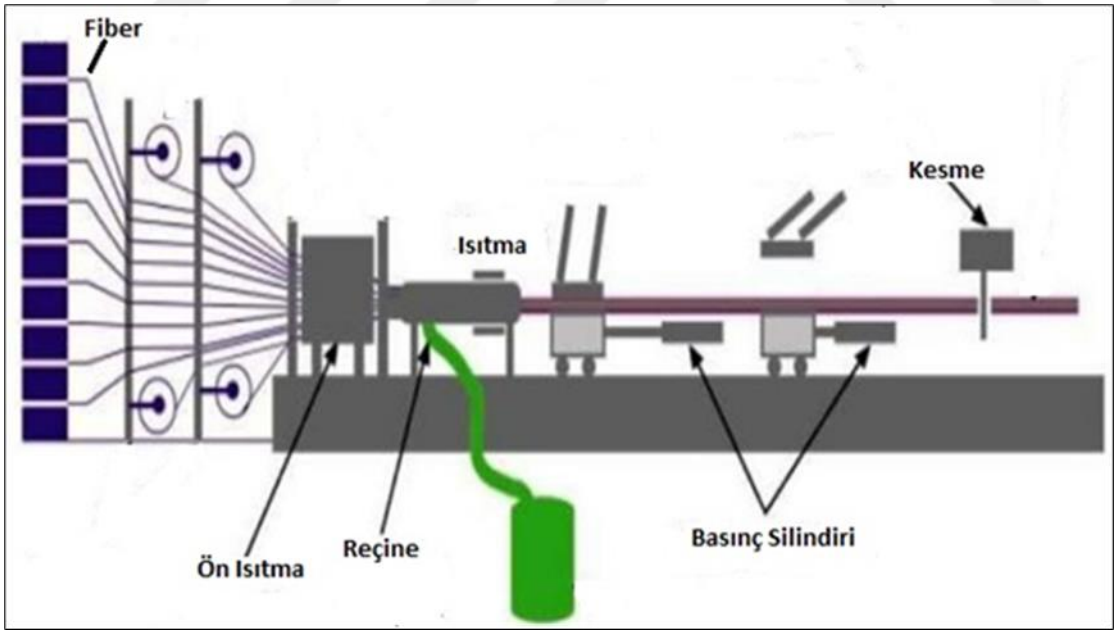
Resim 2.9. Vakum destekli reçine transfer yöntemi [23]

2.5.6. Presleme yöntemi

Presleme yönteminde takviye elemanı ve reçine kalıba yerleştirilir. Kalıba ısı verilerek reçinenin akışkanlığı sağlanır ve serimi yapılan reçine ve takviye malzemesine yüksek basınçta presleme uygulayarak homojen olarak kalıba dağılımı gerçekleştirilir. Presleme, prepreg haldeki kompozitlerin şekillendirilmesinde de kullanılan bir yöntemdir. Preslemede üretim hızlıdır ve üretim adedi yüksektir. Kalıplar büyük ölçekli üretimlerde kullanıldığı için dayanıklı ve maliyetlidir [21].

2.5.7. Pultrüzyon yöntemi

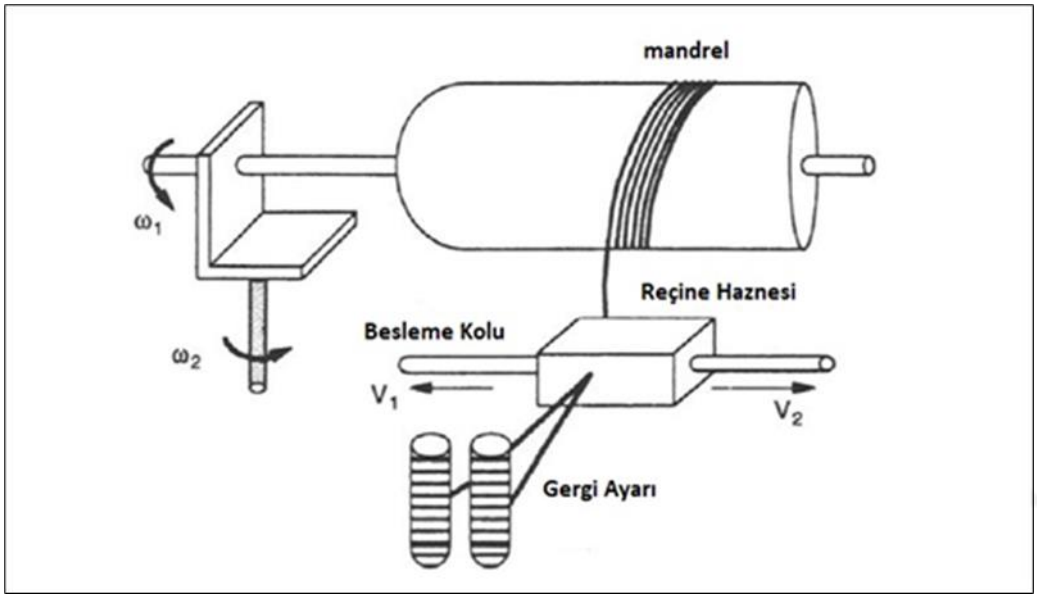
Takviye malzemesi fiber yapıda gerdirilerek klavuzdan geçirilir ve sonrasında fiberlere reçine emdirilir. Belirli bir profil kesiti oluşturacak şekilde fiberler hattan çekilir ve bu aşamada yüksek sıcaklık ve basınç uygulanır. Kürlenme yüksek sıcaklık altında ve hızlı bir şekilde gerçekleşir. İşlem sonunda oluşan nihai profil kesilir. Pultruzyon yöntemi hızlı ve seri üretime uygun bir yöntemdir [1].



Resim 2.10. Pultrüzyon yöntemi [1]

2.5.8. Filament sarma yöntemi

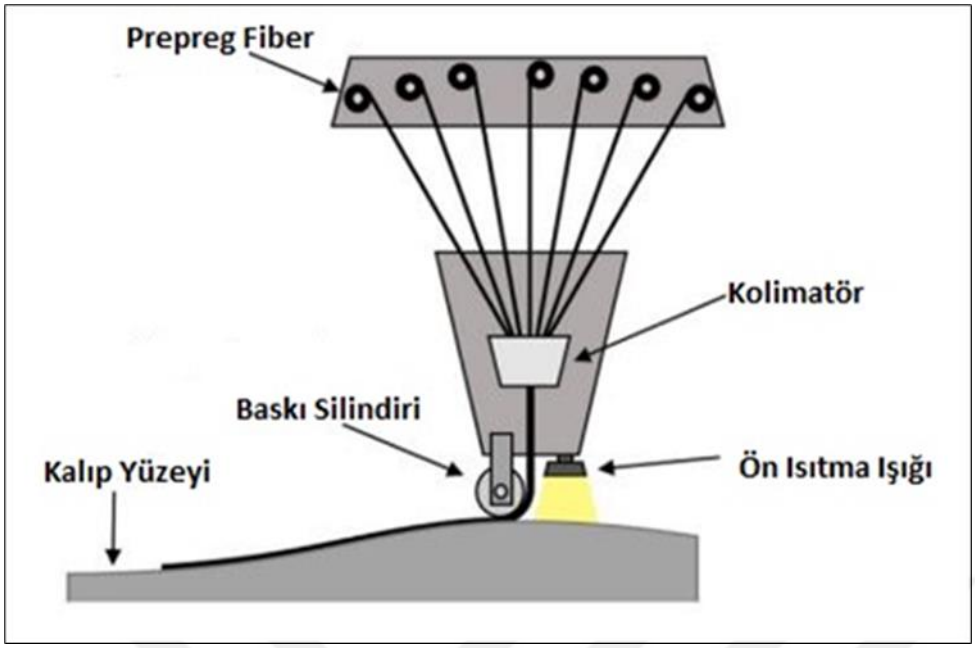
Dönen bir kalıp yüzeyine fiberler gerdirilerek ve reçine emdirilerek sarılır. Sarma sırasında gergin yapıdaki fiberler basınçla daha iyi yapışır. Üretim sırasında sarma açıları değiştirilebilir olmasından dolayı malzeme dayanımı üst seviyede olur. Kürlenme işlemi ortam sıcaklığında veya ısıtılmış ortamda yapılır. Boru, basınçlı kap veya basınçlı tank gövdelerinin üretiminde bu yöntem sıklıkla tercih edilir [21].



Resim 2.11. Filament sarma yöntemi [14]

2.5.9. Otomatik fiber serme (AFP) yöntemi

AFP (Automated Fiber Placement), prepreg veya kuru fiber demetlerinin robotik kol aracılığıyla kalıp üzerine serilmesi prensibiyle çalışan ve katmanlar oluşturarak nihai ürünü elde etmeyi sağlayan bir üretim yöntemidir. Prepreg veya reçine emdirilmiş fiber demetleri robotik kol ile kalıp yüzeyine baskı uygulanarak serim yapılır. AFP ile benzelik gösteren ATL (Automated Tape Laying) yönteminde ise fiber demetleri yerine elyaf bantlar şeklinde serim yapılır. Bu yöntem büyük ebatlı ve düz veya oval yüzeylere sahip ürünlerin üretiminde idealdir [24].

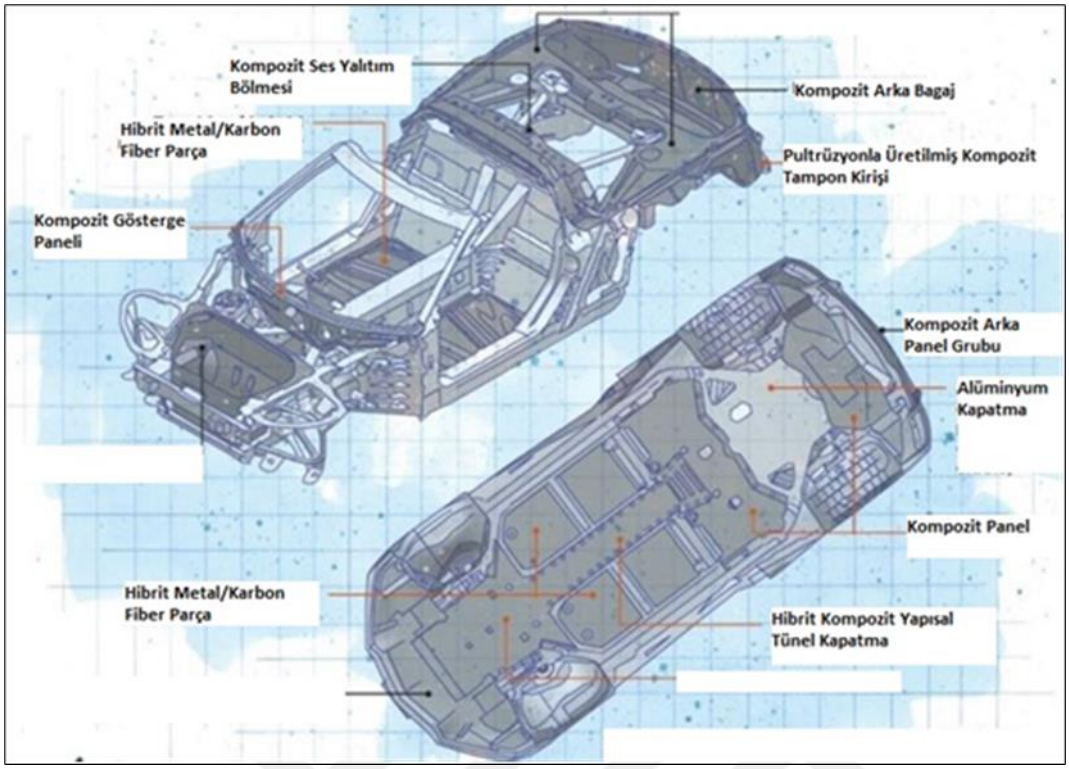


Resim 2.12. Otomatik fiber serme yöntemi [24]

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

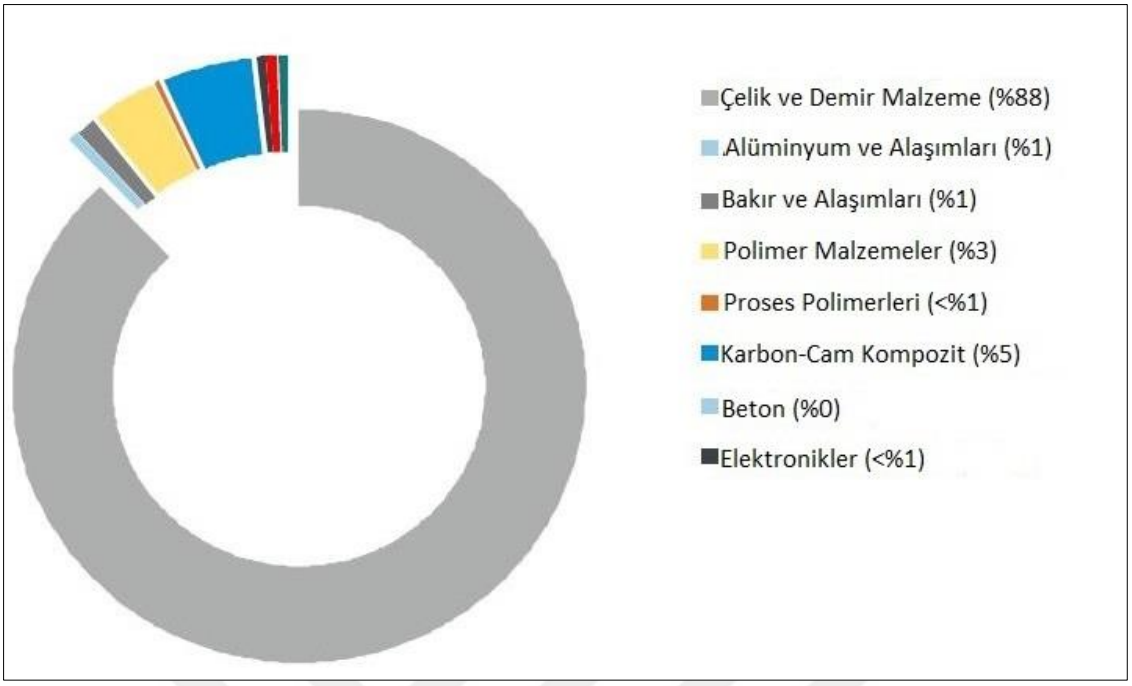
Farklı türde malzemelerin avantajlarını tek malzemede sergilemesi düşüncesiyle ortaya çıkan kompozit malzemelerin geliştirilmesi sürecinde, birden fazla farklı malzemenin kombinasyonunu içeren hibrit kompozit malzemeler, hem mekanik özelliklerin optimize edilmesi hem de malzeme tasarımında esneklik sağlanması açısından önemli bir rol oynamaktadır. Hibrit kompozitler, başlangıçta laboratuvar ortamında teorik çalışmalar ve küçük ölçekli uygulamalarla sınırlı kalmışken, günümüzde sahip oldukları üstün özellikler sayesinde sanayide geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Özellikle otomotiv, havacılık, denizcilik ve enerji sektörlerinde, hafiflik, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gibi özelliklerin bir arada sağlanması, hibrit kompozitlerin tercih edilme oranını artırmıştır. Üretim teknolojilerindeki gelişmeler ve maliyetlerin düşmesi, bu malzemelerin endüstriyel ölçeklerde kullanılmasını mümkün kılmıştır[16]. Ayrıca, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çevre dostu malzeme çözümlerine olan ilginin artması, hibrit kompozitlerin geri dönüştürülebilir ve özelleştirilebilir yapısıyla sanayide yaygınlaşmasını hızlandırmıştır.

Kompozit malzemelerin endüstride kullanımında öncü sektörlerden olan otomotiv sektöründe özellikle de spor arabalarda son zamanlarda kompozit malzemelerle beraber hibrit kompozitlerin de kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Chevrolet Corvette C8 araçta şasi karbon epoksi ve alüminyum malzemenin hibrit tasarımı olarak üretilmiştir ve burulma rijitliğini iyileştirmek amacıyla hibrit karbon-cam kompozit malzeme de kullanılmıştır [25].



Resim 3.1. Chevrolet Corvette C8 kompozit parçaları [26]

Rüzgar türbinleri üreten bir firma olan Vestas, V90 serisi rüzgar türbinlerinde 44 metre uzunluğundaki türbin kanatlarını hibrit kompozit karbon-cam malzeme kullanarak üretmiştir. Firmanın web sayfasında paylaşmış olduğu Ürün Yaşam Döngüsü Değerlendirme dokümanında rüzgar türbininde kullanılan malzemelerin ağırlıkça karşılaştırması yapılmış ve hibrit kompozit karbon-cam kanatlar tüm ağırlığın %5'ine denk geldiği paylaşılmıştır [27].



Şekil 3.1. Vestas V90 3.0 MW rüzgar türbini malzeme oranları [27]



Resim 3.2. Vestas V90 3.0 MW rüzgar türbini [27]

Tasarımcısı Lila-Lou firması ve üreticisi Logos Marine firması olan Curvelle Quaranta isimli katamaran 33.7 m uzunlukta ve 9 m genişlikte gövde malzemesi olarak karbon-cam kompozit malzeme kullanılmıştır. Katamaran ilk defa 2013 yılında Tuzla'da üretilmiştir. Katamaranın kompozit malzeme ve diğer malzemelerde tedarikçisi olan METYX

Composites firmasının web sayfasında katamaran için düşük ağırlığa sahip olduğu, az bakım gerektirdiği, uzun ömürlü kullanıma ve yüksek dayanıklılığa sahip olduğu ifade edilmiştir [28].



Resim 3.3. Curvelle Quaranta katamaran [29]

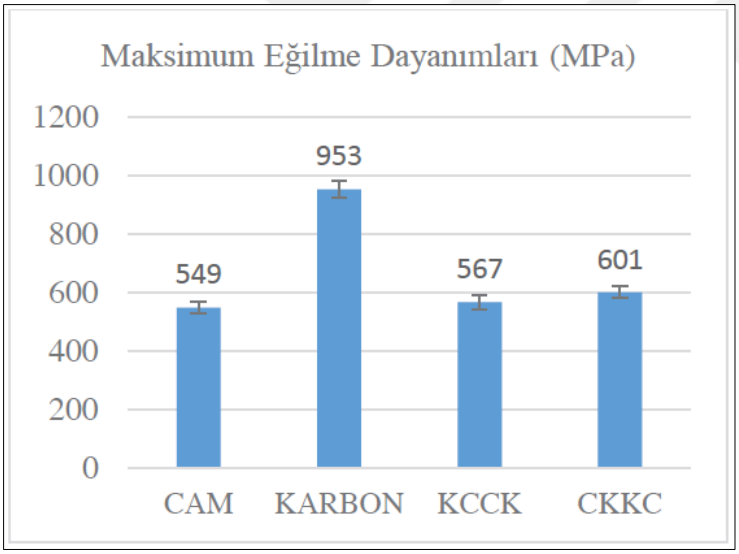
Polimer matrisli hibrit kompozit malzemelerin mekanik, elektrik, termal, akustik ve kimyasal özelliklerini inceleyen birçok çalışma literatürde yer almaktadır. Matris ve takviye malzemesi oranı, matris malzemesi türü; takviye malzemesi türü, şekli, dizilimi; kompozit malzemenin üretim yöntemi vb. değişkenlerin malzeme özellikleri üzerindeki etkisini deneysel, analitik, sonlu elemanlar analizi yöntemleriyle tespit etmek amacıyla yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde özellikle hibrit kompozitler ve geçişli kompozitler üzerinde gerçekleştirilen analiz ve deneysel çalışmalara odaklanılmıştır.

Karthik ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada sentetik takviye malzemelerinden olan karbon, cam ve aramid fiber kumaşlar, katmanlar arası hibritleştirme ile cam-aramid ve karbon-aramid olarak farklı kombinasyonlarda üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak elle yatırma yöntemi tercih edilmiş ve CACAC, ACACA, KAKAK ve AKAKA olmak üzere dört farklı konfigürasyonda numuneler elde edilmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda çekme dayanımı yönünden karbon oranı fazla olan numunelerin en iyi, cam oranı fazla olan numunelerin ise en kötü performansı sergilediği gözlemlenmiştir [30].

Girimurugan ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışmada fiber yapıdaki takviye malzemeleri üzerine yapılan çalışmaların aksine takviye malzemesi olarak nano alümina tozu ve su sümbülü tozunun kullanıldığı çalışmada alümina ve su sümbülü tozları farklı

oranlarda karıştırılmıştır. Düşük oranda alümina tozu ve su sümbülü tozu eklendiğinde çekme dayanımını artırdığı ama toz oranı artışının olumsuz etkilediği tespit edilmiştir [31].

Hibrit karbon-cam kompozitlerin eğme performanslarını inceleyen Aydın ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında katmanlar arası hibrit yapıda olan karbon ve cam fiber kumaşlar kullanılarak dört kat olarak serilmiş kompozit numuneler hazırlanmıştır. Üretim yöntemi olarak Vakum Destekli Reçine Transfer Yöntemi tercih edilmiştir. Karbon katmanlar ve cam katmanlar iç kısımda ve dış kısımda olarak KCCK ve CKKC dizilimindeki numuneler, sadece cam fiber kumaştan ve sadece karbon fiber kumaştan üretilen numunelerle eğme performansları açısından karşılaştırılmıştır. Şekil 3.2'deki grafikte de belirtildiği gibi karbon fiberin eğme performansının daha iyi olduğu ve hibritler içinde ise karbon katmanların iç kısımda bulunduğu numuneler daha yüksek eğme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir [32].



Şekil 3.2. Karbon, cam, KCCK ve CKKC numunelerinin eğilme dayanımları [32]

Hashim ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada katman içi hibrit dokuma karbon-aramid fiber kumaşlarla takviyelendirilmiş kompozit plakalar Vakum Destekli Reçine Transfer Yöntemiyle üretilmiştir. 0° 'de karbon, 90° 'de ise aramid fiberler yönlendirilmiştir. Kompozit plakalar, 0°, 45° ve 90°'lik doğrultularda kesilerek farklı fiber yönlerine sahip numuneler elde edilmiştir. Çekme dayanımı incelenen numunelerde boyuna yönde uzanan fiberler baskın özellik göstermiştir. 45° doğrultudaki numuneler, 0° boyuna uzanan karbon numunelere göre 5 kat daha zayıf performans sergilemiştir [33].

Polimer matrisli kompozit malzemelerde hem hibritleştirme türünün hem de doğal fiber takviye malzemelerinin mekanik özelliklere etkisini inceleyen Islam ve arkadaşları (2021) yaptığı çalışmada polimer matrisli kompozitlerde sıklıkla kullanılan sentetik takviye malzemelerinden olan karbon fiberlerle doğal malzeme olan keten fiberler katman içi ve katmanlar arası hibritleştirmeyle iki farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Hibritleştirme türüne göre çekme ve yorulma davranışları karşılaştırılmıştır. Katman içi hibrit ve katmanlar arası hibrit malzemenin çekme dayanımlarının yaklaşık olarak aynı olmasına rağmen yorulma ömrü açısından katman içi hibrit malzeme yirmi kat daha iyi performans sergilemiştir. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de çekme dayanımı ve yorulma ömrüne ilişkin sonuçlar yer almaktadır [34].

Çizelge 3.1. Karbon-keten çekme dayanımları [34]

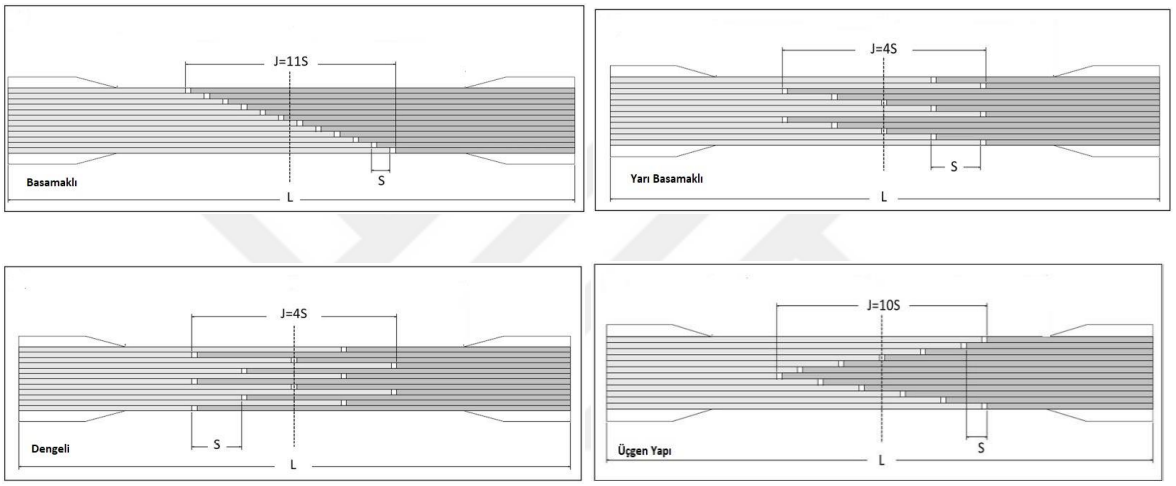
Malzeme	Çekme Dayanımı
Katmanlar Arası Hibrit Karbon-Keten	805,26 MPa
Katman İçi Hibrit Karbon-Keten	765,46 MPa

Çizelge 3.2. Karbon-keten yorulma ömürleri [34]

Malzeme	Ortalama Yorulma Ömrü Döngüsü (%70 UTS'de)
Katmanlar Arası Hibrit Karbon-Keten	17034 (Hz=3)
Katman İçi Hibrit Karbon-Keten	364939 (Hz=3)

Zhu ve arkadaşları (2019) çalışmasında tek yönlü karbon fiberlerle yirmi kat serilmiş kompozit malzeme üretmişlerdir. Belirli katlarda takviye elemanı kesilerek geçişli (eklemli) yapı oluşturulmuştur. Her bir numunede farklı bölgelerde geçiş sağlanmıştır. Geçişli yapıları incelemek üzere analiz modelleri oluşturulmuş ve deneysel çalışma için test numuneleri üretilmiştir. Çalışma sonucunda analiz ve deneysel sonuçlar arasında %1 - %8 arası fark bulunduğu ve kenarlarda bulunan geçiş bölgelerine sahip numuneler ortada bulunan geçiş bölgelerine sahip numunelerden daha iyi çekme dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir [3].

Marques ve arkadaşları (2022) çalışmalarında her katmanda geçişlerin mevcut olduğu karbon fiber kompozitler üzerinde farklı geçiş tipleri oluşturmuşlardır. Numuneler resim 3.4'te görüldüğü gibi basamaklı, yarı basamaklı, dengeli ve üçgen yapı olarak adlandırılan dört farklı tipte hazırlanmıştır. Malzeme, karbon prepreglerin otoklavda birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Geçişsiz karbon fiber numune ve geçişli yapıdaki numunelerin çekme performansları karşılaştırılmış ve geçişsiz malzemeye göre basamaklıda %11, yarı basamaklıda %14, dengelide %17 ve üçgen yapıda %14 çekme dayanımında düşüş olduğu tespit edilmiştir [35].



Resim 3.4. Geçiş tipleri [3]

Polimer matrisli kompozitlerde geçiş tiplerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisini inceleyen Zhang ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan çalışmada B09-4 tipi cam elyaflar 12 kat serim yapılarak Reçine Transfer Kalıplama yöntemiyle kompozit plakalar oluşturulmuş ve sonrasında numuneler elde edilmiştir. Numune tipleri olarak bir adet geçişsiz, üç adet her biri farklı temas aralığına sahip basamaklı geçiş tipi numune ve dört adet de her biri farklı temas aralığına sahip çift dikey geçiş tipi numune oluşturulmuştur. Numuneler üzerinde çekme testi ve üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiş. Numunelerin çekme ve eğme davranışları değerlendirildiğinde geçişsiz numunenin geçişli tip numunelere göre daha iyi performans gösterdiği, geçiş tipleri içinde aynı temas aralığına sahip numuneler kıyaslandığında basamak geçiş tipine sahip numunenin daha iyi mekanik performans sergilediği ve her iki geçiş tipine sahip numunelerde temas aralığı arttığında malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Çizelge 3.3'te elde edilen sonuçlara yer verilmiştir [17].

Çizelge 3.3. Çekme ve eğme dayanımları [17]

Geçiş Tipi	Temas Aralığı (mm)	Çekme Dayanımı	Eğme Dayanımı
Çift Geçiş	4	138,8	119,5
Çift Geçiş	8	147,5	135,5
Çift Geçiş	12	157,0	173,7
Çift Geçiş	16	161,5	193,9
Basamaklı Geçiş	4	189,8	227,9
Basamaklı Geçiş	8	223,7	230,0
Basamaklı Geçiş	12	224,0	232,7
Geçişsiz	-	249,1	243,8

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzemeler ve Numuneler

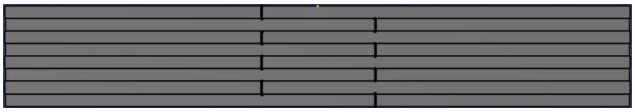
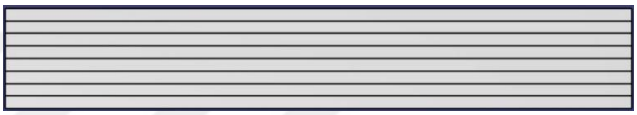
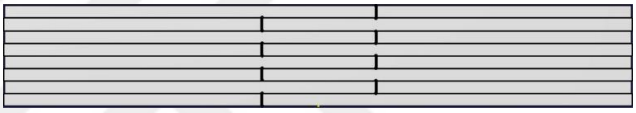
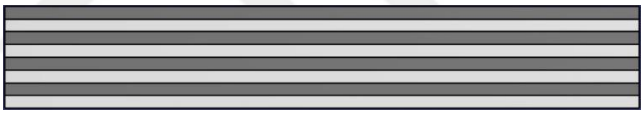
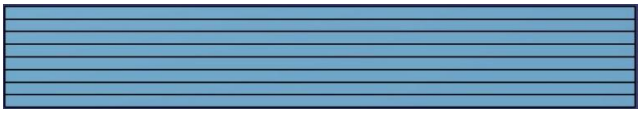
Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere 3 farklı fiber kumaş temin edilmiştir. 200 gr/m^2 düz (plain) dokuma cam kumaş malzeme ve 200 gr/m^2 düz dokuma karbon kumaş malzeme KP Kompozit Pazarı A.Ş'den alınmıştır. 235 gr/m^2 düz dokuma hibrit karbon-cam kumaş malzeme YN Carbon Store'dan alınmıştır.

Çizelge 4.1. Fiber özellikleri [8]

	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Gerilimi (%)
Karbon Fiber	1,76	230	3650	1,5
Cam Fiber	2,54	72,4	3450	4,8

Çizelge 4.2'de fiber kumaşlar kullanılarak elde edilen geçişli ve geçişsiz sadece karbon, sadece cam, katmanlar arası hibrit karbon-cam ve katman içi hibrit dokuma karbon-cam olmak üzere farklı tiplerde oluşturulan numuneler ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır. Her iki tipteki hibrit numunelerde ağırlıkça %50 karbon fiber ve %50 cam fiber takviye malzemesi yer almaktadır.

Çizelge 4.2. Numune tipleri ve özellikleri

Numune Tipi	Fiber Kumaş	Numune Görseli
Karbon	8 Kat Düz (Plain) Dokuma Karbon	
Karbon Geçişli	8 Kat Düz Dokuma Karbon	
Cam	8 Kat Düz Dokuma Cam	
Cam Geçişli	8 Kat Düz Dokuma Cam	
Karbon-Cam	KCKCKCKC diziliminde 4 Kat Düz Dokuma Karbon 4 Kat Düz Dokuma Cam	
Karbon-Cam Geçişli	KCKCKCKC diziliminde 4 Kat Düz Dokuma Karbon 4 Kat Düz Dokuma Cam	
Hibrit Dokuma Karbon-Cam	8 Kat Düz Hibrit Dokuma Karbon ve Cam	
Hibrit Dokuma Karbon-Cam Geçişli	8 Kat Düz Hibrit Dokuma Karbon ve Cam	
Karbon =  Cam = Hibrit Dokuma = 		

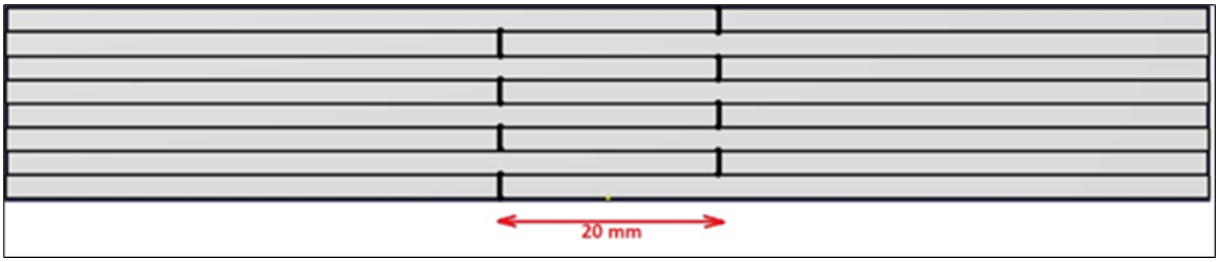
Vakumlu destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemiyle kompozit malzeme üretimine uygun KP 410 infüzyon tipi epoksi reçine ve sertleştirici seti bu tez çalışma için tercih edilmiştir. Reçine seti KP Kompozit Pazarı A.Ş'den alınmıştır. Reçine setiyle beraber kompozit plakaların üretiminde kullanılacak infüzyon hortumları, soyma kumaşı, ayırıcı film, vakum torbası, sızdırmazlık bandı ve bağlantı parçaları da temin edilmiştir.

Çizelge 4.3. Malzeme birim maliyetleri

Malzeme Türü	Birim Maliyeti (TL)
Karbon Kumaş (m^2)	859
Cam Kumaş (m^2)	317
Hibrit Dokuma Karbon-Cam Kumaş (m^2)	2268
KP 410 İnfüzyon Tipi Epoksi Seti (Epoksi + Sertleştirici) (kg)	695

Kompozit plakaların yapısında bulunan malzemelerin birim maliyetleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Karbon fiber kumaşlar, cam fiber kumaşlar ve epoksi seti yurt içinden temin edilmiş olup nakliye masrafları birim maliyete dahil edilmemiştir. Hibrit dokuma karbon-cam fiber kumaş yurt dışından temin edilmiştir ve birim maliyetinin içerisine gümrük vergisi ve nakliye masrafları dahil edilmemiştir.

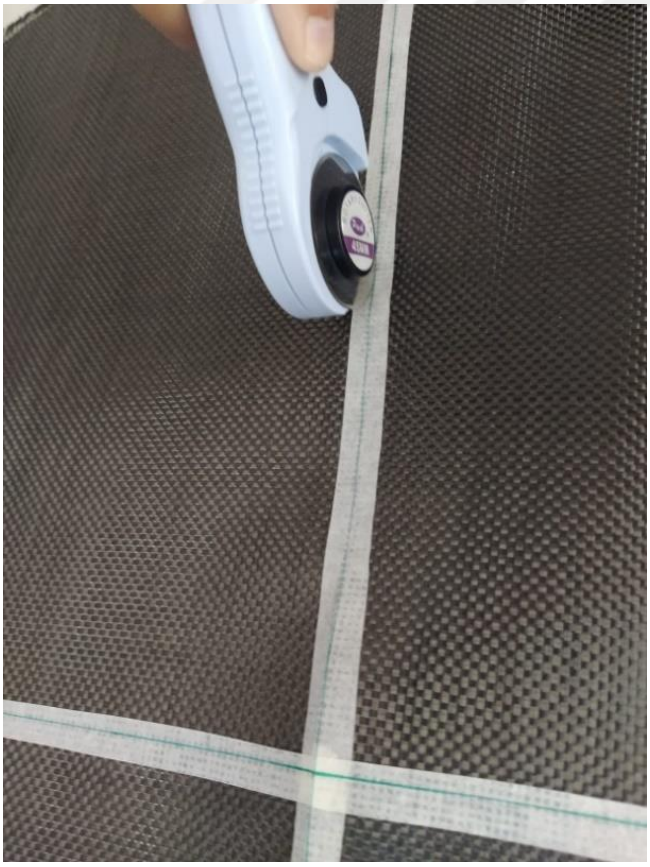
ASTM D3039'a uygun olarak çekme numunelerinin ölçüleri 150x15 mm, ASTM D790'a uygun olarak eğme numunelerinin ölçüleri 80x10 mm olarak belirlenmiştir. Geçişli yapıda olan malzemelere ait fiber kumaşlar, geçiş bölgeleri çekme ve eğme numunelerin orta kısmına gelecek şekilde ayarlanıp kesilmiştir. Geçiş bölgelerindeki uzunluk aynı zamanda malzemenin temas aralığını ifade etmektedir. Günümüzde temas aralığını tanımlayan bir standart bulunmamasıyla birlikte ABD Savunma Bakanlığı tarafından yayınlanan Askeri El Kitabı'nın 3.Bölümünde geçişli yapılarda temas aralığının 15 mm'den az olmaması yönünde bir ifade vardır [36]. Resim 4.1'de de belirtildiği gibi geçişli yapıda oluşturulan numunelerdeki temas aralığı 20 mm olarak belirlenmiştir.



Resim 4.1. Çekme ve eğme numunelerindeki geçişli yapı temas aralığı

4.2. Numunelerin Hazırlanması

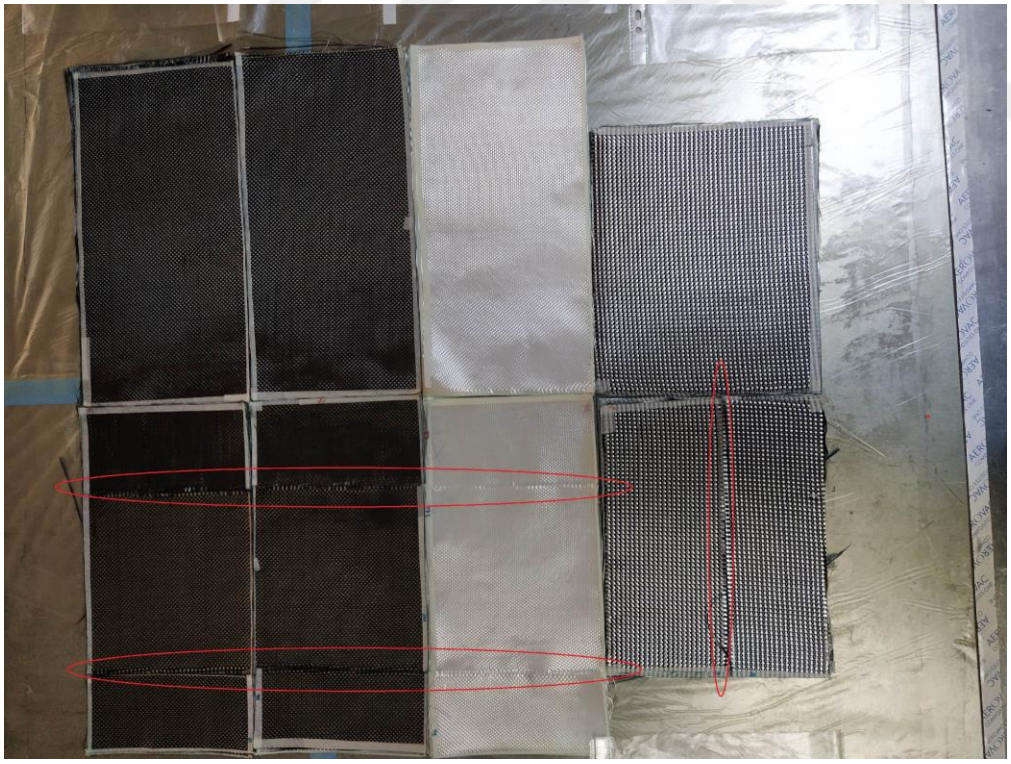
Karbon fiber, cam fiber ve hibrit dokuma karbon-cam fiber kumaşlar katmanlı yapı şeklinde kompozit plakalar oluşturmak amacıyla eşit ölçülerde kesilmiştir. Kesilen kenarlardaki ipliklerde görülen kusurları en aza indirebilmek amacıyla elyaf kumaşların kesim işleminde Resim 4.2'deki görselde yer alan döner kesici (rotary cutter) tercih edilmiştir. Geçişli yapıda hazırlanacak numunelerde geçiş katları ayarlanmış ve her kata uygun şekilde kesim işlemleri yapılmıştır.



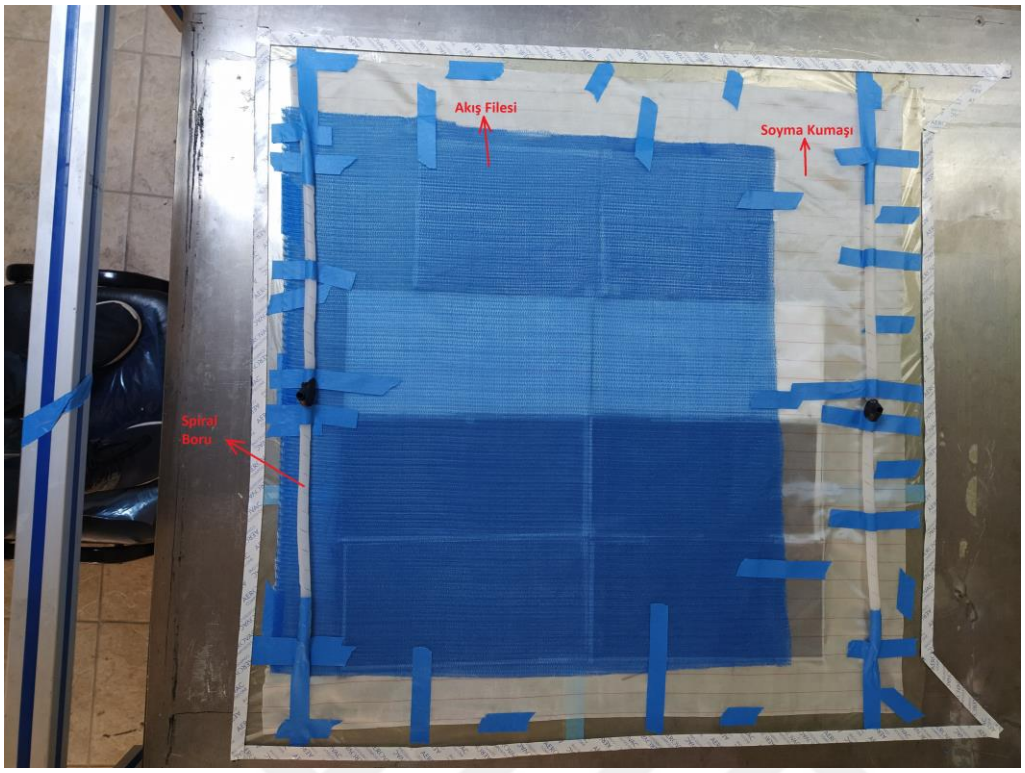
Resim 4.2. Döner kesici (rotary cutter)

Kompozit plakaların üretiminde Gazi Üniversitesi laboratuvarında yer alan üretim tezgahı kullanılmıştır. Tezgah tablasının üzerine ilk olarak ayırıcı film serilmiştir ve ayırıcı filmin kenarlarına sızdırmazlığı sağlaması için sızdırmazlık bandı yapıştırılmıştır. Tezgah tablası üzerine her bir numune tipi için ayrı ayrı kompozit plaka oluşturmak için 8 kat elyaf kumaş serilmiştir. Resim 4.3'te serimleri yapılmış elyaf kumaşlar yer almaktadır ve şekil üzerinde işaretli olan yerler geçiş bölgelerini göstermektedir. Şekilde görünemeyen alt katmandaki geçiş bölgesi ise üst katmandaki geçiş bölgesinin 20 mm uzağında yer almaktadır.

Elyaf kumaşlar üzerine kürlenme sonrası plakaların kolaylıkla soyulabilmesi için soyma kumaşı yerleştirilmiştir. Soyma kumaşı üzerine reçineyi hızlı ve tüm serim bölgesine eşit şekilde transfer edecek akış filesi serilmiştir ve devamında yine reçinenin homojen dağılım göstermesi için spiral boru Resim 4.4'teki gibi konumlandırılmıştır. Bu işlemler sırasında akış filesi, soyma kumaşı ve spiral borunun yerinden kaymaması için kağıt bantlarla sabitleme yapılmıştır.



Resim 4.3. Ayırıcı film üzerine yerleştirilmiş fiber kumaşlar

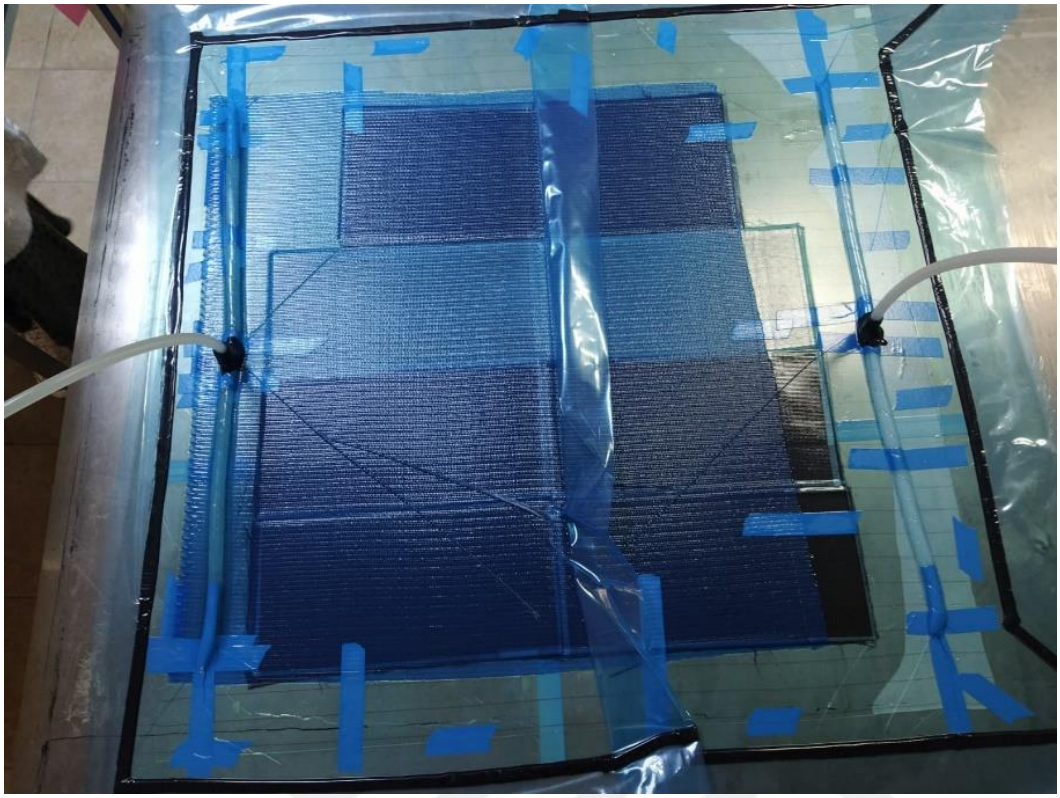


Resim 4.4. Akış filesi, soyma kumaşı ve spiral boru uygulaması

Tabla üzerine elyaf kumaşların seriminde son aşama olarak vakum torbası yerleştirilmiş, sızdırmazlık bandıyla kenarlar yapıştırılmıştır. Vakum torbası üzerine epoksi reçinenin aktarılacağı ve artan reçinenin dışarı boşaltılacağı düz boru bağlantıları yapılmıştır.

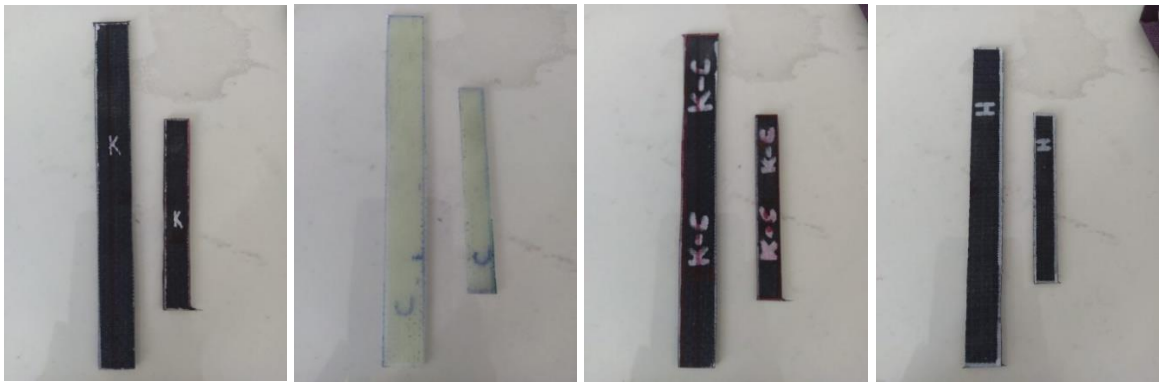
Kompozit plakaların üretiminde hızlı kürlenebilme özelliği gösteren KP 410 infüzyon tipi epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçine içerisine epoksinin %28'i oranında sertleştirici katılmış ve homojen karışım sağlamak için birkaç dakika karıştırılmıştır.

Elyaf kumaşlar üzerine reçine transferinden önce prosesin gerçekleştirileceği ortamın havası vakumlanmıştır ve reçine transferi tezgah tablası 50^{o}C - 60^{o}C arası sıcaklıktayken 700 – 750 mmHg basınçta gerçekleştirilmiştir. Reçine transferi tamamlandıktan sonra 1 saat boyunca plakalar 100^{o}C'de bekletilmiştir ve sonrasında oda sıcaklığında 24 saat boyunca plakaların kürlenmesinin tamamlanması için tabla üzerinde bırakılmıştır. Resim 4.5'te reçine transferinin gerçekleştiği aşama gösterilmiştir.



Resim 4.5. Reçine transferinin gerçekleştiği aşama

Kürlenme sonrası kompozit plakalar üzerinde numunelerin alınacağı bölgeler işaretlenmiştir. Kompozit plakalardan eğme ve çekme numuneleri disk testereyle kesilerek elde edilmiştir. Her bir numune tipi için 5'er adet olmak üzere 40 adet eğme numunesi ve 40 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Resim 4.6'da sol baştan sırasıyla karbon, cam, katmanlar arası hibrit karbon-cam ve hibrit dokuma karbon-cam çekme ve eğme numuneleri yer almaktadır. Resim 4.7'de ise geçişli yapıda olan numuneler yer almaktadır.

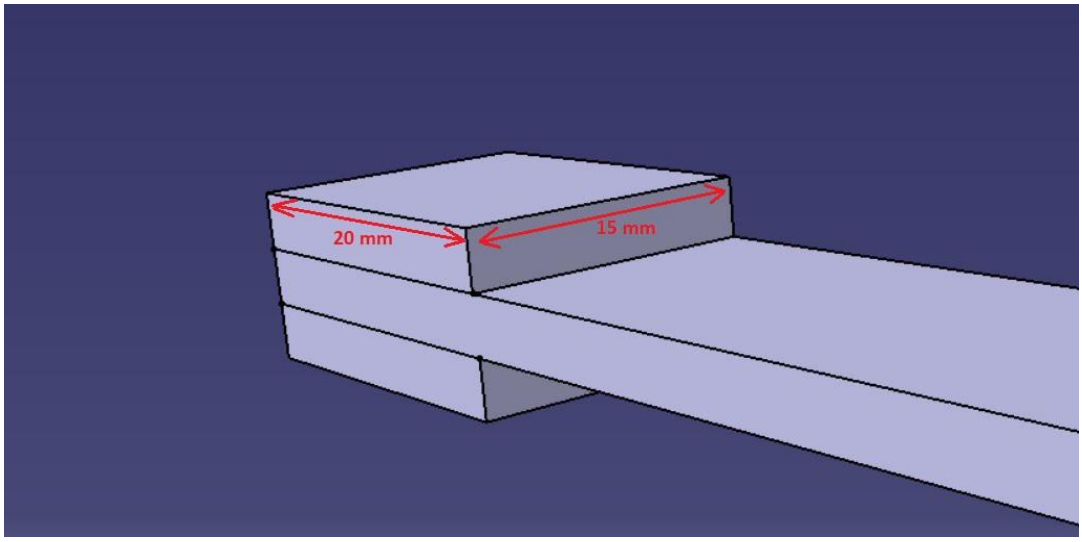


Resim 4.6. Geçişsiz yapıdaki numuneler



Resim 4.7. Geçişli yapıdaki numuneler

Polimer matrisli kompozit malzemelerden oluşan çekme numuneleri test cihazının çenelerine yerleştirildikten sonra sıkılırken numunelerde deformasyon meydana gelebilmektedir. Literatür incelendiğinde bu durumun önüne geçmek için numune uçlarına tab uygulaması yapıldığı görülmektedir. Tab malzemesi olarak numunenin kendi malzemesi kullanılabildiği gibi diğer polimer matrisli kompoit malzemeler veya metal malzemelerin de kullanıldığı örnekler mevcuttur[37]. Çekme numunelerinin her iki ucuna gibi kompozit plakadan kesilen tablar yapıştırılmıştır. Tab uygulaması ASTM D3039 standardında belirtildiği gibi yapılmıştır ve tab ölçüleri Resim 4.8'de yer almaktadır.



Resim 4.8. Tab ölçüleri



Resim 4.9. Tab uygulaması yapılan çekme numunesi

Çekme ve eğme testlerinde numune kalınlıkları test girdisi olacağı için kürlenme sonrası kompozit plakaların kalınlıkları ölçülmüştür. Çizelge 4.4'te kalınlık değerleri bulunmaktadır. Aynı fiber kumaşlardan üretilen geçişli numunelerin kalınlık değerlerinin ölçümler sonucunda aynı olduğu gözlemlenmiştir ve ayrıca Çizelgeda belirtilmemiştir.

Çizelge 4.4. Numunelerin kalınlık değerleri

Numune	Karbon	Cam	Katmanlar Arası Karbon-Cam	Hibrit Dokuma Karbon-Cam
Kalınlık	1,7 mm	1,3 mm	1,5 mm	1,8 mm

4.3. Uygulanacak Testler

4.3.1. Çekme testi

Çekme testleri, malzemenin çekme kuvvetleri altındaki performansının ölçülmesinde ve malzemenin yük taşıma kapasitesinin tespit edilmesinde kullanılan yaygın testlerdendir.

Test öncesinde numuneler tab uygulamasının yapıldığı bölgelerden test cihazındaki çenelerle sıkıştırılmıştır. Numuneler her iki uçtan 20 mm olacak şekilde çenelerle sabitlenmiştir. Testler, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Teknoloji Merkezi'nde

bulunan Instron 3369 test cihazı kullanılarak ve ASTM D3039 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, eksenel çekme kuvvetleri uygulanarak standartta tavsiye edilen 2 mm/dk hızında kırılma meydana gelene kadar gerçekleştirilmiştir. Resim 4.10'da yer alan test cihazı 50 kN kapasiteli servo motorlarla hareketi sağlanan elektromekanik bir test cihazıdır [38].



Resim 4.10. Instron 3369 test cihazı



Resim 4.11. Çenelere yerleştirilmiş çekme numunesi

4.3.2. Üç nokta eğme testi

Üç nokta eğme testleri, malzemenin eğilme mukavemetini ve kırılma dayanımını gibi mekanik özelliklerini belirleyebilmek için gerçekleştirilen testlerdir. Test sonuçları aynı zamanda malzemenin elastik ve plastik özelliklerinin analiz edilmesinde de faydalı olmaktadır. Numune altta yer alan iki destek arasına yerleştirilir. Üstten ve desteklerin ortasında numuneye kuvvet uygulanması sonucu numunede eğilme meydana gelir.

Bu tez çalışmasında üç nokta eğme testleri ASTM D790 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Teknoloji Merkezi'nde bulunan Instron 3369 test cihazı kullanılmıştır. Çekme testlerinin yapıldığı test cihazında çeneler çıkarılarak üç nokta eğme testlerine uygun aparak test cihazına bağlanmıştır. Numuneler desteklere destekler arası mesafe 40 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Testler, standartta tavsiye edilen 2 mm/dk hızında ve kırılma meydana gelene kadar gerçekleştirilmiştir. Resim 4.12'de yer alan eğme aparatının üzerinde bulunan destek silindirleri ve kuvvetin uygulandığı silindir numuneye zarar vermemesi için kauçuk malzemeden oluşmaktadır ve silindirlerin çapı 5 mm'dir.



Resim 4.12. Test cihazına yerleştirilmiş eğme numunesi

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Her bir numune tipi için beşer adet hazırlanan numunelerin hepsi test edilmiştir. Test sırasında numunelere ait kuvvet, uzama, gerilme, gerinim ve elastik modüle ait veriler elde edilmiş ve numunelerin test öncesi ve sonrasına ait görselleri alınmıştır.

5.1. Çekme Testi Sonuçları

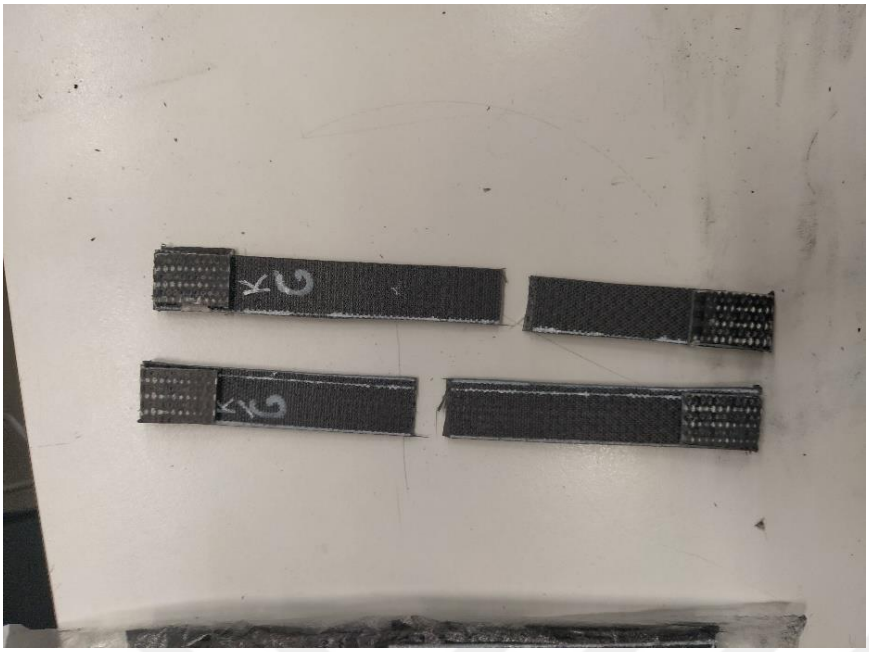
İlk olarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla karbon, karbon geçişli, cam, cam geçişli, katmanlar arası hibrit karbon-cam, karbon-cam geçişli, katman içi hibrit dokuma karbon-cam ve hibrit dokuma karbon-cam geçişli numuneler test edilmiştir.

Takviye malzemesi olarak sadece karbon fiberlerin bulunduğu ve geçişli yapıda olmayan numunelerde gevrek kırılma meydana gelmiştir. Test sonrası Resim 5.1'deki numuneler incelendiğinde birden fazla noktada kırılmanın gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Resim 5.1. Test sonrası karbon numuneler

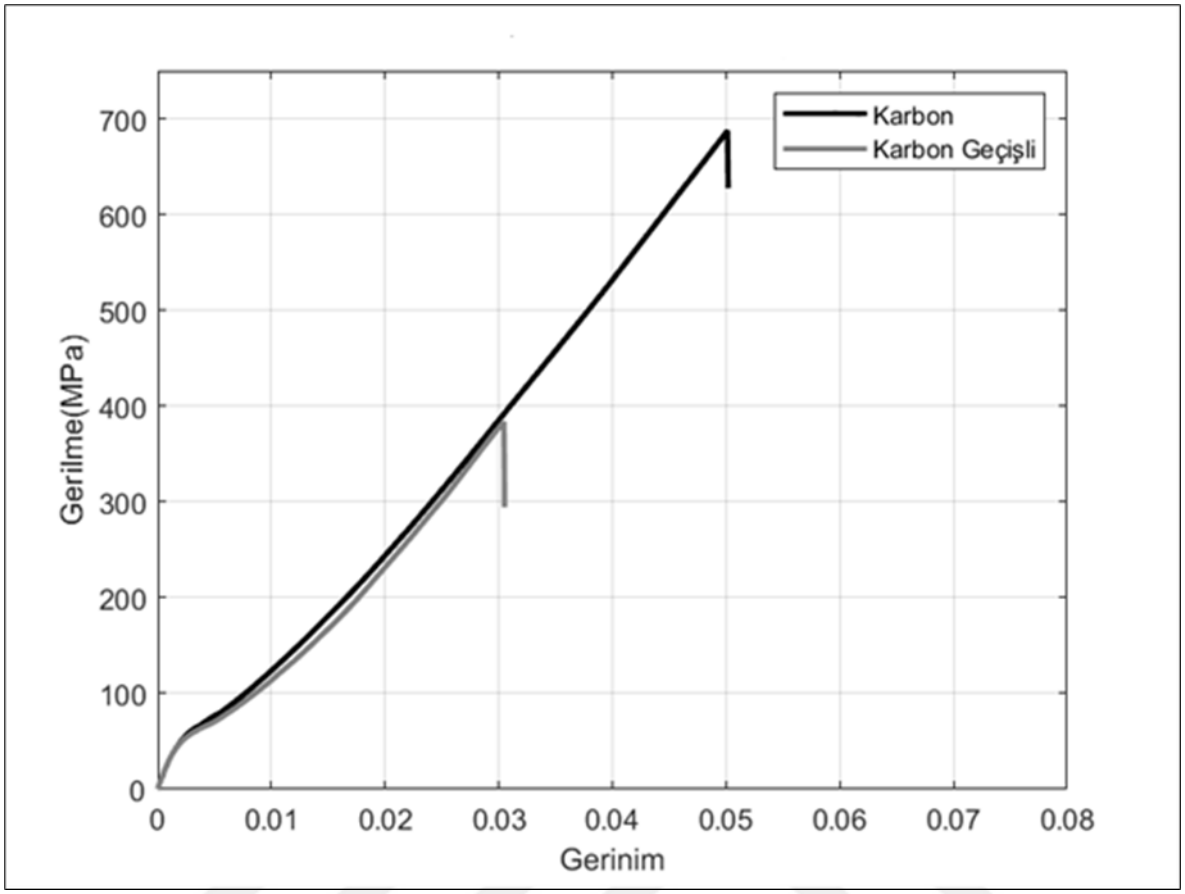
Karbon geçişli numunelerde kırılma Resim 5.2'de de görüldüğü gibi geçişlerin olduğu bölgelerde meydana gelmiştir. Karbon numunelerde olduğu gibi karbon geçişli numuneler kırılma anında gevrek davranış sergilemiştir.



Resim 5.2. Test sonrası karbon geçişli numuneler

Karbon ve karbon geçişli numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen değerlerin gerilme-gerinim grafiği (Şekil 5.1) oluşturulmuştur. Geçişli yapıda olmayan karbon epoksi malzeme çekme dayanımı 696 MPa, geçişli yapıdaki karbon epoksi malzemenin çekme dayanımı ise 375 MPa olarak ölçülmüştür. Var (2021) tez çalışmasında iki eksenli 200 gr/m^2 karbon kumaşla aynı üretim yöntemiyle hazırlanan geçişsiz numunelerin 630 MPa çekme dayanımına sahip olduğunu belirtmiştir [39]. Elde edilen sonucun referans çalışma ile arasında %9'luk fark olduğu ve sonucun tutarlı olduğu değerlendirilmektedir.

Karbon epoksi kompozit malzemede geçişli yapının bulunması malzemenin çekme dayanımında %46'lık bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Karbon epoksi malzemenin kırılma anında gerinim değerinin yaklaşık 0,05, karbon epoksi geçişli malzemenin kırılma anında gerinim değerinin ise yaklaşık 0,03 olduğu tespit edilmiştir.



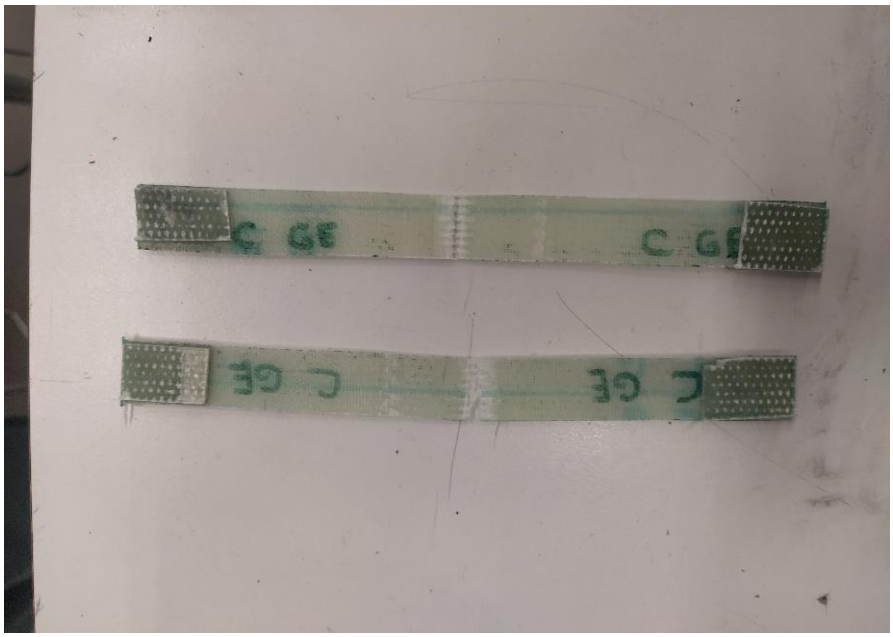
Şekil 5.1. Karbon ve karbon geçişli gerilme-gerinim grafiği

Resim 5.3’te geçişli yapıda olmayan cam epoksi numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen görüntüleri yer almaktadır. Burada görüldüğü gibi numuneler tablara yakın bölgelerden kırılmıştır. Karbon epoksi malzemeye göre nispeten daha sünek bir kırılma gerçekleşmiştir.

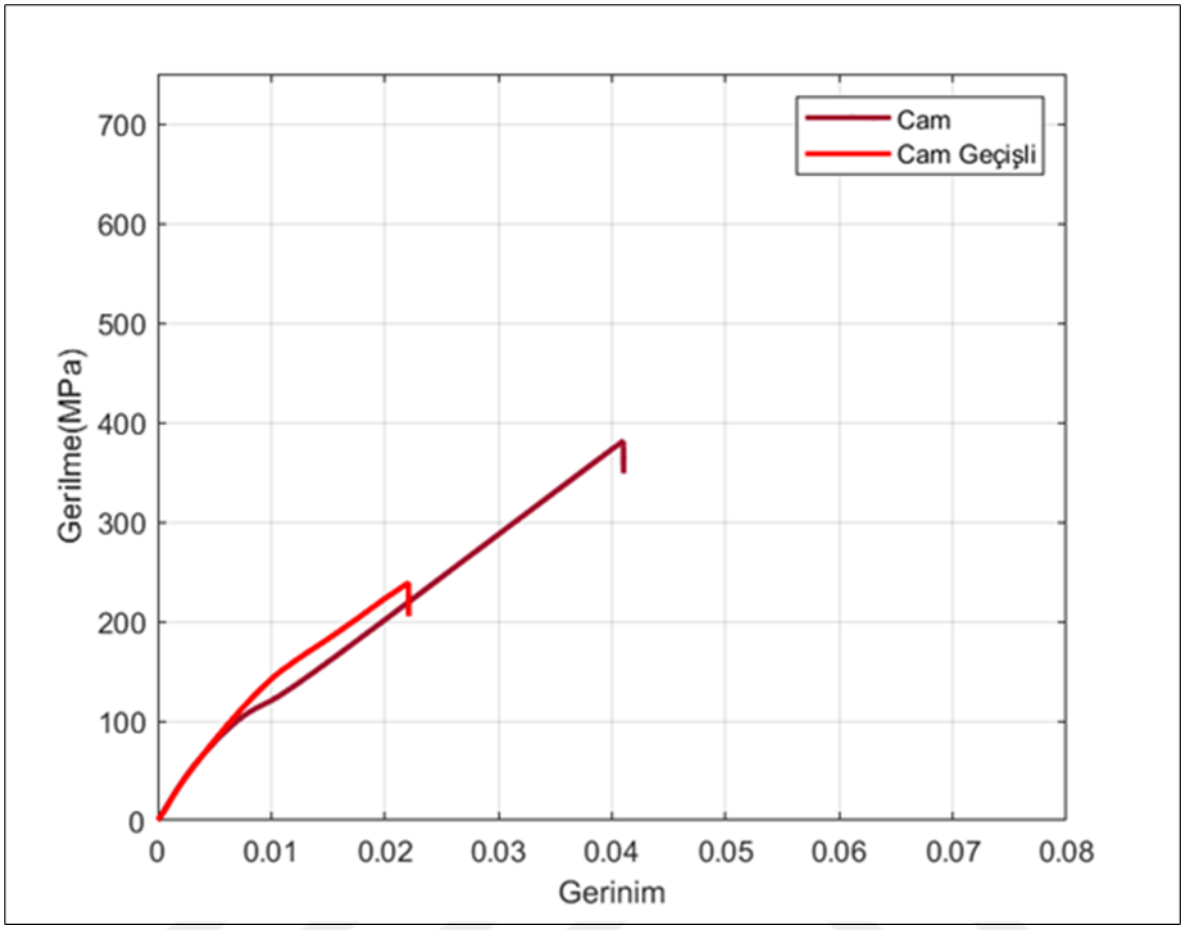


Resim 5.3. Test sonrası cam numuneler

Cam geçişli numunelerde ise kırılmalar geçişlerin olduğu bölgelerde olmuştur. Resim 5.4'teki görselde yer alan numunelerin kırılma bölgelerinde nispeten sünek davranış sergilediği ve kırılmanın olmadığı diğer geçiş bölgesinde ise plastik deformasyon olduğu gözlemlenmiştir.



Resim 5.4. Test sonrası cam geçişli numuneler



Şekil 5.2. Cam ve cam geçişli gerilme-gerinim grafiği

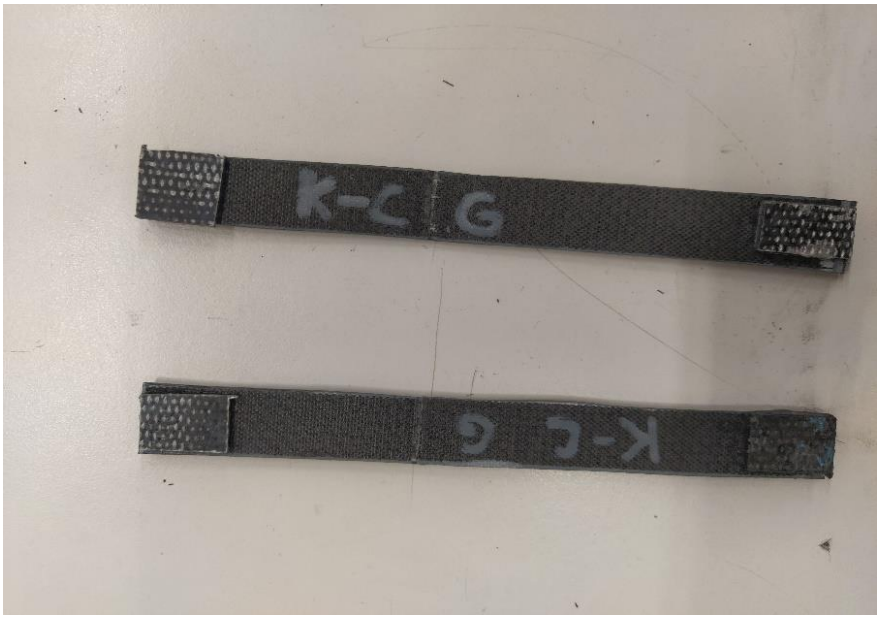
Cam ve cam geçişli numunelerin çekme testleri sonrasında elde edilen verilerden gerilme-gerinim grafiği (Şekil 5.2) oluşturulmuştur. Cam epoksi malzemenin çekme dayanımı yaklaşık olarak 375 MPa olarak ölçülmüştür. Cam epoksi geçişli malzemenin ise çekme dayanımı yaklaşık 247 MPa olarak ölçülmüştür. Geçişli yapıda olan cam epoksi malzemede geçişsiz yapıdaki cam epoksi malzemeye göre çekme dayanımının %34 düştüğü gözlemlenmiştir. Cam epoksi malzemenin kırılma anındaki gerinim değerinin yaklaşık 0,042, geçişli yapıdaki cam epoksi malzemenin gerinim değerinin ise yaklaşık 0,023 olduğu tespit edilmiştir.

Katmanlar arası hibrit karbon-cam numunelerin çekme testleri sonucunda elde edilen görselleri Resim 5.5'te yer almaktadır. Numunelerde kırılmalar farklı bölgelerde olmuştur ve cam malzemenin de etkisiyle karbon numunelerde gözlenen gevrek kırılma karbon-cam numunelerde daha az gözlenmiştir. Kırılma bölgelerinde cam fiberlerin sünek yapıda plastik deformasyona uğradığı görülmektedir.

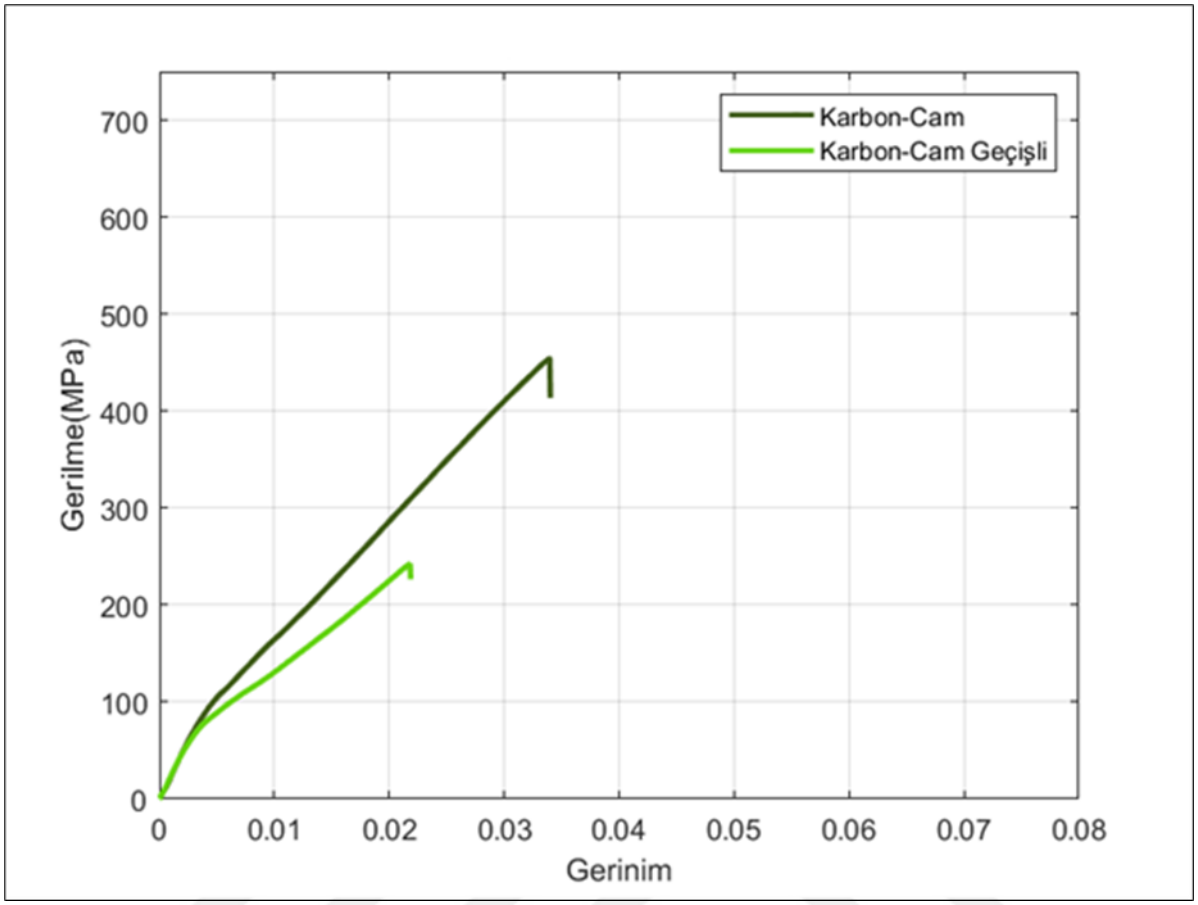


Resim 5.5. Test sonrası karbon-cam numuneler

Geçişli yapıdaki katmanlar arası hibrit karbon-cam numuneler çekme testi sonucunda Resim 5.6'daki gibi geçiş belgelerinden kırılmışlardır. Geçişli numunelerde kırılma geçişsiz karbon-cam numunelere göre daha gevrek gerçekleşmiştir. Geçişsiz karbon-cam numunelerdeki cam fiberlerin kırılma bölgesinde sünek yapıda plastik deformasyon görülürken geçişli karbon-cam numunelerdeki cam fiberlerde sünek yapıda bir plastik deformasyon gözlemlenmemiştir.



Resim 5.6. Test sonrası karbon-cam geçişli numuneler



Şekil 5.3. Karbon-cam ve karbon-cam geçişli gerilme-gerinim grafiği

Geçişli ve geçişsiz yapıdaki katmanlar arası hibrit karbon-cam numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen verilerle gerilme-gerinim grafiği (Şekil 5.3) oluşturulmuştur. Karbon-cam epoksi malzemenin çekme dayanımı yaklaşık olarak 461 MPa, gerinim değeri ise yaklaşık 0,0363 olarak tespit edilmiştir. Geçişli yapıdaki karbon-cam epoksi malzemenin ise çekme dayanımı yaklaşık 240 MPa, gerinim değeri ise yaklaşık 0,0231 olduğu gözlemlenmiştir. Karbon-cam epoksi malzemede geçişli yapının bulunması çekme dayanımının %48 oranında düşmesine neden olmuştur.



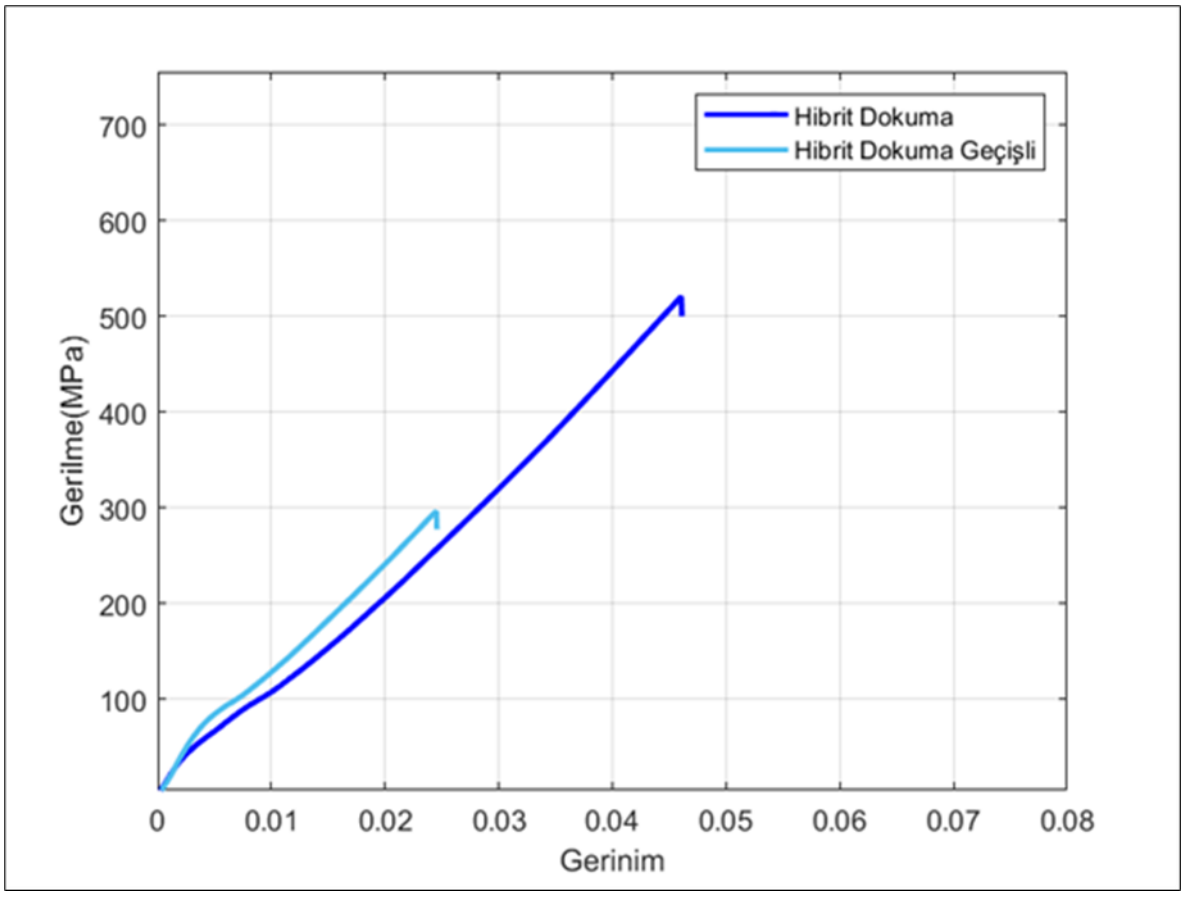
Resim 5.7. Test sonrası hibrit dokuma numuneler

Katman içi hibrit kompozit malzemelerden olan hibrit dokuma karbon-cam numunelerde tablara yakın bölgelerde kırılma gerçekleşmiştir. Kırılmanın meydana geldiği bölgelerde numunenin yapısında yer alan cam fiberlerde sünek yapıda plastik deformasyon olduğu net bir şekilde görülmektedir. Geçişsiz olan cam ve karbon-cam numunelerle karşılaştırıldığında daha gevrek bir kırılma olduğu gözlemlenmiştir.



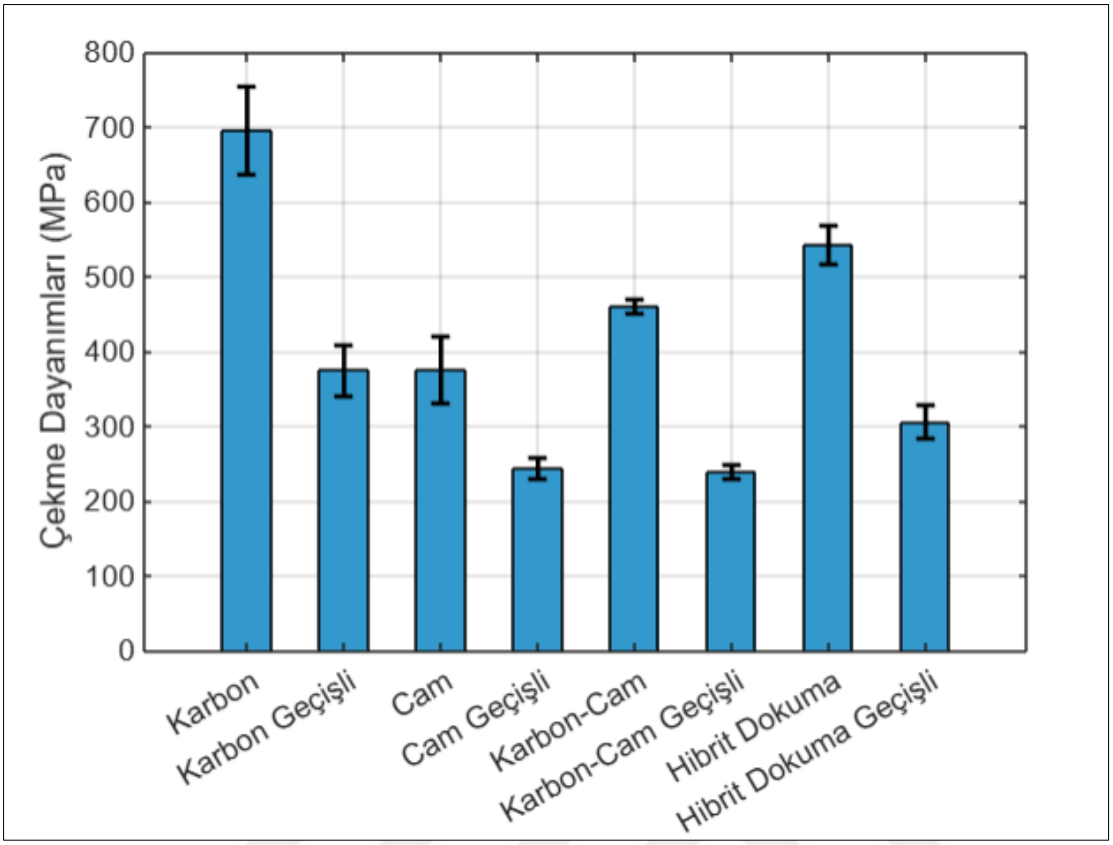
Resim 5.8. Test sonrası hibrit dokuma geçişli numuneler

Resim 5.8'de görüldüğü gibi hibrit dokuma geçişli numunelerde de geçiş bölgelerinde kırılma meydana gelmiştir. Geçişsiz numunelere göre daha gevrek kırılmaların olduğu görülmüştür.

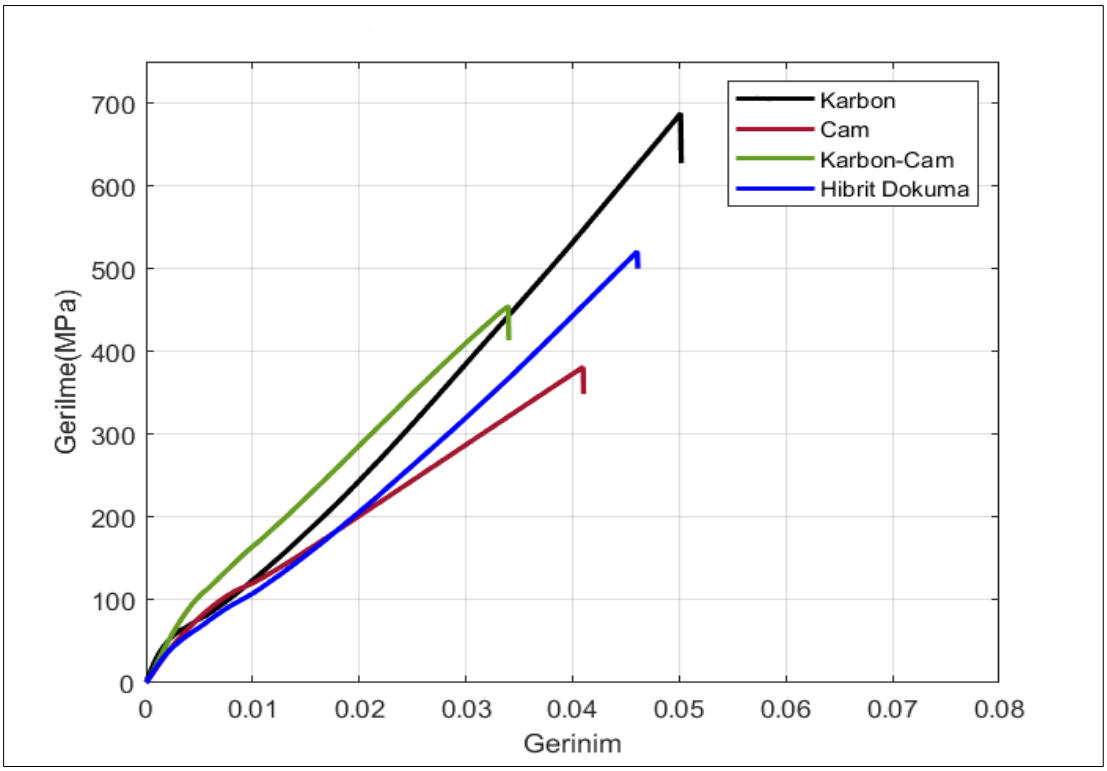


Şekil 5.4. Hibrit dokuma ve hibrit dokuma geçişli gerilme-gerinim grafiği

Katman içi hibrit dokuma karbon-cam geçişli ve geçişsiz yapıda olan numunelere ait verilerden gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir. Şekil 5.4'te yer alan grafikte geçişsiz yapıda olan hibrit dokuma karbon-cam malzemenin çekme dayanımı yaklaşık 543 MPa, hibrit dokuma karbon-cam geçişli malzemenin çekme dayanımı ise yaklaşık 306 MPa olarak ve kırılma anında gerinim değerleri ise sırasıyla yaklaşık 0,0474 ve 0,0274 olarak ölçülmüştür. Çekme dayanımları karşılaştırıldığında hibrit dokuma karbon-cam malzemede geçişli yapının bulunması çekme dayanımını %44 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. Çekme dayanımları bar grafiği



Şekil 5.6. Geçişsiz yapıdaki numunelere ait gerilme-gerinim grafiği

Kompozit malzemenin kendi içerisinde geçişli-geçişsiz yapıların çekme dayanımına etkisiyle beraber malzemenin hibritleştirme türüne göre de çekme testi sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilen test sonuçları beş numunenin ortalama değerlerini göstermektedir. Grafikler incelendiğinde sadece karbonla takviyelendirilmiş kompozit malzeme test sonuçlarına göre en iyi performansı göstermiştir. Hibritleştirme türüne göre katmanlar arası hibrit karbon-cam malzemenin katman içi hibrit olan hibrit dokuma karbon-cam malzemeye göre çekme dayanımının daha düşük olduğu görülmektedir. Test sonuçlarının ortalama değerleri karbon malzemeye göre kıyaslandığında katman içi hibrit dokuma mazlemenin çekme dayanımının %22, katmanlar arası hibrit malzemenin çekme dayanımının %34, cam malzemenin çekme dayanımının % daha düşük olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Test sonuçları ortalama değerler karşılaştırmasının anlamlı olup olmadığını değerlendirmek amacıyla bağımsız verilerin karşılaştırılmasında kullanılabilen ve istatistiksel bir yaklaşım olan t-testi, çekme dayanımı sonuçlarının analizi için uygulanmıştır. Çizelge 5.1'de t-testiyle ilgili formüller yer almaktadır.

İki bağımsız grubun ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını test etmek amacıyla "t" değerleri elde edilir. T-testinden sonra hesaplanan serbestlik derecesi (df) istatistiksel analizlerde bağımsız bilgi miktarını ifade eder. Serbestlik derecesi ve "t" değerleri kullanılarak hesaplanan "p" değeri sonuçları Çizelge 5.2'deki yorumlanarak elde edilen ortalama değerlerin anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığı tespit edilir [41].

Çizelge 5.1. T-testiyle ilgili formüller [42]

Hesaplanan Değerler	Formüller
"t" değerleri	$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$
serbestlik derecesi (df)	$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$
"p" değerleri	$p = P(T \geq \lvert t \rvert) = \int_{\lvert t \rvert}^{\infty} f(T, df)\, dT$

T-testinde karşılaştırılacak iki grubun ortalama değerleri, standart sapmaları, örneklem adetleri bulunur ve Çizelge 5.1'deki değerler elde edilir.

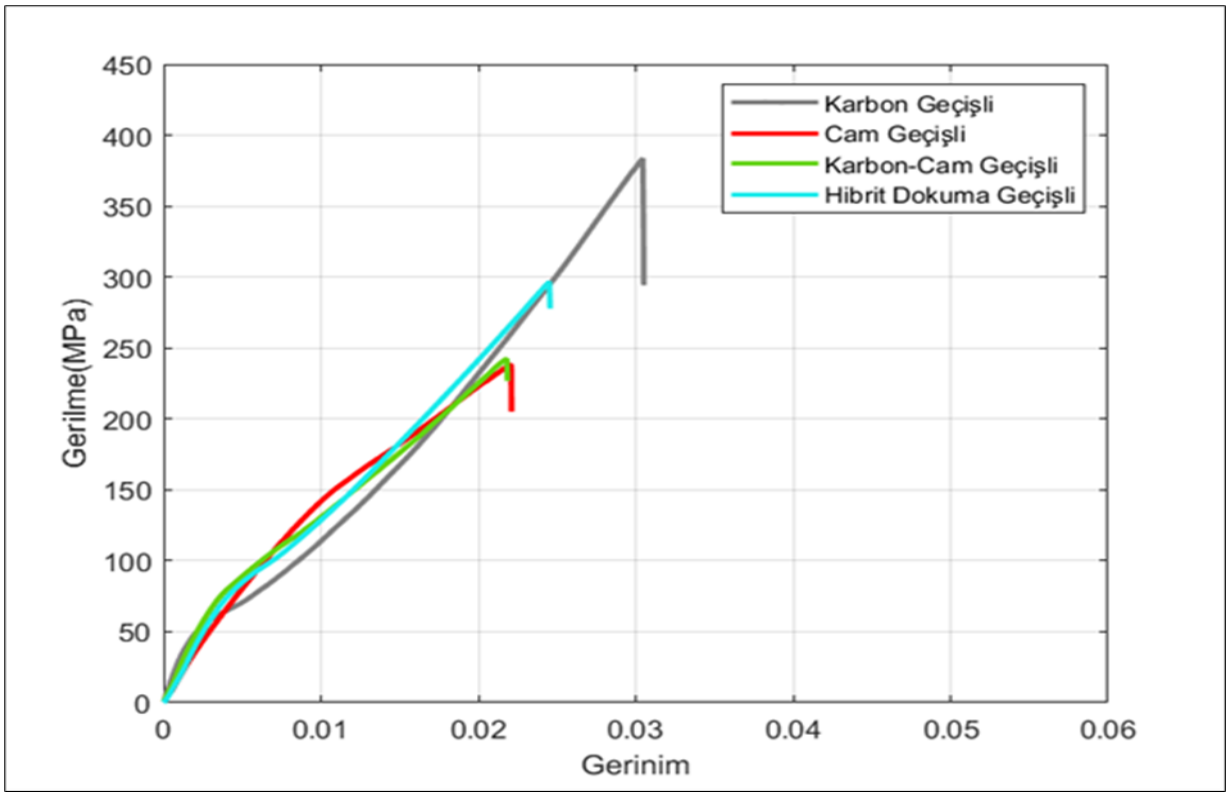
Çizelge 5.2. P değerinin yorumlanması [42]

Koşul	P Değerinin Yorumu
$p < 0,05$	Fark istatistiksel olarak anlamlıdır.
$p \geq 0,05$	Fark istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Çizelge 5.3. Geçişsiz karbon, geçişsiz karbon-cam ve geçişsiz hibrit dokuma çekme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları

Test Sonuçları Karşılaştırılan Gruplar	T Değeri	P Değeri	Sonuç
Geçişsiz Karbon - Geçişsiz Karbon-Cam	5,327	0,006	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon - Geçişsiz Hibrit Dokuma	4,148	0,009	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon-Cam – Geçişsiz Hibrit Dokuma	4,099	0,026	Fark Anlamlıdır.

Çizelge 5.3'te çekme testinde en iyi performansı sergileyen geçişsiz karbon numune referans alınarak hibritleştirme türlerinde çekme dayanımı değişim oranları ve bu farkların anlamlı olup olmadığına dair t-testi sonuçları verilmiştir. T-testi sonucunda karşılaştırılan numune tipleri arasındaki çekme dayanımı farklarının anlamlı olduğu görülmüştür. Geçişsiz numunelerde çekme dayanımları büyükten küçüğe karbon, hibrit dokuma ve karbon-cam şeklinde bulunmuştur.



Şekil 5.7. Geçişli yapıdaki numunelere ait gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 5.4. Geçişli karbon, geçişli karbon-cam ve geçişli hibrit dokuma çekme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları

Test Sonuçları Karşılaştırılan Gruplar	T Değeri	P Değeri	Sonuç
Geçişli Karbon - Geçişli Karbon-Cam	8,337	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişli Karbon - Geçişli Hibrit Dokuma	3,618	0,008	Fark Anlamlıdır.
Geçişli Karbon-Cam – Geçişli Hibrit Dokuma	6,162	0	Fark Anlamlıdır.

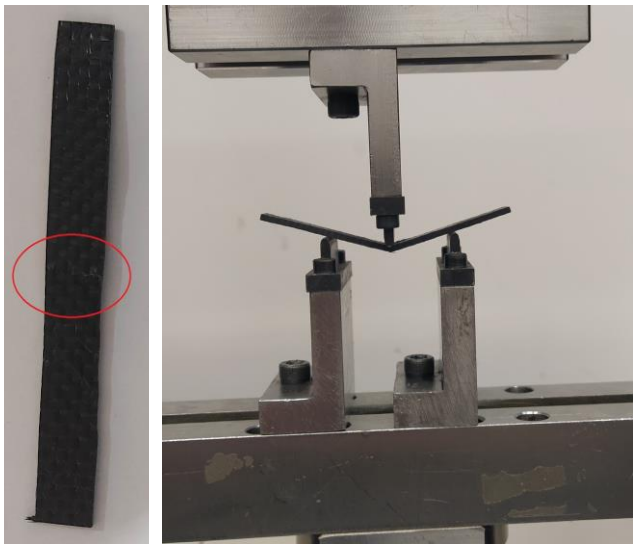
Geçişli yapıdaki kompozit malzemeler Şekil 5.7'deki numunelerin ortalama değerleri arasındaki ilişki ve Çizelge 5.4'teki t-testi sonuçları kendi aralarında incelendiğinde çekme dayanımları büyükten küçüğe karbon, hibrit dokuma ve karbon-cam olarak aynı şekilde sıralanmaktadır. Geçişli numuneler arasında en iyi performansı sergileyen karbon numune referans olarak alınmıştır. Burada geçişsiz numunelerden farklı olarak katmanlar arası hibrit karbon-cam malzeme ve cam malzemenin test sonuçları birbirine yakın çıkmıştır.

Tüzemen tarafından karbon-cam hibrit malzemelerin çekme performansları üzerine gerçekleştirilen çalışmada katmanlar arası hibrit karbon-cam malzemenin dayanımlarının sadece karbon ve sadece cam malzeme dayanımlarının ortalamasında performans gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca katman içi geçişli yapıyla katmanın bir tarafı karbon fiber ve diğer tarafı cam fiber olacak şekilde katman içi hibrit karbon-cam numuneler elde edilmiş ve çekme dayanımları incelenmiştir [43]. Katman içi hibrit numunenin çekme dayanımı sadece cam numune dayanımının altında performans göstermiş ve geçiş bölgesi temas aralığı azaldıkça malzemede çekme dayanımı azalmıştır. Geçişsiz cam malzeme, geçişsiz karbon-cam malzeme ve geçişli hibrit dokuma malzemenin test sonuçları bu çalışmayla karşılaştırıldığında tutarlı sonuçlar ortaya çıktığı değerlendirilmektedir.

5.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

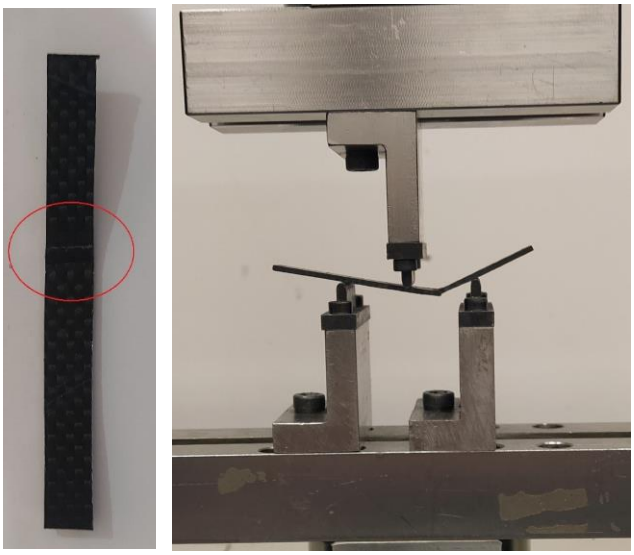
Üç nokta eğme testleri sırasıyla karbon, cam, katmanlar arası hibrit karbon-cam ve katman içi hibrit dokuma karbon-cam numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Test sonunda karbon numuneler kuvvetin uygulandığı orta noktadan kırılmıştır. Kırılma sonucunda malzemede tam bir ayrılma meydana gelmemiş, matris malzemesi ve iki eksenli düz kumaştan oluşan karbon kumaş malzemeyi bütün olarak tutmuştur. Resim 5.9'da kırılma anında test cihazındaki görüntüsü ve kırılmanın bölgesi görüntüleri yer almaktadır.



Resim 5.9. Karbon numune ve kırılma anı görüntüleri

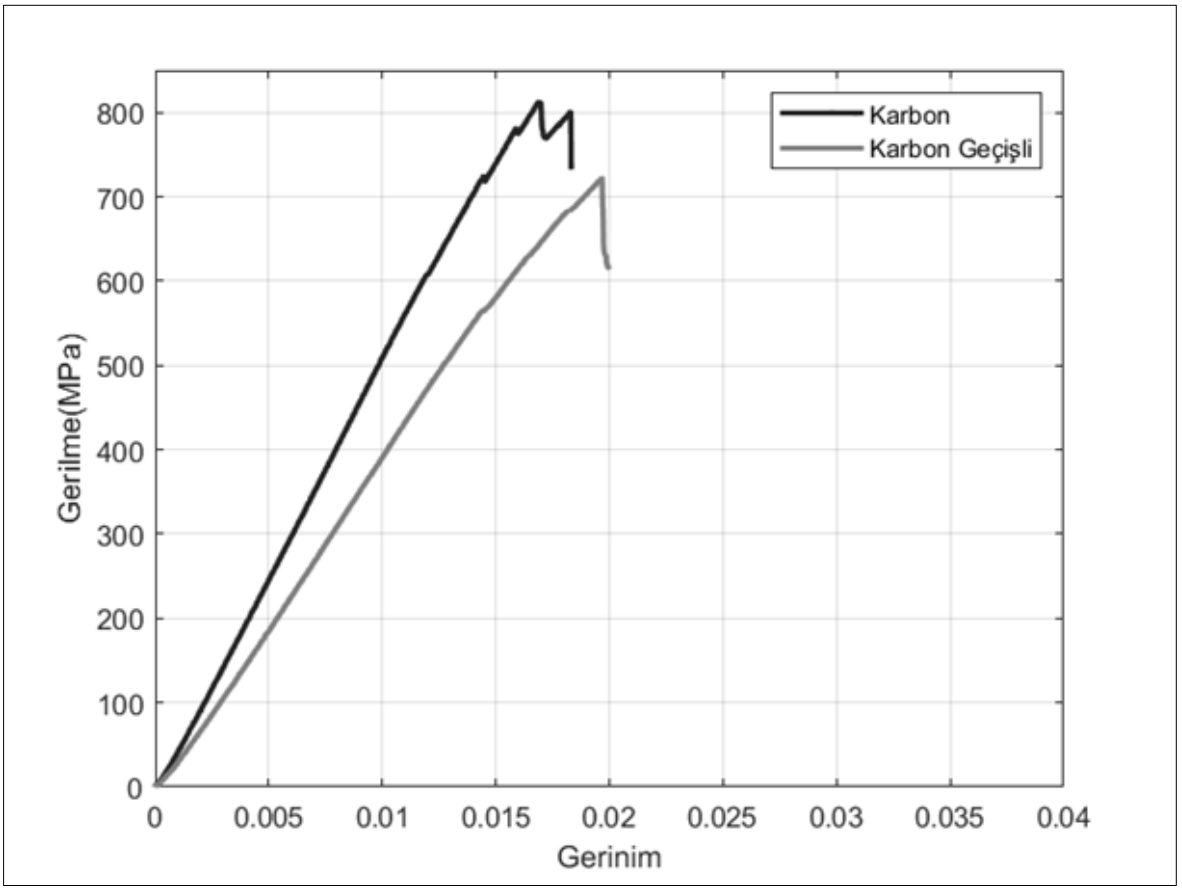
Geçişli yapıdaki karbon numunelerde kırılmalar kuvvetin uygulandığı orta kısımda meydana gelmemiş, orta noktanın sağ ve sol yanına denk gelen geçiş bölgelerinden olmuştur. Kırılma anına kadar numune üzerinde eğilme etkisiyle en fazla yer değiştirme orta kısımda olmuştur. Resim 5.10'da geçişli karbon numunenin kırılmadan sonra test cihazındaki görüntüsü ve numune üzerinde kırılma bölgesinin görüntüleri mevcuttur.



Resim 5.10. Karbon geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri

Test sırasında karbon ve karbon geçişli numunelerin elde edilen verileriyle şekil 5.8'deki eğilme gerilme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Ortalama eğme dayanımı karbon numunelerde 820 MPa, gerinim değeri ise 0,02 olarak ölçülmüştür. Karbon numuneler diğer

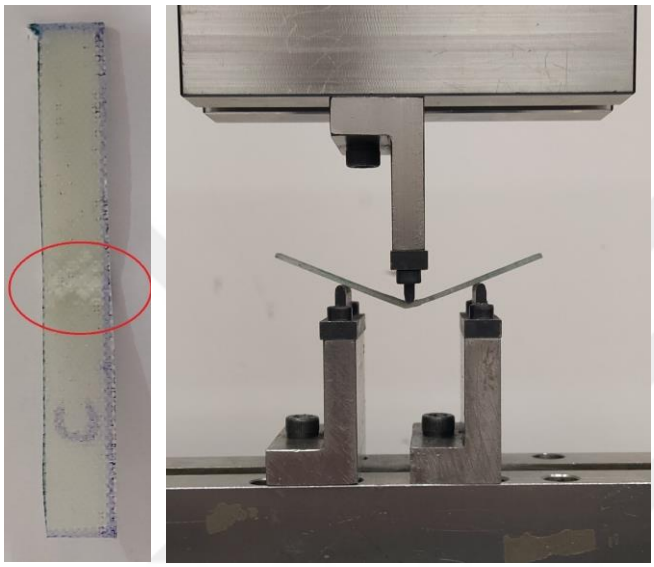
numune tipleri içerisinde en iyi eğme performansı göstermiştir. Karbon geçişli numunelerin ortalama eğme dayanımı 736 MPa, gerinim değeri ise 0,021 olarak ölçülmüştür. Test sonuçlarına göre geçişli yapının karbon epoksi kompozit malzemede uygulanması sonucunda malzemenin eğme dayanımında yaklaşık %10'a varan bir düşüşe neden olmuştur. Bölüm 5.1'de geçişli yapıdaki karbon malzemenin çekme dayanımındaki düşüşle karşılaştırıldığında eğme dayanımındaki düşüşün yaklaşık 4,5 kat daha az olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.



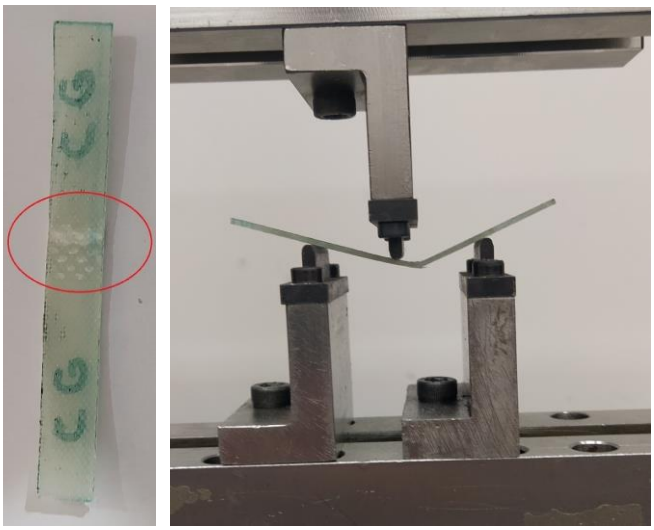
Şekil 5.8. Karbon ve karbon geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği

Test sonrasında cam numunelerin test cihazındaki görüntüleri ve kırılma bölgesinin görüntüleri kaydedilmiştir. Cam numunelerin çekme testinde olduğu gibi eğme testi sonunda da kırılma bölgelerinde sünek yapıda plastik deformasyon olduğu gözlemlenmiştir. Cam numunelerde kırılmanın olduğu bölgelerde iki eksenli cam kumaşların ve epoksi matris malzemesinin numuneyi bütün olarak tutabilmesinden dolayı tam olarak ayrılma meydana gelmemiştir.

Cam geçişli numunelerde kırılmanın geçiş bölgelerinden olduğu görülmektedir. Kırılma anına kadar numune üzerindeki en fazla yer değiştirme numuneye kuvvetin uygulandığı orta kısımda olmuştur. Geçişli numunelerde takviye malzemesinin geçiş bölgesine sahip olması ve süreksiz olmasından dolayı kırılma meydana gelen bölge geçişsiz numunelere göre daha belirgin plastik deformasyona uğramıştır. Resim 5.11 ve Resim 5.12'de cam geçişsiz ve cam geçişli numunelerine ait kırılma bölgelerinin görüntüleri yer almaktadır.

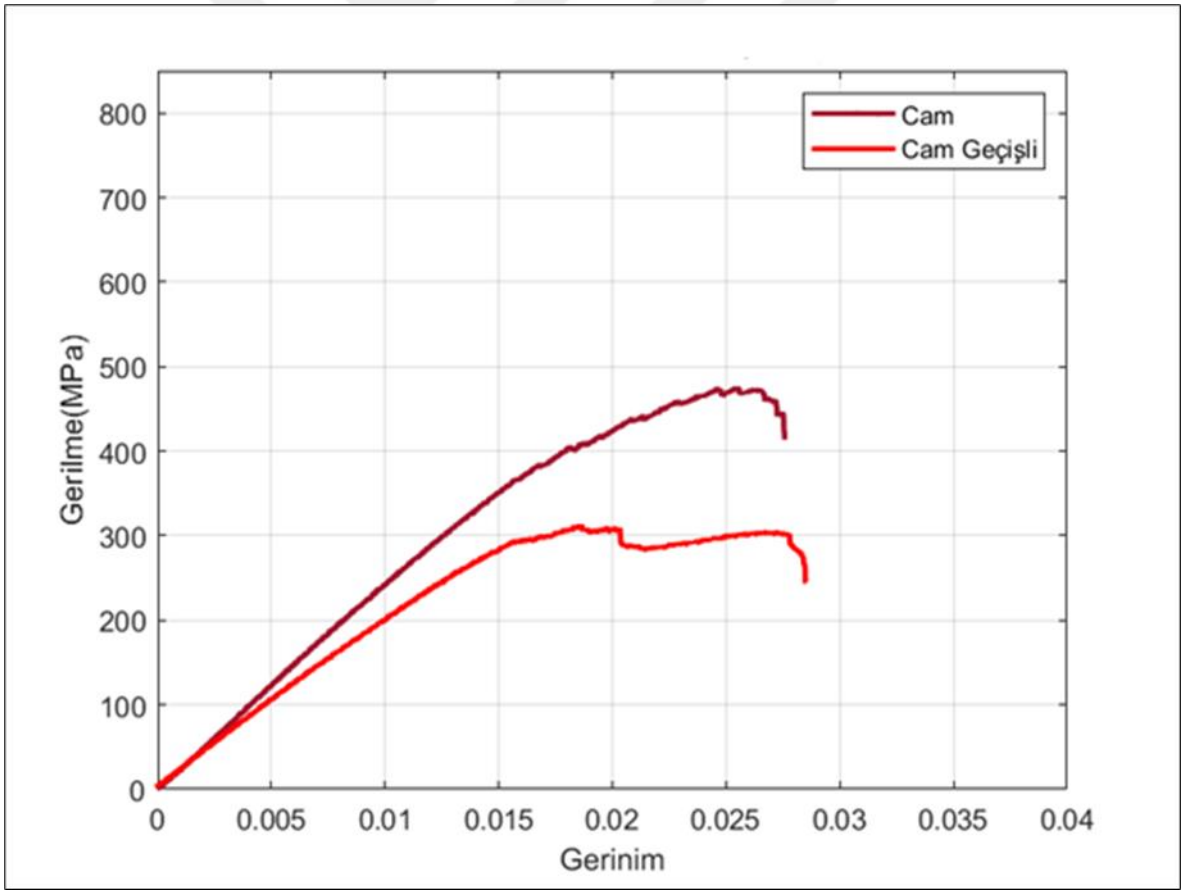


Resim 5.11. Cam numune ve kırılma anı görüntüleri



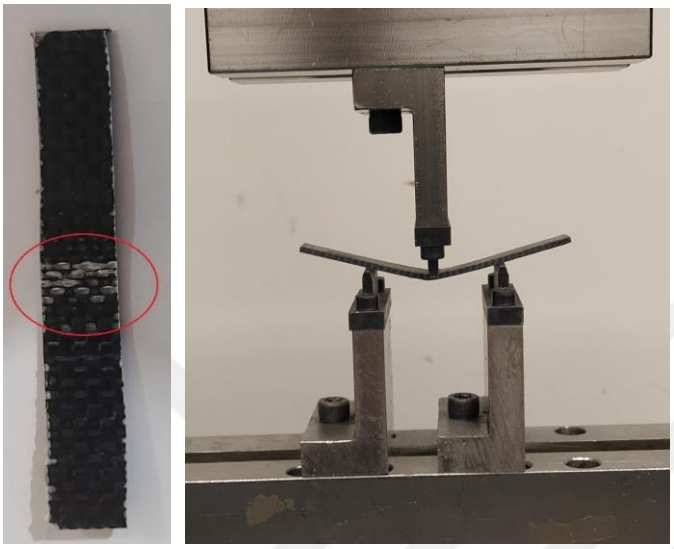
Resim 5.12. Cam geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri

Cam ve cam geçişli numunelerin test sırasında elde edilen verileriyle şekil 5.9'daki eğme gerilme-gerinim grafiği oluşturulmuştur. Cam numune geçişsiz yapıdaki numuneler içerisinde en zayıf eğme dayanımına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Cam epoksi malzemenin eğme dayanımı 459 MPa ve kırılma anındaki gerinim değeri 0,0267, geçişli yapıdaki cam epoksi malzemenin eğme dayanımı 311 MPa ve kırılma anındaki gerinim değeri ise 0,0244 olrak ölçülmüştür. Geçişli yapıdaki cam malzemedeki eğme dayanımı geçişsiz yapıdakine göre %32 daha düşük olduğu görülmektedir. Zhang ve arkadaşlarının 16 mm temas aralığına sahip çift geçiş tipine sahip geçişli ve geçişsiz cam epoksi numuneler üzerinde yaptığı çalışmada malzemenin eğme dayanımındaki düşüşün %21 olarak belirtilmiştir [15]. Kullanılan takviye malzemesi oranı, geçiş temas aralığı ve üretim yöntemlerinin farklı olması aradaki farkın ortaya çıkmasında etkili olduğu ve aradaki farka rağmen sonuçların tutarlı olduğu değerlendirilmektedir.



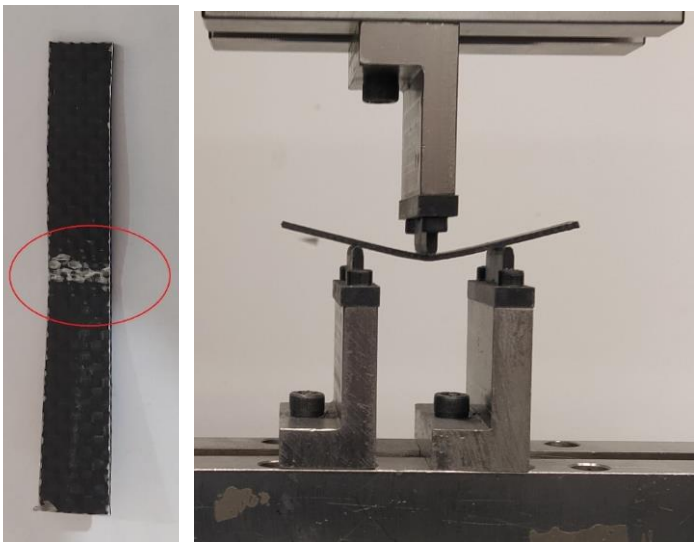
Şekil 5.9. Cam ve cam geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği

Katmanlar arası hibrit karbon-cam numuneleri test sonundaki görüntüleri kaydedilmiştir. Kırılma bölgelerindeki görüntüler Resim 5.13'de yer almaktadır. Karbon-cam numunelerin kırılma bölgesi kuvvetin uygulandığı orta kısım olarak gözlemlenmiştir. Çatlak zikzaklar çizerek ilerlemiştir.



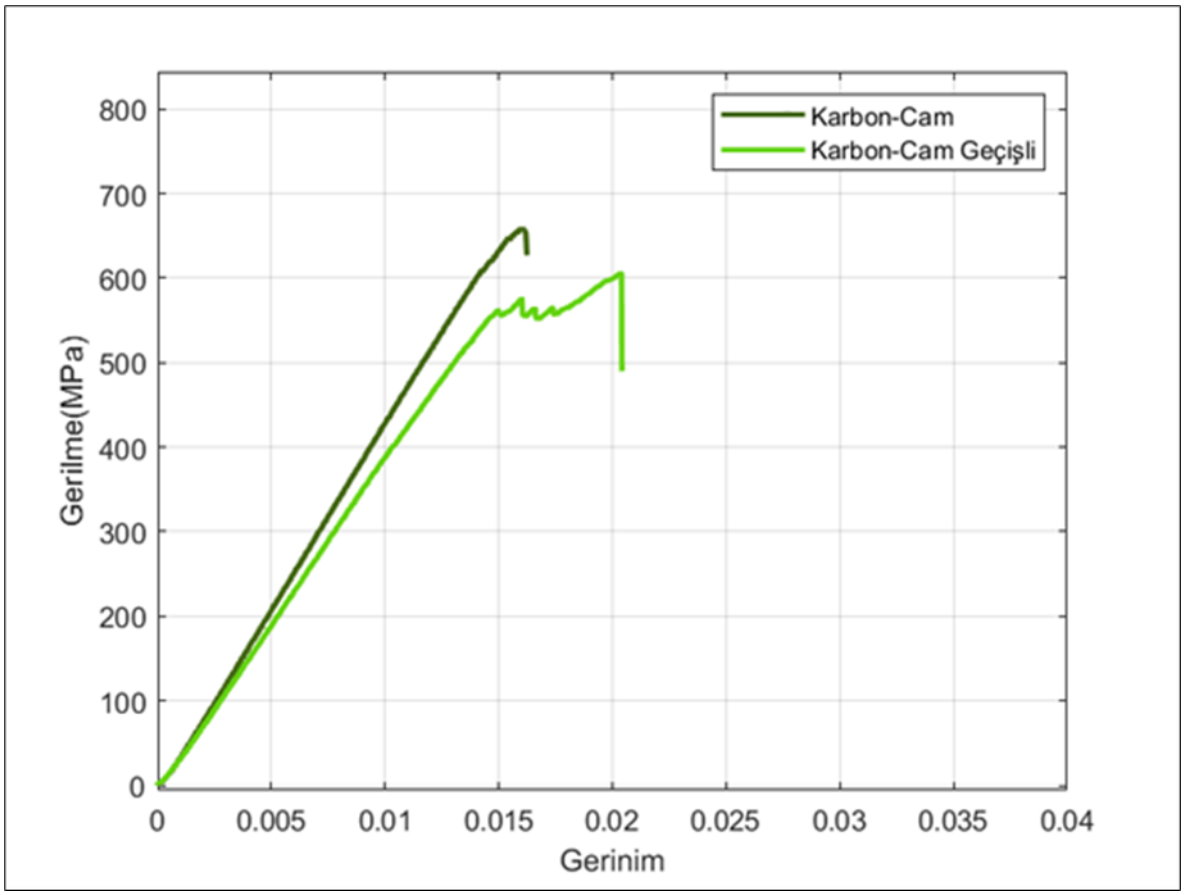
Resim 5.13. Karbon-cam numune ve kırılma anı görüntüleri

Resim 5.14'te görülen karbon-cam geçişli numunelerde diğer geçişli numunelerin aksine kırılma geçişin olduğu bölgeden gerçekleşmemiştir. Geçişsiz numunelerdeki gibi kuvvetin uygulandığı orta kısımda kırılma meydana gelmiştir. Geçişli numunede hat boyunca çatlak ilerlemesi meydana gelmiştir.



Resim 5.14. Karbon-cam geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri

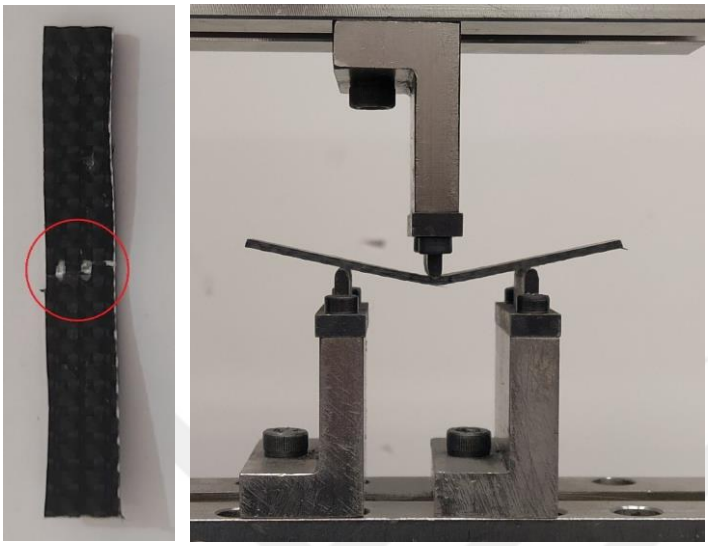
Katmanlar arası hibrit karbon-cam geçişli ve geçişsiz numunelerin testleri sırasında elde edilen verilerden eğme gerilme-gerinim grafiği (Şekil 5.10) oluşturulmuştur. Karbon-cam epoksi malzemenin eğme dayanımı 641 MPa ve kırılma anındaki gerinim değeri 0,0181 olarak ölçülmüştür. Geçişli karbon-cam epoksi malzemenin ise eğme dayanımı 602 MPa ve kırılma anındaki gerinim değeri ise 0,019 olarak ölçülmüştür. Geçişli yapının karbon-cam malzemede bulunması malzemenin eğme dayanımında %6'lık bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. Bu sonuç sadece karbon ve sadece cam malzemelerdeki düşüşten daha az olduğunu göstermiştir.



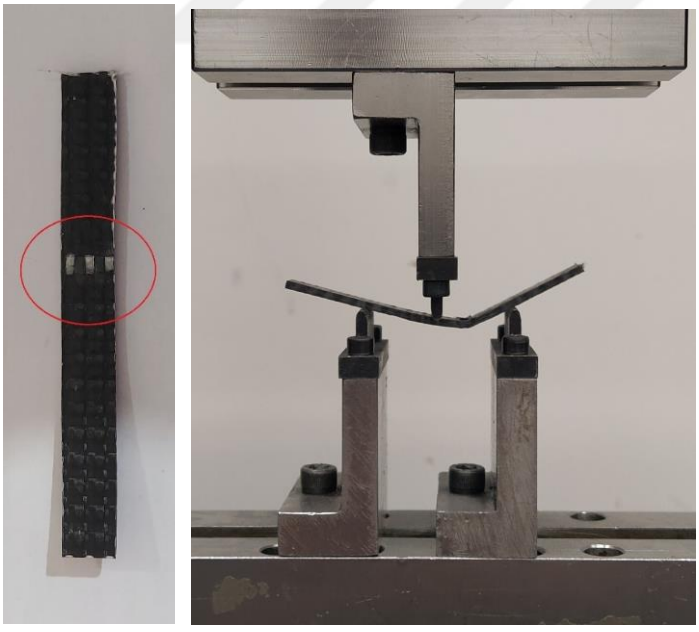
Şekil 5.10. Karbon-cam ve karbon-cam geçişli eğme gerilme gerinim grafiği

Katman içi hibrit dokuma karbon-cam numunelerin testten sonraki görüntüleri Resim 5.15'te yer almaktadır. Diğer geçişsiz numunelerde olduğu gibi geçişsiz yapıda olan hibrit dokuma numunede kırılma kuvvetin uygulandığı orta kısımda meydana gelmiştir. Hibrit dokuma malzemede kırılma bölgesindeki cam fiberlerin sünek yapıda plastik deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Resim 5.16'daki geçişli yapıdaki hibrit dokuma numunede kırılma geçiş bölgesinde meydana gelmiştir. Eğme kuvveti altında kırılma anına kadar numune üzerindeki

en fazla yer değiştirme kuvvetin uygulandığı orta bölümde olmuştur. Geçişsiz numunede kuvvetin uygulandığı bölgede plastik deformasyon bölgesi oluşmuştur. Geçişli numunede ise kırılma meydana gelmiş ve çatlak ilerlemesi düz bir hat boyunca meydana gelmiştir.



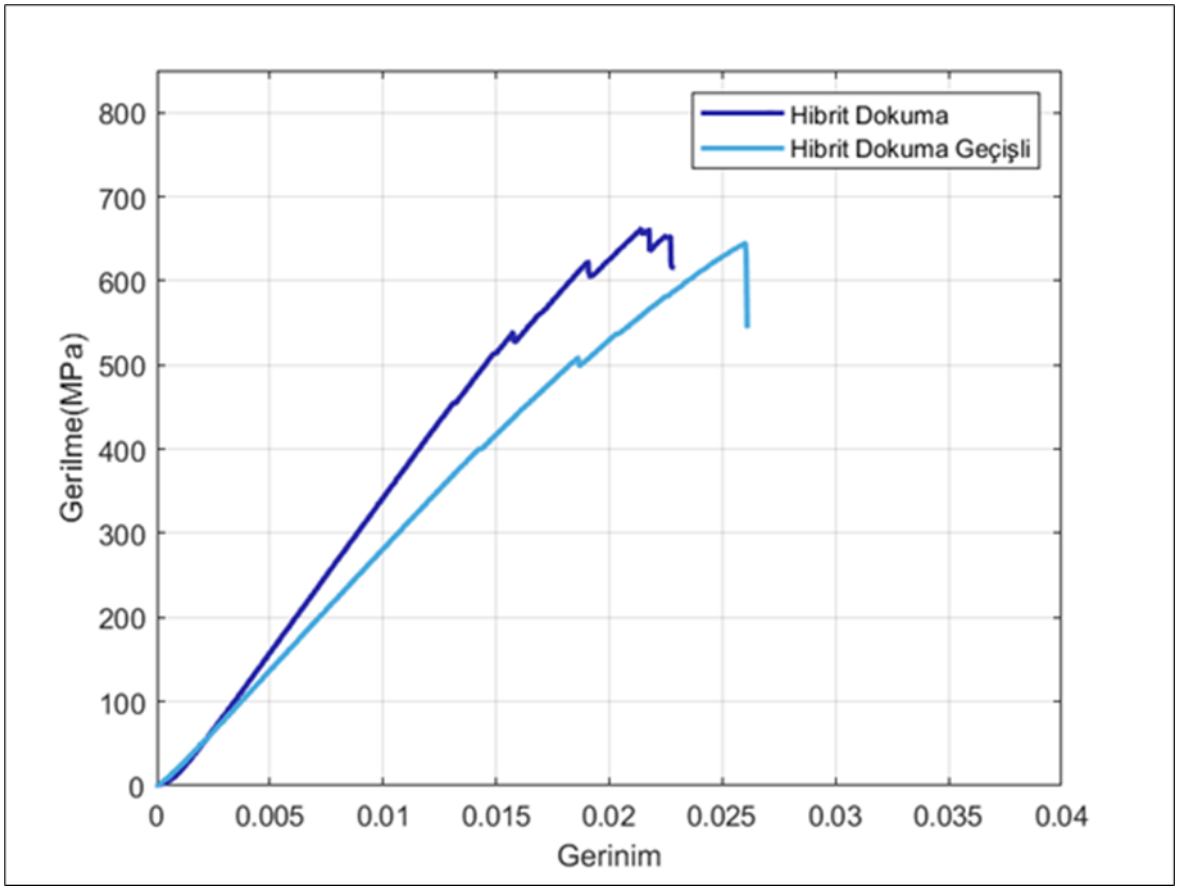
Resim 5.15. Hibrit dokuma numune ve kırılma anı görüntüleri



Resim 5.16. Hibrit dokuma geçişli numune ve kırılma anı görüntüleri

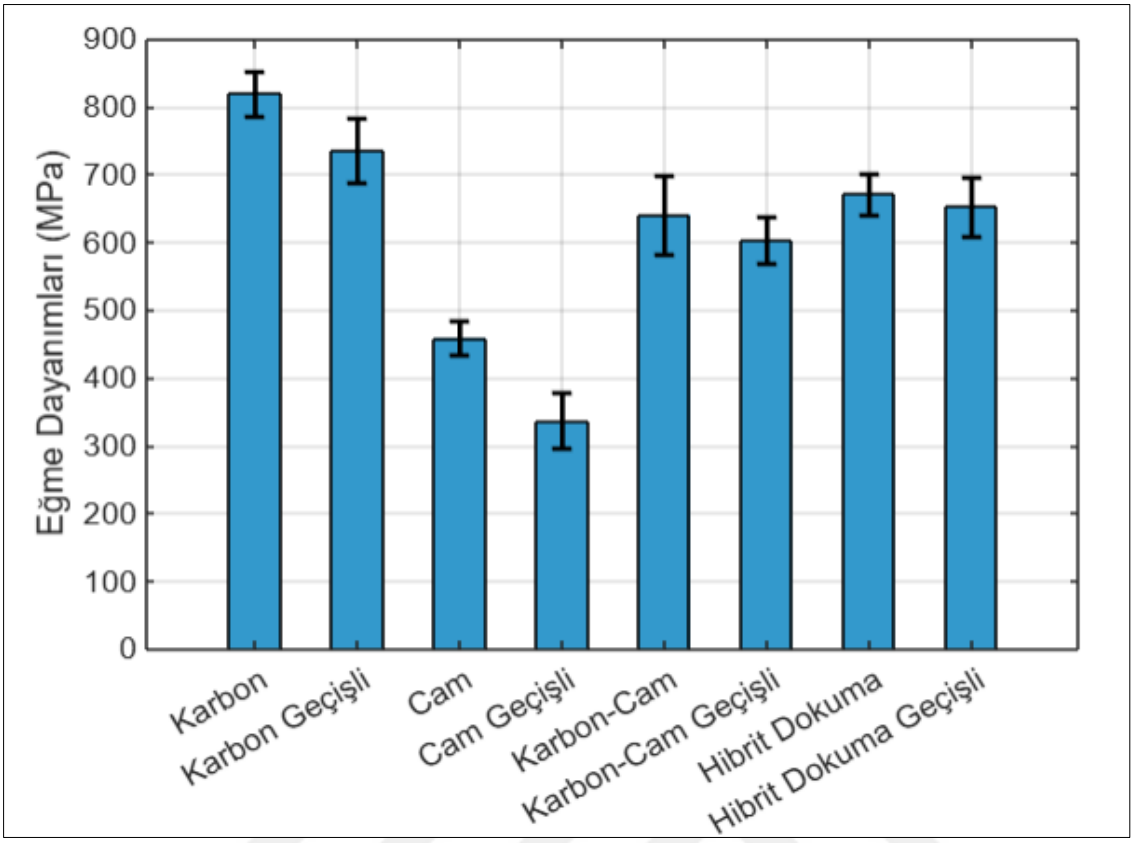
Geçişli ve geçişsiz yapıdaki katman içi hibrit dokuma karbon-cam malzemelerin test sırasında elde edilen verileriyle eğme gerilme-gerinim grafiği (Şekil 5.11) oluşturulmuştur. Geçişsiz yapıdaki hibrit dokuma numunenin eğme dayanımı 671 MPa ve kırılma anındaki

gerinim değeri 0,021 olarak ölçülmüştür. Geçişli hibrit dokuma numunenin eğme dayanımı 652 MPa ve kırılma anındaki gerinim değeri 0,0255 olarak ölçülmüştür.

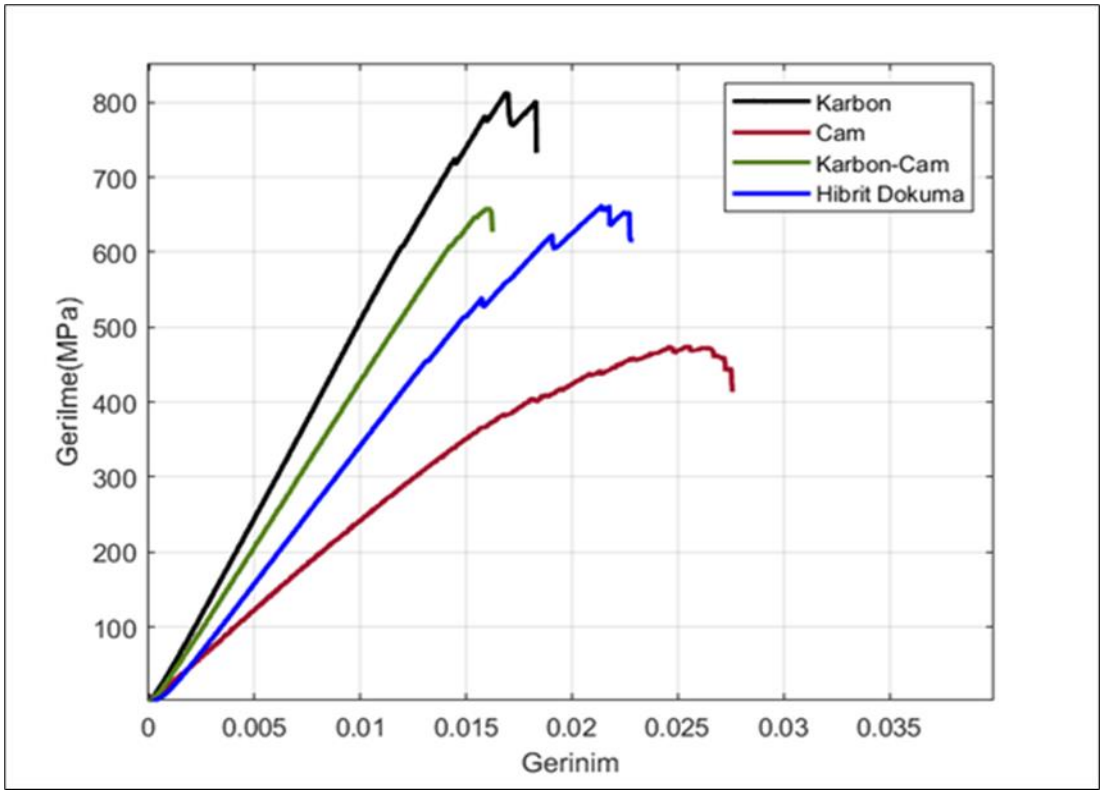


Şekil 5.11. Hibrit dokuma ve hibrit dokuma geçişli eğme gerilme-gerinim grafiği

Hibrit dokuma malzemede geçişli yapının bulunması malzemenin eğme dayanımını %3 düşürmüştür. Bu düşüş diğer tip numunelerdeki düşüşlerle kıyaslandığında en az gerçekleşen düşüş olduğu görülmektedir.



Şekil 5.12. Eğme dayanımları bar grafiği



Şekil 5.13. Geçişsiz yapıdaki numunelere ait eğme gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 5.5. Geçişsiz karbon, geçişsiz karbon-cam ve geçişsiz hibrit dokuma eğme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları

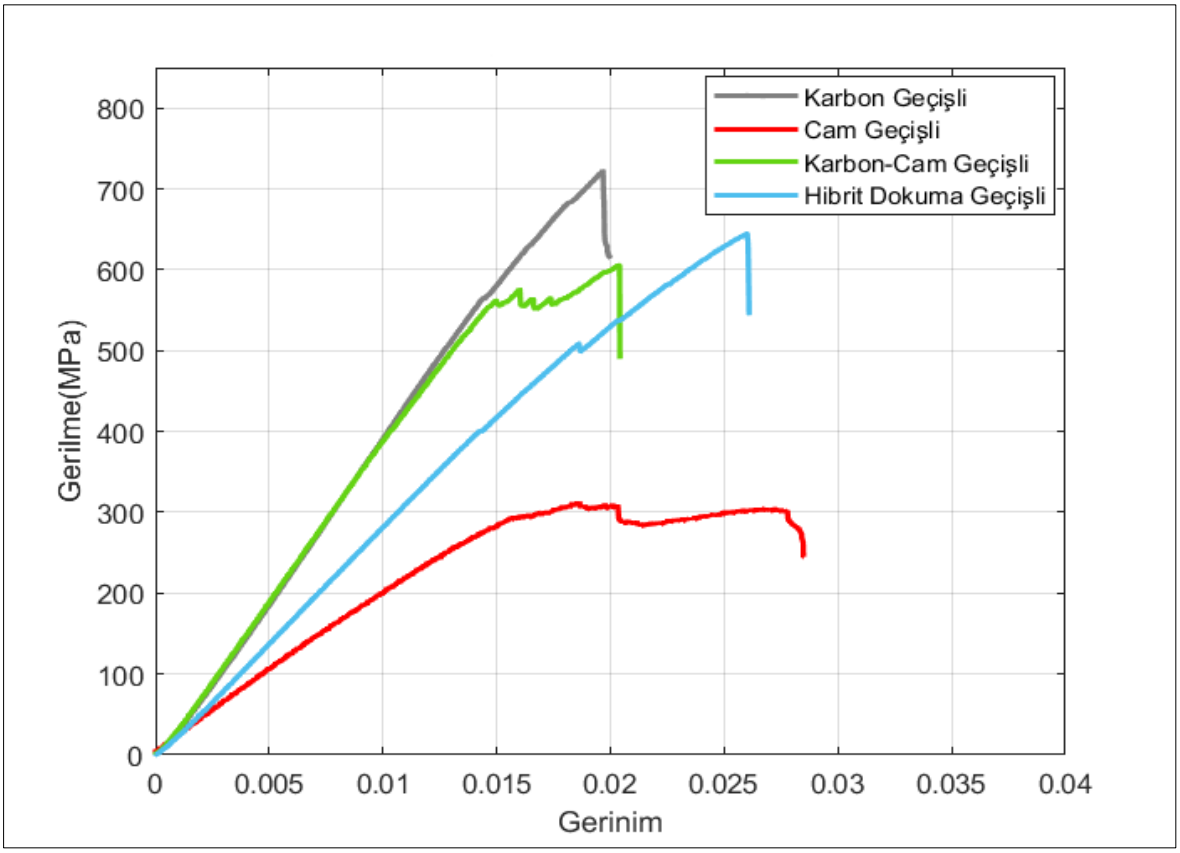
Test Sonuçları Karşılaştırılan Gruplar	T Değeri	P Değeri	Sonuç
Geçişsiz Karbon - Geçişsiz Karbon-Cam	5,405	0,001	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon - Geçişsiz Hibrit Dokuma	6,922	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon-Cam – Geçişsiz Hibrit Dokuma	1,019	0,338	Fark Anlamlı Değildir.

Malzemelerin geçişli ve geçişsiz yapıda olan numunelerinin eğme davranışlarının tespitiyle beraber tez çalışmasının bir diğer odak noktası hibritleştirme türlerinin malzemedeki mekanik özellikleri nasıl etkilediğinin tespit edilmesidir. Şekil 5.13'te geçişsiz yapıların eğme gerilme-gerinim grafikleri ve şekil 5.14'te ise geçişli yapıların eğme gerilme-gerinim grafikleri oluşturulmuştur. Geçişsiz yapıdaki kompozit malzemelerin Şekil 5.12'deki ortalama eğme dayanımı değerleri arasındaki ilişki ve Çizelge 5.5'teki t-testi sonuçları kendi aralarında incelendiğinde eğme dayanımlarında karbon numunenin dayanımının hibrit dokuma ve karbon-cam numunelerin dayanımından yüksek olduğu belirlenmiştir. Hibrit türleri olan karbon-cam ve hibrit dokuma numunelerin ortalama değerlerinin arasındaki farkın t testi sonucunda anlamlı olmadığı görülmüştür. Geçişsiz numuneler arasında en iyi performansı sergileyen karbon numune referans olarak alınmıştır.

Jesthi ve arkadaşları (2018) karbon, cam ve katmanlar arası hibrit malzemelerin eğme performanslarını inceledikleri çalışmada sıralamayı büyükten küçüğe karbon, karbon-cam ve cam şeklinde elde etmişlerdir. Referans çalışmada elde edilen dayanım sıralamasının bu tez çalışmasını destekler nitelikte olmasına rağmen eğme dayanımlarını karbon için 403 MPa, hibrit için 380-400 MPa arası cam için ise 300-320 MPa arası eğme dayanımı elde etmişlerdir[40]. Elle yatırma üretim yönteminin tercih edilmesi bu farkın ortaya çıkmasında en önemli etken olduğu değerlendirilmektedir.

VARTM yöntemiyle gerçekleştirilen üretimlerde fazla reçine vakumlandığı için kompozit malzemenin fiber/matris oranı elle yatırma yöntemine göre yüksek çıkmaktadır ve bu durum kompozit malzemede takviye elemanı oranının artmasına, bir başka deyişle mekanik

özelliklerin iyileşmesine neden olmaktadır. Tüzemen tarafından yapılan çalışmada kompozit numunelerin fiber, matris ve boşluk oranları yakma testi uygulanarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada matris oranının artması kompozit malzemede boşluk oranının artmasında etkili olduğu ifade edilmiş ve malzemede bulunan boşlukların çentik etkisine neden olarak yük altındaki malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmiştir [43].



Şekil 5.14. Geçişli yapıdaki numunelere ait eğme gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 5.6. Geçişli karbon, geçişli karbon-cam ve geçişli hibrit dokuma eğme sonuçları arasındaki t-testi sonuçları

Test Sonuçları Karşılaştırılan Gruplar	T Değeri	P Değeri	Sonuç
Geçişli Karbon - Geçişli Karbon-Cam	5,072	0,001	Fark Anlamlıdır.
Geçişli Karbon - Geçişli Hibrit Dokuma	2,907	0,02	Fark Anlamlıdır.
Geçişli Karbon-Cam – Geçişli Hibrit Dokuma	2,036	0,076	Fark Anlamlı Değildir.

Geçişli yapıdaki kompozit malzemelerin Şekil 5.12'deki eğme dayanımları ortalama değerleri arasındaki ilişki ve Çizelge 5.6'daki t testi sonuçları kendi aralarında incelendiğinde karbon numunenin eğme dayanımlarının hibrit dokuma ve karbon-cam numunelerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hibrit türleri olan karbon-cam ve hibrit dokuma numunelerin ortalama değerlerinin arasındaki farkın t-testi sonucunda anlamlı olmadığı görülmüştür. Geçişli numuneler arasında en iyi performansı sergileyen karbon numune referans olarak alınmıştır.

Çizelge 5.7. Ortalama değerlere göre geçişli yapılarda geçişsiz yapılara oranla dayanım düşüşü

	Karbon	Cam	Katmanlar Arası Hibrit Karbon-Cam	Hibrit Dokuma Karbon-Cam
Çekme Testi	%46	%34	%48	%44
Eğme Testi	%10	%26	%6	%3

Kompozit malzemelerde elyafların kesilmesiyle oluşturulan geçişli yapıların çekme ve eğme dayanımlarında neden olduğu değişim Çizelge 5.7'de oransal olarak gösterilmiştir. Geçişli yapıların malzemenin çekme dayanımını üzerinde daha fazla düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir. Eğme dayanımınları üzerinde ise nispeten daha az etkili olduğu görülmektedir. Hibritleştirilmiş kompozit numunelerde oransal olarak fark daha az çıkmıştır. Çizelge 5.8'de geçişli ve geçişsiz yapılar arasındaki ortalama değerlerde elde edilen farkın anlamlı olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılan t-testinde çekme dayanımlarındaki farkın tamamen anlamlı olduğu eğme dayanımlarında ise karbon ve cam numuneler arasındaki oransal farkın anlamlı olduğu hibrit türleri içerisindeki farkın anlamlı olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. Hibrit yapılardaki malzemelerde eğme testi sonuçları ve t-testi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde geçişli yapılardaki numunelerde net olarak eğme dayanımının düştüğünden bahsedilememektedir.

Çizelge 5.8. Ortalama değerlere göre geçişli yapılarda geçişsiz yapılara oranla dayanım düşüşünün istatistiksel değerlendirilmesi

Test Sonuçları Karşılaştırılan Gruplar	Test	T Değeri	P Değeri	Sonuç
Geçişsiz Karbon - Geçişli Karbon	Çekme	9,378	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon - Geçişli Karbon	Eğme	2,945	0,022	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Cam – Geçişli Cam	Çekme	6,405	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Cam – Geçişli Cam	Eğme	5,657	0,001	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon-Cam – Geçişli Karbon-Cam	Çekme	28,416	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Karbon-Cam – Geçişli Karbon-Cam	Eğme	1,257	0,244	Fark Anlamlı Değildir.
Geçişsiz Hibrit Dokuma – Geçişli Hibrit Dokuma	Çekme	13,817	0	Fark Anlamlıdır.
Geçişsiz Hibrit Dokuma – Geçişli Hibrit Dokuma	Eğme	0,768	0,465	Fark Anlamlı Değildir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında karbon, cam ve hibrit dokuma karbon-cam kumaşlar kullanılarak karbon, cam, katmanlar arası hibrit karbon-cam ve katman içi hibrit dokuma karbon-cam malzemelerden her biri için literatürde çift geçiş tipi olarak adlandırılan geçişli ve geçişsiz yapıda olmak üzere toplam 8 farklı tip numune oluşturulmuş ve numuneler üzerinde çekme ve eğme testleri gerçekleştirilmiştir.

Çekme testlerinde tüm numune tiplerinde kopma noktasına kadar metal malzemelerde gözlemlenen boyun verme davranışı burada gözlemlenmemiştir. Malzemelerin gerilme-gerinim eğrilerinin eğiminde kopmaya kadar değişiklik olmamıştır. Genel olarak gevrek davranış sergileyen numuneler içerisinde cam malzemelerin diğer numunelere göre daha fazla sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. En iyi dayanımı geçişsiz karbon numuneler sergilemiştir. Hibrit malzemeler karbon ve cam malzemeler arasında konumlanmıştır. Hibritleştirme türüne göre katman içi hibrit dokuma malzeme katmanlar arası hibrit malzemeye göre daha iyi performans sergilemiştir. Geçişli yapıların çekme dayanımlarının neredeyse yarı yarıya düşüşler meydana gelmiştir. Geçişli yapılar numunenin boyuna uzanan yönde süreksizlik oluşturması, fiber kumaşların bu yönde kesilmiş olması çekme performanslarının kritik seviyede düşmesine neden olduğu değerlendirilmektedir.

Eğme testlerinde en iyi performansı çekme testinde olduğu gibi geçişsiz karbon numuneler göstermiştir. Geçişsiz yapıdaki numune tiplerinde maksimum eğme dayanımı noktasına yaklaşıldıkça eğme gerilme-gerinim grafiğinde gerilme değerleri yatay seyretmeye ve grafikte zikzakların oluşumunun artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Geçişli tip numunelerde de benzer davranışlar sergilense de geçiş boşluğu ve temas aralığı uzunluklarında küçük ölçekli farkların bulunması kırılma noktasına yaklaştıkça her numunede farklı davranışların gözlemlenmesine neden olmuştur. Malzemelerde geçişli yapıların bulunması eğme dayanımlarını çekme dayanımlarına oranla daha az etkilemiştir. Geçiş temas aralığı bölgesinin, malzeme için eğmeye karşı mukavemet kazanılmasında etkili olduğu ve geçişli yapıların malzeme dayanımı üzerindeki olumsuz etkisini azalttığı değerlendirilmektedir.

Çekme testinde olduğu gibi eğme testinde de hibrit malzemeler karbon ve cam malzemeler arasında performans göstermiştir. Hibritleştirme türleri arasında ortalama değer olarak hibrit dokuma malzemenin daha iyi mekanik performans sergilediği gözlemlenmiş ama yapılan t-testi sonucunda aradaki farkın anlamlı olmadığı tespit edilmiştir. Hibritleştirilmiş karbon-cam malzemelerin çekme ve eğme mekanik performansları ve Bölüm 4.1'de yer verilmiş olan malzeme maliyetleri birlikte değerlendirildiğinde kompozit malzemenin kullanımı açısından mekanik ve maliyet isterler üzerinde yapılacak bir optimizasyon çalışmasıyla katmanlar arası hibrit karbon-cam malzemenin tercih edilebilir olduğu değerlendirilmektedir.

Eğme kuvvetlerine maruz kalacak ebatları büyük ve karmaşık geometriye sahip polimer matrisli kompozit bir üründe ve geçişsiz yapılarla üretimin mümkün olmadığı durumlarda geçişli yapıların kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir. Çekme kuvvetlerinin geçişli yapılar üzerinde kritik etkiye sahip olduğu görülmüştür ve olumlu bir değerlendirme yapılabilmesi için daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu alanda gelecekte yapılacak çalışmalar için öneriler aşağıda yer almaktadır;

- Farklı dizilimde katmanlar arası hibrit karbon-cam kumaşlar arasındaki mekanik performanslar incelenebilir.
- Farklı tipte dokumaya veya dokuma sıklığına sahip katman içi hibrit dokuma karbon-cam malzemelerin mekanik performansı incelenebilir.
- Geçişli yapılarda farklı tip geçişlerin karbon, cam veya hibrit malzemeler üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- Aynı geçiş tipine sahip numunelerde geçiş temas aralığını değiştirerek özellikle malzemenin eğme performansı üzerine bir çalışma gerçekleştirilebilir.
- Hibrit uygulamalarda yapışmayı daha iyi sağlayabilecek takviye veya matris malzemelerinin kullanımı mekanik performansları nasıl etkileyeceği incelenebilir.
- Geçişli yapılarda, farklı geçiş tipleri kullanılarak belirli katlarda ve her katmanda geçiş bulunmasının çekme dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi üzerine çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Sumithra G., Reddy R. N., Kumar G. D., Ojha S., Jayachandra G., Raghavendra G. (2023). Review on composite classification, manufacturing and applications. *Materials Today: Proceedings*, 1-8.

2. Zuo P., Srinivasan D.V., Vassilopoulos A.P., (2021). Review of hybrid composites fatigue. *Composite Structures,* 274, 1-5.

3. Zhu M., Chen D., Hu Q. (2019). Failure mechanisms and reinforcing modes of ply splice fiber-reinforced composite laminates under tensile load. *Materials,* 2912(12), 1-18.

4. Chen J.P., Gu L., He G.J. (2020). A review on conventional and nonconventional machining of SiC particle-reinforced aluminium matrix composites. *Advanced Manufacturing*, 8, 279-280.

5. Karadimas G., Salonitis K. (2023). Ceramic matrix composites for aero engine applications-A review. *Applied Sciences,* 13(3017), 2-4.

6. Mahesh V., Joladarashi S., Kulkarni S.M. (2021). A comprehensive review on material selection for polymer matrix composites subjected to impact load. *Defence Technology,* 17(2021), 257-259.

7. İnternet: Termoset - Termoplastik (Fark nedir?). URL: https://twi-global.com/technical-knowledge/faqs/thermoset-vs-thermoplastic. Son Erişim Tarihi: 29.12.2024

8. Mallick P.K. (2018). *Processing of Polymer Matrix Composites.* ABD: CRC Press Taylor & Francis Group, 3-148.

9. Gün A. D., Demircan B., Şevkan A. (2011). Mikroliflerin üretim yöntemleri, özellikleri ve kullanım alanları. *Tekstil ve Mühendis,* 18(83), 38-41.

10. Chandramohan D., Marimuthu K. (2011). A review on natural fiber. *IJRRAS*, 8(2), 194-200.

11. Kösedağ E., Ekici R. (2018). Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Dergisi,* 8(1), 384-390.

12. Such M., Ward C., Potter K. (2014). Aligned discontinuous fibre composites: A short history. *Journal Of Multifunctional Composites*, 3, 155-158.

13. Kuteneva S.V., Gladkovsky S.V., Vichuzhanin D.I., Nedzvetsky P.D. (2022). Microstructure and properties of layered metal/rubber composites subjected to cyclic and impact loading. *Composite Structures,* 285, 2-3.

14. Staab G.H. (1999). *Laminar Composites.* ABD: Butterworth Heinemann, 7-14.

15. Camcı E., Fındık F., Ergü Ö.B. (2020). Metal esaslı sandviç kompozitlerin balistik performansının incelenmesi. *Düzce Bilim Ve Teknoloji Dergisi,* 8, 1454-1459.

16. Seydibeyoğlu M.Ö., Doğru A., Wang J., Rencheck M., Han Y., Wang L., Seydibeyoğlu E.A., Zhao X., Ong K., Shatkin J.A., Es-haghi S.S., Bhandari S., Özcan S., Gardner D.J. (2023). Review on hybrid reinforced polymer matrix composites with nanocellulose, nanomaterials and other fibers. *Polymers,* 15(984), 2-26.

17. Guoli Z., Fuyou W., Jialu L., Guangwei C., Li C. (2010). Study on mechanical performance of glass fiber 2D woven fabric laminated composites with different splicing shape and interval length. A*pplied Mechanics And Materials,* 34, 1845-1849.

18. Goodship V., Middleton B., Cherrington B. (2016). *Design and Manufacture of Plastic Components for Multifunctionality : Structural Composites, Injection Molding, and 3D Printing* (First edition). William Andrew is an imprint of Elsevier, 53-101.

19. Wu C., Xu F., Wang H., Liu H., Yan F., Ma C. (2023). Manufacturing tecnologies of polymer composites-A review. *Polymers,* 15(712), 2-18.

20. Shukla U., Garg K. (2022). Journey of smart material from composite to shape memory alloy (SMA), characterization and their applications-A review. *Smart Materials in Medicine,* 4(2023), 227-229.

21. Ashrith H.S., Jeevan T.P., Xu J. (2023). A review on the fabrication and mechanical characterization of fibrous composites for engineering applications. *Journal Of Composites Science,* 7(252), 2-18.

22. İnternet: Resin Transfer Molding. URL: https://www.thecompositeshub-india.com/resin-transfer-molding. Son Erişim Tarihi: 29.12.2024.

23. İnternet: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding. URL: https://thegundcompany.com/capabilities/materials-manufacturing/vartm/. Son Erişim Tarihi: 29.12.2024.

24. Rousseau G., Wehbe R., Halbritter J., Harik R. (2019). Automated fiber placement path planning: A state of the art review. *Computer-Aided Design & Applications*, 16(2), 172-175.

25. Zhang J., Lin G., Vaidya U., Wang H., (2023). Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and aplications. *Composites Part B,* 250, 1-5.

26. İnternet: Malnati C. Composites-intensive masterwork: 2020 Corvette, Part 1. URL: https://www.compositesworld.com/articles/composites-intensive-masterwork-2020corvette-part-1. Son Erişim Tarihi: 20.12.2024.

27. Garrett P., Ronde K. (2013). Life cycle assesment of electricity production from an onshore V90-3.0 MW wind plant. *Vestas Wind Systems A/S,* 39-82.

28. İnternet: The World's Largest Carbon Hybrid Composite Catamaran. URL: https://www.metyx.com/the-worlds-largest-carbon-hybrid-composite-catamaran/. Son Erişim Tarihi: 20.12.2024.

29. İnternet: Quaranta. URL: https://logosmarine.com/project/quaranta/. Son Erişim Tarihi: 20.12.2024.

30. Karthik K., Rajamani D., Manimaran A., Udayaprakash J. (2020). Evaluation of tensile properties on glass/carbon/kevlar fiber reinforced hybrid composites. *Materials Today: Proceedings,* 39, 1655-1660.

31. Girimurugan R., Senniangiri N., Krishnan B.P., Kavitha S., Vairavel M. (2021). Tensile behaviour of hybrid polymer composites – An experimental study. *Materials Science And Engineering,* 1059, 1-9.

32. Aydın M.R., Acar V., Yapıcı F., Yıldız K., Topcu M.V., Gündoğdu Ö. (2018). Interply hibrit kompozit yapılarda elyaf diziliş sıralamasının mekanik ve dinamik özelliklere etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Estitüsü Dergisi,* 8(3), 255-263.

33. Hashim N., Majid D. L. A., Mahdi S., Zahari R., Yidris N. (2019). Effect of fiber loading directions on the low cycle fatigue of intraply carbon-kevlar reinforced epoxy hybrid composites. *Composite Structures,* 212, 476-483.

34. Islam M. Z., Amiri A., Ulven C. A., (2021). Fatigue behavior comparison of inter-ply and intra-ply hybrid flax-carbon fiber reinforced polymer matrix composites. *Journal Of Composite Science,* 5(184), 1-12.

35. Marques T.P.Z., Marques B.M.F., Candido G.M., Rezende M.C., (2022). Influence of different geometric arrangements of discontinuous reinforcement on tensile strength and fracture behavior of carbon/epoxy laminates. *Engineering Failure Analysis*, 139, 1-14.

36. USA Department Of Defense. (2002). *Composite Materials Handbook Volume 3. Polymer Matrix Composites Material Usage, Design And Analysis.*

37. Devan D.J., Rehman R.U., Sunny T., Hafeez F., Alsakarneh A. (2023). Effect of different tab materials in the tensile testing of GFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(9), 4597-4602.

38. İnternet: Instron 3360 Series Dual Column Tabletop Models. URL: https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2011/06/3300-series-table-model. Son Erişim Tarihi: 05.02.2025.

39. Var C. (2021). *Karbon Kumaş Takviyeli Hibrit Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,* Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 41-61.

40. Jesthi D.K., Mandal P., Rout A.K., Nayak R.K. (2018). Effect of carbon/glass fiber symmetric inter-ply sequence on mechanical properties of polymer matrix composites. *Procedia Manufacturing,* 20(2018), 530-535.

41. Mishra P., Singh U., Pandey C.M., Mishra P., Pandey G. (2019). Application of students t-test, analysis of variance and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia,* 22(4), 407-410.

42. Xu M., Fralick D., Zheng J.Z., Wang B., Tu X.M., Feng C. (2017). The differences and similarities between two-sample t-test and paired t-test. *Shanghai Archives of Psychiatry,* 29(3), 184-187.

43. Tüzemen M.Ç. (2022). Evaluation of tensile properties on glass/carbon fiber epoxy pure, interply and locally nested intraply hybrid composites. *Polymer Composites,* 43, 6465-6469.



Gazili olmak ayrıcalıktır