



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FARKLI ÖNGERME PARAMETRELERİNDE
ÜRETİLEN TABAKALI TERMOPLASTİK
KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hasan Hüseyin TAŞER

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hasan Hüseyin TAŞER tarafından hazırlanan “Farklı Öngerme Parametrelerinde Üretilen Tabakalı Termoplastik Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 19/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

.....

Üye

Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DEMİRCİ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Hasan Hüseyin TAŞER

Tarih: 19.09.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FARKLI ÖNGERME PARAMETRELERİNDE ÜRETİLEN TABAKALI TERMOPLASTİK KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Hasan Hüseyin TAŞER

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

2025, 73 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DEMİRCİ

Bu tez çalışmasında, tabakalı kompozitlerde fiber öngerme uygulamasının mekanik özellikler ve şekillendirme kabiliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takviye elemanı olarak plain ve twill örgü tiplerinde cam ve karbon fiber kumaşlar, matris malzemesi olarak ise polietilen (PE) tercih edilmiştir. Numuneler, SolidWorks ortamında tasarlanan ve hidrolik prese uyumlu olarak üretilen özel bir kalıp kullanılarak imal edilmiştir. Deneysel çalışmada özel öngerme makinası kullanılarak öngermeli numuneler 15 N ve 30 N germe kuvvetleri altında hazırlanmıştır. Üretim sırasında fiber tabakalar arasına PE astar yerleştirilerek homojen tabakalı yapılar elde edilmiştir.

Mekanik karakterizasyon kapsamında çekme testi, üç nokta eğme testi, Shore D sertlik testi ve Erichsen şekillendirme testi uygulanmıştır. Sonuçlar, öngerme seviyelerinin artmasıyla birlikte malzemelerin çekme dayanımı, sertlik ve şekillendirme davranışlarında anlamlı farklılıklar ortaya koyduğunu göstermektedir. Plain örgü kumaşlar daha yüksek rijitlik ve mukavemet sergilerken, twill örgü kumaşlar daha yüksek şekillendirilebilirlik ve uzama kabiliyeti sunmuştur. Literatürde öngerme etkisi çoğunlukla tek tip fiber takviyeli kompozitlerde incelenmişken, bu çalışma cam ve karbon fiberlerin farklı örgü tipleriyle birlikte değerlendirilmesi açısından özgün bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, öngerme uygulamasının polimer kompozitlerin mekanik performanslarının artırılmasında kritik bir tasarım parametresi olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Cam kumaş, erichsen testi, karbon kumaş, öngerme, plain ve twill dokuma, termoplastik matris

ABSTRACT

Ph.D THESIS

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF LAYERED THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS PRODUCED UNDER DIFFERENT PREFORMING PARAMETERS

Hasan Hüseyin TAŞER

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYIRICI

2025, 73 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Mehmet KAYIRICI
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Asst. Prof. Dr. Yusuf UZUN
Prof. Dr. Abdullah Engin ÖZÇELİK
Asst. Prof. Dr. İbrahim DEMİRCİ

In this thesis study, the effects of fiber pre-stressing on the mechanical properties and formability of layered composites were investigated. Glass and carbon fiber fabrics in plain and twill weave types were chosen as reinforcement elements, while polyethylene (PE) was selected as the matrix material. The specimens were manufactured using a special mold designed in SolidWorks and produced to be compatible with a hydraulic press. In the experimental study, pre-stressed specimens were prepared under 15 N and 30 N tensile forces using a special pre-stressing machine. During production, PE liners were placed between the fiber layers to obtain homogeneous layered structures.

Within the scope of mechanical characterization, tensile testing, three-point bending testing, Shore D hardness testing, and Erichsen forming testing were performed. The results show that increasing pre-stress levels leads to significant differences in the tensile strength, hardness, and forming behavior of the materials. Plain weave fabrics exhibited higher stiffness and strength, while twill weave fabrics offered higher formability and elongation capability. While the effect of prestressing has mostly been studied in single-type fiber-reinforced composites in the literature, this study provides a unique contribution in terms of evaluating glass and carbon fibers with different weave types. The findings reveal that prestressing is a critical design parameter in enhancing the mechanical performance of polymer composites.

Keywords: Glass fabric, Erichsen test, carbon fabric, pre-stressing, plain and twill weave, thermoplastic matrix

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, tezimin hazırlanmasında yardım ve yönlendirmeleriyle büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Dr. Öğr.Üyesi Mehmet KAYIRICI hocama, tez izleme komitemde yer alan ve değerli fikirleriyle katkı sağlayan Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN, Prof. Dr. Murat DİLMEÇ ve Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN hocalarıma sonsuz teşekkür ederim.

Akkanat Holding BEYBO A.Ş. fabrika müdürü Kâmil ÇAĞDAŞ Bey'e deney malzemelerinin üretimi ve test edilmesi konusunda verdiği destekler için teşekkür ederim.

Fedakârlıkları, maddi-manevi destekleri ve sabırları ile hayatımın her aşamasında varlıklarını hissettiğim ve yeri asla doldurulamayacak olan, değerli babam (Merhum) Kadir TAŞER, annem Nadiye TAŞER ve ağabeyim Güray TAŞER'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında yanımda olduğunu hissettiğim, yardım ve desteklerini eksik etmeyen ve yoğun çalışmalarım esnasında büyük bir sabır gösteren sevgili eşim Cansu TAŞER'e tüm kalbimle teşekkür ederim. Ayrıca yaşattığı güzel duygularıyla, enerjisiyle canım oğlum Kadir Alp TAŞER ve canım kızım Zehra Bilge TAŞER'e sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Hasan Hüseyin TAŞER
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1. DeneYlerde Kullanılan Malzemeler	21
3.1.1. Cam fiber kumaş	21
3.1.2. Karbon fiber kumaş	22
3.1.3. Polietilen film	23
3.2. Numune Tasarımı	24
3.3. Numune Kalıp Tasarımı.....	25
3.4. Öngerme İşlemi.....	26
3.5. Numune Üretimi	27
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Çekme Testi	29
4.2. Üç Nokta Eğme Testi.....	33
4.3. Sertlik Testi.....	39
4.4. Erichsen Testi	42
4.5. Hasar Analizi	47
4.5.1. Çekme testi hasar analizi	47
4.5.2. Üç nokta eğme testi hasar analizi	49
4.5.3. Erichsen testi hasar analizi.....	52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	55
5.1. Sonuçlar	55
5.2. Öneriler	56
6. KAYNAKLAR	57

SİMGELER VE KISALTMALAR

PMC	: Polimer Matrisli Kompozit
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
SMA	: Şekil Hafızalı Alaşımlar
VPPMC	: Viskoelastik Öngermeli Polimerik Matris Kompozit
EPPMC	: Elastik Öngermeli Polimerik Matris Kompozit
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
UHMWPE	: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
HDPE	: Yüksek Yoğunluklu Polietilen
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
LLDPE	: Doğrusal Düşük Yoğunluklu Polietilen
PE	: Polietilen
UV	: Ultraviyole
BİTAM	: Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
GFSDR	: Cam Elyaf Dayanımı Hasar Oranı
TPE	: Termoplastik Elastomer
ABS	: Akrlonitril Bütadien Stiren
PC	: Polikarbonat
PVC	: Polivinil Klorür
Tg	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
PP	: Polipropilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PA	: Poliamid

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Gerilme altında matris, kompozit ve elyafın davranışı	1
Şekil 1. 2. Kompozit ara fazın şematik görünümü (Drzal vd., 1982).....	2
Şekil 1. 3. Kompozit ara yüzey şematik görünümü (Drzal vd., 1982)	2
Şekil 1. 4. Fiber kumaşlar a) Karbon b) Cam c) Aramid d) Seramik.....	3
Şekil 1. 5. Kompozit malzemelerde imalat sırasında fiber dalgalılığının oluşmasının kaynakları.....	5
Şekil 1. 6. Ölü ağırlık öngerme yöntemi (Krishnamurthy, 2006).....	6
Şekil 1. 7. V yuvası öngerme yöntemi (Krishnamurthy, 2006).....	7
Şekil 1. 8. Düz yataklı öngerme donanımının şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006).....	7
Şekil 1. 9. Filaman sarım tekniğinin şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)	8
Şekil 1. 10. Hidrolik silindir öngerme teçhizatının şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006).....	8
Şekil 1. 11. Yatay çekme işlemi şematik gösterimi Şekil 1. 12. Öngerme işleminin şematik gösterimi	9
Şekil 1. 13. Çift eksenli yükleme çerçevesinin şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)	9
Şekil 1. 14. Üç eksenli yükleme çerçevesinin şematik gösterimi.....	10
Şekil 3. 1. a) Plain örgü tipi gösterimi b) Twill örgü tipi gösterimi	24
Şekil 3. 2. Cam ve karbon fiber takviyeli PE matrisli numune dizilimi.....	25
Şekil 3. 3. Isıtma plakalı hidrolik pres.....	25
Şekil 3. 4. Isıtma plakalı hidrolik pres için tasarlanmış kalıplar	26
Şekil 3. 5. 15 N ve 30 N öngerme işlem adımları	27
Şekil 3. 6. Öngerme işlemi tamamlanan numunelerin boyutlandırılması	28
Şekil 4. 1. ASTM D3039 test numune boyutları	29
Şekil 4. 2. Çekme deney numune örnekleri ve test cihazı	30
Şekil 4. 3. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti cam plain ve cam twill veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği	31
Şekil 4. 4. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti cam plain ve cam twill veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği	31
Şekil 4. 5. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti karbon plain ve karbon twill veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği.....	32
Şekil 4. 6. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti karbon plain ve karbon twill veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği.....	33
Şekil 4. 7. ASTM D790 test numune boyutları	34
Şekil 4. 8. Üç nokta eğme deney numune örnekleri ve test cihazı	34
Şekil 4. 9. Origin programı gürültü giderme arayüzü.....	35
Şekil 4. 10. 15 N öngerme kuvveti gürültüsüz veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği	36
Şekil 4. 11. 15 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği .	37
Şekil 4. 12. 30 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği	38
Şekil 4. 13. 30 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği .	39
Şekil 4. 14. Shore D test ölçeği ve izaçar	40
Şekil 4. 15. Üretilen numunelerin Shore D sertlik ölçeği grafiği	41
Şekil 4. 16. Erichsen testi numune boyutları	43
Şekil 4. 17. Erichsen test cihazı ve test numune örneği	43
Şekil 4. 18. 15 N germe kuvveti veri ortalamaları kuvvet-stroke grafiği.....	44

Şekil 4. 19. 30 N germe kuvveti veri ortalamaları kuvvet-stroke grafiği.....	45
Şekil 4. 20. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde cam ve karbon dokuma örgü tiplerinin stoke grafiği	46
Şekil 4. 21. Çekme testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi	47
Şekil 4. 22. Çekme testi hasarlı numune SEM görüntüleri	48
Şekil 4. 23. Çekme testi hasarlı numune optik mikroskop görüntüleri	49
Şekil 4. 24. Üç nokta eğme testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi	50
Şekil 4. 25. Üç nokta eğme testi sonrasında oluşabilecek hasar görüntüsü.....	50
Şekil 4. 26. Üç nokta eğme testi sonrasında oluşan hasar görüntüsü	51
Şekil 4. 27. Erichsem testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi	52
Şekil 4. 28. Erichsen testi sonrasında oluşan hasar görüntüsü	53

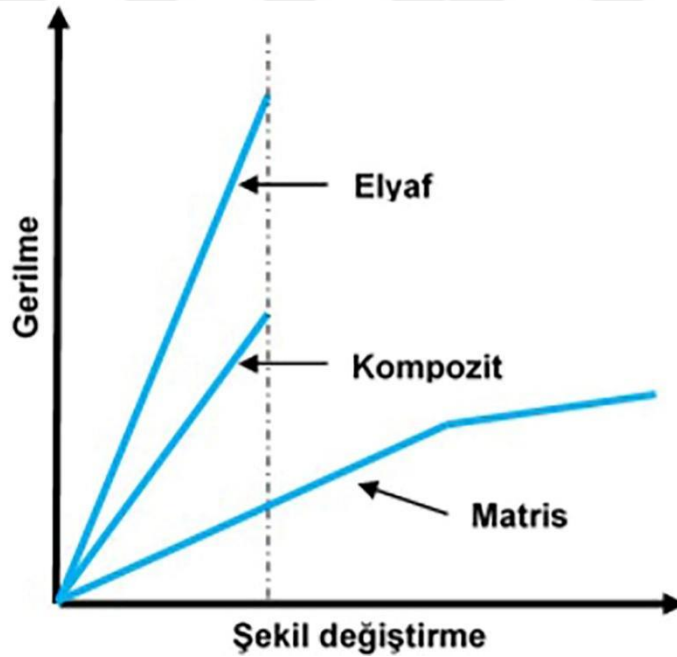


ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. 1. Yaygın olarak kullanılan termoset malzemelerin özellikleri	4
Çizelge 1. 2. Yaygın olarak kullanılan termoplastik malzemelerin özellikleri	4
Çizelge 2. 1. Fiber öngermeli PMC ile ilgili incelemeler.....	18
Çizelge 3. 1. Cam plain ve cam twill kumaş mekanik özellikleri	21
Çizelge 3. 2. Karbon plain ve karbon twill kumaş mekanik özellikleri	22
Çizelge 3. 3. HDPE ve LDPE mekanik özellikleri.....	23
Çizelge 4. 1. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde Cam plain ve twill ortalama çekme test sonuçları	30
Çizelge 4. 2. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde karbon plain ve twill ortalama çekme test sonuçları	32
Çizelge 4. 3. 15 N öngerme seviyelerinde cam plain ve twill ortalama üç nokta eğme test sonuçları	35
Çizelge 4. 4. 30 N öngerme seviyelerinde cam plain ve twill ortalama üç nokta eğme test sonuçları	37
Çizelge 4. 5. Yaygın kullanılan malzemeler ve Shore D sertlik değerleri	40
Çizelge 4. 6. Üretilen numunelerin Shore D sertlik değerleri	41
Çizelge 4. 7. 15 N cam plain ve twill, karbon plain ve twill erichsen test sonuçları	43
Çizelge 4. 8. 30 N cam plain ve twill, karbon plain ve twill erichsen test sonuçları	45

1. GİRİŞ

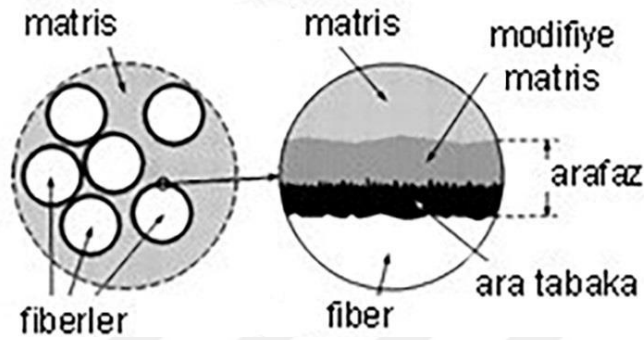
Kompozitler, en az iki farklı malzemenin makro boyutta birleşmesiyle oluşturulan yeni malzemelerdir (Cleyne ve Hull, 2019; İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019; Mourdikoudis vd., 2019; Naslain, 2001; Reinhart, 1998, s.21-11; Verma vd., 2012). Kompozit yapının bu iki ana unsurundan biri olan takviye fazı; fiber, tabaka ve parçacık formlarda uygulanır. Ana unsuru oluşturan diğer yapı ise takviye fazı malzemelerin içerisine gömülen matris fazıdır. Genelde, takviye fazı olarak uygulanan malzemeler yüksek dayanımlı ve düşük yoğunluklu malzemelerdir. Matris fazı ise genelde daha tok ve sünek malzemelerden oluşur (Bagherpour, 2012; Hale, 1976; Jones, 2018; Yan vd., 2012). Kompozit üretim süreçleriyle bir araya getirilen bu iki temel faz, tasarımsal açıdan takviye fazının güç ve dayanımı ile matris fazın tok ve sünek yapısıyla arzu edilen özelliklerin kombine edilmesiyle oluşur. Sonuçta, ayrı ayrı herhangi bir malzemede olmayan niteliklerle donatılmış yeni bir malzeme ortaya çıkar. Şekil 1.1'de matris, kompozit ve elyafın gerilme altındaki genel davranışı gösterilmektedir



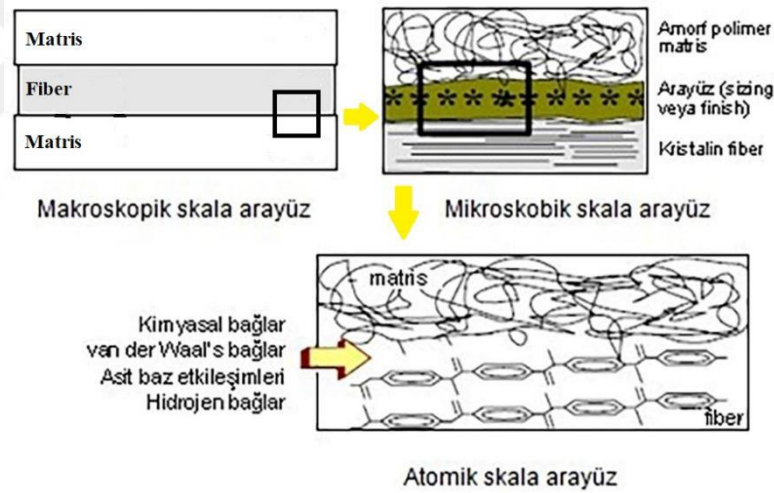
Şekil 1. 1. Gerilme altında matris, kompozit ve elyafın davranışı

Hem matris hem de takviye olarak uygulanan pek çok malzeme çeşidi söz konusudur. Bunların sayısız kombinasyonu ile arzu edilen uygulamalara yönelik kompozit tasarımları mümkündür (Wekekar vd., 2022; Zhang vd., 2022). Tasarımsal olarak matris fazı, geniş yüzey alanına uygulanan gerilim veya yükü, daha sert ve dayanımlı takviye fazına aktararak kompozitin güç ve dayanımını artırır. Matris fazı aynı

zamanda takviye malzemeleri kaplayarak dış etkenlerden koruma ve kavrama görevi de yapar (Al-Furjan vd., 2022; Karki vd., 2021). Bir kompozit malzemenin dayanımı ara yüzey ve ara fazın kalitesine ve üretim şartlarının uygun olmasına bağlı olduğundan kompozit malzemenin dayanımı direkt olarak etkilemektedir. Bu durum fiber/matris uyumuna büyük ölçüde bağlıdır. Şekil 1.2’de kompozit ara faz, Şekil 1.3’te kompozit ara yüzey şematik görünümü gösterilmektedir.



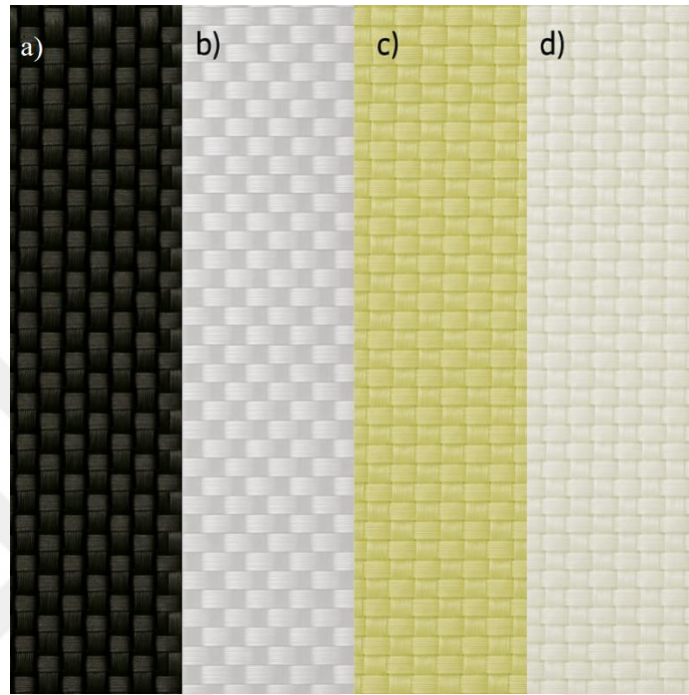
Şekil 1. 2. Kompozit ara fazın şematik görünümü (Drzal vd., 1982)



Şekil 1. 3. Kompozit ara yüzey şematik görünümü (Drzal vd., 1982)

Kompozit malzemeler, dayanım ve hafiflik gibi avantajlar sağlaması nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir malzeme türüdür (Azman vd., 2021; Campbell, 2010; Cleyne ve Hull, 2019). Kompozit malzemeler, matris malzeme türüne göre sınıflara ayrılmaktadır. Kompozit malzeme türü olan polimer matrisli kompozit malzemelerde dayanım özelliklerine göre çeşitli lif türleri bulunmaktadır. En yaygın lif türleri karbon elyaf ve cam elyafıdır. Karbon elyaf yüksek modül ve yüksek gerilme dayanımının mükemmel bir kombinasyonunu sunar ve aynı zamanda yüksek sıcaklık direnci de gösterir (Hassan vd., 2015). Polimer matrisli kompozitlerde genel olarak kullanılan beş karbon fiber kategorisi vardır ve bunlar; düşük modül (210 GPa'dan düşük çekme modülü), standart modül, orta

modül, yüksek modül ve ultra yüksek (500 GPa'dan büyük çekme modülü) modüle sahip liflerdir. Çelik ise 200 GPa'lık bir çekme modülüne sahiptir (Jakob, 2007). En yaygın lif türleri tokluk, basınç dayanımı, kırılma, yalıtımlık veya yüksek sıcaklık özellikleri gibi faydalı özellikler sunan aramid, bor ve seramik lifleri de vardır (Taj vd., 2007). Şekil 1.4'te fiber kumaşlar gösterilmektedir.



Şekil 1. 4. Fiber kumaşlar a) Karbon b) Cam c) Aramid d) Seramik

Günümüzde, polimer matrisli kompozitler (PMC) en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir ve petrokimya ürünüdür. Birim kütle başına yük kapasitesi (özgül mukavemeti) yüksek, kolay şekillendirilebilen, uzun süre kullanılabilir ve korozyona dayanıklı polimerik kompozitler (Khan vd., 2014) termoset ve termoplastik matrisli polimer kompozitler olarak iki kategoriye ayrılır. Termoset matrisler, elyaf takviyeli kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılır. Sıvı haldeyken önce jel haline gelirler ve sertleştirici ilavesi ile katılaşırlar. Termoset reçineler birbirine benzerdir. Reçineler tipik olarak düşük viskoziteye sahiptir. Termoset kompozitler oda sıcaklığında çeşitli ajanlarla sertleştirilerek üretilir. Termoplastik kompozitler ise oda sıcaklığında katı, imalat esnasında yumuşama ve erime sıcaklığına ulaştırılarak kompozit yapımında kullanılan plastik türü malzemeleri içerir. Kolay şekil verilebilir ve üretim esnasındaki hatalar ile artık gerilmeler tekrar ısıtma sayesinde giderilebilir (Anderson vd., 2014). Termoplastikler yarı kristalin veya amorf olabilir. Amorf termoplastiklerde moleküller gelişigüzel bir şekilde gruplanır. Amorf termoplastiklerin molekül yapısı gelişigüzeldir.

Kristalin bölgede moleküller düzenli bir şekilde sıkıca paketlenmiş durumdadır (Montesano vd., 2012).

Termoplastik polimerlerin zincirlerini birbirine bağlayan güçlü kovalent bağlar olmamasına rağmen, polar etkileşimler, hidrojen bağları, London kuvvetleri ve hatta polistiren gibi aromatik grupların üst üste istiflenmesi gibi zincir içi ve zincirler arası etkileşimler, termoplastik polimerlerin zincirlerini birbirine bağlar. Ek olarak, termoplastik polimer zincirlerini bir arada tutan zincir içi ve zincir arası bükülmeler ve dolaşmalar vardır. Bu zincir hareketleri ve bükülmeleri, özellikle mekanik tepki üzerinde, termoplastik polimerlerin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkiler. En yaygın kullanılan termoset malzemelerin özellikleri Çizelge 1.1 ve termoplastik malzemelerin özellikleri Çizelge 1.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 1. 1. Yaygın olarak kullanılan termoset malzemelerin özellikleri

Özellikler	Doymamış Polyester	Vinil Ester	Epoksi Reçine	Fenolik Reçine	Poliüretan
Yoğunluk (g/cm ³)	1,09-1,2	1,14	1,2-1,3	1,2-1,4	1,1
Elastisite modülü (GPa)	3,3	3,5	5	3,8	4
Çekme dayanımı (MPa)	40-90	73-81	55-130	34,5-60	18
Çekme modülü (GPa)	2,5-3,2	3-3,4	2,75-4,1	2,75-5	0,8-11
Kopma uzaması (%)	1,2-3	5	4	2	10
Eğilme modülü (GPa)	1,53	3,4	1,54	2,53	1,2-1,5
Eğilme dayanımı (MPa)	40-45	110	100	56	30
Termal iletkenlik (W/m.K)	0,22	0,35	0,15-0,3	0,52	0,22

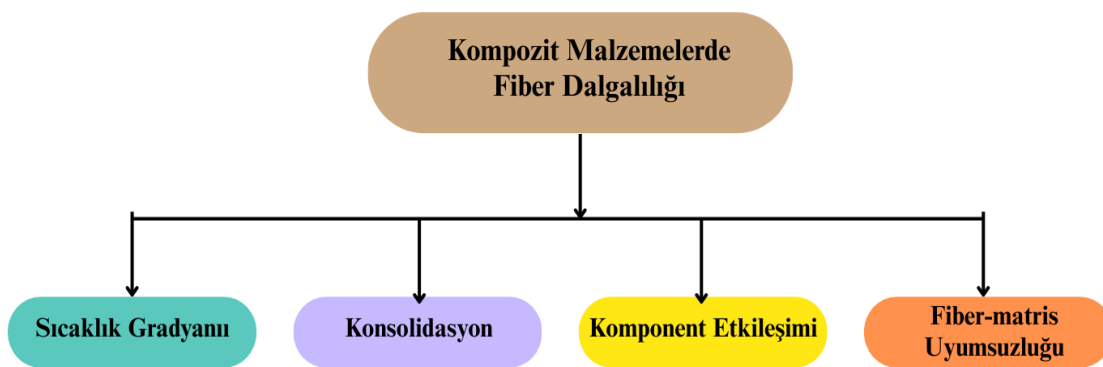
Çizelge 1. 2. Yaygın olarak kullanılan termoplastik malzemelerin özellikleri

Özellikler	LDPE	HDPE	PP	PET	PA
Yoğunluk (g/cm ³)	0,92	0,95	0,94	1,34-1,39	1,1
Çekme dayanımı (MPa)	10	27	32	55	65
Kopma uzaması (%)	190	350	120	50	160
Çekme modülü (GPa)	0,27	0,86	1,5	50-57	0,7-3,3
Eğilme modülü (GPa)	0,1-2,2	0,28-1,8	1,4	2,47-3	0,8-3
Eğilme dayanımı (MPa)	7	26	36,2	26	22
Termal iletkenlik (W/m.K)	0,31	0,52	0,11	0,19	0,23
Erime noktası (°C)	110	110-140	160	250	211-265
Tg (°C)	-125	-110	-10	70-80	50-60

Son dönemde, kompozit malzemeler, metallere karşılaştırıldığında daha yüksek sertlik ve mukavemet/ağırlık oranlarına sahip oldukları için havacılık sektöründe, yenilenebilir enerji alanında, petrol ve boru endüstrilerinde, otomotiv sektöründe ve

denizcilik endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Dixit vd., 2014; Montesano vd., 2015). Özellikle dokuma kumaşla takviye edilmiş kompozitler hem birincil hem de ikincil yük taşıyan yapılar için sıkça tercih edilmektedir (Motahhari vd., 1998; Pandita vd., 2001; Yaser, 2007). Ayrıca, kompozit malzemelerin dokuma kumaş ile takviye edilmesi, yine bu malzemeden yapılmış diğer ürünlerle kıyaslandığında düzlem içi mekanik özelliklerinde de artış olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, dokuma kumaş kompozitleri, kumaşın oryantasyonuna bağlı olarak nispeten yüksek anizotropik özelliklere sahip olarak tanımlanır (Shulte ve Marissen,1992).

Bir polimer matrisli kompozit üretilirken, imalat sırasında önemli artık gerilmeler meydana gelebilmektedir. Bu gerilmeler, hem polimer matrisin kürleme sırasındaki büzülmesinden kaynaklanan gerilmelerden hem de imalat sırasındaki çevre şartları, malzeme homojenizasyonu vb. gibi hatalardan kaynaklanmaktadır. Fiber ve matris malzemeleri arasındaki termal genişleme uyumsuzluğundan kaynaklanan gerilmeler, malzemede istenen nihai özellikler açısından dezavantaj sağlamaktadır. Elyaf-matris kombinasyonlarına ve laminat istifleme düzenlemelerine bağlı olarak, artık gerilmelerin birikmesi lif dalgalanmasına, laminat eğilmelerine, burkulmalara veya matris çatlamlarına neden olabilir. Bu nedenle, kompozit malzemelerde oluşan bu gerilmeler malzemenin mekanik performansını olumsuz yönde etkileyebilir ve kompozit yapının erken kırılmasına bile yol açabilir. Kompozit malzemelerde fiber dalgalılığının oluşmasının kaynakları Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



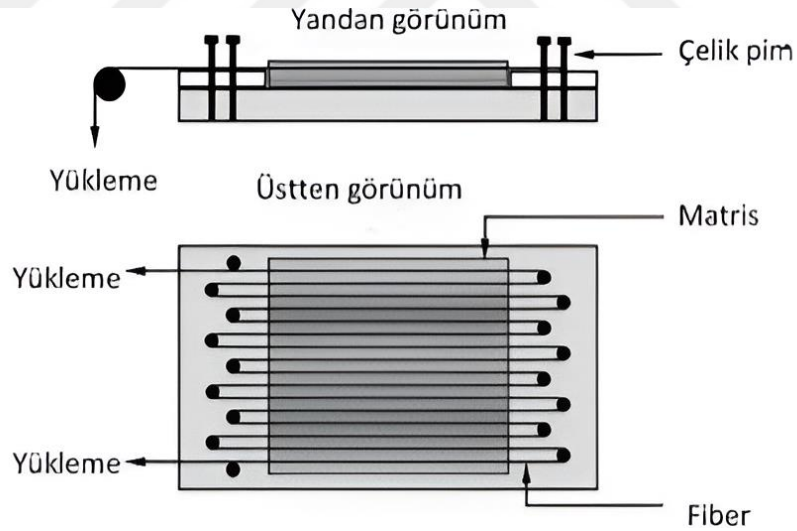
Şekil 1. 5. Kompozit malzemelerde imalat sırasında fiber dalgalılığının oluşmasının kaynakları

Polimerik kompozitlerde, elyaf dalgalılığını azaltmak için kalıplama işleminden önce, elyafları nispeten yüksek bir gerilme seviyesinde gererek zayıf elyafları elimine etmek üzerine odaklanılmıştır. Son otuz yılda, elyaf öngermesi kavramı, elyaf takviyeli kompozitlerin üretim sürecine eşlik eden istenmeyen artık gerilmelerin varlığının etkisini

azaltma kabiliyetini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Fiber öngörme yönteminin temel avantajı, matris içinde istenen ve kontrol edilen bir artık gerilme durumunun oluşmasında çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engellemektir. Ayrıca fiber dalgalılığı radyal gerilmelerin de olumsuz etkilerini üzerinde taşımaktadır. Bu nedenle çeşitli elyaf öngörme teknikleri incelenmiş ve uygulama alanları, özellikleri ve kısıtlamaları gözden geçirilmiştir. Bu inceleme sayesinde, uygun metodolojiyi seçebilme ve yüksek performanslı kompozitlerin üretim sürecinin özelliklerine ek maliyet getirmeden uygun şekilde dağılım için fiber öngermeli kompozitler alanında ileri işlemler için elde edilen bulgular mevcuttur (Fazal, 2014).

Öngermeli fiber kompozitler, kürlleme işlemi sırasında önceden belirlenmiş bir öngörme yöntemi uygulamak için belirli bir metodoloji gerektirmektedir. Öngörme için aşağıdaki yöntemler kullanıldığı bilinmektedir.

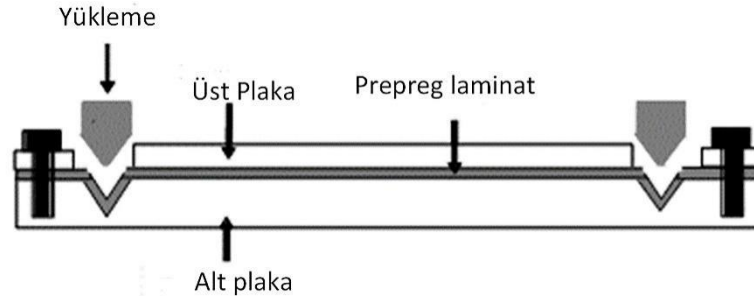
- Ölü ağırlık yöntemi (Huang vd., 2002; Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016); oda sıcaklığında kürlleme işleminde elyaf uçlarına uygun bir yük uygulanarak öngermeli kompozitler hazırlanabilir. Bu metodolojiyi uyguladıktan sonra, kompozitin genişliği boyunca düzgün bir fiber dağılımı elde etmek zordur.



Şekil 1. 6. Ölü ağırlık öngörme yöntemi (Krishnamurthy, 2006)

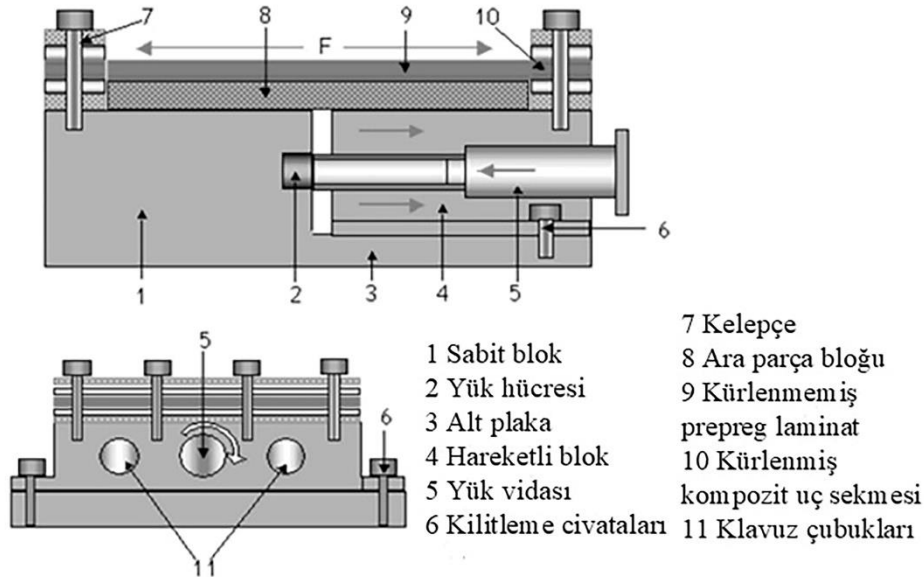
- V-yuvası mekanik sabitleme yöntemi (Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016; Mutasher vd., 2012); uçlarında işlenmiş iki V-yarıklı bir alüminyum levha üzerinde öngörme işleminde elyaflar V-yuvasına doğru itilerek ve alüminyum levhanın 125°C'ye ısıtılmasıyla elyaflar gerilir. Hem V yuvasındaki gerilme hem de alüminyum levhanın termal genişmesiyle öngörme elde edilmektedir. Bu yöntem yalnızca bir öngörme seviyesi uygulamak için kullanılabilir. Alüminyum

levhanın 125°C ısıtılması ve üst plaka uygulamasıyla kürlleme işlemi gerçekleşir. Ayrıca cam ve karbon gibi kırılğan liflere bu teknik kullanılarak öngerme uygulanamaz çünkü V-yuvalarındaki liflerin bükülmesi, eşit olmayan bir stres dağılımına yol açarak çok sayıda lif kırılmasına neden olacaktır.



Şekil 1. 7. V yuvası öngerme yöntemi (Krishnamurthy, 2006)

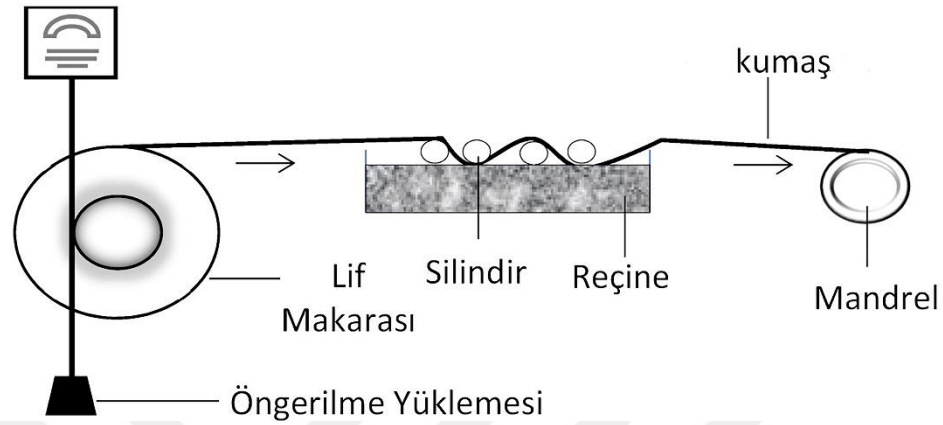
- Düz yatak öngerme yöntemi (Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016; Mutasher vd., 2012); öngerme uygulamak için bir yük vidası kullanmak gerekmektedir. İki blok kullanılır; biri taban plakasına sabitlenmiş, diğeri hareketli olan blok, kılavuz çubuklar üzerinde kayar. Bu kılavuz çubuklar, hareketli ve sabit blokların kelepçelerini hizalamak için kullanılır.



Şekil 1. 8. Düz yataklı öngerme donanımının şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)

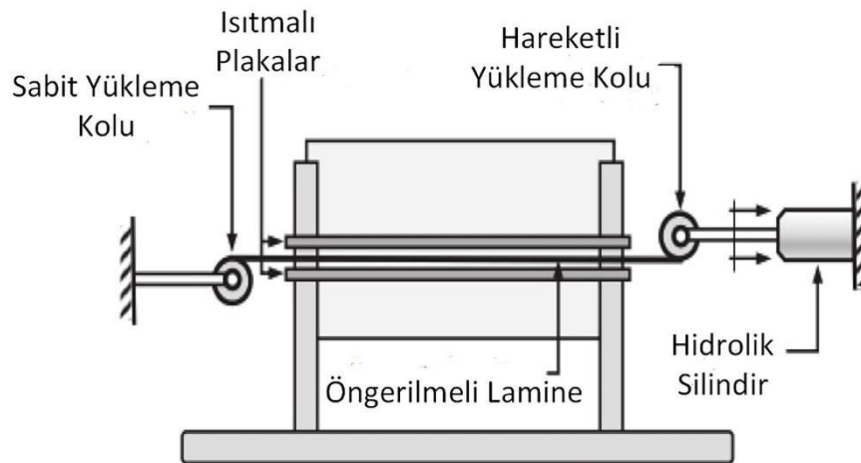
- Dairesel parçaların imalatında kullanılan filaman sarım yönteminde (Hadi vd., 1997; Jevons vd., 2002; Motahhari, 1998; Tuttle vd. 1996); filaman sarım, esas olarak açık veya kapalı uçlu silindirlerin imalatında kullanılan bir imalat tekniğidir. İşlemden önce fiber dönen bir mandrel üzerinde öngerilme altındadır. En

yaygın filamanlar cam veya karbondur ve bir reçine banyosunda emprenye edilir. Mandrel istenen kalınlığa tamamen kaplandıktan sonra reçine kürlenir. Bu yöntemde kompozite uygulanan öngerme değerini belirlemek zordur ve fiber hacim oranı büyük ve sabittir.



Şekil 1. 9. Filaman sarım tekniğinin şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)

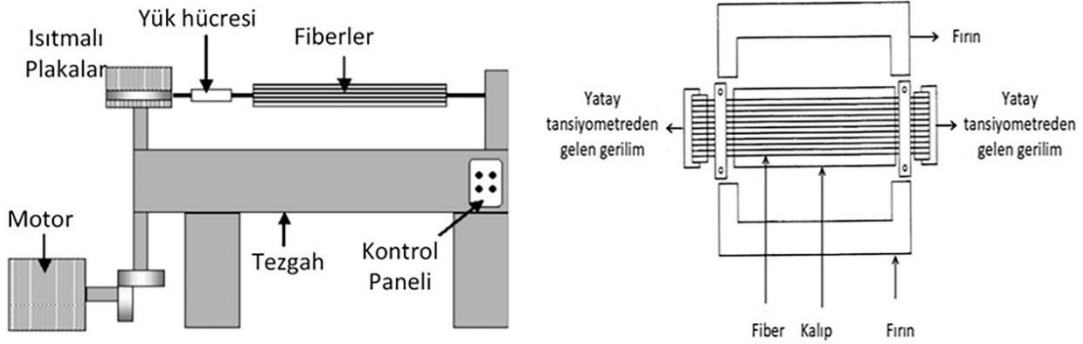
- Hidrolik silindir öngerme yöntemi (Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016; Mutasher vd., 2012); laminatın hareketli yüklem çubuğunu yatay bir çerçeve üzerinde sürükleyen hidrolik silindir kullanılarak kompozitler üzerinde farklı seviyelerde öngerme yapılabilir. Reçineyi kürlemek için ısıtılmış sıcak pres plakaları kullanılır. Yüksek lif öngerme seviyelerinde kat ve yüklem çubuğu yüzeyi arasında kayma meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 1. 10. Hidrolik silindir öngerme teçhizatının şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)

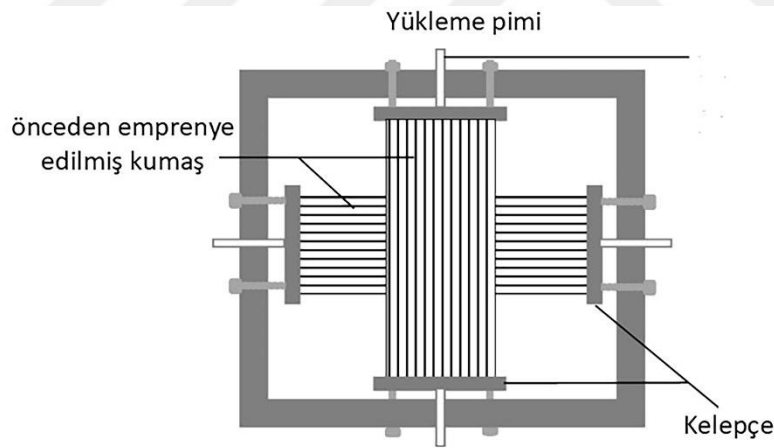
- Yatay çekme yöntemi (Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016; Mutasher vd., 2012); fiber öngerme, yatay bir çekme test makinesi kullanılarak elde

edilebilir. Elektrik motoru mekanik enerjiyi sağlar ve lifleri bir yönde çeken bir tamburu döndürür. Uygulanan yük, bir yük hücresi tarafından izlenebilir.



Şekil 1. 11. Yatay çekme işlemi şematik gösterimi Şekil 1. 12. Öngerme işleminin şematik gösterimi

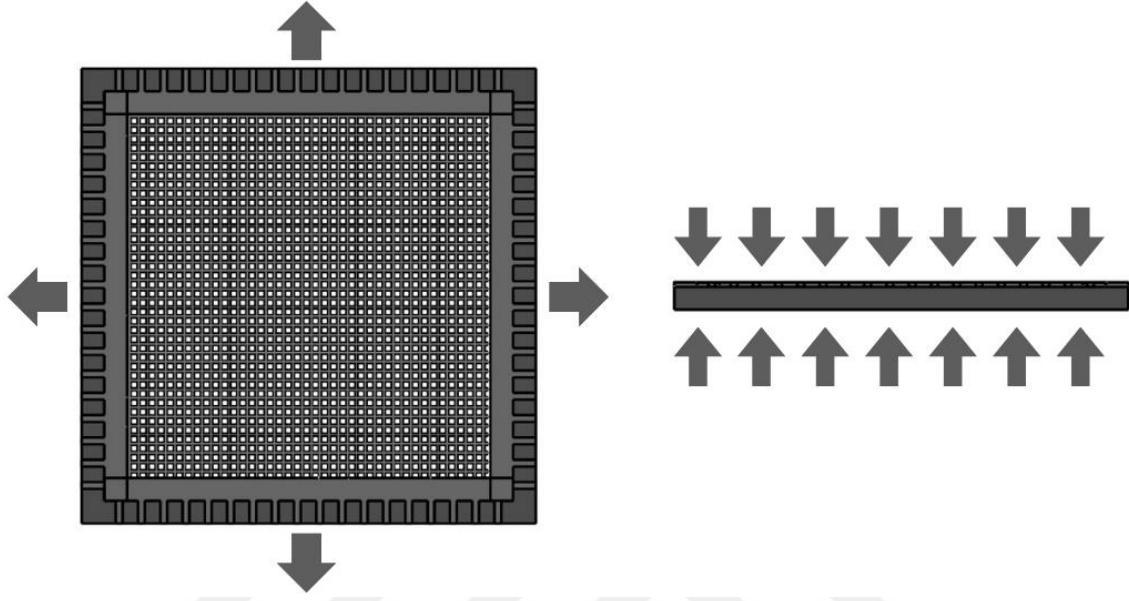
- Çift eksenli yükleme çerçevesi ve fiber germe yöntemi (Krishnamurthy, 2006; Krishnamurthy vd., 2016; Mutasher vd., 2012); çift eksenli bir yükleme çerçevesi kullanılarak elyaf kompozitlere öngerme işlemi uygulanır. Çerçevenin kenarlarında kelepçe yardımıyla fiberler sabitlenir ve öngerme seviyeleri mekanik bir test makinesi kullanılarak ayarlanabilmektedir.



Şekil 1. 13. Çift eksenli yükleme çerçevesinin şematik gösterimi (Krishnamurthy, 2006)

Çalışmamızda uygulanan tüm öngerme yöntemleri göz önünde bulundurularak üç eksenli germe yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemin amacı, temelde kullanılan elyaf tabakalarının lif boyunca çift eksenli gerilmesiyle birlikte üçüncü eksen yönünde uygulanan kuvvetlerle tabakalar arası lamine dalgallılığının önlenerek laminat kalınlığının üretim sürecinde homojenizasyonunu ve kürlenme öncesi maksimum üretim parametrelerinin verimliliğini artırmaktır. Bu yöntem termoset matrisli kompozitlerde sıcak pres, vakum torbalama ve endüstriyel otoklav ile üretim yöntemlerinde kullanılan

malzeme içerisindeki kütleme esnasında oluşan uçucu gaz, nem vb. olumsuzlukların giderilmesini sağlayan yöntemlerle paralellik arz etmektedir. Ayrıca özgün olarak amacımız, üçüncü eksen yönünde uygulanan farklı kuvvetlerin o eksen yönündeki homojenizasyonu sağlayarak malzeme dayanımına olumlu etkilerinin tespit edilmesini sağlamaktır. Şekil 1.14'te üç eksenli germe yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 1. 14. Üç eksenli yükleme çerçevesinin şematik gösterimi

Şekillendirilebilirlik, malzemelerin en önemli avantajlarından biridir çünkü bu özellik, malzemenin üretim süreçlerinde ne kadar kolay işlenebileceğini ve nihai üründe üretimi en zor olan dairesel ve küresel kesitlerin nasıl elde edilebileceğini belirler. Kompozit malzemeler, geleneksel metallere çok daha hafif olmalarına rağmen, en azından aynı veya daha yüksek dayanıklılık, sertlik ve hafiflik sunarak çeşitli uygulamalarda avantaj sağlar. Bu özellik, otomotiv, havacılık, inşaat, denizcilik ve spor ekipmanları gibi birçok endüstriyel alanda tabakalı kompozitlerin tercih edilmesini sağlar (Altan, 2006).

Otomotiv ve havacılık sektörlerinde özellikle kompozit malzemeler, araçların performansını artırmak ve ağırlıklarını azaltmak için yaygın olarak kullanılır. Bu sektörde, daha hafif ve dayanıklı yapılar, yakıt verimliliğini artırmak ve taşıma kapasitesini geliştirmek için kritik öneme sahiptir (Koç, 2008; Zhang vd., 2004). Geleceğin elektrikli mobilite dünyasında bu önem giderek artmaktadır. Tabakalı termoplastik kompozit malzemelerin üretim esnasında şekillendirilebilirlik özelliğinin artırılması bu tür uygulamalarda karmaşık geometrilerde parça üretimine olanak tanır. Ayrıca, tabakalı kompozit malzemeler, darbe dayanıklılığı, yüksek sıcaklık direnci ve

korozyon karşısında üstün performans sergileyerek zorlu çevre koşullarında bile güvenilirlik sunar (Hartl, 2005). Tabakalı yapılar, farklı katmanların birbirinden bağımsız özellikleri sayesinde, her katmanın yer aldığı ortamda en iyi performansı gösterecek şekilde optimize edilebilir. Bu avantaj, kompozit malzemelerin mühendislik tasarımlarında daha esnek bir seçenek sunar ve son ürünlerin daha verimli, dayanıklı ve uzun ömürlü olmasına olanak tanır.

Kompozit malzemelerin özellikle termoplastik kompozit malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirebilmek için uygulanan testlerden birisi de Erichsen testidir. Bu test ilk olarak metal malzemelerin şekillendirilebilirliğini değerlendirmek için geliştirilmiş ve tabakalı kompozit malzemelerin incelenmesinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu test, bir malzemenin, eğilme, gerilme veya basınca maruz kaldığında nasıl deforme olduğunu anlamaya yardımcı olur. Temel prosedürde, bir metal levha veya kompozit malzeme, belirli bir kuvvetle bir panele uygulanır ve ortaya çıkan deformasyon (örneğin, şekillendirilmiş parçasının sehim) ölçülür. Bu testin temel amacı, bir malzemenin, çatlama, delaminasyon veya kopma gibi hatalar olmadan ne kadar elastik deformasyona dayanabileceğini değerlendirmektir.

Havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan kompozit malzemeler üretim sırasında ve kullanımda karmaşık gerilme ve deformasyona maruz kalabilir. Erichsen testi, bu tür koşulları simüle edebilir. Deformasyon derinliği ve diğer hasar modlarını analiz ederek, kompozit malzemenin belirli uygulamalar için uygun olup olmadığını belirleyebilir ve katmanlar arasında delaminasyon veya zayıf bağlanma gibi potansiyel zayıflıkları tespit edebilir.

Tabakalı kompozit malzemeler, iki veya daha fazla lamenin birleşiminden oluştuğu için interlaminar kuvvetler bu malzemelerin en önemli dezavantajıdır. Bu nedenle Erichsen testi, bu malzemelerin mekanik gerilmelere (örneğin, eğilme, gerilme veya şekillendirme) karşı nasıl davrandığını anlamada kritik bir rol oynar. Tabakalı kompozitler kalınlığından dolayı genellikle farklı sertlik, elastikiyet ve dayanıklılığa sahip katmanlardan oluştuğundan, bu test, yük altında bu katmanlar arasındaki etkileşimleri incelemek için özellikle faydalıdır. Tabakalı kompozit malzemeler, özellikle yüksek performans gerektiren sektörlerde, güvenilirlik ve dayanıklılık açısından kapsamlı bir mekanik özellikler değerlendirmesi gerektirir. Erichsen testi, bu bağlamda kompozit malzemelerin değerlendirilmesinde önemli birkaç avantaj sunar. Tabakalı kompozitlerde

bu testin sağladığı ilk faydalardan biri, katmanlar arasındaki etkileşimi stres altında değerlendirebilmesidir. Kompozitlerdeki her bir katman aynı mekanik özelliklere sahip olması gerektiğinden, Erichsen testi, bu katmanların yük altında nasıl birlikte çalıştığını ve potansiyel olarak hangi katmanların zayıf kalabileceğini gösterir.

Delaminasyon, kompozitlerde yaygın bir hasar modu olup, katmanlar arasındaki bağın zayıflaması sonucu ayrılmalar meydana gelir. Bu durum, malzemenin yapısal bütünlüğünde önemli azalmalar yaşanmasına neden olabilir. Erichsen testi, malzemenin deformasyon sırasında nasıl davrandığını inceleyerek bu tür zayıflamaları önceden tespit etmeye yardımcı olur ve daha iyi bağlama teknikleri veya katman düzenlemeleri geliştirmek için faydalı veriler sağlar.

Erichsen testinin bir diğer önemli avantajı, kompozit malzemenin genel şekillendirilebilirlik ve deformasyon kapasitesini değerlendirmesidir. Tabakalı kompozitler, genellikle üretim sırasında şekillendirme süreçlerine tabi tutulur, örneğin otomotiv paneli veya havacılık bileşenleri üretiminde kesin şekillendirme ve eğilme gereksinimleri vardır. Bu test, kompozitin, bu tür şekillendirme işlemlerine karşı ne kadar dayanabileceğini ve şekil değiştirme sırasında çatlama veya hasar meydana gelip gelmeyeceğini değerlendirir. Bu da yüksek performans gerektiren uygulamalarda kritik bir faktördür. Ayrıca, bu test farklı kompozit malzemeleri veya üretim süreçlerini karşılaştırmak için de kullanılabilir, bu sayede malzeme seçimi ve üretim yöntemleri ve şartlarının optimize edilmesi sağlanır. Deformasyon limitlerini belirleyerek, malzemenin hangi koşullar altında başarısız olabileceği hakkında bilgi edinilebilir ve bu sayede üretim süreci daha verimli hale getirilebilir.

Bu tezin amacı, polimer matrisli kompozitlerin fiber dalgalılığının ve üç eksenli gerilme metodunun mekanik özelliklere etkisini incelemek ve bunun farklı fiber ve matris çeşitleriyle zenginleştirmek ve üçüncü eksenle farklı gerilmelerin uygulanmasıyla malzeme hacminin tam homojenizasyonunu hedefleyerek kompozit malzemelerin üretim süreçlerine ve kombinasyonlarına yönelik çeşitli iyileştirme yöntemleri önermektir. Ayrıca polimer matrisli tabakalı kompozitlerin şekillendirilebilirliğini, deformasyon sınırlarını ve üretimi en zor olan parçalarda uyguladığımız üretim metodunun optimizasyonu hedeflenmektedir. Bu çalışmada özellikle, fiber takviyesi ve matris fazı arasındaki etkileşimlerin kompozitlerin dayanım, şekillendirilebilirlik ve diğer fiziksel özellikler üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Kompozitlerin imalat

sürecinde karşılaşılan zorluklar ve bu zorlukların çözümlenmesine yönelik stratejiler de tartışılacaktır. Ayrıca, fiber öngermesi gibi tekniklerin kompozit malzemelerin mekanik performansına etkisi araştırılacak, bu yöntemlerin üretim süreçlerindeki uygulamaları ve sınırlamaları üzerinde durulacaktır. Erichsen testi gibi şekillendirilebilirlik değerlendirmeleri ile malzemelerin deformasyon davranışları incelenerek, kompozitlerin mühendislik uygulamalarındaki potansiyel kullanım alanları için verimli çözümler sunulması hedeflenmektedir. Bu çalışma, polimer matrisli kompozitlerin endüstriyel kullanımını optimize etmek ve yeni nesil yüksek performanslı kompozit malzemeler geliştirmek için önemli bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tabakalı polimer kompozit malzemeler üzerinde araştırmaların çok yoğun bir şekilde yapıldığı ve yapılmaya devam edildiği bilinmektedir. Tabakalı polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında el yatırma yöntemi, vakum torbalama yöntemi, sıcak kalıplama, otoklav uygulaması gibi seçeneklerin kullanılmasında dokunmuş fiber kumaşların ve filamentlerin serbest haldeki formları kullanılmaktadır. Kumaş fabrikasyon üretimdir. Ancak belli bir kesim ölçüsüyle üretildiklerinden en ve boylarından herhangi bir sabitleme olanağı yoktur. Kumaş üretim esnasında atkı ve çözgü yönlerinde bozulmalara ve elyaf doğrultularındaki sapmalara neden olmaktadır. Elyaf dalgalılığının polimer matrisli kompozitlerde yük taşıma etkinliğini azalttığı, elastik modülü düşürdüğü, gerilme yığılmaları ve mikro boşluklara sebep olduğu bilinmektedir. Bu da malzeme mukavemetini ve yorulma dayanımını olumsuz etkiler. Kaçınılmaz sorun da atkı ve çözgü liflerinin dokuma esnasında çeşitli dokuma teknikleri yüzünden mecburen birbiri altına veya üstüne geçmesinden dolayı ekstra gerilmelere sebep olmaktadır. Buna ilaveten elyaf doğrultularının bozulması malzeme mekaniğinde kayıplara yol açacaktır. Malzeme bu noktalarda kıvrım etkisine maruz kalmakta ve bozulmalar ilk kez bu noktalarda oluşmaktadır. Bu bağlamda tabaklı kompozit malzemelerde öngermenin malzeme dayanımına etkisi üzerine literatürde gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar vardır. Öngermenin, örneğin tabakalı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde ve şekillendirme kabiliyetinde etkisinin araştırılması aşağıdaki çalışmalarda gösterilmiştir.

Bayraktar vd. (2019), polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi için silindirle öngörme yöntemi kullanmıştır. Tek yönlü karbon fiber liflerin doğrusallığını arttırmak için sırasıyla 0, 1.8, 2.7, 4.1, 6.2 ve 9.1 MPa değerinde öngörme işlemi uygulanmıştır. Üç nokta eğme ve çekme testi sonuçlarına göre, çekme gerilmesinde %39 ve eğme gerilmesinde %20 oranında artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca fiberlerin 4.1 MPa'nın üzerinde gerilmesi kompozitlerde mekanik özellik açısından herhangi bir iyileştirme sağlamadığını gözlemlemişlerdir.

Ramakrishna (1998), örgü kumaş takviyeli elastomer kompozitlerin çekme özellikleri üzerinde, kumaşın öngermesinin etkilerini araştırmıştır. Özellikle atkı ve çözgü yönlerinde uygulanan tek eksenli ve çift eksenli (biaxial) öngörme işlemlerinin, kompozit malzemelerin elastik modül, çekme dayanımı ve kopma uzaması üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelenmiştir. Öngörme işlemi, özgün olarak tasarlanan bir çift

eksenli gerdirme düzeneği ile gerçekleştirilmiş ve kumaş %0, %10, %20 ve %30 oranlarında farklı derecelerde gerilmiştir. Öngerme işlemi ile liflerin test yönüne hizalanması artmış ve bu durum test yönünde elastik modül ve çekme dayanımında artışa neden olmuştur. Tek eksenli gerdirme durumunda atkı veya çözgü yönünde uygulanan öngerme, sadece o yöndeki mekanik özellikleri artırmış, diğer yönde ise mekanik performans azalmıştır. Eşit oranlı çift eksenli öngerme durumunda hem atkı hem de çözgü yönlerinde kabul edilir düzeyde iyileşme gözlemlenmiştir. Öngerme oranı arttıkça, örgü yapının esneme kabiliyeti azalmış ve bu da kopma uzamasında düşüşe neden olmuştur. 0% öngermeli kompozitlerde, atkı ve çözgü yönleri arasında yaklaşık 2,5 kat anizotropi gözlenmiş; bu anizotropi, çözgü yönünde daha fazla öngerme uygulanmasıyla azaltılabilmektedir.

Mostafa vd. (2016), kumaş öngerme işleminin oda sıcaklığında bir dokuma kumaş kompozit malzemenin yorulma özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Kompozit malzemenin eş-çift eksenli kumaş öngermesinin optimum seviyesini tahmin etmek için 100 MPa'ya kadar olan numuneler üzerinde çekme testleri yapılmıştır. Daha sonra, öngermeli olmayan (0 MPa), optimum seviye (50 MPa) ve aşırı öngermeli (100 MPa) durumlar gibi önceden tanımlanmış eş-çift eksenli kumaş öngerme seviyelerine sahip numuneler için çekme, gerilme ve yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kompozit numuneler ayrıca çözgü ipliklerine göre 0, 15, 30 ve 45°'lik farklı eksen dışı yüklenme yönlerinde de test edilmiştir. Öngermeli kumaşta, elastik modül gibi çekme performansı artırılmış ve kompozitin ilk kırılmasına kadar olan kritik gerilmesi %10-20 oranında artmıştır. Çekme modülü ve kritik gerilme gibi çoğu gerilme özellikleri optimum seviye olan 50 MPa öngerme seviyesinde nihai değerlerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Optimum seviyede öngermeye tabi tutulan numunelerin yorulma ömrü ~ %43'e kadar uzatılmıştır.

Gemi vd. (2017), darbe yüklemesinin cam/karbon hibrit kompozit boruların yorulma davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kompozit boruları 3–48 MPa değerinde teğetsel öngerme, ardından 20 J'de düşük hızlı darbeye tabi tutulmuştur. Ayrıca teğetsel öngermenin artırılmasının darbe hasar alanını azalttığı ve borunun yorulma ömrünü arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 24 MPa öngerme seviyesinde darbe ön hasarlarının borunun yorulma ömrü üzerinde etkili olmadığı da gözlemlenmiştir.

Motahhari (1999), Elyaf öngermesinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Numuneleri üretmek için E-cam elyafı ve karbon elyafı ile epoksi reçinesi kullanılmıştır. Numuneler, reçine kürlenirken yatay bir tansiyometre

makinesinde elyaf lar üzerindeki gerilme uygulanarak ve tutularak yapılmıştır. Cam-epoksi ve karbon-epoksi numuneleri için, reçinenin k urenmesi sırasında sırasıyla 10 ila 100 MPa ve 20 ila 140 MPa arasında farklı ongerme seviyeleri uygulanmıştır. K urreme işle mi sırasında elyaf in ongermesi, cam-epoksi ve karbon-epoksi kompozitlerin b ुक ulleme mukavemetinde ve b ुक ulleme mod ুল ünde önemli bir artış sağladığı gör ুল ümüştür. Mukavemet ve mod ুল , cam epoksi kompozitler için sırasıyla %33'e kadar, karbon-epoksi kompozitler için ise %17 ve %33'e kadar arttığı gözlemlenmiştir. K urreme işle mi sırasında fiber ongerme cam epoksi kompozitlerin darbe dayanımını arttırmıştır. Bu deneylerde, ongermesiz kompozitlerle karşılaştırıldığında darbe dayanımında %33'e varan artış ölç ümüştür. Belirli bir ongerme seviyesinin ötesinde, elyaf ongermesinin mekanik özellikleri azalttığı gözlemlenmiştir.

Abdy vd. (2018), kendinden ongeremeli CFRP/SMA hibrit yamaları geliştirmek için şekil hafızalı alaşımların (SMA), karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerle birlikte kullanımını araştırmıştır. Kendinden ongerme kavramı, önceden gerilmiş SMA tellerini, CFRP yamaları içine gömmek ve bunları doğrudan ısı veya elektrik akımı yoluyla aktive etmek, böylece çatlamaş elemanda ongerme kuvvetleri oluşturmuştur. Başlangıçta çatlamaş ve yalnızca serbest CFRP yamalarla güçlendirilmiş malzemeler ile kendi kendine ongeremeli CFRP/SMA hibrit yamalarla güçlendirilmiş çelik plaka malzemeler üzerinde döngüsel yorulma testlerinin gerçekleştirilmiştir. Yalnızca serbest CFRP yamalarının 6 mm ve 5 mm çatlaklı çelik levhaların yorulma ömrünü sırasıyla 3 ve 5 kat arttırdığını fakat kendinden ongeremeli CFRP/SMA yamalarının 6 mm çatlaklı çelik levhaların yorulma ömrünü sırasıyla 4 ve 5 kat artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak 400 °C ısı l işlem görmüş kendinden ongeremeli CFRP/SMA yamalarının kullanılması, 5 mm çatlaklı çelik plakaların yorulma ömrünü 10 kat artırmıştır. Sonuçlar, geliştirilen kendinden ongeremeli CFRP/SMA hibrit yamaların, çatlaklı çelik yapıların yorulma ömrünü önemli ölç üde artırmak için basit ve etkili çözümler olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Zaixia vd. (2006), çalışmasında ör ুল müş cam elyaf kumaş takviyeli polipropilen (GF/PP) kompozitlerde, farklı ongerme oranlarının (%0 ila %80 arası) çekme özellikleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Bu kapsamda, dokuz farklı ongerme oranı uygulanarak numuneler hazırlanmış ve çekme testleri gerçekleştirmiştir. %50'ye kadar olan ongerme oranlarında, cam elyaf ların boy yönündeki oryantasyonu artmış ve buna bağı lı olarak çekme dayanımı ve elastik mod ুল ünde yaklaşık %50'ye varan artışlar elde edilmiştir. %50'yi aş an ongerme oranlarında ise, cam elyaf larının kırılması artmış, %80

öngerme oranında fiber mukavemetinin yaklaşık %50 oranında azaldığı belirlenmiştir. Öngerme oranı arttıkça, kopma uzaması değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, örgü yapısının esneme kabiliyetinin azalmasıyla açıklanmıştır.

Zhao vd. (1998), sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen (PP) esaslı termoplastik kompozitlerde, üretim öncesinde uygulanan fiber öngerme işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Özellikle, öngerme ile gerilmelerin kontrol altına alınması ve bunun sonucunda çekme, eğilme ve ara katman kayma dayanımı gibi temel mekanik performans kriterlerinde sağlanan iyileşmeler değerlendirilmiştir. Cam elyaf ve PP liflerinden oluşan birbirine karışık iplik yapısı kullanılarak numuneler hazırlanmış, elyaflara üretimden önce ve üretim esnasında farklı düzeylerde (0–200 MPa aralığında) aksenal öngerme uygulanmıştır. Bu öngerme işlemi özel olarak tasarlanmış bir fiber gerdirme düzeneği ile gerçekleştirilmiş ve liflerin üretim boyunca düzgün oryantasyonu sağlanmıştır. Numuneler sıcak presleme yöntemiyle şekillendirilmiş ve ardından çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuştur. Çekme ve eğilme dayanımı ile elastik modül değerleri, öngerme seviyesi belirli bir eşik değere (örneğin çekme için ~87 MPa, eğilme için ~65 MPa) kadar artırıldığında önemli ölçüde artmış, bu değer üzerinde ise mekanik özelliklerde hafif bir düşüş gözlenmiştir. Öngerme işlemi, fiberlerin yük yönünde hizalanmasını artırarak yük taşıma kabiliyetini güçlendirmiş; aynı zamanda polimer matris üzerindeki çekme yönlü termal artık gerilmelerin baskılanmasına yardımcı olmuştur. Öngermenin, ara katman kayma dayanımını da pozitif yönde etkilediği, ancak yüksek öngerme seviyelerinde bu artışın sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Farklı yüklenme türlerine göre optimum öngerme seviyeleri değişkenlik göstermekte olup, çekme testleri için gerekli öngerme düzeyi, eğilme testlerine göre daha yüksek bulunmuştur.

Schlichting vd. (2010), çalışmalarında termoset kompozit malzemelerde öngermeli ve germesiz tek yönlü cam elyaf takviyelerinin etkisini değerlendirmiştir. Sonuçlar, öngermenin numunelerinin eğilme modülünü artırdığını gösterdi. Öngermeli kirişler, ilk göçmede geleneksel olarak güçlendirilmiş kirişlerden 0.85–1.35 mm'den daha fazla sapmaya ulaşmıştır. Öngerme ayrıca kirişlerin eğilme mukavemetini 443,46 MPa'dan 569,15 MPa'ya önemli ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 2. 1. Fiber öngermeli PMC ile ilgili incelemeler

Malzeme	Öngörme Yöntemi	Araştırma Alanı	Bulguların Sonuçları	Referanslar
Kumaş cam elyafı Fenol bazlı reçine	Germe Çubuğu kullanılarak cam elyafın elastik olarak öngörmesi	Kompozitin basınç ve çekme özelliklerinin değerlendirilmesi	Çözgü liflerinin düzleştirilmesinden dolayı elastik özelliklerde %31'e kadar artış kaydedildi. Çekme mukavemetinde	(Zhigun, 1972)
Tek yönlü prepreg grafit/epoksi bant	Prepreg bant, çelik bir rulo üzerinde bükülerek gerilmeye tabi tutuldu	Çekme ve elastik modül ölçümü	%17'ye varan artış kaydedildi. Kompozit elastik modülü etkilenmedi.	(Brown, 1976)
%60 fiber hacim oranına sahip tek yönlü karbon fiber/epoksi kompozit	Yük, kurlenmeden önce fibere uygulandı	Kompozitin termal stres analizi	Fiber öngermeler matristeki artık gerilmeleri azalttı.	(Tuttle, 1988)
%56 fiber hacim oranına sahip tek yönlü E-cam elyaf/polyester reçine	Ölü ağırlık	Çekme özelliklerinin değerlendirilmesi	Çekme mukavemeti, öngörme seviyesindeki artışla arttı.	(Jorge vd., 1990)
%70 fiber hacim fraksiyonuna sahip karbon fiber/epoksi reçine çapraz katlı laminat	Filaman sarım	Kompozit arızalarının modellenmesi ve deneysel çalışması	Öngörme seviyesinin 690 MPa'ya kadar yükseltilmesiyle katın kopma mukavemeti arttı.	(Rose, 1993)
Grafit fiber/epoksi reçine, %56 fiber hacim fraksiyonuna sahip simetrik olmayan çapraz katlı laminat	Hidrolik silindir	Çekme mukavemeti, eğrilik ve enine çatlamanın incelenmesi	Fiber öngörme, bükülmeyi, eğriliği ve enine çatlamayı azalttı.	(Osman vd., 2020)
Öngermeli Tek yönlü Naylon 6.6 fiber/polyester reçine	Dikey germe donanımı	Darbe enerjisinin analizi	Viskoelastik olarak oluşturulan basınç gerilmeleri. Öngermeli numune tarafından daha yüksek darbe enerjisini absorbe etti.	(Fancey, 2000)

E-cam elyaf/epoksi reçine çapraz katlı laminat	Çift eksenli yükleme çerçevesi	Yüksek ve düşük hızlı darbe performansının etkisi	Düşük seviyeli hızda darbe performansının iyileştirilmesi.	(Jevons, 2011)
Tek yönlü E-cam elyaf/epoksi çapraz katlı laminatlar (%58,2 elyaf hacim oranı)	Düz yataklı germe	Çekme, yorulma ömrü ve basınç dayanımı ölçümü	Öngerme seviyelerinde sırasıyla çekme modülü ve basınç dayanımında %9 artış.	(Abdullah ve Hassan, 2016)
Tek yönlü Naylon 6.6 fiber/epoksi reçine (16, 28, 41 ve %53 fiber hacim oranı)	Özel dikey germe teçhizatı	Çekme mukavemeti ve modül ölçümü	Çekme modülü ve çekme mukavemetinde sırasıyla %30 ve %15 artış.	(Pang ve Fancey, 2008)
Karbon ve cam elyaf/Hexcel çapraz katlı laminatlar	Düz yataklı	Öngermeli bükülmüş laminatın deneysel ve sonlu elemanlar analizi	Öngerme yoluyla iki durumlu davranışın uyarılması	(Daynes ve Potter, 2008)
Tek yönlü Naylon 6.6 fiber/polyester reçine (%8, %12, %16 fiber hacim oranı)	Dikey germe donanımı	Eğilme özellikleri ölçümü	Eğilme modülünde %50'ye varan artış.	(Pang ve Fancey, 2009)
Tek yönlü S-cam elyafli kompozit reçineler (%12 elyaf hacim oranı)	Ölü ağırlık	Eğilme özellikleri ölçümü	Eğilme mukavemetinde artış.	(Schlichting vd. 2010)
Tek yönlü UHMWPE fiber/polyester reçine (%3,6 fiber hacim oranı)	Dikey germe donanımı	Darbe özellikleri ölçümü	Öngerme, darbe enerjisi emiliminde %40'a kadar artış	(Fazal ve Fancey, 2014)
Karbon fiber/epoksi reçine (%50 fiber hacim oranı)	Ölü ağırlık	Mukavemet özellikleri	Kompozit malzemelerin mukavemetinde artış	(Nishi vd., 2014)
Hibrit tek yönlü Naylon 6.6 ve kevlar elyaf/polyester	Dikey germe donanımı (Yalnız Naylon için)	Darbe ve eğilme testi	Absorpsiyon enerjisinde ve eğilme modülünde sırasıyla %33 ve %40 artış.	(Fancey ve Fazal, 2015)
Tek yönlü Naylon 6.6 fiber/polimer reçine (lif hacim oranı %2,2)	Dikey germe donanımı	Etki değerlendirmesi	Emilen darbe enerjisi arttı (%40).	(Zaidi vd., 2015)
Keten ipliği/polyester reçinesi	Germe çerçevesi	Çekme ve eğilme değerlendirmesi	Fiber hizalama geliştirilmesi. Artan çekme mukavemeti ve modül. Eğilme mukavemeti ve modülünde artış.	(Mostafa vd., 2015)
Düz dokuma E-cam kumaş/polyester reçine (%16 elyaf ağırlık oranı)	Hidrolik silindir çift eksenli yükleme çerçevesi	Eğilme özellikleri	50 MPa optimum öngerme seviyesinde eğilme	(Mostafa vd., 2016)

Düz dokuma E-cam kumaş/polyester reçine (%11 elyaf ağırlık oranı)	Hidrolik silindir çift eksenli yükleme çerçevesi	Çekme ve yorulma özellikleri	mukavemetinde %16'ya varan artış. Yorulma ömrü %43'e kadar arttı. Düşük ve orta gerilmeli yorulma yükü altında yorulma ömründe iyileşme	(Mohammed vd., 2019)
Tek yönlü E-cam elyaf/epoksi reçine	Yatay test makinesi	Eğilme, çekme ve basma özellikleri	Elyaf dalgalılığında azalma. Eğilme, çekme ve basınç mukavemetinde artış.	(Qin ve Fancey, 2020)
Naylon 6.6 iplik/polyester çapraz katlı kompozit	Germe donanımı	Etki davranışı	Hasar derinliğinde %28'a kadar azalma	(Al-Dulaimy vd., 2021)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde endüstriyel uygulamalara ve literatüre katkıda bulunmak amacıyla tabakalı termoplastik kompozitlerde üretim yöntemleri açıklanmaktadır.

3.1. Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

Tabakalı polimer kompozit malzeme üretimi için takviye elemanı olarak cam ve karbon elyaf fiberler, matris elemanı olarak polietilen film tercih edilmiştir.

3.1.1. Cam fiber kumaş

Cam fiber kumaş, yüksek mukavemet, hafiflik ve kimyasal direncin farklı kombinasyonlarını sunan bir malzemedir. Genellikle E-cam (Elektriksel) ve S-cam (Yapısal) olmak üzere iki temel çeşidi bulunur. E-cam, elektriksel yalıtım özellikleri ve düşük maliyetiyle öne çıkarak yaygın olarak kullanılır. S-cam ise üstün mekanik dayanımı sayesinde havacılık ve savunma sanayisi gibi kritik uygulamalarda tercih edilir. Cam fiber kumaş, 10 mikron gibi ince filament çaplarına sahiptir ve bu ince yapı, yüksek yüzey alanı ile kuvvetin eşit şekilde dağılmasını sağlar. Liflerin yoğunluğu genellikle 2.54 g/cm^3 'tür, bu da karbon fiber gibi diğer kompozit malzemelere kıyasla daha yüksek bir değer olsa da cam fiberi maliyet açısından avantajlı kılar. Çizelge 3.1'de cam plain ve twill kumaşların mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1. Cam plain ve cam twill kumaş mekanik özellikleri

Özellik	Plain (200 g/m ²)	Twill (2/2, 200 g/m ²)
Yoğunluk	2,54 g/cm ³	2,54 g/cm ³
Ağırlık	200 g/m ²	200 g/m ²
Örgü Tipi	Plain	Twill (2/2)
Filament Çapı	10 mikron	10 mikron
Çekme Mukavemeti (min)	2400 MPa	2400 MPa
Elastik Modül (min)	70 GPa	70 GPa
Çekme Gerinimi (min)	4,8 %	4,8 %

Cam fiber kumaş, esnekliği ve uyum kabiliyeti sayesinde karmaşık geometrilere sahip yüzeylerde kolayca kullanılabilir. Yüksek çekme mukavemeti ve elastik modülü, yapısal sağlamlık gerektiren uygulamalarda güvenilir bir seçenek olmasını sağlar. Ayrıca, paslanmaya ve kimyasal saldırılara karşı dirençli olması, açık hava uygulamaları ve dış ortamlar için idealdir. Cam fiber kumaş, plain ve twill gibi farklı örgü tipleriyle üretilir.

Plain örgü daha sert ve sağlam bir yapı sunarken, twill örgü daha fazla esneklik ve şekil uyumu sağlar. Maliyeti düşük olduğu için otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir. Böylece cam fiber kumaş, fonksiyonellik ve maliyet etkinliği arasında dengeli bir çözüm sunar. Çalışmamızda her iki örgü tipi arasındaki farklar vurgulanmıştır.

3.1.2. Karbon fiber kumaş

Karbon fiber kumaş, hafifliği, yüksek mukavemeti ve olağanüstü termal dayanımıyla öne çıkan bir malzemedir. Tipik olarak 3K, 6K veya 12K gibi farklı filament sayılarına göre sınıflandırılır; bu sınıflandırma, bir iplik demetindeki lif sayısını ifade eder. Daha düşük K değerleri daha ince kumaşlar ve karmaşık detaylar için uygunken, daha yüksek K değerleri daha kalın ve sağlam yapılar oluşturur. Karbon fiber kumaşın yoğunluğu 1.79 g/cm^3 civarındadır, bu da onu cam fiber kumaşa göre daha hafif bir seçenek haline getirir. Plain ve twill gibi örgü tipleri, kullanım alanına bağlı olarak esneklik veya sertlik sağlamak için tercih edilir. Ayrıca karbon fiber kumaş, minimum %95 karbon içeriği ile üretilir ve bu da üstün mekanik özelliklerini garanti eder. Çizelge 3.2’de karbon plain ve twill kumaşların mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2. Karbon plain ve karbon twill kumaş mekanik özellikleri

Özellik	Plain (200 g/m ²)	Twill (2/2, 200 g/m ²)
Yoğunluk	1,79 g/cm ³	1,79 g/cm ³
Ağırlık	200 g/m ²	200 g/m ²
Örgü Tipi	Plain	Twill (2/2)
Filament Çapı	6 mikron	6 mikron
Çekme Mukavemeti (min)	3800 MPa	3800 MPa
Elastik Modül (min)	240 GPa	240 GPa
Çekme Gerinimi (min)	1,6 %	1,6 %

Karbon fiber kumaş, yüksek çekme mukavemeti (3800 MPa) ve elastik modülü (240 GPa) sayesinde yapısal dayanıklılık gerektiren uygulamalarda vazgeçilmezdir. Hafifliği, uçak, uzay araçları ve spor otomobiller gibi ağırlığın kritik olduğu alanlarda büyük avantaj sağlarken düşük termal genleşme katsayısı, sıcaklık değişimlerinde boyutsal kararlılık sunar. Karbon fiberin elektriksel iletkenliği, elektronik uygulamalarda kullanılabilirliğini artırır. Örgü tipine göre plain kumaş, daha sert bir yapı sağlarken, twill kumaş daha esnek ve karmaşık şekillere uygun bir seçenek sunar. Maliyeti cam fiber kumaşlara göre yüksek olsa da uzun ömürlülüğü, dayanıklılığı ve üstün performansı,

karbon fiber kumaşı yüksek teknolojiye dayalı projeler için ideal bir seçim haline getirir. Çalışmamızda her iki örgü tipi arasındaki farklar vurgulanmıştır.

3.1.3. Polietilen film

PE, etilen monomerlerinin polimerizasyonu ile üretilen, dünyada en yaygın kullanılan termoplastiklerden biridir. Düşük yoğunluklu (LDPE), yüksek yoğunluklu (HDPE), lineer düşük yoğunluklu (LLDPE) gibi birçok çeşidi vardır. PE, hafifliği, kimyasal direnci ve kolay işlenebilirliği ile öne çıkar. Amorf yapısı nedeniyle esnek bir malzemedir ve geniş bir sıcaklık aralığında dayanıklılık gösterir. Yoğunluğu genellikle 0,91–0,97 g/cm³ arasında değişir ve erime noktası 110–135°C civarındadır. Elektriksel yalıtkanlığı yüksek olan PE, elektrik kablolarında ve elektronik uygulamalarda tercih edilir. Ayrıca, suya ve birçok kimyasal maddeye karşı dirençlidir, bu da polietileni boru sistemleri ve ambalaj malzemeleri için ideal kılar. Çizelge 3.3'te HDPE ve LDPE termoplastiklerin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 3. 3. HDPE ve LDPE mekanik özellikleri

Özellik	HDPE	LDPE
Yoğunluk	0,941–0,965 g/cm ³	0,910–0,940 g/cm ³
Erime Noktası	120–130°C	105–115°C
Çekme Mukavemeti	25–40 MPa	8–20 MPa
Elastik Modül	1000–1500 MPa	200–400 MPa
Darbe Dayanımı	Yüksek	Çok yüksek
Uzama (Kopma Noktasında)	%10–20	%200–800
Kimyasal Dayanıklılık	Mükemmel	İyi
Sertlik	Yüksek	Düşük
Şeffaflık	Düşük	Yüksek
UV Dayanımı	Zayıf (Stabilizatör eklenebilir)	Zayıf (Stabilizatör eklenebilir)
Su Emme	Çok düşük	Çok düşük
İşlenebilirlik	İyi (Enjeksiyon kalıplama)	Çok iyi (Film üretimi, kaplama)

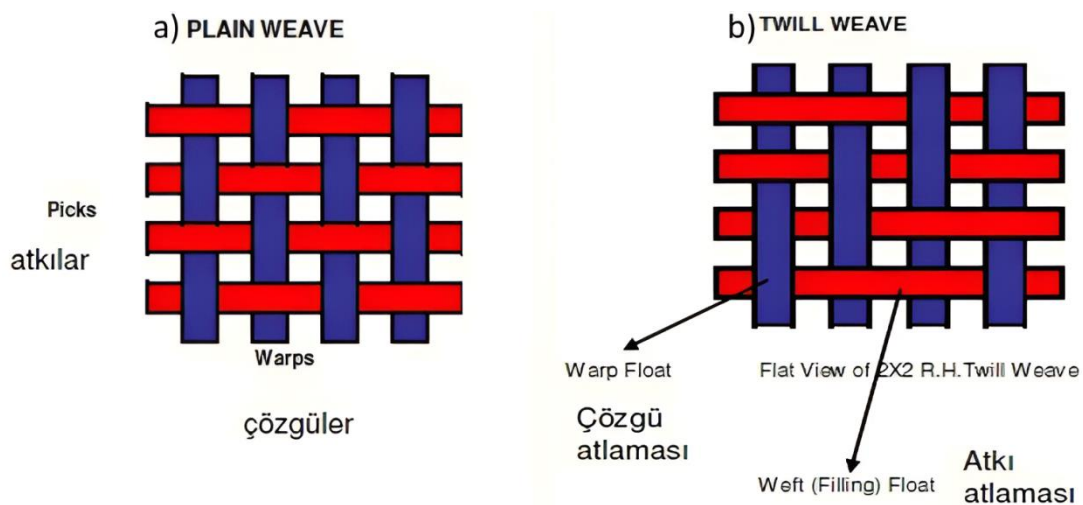
PE avantajları arasında düşük maliyet, hafiflik, kimyasal dayanıklılık ve kolay geri dönüştürülebilirlik yer alır. Ambalaj malzemesi, borular, şişeler ve oyuncaklar gibi birçok alanda kullanılır. Ancak, bazı dezavantajları da vardır; mekanik dayanımı, diğer mühendislik plastiklerine kıyasla daha düşüktür ve UV ışınlarına karşı zayıf bir dayanım sergiler, bu nedenle açık hava uygulamalarında stabilizatör eklenmesi gerekebilir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda yumuşama eğilimindedir, bu da ısıya dayanıklı uygulamalarda kullanımını sınırlar. Buna rağmen, çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi ve geri dönüşüm teknolojilerindeki ilerlemeler, polietileni sürdürülebilir plastik çözümlerinde

öne çıkarır. Polietilen, esnekliği ve şekillendirilebilirliği neticesinde endüstriyel ve günlük kullanımlar için vazgeçilmez bir malzeme olarak kullanılır.

Tabakalı polimer kompozit malzeme üretimi için cam ve karbon fiber kumaşlar farklı germe seviyelerinde enine ve boyuna z eksenine yönünde kuvvet uygulanarak sırasıyla 15 N ve 30 N germe kuvvetiyle öngerme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Takviye elemanı olarak cam fiber kumaş 200 gr/m² plain, cam fiber kumaş 200 gr/m² twill, karbon fiber kumaş 200 gr/m² plain ve karbon fiber kumaş 200 gr/m² twill kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise yüksek yoğunluklu polietilen film tercih edilmiştir. Malzeme üretimi için kullanılan takviye elemanları Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler San. Tic. Ltd. Şti firmasından, matris malzemesi ise Versan Plastik ve Ambalaj San. Tic. Ltd. Şti firmasından tedarik edilmiştir.

3.2. Numune Tasarımı

Numune tasarımı için, takviye malzemeleri olan cam ve karbon fiber kumaşlar twill ve plain örgü tipinde seçilmiş cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain olarak dört farklı türde hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanmasında ağırlıkça %50 fiber-matris konsantrasyonu. Fiber tabakalar arasında matris malzemesi olarak PE film kullanılmıştır. Bu yöntem, fiberlerin düzgün bir şekilde yerleşmesini ve PE matrisin her katmana eşit şekilde dağılmasını sağlamıştır. Plain ve twill örgü tipi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. a) Plain örgü tipi gösterimi b) Twill örgü tipi gösterimi

Hazırlanacak numuneler fiber ve matris elemanlarının ağırlıkça oranları (%50 fiber + %50 matris) olacak şekilde kullanılmıştır. Cam twill ve cam plain malzeme

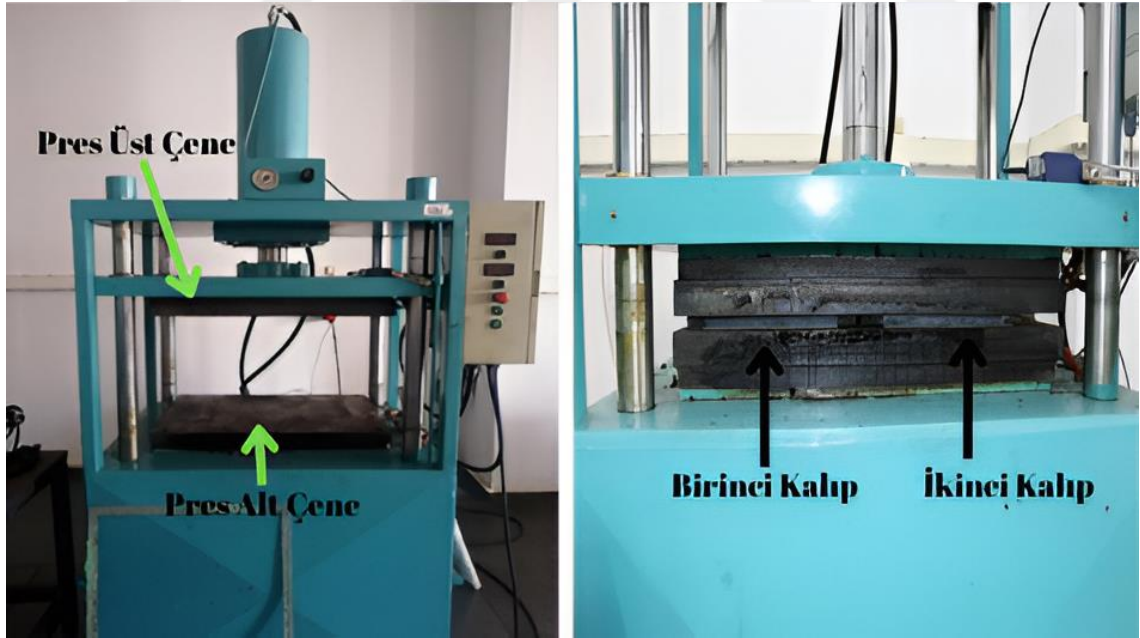
dizilimi ile karbon twill ve karbon plain malzeme dizilimi aynı şekilde olup, cam ve karbon fiber takviyeli PE matrisli numune dizilimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



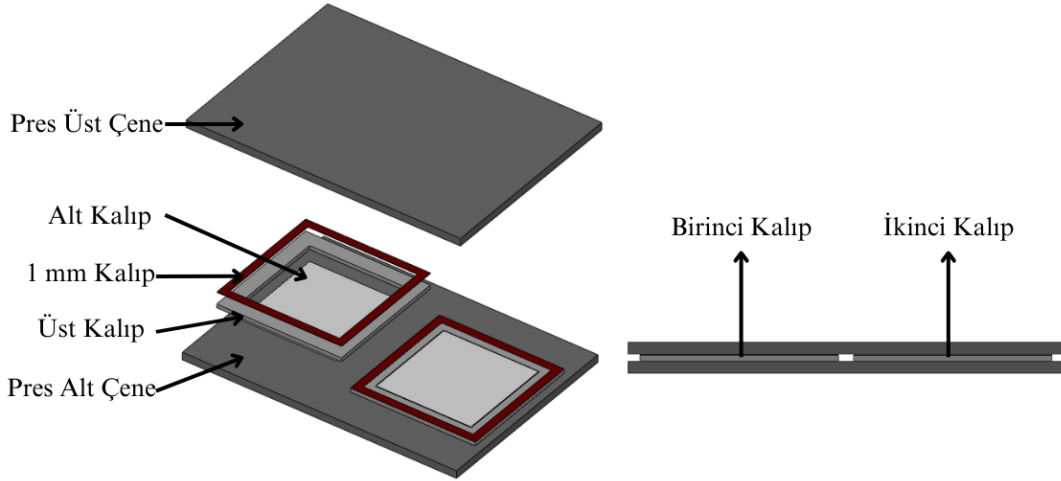
Şekil 3. 2. Cam ve karbon fiber takviyeli PE matrisli numune dizilimi

3.3. Numune Kalıp Tasarımı

Laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere, numune üretiminde kullanılacak kalıp tasarımı, Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi laboratuvarında mevcut bulunan ısıtma plakalı hidrolik prese uygun şekilde planlanmıştır. Tasarım, aynı anda iki numunenin preslenmesine olanak sağlayacak şekilde optimize edilmiş ve SolidWorks programında detaylı olarak modellenmiştir. Kalıp malzemesi seçiminde, PE matrisin erime sıcaklığı göz önünde bulundurularak çelik tercih edilmiştir.



Şekil 3. 3. Isıtma plakalı hidrolik pres



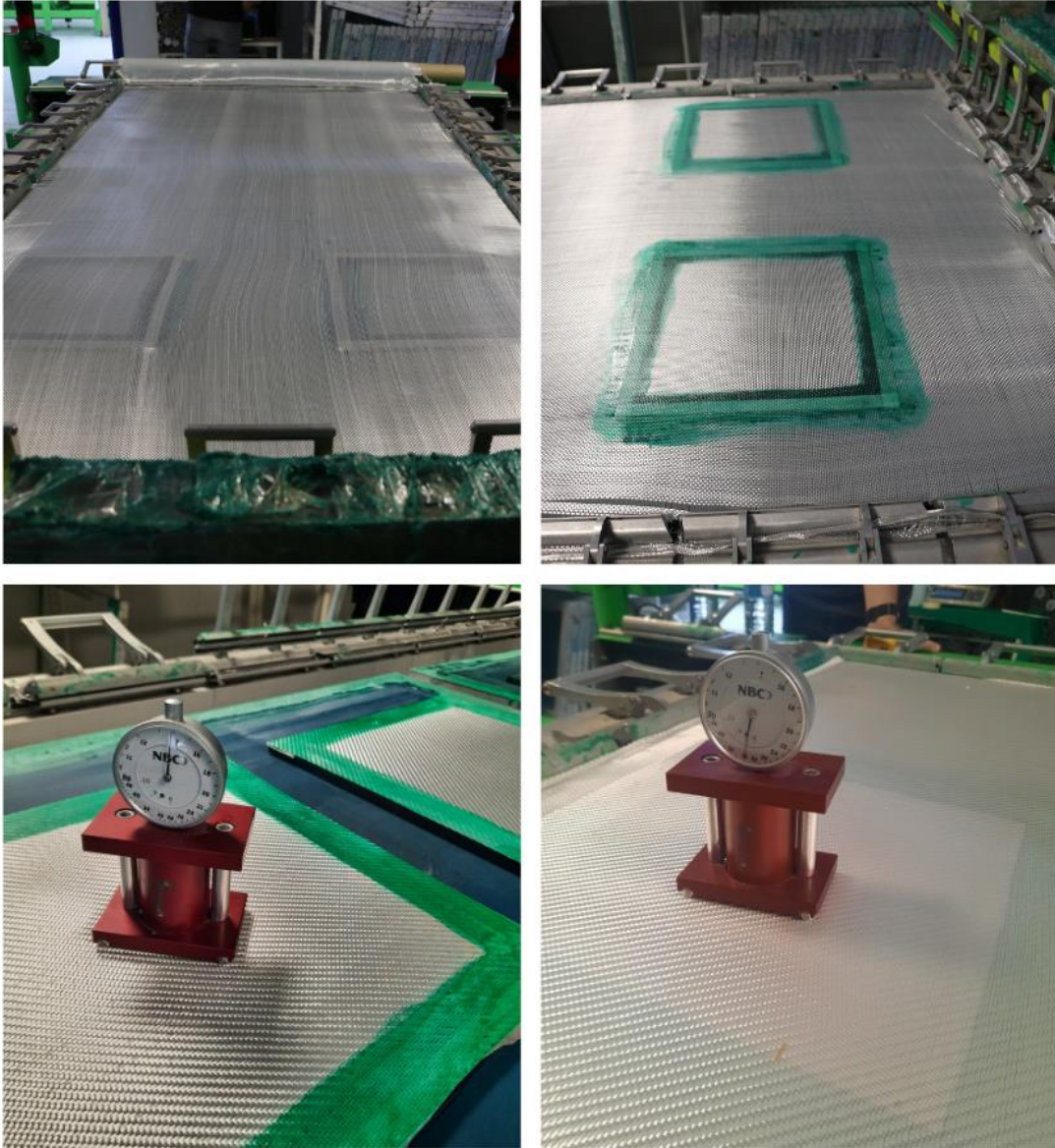
Şekil 3. 4. Isıtma plakalı hidrolik pres için tasarlanmış kalıplar

Numunelerin kalıptan kolayca çıkarılabilmesi için ek önlemler alınmıştır. Silikon bazlı kalıp ayırıcı sprej, kalıp yüzeyinde bir bariyer oluşturarak, malzemenin yapışmasını önlemiştir ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesine katkı sağlamıştır. Bu tasarım ve malzeme seçimleri, deneysel çalışmaların hem güvenilirliğini hem de tekrarlanabilirliğini artırmayı hedeflemiştir. Bu yaklaşım, ısıtma plakalı hidrolik presleme işlemlerinde karşılaşılabilecek sorunları önceden ele alarak, üretim sürecinde yüksek verimlilik ve hassasiyet sağlamıştır.

3.4. Öngerme İşlemi

Öngerme işlemi için belirlenen takviye elemanı fiber kumaş makine üzerine en ve boydan makine kilitleri yardımıyla sabitlenerek kontrolsüz öngerme uygulanmış, daha sonra makinenin kontrol ünitesinden kumaş enine ve boyuna z eksenine yönünde kuvvet uygulanarak sırasıyla 15 N ve 30 N net germe kuvvetiyle gerdirilmiştir ve kumaşın gerginliği torkmetre yardımıyla ölçülmüştür. Kumaşın çerçeveye temas eden yüzeyleri çerçeveye ve kumaşa zarar vermeyen ve kumaşın kalıba temas eden yüzeylerinin yapışmasını sağlayan yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Böylece her tabaka için germe kuvvetleri sabit tutulmuştur. Yapışkan yüzeyin kurumamasından sonra ağırlık oranlarına göre kumaş yüzeylerine matris malzemesi olan PE film yerleştirilmiştir. İlk katı tamamlanan numunenin ikinci katını oluşturmak için önce makine kilitleri açılmış ve makine üzerine tekrar takviye elemanı olan fiber kumaş serilmiştir. İlk kattaki işlemler aynı sıra ve değerlerle uygulanmış ve bu numune dizilimi üçüncü kat tamamlanınca sona ermiştir. Bu işlemler cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain kumaşlar için ayrı ayrı ve aynı işlem adımları takip edilerek yapılmıştır. Böylece 15 N ve 30 N germe kuvvetlerinde cam ve karbon malzemeler plain ve twill örgü tipi olacak 8 adet numune

esas alınmak üzere, her numuneden en az 3 farklı numune üretilmesi varsayılarak 24 adet numune üretilmiştir. Şekil 3.5'te öngerme işlem adımları gösterilmiştir.



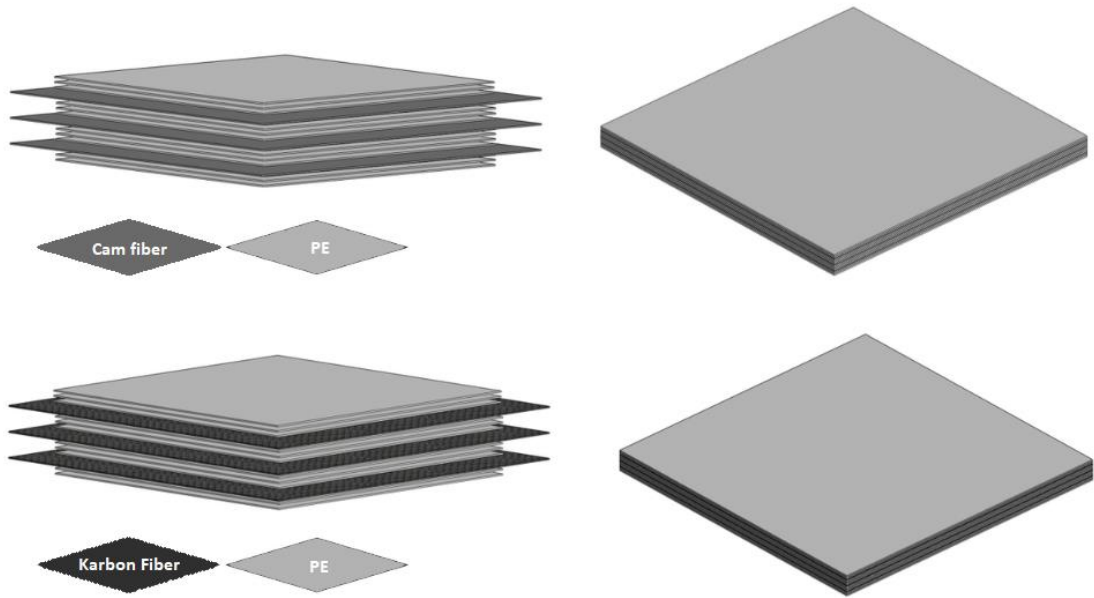
Şekil 3. 5. 15 N ve 30 N öngerme işlem adımları

3.5. Numune Üretimi

Cam plain ve twill, karbon plain ve twill fiber kumaşlar sırasıyla 15 N ve 30 N germe kuvvetiyle çift eksenli germe yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her ekseninde sırasıyla 15 N ve 30 N germe kuvveti bulunmaktadır. Numunelerin germe işlemi Seydişehir Beybo Boya Sanayi A.Ş. firma bünyesinde bulunan Grunig G-Stretch 281 germe makinesiyle atkı ve çözgü yönlerinde belirlenen çekme kuvvetleri sırasıyla 15 N ve 30 N, z eksenine kuvvet uygulanarak elde edilmiştir. Uygulanan kuvvetler kumaşın birçok noktasından ölçülen NBO marka torkmetre ölçü aletiyle kontrol edilmiştir. Üretim

esnasında germe ve basma kuvvetlerini korumak için malzeme güçlü bir yapıştırıcı ile takviye edilmiştir. Tamamlanan numuneler kütleme işlemi için sıcak preste 10 bar basınçta polietilen erime sıcaklığı olan 125-130°C'ye aşamalı olarak yükseltilmiş, tepe sıcaklığında malzeme 20 dk homojenizasyon için bekletilmiş ve yine sıcaklık aşamalı olarak soğutularak numuneler kalıptan çıkarılmıştır.

Öngerme işlemi ve üretimi tamamlanan 290x290x1 mm³ numuneler kalıptan çıkartılarak kalıba yapışmış olan dış kenarlarından kesici uç yardımıyla kesilmiş ve PE film boyutları olan 240x240x1 mm³ ölçüsüne getirilmiştir. Şekil 3.6'da öngerme işlemi tamamlanan numunelerin boyutlandırılması gösterilmiştir.



Şekil 3. 6. Öngerme işlemi tamamlanan numunelerin boyutlandırılması

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde enine ve boyuna sırasıyla 15 N ve 30 N öngerme işlemi tamamlanmış, matris ve fiberlerin hacimsel oranlarına göre kürlenmiş cam plain, cam twill, karbon plain ve karbon twill numuneleri çeşitli mekanik testlere tabii tutulmuştur. Bu testler, çekme, üç nokta eğme, sertlik ve erichsen testleridir. Yapılan testler sonucunda hasar gören numuneleri detaylı incelemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi ile incelemeler yapılmıştır.

Numuneler 240x240x1 mm³ olarak hazırlanmış olup deneyler için farklı boyutlarda kesilmiş ve hazırlanmıştır. Çekme testi, üç nokta eğme testi ve SEM analizi Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) bünyesinde, Erichsen testi Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Fakültesi Metal Şekillendirme Laboratuvarında ve sertlik deneyi Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

4.1. Çekme Testi

Çekme testi, üretilen tabakalı cam ve karbon fiber kompozitlerin mekanik dayanımını belirlemek ve öngermenin malzemenin çekme mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı fiber türleri ve öngerme seviyeleri arasındaki çekme dayanımı farklarını analiz ederek malzeme performansını değerlendirmek hedeflenmiştir.

Numuneler ASTM D3039 standartlarına göre 250x25x1 mm³ boyutlarında her bir deney için 3'er numune hazırlanmış 2 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numune boyutları Şekil 4.1'de, deney numune örnekleri ve test cihazı Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. ASTM D3039 test numune boyutları



Şekil 4. 2. Çekme deney numune örnekleri ve test cihazı

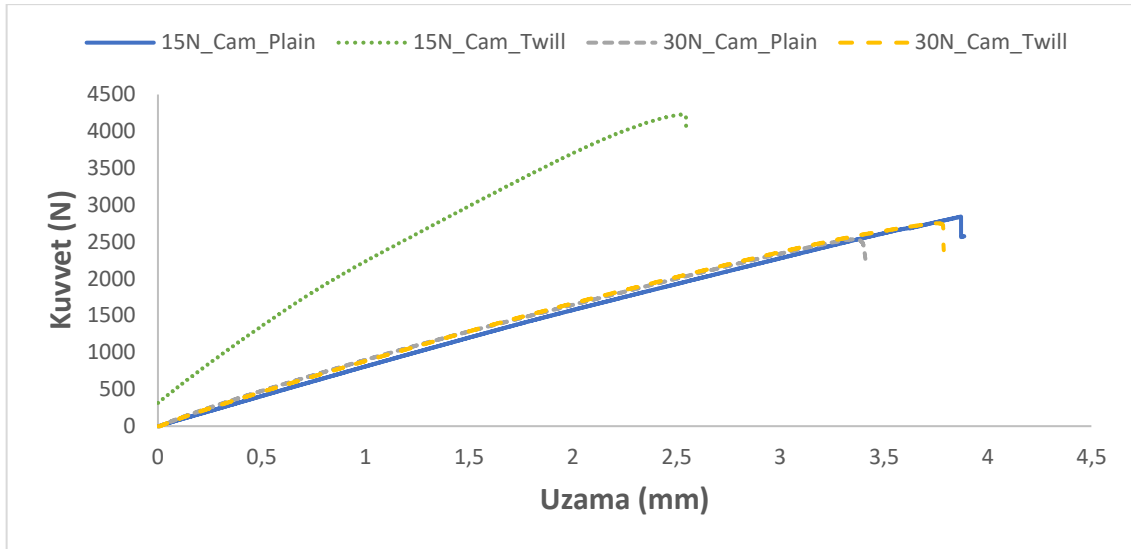
15 N ve 30 N öngerme kuvvetiyle üretilen cam plain ve cam twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde Cam plain ve twill ortalama çekme test sonuçları

Cam Fiber Çekme Testi	15 N Plain	15 N Twill	30 N Plain	30 N Twill
Maksimum Kuvvet (N)	2938,48	4088,5	2919,4	2748,25
Maksimum Gerilme σ_{max} (N/mm ²)	117,53	121,56	116,89	112,65
Maksimum Uzama (mm)	4,21	2,61	3,51	3,78
Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)	1,68	1,69	1,35	1,51

15 N ve 30 N öngerme kuvvetleriyle üretilen cam plain ve cam twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları kuvvet-uzama grafiği ile Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

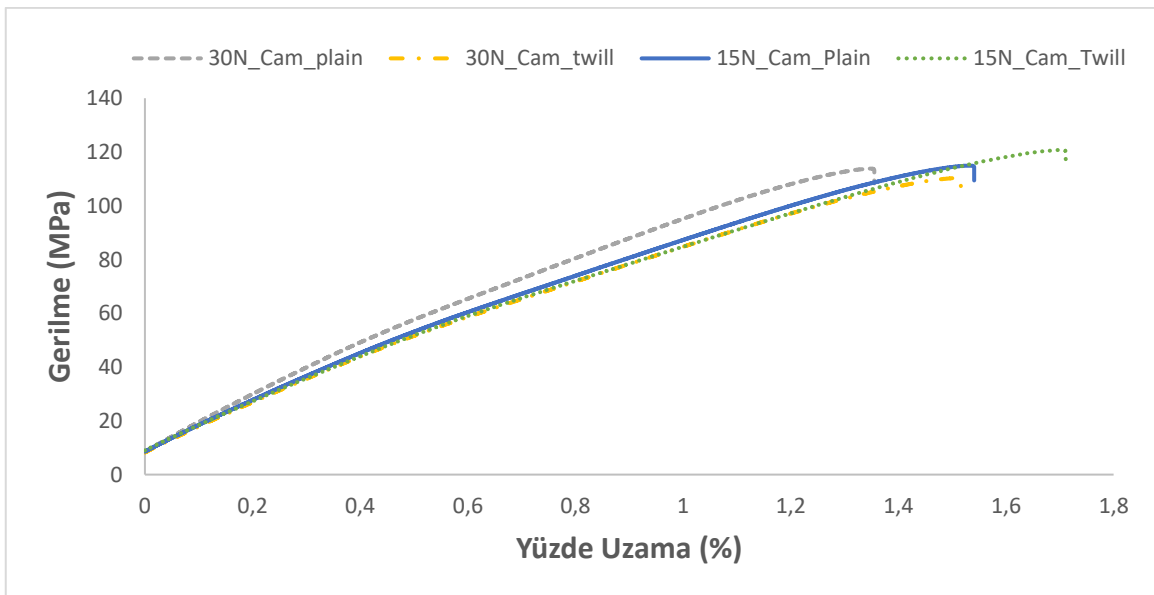
Şekil 4.3’te görüleceği üzere twill malzeme örgü dokusu özelliğinden kaynaklanan daha gevrek ve daha dayanıklı bir yapı gösterirken, plain malzeme daha sünek ve esnek bir yapı göstermektedir. Twill dokuma, liflerin minimum 2x2 şeklinde yerleşmesini sağladığı için daha yüksek dayanım göstermiştir. Plain dokuma, daha sıkı ve dengeli olduğundan uzamaya daha çok izin verir ama dayanım daha düşüktür



Şekil 4. 3. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti cam plain ve cam twill veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği

Her iki dokuma türüne sahip cam elyaf lineer gerilme ve uzama değerleri oluşmuş, cam plain ve twill malzeme benzer elastik özellikler göstermiştir. Cam twill malzeme daha dayanıklı olduğu için cam plain malzemeye göre biraz daha fazla uzama göstermiştir. 15 N germe kuvvetinde cam plain ve twill malzeme arasındaki dokuma farklarının etkisi elastik farkların çok az olmasından dolayı tespit edilememiştir.

15 N ve 30 N öngerme kuvvetleriyle üretilen cam plain ve cam twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları gerilme-yüzde uzama grafiği ile Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 4. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti cam plain ve cam twill veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği

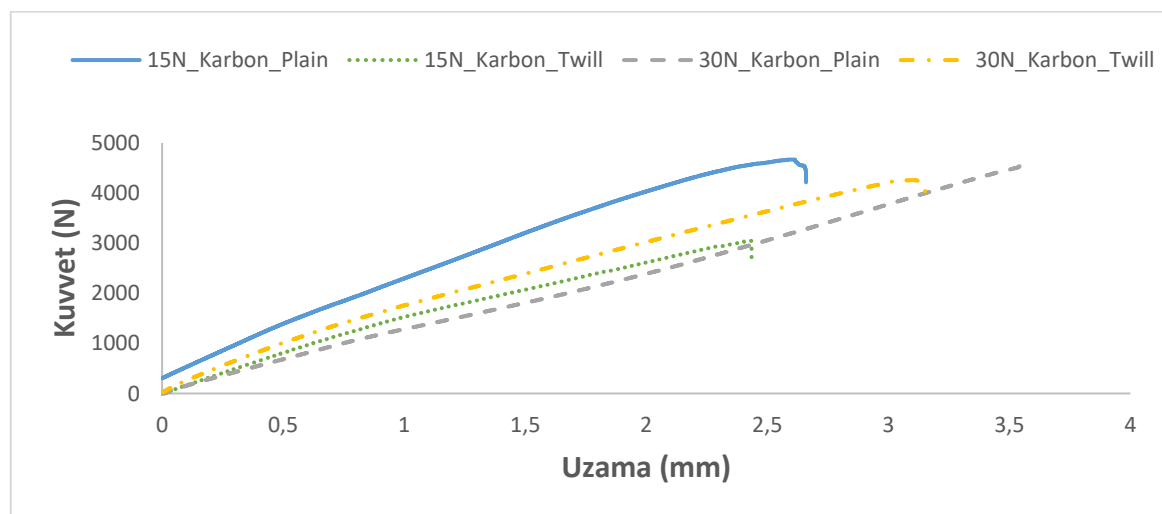
Grafikte görüleceği üzere 30 N germe kuvveti sonucunda her iki örgü dokusu benzer elastik davranışlar sergilemiştir. Cam twill malzeme daha dayanıklı olduğu için daha fazla uzama göstermektedir. İki örgü doku numunesinde birbirine yakın gerilme-yüzde uzama değerleri çeşitli germe değerleri altında malzemelerde anlamlı bir fark oluşmadığını göstermektedir. Burada cam plain ve twill seçim kriteri bu malzemelerin kullanılacağı yerdeki özellikleri dikkate alınarak oluşturulabilir. Tasarımsal olarak dayanımın ön planda olduğu uygulamalarda cam twill malzemenin ve maliyetin ön planda olduğu uygulamalarda cam plain malzemenin seçimi uygundur. 15 N germe kuvvetine göre 30 N germe kuvveti her iki malzemede kararlı elastik davranış oluşturmaktadır. Germe kuvvet miktarı arttıkça malzeme daha rijit ve gevrek bir yapı oluşturmaktadır.

15 N ve 30 N öngerme kuvvetiyle üretilen karbon plain ve karbon twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları sırasıyla Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde karbon plain ve twill ortalama çekme test sonuçları

Karbon Fiber Çekme Testi	15 N Plain	15 N Twill	30 N Plain	30 N Twill
Maksimum Kuvvet (N)	4598,16	3155,91	4645,82	4021,21
Maksimum Gerilme σ_{max} (N/mm ²)	180,83	126,36	185,27	161,43
Maksimum Uzama (mm)	2,73	2,68	3,81	3,27
Maksimum Yüzde Uzama (% ϵ)	1,82	1,05	1,52	1,32

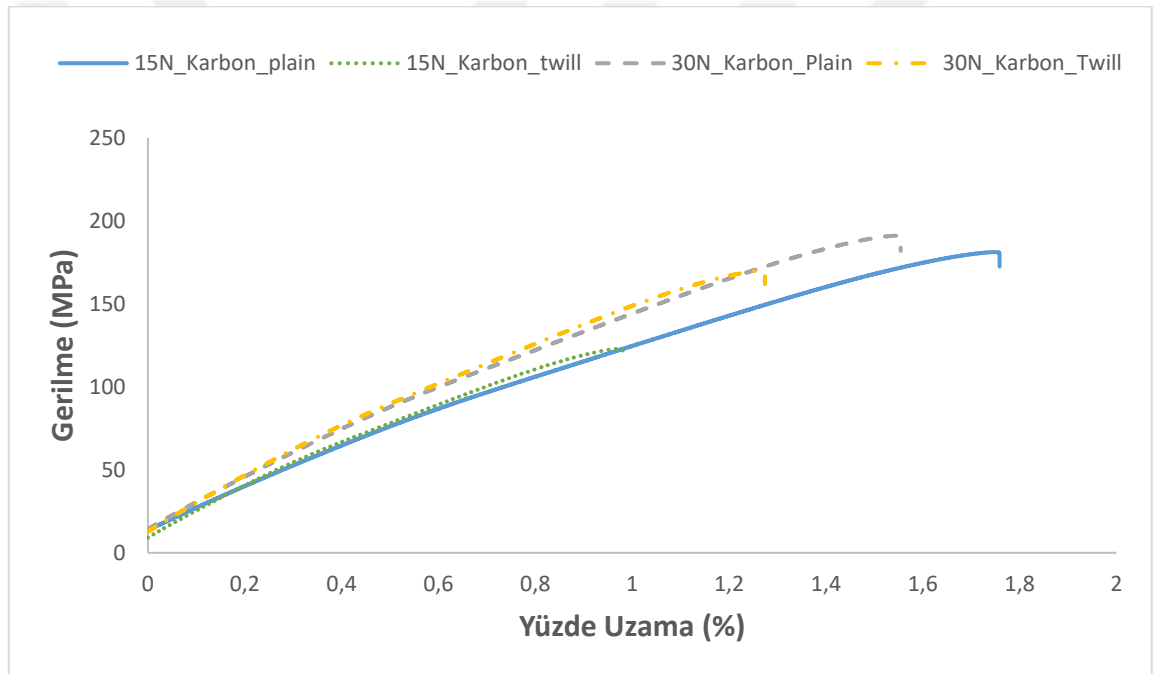
15 N ve 30 N öngerme kuvvetleriyle üretilen karbon plain ve karbon twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları kuvvet-uzama grafiği ile Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4. 5. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti karbon plain ve karbon twill veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği

Grafikten görüleceği üzere 15 N öngerme kuvvetinde malzeme daha gevrek davranmakta plain örgü dokuması daha mukavemetli ve daha karalı bir uzama göstermektedir. 30 N öngerme kuvvetinde ise twill örgü dokuma plain örgü dokumaya göre daha mukavemetli ve nispeten daha erken kopmaya uğramaktadır. Bunun sebebi twill (2x2) örgü dokumasında kesme kuvvetlerinin daha az olmasıdır. Yani plain dokuma yüksek germe kuvvetlerinde daha mukavemetli ve uzama katsayısı daha yüksek olduğu için tercih edilebilir.

15 N ve 30 N öngerme kuvvetleriyle üretilen karbon plain ve karbon twill numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları gerilme-yüzde uzama grafiği ile Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. 15 N ve 30 N öngerme kuvveti karbon plain ve karbon twill veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği

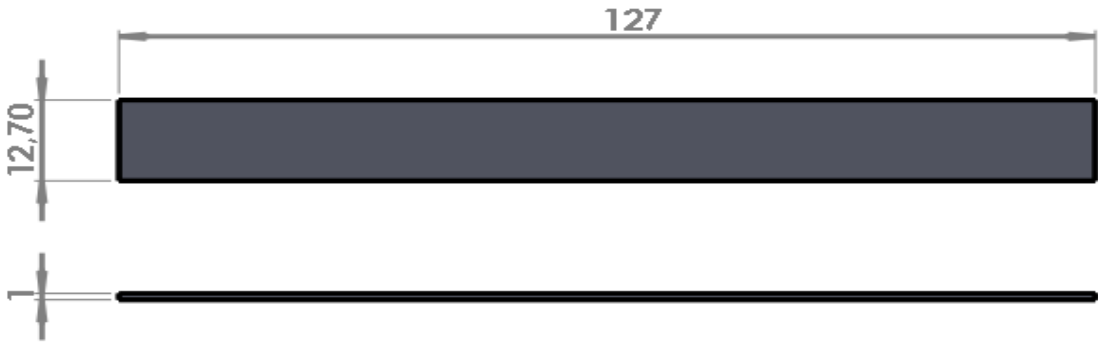
Grafikten görüleceği üzere beklenildiği gibi her iki öngerme kuvvetinde plain malzemeler twill malzemelere göre yük taşıma ve uzama kabiliyeti açısından daha avantajlıdır. 30 N öngerme kuvvetinde elyaf dalgalılığının daha az olmasından dolayı malzeme daha mukavemetli, twill örgü dokuma ise daha gevrek bir yapı göstermektedir.

4.2. Üç Nokta Eğme Testi

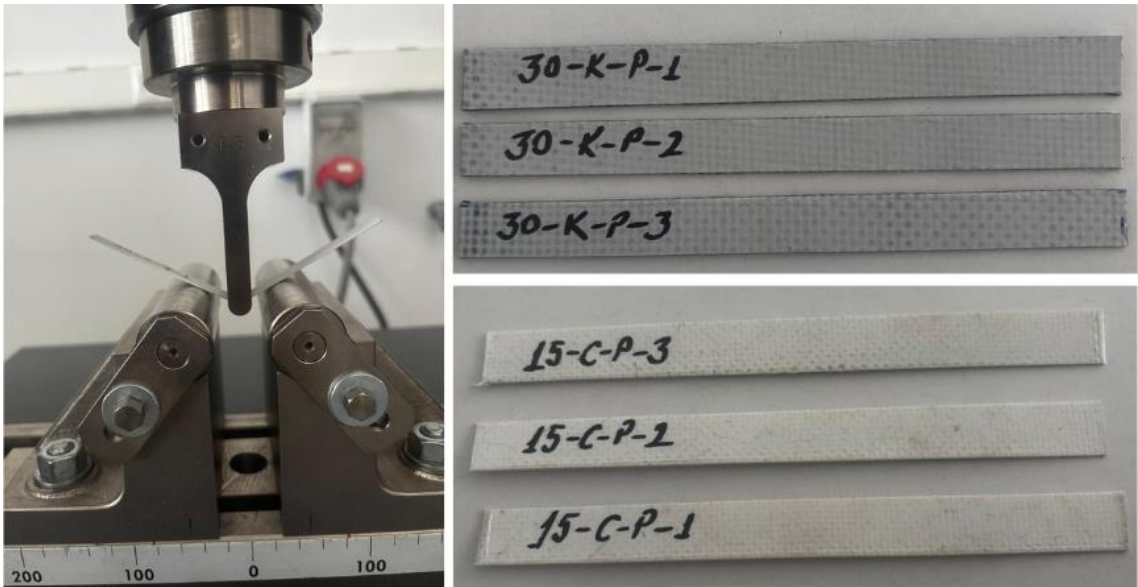
Tabakalı kompozitlerin eğilme dayanımını belirlemek amacıyla üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Bu test, kompozit malzemelerin eğilme yükleri altındaki mekanik

tepkisini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı öngerme seviyelerinin ve takviye malzemesi olan dokuma türlerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini inceleyerek, malzemenin rijitliği, sünekliliği ve kırılma davranışı hakkında kapsamlı veriler elde edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanım potansiyelini değerlendirmek açısından önemli bir referans sağlayacaktır.

Numuneler ASTM D790 standartlarına göre $127 \times 12,7 \times 1$ mm³ boyutlarında her bir deney için 3'er numune hazırlanmış 4,3 mm/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numune boyutları Şekil 4.7'de, deney numune örnekleri ve test cihazı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 7. ASTM D790 test numune boyutları



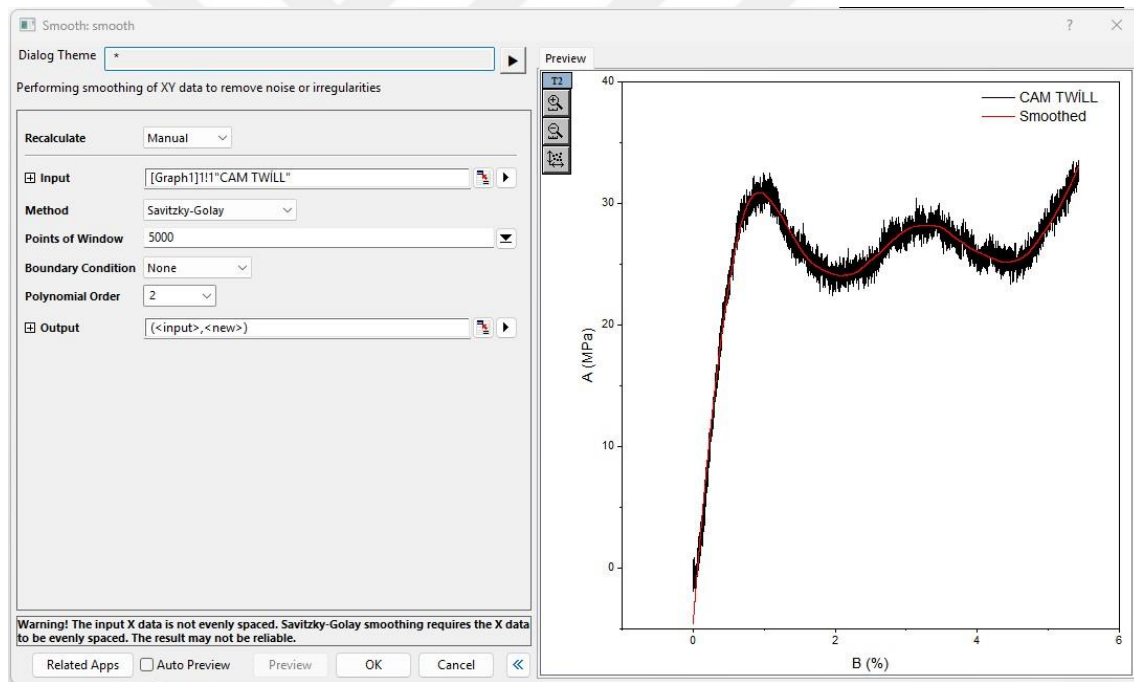
Şekil 4. 8. Üç nokta eğme deney numune örnekleri ve test cihazı

15 N öngerme kuvvetiyle üretilen cam plain ve twill, karbon plain ve twill numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen verileri ve bu numunelerin ortalamaları sırasıyla Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

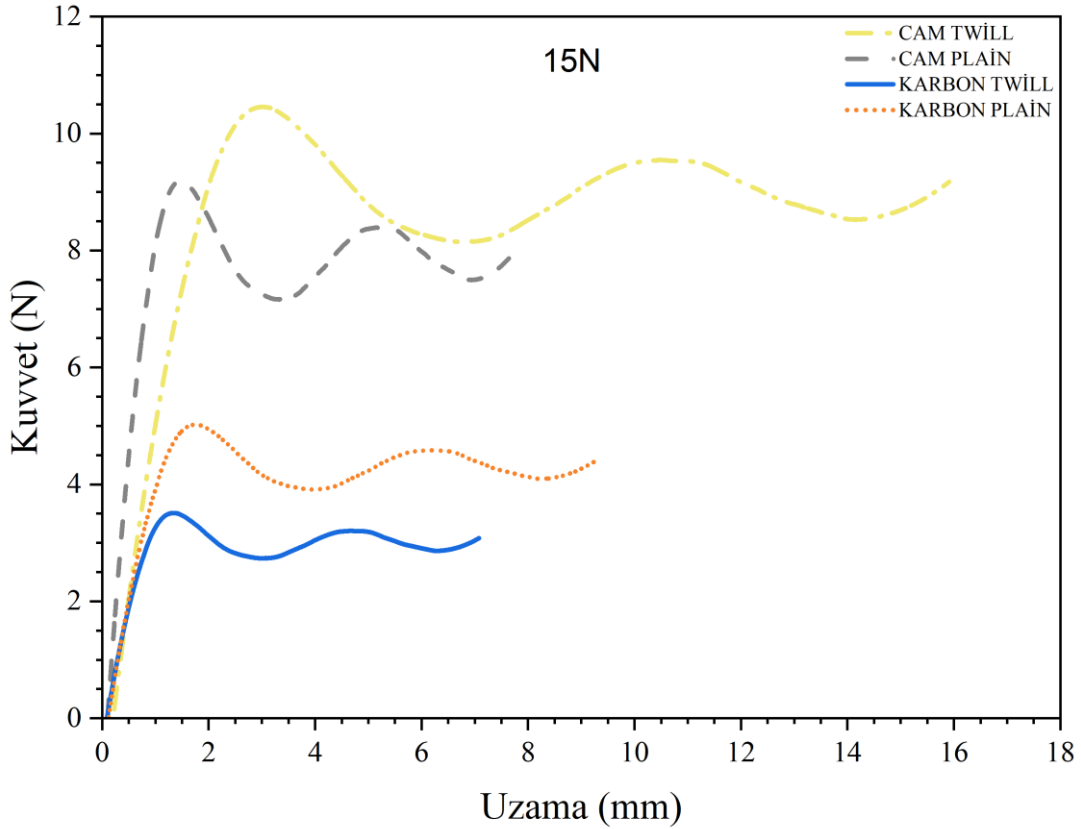
Çizelge 4. 3. 15 N öngerme seviyelerinde cam plain ve twill ortalama üç nokta eğme test sonuçları

Üç Nokta Eğme Testi	15 N Cam Plain	15 N Cam Twill	15 N Karbon Plain	15 N Karbon Twill
Maksimum Kuvvet (N)	9,89	11,89	5,35	3,65
Maksimum Gerilme σ_{max}	58,65	35,45	31,41	22,5
Maksimum Uzama (mm)	7,02	18,65	9,65	9,75
Maksimum Yüzde Uzama	1,88	6,32	2,36	2,35

Termoplastik kompozit malzemelerde üç nokta eğme testlerinde özellikle lif-matris ara yüzeyinde mikro çatlaklar veya kaymalar oluşabilir ve bu durum malzemenin yük taşıma kapasitesinde anlık değişiklikler oluşturup, gürültülü bir grafik ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Üretilen numunelerin üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen grafiklerinde de gürültülü bir grafik olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen gürültülü veriler Origin programı kullanılarak gürültüsüz hale çevrilmiştir. Üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen veriler hem gürültülü hem de gürültüsüz olarak gösterilmiştir. Programda gürültünün nasıl giderildiği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

**Şekil 4. 9.** Origin programı gürültü giderme arayüzü

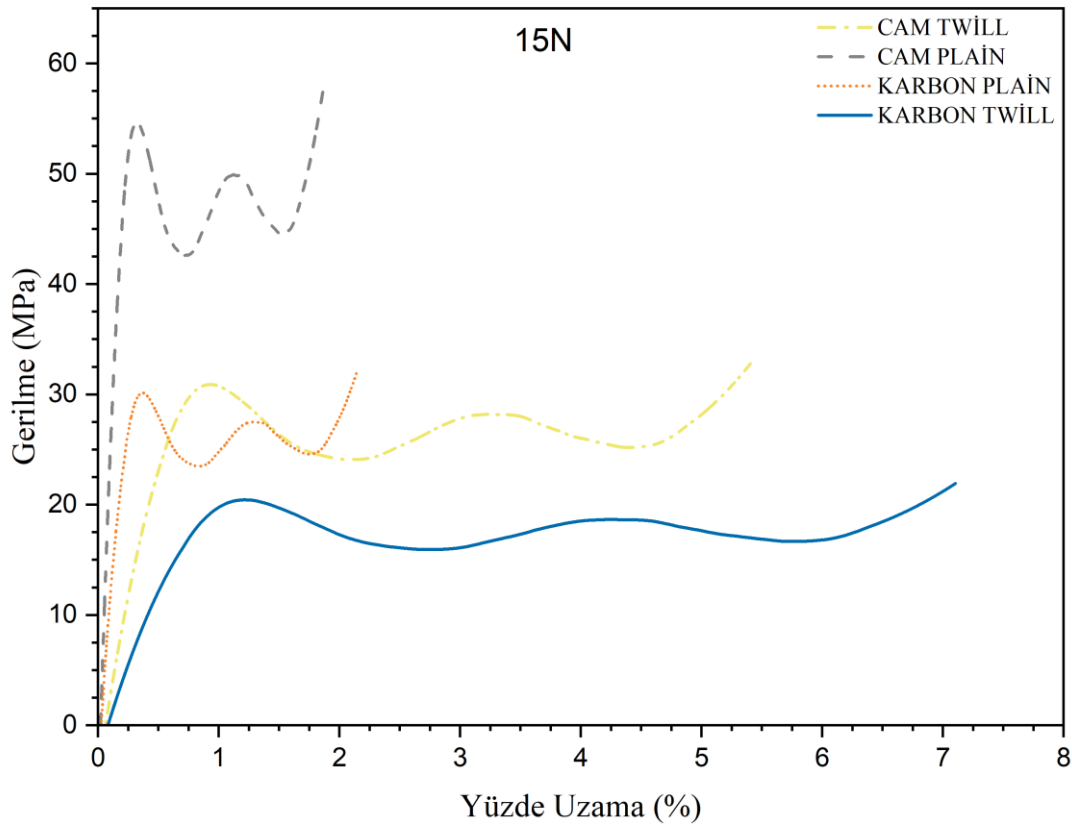
15 N germe kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen veri ortalamaları kuvvet-uzama grafiği Şekil 4.10'da, gerilme-yüzde uzama grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 10. 15 N öngerme kuvveti gürültüsüz veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği

Grafikte görüldüğü gibi cam elyaflar, karbon elyaflara göre daha iyi mekanik performans göstermiştir. Cam elyaf twill örgü dokuma gerek cam elyaf plain örgü dokumaya göre gerekse de karbon elyaflara göre daha kararlı ve dayanım olarak yüksek performanstadır. Dokuma türü olarak cam ve karbon elyaflar çarpaz performans göstermiştir. Yani cam elyaflarda twill dokuma, karbon elyaflarda plain dokuma tercih edilebilir. 15 N öngerme kuvveti altında cam elyaflar, karbon elyaflara göre öngerme yüklerini daha etkili bir şekilde karşılamıştır.

Şekil 4.11’de grafikten görüleceği üzere cam plain ve cam twill örgü dokumalar öngerme kuvvetine daha fazla direnç göstermiş ve daha gevrek bir yapıya kavuşmuştur. Cam twill örgü dokuma hem cam plain örgü dokumaya hem de karbon malzemeye göre daha gevrek davranış ve daha az deformasyon göstermiştir. Her iki malzemede plain örgü dokumalar gerek uzama gerekse gerilme açısından daha iyi performans göstermektedir. Yüksek mukavemet ve sınırlı deformasyon istenen bölgelerde cam ve karbon plain örgü dokumalar tercih edilebilir.



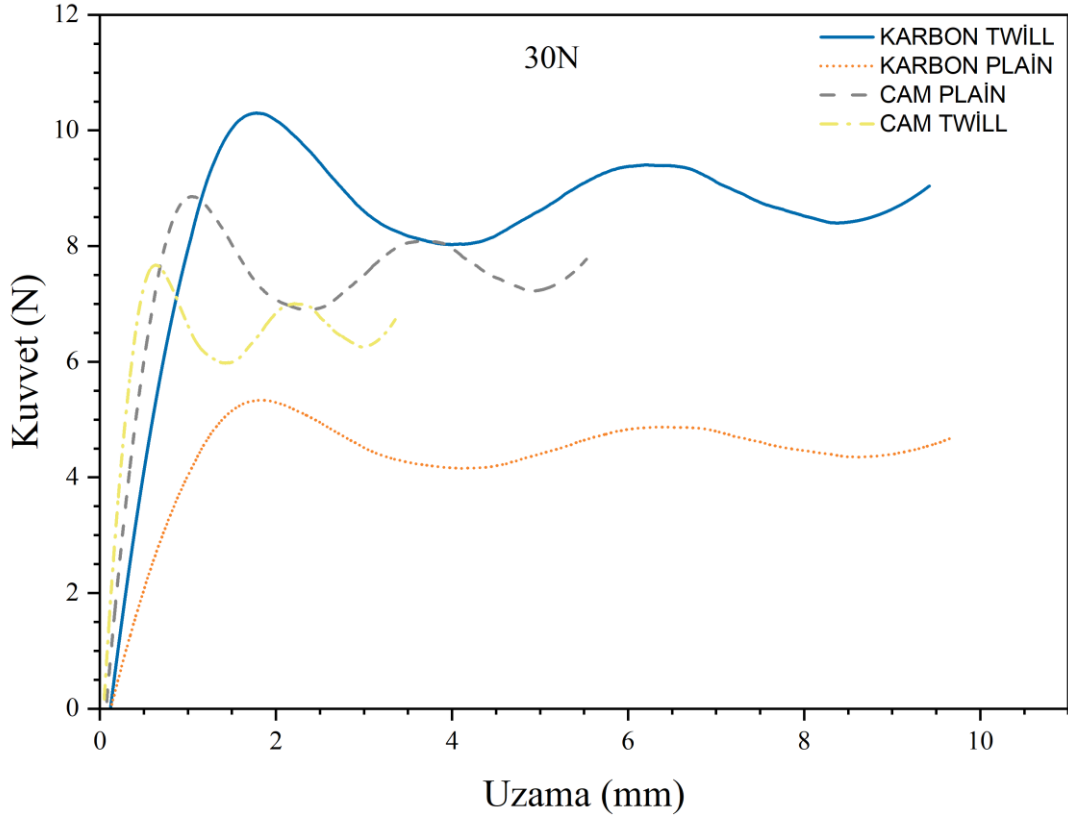
Şekil 4.11. 15 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği

30 N öngerme kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen verileri ve bu numunelerin ortalamaları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. 30 N öngerme seviyelerinde cam plain ve twill ortalama üç nokta eğme test sonuçları

Üç Nokta Eğme Testi	30 N Cam Plain	30 N Cam Twill	30 N Karbon Plain	30 N Karbon Twill
Maksimum Kuvvet (N)	9,55	8,32	5,81	11,23
Maksimum Gerilme σ_{max}	56,56	48,65	33,45	66,45
Maksimum Uzama (mm)	5,65	3,52	10,6	9,62
Maksimum Yüzde Uzama	1,35	0,83	2,45	2,36

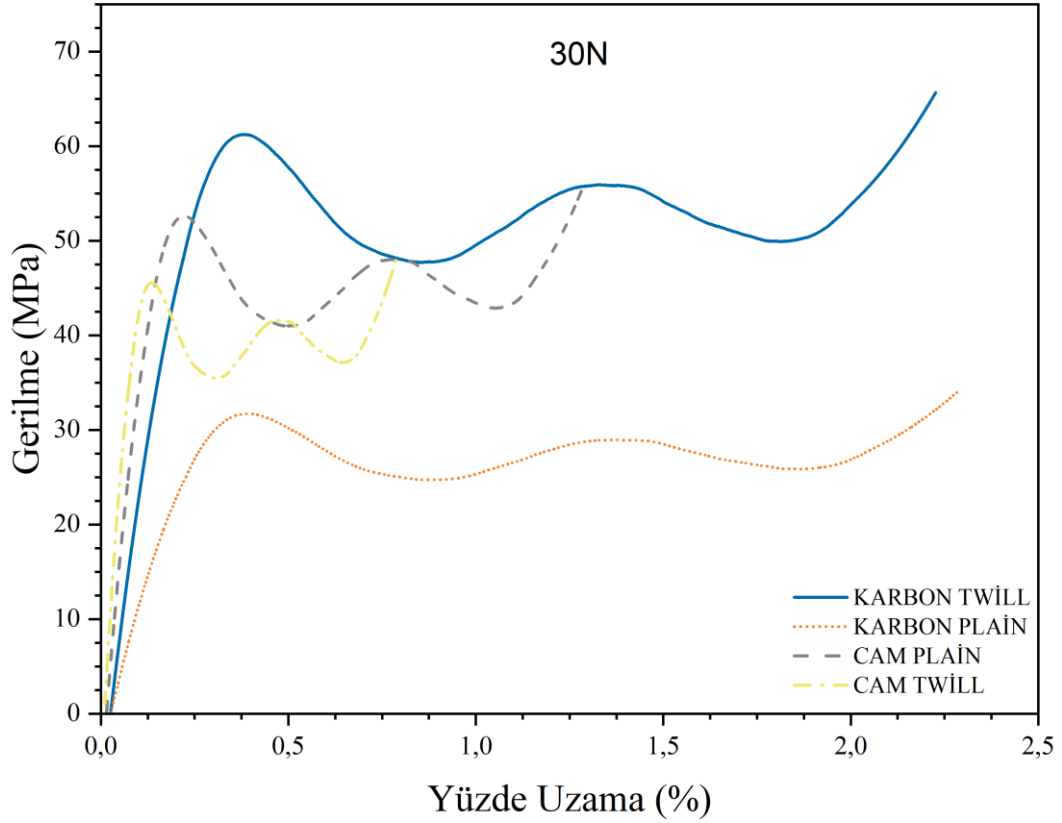
30 N öngerme kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen veri ortalamaları kuvvet-uzama grafiği Şekil 4.12'de, gerilme-yüzde uzama Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.12. 30 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının kuvvet-uzama grafiği

Kuvvet-uzama grafiğinde öngerme kuvveti arttığında karbon malzeme cam malzemeye göre daha az uzama ve daha yüksek kuvvet taşıdığını, malzeme daha mukavemetli ve gevrek yapıdadır. Cam malzeme de ise yapısı gereği daha düşük kuvvetler ve daha fazla uzama performansı göstermiştir. Buradan öngerme kuvvetinin alt sınırını belirlemek mümkündür. Plain-twill örgü dokuma farklarına gelince en yüksek kuvvet-uzama performansını karbon twill gösterirken, cam twill en düşüğe kalmıştır. Öngerme kuvvetinin artmasıyla arayüzey etkileşimi fiber-matris kayma dayanımı ve tabakalar arası bağlarda oluşabilecek olumsuz etkisi nedeniyle malzemenin dayanım performansında azalmaya neden olduğu görülmüştür. Yüksek öngerme kuvvetlerinde karbon twill kullanımı tavsiye edilebilir.

Şekil 4.13'te grafikten görüleceği üzere, karbon twill örgü dokuma türü en yüksek gerilme-yüzde uzama performansı göstermiştir. Bununla birlikte cam malzemeler karbon malzemeye göre daha gevrek ve daha rijit davranış göstermiştir. Yüksek mukavemet istenen yerlerde karbon twill cam plain örgü dokuma malzemesi kullanımı uygun olabilir.



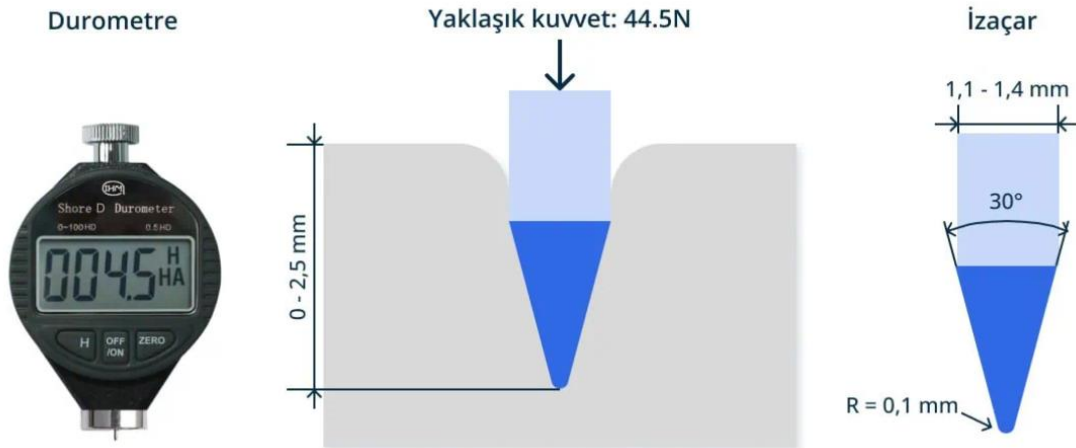
Şekil 4. 13. 30 N öngerme kuvveti veri ortalamalarının gerilme-yüzde uzama grafiği

4.3. Sertlik Testi

Shore sertliğini ölçmek; kauçuk, plastik ve elastomerler gibi malzemelerin sertliğini belirlemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Metaller ve sert malzemeler için tasarlanmış Rockwell veya Brinell gibi diğer sertlik test yöntemlerinden farklı olarak, Shore sertlik testlerinde özellikle daha esnek malzemelerin iz (girinti) açmaya karşı direnci ölçülür. Bu nedenle esneklik, elastikiyet ve darbeye karşı direnç gibi özelliklerin önemli olduğu uygulamalarda özellikle tercih edilir. Shore sertliği, termoplastik elastomerler (TPE'ler) ve yumuşak kauçuklar gibi çok yumuşak malzemelerden termoplastikler ve termosetler gibi çok sert malzemelere kadar birçok malzemede sertliği ölçmek için kullanılan çok yönlü bir tekniktir.

Çalışmamızda üretilen numunelerin sertlik değerini ölçmek için Shore D ölçeği kullanılmıştır. Shore D ölçeğinde, sert plastikler ve esnekliği az olan daha sert elastomerler de dahil olmak üzere daha sert, daha katı malzemelerin sertliği ölçülür. Shore D sertlik ölçeği ve izaçar şekil 4.14'te gösterilmiştir.

Shore D Sertlik Testleri



Şekil 4. 14. Shore D test ölçeği ve izaçar

Shore D ölçeği genellikle vulkanize kauçuk, sert TPE gibi daha sert plastiklerin, elastomerlerin, ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), PC (Polikarbonat) ve PVC (Polivinil Klorür) gibi termoplastiklerin sertliğini ölçmek için kullanılır. Yaygın kullanılan malzemeler ve sertlik değerleri Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 5. Yaygın kullanılan malzemeler ve Shore D sertlik değerleri

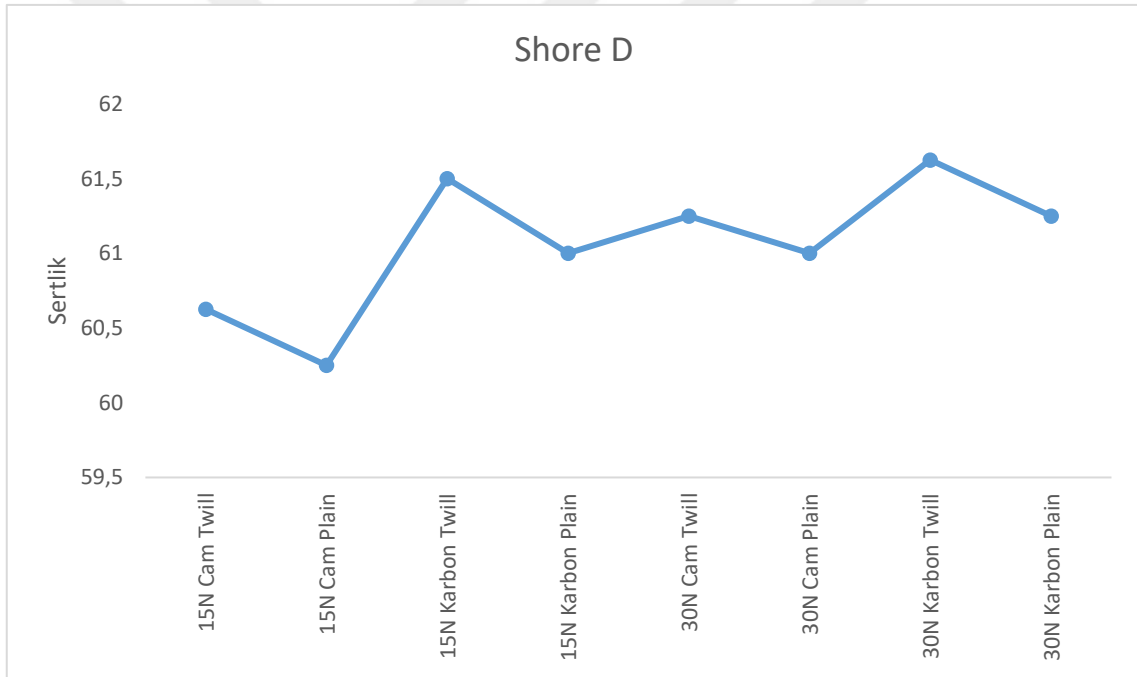
Malzeme Tipi	Malzeme Örneği	Shore D Sertliği
Sert elastomer	Vulkanize kauçuk	50-75
Sert elastomerler	Sert TPE'ler	55-75
Sert plastik	ABS ve PC	70-85
Termoset plastik	Epoksi reçineler	75-90
Kompozit malzeme	Karbon fiber kompozitler	80-90

Karbon fiber kumaşlar genel olarak cam fiber kumaşlara göre daha yüksek sertlik göstermektedir. Karbon fiberin daha yüksek elastik modüle sahip olması, polimer matris içerisindeki sertlik değerini artıran bir faktördür. Cam fiberler daha esnek yapıya sahip olduğundan, Shore D sertlik testi sırasında karbon fiberler kadar sertlik göstermemiştir. Twill dokumalar, plain dokumalara kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Twill dokunun, daha yoğun ve kaygan bir yapıya sahip olması nedeniyle yük aktarımını daha dengeli sağlayarak yüzey sertliğini artırması mümkündür. Plain dokumada, liflerin daha sıkı geçmemesi ve boşlukların fazla olması sertlik değerlerini biraz daha düşürebilir.

Üretilen numunelerin Shore D sertlik ölçümü sabit bir zemin üzerinde her bir numunenin 8 farklı noktasından ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.6, grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 6. Üretilen numunelerin Shore D sertlik değerleri

Numune	Genel Ortalama	Standart Sapma
15 N Cam Twill	60,625	0,744
15 N Cam Plain	60,25	1,035
15 N Karbon Twill	61,5	1,069
15 N Karbon Plain	61	1,309
30 N Cam Twill	61,25	0,886
30 N Cam Plain	61	0,925
30 N Karbon Twill	61,625	0,517
30 N Karbon Plain	61,25	0,707



Şekil 4. 15. Üretilen numunelerin Shore D sertlik ölçüğü grafiği

15 N öngerme seviyesinde karbon fiber kumaşlar cam fiberlere kıyasla daha yüksek sertlik göstermiştir. Bu durum, karbon fiberlerin doğal olarak daha rijit olmasına ve uygulanan öngerme kuvvetiyle birlikte daha fazla sıkışmasına bağlanabilir. 30 N öngerme seviyesinde cam fiber kumaşların sertlik değerleri artmış ve karbon fiber kumaşlara yaklaşmıştır. Cam fiberlerin mekanik özellikleri gereği belirli bir gerginlik seviyesinde daha fazla rijitleşmesi ve liflerin hizalanmasının etkisiyle sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiş olabilir. Ancak karbon fiberlerde sertlik değerleri 30 N seviyesinde

dalgalanma göstermektedir. Bu durum, karbon fiberlerin daha düşük uzama oranına sahip olmasından kaynaklanabilir.

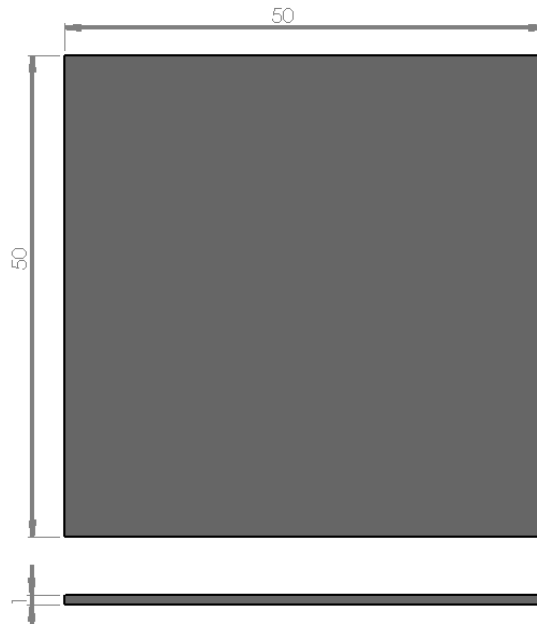
Öngerme ile liflerin hizalanması ve yoğunluğun artması, sertliğe artırıcı bir etki yapmıştır. Ancak belirli bir noktadan sonra (örneğin 30 N karbon fiberde) bu artışın duraklaması veya düşüş göstermesi, lif-matris etkileşimlerinin belirli bir sınırdaki mekanik avantaj sağlamasının ötesine geçemeyeceğini gösterir. Shore D sertliği genellikle yüzey sertliğini ifade ettiğinden, çekme ve eğilme gibi diğer mekanik testlerle desteklenmesi gereklidir. Sertliği yüksek olan malzemelerin aşınma direnci genellikle daha yüksektir, ancak tokluk ve darbe dayanımı gibi özellikler için farklı testler yapılmalıdır. Twill dokumalar, genellikle daha iyi yük aktarımı sağladığından sertlik avantajı sunarken, plain dokular daha esnek ve darbe dayanımı açısından avantajlı olabilir.

Sertlik deneyi yüzeyden ölçüldüğü için polimer matrisli kompozitlerde, matrisler fiberlere göre daha avantajlıdır. Yapılan sertlik deneyi ölçümlerinde hem karbon ve cam elyaf malzemeler arasında hem de farklı öngerme kuvvetleri altında anlamlı bir fark görülmemiştir.

4.4. Erichsen Testi

Tabakalı kompozit malzemelerin plastik şekil alma kabiliyetini değerlendirmek amacıyla Erichsen derin çekme testi uygulanmıştır. Bu test, malzemenin süneklik seviyesini ve plastik deformasyon kapasitesini belirlemek için kullanılan standart bir yöntemdir. Farklı öngerme seviyelerine tabi tutulan numunelerin şekillendirme performansları karşılaştırılarak, öngerme işleminin kompozit yapı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Ayrıca, twill ve plain örgü yapısına sahip numuneler test edilerek, örgü tipinin deformasyon mekanizmalarına olan etkisi incelenmiştir.

Numuneler ISO 20482 standartlarına göre 50x50x1 mm³ boyutlarında her bir deney için 3'er numune hazırlanmış 100°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numune boyutları Şekil 4.16, deney numune örnekleri ve test cihazı Şekil 4.17'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 16. Erichsen testi numune boyutları



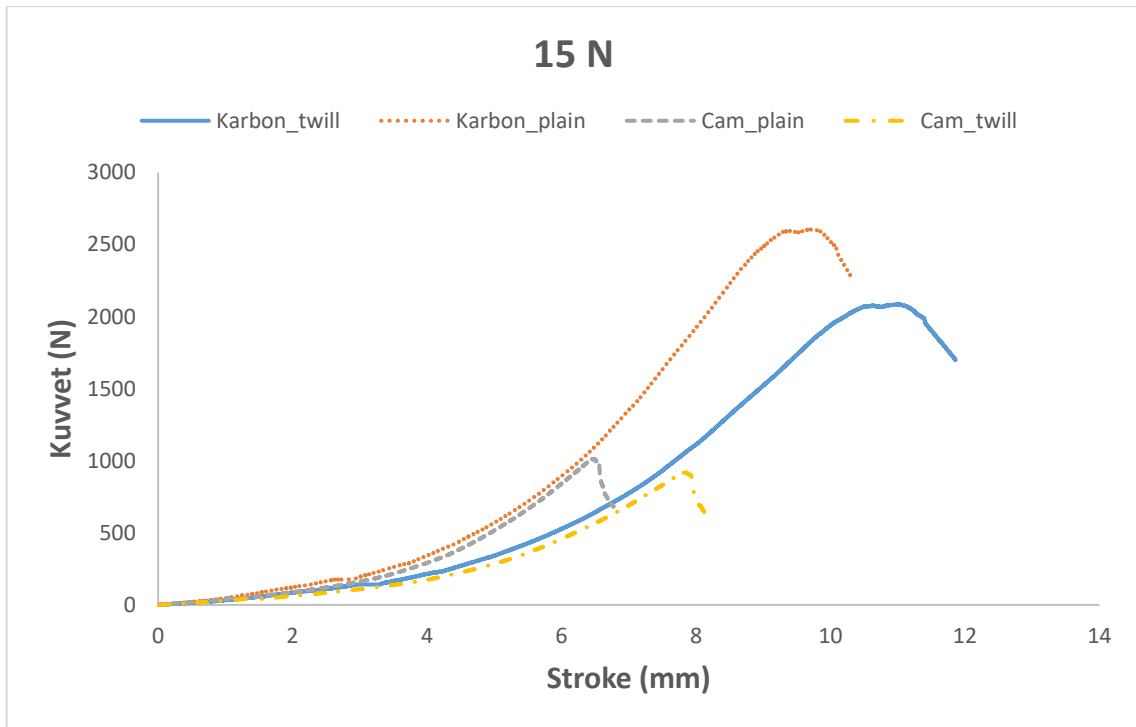
Şekil 4. 17. Erichsen test cihazı ve test numune örneği

15 N germe kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin erichsen deneyi sonucunda elde edilen verileri ve bu numunelerin ortalamaları sırasıyla Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 7. 15 N cam plain ve twill, karbon plain ve twill erichsen test sonuçları

15 N Öngerme Erichsen Testi	Cam Plain	Cam Twill	Karbon Plain	Karbon Twill
Maksimum Kuvvet (N)	987,36	941,52	2565,65	2214,62
Maksimum Stroke (mm)	6.83	8,12	9,91	14,51

15 N germe kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin erichsen deneyi sonucunda elde edilen veri ortalamaları kuvvet-stroke grafiği ile Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 18. 15 N germe kuvveti veri ortalamaları kuvvet-stroke grafiği

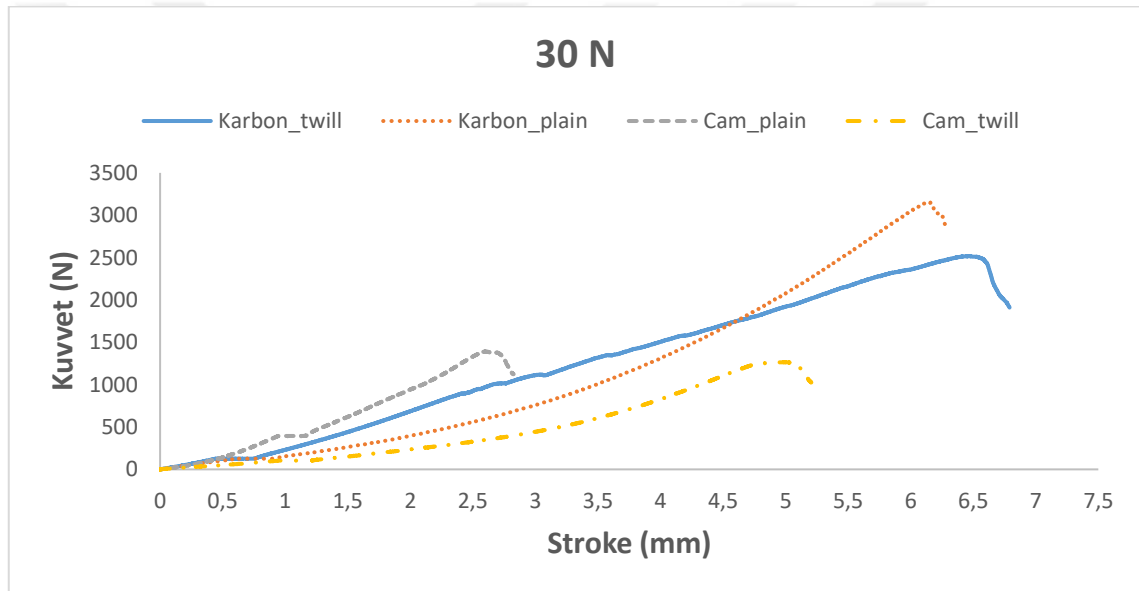
15 N öngerme kuvveti altında gerçekleştirilen Erichsen testi sonucunda elde edilen kuvvet-deformasyon eğrileri, farklı takviye tipi ve dokuma yapısının tabakalı termoplastik kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik performansına etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, karbon elyaf takviyeli numunelerin cam elyafli numunelere kıyasla daha yüksek maksimum kuvvet değerlerine ulaştığı, dolayısıyla daha yüksek mekanik direnç gösterdiği gözlemlenmektedir. Özellikle karbon plain dokulu kompozitler, yaklaşık 2700 N seviyesinde en yüksek kuvveti taşıırken, bunu sırasıyla karbon twill, cam twill ve cam plain dokulu kompozitler takip etmektedir. Bununla birlikte, cam takviyeli kompozitlerin daha düşük maksimum kuvvet değerlerine sahip olması hem elyaf tipinin hem de arayüz bağlanma kalitesinin şekil alma davranışını sınırladığını göstermektedir. Ayrıca, dokuma tipine bağlı olarak deformasyon davranışının değiştiği ve twill dokuların, daha karmaşık lif yönlenmesi nedeniyle gerilmenin yayılmasında plain dokulara göre daha düzensiz bir tepki verdiği anlaşılmaktadır. Bu veriler, takviye türü ve dokuma yapısının derin çekme formundaki plastik deformasyon kapasitesine doğrudan etkili olduğunu ve kompozit tasarımında kritik parametreler olarak dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

30 N germe kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen verileri ve bu numunelerin ortalamaları sırasıyla Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4. 8. 30 N cam plain ve twill, karbon plain ve twill erichsen test sonuçları

30 N Öngerme Erichsen Testi	Cam Plain	Cam Twill	Karbon Plain	Karbon Twill
Maksimum Kuvvet (N)	1402,5	1312,41	3241,5	2645,62
Maksimum Stroke (mm)	3,21	5,11	6,22	6,71

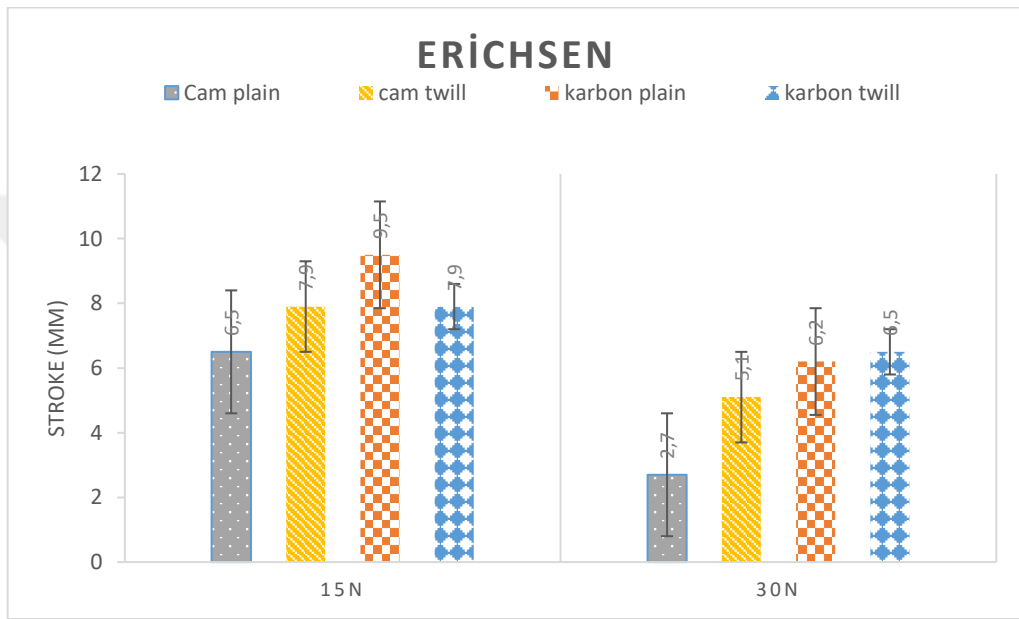
30 N germe kuvvetiyle üretilen cam twill, cam plain, karbon twill ve karbon plain numunelerin erichsen deneyi sonucunda elde edilen verilerin ortalamaları kuvvet-stroke grafiği ile Şekil 4.19’de, 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde cam ve karbon dokuma örgü tiplerinin stoke grafiği Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 19. 30 N germe kuvveti veri ortalamaları kuvvet-stroke grafiği

30 N öngerme kuvveti altında gerçekleştirilen Erichsen testi sonucunda elde edilen kuvvet-stroke eğrileri, tabakalı termoplastik kompozit malzemelerin şekillendirme davranışları üzerine takviye tipi ve dokuma yapısının etkisini bir kez daha ortaya koymaktadır. Elde edilen grafik, tüm numunelerde deformasyonun daha kısa stroke değerlerinde sonlandığını ve 15 N öngerme durumuna kıyasla şekil alma kapasitesinde belirgin bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu durum, artan öngerme kuvvetinin fiber kırılma kapasitesini artırarak erken hasar oluşumunu tetiklediğini düşündürmektedir. Karbon plain dokulu kompozitler, yaklaşık 2900 N seviyesinde en yüksek kuvvet değerine ulaşarak mekanik dayanım açısından en iyi performansı göstermiştir. Karbon twill dokulu kompozitler de benzer şekilde yüksek taşıma kapasitesi sergilemiş, ancak maksimum

stroke seviyesine daha erken ulaşmıştır. Cam elyaf takviyeli numunelerde ise özellikle cam plain dokulu kompozitlerde, yaklaşık 2,5 mm ani bir düşüşle erken hasar oluştuğu gözlemlenmiştir. Cam twill dokulu numuneler ise daha düşük kuvvet değerlerine ulaşmış ve şekil alma kabiliyeti sınırlı kalmıştır. Bu bulgular, artan öngerme kuvvetinin, özellikle cam elyafli sistemlerde delaminasyon ve arayüz zayıflıkları nedeniyle deformasyon davranışını olumsuz etkilediğini, karbon elyaf takviyeli sistemlerin ise bu koşullarda daha stabil ve dirençli bir yapı sergilediğini göstermektedir.



Şekil 4. 20. 15 N ve 30 N öngerme seviyelerinde cam ve karbon dokuma örgü tiplerinin stoke grafiği

15 N ve 30 N öngerme kuvveti altında gerçekleştirilen Erichsen testlerinin karşılaştırmalı analizi, tabakalı termoplastik kompozitlerin şekillendirilebilirlik ve hasar toleransı açısından öngerme kuvvetine duyarlılığını ortaya koymaktadır. 15 N öngerme altında, tüm numuneler daha yüksek stroke (deformasyon) değerlerine ulaşırken, malzemelerin plastik deformasyon kapasiteleri daha uzun süre korunmuştur. Özellikle karbon elyaf takviyeli kompozitler bu koşullarda yüksek kuvvet taşıma kapasiteleri ve daha geç kırılma davranışı sergilemiştir. Öte yandan, 30 N öngerme durumunda deformasyonlar daha kısa stroke mesafelerinde sonlanmış, erken çatlak oluşumu ve hızlı hasar ilerlemesi gözlemlenmiştir. Bu durum, artan öngerme kuvvetinin, özellikle cam elyaf takviyeli sistemlerde arayüz bağlarını zayıflatarak delaminasyon ve lif-matris ayrılması gibi hasar mekanizmalarını tetiklediğini göstermektedir. Karbon plain dokulu kompozitler her iki öngerme düzeyinde de en yüksek mekanik performansı sergilemiş, karbon twill dokulu kompozitler ise daha düşük ama dengeli bir deformasyon davranışı

göstermiştir. Cam elyafli kompozitlerde ise özellikle cam plain dokuların 30 N öngerme altında ani kırılma eğilimi sergilediği ve şekil alma kapasitelerinin ciddi şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Bu veriler, öngerme düzeyinin kompozit malzeme tasarımında kritik bir parametre olduğunu ve optimum şekillendirme performansı için takviye tipi ile uyumlu bir öngerme stratejisi geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

4.5. Hasar Analizi

Hasar analizlerinde, iki eksenle sırasıyla 15 N ve 30 N öngerme işlemi uygulanmış ve kürlenmiş cam plain, cam twill, karbon plain ve karbon twill numunelere çeşitli mekanik testler uygulandıktan sonra hasar gören numuneler detaylı incelenmek üzere yüksek çözünürlüklü optik mikroskop ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir.

4.5.1. Çekme testi hasar analizi

Üretilen tabakalı cam ve karbon fiber kompozitlerin mekanik dayanımını belirlemek ve öngermenin malzemenin çekme mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla yapılan çekme testi sonucunda malzemelerde hasarlar meydana gelmiştir. Hasarlı bölgelerden alınan numunelerde yüzeyde meydana gelen hasarlar için yüksek çözünürlüklü CANON marka optik mikroskop, ara yüzeyi ve kompozit malzemelerin aralarındaki etkileşimi anlamak için SEM analiziyle detaylı açıklanmıştır.

Çekme testi esnasında ve sonrasında oluşan hasarlı numuneler Şekil 4.21'de gösterilmiştir.

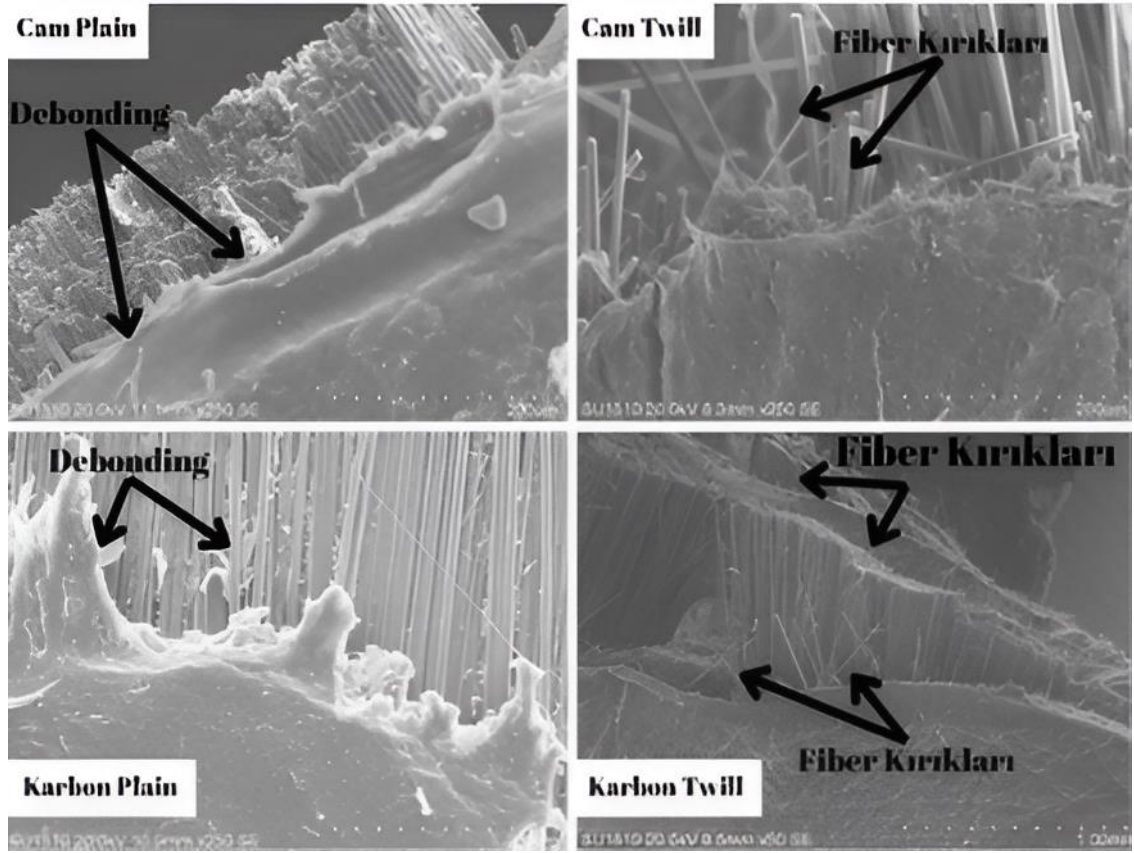


Şekil 4. 21. Çekme testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi

Çekme testi sonrasında hem cam elyaf hem de karbon elyaf takviyeli tabakalı termoplastik kompozit numunelerde hasarın genellikle çene bölgelerine yakın

konumlandığı gözlemlenmiştir. Bu durum, test sırasında çene-numune arayüzünde meydana gelen yerel gerilme yığılmaları, sıkıştırma kuvvetleri ve sürtünme etkileriyle ilişkilendirilebilir. Özellikle rijit yapıya sahip kompozit malzemelerde, test çeneleri tarafından uygulanan yüksek temas basıncı, numune uçlarında mikroyapısal hasarların oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Bunun sonucunda, numune gövdesinde homojen bir gerilme dağılımı elde edilemeden, çene bölgesinde delaminasyon, lif-matris ayrılması ve lif kopması gibi hasar mekanizmaları tetiklenmektedir.

Çekme testinden sonra numunede hasarlı bölgelerden alınan 5x5x1 mm³ ebatında parçalar kesilip üzeri iletkenliği arttırmak amacıyla altın/paladyum ile kaplandıktan sonra SEM analizinde incelenmiştir. Hasarlı çekme test numuneleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 22. Çekme testi hasarlı numune SEM görüntüleri

Polietilen matrisli cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin çekme sonrası hasar bölgelerinden alınan numunelere ait SEM analizleri gösterilmiştir. Cam plain ve cam twill numunelerinde, lif-matris arayüzünde belirgin ayrılmalar (debonding) gözlenmiş, özellikle cam plain örneğinde matrisin liflere tutunamadığı ve gevrek kırılmaların yoğun olduğu tespit edilmiştir. Karbon takviyeli numunelerde ise, arayüz bağının cam elyafa kıyasla daha iyi olduğu, karbon plain dokuda lif

hizalanmasının daha düzgün gerçekleştiği ve kısmen matris kalıntılarının lif yüzeyinde kaldığı gözlemlenmiştir. Karbon twill dokuda ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) hasarının ön plana çıktığı, liflerin katmanlar boyunca ayrıldığı ve bunun mekanik performansa olumsuz yansiyabileceği değerlendirilmiştir. Elde edilen bu mikroyapısal gözlemler, elyaf türü ve dokuma şeklinin yanı sıra, polietilenin düşük yüzey enerjisi nedeniyle zayıf arayüz bağlanmasının kompozitlerin hasar davranışı üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymaktadır.

Üretilen numunelerin yüzeyinde oluşan hasar görüntüsü optik mikroskopla incelenmiş, Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



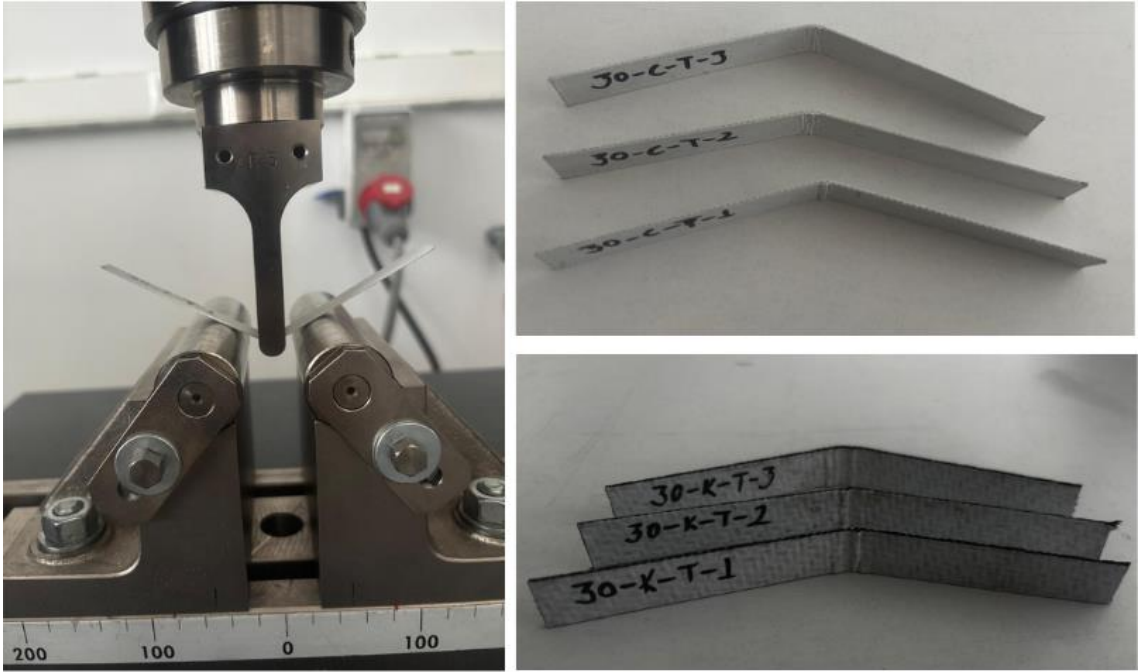
Şekil 4. 23. Çekme testi hasarlı numune optik mikroskop görüntüleri

Çekme testi sonrası kompozit numunelerin yüzeylerinde oluşan makroskobik hasarlar, hasar mekanizmalarının anlaşılması açısından değerlendirilmiştir. Görsellerde, özellikle delaminasyon, sıyrılma hasarı ve radyal çatlak oluşumu gibi tipik kompozit hasar modları açıkça gözlemlenmiştir. Delaminasyon, tabakalı yapının ara yüzeylerinden ayrılmasıyla meydana gelmiş olup, lif-matris bağının zayıf olduğu bölgelerde yoğunlaşmıştır. Sıyrılma hasarları, özellikle liflerin matris fazından ayrılarak dışarı çıkması şeklinde gerçekleşmiş; bu durum, çekme yükü altında lif-matris arayüzünden kopmanın etkili bir hasar modu olduğunu göstermektedir. Radyal çatlak oluşumu ise lif yönüne dik doğrultuda gelişen mikroçatlakların birleşmesiyle ortaya çıkmış ve yapının ani kırılma eğilimini yansıtmaktadır. Bu makroskobik gözlemler, SEM analizleriyle desteklenen mikroyapısal bulgularla uyumlu olup, kompozitlerin mekanik davranışını belirleyen kritik hasar mekanizmalarını ortaya koymaktadır.

4.5.2. Üç nokta eğme testi hasar analizi

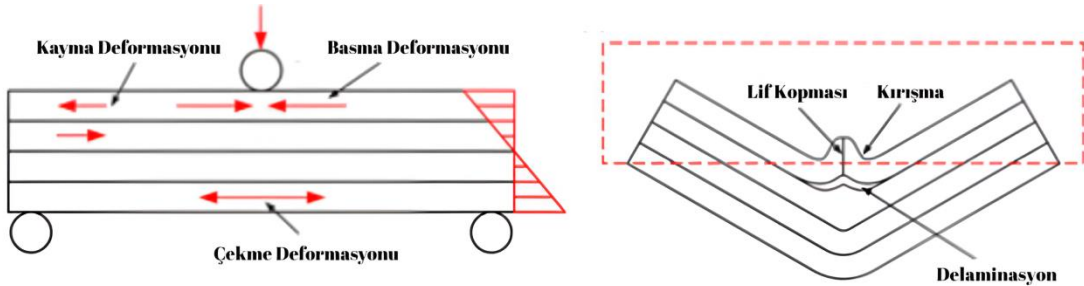
Tabakalı kompozitlerin eğilme dayanımını belirlemek amacıyla üç nokta eğme testi gerçekleştirilmiştir. Bu test sonucunda numunede makro ve mikro düzeyde hasarlar meydana gelmiştir. Hasarlı bölgelerden alınan numunelerde ara yüzeyi ve kompozit malzemelerin aralarındaki etkileşimi anlamak için SEM analiziyle detaylı açıklanmıştır.

Üç nokta eğme testi esnasında ve sonrasında oluşan hasarlı numuneler Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



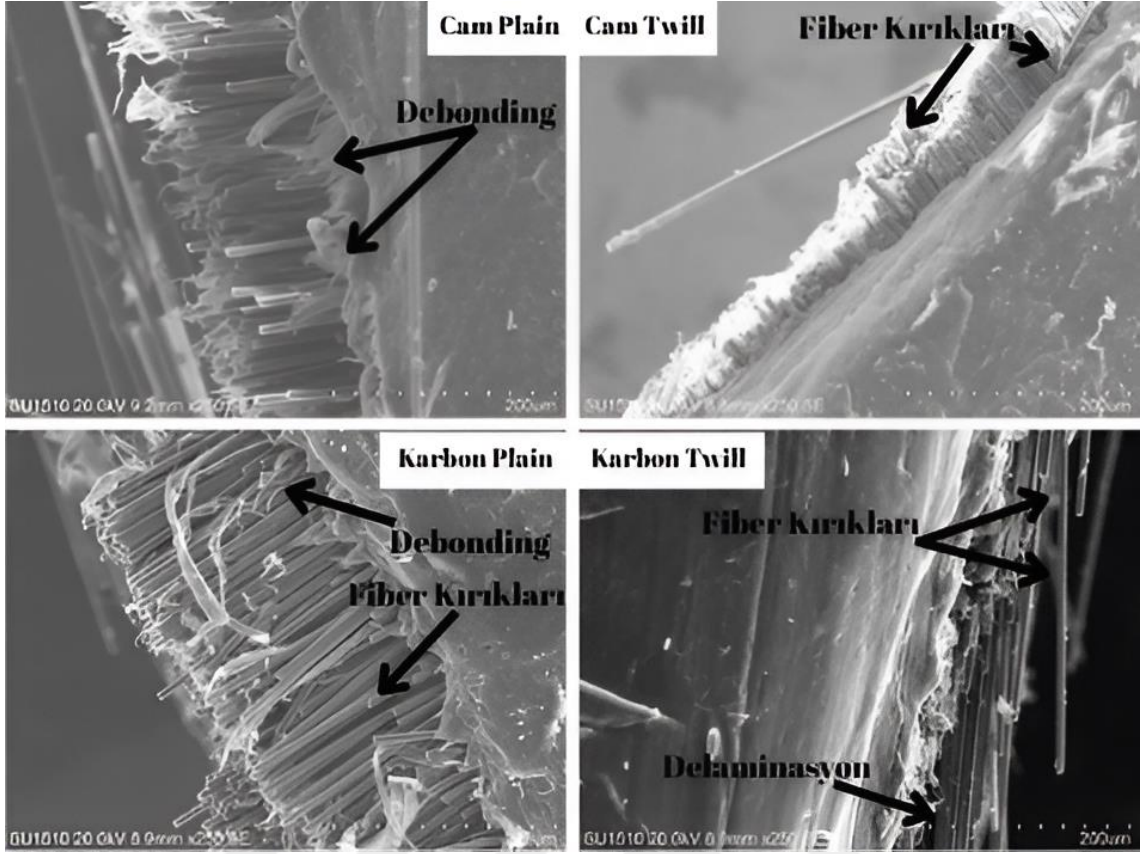
Şekil 4. 24. Üç nokta eğme testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi

Termoplastik kompozit malzemelerde üç nokta eğme testlerinde özellikle lif-matris ara yüzeyinde mikro çatlaklar veya kaymalar oluşabilir ve bu durum malzemenin yük taşıma kapasitesinde anlık değişiklikler oluşturup, gürültülü bir grafik ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Üç nokta eğme testi sonrası malzemede oluşabilecek deformasyonlar Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 25. Üç nokta eğme testi sonrasında oluşabilecek hasar görüntüsü

Üç nokta eğme testinden sonra numunede hasar gören yerden parçalar $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ ebatında kesilip üzeri iletkenliği arttırmak amacıyla altın/paladyum ile kaplandıktan sonra SEM analizinde incelenmiştir. Hasarlı test numuneleri Şekil 4.26'da gösterilmiştir



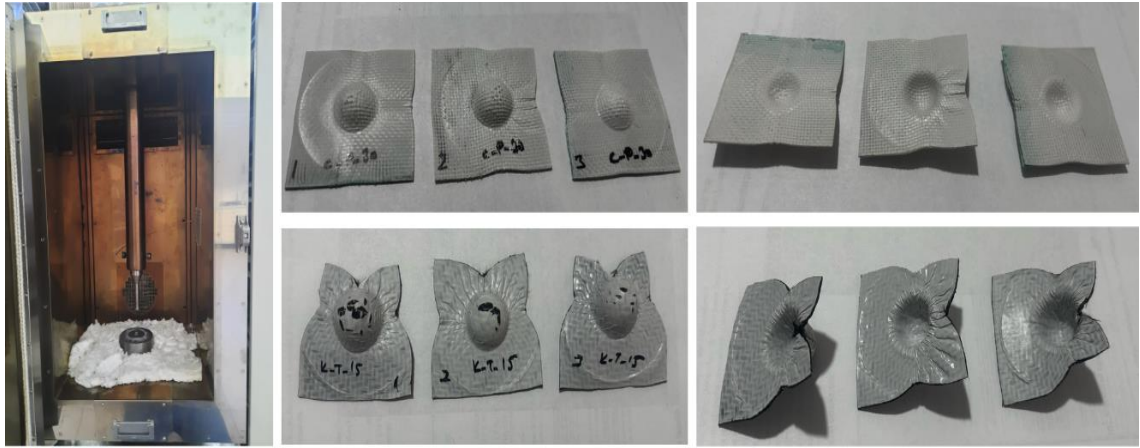
Şekil 4. 26. Üç nokta eğme testi sonrasında oluşan hasar görüntüsü

Üç nokta eğme testi sonrasında elde edilen SEM görüntüleri, cam ve karbon elyaf takviyeli, polietilen matrisli tabakalı kompozitlerin kırılma yüzeylerindeki mikroyapısal hasar davranışlarını ortaya koymaktadır. Cam plain dokulu numunelerde, liflerin matris fazından düzenli bir şekilde ayrıldığı ve lif-matris arayüzünde belirgin bir debonding davranışı sergilendiği gözlemlenmiştir. Cam twill dokuda ise, lif hizalanmasındaki düzensizlik ve dokuma karmaşıklığına bağlı olarak daha kaotik bir kırılma yüzeyi oluşmuş, yer yer sıyrılmaya ve lif bükülmeleri tespit edilmiştir. Karbon plain dokulu kompozitlerde, gevrek kırılmaya özgü keskin lif uçları ve düşük arayüz tutunmasına bağlı olarak liflerin yüzeyinde çok az matris kalıntısı bulunmuştur. Karbon twill dokuda ise lif yerleşmesinin değişkenliği nedeniyle lif-matris ayrılmaları daha belirgin hale gelmiş, kırılma yüzeyinde lif sıyrılmaya ve delaminasyon izleri gözlemlenmiştir. Elde edilen bu mikroyapısal bulgular, dokuma türü ve takviye malzemesinin eğilme yükleri altındaki hasar davranışını doğrudan etkilediğini ve özellikle twill dokuların delaminasyon ve arayüz zayıflıklarına karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir.

4.5.3. Erichsen testi hasar analizi

Tabakalı kompozit malzemelerin şekillendirilebilirlik performansını değerlendirmek amacıyla da kullanılabilen Erichsen testi, bu malzemelerin plastik deformasyon kabiliyetini ve derin çekme sırasında çatlamaya karşı gösterdiği direnci ortaya koymaktadır. Test sırasında, küresel uçlu bir zımbanın etkisiyle numunenin yüzeyine derinlemesine bir deformasyon uygulanır ve ilk çatlak oluşumuna kadar geçen süreçte malzemenin form alma kapasitesi belirlenir. Polietilen matrisli, cam ve karbon elyaf takviyeli tabakalı termoplastik kompozitlerde, bu test; katmanlar arası kayma, matris fazının plastik deformasyon davranışı ve takviye elemanlarının yönlenmesine bağlı olarak ortaya çıkan hasar mekanizmalarını incelemek açısından kritik öneme sahiptir. Test sonrasında gerçekleştirilen SEM analizleri, oluşan mikro yapısal hasarları detaylı biçimde ortaya koyarak; lif-matris arayüzünde meydana gelen debonding, lif sıyrılması, mikro çatlak oluşumu, delaminasyon ve matris akışı gibi mekanizmaların gözlemlenmesine olanak tanımaktadır. Böylece, malzemenin şekillendirme uygulamalarına uygunluğu ve farklı dokuma yapılarının deformasyon davranışına etkisi mikro yapı düzeyinde değerlendirilebilmektedir.

Erichsen testi esnasında ve sonrasında oluşan hasarlı numuneler Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

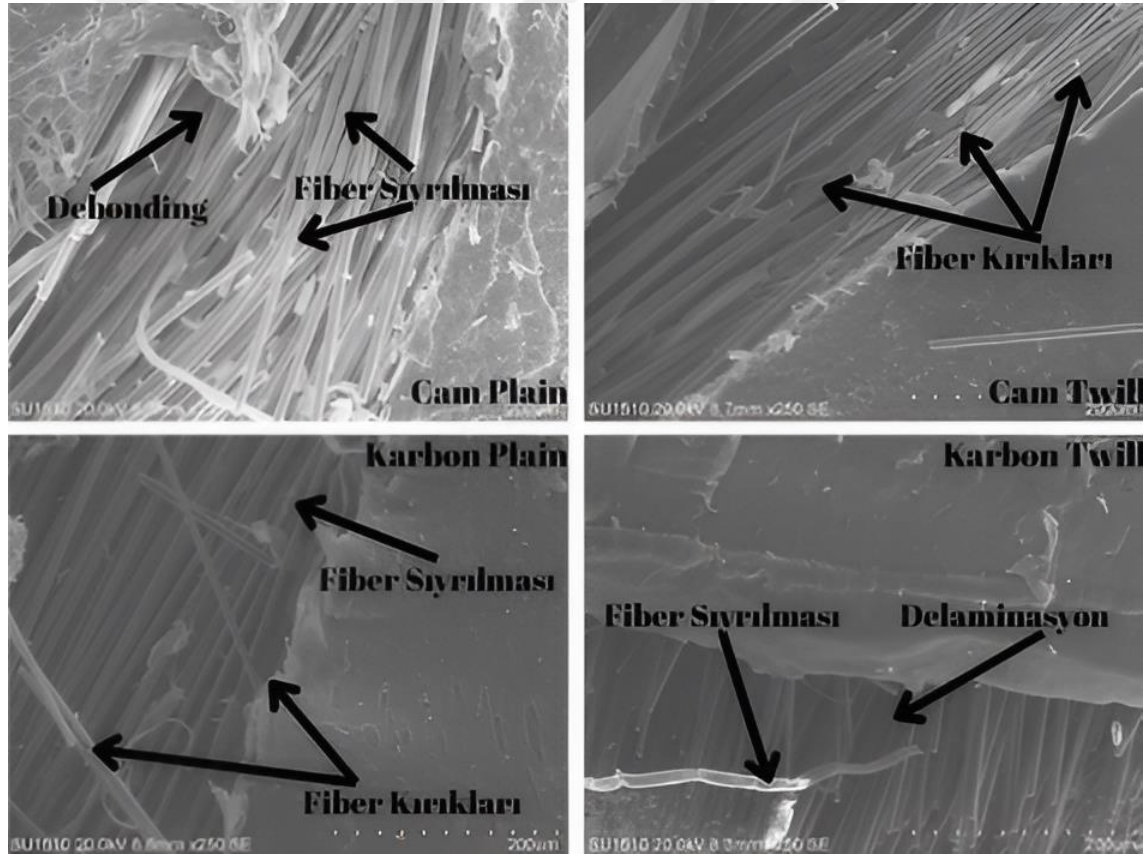


Şekil 4. 27. Erichsem testi esnasında ve sonrasında hasarlı numune gösterimi

Erichsen testi sonrası gerçekleştirilen SEM analizleri, tabakalı kompozit malzemelerin derin çekme koşulları altındaki hasar mekanizmalarını mikro yapı düzeyinde ortaya koymuştur. Test esnasında uygulanan şekil değişimi sonucunda, özellikle zımba temas bölgesine yakın alanlarda yoğunlaşan gerilmeler, lif-matris arayüzünde kopmalara, mikro çatlak oluşumuna ve liflerin matristen sıyrılmasına neden olmuştur. SEM görüntülerinde, polietilen matris fazında plastik akma izleri belirgin

şekilde gözlemlenirken, bazı bölgelerde liflerin arayüzden tamamen ayrılarak sıyrılmaya davranışı sergilediği tespit edilmiştir. Twill dokulu numunelerde lif yerleşmesinin yapısı nedeniyle matris deformasyonunun homojen olmadığı, bu durumun lokal gerilme birikimlerine ve delaminasyon bölgelerine neden olduğu görülmüştür. Plain dokulu kompozitlerde ise daha düzenli bir lif yerleşimine bağlı olarak hasarın nispeten tek yönlü ilerlediği ve arayüzde lif-matris tutunmasının görece daha dengeli olduğu gözlenmiştir. Bu bulgular, kompozit malzemenin şekil alma davranışının hem dokuma türüne hem de arayüz kalitesine doğrudan bağlı olduğunu ve lif yerleşmesinin deformasyon sürecinde kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Erichsen testinden sonra numunede hasar gören yerden parçalar $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ ebadında kesilip üzeri iletkenliği arttırmak amacıyla altın/paladyum ile kaplandıktan sonra SEM analizinde incelenmiştir. Hasarlı test numuneleri Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 28. Erichsen testi sonrasında oluşan hasar görüntüsü

Erichsen testi sonrasında elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, cam ve karbon elyafların farklı örgü tiplerinde özgün hasar mekanizmaları sergilediği görülmektedir. Cam plain dokuma numunelerinde, liflerin matristen belirgin şekilde ayrıldığı ve lif sıyrılmalarının baskın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, cam elyaflarda

matris ile liflerin arayüzey kuvvetinin sınırlı kaldığını ve yük aktarımı sırasında ara yüzey zayıflıklarının hasara neden olduğunu göstermektedir. Cam twill dokuma örneklerinde ise liflerin daha düzenli bir yönlenme sergilediği, kısmi lif kırıkları ve ara yüzey ayrılmaları gözlemlenmiştir. Karbon plain dokuma numunelerinde, liflerin büyük oranda matris içerisinde gömülü kaldığı ancak bazı bölgelerde topluca ayrışmaların meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuç, karbon liflerin yüksek rijitlikleri sayesinde cam elyafa kıyasla daha güçlü bir matris aderansı sağladığını göstermektedir. Karbon twill dokuma örneklerinde ise liflerin daha homojen bir şekilde matrisle bütünleştiği, fakat kırılma sonrasında keskin yüzeylerin oluştuğu tespit edilmiştir. Twill örgü yapısının lif kaymasına izin vermesi nedeniyle, hasarın lif kırılmasından çok lif-matris ayrışması şeklinde gerçekleştiği söylenebilir.

Genel olarak, cam elyafı numunelerde lif sıyrılma ve ara yüzey ayrılmaları baskınken, karbon elyafı numunelerde lif kırılmaları ve gevrek davranışın daha karakteristik olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışma sonucunda, tabakalı termoplastik kompozitlerin mekanik ve şekillendirilebilirlik özellikleri üzerinde öngerme seviyelerinin önemli etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Cam ve karbon fiber plain örgü kumaşlar, daha sıkı dokuma yapıları sayesinde twill örgülere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti, rijitlik ve sertlik değerleri sergilemiştir. Germe seviyeleri yükseldikçe cam fiber twill dokuma plain dokumaya göre daha fazla mukavemet ve uzamaya sahiptir. Karbon fiberde ise; anlamlı bir değişiklik görülmemiştir.

Fiber türü açısından değerlendirildiğinde; karbon fiber takviyeli kompozitler cam fiber takviyeli olanlara göre daha yüksek çekme dayanımı, rijitlik ve sertlik sağlamış, cam fiber takviyeli kompozitler ise daha yüksek süneklik ve uzama kapasitesiyle özellikle şekillendirme testlerinde öne çıkmıştır.

Öngerme uygulamasının etkisi incelendiğinde hem cam hem de karbon fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özelliklerin genel olarak iyileştiği görülmüştür. 15 N öngerme seviyesinde karbon fiber takviyeli kumaşlar daha yüksek sertlik ve dayanım gösterirken, 30 N öngerme seviyesinde cam fiber takviyeli kumaşlar şekillendirme kabiliyeti açısından daha üstün performans sergilemiştir. Öngerme kuvvetinin artmasıyla arayüzey etkileşimi fiber-matris kayma dayanımı ve tabakalar arası bağlarda oluşabilecek olumsuz etkisi nedeniyle malzemenin dayanım performansında azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Deneysel bulgular genel olarak değerlendirildiğinde, çekme testlerinde plain örgü ve karbon fiber kumaşların üstünlüğü belirginleşmiş, eğme testlerinde twill örgülerin esneklik avantajı ortaya çıkmıştır. Shore D sertlik testinde öngerme seviyesine bağlı olarak düşük germe seviyesi altında karbon fiberler, yüksek germe altında ise cam fiberler daha iyi sonuçlar vermiştir.

Erichsen testinde ise; twill örgülerin lif kaymasına izin vermesi nedeniyle plain örgülere göre şekillendirme kabiliyeti daha yüksektir. Karbon fiberlerin de cam elyaflara kıyasla daha yüksek şekillendirilebilirlik sunduğu tespit edilmiştir. Öngerme seviyesi

yükseldikçe her iki malzemenin şekillendirme kabiliyeti malzeme mukavemeti arttığı ve yapı gevrekleştiği için azalmaya başladığı görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Plain örgü kumaşlar, yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalarda tercih edilebilir.
- Twill örgü kumaşlar, esneklik ve şekillendirilebilirliğin önemli olduğu karmaşık geometrilerde kullanıma uygundur.
- Karbon fiber takviyeli kompozitler, yapısal dayanımın kritik olduğu mühendislik uygulamaları için daha avantajlıdır.
- Cam fiber takviyeli kompozitler, daha yüksek süneklik ve şekillendirme kabiliyeti gerektiğinde tercih edilmelidir.
- Öngerme uygulaması, kompozitlerin mekanik performansını artıran önemli bir parametre olup, optimum öngerme seviyesi uygulama alanına göre belirlenmelidir.
- 15 N öngerme seviyesi sertlik ve dayanımı ön plana çıkarırken, 30 N öngerme seviyesi şekillendirilebilirlik açısından daha avantajlıdır.
- Gelecek çalışmalarda, farklı öngerme seviyeleri, farklı termoplastik matrisler ve çok eksenli testlerin incelenmesi önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abdullah, O. A., & Hassan, A. K. F. (2016). Effect of prestress level on the strength of CFRP composite laminate. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(11), 5115-5123.
- Abdy, A. I., Hashemi, M. J., & Al-Mahaidi, R. (2018). Fatigue life improvement of steel structures using self-prestressing CFRP/SMA hybrid composite patches. *Engineering Structures*, 174, 358-372. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.072>
- Al-hassany, M. O. A. (2021). The effect of unidirectional pre-load on tensile characteristics of E-glass fiber and epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2510-2515. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.571>
- Al-Furjan, M. S. H., Shan, L., Shen, X., Zarei, M. S., Hajmohammad, M. H., & Kolahchi, R. (2022). A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 19, 2930-2959. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.008>
- Altan T. (2006). Processes for hydroforming sheet metal, *Stamping Journal*, 400-418.
- Andersson, F., Hagqvist, A., Sundin, E., & Björkman, M. (2014). Design for manufacturing of composite structures for commercial aircraft—the development of a DFM strategy at SAAB aerostructures. *Procedia Cirp*, 17, 362-367.
- Azman, M. A., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Petru, M., Ruzaidi, C. M., Sapuan, S. M., ... & Suriani, M. J. (2021). Natural fiber reinforced composite material for product design: A short review. *Polymers*, 13(12), 1917. <https://doi.org/10.3390/polym13121917>
- Bagherpour, S. (2012). Fibre reinforced polyester composites. *In Polyester*. IntechOpen.
- Bayraktar, Ö., & Guldaz, A. (2019). A new approach to fabricate carbon fiber reinforced polymer with roller pre-stretching method and characterization of their mechanical properties. *Polymer Composites*, 40(2), 489-499. <https://doi.org/10.1002/pc.24673>
- Brown, G.G. Development of Prestressed Graphite Processing Techniques; North American Rockwell: Hampton, VA, USA, 1976
- Campbell, F. C. (2010). *Structural composite materials*. ASM international.
- Clyne, T. W., & Hull, D. (2019). An introduction to composite materials. Cambridge university press.

- Daynes, S., Potter, K. D., & Weaver, P. M. (2008). Bistable prestressed buckled laminates. *Composites Science and Technology*, 68(15-16), 3431-3437. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.09.036>
- Dixit, A., Mali, H. S., & Misra, R. K. (2014). A micromechanical unit cell model of 2×2 twill woven fabric textile composite for multi scale analysis. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, 95(1), 1-9.
- Drzal, L. T., Rich, M. J., & Lloyd, P. F. (1983). Adhesion of graphite fibers to epoxy matrices: I. The role of fiber surface treatment. *The Journal of Adhesion*, 16(1), 1-30. <https://doi.org/10.1080/00218468308074901>
- Fazal, A., & Fancey, K. S. (2014). UHMWPE fibre-based composites: Prestress-induced enhancement of impact properties. *Composites Part B: Engineering*, 66, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.031>
- Fazal, A. (2014). Performance Enhancement Through Viscoelastically Generated Pre-stress. In *22nd International Conference on Composite and Nano Engineering*
- Fancey, K.S. Investigation into the Feasibility of Viscoelastically Generated Pre-Stress in Polymeric Matrix Composites. *Mater. Sci. Eng. A* 2000, 279, 36–41. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00687-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00687-5)
- Fancey, K. S., & Fazal, A. (2016). Prestressed polymeric matrix composites: Longevity aspects. *Polymer Composites*, 37(7), 2092-2097. <https://doi.org/10.1002/pc.23387>
- Garzon Barragán, O., & Jacob, J. (2007). Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers
- Gemi, L., Şahin, Ö. S., & Akdemir, A. (2017). Experimental investigation of fatigue damage formation of hybrid pipes subjected to impact loading under internal pre-stress. *Composites Part B: Engineering*, 119, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.051>
- Hadi, A. S., & Ashton, J. N. (1997). On the influence of pre-stress on the mechanical properties of a unidirectional GRE composite. *Composite structures*, 40(3-4), 305-311. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00032-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00032-4)
- Hale, D. K. (1976). The physical properties of composite materials. *Journal of materials science*, 11, 2015-2141.
- Hartl, C. (2005). Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(2-3), 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.035>
- Hassan, A. K. F., & Abdullah, O. A. (2015). New methodology for prestressing fiber composites. *Univers. J. Mech. Eng.*, 3, 252-261. DOI: 10.13189/ujme.2015.030605

- İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E. (2019). Cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 335-381. <https://doi.org/10.31202/ecjse.519072>
- Jevons, M. P., Fernando, G. F., & Kalsi, G. S. (2002, June). Effect of pre-tensioning on the low velocity impact performance of glass fibre composites. In *Proceedings of the Tenth European Conference on Composite Materials (ECCM-10)*, Brugge, Belgium (pp. 3-7).
- Jevons, M. P. (2011). The effects of fibre pre-stressing on the impact performance of composite laminates.
- Jorge, L. D. A., Marques, A. T., & De Castro, P. M. S. T. (1990). The influence of prestressing on the mechanical behaviour of uni-directional composites. In *Developments in the Science and Technology of Composite Materials: Fourth European Conference on Composite Materials September 25–28, 1990 Stuttgart-Germany* (pp. 897-902). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Khan, L. A., Mahmood, A. H., Hassan, B., Sharif, T., Khushnod, S., & Khan, Z. M. (2014). Cost-effective manufacturing process for the development of automotive from energy efficient composite materials and sandwich structures. *Polymer composites*, 35(1), 97-104. <https://doi.org/10.1002/pc.22638>
- Karki, S., Gohain, M. B., Yadav, D., & Ingole, P. G. (2021). Nanocomposite and bio-nanocomposite polymeric materials/membranes development in energy and medical sector: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 2121-2139. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.044>
- Krishnamurthy, S. (2006). Pre-stressed advanced fibre reinforced composites fabrication and mechanical performance.
- Krishnamurthy, S., Badcock, R. A., Machavaram, V. R., & Fernando, G. F. (2016). Monitoring pre-stressed composites using optical fibre sensors. *Sensors*, 16(6), 777. <https://doi.org/10.3390/s16060777>
- Koç, M. (Ed.). (2008). *Hydroforming for advanced manufacturing*. Elsevier.
- Mohamed, M., Selim, M. M., Ning, H., & Pillay, S. (2020). Effect of fiber prestressing on mechanical properties of glass fiber epoxy composites manufactured by vacuum-assisted resin transfer molding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 39(1-2), 21-30. <https://doi.org/10.1177/0731684419868841>
- Montesano, J. Fawaz, Z. Behdinan, K., & Poon, C. (2012), Fatigue damage in on-axis and off-axis woven-fiber/resin composite, *Key Eng Mater* 488, 230-233. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.488-489.230>
- Montesano, J., Fawaz, Z., & Bougherara, H. (2015). Non-destructive assessment of the fatigue strength and damage progression of satin woven fiber reinforced polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 71, 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.005>

- Mostafa, N. H., Ismarrubie, Z. N., Sapuan, S. M., & Sultan, M. T. H. (2016). The influence of equi-biaxially fabric prestressing on the flexural performance of woven E-glass/polyester-reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 50(24), 3385-3393. <https://doi.org/10.1177/0021998315620478>
- Mostafa, N. H., Ismarrubie, Z. N., Sapuan, S. M., & Sultan, M. T. H. (2016). Effect of fabric biaxial prestress on the fatigue of woven E-glass/polyester composites. *Materials & Design*, 92, 579-589. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.109>
- Motahhari, S., & Cameron, J. (1998). Impact strength of fiber pre-stressed composites. *Journal of reinforced plastics and composites*, 17(2), 123-130. <https://doi.org/10.1177/073168449801700203>
- Motahhari, S. (1999). Fibre prestressed composites: a study of the influences of fibre prestressing on the mechanical properties of polymer matrix composites.
- Mourdikoudis, S., Kostopoulou, A., & LaGrow, A. P. (2021). Magnetic nanoparticle composites: synergistic effects and applications. *Advanced Science*, 8(12), 2004951. <https://doi.org/10.1002/advs.202004951>
- Mutasher, S., Mir-Nasiri, N., & Lin, L. C. (2012). Small-scale filament winding machine for producing fiber composite products. *Journal of Engineering Science and Technology*, 7(2), 156-168
- Naslain, R. R. (2001). Ceramic matrix composites: matrices and processing. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 1060-1066. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00196-0>
- Nishi, Y., Okada, T., Okada, S., Hirano, M., Matsuda, M., Matsuo, A., & Faudree, M. C. (2014). Effects of tensile prestress level on impact value of 50 vol% continuous unidirectional 0 degree oriented carbon fiber reinforced epoxy polymer (CFRP). *Materials Transactions*, 55(2), 318-322. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2013278>
- Osman, B. H., Tian, Z., Jiang, G., Sun, X., & Carroll, A. (2020). Experimental study on dynamic properties of UHMWPE and PVA fibers concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(10), 2993-3011. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-2132-5>
- Pandita, S. D., Huysmans, G., Wevers, M., & Verpoest, I. (2001). Tensile fatigue behaviour of glass plain-weave fabric composites in on-and off-axis directions. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(10), 1533-1539. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00053-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00053-7)
- Pang, J.W., & Fancey, K.S. (2008). Analysis of the Tensile Behaviour of Viscoelastically Prestressed Polymeric Matrix Composites. *Compos. Sci. Technol.* 68, 1903–1910. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.12.018>

- Pang, J.W., & Fancey, K.S. (2009). The Flexural Stiffness Characteristics of Viscoelastically Prestressed Polymeric Matrix Composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 40, 784–790. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.009>
- Ramakrishna, S. (1998). Effect of fabric pre-stretching on the tensile properties of knitted fabric composites. *Advanced Composites Letters*, 7(3) <https://doi.org/10.1177/096369359800700304>
- Reinhart, T. J. (1998). Overview of composite materials. In *Handbook of composites* (pp. 21-33). Boston, MA: Springer US.
- Rose, D.H. Effect of Prestressed Fibres Upon the Response of Composite Materials. Master's Thesis, The University of Dayton, Dayton, OH, USA, 1993
- Schulte, K., & Marissen, R. (1992). Influence of artificial pre-stressing during curing of CFRP laminates on interfibre transverse cracking. *Composites science and technology*, 44(4), 361-367. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90072-B](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90072-B)
- S. Motahhari. A study of the influences of fiber prestressing on the mechanical properties of polymer matrix composites. PhD thesis, Queen's University Kingston, Ontario, Canada. 1998
- Schlichting, L. H., de Andrada, M. A. C., Vieira, L. C. C., de Oliveira Barra, G. M., & Magne, P. (2010). Composite resin reinforced with pre-tensioned glass fibers. Influence of prestressing on flexural properties. *Dental materials*, 26(2), 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.09.004>
- Taj, S., Munawar, M. A., & Khan, S. (2007). Natural fiber-reinforced polymer composites. *Proceedings-Pakistan Academy of Sciences*, 44(2), 129.
- Tuttle, M.E. A Mechanical/Thermal Analysis of Prestressed Composite Laminates. *J. Compos. Mater.* 1988, 22, 780–792. <https://doi.org/10.1177/002199838802200806>
- Tuttle, M. E., Koehler, R. T., & Keren, D. (1996). Controlling thermal stresses in composites by means of fiber prestress. *Journal of composite materials*, 30(4), 486-502. <https://doi.org/10.1177/002199839603000404>
- Qin, Y., & Fancey, K. S. (2020). Drop weight impact behaviour of viscoelastically prestressed composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 131, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105782>
- Verma, D., Gope, P. C., Maheshwari, M. K., & Sharma, R. K. (2012). Bagasse fiber composites-A review. *J. Mater. Environ. Sci.* 3(6), 1079-1092
- Yan, D. X., Ren, P. G., Pang, H., Fu, Q., Yang, M. B., & Li, Z. M. (2012). Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite. *Journal of Materials Chemistry*, 22(36), 18772-18774.

- Yaser, A. S. (2007). *The Effect of Fiber Pre-Tension on the Static and Dynamic Behavior of Composite Plates* (Doctoral dissertation, Phd. thesis, University of Technology, Iraq).
- Y. Huang, P. Frings, E. Hennes (2002). Mechanical properties of Zylon/epoxy composite. *Composite: Part B*, 33(2),109-115. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00064-6)
- Wakekar, A. D., Patil, S. H., Deshmukh, S., & Thakar, C. M. (2022). The review of carbon fiber materials in automotive industry. *ECS Transactions*, 107(1), 16595. doi:10.1149/10701.16595ecst
- Zaidi, B. M., Magniez, K., & Miao, M. (2015). Prestressed natural fibre spun yarn reinforced polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 75, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.021>
- Zaixia, F., Zhangyu, Yanmo, C., & Hairu, L. (2006). *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19(4), 399-411 Effects of pre-stretching on the tensile properties of knitted glass fiber fabric reinforced polypropylene composite. <https://doi.org/10.1177/0892705706059744>
- Zhang S.H., Wang Z.R., Xu Y., Wang Z.T., Zhou L.X. (2004). Recent developments in sheet hydroforming technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 237-241. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.054>
- Zhang, J., Lin, G., Vaidya, U., & Wang, H. (2022). Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications. *Composites Part B: Engineering*, 250, 110463. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110463>
- Zhao, J., & Cameron, J. (1998). Polypropylene matrix composites reinforced with pre-stressed glass fibers. *Polymer composites*, 19(3), 218-224. <https://doi.org/10.1002/pc.10093>
- Zhigun, I.G. Experimental Evaluation of the Effect of Prestressing the Fibres in Two Directions on Certain Elastic Characteristic of Woven-Glass Reinforced Plastics. *Polym. Mech.* 1972, 4, 691–695