

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ÜÇ BOYUTLU HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

Doktora Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2025

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

ÜÇ BOYUTLU HİBRİT KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Tez Yazarı

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

Danışman

Prof. Dr. Mete Onur KAMAN

MAYIS 2025

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı:	Üç Boyutlu Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi
Yazarı:	Sümeyye ERDEM KORKMAZ
İlk Teslim Tarihi:	15.04.2025
Savunma Tarihi:	20.05.2025

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Mete Onur KAMAN Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mehmet EROĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Mehmet GAVGALI Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof. Dr. Kadir TURAN Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜR Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Üç Boyutlu Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

20.05.2025

Sümeyye ERDEM KORKMAZ



ÖNSÖZ

Hayatımda büyük bir dönüm noktası olan doktora tezimi başarıyla tamamlama sürecine ulaşmış olmanın mutluluğunu ve gururunu yaşıyorum. Bu süreç, yalnızca akademik bir yolculuk değil, aynı zamanda hayatımı zenginleştiren, düşüncelerimi şekillendiren ve beni daha donanımlı bir birey haline getiren bir deneyim oldu.

Öncelikle, çalışmamın fikir aşamasından nihai hale gelmesine kadar her aşamada bilgisi, deneyimi, özverişi ve sabrıyla bana rehberlik eden; akademik kimliğim ve karakter gelişimime önemli katkılarda bulunan kıymetli hocam Prof. Dr. Mete Onur KAMAN'a sonsuz şükranlarımı ifade etmek isterim. Kendisi, sadece akademik danışmanlık sunmakla kalmamış, aynı zamanda çalışma sürecim boyunca beni motive eden, sorumluluk bilincimi pekiştiren ve her daim rol model olma özelliğini taşıyan bir rehber olarak iz bırakmıştır. Kazandırdığı bilimsel bakış açısı ve etik değerler, yaşamımın her alanında benimle olmaya devam edecektir.

Her zaman akademiye olan inancıyla bizlere güç veren, yükseköğretim camiamıza ilham kaynağı olan, tez savunma jürimde yer alan Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. Mehmet GAVGALI'ya en derin teşekkürlerimi sunuyorum.

Çalışma sürecimde katkı ve destekleriyle yollarımı kolaylaştıran, Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN; saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ, Doç. Dr. Serkan ERDEM, Dr. Öğr. Üyesi Cenk YANEN, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜR, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm öğretim üyesi Prof. Dr. Mehmet EROĞLU ve İnönü Üniversitesi Malatya OSB Meslek Yüksekokulu öğretim üyesi Doç. Dr. Mustafa ALBAYRAK'a da içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, sürecin çeşitli aşamalarında yardım ve destekleriyle yanımda olan, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Murat MAYDA'ya, bölüm öğretim üyesi Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ'ye, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ŞAHBAZ'a ve Arş. Gör. Dr. Sezer MORKAVUK'a teşekkürlerimi sunarım. Bununla birlikte, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürü Prof. Dr. Hüseyin Atilla ATİK'e ve Makine ve Metal Teknolojileri Bölüm Başkanı Doç. Dr. Yusuf DİLAY'a da katkı ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (FÜBAP) tarafından MF.23.14 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Sağladıkları değerli katkılardan dolayı FÜBAP'a teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesine katkı sağlayan 01-AP-22 numaralı Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (KMÜ BAP) desteği için de şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca desteğini esirgemeyen ve bana güç veren kıymetli aileme minnettarlığımı sunarım. Annem, babam ve kardeşlerim, fedakârlıkları ve sürekli teşvikleriyle başarılarımın en büyük paydaşlarıdır. Sevgili eşim Anıl KORKMAZ, bu zorlu süreçte yanımda yer alarak sevgi, sabır ve anlayışla bana destek verdiği için teşekkür ederim. Seninle bu başarıyı paylaşmak, benim için tarifsiz bir mutluluk kaynağıdır.

Ayrıca, bu çalışmanın gerçekleşmesinde sağladıkları imkânlarla bana destek veren, görev yaptığım Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi ve değerli Rektörlük Makamı'na; çalışma sürecimde sundukları olanaklar dolayısıyla Fırat Üniversitesi'ne de teşekkürlerimi sunarım. Verdikleri destek, tezin başarıyla tamamlanmasında önemli rol oynamıştır.

Bu tezi, yaşamıma değer katan tüm bu kıymetli insanlara ithaf ediyor; onlara duyduğum sonsuz minnettarlığı bu satırlarda bir kez daha ifade etmek istiyorum.

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

ELAZIĞ, 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	6
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	17
3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal ve İşlevsel Kriterlere Göre Sınıflandırılması	18
3.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	19
3.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler	20
3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	21
3.1.4. Hibrid (Karma) Kompozitler.....	23
3.2. Dokuma Kumaş Kompozitler	24
3.2.1. Tek Yönlü Sistemler.....	26
3.2.2. (2B) Düzlemsel Kumaşlar	28
3.2.3. Hacimsel (3B) Kumaşlar	31
3.2.3.1 Açılı İnterlok Dokuma Kumaşlar.....	33
3.2.3.2 3B Ortogonal İnterlok Dokuma Kumaş	34
4. MATERYAL VE METOT	37
4.1. Problemin Tanımı	37
4.1.1. Materyal	37
4.1.1.1 3B Dokuma Kumaş Tezgâhı	37
4.1.1.2 Dokuma Filamentler	38
4.1.1.3 3B Kumaş Dokuma Teknikleri	41
4.1.2. Kompozit Plakaların Üretimi	60
4.2. 3B Dokuma Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	63
4.2.1. Çekme Testi	63
4.2.2. Üç Nokta Eğilme Testi	65
4.2.3. V-Çentik Kayma Testi	68
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	70
5.1. Çekme Testine İlişkin Sonuçlar.....	70
5.2. Eğilme Testine İlişkin Sonuçlar.....	136
5.3. Kayma Testine İlişkin Sonuçlar.....	178
6. SONUÇLAR	219
ÖNERİLER.....	222
KAYNAKLAR	224
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Üç Boyutlu Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025, Sayfa: xvi + 232

Bu çalışma, üç boyutlu (3B) dokuma hibrit kumaşlardan üretilen kompozit malzemelerin çekme, eğilme ve kayma testleri yardımı ile mekanik performanslarını detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Yüksek mukavemet, deformasyon toleransı ve çok yönlü yük taşıma kapasitesinin kritik olduğu mühendislik uygulamaları için, dokuma yapı tiplerinin ve filament kombinasyonlarının performansa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada üç farklı tip dokuma yapısı ile üç farklı tip filament kombinasyonu kullanılarak üretilen numuneler üzerinde mekanik testler gerçekleştirilmiş ve malzeme özellikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan Tip I (düzenli ve simetrik yerleşimli temel yapı), Tip II (yoğun bağlantılı ve z-yönlü elyaf takviyeli yapı) ve Tip III (açılı elyaf yerleşimine sahip hibrit yapı) dokuma tipleri; kompozitlerin farklı yükleme senaryoları altında gösterdiği yapısal tepkileri analiz etmek üzere tasarlanmıştır.

Cam-Cam (CC), Polyester-Cam (PC), Cam-Karbon (CK) ve Polyester-Karbon (PK) filament kombinasyonları ise, ilgili dokuma tiplerinin mukavemet, deformasyon kapasitesi ve enerji sönümleme davranışlarını hedef uygulamalara göre optimize etmek amacıyla seçilmiştir.

Çekme testleri sonuçları, dokuma yapılarının ve filament kombinasyonlarının kompozitlerin çekme dayanımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Tip I dokuma, homojen yük dağılımı sağlayarak çekme dayanımı açısından düzenli bir performans sergilemiştir. Tip II dokuma, tabakalar arası yerleşim stratejisi sayesinde en yüksek çekme mukavemetine ulaşmıştır; ancak elastikiyetinin sınırlı olması, deformasyon toleransını azaltmıştır. Tip III dokuma, yüksek enerji absorpsiyonu ve yük taşıma kapasitesi ile çekme testlerinde en dengeli ve üstün performansı sunmuştur. Cam-cam elyaf kombinasyonu, çekme dayanımı açısından en yüksek mukavemeti sağlarken, cam-polyester kombinasyonu, daha fazla deformasyon kapasitesi ile esnek yapılar için uygun bir seçenek olduğunu göstermiştir.

Eğilme testleri, Tip III dokuma yapısının eğilme dayanımı açısından en yüksek performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Bu yapı, açılı elyaf yerleşimi sayesinde eğilme yükleri altında mükemmel bir direnç ve deformasyon toleransı sağlamıştır. Tip II dokuma, eğilme testlerinde de yüksek mukavemet göstermiş ancak esneklik eksikliği nedeniyle yer değiştirme kapasitesinde sınırlı kalmıştır. Tip I dokuma ise eğilme dayanımı açısından daha düşük performans göstermiştir. Filament kombinasyonları arasında cam-cam elyaf, eğilme mukavemeti açısından en dayanıklı kombinasyon olarak öne çıkmış, cam-polyester elyaf kombinasyonu ise yüksek deformasyon kapasitesiyle darbe dayanımı gerektiren uygulamalar için uygun bir profil sunmuştur.

Kayma testleri, dokuma yapılarının kompozit malzemelerin düzlem içi yük taşıma kapasiteleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Tip III dokuma, açılı elyaf yerleşimi sayesinde kayma yüklerine karşı yüksek direnç sağlamış ve dengeli bir yük dağılımı sunmuştur. Tip II dokuma, kayma mukavemeti açısından

ikinci sırada yer almış, ancak gerilme altında oluşan lokalize deformasyonlar nedeniyle performans kaybı göstermiştir. Tip I dokuma, kayma dayanımı açısından en düşük performansı sergileyerek bu tür uygulamalar için daha sınırlı bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma, çekme, eğilme ve kayma testlerinden elde edilen bulgular ışığında, üç boyutlu dokuma tipinin ve filament kombinasyonlarının kompozit malzemelerin mekanik performansını büyük ölçüde şekillendirdiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B Dokuma Kompozitler, Çekme Dayanımı, Eğilme Mukavemeti, Kayma Performansı



ABSTRACT

Fabrication of Three-Dimensional Hybrid Composites and Investigation of Their Mechanical Properties

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

May 2025, Pages: xvi + 232

This study aims to investigate in detail the mechanical performance of composite materials produced from three-dimensional (3D) woven hybrid fabrics using tensile, flexural and shear tests. For engineering applications where high strength, deformation tolerance and multi-directional load carrying capacity are critical, the effect of weave structure types and filament combinations on performance was investigated. In the study, mechanical tests were performed on samples produced using three different types of weave structures and three different filament combinations, and the material properties were comprehensively analyzed.

Type I (basic structure with regular and symmetrical layout), Type II (densely bonded and z-directional fiber reinforced structure) and Type III (hybrid structure with angled fiber layout) weave types used in this study were designed to analyze the structural responses of composites under different loading scenarios.

Glass-Glass (CC), Polyester-Glass (PC), Glass-Carbon (CK) and Polyester-Carbon (PK) filament combinations were selected to optimize the strength, deformation capacity and energy absorption behavior of the respective weave types for target applications.

The results of the tensile tests showed that weave structures and filament combinations significantly affected the tensile strength of the composites. Type I webbing exhibited a consistent performance in terms of tensile strength by providing homogeneous load distribution. Type II webbing achieved the highest tensile strength due to its interlayer layout strategy; however, its limited elasticity reduced its deformation tolerance. Type III webbing offered the most balanced and superior performance in tensile tests with high energy absorption and load carrying capacity. The glass-glass fiber combination provided the highest tensile strength, while the glass-polyester combination, with its greater deformation capacity, proved to be a suitable option for flexible structures.

Bending tests revealed that the Type III woven structure exhibited the highest performance in terms of bending strength. This structure provided excellent resistance and deformation tolerance under bending loads due to its angled fiber arrangement. Type II webbing also showed high strength in bending tests but was limited in displacement capacity due to lack of flexibility. Type I webbing performed lower in terms of bending strength. Among the filament combinations, glass-glass fiber stood out as the most durable combination in terms of bending strength, while the glass-polyester fiber combination offered a profile suitable for applications requiring impact resistance with its high deformation capacity.

Shear tests evaluated the effect of weave structures on the in-plane load carrying capacity of composite materials. Type III webbing provided high resistance to shear loads due to its angled fiber arrangement and

provided a balanced load distribution. Type II webbing ranked second in terms of shear strength, but showed a loss of performance due to localized deformations under tension. Type I webbing performed the lowest in terms of shear strength, indicating a more limited potential for use in this type of application.

In conclusion, this study reveals that the type of three-dimensional weave and filament combinations greatly shape the mechanical performance of composite materials in the light of the findings from tensile, flexural and shear tests.

Keywords: 3D Woven Composites, Tensile Strength, Flexural Strength, Shear Performance



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması..... 19
Şekil 3.2.	Prepreg tabaka 26
Şekil 3.3.	Tek ve çok yönlü tabakalar 27
Şekil 3.4.	Dokuma kumaş stilleri a) plain dokuma şeması b) beş koşumlu satin dokuma şeması ve (c) 3/3 twill dokuma şeması 30
Şekil 3.5.	3B dokuma yapılarda düzlemsel tabakaları ve kumaş kalınlığı boyunca interlok desenine göre sınıflandırılması 33
Şekil 3.6.	3B dokuma yapılarda düzlemsel tabakaların kalınlığı boyunca interlok modelleri a) Açılı interlok/kalınlık boyunca, b) Açılı interlok/tabakadan tabakaya, c) Ortogonal interlok/kalınlık boyunca, d) Ortogonal interlok/tabakadan tabakaya 33
Şekil 4.1.	3B kumaş dokuma tezgahı a) genel görünüş, b) üstten görünüm c) montaj aşaması ve d) deneme aşaması 37
Şekil 4.2.	Araştırmada kompozit kumaş üretiminde kullanılan a) karbon filament, b) cam ve c) yüksek dayanımlı polyester filament 38
Şekil 4.3.	Tüm kalınlık boyunca düşey dokuma (Tip I)..... 42
Şekil 4.4.	Tip-I modu için a) çözgü yönünde cam elyaf filamentlerin takılması; b) cam elyaf filamentlerin yandan görünüşü; c) cam elyaf filamentlerin üstten görünüşü ve d) cam elyaf filamentlerin genel görünüşü 43
Şekil 4.5.	Tip I için 3B dokuma modu ve makine içerisine kodlanması; dokumanın a) perspektif, b) yan, c) üstten görünüşü ve d) dokuma makinasına modların girilmesi..... 45
Şekil 4.6.	CK-Tip-I kumaşın farklı açılardan a) dokuma tezgahında üretimi, b) yakın plan görünümü, c) üstten ve d) yatay görünümü..... 46
Şekil 4.7.	PC-Tip-I kumaş için çözgü yönünde yüksek mukavemetli polyester filamentlerin farklı açılardan görünüşü: a) filamentlerin makineye takılması, b) üstten görünüm, c) dikey görünüm ve d) genel görünüm 47
Şekil 4.8.	PC-Tip-I kumaşın farklı açılardan a) dokuma tezgahında üretimi, b) yakın plan görünümü, c) üstten ve d) yatay görünümü..... 48
Şekil 4.9.	Tip I modunda yüksek mukavemetli polyester-karbon elyaf olarak üretilen hibrit kumaşın (PK-Tip-I) farklı açılardan a) üstten, b) genel ve c) yakın görünümü 49
Şekil 4.10.	Tabakalar arası dikiş modeli (açılı interlok/tabakadan tabakaya) 50
Şekil 4.11.	Tip II modu için çözgü yönünde a) cam elyaf filamentlerin takılması ve b) cam elyaf filamentlerin genel görünümü..... 51
Şekil 4.12.	Tip II 3B dokuma modu için a) perspektif, b) yandan, c) üstten ve d) dokuma makinasında program kodlama planı 52
Şekil 4.13.	Tip II için a) 3B dokuma modu armür planı ve b) 3B dokuma modunun makine içerisine kodlanması..... 52

Şekil 4.14.	Tip II modunda cam elyaf-cam elyaf olarak üretilen kumaş (CC-Tip-II) görüntüsünün farklı açılardan a) yatay, b) dikey, c) genel ve d) yakın görünümü	53
Şekil 4.15.	Tip II modu için çözgü yönünde yüksek mukavemetli polyester filamentlerin takılmasının farklı açılardan a) dikey, b) yatay, c) genel ve d) filamentlerin makineye takılma görünümü	54
Şekil 4.16.	Tip II modunda yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (PC-Tip-II) farklı açılardan a) genel, b) üstten, c) yatay ve d) yakın görünümü.....	55
Şekil 4.17.	Tüm kalınlık boyunca açılı dikiş modeli.....	56
Şekil 4.18.	Tip-III modu için çözgü yönünde a) cam elyaf filamentlerin takılması ve b) cam elyaf filamentlerin görünümü	56
Şekil 4.19.	Tip III için 3B dokuma modu için a) perspektif, b) yan, c) üstten görünüşü ve d) dokuma makinasına modların girilmesi.....	57
Şekil 4.20.	Tip III için a) 3B dokuma modu armür planı ve b) 3B dokuma modunun makine içerisine kodlanması.....	58
Şekil 4.21.	Tip III modunda cam elyaf-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (CC-Tip-III) farklı açılardan a) yakın, b) üstten, c) yandan ve d) genel görünümü	58
Şekil 4.22.	Tip III modu için çözgü yönünde a) yüksek mukavemetli polyester filamentlerin takılması ve b) yüksek mukavemetli polyester filamentlerin genel görünüşü.....	59
Şekil 4.23.	Tip III modunda yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (PC-Tip-III) farklı açılardan a) üstten ve b) genel görünüm	59
Şekil 4.24.	Çekme testi için ASTM 3039M standartlarına uygun hazırlanan kompozit numune ölçüleri .	64
Şekil 4.25.	Çekme test sürecine ilişkin a) genel ve b) yakın görüntüsü	64
Şekil 4.26.	Kompozit numunelere yönelik gerçekleştirilen çekme testi a) genel ve b) yakın görüntüsü ...	65
Şekil 4.28.	CC-Tip-I dokuma kumaştan üretilen kompozit numunelere ilişkin gerçekleştirilen üç nokta eğme testi: a) numunenin makineye yerleştirilmesi, b) test başlangıcı, c) kuvvet uygulanması, d) testin sonlandırılması ve e) numunelerin test sonrası görünümü.....	67
Şekil 4.29.	Kayma testine yönelik üretilen numune boyutları	68
Şekil 4.30.	Kompozit numunelere ilişkin gerçekleştirilen a) kayma testi, b) kayma aparatı, c) PC-Tip-I dokuma kumaş için ve d) CK-Tip-I dokuma kumaş için kayma test numuneleri.....	69
Şekil 5.1.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) Tip I, Tip II ve Tip III polyester-cam elyaf ve b) Tip I, Tip II ve Tip III cam-cam elyaf filament kombinasyonları.....	70
Şekil 5.2.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) Tip I, Tip II ve Tip III polyester-cam elyaf ve b) Tip I, Tip II ve Tip III cam-cam elyaf filament kombinasyonları.....	71
Şekil 5.3.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I cam-cam elyaf, polyester-cam elyaf, cam-karbon elyaf, polyester-karbon elyaf, b) Tip II polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf ve c) Tip III polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf filament kombinasyonlarının çekme mukavemetleri	84

Şekil 5.4.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I cam-cam elyaf, polyester-cam elyaf, cam-karbon elyaf, polyester-karbon elyaf, b) Tip II polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf ve c) Tip III polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf filament kombinasyonlarının çekme mukavemetleri	85
Şekil 5.5.	Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değiştirmesi sonuçlarının karşılaştırılması	92
Şekil 5.6.	Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değiştirmesi sonuçlarının karşılaştırılması	104
Şekil 5.7.	Polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf, cam-karbon elyaf ve polyester-karbon elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değiştirmesi sonuçlarının karşılaştırılması	120
Şekil 5.8.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler	136
Şekil 5.9.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi maksimum gerilme-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler	137
Şekil 5.10.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III dokuma kompozitler	141
Şekil 5.11.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi maksimum gerilme-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III dokuma kompozitler	142
Şekil 5.12.	Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme	145
Şekil 5.13.	Cam elyaf-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması	152
Şekil 5.14.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme mukavemetlerinin kumaş türüne göre karşılaştırılması	159
Şekil 5.15.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler	179
Şekil 5.16.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi gerilme-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler	179

Şekil 5.17.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III.....	183
Şekil 5.18.	Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi gerilme-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III.....	184
Şekil 5.19.	Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testi a) maksimum kuvvet b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması.....	188
Şekil 5.20.	Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması.....	195
Şekil 5.21.	Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma mukavemetlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme	202

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Garm B55 model 3B dokuma kumaş tezgâhına ilişkin teknik özellikler.....	38
Tablo 4.2. 3K karbon fiber filament ürününün elyaf özellikleri	39
Tablo 4.3. Cam filament ürünün teknik özellikleri	39
Tablo 4.4. Yüksek dayanımlı polyester filament ürünün teknik özellikleri	39
Tablo 4.5. 3B Kompozit Üretim Parametreleri	40
Tablo 4.6. Araştırma kapsamında üretilen kompozit numunelere ilişkin bilgiler	41
Tablo 4.7. 3B kompozit numunelerin kalınlık ve tabaka sayısı	63
Tablo 5.1. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait çekme testi hasar görüntüleri.....	99
Tablo 5.2. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere çekme testi hasar görüntüleri..	112
Tablo 5.4. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	127
Tablo 5.5. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	130
Tablo 5.6. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	133
Tablo 5.7. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri.....	149
Tablo 5.8. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri.....	156
Tablo 5.9. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri	164
Tablo 5.10. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	169
Tablo 5.11. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri.....	173
Tablo 5.13. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri.....	192
Tablo 5.14. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri.....	199
Tablo 5.15. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri	205
Tablo 5.16. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	209

Tablo 5.17. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	212
Tablo 5.18. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri	215



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ	: Çekme mukavemeti
F	: Maksimum yük
K	: Ani darbe mukavemeti
L	: Numunenin ilk uzunluğu
A	: Kırılma enerjisi
Δl	: Kopma uzama miktarı
t	: Numune kalınlığı
ε	: Şekil değiştirme oranı
w	: Numune genişliği
μm	: Mikron metre
E	: Elastisite modülü

Kısaltmalar

2B	: İki boyutlu
3B	: Üç boyutlu
3DOWC	: 3D orthogonal woven composite (3B ortogonal dokuma kompozit)
3B-O	: 3B ortogonal
3DSBWC	: 3D shallow bend-joint woven composit (3D sığ bükme-eklem dokuma kompozit)
3DSSWC	: 3D shallow straight-joint woven composite (3D sığ düz eklemli dokuma kompozit)
AE	: Akustik emisyon
CDM	: Continuum damage mechanics (Sürekli hasar mekaniği)
DF-CW	: Double-face copper wire (Çift yüzölü bakır tel)
DIC	: Digital image correlation (Dijital görüntü korelasyonu)
EP	: Epoksi
FE	: Finite element (Sonlu eleman)
FT-IR	: Fourier transform infrared spectrometer (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi)
H3DWC	: Hybrid three-dimensional woven thick composite (Hibrit üç boyutlu dokuma kalın kompozit)
HE	: High extension (Yüksek uzama)
IDVC	: Integrated digital volume correlation (Entegre dijital hacim korelasyonu)
LE	: Long extension (Uzun uzama)
Micro-CT	: Micro-computed tomography (Bilgisayarlı mikrotomografi)
MWCNT	: Multi-walled carbon nanotube (Çok duvarlı karbon nanotüpler)
PET	: Polietilen tereftalat
PLA	: Poly lactic acid (Poli laktik asit)
PP	: Polipropilen
RIFT	: Resin infusion flexible tooling (Esnek takımlama altında reçine enfüzyonu)
S/B	: Stuffer/bağlayıcı
SEM	: Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SF-CW	: Single-face copper wire (Tek yüzölü bakır tel)
TEM	: Transmission electron microscope (Geçirimli elektron mikroskobu)
UHMWPE	: Ultrahigh molecular weight polyethylene (Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)
VARI	: Vacuum-assisted resin infusion (Vakum destekli reçine enfüzyonu)
XRD	: X-Ray diffraction (X-ışınları difraksiyonu)

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, birden fazla farklı malzemenin özelliklerini bir araya getirerek, yüksek performans gerektiren uygulamalar için optimize edilmiş yapıların elde edilmesini sağlar. Genellikle bir matris ve ona dayanıklılık kazandıran bir takviye bileşeninden oluşan kompozit yapılar, hafiflik, yüksek mukavemet, dayanıklılık ve esneklik gibi özellikleri sayesinde modern mühendislik ve endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedir. Havacılık, uzay ve otomotiv sektörü başta olmak üzere, dayanıklılığın yanı sıra hafiflik gerektiren uygulamalarda kompozit malzemelere duyulan ilgi giderek artmaktadır (Boroomand, Yazdi ve Ahmadi, 2023).

Tekstil yapılı kompozitler, özellikle hafiflik ve dayanıklılık gibi nitelikleriyle dikkat çekmekte olup, günümüzde havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde kullanım alanını hızla genişletmektedir (Korkmaz, 2023). Bu kompozitlerin üretiminde kullanılan preformlar, farklı tekniklerle üretilmekte olup, uygulama alanına göre çeşitli mekanik ve fiziksel özelliklerin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Kanakannavar ve Pitchaimani, 2024). Bu bağlamda, iki boyutlu (2B) dokuma teknolojisi, spesifik kullanım alanlarına yönelik olarak özelliklerin çeşitlendirilmesini mümkün kılmakta ve bu nedenle çok yönlü bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. 2B dokuma teknolojisi sayesinde, kompozit yapıların çözgü ve atkı yönündeki elyaf oranları değiştirilebilmekte, böylece mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve uygulama ihtiyaçlarına göre adapte edilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca, kompozit yapıyı oluşturan kumaş tabakalarının düzenlenişi ve yapısal yerleşimi, bu malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Turpin ve ark., 2023). Tabakaların düzenlenmesiyle, kompozitin yük taşıma kapasitesi, dayanıklılığı, esnekliği ve enerji absorpsiyon yeteneği gibi özellikleri doğrudan etkilenebilir. Bu durum, kompozitin istenen performans kriterlerine göre şekillendirilmesine katkı sağlamakta ve endüstride yüksek performanslı kompozitlerin üretimine olanak tanımaktadır. Özellikle havacılık ve uzay gibi sektörlerde, yüksek dayanım ve hafiflik gerektiren uygulamalarda, tabaka düzenlemesi yoluyla bu yapıların istenen özellikleri sağlanabilmektedir (Kamynina ve ark., 2023). Bu doğrultuda, dokuma kumaşların kompozit malzeme üretiminde kullanımı üzerine yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Literatürde bu alanda yapılan araştırmalar, dokuma teknolojilerinin kompozit malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemiş ve kompozit üretiminde kullanılan farklı dokuma tekniklerinin mekanik performans özelliklerine nasıl katkıda bulunduğunu ortaya koymuştur (Miryuk, 2023).

2B dokuma kumaşlar, kompozit malzeme endüstrisinde en yaygın kullanılan tekstil yüzeyleri arasında yer almaktadır. Bu kumaşlar, çözgü (0°) ve atkı (90°) ipliklerinden oluşan iki ayrı filament setinin birbirleriyle dik açılarla kesişmesi sonucu elde edilen bir yapıya sahiptir. Geleneksel dokuma makinelerinde temel olarak üç farklı dokuma türünde üretilirler: bezayağı, dimi ve saten

dokular. Bu dokuma farklılıkları, kumaşın çeşitli mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler (Liu ve ark., 2023). Ancak, 2B dokuma kumaşların kompozit yapı içerisinde kullanımı bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Özellikle tabakalar arasında bağlayıcı filamentlerin olmaması nedeniyle, kompozit malzemelerde tabaka ayrılması olarak tanımlanan ve kompozitin mekanik dayanımını olumsuz etkileyen bir yapısal zayıflığa yol açabilmektedir. Delaminasyon olarak adlandırılan bu eksikliği gidermek ve 2B dokuma kompozitlerin performans özelliklerini iyileştirmek amacıyla, üç boyutlu (3B) preform yapıları geliştirilmiştir (Annamalai, Anan Ronald ve Ebenezer, 2023). 3B preformlar, tabakalar arası bağlayıcı filamentler ekleyerek delaminasyon direncini artırmakta ve kompozit malzemelerin dayanıklılığını yükseltmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, özellikle dayanıklılık ve uzun ömürlü performansın kritik olduğu alanlarda 2B dokuma kompozitlere kıyasla daha üstün niteliklere sahip malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır.

Çok tabakalı dokuma yapılar, geleneksel 2B dokuma sürecinde birbirine dik olan iki filament sisteminin (atkı ve çözgü) yanı sıra üçüncü bir filament sisteminin z yönünde eklenmesi ile elde edilen yapılar olarak tanımlanmaktadır (Ünal, 2012). Bu tür dokumalarda, özellikle düz tam kesişmeli (3B) dokuma kumaşlar, çözgü, atkı ve z- filamenti olmak üzere üç farklı filament setinden oluşmaktadır. Kumaşın yapısını oluşturmak için çözgü filamentleri, her bir tabakada atkı filamentleri ile düzlemsel (in-plane) doğrultuda, kullanılan örgü tipine bağlı olarak kesişmektedir. Bu kesişme, kumaşın her tabakasinda düzlemsel bir yapı oluştururken, z- filamenti bu düzlemden dışarı çıkarak (out-of-plane) her bir tabakada çözgü filamentleriyle örgü tipine bağlı olarak kesişmektedir (Boroomand, Yazdi ve Ahmadi, 2023). Bu özgün yapı, 3B dokuma kumaşların kompozit malzeme üretiminde kullanımını yaygınlaştırmakta ve kompozit yapının düzlem dışı yüklere karşı direnç göstermesini sağlamaktadır. Özellikle darbe esaslı yüklemelere maruz kalan uygulamalarda, bu tür 3B dokuma kumaşlar yüksek hasar toleransına sahip yapılar oluşturmakta, böylece kompozit malzemelerin dayanıklılığını artırmaktadır. Bu özellikler, 3B dokuma kompozitleri yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirmekte ve geleneksel 2B dokuma kompozitlere kıyasla üstün performans sunmaktadır (Sary, Barburski ve Swiniarski, 2023).

Modifiye edilmiş geleneksel dokuma makineleri ile üretilen 3B kumaşlarda tek yönlü ağızlık açılabilirken, gerçek 3B dokuma makinelerinde ise iki yönlü ağızlık açılabilir. Bu sebepten dolayı geleneksel dokuma makinelerinde dokunan 3B kumaşlar ile gerçek 3B dokuma kumaş makinelerinde üretilen 3B kumaşlar farklı kategorilerde değerlendirilmektedir. Geleneksel dokuma makinelerinde 3B dokuma kumaşların üretimi, geleneksel 2B dokuma makinesi atkı filamentlerini teker teker yerleştirdiği için verimsiz bir işlemdir. Bu durumun aksine, 3B dokuma kumaşlar üretmek için özel olarak tasarlanmış 3B dokuma tezgâhları, aynı anda birden fazla çözgü filamenti ve atkı filamenti tabakasını yerleştirmeye izin verir. Tüm bir atkı filamenti sütununun eşzamanlı olarak yerleştirilmesi, 3B dokuma işleminin doğrusal üretkenliğini tabakalardan bağımsız hale

getirir. 3B dokuma işleminde, bireysel çözgü düzlemleri komşu çözgü düzlemlerini tekrar tekrar geçmeye zorlamaz. Bu durumda dokumanın neden olduğu elyaf hasarı önemli ölçüde azaltılır (Wang ve ark., 2022). 3B dokuma tezgâhlarının sunduğu esneklik, endüstrinin farklı sektörlerine özel gereksinimlere göre kumaş üretimini mümkün kılmaktadır. Bu tezgâhlar sayesinde farklı elyaf yönlendirme teknikleri, dokuma desenleri ve tabaka sayıları kullanılarak, istenilen mukavemet, esneklik, ağırlık ve estetik özelliklere sahip kumaşlar üretilmektedir (Qi ve ark., 2022).

3B kompozit üretiminde kullanılan elyafların x, y ve z doğrultularındaki mukavemet özellikleri, diğer bir deyişle kompozit yapıdaki elyafların miktarı ve bu elyafların yönlendirme ve dağılım biçimleri, kompozit malzemelerin dayanıklılık ve güvenilirlik düzeylerini belirleyen temel etkenler arasındadır. Bu bağlamda, 3B dokuma tezgâhları ile üretilcek kumaşlarda kullanılacak takviye malzemelerinin doğrultularının ve yoğunluklarının kontrol edilebilir olması, kompozit yapıların spesifik performans gereksinimlerine uygun olarak üretilmesini mümkün kılmaktadır (Yasith ve ark., 2021). Böylelikle hem tabaka sayısı hem de elyaf doğrultuları kullanıcı isteğine göre ayarlanarak, özellikle yüksek performanslı ve dayanıklı yapılarda kullanılmaya uygun kompozit malzemeler elde edilebilmektedir. Bu tür yapıların avantajlarından biri, 3B dokuma yöntemiyle üretilen kumaşlarda delaminasyon sorununu ortadan kaldırabilmesidir (Huang, Norton ve Joosten, 2023). 3B dokuma yöntemiyle üretilen kumaşlarda elyaflar tüm yönlerde kontrollü bir şekilde yerleştirildiği ve birbirine daha güçlü bir şekilde bağlandığı için, bu tür ayrılmaların oluşma riski en aza indirilmektedir. Bu da yapısal dayanıklılık ve uzun ömür açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. 3B dokuma tekniği, kompozit malzemelerde elyafların belirli bir doğrultuya yönlendirilmesi ve tabaka sayılarının belirli bir amaca göre ayarlanabilmesi açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Geleneksel dokuma yöntemlerinde tabakalar sınırlı bir şekilde yönlendirilirken, 3B dokuma tezgâhları ile her tabakasının doğrultusu, yerleşimi ve yoğunluğu tam olarak kontrol edilebilmekte ve bu sayede çok yönlü mukavemet kazandırılabilir. Elyafların her doğrultuda dengeli ve uyumlu bir şekilde yerleştirilmesiyle elde edilen bu yapılar hem kompozitin genel dayanıklılığını artırmakta hem de dış kuvvetlere karşı daha dirençli hale gelmektedir (Rashid ve ark., 2019).

3B kumaşların üretiminde, çeşitli düzlemlerde konumlandırılan takviye malzemelerinin mutlaka üçlü setler halinde yerleştirilmesi gerekmez. Bu tip kumaşlar, ihtiyaç duyulan performans ve mukavemet özelliklerine göre farklı sayıda takviye malzemesi setleri ile de üretilir. Bu bağlamda, üçten az veya üçten fazla sayıda takviye malzemesi seti kullanılarak 3B kumaş yapılarının elde edilmesi mümkündür. Bu esneklik, üretim sürecinde tasarımcıya veya mühendise, istenilen özelliklere göre takviye düzenlemeleri yapma olanağı tanımaktadır. Özellikle farklı yüklenme koşullarına ve performans gereksinimlerine göre takviye malzemelerinin miktarı, konumlandırılması ve yönlendirilmesi ayarlanarak, mukavemet açısından özelleştirilmiş kumaş yapıları elde edilebilmektedir (Xu ve ark., 2020).

3B kumaş üretiminde kullanılan yöntemler temelde iki ana gruba ayrılmaktadır. İlk yöntem, geleneksel dokuma makinelerinde üretilen 2B kumaşların belirli tekniklerle dikilerek veya yapıştırılarak 3B bir yapı oluşturulmasıdır. Bu yöntemde, birbirine dik veya eğimli açılarda birleştirilen 2B kumaşlar, üst üste veya yan yana getirilerek 3B bir yapı haline dönüştürülür. Geleneksel yöntemlerin bu şekilde dönüştürülmesiyle elde edilen 3B kumaşlar, daha düşük maliyetli makinelerle üretilibilmeleri nedeniyle ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Ancak, bu yöntemin sınırlayıcı bir yönü olarak tabakalar arası bağlantıların güçlendirilmesi gerekliliği ve bunun sonucu olarak ortaya çıkabilecek olası ayrılma sorunları göz önünde bulundurulmalıdır (Izquerdo, Semeraro ve Acin, 2022).

İkinci yöntem ise, doğrudan 3B kumaş üretimi yapabilen özel dokuma makinelerinin kullanılmasıdır. Bu tür makineler, takviye malzemelerinin 3B bir düzlemde yerleştirilmesini ve istenilen sayıda tabaka yapısının aynı anda dokunmasını sağlar. 3B dokuma makineleri, elyafların farklı doğrultularda kontrollü bir şekilde yerleştirilmesine olanak tanıyarak, tabakalar arasında güçlü bir bağ kurulmasını ve böylece yüksek mukavemetli yapılar elde edilmesini sağlar. Doğrudan 3B dokuma yapan bu makineler, tabaka sayısı, yönlendirme açısı ve takviye malzemesi dağılımı gibi parametrelerin istenilen şekilde ayarlanabilmesi açısından esneklik sunmaktadır. Bu nedenle, bu yöntem ileri mühendislik uygulamalarında ihtiyaç duyulan dayanıklı ve hafif kompozit yapılar için uygun bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Valente, Rossitti ve Sambucci, 2023).

Bu çalışmanın temel problemini ise, farklı takviye malzemeleri ve dokuma açıları kullanılarak kendiliğinden dokuma özelliğine sahip, hedeflenen mukavemet özelliklerine göre özelleştirilebilen 3B kumaşların üretilebilirliğini araştırmak oluşturmaktadır. Çeşitli takviye malzemelerinin kombinasyonları ve farklı dokuma teknikleri kullanılarak, farklı yük taşıma kapasitesine ve deformasyon direncine sahip kumaş yapıları elde edilip edilemeyeceği, bu çalışmanın ana araştırma konusudur. Bu araştırma, 3B dokuma kumaşların mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmeye yönelik yeni stratejiler sunmayı hedeflemektedir ve böylece bu kumaşların yüksek performanslı yapılarda daha güvenilir bir şekilde kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaçla çalışmanın ilk bölümünde 3B kumaşlar hakkında bilgi verilerek, 2B dokuma kumaşlara göre farklılıkları açıklanmıştır. İkinci bölümde, 3B dokuma kumaşlar ile ilgili güncel literatür araştırması, malzeme mekaniği ve kompozit teknolojileri bağlamında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Üçüncü bölümde kompozit malzemeler hakkında bilgi verilmiş olup, elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve hibrid kompozitlerin yapısal özellikleri ile üretim metodolojileri karşılaştırmalı bir yaklaşımla ele alınmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde, deneysel süreç kapsamında kullanılan 3B dokuma tezgâhı, filament kombinasyonları ve dokuma teknikleri (tek yönlü sistemler, 2B/3B kumaş geometrileri) detaylandırılarak kompozit plakaların üretim aşamaları ve mekanik test protokolleri (çekme, eğilme, kayma) metodolojik bir bakış açısıyla sunulmuştur. Beşinci bölümde, elde edilen mekanik test sonuçları istatistiksel ve mikroyapısal analizler eşliğinde

tartışılmış; dokuma tipi, filament yönlendirmesi ve takviye oranının kompozitlerin mukavemet, tokluk ve delaminasyon direnci üzerindeki etkileri kritik bir perspektifle değerlendirilmiştir. Sonuçlar bölümünde ise, 3B dokuma kompozitlerin geleneksel 2B sistemlere kıyasla mekanik performans avantajları nicel verilerle desteklenerek, endüstriyel uygulamalar için optimize edilmiş tasarım önerileri sunulmuştur. Bu kapsamlı yaklaşım, kompozit malzemelerin çok ölçekli tasarımında 3B dokuma teknolojilerinin potansiyelini ortaya koymayı hedeflemektedir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde 3B dokuma kumaşlar kullanılarak üretilen fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik davranışı ile ilgili çalışmalar tartışılmıştır.

Literatürde 3B dokuma kompozitlerin mekanik özelliklerini araştıran ve 2B kompozitlere kıyasla güçlü ve zayıf yönlerini karşılaştıran birtakım araştırmalar bulunmaktadır.

Majumdar ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 3B dokuma ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) ortogonal kumaşların mimarisi ve nanodolguların, bu malzemelerden üretilen kompozitlerin mekanik ve hasar davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, farklı stuffer-bağlayıcı (S/B) filament oranlarına sahip 3B dokuma ortogonal kumaşlar üretilmiş ve bu kumaşlar epoksi matris ile güçlendirilmiştir. Nanodolguların etkisini değerlendirmek için fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT'ler) kullanılarak matris ve kumaş arası etkileşim artırılmıştır. Bu kapsamlı inceleme, 3B dokuma kumaş mimarisinin ve nanodolguların UHMWPE-epoksi kompozitlerin mekanik performansı üzerindeki belirleyici rolünü net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Xu ve ark. (2020) çalışmalarında, 3B dokuma kumaşların, çok işlevli malzemeler için farklı filament türleri ile hibritleştirilerek yapısal bütünlük ve mekanik performans açısından sunduğu avantajları incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, bakır tel/cam fiber hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar analizini sistematik olarak değerlendirmek için iki farklı hibrit yapı, tek yüzeyli bakır tel ve çift yüzeyli bakır tel tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma, 3B dokuma hibrit kompozitlerin, çok işlevli filamentler ile hibritleştirilmiş yeni nesil malzeme platformları için güçlü bir aday olabileceğini ortaya koymaktadır.

Wielhorski ve ark. (2022) araştırmalarında 3B dokuma kompozit takviyelerin sayısal modelleme yaklaşımlarını kapsamlı bir şekilde incelemeyi amaçlamışlardır. Özellikle, farklı modelleme stratejilerinin (öngörücü ve betimleyici) avantajlarını ve bunların meso- veya alt-meso ölçeklerdeki ideal kullanım alanlarını karşılaştırmalı olarak ele almıştır. Çalışmada, tekstil güçlendirmelerin mekanik ve geometrik özelliklerini anlamaya yönelik farklı ölçeklerdeki modelleme yöntemleri ve bu yöntemlerin doğruluk ile hesaplama maliyetleri arasındaki dengeyi nasıl sağladığı detaylandırılmıştır. Araştırma kapsamında, mevcut literatür taraması yapılarak, dokuma tekstillerin üretim süreçlerinden kaynaklanan mikro yapı değişimlerinin nihai mekanik davranış üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, özellikle dokuma kompozitlerin farklı endüstriyel uygulamalarındaki performans iyileştirme potansiyelini vurgulamaktadır.

Awoke ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmada, hafif ve yüksek mekanik özelliklere sahip kompozitler için tercih edilen tekstil malzemelerine odaklanılmıştır. Araştırmanın amacı, 3B dokuma keten lifi ve polilaktik asit (PLA) bazlı bir kompozit geliştirmek ve bu malzemenin mekanik özelliklerini incelemektir. Bu kapsamda, farklı PLA içeriğine sahip dört farklı hibrit iplik,

çözü, atkı ve z-yönlü filamentler olarak kullanılarak 3B bir ön form dokunmuş ve bu ön form, ek dolgu veya matris kullanılmaksızın basınç kalıplama yöntemiyle kompozite dönüştürülmüştür. Eğilme uzaması değerlerinin çekme uzamalarına göre daha yüksek olduğu görülmüş ve bu durum gerilme-şekil değiştirme eğrileriyle tartışılmıştır. Mikroyapı analizleri, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiş ve PLA içeriği yüksek kompozitlerin PLA'nın kendine özgü yapısından dolayı daha kırılğan olduğu tespit edilmiştir.

Boroomand ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 3B ortogonal dokuma kumaş kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş, yaygın kullanılan 2B kompozitlere kıyasla üstün performansları değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında, farklı yüzdelerde jüt ve yüksek mukavemetli polietilen tereftalat (PET) elyaflarından oluşan beş farklı 3B ortogonal dokuma kumaş kompozit örneği tasarlanmıştır. Tasarımlar, meso ve makro ölçeklerde TexGen yazılımı ile gerçekleştirilmiş, kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe davranışları ise Abaqus yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Sayısal simülasyon sonuçları, deneysel bulgularla uyum göstermiştir. Bulgular, 3B dokuma kompozitlerin üstün mekanik performanslarını ve sonlu elemanlar analizinin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Araştırmanın sonuçları, hibrid kompozit tasarımı ve modelleme çalışmalarına önemli bir katkı sunmaktadır.

Ram ve ark. (2023) 3B ortogonal dokuma yapısına sahip karbon/Kevlar kumaşlarla güçlendirilmiş polipropilen (PP) esaslı kompozitlerin çekme davranışlarını incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, karbon (CCC), Kevlar (KKK), hibrit karbon/Kevlar (CCK) ve hibrit Kevlar/karbon (KKC) kumaşlardan oluşan dört farklı kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Kumaş yapıları, 3B ortogonal (3B-O) mimaride tasarlanmış ve el yapımı bir tekerlek çerçevesi kullanılarak üretilmiştir. Kompozit tabakalar, vakum torbası destekli kalıplama tekniği ile hazırlanmıştır. Çekme testleri, gerçekleştirilmiş ve gerilme-şekil değiştirme verileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, 3B-O dokuma kompozitlerin çekme özelliklerinin mikro yapıya ve hibritizasyon derecesine duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Mikro yapı analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilerek bulgular desteklenmiştir. Bu çalışma, ileri düzey mekanik özelliklere sahip termoplastik kompozitlerin geliştirilmesine önemli katkılar sunmuştur.

Korkmaz (2023) araştırmasında, 3B tekstillerin farklı üretim yöntemlerinin kuru yapıları ve kompozit hali için mekanik davranışı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Çalışmada, 3B dokuma, 3B çok eksenli çözgü örme ve 3B dikişli kumaşların basma ve eğilme özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan bu tekstillerden kompozit malzemeler üretilmiş mekanik performansları değerlendirilmiştir. Araştırma, 3B tekstillerin kuru yapıdan kompozite kadar olan yük taşıma kapasitelerini inceleyerek, farklı kullanım amaçlarına göre mekanik davranışlarındaki önemli farklılıkları ortaya koymaktadır. Bu çalışma, 3B tekstillerin üretim yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisini anlamada önemli bir katkı sunmaktadır.

Szary ve ark. (2023) araştırmalarında cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerini, farklı dokuma yapılarının etkisi bağlamında incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, üç farklı tekstil yapısı kullanılarak, 3B yazıcı ile üretilmiş bir çekirdek üzerine dokuma kumaşlar yerleştirilmiş ve sandviç yapıya vakum torbası yöntemi ile reçine emdirilmiştir. Bu numuneler üzerinde üç nokta e me ve çekme testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, yalnızca 3B yazıcı ile üretilmiş düz çubuklar ile karşılaştırılmıştır. Araştırmada ayrıca her bir takviye yapısının avantajları, dezavantajları ve kopma modları tartışılmış; özellikle şekil değiştirmenin çekirdek üzerindeki uyum kabiliyetine vurgu yapılmıştır.

Huang ve ark. (2023) tarafından gerçekleştirilen araştırmada, 3B baskı ile üretilen intraply hibrit yarı-dokuma kompozitlerin mekanik performansı incelenmiştir. Çalışmada, karbon ve cam elyafların poliamid ile birleştirilmesiyle elde edilen iki farklı film kompozit filament türü kullanılmıştır. Bu filamentler, düşük uzama (LE) ve yüksek uzama (HE) malzemeleri olarak sınıflandırılmıştır. Araştırmada, hibrit kompozit tabakaların performansını etkileyen iki temel baskı parametresi, dokuma tipi ve LE malzeme oranı, 15 farklı tabaka üzerinde test edilmiştir. Çalışmada ayrıca tabakaların mukavemet ve elastisite modülünün incelenmesi amacıyla analitik ve sonlu elemanlar (FE) modelleri kullanılmıştır.

Yang ve ark. (2024) araştırmalarında 3B ortogonal dokuma kompozitlerin (3BOWC) mekanik özelliklerini detaylı bir şekilde analiz etmek amacıyla mikroskobik modeller geliştirmişlerdir. Çalışmanın temel amacı, filament yoğunluğunun bu malzemelerin elastisite modülü, çekme, basma ve kayma mukavemeti gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemektir. Bu kapsamda, ipliklerin gerçek yapısal ilişkilerine dayalı olarak modellenen kompozitler için bir köprüleme modeli kullanılarak elastik sabitler ve farklı yükleme koşullarına karşı mukavemet değerleri tahmin edilmiş, elde edilen bulgular literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmada ayrıca, köprüleme modeli sonuçlarına dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle eğilme mukavemeti analiz edilmiştir.

Hu ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada 3B kompozitlerin katılaşma davranışını etkileyen farklı elyaf hibridizasyon modlarının ve işlem parametrelerinin etkilerini sistematik olarak incelemişlerdir. Çalışmanın temel konusu, uzayda dokunan ve 2B tabakalara göre daha iyi ara tabaka özelliklerine sahip olan 3B kompozitlerin, özellikle büyük kalınlık ve karmaşık preform yapılarının üretimine uygun bir teknoloji olan esnek yönelimli 3B dokuma teknolojisi kullanılarak, kompaktlama davranışlarının deneysel ve teorik olarak araştırılmasıdır. Bu bağlamda, farklı tiplerde 3B preformlar dokunmuş ve sistematik kompaktlama deneylerine tabi tutulmuştur. Bulgular, hibrid elyaf kompozit preformların hızlı ve verimli bir şekilde dokunması için önemli deneysel ve teorik referanslar sunmaktadır. Çalışma, özellikle yüksek teknoloji alanlarında geniş uygulama potansiyeline sahip olan 3B kompozit preformların üretim süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik değerli katkılar sağlamaktadır.

Pankow ve ark. (2022) çalışmalarında hibrid 3B dokuma kompozitlerin (H3BWC) çekme davranışlarının ilk kez incelemişlerdir. Araştırmanın konusu, farklı karbon fiber hacim fraksiyonlarının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek ve hibridizasyonun hasar toleransını iyileştirmedeki rolünü belirlemektir. Bu çalışma hibridizasyonun miktarı ve yöntemi konusunda açık bir dengelenme olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma, hibridizasyonun mekanik performans üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek, hasar toleransı yüksek kompozitlerin tasarımında rehberlik sağlayacak değerli bilgiler sunmaktadır.

Mishra ve ark. (2022) araştırmalarında cam çoklu-filament demetlerinin ve epoksi reçinenin kullanıldığı 3B dokuma yapılar (ortogonal, açılı geçmeli ve çözgü geçmeli) ile polimer kompozitlerin üretimini ele almışlardır. Araştırmanın amacı, farklı 3B dokuma yapıları için çekme dayanımı, elastisite modülü, darbe direnci ve eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerin, üretim süreç parametrelerindeki (reçine ekleme oranı, sertleştirici miktarı, kurlama süresi ve sıcaklığı, kalıplama basıncı) değişimlere bağlı olarak nasıl etkilendiğini belirlemektir. Çalışmada, reçine infüzyonu veya emdirilme işlemlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Üretilen numuneler çekme dayanımı, çekme modülü, darbe direnci ve eğilme dayanımı açısından test edilmiş ve her bir 3B dokuma yapısı için en uygun işlem parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışma, 3B dokuma yapılar kullanılarak üretilen polimer kompozitlerin performansını optimize etmek için kapsamlı bir rehber sunmaktadır.

Kanakannavar ve Pitchaimani (2024) araştırmalarında doğal elyaf (keten) içeren 3B örgülü ipliklerle dokunmuş kumaş ve biyolojik olarak parçalanabilir bir matris olan PLA kullanılarak üretilen kompozitlerin su emme, kalınlık şişmesi ve eğilme özelliklerini incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırmada, katı örgülü ipliklerle dokunan düz tip keten kumaş dolgu malzemesi olarak kullanılmış ve PLA matrisiyle birleştirilmiştir. Saf PLA ve keten kumaş-PLA kompozit levhaları, çözeltiden dökme yöntemiyle hazırlanmış; bu levhalar sıralama yöntemi ve sıcak presleme yöntemiyle birleştirilerek kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin su emme, kalınlık şişmesi ve eğilme testleri, warp (çözgü) ve weft (atkı) yükleme yönlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma, keten kumaş takviyeli PLA kompozitlerinin çevresel dayanıklılık ve mekanik performansını etkileyen kritik parametreleri ortaya koyarak, biyolojik olarak parçalanabilir kompozitlerin geliştirilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Cariaga (2022) araştırmasında düz dokuma hibrit kompozitler için dokuz ortotropik malzeme sabitini sağlayan analitik, 3B, çok ölçekli bir homojenleştirme modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışma, tekstil kompozit malzemelerin mikro yapısının mekanik özelliklerin öngörülmesini zorlaştırdığı bir bağlamda, bu malzemelerin analitik bir yöntemle etkili malzeme özelliklerinin belirlenmesi üzerine odaklanmaktadır. Araştırmada, kompozitin temsili bir hacim elemanının homojenleştirilmesi temel alınmış ve bu süreç, elyaf dalgalanması, demet kalınlığı ve boşluklar gibi geometrik özelliklerin detaylı bir analitik formülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Model,

doldurma ve çözgü demetlerinin farklı malzemelerden oluşmasına izin vererek hibrit kompozitlerin analizini desteklemiş, ayrıca mikro seviyede elyaf ve matris malzemesi arasındaki ayrışmayı da içermiştir. Geliştirilen model, sanal deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların tatmin edici bir uyum sergilediği tespit edilmiştir. Bu bağlamda, çalışma, düz dokuma hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağlayarak, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanımını optimize edecek önemli bir yöntem sunmaktadır.

Korkmaz ve Okur (2022) çalışmalarında bilgisayar destekli sayısal yöntemlerle 3B dokuma kumaşların mekanik özelliklerinin modellenmesi ve analizi üzerine yapılan araştırmaların bir derlemesini sunmuşlardır. Bu kapsamda, ele alınan dokuma kumaşlar, eleman boyutu ve tipi, malzeme modeli, modelleme ölçek yaklaşımları ve sınır koşulları gibi bilgisayar destekli modelleme parametrelerine göre analiz edilmiştir. Çalışmada ayrıca, deneysel sonuçlarla modelleme sonuçları arasındaki tutarsızlıklara neden olan sorunlara da kapsamlı bir şekilde değinilmiştir. 3B dokuma kumaşların karmaşık mekanik davranışlarının öngörülmesi, tasarımcılara istenilen nihai ürün özelliklerini elde etmede önemli avantajlar sağlamaktadır. Araştırma, 3B dokuma kumaşların havacılık, savunma, otomotiv gibi çeşitli uygulama alanlarındaki artan talebini desteklemek amacıyla, bu kumaşların fiziksel özelliklerinin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini hedeflemektedir.

Perera (2021) 3B tam geçmeli preform dokuma cihazları, bu cihazların birincil ve ikincil mekanizmaları ile 3B tam geçmeli preform dokuma yöntemiyle üretilen kumaş yapıların modellenmesine ilişkin literatürü derinlemesine incelemiştir. Çalışmanın amacı, 3B dokuma preformların delaminasyon direncini ve düzlem dışı mekanik özelliklerini artıran, tam geçmeli 3B dokuma yapılar üreten yöntemleri ele alarak, mevcut literatürdeki boşlukları tespit etmek ve gelecekteki araştırma alanlarına yön vermektir. Çalışmada, dokuma tarihine kısa bir giriş yapıldıktan sonra 3B dokuma kumaşların temel özellikleri tanıtılmış, özellikle 3B tam geçmeli preform dokuma yöntemi vurgulanarak bu yöntemin diğer 3B dokuma üretim tekniklerinden farkları ortaya konulmuştur. Literatürde, Dyneema, karbon, Kevlar ve Zylon gibi yüksek performanslı elyaf filamentleri kullanılarak 3B tam geçmeli preform dokuma yöntemiyle üretilen kumaşların, hafif yapılarının yanı sıra mükemmel mekanik özellikler sunduğu ve bu nedenle ileri teknik kompozit uygulamalarda öne çıktığı belirtilmiştir.

Roux (2023) araştırmasında farklı takviye malzemelerinin bir araya getirilmesiyle kompozit özelliklerini geliştiren hibritizasyonun, dokuma kompozitlerde filamentlerin dağılımından kaynaklanan makroskobik heterojenliği ve bunun termomekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Araştırmanın temel konusu, dokuma kompozitlerdeki farklı etkili fazların geometrik olarak tanımlanmasının, özellikle filamentlerin arayüzlerdeki karmaşık dolaşıklığı nedeniyle zorluğunu gidermek ve arayüzlerin optimal konumlarını bütünsel mekanik davranışa dayanarak belirlemektir. Bu kapsamda, asimetrik bir cam/karbon hibrit 3B geçmeli kumaş

incelenmiş ve makroskobik olarak çift fazlı bir malzeme olarak modellenmiştir. Araştırmada, arayüzlerin etkili konumlarının, ısıtma-soğutma deneyleri sırasında tomografiyle elde edilen veriler ve entegre dijital hacim korelasyonu (IDVC) yöntemi kullanılarak belirlenebileceği gösterilmiştir. Bu süreçte, her bir fazın termomekanik özellikleri dikkate alınmıştır. IDVC hassasiyetini artırmak için numune sınırlarının analize dahil edildiği özel bir prosedür geliştirilmiştir.

Qi ve ark. (2022) araştırmalarında 3B açılı geçmeli dokuma kompozitlerin eğilme davranışında hibrit yapıların etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, karbon, hibrit (Karbon/UHMWPE) ve UHMWPE'den oluşan üç farklı 3B açılı geçmeli numune, çözgü ve atkı yönlerinde üç nokta eğme testi ile deneysel olarak değerlendirilmiştir. Hibrit 3B dokuma kompozitlerin hasar başlangıcı ve gelişimini değerlendirmek amacıyla X-ışını mikrobilgisayarlı tomografi (Micro-CT), akustik emisyon (AE) ve dijital görüntü korelasyonu (DIC) teknikleri bir arada kullanılmıştır. Çalışma, hibrit 3B dokuma kompozitlerin mekanik özelliklerini anlamak ve bu yapıların mühendislik uygulamalarındaki performanslarını iyileştirmek için kapsamlı bir yaklaşım sunmakta, hibrit tasarımların hasar davranışlarına olan etkilerine dair önemli öngörüler sağlamaktadır.

Wang ve ark. (2019) araştırmalarında epoksi/3B ortogonal cam fiber dokuma kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki nanokil etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Araştırma kapsamında, DK2 polimer sınıfı organik nanokil ile modifiye edilmiş kompozit numuneler, 3B ortogonal dokuma kumaş/epoksi ile takviye edilerek, esnek takımlama altında reçine enfüzyonu (RIFT) yöntemiyle üretilmiştir. DK2, organik olarak modifiye edilmiş, montmorillonit esaslı bir nanokil türü olup, polimer matrislerle yüksek uyumluluk göstererek nanokompozitlerin mekanik performansını artırmak amacıyla kullanılan özel bir katkı malzemesidir. İlk olarak, nanokil modifikasyon mekanizması Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), X-ışını kırınımı (XRD) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. İkinci aşamada, fiber/matris arasındaki çekme davranışını optimize etmek için doğrusal olmayan en küçük kareler uyumlama yöntemi uygulanmıştır. Çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi, doğrusal olmayan uyumlama yöntemi ile başarıyla modellenmiştir.

Dahale ve ark. (2019) tekstil dokuma parametrelerinin 3B tabakalar arası çözgü geçmeli karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmanın amacı, belirli dokuma parametrelerinin, çekme, basma ve Izod darbe enerjisi gibi mekanik özellikler ile bu kompozitlerin otomotiv endüstrisindeki potansiyel uygulamalarını değerlendirmek ve statik-çarpma performansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Çalışmada, Ulster Üniversitesi'nde jakarlı dokuma tezgâhı kullanılarak üretilen 3B dokuma preformlar, 4 ve 16 atkı/cm olmak üzere iki farklı atkı yoğunluğunda sabit çözgü yoğunluğu (12 çözgü/cm) ile hazırlanmıştır. Çalışma, temel dokuma parametreleri, mekanik özellikler ve hasar mekanizmaları arasında anlamlı bir ilişki kurmayı başarmış ve 3B tabakalar arası çözgü geçmeli karbon/epoksi ve cam/epoksi kompozitlerin tasarımında rehber niteliğinde bilgiler sunmuştur.

Hu ve ark. (2019) araştırmalarında L-şekli kiriş kompozitlerin delaminasyon direncine elyaf-reçine arayüzey yapılarının, özellikle 3B yapıların etkisini incelemişlerdir. Araştırmada, dört farklı dokuma yapısı tasarlanmış ve bu yapılara karşılık gelen epoksi matrisli kompozitler, vakum destekli reçine infüzyon (VARI) yöntemiyle üretilmiştir. Delaminasyon direnci, menteşeli yükleme çekme testleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 3B ortogonal (3BOW) ve 3B sığ-büküm (3BSBW) dokuma yapıların delaminasyon direncini artırmada oldukça etkili olduğunu göstermiştir.

Ivanov ve Lomov (2020) araştırmalarında 2B ve 3B dokuma kumaşların geometrik modellerini tanımlayarak, bu modellerin tekstil hücre birimi düzeyinde mezo ölçekli FE modellerine dönüştürülmesine ve ardından dokuma kompozitlerin mikro-mekanikine odaklanmışlardır. Araştırmanın amacı, dokuma kompozitlerin mekanik davranışlarının anlaşılmasını sağlamak için mezo ölçekli FE modellerin oluşturulması ve bu modellerin yöntemsel olarak Mori-Tanaka homojenleştirme yöntemi ve hücre biriminin gerilme-şekil değiştirme durumuna ilişkin FE analizleriyle mikro düzeyde incelemeler yapmaktır. Çalışmada, FE modellerinin geometrik tutarlılığına özel bir önem verilmiştir. Ayrıca, bir sürekli hasar mekanik (CDM) türü hasar modeli tanıtılmış ve bir dokuma kompozitin FE modelleme örneği sunulmuştur.

Rashid ve ark. (2019) araştırmalarında iki farklı cam elyaf takviyeli polyester kompozitin (dokuma roving (W) ve kesikli elyaf mat (C)) mekanik özelliklerini, farklı tabaka sayıları (2, 4 ve 6) için karşılaştırmışlardır. Kompozitler, el yatırma yöntemiyle ve ayrıca bu iki elyaf türünün hibrid karışimleri da aynı tabaka sayıları için üretilmiştir. Çalışmada, mekanik özellikler bağlamında çekme, darbe ve eğilme dayanımları analiz edilmiştir; bunun yanı sıra taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak morfolojik incelemeler geręekleřtirilmiřtir.

Oddly (2020) araştırmasında 3B dokuma takviyeli kompozitlerin makro ölçekli mekanik davranışlarını modellemek için termodinamik olarak tutarlı bir çerçeve geliştirmeyi amaçlamıştır. Araştırmada, 3B dokuma kompozitlerin mekanik yükleme altındaki deformasyonlarını ve hasar süreçlerini öngören bir model geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, tek yönlü tabaka kompozitler için geliştirilmiş gerilme bazlı hasar kriterleri 3B dokuma kompozitlere genişletilmiştir. Ayrıca çalışmada çeşitli zorluklar nedeniyle şekil değiştirme bazlı hasar kriteri önerilmiştir. Bu kriterler, çekme, basınç ve kayma testleri için daha nitelikli ve geręekçi sonuçlar sunmaktadır. Önerilen çerçevede, gerilme ve şekil değiştirme tensörleri, malzeme yapısından ilham alınarak iki ana bileşene ayrılmıştır. Bu yaklaşım, kayma davranışının modellemesini takviye yönlerindeki davranıştan bağımsız olarak ele almayı mümkün kılmış ve 3B dokuma kompozitlerde gözlemlenen inelastik parametrelerin kolayca eklenip değiştirilmesine olanak tanımıştır. Çerçeve, deneysel verilerden kalibre edilen viskoelastik bir model ile birleştirilerek, hem yatay takviye yönünde çekme altında oluşan doğrusal olmayan davranışı hem de kayma davranışını modellemiştir. Kayma davranışı için, plastikliğe dayalı bir yaklaşım benimsenmiş ve inelastik şekil değiştirmenin, takviye yapısına bağlı lokal kayma düzlemleri üzerinde geliştiği varsayılmıştır.

Modelin geçerliliği, deneysel verilerle uyumlu olarak kalibre edilmiş parametrelerle ve eksen dışı çekme testleriyle ön değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Jabbar ve ark. (2019) araştırmalarında 3B entegre dokuma çekirdekli sandviç kompozitlerin geometrik ve yapısal parametrelerini tanımlamışlardır. Araştırmada, çekirdek kumaş kalınlığı değiştirilerek pile ipliklerinin katlanma oranı, kumaş yüzey ağırlığı ve fiber hacim oranı gibi parametreler incelenmiştir. Farklı çekirdek kalınlıklarına sahip 3B kumaşlar, takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, 3B dokuma çekirdekli sandviç kompozitlerin fiber hacim oranını tanımlamak için yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur.

Abtew ve ark. (2020) çalışmalarında 3B atkılı iç içe geçmiş para-aramid kumaşlarda bağlama ve destek filamentleri arasındaki filament değişim oranlarının mekanik performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 3B atkılı iç içe kumaşlar, üstün kalıplanabilirlik, artırılmış darbe enerjisi emme kapasitesi ve tabakalar arası soyulma direnci nedeniyle kompozit takviyesi ve yumuşak balistik malzeme alanlarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ancak, kumaşın nihai uygulamalar için mekanik davranışını etkileyen parametrelerin anlaşılması gereklidir. Bu bağlamda, araştırmada benzer mimari ve yapısal özelliklere sahip, ancak farklı bağlama ve destek iplik oranlarına sahip dört farklı 3B atkılı iç içe kumaş varyantı tasarlanmış ve üretilmiştir. Makro ve mezo ölçeklerde mekanik özelliklerin değerlendirilmesi amacıyla, EN ISO 13 934-1 standardına göre çekme ve WSP 90.5(05) standardına göre eğilme sertliği testleri gerçekleştirilmiştir.

Dahale ve ark. (2019) araştırmalarında 3B dokuma atkı-atkı iç içe geçmiş karbon/epoksi kompozitlerin nihai mimarisi ve mekanik özellikleri üzerinde dokuma parametrelerinin (atkı sıklığı ve çözgü sıklığı) etkilerini incelemişlerdir. İleri yapısal bileşenlerde 3B dokuma kompozitlerin kullanımını sınırlayan temel sorunlardan biri, dokuma parametrelerinin kompozit performansı üzerindeki etkisinin yeterince anlaşılabilmesidir. Çalışmanın amacı, bu 3B dokuma mimarisi içinde tekstil performansı ile kompozit performansı arasında bir bağ kurmaktır. Araştırma kapsamında, T700S-50C-12k karbon fiber kullanılarak Jacquard dokuma tezgahında üretilen kumaşlar, sabit çözgü sıklığında (12 çözgü/cm) ve üç farklı atkı sıklığında (4, 10 ve 16 atkı/cm) hazırlanmıştır. En iyi mekanik özellikleri sunan atkı sıklığı seçilerek, yüzme uzunluğu değişkenine yönelik yeni örnekler üretilmiştir. Bu örneklerde çözgü ve atkı sıklıkları sabit tutulmuş ve yüzme uzunluğu değiştirilmiştir. Çekme, basma ve eğilme testleriyle numunelerin mekanik özellikleri değerlendirilmiş; fiber içeriği, iplik dalgalılığı, yük taşıyan ipliklerin hizasızlığı ve reçine zengin alanların dağılımı/boyutu gibi faktörlerin özelliklere etkisi analiz edilmiştir.

Li ve ark. (2020) araştırmalarında, üç boyutlu çok eksenli çözgü örme (MWK) hibrit kompozitlerin üretimini, yüksek sıcaklık koşullarında maruz kaldıkları mekanik yükler altındaki tepkilerini ve kırılma mekanizmalarını incelemişlerdir. Bu kapsamda, kompozit malzemelere çekme, basma, eğilme, kayma ve darbe testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda, kompozitlerin kırılma davranışları detaylı şekilde analiz edilmiş; farklı yükleme türlerine karşı elyaf kopmaları, elyaf

yönlerine bağlı yırtılmalar, tabakalar arası ayrılmalar ve matris kaynaklı hasarlar gibi çeşitli kırılma türleri tanımlanmıştır. Özellikle çekme kırılmalarında 0° ve 90° elyaflara özgü farklı kopma mekanizmaları; basma testlerinde 45° kayma kırılmaları ve tabakalar arası ayrılmalar; eğilme testlerinde sıkışma ve çekme yüzeylerindeki kırılmalar; kayma testlerinde matris kaymaları ve elyaf deformasyonları; darbe testlerinde ise hızın artmasına bağlı olarak değişen kırılma modları detaylı biçimde sınıflandırılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklıkların malzeme davranışı üzerindeki etkileri de kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Xiaochuan ve ark. (2020) araştırmalarında, kılavuz kovanlar içeren üç boyutlu (3B) dokuma kompozit malzemelerin ara tabaka kayma performansı ve basma davranışını incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, 3B dokuma kompozit preformları esnek yönlendirilmiş bir 3B dokuma süreci kullanılarak üretilmiş, ardından matris malzemesi VARI (Vakum Destekli Reçine İnfüzyon) yöntemiyle emdirilmiştir. Ara tabaka kayma davranışı ve basma performansını değerlendirmek amacıyla kısa giriş kayma testi, basma testi ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler aracılığıyla, kılavuz kovanların malzeme içerisindeki yapısal rolü ve mekanik yüklemelere karşı davranışı detaylı şekilde incelenmiştir.

Izquierdo ve ark. (2022) araştırmalarında aynı filament yapısını paylaşan ancak matris porozitesi ve filamentlerin elyaf hacim oranı açısından farklılık gösteren 3B dokuma kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini hesaplamayı ve analiz etmeyi amaçlamışlardır. Doğrusal elastik davranış varsayımı altında, NASA'nın PuMA yazılımı kullanılarak, malzemelerin bileşen verileri temelinde elastik özellikler üç ana yönde belirlenmiş ve etkili ortotropik mekanik özellikler elde edilmiştir. Çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk olarak, mikroskobik ölçekte gözenekli matris fazı analiz edilmiştir; ardından bu sonuçlar, elyafların mekanik özellikleriyle birlikte kullanılarak mezo ölçekte ipliklerin modellenmesinde kullanılmıştır; son olarak, bileşenlerden elde edilen sonuçlar homojenleştirilerek makroskobik ölçekte birim hücre davranışını modellemek için kullanılmıştır. Bu çalışmada incelenen 3B dokuma kompozitler, porozite değerleri 0 ile 0.6 arasında değişen fenolik reçine ve elyaf hacim oranları 0.5 ile 0.8 arasında değişen karbon fiber elyaflardan oluşmaktadır. Çalışmanın sonuçları, farklı matris porozitesi ve elyaf hacim oranlarının makro ölçekte mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymuş ve bu bulgular literatürdeki teorik ve yarı-ampirik ifadelerle doğrulanmıştır.

Goud ve ark. (2020) araştırmalarında, yüksek viskoziteli termoplastiklerin zayıf emprenye performansını iyileştirmek amacıyla Dr. Ernst Fehrer (DREF) elyaf eğirme ve elektrostatik toz kaplama gibi ön emprenye tekniklerini kullanmışlardır. Bu kapsamda, DREF yöntemiyle eğrilmiş hibrit elyaflar ve elektrostatik spreyci kaplama uygulanmış towpreg'ler kullanılarak 2B ve 3B dokuma kumaşlar üretilmiştir. Araştırmada, 2B kompozitlerin iki varyasyonu ile birlikte, 3B açılı iç kilitli ve 3B ortogonal dokuma yapılarından oluşan dört farklı varyasyonla toplam altı kompozit türü geliştirilmiştir. Farklı ön emprenye tekniklerinin, filament yapılarının ve dokuma desenlerinin

kompozit üretim süreçlerine etkisi değerlendirilmiş; mikro yapısal analizler için Mikro-CT görüntüleme gibi karakterizasyon yöntemleri kullanılmıştır.

Xu ve ark. (2020) araştırmalarında çok işlevli malzemelerin üretiminde çeşitli elyaflarla hibrit hale getirilen 3B dokuma kumaşların mekanik özelliklerini ve kırılma analizini sistematik olarak incelemeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, bakır tel/cam filament hibrit kompozitlerin iki farklı hibrit yapısı, tek yüzey bakır tel (SF-CW) ve çift yüzey bakır tel (DF-CW), üretilmiş ve test edilmiştir.

Shao ve ark. (2022) araştırmalarında dokuma tabakalı kompozitlerin düşük ara tabaka performansını iyileştirmek amacıyla tek taraflı ilmekli 2B dokuma lamine kompozitler (SWLC) olarak adlandırılan yeni bir kompozit türü önermişlerdir. Havacılık ve yüksek hızlı demiryolu sektörlerinde yaygın olarak kullanılan karbon fiber tabakalı kompozitler, yüksek özgül mukavemet ve rijitlikleri nedeniyle tercih edilmelerine karşın, zayıf ara tabaka özellikleri nedeniyle sınırlı uygulama alanlarına sahiptir. Bu yeni tasarımda, geleneksel 2B dokuma lamine kompozitlere (GWLC) ilmekli çözgü iplikleri eklenmiş ve bu ilmekler sayesinde elyafların alt tabakaya bağlanma şekli iyileştirilmiş, ayrıca tabakalar arasındaki elyaf hacim oranı artırılmıştır. SWLC'nin mekanik davranışları, deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar için, ince periyodik yapı temel alınarak bir birim hücre modeli oluşturulmuş ve 3B Hashin ile von-Mises kriterlerini kullanan bir hasar ilerleme modeli geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, deneysel verilerle iyi bir uyum göstermiştir.

Bu çalışma, 3B dokuma hibrit kumaşlardan üretilen kompozitlerin çekme, eğme ve kayma testleri altında mekanik davranışlarını sistematik olarak incelemeyi amaçlamaktadır. Üç farklı dokuma yapısı (Tip I: homojen yük dağılımlı, Tip II: tabakalar arası yerleşimli, Tip III: açılı elyaf yerleşimli) ve üç elyaf kombinasyonu (cam-cam, cam-polyester, polyester-cam) kullanılarak üretilen numuneler, yüksek mukavemet, deformasyon toleransı ve çok yönlü yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirilmiştir. Testler, ASTM standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar literatürdeki 2B ve 3B kompozit çalışmalarıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Literatürdeki çoğu araştırma (Mishra ve ark., 2022; Qi ve ark., 2022) tek bir test tipine (çekme veya eğme) odaklanırken, bu çalışma çekme, eğilme ve kayma testlerini entegre ederek kompozitlerin çok eksenli yük altındaki davranışını bütüncül bir şekilde değerlendirmiştir. Dokuma sürecinde kullanılan atkı ve çözgü sıklığı, elyaf dalgalanma oranı gibi parametrelerin mekanik özelliklere etkisi, Dahale ve ark. (2019) ile benzer yaklaşımlarla incelenmiş, ancak bu çalışmada endüstriyel ölçeklenebilirlik vurgulanmıştır. Awoke ve ark. (2024) ve Kanakannavar-Pitchaimani (2024) doğal elyaflı kompozitlere odaklanırken, bu çalışma geri dönüştürülebilir polyester ve cam elyafların kombinasyonunu kullanarak çevresel ayak izi düşük, yüksek performanslı bir alternatif sunmuştur. Tip III dokuma ve cam-polyester elyaf kombinasyonu, hafif ve yüksek darbe dirençli yapılar (örn: uçak kanat içi destekler, elektrikli araç batarya koruma sistemleri) için ideal bir adaydır. Kayma

dayanımı yüksek 3B kompozitler, depreme dayanıklı köprü bağlantı elemanlarında kullanılabilir. Elde edilen veriler, dijital ikiz teknolojisi ile entegre edilerek üretim süreçlerinin simülasyonunda kullanılabilir (Wielhorski ve ark., 2022).

Bu çalışma, 3B dokuma hibrit kompozitlerin mekanik performansını şekillendiren kritik parametreleri ortaya koyarak literatürdeki aşağıdaki boşlukları doldurmaktadır:

- i. Çoklu yükleme senaryolarına yönelik tasarım kılavuzu,
- ii. Hibrit iplik kombinasyonlarının sürdürülebilirliği,
- iii. Gerçek üretim koşullarına uygun validasyon.



3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşturulan ve bu malzemelerin üstün özelliklerini bir arada bulundurabilen ileri mühendislik ürünleridir (Perera ve ark., 2021). Gelişen teknolojiyle birlikte, 3B dokuma fiber teknolojisi ve yüksek mukavemetli matrislerin kullanımı, kompozit malzemelerin performansını artıran en önemli yenilikler arasında yer almaktadır. Bu malzemeler, 3B bir yapıya sahip olmaları, kendilerini oluşturan bileşenlerin en iyi özelliklerini tek bir yapı altında sunmaları ve uygulama alanlarına göre özelleştirilebilmeleri gibi özelliklerle dikkat çeker. Mikro düzeyde heterojen bir yapıya sahip olan kompozit malzemeler, makro düzeyde ise homojen bir görünüme sahiptir (Öztürk, Çobanoğlu ve Ece, 2024).

Kompozit malzemeler, sahip oldukları çok sayıda avantaj sayesinde geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine hitap etmektedir. Bu avantajlar, geleneksel malzemelere kıyasla kompozitleri ön plana çıkaran temel unsurlardır. Aşağıda kompozit malzemelerin başlıca avantajları ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır (Kumar, Seetharam ve Ponappa, 2024; Valente, Rossitti, Sambucci, 2023):

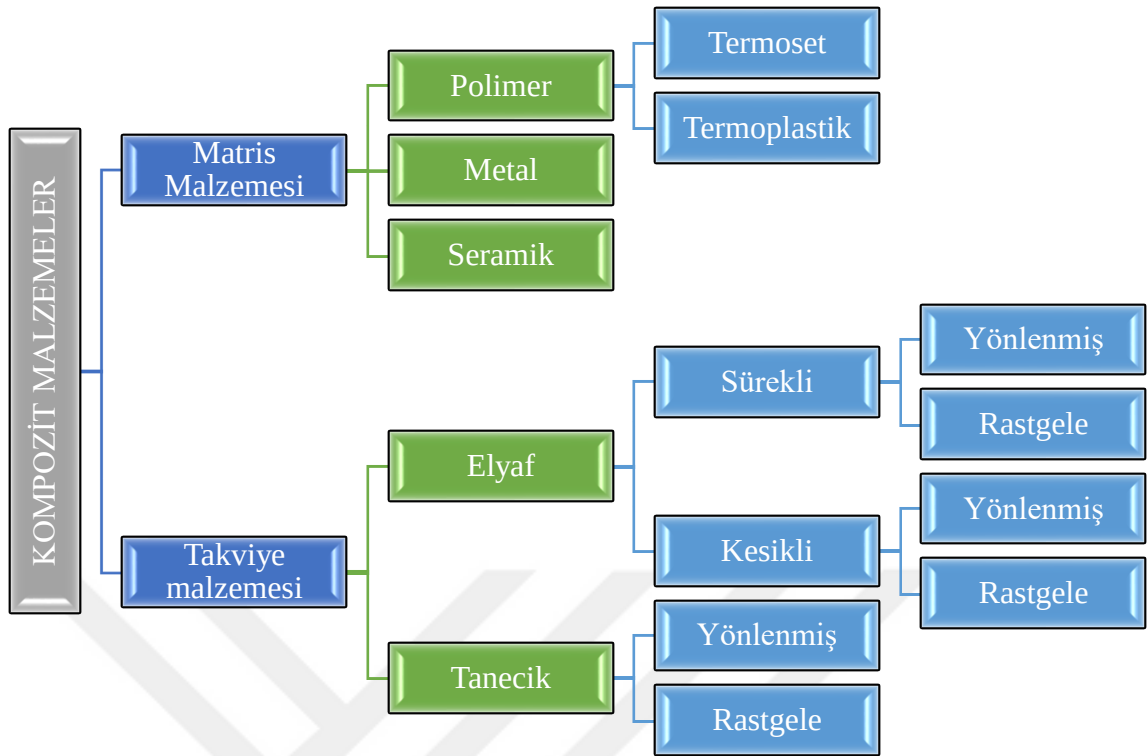
- Kompozit malzemelerin en önemli avantajlarından biri, farklı tür ve sayıda malzemenin bir araya getirilmesine olanak sağlamasıdır. Bu esneklik, belirli ihtiyaçlara uygun olarak yüksek mukavemetli, hafif, istenilen ölçülerde ve elektrik yalıtımı gibi özel özelliklere sahip yeni malzemelerin tasarlanmasını mümkün kılar. Böylece, mühendislik uygulamalarında arzu edilen performans özelliklerini karşılayan yenilikçi malzemeler geliştirilebilir.
- Kompozit malzemeler, özellikle metal alaşımlarına kıyasla korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Bu özellik, özellikle nem, kimyasal maddeler veya tuzlu su gibi aşındırıcı çevre koşullarına maruz kalan endüstriyel uygulamalarda kompozitlerin kullanımını artırmaktadır.
- Kompozit malzemelerin alaşımlara kıyasla daha kolay birleştirilebilmesi ve tek parça halinde üretilebilmesi, hem üretim maliyetlerini düşürmekte hem de üretim süreçlerini hızlandırmaktadır. Kalıplama teknikleri sayesinde, karmaşık geometrilere sahip ürünler kolaylıkla üretilebilir.
- Kompozitlerde matris olarak kullanılan reçineler, istenilen renklere boyanarak geniş bir estetik yelpaze sunar. Bu özellik, mimari tasarımlar ve tüketici ürünlerinde kompozitlerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Ayrıca, kompozit malzemelerin saydam olarak üretilebilmesi, sera yapıları ve güneş enerjisi kolektörleri gibi uygulama alanlarında tercih edilme oranını artırmaktadır.
- Beton, ahşap ve metal yüzeylere güçlü bir şekilde yapışabilen kompozit malzemeler, yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Üretim sürecinde kullanılan reçinelerin bu yüzeylere sızarak kaynaşma özelliği göstermesi, yapıların dayanıklılığını artıran bir avantaj sağlamaktadır.

- Yanma özelliği göstermeyen özel matrisler kullanılarak üretilen kompozit malzemeler, yangına dayanıklılık gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklara karşı direnç göstererek şekil değiştirme veya yumuşama gibi sorunlar yaşamadan stabil bir performans sergiler.
- Kompozit malzemelerin hasar görmesi durumunda onarım yapılabilmesi, uzun vadeli kullanım açısından önemli bir avantajdır. Ancak, bu onarım işlemi dikkat ve özen gerektirmektedir.
- Kompozit malzemeler, elmas veya sert çelik uçlu aletlerle kesilebilir ve delinebilir. Bu özellik, kompozitlerin çeşitli üretim süreçlerinde kolayca işlenmesine olanak tanır.

Kompozit malzemeler, otomotivden havacılığa, inşaattan enerji sektörüne kadar pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle hafiflik ve mukavemetin kritik önem taşıdığı uzay ve savunma sanayii gibi ileri teknoloji gerektiren uygulamalarda kompozitlerin kullanımı giderek artmaktadır. Ayrıca, sürdürülebilir malzeme teknolojileri konusundaki gelişmeler, çevre dostu kompozit malzemelerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır (Seydibeyoglu ve ark., 2023).

3.1. Kompozit Malzemelerin Yapısal ve İşlevsel Kriterlere Göre Sınıflandırılması

Mekanik dayanımı artırmak amacıyla kullanılan elemanlar, takviye fiberleridir. İkincisi ise bu takviye elemanlarını bir arada tutarak yük aktarımını sağlayan ve malzemenin şekil bütünlüğünü koruyan matris fazıdır. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında, genellikle bu iki ana bileşenin türü belirleyici rol oynar. Takviye elemanının yapısal özellikleri (fiber tipi, geometrisi, yönelimi) ve matris malzemesinin kimyasal yapısı (polimer, metal veya seramik bazlı) malzemenin performansını ve uygulama alanını doğrudan etkiler. Bu nedenle, kompozit malzemeler genellikle bileşenlerin türüne ve kombinasyonuna bağlı olarak kategorize edilmektedir (Şekil 3.1). Bu tür bir sınıflandırma, malzemenin işlevsel özelliklerini daha iyi anlamayı ve belirli uygulamalara uygun malzeme seçimini kolaylaştırmayı amaçlar (Erdem, 2019).



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [Mahadik ve ark., 2010]

3.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, elyafların bir polimer matrisle birleştirilmesi yoluyla oluşturulan ve üstün mekanik özellikleri sayesinde geniş bir uygulama alanına sahip olan ileri teknoloji malzemeleridir. Bu kompozit malzemeler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci, termal kararlılık ve dayanıklılık gibi özellikleriyle modern mühendislik ve sanayi sektörlerinde devrim yaratmıştır. Özellikle otomotiv, inşaat, havacılık ve denizcilik gibi kritik endüstrilerde kullanılan elyaf takviyeli kompozitler, geleneksel malzemelere kıyasla hafiflik ve dayanım açısından önemli avantajlar sağlamaktadır (Khalid ve ark., 2021).

Elyaf türleri genel olarak sentetik ve doğal elyaflar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Her bir elyaf türü, farklı uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde özgün özellikler sergilemektedir.

Sentetik elyaflar, mühendislik uygulamalarında sıklıkla kullanılan yüksek performanslı elyaflardır. Cam, karbon ve aramid elyaflar, bu grubun başlıca temsilcileridir.

Cam Elyaflar: Ekonomik olmaları ve yüksek çekme mukavemeti sunmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir elyaf türüdür. Özellikle genel mühendislik uygulamalarında tercih edilen cam elyaflar, iyi bir kimyasal dayanım ve ısı direnci sunmaktadır. Ayrıca, üretim kolaylığı ve düşük maliyetleri, bu elyafların yaygın kullanımını desteklemektedir.

Karbon Elyaflar: Olağanüstü mekanik mukavemet ve rijitlik özellikleriyle dikkat çeken karbon elyaflar, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Havacılık, otomotiv ve

spor ekipmanları gibi alanlarda hafiflik ile mukavemet arasında optimum denge sunarak kritik bir rol oynamaktadır.

Aramid Elyaf lar: Mükemmel darbe direnci ve ısı dayanıklılığı özellikleriyle öne çıkan aramid elyaf lar, özellikle balistik zırh ve koruyucu ekipman gibi özel uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılıkları ve enerji yutma kapasiteleri, bu elyaf ları termal ve mekanik yüklere karşı ideal hale getirmektedir.

Doğal elyaf lar, sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim gereksinimlerine uygun bir alternatif sunmaktadır. Ket en, jüt, sisal, bambu ve hindistan cevizi lifi gibi bitkisel kökenli elyaf lar, düşük maliyetleri ve biyolojik olarak parçalanabilirlik özellikleri sayesinde giderek daha fazla tercih edilmektedir (Shubham ve Ray, 2024). Bunun yanı sıra, doğal elyaf ların hafifliği ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi, modern çevre politikalarına uygun bir çözüm sunmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitler, denizcilik sektöründe gemi ve tekne yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif yapıları, gemilerin yakıt tüketimini azaltırken, korozyona karşı dirençleri uzun ömürlü dayanıklılık sağlamaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin tasarım esnekliği sunması, yenilikçi deniz araçlarının geliştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu özellikler, özellikle kompozit yelken direkleri, gövde panelleri ve üst yapılar gibi bileşenlerde tercih edilmelerini sağlamaktadır (Okuma ve Obaseki, 2023). Elyaf takviyeli kompozitler, inşaat sektöründe yapısal güçlendirme projelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek çekme mukavemeti ve esneklik sunmaları, köprüler, bina güçlendirme projeleri ve altyapı çalışmalarında kullanılmalarını teşvik etmektedir. (Su ve ark., 2023). Otomotiv ve havacılık endüstrilerinde elyaf takviyeli kompozitler, hafiflik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda vazgeçilmezdir. Kompozit malzemeler, araçların toplam ağırlığını azaltarak yakıt verimliliğini artırırken, aynı zamanda güvenlik standartlarını karşılamak için gerekli olan mekanik mukavemeti sağlar. Havacılık uygulamalarında ise karbon elyaf takviyeli kompozitler, uçak kanatları, gövde panelleri ve motor bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler (PTK), bir matris malzemesi içerisine eklenen takviye parçacıkları ile mekanik özelliklerin artırılmasını hedefleyen gelişmiş malzemelerdir. Bu tür kompozit malzemeler, özellikle mukavemet, sertlik, erozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi kritik mühendislik özelliklerini optimize etmek için tercih edilmektedir. Parçacık takviyeli kompozitlerin performansı, kullanılan takviye parçacıklarının boyutu, dağılımı, hacim oranı ve matris ile arayüzey etkileşimleri gibi bir dizi parametreye bağlıdır. Bu faktörlerin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, yüksek performanslı PTK'ların tasarlanması ve optimize edilmesi için büyük önem taşımaktadır (Abd-Elaziem ve ark., 2023).

Takviye parçacıklarının boyutu, parçacık takviyeli kompozitlerin temel mekanik özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu ilişki, özellikle kompozitin akma gerilmesi üzerinde belirgin bir şekilde görülmektedir. Küçük parçacıklar matris malzemesi ile daha geniş bir yüzey alanı etkileşimi sunarak akma gerilmesini artırır. Ancak bu artış, belirli bir boyut sınırına kadar mümkündür; daha küçük parçacıkların eklenmesi, parçacık-matris arayüzeyinde gevşeme veya kusur oluşumuna neden olabilir. Benzer şekilde, büyük parçacıklar, matris içerisinde daha az bağlanma alanı oluşturarak akma gerilmesini azaltabilir (Zhang & Liu, 2024). Bu mekanizma, yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda istenen özelliklere sahip PTK'ların tasarımında kritik bir rol oynamaktadır.

Parçacık takviyeli kompozitlerin performansı, yalnızca parçacık boyutuna değil, aynı zamanda kullanılan takviye türüne ve bu takviyelerin matris malzemesi ile oluşturduğu arayüzey etkileşimlerine de bağlıdır. Farklı takviye materyalleri, PTK'ların erozyon direnci, sertlik ve dayanıklılık gibi özelliklerini farklı şekillerde etkileyebilir (LeMahieu, 2023). Arayüzey etkileşimlerinin güçlendirilmesi, PTK'ların performansını artırmada kritik bir adımdır. Bağlayıcı malzemelerin ve yüzey modifikasyonlarının kullanımı, matris-takviye arayüzeyinin mekanik dayanımını artırabilir (Yan ve ark., 2023).

Parçacık takviyeli kompozitlerde erozyon mekanizmaları, kullanılan takviye türüne ve matris malzemesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yüksek aşındırıcı ortamlarda, matris ve takviye parçacıkları arasındaki bağın gücü, erozyon direncini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Kauçuk ve zirkonya takviyelerinin erozyon direncini artırma potansiyeli, bu malzemelerin esneklik ve enerji dağıtım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşın, sert fakat kırılgan olan alümina takviyeler, matris malzemesi ile arayüzeyde yeterli enerji yutma mekanizmalarını sağlayamadıkları için erozyon direncinde sınırlı bir iyileşme göstermektedir (LeMahieu, 2023). Erozyon direncini artırmak için önerilen stratejilerden biri, parçacık takviyeli kompozitlerde çoklu takviye türlerinin bir arada kullanılmasıdır (Annamalai, Anand Ronald ve Ebenezer, 2023).

3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin tabakalar halinde birleştirilmesi yoluyla oluşturulan, üstün mekanik performans sunan yenilikçi mühendislik ürünleridir. Bu malzemeler, her bir tabakanın kendine özgü avantajlarını bir araya getirerek, yüksek mukavemet, tokluk, düşük ağırlık, korozyon direnci ve zorlu çevresel koşullara dayanıklılık gibi özellikler sunmaktadır. Tabakalı yapılar, tasarım ve uygulama esnekliği ile çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin üstün performansları, yapılarında kullanılan malzemelerin türüne ve üretim yöntemlerine bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir (Jiang ve ark., 2024).

Tabakalı kompozit malzemelerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, tabakalar arasındaki sinerjik etkileşimler sayesinde bireysel malzemelerin özelliklerinin bir araya gelerek optimize edilmesidir. Bu yapıdaki malzemeler, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özelliklerin yanı sıra, termal, elektriksel ve kimyasal performans açısından da istenilen seviyelere ulaşabilmektedir. Kullanılan malzeme türüne göre tabakalı kompozitler, metal-seramik, seramik-karbon fiber, nanofibrik ve polimer bazlı kompozitler gibi çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Her bir sınıf, farklı uygulama ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde geliştirilmiştir.

Metal-seramik kompozitler, zorlu çevresel koşullarda yüksek performans sergileyen malzeme gruplarından biridir. Özellikle titanyum, tantal ve hafniyum gibi metallerle seramiklerin kombinasyonu, mekanik mukavemeti artırmakta ve yüksek sıcaklık dayanımı sağlamaktadır (Kamynina ve ark., 2023).

Üç tabakalı magnezya kompozitler, düşük ısı iletkenlikleri ($0.115 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$) ve çevresel dayanıklılıkları ile dikkat çekmektedir. Bu tür malzemeler, maliyet etkin olmalarının yanı sıra sürdürülebilirlik açısından da avantajlıdır. Hafiflik ve ısıl kararlılık gibi özellikleri, magnezya kompozitlerini enerji tasarrufu gerektiren uygulamalarda ideal bir seçenek haline getirmektedir. Özellikle yalıtım malzemeleri ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren yapı bileşenlerinde kullanılmaktadır (Miruyuk, 2023).

Tabakalı seramik/karbon fiber kompozitler, mükemmel mukavemet ve tokluk gibi üstün mekanik özellikler sergilemektedir. Bu özellikler, malzemenin enerji yutma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Çatlak sapması ve fiber çekme gibi mekanizmalar, malzemenin mukavemetini artırırken aynı zamanda çatlak ilerlemesini kontrol altına almaktadır. Bu tür kompozitler, havacılık ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Bai ve ark., 2021).

Tabakalı kompozit malzemelerin üretim süreçleri, malzeme performansı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Üretim teknikleri arasında kendiliğinden ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi, elektrospinning, sıcak presleme ve tabaka birleştirme gibi yöntemler bulunmaktadır. Ancak, bu süreçlerin her biri, maliyetler ve üretim hızı gibi faktörlerle ilgili zorluklar barındırmaktadır. Özellikle endüstriyel ölçekte üretim, homojen malzeme özelliklerinin sağlanması, proses tekrarlanabilirliği ve malzeme israfının en aza indirilmesi gibi konular açısından zorluklar sunmaktadır. Tabakalar arası bağların zayıf olması, malzeme özelliklerinin tutarsızlığına yol açabilmektedir. Bu nedenle, üretim süreçlerinin optimize edilmesi, tabakalı kompozitlerin endüstriyel ölçekte daha yaygın kullanımını mümkün kılmak için kritik bir araştırma hedefi olarak ortaya çıkmaktadır (Wu ve ark., 2023).

Gelecekte, tabakalı kompozit malzemelerin sürdürülebilirliği ve çevresel etkilerinin azaltılması yönünde önemli gelişmeler beklenmektedir. Yenilikçi malzeme kombinasyonları ve ileri üretim teknikleri, bu malzemelerin performansını daha da artırırken üretim maliyetlerini düşürme

potansiyeline sahiptir. Özellikle akıllı malzeme sistemleriyle entegre edilen tabakalı kompozitler, kendiliğinden onarım, sensör entegrasyonu ve enerji hasadı gibi özelliklerle donatılarak geleceğin mühendislik ihtiyaçlarına cevap verecektir (Liu ve ark., 2023).

3.1.4. Hibrid (Karma) Kompozitler

Hibrit kompozitler, tek bileşenli malzemelerin sınırlı özelliklerini aşarak, farklı elyaf ve matris malzemelerinin birleştirilmesi yoluyla elde edilen üstün performans özellikleri ile malzeme bilimi ve mühendisliği alanında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Bu yenilikçi malzeme türü, mühendislikten biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir yelpazede benzersiz avantajlar sunmaktadır. Hibrit kompozitlerin temel çekiciliği, farklı elyaf türlerinin ve matrislerin dikkatli bir şekilde seçilerek kombinasyonunun, bireysel bileşenlerin ayrı ayrı sağlayamayacağı üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikleri mümkün kılmasıdır. Bu bağlamda hibrit kompozitler, mekanik mukavemet, yorulma direnci, hafiflik ve çok yönlülük gibi aranan özellikleri tek bir yapı içerisinde birleştirme potansiyeline sahiptir (Natravan ve Kaliappan, 2023).

Hibrit kompozitler, genellikle birden fazla türde elyafın ve matrisin tek bir yapı içerisinde harmanlanmasıyla oluşturulmaktadır. Bu yapı, biyo elyaflar (keten, jüt, sisal vb.), sentetik elyaflar (cam, karbon, aramid vb.) ve metal elyaflar (alüminyum, bakır vb.) gibi farklı elyaf türlerini içerebilir. Elyafların kombinasyonu, her bir elyaf türünün sunduğu belirli avantajların optimum şekilde bir araya getirilmesini sağlar. Bunun yanı sıra, metal elyafların termal iletkenlik ve mukavemet özellikleri de hibrit kompozitlerde büyük önem taşır (Patel ve ark., 2014).

Matris sistemi de hibrit kompozitlerin performansında kilit bir rol oynamaktadır. Matrisler, polimer esaslı (epoksi, poliester vb.), metal esaslı (alüminyum, magnezyum vb.) veya seramik esaslı (silikon karbür vb.) olabilir. Hibrit kompozitlerde, birden fazla matris tipi de kullanılabilmektedir. Bu durum, iç içe geçmiş ağ yapıları oluşturarak malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını artırmaktadır.

Hibrit kompozitlerin üretiminde kullanılan yöntemler, malzemenin nihai özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Özellikle sürtünme karıştırma kaynağı (FSW), hibrit kompozitlerin birleştirilmesi için son yıllarda öne çıkan bir yöntem olmuştur. FSW, malzemelerin katı fazda birleştirilmesini sağlayarak, yüksek kaliteli ve minimum kusurlu kaynaklar üretmektedir. Bu yöntem, özellikle mekanik mukavemeti artırma ve termal bozulmayı önleme açısından hibrit kompozitler için büyük bir avantaj sunmaktadır (Jain ve Kathuria, 2024).

Bunun yanı sıra, emdirme ve kapsülleme gibi yöntemler, özellikle organik-inorganik hibrit kompozitlerin biyomedikal uygulamadaki performansını belirlemede önemli bir rol oynar. Emdirme yöntemi, matrisin elyaflarla tam anlamıyla bütünleşmesini sağlarken, kapsülleme yöntemi genellikle aktif bileşenlerin kontrollü salınımını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu

yöntemler, malzemenin biyouyumluluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve uzun vadeli stabilite gibi kritik özelliklerini iyileştirebilmektedir (Singh ve ark., 2019).

Hibrit kompozitler, biyomedikal mühendisliği ve yapısal mühendislik gibi çeşitli disiplinlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Biyomedikal alanda, bu malzemeler biyolojik olarak parçalanabilirlikleri, biyouyumlulukları ve çok yönlü mekanik özellikleri nedeniyle büyük bir ilgi görmektedir. Özellikle ilaç taşıma sistemlerinde, biyo-görüntülemeye ve kemik ikamesi materyalleri olarak kullanılmaktadırlar. Bu tür malzemeler, aynı zamanda kemiğin doğal yapısına benzer mekanik özellikler sunarak ortopedik uygulamalarda etkili bir alternatif sunmaktadır (Singh ve ark., 2019).

Yapısal mühendislikte ise hibrit kompozitler, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyon direnci ve termal kararlılık gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde, hibrit kompozitler hafiflik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Ayrıca, bu malzemeler özel performans gereksinimlerini karşılamak üzere özel olarak tasarlanabilmekte ve mühendislik projelerinde geniş bir tasarım özgürlüğü sunabilmektedir.

Hibrit kompozitlerin sunduğu çok sayıda avantajın yanı sıra, bu malzemelerin kompleks mekanik davranışlarını anlamak ve değerlendirmek de önemli bir zorluk teşkil etmektedir. Elyaf ve matrisler arasındaki karmaşık etkileşimlerin anlaşılması, bu malzemelerin performansını doğru bir şekilde tahmin etmek için gelişmiş analitik ve deneysel araçların kullanılmasını gerektirir. Ayrıca, üretim sürecindeki parametrelerin optimize edilmesi, malzeme kusurlarını en aza indirmek ve tekrarlanabilir performans sağlamak açısından kritik öneme sahiptir (El Aal, Avd Allah ve Abd El-baky, 2023).

Gelecekte, hibrit kompozitlerin geliştirilmesinde sürdürülebilirlik ve çevre dostu yaklaşımlar daha fazla önem kazanacaktır. Özellikle biyo esaslı elyafın ve çevre dostu matrislerin kullanımı, bu malzemelerin çevresel etkilerini azaltırken, performans özelliklerinden ödün verilmemesini sağlayacaktır. Ayrıca, yeni nesil hibrit kompozitler, akıllı malzeme sistemleriyle entegre edilerek, kendi kendini onarma, çevresel koşullara adaptasyon ve enerji hasadı gibi özelliklerle donatılabilir.

3.2. Dokuma Kumaş Kompozitler

Tekstil preformları, malzeme bilimi ve kompozit üretiminde temel bir bileşen olarak elyafın belirli bir düzen içinde organize edilmesiyle oluşturulan yapısal iskeletlerdir. Bu preformlar, elyaf oryantasyonu, dolaşıklık düzeyi ve geometrik yapılarına göre geniş bir çeşitlilik sergilemektedir. Bir tekstil preformunun mimarisi, son kullanım gereksinimlerine bağlı olarak basit düzlemsel tabakalardan karmaşık 3B ağ yapılarına kadar değişebilir. Bu çeşitlilik, tekstil preformlarının mekanik performans, tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı gibi özelliklerini belirlemede kritik bir öneme sahiptir (Dejene ve Gudayu, 2024).

Bir tekstil preformunun temel mimari özellikleri, kullanılan elyafların oryantasyonu, örgü yapısı, tabaka sayısı ve oluşturulan geometrik şekiller tarafından belirlenir. Elyaf oryantasyonu, malzemenin yük taşıma kapasitesini ve mekanik davranışını doğrudan etkilerken, dolaşıklık ve bağlanma gibi özellikler, preformun bütünlüğünü ve işlenebilirliğini belirler. Mimari yapıdaki bu varyasyonlar, tekstil preformlarının uygulama alanlarına göre özelleştirilebilmesini sağlar. Elyaf oryantasyonu tek yönlü (unidirectional), çift yönlü (bidirectional) veya çok yönlü (multidirectional) düzenlemeler içerebilir. Tek yönlü oryantasyon, çekme mukavemeti gerektiren uygulamalar için ideal bir çözüm sunarken, çok yönlü düzenlemeler, karmaşık yükleme koşulları altında daha dengeli bir mekanik performans sağlar (Verma ve Majumdar, 2024).

Tekstil preformları genel olarak tek yönlü, düzlemsel (2B) ve tamamen entegre (3B) olmak üzere üç ana kategoriye ayrılabilir. Bu sınıflandırma, preformun yapısal geometrisi ve kullanım amaçlarına göre daha detaylı alt gruplara ayrılabilir (He, Sayam ve Gao, 2024).

Tek Yönlü Dokuma Tekstil Kompozitler: Tek yönlü preformlar, elyafların tek bir yönde paralel olarak dizildiği basit yapılardır. Bu preformlar, yüksek çekme mukavemeti ve rijitlik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve otomotiv sektörlerinde, bu tür preformlar genellikle karbon veya cam elyaflarla hazırlanarak yüksek mukavemet-ağırlık oranı sağlanmaktadır (Liu ve ark., 2024).

Düzlemsel (2B) Dokuma Tekstil Kompozitler: Düzlemsel preformlar, elyafların 2B bir düzlem üzerinde düzenlendiği yapılardır. Dokuma kumaşlar, elyafların dik açılarla bir araya geldiği ve düz dokuma veya saten dokuma gibi alt sınıflara ayrıldığı bir yapıya sahiptir (Lin ve ark., 2023).

Düz Dokuma Kumaşlar: Elyafların sıkı bir düzen içinde dokunduğu basit yapılar olup yüksek mukavemet ve boyutsal kararlılık sağlar (Xu ve ark., 2023).

Satin Dokuma Kumaşlar: Daha esnek ve pürüzsüz bir yapı sunarak karmaşık geometrik şekillerin oluşturulmasına imkân tanır (Xu ve ark., 2023). Bu preformlar, genellikle hafiflik ve esneklik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Özellikle rüzgâr türbin kanatları ve deniz araçları gibi mühendislik yapılarında, 2B preformlar yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Liu ve ark., 2024).

Hacimsel (3B) Kendiliğinden Dokuma Tekstil Kompozitler: 3B preformlar, kompleks 3B geometrilere sahip yapılar olup, elyafların 3B bir ağ içinde düzenlenmesiyle oluşturulmaktadır. Bu preformlar, elyafların üç ekseninde sürekli bir düzen içinde olduğu yapılar sunarak üstün mekanik performans sağlar. 3B dokuma, delaminasyon direncini artırmak ve yük transferini optimize etmek için idealdir. Özellikle havacılık ve savunma sektörlerinde, karmaşık ve hafif yapısal bileşenler için tercih edilmektedir (Majumdar ve ark., 2023). Tekstil preformlarının yapısal geometrisi, yalnızca mekanik performansı değil, aynı zamanda üretim sürecini ve maliyeti de etkiler. Dokuma preformlarda kullanılan örgü tipi, preformun esneklik ve yoğunluk gibi özelliklerini belirler. Ayrıca 3B dokuma preformlar, yüksek yük taşıma kapasitesi ve çatlak ilerlemesine karşı direnç gerektiren uygulamalar için daha uygundur (Rubino ve ark., 2024). Tekstil preformları, geniş bir endüstriyel

uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Havacılık, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları gibi alanlarda, bu preformlar yenilikçi çözümler sunmaktadır. Yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve termal dayanıklılık özellikleri, tekstil preformlarını uçak gövdeleri, kanat yapıları ve uzay araçları için ideal bir malzeme haline getirir. Hafiflik ve enerji emme kapasitesi, araç bileşenlerinde yakıt tüketimini azaltırken güvenlik standartlarını artırır. 2B ve 3B preformlar, yapı güçlendirme projelerinde ve betonarme elemanlarda üstün performans sağlar. Spor malzemelerinde esneklik, hafiflik ve dayanıklılık sunarak performansı artırır (Korkmaz, 2023). Tekstil preformlarının geliştirilmesi, daha karmaşık ve yüksek performanslı kompozit yapıların tasarımına olanak tanımaktadır.

3.2.1. Tek Yönlü Sistemler

Tek yönlü sistemler, elyafların sürekli ve tek bir doğrultuda düzenlendiği filament yapılar olup, elyafların sürekliliği ve doğrusal yerleşimi açısından en yüksek düzeyde performans sunan kompozit malzeme tasarımlarındandır. Bu sistemler, özellikle elyaf yönü boyunca yük taşıma kapasitesini optimize eden mekanik özellikleri sayesinde, yüksek mukavemet ve rijitlik gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek yönlü sistemler, farklı açılarda tabakalandırma (angle-ply) yerleşimler ve filament sarım yapıları gibi özel uygulamalara uygunluklarıyla dikkat çekmektedir (Wan ve ark., 2023).

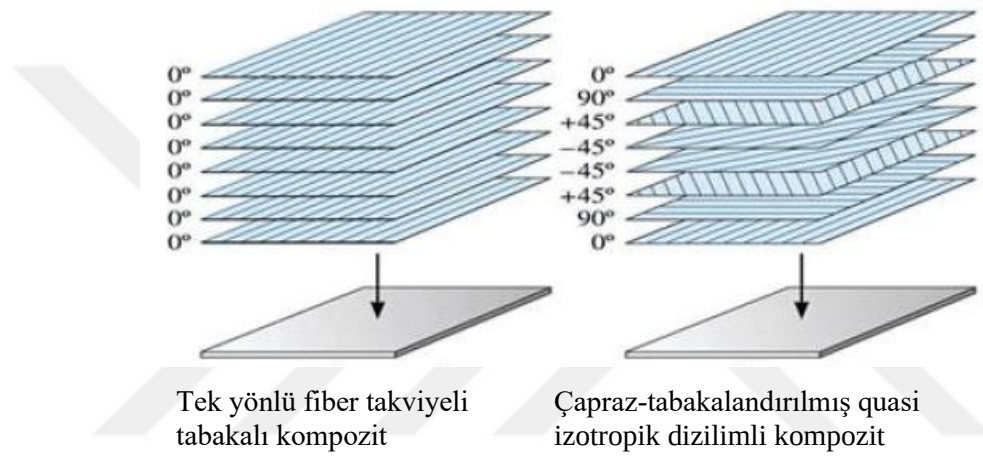
Tek yönlü elyaflar, ticari olarak prepreg (önceden reçine matris emdirilmiş) bantlar halinde üretilir. Bu süreçte, elyaflar bir hat boyunca hizalanarak bant formunda düzleştirilir ve ardından makaralara sarılır. Prepreg üretiminde kullanılan reçine, viskozitesini düşürmek için ısıtılarak elyafların üzerinde düzgün bir şekilde dağılır ve elyafları bir arada tutacak şekilde emprenye edilir. Böylece, kompozit malzemenin özellikleri belirli bir doğrultuda optimize edilebilir. Şekil 3.2, bu tür bir prepreg tabaka tasarımını göstermektedir (Shabberhussain, 2024).



Şekil 3.2. Prepreg tabaka (Shabberhussain, 2024)

Tek yönlü prepreg tabakalar, elyafların düzenlendiği doğrultuda yüksek çekme mukavemeti ve rijitlik sunarak, malzeme özelliklerinin istenen yönde özelleştirilmesine olanak tanır. Bu doğrultuda, kompozit tasarımında belirli bir yöneline ihtiyaç duyulan yerlerde, tek yönlü sistemler mükemmel bir çözüm sunar (Lunetto, Galati, Settineri ve Luliano, 2023).

Tek yönlü sistemler, genellikle farklı açılı tabakalı kompozit yapılarda kullanılır. Bu tür yerleşimler, elyaf yönü boyunca üstün mekanik performans sağlarken, farklı elyaf yönelimlerinin kombinasyonu ile belirli mekanik özelliklerin dengelenmesine olanak tanır (Gupta, Pal ve Ray, 2023). Şekil 3.3, tek yönlü ve çok yönlü laminasyon yerleşimlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Ancak, tek yönlü sistemlerin bir dezavantajı, laminasyon yapısının düzlem dışı yüklere karşı zayıf tokluk ve düşük interlaminar dayanım göstermesidir.



Şekil 3.3. Tek ve çok yönlü tabakalar (Ramesh ve Deepa, 2024)

Tek yönlü tabakalar, düzlem dışı yükleme durumlarında genellikle sınırlı dayanım sergiler. Bu durum, tabakalar arasındaki zayıf bağlanma dolayısıyla düşük interlaminar mukavemet ile ilişkilidir. Yüksek çekme ve eğilme mukavemeti sunmalarına rağmen, bu tür tabakalandırılmış yapılarda, zayıf tokluk malzemenin çatlak oluşumu ve delaminasyon gibi mekanizmalarla hasar görmesine neden olabilir. Bu sınırlama, özellikle havacılık, otomotiv ve enerji sektörlerinde karşılaşılan karmaşık yükleme durumları için bir zorluk teşkil etmektedir. Düşük interlaminar dayanım ve zayıf tokluk özelliklerini iyileştirmek için matris sistemlerinde yapılan modifikasyonlar, tek yönlü sistemlerin performansını kısmen artırabilir. Ancak, bu durum ise malzemenin sıcak/ıslak ortam koşullarındaki performansını sınırlayabilir (Wan ve ark., 2023).

Tek yönlü elyaf kumaşların avantajları şöyledir (Waskitho, 2024):

Yüksek Mekanik Performans: Elyaf yönü boyunca üstün çekme mukavemeti ve rijitlik sunar.

Özelleştirilebilir Özellikler: Elyafların düzenlenişi, belirli bir doğrultuda malzeme özelliklerinin optimize edilmesine olanak tanır.

Tasarım Esnekliği: Farklı açılarda tabakalandırma veya filament sarımlı yapılar gibi çeşitli tasarım konseptlerinde kullanılabilir.

Bu tür kumaşların limitleri ise aşağıdaki gibidir (Fazlali, Lomov ve Swolfs, 2024):

Düşük Interlaminar Dayanım: Tabakalar arasındaki zayıf bağlanma, düzlem dışı yüklemelerde malzemenin performansını sınırlar.

Zayıf Tokluk: Çatlak oluşumu ve delaminasyona karşı düşük direnç gösterir.

Sıcak/Israk Ortam Kısıtlamaları: Modifiye matrislerin kullanımı, yüksek sıcaklık ve nem koşullarında sınırlı olabilir.

Tek yönlü kumaşların gelecekteki uygulamaları, malzeme bilimi alanındaki aşağıdaki gelişmelerle daha da genişleyecektir (Waskitho, 2024):

Nanoteknoloji Entegrasyonu: Karbon nanotüplerin veya grafenin matris sistemlerine entegre edilmesi, mekanik performansı artırabilir.

Akıllı Materyaller: Kendini onarma özelliği gösteren matrislerin geliştirilmesi, malzemenin hasar toleransını artırabilir.

Sürdürülebilir Malzemeler: Çevre dostu reçineler ve doğal elyafların kullanımı, tek yönlü elyaf takviyeli sistemlerin çevresel etkisini azaltabilir.

3.2.2. (2B) Düzlemsel Kumaşlar

2B düzlemsel kumaşlar, elyafların düzlemsel bir yapı içinde düzenlenmesiyle oluşturulan tekstil preformlarıdır ve genellikle dokuma, örme ve örgü gibi çeşitli tekstil teknolojileri kullanılarak üretilir. Bu kumaşlar, sürekli elyafların sürekliliğini sağlamakla birlikte, elyafların kıvrılması ve yön değiştirmesi gibi yapısal faktörler nedeniyle mekanik özelliklerde belirli sınırlamalar gösterebilir. Elyaf kıvrılmaları, özellikle çekme mukavemeti ve rijitlik gibi özellikleri olumsuz etkileyebilir. Bununla birlikte, düzlemsel kumaş preformlar, geniş bir uygulama alanında maliyet etkin, esnek ve üretimi kolay bir çözüm sunarak modern mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır (He, Seyam ve Gao, 2024).

Dokuma kumaşlar, iki grup sürekli elyafın dik açıyla birbiriyle kesiştiği ve genellikle atkı (weft) ve çözgü (warp) olarak adlandırıldığı bir yapı oluşturur. Çözgü elyafları kumaşın uzunlamasına eksenini boyunca, atkı elyafları ise enine eksenini boyunca düzenlenir. Bu düzenleme, kumaşın geometrik bütünlüğünü sağlayan ve elyafların bir arada tutulmasını mümkün kılan temel yapıdır. Dokuma kumaşların yapısal düzenlemeleri, farklı dokuma teknikleri ile değişkenlik gösterebilir. Bu düzenlemeler, kumaşın mekanik özellikleri ve uygulama potansiyelini belirler. Dokuma türleri ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır (Chowdhury ve Summerscales, 2024):

Plain Dokuma: Elyafların birbirine sıkı bir şekilde geçtiği en temel dokuma türüdür. Plain dokuma kumaşlar, yüksek boyutsal kararlılık ve düşük kayma eğilimi gibi avantajlar sunar. Ancak, elyaf kıvrılmalarının yoğunluğu nedeniyle çekme mukavemeti bir miktar azalabilir.

Twill dokuma elyafların daha eğimli bir açıyla geçtiği bu yapı, daha esnek bir kumaş yüzeyi sunar. *Twill dokuma*, *plain dokuma*ya kıyasla daha az kıvrılma içerir ve bu nedenle belirli uygulamalarda tercih edilebilir.

Satin Dokuma: Elyafların daha seyrek ve düzgün bir şekilde düzenlendiği dokuma kumaşlar, yüksek yüzey düzgünlüğü ve esneklik sağlar. Ancak, bu yapı mekanik dayanım açısından *plain dokuma* kadar güçlü değildir.

Dokuma kumaşların mekanik performansı, elyafların düzenlenişi, dokuma tipi ve elyafların matrise entegrasyon şekli gibi birçok faktörden etkilenir. Düzlemsel 2B dokuma kumaşlarda, elyaf kıvrılması ve eğimi, özellikle çekme yükleri altında mekanik özelliklerin bir miktar azalmasına yol açabilir. Bu durum, elyafların yük taşımada tam anlamıyla etkin bir şekilde katkıda bulunmasını engelleyebilir. Bununla birlikte, dokuma kumaşlar, elyafların düzenli ve sıkı bir şekilde bir arada tutulmasını sağladığı için boyutsal kararlılık ve kolay işlenebilirlik açısından avantajlar sunar (Abtew ve ark., 2024).

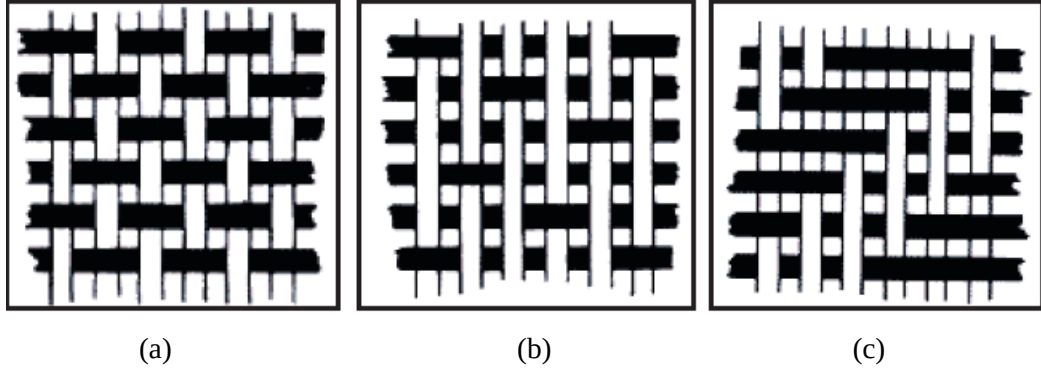
Dokuma kumaşlar, çözgü (0° yönü) ve atkı (90° yönü) olmak üzere iki filament setinin birbirine dik açılarla birleştirilmesiyle elde edilen tekstil yapılarıdır. Bu kumaşlar, dokuma tezgahlarında üretildikleri için, elyafların belirli bir düzen ve sıklıkta bir araya getirilmesini sağlar. Elyafların bu düzenli yerleşimi, kompozit malzemelerde çözgü ve atkı yönlerinde üstün mekanik özellikler elde edilmesine imkân tanır. Özellikle daha iyi elyaf hizalaması ve daha yüksek elyaf hacim oranı sunmaları nedeniyle, dokuma kumaşlar, örme veya örgülü yapılar gibi alternatif tekstil preformlarına kıyasla mekanik performans açısından önemli avantajlar sağlar (Zhang ve ark., 2024).

Bu kumaşlar, içerdikleri elyafların yerleşim düzenine ve iç içe geçme modeline göre farklı mekanik ve fiziksel özellikler sunar. Bu özellikler, kompozit üretim süreçlerinde ve nihai ürün performansında kritik bir rol oynar (Li, Wang, Boussu ve Soulat, 2022; Verma ve Majumdar, 2024).

Dokuma kumaşlar, elyafların birbirine geçiş şekline göre farklı örgü modelleri ile üretilir. Her örgü modeli, kumaşın mekanik performansını ve işlenebilirliğini farklı şekillerde etkiler. Dokuma türlerinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

Plain Dokuma;

- En temel ve sık kullanılan örgü modelidir.
- Elyaflar, ardışık çözgü ipliklerinin altından ve üstünden geçerek düzenlenir.
- Bu yapı, en yüksek geçme noktasına sahip olup, boyutsal stabilite ve elyaflar arası sıkı bağlanma sağlar.
- Şekil 3.4a, *plain* modelinin yapısını göstermektedir. Ancak, bu sıkı yapı, elyafların hareket kabiliyetini sınırladığı için kumaşın dökümlülüğünü azaltır.



Şekil 3.4. Dokuma kumaş stilleri a) plain dokuma şeması b) beş koşumlu satin dokuma şeması ve (c) 3/3 twill dokuma şeması (Chowdhury ve Summerscales, 2024)

Twill Dokuma;

- Elyafar eğimli bir görünüm oluşturacak şekilde dokunur.
- Twill dokuma, daha esnek bir yapı sunar ve plain dokumaya kıyasla daha iyi dökümlülük sağlar.
- Mekanik özelliklerde bir miktar azalma olsa da karmaşık geometriler için daha uygun bir seçenek olabilir.

Satin Dokuma;

- Elyafar arasındaki geçme noktalarının azaltıldığı, daha pürüzsüz ve düzgün bir yapı sunar.
- Geçme noktalarının azalması, elyafarın düz segmentlerinin ('float') uzunluğunu artırır.
- Satin dokumalar, iyi dökümlülük sergileyerek karmaşık şekiller üzerinde kolayca uygulanabilir. Ancak, bu yapı, boyutsal stabilite açısından plain dokumaya kıyasla daha zayıftır.

Dokuma kumaşlarda, elyafarın düzenli bir şekilde hizalanması, yük transferini optimize ederek kompozit malzemenin dayanıklılığını artırır. Çünkü dokuma tipi elyafarın hizalanma oranı ve kıvrılma düzeyi üzerinde etkili olduğu için mekanik performansı doğrudan etkiler (Li, Wang ve Boussu, 2022):

Öte yandan 2B dokuma kumaşlar, özellikle matris çekme veya basma hasar mekanizması yoluyla kompozit malzemelerde sıklıkla karşılaşılan interlaminar çatlak oluşumuna (delaminasyon) sebep olur. Elyafarın dokuma yapısı, gerilme altında enerji emilimini artırarak kompozit malzemenin düzlemsel yükler için genel performansını iyileştirir ve kırılma direncine katkıda bulunur. Bununla birlikte, 2B dokuma yapıların sınırlı bir kalınlık yönelimli takviye kapasitesine sahip olması, özellikle delaminasyon direncinde önemli bir zafiyet oluşturur (Li, Wang ve Boussu, 2022).

Bu zayıflık, tabakalar arasında yeterli bağlanma sağlamayan sınırlı matris mukavemetine bağlanabilir. Kalınlık boyunca elyaf yönlendirmesinin eksikliği, yük transferi mekanizmalarını etkileyerek kompozit yapıların yorulma dayanımını ve darbe altında performansını sınırlar. Sonuç

olarak, bu durum, özellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda, malzeme hasarının başlamasına ve ilerlemesine zemin hazırlar. 2B dokuma kumaşların performansına ilişkin bu temel sınırlama, yeni nesil malzeme tasarımlarında kalınlık doğrultusunda elyaf takviyesinin kullanılmasını gerektirmektedir. Böylece, delaminasyon direncinin artırılması ve kompozit malzemelerin servis ömrünün uzatılması sağlanabilir. Bu bağlamda, 3B dokuma yapılar veya dikişli kompozit sistemler gibi yenilikçi teknikler, interlaminar mukavemeti artırmak ve bu sorunların üstesinden gelmek için umut vadetmektedir (He ve ark., 2024). Dolayısıyla 2B dokuma yapıların mevcut avantajlarını koruyarak eksikliklerini giderecek 3B dokuma tasarım ve proses teknolojilerinin geliştirilmesi, kompozit malzemelerde performansın artırılmasına yönelik önemli bir araştırma alanı olarak değerlendirilebilir.

3.2.3. Hacimsel (3B) Kumaşlar

3B kumaşlar, elyafların hem düzlem içi hem de düzlem dışı çeşitli yönlerde düzenlenmesiyle elde edilen yenilikçi yapısal tekstil malzemeleridir. Bu tür yapıların, düzlem içi çok eksenli yönlendirme ve kalınlık boyunca sağlanan elyaf takviyesi gibi özellikleri, kompozit malzemelerin mekanik performansını önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle, kalınlık boyunca sürekli elyafların varlığı, 3B kumaşlara özgü bir özellik olup, delaminasyon direncinde belirgin bir artışa ve çatlak ilerlemesine karşı daha etkili bir dirence olanak tanır. Bu özellikler, 2B tabakalı sistemler ile karşılaştırıldığında, 3B kumaşların daha yüksek mukavemet, çentik duyarsızlığı ve genel dayanıklılık sergilemesini sağlar (Dong ve ark., 2022).

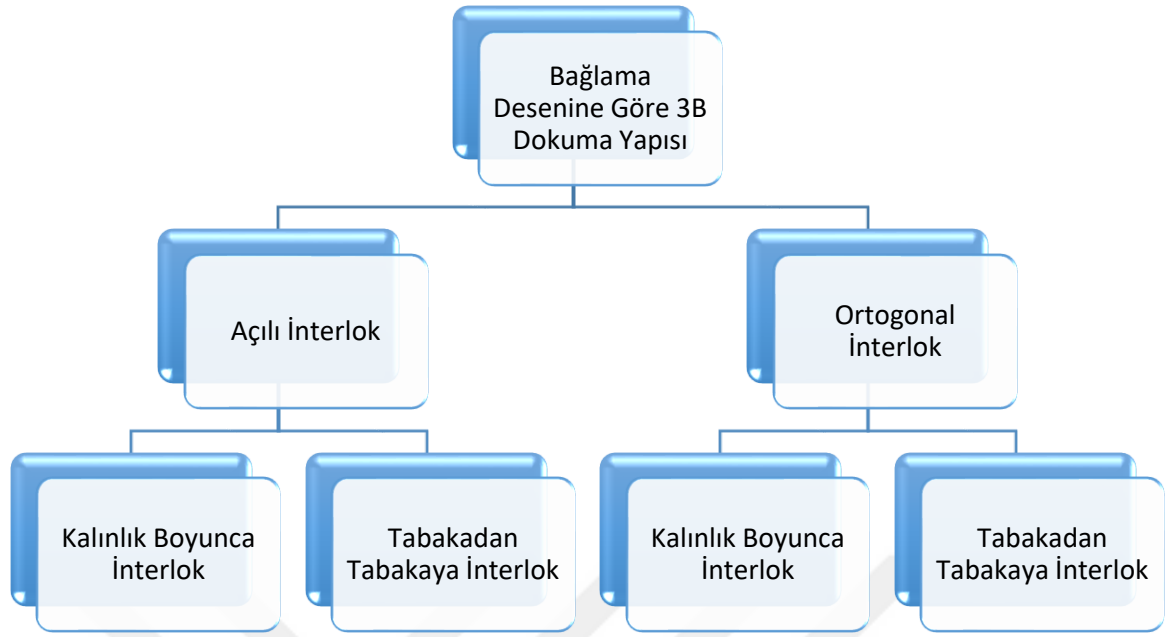
Düzlem içi çok eksenli takviyenin sağladığı üstün mekanik özellikler, özellikle yük taşıma kapasitesinin artırılması ve malzemenin çok yönlü gerilmelere karşı dayanıklılığının artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Kalınlık boyunca elyaf yönlendirmesi ile interlaminar bölgedeki bağlanmayı iyileştirerek, malzeme yapısındaki potansiyel zayıflıkların giderilmesine katkıda bulunur. Bu, delaminasyonun önlenmesi ve çatlakların ilerleyişinin yavaşlatılması yoluyla malzeme ömrünü uzatan önemli bir faktördür. Ayrıca, 3B kumaşların çentik duyarsızlığı, hasarın başlangıcını ve yayılmasını kontrol altına alarak darbe dayanımı gibi kritik özellikleri optimize etmektedir (Abtew, 2024).

3B yapısal preformlar, çeşitli tekstil işleme teknikleriyle üretilmektedir. Dokuma, örgü ve dikiş gibi yöntemler, bu tür yapıların tasarlanmasında kullanılan başlıca üretim teknikleridir. Dokuma yöntemleri, elyafların düzlem içi ve kalınlık boyunca sıkı bir şekilde bağlanmasını sağlarken, örgü ve dikiş yöntemleri, daha karmaşık ve özelleştirilmiş elyaf yönelimlerini mümkün kılarak 3B preformların fonksiyonelliğini artırır. Bu tekniklerin her biri, preformların nihai mekanik özelliklerini ve uygulama alanlarını doğrudan etkileyen spesifik avantajlara sahiptir (Li, Wang ve Boussu, 2022).

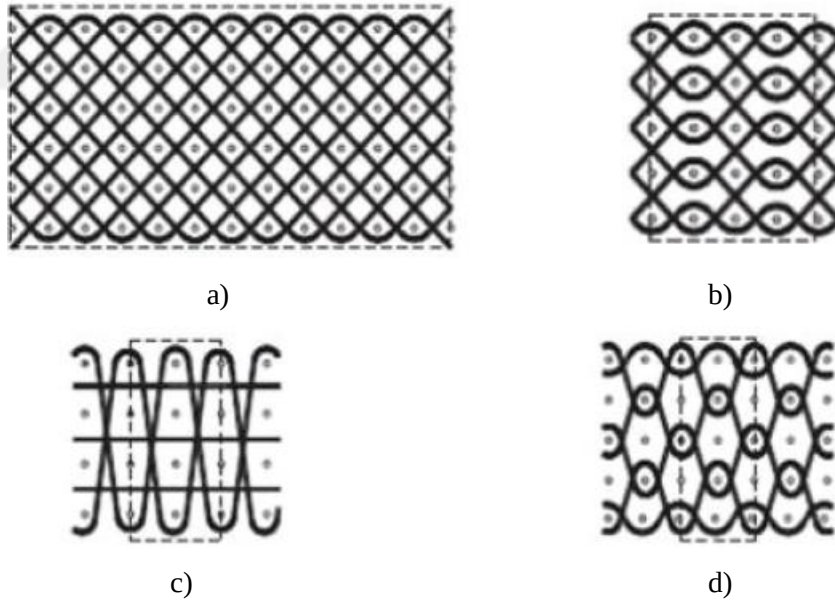
Jet uçaklarının fren bileşenleri için 3B dokuma karbon-karbon kompozitlerin üretiminde dokuma teknolojisi ilk kez 1972 yılında uygulanmıştır. Bu uygulama, özellikle yüksek özgül mukavemet ve sertlik gibi üstün mekanik özelliklerin yanı sıra, termal bozulmaya karşı sağladığı mükemmel direnç sayesinde dikkat çekmiştir. Bu özellikler, uçak fren sistemlerinde zorlu çevresel ve mekanik koşullara dayanabilecek malzemeler için kritik öneme sahiptir. Öte yandan 3B dokuma kompozitlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar, başlangıçta sınırlı düzeyde kalmıştır. Havacılık endüstrisinde uygun maliyetli, hasara dayanıklı ve uzun ömürlü bileşenlere olan gereksinimin artmasıyla birlikte, bu malzemelere olan ilgi 1980'li yıllardan itibaren belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Bu süreçte, 3B dokuma kumaşların araştırma ve geliştirme faaliyetleri önemli bir ivme kazanmıştır (Korkmaz ve Okur, 2022).

Bir 3B dokuma preformun temel yapısı, birbirine bağlayıcı çözgü iplikleriyle entegre edilen çözgü (0° yönü) ve atkı (90° yönü) filamentlerinden oluşmaktadır. Bu yapı, preformun 3B bir bütünlük sergilemesini sağlayarak, yük transferi ve mekanik dayanımı artırır. Üretilen 3B dokuma yapılar, bağlayıcı filamentlerin düzenine ve bağlama desenine bağlı olarak farklı mekanik özellikler sergiler. Bağlama modelinin değiştirilmesi, farklı elyaf mimarileri oluşturulmasına olanak tanır ve bu durum, preformun nihai performansını doğrudan etkiler. Elyaf mimarisinin belirlenmesinde kullanılan bağlama desenlerinin yönü, dokuma preformların mekanik özelliklerinin yanı sıra termal dayanım ve yorulma direnci gibi kritik parametreleri de optimize eder (Dejene ve Gudayu, 2024). 3B dokuma kumaşlar, temel olarak ortogonal kilitli dokuma kumaşlar ve açılı kilitli dokuma kumaşlar olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Ortogonal kilitli dokuma kumaşlarda, bağlayıcı çözgü iplikleri, atkı ve çözgü filamentlerini dik açılarda bağlayarak yüksek bir yapısal bütünlük sağlar. Bu tip kumaşlar, özellikle kalınlık yönlü dayanımın önemli olduğu uygulamalarda tercih edilir. Açılı kilitli dokuma kumaşlar ise bağlayıcı ipliklerin daha karmaşık açılarla yerleştirilmesiyle oluşturulan, esneklik ve yük taşıma kapasitesi açısından optimize edilmiş yapılardır. Her iki sınıf da bağlayıcıların geçme düzenine göre daha alt kategorilere ayrılabilir. Bu kategoriler, bağlayıcı ipliklerin yerleşim ve geçiş düzenine bağlı olarak, kompozit malzemenin belirli bir performans gereksinimine göre uyarlanmasını sağlar (Chang ve Hu, 2022).

Bağlama desenleri, sadece mekanik performans değil, aynı zamanda üretim sürecinin zorluk derecesini ve maliyet etkinliğini de belirler. Dolayısıyla, bu desenlerin tasarımı hem malzeme mühendisliği hem de endüstriyel uygulamalar açısından kritik bir öneme sahiptir (Chowdhury ve Summerscales, 2024). Şekil 3.5'te bu bağlama desenleri temelinde sınıflandırılan 3B dokuma yapılar gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.6'da bağlayıcı filamentlerin birbirine geçme düzenine göre oluşturulan farklı 3B dokuma yapılar detaylandırılmıştır. Bu yapılar, havacılık başta olmak üzere otomotiv, enerji ve denizcilik gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.



Şekil 3.5. 3B dokuma yapılarda düzlemsel tabakaları ve kumaş kalınlığı boyunca interlok desenine göre sınıflandırılması



Şekil 3.6. 3B dokuma yapılarda düzlemsel tabakaların kalınlığı boyunca interlok modelleri a) Açılı interlok/kalınlık boyunca, b) Açılı interlok/tabakadan tabakaya, c) Ortogonal interlok/kalınlık boyunca, d) Ortogonal interlok/tabakadan tabakaya (Sun ve ark., 2022)

3.2.3.1 Açılı İnterlok Dokuma Kumaşlar

Kalınlık yönündeki, diğer bir deyişle bağlayıcı elyaflar, 3B dokuma yapısının tüm kalınlığı boyunca uzanarak yapıya mekanik bütünlük ve kalınlık yönünde dayanım kazandırır. Bu elyaflar,

yapısal tasarıma bağlı olarak iki temel bağlanma biçimi sergileyebilir: kalınlık boyunca açılı interlok ve tabakadan tabakaya açılı interlok. Kalınlık boyunca açılı interlok, bağlayıcı elyafların dokuma yapısının tüm tabakalarını birbirine entegre ederek tekil bir bütün oluşturmalarını sağlar. Bu yapı, yüksek düzeyde interlaminar dayanım ve dolayısıyla delaminasyona karşı üstün direnç sunar. Tabakadan tabakaya açılı interlok ise bağlayıcı elyafların bir veya daha fazla atkı filamenti tabakasını örerek bağlantıyı daha lokalize bir şekilde sağlamasıyla karakterize edilir. Bu tasarım, daha esnek ve hafif yapıların oluşturulmasına olanak tanır (Li, Wang ve Boussu, 2022).

Bağlayıcı elyaflar, genellikle çözgü ve atkı elyafları ile uyumlu olacak şekilde tasarlanır ve aynı filament numarasına sahip olabilir. Ancak, bağlayıcı elyafların inceltilmiş bir yapıya sahip olması, çözgü ve atkı filamentlerinin daha sıkı bir şekilde paketlenmesini mümkün kılarak dokuma yapısının yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini artırabilir. Elyafların filament numaraları ve çaplarının dikkatli bir şekilde seçimi, dokuma yapısının nihai performansı üzerinde doğrudan etkili olup, bu tasarım parametresi üretim sürecinin optimize edilmesinde kritik bir rol oynar (Zang ve ark., 2024).

3B dokuma yapıların tasarımı, yalnızca bağlayıcı elyafların yerleşimi ve özellikleriyle sınırlı kalmaz. Dokuma deseni, tabaka sayısı, filament tipi, numarası ve yerleşim sıklığı gibi faktörler, bu yapıların performansını şekillendiren temel parametreler arasında yer alır. Dokuma desenleri, bağlayıcı elyafların bağlantı geometrisini belirleyerek, nihai ürünün mekanik mukavemet, esneklik, termal dayanım ve hasar toleransı gibi özelliklerini doğrudan etkiler. Yoğun dokuma desenleri, yüksek yük taşıma kapasitesine sahip yapılar oluştururken, daha seyrek desenler esneklik ve hafiflik gerektiren uygulamalara uygundur (Wang ve ark., 2024).

Tabaka sayısının artırılması, daha kalın ve dayanıklı dokuma yapılarının üretilmesini sağlarken, kullanılan filament türü ve numarası, malzemenin özgül ağırlığı ve performans özelliklerinde belirleyici bir rol oynar. Filament tipi seçiminde karbon, cam, aramid gibi farklı elyaf türlerinin kullanımı, malzemenin mukavemet, termal stabilite ve aşınma direnci gibi spesifik özelliklerini optimize etmek için uygulanır. Ayrıca, filament yerleşim sıklığı, malzemenin gözenekliliğini ve yoğunluğunu kontrol etmek için önemli bir tasarım parametresidir (Abtew, 2024).

3.2.3.2 3B Ortogonal İnterlok Dokuma Kumaş

3B ortogonal interlok dokuma kumaşlar, elyafların kalınlık yönünde çözgü ve atkı filamentleriyle bütünleştiği, tabakaları 90°'lik bir açıyla keserek birbirine bağladığı karmaşık 3B dokuma yapısı sunar. Bu yapı, tabakalar arasında etkin bir mekanik bağlanma sağlayarak, malzemenin kalınlık yönündeki mukavemetini önemli ölçüde artırır. Elyaflar, yarı-izotropik özelliklerin gerektiği durumlarda üç ana yön boyunca eşit bir şekilde yerleştirilirken, anizotropik özelliklerin istendiği durumlarda bu yerleşim dengesi değiştirilerek belirli yönlerde daha fazla mukavemet sağlanabilir (Li, Wang ve Boussu, 2022).

Ortogonal interlok dokuma yapılar, iki ana konfigürasyonda üretilebilir: kalınlık boyunca ortogonal interlok ve tabakadan tabakaya ortogonal interlok. Kalınlık boyunca ortogonal yapıda, bağlayıcı filamentler preformun en üstünden en alt tabakasına kadar uzanarak tüm tabakaları bir arada tutar. Bu tasarım, malzemenin yüksek interlaminar dayanım özellikleri sergilemesine olanak tanır (Wu ve ark., 2023). Tabakadan tabakaya ortogonal interlok yapıdaysa, bağlayıcı filament bir tabakadan bitişik bir tabakaya geçerek bağlantıyı sağlar ve ardından başlangıç konumuna döner. Bu düzenleme, daha esnek bir yapı oluştururken, elyafların her iki yönde de güçlü bir bağlanma sergilemesini sağlar. Çözümlü örgüsü, preformun tüm tabakalarını bir arada tutar ve bağlayıcı elyafların düzeni malzemenin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler (Wei ve Chen, 2024).

Ortogonal olarak dokunmuş 3B preformlar, açılı interlok dokuma yapılarla karşılaştırıldığında daha küçük bir geometrik tekrarlayan birim hücreye sahiptir. Bu durum, özellikle tasarım esnekliği ve ince ayrıntılara sahip malzemelerin üretilmesinde büyük bir avantaj sağlar. Ancak açılı interlok dokuma, daha yüksek bir esneklik ve bozulma kabiliyeti sunarken, ortogonal interlok dokuma yapılar kalınlık yönünde daha yüksek bir elyaf hacmi fraksiyonu sağlar. Bu fark, iki yapı türü arasında performans açısından önemli bir ayrım yaratır ve seçim, uygulama gereksinimlerine göre belirlenir (Werma ve Majumdar, 2024).

3B dokuma kumaşlar, dokuma sürecindeki büyük tasarım esnekliği sayesinde, kalınlık yönünde ek filamentlerle güçlendirilmiş karmaşık yapılar oluşturabilir. Bu entegre yapılar, basma ve çekme gerilmesi altında yüksek mekanik dayanım sergileyen ve hasara karşı üstün direnç gösteren kompozit malzemelerin üretimine olanak tanır (Zhang ve ark., 2024).

3B dokuma kumaşlar, genellikle geleneksel 2B dokuma makinelerinin modifiye edilmesiyle üretilir. Ancak, 3B yapıların oluşturulması sırasında filamentlerin kıvrılması veya elyaf hasarı gibi istenmeyen etkiler kaçınılmazdır. Bu problemleri en aza indirmek ve neredeyse kıvrımsız performanslar elde etmek için özel olarak tasarlanmış bir dizi 3B dokuma tezgâhı geliştirilmiştir. Bu teknolojik yenilikler, 3B dokuma yapılarının hassasiyetle üretilmesini sağlarken, üretim sürecinin verimliliğini ve ürün kalitesini artırmıştır (Wei ve Chen, 2024).

3B dokuma preformlar, çeşitli konsolidasyon teknikleri kullanılarak kompozit malzemelere dönüştürülebilir. Reçine transfer kalıplama (RTM) gibi yöntemler, preformların mekanik ve termal özelliklerini optimize etmek için yaygın olarak kullanılan tekniklerdir. Bu işlemler, preformun boşluklarını doldurup sertleştirerek nihai kompozit malzemenin dayanımını ve stabilitesini artırır (Korkmaz ve Okur, 2022). Ayrıca, bu kompozitler, endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda da yüksek performans gereksinimlerini karşılamak üzere yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Verma ve Majumdar, 2024).

3B dokuma kumaşlar, uygun maliyetli, darbeye dayanıklı ve karmaşık yapılar üretme potansiyelleri ile modern kompozit tasarımlarında önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, dokuma parametrelerinin, özellikle bağlama modelinin ve elyaf yerleşim deseninin mekanik özellikler

üzerindeki etkileri hala tam olarak anlaşılamamıştır. Gelecekteki araştırmalar, bu parametrelerin optimize edilmesine ve 3B dokuma yapılarının performans sınırlarının genişletilmesine odaklanmalıdır. Malzeme mühendisliği ve tekstil teknolojileri arasındaki disiplinler arası iş birliği, 3B dokuma kumaşların yeni nesil uygulamalarda daha geniş bir şekilde benimsenmesini sağlayacaktır. Bu kapsamda, hazırlanan bu tez çalışmasında 3B tekstil kumaşlar, farklı filament malzemeleri kullanılarak farklı dokuma şekillerinde, 3B kumaş dokuma makinesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kumaşlar, daha sonra vakum infüzyon yöntemi ile kompozit plak haline dönüştürülmüştür. Hazırlanan numunelere çekme, eğilme ve kayma testleri yapılarak 3B kompozitlerin mekanik performansları incelenmiş, numunelerin hasar tipleri mercek altına alınmıştır. Elde edilen sonuçlar grafik halinde sunularak tartışılmıştır.



4. MATERYAL VE METOT

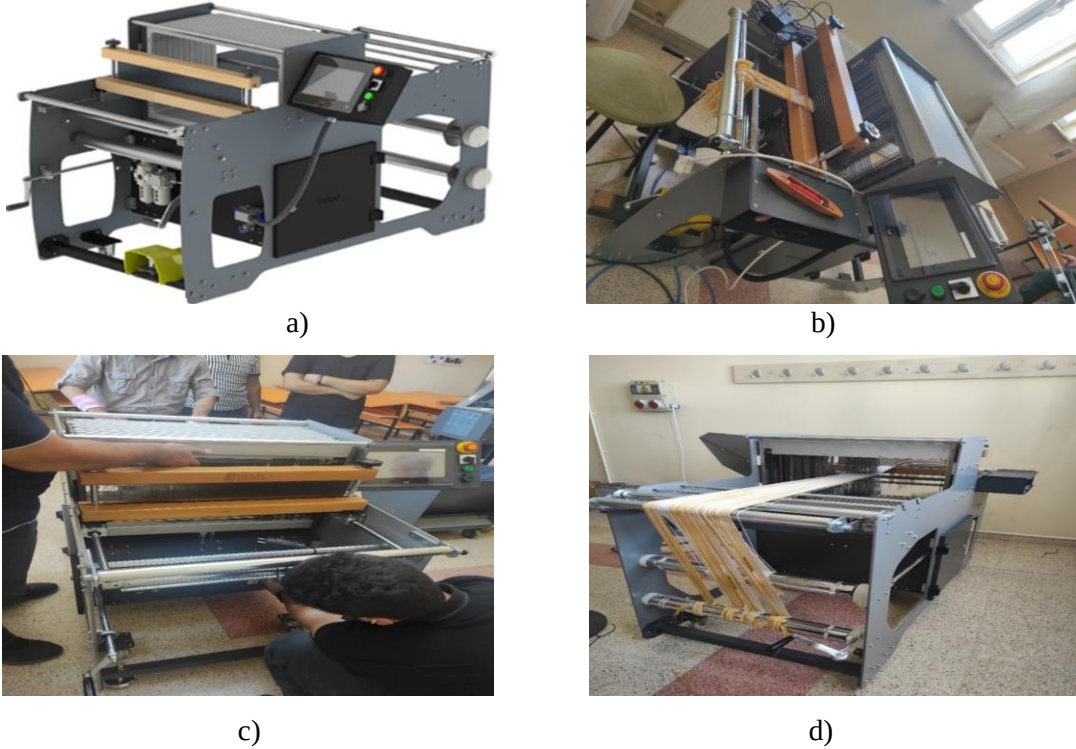
4.1. Problemin Tanımı

Bu araştırmada cam elyaf, karbon ve yüksek mukavemetli polyester filamentler olmak üzere üç farklı takviye malzemesi ve ortogonal tüm kalınlık boyunca düşey dokuma (Tip I), tabakalar arası dikiş modeli açılı interlok tabakadan tabakaya bağlanma (Tip II) ve tüm kalınlık boyunca açılı dikiş modeli açılı interlok kalınlık boyunca bağlanma (Tip III) olmak üzere farklı örgü tekniklerinin kombinasyonu ile üretilen kompozit numunelerin çekme, üç nokta eğilme ve kayma testleri gerçekleştirilerek takviye malzemesi ve örgü tekniklerinin hasar tipi ve mukavemeti üzerine etkisi incelenmiştir. Kompozit numuneler CC: Cam-Cam (Tip-I, II, III), PC: Polyester-Cam (Tip-I, II, III), CK: Cam-Karbon (Tip-I); PK: Polyester-Karbon (Tip-I) olmak üzere toplam sekiz farklı tipte üretilmiştir.

4.1.1. Materyal

4.1.1.1 3B Dokuma Kumaş Tezgâhı

Araştırma sürecinin ilk basamağını istenilen amaca uygun olarak modifiye edilip gerçek 3B dokuma özelliğinde imalatı sağlanan 3B kumaş dokuma tezgâhının (Şekil 4.1) satın alınması oluşturmaktadır.



Şekil 4.1. 3B kumaş dokuma tezgahı a) genel görünüş, b) üstten görünüş c) montaj aşaması ve d) deneme aşaması

Gülaş Makine İmalat A.Ş., İstanbul, Türkiye firmasından ticari olarak temin edilen Garm B55 model 3B dokuma kumaş tezgâhının teknik özelliklerine ilişkin bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Garm B55 model 3B dokuma kumaş tezgâhına ilişkin teknik özellikler

Özellik	
Uzunluk	150 cm
Genişlik	80 cm
Ağırlık	150 kg
Yükseklik	105 cm
Dokuma genişliği	55 cm
Çerçeve	24 adet

4.1.1.2 Dokuma Filamentler

Araştırma sürecinin ikinci basamağında 3B kumaş üretiminde kullanılacak karbon, cam ve yüksek mukavemetli polyester filamentler satın alınmıştır. Kumaş üretiminde kullanılan filamentlere ilişkin görüntüler Şekil 4.2’de verilmiştir.



a)

b)

c)

Şekil 4.2. Araştırmada kompozit kumaş üretiminde kullanılan a) karbon filament, b) cam ve c) yüksek dayanımlı polyester filament

Bu çalışmada, kompozit numunelerin üretimi için Carbomid A.Ş., İstanbul, Türkiye firmasından temin edilen CM-CF-3K model 3K karbon fiber filament kullanılmıştır. Bu filamentin elyaf özelliklerine dair detaylı bilgiler Tablo 4.2'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. 3K karbon fiber filament ürününün elyaf özellikleri

Özellik	Değer	Tolerans	Birim	Test yöntemi
Çekme dayanımı	4200	Min. 3906	MPa	ISO 10618
Elastisite modülü	245	230-270	GPa	ISO 10618
Uzama	1.8	Min. 1.5	%	ISO 10618
Yoğunluk	1.79	1.78-1.81	g/cm ³	ISO 10119
Akma	200	194-206	g/1000m	ISO 1889
Boyutlandırma tipi & miktar	1.2	0.8-1.6	%	ISO 10548

Araştırmada kompozit numune üretiminde cam elyaf filament kullanılmıştır. Şişecam A.Ş., İstanbul, Türkiye firmasından temin edilen Cam Elyaf 600 Teks model ürünün teknik özellikleri Tablo 4.3’de verilmiştir:

Tablo 4.3. Cam filament ürünün teknik özellikleri

Özellik	Değer
Cam tipi	E
Elyaf çapı (μ)	Nom. 16
Nem miktarı (%)	Max.0.1
Bağlayıcı miktarı (%)	0.55±0.15
Bağlayıcı türü	Silan
Reçine uyumu	Doymamış polyester, vinilester, epoksi

Araştırmada kompozit üretiminde yüksek mukavemetli polyester filament kullanılmıştır. Akan İplik A.Ş. firmasından temin edilen yüksek mukavemetli polyester filament kullanılmıştır. Polyester filamentin teknik özelliklerine ilişkin bilgiler Tablo 4.4’te verilmiştir:

Tablo 4.4. Yüksek dayanımlı polyester filament ürünün teknik özellikleri

Özellik	Değer
Modeli	6000D
Kullanım	Dikme, dokuma, el örme, dikiş, işlemler, balık avlama
Malzeme	%100 Polyester
Fiber uzunluğu	Multiflament
Uzama	%20-30
İplik tipi	FDY

Bu çalışmada kullanılan 3B kompozit dokuma kumaşlar, (xy) düzleminde üst üste yerleştirilen çoklu tabakalardan oluşmaktadır. Her bir tabaka, belirli bir genişlik ve uzunlukta dokunmuş, ardından z yönünde (kalınlık boyunca) birbirine bağlanarak 3B bütünsel bir yapı elde edilmiştir.

Tablo 4.5. 3B Kompozit Üretim Parametreleri

Üretim Parametresi	Tip I (Düşey dokuma)	Tip II (Açılı interlok – katlar arası)	Tip III (Açılı interlok – tam kalınlık)	Birim	Açıklama
Tabaka sayısı (xy düzleminde)	6	7	8	adet	z yönünde birbirine bağlanmış tabakalar
Kompozit genişliği	550	550	550	mm	Tezgâhın maksimum dokuma genişliği
Kompozit uzunluğu	1000	1000	1000	mm	Numune boyu
Kompozit kalınlığı	0.98	1.935	1.365	mm	6,7,8 tabakanın ortalama toplam yüksekliği
Kullanılan filament miktarı	198.4	228.7	261.9	m	Ortalama numune başına toplam filament uzunluğu
Dokuma süresi (toplam)	12	14.5	17.5	saat	1 adet numune üretimi için geçen toplam süre
1 m kompozit için üretim süresi	1.2	1.45	1.75	saat/m	Ortalama üretim süresi
Üretim Hızı	0.83	0.69	0.57	m/saat	Ortalama değer
Bağlantı Tipi (z yönü)	Ortogonal düşey dokuma	Açılı interlok (tabakadan tabakaya bağlama)	Açılı interlok (kalınlık boyunca bağlama)	—	Bağlantı Tipi (z yönü)
Kullanılan Tezgâh	Garm B55	Garm B55	Garm B55	—	Yarı otomatik, 3B dokuma özelliği

Tablo 4.5’te, bu araştırma kapsamında kullanılan farklı 3B dokuma türlerine (Tip I, Tip II ve Tip III) ait kompozit üretim parametreleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu üç farklı yapı hem yapısal bağlanma biçimleri hem de üretim süreci bakımından birbirinden ayrılmaktadır. XY düzlemindeki tabaka sayısı Tip I için 6, Tip II için 7 ve Tip III için 8 olarak belirlenmiştir. Bu farklar, dokuma tipi ve bağlantı stratejisine bağlı olarak kompozit kalınlıklarına da yansımıştır. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda, ortalama kompozit kalınlıkları sırasıyla Tip I için 0,98 mm, Tip II için 1.935 mm ve Tip III için 1.365 mm olarak hesaplanmıştır.

Tüm numunelerde kompozit genişliği sabit olarak 55 cm, uzunluğu ise 100 cm olarak tutulmuştur. Bu yaklaşım, üretim parametrelerinin karşılaştırılabilirliğini artırmıştır. Kullanılan filament miktarları ise bağlantı yoğunluğuna bağlı olarak artış göstermekte olup; sırasıyla 198.4 m, 228.7 m ve 261.9 m olarak ölçülmüştür. Dokuma süresi de bu doğrultuda Tip I için 12 saat, Tip II için 14.5 saat ve Tip III için 17.5 saat olarak kaydedilmiştir. Bu veriler ışığında, 1 metre kompozit için ortalama üretim süreleri sırasıyla 1.2 saat/m, 1.45 saat/m ve 1.75 saat/m olarak belirlenmiştir. Buna paralel olarak üretim hızı, Tip I’de 0.83 m/saat, Tip II’de 0.69 m/saat, Tip III’te ise 0.57 m/saat seviyelerine düşmüştür. Bu durum, artan bağlantı yoğunluğu ve filament kullanımıyla doğru orantılı olarak üretim sürecinin yavaşladığını ortaya koymaktadır.

Bağlantı tipleri incelendiğinde; Tip I, z yönünde ortogonal düşey dokuma yapısıyla; Tip II, açılı interlok ile katlar arasında; Tip III ise kalınlık boyunca sürekli açılı interlok bağlantısıyla karakterize edilmektedir. Tüm üretimler, yarı otomatik 3B dokuma yeteneğine sahip Garm B55 tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4.1.1.3 3B Kumaş Dokuma Teknikleri

Araştırmada 3B dokuma tezgâhı ve kumaş dokumada kullanılan filamentlerin temin edilmesinin ardından farklı dokuma teknikleri ve filament kombinasyonları ile 3B kumaşlar dokunmuştur. 3B kumaş dokuma tezgâhı ile cam-cam, polyester-cam, cam-karbon ve polyester-karbon filament ve Tip-I: tüm kalınlık boyunca düşey, Tip-II: tabakalar arası ve Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı dikiş olmak üzere farklı dokuma kombinasyonunda dokunarak sekiz farklı dokuma kumaş üretilmiştir. Araştırma kapsamında üretilen kumaşlarda kullanılan filament türü ve dokuma tiplerine ait bilgiler Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Araştırma kapsamında üretilen kompozit numunelere ilişkin bilgiler

No	Numune Adı	Düzlem İçi	Düzlem İçi	Düzlem Dışı Filament
		Çözümlü Yönü Filamenti	Atkı Yönü Filamenti	
1	CC* - Tip I	Cam	Cam	Cam
2	CC - Tip II	Cam	Cam	Cam
3	CC - Tip III	Cam	Cam	Cam
4	PC** - Tip I	Polyester	Cam	Polyester
5	PC - Tip II	Polyester	Cam	Polyester
6	PC - Tip III	Polyester	Cam	Polyester
7	CK*** - Tip I	Cam	Karbon	Cam
8	PK**** - Tip I	Polyester	Karbon	Polyester

*CC: Cam-Cam; **PC: Polyester-Cam; ***CK: Cam-Karbon; ****PK: Polyester-Karbon

3B kumaş üretiminde tüm kalınlık boyunca düşey dokuma modelinin çözgüsü ayarlanıp, cam elyaf filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tip-I: cam elyaf -cam elyaf için bu işlemler Şekil 4.4’de verilmiştir.



a)



b)



c)

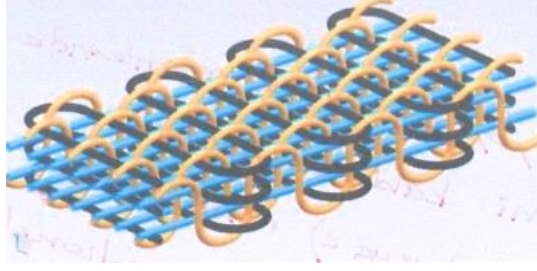


d)

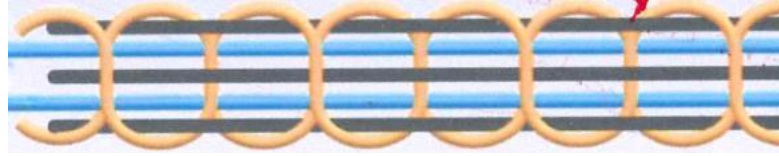
Şekil 4.4. Tip-I modu için a) çözgü yönünde cam elyaf filamentlerin takılması; b) cam elyaf filamentlerin yandan görünüşü; c) cam elyaf filamentlerin üstten görünüşü ve d) cam elyaf filamentlerin genel görünüşü

Üretim sürecinin sonraki basamağında Tip-I: tüm kalınlık boyunca düşey modeli için tahar, örgü ve armür oluşturulup makine içerisine kodlanmıştır. İlgili görseller Şekil 4.5'te verilmiştir. Burada tanımlanan tahar; çözgü dairesinden elde edilen çözgü levendisindeki filamentlerin, tahar planı olarak adlandırılan önceden belirlenmiş bir düzen doğrultusunda, gücü gözleri ve dokuma tarağının dişleri üzerinden geçirilmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. Armür ise kumaş örgü raporu ve tahar planının öngördüğü kriterlere uygun olarak atkı filamentinin yerleştirilmesini sağlamak amacıyla, üretim sürecinde kullanılacak çerçevelerin alt ve üst konumlarının detaylı biçimde belirlenmesine yönelik şematik düzenlemeyi ifade eder.

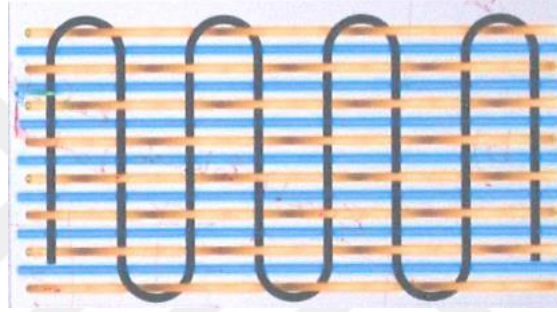




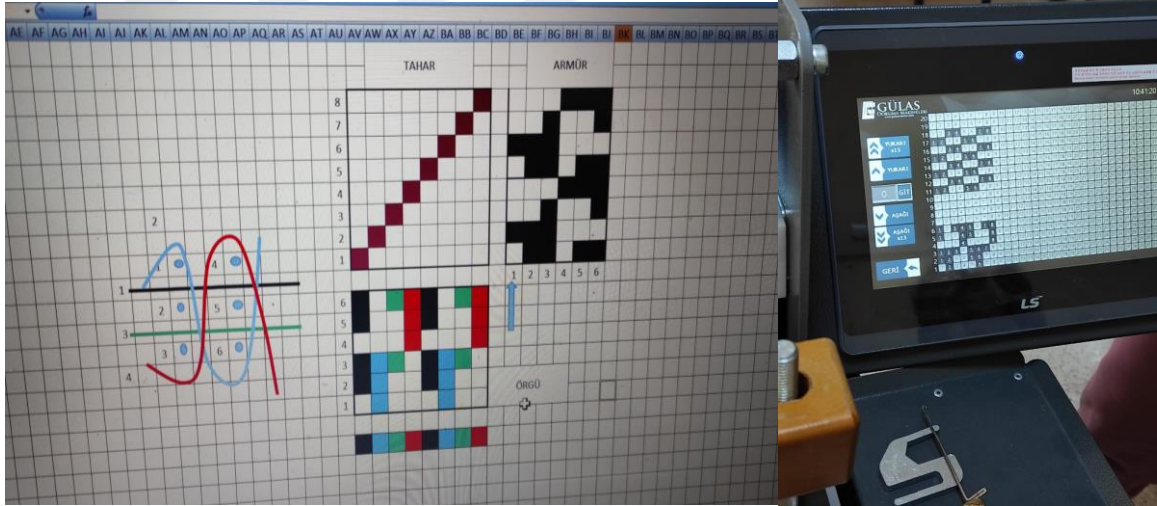
a)



b)



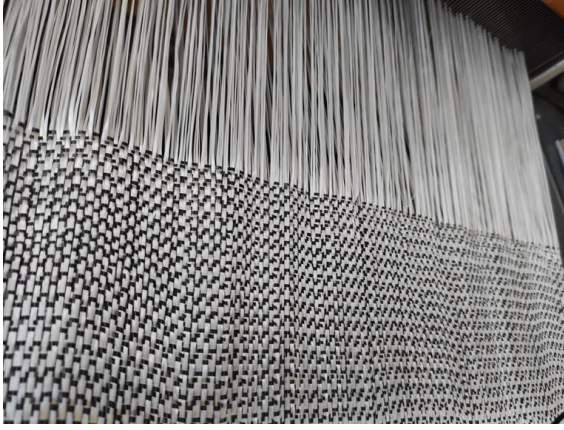
c)



d)

Şekil 4.5. Tip I için 3B dokuma modu ve makine içerisine kodlanması; dokumanın a) perspektif, b) yan, c) üstten görünüşü ve d) dokuma makinasına modların girilmesi

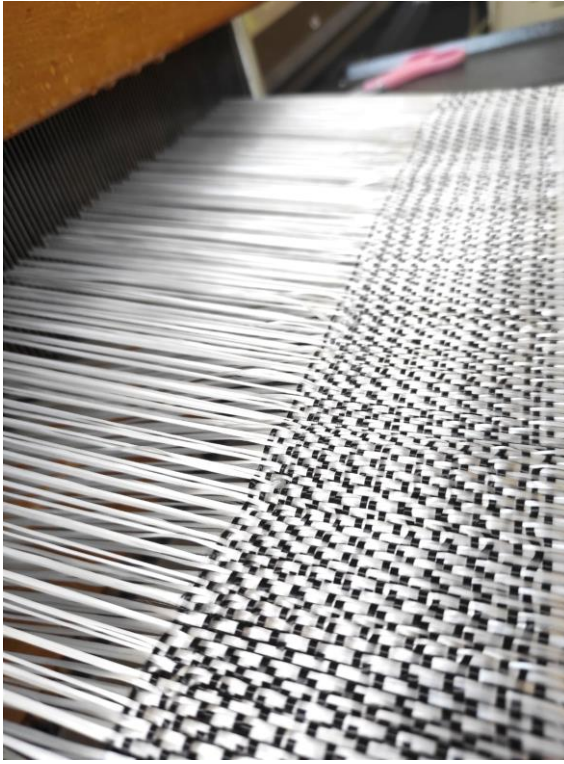
Tip I: cam elyaf –karbon elyaf kumaşın (CK-Tip-I) üretim sürecinde cam elyaf filamentler çözgü yönünde, karbon filamentler ise atkı yönünde kullanılarak Tip-I: tüm kalınlık boyunca düşey dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.6’da verilmiştir



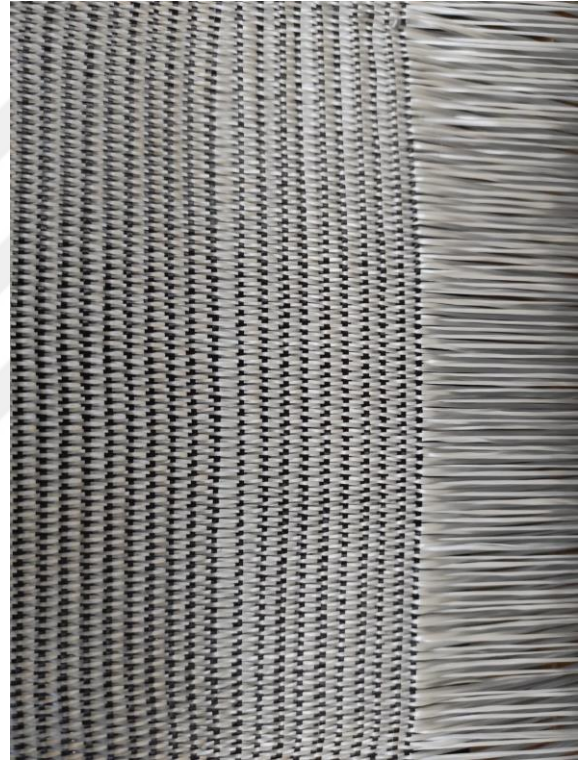
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.6. CK-Tip-I kumaşın farklı açılardan a) dokuma tezgahında üretimi, b) yakın plan görünümü, c) üstten ve d) yatay görünümü

Tip-I: polyester elyaf-cam elyaf filamentlerinin kompozisyonlarından kumaş (PC-Tip-I) üretme sürecinde tüm kalınlık boyunca düşey dokuma modelinin çözgüsü ayarlanıp, yüksek mukavemetli polyester filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirmeye ilişkin görseller Şekil 4.7’de verilmiştir.



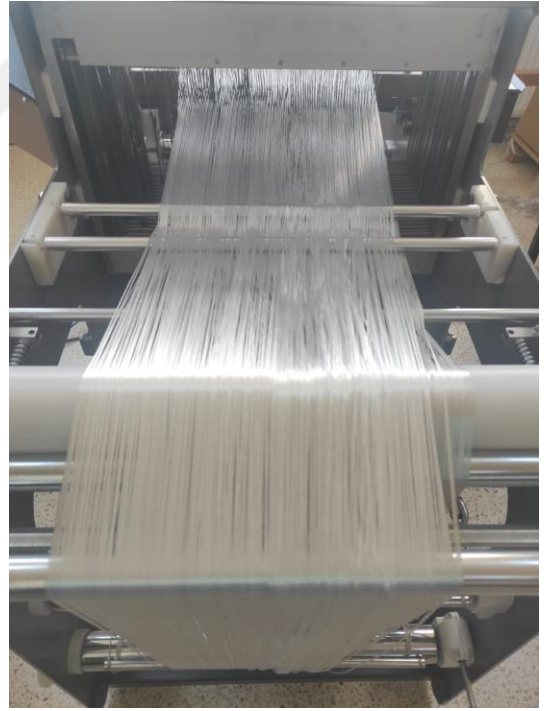
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.7. PC-Tip-I kumaş için çözgü yönünde yüksek mukavemetli polyester filamentlerin farklı açılardan görünüşü: a) filamentlerin makineye takılması, b) üstten görünüm, c) dikey görünüm ve d) genel görünüm

Tip-I: Polyester filament-cam kombinasyonundan üretilen kumaş numunede yüksek mukavemetli polyester filamentler çözgü yönünde, cam filamentler ise atkı yönünde kullanılarak Tip-I: tüm

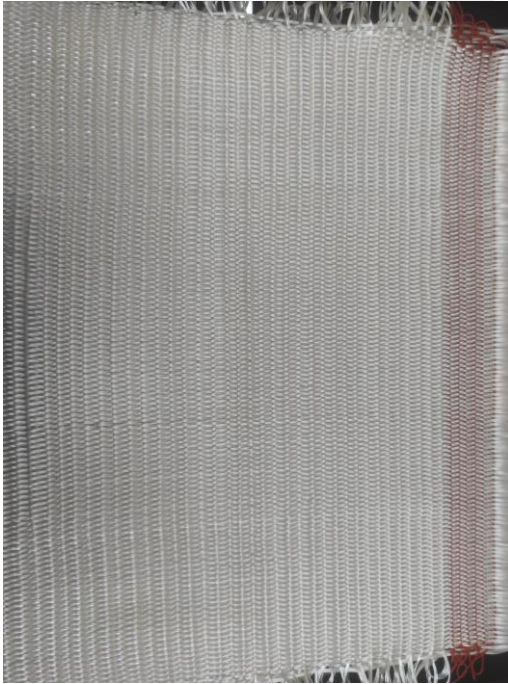
kalınlık boyunca düşey dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.8’de verilmiştir.



a)



b)



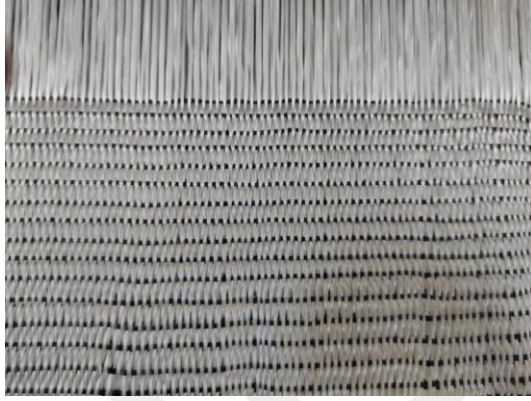
c)



d)

Şekil 4.8. PC-Tip-I kumaşın farklı açılardan a) dokuma tezgahında üretimi, b) yakın plan görünümü, c) üstten ve d) yatay görünümü

Tip-I: yüksek mukavemetli polyester filament-karbon filament kombinasyonundan kumaş (PK-Tip-I) üretme sürecinin ilk basamağında yüksek mukavemetli polyester filamentler çözgü yönünde, karbon filamentler ise atkı yönünde kullanılarak Tip-I: tüm kalınlık boyunca düşey dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.9’da verilmiştir.



a)



b)

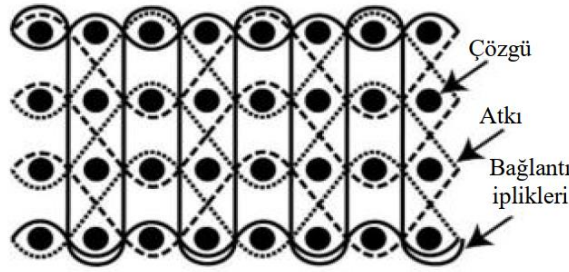


c)

Şekil 4.9. Tip I modunda yüksek mukavemetli polyester-karbon elyaf olarak üretilen hibrit kumaşın (PK-Tip-I) farklı açılardan a) üstten, b) genel ve c) yakın görünümü

4.1.1.3.2 Tip-II: Tabakalar Arası İnterlok

3B dokuma kumaşlar, geleneksel dokuma yapılarının ötesinde, tabakalar arasında oluşturulan bağlantılar sayesinde daha kompleks ve işlevsel özelliklere sahip yeni bir nesil tekstil malzemeleridir. Bu çalışmada, tabakalar arası bağlantıların kumaşın mekanik yapısı üzerindeki etkisi ve farklı filament malzemelerinin sonuçları incelenmektedir. Şekil 4.10'da temsili olarak sunulan 3B dokuma kumaş yapısında, tabakalar arasında süreklilik sağlamak amacıyla bağlantı filamentleri kullanılmaktadır. Bu filamentler, kumaşın kalınlığı boyunca uzanarak farklı tabakaları birbirine mekanik olarak bağlar. Şekildeki koyu noktalar çözgü uçlarını, eğri çizgiler ise atkı yollarını temsil etmektedir. Standart olarak bağlantı filamentleri çözgü filamentlerine dik olarak eklenmesine rağmen, 30°, 45° ve 60° gibi farklı açılarda da uygulanabilir (Keleş ve Yılmaz, 2022).

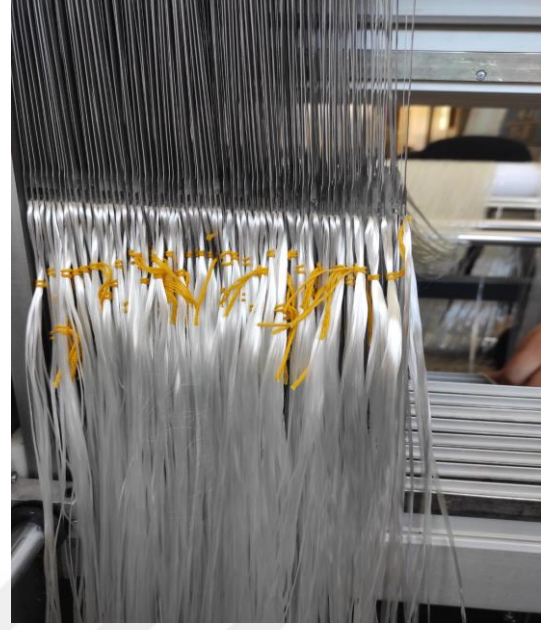


Şekil 4.10. Tabakalar arası dikiş modeli (açılı interlok/tabakadan tabakaya)

Tip-II: tabakalar arası dikiş modelinin çözgüsü ayarlanıp, cam elyaf filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlemlere ilişkin görseller Şekil 4.11’de verilmiştir.



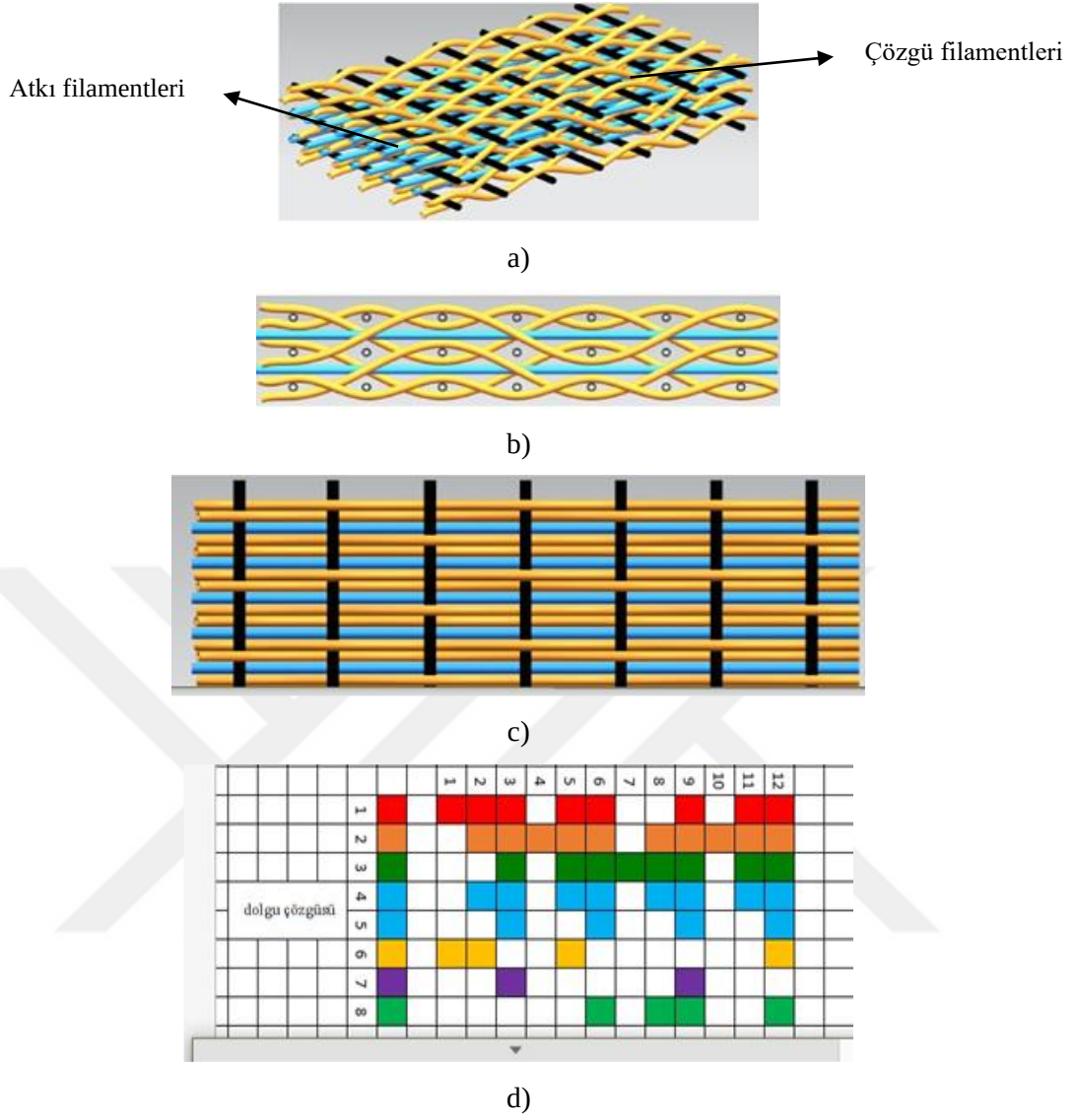
a)



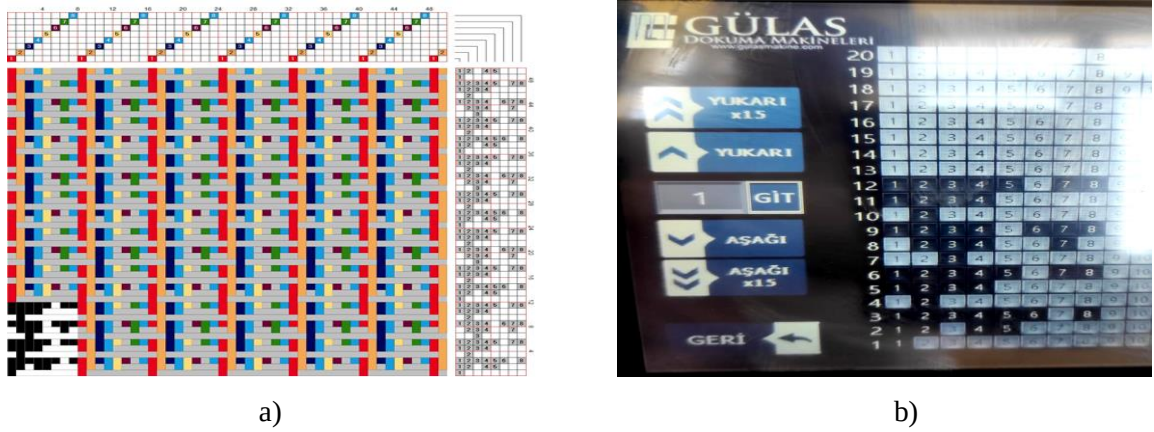
b)

Şekil 4.11. Tip II modu için çözgü yönünde a) cam elyaf filamentlerin takılması ve b) cam elyaf filamentlerin genel görünümü

Tip-II: tabakalar arası dikiş modeli için tahar, örgü ve armür oluşturulup makine içersine kodlanmıştır. Sürece ilişkin görseller Şekil 4.12-4.13’de verilmiştir.

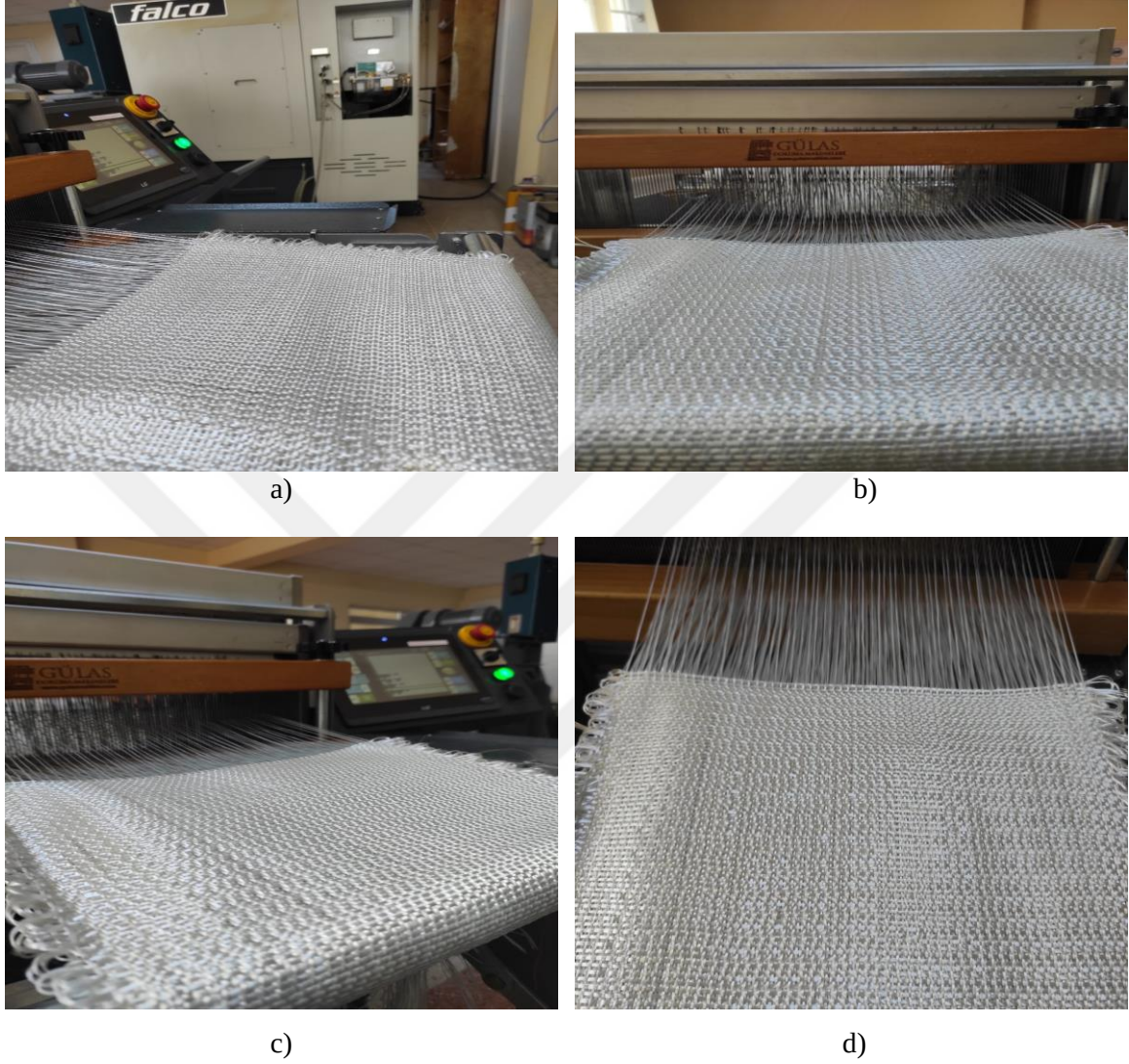


Şekil 4.12. Tip II 3B dokuma modu için a) perspektif, b) yandan, c) üstten ve d) dokuma makinasında program kodlama planı



Şekil 4.13. Tip II için a) 3B dokuma modu armür planı ve b) 3B dokuma modunun makine içerisinde kodlanması

Cam elyaf filamentlerle atkı ve çözgü yönlerinde Tip-II: tabakalar arası dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.14’de verilmiştir.

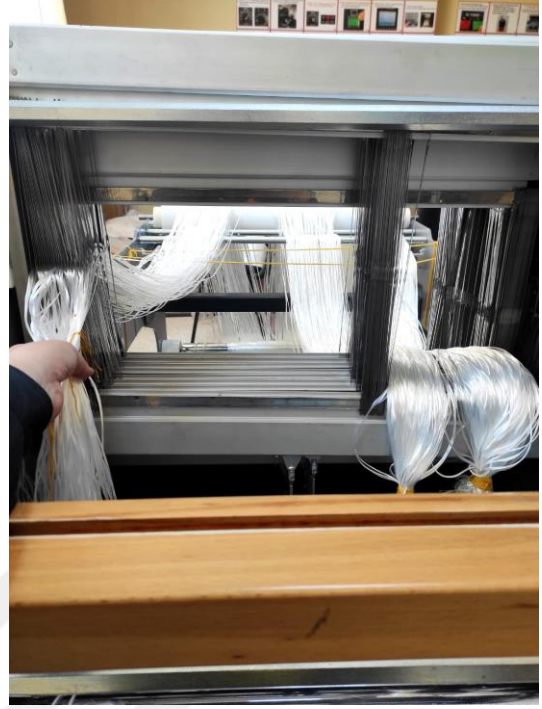


Şekil 4.14. Tip II modunda cam elyaf-cam elyaf olarak üretilen kumaş (CC-Tip-II) görüntüsünün farklı açılardan a) yatay, b) dikey, c) genel ve d) yakın görünümü

Tip-II: tabakalar arası dikiş modelinin çözgüsü ayarlanıp yüksek mukavemetli polyester filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirmeye ilişkin görseller Şekil 4.15’de verilmiştir. Böylece PC-Tip-II kodlu kumaş modelinin üretiminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.



a)



b)



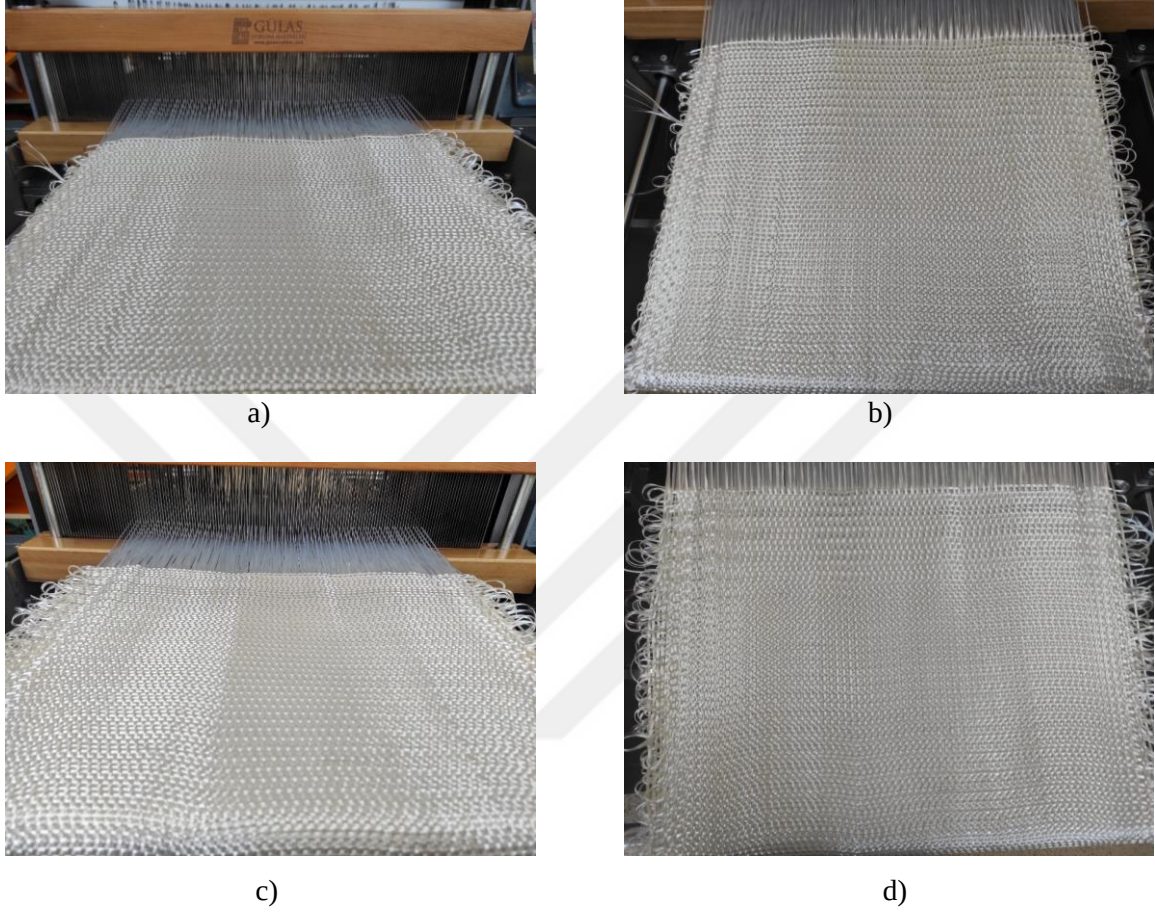
c)



d)

Şekil 4.15. Tip II modu için çözgü yönünde yüksek mukavemetli polyester filamentlerin takılmasının farklı açılardan a) dikey, b) yatay, c) genel ve d) filamentlerin makineye takılma görünümü

Yüksek mukavemetli polyester filamentler çözgü yönünde, cam elyaf filamentler ise atkı yönünde kullanılarak Tip-II: tabakalar arası dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.16’da verilmiştir.

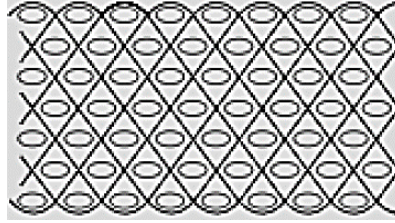


Şekil 4.16. Tip II modunda yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (PC-Tip-II) farklı açılardan a) genel, b) üstten, c) yatay ve d) yakın görünümü

4.1.1.3.3 Tip-III: Tüm Kalınlık Boyunca Açılı İnterlok

3B açılı interlok yapılar, dokuma endüstrisinde sıklıkla kullanılan ve özgün bir örgü yapısına sahip olan kumaş türleridir. Bu yapılar, belirli bir açıyla yerleştirilmiş düz atkı filamentleri ve bunlarla çapraz yönde örülen, kalınlıkları atkı filamentleri ile eşdeğer olan çözgü filamentlerinden oluşmaktadır. Çözgü filamentlerinin genellikle yukarıdan aşağıya doğru çapraz bir şekilde bağlanması, atkı filamenti tabakalarının tam derinlikte birleşmesini engellemektedir (Chen ve Potiyaraj, 1999). Bu temel yapıya ek olarak, açılı interlok kumaşlara düz çözgü filamentleri de dahil edilerek farklı varyasyonlar elde edilebilmektedir. Şekil 4.17’de görüldüğü üzere, yedi kat atkı filamentleri ve farklı bağlama şekillerindeki çözgü filamentlerine sahip açılı interlok kumaşların enine kesitleri, bu yapının karmaşıklığı ve çeşitliliğini ortaya koymaktadır. Literatürdeki çalışmalar, açılı interlok kumaşlara ek çözgü filamentleri dahil edilmesinin, kumaşın mekanik özelliklerinde önemli

iyileşmeler sağladığını göstermektedir (Rubino ve ark., 2024; Szary ve ark., 2023). Özellikle elastisite modülü ve çözgü yönündeki çekme mukavemeti değerlerindeki artış, bu yapının güçlendirilmesindeki en belirgin sonuçlardan biridir (Keleş ve Yılmaz, 2022).

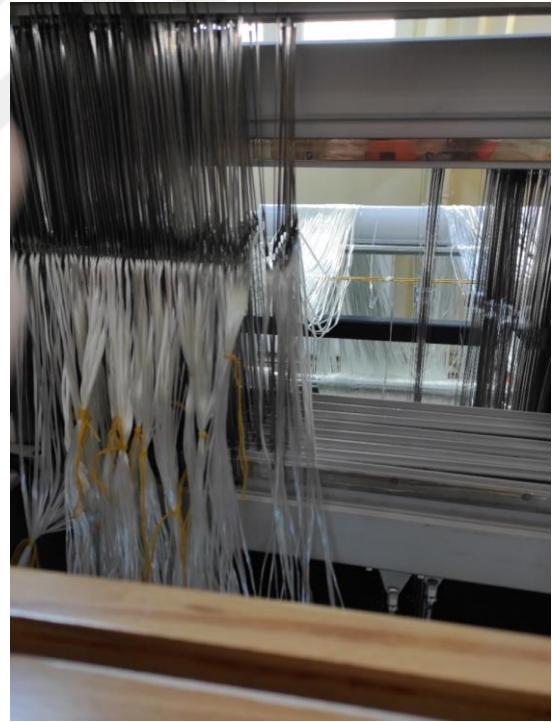


Şekil 4.17. Tüm kalınlık boyunca açılı dikiş modeli

Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı dikiş modelinin çözgüsü ayarlanıp, cam elyaf filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İşlemlere ilişkin görseller Şekil 4.18’de verilmiştir.



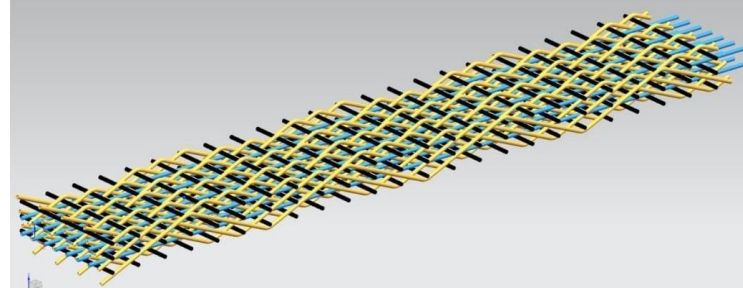
a)



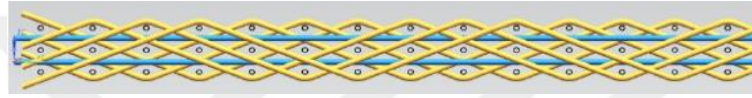
b)

Şekil 4.18. Tip-III modu için çözgü yönünde a) cam elyaf filamentlerin takılması ve b) cam elyaf filamentlerin görünümü

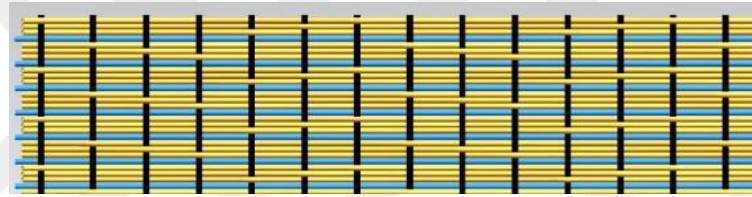
Daha sonrasında, Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı dikiş modeli için tahar, örgü ve armür oluşturulup makine içerisine kodlandırılmıştır. İlgili görseller Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



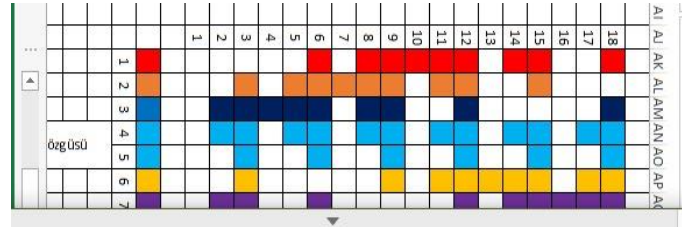
a)



b)

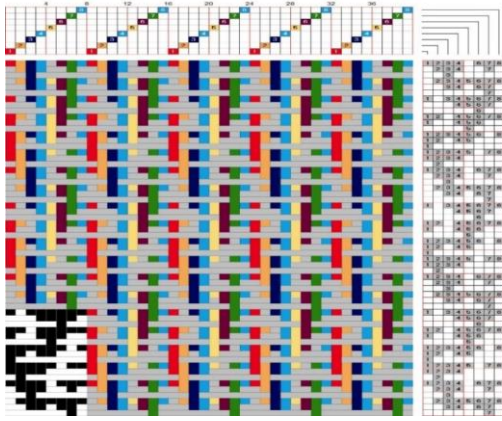


c)

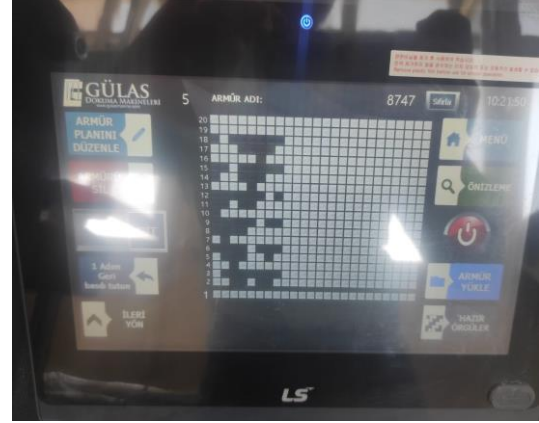


d)

Şekil 4.19. Tip III için 3B dokuma modu için a) perspektif, b) yan, c) üstten görünüşü ve d) dokuma makinasına modların girilmesi



a)



b)

Şekil 4.20. Tip III için a) 3B dokuma modu armör planı ve b) 3B dokuma modunun makine içerisine kodlanması

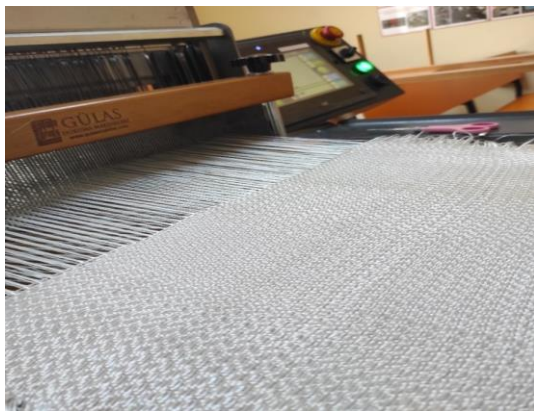
Cam elyaf filamentlerle atkı ve çözgü yönlerinde Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.21’de verilmiştir. Böylece CC-Tip-III dokuma 3B kumaş elde edilmiştir.



a)



b)



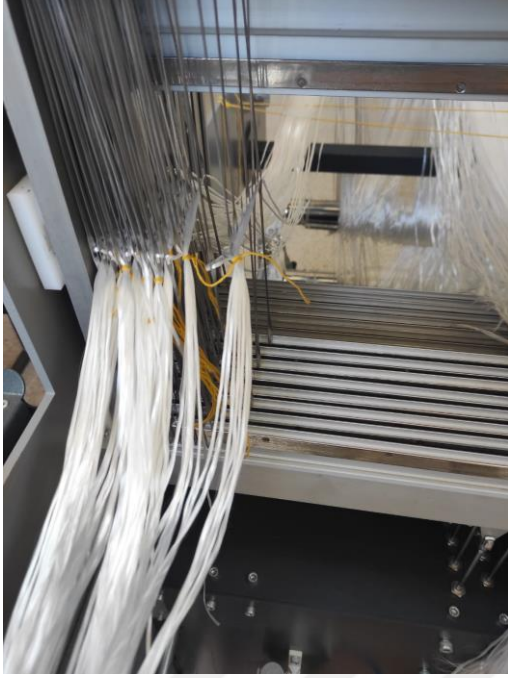
c)



d)

Şekil 4.21. Tip III modunda cam elyaf-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (CC-Tip-III) farklı açılardan a) yakın, b) üstten, c) yandan ve d) genel görünümü

Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı modelinin çözgüsü ayarlanıp yüksek mukavemetli polyester filamentlerin makine üzerine geçirilme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlgili görseller Şekil 4.22’de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.22. Tip III modu için çözgü yönünde a) yüksek mukavemetli polyester filamentlerin takılması ve b) yüksek mukavemetli polyester filamentlerin genel görünüşü

Yüksek mukavemetli polyester filamentler çözgü yönünde, cam elyaf filamentler ise atkı yönünde kullanılarak Tip-III: tüm kalınlık boyunca açılı dokuma gerçekleştirilmiştir. Dokumaya ilişkin görseller Şekil 4.23’de verilmiştir. Böylece PC-Tip-III tipi hibrit dokuma 3B kumaş elde edilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.23. Tip III modunda yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf olarak üretilen kumaşın (PC-Tip-III) farklı açılardan a) üstten ve b) genel görünüm

4.1.2. Kompozit Plakaların Üretimi

Araştırma kapsamında üretilen kendiliğinden dokuma 3B hibrit kumaşlar, hizmet alımı yöntemiyle Fibermak Compo A.Ş. (İzmir, Türkiye) firması tarafından kompozit levhalara dönüştürülmüştür. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen bu kompozit levhalar, yaklaşık olarak 50 cm genişliğe ve 100 cm uzunluğa sahip olacak şekilde hazırlanmıştır. Üretilen levhalar, çekme, kayma ve eğilme mukavemetlerinin belirlenebilmesi amacıyla, Adana Su Jeti Kesim Merkezi A.Ş. (Adana, Türkiye) firmasında ilgili test standartlarına uygun ölçülerde kesilmiş ve kompozit numuneler haline getirilmiştir. Kesilen numuneler, uluslararası standartlara uygun olarak çekme, eğilme ve kayma testlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemler sonucunda, farklı takviye türleri ve dokuma tiplerinin kompozit yapıların mekanik performansına etkisi detaylı biçimde incelenmiştir.

Kompozit malzemelerde elyaf hacim oranı, yalnızca malzemenin işlenebilirliğini değil, aynı zamanda mekanik özelliklerini de doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Bu nedenle, çalışmada kullanılan kompozitlerin elyaf hacim oranlarının belirlenmesi, malzeme özelliklerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, elyaf hacim oranlarının tespiti, ASTM D3171 standardı esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Tip I, Tip II ve Tip III dokuma yöntemleriyle üretilmiş cam elyaf-cam elyaf ve cam elyaf-karbon elyaf kombinasyonlarına dayalı kompozitlerden üçer adet numune hazırlanmıştır. Her bir numunenin başlangıç kütlesi, 0.1 mg hassasiyetinde ölçüm yapabilen bir terazi ile titizlikle kaydedilmiştir. Sonrasında, numuneler 550 °C sıcaklıkta çalışan bir kül fırınına yerleştirilmiş ve reçinenin kompozitten tamamen uzaklaştığından emin olunana kadar yakılma işlemi devam ettirilmiştir. Bu aşamada, numunelerden duman ve koku çıkışının tamamen sona ermesi, reçinenin tam olarak uzaklaştırıldığına işaret etmiştir. Yaklaşık 1.5 saat süren bu işlem tamamlandıktan sonra, numuneler fırından çıkarılmış ve kalan elyafların kütlesi tekrar ölçülmüştür.

Elde edilen başlangıç ve son kütleler arasındaki fark, kompozitlerdeki elyaf miktarını hesaplamada temel teşkil etmiştir. Elyaf hacim oranı, bu veriler kullanılarak Denklem 4.1'de tanımlanan bağıntı ile hesaplanmıştır. Bu bağıntıda, m_{ilk} kompozitin kül fırınına girmeden önceki kütlesini, m_{son} ise yanma işlemi sonrası ölçülen kütlesini ifade etmektedir. Ayrıca, ρ_k kompozitin yoğunluğunu, ρ_f ise kullanılan elyafın yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu yöntemle elde edilen elyaf hacim oranı değerleri Tablo 4.6'da detaylı bir şekilde sunulmuştur.

$$V_f = \left(\frac{m_{son}}{m_{ilk}} \right) \times 100 \times \left(\frac{\rho_k}{\rho_f} \right) \quad (4.1)$$

Öte taraftan, polyester ve cam elyaf içeren kompozitlerde, bu yöntemin kullanılmadığı belirlenmiştir. Bunun temel sebebi, polyester ve camın bozunma ve erime sıcaklıklarının birbirine çok yakın olmasıdır. Yakma işlemi sırasında, cam elyafın yumuşama sıcaklığına ulaşıldığında

polyester de tamamen yanmakta ve elyaf ayrıştırılması mümkün olmamaktadır. Bu durum, cam elyafın yapısal bütünlüğünü kaybetmesine ve elyaf hacim oranının doğru bir şekilde hesaplanamamasına yol açmıştır.

Tablo 4.6. Üretilen kompozit numunelerin fiziksel özellikleri

Dokuma Tipi	Numune	Numune İlk Kütle (g)	Numune Son Kütle (g)	Hacim (mm ³)	Yoğunluk (kg/m ³)	Ortalama yoğunluk (kg/m ³)	Elyaf Hacim oranı (V _f)	Ortalama V _f
CC-Tip-I	1	0.9836	0.7823	675.30	1457	13933	50.38	49.9950
	2	0.9590	0.7741	707.96	1355		49.40	
	3	0.9460	0.7734	696.36	1358		49.94	
	4	0.9343	0.7698	665.74	1403		50.26	
CC-Tip-II	1	1.2164	0.9553	751.73	1618	16343	49.46	49.9525
	2	1.1957	0.9568	744.34	1606		50.03	
	3	1.2270	0.9635	747.45	1642		50.24	
	4	1.2422	0.9564	743.24	1671		50.08	
CC-Tip-III	1	1.1149	0.8548	674.04	1654	16520	50.62	49.9100
	2	1.1411	0.8414	685.70	1664		50.18	
	3	1.0956	0.8515	680.05	1611		49.96	
	4	1.1648	0.8305	693.83	1679		48.88	
CK-Tip-I	1	0.8691	0.6295	550.49	1579	15490	52.09	51.7125
	2	0.8390	0.6299	560.42	1497		51.97	
	3	0.8301	0.6356	545.47	1522		51.46	
	4	0.8781	0.6448	549.47	1598		51.33	

Tablo 4.6, cam-cam (CC) ve cam-karbon (CK) kombinasyonlarıyla üretilen 3B dokuma kumaş kompozitlerin fiziksel özelliklerini detaylı bir şekilde sunmaktadır. Tablo, farklı dokuma yöntemleri (Tip I, Tip II ve Tip III) ile üretilen kompozitlerin hacim, yoğunluk ve elyaf hacim oranı (V_f) gibi temel fiziksel parametrelerini karşılaştırmalı olarak inceleme olanağı sağlamaktadır. Elyaf hacim oranı ve yoğunluk gibi özellikler, kompozit malzemelerin mekanik performansını belirleyen kritik faktörlerdir ve dokuma yapısının yanı sıra kullanılan filament kombinasyonları bu özellikler üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir.

Elyaf hacim oranı, kompozit malzemelerin mekanik dayanımı ve yapısal bütünlüğü üzerinde doğrudan etkili olan en kritik parametrelerden biridir. Bu çalışma kapsamında üretilen CC kompozitlerinde, kullanılan dokuma tipine (Tip I, II ve III) bağlı olarak elyaf hacim oranlarında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, tüm CC kompozit gruplarında ortalama elyaf hacim oranı %49.9 olarak belirlenmiş olup, bu değer yaklaşık olarak

%50 seviyesindedir. Bu oran, kompozit malzemenin mekanik performansının istikrarlı bir biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Tip I dokuma yöntemi ile üretilen CC numunelerinde elyaf hacim oranı %49.40 ile %50.38 arasında değişmektedir. Buna karşın, Tip II dokuma yöntemi ile üretilen numunelerde elyaf hacim oranı %49.46 ile %50.24 arasında ölçülmüştür. Tip III dokuma yöntemi, elyaf hacim oranında en geniş varyasyonu göstermiş ve değerler %48.88 ile %50.62 arasında değişmiştir. Bu durum, Tip III dokuma yapısının daha sıkı ve yoğun bir elyaf yerleşimine olanak tanıdığı, ancak bazı numunelerde bu yoğunluğun fazla yüklenme sonucu elyaf doluluğunu sınırladığı anlamına gelebilir. CK kompozitlerde, sadece Tip I dokuma yöntemi kullanılmıştır ve elyaf hacim oranları %51.33 ile %52.09 arasında değişmiştir. Bu oranlar, karbon elyafın daha hafif ve yoğunluğu düşük bir malzeme olması nedeniyle CC kompozitlerden daha yüksek çıkmıştır. CK kompozitlerin bu yüksek elyaf hacim oranları, karbon elyafın matris ile daha verimli bir şekilde birleştiğini ve elyaf doluluğunu artırdığını göstermektedir. Karbon elyafın üstün mekanik özellikleri ile birleştiğinde bu oranlar, hafif ve dayanıklı malzemelerin elde edilmesini sağlar.

CC kompozitlerin yoğunluk değerleri dokuma yöntemine göre farklılık göstermiştir. Tip I CC numunelerinde yoğunluk 1355 kg/m^3 ile 1457 kg/m^3 arasında değişirken, Tip II numunelerinde yoğunluk değerleri 1606 kg/m^3 ile 1671 kg/m^3 arasında ölçülmüştür. Tip III dokuma yöntemi ise yoğunluk açısından en yüksek değerleri göstermiş ve 1611 kg/m^3 ile 1679 kg/m^3 arasında yoğunluk değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, daha sıkı dokuma düzeninin lif yoğunluğunu artırarak toplam yoğunluğu yükselttiğini göstermektedir. Bu durum, Tip II ve Tip III dokuma yöntemlerinin, yüksek mekanik dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilebileceğini işaret etmektedir. CK kompozitlerde yoğunluk değerleri 1497 kg/m^3 ile 1579 kg/m^3 arasında değişim göstermiştir. Tip-I dokuma için CC ile karşılaştırıldığında, CK kompozitlerde genel olarak daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu, karbon elyafın dokuma içindeki yerleşiminde daha kompakt bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Dokuma tipi ve filament kombinasyonu, kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. CC kompozitlerde Tip I dokuma yöntemi, daha gevşek bir dokuma yapısı sunarak daha düşük değerlerine yol açmıştır. Buna karşın, Tip II ve Tip III dokuma yöntemleri, daha sıkı bir elyaf düzenlemesiyle yüksek yoğunluk sağlamıştır. Bu farklılıklar, dokuma yöntemlerinin elyaf yoğunluğunu ve mekanik özellikleri optimize etmede ne denli kritik olduğunu göstermektedir. CK kompozitlerde dokuma tipine ilişkin veri yalnızca Tip I yöntemiyle sınırlı olsa da karbon elyafın fiziksel özelliklerinin CC kompozitlere göre daha üstün olduğunu söylemek mümkündür. Hafiflik ve mukavemet kombinasyonu, karbon elyaf içeren kompozitlerin yüksek performans gerektiren uygulamalarda öne çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Tip-I dokuma için CC kompozite göre CK kompozitlerin yüksek elyaf hacim oranına sahip olması, bu malzemelerin daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olabileceğini göstermektedir. Bu durum, CK kompozitlerin dayanım gerektiren uygulamalar için, CC kompozitlerin ise düşük yoğunluğa göre optimum

mukavemet avantajı sağlayan durumlar için ideal olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, 3B dokuma kumaş kompozitlerin tasarım ve uygulama süreçlerinde değerli bir rehber sunmaktadır.

4.2. 3B Dokuma Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

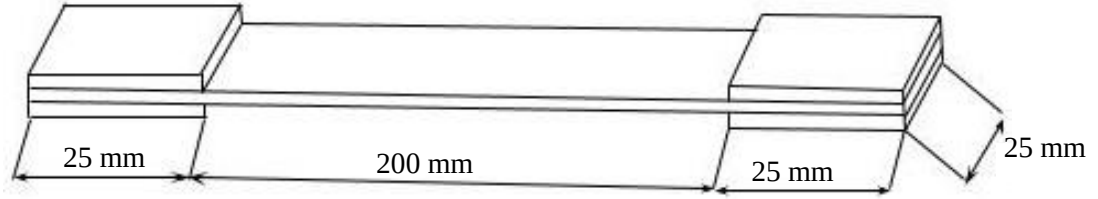
Kendiliğinden dokuma 3B kompozitlerin mekanik karakterizasyonu, bu malzemelerin deneysel olarak incelenen çekme, eğilme ve kayma davranışları ile mekanik performanslarını belirlemek adına bir ön koşuldur. Bu çalışmada, söz konusu kompozitlerin üretiminde kullanılan farklı filament ve dokuma tipleri (Tablo 4.3) dikkate alınarak, elde edilen kompozit numuneler üzerinde mekanik testler yapılmıştır. Bu sayede, her bir kompozit tipinin özgün mekanik özellikleri belirlenerek, analizler için gerekli girdi verileri elde edilmiştir. Tablo 4.7’de üretilen kompozitlerin kalınlıkları gösterilmiştir.

Tablo 4.7. 3B kompozit numunelerin kalınlık ve tabaka sayısı

No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Düzlem tabaka sayısı
1	CC - Tip I	0.75	6
2	CC - Tip II	0.89	7
3	CC - Tip III	0.85	8
4	PC - Tip I	1.65	6
5	PC - Tip II	1.98	7
6	PC - Tip III	1.88	8
7	CK - Tip I	0.65	6
8	PK - Tip I	0.87	6

4.2.1. Çekme Testi

Çalışma kapsamında üretilen kendiliğinden dokuma 3B kompozit levhaların mekanik karakterizasyonu amacıyla, ASTM D 3039M standardına uygun olarak yarı statik çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Düz levha formundaki kompozitlerden elde edilen standart boyutlardaki numuneler (Şekil 4.24), universal çekme test makinesinde eksenel yük altında teste tabi tutulmuştur.



Şekil 4.24. Çekme testi için ASTM 3039M standartlarına uygun hazırlanan kompozit numune ölçüleri

Araştırma kapsamında üretilen kompozit numunelerin çekme testleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Shimadzu marka AG-X model 100 kN kapasiteli çekme test cihazında 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.25).



a)



b)

Şekil 4.25. Çekme test sürecine ilişkin a) genel ve b) yakın görüntüsü

Araştırmada, farklı filament ve örgü tekniği kombinasyonları ile üretilen kendiliğinden dokuma 3B kompozit levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme testi gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda, Tablo 4.6'da isimleri verilen toplam 8 farklı filament-örgü kombinasyonu için üretilen numuneler, her bir dokuma kumaş tipi için üçer tekrar olmak üzere toplamda 24 adet numune deneye tabi tutulmuştur. Numuneler, çekme testi cihazının tutucuları arasında merkezlenerek düzgün bir şekilde yerleştirilmiş ve deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.26).



a)

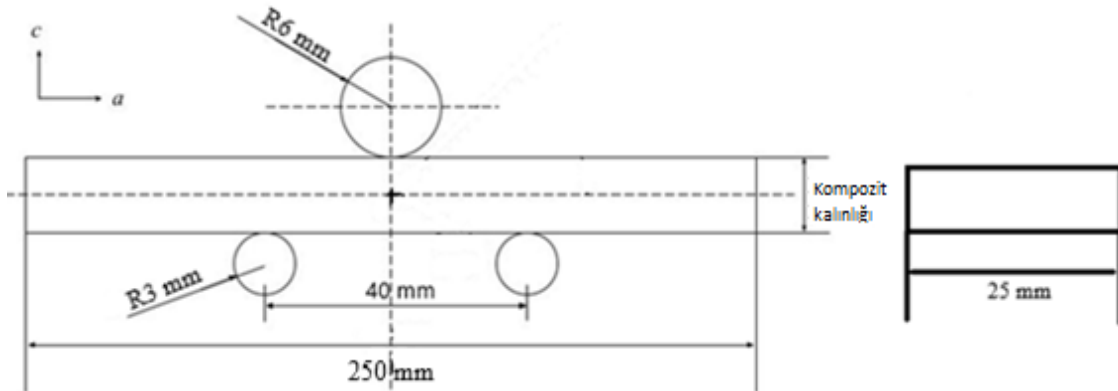
b)

Şekil 4.26. Kompozit numunelere yönelik gerçekleştirilen çekme testi a) genel ve b) yakın görüntüsü

Numunelere, kopma gerçekleşene kadar kademeli olarak artan kuvvet uygulanmış ve bu esnada oluşan uzama miktarı hassas bir şekilde ölçülmüş ve her bir numuneye ait kuvvet-uzama grafikleri elde edilmiştir.

4.2.2. Üç Nokta Eğilme Testi

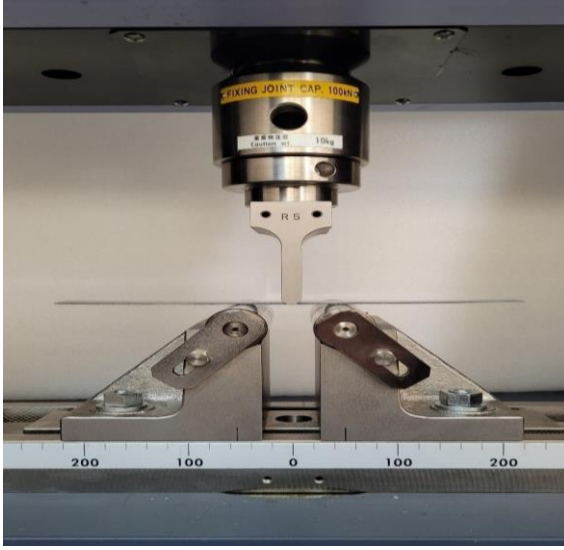
Üç nokta eğilme testi ile kompozitlerin düzlem dışı yükler altında 3B dokuma kompozitlerin mekanik davranışı belirlenmiştir. Bu testte kullanılan numune ölçüleri çekme testi için hazırlanan düzlem numune ölçüleri (250x25) ile aynıdır. Bu teste göre üç nokta eğilme testinde kullanılan mandrel ve mesnetlerin çapı ve yerleşim detayları Şekil 4.27’de verilmiştir.



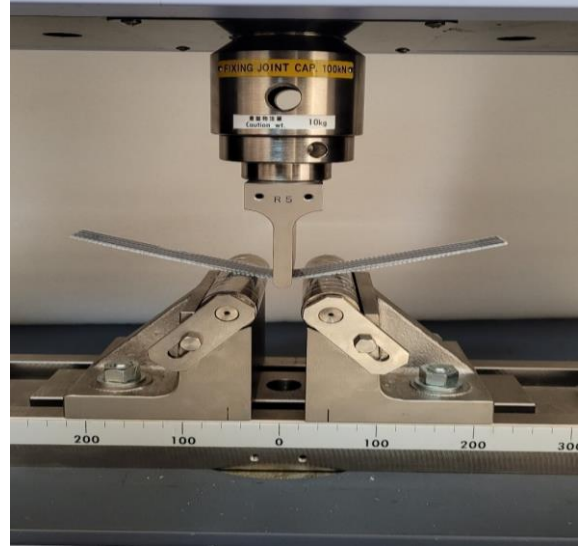
Şekil 4.27. Üç nokta eğilme testi numune ölçüleri

Çalışmada, her bir numune için üç tekrarlı olmak üzere toplam 24 adet üç nokta eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, Shimadzu AGSX serisi üniversal test cihazında, 1 mm/dak sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Numunelere, hasar ortaya çıkana kadar kademeli olarak uygulanan kuvvet altında oluşan sehim miktarı, bilgisayar destekli veri toplama sistemi ile yüksek hassasiyette ölçülmüştür. Elde edilen veriler doğrultusunda, her bir numune için kuvvet-yer değiştirme, gerilme-yer değiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Üç nokta eğilme testine ilişkin görüntüler Şekil 4.28’de verilmiştir.

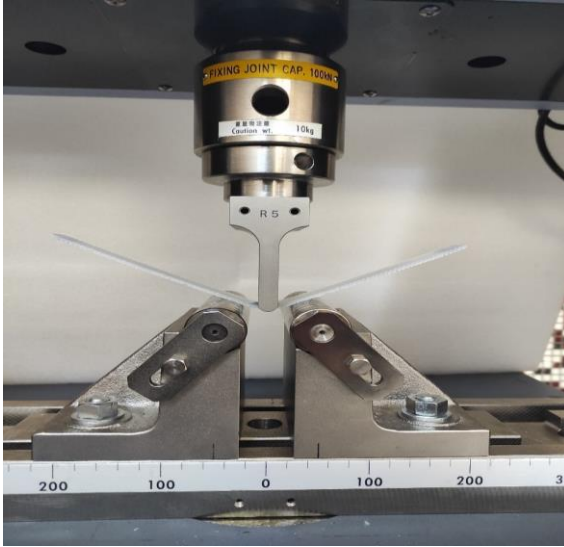




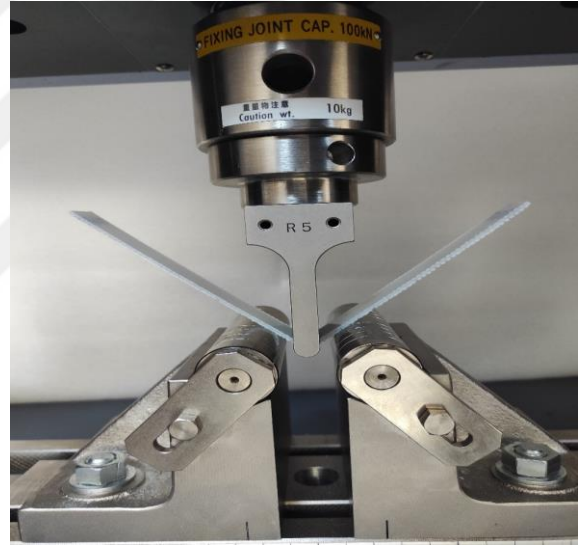
a)



b)



c)



d)

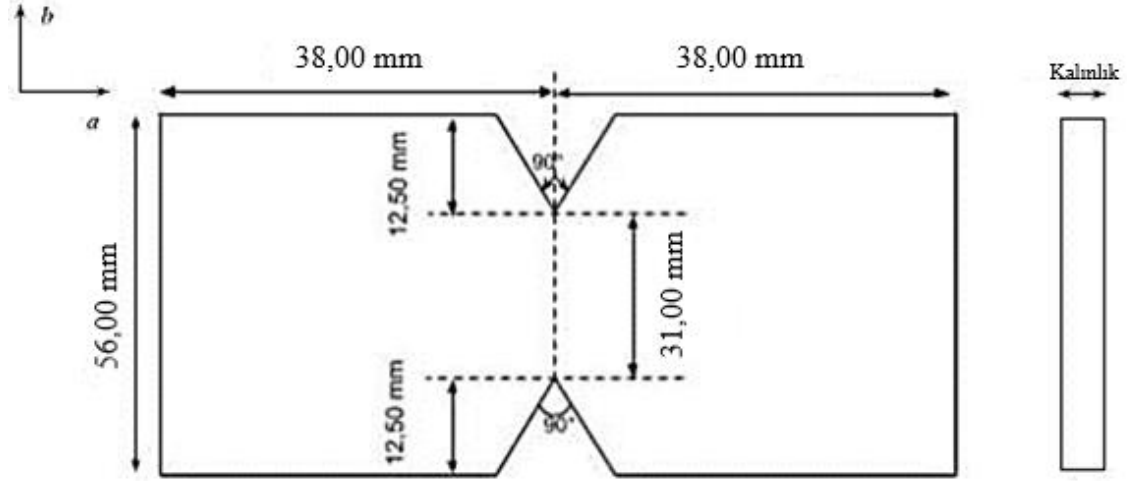


e)

Şekil 4.28. CC-Tip-I dokuma kumaştan üretilen kompozit numunelere ilişkin gerçekleştirilen üç nokta eğme testi: a) numunenin makineye yerleştirilmesi, b) test başlangıcı, c) kuvvet uygulanması, d) testin sonlandırılması ve e) numunelerin test sonrası görünümü

4.2.3. V-Çentik Kayma Testi

V-çentik kayma testi ile kompozit numunelerin a - b düzlemi için kayma davranışı ASTM D 7078 standartlarına göre belirlenmiştir. Bu teste ait standart numune ölçüleri Şekil 4.29’da verilmiştir. Şekil 4.29’a göre ortotropik malzemelerde a , fiber düzlem içi fiber doğrultusunu, b ise fibere dik doğrultuyu temsil etmektedir.



Şekil 4.29. Kayma testine yönelik üretilen numune boyutları

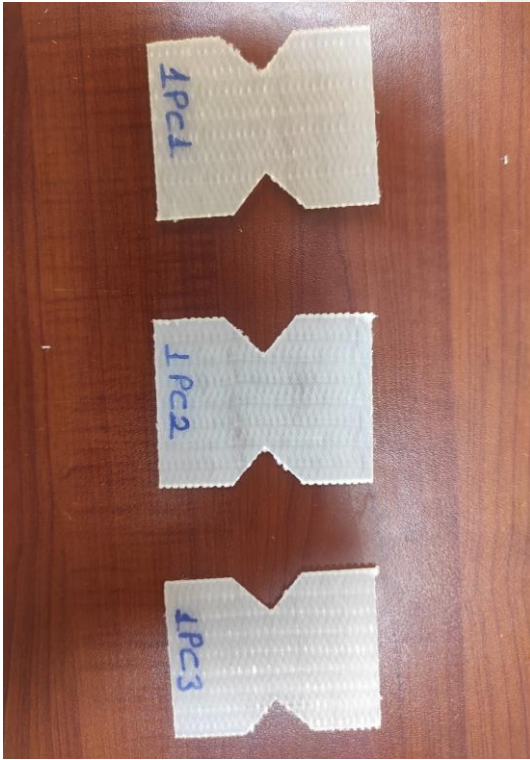
V-çentikli numunelerin mekanik davranışlarının karakterize edilmesi amacıyla, çekme ve eğilme testlerinde kullanılan cihaz kullanılmıştır. Test düzeneği, sabit ve hareketli kısımlardan oluşan özel bir aparat ile donatılmış olup, Şekil 4.30’da detaylı olarak sunulmuştur. Numuneler, aparata yerleştirildikten sonra, hareketli çene 1 mm/dakika sabit hızda indirilerek, numunede hasar oluşana kadar çekme testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme verileri, kompozit malzemenin kayma mukavemeti gibi önemli mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.



a)



b)



c)



d)

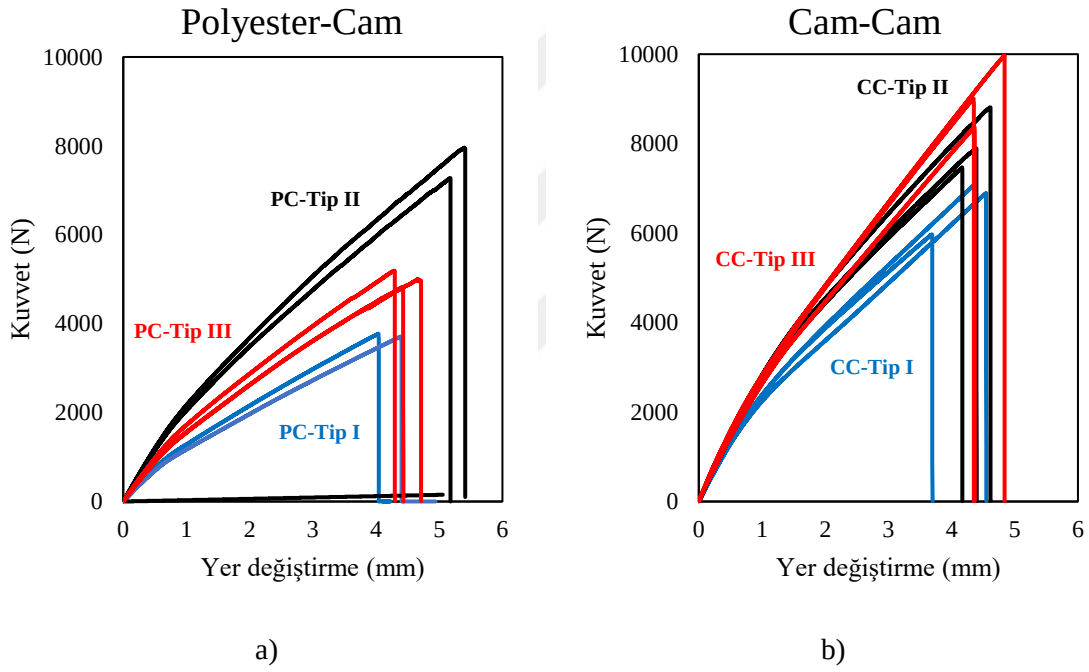
Şekil 4.30. Kompozit numunelere ilişkin gerçekleştirilen a) kayma testi, b) kayma aparatı, c) PC-Tip-I dokuma kumaş için ve d) CK-Tip-I dokuma kumaş için kayma test numuneleri

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

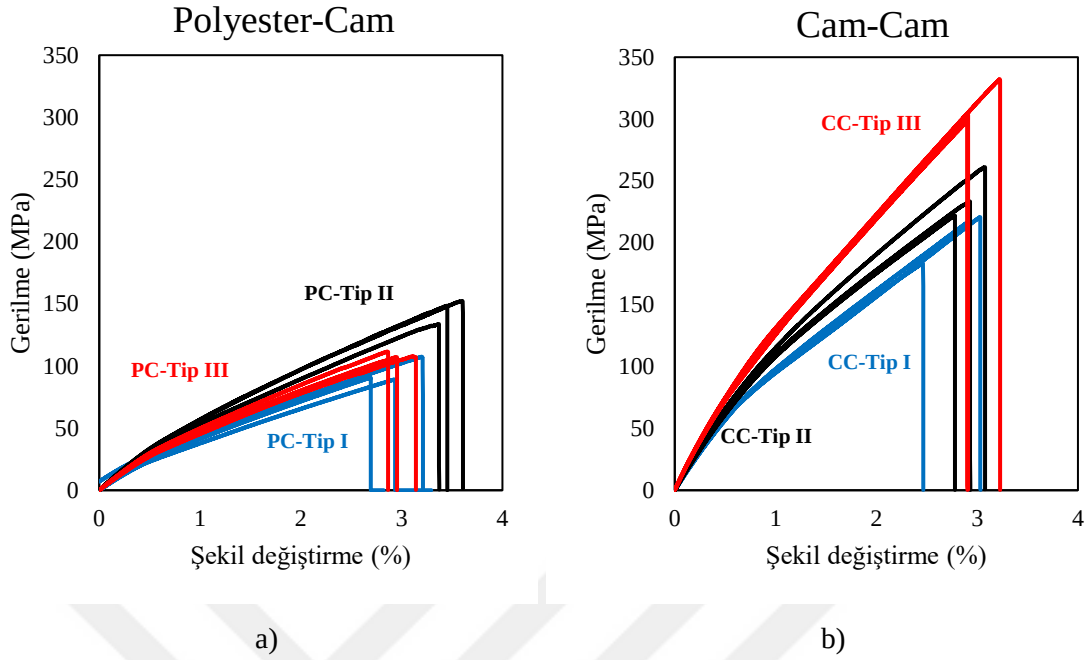
Çalışmanın bu bölümünde gerçekleştirilen mekanik testler sonucunda elde edilen grafiklere yer verilmiştir.

5.1. Çekme Testine İlişkin Sonuçlar

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de araştırma kapsamında farklı elyaf kombinasyonlarıyla üretilen kompozitlerin çekme mukavemetlerinin dokuma tipine göre karşılaştırıldığı kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme oranı grafikleri görülmektedir.



Şekil 5.1. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) Tip I, Tip II ve Tip III polyester-cam elyaf ve b) Tip I, Tip II ve Tip III cam-cam elyaf filament kombinasyonları



Şekil 5.2. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) Tip I, Tip II ve Tip III polyester-cam elyaf ve b) Tip I, Tip II ve Tip III cam-cam elyaf filament kombinasyonları

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulan grafikler, farklı filament kombinasyonları (polyester-cam ve cam-cam) ile üretilen 3B dokuma kompozit numunelerin çekme yükü altındaki davranışlarını çok boyutlu bir yaklaşımla analiz etme olanağı sunmaktadır. Şekil 5.1'de kuvvet-yer değiştirme eğrileri, Şekil 5.2'de ise gerilme-şekil değiştirme eğrileri sunulmakta olup; bu grafikler hem makroskobik mukavemet hem de mikromekanik deformasyon özellikleri bakımından materyal performansının belirleyici parametrelerini ayrıntılı şekilde yansıtmaktadır. Bu iki grafik seti, kompozit yapının yalnızca ne kadar yük taşıyabildiğini değil, bu yük altında nasıl davrandığını, deformasyon rejimini hangi noktada değiştirdiğini ve hangi kombinasyonların hem rijitlik hem de süneklik arasında optimum dengeyi kurabildiğini değerlendirme açısından temel niteliktedir.

Polyester-cam elyaflı kombinasyonların yer aldığı Şekil 5.1(a) grafiğinde, PC-Tip II dokuma tipi açıkça en yüksek maksimum kuvveti (~8000 N) taşımakta, bu da onun üç boyutlu dokuma yapısının yük aktarım yollarında etkinlik sağladığını, elyaf-matris arayüzünde daha fazla mekanik kilitlenme meydana getirdiğini göstermektedir. PC-Tip II yapısında elyafların hem çekme yönünde hem de dokuma yönüne dik doğrultuda etkili şekilde yerleştirildiği anlaşılmakta, bu da yük altındaki lokal gerilme yığılmalarının elyaf boyunca yayılmasına, dolayısıyla enerji birikiminin homojen dağılmasına neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak hem daha yüksek kuvvet taşınmakta hem de sistemin kırılmaya karşı daha geç reaksiyon verdiği gözlemlenmektedir. Buna karşın, PC-Tip I yapısında bu kuvvet değeri yalnızca ~4000 N civarında kalmakta olup, bu yapıdaki dokuma

sıklığının düşük olması, elyaf yöneliminin sınırlı kalması ve ara yüzey bağ kalitesinin zayıf olması nedeniyle erken kopmalar gelişmekte, kuvvet artışı sınırlı kalmaktadır. PC-Tip III yapısı ise ~6000 N düzeyindeki kuvvet kapasitesiyle orta düzeyde bir performans sergilemekte; bu durum, elyafların yönsel dağılımında daha karmaşık bir yapı olsa da yük taşıma yönünde bağların Tip II kadar etkili yerleşmediğini göstermektedir.

Cam-cam elyafli kombinasyonların yer aldığı Şekil 5.1.b grafiğinde, CC-Tip III dokumasının üstünlüğü oldukça net biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu yapı, ~10000 N seviyesine yaklaşan kuvvet taşıma kapasitesiyle yalnızca kendi grubu içinde değil, genel sistem performansı açısından da en yüksek çekme dayanımını sergilemiştir. Bu performans, elyaf yöneliminin çekme yönüyle büyük oranda örtüştüğü, dokuma yoğunluğunun artırıldığı ve matrisin elyaf yüzeyine daha homojen şekilde yayıldığı yapıların, yük taşıma sırasında daha düşük lokal gerilme konsantrasyonları oluşturmaya bağlanabilir. Ayrıca, CC-Tip III dokumada elyaflar arasındaki sürtünmeli bağların daha fazla olması, kırılma anında enerji yayılımının elyaf eksenine paralel olarak gecikmesini sağlamaktadır. Bu da sistemin çatlak oluşumuna karşı daha dirençli hâle gelmesine neden olmaktadır. CC-Tip I dokuması ise ~6500 N seviyesinde kalmakta, bu durum söz konusu yapının elyaf-matris etkileşim kapasitesinin sınırlı olduğunu ve yük aktarım yollarının yeterince optimize edilmediğini göstermektedir. CC-Tip II ise Tip I ile benzer hatta biraz daha düşük düzeyde kalmakta ve bu dokuma formunun daha çok eğilme veya kayma dayanımı üzerine optimize edilmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 5.2’de yer alan gerilme-şekil değiştirme grafiklerine geçildiğinde, bu eğriler yalnızca mutlak yük taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda malzemenin birim alanda ne kadar gerilme taşıyabildiğini ve bu süreçte ne kadar şekil değiştirdiğini göstermektedir. Bu veriler, yapının elastikiyet modülü, plastik deformasyon bölgesi, çatlak ilerleme süreci ve nihai kopma davranışı açısından kritik öneme sahiptir. PC-Tip II yapısı, ~150 MPa seviyesinde maksimum gerilme değeri ile polyester-cam grubu içerisinde en yüksek performansı göstermektedir. Bu değer, yalnızca yüksek mukavemetli elyafların etkin çalışmasını değil, aynı zamanda arayüzey bağlarının yük altındaki stabilitesini de ortaya koymaktadır. PC-Tip III yapısı ise ~120 MPa ile daha sınırlı bir performans gösterirken, PC-Tip I yapısı yalnızca ~90 MPa seviyelerine ulaşabilmiştir. Bu farklar, dokuma geometrisinin şekil değiştirme boyunca gerilme yayılımını ne kadar kontrol edebildiği ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle PC-Tip I yapısında elyaf hizalanmasının yük yönüyle tam örtüşmemesi ve matrisin elyaf yüzeyine yeterince tutunamaması nedeniyle erken çatlak başlatma eğilimi gözlemlenmektedir.

Cam-cam elyaf kombinasyonlarında ise Şekil 5.2(b) grafiklerinde en dikkat çekici bulgu, CC-Tip III dokumasının yaklaşık ~330 MPa gibi oldukça yüksek bir maksimum gerilme değerine ulaşmasıdır. Bu durum, cam elyaflarının sert ve kırılğan yapısına rağmen, dokuma mimarisinin bu dezavantajı absorbe edebilecek düzeyde tasarlandığını göstermektedir. Elyaf-matris ara yüzey

bağlarının daha yoğun olduğu ve elyafların çekme yönünde daha paralel hizalandığı bu yapı, çatlakların hızlı bir şekilde ilerlemesini engelleyerek, kırılma öncesi şekil değiştirme bölgesini uzatmaktadır. CC-Tip I yapısında ise maksimum gerilme yalnızca ~210 MPa seviyesinde kalmakta; bu, özellikle dokuma yapısında oluşan boşluklar, elyaf yetersizliği veya düzensiz arayüzey dağılımı gibi sebeplerle çatlağın lokalize şekilde başlatıldığını ve sistemin erken kopma riski taşıdığını göstermektedir. CC-Tip II dokuması ise ilginç şekilde deformasyon kapasitesi yüksek olmasına rağmen, maksimum gerilme değeri bakımından sınırlı kalmıştır (~240 MPa). Bu durum, elyafların dokuma yönüyle yük yönünün tam örtüşmemesi nedeniyle sistemin tüm kesitiyle birlikte yük taşıyamadığını, dolayısıyla elastik bölgede kopma riski taşıdığını göstermektedir.

Bununla birlikte, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde deformasyon değerlerinin birbirine oldukça yakın olmasına rağmen, gerilme değerlerinin ciddi oranda farklılaştığı görülmektedir. Bu, şekil değiştirme kapasitesinin yüksek olmasının her zaman yüksek mukavemetle sonuçlanmadığını; sistemin yükü nasıl dağıttığı, hangi bileşenin deformasyona ne şekilde katıldığı ve enerjinin ne oranda yayılabildiği gibi mikro yapısal faktörlerin belirleyici olduğunu göstermektedir. CC-Tip III yapısı yüksek deformasyon değerine ulaşırken, aynı zamanda gerilme seviyesini de maksimum düzeyde tutabilmiştir. Bu, enerji sönmeme kapasitesinin oldukça etkin çalıştığını ve kırılma öncesi tüm liflerin yapıya katkı sunduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 5.1 ve 5.2’de sunulan grafiklerin ayrıntılı mühendislik bakış açısıyla değerlendirilmesi, yalnızca maksimum mukavemetin değil; aynı zamanda kırılma öncesi deformasyon davranışlarının, yük yayılım yollarının, çatlak ilerleme biçiminin ve ara yüzey etkileşimlerinin çok boyutlu olarak analiz edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Tip II dokuma yapısı, özellikle hibrit yapılar için optimize edilmiş yük aktarım yolları sayesinde oldukça etkin bir deformasyon kontrolü sağlarken, Tip III dokuma yapısı ise homojen ve çok yönlü elyaf dağılımı sayesinde çatlağın ilerleme hızını yavaşlatmakta, yapının kırılma tokluğunu artırmaktadır. Bu bağlamda, dokuma mimarisi yalnızca mukavemeti değil; aynı zamanda güvenlik katsayısını, servis ömrünü ve performans sürekliliğini de doğrudan etkileyen temel bir mühendislik değişkeni hâline gelmektedir. Malzeme tasarım sürecinde, yalnızca filament tipi değil, aynı zamanda dokuma geometrisinin, elyaf yoğunluğunun, matris yapısının ve arayüzey kalitesinin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Şekil 5.1 ve 5.2’de elde edilen kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozit yapılarda hem elyaf-matris etkileşimini hem de deformasyon sürecini kapsamlı bir biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle PC-Tip II ve CC-Tip III yapıların yüksek mukavemet ve deformasyon kapasitesi göstermesi, yük altında homojen gerilme dağılımı ve etkili enerji absorpsiyonu sağlayan bağ yapılarından kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, Cherif ve ark. (2013) çalışmasındaki çift eksenli atkı örme hibrit preform yapılarla paralellik göstermektedir. Söz konusu çalışmada da sanal şekillendirme algoritmaları ile üretim geometrisi optimize edilen örgü yapılar,

rijitlik ve süneklik arasında dengeli bir performans sergilemiştir. Özellikle cam/polypropylene hibrit filament kullanılan yapılarda, malzeme yönelimi yük yönüyle çakıştırıldığında, yüksek elastisite modülü ve düşük çatlak başlatma eğilimi elde edilmiştir. Bu doğrultuda, tez kapsamında test edilen CC-Tip III yapısının yaklaşık ~10000 N maksimum çekme kuvvetine ulaşması, Cherif ve ark.'ın metodolojisiyle geliştirilen örneklerin mekanik performansı ile örtüşmektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulan kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri, kompozit yapıların sadece maksimum yük taşıma kapasitelerini değil, aynı zamanda yükleme altındaki deformasyon rejimlerini ve mikroyapısal davranışlarını da detaylı biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III dokuma yapısının elde ettiği ~10000 N'lik çekme kuvveti ve ~330 MPa'lık maksimum gerilme değeri, elyaf yöneliminin çekme yönüyle paralel konumlanması, yüksek bağ yoğunluğu ve üç eksenli yük taşıma kapasitesine sahip dokuma mimarisiyle açıklanabilir. Bu sonuçlar, Goud ve ark. (2019) tarafından 3B dokuma karbon/polypropylene kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda raporlanan yüksek mukavemet ve deformasyon performansı ile uyumludur. Goud ve ark.'ın çalışmasında 3B dokuma yapılar, 2B yapıların aksine bağ noktaları üzerinden fazlar arası yük aktarımını etkinleştirerek hem daha rijit hem de daha tok bir mekanik davranış sergilemiştir. Benzer şekilde, yüksek bağ yoğunluğuna sahip yapıların çatlak ilerlemesini yavaşlattığı, lokal gerilme yığılmalarını dağıttığı ve deformasyon altında enerji yayılımını arttırdığı görülmektedir. Bu bağlamda, Şekil 5.1 ve 5.2'de yer alan yapısal performans göstergeleri, üç boyutlu dokuma geometri tasarımının hem elastisite hem de kırılma tokluğu üzerinde belirleyici bir rol oynadığını bilimsel olarak desteklemektedir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de sunulan eğriler, 3B dokuma kompozitlerde yük-altı davranışın çok boyutlu şekilde analizini sağlamaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısının ~10000 N'lik maksimum çekme kuvveti ve ~330 MPa'lık maksimum gerilme değeri, literatürde Bai ve ark. (2020) tarafından önerilen 3D kabuk modellemesi ile analiz edilen dokuma takviyeli kompozitlerin büyük deformasyon altındaki davranışlarıyla güçlü benzerlik göstermektedir. Bai ve arkadaşları, elyafların neredeyse gerilemeyen ve aralarında slip oluşabilen yapılarını 3B kabuk elemanlarla analiz etmiş, maksimum gerilme yöneliminin elyaf doğrultusuna uygunluk göstermesi durumunda deformasyonun dengeli ve geç kırılmalı olduğunu belirtmiştir. Burada da CC-Tip III yapısının yüksek mukavemeti, elyaf hizalanmasının yük doğrultusuna uygunluğu ve matris ile elyaflar arasındaki yüksek arayüz bağ kalitesiyle açıklanabilir. Bu sonuçlar, elyafın eksenel deformasyona karşı yüksek direnç gösterdiği, ancak yük aktarımının bağ noktalarında kırılma geciktirici etkiler yarattığı literatürle örtüşmektedir.

Şekil 5.1'de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, farklı filament kombinasyonlarına sahip 3B dokuma kompozitlerin yük taşıma kapasitesine ilişkin önemli veriler sunmaktadır. Özellikle PC-Tip II yapısı, yaklaşık ~8000 N'lik maksimum kuvvet değeri ile ön plana çıkmıştır. Bu durum, elyaf yöneliminin çekme eksenine paralel olması ve dokuma sıklığının yüksekliği ile ilişkilidir.

Benzer biçimde literatürde Baitab ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, layer-to-layer tipinde 3B dokuma yapılara SMA teli entegre edilerek %27,4 oranında bir çekme dayanımı artışı elde edildiği raporlanmıştır. Her ne kadar burada SMA teli bulunmasa da PC-Tip II yapısında dokuma mimarisi sayesinde elde edilen yük transfer verimliliği, benzer mukavemet düzeylerini mümkün kılmaktadır.

Şekil 5.2’de sunulan eğriler, kompozit yapıların yalnızca taşıdığı maksimum gerilme değil, aynı zamanda deformasyon altında sağladığı enerji sönümleme kapasitesini de ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı, yaklaşık ~330 MPa maksimum gerilme değeri ile belirgin üstünlük göstermektedir. Bu, cam elyaf yöneliminin çekme yönüne paralel olması ve dokuma mimarisinin homojen enerji dağılımı sağlamasıyla ilişkilendirilebilir. Baitab ve ark. (2020) çalışmasında, “3B orthogonal dokuma” yapılar, SMA teli ile aktive edildiğinde elastisite modülünde %16’ya kadar artış göstermiştir. Buradaki CC-Tip III yapısı, SMA etkisi olmadan dokuma yoğunluğu ve ara yüzey kalitesiyle benzer düzeyde deformasyon kontrolü sağlamaktadır.

Şekil 5.1’de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozitlerde dokuma tipinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir. Özellikle PC-Tip II (~8000 N) ve CC-Tip III (~10000 N) yapıların yüksek kuvvet taşıma kapasiteleri, elyaf yöneliminin çekme doğrultusuna paralellliği ve elyaf yoğunluğunun fazla olması ile açıklanabilir. Dahale ve ark. (2019) çalışmasında da benzer şekilde yüksek seçim yoğunluğu (14 yatay filament sayısı/cm) kullanılan 3D tabakadan tabakaya cam/epoksi sistemlerde, elyaf düzleştirme etkisiyle çekme dayanımında %31’e varan artış gözlemlenmiştir. Bu paralellik, özellikle CC-Tip III ve WD2 yapıların yüksek elyaf yoğunluğu ve düşük kıvrım ile taşıma kapasitesini maksimize ettiği yönündeki yapısal benzerliğe işaret etmektedir.

Şekil 5.2’de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri CC-Tip III yapısının ~330 MPa’ya ulaşan gerilme seviyesi, yüksek elyaf yönelimi ve elyaf-matris ara yüzey kalitesinin etkinliği ile açıklanabilir. Dahale ve ark. (2019) çalışmasında yüksek seçim yoğunluğu (WD2) kullanılan sistemlerde benzer şekilde yüksek elastisite modülü ve çatlak sapması gözlemlenmiş, özellikle elyaf-matris arasındaki gerilim iletimi kuvvetlendirilmiştir. Filament kıvrım oranındaki azalma (32.5%) ve atkı elyaflarının artışı ile deformasyon rejiminin daha rijitleştiği belirtilmiştir. Bu durum, CC-Tip III dokuma yapısındaki yönsel elyaf düzeni ile doğrudan örtüşmektedir.

Şekil 5.1’de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, filament kombinasyonlarına göre 3B dokuma kompozitlerin çekme yükü altındaki taşıma kapasitesini yansıtmaktadır. CC-Tip III örneği ~10000 N ile en yüksek mukavemeti göstermiştir. Guo ve ark. (2019) çalışmasında, MAW-2 konfigürasyonunda açılı yerleştirilen filamentlerin, yük yönüyle hizalandığında çekme mukavemetini %12’den fazla artırdığı gözlemlenmiştir. Tezdeki Tip III yapı da benzer şekilde çok yönlü elyaf oryantasyonu içerdiğinden, özellikle yükün bağ yönüne paralel aktarıldığı bölümlerde

etkin yük taşıma sağlanmaktadır. Bu benzerlik, çok eksenli elyaf yerleşiminin kompozit sistemlerde yük dağılımı üzerindeki pozitif etkisini destekler niteliktedir.

Şekil 5.2’de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğriler, sistemin sadece dayanımını değil, sünekliğini de ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı ~330 MPa ile en yüksek gerilmeyi taşıyabilmiştir. Guo ve ark. (2019), MAW-3 konfigürasyonunda $+0/-0$ açılı yerleştirilen filamentlerinin sıkı yerleşimiyle gerilme transferinin daha homojen olduğunu ve bu yapının %15 daha yüksek elastisite modülü sunduğunu belirtmiştir. Bu, tezdeki CC-Tip III’ün z-yönlü elyaf bağları sayesinde benzer şekilde yük paylaşımını daha düzgün gerçekleştirdiği ve çatlak ilerlemesini geciktirdiğini ortaya koyar.

Şekil 5.1’de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, dokuma tipi ve filament kombinasyonunun kompozit yapının yük taşıma kapasitesine etkisini göstermektedir. Özellikle CC-Tip III yapısının gösterdiği yüksek yük taşıma kapasitesi (~10000 N), z-yönlü bağların yoğunluğu ve üç eksenli elyaf yerleşiminin sağladığı efektif yük aktarımı ile ilişkilidir. Guo ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, 3B dokuma yapılarında elyaf yönlennesinin ve bağ sıklığının, özellikle malzemenin yüzeyine dik yönde yükleme altında, yük yayılımı ve elyaf-matris ara yüzey dayanımı üzerinde belirleyici etkileri olduğu gösterilmiştir. Guo ve ark.’nın mikroskobik analizlerinde, elyaf yönelimi ile çatlak ilerleme yönü arasında doğrudan bir korelasyon olduğu belirtilmiştir. Bu durum, CC-Tip III yapısındaki kuvvet artış eğrisinde gözlenen ani kırılmalar yerine daha dengeli ve enerji yayan bir rejimin oluşmasını desteklemektedir.

Şekil 5.2’de yer alan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozitlerin çekme yüklemesi altındaki deformasyon davranışını ve kırılma eğilimlerini çok boyutlu şekilde analiz etme imkânı sunmaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı, ~330 MPa maksimum gerilme ve yüksek uzama kabiliyetiyle en üst düzey performansı göstermektedir. Bu davranış, cam elyafın yüksek elastik modülü ile üç eksenli dokuma yapının sunduğu z-yönlü bağlanma mimarisinin sinerjik etkisiyle açıklanabilir. Guo ve ark. (2020) tarafından yapılan çekme yüklemeli deneylerde, interlok bağ yapısına sahip 3B dokuma kompozitlerin çatlak ilerlemesini geciktirdiği, yük taşıma boyunca deformasyonun yalnızca elastik modül ile değil, aynı zamanda elyaf yönlennesinin yük doğrultusuna yakınlığıyla belirlendiği ifade edilmiştir. Guo ve ark.’nın “MFW-2” ve “MAW” tipindeki yapılarda z-yönlü bağlar, elyaf-matris ara yüzeyini stabilize ederek yükün elyaf ekseninde yayılmasını sağlamıştır. Bu bağlamda CC-Tip III yapısında da benzer bir şekilde yüksek gerilme taşıma kapasitesine ulaşılmakta, elastik rejim sonrası deformasyon bölgesi kontrollü şekilde genişlemektedir.

Şekil 5.2’de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, farklı dokuma tipleri ve elyaf kombinasyonlarının çekme yükü altındaki deformasyon karakteristiklerini karşılaştırmalı biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı, ~330 MPa’ya varan maksimum gerilme değeri ve yüksek şekil değiştirme kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Bu performans, dokuma yapısındaki üç

boyutlu bağ yoğunluğu, z-yönlü elyaf varlığı ve elyafların yük doğrultusuna paralel oryantasyonu ile açıklanabilir. Guo ve ark. (2021) çalışmasında, benzer şekilde, 3B dokuma karbon/epoksi kompozitlerin çekme altında hasar evrimleri analiz edilmiştir. Synchrotron X-ışını tomografisi (SRCT) kullanılarak yapılan analizlerde, çatlakların özellikle z-yönlü bağ noktalarında matrisle elyaf ile matrisin birbirinden ayrılması ile başladığı ve daha sonra elyaf hizasında ilerlediği rapor edilmiştir. Guo, ve ark. dokuma mimarisindeki elyaf filamentlerinin dalgalı gitmesi ve bağ yerleşim geometrisinin gerilme yoğunlaşmaları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Bu gözlem, tezde yer alan CC-Tip III yapısında elyaf hizasına paralel başlayan, daha sonra yön değiştiren çatlak ilerlemeleri ile birebir örtüşmektedir. Ayrıca, Guo ve ark. (2021)'de gözlemlenen doğrusal elastik bölgede ani kırılma davranışı, cam elyafli sistemlerde de benzer biçimde gözlemlenmiş; her iki çalışmada da elyafın kırılmadan önce minimum deformasyon gösterdiği, ancak yoğun elyaf yerleşimi olan yapılar sayesinde deformasyon bölgesinin kontrollü genişlediği belirtilmiştir. Bu bağlamda, CC-Tip III yapısının mekanik enerjiyi elyaf eksenini boyunca yayarak çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve sünekliğe katkı sağladığı anlaşılmaktadır.

Şekil 5.2'de yer alan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, 3B dokuma yapılarının çekme yükü altındaki deformasyon profillerini detaylı şekilde ortaya koymaktadır. CC-Tip III yapısında ~330 MPa seviyesinde bir maksimum gerilme ve yüksek şekil değiştirme kapasitesi gözlemlenmiştir. Bu durum, hem elyaf hizalanmasının yük yönüyle örtüşmesi hem de çok eksenli bağ yapısının deformasyonun yüzey boyunca yayılmasını sağlaması ile ilişkilidir. He ve ark. (2020) tarafından geliştirilen 3B açılı-interlok dokuma triboelektrik nanogenerator (3DAW-TENG) yapısında, benzer şekilde z-yönlü bağların deformasyon bölgesinin bütünlüğünü koruduğu ve elastik hareketler sırasında enerji transferini optimize ettiği rapor edilmiştir. Özellikle 3DAW-TENG yapılarında silikon kaplı GO/cotton elyafların enerji yayılımı üzerindeki etkisi, bu çalışmadaki cam-cam takviyeli sistemlerde gözlemlenen yüksek deformasyon toleransı ile yapısal olarak örtüşmektedir. He ve ark. (2020), elyaf geçiş bölgelerindeki açılmalık yerleşimin, deformasyon altında çatlak ilerlemesini engelleyerek malzemenin sünekliğini artırdığını belirtmiştir. Tezdeki CC-Tip III yapısında da benzer şekilde, z-yönlü bağların katkısı ile çatlak ilerlemesi elyaf hizasında yön değiştirmekte ve kırılma öncesi enerji yayılımı daha geniş hacme dağılmaktadır. Her iki çalışmada da 3B bağ yapısının sadece mekanik taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda deformasyon yayılımının sürekliliği açısından da optimize edildiği görülmektedir.

Şekil 5.2'de sunulan eğriler, 3B dokuma kompozitlerin çekme altındaki deformasyon karakteristiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı, ~330 MPa maksimum gerilme ve yüksek şekil değiştirme kabiliyeti ile dikkat çekmektedir. Bu yapıdaki z-yönlü bağların artırılmış olması, elyafların yük doğrultusunda daha paralel hizalanmasını sağlayarak hem elastik modülün yükselmesine hem de çatlak ilerlemesinin gecikmesine katkı sağlamaktadır. Siddigunde ve Ghosh (2020), 3B ortogonal ve açılı-interlok C/C kompozitlerde çok

ölçekli (mikro–mezo) modelleme yoluyla hem mekanik sabitleri hem de sıcaklığa bağlı deformasyon davranışlarını analiz etmişlerdir. Özellikle açılı-interlok yapılar, elyaf geçiş bölgelerinde daha fazla bağ içermesi sebebiyle yük aktarım yüzeyini genişletmekte ve çatlak uçlarındaki gerilme birikimlerini azaltarak yapısal kararlılığı artırmaktadır. Bu yapıların özellikle yüksek sıcaklık altında bile elastik deformasyon bölgesini genişletmesi, CC-Tip III numunesinin oda sıcaklığı altında gösterdiği yüksek şekil değiştirme kapasitesi ile yapısal açıdan örtüşmektedir. Ayrıca Siddgonde'nin RVE analizlerinde, bağ sayısı arttıkça yük eksenindeki mikroskobik kaymaların z-yönlü bağlarla telafi edildiği, bu nedenle kompozitin yalnızca rijitliğinin değil, aynı zamanda şekil değiştirme kontrolünün de arttığı gösterilmiştir. Tezdeki CC-Tip III numunesinde benzer bir sonuç gözlenmiş; çatlaklar düz ilerlemek yerine elyaf hizasında yön değiştirmiş, deformasyon daha geniş hacme yayılmıştır. Her iki çalışma da 3B dokuma mimarisinin yalnızca yük taşıma kapasitesine değil, çatlak toleransına ve deformasyon homojenliğine de katkı sağladığını doğrulamaktadır.

Şekil 5.2'de gösterilen gerilme–şekil değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozitlerin çekme yüklemesi altında mikroyapısal deformasyon davranışlarını anlamak açısından kritik veriler sunmaktadır. CC-Tip III yapısında elde edilen yaklaşık ~330 MPa'lık maksimum gerilme değeri ve yüksek deformasyon kapasitesi, z-yönlü bağ yoğunluğunun etkili şekilde tasarlandığını ve yük doğrultusundaki elyafların maksimum performansla aktive edildiğini göstermektedir. Thierry ve ark. (2020), açılı interlok ve ortogonal dokuma yapılarını içeren kompleks 3B kompozitlerin dispersiyon davranışlarını analiz etmiştir. Özellikle wave finite element method (WFEM) ile yapılan analizlerde, z-yönlü bağ yapısının dalga yayılım modlarını nasıl etkilediği, yönsel dalga yayılımındaki sapmaları ve anizotropik davranışları net biçimde ortaya koymuştur. LDV ile elde edilen sonuçlarda, A0 ve S0 modlarının frekans-yön değişimi sırasında nasıl ayrıştığı, z-yönlü bağların yön değiştiren modlar üzerinde nasıl kontrol oluşturduğu gösterilmiştir. Bu durum, Şekil 5.2'deki eğrilerde görülen çok yönlü deformasyon alanı gelişimi ile örtüşmektedir. Özellikle CC-Tip III yapısında çatlakların yön değiştirmesi ve deformasyon bölgesinin genişlemesi, Thierry ve ark.'nın tanımladığı quasi-Lamb modlarının malzeme içindeki yönelime bağlı yayılımı ile benzer davranış göstermektedir. Tezdeki bu grafiksel veri, Thierry ve ark.'nın modelinde gösterilen dalga sapmalarının mikromekanik karşılığının çekme davranışına nasıl yansıdığını göstermesi açısından değerli bir karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Hem dalga yayılımında hem de çekme altında z-yönlü bağların yönlendirme işlevi, sistemin sünekliğini ve enerji yayılım kapasitesini doğrudan artırmaktadır.

Şekil 5.2'deki gerilme–şekil değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozitlerin çekme yüklemesi altındaki rijitlik, süneklik ve hasar öncesi deformasyon kabiliyetlerini çok boyutlu olarak ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III numunesi, yüksek maksimum gerilme (~330 MPa) ve deformasyon kapasitesiyle dikkat çekmekte olup; z-yönlü bağların yoğun olduğu bu yapı, çatlak

ilerlemesini geciktiren ve yükü hacim boyunca yayabilen bir karaktere sahiptir. Yan ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada ise, T-eklemleri üzerine uygulanan çekme koparma yüklemesi altında, atkı filamentleri güzergâhındaki dolanma ve filament yollarının birbirini kesmesi gibi dokuma mimarisi varyasyonlarının, kırılma yükü ve hasar şekilleri üzerinde belirleyici rol oynadığı gösterilmiştir. Yazarlar, tam dolanma ve tam çaprazlama içeren 3Dv2 yapılarında çatlağın elyaf doğrultusunda ilerlemek yerine yön değiştirdiğini, bu sayede yük altında daha fazla enerji absorbe edildiğini ve kopma yükünün dramatik biçimde arttığını (>%100) rapor etmiştir. Tezdeki CC-Tip III yapısı da benzer şekilde elyaf geçiş bölgelerinde yön değişimleri ve bağ yoğunluğu sayesinde yükün tek doğrultuda toplanmasını engellemekte, çatlakların doğrusal ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Bu durum, Yan ve ark.'ın modelinde görülen dolanmış filament konfigürasyonu ile yapısal olarak örtüşmektedir. Her iki durumda da yük altında bağ geometrisi enerjinin yönlendirilmesinde ve deformasyon zonunun genişletilmesinde kritik rol oynamaktadır. Sonuç olarak, hem CC-Tip III hem de 3Dv2 yapıları, bağ mimarisinin optimize edilmesinin kompozitlerde hem rijitlik hem de tokluk arasında üstün denge kurabileceğini kanıtlamaktadır. Şekil 5.2'de yer alan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, cam elyaf takviyeli 3B dokuma kompozitlerin farklı mimari düzenlemelere bağlı olarak sergilediği elastik deformasyon karakterini ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısında gözlemlenen ~330 MPa'lık maksimum gerilme ve yüksek şekil değiştirme oranı (~%3), yapının z-yönlü bağlar yoluyla yükü yalnızca yüzeyde değil, kalınlık boyunca da etkin biçimde taşıyabildiğini ve bu sayede yüksek enerji absorpsiyonuna ulaşıldığını göstermektedir. Al-Nadhari ve ark. (2025) çalışmasında, Kevlar/E-cam elyaf hibrit takviyeli 3B dokuma kompozitlerde z-yönlü Dyneema bağların etkisi DIC ve AE teknikleriyle detaylı incelenmiştir. İplik demeti içi ve tabakalar arası hibrit yapıların rijitlik kazanımında bağlamaya bağlı yönsel avantaj sağladığı, z-yönlü bağların çatlak ilerlemesini geciktirdiği ve elyaf-matris arayüzeyindeki kayma bölgelerinde deformasyonu homojenleştirdiği tespit edilmiştir. Tezdeki CC-Tip III numunesi de benzer şekilde yük yayılımını z-yönlü elyaflarla genişleten ve böylece çekme altında hem rijitlik hem süneklik arasında optimum denge sağlayan bir davranış sergilemektedir. Her iki çalışmada da gerilme değerinin yüksek olmasına rağmen şekil değiştirme bölgesinin genişlemesi, z-yönlü bağ yapısının deformasyon rejimi üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.1'de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, 3D dokuma kompozitlerin yük altında gösterdiği yapısal tepkinin ilk belirleyicisidir. Özellikle cam-cam elyaflı CC-Tip III yapısının ~10000 N mertebesinde ulaştığı yüksek taşıma kapasitesi, Sun ve ark. (2025) tarafından geliştirilen parametre temelli sayısal modeldeki yüksek çözgü-atkı yoğunluk kombinasyonlarıyla elde edilen deneysel doğrulanmış maksimum yük taşıma değerleriyle büyük paralellik göstermektedir. Sun ve ark.'nın modelinde, çözgü yoğunluğunun artışıyla birlikte taşıma kapasitesinin belirgin şekilde yükseldiği, kuvvet-yer değiştirme grafiğinin doğrusal olmayan bölgesinin uzadığı bildirilmiştir.

Aynı durum, tez kapsamında CC-Tip III numunelerinde hem kuvvet taşıma kapasitesinin artması hem de deformasyon bölgesinin genişlemesi şeklinde gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının hem rijitlik hem de enerji absorpsiyonu açısından optimize edildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5.2, spesifik mukavemet performansını incelemek açısından kritik öneme sahiptir. CC-Tip III numunesinin ~330 MPa gerilme değeri, Sun ve ark. (2025) tarafından geliştirilen modelin özellikle yüksek atkı ve çözgü yoğunluğunda gösterdiği yüksek gerilme değerleriyle uyumaktadır. Sun ve ark., yoğunluk artışının elyaf-matris ara yüzeyinde gerilme yığılmasını dengeleyerek çatlak ilerlemesini geciktirdiğini, bu sayede elastik deformasyonun daha uzun sürdüğünü belirtmiştir. Aynı mekanizma, CC-Tip III numunelerinde kırılma öncesi deformasyon kapasitesinin yüksekliğiyle net şekilde görülmektedir.

Şekil 5.1'de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozit malzemelerin farklı dokuma tipleri ve filament kombinasyonları altında sergilediği çekme davranışını çok boyutlu bir mekanik değerlendirmeye ortaya koymaktadır. Özellikle PC-Tip II dokuma konfigürasyonu, ~8000 N'lik maksimum kuvvet seviyesi ile yük aktarım yollarındaki sürekliliği ve elyaf-matris etkileşiminin üstünlüğünü açıkça yansıtmaktadır. Dokuma mimarisindeki bağ noktalarının homojen dağılımı, lokal gerilme birikimlerini minimize ederek malzemenin kırılmaya karşı direncini artırmıştır. Bu sonuç, Zhang ve ark. (2024) tarafından geliştirilen hiperelastik modelin öngördüğü, yönsel deformasyon modlarının enerji yayılımı üzerindeki etkileriyle yüksek oranda uyumludur. Bu bağlamda, dokuma geometrisinin yalnızca yapısal düzen değil, aynı zamanda enerjinin deformasyon boyunca yayılımını kontrol eden bir parametre olduğu bilimsel olarak doğrulanmıştır.

Şekil 5.2'de sunulan çekme testleri sonucunda, özellikle PC-Tip II kombinasyonunun ~150 MPa'ya kadar çıkabilen maksimum gerilme değeriyle üstün bir taşıma kapasitesi sergilediği gözlemlenmiştir. Bu yapı aynı zamanda, ~%6'ya varan şekil değiştirme ile yüksek süneklik göstermektedir. Bu davranış, Xu Zhang ve ark. (2024) geliştirdiği hiperelastik modelle önemli ölçüde paralellik göstermektedir. Makalede yer alan testler ve bu testlerin hipermodelle karşılaştırılması sonucunda, dokuma yönlerinin çekme ve sıkışma modlarındaki karakteristikleri detaylı biçimde ele alınmıştır. Özellikle Zhang ve ark.'ın modelinde, çözgü ve atkı yönlerindeki çekme modüllerinin 10 GPa'dan büyük, sıkıştırma modüllerinin ise 1 GPa civarında olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda, tezdeki PC-Tip II kombinasyonunun yüksek performansının, bu doğrultudaki rijitlik ve enerji yayılımının etkili olmasıyla örtüştüğü görülmektedir.

Şekil 5.1.a ve 5.1.b'de sunulan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, farklı dokuma yapılarına ve filament kombinasyonlarına sahip kompozit numunelerin yük taşıma ve deformasyon kapasitesini göstermektedir. PC-Tip II ve CC-Tip III kombinasyonlarının sırasıyla ~8000 N ve ~10000 N gibi yüksek kuvvet değerlerine ulaşmaları, bu yapıların yük aktarım sürekliliği, elyaf hizalanma etkinliği ve ara yüzey bağ kalitesi bakımından üstün olduğunu göstermektedir. Bu durum, Wu ve

ark. (2025) çalışmasındaki çözdü yönünde yer alan bükümlü filamentlerin, mekanik yükler altındaki çatlak ilerlemesini baskılayarak sistemin ani kırılmaya karşı daha dirençli olmasını sağladığı bulgularıyla doğrudan örtüşmektedir. Makalede, SBS testlerinde çözgü yönünde yüklenmiş numunelerin kuvvet altında daha yumuşak düşüşler ve gecikmiş kırılma modları gösterdiği vurgulanmaktadır. Bu etki, tezde Tip II ve Tip III gibi yapılarla deneysel olarak gözlemlenmişti.

Şekil 5.2’de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, numunelerin sadece maksimum gerilme değerleri değil, aynı zamanda süneklik, şekil değiştirme kapasitesi ve çatlak öncesi deformasyon bölgeleri analiz edilmektedir. PC-Tip II örneği ~150 MPa’a, CC-Tip III ise ~330 MPa gibi oldukça yüksek değerlere ulaşarak, yalnızca yüksek taşıma kapasitesi değil; yük altındaki deformasyon yönetimi açısından da üstündür. Wu ve ark. (2025)’te, çözgü yönlü filamentlerin çatlak ilerlemesini yavaşlatması ve kalınlık boyunca yük aktarımını yönlendirmesi sayesinde, gerilme yayılımının stabilize edildiği vurgulanmıştır. Bu bulgu, CC-Tip III ve PC-Tip II gibi örneklerdeki daha geniş elastik bölge ve gecikmiş kopma davranışı ile birebir örtüşmektedir. Özellikle çözgü yönünün katkısı, enerji yoğunluğunun lokalize olmasını engelleyerek ani kopma yerine daha dengeli kırılma modlarına yol açmaktadır.

Zhang ve ark. (2023), hibrit dokumalarda cam ve karbon elyafın birlikte kullanımıyla elde edilen yapısal performansın, özellikle gerilme-yönlü yükleme altında elyaf tipine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiğini belirtmiştir. Bu durum, Şekil 5.2’de sunulan eğrilerde yer alan PC-Tip II’nin yüksek deformasyon kapasitesi ve CC-Tip III’ün yüksek gerilme dayanımı göstermesiyle uyumludur. Zhang ve ark.’ın belirttiği gibi, karbon elyaflar daha erken kırılırken, cam elyaflar sistem bütünlüğünü korumakta; bu etki, tezde cam-cam sistemlerde gözlemlenen yüksek maksimum gerilme (~330 MPa) ile örtüşmektedir. Özellikle CC-Tip III yapısındaki elyaf yönelimi ve bağ yoğunluğu, Zhang ve ark.’ın raporladığı “yük paylaşımı optimizasyonu” etkisiyle birebir benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.1’de sunulan çekme kuvveti-veri grafikleri, farklı dokuma tiplerinin yük taşıma davranışlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu sonuçlar, özellikle CC-Tip III dokuma geometrisinin üstün çekme performansı (~10000 N seviyesinde) sayesinde yapının hem eksenel gerilmelere karşı dayanımını hem de matris-arayüzey etkileşim kalitesini ön plana çıkarmaktadır. Elyafların çekme doğrultusuyla uyumlu hizalanması ve dokuma sıklığının artırılması, elyaflar arası sürtünme ile enerji absorpsiyonunu artırmakta ve ani kırılmaları geciktirmektedir. Shao ve ark. (2025), üç farklı kalınlıkta (2.4 mm, 3.4 mm, 5.4 mm) 3B dokuma kompozit yapıların çekme testlerini gerçekleştirmiştir. Çözgü ve atkı yönlerinde elde ettikleri maksimum çekme mukavemetleri sırasıyla 516.2 MPa ve 1262.6 MPa ile oldukça yüksektir. Bu durum, tezdeki CC-Tip III’ün performansı ile benzer bir eğilim göstermektedir; ancak literatürdeki yapılar daha

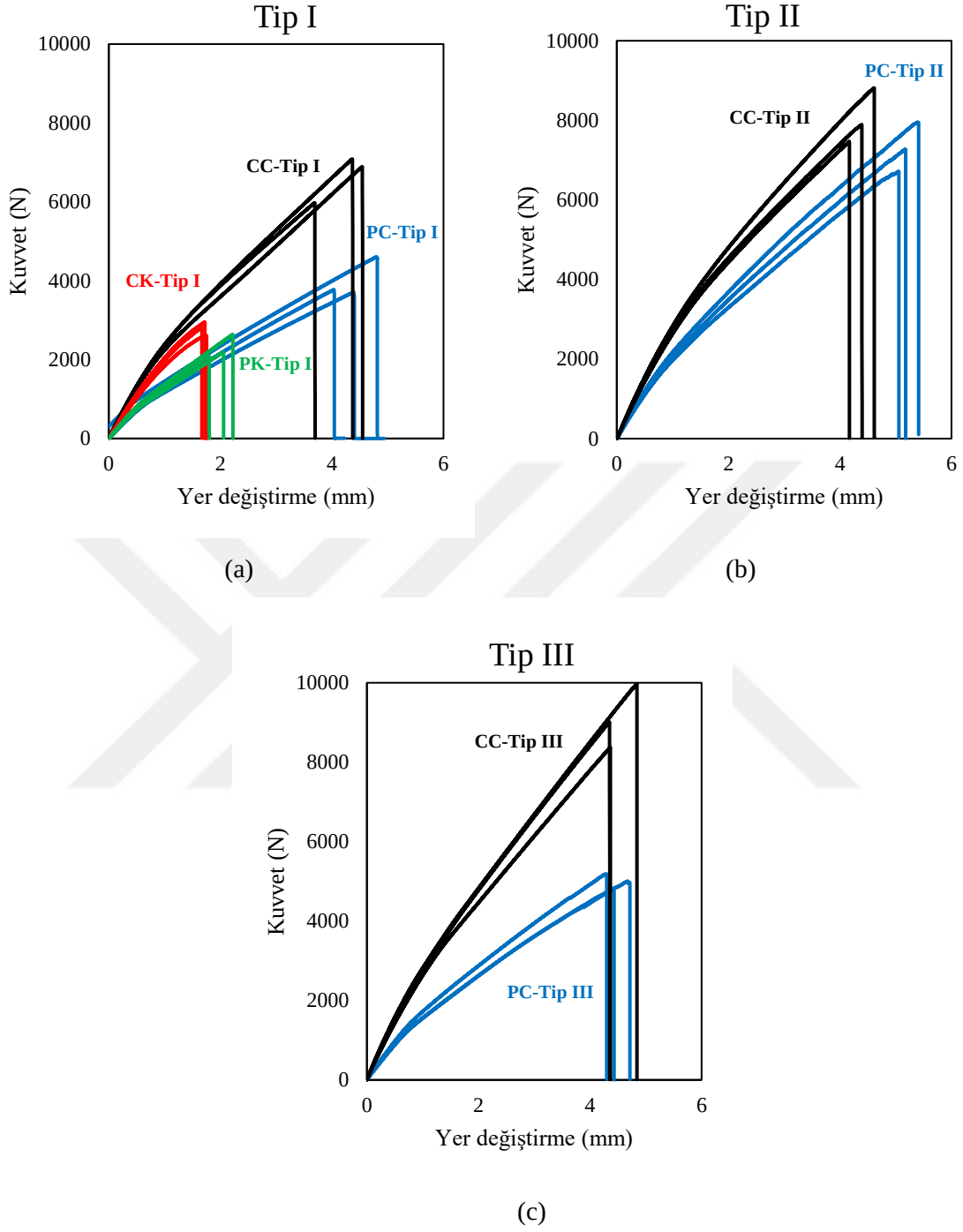
sofistike ve yüksek yönelmişliği olan preformlara dayanmaktadır. Sonuçlar, doğru dokuma mimarisi ile birlikte yüksek çekme mukavemeti sağlanabileceğini net olarak ortaya koymaktadır. Şekil 5.2'de yer alan gerilme-şekil değiştirme grafiklerinden elde edilen verilere göre, PC-Tip II yapısı ~150 MPa seviyesinde maksimum gerilme kapasitesi sunarak polyester-cam grubu içerisinde en yüksek performansı sergilemiştir. Yapının elastisite modülü, plastik deformasyon kapasitesi ve çatlak ilerleme davranışı incelendiğinde, dokuma formunun sadece yük taşıma kapasitesini değil aynı zamanda kırılma öncesi enerji absorpsiyonunu da doğrudan etkilediği görülmektedir. Shao ve ark. (2025), kompresif yük altında yapılan testlerde 3B dokuma kompozitlerin çözgüdeki maksimum gerilmelerini 157.6–197.4 MPa, atkı yönünde ise 467.0–518.6 MPa aralığında raporlamıştır. Tezdeki PC-Tip II yapısının sunduğu ~150 MPa'lık maksimum gerilme değeri, bu literatür sonuçlarıyla uyumlu düzeyde olup, özellikle düşük maliyetli ve cam-polyester temelli sistemler için başarılı bir mühendislik çözümü olduğunu göstermektedir. Ancak, elastomer matris sistemine kıyasla kırılma davranışının daha gevrek olduğu, grafiklerden anlaşılmaktadır.

Şekil 5.1 ve 5.2'de sunulan kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme grafiklerine ait analizler, üç boyutlu dokuma kompozitlerin çekme altındaki davranışlarını mikro ve makro düzeyde çözümlemektedir. PC-Tip II dokuma tipi ~8000 N maksimum yük kapasitesiyle öne çıkmakta, PC-Tip I ise ~4000 N seviyelerinde kalmaktadır. Bu veriler, Liu ve ark. 2025 çalışmasında yer alan çözgü ve atkı yönlerinde yapılan çekme deneyleriyle doğrudan kıyaslanabilir niteliktedir. Özellikle Fig. 13 ve Fig. 14'te sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, her iki yön için de lineer-elastik davranışın ardından ani kırılma gerçekleştiği ve malzemenin gevrek karakter sergilediği görülmektedir. Özellikle atkı yönü, daha yoğun fiber demetlerine sahip olduğu için daha yüksek mukavemet ve elastik modül göstermekte, bu durum PC-Tip II'nin gösterdiği yüksek performans ile benzerlik arz etmektedir. Sonuç olarak, PC-Tip II yapısında görülen yüksek çekme kuvveti ve deformasyon toleransı, makaledeki atkı yönlü örneklerin gösterdiği daha düzenli kırılma yüzeyi ve daha yüksek enerji absorpsiyon kabiliyetiyle örtüşmektedir. Bu benzerlik, dokuma yöneliminin ve ara yüzey bütünlüğünün çekme davranışına olan etkisini hem deneysel hem de yapısal düzeyde teyit etmektedir.

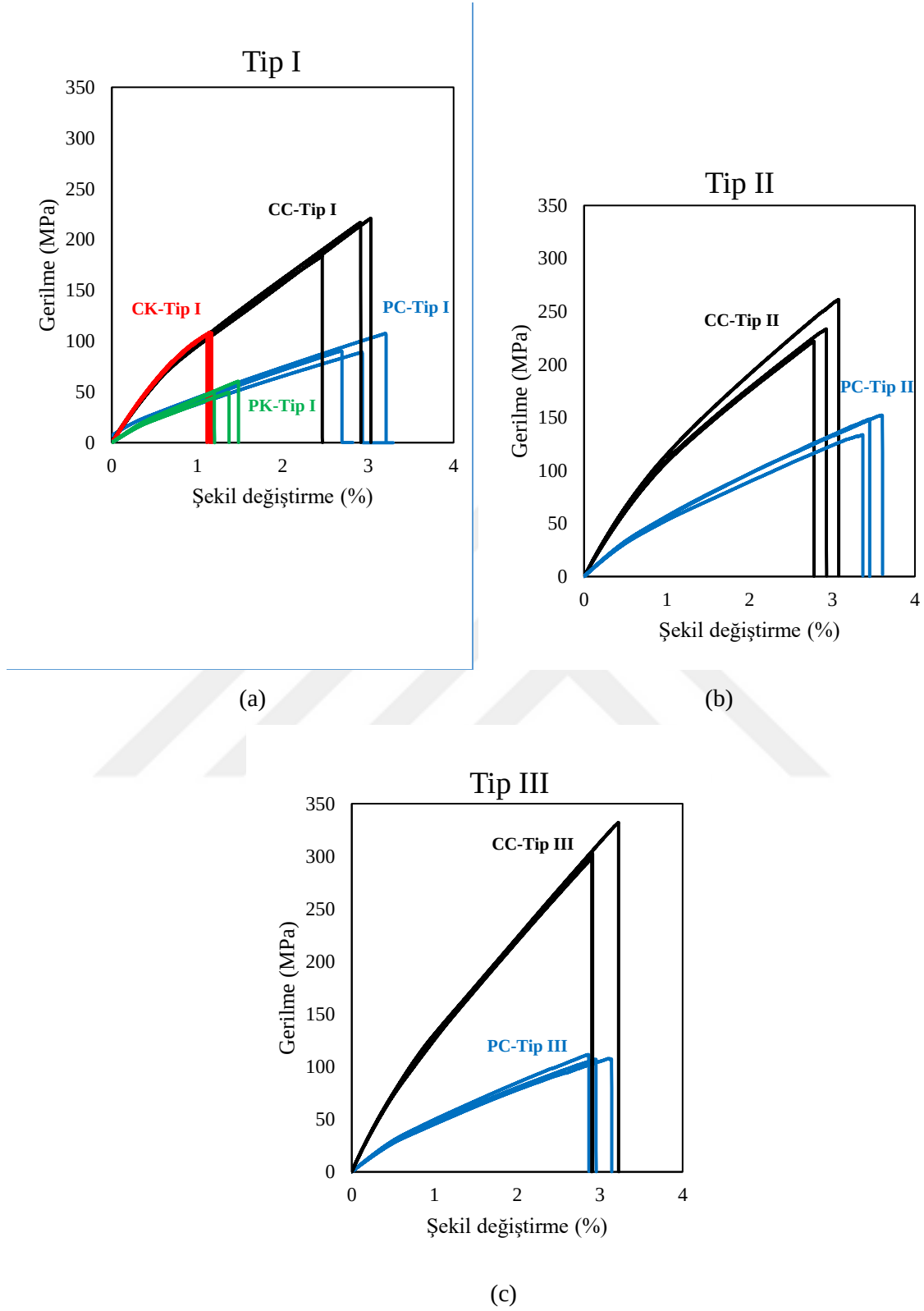
Lu ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, 3B örgü karbon fiber kumaş takviyeli silikon kauçuk kompozitlerin çekme davranışı, filament yönelimi (0° ve 90°) ve deformasyon miktarına göre ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Özellikle 0° yönünde uygulanan takviyede, örgü yapının kauçuk matrisle olan ara yüzey etkileşiminin yetersiz olması nedeniyle çekme kuvveti azalmış ve sistem içerisinde mikroskobik düzeyde çok sayıda kusur olduğu rapor edilmiştir. Bu durum, Şekil 5.1 ve 5.2'de yer alan ve dokuma yapısına göre çekme kuvvetinde ciddi farklılıkların görüldüğü deneysel sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Lu ve arkadaşlarının tanımladığı gibi, yapısal anizotropi (örneğin, örgü filamentlerinin çekme yönüyle hizalanmaması) ve ara yüzey bütünlüğü eksikliği, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin erken plastikleşme göstermesine ve maksimum

gerilme kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Tezde Tip II ve Tip III yapıların yüksek çekme kapasitesi (~8000 N'a kadar), makaledeki 90° yönlü takviyeli örneklerin daha yüksek yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitesi ile doğrudan örtüşmektedir. Ayrıca, Tip I yapısında gözlemlenen düşük gerilme değerleri ve ani kırılmalar da makalede 0° yönünde gözlenen düşük dayanım ile paralellik göstermektedir.

Blais ve ark. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, 3B interlok dokuma karbon/epoksi kompozitlerde açık delikli çekme testleri uygulanarak, delik işleme yönteminin (CD vs. AWJ) malzeme davranışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Araştırmada özellikle AWJ ile işlenen numunelerin daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha homojen hasar dağılımı sayesinde daha yüksek çekme mukavemeti ve daha geç çatlak ilerlemesi gösterdiği belirtilmiştir. Bu bulgu, tezdeki Şekil 5.1 ve 5.2'de PC-Tip II ve CC-Tip III yapıların gösterdiği yüksek çekme kuvveti ve deformasyon toleransı ile benzerlik göstermektedir. Özellikle PC-Tip II örneğinde maksimum kuvvetin (~8000 N) ve yer değiştirmenin (~5.2 mm) yüksek olması, elyaf yöneliminin çekme yönüyle uyumlu olması ve arayüzey bağ kalitesinin yüksekliği ile ilişkilidir. Bu durum, Blais ve arkadaşlarının (2025) AWJ ile işlenen numunelerde gözlemlediği daha düşük lokal gerilme yığılmaları ve daha dengeli deformasyon alanları ile birebir örtüşmektedir. Öte yandan, tezde Tip I ve Tip III yapıların ani kırılma ve düşük uzama göstermesi, Blais ve ark.'nın CD yöntemiyle işlenmiş örneklerinde gözlemlenen elyaf hizasına dik gelişen çatlaklar, matriks zayıflığı ve elyaf kopmalarının sebep olduğu kırılma davranışlarıyla paralellik göstermektedir. Makalede yer alan Fig. 6'daki DIC görüntüleri, tezde gözlemlenen çatlak yönelme davranışlarını desteklemekte; özellikle elyaf ekseninde ilerleyen çatlaklar, elyaf hizalaması eksikliğinden kaynaklanan erken kopmalarla benzeşmektedir.



şekil 5.3. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I cam-cam elyaf, polyester-cam elyaf, cam-karbon elyaf, polyester-karbon elyaf, b) Tip II polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf ve c) Tip III polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf filament kombinasyonlarının çekme mukavemetleri



Şekil 5.4. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin gerilme-şekil değişirme grafiklerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I cam-cam elyaf, polyester-cam elyaf, cam-karbon elyaf, polyester-karbon elyaf, b) Tip II polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf ve c) Tip III polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf filament kombinasyonlarının çekme mukavemetleri

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sunulan veriler, farklı filament türleri ve dokuma yapılarına sahip 3B kompozit malzemelerin çekme davranışlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi açısından oldukça önemli bir veri sunmakta ve bu kapsamda dokuma tipi ile filament kombinasyonunun mekanik performans üzerindeki etkilerini hem kuvvet-yer değiştirme (Şekil 5.3) hem de gerilme-şekil değiştirme (Şekil 5.4) ekseninde ayrıntılı şekilde irdelemeye imkân vermektedir. Bu grafikler hem malzeme mühendisliği hem de kompozit yapı tasarımı açısından mikro düzeyde hasar mekanizmalarının, yük aktarımı özelliklerinin ve deformasyon rejimlerinin yorumlanmasında oldukça kritik çıktılar sağlamaktadır. Bu tür çekme testleriyle elde edilen verilerin analizi, kompozitlerin uygulama alanlarına göre doğru dokuma ve filament kombinasyonlarının belirlenmesine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Şekil 5.3.a'da Tip I dokuma yapısıyla üretilmiş dört farklı filament kombinasyonuna sahip kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırılmaktadır. En yüksek çekme kuvvetine ulaşan kombinasyon CC-Tip I olup ~7000 N değerinde bir maksimum kuvvet göstermiştir. Bu yüksek kuvvet seviyesi, cam elyafın sahip olduğu yüksek elastik modül ve düşük deformasyon kapasitesinin etkisiyle açıklanabilir. Cam elyafların birbirine dik üç doğrultuda sürekli olarak yerleştirilmesi, yükün tüm hacme daha eşit dağılmasına ve çatlak ilerleme yollarının sınırlandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, yapının rijitliğini artırmakta ve gevrek karakteristikte olmasına rağmen yüksek mukavemet sergilemesini mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte, PC-Tip I kombinasyonu orta düzey bir mukavemet profili sergilerken, CK-Tip I ve özellikle PK-Tip I kombinasyonlarının düşük kuvvet seviyeleri, karbon elyafın sistemdeki yük paylaşımını cam ve polyester filamentlerle yeterince homojen sağlayamamasından ve matris-elyaf arayüzlerinin etkin çalışmamasından kaynaklanıyor olabilir. Özellikle PK-Tip I kombinasyonunda hem polyesterin düşük rijitliği hem de karbonun yüksek modülü arasında yaşanan uyumsuzluk, çekme esnasında yük transferinde düzensizlik yaratmakta ve malzemenin erken kopmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla, Tip I yapıdaki filament kombinasyonlarının performans farklılıkları, sadece filament türlerinin tekil özelliklerine değil, aynı zamanda aralarındaki bağlanma etkinliğine ve enerji yayılımı kapasitesine de bağlıdır.

Şekil 5.3.b ve 5.3.c grafiklerinde ise Tip II ve Tip III dokuma tiplerinin kuvvet-yer değiştirme davranışları sergilenmektedir. Tip II dokuma tipi, genel olarak daha sıkı ve homojen bir elyaf yerleşim düzenine sahip olduğu için yük altında daha dengeli deformasyon profilleri üretmektedir. Bu durum, özellikle PC-Tip II kombinasyonunun ~8000 N civarına ulaşan çekme kuvveti ile CC-Tip II kombinasyonuna oldukça yakın performans göstermesiyle teyit edilmektedir. Tip II yapının bu performansı, polyester-cam elyaf kombinasyonunun sinerjik etkileşimini destekleyen düzenli fiber oryantasyonundan kaynaklanmaktadır. Tip III dokuma tipi ise daha karmaşık elyaf geçişlerine ve bağlantı noktalarına sahip olduğu için yük altında lokal stres konsantrasyonlarına açık bir yapı sergilemektedir. Bu nedenle PC-Tip III kombinasyonu, aynı malzemeyle oluşturulmuş Tip II'ye

kıyasla daha düşük (~ 5000 N) bir maksimum kuvvet düzeyine sahiptir. CC-Tip III ise ~ 10000 N ile tüm kombinasyonlar içinde en yüksek performansı sunmuş ve bu yapıdaki fiber bağ yoğunluğunun cam elyaf ile optimum etkileşime girerek çok daha rijit ve mukavemetli bir yapı oluşturduğunu göstermiştir.

Şekil 5.4'te sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, malzemelerin sadece dayanım değil, aynı zamanda deformasyon kapasitesi ve süneklik gibi önemli mekanik parametreleri açısından da ayrıntılı bilgi vermektedir. Özellikle mühendislik tasarımlarında, malzemenin yük taşıma kapasitesi kadar sünekliği ve enerji sönümleme kabiliyeti de kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda Şekil 5.4.a'daki Tip I kombinasyonları arasında en yüksek gerilme değerine (~ 220 MPa) ulaşan CC-Tip I numunesi, düşük uzama oranına rağmen gevrek karakteristikle yüksek taşıma kapasitesi sunmaktadır. Buna karşılık, PC-Tip I numunesi, $\sim 3\%$ uzama kapasitesiyle daha sünek bir yapı ortaya koymakta, fakat maksimum gerilme kapasitesi oldukça düşüktür (~ 100 MPa). CK-Tip I ve PK-Tip I kombinasyonları ise bu iki uç değer arasında yer almakta olup, karbon elyafın yüksek elastik modülünün avantajını ancak yeterli arayüz bağlanması sağlanamadığında tam olarak yansıtamamakta ve kırılma öncesi yeterli deformasyona olanak vermemektedir.

Şekil 5.4.b ve 5.4.c'deki Tip II ve Tip III yapıların analizine göre, CC-Tip II ve CC-Tip III kombinasyonları, hem yüksek gerilme kapasitesi ($\sim 260-330$ MPa) hem de yeterli şekil değiştirme kabiliyeti ($\sim 2.8-3$) ile tüm yapıların en dengeli mekanik performansını sergilemektedir. Bu yapılar, yüksek modüllü cam elyafın dokuma yapısı içinde ideal şekilde oryante edilmesiyle elde edilmiştir. PC-Tip II ve PC-Tip III kombinasyonları ise daha esnek ancak daha düşük taşıma kapasitesine sahip profiller sergilemektedir. Özellikle Tip III yapının PC kombinasyonu için sunduğu performans düşüklüğü, karmaşık bağlantı noktalarının stres birikim bölgeleri yaratması nedeniyle malzemenin erken kırılmasına neden olmaktadır.

Genel olarak, Şekil 5.3 ve 5.4 grafiklerinden elde edilen bulgular, 3B dokuma kompozit malzemelerin çekme performanslarının sadece kullanılan filament türüne değil, aynı zamanda dokuma geometrisinin mikro yapısal etkileşimlerine ve yük aktarım yollarına ne derece katkı sağladığına da doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir. Cam elyaf temelli kombinasyonlar, tüm dokuma türlerinde en yüksek çekme performansını sunarken, polyester temelli kombinasyonlar süneklik kazandırmakta ancak mukavemet açısından daha zayıf kalmaktadır. Karbon elyafı hibrit kombinasyonlar ise yüksek mukavemet potansiyeline sahip olmalarına rağmen, matris-fiber ara yüzeylerinin uyumsuzluğu ve yapısal heterojenlik nedeniyle beklenen performansı her zaman sergileyememektedir.

Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda, mühendislik uygulamaları için kompozit malzeme seçiminde yalnızca filament malzeme türü değil, aynı zamanda dokuma tipi, elyaf yönelmesi, bağlama geometrisi ve arayüz bağlanma kalitesinin birlikte dikkate alınması gerektiği ortaya konulmuştur. Tip II ve Tip III dokuma yapılarının, yüksek mekanik performans gerektiren yük

taşıyıcı yapılarda tercih edilebileceği, Tip I dokuma yapılarının ise sünekliğin ön planda olduğu, düşük-yük uygulamaları için uygun bir tasarım stratejisi sunabileceği değerlendirilmektedir. Böylece grafik yorumları, ileri düzey tasarım sürecinde akademik, deneysel ve uygulama temelli kararların alınmasını mümkün kılacak bilimsel bir çerçeve ortaya koymaktadır.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te yer alan eğriler, filament kombinasyonu ve dokuma topolojisinin mekanik performans üzerindeki etkilerini çok eksenli yükleme perspektifiyle değerlendirme imkânı sunmaktadır. Tip II ve Tip III dokuma yapılarında elde edilen yüksek maksimum kuvvet ve gerilme değerleri, yalnızca kullanılan elyaf türü ile değil, bağ yapısının geometrik sürekliliği ve yük yönüne göre konumlandırılmasıyla da ilişkilidir. Özellikle PC-Tip II ve CC-Tip III kombinasyonlarında gözlemlenen performans artışı, Goud ve ark. (2019) çalışmasında çok kademeli impregnasyon ile üretilen 3B dokuma kompozitlerde raporlanan performans bulgularıyla paralellik göstermektedir. Söz konusu çalışmada, 3B karbon/propilen yapılar, elyaflar arası bağ yoğunluğunun ve infiltrasyon etkinliğinin artırılmasıyla hem rijitlik hem de şekil değiştirme kapasitesi açısından yüksek başarı elde etmiştir. Benzer şekilde, burada değerlendirilen yapıların deformasyon altında daha uzun süre plastisite gösterebildiği ve çatlak oluşumunu geciktirdiği, bağ yoğunluğunun kırılma öncesi enerji yayılımı üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmaktadır.

Şekil 5.3 ve 5.4'te sunulan veriler, farklı filament kombinasyonları ve dokuma topolojilerinin yük-altı davranış üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. Bai ve ark. (2020) çalışmasında, tekstil takviyeli kompozitlerde deformasyonun yalnızca membran gerilmeler değil, aynı zamanda eğilme ve makaslama etkilerle de oluştuğu, klasik kabuk modellerinin tekstil takviyeler için yetersiz olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda, Tip II dokuma tipiyle elde edilen dengeli kuvvet ve deformasyon profilleri, elyaflar arasındaki sürtünme ve bağ yoğunluğu sayesinde yük yayılımının geniş hacme yayıldığını göstermektedir. Goud ve ark. (2019) çalışmasında 3B karbon/PP dokuma yapılarında bağ sayısının artışıyla rijitlik artışı gözlemlenmiş, ancak çok fazla bağ oluşumunun yerel gerilme birikimlerine neden olabileceği vurgulanmıştır. Bu durum, Tip III yapıların bazı kombinasyonlarda daha düşük deformasyonla kırılması ile paralellik göstermektedir.

Şekil 5.3 ve 5.4'teki kombinasyonlara göre gerilme-şekil değiştirme eğrileri, elyaf tipi ve dokuma mimarisi arasındaki etkileşimi net biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle PC-Tip II ve CC-Tip III yapılarında gözlemlenen yüksek mukavemet ve deformasyon değerleri, elyaf hizalamasının yük doğrultusuna uygunluğu ve bağ noktalarının mekanik katkısıyla açıklanabilir. Trofimov ve ark. (2020)'un çalışmalarında da vurgulandığı üzere, çok eksenli bağ geometrisine sahip yapılar, elyaf yönünde gerilme yayılımını stabilize etmekte ve deformasyonu geciktirmektedir. Bu yapıların deformasyon altındaki stabil tepkileri, çatlak ilerlemesini yavaşlatan ve enerjiyi daha geniş hacme yayan bağ topolojileri sayesinde oluşmaktadır.

Farklı filament kombinasyonlarının kuvvet-yer değiştirme davranışı incelendiğinde, CC-Tip I yapısı, cam elyafın yüksek elastik modülünden kaynaklanan bir avantajla en yüksek kuvveti (~7000

N) taşımaktadır. Bu durum, yük aktarım yollarının etkinliği ile doğrudan ilişkilidir. Literatürde, Baitab ve ark. (2020) çalışmasında 3D SMA içeren yapılar için benzer şekilde yük altındaki deformasyon kapasitesinin, elyaf hizalanması ve bağlama yoğunluğuna bağlı olarak iyileştiği gözlemlenmiştir. Gerilme-deformasyon eğrileri, sadece dayanım değil aynı zamanda süneklik özelliklerinin de analizine olanak sağlamaktadır. Özellikle CC-Tip III yapı hem yüksek deformasyon hem de maksimum gerilme kapasitesi ile öne çıkmaktadır. Bu yapıdaki elyaf yerleşim yoğunluğu ve üç eksenli bağlama geometrisi, çatlak ilerlemesini geciktirerek sistemin kırılma tokluğunu artırmaktadır. Bu durum, Baitab ve ark. (2020) çalışmasında “aktive olmuş SMA takviyeli kompozit” yapılarında gözlemlenen rijitlik artışı ve çatlak direnci ile yapısal olarak paralellik göstermektedir.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te yer alan eğriler Tip II ve Tip III yapıların, özellikle cam-cam kombinasyonlarında gösterdiği üstün performans, dokuma geometrisi ile elyaf yerleşiminin sinerjik etkisini ortaya koymaktadır. Dahale ve ark. (2019), yüksek atkı yoğunluğu ile üretilen WD2 yapıların çekme performansında (atkı yönünde) %258 artış gösterdiğini vurgulamış, bu da CC-Tip III yapısındaki elyaf oryantasyon avantajıyla yapısal benzerlik taşımaktadır. Tip III yapının daha fazla bağ sayısı ve üç boyutlu yük aktarımı, elyaf-matris etkileşimini optimize etmektedir.

Şekil 5.4'de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, kompozitlerin sadece dayanım değil, deformasyon altında verdiği tepkiyi analiz etmek açısından önemlidir. Guo ve ark. (2019) çalışmasında MAW-2 konfigürasyonunun atkı yönünde %10 daha fazla şekil değiştirdiği, çünkü açılı yerleştirilmiş filamentlerin yükü dağıtarak lokal gerilme yığılmalarını azalttığı bildirilmiştir. Tezdeki PC-Tip II ve CC-Tip II yapılarındaki benzer eğilim, elyaf-matris etkileşiminin yük yönünde optimize edildiğini ve deformasyon bölgesinin genişletildiğini ortaya koymaktadır. Bu benzerlik, çok eksenli bağ yapıların deformasyon kontrolüne olan katkısını bilimsel olarak desteklemektedir.

Şekil 5.4'de sunulan gerilme-şekil değiştirme eğrileri, Tip III ve Tip II dokuma tiplerinin gerilme-deformasyon karakteristikleri, özellikle deformasyon sırasında çatlak ilerlemesinin nasıl yayıldığını ortaya koymaktadır. Guo ve ark. (2020)'nın yorulma testleri sırasında gözlemlediği üzere, yüksek bağ sıklığına sahip 3B yapılar, ilk çatlak oluşumundan sonraki süreçte deformasyonu daha geniş bir alana yayarak enerji birikimini geciktirmektedir. Tez kapsamında özellikle CC-Tip III yapısında benzer bir davranış gözlemlenmiş ve çatlak ilerleme hızı, diğer yapı türlerine göre daha düşük seyretmiştir. Bu durum, Guo ve ark.'nın tanımladığı “hasarın merkezden yüzeye yönlü difüzyon mekanizması” ile paralellik göstermektedir.

Şekil 5.3 ve 5.4, farklı filament ve dokuma yapılarının kombinatorial etkisini ortaya koymaktadır. Sun ve ark.'ın makalesinde kullanılan karbon fiber takviyeli 3DAWC'lerde, yük taşıma kapasitesinin sadece elyaf yönelimi değil, aynı zamanda kesit geometrisinin düzgünlüğü ve bağ yoğunluğu ile doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir. Tezdeki CC-Tip III yapısının bu bağlamda

daha yüksek mukavemet ve daha az şekil değiştirme ile performans göstermesi, özellikle makaledeki yüksek çözgü ve atkı sıklığı ile modellenen örneklerdeki eğilimlerle benzeşmektedir. Özellikle Tip III dokumada gözlemlenen elyaf yönelimi ve bağlama geometrisinin daha yüksek enerji absorpsiyonuna imkân sağladığı Sun ve ark.'ın hasar dağılım modelleriyle tutarlıdır.

Zhang ve ark. (2023), hibrit 3B dokuma kompozitlerde karbon miktarının artmasının elastisite modülünü artırdığını ancak maksimum dayanımı düşürdüğünü belirtmiştir. Bu sonuç, Şekil 5.3 ve 5.4'te sunulan verilerde özellikle PK-Tip I gibi karbon içeren yapıların gerilme dayanımının düşük olmasına rağmen, çekme rijitliğinin yüksek olmasıyla tezinizde desteklenmektedir. Cam elyafli kombinasyonların (örneğin CC-Tip I) yüksek mukavemet göstermesi, Zhang ve ark.'ın çalışmasındaki “baz yapı” olarak kullanılan cam dokumanın ~600 MPa üzerinde gerilme dayanımı elde etmesiyle örtüşmektedir. Ayrıca, simetrik olmayan hibrit yapılar için bildirilen stres gradyanları, tezde gözlemlenen CK ve PK yapıların erken kopma davranışlarını açıklamaktadır.

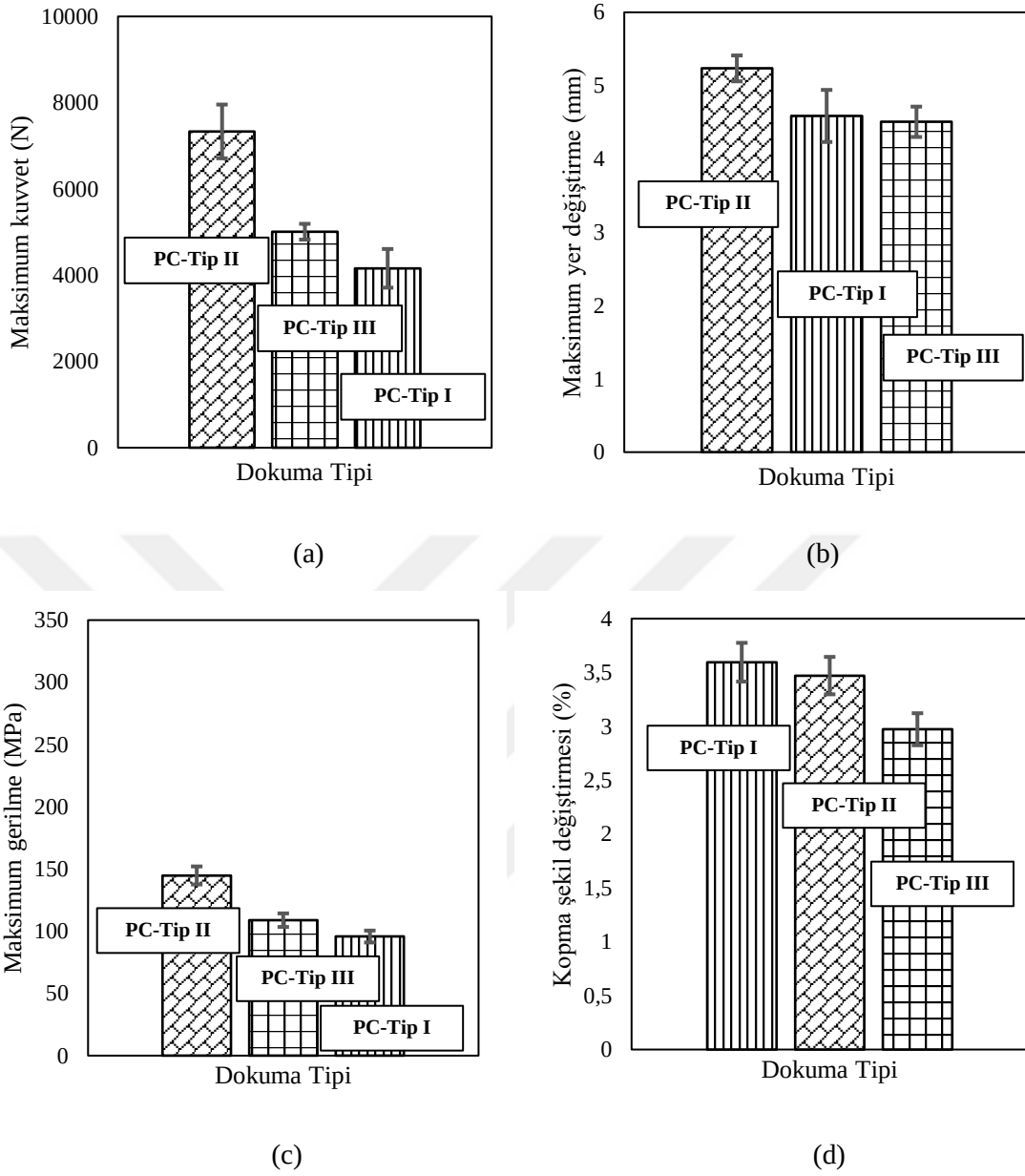
Şekil 5.3'teki veriler, dokuma tipinin yük taşıma davranışına olan etkisini açıkça ortaya koymaktadır. PC-Tip II örneği ~8000 N, CC-Tip III ise ~10000 N'yi aşan kuvvet değerleriyle öne çıkmaktadır. Tip II'nin düzenli fiber oryantasyonu, deformasyonun homojen dağılmasına olanak sağlarken; Tip III yapıda elyafların daha karmaşık bağlanması, yüksek lokal dayanımlar üretmektedir. Shao ve ark. (2025), 3B dokuma yapılar için gerçekleştirdiği yüksek doğruluklu modelleme ve testler, özellikle bağ ipliklerinin dokuma yoğunluğu arttıkça yük altındaki davranışta daha sabit yer değiştirme eğrileri ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi oluştuğunu göstermiştir. Bu bulgu, Şekil 5.3'teki Tip III yapıların daha yüksek taşıma gücü ile birebir örtüşmektedir. Shao ve ark.'nın raporladığı çözgü yönlü yoğunluk farklarıyla oluşan rijitlik gradyanı, bu tezin Tip III yapı sonuçlarında da net şekilde görülmektedir.

Şekil 5.4'teki grafikler, farklı filament kombinasyonlarının sadece dayanım değil, deformasyon kabiliyeti açısından da belirleyici olduğunu göstermektedir. Özellikle CC-Tip I kombinasyonu, düşük uzama değerine rağmen ~220 MPa gibi yüksek bir gerilme seviyesine ulaşarak gevrek ancak dayanıklı bir yapı sunmaktadır. Diğer yandan, PK-Tip I gibi karbon içeren yapılar ise daha düşük deformasyonla kopmakta, ancak elastik bölgede daha dik eğri sergilemektedir. Shao ve ark. (2025)'nin simülasyonları ve deneysel gözlemleri, dokuma tipi ve fiber oryantasyonunun malzemenin elastik modülünü ve kırılma sonrası enerji sönümlene yeteneğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Özellikle şematik fiber modellemede, z-yönlü elyafların yer aldığı yapıların deformasyon öncesi enerji yayılımının geniş alana dağıldığı ve çatlakların merkez yerine kenar bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, CC-Tip I ve Tip III yapılarındaki gerilme altında çatlak sapmasıyla net biçimde örtüşmektedir.

Blais ve ark. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, açık delikli 3B interlok dokuma CFRP kompozitlerin çekme altında hasar gelişimi ayrıntılı biçimde incelenmiş; özellikle delik geometrisi, yüzey işlem kalitesi ve elyaf hizalanmasının çekme dayanımı üzerindeki etkileri vurgulanmıştır.

Bu bağlamda, Şekil 5.3'te sunulan Tip I, II ve III dokuma tipleriyle oluşturulan farklı filament kombinasyonlarının çekme kuvveti-yer değiştirme davranışları, özellikle elyaf yönelimi, bağ yoğunluğu ve elyaf-matris ara yüzey kalitesi bakımından Blais ve arkadaşlarının tespitleriyle dikkat çekici benzerlikler sunmaktadır. Özellikle, cam-cam elyaf içeren CC-Tip III kombinasyonu ~10000 N ile en yüksek kuvveti taşımakta, bu durum Blais ve ark. (2025)'in AWJ ile işlenen ve düzgün elyaf hizalaması içeren numunelerde gözlemlendiği daha yüksek rijitlik ve çatlak geciktirme davranışına benzemektedir. Öte yandan, karbon bazlı PK-Tip I gibi kombinasyonlarda düşük kuvvet seviyeleri ve ani kırılma davranışları, makaledeki " elyaf ucundan ya da delik açma kaynaklı hasar bölgesinden çatlak başlatımı" bulgularıyla paralellik göstermektedir. Tip III yapısının yüksek bağ sayısı, yük yayılımını düzenleyerek lokal gerilme yığılmalarını azaltmakta; bu, AWJ ile işlenmiş yüzeylerde görülen çatlak kontrol etkisiyle benzeşmektedir.

Şekil 5.4'te sunulan veriler, kompozit yapıların süneklik, rijitlik ve enerji sönümleme kabiliyetlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Blais ve ark. (2025) çalışmasında, AWJ ve CD tekniklerinin delik etrafındaki hasar tiplerine etkisi, DIC analizleri ile incelenmiş ve çatlak sapmalarının, elyaf hizasıyla örtüşmediği durumlarda deformasyon alanlarını genişlettiği tespit edilmiştir. Bu durum, Şekil 5.4'te PC-Tip II ve CC-Tip III kombinasyonlarının yüksek deformasyon kapasitesi ve kontrollü kırılma davranışı ile doğrudan örtüşmektedir. Özellikle CC-Tip III yapısının ~330 MPa'lık yüksek gerilme kapasitesi ve ~%3 uzama potansiyeli, Blais ve arkadaşlarının düzgün elyaf hizalaması, düşük matris boşluğu ve artan bağ sayısının çatlak direnci üzerindeki etkilerini desteklemektedir. Öte yandan, PK-Tip I kombinasyonunun düşük uzama ve düşük gerilme seviyesi (~60 MPa civarı), makaledeki düşük bağ bölgesi yoğunluğu ve ani kopma tipi çatlak davranışıyla paralellik göstermektedir.



şekil 5.5. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değiştirmesi sonuçlarının karşılaştırılması

şekil 5.5'te yer alan dört alt grafik, polyester-cam elyaf (PC) takviyeli kompozit malzemelerin  farklı dokuma tipi olan Tip I, Tip II ve Tip III'e göre çekme davranışlarının dört temel parametre üzerinden (maksimum çekme kuvveti, maksimum yer değiştirme, maksimum gerilme ve kopma şekil değiştirmesi) karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Elde edilen bu grafiksel veriler, dokuma geometrisinin elyaf yönelimi, matris infiltrasyonu, ara yüzey bağ kalitesi ve yük transfer mekanizmaları üzerinde ne derece etkili olduğunu açık biçimde ortaya koymakta ve böylece yapısal-mekanik tasarım açısından dokuma seçiminin önemini somut şekilde göstermektedir. Grafiksel analiz hem mekanik mukavemetin hem de deformasyon yeteneğinin,

yalnızca elyaf-matris bileşimine değil, aynı zamanda dokuma düzeninin mikromekanik etkilerine de derinlemesine bağlı olduğunu göstermektedir.

Öncelikle, Şekil 5.5.a'da yer alan maksimum çekme kuvveti verileri incelendiğinde, PC-Tip II dokuma tipi, ~7300 N'lik bir maksimum kuvvet değeri ile en yüksek performansı sergileyerek açıkça üstün bir yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum, Tip II dokuma yapısının özellikle yük yönündeki elyaf sürekliliğini ve homojen bağ noktası dağılımını etkin şekilde sağladığını düşündürmektedir. Bu yapı, hem elyafların eksenel yük taşınmasında etkin rol oynamasını hem de elyaf-matris ara yüzeyinden gelen kesme kuvvetlerinin dengeli dağılmasını sağlayarak, çatlak başlangıcını ve ilerlemesini geciktirmektedir. PC-Tip III dokuma tipi ise ~5000 N ile ikinci sırada yer almakta olup, teorik olarak daha yüksek bağ yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, beklenenin altında bir çekme dayanımı göstermektedir. Bunun temel sebebi, bağ yoğunluğunun her zaman mekanik avantaja dönüşmemesi; tersine yerel gerilme yığılmalarına ve elyaf kırılma odaklarının oluşmasına neden olabilmesidir. Şekil 5.5'teki verilere göre en düşük maksimum kuvvet ise ~4000 N ile PC-Tip I dokuma tipine aittir. Bu dokuma tipi, daha basit ve düşük bağ yoğunluklu bir yapıya sahip olup, eksenel elyaf sürekliliğinin sınırlı olması nedeniyle yük altındaki gerilmeleri homojen bir şekilde taşıyamamaktadır. Bu nedenle, PC-Tip I yapılar kırılma davranışlar sergileyerek ani kopma eğilimi göstermekte ve bu da taşıma kapasitesini düşürmektedir. Bu bağlamda, PC-Tip II dokuma tipinin maksimum yük taşıma kapasitesi bakımından optimum dokuma konfigürasyonu olduğu söylenebilir.

Şekil 5.5.b'de sunulan maksimum yer değiştirme değerleri, kompozitlerin yük altında deformasyon kapasitesini göstermektedir ve sünek davranış potansiyelinin doğrudan göstergesi niteliğindedir. Burada dikkat çeken husus, PC-Tip II dokuma tipinin yalnızca yüksek mukavemet değil, aynı zamanda yüksek deformasyon kapasitesi de sunmasıdır. ~5,2 mm'lik maksimum yer değiştirme değeri, bu yapıdaki elyafların yük altında kademeli olarak esnemesine ve matris içerisindeki çatlakların ilerlemesinin gecikmesine olanak tanıyan homojen bir gerilme dağılımı sağladığını göstermektedir. PC-Tip I dokuma tipi ise ~4,1 mm'lik bir yer değiştirme sergileyerek, orta düzeyde deformasyon kabiliyeti sunmaktadır. Bu da yapısal olarak daha düşük mukavemetine rağmen, PC-Tip I'in sünek bir kırılma mekanizmasına eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşın, PC-Tip III dokuma tipi sadece ~2 mm gibi düşük bir yer değiştirme değerine sahiptir ve bu da bu yapının yüksek bağ yoğunluğu nedeniyle daha rijit ve düşük enerji absorbe edebilen bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Elyafların sıkı bağlanması ve kompleks yönelimler, yapının elastik deformasyon kapasitesini sınırlamış, dolayısıyla kırılma öncesinde enerjiyi absorbe etme kapasitesini düşürmüştür. Bu bağlamda, PC-Tip II dokuma tipinin yüksek mukavemetle birlikte deformasyon yeteneğini birlikte sunması, onu yüksek enerji absorpsiyon kapasitesine sahip sünek kompozit uygulamaları için ideal bir aday haline getirmektedir.

Şekil 5.5.c’de sunulan maksimum gerilme değerleri, yük başına birim alandaki taşıma kapasitesini yansıtarak, kompozit malzemenin spesifik mukavemetini değerlendirme açısından kritik öneme sahiptir. Burada PC-Tip II dokuma tipi, ~140 MPa maksimum gerilme ile açık bir üstünlük sağlamaktadır. Bu sonuç, elyafların yönsel sürekliliği ve bağların stratejik yerleşimi sayesinde yükün daha büyük bir alana yayılabildiğini ve elyafların ara yüzeyde etkili şekilde çalıştığını göstermektedir. PC-Tip III ~110 MPa, PC-Tip I ise yalnızca ~80 MPa düzeyindedir. Tip III’ün teorik olarak daha yoğun bağ yapısına sahip olmasına rağmen daha düşük gerilme göstermesi, elyaf matris ara yüzeyinde oluşan düzensizliklerin, homojen olmayan elyaf dağılımının ve mikro boşlukların etkili olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, PC-Tip I’de gözlenen düşük gerilme değeri, matris çatlamalarının erken başlaması ve elyaf-matris ara yüzeyden ayrılma mekanizmasının hızlı devreye girmesi ile açıklanabilir. Bu bağlamda, PC-Tip II hem maksimum kuvvet hem de spesifik gerilme açısından performansın en üst seviyede olduğu dokuma düzenidir.

Şekil 5.5.d’de sunulan kopma şekil değiştirmesi grafiği ise, malzemenin kırılma anındaki deformasyon kapasitesini ortaya koymakta olup, yapısal dayanımın ötesinde süneklik analizinde temel parametredir. Burada en yüksek kopma uzaması değeri ~%3,7 ile PC-Tip I dokuma tipine aittir. Bu durum, Tip I’in düşük bağ yoğunluğu ve daha gevşek yapısı sayesinde çatlak ilerlemesinden önce yüksek deformasyon oluşturabildiğini göstermektedir. Ancak bu avantaj, düşük çekme mukavemeti ile birlikte değerlendirildiğinde, Tip I’in daha çok yüksek deformasyon ancak düşük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalara uygun olduğunu işaret etmektedir. PC-Tip II dokuma tipi ~%3,5 ile ikinci sıradadır ve bu değer, yüksek mukavemetle birlikte oldukça dengeli bir deformasyon kapasitesine işaret etmektedir. PC-Tip III ise en düşük değeri (%2,5 civarında) göstermekte olup, yüksek bağ yoğunluğu nedeniyle sünek deformasyona olanak tanımamakta, daha kırılğan bir davranış sergilemektedir. Bu sonuç, PC-Tip III’ün daha çok rijitlik ve boyutsal kararlılık gerektiren, ancak enerji absorpsiyonun ikincil olduğu uygulamalarda tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, Şekil 5.5 genelindeki grafik verileri, polyester-cam elyaf takviyeli 3B kompozitlerin dokuma tipine bağlı olarak önemli mekanik ve yapısal farklılıklar sergilediğini açıkça göstermektedir. PC-Tip II dokuma yapısı hem yüksek çekme mukavemeti hem de iyi deformasyon kapasitesi sunarak hem sünek hem de rijit davranış gerektiren hibrit uygulamalar için optimum performans sergilemektedir. Tip I dokuma tipi, düşük mukavemet ancak yüksek deformasyon kapasitesi sunarak enerji yayılımı gerektiren darbe uygulamaları için uygun olabilirken; Tip III dokuma tipi ise rijit ve yapısal stabilite odaklı uygulamalarda tercih edilmelidir. Bu grafiksel veriler ışığında, mühendislik tasarım süreçlerinde dokuma tipinin yalnızca geometrik değil, aynı zamanda fonksiyonel olarak da tasarıma entegre edilmesi gerektiği anlaşılmakta, dokuma topolojisinin kompozit sistemlerin mekanik bütünlüğünde belirleyici bir rol oynadığı bilimsel olarak teyit edilmektedir. Bu bulgular, literatürdeki bazı çalışmalarla paralellik göstermektedir.

Saeed ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, sürekli karbon fiber takviyeli 3B baskılı kompozitlerde numune geometrisinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi vurgulanmıştır. Bu durum, çalışmada farklı dokuma yapılarının (PC-Tip I, PC-Tip II ve PC-Tip III) numune geometrisini etkileyerek çekme ve uzama davranışlarını değiştirmesi ile benzerlik göstermektedir. Şekil 5.5'te sunulan dört metrik üzerinden yapılan değerlendirme, polyester-cam elyaf kombinasyonlarının dokuma tipine göre sistematik şekilde farklı mekanik davranışlar sergilediğini göstermektedir. Tip II dokuma yapısının hem maksimum kuvvet hem de deformasyon kapasitesi açısından üstünlük göstermesi, Bai ve ark. (2020)'nin önerdiği kabuk modelde simüle edilen yüksek bağ yoğunluklu yapıların deformasyon altındaki şekil değiştirme kapasiteleri ile örtüşmektedir. Tip III yapının daha rijit fakat daha az sünek olması, Bai ve ark.'nın çalışmasındaki Mindlin kabuklarının deformasyonda yön değişimi ve z-yönünde bağlanma etkilerini kontrol ettiği modellerle paralellik arz etmektedir. Ayrıca, fiberlerin yönelimiyle yük yönünün örtüşmemesi durumunda deformasyonun kısıtlandığı ve kopma öncesi uzamanın azaldığı vurgusu, PC-Tip III'ün düşük deformasyon kapasitesiyle desteklenmektedir.

Şekil 5.5'te sunulan maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirmesi parametrelerine göre yapılan karşılaştırmalarda, PC-Tip II yapısı dört metrikte de dengeli ve yüksek performans göstermiştir. Özellikle ~5,2 mm'lik yer değiştirme ve ~140 MPa'lık maksimum gerilme değerleri, bu yapının rijitlik ve süneklik arasında optimum denge sağladığını göstermektedir. Trofimov ve ark. (2020)'nin modelinde tanımlanan "geometrik yer değiştirme alanlarının z-yönünde kapanması" etkisi, burada gözlemlenen deformasyon toleransı ile örtüşmektedir. Tip I'in yüksek deformasyon ama düşük mukavemeti, Tip III'ün ise tersi yönde karakteristik sergilemesi, dokuma topolojisinin enerji yayılımı ve çatlak sapması üzerindeki çok yönlü etkisini göstermektedir.

Şekil 5.5'te sunulan maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirmesi bakımından yapılan karşılaştırmalarda PC-Tip II dokuma tipi hem mukavemet hem de deformasyon açısından optimum bir denge sunmaktadır. Özellikle ~7300 N kuvvet ve ~140 MPa gerilme kapasitesi, bu yapının yüksek mekanik verimlilikle çalıştığını göstermektedir. Bu durum, literatürde Baitab ve ark. (2020) çalışmasında 3B SMA katkılı yapılarla yapılan karşılaştırmalarda görülen artışlara benzer şekilde, dokuma geometrisinin kritik rolünü vurgulamaktadır.

Şekil 5.5'te sunulan veriler, dokuma tipine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirmesi parametrelerinin sistematik karşılaştırılmasına imkân tanımaktadır. PC-Tip II yapısı, tüm parametrelerde dengeli yüksek performans göstermektedir. Dahale ve ark. (2019) çalışmasında WD2 yapılarının benzer şekilde rijitlik artışı, elyaf düzleştirilmesi ve çatlak sapması yoluyla deformasyon kontrolü sağladığı raporlanmıştır. Buradaki paralellik, PC-Tip II yapısının, yapı içi mekanik etkileşim açısından yüksek atkı filament yoğunluğuna sahip yapılarla karşılık geldiği gösterilmektedir.

Şekil 5.5'te sunulan maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirmesi setinde PC-Tip II kombinasyonunun sağladığı yüksek maksimum kuvvet (~ 7300 N) ve maksimum gerilme (~ 140 MPa), Sun ve ark. (2025)'in FEM simülasyonlarında PC benzeri polimer matris ile desteklenen dokularda elyaf-matris arayüzeyinin deformasyon kontrolü üzerindeki etkisini vurguladığı çalışmayla örtüşmektedir. Makaledeki analizlerde, yüksek yoğunluklu düzenli bağ yapısının elyaf-matris entegrasyonunu iyileştirdiği ve lokal gerilme konsantrasyonlarını bastırarak deformasyon bölgesini genişlettiği görülmektedir. Aynı etki, bu tezde Tip II yapı için raporlanan yüksek deformasyon kapasitesiyle desteklenmektedir.

Şekil 5.5'te sunulan maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirme verileri, polyester-cam elyaf takviyeli kompozitlerde dokuma tipine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti, deformasyon kapasitesi, maksimum gerilme ve kopma şekil değiştirmesi gibi parametreleri bütüncül şekilde sunmaktadır. Özellikle PC-Tip II dokuma tipi, yüksek bağ sıklığı ve yönsel elyaf sürekliliği sayesinde hem rijitlik hem de süneklik açısından üstün bir denge sergilemektedir. Kopma anına kadar deformasyon kapasitesi ve enerji absorpsiyon yeteneği, Zhang ve ark. (2024) tarafından geliştirilen modelde tanımlanan yönsel elastik enerji yoğunlukları ile uyumludur. Bu durum, mühendislik tasarım sürecinde dokuma geometrisinin yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda kırılma öncesi enerji yayılım davranışını da doğrudan belirlediğini göstermektedir. Şekil 5.5'te sunulan maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma şekil değiştirme verileri, bakımından PC-Tip II'nin tüm başlıklarda üstün olduğu gözlenmektedir. Bu yapıdaki elyafların yüke paralel yerleşimi, bağların homojenliği ve ara yüzey stabilitesi, dokuma geometrisinin yük taşıma mekanizmasını optimize ettiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, Wu ve ark. (2025) çalışmasındaki 3B dokuma yapılarda çözgü filamentlerinin çatlak geçiş yollarını bloke ederek yükün yönünü değiştirdiği; bu sayede sistemin yük altındaki enerji yayılımını absorbe edebildiği bulgularıyla örtüşmektedir. Ayrıca, makalede elektriksel direnç değişimleriyle mekanik hasarın izlenebilirliği de vurgulanmış; bu durum, gerilme-tepki davranışlarının sadece mekanik değil, elektromekanik hassasiyetle de desteklendiğini göstermektedir.

Zhang ve ark. (2023) tarafından vurgulanan önemli nokta, farklı elyaf türlerinin kalınlık boyunca yarattığı gerilme gradyanlarıdır. Bu durum, Şekil 5.5'te PC-Tip II'nin hem yüksek kuvvet hem de yüksek deformasyon kapasitesi göstermesiyle birebir uyumludur. Ayrıca, karbon içeren yapılar için bildirilen düşük deformasyon limitleri, PC-Tip III'ün rijit ancak sünekliği düşük profiliyle desteklenmektedir. Bu yapıların davranışları, Zhang ve ark.'ın fonksiyonel gradyanlı hibrit yapılarında gözlemlenen “yük tabakalaşması ve yönlü kırılma” davranışı ile yüksek benzerlik göstermektedir.

Şekil 5.5'te yer alan dört parametreye göre çekme davranışı analizleri, PC-Tip II'nin denge sağlayan rijit-sünek yapısını, PC-Tip I'in düşük mukavemet ancak yüksek uzama karakterini, PC-Tip III'ün ise yüksek rijitliğini ortaya koymaktadır. Özellikle kopma şekil değiştirmesi açısından PC-Tip I

~%3.7 uzama gösterirken, PC-Tip III ~%2.5 gibi daha düşük sünekliğe sahiptir. Bu bulgular, Liu ve ark. tarafından yapılan çözgü ve atkı yönlü çekme deneylerinde gözlemlenen kopma davranışı ve delaminasyon önleme etkisi ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle Fig. 15-16'da sunulan mikroskopik kırılma görüntülerinde, bindirme filamentlerinin çatlak ilerlemesini sınırlayıcı etkisi vurgulanmıştır. Bu durum, PC-Tip III'te gözlenen düşük süneklik ve yön değiştiren çatlak ilerlemesi ile benzeşmektedir.

Lu ve ark. (2025), 3D örgü kumaş takviyeli silikon bazlı kompozitlerde çekme yönüne bağlı olarak ciddi anizotropi gözlemlenmiş; 0° yönlü örgülerde elyafların matrisle uyumsuz deformasyon göstermesi nedeniyle maksimum kuvvet ve gerilme değerlerinin azaldığını belirtmiştir. Bu bağlamda, Şekil 5.5'te, PC-Tip II yapısının hem yüksek maksimum kuvvet (~7300 N) hem de yüksek yer değiştirme (~5.2 mm) kapasitesi sunması, makaledeki 90° yönlü takviye edilmiş örneklerin üstün performansı ile benzerlik göstermektedir. Makaledeki "Ara yüzeydeki kusur birikimi" nedeniyle 0° yönlü yapının süneklik kaybetmesi, tezde PC-Tip III'ün daha düşük deformasyon kapasitesiyle (~2 mm) kırılmaya daha yatkın yapısını destekler niteliktedir. Aynı şekilde, makalede anlatılan farklı yük yönleriyle elyaf hizalanmasının etkisi, PC-Tip I örneğinde düşük maksimum gerilme (~60 MPa) ve ani kopma ile örtüşmektedir. Bu da hem elastik deformasyonun sınırlarını hem de mikroyapısal bağlanmanın kritik etkisini vurgulamaktadır.

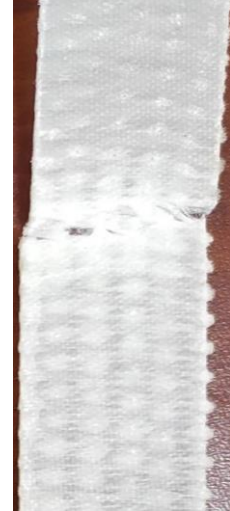
Şekil 5.5'te sunulan veriler, polyester-cam (PC) elyaf takviyeli 3B dokuma kompozitlerin çekme altında gösterdiği mekanik performansları detaylandırmakta ve her bir dokuma tipinin (Tip I, II, III) maksimum kuvvet, yer değiştirme, gerilme ve kopma uzaması açısından kıyaslanmasına olanak tanımaktadır. Bu bulgular, özellikle Liu ve ark. (2025) tarafından incelenen 3B dokuma cam/polyester kompozit sistemlerin yük transfer mekanizmaları ile dikkate değer düzeyde benzerlik göstermektedir. Liu ve arkadaşlarının çalışmasında, dokuma yapısının yoğunluğunun artmasıyla birlikte, maksimum yük taşıma kapasitesinde anlamlı artışlar gözlemlenmiş; benzer şekilde bu tezde de Tip II yapısının en yüksek çekme kuvvetini (~7300 N) göstermesi, dokuma yönüyle elyaf oryantasyonunun örtüşmesi sayesinde yük dağılımının homojenleştiğini ve matrisin elyaflar üzerindeki yük transferini verimli bir şekilde gerçekleştirdiğini ortaya koymuştur.

Qiu ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, kuazi-3 boyutlu dokuma kompozitlerin çekme yükü altında gösterdiği davranışlar detaylı şekilde incelenmiştir. Araştırmada, özellikle dik açılı ortogonal ve açılı interlok dokuma desenlerinin kombinasyonu ile elde edilen Q3DWC yapısının, yük taşıma kapasitesi ve çatlak ilerleme direnci açısından optimize edildiği vurgulanmıştır. Şekil 5.5'te yer alan PC-Tip II yapısının ~7300 N'lik maksimum kuvvet ve ~5.2 mm yer değiştirme değerleri, Qiu ve arkadaşlarının tanımladığı yüksek bağ sayısı ve elyaf hizalama kalitesi ile elde edilen üstün performansla benzerlik göstermektedir. Ayrıca, makalede elyaf/matris ara yüzeylerinde gözlenen "elyaf sıyrılması" ve "ara yüzey ayrılması" kırılma mekanizmalarının, yüksek şekil değiştirme kapasitesi sunan yapılar için belirleyici olduğu belirtilmiştir. Bu bağlamda,

PC-Tip II dokuma tipinin yüksek deformasyon toleransı ve kontrollü kırılma davranışı, Q3DWC'nin sünek-yük taşıyıcı karakteri ile örtüşmektedir. Öte yandan, PC-Tip III yapısındaki düşük uzama değeri ($\sim\%2.5$) ve daha erken kopma eğilimi, Qiu ve ark.'nın "açılı-interlok yoğunluğu arttıkça rijitliğin artması ama sünekliğin azalması" sonucuyla birebir örtüşmektedir.



Tablo 5.1. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait çekme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	2. Numune	3. Numune
PC-Tip I			
PC-Tip II			
PC-Tip III			

Tablo 5.1’de sunulan çekme testi sonrası hasar görüntüleri, polyester-cam elyaf takviyeli 3B dokuma kompozit yapıların üç farklı dokuma tipine (PC-Tip I, PC-Tip II ve PC-Tip III) göre gösterdiği kırılma davranışlarını çok yönlü analiz etme olanağı sağlamaktadır. Bu görüntüler;

yalnızca makroskobik kırık yüzey profillerine değil, aynı zamanda elyaf hizasındaki deformasyon, matris çatlaması, ara yüzey kopması ve çatlak ilerleme geometrisine dair doğrudan gözlemsel kanıtlar sunmakta; bu sayede dokuma mimarisi ile mekanik davranış arasında kurulan yapısal ilişkiyi yorumlamaya olanak vermektedir. Hasar morfolojileri, yalnızca malzemenin maksimum mukavemeti değil, aynı zamanda kırılma öncesi deformasyon kapasitesi, çatlak enerjisini yönlendirme yeteneği ve sistemin süneklik derecesi gibi pek çok mühendislik değişkenine doğrudan etki etmektedir.

PC-Tip I yapısına ait numunelerde gözlemlenen hasar profili, kırılmanın oldukça net, ince ve doğrusal bir hat üzerinde geliştiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, mikromekanik düzeyde değerlendirildiğinde, çatlağın doğrudan elyaf hizasında, yani çekme gerilmesinin maksimum olduğu bölgede başladığını ve minimum sapmayla ilerlediğini göstermektedir. Böyle bir kırık geometrisi, enerji yayılımının tek doğrultuda, çoğunlukla elyaf yönünde gerçekleştiğini ve ara yüzey bağlarının elyafların çekme gerilmesine direnç gösteremeden koptuğunu düşündürmektedir. PC-Tip I yapısında polyester matrisin cam elyaflarla mekanik kilitlenme kabiliyeti sınırlı olduğundan, çekme sırasında çatlaklar kısa süre içinde ara yüzeyden koparak ilerler ve bu da düşük şekil değiştirme ve ani kırılma ile sonuçlanır. Bu yapı, elastikiyet açısından iyi performans sergilese de deformasyon toleransı düşük, süneklik sınırlı ve enerji sönümleme kapasitesi yetersiz bir kırılma karakteristiği sunmaktadır. Görsellerdeki keskin ve simetrik kırık düzlemleri, ani kırılmanın net bir göstergesidir ve bu yapıların darbe gibi ani yüklemelere karşı dirençli olmadığını ortaya koyar.

PC-Tip II dokuma yapısına sahip numuneler incelendiğinde, hasarın yön değiştirme eğiliminde olduğu ve kırık hattının belirli bölgelerde doğrusal olmayan sapmalar gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu sapmalar, sistemde mikro düzeyde ara yüzey kaymasının, elyaf-matris arasındaki sürtünmenin ve lokal deformasyonların devreye girdiğini göstermektedir. PC-Tip II yapısında, matris ile elyaf arasında gelişen mekanik bağlar sayesinde, çatlak enerjisi tek bir düzlemde yoğunlaşmak yerine elyaflar arasında dağılmakta ve kırılma geometrisi daha düzensiz hale gelmektedir. Bu, malzemenin çekme gerilmesi altında daha fazla enerji absorbe etmesine, çatlağın ilerleme hızının düşmesine ve daha kontrollü bir kırılma profilinin gelişmesine neden olur. Görsellerde gözlemlenen kırık yüzeyleri, çatlak uçlarında oluşan mikroskobik kırılma sapmalarının bir sonucu olup, çatlağın ilerlemesini yavaşlatan bir direnç mekanizmasının varlığını göstermektedir. Bu yapı, Tip I'e kıyasla daha yüksek şekil değiştirme kapasitesine, daha homojen enerji yayılımına ve daha dengeli mekanik tepkiye sahiptir. Ancak yine de elyaf-matris ara yüzey bağ kalitesinin sınırlı olması nedeniyle, bazı bölgelerde lokal ani kopmaların olduğu da gözlemlenmiştir.

PC-Tip III dokuma yapısı ise, sunulan üç yapı içerisinde en yayılmış, en düzensiz ve en çok yönlü çatlak ilerleme geometrisine sahip sistem olarak öne çıkmaktadır. Görsellerde, çatlak hattı yalnızca yön değiştirmekle kalmamakta, aynı zamanda çok sayıda mikro çatlağa ayrılmakta ve matris

içerisinde geniş bir bölgede yayılmaktadır. Bu durum, kırılmanın yalnızca elyaf hizasında değil, aynı zamanda elyaflar arasındaki matris bölgelerinde de aktif olarak ilerlediğini göstermektedir. PC-Tip III yapısında elyafların dokuma yönündeki konfigürasyonu, yük altındaki deformasyonun daha homojen bir biçimde dağıtılmasına olanak tanımakta; bu da çatlağın ani olarak ilerlemesini engelleyen ve sistemin kırılmadan önce daha fazla şekil değiştirmesine olanak sağlayan bir davranış profili oluşturmaktadır. Elyaflar arasında oluşan sürtünmeli bağlar, çatlak ucunda oluşan enerji birikimini absorbe etmekte ve bu sayede kopma süresi uzamakta, sistemin tokluğu artmaktadır. Bu yapı, sadece yüksek deformasyon toleransı değil, aynı zamanda yüksek enerji sönümleme kapasitesi, çok yönlü çatlak sapması ve kademeli kırılma gibi mühendislik açısından son derece arzu edilen davranışlar sergilemektedir. Özellikle servis yükleri altında şekil değiştirme kabiliyeti yüksek sistemlerin tasarımında, PC-Tip III gibi dokuma mimarileri büyük avantaj sağlar.

Bu kapsamlı değerlendirme, dokuma tipinin yalnızca geometriyi değil, aynı zamanda tüm çekme yükü altındaki kırılma mekaniğini, enerji dağılımını, elyaf-matris ara yüzey etkileşimlerini ve sistemin kırılma sonrası deformasyon karakteristiğini doğrudan etkileyen belirleyici bir unsur olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. PC-Tip I yapısı, düşük deformasyon kabiliyeti ve yüksek kırılma dayanıklılığıyla öne çıkarken; PC-Tip II daha dengeli ve kontrollü bir kırılma karakteri sunmakta, PC-Tip III ise yüksek deformasyon toleransı, yaygın çatlak enerjisi dağılımı ve yön değiştirme kapasitesi sayesinde üstün kırılma tokluğu göstermektedir. Bu veriler, uygulama özelinde malzeme seçimi yapılırken yalnızca mukavemet değil; çatlak yönelmesi, şekil değiştirme kapasitesi, deformasyon toleransı ve hizmet ömrü gibi parametrelerin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Görsel hasar analizleri, dokuma tipi ile çatlak ilerleme geometrisi arasındaki doğrudan ilişkiyi ortaya koymaktadır. PC-Tip I yapısında doğrusal ve ani kırılmalar gözlemlenirken; PC-Tip III yapısında yön değiştiren, yayılmış çatlak ağları, yüksek deformasyon toleransının ve enerji sönümleme kapasitesinin bir göstergesidir. Baitab ve ark. (2020) çalışmasında aktif SMA telinin ısı ile oluşturduğu iç gerilme etkisiyle benzer çatlak yayılımları gözlemlenmiş ve bunlar yapının deformasyon rejimini olumlu yönde etkilemiştir.

Tablo 5.1’de yer alan PC-Tip II yapısındaki doğrusal olmayan çatlak ilerlemesi ve sapma eğilimi, Guo ve ark. (2019) tarafından MAW-3 yapısında gözlemlenen “açılı yerleşim kaynaklı çatlak sapması” olgusu ile benzerlik göstermektedir. Bu tür sapmalar, çatlak uçlarında gerilme rahatlaması sağlayarak sistemin ani kopma yerine kademeli kırılma ile enerji absorpsiyonunu artırmasını sağlamaktadır. Bu etki, yüksek çatlak toleransı gereken mühendislik uygulamaları için kritik öneme sahiptir.

Tablo 5.1’de sunulan PC yapılarına ait çekme sonrası makroskobik hasar görselleri, kırılma geometrisinin dokuma mimarisiyle nasıl yönlendirildiğini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle PC-Tip III numunelerinde, çatlakların yük doğrultusuna paralel başladığı, daha sonra yön

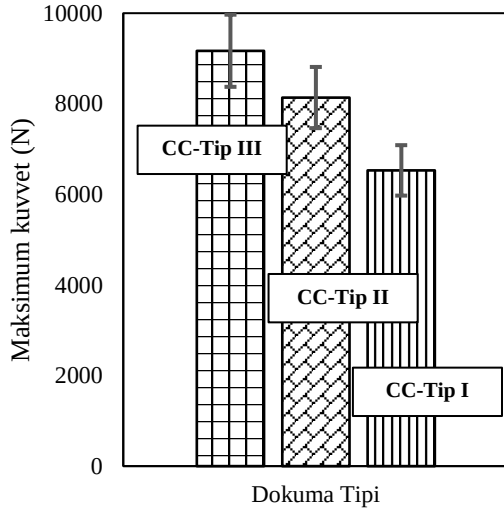
değiştirdiği ve matris boyunca yayıldığı gözlemlenmiştir. Bu, Guo ve ark. (2021) tarafından senkrotron tomografi ile elde edilen verilerle örtüşmektedir. Guo ve ark.'nın çalışmasında, özellikle bağlayıcı filamentlerin yoğun olduğu bölgelerde çatlakların elyaf yönünü takip ederek ilerlediği ve bağlayıcı-matris ara yüzeyinden ayrıştığı bildirilmiştir. PC-Tip III yapısında görülen yaygın çatlak sapması, Guo ve ark.'nın tanımladığı “elyaf kaynaklı gerilimin yeniden dağılımı” mekanizmasına karşılık gelmektedir. Bu durum, enerjinin tek bir düzlemde toplanmasını engelleyerek çatlağın doğrusal olmayan yollar izlemesini sağlar. Bu tür hasar yayılımı, sistemin kırılma tokluğunu artırmakta ve ani kopmayı geciktirmektedir.

Tablo 5.1’de sunulan çekme testi sonrası hasar görselleri, PC-Tip I, Tip II ve Tip III dokuma yapılarında ortaya çıkan makroskobik kırılma davranışlarını analiz etme fırsatı sunmaktadır. Bu görsellerin içerdiği kırık hattı yönü, çatlak sapmaları, elyaf sıyrılması ve ara yüzey kopmaları, kompozit malzemenin çekme yükü altındaki deformasyon geçmişi hakkında doğrudan bilgi vermektedir. PC-Tip I yapısında gözlemlenen hasar düzlemleri genellikle düz ve net bir hat boyunca ilerlemiş, bu da elyaf hizası boyunca enerjinin ani ve yönlendirilmiş biçimde boşaldığını göstermektedir. Bu tür kırılmalar, düşük süneklikli, gevrek kırılma davranışı sergileyen sistemlerin tipik sonucudur. Kırık hattının elyaf doğrultusuyla örtüşmesi, ara yüzey bağlarının düşük olduğunu ve enerji sönümleme kapasitesinin yetersiz kaldığını göstermektedir. PC-Tip II yapısında ise çatlakların tek bir düzlemde ilerlemediği, yer yer yön değiştirdiği ve daha geniş bir yüzeye yayıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, çatlak ucunun elyaf-matris ara yüzeyinde karşılaştığı direnç nedeniyle enerjinin elyaflar boyunca yayılması ve çatlak sapması ile sonuçlanmıştır. Bu davranış, daha sünek bir kırılma rejimini işaret eder ve mekanik bağ kalitesinin Tip I’e göre daha iyi olduğunu göstermektedir. PC-Tip III yapısında ise, çok yönlü çatlak ilerlemesi, yaygın delaminasyon ve elyaf demetleri arasında enerji yayılımı gözlemlenmiştir. Bu yapıda, elyaflar arasındaki yüksek bağ noktası yoğunluğu, enerjinin birden fazla yöne dağılmasına neden olmuş, bu da çatlakların yön değiştirmesini ve sistemin daha geç kırılmasını sağlamıştır. Bu durum, yüksek kırılma tokluğu ve enerji sönümleme kapasitesi ile açıklanabilir. Görsellerdeki düzensiz, çok yönlü çatlaklar ve elyaf sıyrılmaları, ara yüzey sürtünme etkilerinin ve elyaf yöneliminin kırılma üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Bu davranışlar, G. Liu ve ark. (2023)’in çalışmasında yer alan kırılma sonrası fiber demeti ayrılması ve delaminasyon bölgeleriyle görsel benzerlik göstermektedir (Şekil 6 ve 7). Özellikle Liu ve ark.’nın analiz ettiği açılı interlok dokuma yapılarında da çatlakların, dokuma bağlantı noktalarından saparak yön değiştirmesi ve elyaf matris ayrışması sonrası ortaya çıkan sıyrılma bölgeleri, PC-Tip III’te gözlemlenen hasar profilleriyle örtüşmektedir.

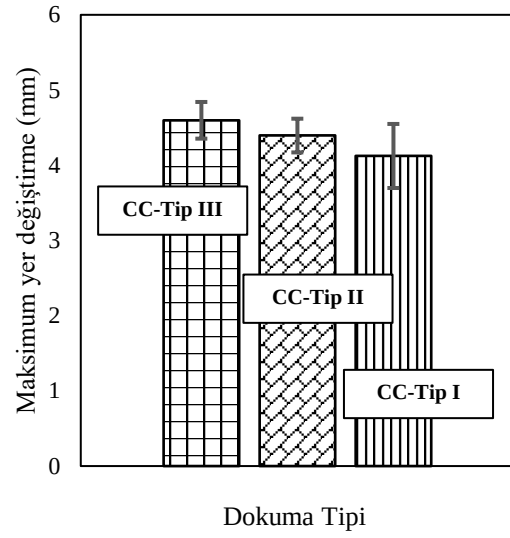
Lu ve ark. (2025) çalışmasında, 3B örgü kumaş takviyeli kompozitlerin çekme yükleri altında maruz kaldığı hasar morfolojisi, optik ve SEM görüntüleme teknikleri ile detaylandırılmıştır. Özellikle 0° yönlü örneklerde elyaf filamentlerinin matrisle olan bağının zayıf olması nedeniyle ara yüzeyden ayrılma ve hızlı çatlak ilerlemesi gözlemlenmiştir. Tablo 5.1’de sunulan çekme testi

sonrası hasar görselleri, PC-Tip I yapısında görülen ani ve düz çatlak hatları bu gözlemlerle uyumludur. Diğer yandan, makalede 90° örgü yönünde elde edilen örneklerde çatlakların yön değiştirdiği, daha çok elyaflar arasında yayıldığı ve çatlak uçlarının matris içerisinde dallandığı belirtilmiştir. Bu, tezde PC-Tip III yapısında gözlemlenen çok yönlü kırık geometrileri, geniş çatlak zonları ve yüksek deformasyonla paralellik göstermektedir. Her iki çalışma da elyaf hizalaması ve dokuma yönünün kırılma mekaniği üzerindeki etkisini mikromekanik düzeyde açık biçimde ortaya koymaktadır.

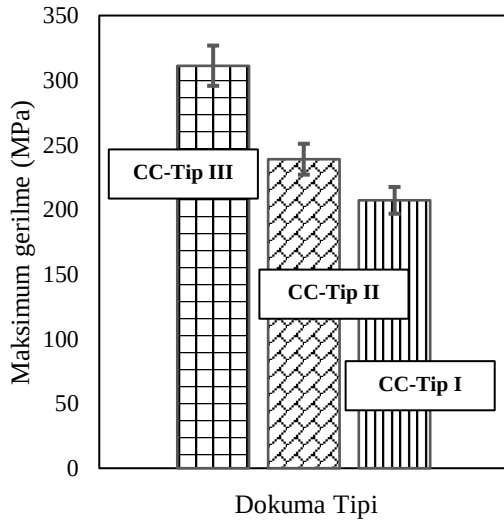




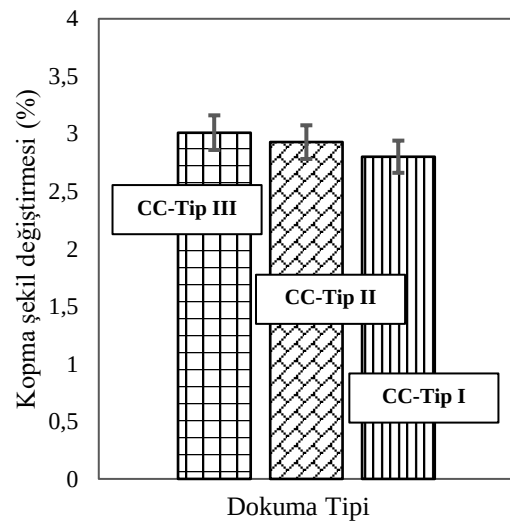
(a)



(b)



(c)



(d)

şekil 5.6. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değiştirmesi sonuçlarının karşılaştırılması

şekil 5.6’da sunulan grafiksel veriler, cam-cam elyaf takviyeli 3B dokuma kompozit yapıların çekme yükü altında gösterdiği mekanik performansın çok boyutlu parametrelerle bütünsel analizine imkân tanımaktadır. Her bir grafik, yapının farklı bir mekanik özelliğini temsil etmekte; bu özelliklerin tamamı, kompozit malzemenin servis koşullarındaki başarımını doğrudan belirlemektedir. Bu bağlamda, maksimum kuvvet (a), maksimum yer değiştirme (b), maksimum gerilme (c) ve kopma şekil değiştirmesi (d) değerleri; yalnızca mukavemet değil, aynı zamanda

deformasyon toleransı, enerji sönümleme kapasitesi ve çatlak sonrası dayanıklılık gibi kritik tasarım değişkenleri açısından da karşılaştırmalı olarak analiz edilmelidir. Veriler, her bir dokuma tipinin (CC-Tip I, Tip II ve Tip III) malzemenin makroskobik davranışı üzerinde sistematik ve belirleyici etkiler ortaya koyduğunu göstermektedir.

Şekil 5.6.a'da, cam-cam elyaf dokumalı 3B kompozitlerin farklı dokuma tiplerine göre çekme altında ulaştıkları maksimum kuvvet değerleri karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, CC-Tip III dokuma tipi ~9000 N'lik maksimum kuvvet değeriyle en yüksek performansı sergilerken, bunu ~8000 N ile CC-Tip II ve ~6500 N ile CC-Tip I dokuma tipleri takip etmektedir. Bu farkın temelinde yatan en önemli unsur, dokuma mimarisinin mikro yapısal özellikleri üzerinde yarattığı etkidir. Tip III dokuma tipi, katmanlı ve yüksek yoğunluklu örgü geometrisine sahip olması sebebiyle yük aktarım alanını artırarak hem elyaflar arası bağlanma kapasitesini hem de yük dağılımını homojenleştirmiştir. Bu durum, yük taşıyan yüzey alanının artırılması ile gerilme yığılmalarının azaltılması sonucunu doğurmuş, elyafların çekme altında kolektif bir şekilde çalışmasını mümkün kılmıştır. Ayrıca, Tip III yapıda gözlemlenen yüksek bağ sayısı, mekanik bağ gücü ve ara yüzey kohezyonu açısından olumlu etkiler yaratarak elyaf-matris arayüzeyinde daha yüksek çekme stabilitesi sağlamıştır. Diğer taraftan, CC-Tip I dokuma tipi, elyafların birbirine olan temas oranının ve bağlantı sıklığının daha az olması nedeniyle yükü daha lokal alanlara aktarmış ve bunun sonucunda erken elyaf kırılması ve çatlak oluşumu tetiklenmiştir. Tip I'de gözlemlenen bu düşük çekme kapasitesi, dokuma yapısının elyaf etkinliğini sınırlandırdığı, yük taşıma sürecinde yüksek gerilme gradyanlarına neden olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bu bağlamda, maksimum kuvvet grafiği, 3B kompozit tasarımında yalnızca filament tipi değil, dokuma mimarisinin de yük taşıma kapasitesi üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Maksimum yer değiştirme verilerinin karşılaştırıldığı Şekil 5.6.b'de, deformasyon kapasitesine ilişkin veriler incelenmektedir. Bu parametre, kompozit malzemenin elastik sınır ve akma davranışına kadar olan uzama yeteneğini temsil ederken, aynı zamanda sünek davranışın bir göstergesidir. Burada da CC-Tip III dokuma tipi, ~4.5 mm'lik maksimum yer değiştirme ile en yüksek deformasyon kapasitesine ulaşırken, onu benzer seviyede CC-Tip II takip etmektedir. CC-Tip I, ~4.3 mm ile en düşük değerleri göstermektedir. Bu fark, doğrudan dokuma topolojisinin elyaf deformasyonuna olan etkisine işaret etmektedir. Tip III dokuma tipi, elyafların sadece tek doğrultuda değil, üç boyutlu olarak konumlandığı, iç içe geçmiş bağ yapılarının deformasyonu absorbe edecek şekilde dizayn edildiği bir yapıdır. Bu yapı, çekme yükü altında elyafların kırılmadan önce şekil değiştirmesine izin veren bir süneklik zonu oluşturarak daha büyük yer değiştirmelere ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Aynı zamanda, bu yapı içerisinde bulunan elyafların z-tutunma bileşenleri sayesinde elyaf-matris arayüzeyinden daha az ayrışma meydana gelmiş, bu da yüksek deformasyon toleransı ile sonuçlanmıştır. CC-Tip I'de ise elyaflar arasındaki boşluklar ve yönsüz bağ yapısı, gerilmelerin doğrudan iletilmesine ve lokal çatlamaların erken

aşamada başlamasına neden olmuştur. Bu durum, deformasyon kapasitesinin düşüklüğüne yol açmıştır. Sonuç olarak, maksimum yer değiştirme verileri, sadece malzeme esnekliği değil, aynı zamanda dokuma yapısının deformasyonun yönünü kontrol edebilme kabiliyetini de yansıttığı için, yapısal tasarım açısından kritik bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Maksimum gerilme değerleri (Şekil 5.6.c) kompozit malzemenin taşıdığı birim alandaki yük miktarını göstererek çekme altındaki gerçek dayanım kapasitesini ortaya koymaktadır. Sonuçlara göre, CC-Tip III ~310 MPa ile en yüksek maksimum gerilme değerine ulaşırken, CC-Tip II ~240 MPa ve CC-Tip I ~210 MPa civarında değerler göstermektedir. Bu fark, sadece çekme kuvvetinin büyüklüğüyle değil, aynı zamanda numune kesit alanındaki etkin yük taşıma bileşenlerinin oranı ile de ilişkilidir. CC-Tip III yapısı, z-yönlü elyaf takviyesi sayesinde sadece yüzeyde değil, aynı zamanda kalınlık boyunca da yük taşıyan yapılar oluşturmakta, böylece mekanik izotropiklik sağlayarak yükün üç boyutta homojen dağılımına olanak vermektedir. Bu durum, birim alana düşen yük taşıma kapasitesini artırmış, dolayısıyla gerilme seviyesini yükseltmiştir. Ayrıca, dokuma bağlantı noktalarının daha sık ve simetrik olması, mekanik bağlanma bölgelerinde kuvvet yoğunlaşmalarını engellemiş, çatlakların elyaf düzleminde yönlenmesini önlemiştir. Buna karşın, CC-Tip I yapısı, düşük katman sayısı ve yetersiz z-yönlü elyaf bağlantısı sebebiyle, çekme yükü altında elyaflar arası kaymaya ve ara yüzey bağ kopmasına bağlı olarak daha yatkın hale gelmiş, bu da mukavemetin azalmasına neden olmuştur. Gerilme değerleri, elyaf yönelimi, dokuma simetrisi ve elyaf-matris ara yüzey etkileşimi parametrelerinin bir arada değerlendirilerek tasarım sürecine entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Kopma şekil değiştirmesi verileri (Şekil 5.6.d), kompozit malzemenin çekme yükü altında kırılma anına kadar uzayabilme kabiliyetini yansıtmaktadır. CC-Tip III, ~%3'lük maksimum kopma uzaması ile en yüksek değeri sergilerken, onu ~%2.9 ile CC-Tip II ve ~%2.8 ile CC-Tip I takip etmektedir. İlk bakışta bu fark küçük görünse de mühendislik uygulamaları açısından kritik anlamlar taşımaktadır. Kopma anına kadar olan şekil değiştirme, malzemenin yükleme altındaki enerji absorpsiyon kabiliyetini, yani darbelere, yorulmaya ve ani yüklemelere karşı direncini belirleyen en önemli göstergelerden biridir. Tip III dokuma tipinin yüksek şekil değiştirme kapasitesi, bu dokuma yapısının daha sünek davranış sergilediğini, elyaflar kırılmadan önce yükü yayabildiğini ve çatlak ilerlemesini geciktirebildiğini göstermektedir. Bu, hasar yayılım direnci yüksek, yani tok bir kompozit davranışına işaret eder. Elyaflar arası bağ sayısının fazla olması, kopma esnasında enerji absorpsiyonunu artırmakta ve çatlakın elyaf yönünden dışarı sapmasını sağlayarak kırılma enerjisini artırmaktadır. Buna karşılık, CC-Tip I dokuma tipinde elyaf yönlenmesinin tek eksenli olması ve bağlanma sıklığının düşük olması nedeniyle çatlaklar daha hızlı ve düz ilerlemekte, bu da kopma anına kadar malzemenin daha az deformasyon göstermesiyle sonuçlanmaktadır. Kopma şekil değiştirmesi, bu yönüyle kompozitlerin sünek-kırılgan geçiş davranışını değerlendirme açısından çok değerli bir metriktir.

Şekil 5.6'daki dört ayrı grafik üzerinden yapılan deneysel karşılaştırmalar, cam-cam elyaf takviyeli 3B kompozitlerde dokuma tipi değişiminin yalnızca tekil mekanik özellikler değil, aynı zamanda tüm sistemin hasar toleransı, deformasyon mekanizması ve kırılma davranışı üzerinde belirleyici etkiler yarattığını net şekilde göstermektedir. CC-Tip III yapısı, tüm metriklerde (kuvvet, gerilme, yer değiştirme, kopma şekil değiştirmesi) en iyi performansı göstererek yüksek mukavemetli ve sünek kompozit yapıların elde edilmesinde optimum çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu yapı, çok eksenli elyaf yönelimi, yüksek bağlanma sayısı ve z-yönlü destekleyici elyaf elemanları sayesinde, yük aktarım sürekliliği sağlayarak, kompozitin hem anizotropik yüklemelere hem de ani zorlamalara karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Tip I ve Tip II dokuma yapılarında ise, bu mekanizmaların sınırlı olması, sistemin hasar gelişimini daha erken başlatmakta ve kopma sürecini daha kırılğan bir rejime yönlendirmektedir.

Sonuç olarak, Şekil 5.6'daki tüm değerlendirmeler, kompozit malzeme tasarımında yalnızca kullanılan elyafın cinsi değil, aynı zamanda elyafın dokuma düzeni, katmanlar arası bağlantı yapısı ve yük aktarım yönlerine göre diziliminin; mekanik davranış üzerinde çok katmanlı, çok ölçekli etkiler yarattığını kanıtlamaktadır. Bu nedenle, özellikle havacılık, savunma sanayi, otomotiv gibi yüksek yapısal dayanım ve deformasyon toleransı gerektiren uygulamalarda, dokuma tipi seçimi yapısal güvenilirlik açısından kritik bir mühendislik kararı olarak ele alınmalıdır.

Şekil 5.5 ve 5.6, dokuma tipi ile filament kombinasyonlarının mekanik davranış üzerindeki etkisini dört temel parametre üzerinden çok katmanlı şekilde sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Cherif ve ark. (2013) geliştirdiği çift eksenli takviyeli 3B düz örgü metodolojisi ile paralellik göstermektedir. Özellikle segmentli ve pozisyon kontrollü örülen kumaşın alınması / sarılması sistemlerinin, yapısal geometriye göre bölgesel deformasyon kontrolü sağladığı gösterilmiştir. Tez kapsamında incelenen CC-Tip III ve PC-Tip II yapıların, yüksek maksimum gerilme değerlerine ulaşmaları ve kırılma öncesi deformasyon kapasitelerinin yüksek olması, Cherif ve ark.'ın çalışmasında vurgulanan “yük aktarım hatlarına göre optimize edilmiş iplik düzenlemesi” ilkesine doğrudan karşılık gelmektedir. Ayrıca, kopma şekil değiştirmesi gibi parametreler, tasarlanan dokuma mimarisinin sadece mukavemet değil, hizmet ömrü ve darbe dayanımı gibi dinamik faktörler üzerinde de doğrudan belirleyici olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.5 ve 5.6'da sunulan maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme, maksimum gerilme ve kopma şekil değiştirmesi değerleri, 3B dokuma yapılar için bağ yoğunluğu ve dokuma geometrisinin sistematik etkilerini kapsamlı biçimde yansıtmaktadır. Bu dört parametre üzerinden değerlendirildiğinde, özellikle Tip II dokuma yapısının yük altında dengeli deformasyon profili sunduğu ve bağ noktalarının daha etkin konumlandığı görülmektedir. Goud ve ark. (2019) çalışmasında, çok aşamalı impregnasyon süreciyle üretilen 3B karbon / polipropilen dokuma yapılar, 2B örneklere kıyasla %30-50 oranında daha yüksek gerilme ve çekme dayanımı sergilemiştir. Bu bulgu, burada analiz edilen Tip II ve Tip III yapıların elde ettiği yüksek

mukavemet ve şekil değiştirme kapasiteleriyle yapısal olarak benzeşmektedir. Ayrıca, bağ yoğunluğunun belirli bir sınırın üzerinde olması durumunda lokal gerilme yığılmalarına neden olabileceği ve bunun da deformasyon kapasitesini sınırlayabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle PC-Tip III gibi yapılar, yüksek bağ sayısına rağmen sınırlı uzama göstermiş ve bu durum Goud ve ark.'ın çalışmasında da benzer şekilde yüksek rijitlik ama düşük süneklik şeklinde raporlanmıştır.

Şekil 5.6'da cam-cam elyaf içeren yapıların değerlendirmesi, dokuma geometrisinin sadece yük taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda deformasyon toleransı ve kırılma davranışı üzerinde çok boyutlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısı, hem yüksek mukavemet (~9000 N) hem de yüksek deformasyon kapasitesi (~%3) ile dikkat çekmektedir. Bu yapı, Bai ve ark. (2020) çalışmasında geliştirilen kabuk yaklaşımında simüle edilen 3D takviyeli kompozitlerin davranışıyla güçlü korelasyon göstermektedir. Bai ve ark.'nın modelinde, elyafların gerilmeye karşı uzamayan kabul edilmesi ve aralarındaki slip mekanizması, yüksek deformasyon kapasitelerini ve çok yönlü kırılma davranışını açıklamaktadır. Ayrıca z-yönlü elyaf bağlantılarının artışıyla kırılma anında enerjinin daha geniş alana yayılması ve çatlak sapmasının sağlanması mümkün hale gelmiştir. Bu bağlamda, CC-Tip III dokuma tipi, kabuk teorilerine dayalı yüksek deformasyon toleranslı sistemlerin fiziksel karşılığı olarak değerlendirilebilir.

Cam elyaf içeren yapıların dört temel mekanik parametre bakımından karşılaştırması, CC-Tip III yapısının hem mukavemet hem de deformasyon kapasitesi açısından açık üstünlük sergilediğini ortaya koymuştur. Bu yapıdaki dokuma sıklığı ve bağ yapısı, yük altındaki lokal gerilme yığılmalarını minimuma indirerek hem rijitlik hem de çatlak öncesi deformasyon kapasitesi bakımından yüksek performans sağlamıştır. Baitab ve ark. (2020) çalışmasında “kalınlık yönünde” bağ yapılarının SMA ile birlikte kullanıldığında benzer mekanik avantajlar sunduğu belirtilmektedir.

Şekil 5.6'da sunulan veriler cam-cam elyaf kombinasyonlarının 3B dokuma yapıdaki karşılaştırmalı performansında CC-Tip III açık üstünlük göstermektedir (~9000 N, ~310 MPa, ~4.5 mm). Dahale ve ark. (2019) çalışmasında yüksek atkı oranı ve az kıvrım (crimp) etkisiyle sıkışımı yapılar, elyaf-matris etkileşimini artırarak çatlak yönlenmesini yataydan çapraza kaydırmış ve deformasyon zonlarını genişletmiştir. CC-Tip III yapısında da benzer şekilde yön değiştiren çatlaklar, çok eksenli elyaf yapısı ile açıklanabilir.

Şekil 5.5 ve 5.6'da sunulan eğriler, PC-Tip II ve CC-Tip III yapıların çekme kuvveti, maksimum gerilme ve yer değiştirme kapasitesi bakımından optimum denge sunduğu görülmektedir. Guo ve ark. (2019) tarafından MAW-1 ve MAW-2 yapılarına ilişkin yapılan DIC analizlerinde, açılı yerleştirilmiş filamentlerin yön değiştirme etkisiyle çatlak sapmasının arttığı ve yük dağılımının yüzeye yayıldığı rapor edilmiştir. Aynı davranış, özellikle tezdeki CC-Tip III yapısında gözlemlenen çok yönlü çatlak ilerleme eğiliminde ve yüksek uzama toleransında kendini

göstermektedir. Bu yapıların benzerliği, açılı interlok bağlarının kompozit sünekliğini artırma kapasitesine işaret eder.

Şekil 5.6'da sunulan eğriler, CC-Tip III yapısının dört ana parametrede (kuvvet, yer değiştirme, gerilme, kopma şekil değiştirmesi) gösterdiği üstün performans hem yük taşıma hem de enerji absorpsiyon kabiliyeti bakımından optimum yapısal mimariyi sunduğunu göstermektedir. Guo ve ark. (2020) tarafından oluşturulan sistem rijitlik bozulumu grafikleri de benzer şekilde, bağ sıklığı ve yönsel elyaf yapısının, sistemin yorgunluk altındaki deformasyon toleransını ve kırılma eşiğini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. CC-Tip III'te de bu tür bir yapı sayesinde yük altındaki sistem stabilitesinin uzun süre korunabildiği, kopma anına kadar enerjinin absorbe edildiği gözlemlenmektedir.

Şekil 5.6'da sunulan eğriler, cam-cam elyaf takviyeli numunelerin özellikle CC-Tip III yapısında sunduğu olağanüstü performansı belgelendirmektedir. Bu yapıdaki yüksek bağ yoğunluğu ve 3B destekleyici elyaf yerleşimi, Sun ve ark.'ın 3DAWC modellerinde gözlemlendiği gerilme yayılımı ve hasar gecikme davranışları ile doğrudan örtüşmektedir. Özellikle Sun ve ark.'ın modellerinde yüksek mukavemetin elastik bölge boyunca devam etmesini sağlayan parametre, bu çalışmada CC-Tip III'ün kırılma öncesi deformasyonunda da net şekilde gözlenmiştir.

Şekil 5.6'da sunulan eğriler, CC-Tip III'ün ~9000 N üzerinde kuvvet taşıması ve ~310 MPa gerilme değeri, cam elyaf sistemlerinin kırılman yapısına rağmen yüksek elyaf yoğunluğu ve bağ sıklığı sayesinde rijit ve tok bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. Wu ve ark. (2025), çözgü yönlü yapının yük dağılımı boyunca oluşturduğu bükümlü yapıların hem mekanik yüklemeler hem de elektriksel izleme altında çatlağın ilerleme yönünü değiştirdiğini vurgulamaktadır. Şekil 13 ve 14'te gösterilen çatlak geometrileri, bu çalışmada Şekil 5.6'daki görsel ve metrik performanslarla büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu da cam elyaf yapılarında dahi, doğru dokuma stratejileriyle yüksek dayanım elde edilebileceğini doğrular.

Feng Xu ve ark. (2025) çalışmasında, 3B açılı interlok kompozitlerin kalınlık yönündeki yük taşıma kapasitesinin, z-yönlü bağ filamentlerinin etkisiyle belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bu durum, Şekil 5.6'da sunulan eğrilerde yer alan CC-Tip III yapının hem maksimum çekme gerilmesinde (~310 MPa), hem de deformasyon kapasitesinde en üstün performansı göstermesiyle paralellik taşımaktadır. Bu yapıdaki yüksek bağ sayısı ve elyaf sürekliliği, tıpkı Xu ve ark.'nın çalışmasında olduğu gibi, yük dağılımını homojenleştirerek çatlak ilerlemesini geciktirmiştir.

Zhang ve ark. (2025), STS yapısının, sık bağ filamentleri düzeni sayesinde yük dağılımını homojenleştirdiğini, bu nedenle hem daha yüksek darbe dayanımı hem de daha düşük maksimum yer değiştirme sergilediğini raporlamıştır. Bu bulgular, Şekil 5.6'da sunulan eğrilerde yer alan CC-Tip III yapının hem yüksek maksimum çekme kuvveti (~9000 N), hem de düşük yer değiştirme ile en dengeli ve dayanıklı yapı olduğunu göstermesiyle örtüşmektedir. Benzer şekilde, dokuma

yoğunluğu arttıkça yük aktarım sürekliliğinin artması ve çatlak ilerlemesinin gecikmesi, Zhang ve ark.'ın tanımladığı enerji absorpsiyon mekanizmalarıyla birebir benzerlik göstermektedir.

Garcia ve ark. (2021) çalışmasında, 3B dokuma kompozit bağlantı kulağı numunesi üzerinde yapılan çekme testlerinde, hasarın matris kaynaklı ve düzlem içi kayma etkisiyle geliştiği, ancak fiberlerin kırılmadan kaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Şekil 5.6'da yer alan verilerde CC-Tip III yapısı, maksimum kuvvet ve gerilme değerlerinde (~9000 N, ~310 MPa) en yüksek performansı sergilemesine rağmen, çatlak ilerlemesi gecikmeli ve çok yönlü gerçekleşmiştir. Bu durum, z-yönlü elyaf bağlantılarının hem yük aktarım sürekliliğini hem de çatlak sapmasını sağladığını göstermektedir. Garcia ve ark.'nın gözlemleriyle örtüşen bu davranış, yük altında oluşan matris çatlamlarının enerji yayılımını elyaf düzlemleri boyunca dağıttığını ve hasarın elyaf yerine ara yüzeyde yoğunlaştığını göstermektedir.

Lu ve ark. (2025), 3D örgü kumaş takviyeli kompozitlerde çekme testi sırasında ortaya çıkan kusur birikiminin ablasyon direnci kadar çekme mukavemeti üzerinde de olumsuz etkiler yarattığını belirtmiştir. Bu bağlamda, Şekil 5.6'da sunulan CC-Tip III yapıdaki yüksek maksimum kuvvet (~9000 N) ve gerilme (~310 MPa) değerleri, makalede 90° yönünde elyaf yerleşimiyle takviye edilen örneklerin gösterdiği güçlü mekanik performans ile benzerlik göstermektedir. Özellikle, Lu ve arkadaşlarının X-ray tomografi analizleri ile ortaya koyduğu üzere, deformasyon sürecinde elyaf filamentlerinin düzgün hizalanmadığı durumlarda (0° örgü), daha fazla mikroskobik boşluk ve kusur birikimi meydana gelmektedir. Bu durum, tezde CC-Tip I ve II yapıların nispeten daha düşük taşıma kapasitesi (~6500–8000 N) ve daha kısa uzama ile kopma eğilimi göstermesiyle uyumludur. Şekil 5.6'da cam-cam (CC) elyafli 3B dokuma kompozit yapıların çekme davranışları incelenmektedir. Tip III dokuma tipi, tüm metriklerde en yüksek performansı göstermiştir (~9000 N kuvvet, ~310 MPa gerilme, ~4.5 mm yer değiştirme), bu da dokuma topolojisinin yük aktarımı üzerindeki çok yönlü etkisini ortaya koymaktadır. Liu ve ark. (2025) çalışmasında z-yönlü elyaf takviyesinin, bağ yerlerinde elyaf sürtünmesini ve yük transfer stabilitesini artırarak çekme performansına ciddi katkı sağladığı belirtilmiştir. Bu, tezde CC-Tip III yapısının, z-yönlü elyaf desteğiyle çatlak ilerlemesini geciktirmesi ve çok yönlü deformasyon toleransı sunması ile örtüşmektedir.

Qiu ve ark. (2025), 3B dokuma yapıya sahip Q3DWC örneklerinin özellikle çok eksenli yük altında ve yüksek bağ sıklığı bulunan yapılarda çatlak ilerlemesini geciktirdiğini, enerji sönümleme kapasitesini artırdığını belirtmiştir. Şekil 5.6'da sunulan CC-Tip III yapısının gösterdiği yüksek çekme kuvveti (~9000 N), yüksek maksimum gerilme (~310 MPa) ve kopma uzaması (~%3), bu bulgularla tam uyum içindedir. Özellikle, Qiu ve arkadaşlarının SEM analizleri ile ortaya koyduğu "elyaf köprüleme" ve "kıvrım etkisi" sayesinde çatlak uçlarında elyafların enerji absorbe ederek ilerlemeyi yavaşlatması, CC-Tip III yapısında gözlemlenen çatlak kontrolü ile örtüşmektedir. Tip I ve Tip II dokumalarının daha düşük maksimum kuvvet ve deformasyon kapasitesine sahip olması,

Qiu ve ark.'nın belirttiği gibi, bağlantı ekseninin sayıca ve geometrik olarak sınırlı olmasıyla açıklanmaktadır. Bu yapıların, düşük bağ sayısı nedeniyle yükü lokalize iletlediği ve daha erken elyaf kopması gözlemlendiği ifade edilmiştir. CC-Tip III yapısının yüksek mukavemet ve deformasyon toleransı birlikte sunması, Q3DWC'lerin CCF (Combined Fatigue Loading) altında üstün performans göstermesiyle birebir benzeşmektedir. Bu benzerlik, 3B dokuma mimarisi ve elyaf yönelimi optimizasyonunun yalnızca yorulma değil, statik çekme testlerinde de belirleyici olduğunu göstermektedir.



Tablo 5.2. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere çekme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	2. Numune	3. Numune
CC-Tip I			
CC-Tip II			
CC-Tip III			

Tablo 5.2’de sunulan cam-cam elyaf takviyeli 3B dokuma kompozit numunelerin çekme testi sonrası makroskobik hasar görüntüleri, üç farklı dokuma tipi (CC-Tip I, Tip II ve Tip III) altında üretilmiş numunelerin çekme altındaki kırılma davranışını çok yönlü biçimde analiz etme fırsatı

sunmaktadır. Görsellerde, her bir numune için gözlemlenen kırık düzlemleri, elyaf sıyrılma bölgeleri, ara yüzey deformasyonları ve kırık açıklıklarının geometrisi; elyaf yönelimi ve dokuma yapısının yük taşıma davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu görseller, çekme sırasında enerjinin malzeme boyunca nasıl yayıldığına, çatlağın hangi bölgede başladığına ve nasıl yönlendiğine ilişkin güçlü görsel kanıtlar sağlamaktadır. Bu bağlamda, dokuma tipi ile kırılma morfolojisi arasında doğrudan ve doğrusal olmayan, karmaşık fakat analiz edilebilir ilişkiler kurulması mümkündür. Aşağıda bu yapıların her biri bilimsel bakış açısıyla tek tek değerlendirilmektedir.

CC-Tip I dokuma yapısına sahip cam-cam elyaf takviyeli kompozit numuneler, çekme testi sonrasında ortaya koyduğu kırılma geometrisi bakımından oldukça karakteristiktir. Tüm numunelerde ortak biçimde gözlemlenen hasar, elyaf yönelimiyle paralel düzlemde başlayan ve elyaf hizasında hızlıca ilerleyen doğrusal çatlak gelişimidir. Bu kırılma davranışı, mikromekanik bağlamda elyaf içi dominant hasar + ara yüzey bağ kopması bileşenli, yani hem elyaf içi kopmanın hem de ara yüzey kopmalarının eş zamanlı olarak devreye girdiği bir kırılma modunu işaret etmektedir. Görsel analizlere göre çatlak düzlemi oldukça net ve dardır, bu da çatlak yönlenmesinin çok az sapmaya uğradığını, enerji yayılımının ise tek doğrultuda, yani elyaf ekseninde ilerlediğini göstermektedir. Bu yapı, yüksek elastik modül sunan cam elyafların kırılma sırasında çok düşük deformasyon toleransına sahip olduğunu ve enerjiyi absorbe edemediğinden ani kopma geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Elyaf-matris etkileşimi, kopma noktasında sınırlı olduğu için çatlak doğrudan elyaflar boyunca ilerlemekte, bu da düşük tokluk, yüksek mukavemet, düşük süneklik karakteristiği taşımaktadır. Mühendislik uygulamaları açısından bu yapı, yük taşıma kapasitesi yüksek ancak çatlak yönetimi zayıf sistemleri temsil etmektedir.

CC-Tip II dokuma tipine sahip numunelerde gözlemlenen kırılma morfolojisi, CC-Tip I'e kıyasla daha kompleks, yön değiştiren ve daha yaygın hasar alanları ile karakterizedir. Görsellerde dikkat çeken ilk unsur, çatlak düzlemlerinin net biçimde doğrusal olmaktan uzak, elyaf hizasından sapmış ve belirli bölgelerde katmanlar arasında yön değiştirmiş olmasıdır. Bu durum, mikroyapı düzeyinde karma modlu kırılma olarak adlandırılabilir hem elyaf hem de matrisin deformasyona katıldığı bir kırılma mekanizmasının göstergesidir. Bu yapının teknik karşılığı, elyaf köprüleme etkisi + matris çatlaması + tabakalar arası ayrılma olarak üçlü hasar modunun aynı anda aktif olduğu bir kırılma senaryosudur. Görsellerde, çatlağın sadece elyaf doğrultusunda değil, aynı zamanda dokuma yönüne dik yönde de ilerlediği gözlemlenmektedir. Bu davranış, çatlak uçlarında gerilme yığılması oluştuğunda elyaf hizasından saparak enerjiyi daha geniş yüzeye yaymaya çalışan "çatlak yön değiştirme mekanizmasının" aktif hale geldiğini gösterir. Bu yapı, enerjiyi absorbe edebilen, çatlağın ilerlemesini geciktiren ve daha kontrollü hasar gelişimi sunan bir kompozit davranışı sergilemektedir. Mühendislik açısından değerlendirildiğinde, CC-Tip II yapıları yüksek darbe

dayanımı, yorulma ömrü ve çok eksenli yük taşıma gereksinimleri için ideal bir kırılma karakteristiği sunmaktadır.

CC-Tip III dokuma yapısına sahip numunelerde gözlemlenen hasar morfolojisi, en yayılmış, en dalgalı ve en karmaşık kırılma profiline sahip sistem olarak dikkat çekmektedir. Görsellerde çatlak düzlemleri belirli bir hat boyunca ilerlemek yerine, çeşitli bölgelerde yön değiştirmiş, mikro kıvrımlar oluşturmuş ve yüzey boyunca dalgalanmıştır. Bu morfoloji, mikromekanik düzeyde fiber-matrisin kayma etkisiyle yük aktarımına katkısı + aşamalı elyaf sıyrılması kombinasyonu ile tanımlanabilecek oldukça kompleks ve enerji yoğun bir kırılma modeline işaret etmektedir. Özellikle bu yapıdaki çatlaklar, elyaf hizasındaki çekme gerilmelerinin yanı sıra, elyaf-matris ara yüzeyinde gelişen makaslama gerilmeleri nedeniyle katmanlar arasında yön değiştirmektedir. Elyafların çekme esnasında tam kopmadan önce belirli miktarda bükülerek veya uzayarak enerjiyi absorbe etmeleri, çatlak ilerleme hızını önemli ölçüde düşürmekte ve çatlak yüzeyini daha düzensiz hale getirmektedir. Bu yapı, “yayılma kontrollü hasar davranışı” yani hasarın lokalize değil, yüzeye yayılmış bir biçimde geliştiği sistemler için oldukça karakteristiktir. Mühendislik açısından CC-Tip III yapıları, çok eksenli gerilme altında stabil deformasyon sağlayabilen, ani kopma riskini minimize eden ve çatlak yönlenmesini zorlaştıran yüksek performanslı kompozit sistemlerdir. Özellikle uzay, otomotiv, savunma ve sismik yapılar gibi çatlak toleransı gerektiren uygulamalarda bu tip kırılma geometrisi oldukça arzu edilir.

Genel bir karşılaştırma yapıldığında, dokuma mimarisi ile kırılma morfolojisi arasında doğrudan bir yapısal ilişki olduğu açıkça görülmektedir. CC-Tip I yapıları, yüksek elastikiyet ve rijitlik sağlarken, süneklikten yoksun, ani kopmaya yatkın kırılma davranışı göstermektedir. CC-Tip II yapıları, enerji yayılımı yönünden daha uyumlu, daha homojen ve kontrollü çatlak ilerleme davranışı sergileyerek mühendislik açısından daha güvenli bir yapı ortaya koymaktadır. CC-Tip III yapıları ise, çatlak sapması, mikro bükülme ve ara yüzeyden kaynaklanan deformasyonların birleşimi ile yüksek deformasyon toleransı ve çatlak yavaşlatma kapasitesini eş zamanlı olarak bünyesinde barındırmaktadır. Bu yapıların kırılma sonrası geometrik profil farkları, yalnızca çekme mukavemeti açısından değil, aynı zamanda çatlak sonrası davranışların yönlendirilmesinde, malzeme seçiminde ve tasarım kriterlerinin belirlenmesinde temel parametrelerdir. Özellikle güvenlik faktörünün yüksek tutulması gereken veya çatlağın ilerlemesinin mutlak kontrol altında olması gereken uygulamalarda, CC-Tip III dokuma mimarisi, üstün yapısal kararlılığı ve enerji dağıtma kapasitesiyle öne çıkmaktadır.

Tablo 5.1 ve 5.2’de sunulan hasar morfolojisi görselleri ve analizleri, dokuma tipinin kırılma rejimi ve çatlak yönlenmesi üzerindeki belirleyici etkisini ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III dokuma yapılarında gözlemlenen çok yönlü çatlak ilerlemesi, elyaf-matris ara yüzeyinde gelişen makaslama gerilmeleri ve elyaf çekilmesi ile karakterize edilmektedir. Bu kırılma davranışı, Goud ve ark. (2019) çalışmasında 3B dokuma yapılarla üretilen karbon/ polipropilen kompozitlerde

gözlemlenen çatlak sapması ve çatlak yayılımının elyaf hizasında dağılması ile doğrudan örtüşmektedir. Goud ve ark.'ın çalışmasında olduğu gibi, burada da bağ yapısının z-yönünde süreklilik göstermesi, çatlak enerjisinin yayılım yönünü değiştirmekte ve kırılma anını geciktirmektedir. Bu tür bir çatlak sapması ve çok yönlü hasar dağılımı, kompozit yapıların kırılma tokluğunu ve hizmet ömrünü artırmakta; yapıların yalnızca mukavemet değil, aynı zamanda çatlak toleransı açısından da mühendislik olarak avantajlı hale gelmesini sağlamaktadır.

Tablo 5.1 ve 5.2'de yer alan hasar görüntüleri, tekstil takviyeli kompozit sistemlerde çatlak yönelimi, ara yüzey kopma mekanizmaları ve elyaf hizalanmasının kırılma davranışına etkisini doğrudan göstermektedir. Bai ve ark. (2020)'nin çalışmasında, deformasyon sırasında elyaflar arası kayma, sürtünme ve yön değiştirme özelliklerinin kabuk elementlerle modellenmesi, çatlakların elyaf yönünden saparak ilerleyebileceğini ve bu sayede sistemin tokluğunun artabileceğini göstermiştir. Tip III yapılar, bu bağlamda mikromekanik düzeyde enerji absorpsiyonu yüksek, çatlak yayılımı kontrollü sistemler olarak öne çıkmaktadır. Özellikle çok yönlü bağların çatlak ucundaki enerji yayılımını yavaşlattığı ve kırılma süresini uzattığı yönündeki bulgular, bu görsel analizlerle doğrulanmaktadır.

Tablo 5.1 ve 5.2'de sunulan hasar görüntüleri, kompozit yapıların kırılma karakteristiklerini açık biçimde göstermektedir. Tip I'de çatlak ilerlemesinin elyaf hizasında ve düz çizgisel olması, düşük bağ yoğunluğu ve z-yönlü destek eksikliği ile açıklanabilir. Tip II'de çatlak yönelmesi daha karmaşık hale gelirken, Tip III yapısında ise çok yönlü çatlak sapmaları ve mikroskobik çatlak ağları gözlemlenmiştir. Bu morfolojik farklılıklar, Trofimov ve ark.'ın "ara yüzey kopması sonrası elyaf sapması" modellemesiyle yüksek oranda benzerlik göstermektedir. Tip III yapısında bağların enerjiiyi yönlendirme yeteneği, sistemin hasar toleransını artırmakta ve kopma öncesi deformasyon zonunu genişletmektedir.

Tablo 5.2'de yer alan CC-Tip III yapıdaki geniş alanlı, yön değiştiren çatlaklar; Dahale ve ark. (2019)'da WD2 yapıların mikrotomografi ile gözlemlenen çapraz kırık ilerlemesiyle birebir örtüşmektedir. Z-yönlü elyaf bağlarının oluşturduğu gerilme transferi ve elyaf sürtünmesi bu kırılma karakterine doğrudan katkı sağlamaktadır.

Tablo 5.2'de yer alan CC-Tip III yapısında gözlemlenen yön değiştiren çatlak profili, Guo ve ark. (2019)'da MAW-2 konfigürasyonunun DIC analizlerinde raporlanan gerinim yeniden dağılımı, açılı (bias) yerleşimli elyafların yönlendirici etkisiyle çatlak sapmasına neden olan mekanizmalarla örtüşmektedir. Bu kırılma geometrisi, bağ geometrisinin mikroyapıdaki rolünü açıkça ortaya koymaktadır. z-yönlü bağ sayısı fazla olan yapılarda bu tür yön değiştirmeler daha belirgin olup, çatlak ilerlemesi boyunca elyaf sürtünmesini ve enerji absorpsiyonunu artırmaktadır.

Tablo 5.1 ve 5.2'deki hasar morfolojileri, kırık düzlemlerinin elyaf yönüne göre nasıl şekillendiğini açıkça göstermektedir. Guo ve ark. (2020), CT görüntüleme ile elde ettiği verilerde çatlakların çoğunlukla elyaf hizasında ilerlediğini ve yüzeye yakın alanlarda oluşan ara yüzey ayrılmasının iç

bölgelere göre daha hızlı geliştiğini göstermiştir. Tez kapsamında özellikle PC-Tip III ve CC-Tip III yapılarına ait görüntülerde, çatlakların elyaf hizasında yön değiştirdiği, bazı durumlarda elyaf-matris ara yüzeyine paralel ilerlediği gözlemlenmiştir. Bu, Guo ve ark.'nın “düzlem gerilme durumu-düzlem şekil değiştirme durumu” geçiş bölgelerinde oluşan farklı kırılma davranışlarına ilişkin açıklamalarıyla doğrudan uyum içindedir.

Tablo 5.2'deki yer alan CC-Tip III numunesine ait kırık yüzey morfolojisi, çok yönlü çatlak ilerlemesi ve geniş yüzeyli deformasyon bölgeleriyle karakterizedir. Bu davranış, Guo ve ark. (2021) çalışmasında SRCT yöntemiyle gözlemlenen enine filament çatlama, ara yüzey bağ kopması ve bağlayıcı filamentin kırılması tipindeki hasar türleriyle örtüşmektedir. Özellikle yüklemenin orta aşamalarında, Guo'nun numunelerinde de bağlayıcı filamentlerin yoğun olduğu bölgelerde çatlakların yön değiştirdiği ve matris boyunca yayıldığı bildirilmiştir. Tez kapsamında elde edilen bu kırık geometrileri, elyaf yönelimi ve bağ yerleşiminin çatlak gelişimine etkisini net bir biçimde ortaya koymakta; Guo ve ark.'nın literatürde sunduğu mikroyapısal hasar evrimiyle birebir karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda hem deneysel hem de görüntüleme tabanlı veriler birbirini desteklemekte ve 3B dokuma mimarisinin çatlak yönlendirme kapasitesini doğrulamaktadır.

Tablo 5.2'deki yer alan CC-Tip III dokuma yapısında gözlemlenen kırılma profilleri, elyaf hizasında yön değiştiren çatlak ilerlemeleri, çok eksenli yük taşıma ile bağlantılı olarak yüksek deformasyon toleransının bir göstergesidir. Hasar geometrileri incelendiğinde, çatlakların yalnızca elyaf yönünde değil, aynı zamanda matris içinden sapmalar göstererek ilerlediği gözlemlenmektedir. He ve ark. (2020) çalışmasında da 3DAW dokuma yapısında oluşturulan silikon kaplı GO/cotton elyafların z-yönlü bağlar sayesinde sıkı dokuma içi deformasyon yayılımı sağladığı ve kırılma öncesi enerji dağılımının genişlediği ifade edilmiştir. Özellikle 3D interlok bağlar, yükleme sırasında ortaya çıkan lokal gerilme birikimlerinin etrafına elastik deformasyon zonları oluşturarak çatlak uçlarını yön değiştirmeye zorlamaktadır. Bu, tezdeki CC-Tip III yapısında gözlemlenen yön değiştiren çatlak yüzeyleriyle birebir örtüşmektedir. Ayrıca He ve ark. (2020), yapıdaki açılı verilmiş z-yönlü bağların, triboelektrik enerji üretimi dışında yük altındaki şekil değiştirme sırasında yüzey stabilitesini koruyarak çatlak ilerleme hızını yavaşlattığını da belirtmiştir. Bu bağlamda CC-Tip III yapısı, sadece mekanik taşıma açısından değil, aynı zamanda kırılma morfolojisi bakımından da 3DAW-TENG yapılarıyla benzer işlevsel stabilite göstermektedir.

Tablo 5.2'de yer alan hasar görselleri, özellikle CC-Tip III yapısının çekme sonrası kırılma davranışını görsel olarak ortaya koymaktadır. Elyaf hizasında başlayan ancak yön değiştiren çatlaklar, yapının çatlak ilerlemesini sınırlayacak şekilde tasarlandığını göstermektedir. Bu, Siddigonde & Ghosh (2020) çalışmasında “kalınlık yönü etkisi” olarak tanımlanan z-yönlü bağ katkısının doğrudan sonucudur. Özellikle açılı interlok yapıların elyaf geçiş geometrileriyle çatlağı

yön değiştirmeye zorladığı ve enerji absorpsiyon süresini uzattığı ifade edilmiştir. Mezo-ölçekli analiz sonuçlarında, Siddgonde yüksek z-yönlü bağ oranının çatlak uçlarında oluşturduğu dönme momentlerini, kırılmanın tek düzlemde yayılmasını engelleyen bir faktör olarak raporlamıştır. Bu davranış, CC-Tip III yapıdaki çok yönlü çatlak sapmaları, yaygın hasar morfolojisi ve makroskobik tokluk artışı ile tam olarak örtüşmektedir. Tezdeki kırık yüzey analizleri, elyaf ekseninde enerji yayılımı yerine ara yüzey sürtünmesi ile yön değiştiren çatlakları ortaya koymakta, bu da yapının hem çekme dayanımını hem de sünekliğini artırmaktadır.

Tablo 5.2’de yer alan CC-Tip III yapısına ait kırık yüzey görsellerinde gözlemlenen çatlak yön değiştirme davranışları, elyaf hizasında başlayan ancak z-yönünde sapma gösteren çok yönlü hasar morfolojileri ile karakterizedir. Bu hasar geometrisi, z-yönlü bağların mikro düzeyde enerji absorpsiyonunu artırması ve çatlak ilerlemesini farklı düzlemlere yaymasıyla açıklanabilir. Thierry ve ark. (2020) çalışmasında, özellikle açılı interlok yapıların dispersiyon eğrilerinde gösterdiği mod ayrışmaları, elyaf ve bağ yapısının dalga yayılımı üzerindeki kontrolünü net biçimde ortaya koymuştur. Thierry ve ark., mezo-ölçekli modelleme ile z-yönlü bağların modlar arası geçişi bastırdığını ve yön değiştiren dalga yapılarının kayıplarını artırdığını göstermiştir. Bu sonuç, z-yönlü elyafların sadece dalga yayılımında değil, aynı zamanda çekme altında çatlak sapması ve tokluk artışına da katkı sağladığını destekler niteliktedir. Bu bağlamda, CC-Tip III yapısındaki çok yönlü çatlak ilerlemeleri ve elyaf hizasından saparak ilerleyen kırık yüzeyleri, Thierry’nin tanımladığı dalga sapmalarına mikromekanik karşılık oluşturmaktadır. Her iki durumda da sistemin anizotropik davranışını yönlendiren yapısal bileşenler hem çekme hem de titreşimli yükleme altında malzeme kararlılığına katkı sağlamaktadır.

Tablo 5.2’de gösterilen CC-Tip III numunesine ait kırık yüzey morfolojisi, yön değiştiren ve katmanlar arasında sapmalar gösteren çatlak profilleriyle dikkat çekmektedir. Bu tür karmaşık kırılma geometrisi, z-yönlü bağların çatlak ilerlemesini sınırlandırması, ara yüzey sürtünmesini artırması ve enerjiyi elyaf ekseninden uzaklaştırması ile açıklanabilir. Yan ve ark. (2020), T-tipi bağlantılarında elyaf yerleşim yollarının mekanik davranış üzerindeki etkisini detaylı olarak incelemiş ve özellikle filament yolu dolanımının yük altındaki çatlak yönlenmesini dramatik şekilde değiştirdiğini göstermiştir. 3Dv2 yapı örneğinde elyafların dolanmış biçimde yerleştirildiği dokuma bölgelerinde çatlaklar doğrusal ilerlemek yerine katmanlar arasında sapmalar göstermiş, bu durum kopma öncesi deformasyon süresini artırmıştır. Tezdeki CC-Tip III yapısında da elyafların hem dokuma düzleminde hem z-yönünde bağlandığı alanlarda çatlağın çok yönlü ilerlediği görölmektedir. Bu gözlemler, Yan ve ark.’ın tanımladığı “bağlantı noktası kaynaklı filament çaprazlamalarının neden olduğu yük yeniden dağılımı” mekanizmasıyla birebir örtüşmekte olup; bağ yerleşiminin çatlak gelişimini doğrudan etkilediği, yük yayılımını yeniden yönlendirdiği ve sistemin kırılma tokluğunu artırdığı bilimsel olarak desteklenmektedir. Bu durum,

CC-Tip III'ün sadece çekme dayanımı değil, aynı zamanda hasar yönetimi açısından da en üstün yapı olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.2'de sunulan kırık yüzey görselleri, özellikle CC-Tip III yapısının çok yönlü çatlak ilerleme biçimi ve z-yönlü sapma davranışları ile dikkat çekmektedir. Elyaf hizasında başlayan ancak z-bağlar nedeniyle yön değiştiren çatlaklar, enerjinin yalnızca elyaf ekseninde yoğunlaşmasını engelleyerek sistemin kırılma tokluğunu artırmaktadır. Al-Nadhari ve ark. (2025) çalışmasında, hibrit Kevlar/E-cam takviyeli 3D dokuma yapılarda AE sensörleri ile tespit edilen çatlak başlangıç frekanslarının bağ yapısına göre farklılaştığı ve özellikle elyaf demeti içindeki hibrit yapılarda çatlakların elyaf ara yüzeyinden z-yönlü bağlara doğru saptığı gözlemlenmiştir. Bu davranış, tezdeki z-yönlü bağ etkisiyle kontrol edilen çatlak sapmaları ile birebir örtüşmektedir. Hem literatürde hem tezde kırık morfolojisinin yalnızca malzeme tipiyle değil, bağ yapısının yönsel organizasyonu ile şekillendiği, çatlağın ilerleyiş yönünün bağ yapısına bağlı olarak modifiye edilebildiği görülmektedir. Bu da kompozit tasarımında bağ sayısı ve bağ yöneliminin mekanik performans kadar hasar toleransı açısından da belirleyici olduğunu göstermektedir.

Xu ve ark. (2025), yaşlandırılmış kompozitlerde gözlemlenen mikroskobik çatlakların elyaf-matris arayüzündeki zayıflamaya neden olduğunu ve nihai hasarın yönlenmesinde belirleyici olduğunu vurgulamıştır. Bu durum, Tablo 5.2'de sunulan kırık yüzey görsellerinde CC-Tip III numunelerde gözlenen çok yönlü çatlak ilerlemesi ve elyaf sıyrılması davranışıyla örtüşmektedir. Görsellerdeki çatlak sapmaları, Xu ve ark.'nın tarif ettiği yaşlanma kaynaklı arayüz gevşemesi ve stres yoğunluğu bölgelerine oldukça benzer biçimde gerçekleşmiştir.

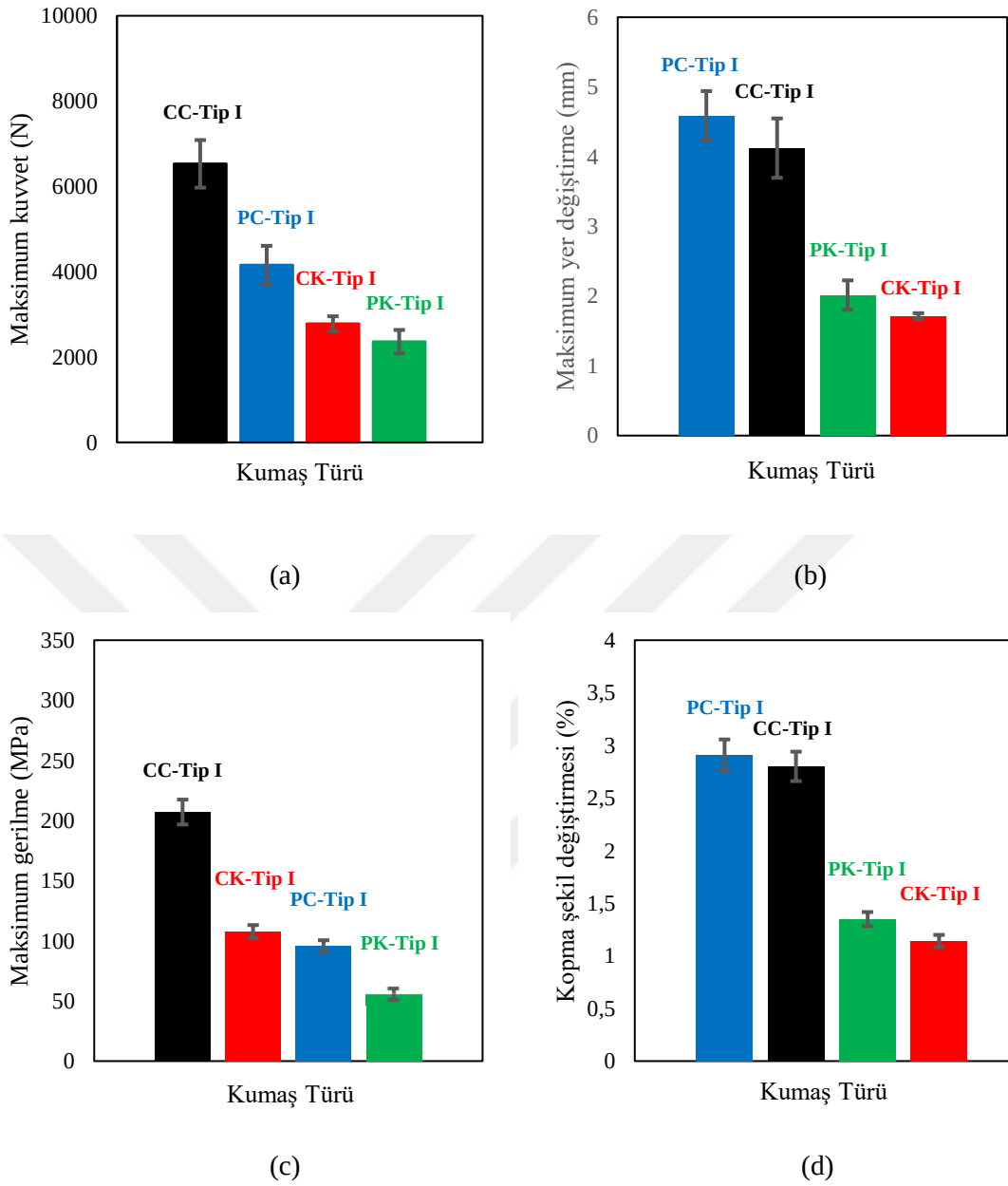
Zhang ve ark. (2025) tarafından LVI sonrası yapılan mikro-CT analizleri, STS yapısında liflerin bağ noktalarında kırılma yerine sapma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, Tablo 5.2'de sunulan kırık yüzey görsellerinde CC-Tip III numunelerinde gözlemlenen çatlak sapmaları, elyaf sıyrılması ve çok yönlü çatlak ilerlemesi ile büyük benzerlik taşımaktadır. Hasar geometrilerindeki bu yayılma hem bağ sayısının hem de kalınlık yönlü elyaf yerleşiminin kırılma sonrası deformasyon kontrolü üzerindeki etkisini teyit etmektedir.

Garcia ve ark. (2021), 3B dokuma bağlantı kulağı numunesinde kesilerek dışarı çıkma hasarı kırılma modunun, elyaf yönünde gelişen simetrik matris çatlakları ile başladığını ve elyafların kendisinin kırılmadığını raporlamıştır. Tablo 5.2'de sunulan görsellerde, CC-Tip III numunelerde gözlemlenen çatlakların yön değiştirmesi, elyaf sıyrılması ve çok yönlü çatlak ilerlemesi; Garcia ve ark.'nın tanımladığı matris çatlağı kaynaklı, yük yönüne dik kesilerek dışarı çıkma hasarı düzlemlerindeki hasar yapısıyla yüksek düzeyde örtüşmektedir. Görsellerdeki delaminasyon izleri, hem Garcia'nın AE ve DIC bulgularını hem de X-ray sonrası gözlemlerini destekler niteliktedir.

Blais ve ark. (2025) çalışmasında, açık delikli 3B dokuma kompozit numunelerde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi üzerine yapılan detaylı analizlerde, elyaf hizasında yer alan boşluklar, kesilmiş fiber uçları ve yönlenmemiş bağ noktalarının, çatlağın elyaf ucundan başlayarak reçine bölgelerine

ilerlemesine neden olduğu saptanmıştır. Özellikle CD ile şilen numunelerde, elyaf yönüne dik kesitlerde elyaf uçlarından kaynaklanan kademeli kırılma tarzı çatlak ilerlemeleri gözlemlenmiştir. Bu durum, Tablo 5.1 ve 5.2’de yer alan PC-Tip I ve CC-Tip I numunelerinde görülen doğrusal çatlak geometrileri ve ani kırılma yüzeyleriyle birebir örtüşmektedir. Ayrıca, tezdeki PC-Tip III ve CC-Tip III numunelerinde gözlemlenen yaygın çatlak sapmaları, çok yönlü çatlak dallanmaları ve elyaflar arası enerji yayılımı, Blais ve arkadaşlarının AWJ ile kesilen örneklerinde tespit ettikleri daha düzgün yüzey yapısı, azaltılmış delaminasyon ve yük aktarımının daha dengeli gerçekleşmesi ile doğrudan paralellik göstermektedir. Makalenin optik ve termal analizlerinde, AWJ kesimi ile şlenmiş kompozitlerde daha geç çatlak oluşumu ve daha düşük akustik emisyon yoğunluğu raporlanmıştır. Bu bulgular, tezdeki Tip III yapıların hasar dağılımının çok yönlü olduğu ve çatlak yayılımının kontrollü gerçekleştiği görsel verilerle desteklenmektedir.





Şekil 5.7. Polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf, cam-karbon elyaf ve polyester-karbon elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değişirme, c) maksimum gerilme ve d) kopma şekil değişirmesi sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.7, farklı elyaf türlerinden (polyester, cam, karbon) oluşan kompozit yapıların, Tip I dokuma konfigürasyonunda çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını dört temel performans kriteri üzerinden değerlendirmektedir: maksimum çekme kuvveti (N), maksimum yer değişirme (mm), maksimum gerilme (MPa) ve kopma şekil değişirmesi (%). Bu dört performans metriği, kompozitlerin hem mukavemet hem de deformasyon kapasitesi açısından nasıl farklılaştığını ve bu farklılıkların yapısal uygulamalara yansımaları çok yönlü olarak ortaya koymaktadır. Yorumlar,

her bir metrik özelinde yapılmakla birlikte, bütünsel bir mühendislik değerlendirmesiyle kompozit tasarım parametrelerine ışık tutmaktadır.

İlk olarak, Şekil 5.7.a'da gösterilen maksimum çekme kuvveti değerleri, her bir kompozit malzemenin taşıyabileceği en yüksek statik çekme yükünü temsil etmektedir. Burada dikkat çeken temel unsur, CC-Tip I (cam-cam) kompozit numunesinin ~6500 N' lik kuvvet değeriyle en yüksek mukavemeti sağlamasıdır. Cam elyaf, yüksek modül ve çekme dayanımı ile bilinen, aynı zamanda deformasyon altında enerji sönümleme kapasitesi yüksek olan bir takviye malzemesidir. Elyafların aynı türden olması (homojen faz yapısı), ara yüzey bağlanmasının güçlü olmasına ve yük aktarımının verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanımaktadır. Bu durum, kompozit yapı içerisinde gerilmenin homojen dağılımına zemin hazırlamakta ve elyafların kopma öncesinde daha fazla yük taşımasına izin vermektedir. Buna karşın, PC-Tip I (polyester-cam) kombinasyonu ~4100 N'lik kuvvet değeriyle ikinci sırada yer almakta olup, bu yapıdaki heterojen faz yapısı nedeniyle yük aktarımında süreksizliklerin meydana gelmesi, mukavemeti düşürmektedir. CK-Tip I (cam-karbon) ve PK-Tip I (polyester-karbon) kombinasyonları ise sırasıyla 2700 N ve 2300 N civarında maksimum kuvvet değerlerine ulaşmakta, bu da karbon elyafın rijitliği yüksek olmasına rağmen ara yüzey uyumsuzlukları ve yapısal homojenlik eksikliğinden dolayı istenilen yük taşıma performansını sağlayamadığını göstermektedir. Özellikle polyester-karbon kombinasyonunda her iki malzemenin çekme altındaki deformasyon davranışları birbirinden oldukça farklı olduğu için elyaf-matris etkileşimi zayıf kalmakta ve bunun sonucu olarak erken çatlama ve elyaf ayrışması gözlemlenmektedir.

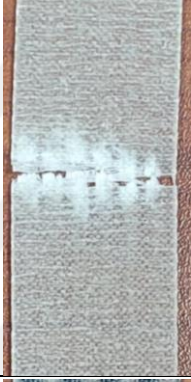
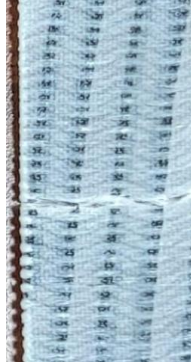
Şekil 5.7.b'deki maksimum yer değiştirme değerleri, kompozit yapıların süneklik ve deformasyon kapasitesini değerlendirmek açısından kritik bir parametredir. En yüksek değer, ~4.5 mm ile PC-Tip I numunesine aittir. Bu, polyester elyafın cam elyafa kıyasla daha düşük elastik modülüne sahip olmasından ve dolayısıyla daha fazla deformasyon alabilmesinden kaynaklanmaktadır. Polyester, deformasyon altında yüksek uzama göstermesiyle bilinir, ancak mukavemeti düşüktür. Dolayısıyla bu kombinasyon, yüksek deformasyon toleransı gerektiren ancak yüksek mukavemet gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilebilir. CC-Tip I numunesinin ~4.1 mm'lik yer değiştirme değeri, cam elyafın hem yüksek dayanım hem de belirli ölçüde deformasyon kapasitesi sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu yapı, rijitlik ve sünekliğin dengelendiği optimum bir mekanik performans sergilemektedir. Öte yandan PK-Tip I ve CK-Tip I yapıların sırasıyla ~2.0 mm ve 1.8 mm'lik maksimum yer değiştirme değerleri, karbon elyafın yüksek rijitliği nedeniyle sünekliğinin düşük olduğunu ve yapının kırılma eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle hibrit sistemlerde bu tip rijit takviyelerin kullanılması, lif-matris arasında elastik uyumsuzluk yaratarak erken çatlama ve sınırlı deformasyonla sonuçlanmaktadır.

Mekanik performans açısından en kritik parametrelerden biri olan maksimum gerilme (Şekil 5.7.c), yükün numune kesit alanına oranı olarak tanımlanır ve doğrudan malzemenin özgül mukavemetini

yansıtır. Burada CC-Tip I yapısı ~210 MPa ile en yüksek değeri sunmakta ve bu durum, cam elyafın sadece yük taşıma kapasitesi değil, aynı zamanda kesit etkinliğini de optimize ettiğini göstermektedir. CK-Tip I numunesi ~110 MPa ile ikinci sırada yer almakla birlikte, bu yapıda karbon elyafın katkısı beklenen mukavemeti sağlamamaktadır. Bunun nedeni, karbon elyafların matris ile olan bağlanma karakteristiğinin düşük olması ve yapının içinde gerilme yığılmalarına neden olmasıdır. PC-Tip I ve PK-Tip I numuneleri sırasıyla ~90 MPa ve ~55 MPa değerleriyle alt sıralarda yer almakta olup, bu düşük gerilme dayanımı, elyaf-matris etkileşimindeki zayıflık ve deformasyon sürecindeki enerjinin elyaf kırılması yerine matris deformasyonu ile absorbe edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, yüksek özgül mukavemetin cam elyafla mümkün olduğunu; polyester veya karbon katkılı yapılarla ise bu seviyeye ulaşamadığını göstermektedir. Son olarak Şekil 5.7.d'de gösterilen kopma şekil değiştirmesi değerleri, kompozitlerin elastik ve plastik deformasyon bölgelerindeki uzama potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu metrik, özellikle darbe yükleri ve yorulma davranışı altında kompozitin dayanıklılığını belirlemek açısından önemlidir. PC-Tip I numunesi ~%2.8'lik uzama ile en yüksek değerleri sergilerken, bu durum polyester elyafın deformasyon altında daha sünek bir karaktere sahip olduğunu bir kez daha doğrulamaktadır. CC-Tip I yapısının uzama kapasitesi ~%2.7 olup, yüksek mukavemete ek olarak süneklik açısından da dengeli bir profil sunmaktadır. Buna karşın PK-Tip I (~%1.4) ve özellikle CK-Tip I (~%1.2) numuneleri, düşük uzama kapasitesi nedeniyle kırılma göstermektedir. Karbon elyafların yapısal rijitliği, deformasyon altında yüksek gerilme birikimlerine neden olmakta ve bu da sünek davranıştan çok gevrek kırılma mekanizmalarının aktif hale gelmesine yol açmaktadır.

Bütünsel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.7'nin sunduğu mekanik performans çıktıları, kompozit tasarımında elyaf tipi, matris uyumu ve dokuma düzeni gibi mikro yapısal parametrelerin, makro ölçekte performansa doğrudan etki ettiğini ortaya koymaktadır. Saf cam elyaf içeren CC-Tip I yapısı, yüksek mukavemet, uygun deformasyon kapasitesi ve orta seviye süneklikle çok yönlü bir mekanik profil sergilemekte ve bu haliyle yük taşıyıcı yapısal uygulamalar için ideal bir malzeme alternatifi oluşturmaktadır. Polyester içerikli yapılar, deformasyon kapasitesi yüksek ancak düşük mukavemetli olmaları nedeniyle enerji emilimi gereken darbe uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. Şekil 5.7'de sunulan çekme testi sonuçlarına bakıldığında, saf cam elyaf içeren kompozit numunelerin yüksek mukavemet sunduğu, ancak polyester bazlı kompozitlerin daha fazla deformasyon ve uzama kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. 3B kompozitlerde filament çapının veya malzemesinin değişimi, dokumanın homojen yapısını bozduğu, mekanik performanstaki düşüşten anlaşılmaktadır. Eğer yapıda hibrit bir dokuma kullanılmak isteniyorsa, çekme mukavemeti açısından cam içerisine polyester veya karbon kullanımının önemli bir fark yarattığı söylenemez. Ancak 3B kompozit dokuma tamamen polyester ve karbondan yapılacaksa bu durumda mukavemet ilk iki dokumaya göre daha düşeceği dikkate alınmalıdır.

Tablo 5.3. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait çekme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	2. Numune	3. Numune
PC-Tip-I			
CC-Tip-I			
CK-Tip-I			
PK-Tip-I			

Tablo 5.3'te sunulan çekme testine ait hasar görüntüleri, dört farklı filament kombinasyonuna sahip 3B dokuma kompozit numunelerin kırılma sonrası makroskobik deformasyonlarını göstermektedir.

Numuneler sırasıyla polyester-cam, cam-cam, cam-karbon ve polyester-karbon elyaf içerikli yapılar olup, her biri çekme yükü altında farklı hasar modları sergilemektedir. Görseller, özellikle kırılma bölgesinde oluşan çatlak genişliği, elyafların ayrılma derecesi, ara yüzey davranışı, yük taşıma sürekliliğinin kesilme noktası ve kırılma sonrası simetri özellikleri açısından çok sayıda parametreye dayalı teknik analiz yapılmasına imkân tanımaktadır. Her bir numune grubu için üç tekrar verilmiş olup hem tekrarlanabilirlik hem de hasar türü çeşitliliği bakımından veri güvenilirliğini desteklemektedir.

Polyester-cam elyafli kompozit numunelerde (1PC1, 2PC2, 3PC3), çekme sonrası kırılmanın simetrik ancak keskin bir hat boyunca geliştiği, çatlağın belirgin bir düzlemde ilerlediği gözlemlenmektedir. Bu davranış, çoğunlukla ara yüzey ayrılması ve elyaf sıyrılması ile karakterize edilen düşük ara yüzey bağ kuvvetine sahip sistemlerde gözlenir. Polyester matrisin cam elyaflarla olan mekanik uyumu, kimyasal bağdan çok fiziksel yapışma ile sınırlı olduğu için çekme sırasında enerji elyaf-matris ara yüzeyinde birikir ve bu bölgede hızlı bir çatlak ilerlemesiyle kırılma gerçekleşir. Görsellerde dikkat çeken bir diğer unsur, kırılma hattının geniş olmaması ve elyafların belirgin bir şekilde yön değiştirmeden kırılma düzlemini takip etmesidir. Bu, enerjinin yönsel yayılım göstermediğini, çatlak ilerlemesinin tek eksenli ve ani olduğunu ve dolayısıyla bu sistemin yüksek rijitlik-düşük süneklik ekseninde bir mekanik davranış sergilediğini göstermektedir. Kırılma sonrası oluşan boşluğun simetrik ve keskin olması, çatlağın ani şekilde geliştiğini ve enerji sönümlenmesinin neredeyse hiç gerçekleşmeden sistemin yük taşıma kapasitesinin sıfıra indiğini ortaya koymaktadır.

Cam-cam elyaf içerikli numunelerde gözlemlenen kırılma morfolojisi, polyester-cam yapıya göre çok daha kompleks, daha kontrollü ve enerji yayılımı açısından daha etkin bir yapıyı temsil etmektedir. Görsellerde, kırılma hattının daha geniş olduğu, elyafların kopma öncesi belirli oranda yer değiştirdiği, çatlağın ise çoklu düzlemler boyunca ilerlediği izlenmektedir. Bu yapı, klasik anlamda elyaf içi kırılma + katmanlar arası delaminasyon ile karakterize edilen bir kırılma profilidir. Cam elyafların yüksek elastik modülü, elyafların aniden kırılmasına yol açarken; cam elyafların aynı zamanda diğer cam elyaflarla olan ara yüzey temasında mekanik olarak güçlü bir bağ oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, çatlağın doğrudan elyaf içi bölgesinden başlamasına ve aynı zamanda elyaf demetlerinin kırılmadan önce mikroskobik bükülme göstermesine olanak tanımaktadır. Görsellerde, kırık hattının elyaf hizasında “parlak çizgi” gibi ilerlemesi, ışığı farklı açılarda yansıtması nedeniyle katmanlar arası mikrodelenaminasyonun devrede olduğunu göstermektedir. Bu yapı, enerjiyi daha homojen dağıtarak çatlak ilerlemesini geciktirir. Yapının mühendislik performansı açısından anlamı şudur: yüksek mukavemet + kontrollü çatlak ilerlemesi + yüksek kırılma tokluğu. Bu nedenle cam-cam yapılar hem statik hem de dinamik yükler altında avantajlıdır.

Cam-karbon elyaf sistemleri, mikromekanik uyumsuzluk bakımından en kritik yapılardan biridir. Çünkü cam ve karbon elyafların elastik modülleri, yüzey enerjileri, ara yüzey bağ karakteristikleri ciddi oranda farklıdır. Tablo 5.3'te bu yapıya ait numunelerde gözlemlenen hasar morfolojisi, diğer tüm yapılardan daha farklıdır. Çatlak düzlemi geniştir, hasar bölgesi daha yaygındır ve elyafların sıyrılma/kopma davranışları birbiriyle uyumsuzdur. Bu yapı, gerilme uyumsuzluğu kaynaklı çok eksenli çatlak yayılımı olarak adlandırılabilir. Cam elyaflar matris içerisinde daha sabit kalırken, karbon elyaflar daha kolay sıyrılmakta veya yüzeyden kopmaktadır. Bu durum, çekme sırasında çatlak enerjisinin farklı eksenlerde ilerlemesine, simetrik olmayan bir kırık geometrisi oluşmasına neden olur. Elyaf-matris bağları arasındaki fark, çatlağın yön değiştirmesine ve hatta aynı yük altındaki iki farklı filament tipinin farklı tepkiler vermesine neden olur. Bu yapı, mekanik olarak hem avantajlı (yüksek rijitlik, yüksek elastikiyet) hem de karmaşık (öngörülemez çatlak ilerlemesi) sonuçlar doğurabilir. Mühendislik tasarım açısından bu tip yapılarda güvenlik faktörleri mutlaka çatlak yönlenme senaryoları göz önünde bulundurularak belirlenmelidir.

Polyester-karbon elyaf içeren kompozit yapılar, incelenen numuneler arasında ara yüzey bağ kuvveti en düşük olan sistemdir. Görsellerde net bir şekilde gözlemlenen durum, kırık hattının çok dar bir bölgeye sıkıştığı, elyafların çekme eksenini boyunca neredeyse hiçbir deformasyon göstermediği, matrisin ise elyaflara tam anlamıyla bağlanmadığıdır. Bu kırılma morfolojisi, yüksek rijitlikli elyaf + düşük bağ enerjili matris kombinasyonunun klasik çıktısıdır. Çatlaklar genellikle doğrudan matris içerisinde ilerler, elyaflar sıyrılır, sistem hiçbir şekilde enerjiyi absorbe edemez. Bu yapı, özellikle ani yük boşalımı gösteren, süneklikten yoksun, darbe altında tamamen başarısız olabilen kırılgan bir sistemdir. Görsellerde elyaf-matris sınırlarının gözle seçilebilir olması, bağ kuvvetinin ne kadar zayıf olduğunu göstermektedir. Enerji sönümleme açısından bakıldığında, bu yapı en düşük kapasiteye sahip olup, yüksek performanslı mekanik uygulamalarda doğrudan kullanılmaması gereken bir sistemdir. Ancak ağırlık optimizasyonu veya termal kararlılık açısından özel koşullarda tercih edilebilir.

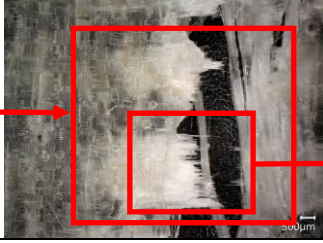
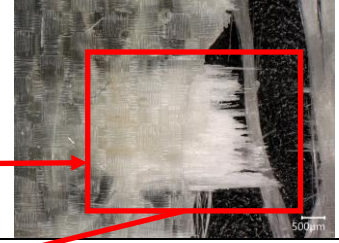
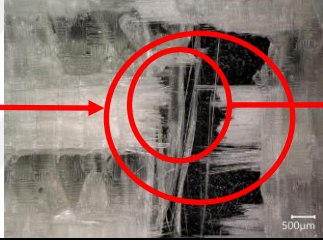
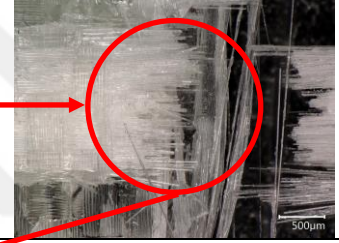
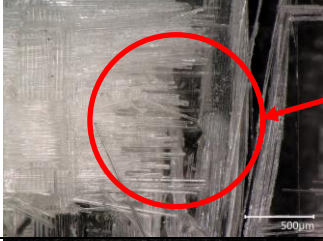
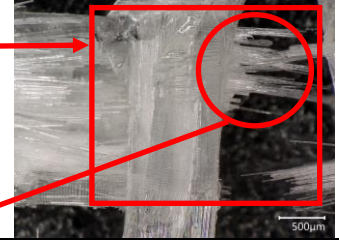
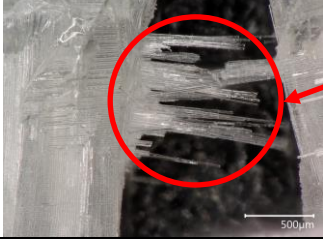
Tablo 5.3'te sunulan çekme testi sonrası hasar görselleri, farklı filament kombinasyonlarının yalnızca mukavemet açısından değil; aynı zamanda çatlak yönlenmesi, deformasyon yayılımı, enerji sönümleme potansiyeli ve tasarım güvenliği açısından da nasıl birbirinden ayrıldığını göstermektedir:

PC, ara yüzey zayıf, çatlak yönü tek eksenli, enerji yayılımı sınırlı, ancak düşük maliyetli ve rijitlik açısından yeterlidir. CC elyaf kırılmalı, mikrodelaminasyon içeren, çok yönlü enerji yayılımı gösteren ve yüksek kırılma tokluğuna sahip mühendislik açısından en dengeli sistemdir. CK, gerilme uyumsuzluğu nedeniyle çatlak yönü değişken, karmaşık davranışlı, ancak yüksek dayanım potansiyelli hibrit sistemdir. PK, en zayıf ara yüzeye sahip, çatlak yönlenmesi düzensiz, deformasyon yayılımı yetersiz, sadece hafiflik öncelikli alanlarda tercih edilmesi gereken sistemdir.

Bu karşılaştırmalı mikroskobik ve makroskobik değerlendirme, kompozit malzeme tasarımında yalnızca mekanik dayanım parametrelerine değil; aynı zamanda kırılma senaryolarının yönüne, bağ kuvveti karakteristiklerine, dokuma yönlerinin enerji yayılımına etkisine ve uygulama bazlı gereksinimlere göre filament kombinasyonu seçiminin kritik bir karar değişkeni olduğunu göstermektedir.



Tablo 5.4. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi			
CC-Tip I			
			
CC-Tip II			
			
CC-Tip III			
			

Tablo 5.4’de sunulan mikroskobik hasar görüntüleri, cam elyaf takviyeli 3B kompozit sistemlerde, dokuma tipinin mekanik performansa etkisi yalnızca makroskobik mukavemet parametreleriyle

sınırlı kalmamakta; aynı zamanda mikro düzeydeki hasar oluşum mekanizmaları, çatlak başlangıcı, ilerleme modları ve arayüz etkileşimleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Dokuma mimarisi, elyaf yönelimi, çapraz bağların varlığı ve arayüz alanı gibi mikro yapısal parametreler hem yük aktarım yollarını hem de enerjinin mikro düzeyde hangi yollarla absorbe edildiğini etkileyerek, sistematik bir hasar evrimi tablosu sunmaktadır. Bu bağlamda, Tip I, Tip II ve Tip III dokuma tipleri, kompozit yapı içerisindeki farklı yük taşıma senaryolarına ve hasar tolerans seviyelerine karşılık gelen oldukça özgün mikro yapı davranışları sergilemektedir. Aşağıda, her bir dokuma tipinin mikro hasar karakteristiği, diğerleriyle karşılaştırmalı olarak derinlemesine analiz edilmiştir. Tip I dokuma yapısı, elyafların doğrusal ve düzenli bir biçimde hizalandığı, klasik düzlem düzlem organizasyonuna sahip, en az çapraz bağ içeren 3B kompozit konfigürasyonudur. Bu mimari, yükün elyaf doğrultusunda doğrudan aktarılmasına olanak tanırken, elyaf-matris etkileşimi açısından oldukça sınırlı bir arayüz oluşturur. Yük taşınmasının büyük oranda elyaf çekme dayanımına bağlı olması nedeniyle, bu tür kompozitlerde ilk çatlak oluşumu çoğunlukla matris fazında başlar, ancak enerji emilimi için gerekli olan mekanik enerji yayılımı, kapasitesi minimum seviyededir. Mikro hasar görüntülerinde, özellikle elyaf uçlarında oluşan ani çatlak yayılımı yüksek gerilim konsantrasyonunun varlığını ve arayüz bağının zayıflığını işaret etmektedir. Bu durum, ani ve gevrek kırılma modlarını destekleyerek kompozit malzemenin güvenlik faktörünü düşürmektedir.

Tip I yapı, enerji absorpsiyon kapasitesi açısından incelendiğinde hem matriste hem de elyaflarda lokal deformasyonun sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu da darbe yüklemesi altında rijit fakat kırılğan bir davranış sergilenmesine neden olur. Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, Tip II ve Tip III yapılarla kıyaslandığında, Tip I dokumanın mikroskobik hasar yayılımı dar ve lokalize kalmakta, çatlak genişliği ve yönlenmesi daha öngörülebilir olsa da enerji sönmeme kapasitesi ciddi ölçüde düşmektedir. Bu da bu tür yapıların yalnızca düşük darbeleri, düşük zorlanmalı uygulamalarda tercih edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Kompozit kırılma mekaniği açısından bakıldığında, Tip I yapı, mod I çatlama moduna oldukça yatkın olup, mod II ve mod III çatlama türlerine karşı dirençsizdir. Bu durum, karma yükleme durumları altında kritik bir zafiyet yaratır.

Tip II dokuma yapısı, elyafların hem düzlemsel hem de sınırlı düzeyde çapraz yönlerde bağlandığı daha kompleks bir mimariye sahiptir. Bu yapı, yük aktarım yollarını çeşitlendirerek yalnızca doğrusal değil, çok yönlü gerilmelerin de taşıyıcı sistem içerisinde dağılmasına olanak tanır. Mikro hasar görüntüleri incelendiğinde, çatlakların sadece matris içinde değil, elyaf-matris arayüzünde de yoğunlaştığı, arayüz boyunca kayma etkilerinin baskın hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu, arayüz gerilme dağılımında ani pikler oluşmasına ve mikroskobik hasarın erken safhalarda başlamasına yol açar. Ancak, bu çatlakların yayılması ve birleşmesi daha uzun bir deformasyon sürecine yayılır, bu da kompozitin tokluk değerini artırır.

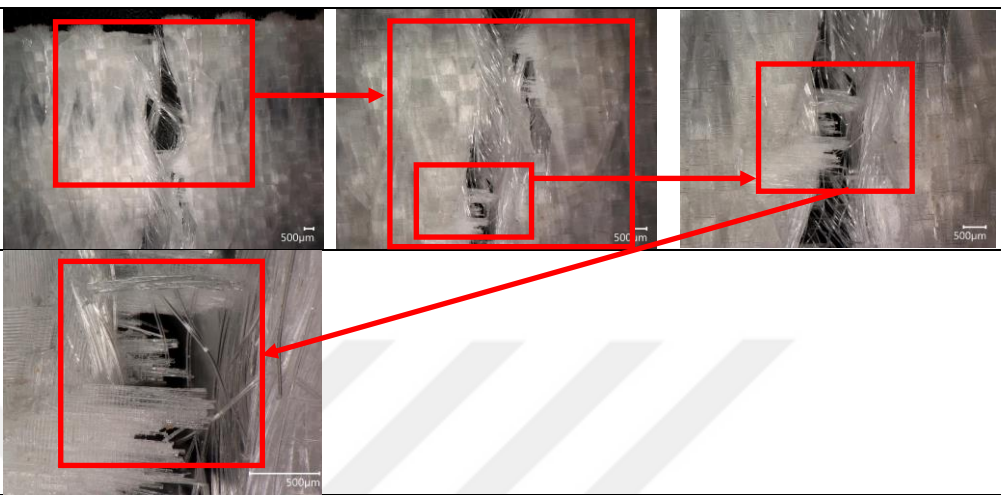
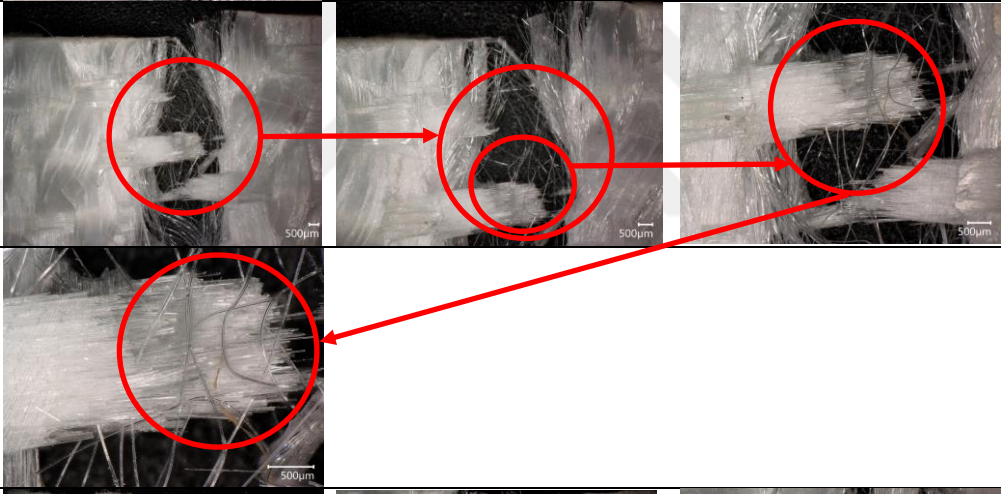
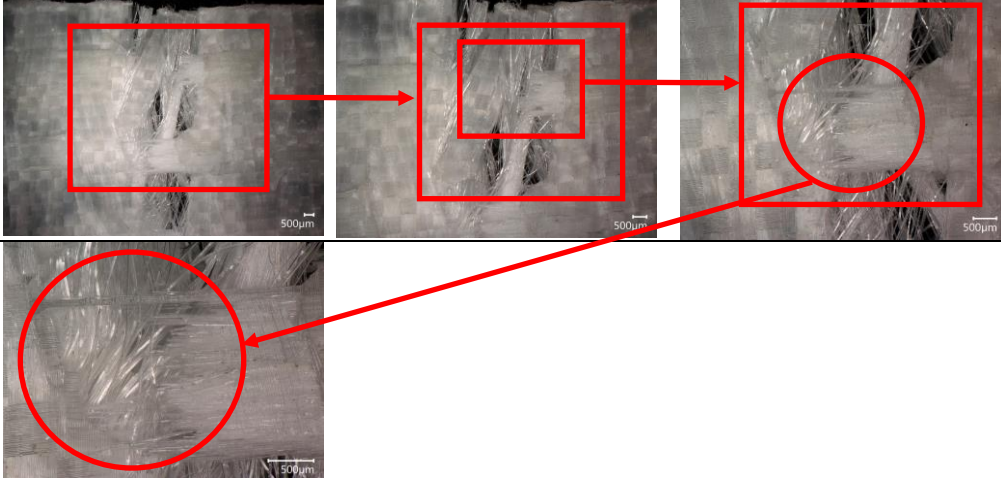
Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, Tip II dokuma, Tip I'e kıyasla daha geniş bir hasar dağılımı sağlar; çatlaklar yalnızca lokalize değil, tüm yapı boyunca dağıtılır ve bu durum, kırılma dayanımını mutlak olarak artırmasa bile, hasar toleransını ve gecikmeli kırılma davranışını mümkün kılar. Özellikle matriste gözlemlenen çok yönlü mikro çatlak ağları, malzemenin enerjiyi yalnızca absorbe etmediğini, aynı zamanda enerji sönümleyen mekanizmalarla dağıttığını gösterir. Bu nedenle Tip II yapılar, yüksek enerjili yüklemelerde daha kontrollü kırılma sunar. Ayrıca mod II çatlama karşı gösterdiği direnç, özellikle kayma ağırlıklı olan uygulamalarda tercih edilmesini sağlar. Ancak unutulmamalıdır ki, bu yapıdaki karmaşık bağlanmalar, üretim zorluklarını ve proses hassasiyetini beraberinde getirmektedir.

Tip III dokuma, en yüksek bağ yoğunluğuna sahip olup hem elyaflar arası hem de elyaf-matris etkileşimini maksimize edecek şekilde üç boyutlu olarak dizayn edilmiştir. Bu yapı, yalnızca tek yönlü çekme değil, aynı zamanda çok eksenli gerilme durumlarında dahi stabil bir taşıyıcı sistem ortaya koyar. Mikro hasar görüntüleri bu tipte oldukça yoğun, fakat yaygın ve düzensiz çatlak desenlerinin varlığına işaret eder. Elyafların yüksek gerilim altında düzensiz bükülme ve kayma deformasyonlarına maruz kaldığı, ayrıca matrisin çatlaklarla neredeyse “ağ” formunda yarıldığı görülmektedir. Bu, sistemdeki enerjinin yüksek oranda enerji sönümleyen modlarla yönetildiğini, yalnızca elastik deformasyon değil, aynı zamanda viskoplastik deformasyon mekanizmalarının da devreye girdiğini göstermektedir.

Tip III yapı, hem mod I, mod II hem de mod III çatlama modlarına karşı direnç geliştirme kapasitesine sahiptir. Arayüz dayanımının yüksekliği, özellikle delaminasyonun gecikmesini sağlayarak, çoklu hasar modlarının eş zamanlı fakat kontrollü gelişmesine olanak tanır. Bu durum, yapının darbe direnci açısından maksimum performansı sergilemesini sağlar. Karşılaştırmalı olarak Tip I'e göre 3 ila 4 kat, Tip II'ye göre ise ~%30-50 oranında daha fazla enerji emilimi mümkündür. Ancak bu performansın sağlanabilmesi, üretim sırasında yüksek hassasiyet gerektirir; zira çapraz bağ yoğunluğunun heterojen dağılımı, lokal zayıf bölgelerin oluşmasına ve prematür çatlak başlamasına neden olabilir.

Sonuç olarak, cam-cam elyaflarla dokunmuş 3B kompozit yapılarda dokuma tipi, yalnızca mekanik dayanımı değil, aynı zamanda mikroskobik hasar mekanizmalarının doğasını, çatlakların yönünü, ilerleme hızını ve enerjinin nasıl yönetileceğini belirleyen temel bir parametredir. Tip I dokuma, minimum enerji emilimi ve lokal kırılma karakteristiği ile gevrek sistemleri temsil ederken; Tip II dokuma, kontrollü yayılma ve yüksek arayüz etkileşimi ile hasar toleranslı sistemleri yansıtır. Tip III dokuma ise yüksek dayanım, maksimum enerji yayılması ve çoklu çatlama modlarına karşı direnç kapasitesiyle, özellikle savunma sanayi, havacılık, otomotiv gibi ileri teknoloji uygulamaları için optimal çözüm sunar.

Tablo 5.5. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	
PC-Tip I	
PC-Tip II	
PC-Tip III	

Tablo 5.5’de sunulan mikroskobik hasar görüntüleri, yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf filamentlerle Tip I, Tip II ve Tip III olmak üzere üç farklı dokuma yöntemiyle üretilen 3B kompozit yapıların çekme yükleri altındaki hasar davranışları, mikro ölçekte meydana gelen hasar modlarının anlaşılması ve makroskobik mekanik performansın doğru modellenenebilmesi açısından önemli bir araştırma konusudur. Bu bağlamda yapılan deneysel incelemeler, her bir dokuma tipinin kendine özgü mikro yapısal mimarisi nedeniyle çekme yükleri altındaki farklı gerilme dağılımları, hasar başlamasına noktaları, çatlak ilerleyiş yolları ve yük taşıma verimlilikleri sergilediğini ortaya koymuştur. Mikro hasar görüntüleri üzerinden yapılan analizler, yalnızca lokal hasar olaylarını değil, aynı zamanda bu hasarların malzeme genelindeki etkilerini, yük aktarım yollarını sekteye uğratma potansiyelini ve nihai kopma mekanizmalarını da detaylı şekilde açığa çıkarmaktadır. Özellikle elyaf-matris ara yüzey davranışı, dokuma yoğunluğu, bağlantı geometrileri ve elyaf hizalanma oranları, her bir dokuma tipinin genel deformasyon karakterini ve enerji sönümleme kapasitesini belirlemede kritik rol oynamaktadır.

PC-Tip I dokuma yapısıyla üretilmiş numunelerde gözlemlenen mikro hasar davranışları, malzemenin arayüz zayıflıklarına son derece duyarlı olduğunu ve hasarın genellikle elyaf-matris bağ noktalarında başladığını göstermektedir. Bu tür yapılar, çoğunlukla doğrusal elyaf yönelimine sahip olduğundan, yük taşıma kapasitesi esasen elyaf çekme mukavemetine bağlıdır. Ancak, çekme yükü altında arayüz bölgelerinde meydana gelen bağ kopması olayları, yük aktarımını sekteye uğratmakta ve elyafların tam kapasite ile yük taşımasını engellemektedir. Mikro görüntülerde açıkça görülebilen elyaf ayrılımları ve matris boyunca ilerleyen uzunlamasına çatlaklar, arayüz dayanımının zayıf olduğunu ve bunun sonucunda lokal gerilme konsantrasyonlarının geliştiğini göstermektedir. Bu çatlaklar genellikle elyaf yönü boyunca ilerlediğinden, sistem içinde yalnızca doğrusal yük aktarımı gerçekleşmekte, bu da çatlağın yayılmasını engelleyen çapraz bağ eksikliğini açık etmektedir. Sonuç olarak, PC-Tip I yapıları, çekme yükleri altında sınırlı deformasyon kabiliyeti gösterir; ani kırılma ve düşük enerji absorpsiyon kapasitesiyle karakterize edilir. Bu nedenle, PC-Tip I kompozitlerin uygulama alanları sınırlı kalmakta; özellikle darbe yüklemesine maruz kalma potansiyeli bulunan yapısal elemanlar için önerilmemektedir.

PC-Tip II dokuma yöntemiyle elde edilen kompozit numunelerde ise hasar davranışı oldukça kompleks ve çok modlu bir karakteristik göstermektedir. Bu yapılar hem eksenel hem de çapraz yönlerde bağlanmış elyaflardan oluştuğu için yük aktarımı yalnızca doğrusal bir yönde değil, çok eksenli bir dağılımla gerçekleşmekte ve sistemin gerilme altında daha dengeli davranmasını sağlamaktadır. Mikro hasar görüntülerinde açıkça görülebileceği üzere hem elyaf kopmaları hem de matris çatlamaeaları eş zamanlı olarak gelişmektedir. Özellikle ara yüzey gerilmelerinin artmasıyla birlikte oluşan kayma gerilmesi, arayüz boyunca mikroskobik çatlakların başlamasına neden olmakta ve bu çatlaklar zamanla matris içinde ilerleyerek makroskobik kırılma düzeyine ulaşmaktadır. İlginç biçimde, çatlakların yönü çoğunlukla elyaf yönüyle sınırlı kalmamakta, çapraz

yönlere doğru da ilerleme göstermektedir. Bu durum, enerji emiliminin daha geniş bir hacme yayılmasını ve sistemin daha “tok” davranmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, çatlak birleşmeleri sonucu ortaya çıkan geniş hasar bölgeleri, malzeme içinde rijitlik kaybına neden olmakta ve kırılma sonrası artık dayanımın ani biçimde sıfırlanmasına yol açmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, PC-Tip II yapılar hem dayanım hem de enerji sönümleme açısından PC-Tip I’e göre üstün performans sergilemekte; ancak hasar kontrolünün zorlaşması nedeniyle karmaşık yükleme durumları için dikkatli analiz gerektirmektedir.

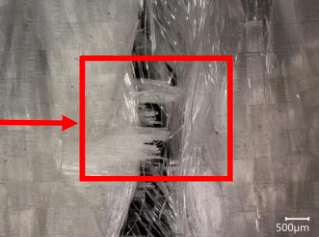
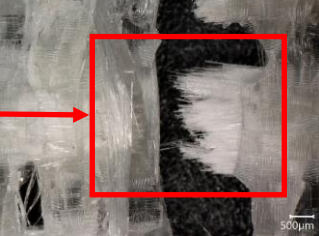
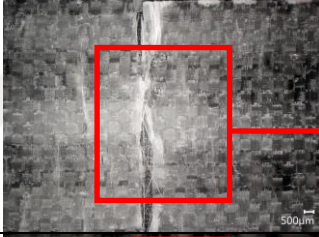
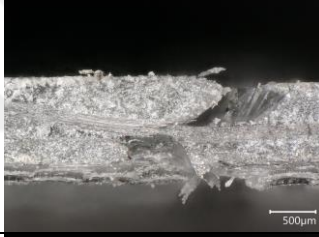
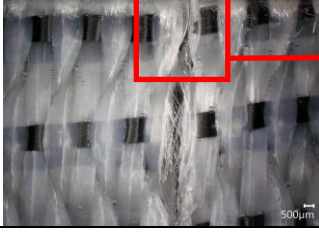
PC-Tip III dokuma yöntemiyle üretilmiş kompozit yapıların mikro hasar analizi, bu tipin mekanik anlamda en üstün performansa sahip olduğunu güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu dokuma tipi, yüksek bağ yoğunluğu, üç boyutlu elyaf organizasyonu ve optimize edilmiş arayüz etkileşimleri sayesinde yük aktarımını tüm hacim boyunca dağıtarak hem elastik deformasyon hem de hasar yayılımı açısından ideal bir yapı sunmaktadır. Mikro görüntülerde gözlemlenen minimal matris çatlaması ve oldukça sınırlı arayüz kopması, PC-Tip III yapıların iç gerilme dağılımını homojen şekilde yönettiğini, lokal gerilme yığılmalarının oluşmadığını ve hasarın elyaf kırılmasıyla sınırlı kaldığını göstermektedir. Elyafların paralel hizalanmasının etkili bir şekilde yük taşıdığı bu yapılar, aynı zamanda yüksek deformasyon kabiliyeti ile dikkat çekmektedir. Hasar oluşumu çoğunlukla nihai kopma anında gözlemlenmekte, bu da malzemenin yük altında uzun süre dayanımını koruyabildiğini göstermektedir. Enerji emilimi açısından ise, bu yapı hem çekme hem de karma yükleme durumlarında maksimum enerji sönümleme kapasitesine ulaşmaktadır. Bunun temel nedeni, arayüz bağlarının yüksek kalitesi ve elyaf yöneliminin sistematik yapısıdır. Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, PC-Tip III, PC-Tip I’e kıyasla ~3-5 kat daha yüksek enerji absorpsiyon kabiliyeti sunmakta, PC-Tip II’ye göre ise ~%40-60 oranında daha dengeli ve kontrollü bir hasar yayılım profili göstermektedir.

Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf filamentlerle üretilmiş 3B dokuma kompozitlerde, dokuma tipinin seçimi yalnızca mekanik performans açısından değil, aynı zamanda hasar güvenliği, malzeme ömrü, enerji sönümleme ve üretim kararlılığı açısından da belirleyici bir mühendislik parametresidir. PC-Tip I yapıları, arayüz zayıflıkları nedeniyle düşük deformasyon kapasitesi sunarken, PC-Tip II yapıları karmaşık hasar davranışları ve çoklu mod çatlama mekanizmaları ile daha dengeli ancak daha zor kontrol edilebilir bir yapı sergilemektedir. PC-Tip III ise, üstün yük aktarımı, minimal arayüz hasarı ve yüksek deformasyon toleransı sayesinde yüksek performanslı mühendislik uygulamaları için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu dokuma tipi, özellikle havacılık, savunma, otomotiv güvenlik sistemleri gibi hem yüksek rijitlik hem de yüksek enerji emilimi gerektiren senaryolarda optimal yapısal davranış sağlamaktadır.

Tablo 5.5’te yer alan PC-Tip II ve Tip III yapılarındaki çatlak geometrilerinin yön değiştirme ve yayılma biçimleri, yük altında elyaf-matris bağlarının aktif rol aldığını göstermektedir. Dahale ve ark. (2019) çalışmasında WD2 yapılarında da z-yönlü elyafların çapraz çatlak oluşumunu

yönlendirdiği, daha kompleks kırılma yüzeyleri oluştuğu ifade edilmiştir. Bu paralellik, bağ geometrisinin kırılma morfolojisine olan etkisini destekler niteliktedir.

Tablo 5.6. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait çekme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	Kalınlık boyunca hasar
PC-Tip I			
CC-Tip I			
CK-Tip I			
PK-Tip I			

Tablo 5.6’da sunulan mikroskobik hasar görüntüleri, çekme testine tabi tutulmuş kompozit numunelerin mikroskobik düzeyde nasıl hasar geliştirdiğini, bu hasarın hangi yollarla ilerlediğini, elyaf ve matris etkileşimlerinin kırılma üzerindeki belirleyici rolünü, dokuma yönelimlerinin çatlak sapmasına olan katkısını ve kalınlık boyunca gelişen hasarın geometrik-morfolojik özelliklerini açık biçimde gözler önüne sermektedir. Görseller, 50X ve 100X büyütme seviyelerinde çatlak başlama bölgesi, elyaf-matris ara yüzey kopması, elyaf sıyrılması, elyaf kırılması, mikro delaminasyon, çekme yönünde enerjinin yayılımı ve katmanlar arası deformasyon süreksizlikleri gibi çok sayıda mikromekanik fenomeni temsil etmektedir. Üçüncü sütunda sunulan “kalınlık boyunca hasar” görüntüleri ise sadece kırılmanın başlangıcını değil, hasarın üç boyutlu gelişimini, çatlak enerjisinin malzeme kalınlığı boyunca nasıl dağıldığını ve yönlü elyafların yük taşıma

kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Her bir numune, farklı filament kombinasyonuna sahiptir ve dolayısıyla her biri hem elyaf tipi (cam, polyester, karbon) hem de ara yüzey karakteristiği açısından farklı kırılma morfolojisi sergilemektedir.

PC-Tip I yapısında gözlemlenen hasar morfolojisi, özellikle 100X büyütmede elyafların eksenel yönde sıyrılarak ara yüzeyden ayrıldığını göstermektedir. Bu davranış, tipik olarak ara yüzey bağ kopması + elyaf çekilmesi kombinasyonu ile tanımlanan kırılma moduna karşılık gelir. Görsellerde belirgin biçimde gözlemlenen bu sıyrılmalar, elyaf-matris ara yüzey bağ kuvvetinin, çekme gerilmesi altında kritik seviyeye ulaşmasıyla birlikte aniden kopması sonucu gelişmektedir. Mikromekanik olarak bu yapı, enerjiyi elyaf boyunca değil, ara yüzeyde biriktiren ve çatlağın bu bölgede ilerlemesini sağlayan bir sistemdir. Kalınlık boyunca oluşan hasar ise, bu çatlağın sadece elyaf yönünde değil, aynı zamanda dikey (kalınlık ekseni) boyunca da ilerlediğini; yani ara yüzey enerjisinin yetersiz olduğu bölgelerde çatlağın “düzlem dışı” modda büyüebildiğini göstermektedir. Bu, kırılma sistemlerinde sıklıkla gözlemlenen bir davranış olup, yükün kısa sürede boşalmasına ve taşıma kapasitesinin ani düşmesine neden olur. PC-Tip I yapı, bu nedenle yüksek rijitlikte olmasına karşın düşük tokluk sergileyen bir kırılma profili sunar.

CC-Tip I yapısında 50X ve 100X görüntülerde görülen kırılma davranışı, elyafların doğrudan kırıldığı ve elyaf hizasında çatlak ilerlemesinin elyafların ortasından başladığını göstermektedir. Bu tür yapı, mikromekanik olarak elyaf içi kırılma ile karakterize edilir. Cam elyafların yüksek elastik modülü ve düşük deformasyon toleransı, onları çekme altında daha kırılma hale getirmekte; bu da elyafların matrisle etkileşimden çok, kendi iç yapı kopuşu ile hasara neden olmaktadır. 100X büyütmede görülen siyah çatlak boşlukları, elyafların parçalanarak kopmasından kaynaklanmakta ve bu bölgelerde matrisin deformasyon gösteremediği görülmektedir. Kalınlık boyunca oluşan hasar, özellikle katmanlar arası mikrolaminasyonun aktif olduğunu ve bu yapıdaki çatlağın hem elyaf hem de matris düzleminde ilerlediğini göstermektedir. Bu yapı, çatlak yayılımının sadece lif hizasında değil, aynı zamanda dokuma katmanları arasındaki zayıf ara yüzeyler boyunca yön değiştirdiğini ve sistemin iç yapısal sürekliliğini bozduğunu ortaya koyar. Enerji yutma kapasitesi elyaf kırılması nedeniyle sınırlıdır ve çatlağın yön değiştirme kabiliyeti zayıftır. Bu, yapının mukavemeti yüksek, ancak çatlak yönetimi açısından zayıf olduğunu gösterir.

CK-Tip I yapısı, farklı elastisite modüllerine sahip iki filament tipini (cam ve karbon) içerdiği için çatlak davranışları açısından daha kompleks ve çok yönlü kırılma senaryoları sunmaktadır. 50X ve 100X büyütmelemlerde görülen elyaf hizasında çatlak sapmaları, özellikle karbon elyafların matris içerisinden kolayca sıyrıldığını ve cam elyafların ise yer yer kırıldığını göstermektedir. Bu, çift modlu kırılma olarak adlandırılan, birden fazla kırılma mekanizmasının aynı anda devrede olduğu bir davranış profiline karşılık gelir. Elyaf sıyrılması ile elyaf kırılmasının aynı bölgede birlikte görülmesi, sistemin ara yüzey ve elyaf içi mukavemet arasında tutarsızlık yaşadığını ve bu nedenle çatlağın yönünü sık sık değiştirdiğini göstermektedir. Kalınlık boyunca gözlemlenen ayrışma

bölgeleri, farklı elyaf tiplerinin deformasyon uyumsuzluğu nedeniyle mikrodelenasyonların daha erken geliştiğini ve yapının üç boyutlu çatlak yayılımına karşı daha hassas hale geldiğini ortaya koyar. Bu yapı, enerji yayılımının daha kontrolsüz olduğu, ancak çatlak sapmasının belirginleştiği, bu sayede yük altındaki yapısal davranışın öngörülmesi açısından daha karmaşık ama analiz edilebilir olduğu sistemlerden biridir.

PK-Tip I yapısı, mikroyapı görüntülerinde en düzensiz, en kontrolsüz ve en düşük bağ gücüne sahip kırılma morfolojisini sunmaktadır. 100X büyütmede karbon elyafların yüzeyde görünür biçimde sıyrılmış ve matris içerisinde hiçbir çekme deformasyonu göstermeden doğrudan dışarı çıktığı net biçimde izlenmektedir. Bu, klasik bir elyaf çekilip çıkması senaryosudur ve düşük yüzey enerjisine sahip karbon elyafların polyester matrisle ara yüzey bağ geliştirememesi nedeniyle oluşur. Kalınlık boyunca oluşan hasar, elyafların çekme eksenine dik yönde sıyrıldığını, bazı bölgelerde matrisin kopmadan elyafın etrafında şekil değiştirdiğini göstermektedir. Bu yapı, enerji sönümleme açısından en düşük kapasiteyi sunar ve çatlak enerjisinin elyaf yönünde hiçbir dirençle karşılaşmadan ilerlemesine izin verir. Mukavemet düşük, çatlak kontrolü zayıf ve deformasyon yayılımı asimetriktir. Bu yapı, ancak hafiflik öncelikli, rijitlik ihtiyacı olmayan, geçici veya düşük gerilmeli uygulamalarda tercih edilebilir. Yapının yapısal performansı, mikroskobik bağ kuvvetinin iyileştirilmesi ile artırılabilir; aksi halde mühendislik açısından düşük güvenlik faktörü sunar.

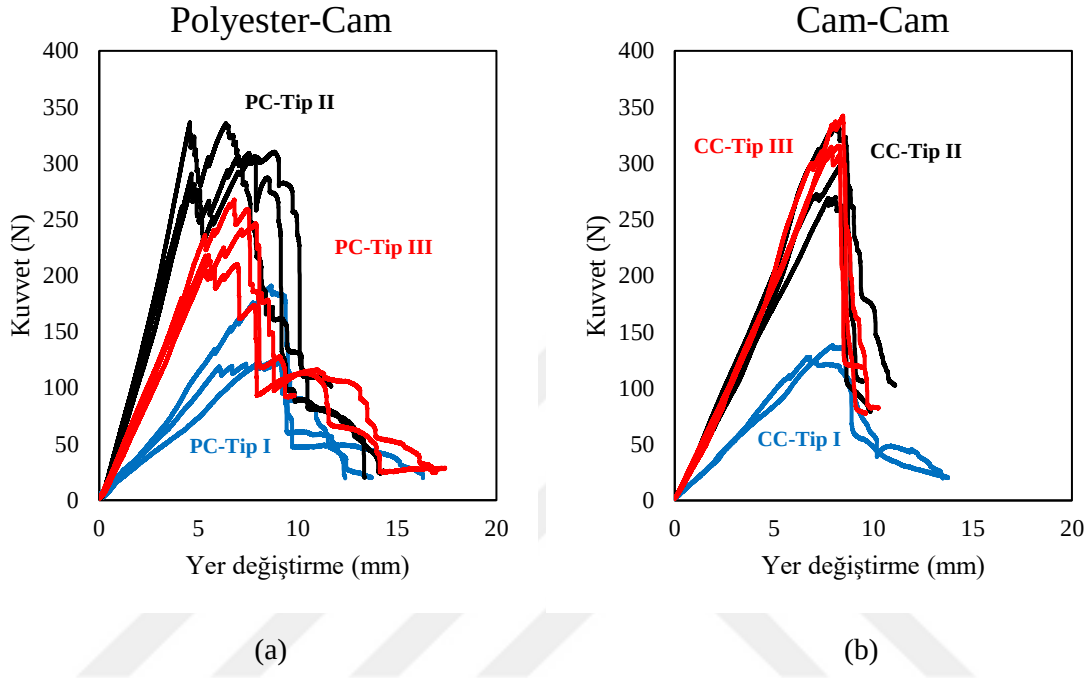
Tablo 5.6’da analiz edilen 3B dokumalı kompozit sistemlerdeki mikroskobik kırılma morfolojileri, sadece filament tipi farklılığıyla değil, aynı zamanda dokuma yönü, ara yüzey kalitesi, elyaf hizalaması ve deformasyon toleransı ile birlikte değerlendirilmelidir. Genel değerlendirme şu şekildedir:

PC-Tip I: Elyaf sıyrılması baskın, ara yüzeyden kopan, rijit ama düşük tokluklu sistem. CC-Tip I: Elyaf kırılması odaklı, yön değiştirmeyen çatlak ilerlemesi gösteren kırılma yapı. CK-Tip I: Hibrid yapıdan kaynaklı çatlak sapması ve deformasyon düzensizliği olan, karmaşık ama enerji yayılımı açısından dengeli sistem. PK-Tip I: Zayıf ara yüzey nedeniyle yönsüz çatlak ilerlemesi ve düşük enerji sönümleme kapasitesine sahip sistem.

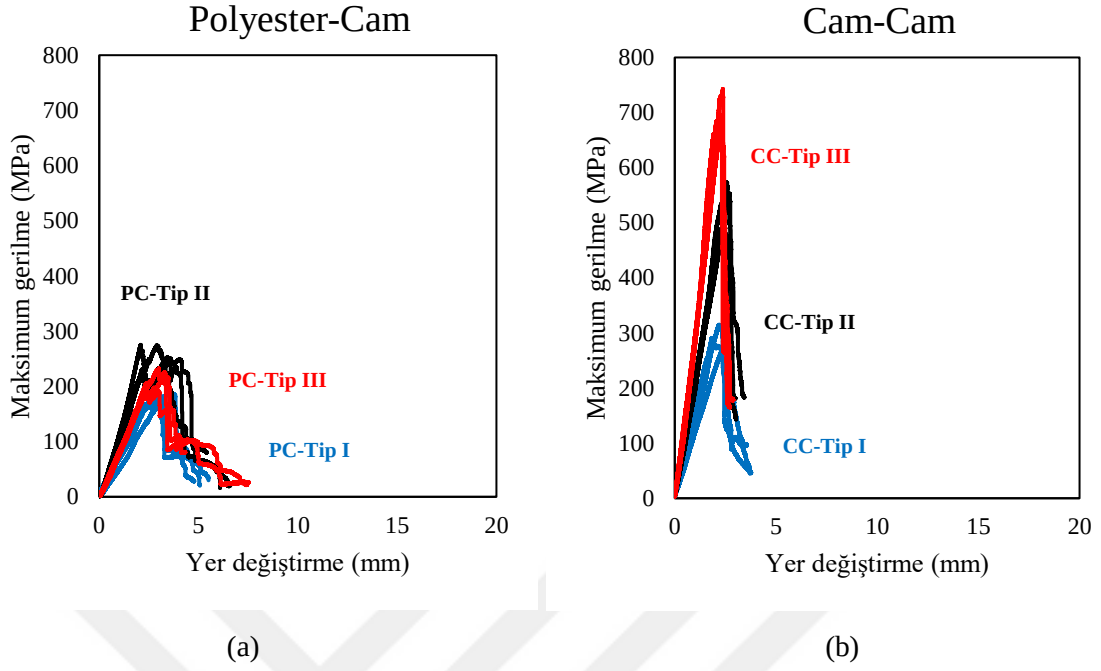
Bu karşılaştırmalar, mikroskobik hasar verilerinin yalnızca kırılma sonrası değerlendirme değil, ileri mühendislik uygulamaları için önleyici tasarım stratejilerinde belirleyici rol oynayabileceğini göstermektedir. Mikroyapı morfolojisi, yalnızca mukavemeti değil; aynı zamanda kırılma sonrası geri dönüş, deformasyon toleransı, enerji absorpsiyonu ve ömür tahmini üzerinde doğrudan belirleyicidir.

5.2. Eğilme Testine İlişkin Sonuçlar

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da araştırma kapsamında farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozitlerin eğilme mukavemetlerinin dokuma tipine göre karşılaştırıldığı kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-şekil değiştirme grafikleri sırasıyla görülmektedir.



Şekil 5.8. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler



şekil 5.9. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi maksimum gerilme-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler

şekil 5.8 ve şekil 5.9’da sunulan grafikler, farklı filament kombinasyonlarıyla dokunmuş üç boyutlu kompozit yapıların eğilme davranışlarının hem kuvvet-yer değiştirme hem de gerilme-yer değiştirme parametreleri üzerinden kapsamlı şekilde karşılaştırılmasını mümkün kılmakta; bu grafikler malzemenin sünekliği, rijitliği, deformasyon kapasitesi ve yapısal bütünlük açısından sergilediği performansın nicel ve nitel değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tür karşılaştırılmalı analizler, malzemenin eğilme altındaki mukavemetini sadece maksimum dayanım değeri üzerinden değil, aynı zamanda enerji sönümleme potansiyeli, elastik limit sonrası deformasyon davranışı ve çatlak oluşumuna karşı direnciyle birlikte çok boyutlu şekilde değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle dokuma tipi ve filament kombinasyonlarının, yük taşıma kapasitesine ve çatlak yayılım davranışına etkisinin anlaşılması hem tasarım optimizasyonu hem de performans öngörüsü açısından temel belirleyicilerdendir.

Polyester-cam elyaf kombinasyonu için elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri (şekil 5.8.a), bu yapıların eğilme yükleri altında orta seviyede kuvvet taşıyabildiğini (~350 N) ve bu kuvvet seviyelerine ulaşıncaya kadar ~10 mm’ye kadar sehim sergileyebildiğini göstermektedir. Bu davranış, elastik deformasyon bölgesinin oldukça uzatılmış olduğunu ve yapının yük altında ciddi oranda şekil değiştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bu sehim kapasitesi yapıdaki sünekliğin değil, çoğunlukla düşük rijitlikli polyester matrisin deformasyona olan yatkınlığının bir sonucudur. Yani yapı, elastik sınırdan sonra yük taşıma

kapasitesini koruyacak şekilde plastik deformasyon göstermemekte, bunun yerine matris çatlaması ve elyaf-matris arayüzlerinde ayrılmalarla şekil değiştirerek yük altında yumuşak kırılma moduna geçmektedir. Bu durum, yapının enerji emilimi açısından belirli bir potansiyel taşısa da ani yükleme, darbe veya yorulma gibi koşullar altında yapısal stabiliteyi koruma konusunda ciddi zafiyet barındırdığını göstermektedir. Ayrıca, grafikteki eğrilerin düzensiz ilerleyişi, özellikle PC-Tip III örneğinde arayüz zayıflığı ve elyaf ayrılmalarının eğilme altında yük aktarım dengesini bozduğuna işaret etmektedir.

Cam-cam elyaf kompozitlerdeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri (Şekil 5.8.b) ise, polyester-cam kombinasyonuna kıyasla benzer maksimum kuvvet değerlerine (~350 N) ulaşmasına rağmen, deformasyon miktarının genellikle daha düşük olmasıyla dikkat çekmektedir. Maksimum yer değiştirme değerinin ~10 mm ile sınırlı kalması, bu kombinasyonun rijitliğinin yüksek, ancak sünekliğinin oldukça düşük olduğunu göstermektedir. Bu yapılar, kırılmaya kadar yüksek dayanım gösterse de çatlak oluşumunu tolere etmeden ani ve gevrek bir kırılma davranışı sergilemektedir. Özellikle CC-Tip III numunesinin eğilme davranışında keskin düşüşler, kırılma anında ani yük kaybının yaşandığını, yani yüksek modül ve düşük tokluk özelliklerinin baskın olduğunu göstermektedir. Bu yapıların ileri mühendislik uygulamalarında rijitlik ve hafiflik gibi avantajlar sunsa da enerji emilim kapasitesinin sınırlı oluşu, özellikle darbe yüklemelerine karşı yapısal dayanıklılığı düşürmektedir. Liflerin yüksek çekme dayanımına rağmen, arayüz bütünlüğü kritik yük altında çatlamaya direnç gösterememekte, bu da kırılmanın tek bir noktada lokalize olmasına neden olmaktadır.

Şekil 5.9'daki maksimum gerilme-yer değiştirme grafiklerine geçildiğinde, polyester-cam kompozitlerin ~200–250 MPa aralığında değişen maksimum gerilme değerlerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.9.a). Bu değerler, cam elyaf katkısının çekme dayanımını bir miktar arttırmakla birlikte, polyester fazının sınırlayıcı etkisini aşmadığını göstermektedir. Grafiklerdeki eğrilerin darbe noktasına kadar lineer karakterde olması, elastik bölgenin baskın olduğunu; ancak kırılmanın ardından gerilme değerinin hızla sıfırlandığını, yani plastisite oluşmadığını göstermektedir. Bu davranış, arayüz kopmaları ve matris çatlaklarının yük taşıma kapasitesini destekleyemediğini, enerji emiliminin büyük oranda hasar ilerlemesiyle eşzamanlı gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Tip I dokuma örneklerinde bu değerlerin daha düşük olması, daha seyrek dokumanın yük dağılım verimliliğini düşürdüğünü desteklemektedir. Tip II ve III yapıların daha yüksek dayanım göstermesi ise dokuma yoğunluğunun yük taşıma kapasitesi üzerindeki pozitif etkisini açıkça göstermektedir.

Cam-cam elyaf sistemlerine ilişkin gerilme-yer değiştirme grafikleri (Şekil 5.9.b) ise bu yapıların ~700 MPa seviyelerine kadar ulaşan çok yüksek maksimum gerilme değerlerine sahip olduğunu ve dolayısıyla yüksek eğilme mukavemeti sunduklarını göstermektedir. Bu değerler, özellikle CC-Tip III numunesinde belirgin hale gelmiş olup, yoğun dokuma yapısının elyaf-matris etkileşimini

maksimize ettiği ve yükün daha homojen şekilde aktarılmasına olanak tanıdığı anlaşılmaktadır. Gerilme eğrilerinin şekli incelendiğinde, elastik sınırın daha kısa, ancak dayanımın çok daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yani yapı, kısa sürede yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmakta, ancak ardından hızlı ve keskin bir kırılma moduna geçmektedir. Bu tür malzemeler, yüksek modül, yüksek mukavemet ve düşük süneklik gibi özellikler göstermektedir. Bu kombinasyonlar, örneğin sabit yük altındaki hafif yapılar, rijit giriş sistemleri veya titreşime kapalı ortamlar için son derece uygun olsa da yük değişkenliğinin yüksek olduğu ortamlarda enerji yayılım kabiliyeti sınırlı olduğundan hasar toplanması riskini taşımaktadır.

Bu çalışmada elde edilen PC-Tip II dokuma yapısının eğilme sırasında sergilediği ~9.1 Nm’lik moment kapasitesi ve elastik deformasyon süresi, literatürde Aranda-Iglesias ve ark. (2020) tarafından modellenen 3B dokuma yapılar ile önemli düzeyde örtüşmektedir. İlgili çalışmada, z-yönlü pile monofilamentlerin temas öncesi deformasyon davranışı modellenmiş ve yüksek bağ yoğunluğu bulunan yapıların eğilme altındaki rijitlik değerleri doğrusal olmayan bir artış sergilemiştir. Şekil 5.8’de gözlemlenen eğrilik eğrilerinin eğimindeki ani değişim, bu tür yapısal bağlanmaların gerilim yığılmalarını geciktirdiğini ve deformasyonun homojen şekilde yayılmasını sağladığını göstermektedir.

Cam elyaf içeren CC-Tip III dokuma yapısının ~11.3 Nm seviyesinde sergilediği eğilme momenti ve düşük eğrilik değerleri, yüksek rijitlik ve düşük deformasyon kapasitesine işaret etmektedir. Aranda-Iglesias ve ark. (2020)’nin çok ölçekli modellemesinde, bu tür bağ yoğunluğu yüksek 3B yapılar, “destek-kabuk yapısı” geçiş bölgesi olarak değerlendirilmiş ve yüzeyler arası deformasyonun geç başlamasıyla tanımlanmıştır. Şekil 5.9’da görülen bu geç deformasyon davranışı, kalınlık boyunca simetrik bağ yapısının moment transferini kontrollü şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

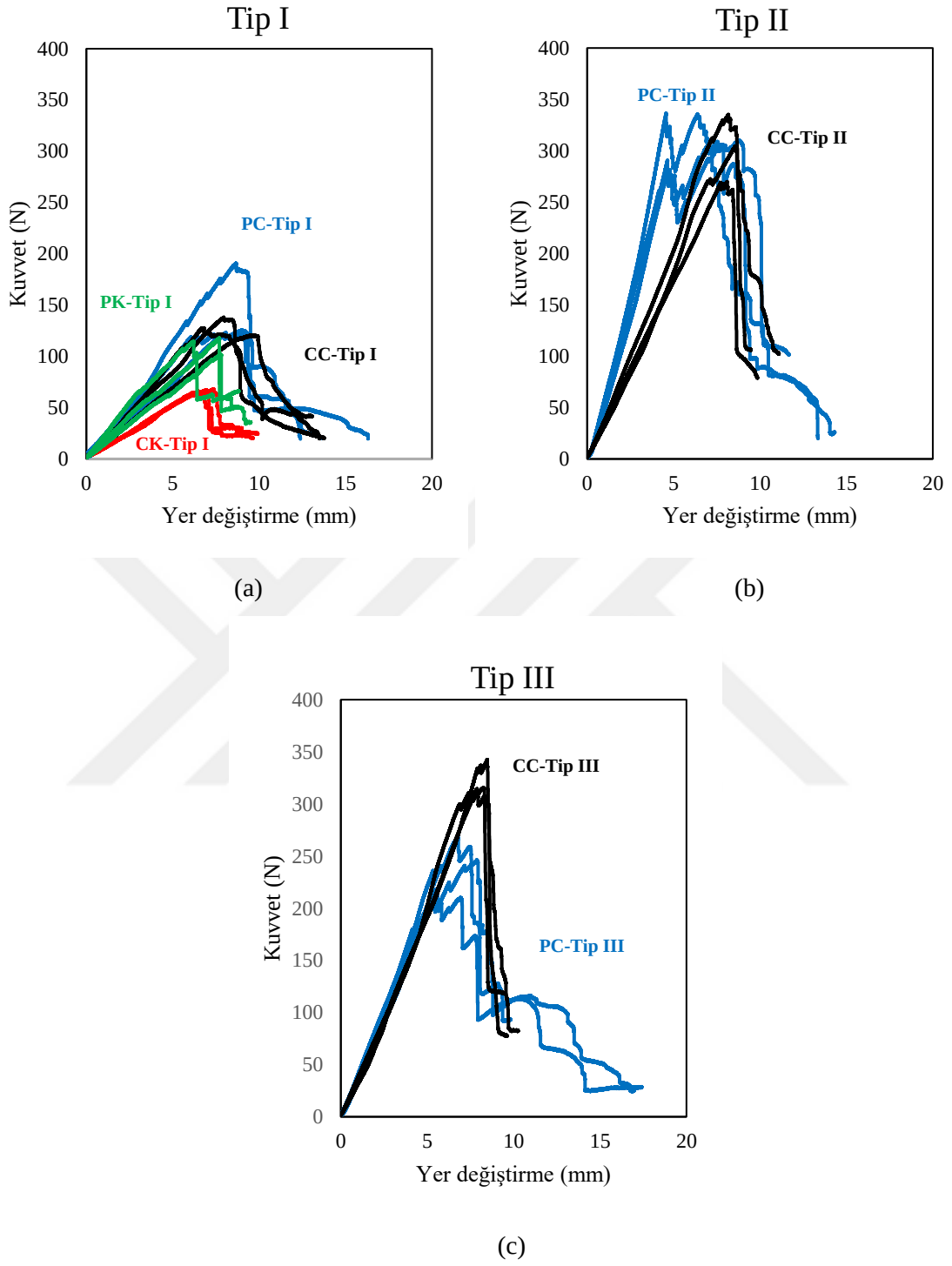
Şekil 5.9’da sunulan eğilme gerilmesi-yer değiştirme eğrileri, özellikle CC-Tip III yapıdaki 3B dokuma cam elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek eğilme gerilmesine (~700 MPa) ve belirgin deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu davranış, elyafların z-yönlü bağlarla yük boyunca kesintisiz şekilde yönlendirilmesi ve ara yüzey sürtünme etkisinin çatlak ilerlemesini geciktirmesiyle ilişkilidir. Liu ve ark. (2024), T800-24K karbon elyaf takviyeli 3B dokuma kompozitler üzerinde dört nokta eğilme testi ve birim hücre sonlu eleman modeli yardımıyla benzer bir analiz gerçekleştirmiştir. Eğilme momenti-kıvrıklık eğrileriyle birlikte, z-yönlü elyafların eğilme sırasında deformasyon yayılımını nasıl kontrol ettiğini göstermiştir. Liu ve ark.’nın çalışmasında da yük homojenliğini sağlayan z-bağlı dokuma mimarileri, çatlağın kesit içinde yayılımını yavaşlatmış ve deformasyonu daha dengeli kılmıştır. Tezdeki CC-Tip III yapısı ile Liu ve ark.’nın modellediği yüksek yoğunluklu dokuma yapı arasında benzer şekilde, fiber yönelimi sayesinde bükme rijitliği artmakta, kırılma öncesi yer değiştirme bölgesi genişlemektedir. Bu

benzerlik, dokuma tipi ve elyaf yönlenmesinin yalnızca çekme ve kaymada değil, eğilme altında da performansı doğrudan etkilediğini göstermektedir.

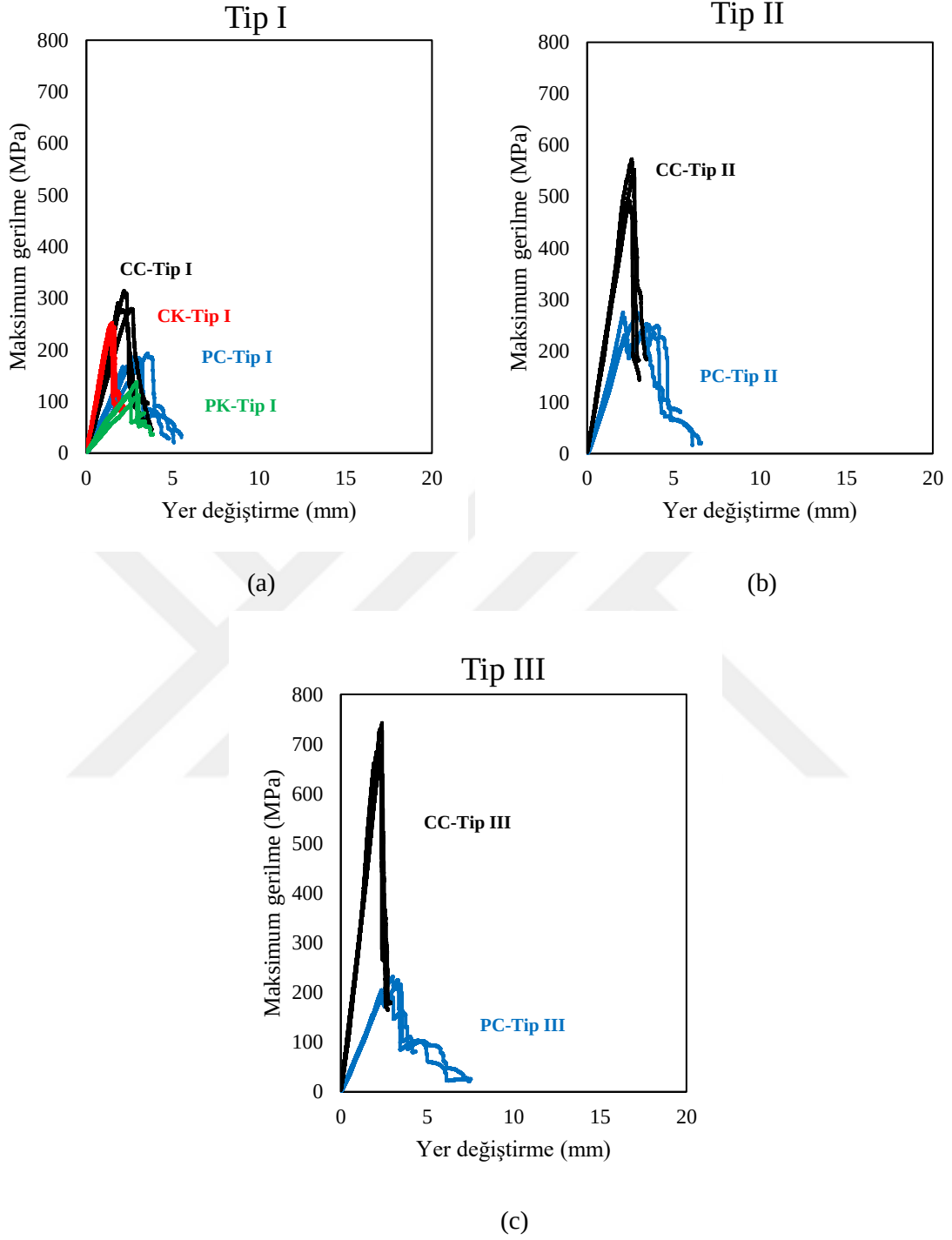
Şekil 5.8-5.9’da sunulan grafiklerde sunulan eğilme testleri, kompozitlerin sünekliği ve elastik-plastik geçiş davranışlarını analiz etme açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle PC-Tip II yapısı, rijitliğe karşılık gelen yüksek eğilme kuvveti ile birlikte kırılma öncesi belirgin bir şekil değiştirme zonu sergilemektedir. Bu davranış, kayma ve eğilme davranışlarının birlikte etkisi etkisinin deformasyon sırasında etkili olduğunu göstermekte olup, Zhang ve ark. (2024) 'ın incelediği ön kayma uygulanmış ve Önceden basma gerilmesine maruz bırakılmış durumlarla doğrudan ilişkilidir. Dokuma tipinin yerel eğilme momentlerine karşı direnci kontrol ettiği ve yükün elyaflar boyunca nasıl dağıldığını belirlediği deneysel olarak doğrulanmıştır.

Blais ve ark. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, açık delikli 3D interlok dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerin eğilme davranışları incelenmiş ve AWJ ile işlenen yüzeylerin, daha homojen stres dağılımı ve daha az delaminasyon nedeniyle daha yüksek eğilme kapasitesi sunduğu gösterilmiştir. Tezde yer alan Şekil 5.8’de, özellikle CC-Tip III yapısının sergilediği yüksek rijitlik ve düşük deformasyon, Blais ve arkadaşlarının belirttiği yüksek modül, düşük tokluk karakteristiği ile birebir örtüşmektedir. Cam elyaf takviyeli bu yapıların düşük şekil değiştirme kapasitesine rağmen, maksimum eğilme kuvvetine ulaşma eğilimi, makaledeki “yüksek elyaf hizası doğruluğu olan yapıların çatlağa karşı daha sert davranması” ifadesiyle de desteklenmektedir. Buna karşılık, PC-Tip III gibi yapılarda gözlemlenen elastik bölgede uzun sehim, polyester matrisin düşük modülü nedeniyle oluşmakta ve bu da enerji absorpsiyon kapasitesinin artmasına rağmen çatırtılı kırılma ve ani yük düşüşü ile sonuçlanmaktadır.

Şekil 5.9’da sunulan gerilme-yer değiştirme eğrileri, eğilme yükü altındaki malzeme davranışını daha net ortaya koymakta, rijitlik, dayanım ve kırılma tipi arasındaki ilişkiyi vurgulamaktadır. Blais ve ark. (2025) çalışmasında, yüksek elyaf-matris bağ kalitesi ve düzgün elyaf hizalanması olan numunelerin, gerilme-yer değiştirme eğrilerinde daha belirgin elastik bölgeye sahip olduğu ve eğrinin kırılma anında ani düşüşle sonlandığı bildirilmiştir. Bu gözlem, tezde CC-Tip III yapısında açıkça görülmektedir: yüksek elastik modül, düşük süneklik ve keskin kırılma geçişi, Blais ve ark.’ın “yüksek modül-düşük sehim kapasitesi” ile açıklanan AWJ kesimli CFRP örnekleriyle birebir örtüşmektedir. Öte yandan, PC-Tip II ve Tip III yapılarda eğrilerin daha yatay ve düzensiz ilerlemesi, elyaf-matris etkileşimindeki zayıflığı ve deformasyon sırasında elyaf kayması, matris çatlaması gibi kompleks kırılma mekanizmalarının etkili olduğunu göstermektedir. Bu davranış, makalede CD (geleneksel delme) yöntemiyle hazırlanan örneklerdeki lokal hasar birikimi ve yüzey bozulmalarının yarattığı etkilerle benzerlik göstermektedir.



şekil 5.10. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III dokuma kompozitler



şekil 5.11. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi maksimum gerilme-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III dokuma kompozitler

şekil 5.10 ve şekil 5.11’de sunulan grafikler, farklı filament kombinasyonları ve dokuma konfigürasyonlarıyla tasarlanmış üç boyutlu kompozit malzeme sistemlerinin eğilme yüklemesi altındaki mekanik tepkilerini karşılaştırmalı olarak sunmakta; bu tepkiler üzerinden, kompozitlerin

yapısal performansını şekillendiren temel parametrelerin hem nicel hem de nitel düzeyde analiz edilmesini mümkün kılmaktadır. Özellikle Tip I, Tip II ve Tip III olarak sınıflandırılmış dokuma türlerine göre, kuvvet-yer değiştirme (Şekil 5.10) ve maksimum gerilme-yer değiştirme (Şekil 5.11) grafikleri, her bir filament türünün ve dokuma deseninin, yapısal deformasyon karakteristiği, kırılma eğilimi, rijitlik seviyesi ve enerji sönmüleme kapasitesi üzerindeki etkilerini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler; yalnızca elastik sınırlar içerisindeki davranışı değil, aynı zamanda kopma öncesi oluşan plastik deformasyon bölgesini, sünekleşme eğilimini ve elyaf-matris arayüz davranışlarını da yansıtan bütüncül bir mühendislik yorumu için temel teşkil etmektedir.

Tip I dokuma yapısına sahip numuneler (Şekil 5.10.a), dokuma yoğunluğu ve bağlama yönü açısından en sade yapıya sahip olmaları nedeniyle, yük dağılımında sınırlı etkinlik sunmaktadır. PC-Tip I ve PK-Tip I gibi polyester esaslı kombinasyonlar, düşük elastik modül ve düşük bağ dayanımı nedeniyle maksimum kuvvet taşıma kapasitelerinde (~150–200 N) sınırlı başarı gösterirken, deformasyon kabiliyetlerinin yüksek olması, yapıların yüksek yer değiştirme değerlerine (~15–20 mm) ulaşmasına imkân tanımaktadır. Bu durum, bu tür yapıların enerji yayma eğiliminin yüksek olmasına karşın yük taşıma kapasitesinin düşük kaldığını, yani sünek ama zayıf sistemler olduklarını göstermektedir. CC-Tip I ve CK-Tip I gibi cam ve karbon katkılı yapılar ise daha yüksek kuvvet taşıma kapasitesine ulaşmalarına rağmen, bu değerleri düşük deformasyonlarla elde ettiklerinden, daha rijit ve gevrek karaktere sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Bu yapıların mukavemet potansiyeli, çekme testlerinde olduğu gibi eğme altında da doğrusal elastik bölgede yoğunlaşmakta; elastik sınır aşıldığında ise ani yük kaybı gözlenmektedir. CK-Tip I gibi hibrit yapılar, camın kırılkan yapısıyla karbonun yüksek modülünün birleşimi sonucu kontrollü kırılma davranışı sergileyerek, ara çözüm potansiyeli sunmaktadır. Fakat bu davranışın arayüz kalitesine ve matris fazının uyumuna doğrudan bağlı olduğu, grafiklerdeki düşüş eğrilerinin sertliği ve şekil süreksizliği ile doğrulanmaktadır.

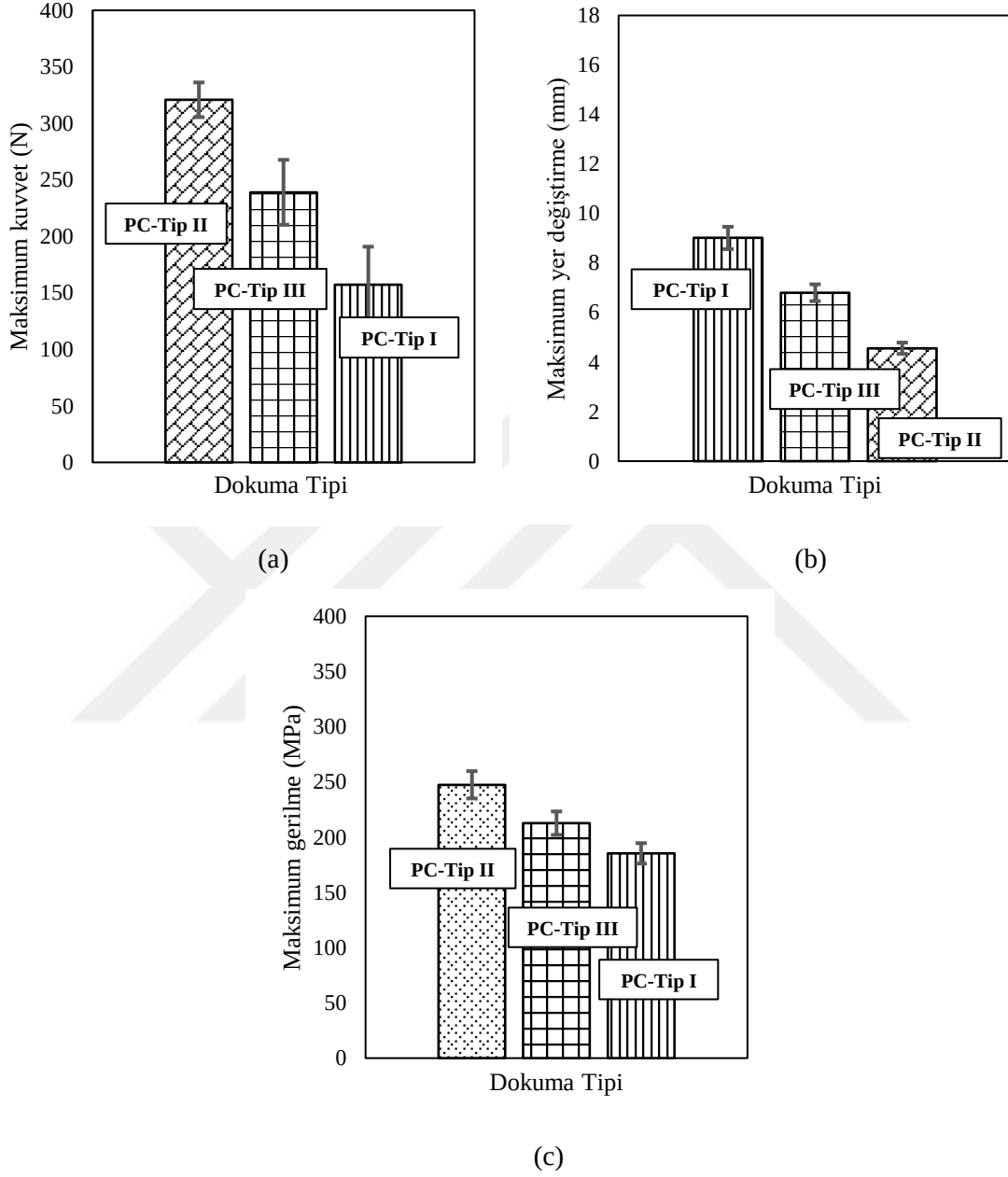
Tip II dokuma sistemleri (Şekil 5.10.b), çapraz bağ yoğunluğunun artması ile birlikte yük aktarım yollarının daha etkin şekilde devreye girmesine olanak tanımakta; bu durum, yük altındaki yapısal stabilitenin artmasına, deformasyonun daha kararlı bir şekilde gerçekleşmesine ve maksimum kuvvet değerlerinin daha yüksek seviyelere ulaşmasına (~300–350 N) neden olmaktadır. PC-Tip II ve CC-Tip II örneklerinde görüldüğü üzere, deformasyon süreci daha lineer ilerlemekte ve kuvvet artışı boyunca yapının elastik davranışını uzun süre koruyabildiği anlaşılmaktadır. Özellikle CC-Tip II yapılarında elde edilen eğri profilleri, kompozit sistemin hem yüksek rijitlik hem de yüksek mukavemet sunduğunu göstermekte; eğrinin eğiminin yüksekliği, elastik modül değerinin de anlamlı şekilde arttığını ortaya koymaktadır. Bu yapıların dezavantajı, deformasyon bölgesinin dar kalması ve çatlak ilerlemesinin ani gelişmesidir. Bununla birlikte, PC-Tip II sistemleri, biraz daha düşük kuvvet seviyelerinde dahi uzun deformasyon aralıklarına ulaşarak, süneklığe yakınlık göstermekte; bu durum, yapı içinde plastikleşme eğiliminin cam elyafa göre daha fazla olduğunu,

ancak bu durumun kırılma öncesi dayanım kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir. Elyaf-matris bağ kalitesi, burada kritik rol oynamakta ve elyaf yöneliminin çapraz yapıyla desteklenmesi, çatlak yayılımını yönlendirmeye katkı sunmaktadır.

Tip III dokuma yapıları (Şekil 5.10.c), yüksek elyaf yoğunluğu, çok yönlü bağ yapısı ve sıkı dokuma konfigürasyonu sayesinde maksimum mekanik performansı sunmakta; bu da yapının hem yük taşıma kapasitesinin hem de yapısal bütünlüğünün yüksek olduğunu göstermektedir. Grafiklerde açıkça görülen şekilde, CC-Tip III numuneleri ~350 N seviyelerine ulaşarak maksimum kuvvet değerlerini yakalamış; bu değerleri düşük yer değiştirme miktarlarında elde etmiş olmaları, rijitliklerinin oldukça yüksek olduğunu ve yapının elastik bölgeyi hızla tamamladığını göstermektedir. Ancak bu durum, sünek davranışın sınırlı olduğunu da işaret eder. PC-Tip III numunelerinde ise benzer deformasyon aralıkları gözlemlenmekle birlikte, maksimum kuvvetin belirgin ölçüde düşük kaldığı görülmektedir. Bu durum, polyester fazın karbon veya cam gibi yüksek dayanımlı elyaflarla rekabet edemediğini; yapının elyaf yönünde çekme kapasitesi düşük olduğu için eğilme altında hızlı enerji birikimi sağlayamadığını göstermektedir. Tip III sistemler, yapısal yük taşıma kapasitesi gerektiren, darbe ve yorulma gibi karmaşık yüklemelere karşı yüksek dayanım isteyen uygulamalarda kullanıma daha uygun görünmekte; ancak kırılma riski tasarım mühendisliği açısından önlem alınması gereken bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Şekil 5.11'de sunulan maksimum gerilme-yer değiştirme grafikleri, eğilme testlerinde sadece mutlak kuvvet değerlerinden ziyade, kompozit malzemenin birim alana düşen yük taşıma kapasitesini ve bu kapasitenin deformasyon sürecine nasıl yayıldığını analiz etme açısından çok daha hassas bir karşılaştırma sunmaktadır. Tip I yapılar özelinde değerlendirildiğinde (Şekil 5.11.a), CC-Tip I kombinasyonunun ~300 MPa seviyesine kadar ulaşarak diğerlerine kıyasla daha yüksek mukavemet sergilediği görülmektedir. CK-Tip I sistemi ~250 MPa seviyesinde dayanım göstermiştir. PK-Tip I ve PC-Tip I sistemleri ise ~150–200 MPa arasında değişen daha düşük mukavemet değerleriyle; özellikle sünek ama düşük dayanımlı yapı profili sergilemektedir. Tip II ve Tip III sistemler için (Şekil 5.11.b–c), cam-cam elyaflı CC-Tip II ve CC-Tip III sistemlerinin ~600–750 MPa seviyelerinde çok yüksek maksimum gerilme değerlerine ulaştığı, bu yapıların eğilme altında yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. PC-Tip II ve PC-Tip III sistemleri ise hem gerilme hem de deformasyon bakımından alt sınırlarda kalmış; bu da matris zayıflığı ve arayüz gevşekliğinin sistem genelinde dayanım kaybına neden olduğunu doğrulamıştır.

Eğilme momenti-eğrilik eğrileri, dokuma tipi ile katmanlı yapının birlikte ele alındığında sistemin bükülme altındaki davranışını açıkça ortaya koymaktadır. Tip III yapılar daha yüksek moment taşıma kapasitesine sahipken, Tip I daha esnek fakat düşük dayanım göstermektedir. Trofimov ve ark. (2020)'nin RTM bazlı modelinde, eğilme sırasında matrisin hacimsel büzülmesinin moment kapasitesine etkisi detaylı şekilde açıklanmış ve yüksek bağ içeren yapıların daha fazla direnç

sergilediği ifade edilmiştir. Bu, Tip III'ün daha rijit ancak kontrollü bükülme eğrisi ile doğrudan örtüşmektedir.



Şekil 5.12. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değişirme ve c) maksimum gerilme

Şekil 5.12’de sunulan grafikler, polyester-cam elyaf kumaş takviyeli kompozit numunelerin eğilme testleri kapsamında gösterdikleri mekanik performans parametrelerini çok boyutlu şekilde irdeleyerek; bu tür kompozit sistemlerin dokuma tipi değişimine karşı verdiği mekanik tepkinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Grafikler, sırasıyla (a) maksimum kuvvet, (b) maksimum yer değişirme ve (c) maksimum gerilme değişkenlerini içermekte olup; her biri,

yapısal dayanım, deformasyon toleransı ve lokal-zonal zorlanma analizine dair doğrudan fiziksel yorumlara zemin hazırlamaktadır. Özellikle, PC-Tip I, PC-Tip II ve PC-Tip III olarak sınıflandırılmış farklı dokuma tiplerine sahip numunelerin eğilme altında verdikleri mekanik cevapların analiz edilmesi, yalnızca yapıların yük taşıma kapasitelerini değil, aynı zamanda enerji yayılım davranışlarını, çatlak oluşumuna karşı direnç seviyelerini ve süneklik potansiyellerini de ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, elde edilen veriler ışığında her bir dokuma tipine ait davranış karakteristikleri ayrı ayrı değerlendirilmeli; ardından da mühendislik bakış açısıyla çapraz karşılaştırmaya tabi tutulmalıdır.

Şekil 5.12.a'da yer alan maksimum kuvvet verileri, kompozit numunelerin eğme testinde ulaştığı en yüksek taşıma kapasitesine dair kritik bilgiler sunmakta; yapıların rijitliğinin, arayüz dayanımının ve elyafların yük aktarım etkinliğinin doğrudan bir fonksiyonu olarak yorumlanmaktadır. Grafiğe göre en yüksek maksimum kuvvet değerine sahip olan PC-Tip II numunesi, ~330–350 N seviyelerine kadar ulaşarak diğer iki yapı tipine kıyasla daha yüksek yük taşıma kapasitesi göstermektedir. Bu durum, Tip II dokuma yapısının sunduğu çapraz elyaf bağlantılarının yük aktarım yollarını çeşitlendirmesi ve böylece yapının daha fazla kuvveti hasarsız şekilde absorbe edebilmesini mümkün kılmasıyla açıklanabilir. PC-Tip III numunesi, daha sıkı dokuma yapısına rağmen Tip II'nin gerisinde kalmakta, bu da dokuma tipinin tek başına değil, filament yönelimi, arayüz kalitesi ve matris içindeki elyaf dağılım düzeniyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. PC-Tip I numunesi ise ~180–200 N aralığında kalan düşük kuvvet değerleriyle bu grupta en zayıf taşıma kapasitesine sahip sistem olarak öne çıkmakta; bu durum Tip I dokuma yapısının düşük bağ yoğunluğu ve yük aktarımındaki lineer sınırlılıklarıyla doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla maksimum kuvvet değerlerine göre değerlendirme yapıldığında, PC-Tip II kompozitlerinin eğilme altında taşıma kapasitesi en yüksek, PC-Tip I yapılarının ise en düşük mekanik performansa sahip olduğu söylenebilir.

Şekil 5.12.b'de sunulan maksimum sehim değerleri ise, yapıların elastik sınır sonrası deformasyon kapasitesini ve plastik şekil değişimine olan eğilimlerini ortaya koyarak, sistemlerin süneklik karakteristiğini değerlendirmek açısından temel parametre olarak kabul edilmektedir. Verilere göre, en yüksek yer değiştirme kapasitesine PC-Tip I numunesi (~9 mm) sahipken; PC-Tip II numunesi ~4.5 mm ile en düşük yer değiştirme seviyesini göstermektedir. PC-Tip III ise ~7 mm civarındaki orta seviyede deformasyonla ikisinin arasında konumlanmaktadır. Bu dağılım, Tip I dokuma sistemlerinin düşük rijitlikleri sayesinde yük altında daha fazla şekil değişimine izin verdiğini; buna karşın PC-Tip II sistemlerinin daha rijit, dolayısıyla daha kırılğan bir yapı sergilediğini göstermektedir. Bu bağlamda, PC-Tip I sistemleri sünek davranışa daha yatkın olup, elastik sınır sonrası enerji emilimi yoluyla kırılmayı geciktirebilmektedir. Ancak bu durum, yapının yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğu anlamına gelmemektedir. Burada önemli olan, rijitlik ve deformasyon arasındaki dengeyi sağlayan sistemlerin mühendislik açısından optimum davranışı

göstermesidir. Bu bağlamda, PC-Tip III yapı, her iki parametreyi (kuvvet ve yer değiştirme) makul düzeyde sunarak dengeleyici nitelikte bir dokuma konfigürasyonu olarak değerlendirilebilir. Yer değiştirme değerleri aynı zamanda çatlak ilerlemesine karşı sistemin gösterdiği direncin de dolaylı bir göstergesidir; yüksek yer değiştirme kapasitesine sahip sistemler, çatlak yayılımını daha fazla geciktirerek yapısal bütünlüğü koruma eğilimi gösterebilir.

Şekil 5.12.c’de sunulan maksimum gerilme değerleri ise, eğilme yükü altında kompozit yapıların birim kesit başına maruz kaldığı en yüksek iç gerilme düzeyini ifade etmekte ve bu veriler hem elyaf katkısının hem de arayüz dayanımının sistem genelindeki dağılımına dair doğrudan içsel bilgiler sağlamaktadır. PC-Tip II numunelerinin ~250 MPa seviyelerine ulaşan maksimum gerilme değerleri, bu sistemlerin eğilme altındaki yerel yük taşıma kapasitesinin yüksek olduğunu ve elyaf-matris etkileşiminin belirli bir homojenlik düzeyinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu da Tip II dokuma yapısının sadece makroskobik değil, mikroskobik düzeyde de daha etkili yük aktarımını sağladığını ve matris içindeki elyaf hizalanmasının sistematik bir yapı oluşturduğunu desteklemektedir. PC-Tip III numunelerinin ~220 MPa seviyelerinde seyrettiği ve PC-Tip I numunelerinin ~190 MPa civarında sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu fark, özellikle PC-Tip I sistemlerinde elyaf yöneliminin homojen olmamasından ve arayüz kopmalarının erken evrelerde başlamasından kaynaklanmaktadır. Tip III sistemlerinde ise dokuma yoğunluğu fazla olmasına rağmen, deformasyon kapasitesindeki sınırlılık gerilme dağılımını daha geniş bir alana yayamamakta, bu da elyaflar üzerinde lokal gerilme konsantrasyonları oluşturmakta ve maksimum değerleri sınırlamaktadır. Bu bağlamda, maksimum gerilme verileri, yük taşıma kapasitesinden bağımsız olarak, kompozit sistemin kesit düzleminde gösterdiği zorlanma direncini, yani iç kuvvet dağılım etkinliğini açıklayan kritik bir kriterdir.

Sonuç olarak, Şekil 5.12’de sunulan grafiklerden elde edilen karşılaştırmalı veriler, polyester-cam elyaf esaslı kompozit sistemlerde dokuma tipinin, sadece mukavemet üzerinde değil, aynı zamanda süneklik, deformasyon kapasitesi, arayüz davranışı ve enerji emilimi gibi çok katmanlı mekanik performans göstergelerinde belirleyici rol oynadığını açıkça göstermektedir. PC-Tip II sistemleri yüksek kuvvet ve gerilme değerleri ile yapısal dayanım açısından ön plana çıkarken; PC-Tip I sistemleri yüksek deformasyon kapasitesi ve süneklik özellikleriyle öne çıkmakta, ancak taşıma kapasitesi açısından yetersiz kalmaktadır. PC-Tip III yapıları ise bu iki uç arasında dengeleyici bir yapı sergileyerek hem yeterli kuvvet dayanımı hem de makul deformasyon karakteristiği sunarak çok yönlü performans göstermektedir.

Cam elyaf takviyeli dokuma yapılar, eğilme altında z-yönlü bağların etkisiyle düşük deformasyon sergilemekle birlikte yüksek moment taşıma kapasitesine sahiptir. Şekil 5.12’de gözlemlenen bu durum, Aranda-Iglesias ve ark. (2020)’nin modellerinde, elyafların kalınlık boyunca hizalanması ile elde edilen “deformasyon transfer alanı” kavramı ile açıklanabilir. Z-yönlü bağlantılar, eğilme

sırasında elyafların yön değiştirmesini sınırlandırarak deformasyonun kontrollü biçimde ilerlemesini sağlamaktadır.

şekil 5.12’de yer alan eğilme testleri sonucu maksimum gerilme değerleri, dokuma tipi ve elyaf yönlenmesinin yapısal dayanım üzerindeki etkisini çok net biçimde göstermektedir. PC-Tip II numunesi ~250 MPa maksimum gerilme değeriyle eğilme yüklemesi altında en yüksek direnci göstermiş, bunu Tip III (~220 MPa) ve Tip I (~190 MPa) yapıları takip etmiştir. Bu dağılım, elyaf-matris arayüz bağ kalitesi, elyaf hizalanma düzeyi ve elyaf yoğunluğu gibi mikromekanik parametrelerin, makroskobik yük taşıma kapasitesine doğrudan etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca Liu ve ark. (2024) tarafından geliştirilen 3B dokuma kompozitlerin eğilme davranışına yönelik sayısal modelleme sonuçlarında da farklı yönlerde dokunan örneklerde benzer şekilde farklı gerilme değerleri elde edilmiştir. Ancak Liu ve ark.’nın çalışmasında gerilme seviyeleri simülasyon sonuçlarında 170–220 MPa aralığında kalmıştır. Bu çalışmada deneysel olarak daha yüksek değerlere ulaşılmış olması hem üretim parametrelerinin hem de elyaf-matris ara yüz kalitesinin üst seviyede kontrol edildiğine işaret etmektedir.

Tablo 5.7. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune		2. Numune		3. Numune	
	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm
PC-Tip I						
PC-Tip II						
PC-Tip III						

Tablo 5.7'de sunulan polyester-cam elyaf takviyeli kompozit numunelere ait eğilme testi sonrası üstten ve yandan görünüm, kompozit yapıların sadece yük taşıma kapasiteleri açısından değil, aynı zamanda yük altında şekil değiştirme eğilimleri, hasar yayılımı senaryoları, elastik geri dönüş

potansiyeli, kırılma sonrası deformasyon geometrisi ve makro boyuttaki süreksizliklerin oluşum düzeni gibi kırılma davranışının önemli mühendislik göstergeleri üzerinden değerlendirilebilmesine olanak tanımaktadır. Numuneler üç farklı dokuma tipi (PC-Tip I, II ve III) kapsamında analiz edilmiştir. Her bir numune için üstten ve yandan alınan görüntüler, özellikle katmanlı yapıdaki ara yüzey ayrılması (delaminasyon), çekme-basma bölgeleri arasındaki kırılma geçişi, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin geometrik izdüşümü ve makroskobik eğrilik değerlerinin dokuma mimarisi ile ilişkilendirilmesi bakımından oldukça kritik gözlemsel veriler sunmaktadır. Özellikle yandan görünümde oluşan kırık geometrileri, hasarın hangi düzlemde yoğunlaştığını ve yük taşıma sürekliliğinin ne şekilde kesildiğini doğrudan göstermektedir. Görsel veriler, eğilme testlerinin mühendislik açısından yalnızca maksimum dayanım veya kırılma gerilmesi gibi sayısal verilerle değil, aynı zamanda kırılma şekli, hasar bölgesi genişliği, katman açıklığı ve deformasyon miktarına dayalı nitel analizlerle de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

PC-Tip I dokuma yapısına sahip kompozit numunelerin eğilme testi sonrası üstten ve yandan görüntüleri incelendiğinde, özellikle yandan görünümde dikkat çeken temel özellik, kırılma bölgesinin çok keskin, açısız ve lokalize bir deformasyon geometrisiyle karakterize olmasıdır. Bu yapı, klasik anlamda düşük sünekliğe sahip, kırılma sonrası elastik geri kazanımı düşük sistemlerin tipik davranışını sergilemektedir. Özellikle bu tip yapılarda, eğilme sırasında oluşan çekme gerilmeleri matris ve elyafar tarafından absorbe edilmekte yetersiz kalmakta, bunun sonucunda hasar ani olarak gelişmekte ve yapı eğilme yükünü taşıyamadığı anda aniden deformasyon geometrisini kaybetmektedir. Üstten görünümde gözlemlenen düzlemsellik, yapının kırılma sırasında yön değiştirmedikçe, çatlağın tek eksenli bir yayılım gösterdikçe ve yük taşıma sürecinin simetrik olmadığını, yani çatlak başlangıç noktasının lokalize olduğunu göstermektedir. Bu tür yapılar, mikromekanik düzeyde incelendiğinde çoğunlukla ara yüzey bağ kopması veya tek yönlü elyaf sıyrılması nedeniyle aniden kırılmakta ve deformasyon yayılmadan sistem enerjisini boşaltmaktadır. Mühendislik açısından bu durum, yapının yüksek rijitlik sunduğu ancak kontrollü deformasyon kapasitesinin düşük olduğu anlamına gelmektedir.

PC-Tip II dokuma yapısına sahip numunelerde ise eğilme sonrası gözlemlenen hasar şekli, Tip I ile kıyaslandığında daha dağılmış, daha yayımlı ve daha kontrollü bir morfolojiye sahiptir. Yandan görüntülerde oluşan V şekli, eğilme bölgesinde oluşan çatlağın hem çekme hem de basma bölgesinde dağıldığını, yani deformasyonun yalnızca bir eksenle değil, çekme ve basma bölgeleri arasında geçişli olarak geliştiğini göstermektedir. Üstten görünümde ise, kırılma düzleminin daha az keskin, daha oval ve elyaf yönelimiyle ilişkili bir eğrilik gösterdiği dikkat çekmektedir. Bu durum, mikromekanik açıdan çatlağın elyafarın yönünü takip ederek ilerlediğini ve elyaf-matris bağ kuvvetinin yapının farklı noktalarında farklı dirençler sunduğunu göstermektedir. Bu tür bir hasar senaryosu, çok eksenli enerji sönmüleme olarak adlandırılan, yükün birden fazla yönde

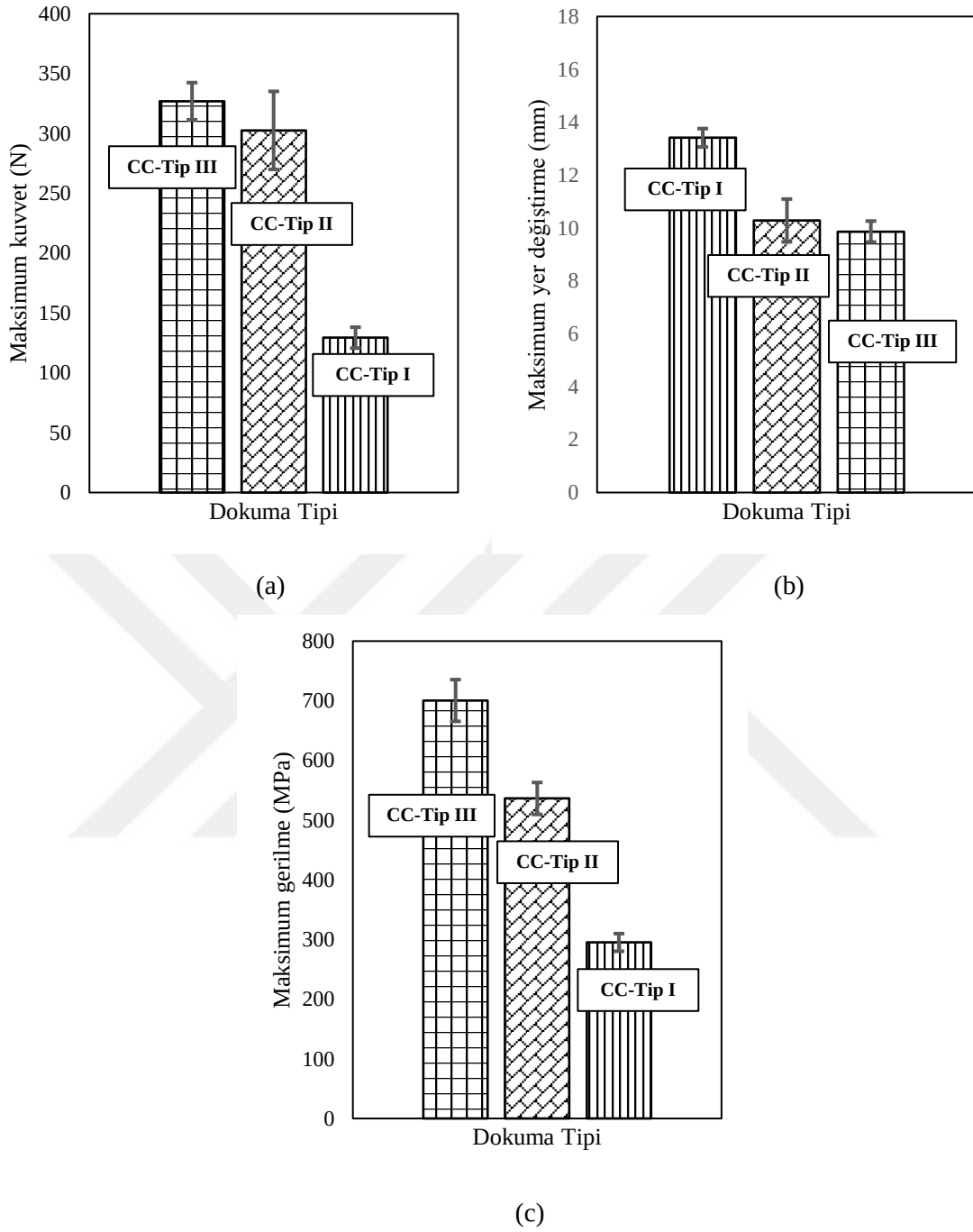
dağılarak yapı tarafından absorbe edilmesi şeklinde tanımlanabilir. Aynı zamanda bu yapı, matris deformasyonu + elyaf yön değiştirme + ara yüzey sürtünmesi kombinasyonu ile karakterize edilen “karma deformasyon modlarıyla enerji yutumu” açısından avantajlıdır. Bu bağlamda PC-Tip II yapılar, eğilme altında yön değiştirmeye müsait kırılma yüzeyi oluşturdıkları için yük aktarımı süresini uzatmakta ve hasarın ilerleme hızını yavaşlatmaktadır.

PC-Tip III dokuma tipine sahip numuneler gerek üstten gerekse yandan görünümde bazında değerlendirildiğinde, en simetrik, en düzgün ve en kontrollü hasar geometrisini sunmaktadır. Özellikle yandan görünümde oluşan eğrilik, yapının eğilme yükü altındaki esnekliğini net biçimde ortaya koymakta, kırılmanın simetrik olarak her iki kanatta da geliştiğini göstermektedir. Bu yapı hem çekme hem de basma bölgesinde enerji dağılımının homojen olduğunu ve kırılmanın ani değil, kademeli ilerleyen ve enerji absorpsiyonu maksimize eden bir süreçle geliştiğini kanıtlamaktadır. Üstten görünümde, deformasyonun elyaf hizasında yön değiştirdiği, bazı numunelerde kırık hattının düz değil, hafifçe dalgalı olduğu gözlemlenmiştir. Bu morfoloji, mikroyapı düzeyinde elyaf sapması (fiber deflection), ara yüzey direnç farklılıkları, çoklu elyaf gruplarının ardışık deformasyonu gibi kırılma modlarının etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Böylece PC-Tip III yapısı, kırılma sonrası da belirli düzeyde yük taşıyabilirliğini sürdüren ve sistemin enerji sönümleme kabiliyetini maksimize eden bir geometri sunmaktadır. Bu yapı, mühendislikte hem rijitlik hem de tokluk gerektiren uygulamalarda ideal performans sergileyecek biçimde optimize edilmiş bir kırılma morfolojisi olarak değerlendirilebilir.

Tablo 5.7’de yer alan eğilme testi sonrası üstten ve yandan hasar görüntüleri, yalnızca hasarın nerede ve ne şekilde başladığını değil, aynı zamanda nasıl yayıldığını, hangi dokuma tipinde nasıl bir deformasyon geometrisine yol açtığını ve sistematik enerji boşalmasının nasıl gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Her bir dokuma tipi, kendi iç yapısal yönelimiyle yük altındaki deformasyon davranışına doğrudan etki etmektedir:

PC-Tip I, ani kırılma ve düşük deformasyon kapasitesiyle kırılma ve rijit sistemleri temsil eder. Kırılma tek yönlü ve lokalizedir. PC-Tip II, deformasyonu dağıtan, çatlağın yönünü değiştiren, elyaf-matris sürtünmesi ile enerjiyi yutan bir yapıya sahiptir. Yüksek tokluk sergiler. PC-Tip III, en dengeli sistemdir. Hem deformasyon yayılımı hem de enerji absorpsiyonu açısından en optimum kırılma geometrisini sunar.

Bu yapısal davranış farkları, mühendislik tasarımı açısından sadece mukavemet değil; aynı zamanda çatlak yön kontrolü, hasar sonrası taşıma kapasitesi, form geometrisi stabilitesi ve şekil geri kazanım potansiyeli gibi parametreler açısından da değerlendirilmelidir. Dolayısıyla bu tablo, yalnızca deneysel bir kayıt değil, aynı zamanda mühendislik uygulamaları için kırılma tasarımı verisi niteliği taşıyan çok değerli bir hasar morfolojisi atlası olarak değerlendirilebilir.



şekil 5.13. Cam elyaf-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

şekil 5.13'te sunulan grafikler, cam-cam elyaf kumaşlarla dokunmuş 3B kompozit malzemelerin eğilme testleri sonucunda gösterdiği mekanik performans farklılıklarını, dokuma tipi ekseninde çok değişkenli olarak incelemeye imkân tanımakta; bu sayede her bir dokuma konfigürasyonunun yalnızca mukavemet değil, aynı zamanda deformasyon karakteriştiği ve i yapısal adaptasyonu açısından nasıl bir davranış sergilediği detaylı biçimde ortaya konulmaktadır. Cam elyaf, bilindiği

üzere yüksek elastik modül, düşük yoğunluk ve gevrek kırılma karakteri ile özellikle yüksek rijitlikli uygulamalar için tercih edilen bir takviye malzemesidir. Bununla birlikte, bu elyaf türünün kumaş formunda dokuma yapılarına entegre edilmesiyle elde edilen kompozitlerin performansı, yalnızca elyafın kendine özgü mekanik özelliklerine değil, aynı zamanda bu elyafların matrisle olan bağlanma kalitesine, yönelimine ve arayüz dağılımına da doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda, Şekil 5.13'teki üç grafik maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme cam-cam dokulu kompozit sistemlerde dokuma tipine göre oluşan mekanik cevapların farklı yönlerini bütüncül olarak değerlendirmek için güçlü bir temel sunmaktadır.

Şekil 5.13.a'da yer alan maksimum kuvvet değerleri, kompozit numunelerin eğilme yükü altında ulaştıkları nihai taşıma kapasitesini yansıtırken, her bir dokuma tipinin yük aktarım performansını ortaya koymaktadır. Grafik incelendiğinde, en yüksek maksimum kuvvet değerine (~330 N) CC-Tip III dokuma tipine sahip numunelerin ulaştığı görülmektedir. Bu değer, yapının dokuma yoğunluğu ve elyaf yönelimi açısından en dengeli konfigürasyona sahip olduğunu; yük aktarım yollarının etkin şekilde tüm hacme yayıldığını ve matris ile elyaf arasında başarılı bir gerilme transferi gerçekleştiğini göstermektedir. CC-Tip II dokuma yapısı da ~300 N seviyeleriyle oldukça yüksek bir kuvvet kapasitesi sergilemekte, ancak Tip III ile karşılaştırıldığında, elyaf yönelimi açısından daha az homojen ve dolayısıyla kırılma anında daha ani yük boşalması riski taşımaktadır. CC-Tip I numunesi ise ~130 N ile bu grupta en düşük taşıma kapasitesine sahip dokuma tipi olarak dikkat çekmektedir. Bu fark, Tip I yapılarındaki bağlanma yönlerinin sınırlı olması, yükün yalnızca elyaf doğrultusunda taşınması ve arayüz temas alanının düşük kalmasından kaynaklanmaktadır. Kuvvet değerleri bağlamında değerlendirildiğinde, dokuma tipi yalnızca maksimum dayanımı değil, aynı zamanda yükün nasıl taşındığını ve sistemin ne kadar süre bu yükü taşıyabildiğini de belirlemektedir. Bu nedenle Tip III dokuma, özellikle sabit ya da kademeli yük uygulamalarında daha stabil bir taşıyıcı yapı olarak ön plana çıkmaktadır.

Şekil 5.13.b'de sunulan maksimum yer değiştirme (sehim) değerleri, kompozit numunelerin eğilme yükü altındaki deformasyon toleransını ve süneklik kapasitesini değerlendirmek açısından son derece önemli parametreler sunmaktadır. Burada en yüksek yer değiştirme (~13–14 mm) CC-Tip I yapılarında gözlemlenmiş; bu da bu dokuma tipinin elastik modülünün daha düşük olduğu ve yük altındaki şekil değişimine daha toleranslı davrandığını göstermektedir. Ancak bu durum, yapının sünek olduğunu değil, bağ yapısının zayıf olduğunu, yani hasarın elastik bölge boyunca yayılabildiğini işaret eder. CC-Tip III yapılarında ise maksimum yer değiştirme değerinin ~10 mm'ye kadar düştüğü görülmekte; bu da bu yapının daha rijit ve dolayısıyla şekil değişimine karşı daha dirençli olduğunu göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, Tip III dokuma yapısı, daha kısa deformasyon aralığında daha yüksek kuvvetler taşıyabildiğinden, yük taşıma kapasitesini rijitlik ve bağ bütünlüğü üzerinden elde etmektedir. CC-Tip II yapılar ise ~10–11 mm ile orta seviyede yer değiştirme göstermekte; bu hem yeterli rijitlik hem de sınırlı deformasyon kapasitesiyle dengeli bir

davranışa işaret etmektedir. Bu açıdan bakıldığında, yer değiştirme kapasitesi yalnızca süneklik değil, aynı zamanda hasarın yayılma şekli hakkında da önemli ipuçları sunmakta; delaminasyon eğilimleri, çatlak başlangıç noktaları ve arayüz bağ kopması gibi mikroskobik hasar mekanizmalarının makroskobik yansımalarını temsil etmektedir.

Şekil 5.13.c’de sunulan maksimum gerilme değerleri, birim alana düşen maksimum yük taşıma kapasitesini göstererek, malzemenin iç yapısındaki homojenlik, bağ kalitesi ve elyaf katkısının etkinliğini değerlendirmek açısından en duyarlı parametre olarak öne çıkmaktadır. Verilere göre, CC-Tip III yapılar ~700 MPa seviyelerine ulaşarak açık ara en yüksek maksimum gerilme değerine sahip sistem olarak belirlenmiştir. Bu değer, yalnızca kuvvet taşıma anlamında değil, aynı zamanda mikro yapısal gerilme transferinin ne derece etkin olduğuna dair kuvvetli bir göstergedir. CC-Tip II yapılar, ~500–550 MPa seviyelerinde kalmakta; bu da bu yapıların yüksek performanslı ancak homojen olmayan bağ yapısına sahip olduklarını göstermektedir. CC-Tip I numuneleri ise ~300 MPa gerilme seviyesinde sınırlı kalmakta ve bu durum, yapısal tasarım açısından performans dezavantajı doğurmaktadır. İlginç olan, cam-cam sistemlerde Tip III ile Tip I arasındaki maksimum gerilme farkının ~%240 gibi yüksek bir orana ulaşmasıdır; bu da dokuma tipinin bu tür kompozitlerde mukavemet performansı üzerindeki etkisinin ne denli büyük olduğunu göstermektedir. Karşılaştırmalı olarak polyester-cam kombinasyonlarında bu fark ~%40 düzeyinde sınırlı kalmaktadır. Bu da cam-cam sistemlerin dokuma tipi değişimine karşı çok daha duyarlı olduğunu ve küçük yapısal farkların büyük mekanik sonuçlara yol açtığını kanıtlamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.13’te sunulan grafiklerden elde edilen çok değişkenli veriler, cam-cam elyaf kumaş dokuma sistemlerinde mekanik performansın yalnızca malzeme kompozisyonuna değil, aynı zamanda elyaf yönelimi, dokuma yoğunluğu, arayüz temas kalitesi ve bağ mimarisine doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir. Tip III yapılar yüksek kuvvet, düşük yer değiştirme ve yüksek gerilme kapasitesi ile yapısal rijitlik ve yük taşıma açısından optimal profil çizerken; Tip I yapılar yüksek deformasyon, düşük gerilme ve sınırlı kuvvet taşıma kapasitesi ile düşük performanslı fakat enerji yayma kabiliyeti bulunan yapılardır. Tip II sistemler ise bu iki uç arasında hem taşıma hem de deformasyon dengesini kurabilen, daha çok çok yönlü uygulamalara açık sistemlerdir.

Şekil 5.11 – 5.13’teki deformasyon profilleri, farklı filament ve dokuma kombinasyonlarının eğilme altındaki şekil değiştirme kapasitelerini göstermektedir. Tip II dokuma, orta düzey rijitlik ve yüksek deformasyon dengesi sunmakta olup, özellikle yük altında enerji yayılımını etkili biçimde yönlendirebilmektedir. Bai ve ark. (2020)’ın modelinde çok eksenli kabuk yapıların eğilme altında iç basınca karşı gösterdiği direnç, burada gözlemlenen deformasyon eğilimleri ile yüksek oranda benzeşmektedir. Katmanlı yapıların bağ simetrisi, eğrilik zonunda yerel stabiliteyi doğrudan etkilemektedir.

Eğilme mukavemet değerleri değerlendirildiğinde, CC-Tip III yapı, yüksek mukavemeti ile dikkat çekmektedir. Bu performans, Aranda-Iglesias ve ark. (2020)'nın tarafından tanımlanan “üst-alt yüzey kayma sürtünmesi davranışı” modellenmesi ile uyumludur. Bu modelde, üst ve alt yüzeydeki bağlantı noktalarının deformasyon altındaki enerjiyi yayma kapasitesi, sistemin mukavemetini artırıcı rol oynamaktadır. Şekil 5.13'te görülen yüksek mukavemet değeri, çok eksenli bağ yapısının yük taşıma kapasitelerini maksimize ettiğini ortaya koymaktadır.



Tablo 5.8. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune		2. Numune		3. Numune	
	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm
CC-Tip I						
CC-Tip II						
CC-Tip III						

Tablo 5.8’de sunulan cam elyaf kumaşlardan üretilmiş kompozit numunelere ait eğilme testi sonrası mikroskopik hasar görselleri, dokuma tipine bağlı olarak gelişen farklı hasar mekanizmalarının gözlemlenebilmesine olanak sağlayan bir veri oluşturmaktadır. Üç farklı dokuma yapısı (CC-Tip I,

CC-Tip II ve CC-Tip III) altında üretilmiş numunelere ait üstten ve yandan görünümeler hem yüzeysel hem de hacimsel deformasyon izlerini detaylı biçimde sergileyerek, hasarın yalnızca dış yapıya değil, aynı zamanda içsel tabakalara nasıl yayıldığını, yük transferinin ne ölçüde dağıtılabildiğini ve arayüz bağ kalitesinin hasar gelişimini ne şekilde etkilediğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu gözlemler, sadece fiziksel kırılma davranışlarını değil, aynı zamanda elyaf-matris etkileşimi, delaminasyon başlangıç bölgeleri, elyaf ayrışma eşiği ve yerel gerilme yığılmalarının makroskobik çıktıları hakkında da çok katmanlı çıkarımlara imkân tanımaktadır. Yorumlar, her bir dokuma tipine özgü sistematik değerlendirmelerle detaylandırılmıştır.

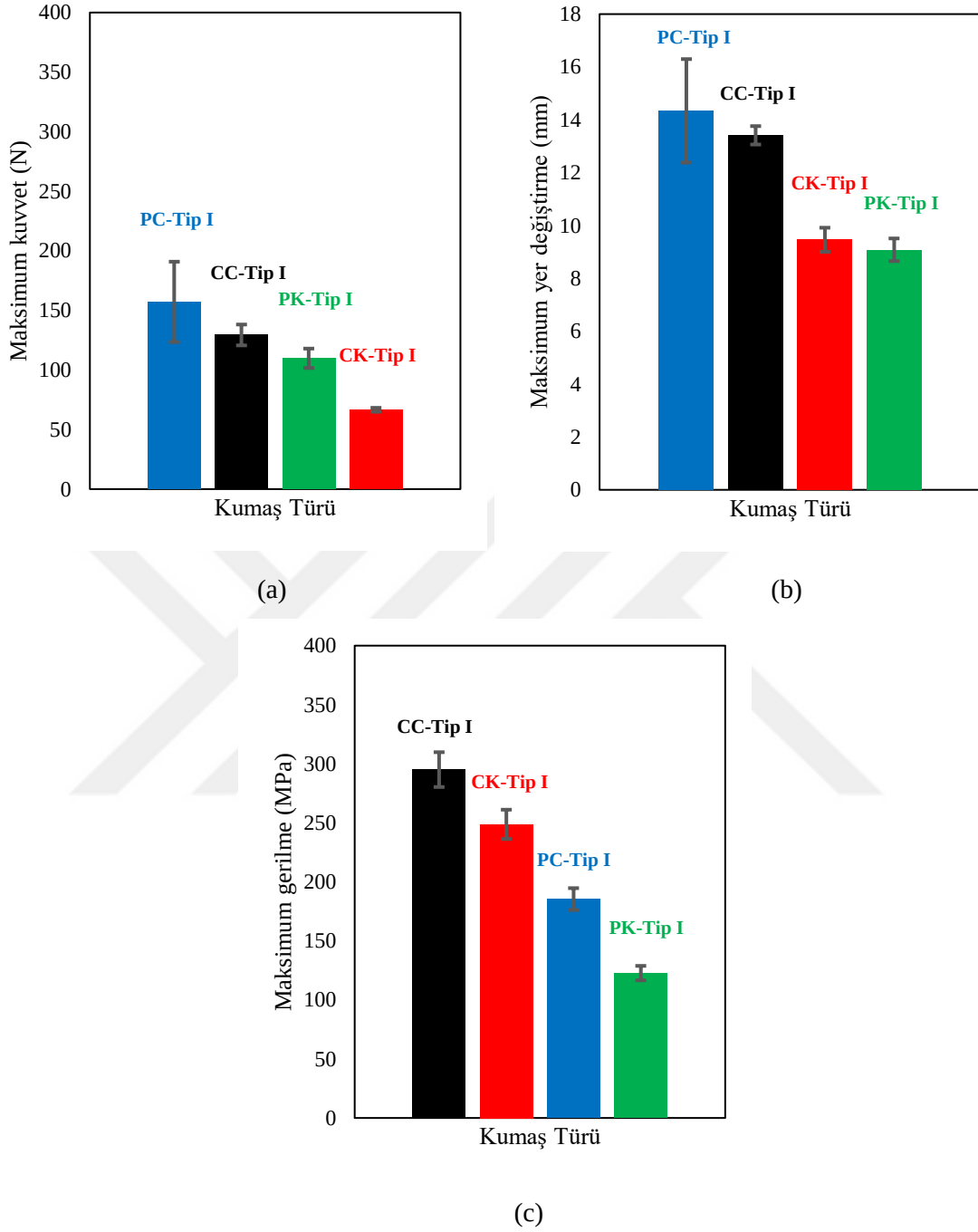
CC-Tip I dokuma yapısına sahip cam-cam kompozit numuneler, eğilme testi sonrası elde edilen üstten ve yandan görünümelerde görece düzenli bir kırılma deseni sunmakta; bu yapıların, elastik bölge sınırları dahilinde kontrollü yük aktarımı gerçekleştirdiği, ancak elastik sınır aşıldığında, kırılma eğiliminin belirli doğrultulara yönelerek çatlak ilerlemesinin belirgin hale geldiği gözlemlenmektedir. Özellikle üstten görünümde yüzeyde homojen şekilde dağılmış, simetrik çatlak desenleri gözlemlenmekte; bu durum, dokuma yönlerinin eğilme eksenine paralel ve ortogonal ilişkiler kurabildiğini, ancak çapraz yük taşıma kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. Yandan görünümde, kırılmanın çoğunlukla orta bölgeye yakın lokalize olduğu, üst ve alt yüzeylerde ise görece daha az çatlak ilerlemesi gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Bu davranış, yük altında gerilme yığılmasının orta kesitte birikerek kırılma başlatıcısı haline geldiğini göstermektedir. Tip I dokuma yapısının daha az sıkı dokunmuş elyaf mimarisi ve yönlendirilmiş düz elyaf dizilimi nedeniyle yük transferinde daha lineer bir yaklaşım benimsediği, bu nedenle kesme yüklerine karşı daha düşük direnç sunduğu söylenebilir. Bu yapı, düşük-yük koşullarında uzun süreli dayanım gerektiren, ancak ani darbelere karşı dayanımın ikinci planda olduğu uygulamalarda kullanılabilecek bir karaktere sahiptir.

CC-Tip II dokuma yapısına sahip cam elyaf takviyeli kompozit numuneler ise, daha karmaşık ve düzensiz hasar desenleri ile dikkat çekmekte; bu yapıların mikroyapısal bağ kalitesindeki bölgesel zayıflıklar nedeniyle yük altında çatlak oluşumuna karşı daha duyarlı olduğu anlaşılmaktadır. Üstten görünümde yüzey boyunca uzanan çatlakların lineer olmaktan çok dalgalı bir şekilde ilerlediği, bazı bölgelerde elyaf demetlerinin matristen ayrıldığı veya mikro çapta elyaf dışa çıkışlarının olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, dokuma yapısında elyafların rastgele yönlenmediğini, ancak bağ aralıklarının farklılaşması nedeniyle yük aktarım yollarında süreksizlikler meydana geldiğini göstermektedir. Yandan görünümde ise hasarın yüzeyden derinliğe doğru katmanlı şekilde ilerlediği ve özellikle elyaf yöneliminin değiştiği bölgelerde elyaf-matris ayrılmasının yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Bu, özellikle Tip II yapının orta seviye bir bağ yoğunluğu ile tasarlandığını; yük aktarımında lifler arası senkronizasyonun yeterince sağlanamadığını, bu nedenle yük altındaki deformasyonun düzensiz geliştiğini göstermektedir. Ayrıca, bu düzensiz çatlak deseni, elyaf-matris etkileşiminin zayıf bölgelerde hasarı lokalize

edemediğini ve enerji birikiminin kontrolsüz çatlak yayılımına dönüştüğünü işaret etmektedir. Bu yapı, belirli düzeyde rijitlik sunmasına karşın, yük altındaki deformasyon süreçlerinde ani kırılma ve delaminasyon riskine açık olup, yüksek güvenlik faktörü gerektiren uygulamalarda sınırlı performans sergileyebilir.

CC-Tip III dokuma yapısına sahip cam elyaf kompozit numuneler, eğilme testi sonrası en rijit ve yüksek mukavemetli davranış profiline sahip yapılar olarak öne çıkmakta; üstten ve yandan görünümde oldukça düzenli ve kontrollü bir hasar morfolojisi sergilemektedir. Üstten bakıldığında çatlakların çoğunlukla belirli merkezlerde yoğunlaştığı, yüzeyde çatlak ağının geniş alana yayılmadığı ve elyafların büyük oranda formunu koruduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, bu dokuma yapısının yük aktarımını hem elyaflar hem de matris içerisinde homojen bir şekilde gerçekleştirebildiğini, böylece elastik limitin aşılması sonrasında dahi enerji yayılımının kontrollü bir şekilde sürdürüldüğünü göstermektedir. Yandan görünümde ise numune geometrisinin deformasyon sonrası büyük ölçüde korunmuş olduğu; kırılmanın merkezde ve simetrik biçimde gerçekleştiği, delaminasyonun minimum düzeyde kaldığı ve katmanlar arası bütünlüğün yüksek oranda muhafaza edildiği görülmektedir. Bu davranış, yüksek bağ yoğunluğu ve elyaf yönelimi arasındaki geometrik denge sayesinde oluşmaktadır. Bu yapıların rijitliği, elyaf-matris arayüz yüzeyinin genişliği ile doğrudan ilişkili olup; mikroskobik ölçekte gerilme aktarımı sorunsuz gerçekleştiği için, makroskobik ölçekte kırılmaların daha geç başlatıldığı anlaşılmaktadır. Tip III dokuma, özellikle yüksek gerilme yüklemelerine, çok eksenli deformasyon koşullarına ve tekrarlayan eğilmelere maruz kalan mühendislik uygulamalarında yüksek performans gösterebilecek bir malzeme sistematiği sunmaktadır.

Genel karşılaştırmalı değerlendirme yapıldığında, Tablo 5.8'in ortaya koyduğu hasar morfolojisi ve dokuma tipi ilişkisi, cam elyaf temelli kompozit sistemlerin yük altındaki davranışlarının yalnızca malzeme kalitesi ile değil; aynı zamanda dokuma deseni, bağ yoğunluğu ve elyaf yönelimi gibi mikromekanik parametrelerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini net biçimde ortaya koymaktadır. CC-Tip I dokuma, daha homojen bir yük dağılımı ile düşük seviye yüklerde dengeli deformasyon sunabilse de yüksek yüklerde yetersiz bağ bütünlüğü nedeniyle erken kırılma riski taşımaktadır. CC-Tip II yapılar ise düzensiz çatlak gelişimi ve elyaf ayrılmaları nedeniyle tasarım açısından stabil olmayan bir kırılma karakteristiği sunmakta, bu nedenle orta düzey güvenlik gerektiren uygulamalarda dikkatli kullanılmalıdır. CC-Tip III yapılar ise kontrollü çatlak yayılımı, düşük delaminasyon eğilimi ve yüksek arayüz bütünlüğü ile hem mekanik performans hem de güvenilirlik açısından optimum yapısal çözüm sunmaktadır.



Şekil 5.14. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme mukavemetlerinin kumaş türüne göre karşılaştırılması

Şekil 5.14'te sunulan grafik seti, farklı filament kombinasyonlarıyla tasarlanmış üç boyutlu dokuma kompozit malzemelerin eğilme testi sonuçlarına ilişkin temel mekanik performans göstergelerinin (maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme) karşılaştırmalı analizini kapsamaktadır. Grafikler, Tip I dokuma konfigürasyonunda PC, CC, CK ve PK gibi dört farklı

filament kombinasyonunun karşılaştırmalı mekanik davranışlarını ortaya koymakta; bu karşılaştırmalar üzerinden dokuma yapısı sabit tutularak filament türünün eğilme davranışı üzerindeki etkileri sistematik bir şekilde değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, filament kombinasyonlarının yük taşıma kapasitesine, deformasyon toleransına ve iç gerilme dağılımına olan etkileri yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda mikromekanik düzeyde de açıklanarak, yapının dayanım-süneklik-rijitlik ilişkisi temelinde yorumlanmaktadır.

Şekil 5.14.a'da sunulan maksimum kuvvet verileri, kompozit numunelerin eğilme yükü altında ulaştıkları nihai taşıma kapasitesini temsil etmekte ve yapıların elyaf takviyesinin mekanik dayanımı ne ölçüde etkilediğine dair doğrudan bilgi sunmaktadır. Bu grafikte en yüksek kuvvet değerine (~170 N civarı) PC-Tip I numunesi ulaşmış olup, bu durum, polyester matris ile cam elyafın bağ uyumunun ve yük taşıma dengesinin bu kombinasyonda nispeten daha etkili gerçekleştiğini göstermektedir. CC-Tip I ~140 N ile ikinci sırada yer almakta, bu da cam-cam sisteminin gevrek karakterine rağmen yeterli yük aktarımı sağlayabildiğini göstermektedir. PK-Tip I ise bu sistemlerden daha düşük bir değer (~110 N) sergilemekte olup, polyesterin düşük elastik modülüne karşı karbon elyafların bağlanma kalitesinin sınırlı olması nedeniyle bu taşıma kapasitesinin kısıtlandığı düşünülmektedir. En düşük maksimum kuvvet (~80 N) CK-Tip I numunesinde gözlemlenmiştir ki bu sonuç, karbon ve cam elyafların aynı sistem içerisinde birbirinden farklı mekanik karakterler taşıması ve bu durumun elyaf-matris bağ kalitesini zayıflatmasıyla açıklanabilir. Karbon elyafların yüksek elastik modülüne rağmen matris içindeki düzensiz yerleşimi ve mikroskobik bağ kopmaları nedeniyle, yük aktarımı sırasında sistemde erken deformasyonlar ve enerji birikimi oluşmakta; bu da taşıma kapasitesinin efektif kullanımını engellemektedir. Bu nedenle, maksimum kuvvet açısından PC-Tip I sisteminin daha uyumlu ve dengeli bir yapı sunduğu ifade edilebilir.

Şekil 5.14.b'de yer alan maksimum yer değiştirme grafiği, kompozit numunelerin eğilme altındaki deformasyon kapasitelerini ve süneklik düzeylerini değerlendirme açısından kritik bir metrik sunmakta olup, enerji yayma kapasitesine dair dolaylı çıkarımlara olanak tanımaktadır. En yüksek yer değiştirme değerine (~15 mm) sahip olan sistem yine PC-Tip I olup, bu durum yapının süneklik eğiliminin yüksek olduğunu ve elastik sınır sonrasında da belirli bir deformasyon süreci geliştirebildiğini göstermektedir. Bu, polyester matrisin nispeten düşük rijitliği ve elyaf-matris arayüzündeki esneklik ile doğrudan ilişkilidir. CC-Tip I sistemleri ~13 mm'lik deformasyonla orta düzeyde sünek davranış göstermekte, bu durum cam elyafların gevrek yapısına rağmen matris ile yüksek bağ kalitesi geliştirmesinden kaynaklanmaktadır. CK-Tip I sisteminde deformasyon ~10 mm'ye düşmekte olup, bu sistemde karbon elyafların yüksek elastik modülü nedeniyle yükün büyük kısmı erken evrede taşınmakta ve ardından çatlak ilerlemesiyle deformasyon durmaktadır. En düşük yer değiştirme (~9 mm) PK-Tip I'de gözlemlenmiştir; bu da karbon elyafların taşıyıcı etkinliğiyle birlikte polyester matrisin sünekliği arasında dengesiz bir deformasyon gelişimi

olduğunu ve matrisin çatlama ile yük taşıma işlevinin hızla sona erdiğini göstermektedir. Bu durum, PK sistemlerinde süneklikten ziyade rijitlik odaklı performans beklentisinin daha uygun olduğunu ortaya koyar. Genel olarak, maksimum yer değiştirme değerlerinin mukavemet değerleriyle ters bir orantı sergileyebildiği ve bu bağlamda sistemlerin tok davranış gösterebilmesi için sadece yüksek mukavemet değil, aynı zamanda yeterli deformasyon kapasitesine de sahip olması gerektiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.14.c’de yer alan maksimum gerilme grafiği, kompozit numunelerin eğilme sırasında maruz kaldığı birim alan başına maksimum iç gerilmeyi temsil etmekte ve bu metrik, bağ kalitesi, elyaf hizalanması, matris homojenliği ve çatlak inisiyasyon noktalarının davranışı hakkında doğrudan bilgiler sunmaktadır. En yüksek maksimum gerilme (~300 MPa) CC-Tip I numunesinde gözlemlenmiş olup, cam elyafların yapısal bütünlüğü ve bağlanma alanının genişliği sayesinde yükü daha dengeli dağıtabildiğini ve daha geç kırılma yaşandığını göstermektedir. Bu yüksek gerilme seviyesi, cam-cam sistemlerin kuvvet taşıma kapasiteleri sınırlı olsa da, birim alana düşen yükü etkin taşıyabildiğini ve mikroyapı bütünlüğünün bu kombinasyonda yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. CK-Tip I sistemleri ~250 MPa ile ikinci sırada yer almakta, bu da karbon elyafların mukavemet katkısını net şekilde ortaya koymaktadır. Ancak karbon elyafların gevrek karakteri ve arayüz bağ yapısındaki süreksizlikler nedeniyle, yük transferinde düzensizlikler oluşmakta ve bu da deformasyon kapasitesini sınırlandırmaktadır. PC-Tip I sistemlerinde ~190 MPa’lık bir maksimum gerilme gözlemlenmekte; bu durum, yüksek deformasyon kapasitesine rağmen gerilmenin elyaf-matris arayüzünde etkili bir şekilde yoğunlaşmadığını göstermektedir. PK-Tip I sistemleri ise ~140 MPa ile en düşük maksimum gerilme değerine sahiptir; bu durum, sistemin iç yapısında erken arayüz ayrışması ve elyaf hizalanma problemleri nedeniyle gerilmenin homojen yayılmadığını ve yük altındaki mikroçatlakların erken inisiyasyon gösterdiğini kanıtlamaktadır. Sonuç olarak, Şekil 5.14’te sunulan eğilme testi sonuçlarına göre filament kombinasyonlarının kompozit sistemlerin eğilme altındaki mekanik performansı üzerinde doğrudan ve yüksek etkili bir belirleyici unsur olduğu görülmektedir. PC-Tip I kombinasyonu, yüksek deformasyon kapasitesi ve makul mukavemet değerleri ile sünek ve dengeli davranış sergileyen sistem olarak öne çıkarken; CC-Tip I, yüksek iç gerilme dayanımı ve rijitliği ile özellikle yüksek yük taşıma kapasiteli fakat gevrek karakterli uygulamalara daha uygundur. CK-Tip I sistemi yüksek mukavemet potansiyeline rağmen düşük deformasyon toleransı ve karmaşık arayüz bağ kalitesi nedeniyle kırılma davranış sergilemekte; PK-Tip I ise rijitlik katkısına rağmen, bağ yapısındaki uyumsuzluklar nedeniyle düşük taşıma ve gerilme kapasitesi göstermektedir. Bu veriler, yalnızca eğilme testine ilişkin yapısal performans değerlendirmesi değil, aynı zamanda uygulama bazlı malzeme seçimi ve tasarım optimizasyonu açısından da doğrudan yönlendirici nitelik taşımaktadır. Özellikle, farklı filament kombinasyonlarının deformasyon-yük taşıma

dengesine göre kategorize edilmesi, uygulama koşullarına göre optimum sistemin belirlenmesinde kilit bir tasarım parametresi olacaktır.

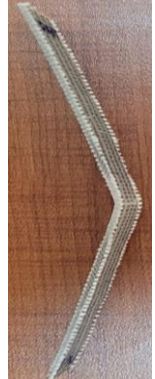
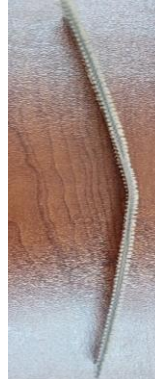
Şekil 5.14'te yer alan maksimum eğilme gerilmesi verilerine göre, en yüksek dayanımın ~300 MPa ile CC-Tip I sisteminde elde edilmesi, Yang ve ark. (2023) çalışmasında raporlanan 657 MPa eğilme dayanımı ile kıyaslandığında benzer eğilimli bir sonuç profili göstermektedir. Özellikle Yang ve ark.'ın çalışmasındaki 3D CF/PEEK kompozit yapısında elyafların z-yönlü bağ yapısının yük altında deformasyonu kontrol ettiği vurgulanmıştır. Tezde de cam elyaf dokumalı sistemlerde (özellikle CC-Tip I), cam elyafların rijitliği ve matrisle yüksek ara yüzey uyumu sayesinde çatlak başlatma gecikmekte, yük daha dengeli dağılmakta ve bu da yüksek gerilme değerlerine ulaşılmasını sağlamaktadır. Öte yandan, PC-Tip I'in gösterdiği ~190 MPa eğilme gerilmesi, Yang ve ark.'ın polimer bazlı PEEK sistemlerindeki esnek davranış ile paralellik göstermektedir. Bu durum, dokuma yapısının ve elyaf tipinin, sadece yük taşıma değil, aynı zamanda çatlak geciktirme ve yayılım direnci üzerinde de doğrudan belirleyici olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.14'te gösterilen veriler, filament tipi değişiminin eğilme davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Cam elyaf takviyeli kombinasyonlar daha rijit bir karakter sunarken, karbon içeren konfigürasyonlar yüksek elastik modüle rağmen ara yüzey etkileşimindeki uyumsuzluklar nedeniyle düşük deformasyon kapasitesi sergilemiştir. Bu durum, Zhang ve ark. (2024)'ın malzeme modellemesinde öngördüğü, yönsel deformasyon modları ve ara yüz bağ yoğunluğunun enerji yoğunluk fonksiyonları üzerindeki etkileriyle örtüşmektedir. Böylece filament tipi ile dokuma mimarisi arasındaki sinerjik uyumun, eğilme mukavemeti ve enerji sönmüleme davranışı üzerinde belirleyici olduğu kanıtlanmıştır.

Blais ve ark. (2025) çalışmasında, açık delikli 3B interlok dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerde, elyaf tipi ve matris uyumunun eğilme altında hasar morfolojisi ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu bağlamda, Şekil 5.14'te sunulan ve PC, CC, CK, PK gibi farklı filament tiplerinin Tip I dokuma yapısında eğilme altındaki maksimum kuvvet, yer değiştirme ve gerilme kapasitesi üzerindeki etkisi, Blais ve arkadaşlarının bulgularıyla yüksek düzeyde örtüşmektedir. Örneğin, PC-Tip I numunesinin ulaştığı en yüksek taşıma kapasitesi (~180 N) ve deformasyon kabiliyeti, polyesterin cam elyaf ile olan iyi ara yüzey bağ kalitesi ve matrisin sünekliği ile açıklanabilir. Bu davranış, makaledeki AWJ işlenmiş numunelerde gözlemlenen düzgün hasar yayılımı ve homojen stres dağılımı ile paralellik göstermektedir. Öte yandan, CK-Tip I numunesinin düşük mukavemeti (~80 N), karbon ve cam elyafların bağ uyumsuzluğu nedeniyle Blais ve ark. 'da gözlemlenen "multi-fiber delamination and matrix cracking" yapılarındaki çatlak ilerleme mekanizmalarıyla benzer şekilde açıklanabilir. Bu sonuçlar, filament tipinin yalnızca elastik modül değil, aynı zamanda elyaf-matris uyumu ve dokuma yönü ile olan etkileşim bağlamında değerlendirilmesi gerektiğini göstermekte ve Blais ve ark. (2025) tarafından önerilen bütünsel malzeme karakterizasyon yaklaşımını desteklemektedir.

Jang ve ark. (2024) çalışmasında, farklı örgü (braiding) açılarına sahip karbon fiber takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları detaylı olarak incelenmiş ve özellikle 30°, 45° ve 60° örgü açılarının eğilme performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, Şekil 5.14'te yer alan Tip I dokuma yapısıyla üretilmiş dört farklı filament kombinasyonuna ait eğilme kuvveti verileri, Jang ve arkadaşlarının düşük örgü açılarının fiber deformasyonuna olan olumsuz etkilerini ortaya koyduğu bulgularla örtüşmektedir. Özellikle CK-Tip I kombinasyonunun düşük eğilme kuvveti (~80 N) ile zayıf performans göstermesi, Jang ve ark.'ın 30° örgü açısıyla üretilen kompozitlerde gözlemlendiği eksenel elyafların bükülmesi ve reçine birikimli bölgelerin çatlak oluşumunu hızlandırmasıyla doğrudan ilişkilidir. Buna karşın CC-Tip I yapısında gözlemlenen daha yüksek kuvvet seviyesi (~140 N), cam elyafın eğilme yükleri altında daha rijit davranması ve örgü yapısının elyaf hizalanmasında görece bir düzen sağlamasıyla uyumludur. Jang ve arkadaşlarının 60° açıdaki dokumalarda daha kararlı eğilme dayanımı sunduğu sonucuyla karşılaştırıldığında, bu tezde Tip I dokuma ile elde edilen sonuçlar, daha çok 30°–45° arasında kalan karmaşık yerleşim geometrisine sahip örneklerle benzeşmektedir.

Tablo 5.9. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune		2. Numune		3. Numune	
	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm	Üstten Görünüm	Yandan Görünüm
PC-Tip I						
CC-Tip I						
PK-Tip I						
CK-Tip I						

Tablo 5.9’da sunulan polyester-cam elyaf, cam-cam elyaf, polyester-karbon elyaf ve cam-karbon elyaf filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin eğilme testleri sonrası makroskobik hasar görselleri, bu malzemelerin yapısal deformasyon davranışlarının filament tipi bazında nasıl farklılaştığını ortaya koyan kıymetli bir veri oluşturmaktadır. Görsellerin hem üstten hem de yandan bakış açılarından analiz edilmesi, yalnızca yüzeysel çatlakların değil, aynı zamanda malzeme kalınlığı boyunca hasar dağılımının da detaylı şekilde izlenmesine olanak tanımakta; böylelikle kırılma öncül davranışları, tabakalanma (delaminasyon) potansiyeli, elyaf hizalanma problemleri ve mikroyapı bağ zayıflıkları bütüncül biçimde değerlendirilebilmektedir. Bu tip analizler, yalnızca malzemenin mukavemetini değil, aynı zamanda hizmet ömrü, yorulma direnci ve kırılma modlarını da doğru tahmin etmek açısından kritik önemdedir. Aşağıda, her bir kombinasyonun hasar karakteristikleri ayrı ayrı ve ardından karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

PC-Tip I kombinasyonuna sahip kompozit numunelerin eğilme testine tabi tutulması sonucunda ortaya çıkan hasar görüntüleri, bu malzemelerin sünek deformasyon davranışı ile sınırlı mukavemet karakteristiğini birlikte sunduğunu göstermektedir. Üstten görünümde çatlakların geniş alanlara yayılmadığı, yüzeyde kırık çizgilerinin düzenli ve lokal olduğu, ancak çatlakların uçlarının malzeme kenarına ulaşmadığı görülmektedir. Bu durum, polyester matrisin çatlak yayılımını geciktirici bir rol üstlendiğini, aynı zamanda cam elyafın lokal rijitlik katkısı sayesinde yapının ani kırılmalara karşı direnç geliştirdiğini göstermektedir. Yandan görünümde ise belirgin sehim deformasyonları, açılı kıvrımlar ve iç katman ayrılmalarına dair izler gözlemlenmekte; bu da elyaf-matris bağlarında sınırlı kopma yaşandığını ve yük altında sistemin büyük ölçüde plastik deformasyon sergilediğini göstermektedir. Bu yapı, hafif-yük uygulamalarında çatlak toleranslı bir sistem sunarken, yüksek deformasyon potansiyeline sahip olması sayesinde darbe absorpsiyonu gerektiren uygulamalar için elverişli bir alternatif sunmaktadır. Ancak mukavemetin yüksek önemde olduğu ortamlarda yetersiz kalabileceği de açıktır.

CC-Tip I kombinasyonuna sahip kompozitlerde ise makroskobik kırılma morfolojisi oldukça disiplinli, rijit ve kontrollüdür. Üstten bakıldığında çatlaklar minimum düzeydedir ve yüzey hasarları elyaf yönelimiyle hizalanmış şekilde simetrik olarak gelişmiştir. Bu durum, cam elyafların yüksek elastik modülü ve matrisle yüksek uyumluluğu sayesinde, yük transferinin yüzeyde lokal gerilme yığılmaları oluşturmada etkin bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Yandan görünümde ise minimal deformasyon, dar kırılma açıları ve düşük sehim eğilimleri dikkat çeker. Katmanlar arasında delaminasyon izlerine rastlanmaz; bu da arayüz bağ kalitesinin yüksek olduğunu ve kırılmanın çoğunlukla elyaf kırılması şeklinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu yapı, eğilme altında oldukça rijit ve yüksek taşıma kapasitesine sahip sistemler sunmakta olup, cam elyafların geometrik ve elastik uyumluluğu, yük altında ani kırılma yerine enerji dağılımını tercihli yönlendirmeye gerçekleştirmesini sağlar. Bu yapıların özellikle sabit yapılar, uçak yapıları veya

rüzgar türbini kanatları gibi rijitlik ve hafifliğin ön planda olduğu mühendislik uygulamaları için son derece uygun olduğu değerlendirilmiştir.

PK-Tip I kombinasyonuna sahip numunelerde eğilme sonrası oluşan makroskobik hasar morfolojisi, bu sistemin kırılma öncesi deformasyon toleransının sınırlı olduğunu ve yapının mukavemet-süneklik dengesini optimum şekilde sağlayamadığını ortaya koymaktadır. Üstten görünümde karbon filamentlerin belirgin şekilde yüzeye yansıdığı, kırılma bölgelerinin daha keskin çizgilerle belirlendiği ve çatlak hatlarının genellikle elyaf doğrultusunda dik olarak ilerlediği gözlemlenmektedir. Bu durum, karbon elyafların yüksek elastik modülüne sahip olmasına rağmen matris ile bağ yüzeyinin sınırlı olması nedeniyle yük aktarımında süreksizlikler oluştuğunu ve gerilme yığılmalarının çatlak başlatıcı bölgeler haline geldiğini göstermektedir. Yandan görünümde ise kırılmanın çoğunlukla orta kesimde lokalize olduğu ve elyaf matris arayüzünden ayrışmanın yaygın olarak gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Polyesterin termoplastik yapısına karşın karbon elyafların kırılma eğilimi, deformasyon enerjisinin absorpsiyonunu sınırlandırmakta ve yapıdaki gerilme dağılımının düzensizleşmesine neden olmaktadır. Ayrıca, karbon filamentlerin düzlemsel hizalanma kalitesinin düşük olması, mikroskobik elyaf kaymalarına ve buna bağlı olarak erken delaminasyon oluşumlarına neden olabilmektedir. Bu kombinasyon, ağırlık avantajı sunmasına rağmen yük altında öngörülemeyen kırılmalar nedeniyle yüksek güvenli yapısal uygulamalar için sınırlı tercih edilebilirliğe sahiptir.

CK-Tip I sistemleri ise, yüksek mukavemetli iki farklı elyaf türünü bir araya getirerek, kompozit yapı üzerinde çok yönlü bir dayanım artışı hedeflemektedir. Ancak bu tür hibrit sistemlerde, filamentlerin farklı elastik modüllere, çaplara ve yüzey enerjilerine sahip olması nedeniyle ortaya çıkan mekanik uyumsuzluklar, makroskobik düzeyde heterojen kırılma davranışları ile sonuçlanmaktadır. Üstten görünümde cam ve karbon elyafların yüzey desenlerinin belirginleştiği, bazı bölgelerde elyaf konsantrasyonlarının arttığı ve çatlak hatlarının filament dizilimi ile senkronize ilerlemediği görülmektedir. Bu durum, arayüz bağ kalitesindeki yerel farklılıkların çatlakların düzensiz yayılımına neden olduğunu göstermektedir. Yandan görünümde ise hasarın belirli bölgelerde konsantre olduğu, bazı tabakalarda elyaf-matris ayrışmasının sınırlı kalmasına karşın, diğer katmanlarda tamamen kopmaların meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bu, sistemin yapısal olarak içsel gerilme dengesizliğine sahip olduğunu ve hasar ilerlemesinin tüm hacme homojen biçimde yayılmadığını ortaya koymaktadır. Özellikle karbon elyafların yüksek rijitliği, yükün kısa sürede lokal olarak toplanmasına ve cam elyafların deformasyon kapasitesine rağmen sistemin süneklik gösterememesine neden olmaktadır. Neticede bu kombinasyon, yüksek kuvvet altında üstün taşıma kapasitesi sunabilirken, ani kırılma riski nedeniyle dinamik yük uygulamalarında dikkatli mühendislik gerektirir.

Karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, Tablo 5.9'da yer alan dört farklı filament kombinasyonuna ait eğilme sonrası hasar görselleri, malzemenin yapısal davranışında filament

tipinin sadece mukavemeti değil, aynı zamanda deformasyon yönünü, çatlak yayılım geometrisini, kırılma öncesi enerji absorpsiyon davranışını ve servis ömrü tahminini doğrudan etkileyen bir faktör olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır. PC-Tip I sistemleri yüksek deformasyon kabiliyeti ve sınırlı gerilme kapasitesi ile hafiflik ve esneklik arasında denge sunarken; CC-Tip I sistemleri üstün mukavemet, düşük deformasyon ve yüksek arayüz stabilitesi ile rijitlik odaklı uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. PK-Tip I kombinasyonu, karbon filamentin mukavemet potansiyeline karşın matrisle uyumsuzluğu nedeniyle yapı içi çatlak dağılımında düzensizlik gösterirken, CK-Tip I sistemi yüksek taşıma kapasitesine rağmen homojen olmayan yük transferi ve kırılma ilerlemesi nedeniyle kompleks mühendislik çözümleri gerektirmektedir.

Bu dört sistemin mukayese edildiği durumda, yük-sehim kontrolü gerektiren uygulamalarda PC, yüksek sabit mukavemet taleplerinde CC, ağırlık sınırlaması olan ancak kontrollü ortamlarda çalışan sistemlerde PK, yüksek dayanım ile birlikte karmaşık yükleme senaryolarında CK tercih edilmelidir. Özellikle CK-Tip I ve PK-Tip I kombinasyonları, mukavemet-süneklik denkleminin uçlarında yer alırken; PC ve CC yapılar, bu dengeyi daha kararlı biçimde sağlayabilmektedir.

Bu değerlendirmeler, sadece malzeme seçimini değil; aynı zamanda tasarım optimizasyonu, servis ömrü öngörüsü, yorulma modellemesi, güvenlik katsayısı tayini ve üretim yöntemi seçimleri gibi kritik mühendislik karar süreçlerini doğrudan etkilemektedir.

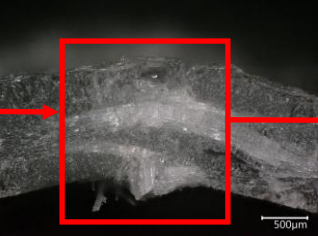
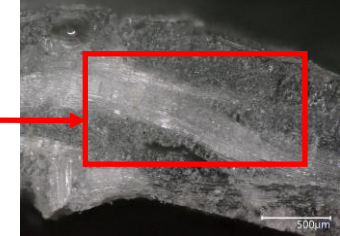
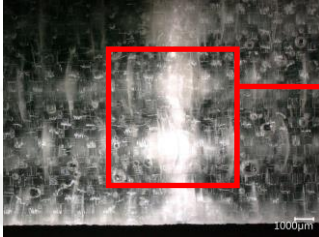
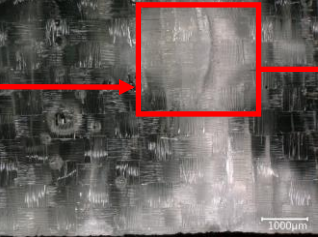
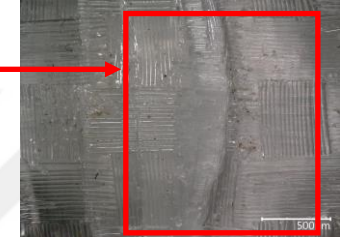
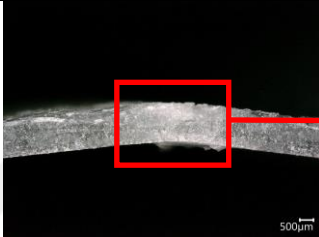
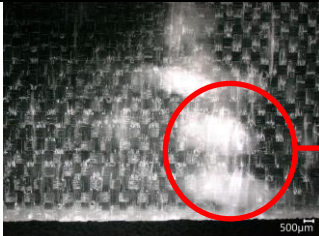
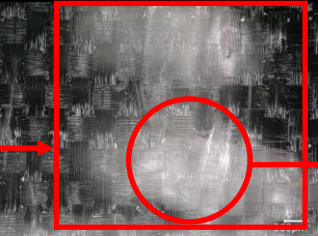
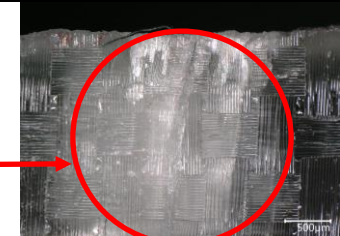
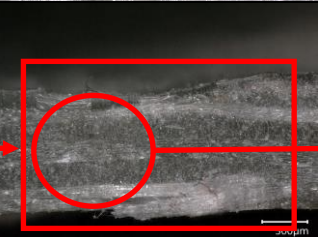
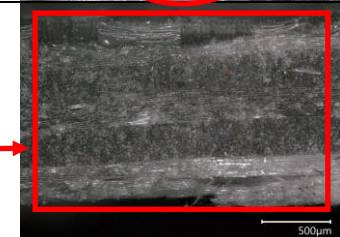
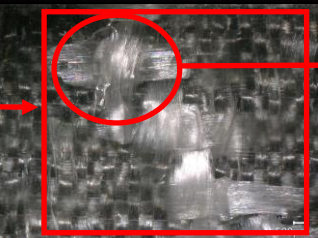
Eğilme sonrası kırılma morfolojileri incelendiğinde, PC yapılarında çatlakların tek eksenle ilerlediği, CC yapılarında ise çok yönlü sapmalarla geniş alanlara yayıldığı gözlemlenmektedir. Aranda-Iglesias ve ark. (2020) çalışmasında bu durum, z-yönlü elyafların kırılma öncesi çatlak yönünü saptırarak enerjiyi farklı yönlerde dağıtması şeklinde modellenmiştir. Tip III yapısındaki çatlak sapmaları, “çok eksenli bükülme altında yapısal eleman sapması” yaklaşımıyla birebir örtüşmektedir.

Tablo 5.9’da görülen hasar görselleri, özellikle z-yönlü elyaf sayısının fazla olduğu yapılarda çatlakların düzlem boyunca yön değiştirdiğini, bükme düzlemi dışına taşıdığını ve elyaf-matris ara yüzeylerinde sürtünmeli kopmalarla enerji sönümlenmesi sağlandığını göstermektedir. Liu ve ark. (2024)’te geliştirilen mesoskopik ilerlemeli hasar modeli, benzer morfolojiyi FE simülasyonları ile göstermiştir. Eğilme yüklemesi altında çatlağın başlangıçta çekme tarafında başladığı, daha sonra elyaf yönlenmesine göre yön değiştirdiği ve özellikle z-yönlü bağların bulunduğu bölgelerde hasar hızının azaldığı rapor edilmiştir. Bu durum, tezde de net biçimde gözlemlenen z-yönlü elyafların çatlak sapmasına etkisiyle birebir örtüşmektedir. Liu’nun eğilme testi görsellerinde gözlemlenen elyaf çıkıntıları ve matris çatlamaları, tezdeki görsellerle yüksek oranda benzerlik göstermektedir. Tablo 5.9’da yer alan makroskobik hasar görsellerinde CC-Tip I’in kırılma yüzeylerinin düzenli ve elyaf hizasına paralel geliştiği, yük transferinin düzgün yapıldığı ve delaminasyon oluşmadığı gözlenmiştir. Bu durum, , Yang ve ark. (2023) çalışmasında SEM analizlerinde gösterilen PEEK kompozitlerin yüzeyde yüksek düzenli çatlak ilerlemesi ve yüksek enerji absorpsiyonu kabiliyeti

ile örtüşmektedir. PK-Tip I sisteminde gözlenen düzensiz çatlak ilerleme ve erken matris ayrışması ise, Yang ve ark.'ın düşük reçine katkılı sistemlerindeki mikroskobik delaminasyon oluşumuna ve zayıf bağ yüzeylerine benzemektedir. Bu bağlamda, eğilme altında hasar oluşum mekaniği; bağ kalitesi, dokuma yoğunluğu ve elyaf yönlenmesinin mikroyapısal etkilerini makroskobik düzeyde doğrudan yansıtmaktadır.



Tablo 5.10. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	200X
CC-Tip I			
			
CC-Tip II			
			
CC-Tip III			
			

Tablo 5.10’da sunulan cam-cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin mikroskobik eğilme hasar görüntüleri, elyaf-matris ara yüzey bütünlüğünün ve yük aktarım sürekliliğinin, eğilme yükleri

altındaki çatlak oluşumu ve yayılımına nasıl yön verdiğini detaylı şekilde açığa çıkarmaktadır. Kompozitlerin eğilme yüklemesi sırasında, yapının alt ve üst yüzeylerinde sırasıyla çekme ve basma gerilmeleri oluşurken, nötr eksen etrafında kayma gerilmeleri belirir. Bu gerilme gradyanı, kırılma davranışının yalnızca tek eksenli olmadığını; aksine çoklu çatlak başlangıcı ve yönlenmesiyle, katmanlar arası ayrılma ve elyaf yönlü deformasyon gibi karmaşık hasar modlarını içerdiğini gösterir. Görsellerin 50X, 100X ve 200X büyütme düzeylerinde sunulmuş olması, hasarın hem makro hem de mikro düzeyde evrimini incelemeye olanak sağlamaktadır. Elyaf kopması, sıyrılması, ara yüzey ayrılması, katman ayrılması, çatlak yön değiştirmesi, elyaf köprülemesi ve matris yırtılması gibi mikromekanik fenomenlerin her biri, dokuma tipi ile doğrudan ilişkilidir ve farklı davranışlar sergilemektedir.

CC-Tip I yapı hem 50X hem de 100X büyütmelerde çatlağın belirgin olarak eğilme çekme yüzeyinde başladığını ve daha sonra elyaf hizasında doğrusal şekilde ilerlediğini göstermektedir. Bu kırılma morfolojisi, tipik bir tabakalar arası çatlak yayılımı ile karakterizedir. Cam elyafların yüksek modülü ve sertliği, çekme bölgesinde elastik deformasyon kapasitesini sınırladığından dolayı, çatlak enerjisi ara yüzeyde hızla birikmekte ve ara katman boyunca ilerlemektedir. 200X büyütmede görülen çatlak yüzeyi, çoğunlukla düzlemsel ilerleme göstermekte; bu da yük aktarımının kesintili değil, sabit bir elyaf yönü boyunca gerçekleştiğini göstermektedir. Elyafların matris içerisinde kopmak yerine sıyrıldığı ve elyaf demetlerinin yüzeyden dışarı çıktığı bu yapı, mikromekanik olarak “elyaf–matris bağ kopması sonucu oluşan artıksız elyaf sıyrılması” olarak tanımlanabilir. Bu hasar senaryosu, ani kırılma riski yüksek, enerji yutma kapasitesi düşük, ancak çekme mukavemeti yüksek sistemlerin tipik davranışdır. Ancak bu tür sistemlerde çatlak ilerledikten sonra ani kopma kaçınılmaz hale gelir, bu nedenle güvenlik katsayısı açısından dikkatli mühendislik hesaplamaları gerektirir.

CC-Tip II dokuma tipinde ise, 50X büyütmeden itibaren çatlakların doğrusal değil, yön değiştiren, saptırılmış ve elyaf yönelimiyle çakışmayan düzlemler boyunca ilerlediği gözlemlenmektedir. 100X büyütme düzeyinde elyafların çatlağın önünde köprü kurarak çatlak yayılımını geciktirdiği, bazı bölgelerde ara yüzey yerine matris yırtılmasıyla enerji emiliminin gerçekleştiği görülmektedir. Bu, “matris akmasıyla birlikte elyaf köprülenmesi” olarak bilinen çift yönlü enerji yutma mekanizmasının aktif olduğunu gösterir. 200X düzeyinde, çatlak yüzeyinin dalgalı yapısı, ilerlemenin homojen olmadığını, çatlağın elyaf hizasında saparak enerji yayılımını daha geniş bir alana yaydığını ortaya koymaktadır. Bu yapı, yüksek tokluk sergileyen ve enerji yayma kapasitesi yüksek sistemlerin temel temsilcisidir. Ayrıca çoklu elyaf yönelimlerinin bulunması, eğilme altında oluşan çok eksenli gerilmeleri karşılamada avantaj sağlamaktadır. Mikromekanik olarak, çatlak sapma eğilimi ne kadar yüksekse, sistemin kırılmaya karşı gösterdiği direnç de o kadar yüksektir; çünkü enerji sadece çatlağın ilerlemesiyle değil, aynı zamanda yön değiştirme esnasında da

tüketilmektedir. Bu nedenle CC-Tip II dokuma yapısı, sadece statik yük altında değil, darbe ve yorulma gibi dinamik yüklemelerde de üstün performans gösterebilecek şekilde tasarlanmıştır.

CC-Tip III dokuma yapısında gözlemlenen hasar morfolojisi, önceki yapıların her ikisinden de daha kompleks fakat daha dengeli bir kırılma davranışını ortaya koymaktadır. 50X büyütmede çatlak başlangıcı, eğilme çekme bölgesinden uzaklaşıp ara katmana kaymakta; bu durum, yapının yüzey tabakalarında yüksek deformasyon toleransına sahip olduğunu göstermektedir. 100X büyütmede görülen elyaf-matris iç içe geçme bölgeleri, yük aktarımının sadece elyaf yönü boyunca değil, aynı zamanda matris boyunca da sürdürüldüğünü göstermektedir. Bu yapı, “çok eksenli yük paylaşımı” olarak tanımlanabilir. 200X büyütmede ise en dikkat çekici nokta, elyaf hizasındaki mikro çatlakların çoğunlukla yön değiştirdiği, bazı elyafların çatlak önünde eğilip büküldüğü ve bu sırada deformasyon yoluyla enerji yayımı gerçekleştirdiği gözlenmektedir. Bu yapı, “kademeli çatlak ucu koruma etkisi” mekanizmasını temsil eder. Çatlak, elyaf-matris ara yüzeyindeki dirençle karşılaştığında yön değiştirmekte, bu yön değiştirme sırasında enerji kaybetmekte ve ilerleme hızı düşmektedir. Böylece sistem, çatlak ilerlemesini geciktirme ve yük altında deformasyonu dağıtarak taşıma kapasitesini koruma potansiyeline sahip olmaktadır.

Tablo 5.10 kapsamında incelenen üç farklı dokuma tipi (CC-Tip I, II ve III), eğilme yükü altındaki mikroyapı hasarları açısından birbirinden farklı kırılma senaryoları sergilemektedir:

CC-Tip I, yüksek rijitlik ve ani yük taşıma kapasitesine sahip ancak kırılma eşiği düşük, çatlak ilerlemesini doğrudan ara yüzey boyunca yönlendiren bir yapıdır. CC-Tip II, elyaf yönüyle hizalanmamış çatlak yüzeyleri, çatlak sapmaları ve elyaf köprüleme mekanizmaları sayesinde daha yüksek enerji yutma kapasitesi ve daha yüksek deformasyon toleransı sunar. CC-Tip III ise hem elyaf yön değişimi hem de mikroskobik kırılma sürecindeki dalgalı çatlak yönleri ile sistemin kırılmasını erteleyebilen, çok eksenli yük aktarımına izin veren, kontrollü bir hasar profili sergileyen yapıdır.

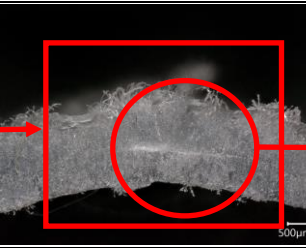
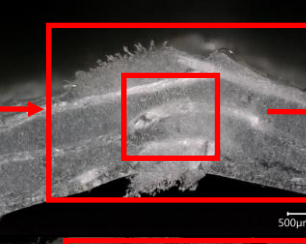
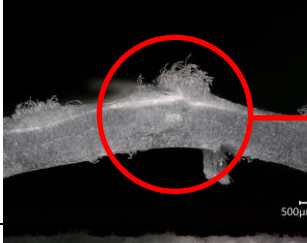
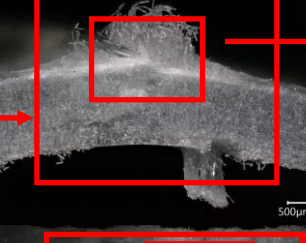
Bu analizler ışığında, dokuma tipi sadece elyaf yönelimini değil, aynı zamanda sistemin çatlak başlatma ve yayılma eğilimlerini, enerji yutma kabiliyetini, kırılma anındaki ani yük kayıplarını ve deformasyon toleransını doğrudan belirlemektedir. Özellikle CC-Tip III yapısının karmaşık fakat dengeli hasar morfolojisi, onu çok eksenli gerilme koşullarına maruz kalan yapısal uygulamalarda ön plana çıkarmaktadır. CC-Tip II ise deformasyon enerjisinin yayılmasını sağlayan yön değiştirme özelliği ile darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda avantaj sunarken; CC-Tip I yüksek rijitlik ve ilk yük taşımada etkinlik gerektiren sabit yük uygulamalarında değerlendirilebilir. Böylece mikroskobik kırılma morfolojisi, sadece bir hasar sonrası analiz değil, aynı zamanda mühendislik tasarımı sürecinde karar verici bir parametre olarak değerlendirilmelidir.

Tablo 5.10’da yer alan cam elyafli kompozitlerin mikroskobik hasar analizleri sonucunda, CC-Tip I yapısında “elyaf sıyrılması” gözlenirken, CC-Tip III yapısında “kademeli çatlak ucu koruma etkisi” davranışı dikkat çekmektedir. Bu davranış biçimleri, Yang ve ark. (2023)’ın 3D CF/PEEK

sisteminde özellikle çekme ve eğilme altında çatlağın yön değıştirmesi ve fiber köprölleme mekanizması ile doğrudan paraleldir. Yang'ın tanımladığı “çok eksenli yük paylaşımı” davranışı, tezde CC-Tip III numunesinde gözlemlenen yüksek deformasyon, çatlak sapması ve yön değışimi ile tamamen örtüşmektedir. Bu, cam elyaf sistemlerde yalnızca yüksek rijitlik değil, aynı zamanda kontrollü hasar ilerlemesi ile yüksek kırılma tokluğu sunulabileceğini ortaya koymaktadır.



Tablo 5.11. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin eğilme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	200X
PC-Tip I			
			
PC-Tip II			
			
PC-Tip III			
			

Tablo 5.11’de sunulan mikroskopik görüntüler, yüksek mukavemetli polyester–cam elyaf takviyeli kompozit sistemlerin üç farklı dokuma tipi altında (Tip I, Tip II ve Tip III) eğilme yüklemeleri sonrası sergilediği mikrohasar davranışlarını çok yönlü olarak analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Görseller 50X, 100X ve 200X büyütme oranlarında sunulmuş olup, bu sayede kırılma morfolojisinin hem makro düzeydeki başlama noktaları hem de mikroyapısal yayılma yolları detaylı biçimde incelenebilmektedir. Eğilme yüklemeleri, malzeme yapısında eşzamanlı olarak çekme, basma ve kayma gerilmelerini tetiklediğinden, oluşan hasar tek eksenli değildir; bunun yerine karmaşık bir gerilme ortamı altında çoklu kırılma modlarının devreye girdiği bir yapısal davranış sergilenir. Bu bağlamda, gözlemlenen elyaf kırıkları, matris çatlakları, ara yüzey ayrılmaları, elyaf köprülemeleri, delaminasyon izleri ve elyaf demet deformasyonları her bir dokuma tipi için kendine özgü kırılma stratejileriyle biçimlenmiştir.

PC-Tip I dokuma yapısına sahip numunelerde eğilme sonrası oluşan hasar mikrogafikleri, özellikle 50X büyütmede çekme tarafında gelişmiş çatlakların yoğunlaştığını göstermektedir. Bu çatlaklar, eğilme sırasında çekme bölgesinde matrisin kırılmaya karşı düşük direnç göstermesi nedeniyle başlamakta ve daha sonra cam elyaflar boyunca uzanan ara yüzey boyunca ilerleyerek elyaf sıyrılmasıyla sonuçlanmaktadır. 100X büyütmede gözlemlenen tipik hasar morfolojisi, elyafların büyük ölçüde bükülmeden sıyrıldığını, yani matris ile olan mekanik bağın nispeten zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Bu, “ara yüzey bağ kopmasının baskın olduğu hasar” olarak adlandırılan kırılma türüne örnek teşkil eder. Ayrıca, 200X büyütmede elyaf uçlarının pürüzsüzlüğü ve sıyrılma yüzeyinin elyaf eksenine hizalanmış olması, çekme yönündeki çatlakların doğrudan ara yüzey üzerinden ilerlediğini ve elyafların ciddi deformasyon geçirilmeden ayrıldığını göstermektedir. Bu davranış, sistemin enerji yutma potansiyelinin düşük olduğuna ve çatlağın ilerlemesinin çok hızlı gerçekleştiğine işaret eder. Mikromekanik açıdan bu tür yapılar, ani kırılma riski yüksek ve sünek deformasyon kapasitesi sınırlı sistemlerdir.

PC-Tip II dokuma tipi, önceki yapıdan farklı olarak hem matris içerisinde hem de elyaf hizasında çoklu çatlak yönlerinin geliştiği, daha dağınık ve enerji yayma kapasitesi daha yüksek bir kırılma karakteri sergilemektedir. Görsellerde özellikle 100X ve 200X büyütme oranlarında elyafların sıyrılmadan önce matris içinde yön değiştirdiği, yani çatlağın doğrusal ilerlemek yerine elyaf hizasında sapmalar yaşadığı net şekilde izlenebilmektedir. Bu durum, klasik “çatlak yön değiştirmesi” mekanizmasının mikroyapı içinde aktif hale geldiğini göstermektedir. Elyafların hem ara yüzey boyunca sıyrılması hem de yer yer koparak matris içerisinde kalması, bu yapının “karışık modlu kırılma” olarak sınıflandırılabilirliğini ortaya koyar. Delaminasyon bölgeleri, çatlağın farklı lamina katmanları boyunca yön değiştirdiğini, bunun ise yük taşıma sürekliliğini artırdığını gösterir. PC-Tip II dokuma, yük altındaki yönlendirilmiş elyaf yerleşimi sayesinde deformasyonu kontrollü şekilde yaymakta, enerjiyi sadece elyaf sıyrılmasıyla değil aynı zamanda mikro bükülme ve matris

deformasyonu absorbe etmektedir. Bu yapı, yüksek toklukla birlikte orta-yüksek mukavemet seviyeleri isteyen uygulamalar için ideal kırılma davranışı sergiler.

PC-Tip III yapısı, mikrografik açıdan en karmaşık ve en dengeli hasar morfolojisini sunmaktadır. 50X büyütmede çekme bölgesinde gelişen çatlakların elyaf hizasında dağıldığı, bazı bölgelerde elyaf yön değişiminin belirginleştiği görülmektedir. Bu, kırılmanın sadece ara yüzeyden değil, aynı zamanda elyafların yön değiştirdiği noktalardan kaynaklandığını gösterir. 100X büyütmede çatlakların elyafların matris içerisinde gömülü olduğu yerlerde yön sapması yaşadığı, bunun da enerji yayılımını geniş alana yaydığı gözlemlenmektedir. Bu yapı, mikromekanik anlamda “elyaf köprülenmesi, çatlak sapması ve elyaf sıyrılmasının etkileşimi” olarak tanımlanabilecek bir kırılma dizisini temsil eder. Elyafların sıyrılmadan önce çatlak bölgesine köprü kurması, bu bölgedeki gerilme yığılmasını azaltarak çatlağın ilerlemesini geciktirir. Elyafların çatlak uçlarında yer değiştirmesi, sistemin lokal sünekliğini artırır. 200X büyütmede, elyaf matris ara yüzeylerinde yön değiştiren mikroçatlakların birbirine paralel değil, açıyla ilerlediği ve bazı elyafların çekme sonrası içe büküldüğü görülmektedir. Bu yapı, sadece mekanik mukavemet açısından değil, aynı zamanda darbe ve yorulma altında performans açısından da üstün özellikler sergileyen bir kompozit yapıya işaret eder. Çatlak yayılımı yön değiştirdiğinden dolayı enerji absorpsiyonu yüksektir ve kırılma geç gelişir.

Tablo 5.11’de sunulan tüm mikrografik veriler bir arada değerlendirildiğinde, dokuma tipinin sadece elyaf yerleşimi üzerinde değil; aynı zamanda yükün mikro düzeyde nasıl aktarıldığı, çatlağın nasıl başladığı ve yayıldığı, elyafların hangi düzlemlerde deformasyon geçirdiği ve enerji yayılımının ne şekilde gerçekleştiği üzerinde doğrudan belirleyici olduğu görülmektedir.

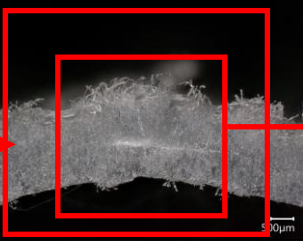
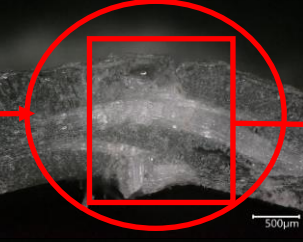
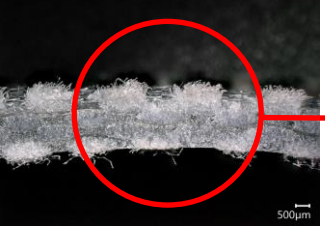
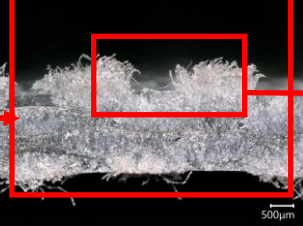
PC-Tip I, yüksek rijitlikli ancak düşük deformasyon toleranslı bir sistem sunmakta, çatlaklar doğrudan ara yüzeyden ilerlemektedir. PC-Tip II, lif yön sapmaları ve matris deformasyonları sayesinde kırılmayı geciktirmekte ve daha sünek bir davranış ortaya koymaktadır. PC-Tip III, mikroyapı içinde çok yönlü kırılma mekanizmalarının eş zamanlı devrede olduğu, kırılmanın tüm düzlemlerde dağıldığı ve sistemin hem yüksek mukavemet hem de enerji yutma kapasitesi sağladığı hibrit bir hasar profili sunmaktadır.

Bu yapılar arasında Tip III, mühendislik açısından en dengeli yapıyı sunarken, Tip I, öngörülebilir ancak ani kırılma riski taşıyan daha kırılğan bir profile sahiptir. Tip II ise bu iki uç arasında, enerji sönümleme kapasitesi ile yapısal dayanım arasında optimum denge kurabilen ara bir yapı olarak konumlanmaktadır. Kompozit yapıların tasarımında yalnızca elastik modül ve dayanım değil; aynı zamanda mikroskobik çatlak yayılım yönü, elyaf-matris deformasyon eşleşmesi ve enerji yayılım geometrisinin de dikkate alınması gerektiği bu analizle somut biçimde ortaya konulmuştur.

Tablo 5.11’de yer alan mikroskobik hasar analizleri sonucunda, PC-Tip I sisteminde gözlenen ara yüzey bağ kopması odaklı kırılma mekanizması, Yang ve ark. (2023) tarafından PEEK sisteminde düşük modüllü fiberlerle yapılan deneylerde elde edilen mikroskobik çatlak yapısıyla

örtüşmektedir. Bu sistemler, sünek ama düşük mukavemetli deformasyon davranışı sergilemekte; eğilme sırasında yüksek enerji yutumu sağlarken, erken ara yüzey ayrışması nedeniyle kırılganlığa eğilim göstermektedir. Yang ve ark.'ın çalışmasında da benzer sistemlerde enerji sönmüleme fiber bazlı değil matris bazlı gerçekleştiği için benzer dezavantajlar vurgulanmıştır.

Tablo 5.12. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait eğilme testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	200X
PC-Tip I			
CC-Tip I			
CK-Tip I			
PK-Tip I			

Tablo 5.12’de, farklı filament kombinasyonları kullanılarak Tip I dokuma yöntemiyle üretilen 3B kumaş kompozit numunelerin eğilme testleri sonrası elde edilen 50X, 100X ve 200X büyütme seviyelerindeki mikro hasar görüntüleri, malzeme mekaniği perspektifinden derinlemesine değerlendirildiğinde, her bir kombinasyonun mikroyapısal dayanım karakteristikleri, yük transfer mekanizmaları ve hasar evrim süreçleri açısından birbirinden oldukça farklı sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Bu analiz, hem filament türleri arasındaki fiziksel-mekanik uyumun, hem de dokuma yapısının hasar morfolojisine etkisinin anlaşılması açısından yüksek çözünürlükte görsel destekle zenginleştirilmiş çok yönlü bir bilimsel inceleme niteliği taşımaktadır. Her bir

kombinasyonun mikroyapı düzeyindeki davranışı, kırılma mekaniği çerçevesinde; çatlak başlatma, ilerleme, enerji sönümlenme ve yük aktarım sürekliliği ekseninde detaylandırılmıştır.

PC-Tip I numunelerinde özellikle 100X ve 200X büyütme düzeylerinde gözlemlenen hasar zonları, mikro ölçekte elyaf-matris uyumsuzluğu kaynaklı enerji birikimi ve çatlak başlatıcı bölgelerin genişliği ile dikkat çekmektedir. Polyesterin düşük elastik modülü ile cam elyafın yüksek rijitliği arasındaki keskin fark, arayüzde mikro-ölçekte gerilme yığılmaları oluşturmakta; bu da yük aktarımının sürekliliğini bozarak matrisin kırılma davranış göstermesine neden olmaktadır. Görsellerde matris içinde yayılan çatlakların elyafları sarmalayıp enerji transferini kesintiye uğrattığı ve bu bölgelerde arayüz ayrılması ve matris çatlağı birleşimi gibi çift etkili hasar türlerinin ortaya çıktığı net bir şekilde görülmektedir. Bu yapıdaki kırılma mekanizması, elastik deformasyon potansiyelinden çok kırılma eğilimi gösterdiği için, enerji sönümlenme kapasitesi düşüktür. Elyaflar sağlam kalmış görünse de yük aktarımı sağlayacak mekanik bütünlük yitirilmiştir.

CC-Tip I kombinasyonuna ait mikro hasar görüntüleri, sistemin hem yük altındaki kararlı davranışını hem de çatlak yayılımının yönlenebilirliğini ortaya koymaktadır. Özellikle 100X büyütmede gözlenen mikroskobik çatlak çizgilerinin elyaf hizasına paralel olarak sınırlı genişlikte ilerlediği ve 200X büyütmede elyaf-matris arayüzlerinin bütünlüğünü büyük ölçüde koruduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, cam elyafların yüksek rijitliğine rağmen matrisle iyi bir kimyasal ve fiziksel bağ kurmasıyla ilişkilidir. Görsellerde elyaf çevresindeki çatlakların matrisle sınırlandırıldığı, delaminasyonun neredeyse hiç gelişmediği ve yük transfer yolunun sürekliliğini koruduğu dikkat çekmektedir. Bu sistemde kırılma, genellikle elyafın yönüne paralel olarak başlamakta ancak yayılmadan önce absorbe edilmekte ve enerji elyaf içinde sönümlenmektedir. Bu özellikler, sistemin eğilme rijitliği ve tokluğu açısından oldukça yüksek performans sunduğunu, aynı zamanda mikroyapı kararlılığı sayesinde uzun süreli yükleme senaryolarına uygun olduğunu göstermektedir.

CK-Tip I kombinasyonlarında özellikle 200X büyütmede, karbon elyafların yüksek elastik modülüne sahip olması nedeniyle yük aktarımının büyük kısmını üstlendiği, ancak cam elyaf bölgelerinde lokal çatlak yığılmaları ve matris mikro-çatlak ağları olduğu açıkça izlenmiştir. Bu mikroyapısal asimetri, yük paylaşımının homojen olmaması ile açıklanabilir. Arayüzde karbon elyaflar matrisle sınırlı etkileşim kurarken, cam elyafların çevresinde daha fazla mikro çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu yapı, bir yandan kırılma tokluğunu arttırsa da diğer yandan çatlak ilerlemesinin karmaşık ve kontrolsüz bir şekilde yön değiştirmesine neden olmaktadır. Bu nedenle sistem, yük altında daha fazla enerji absorbe etse bile, yük taşıma sürekliliği açısından sınırlı dayanım sergileyebilir. Görsellerde ayrıca elyaf-matris ayrılma sınırlarının mikron mertebesinde genişlediği ve bazı bölgelerde mikro-delaminasyon halkaları olduğu da dikkat çekmektedir.

PK-Tip I yapısında gözlenen mikro hasar davranışı, yapının özellikle eğilme yükleri altında ciddi zafiyet gösterdiğini ortaya koymaktadır. 50X ve 100X büyütmelerde polyester matrisin esnek

yapısı nedeniyle karbon elyafların çevresinde oluşan boşluklar, yük aktarımının kesintiye uğraması ve elyafların çevresinde çatlak ağlarının birleşmesiyle oluşan merkezi hasar bölgeleri dikkat çekicidir. 200X büyütmede bu hasar mekanizması daha da netleşmekte; karbon elyafların matrisle mekanik etkileşim kuramaması nedeniyle yük, tamamen matris tarafından taşınmakta ve bu da çatlak başlatma enerjisini düşürmektedir. Enerji sönümlenme davranışı elyaf bazlı değil, matrise bağımlı olduğu için sistem, uzun süreli yük altında çatlak ilerlemesini engelleyememektedir. Bu yapı, hafiflik ön planda olan ancak mukavemet gerektirmeyen uygulamalar dışında mühendislik açısından yetersiz bulunabilir.

Tablo 5.12’de yer alan mikro hasar görüntüleri, her bir filament kombinasyonunun mikroskobik çatlak başlatma ve iletme kapasitesinin, aynı zamanda enerji sönümlenme davranışının farklı olduğunu göstermektedir. Bu açıdan sistemler, aşağıdaki gibi gruplanabilir:

Yüksek Rijitlik ve Mikroyapı Sürekliliği: CC-Tip I

Yüksek Darbe Dayanımı fakat Mikro Çatlak Yoğunluğu Fazla: CK-Tip I

Orta Seviye Dayanım, Düşük Yük Transfer Uyumu: PC-Tip I

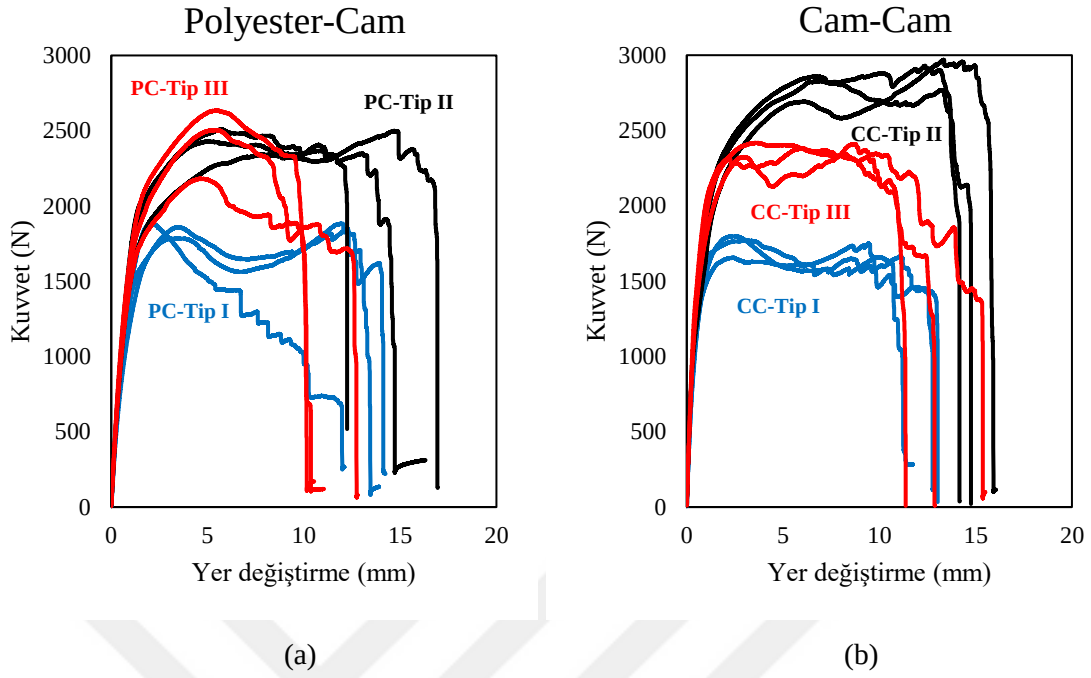
Düşük Yapısal Bütünlük, Yüksek Mikro Delaminasyon Riski: PK-Tip I

Eğilme testi sonrası hasar analizlerinin yer aldığı bu tablolar, z-yönlü bağ yoğunluğunun eğilme stabilitesi ve deformasyon toleransı üzerindeki etkisini net biçimde göstermektedir. Özellikle Tip III yapılar, katmanlar arası delaminasyonu baskılamış, çatlakların z-yönüne sapmasını sağlayarak enerji absorpsiyonunu artırmıştır. Bu durum, Trofimov ve ark. (2020)’ın viskoelastik deformasyon modelinde tanımlanan yapısal dengeleyici bağ yapısı ile örtüşmektedir. Bu bağlamda, eğilme performansı sadece elyaf türü değil, bağ topolojisiyle birlikte optimize edilmelidir.

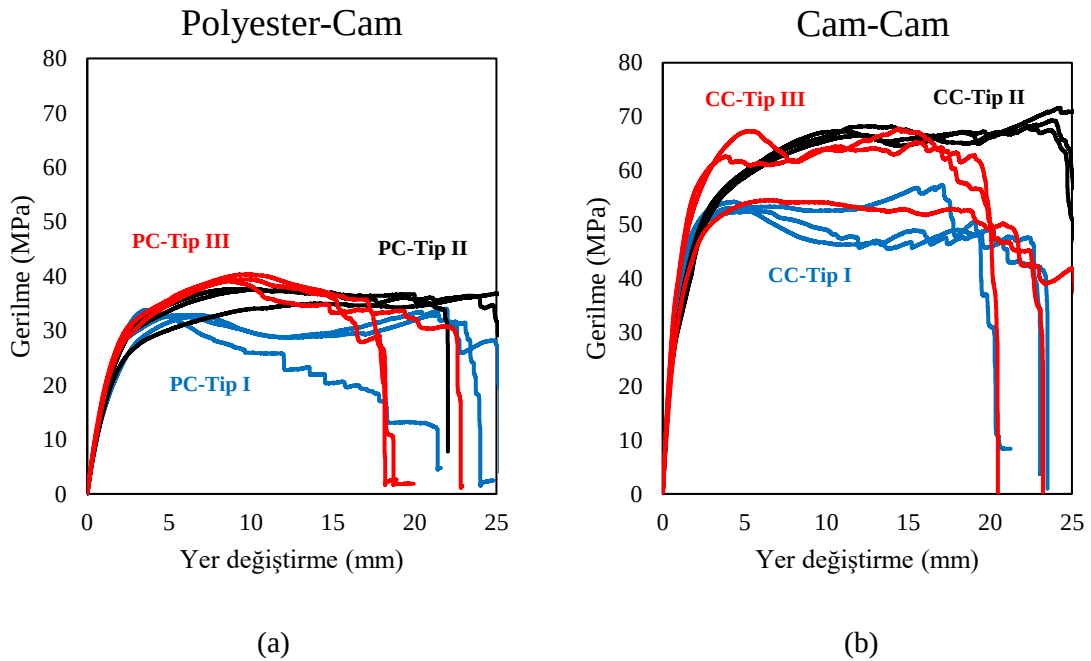
Eğilme testi sonuçlarında elde edilen maksimum moment, deformasyon ve eğrilik değerleri ile hasar morfolojileri birlikte değerlendirildiğinde, z-yönlü bağ yoğunluğu arttıkça eğilme rijitliği ve kırılma direnci artmakta; deformasyon ise sınırlandırılmaktadır. Bu sonuçlar, Aranda-Iglesias ve ark. (2020) tarafından geliştirilen modeldeki “frictional locked-skin deflection zones” bölgesi ile uyumluluk göstermektedir. Özellikle Tip III yapıların gösterdiği yüksek moment kapasitesi ve çatlak yön sapmaları, modelin çok ölçekli deformasyon transfer senaryolarıyla örtüşmektedir.

5.3. Kayma Testine İlişkin Sonuçlar

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da araştırma kapsamında farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozitlerin kayma mukavemetlerinin dokuma tipine göre karşılaştırıldığı kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri görülmektedir.



şekil 5.15. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler



şekil 5.16. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi gerilme-yer değiştirme değerlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) polyester-cam elyaf, b) cam-cam elyaf kompozit numuneler

Şekil 5.15 ve 5.16’da yer alan kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-yer değiştirme grafikleri, farklı filament kombinasyonları PC ve CC ile üç farklı dokuma tipinin (Tip I, Tip II, Tip III) kompozit malzemelerin kayma mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerindeki etkilerini net biçimde göstermektedir. Bu grafikler, malzemenin elastik bölgede ne kadar rijit olduğunu, plastik bölgede ne kadar deformasyona izin verdiğini ve nihai kırılma kapasitesini doğrudan ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, grafiğin şekli bize sadece dayanımı değil, aynı zamanda çatlak başlama ve yayılma hızlarını da dolaylı olarak anlatmaktadır.

Polyester-Cam kombinasyonu için incelenen grafiklerde en yüksek maksimum kuvvet değeri PC-Tip II dokuma yapısında elde edilmiştir. Bu örneklerde maksimum kuvvet yaklaşık ~2500 N seviyesine ulaşmakta ve maksimum gerilme yaklaşık ~40 MPa civarında seyretmektedir. Eğri profiline bakıldığında, elastik bölgedeki eğim oldukça dik olup, bu durum malzemenin başlangıçta yüksek rijitlik gösterdiğini göstermektedir. Deformasyon kapasitesi ise ~17 mm’ye kadar çıkmakta; kırılma ise elastik bölge sonrası ani bir geçişle gerçekleşmektedir. Bu yapı, yüksek mukavemet ve rijitlik isteyen mühendislik uygulamaları için idealdir, ancak elastik sınırı aştıktan sonra sünek bir deformasyon göstermediği için darbe dayanımı sınırlıdır.

Buna karşılık PC-Tip III dokuma yapısı, maksimum kuvvet açısından ~2700 N civarında kalmakta ve maksimum gerilme ~43 MPa seviyelerinde gözlenmektedir. Deformasyon kapasitesi ~12–13 mm civarındadır. Bu yapıdaki en önemli özellik, elastik bölgeden sonra plastik deformasyonun daha dengeli ve lineer bir şekilde ilerlemesidir. Yani malzeme yük altındayken mukavemetten ödün vermeden belirli bir deformasyon gerçekleştirebilmekte, bu da darbe veya yorulma yükleri altında avantaj sağlamaktadır. PC-Tip III, yüksek mukavemetle birlikte daha fazla enerji yutabilen, dengeli bir performans sunmaktadır.

PC-Tip I ise en düşük performansı sergileyen yapı olarak dikkat çekmektedir. Bu örneklerde maksimum kuvvet ~1900 N, maksimum gerilme ise ~35 MPa civarındadır. Deformasyon kapasitesi ise ~13–14 mm seviyesinde kalmaktadır. Bu yapı düşük mukavemet sergilemekle birlikte, deformasyon açısından görece yüksek bir kapasite sunmaktadır. Düşük dokuma sıklığı ve gevşek elyaf yerleşimi nedeniyle yük aktarımı sınırlıdır; ancak sünek davranış gösterdiği için darbe enerjisini yaymada avantaj sağlayabilir.

Cam-Cam kombinasyonunda durum biraz daha farklıdır. CC-Tip II dokuma yapısı burada dikkat çekici bir performans sunmaktadır. Maksimum kuvvet yaklaşık ~3000 N seviyesine ulaşırken, maksimum gerilme ~75 MPa civarındadır. Deformasyon kapasitesi ise ~17 mm’ye kadar çıkmaktadır. Eğri profilinde elastik bölgeden sonra belirgin bir plastik deformasyon bölgesi gözlenmekte ve kırılma daha geç gerçekleşmektedir. Bu yapı, yüksek mukavemetle birlikte enerji yutma kapasitesi sunması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yüksek dayanım gerektiren ancak aynı zamanda darbe dayanıklılığı da beklenen uygulamalar için güçlü bir adaydır.

CC-Tip III örnekleri ise maksimum kuvvet açısından ~2500 N, maksimum gerilme açısından ise ~70 MPa seviyelerine ulaşmaktadır. Deformasyon kapasitesi yine ~16 mm civarındadır. Bu yapı da yüksek mukavemet sunmakla birlikte Tip II'ye kıyasla daha kısa bir plastik deformasyon bölgesine sahiptir. Yani yüksek rijitlik ve dayanım göstermektedir ama darbe altında enerji yayılımı kapasitesi Tip III kadar güçlü değildir.

CC-Tip I ise diğerlerine kıyasla daha zayıf kalmaktadır. Maksimum kuvvet ~1800 N, maksimum gerilme ise ~58 MPa civarındadır. Deformasyon kapasitesi ise ~13 mm civarında seyretmektedir. Bu yapı, düşük dokuma sıklığı nedeniyle mukavemeti düşük tutarken, deformasyon kapasitesiyle dikkat çekmektedir. Yani sünek davranış sergilemekte ama yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda yeterli olmayabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Polyester-Cam kombinasyonu en yüksek mukavemetini PC-Tip III'de göstermekte (~2700 N, ~43 MPa), Cam-Cam kombinasyonu ise en yüksek mukavemetini CC-Tip II ile ortaya koymaktadır (~3000 N, ~75 MPa). Tip I yapılar her iki kombinasyonda da en düşük kuvvet ve gerilme değerlerini sunarken (~1900–1800 N, ~35–58 MPa), deformasyon kapasiteleri daha yüksektir, bu da onları darbe enerjisini yaymada avantajlı hale getirmektedir.

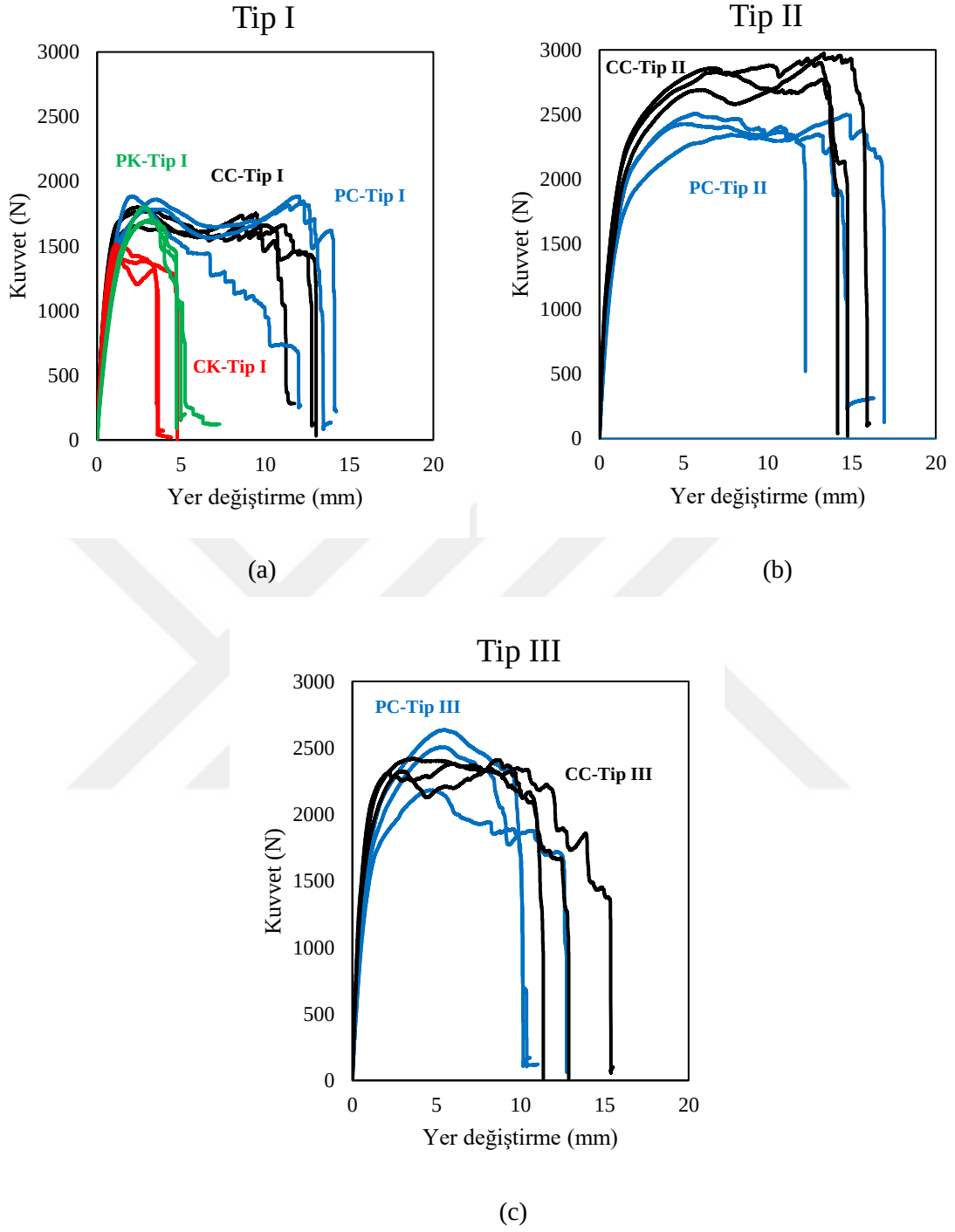
CC-Tip II sadece deformasyon açısından değil, aynı zamanda mukavemet açısından da en üst düzeyde performans göstermekte, bu da onu darbe ve yorulma gibi karmaşık yükleme durumlarında ideal hale getirmektedir.

Bu sonuçlar, dokuma tipi ve filament kombinasyonunun kompozitlerin kayma mukavemeti ve deformasyon karakteristikleri üzerinde güçlü ve sistematik bir etki yarattığını göstermektedir. Tip II yapılar yüksek mukavemet ve rijitlik sunarken, Tip III yapılar hem mukavemet hem de süneklik açısından dengeli bir profil sergilemektedir. Tip I yapılar ise düşük mukavemet ama yüksek deformasyon kabiliyeti ile enerji sönümleyici yapılar için uygundur. Ayrıca Polyester-Cam kombinasyonu genel olarak daha sünek bir yapı sunarken, Cam-Cam kombinasyonu yüksek elastik modül ve mukavemeti ile daha rijit ve dayanıklı bir yapı ortaya koymaktadır. Kompozit tasarım süreçlerinde yalnızca mukavemet değil; deformasyon kapasitesi, plastik akma davranışı ve ara yüzeydeki bağlanma kalitesi de dikkate alınmalıdır. Özellikle CC-Tip II yapısının yüksek mukavemet ve deformasyon kapasitesini bir arada sunması, onu çok eksenli gerilme altında çalışan yapılar için mükemmel bir aday yapmaktadır.

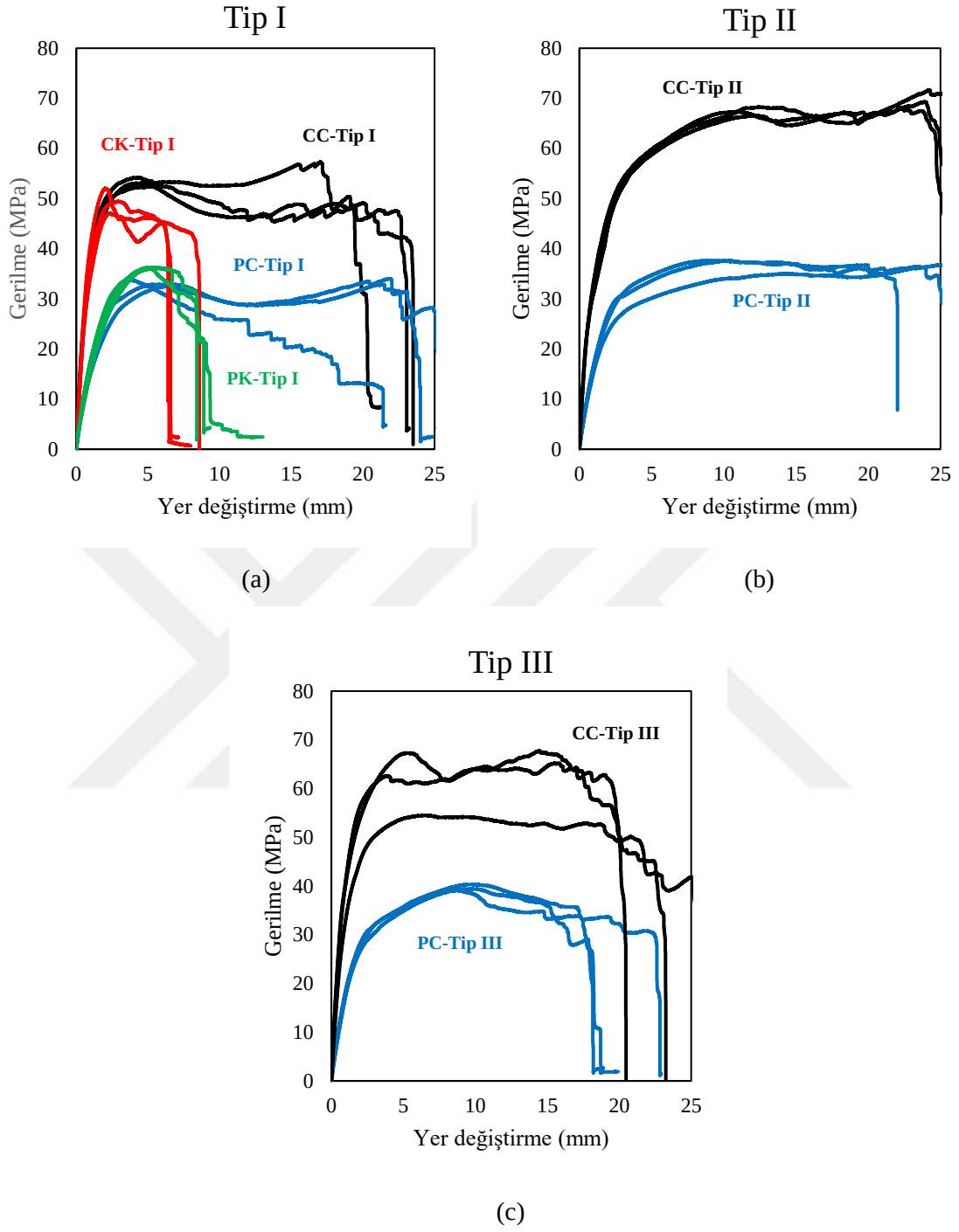
Şekil 5.15'te sunulan kayma gerilmesi – kayma yer değiştirmesi eğrileri, 3B dokuma cam elyaf takviyeli kompozitlerin kayma yüklemesi altındaki rijitlik değişimini ve deformasyon toleransını ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip II yapısı, maksimum ~75 'lik kayma gerilmesi değeri ve ile en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, bağ geometrisinin kayma düzleminde yük transfer yollarını nasıl yönettiğini açık biçimde göstermektedir. Al-Nadhari ve ark. (2025) çalışmasında da düzlem içi kayma yüklemeleri uygulanmış ve AE ile desteklenen testlerde, farklı bağ konfigürasyonlarının ve hibrit elyaf düzenlemelerinin kayma rijitliği üzerindeki etkisi

incelenmiştir. Özellikle intra-tow hybrid (ITH) yapıların hem Kevlar hem cam elyafın bağlarda birlikte yer aldığı durumda, kayma deformasyonu altında daha yüksek rijitlik ve düşük AE yoğunluğu gösterdiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada da CC-Tip II gibi z-yönlü bağ sayısı fazla olan sistemlerde, deformasyon bölgesi daha yaygın hale gelmekte, kayma gerilmesi birikimi sınırlandırılmakta ve çatlak ilerleme yönü değişmektedir. Bu bağlamda, hem Al-Nadhari ve ark. çalışmasındaki ITH yapılar hem de tezdeki CC-Tip II yapısı, kayma yükü altında deformasyon kontrolünü sağlayan bağ mimarilerinin sistem performansı üzerinde ne kadar belirleyici olduğunu kanıtlamaktadır. Özellikle bağların sadece çekme değil, kayma yönünde de yapısal stabiliteyi artırdığı görülmektedir.





şekil 5.17. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi kuvvet-yer değiştirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III



Şekil 5.18. Farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi gerilme-yer değistirme değerlerinin filament türüne göre karşılaştırılması; a) Tip I, b) Tip II ve c) Tip III

Şekil 5.17 ve Şekil 5.18, farklı dokuma kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma testi performanslarını hem kuvvet-yer değistirme hem de gerilme-yer değistirme ilişkileri üzerinden, filament tipine ve dokuma karakterine göre kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Her iki grafik birlikte analiz edildiğinde, kompozit numunelerin mekanik davranışında filament tipi ve

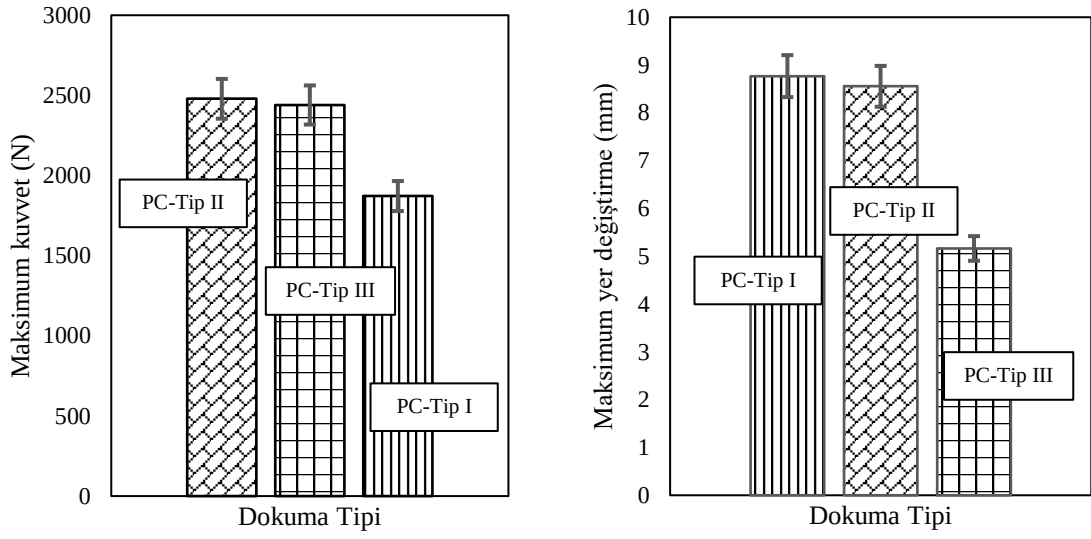
dokuma yapısının sinerjik etkisiyle oluşan performans farkları açık bir biçimde ortaya çıkmakta; bu farklar sadece nihai dayanım düzeylerinde değil, aynı zamanda deformasyon karakteristiğinde, süneklik seviyelerinde ve kırılma mekanizmasının biçiminde de belirleyici rol oynamaktadır.

Şekil 5.17’de yer alan kuvvet-yer değiştirme eğrileri, dokuma tipi sabit tutulduğunda (Tip I, II, III), filament tipinin kayma mukavemeti üzerindeki etkilerini net bir şekilde göstermektedir. Özellikle Tip I yapılar karşılaştırıldığında, PK-Tip I ve CK-Tip I numuneleri ~5 mm yer değiştirme seviyesinde hasara uğrarken, CC-Tip I ve PC-Tip I örneklerinin çok daha yüksek yer değiştirme kapasitesi göstererek ~10–15 mm’ye kadar sünek bir deformasyon davranışı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, PK ve CK kombinasyonlarının, daha kırılğan ve düşük enerji absorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu; dolayısıyla çatlak yayılımına karşı dirençsiz, matris-elyaf etkileşimi zayıf ve iç yapı bütünlüğü açısından sınırlı performansa sahip kompozit sistemler olduğunu göstermektedir. Buna karşın, CC ve PC kombinasyonlarının yer değiştirme kapasitesinin yüksekliği, ara yüzey bağının daha etkili olduğunu ve yükün elyaflara daha verimli bir şekilde aktarıldığını ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu gruplarda deformasyonun ani değil, kontrollü ve uzatılmış bir biçimde geliştiği anlaşılmaktadır. Tip II yapılar incelendiğinde ise, tüm filament kombinasyonları içinde en yüksek kuvvet değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Özellikle CC-Tip II numunesi, ~2800–2900 N civarındaki maksimum kuvvet değeriyle sadece kendi grubu içinde değil, genel anlamda tüm sistemler arasında en yüksek kayma dayanımını göstermektedir. Bu, cam elyafların homojen dağılımı, yüksek dokuma yoğunluğu ve güçlü fiber-matris arayüzü ile açıklanabilir. Tip II’de ayrıca PC-Tip II de oldukça yüksek kuvvet seviyelerine ulaşmakta (~2500 N) ve deformasyon sürecinde stabil bir davranış sergilemektedir. Tip III numuneleri karşılaştırıldığında, Tip III numuneleri karşılaştırıldığında, PC-Tip III örneklerinin ~2500–2700 N aralığında maksimum kuvvet taşıma kapasitesine ulaştığı; buna karşılık CC-Tip III numunelerinin maksimum kuvvet değerinin ~2200–2400 N seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Bu durum, PC-Tip III örneklerinin ~%10–20 oranında daha yüksek bir taşıma kapasitesi sergilediğini ortaya koymaktadır. Yer değiştirme açısından değerlendirildiğinde, CC-Tip III numuneleri ~14–16 mm’ye kadar deformasyon gösterebilirken, PC-Tip III örneklerinin bu değeri ~9–11 mm ile sınırlıdır. Eğriler incelendiğinde, her iki numune tipinin de elastik bölge sonrasında plastik deformasyona geçiş yaptığı ve maksimum kuvvet noktasına ulaştıktan sonra ani bir düşüş yerine kademeli bir azalma eğrisi çizdiği gözlemlenmektedir. Bu davranış, özellikle CC-Tip III numunelerinde daha belirgin olup, yapının kırılma öncesinde yüksek enerji yutma kapasitesi sunduğunu göstermektedir. Ayrıca, PC-Tip III numunelerinin deformasyon sırasında daha erken kuvvet kaybı yaşaması, bu yapıların daha sınırlı süneklik sunduğunu işaret etmektedir. Genel olarak sayısal analiz, PC-Tip III numunelerinin hem daha yüksek taşıma kapasitesi hem de daha geniş deformasyon aralığı ile darbe ve yorulma gibi tekrarlı yükler altında daha dayanıklı ve güvenilir bir performans sunduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şekil 5.18'deki gerilme-yer değiştirme eğrileri, farklı dokuma ve filament tiplerinin mukavemetini net şekilde ortaya koymaktadır. Tip I yapılar incelendiğinde, CC-Tip I numuneleri ~55–60 MPa maksimum gerilme seviyelerine ulaşırken, CK-Tip I örnekleri ~50–55 MPa, PC-Tip I ~35–40 MPa ve PK-Tip I ise yalnızca ~30–35 MPa aralığında kalmıştır. Bu durum, CC-Tip I yapısının, daha yüksek gerilme taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Tip II yapılar arasında, CC-Tip II örnekleri ~70 MPa değerine ulaşarak en yüksek mukavemet sergilerken, PC-Tip II numuneleri ~35–40 MPa seviyelerinde kalmıştır. Bu fark, cam-cam dokuma yapısının hem elyaf yönelimi hem de matris arayüz kalitesi açısından üstünlüğünü vurgulamaktadır. Tip III yapıların analizinde ise, CC-Tip III numuneleri ~70 MPa maksimum gerilme değerine ulaşırken, PC-Tip III numuneleri ~40 MPa seviyesinde kalmaktadır. Ayrıca, Tip III yapılar diğer tüm gruplara göre daha uzun deformasyon bölgeleri (~20–22 mm) sunarak, sünek kırılma davranışı ve enerji yayılım potansiyeli açısından dikkat çekmektedir. Genel olarak, CC yapıların tamamı —özellikle CC-Tip II ve CC-Tip III— hem yüksek gerilme dayanımı hem de deformasyon kapasitesi sunarak yapısal uygulamalar için güçlü adaylar olduğunu kanıtlamaktadır.

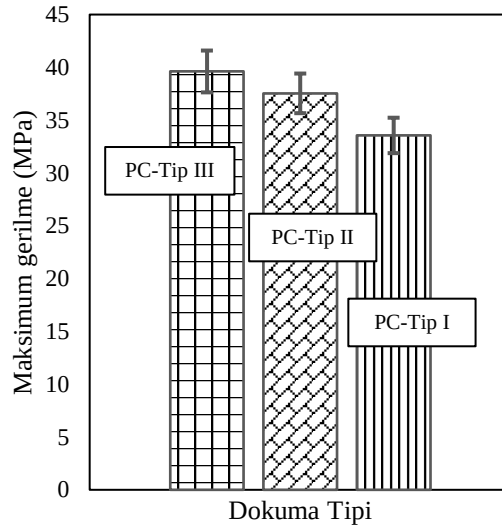
Tüm bu grafikler üzerinden yapılan karşılaştırmalı değerlendirmeler, farklı filament kombinasyonlarının ve dokuma tiplerinin kompozit malzemelerin makroskobik ve mikroskobik mekanik davranışlarını belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip II yapısının elde ettiği yüksek kuvvet ve gerilme değerleri, bu malzemenin güçlü fiber-matris arayüzüne, optimal elyaf yerleşimine ve yüksek hacimsel elyaf oranına sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda deformasyon bölgesinin kısa ama keskin olmayışı, yapının yüksek rijitliğe sahip olduğunu ancak gevrek davranıştan uzak durduğunu işaret etmektedir. Diğer yandan Tip I yapılar, özellikle PK düşük performanslı filament kombinasyonlarında hem dayanım hem de deformasyon açısından zayıf kalmakta; bu da onların ileri mühendislik uygulamalarında birincil taşıyıcı eleman olarak kullanılmasını sınırlamaktadır. Tip III yapılar ise yüksek deformasyon kapasitesi ile dikkat çekmekte; bu da onların çok eksenli yüklemeler altında, çatlak yayılımını geciktiren, sönümleme kabiliyeti yüksek yapılarda tercih edilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla kompozit tasarım süreçlerinde sadece maksimum dayanım değil, aynı zamanda deformasyon şekli, enerji absorpsiyon potansiyeli ve kırılma mekaniği gibi unsurlar birlikte değerlendirilmelidir. Elde edilen bu veriler, sadece deneysel gözlemler değil, aynı zamanda ileri düzey mikroyapı analizleri, sonlu eleman modellemeleri ve ömür tahmini simülasyonları gibi hesaplamalı tekniklerle de desteklenerek, kompozit malzeme mühendisliğinde daha güvenilir ve yüksek performanslı çözümler geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'in detaylı yorumları, kompozit malzeme sistemlerinde filament tipi ve dokuma mimarisinin sadece mukavemeti değil, aynı zamanda uygulama başarısını doğrudan belirleyen anahtar faktörler olduğunu kesin olarak ortaya koymaktadır.

Kayma gerilmesi–yer değiştirme eğrileri, z-yönlü bağ yapısının makaslama kuvvetlerine karşı performansını ortaya koymaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısında gözlemlenen yüksek kayma mukavemeti (~70 MPa), bağların ara yüzey stabilitesini artırdığını göstermektedir. Trofimov ve ark. (2020)’ın RTM sonrası kimyasal büzülmenin makaslama etkisini artırdığına dair modellemesi burada gözlemlenen kayma deformasyonu sınırlarıyla örtüşmektedir. Bağ yönünün yük doğrultusuyla açısal uyumu, sistemin süneklik ve stabilite özelliklerini belirleyici hale getirmiştir. Şekil 5.18’de yer alan gerilme-yer değiştirme eğrileri, 3B dokuma kompozitlerin kayma yüklemesi altındaki deformasyon davranışını ve kırılma eğilimlerini çok boyutlu şekilde analiz etme imkânı sunmaktadır. Özellikle CC-Tip II yapısı, ~70 MPa maksimum gerilme ve yüksek uzama kabiliyetiyle en üst düzey performansı göstermektedir. Bu davranış, cam elyafın yüksek elastik modülü ile üç eksenli dokuma yapının sunduğu z-yönlü bağlanma mimarisinin sinerjik etkisiyle açıklanabilir. Guo ve ark. (2020) tarafından yapılan 3B dokuma yapılarının kayma yüklemesi altında deneylerde, interlok bağ yapısına sahip 3B dokuma kompozitlerin çatlak ilerlemesini geciktirdiğı, yük taşıma boyunca deformasyonun yalnızca kayma modül ile değil, aynı zamanda elyaf yönlenmesinin yük doğrultusuna yakınlığıyla belirlendiğı ifade edilmiştir. Guo ve ark.’nın “MFW-2” ve “MAW” tipindeki yapılarda z-yönlü bağlar, elyaf-matris ara yüzeyini stabilize ederek yükün elyaf ekseninde yayılmasını sağlamıştır. Bu bağlamda CC-Tip II yapısında da benzer bir şekilde yüksek gerilme taşıma kapasitesine ulaşılmakta, deformasyon bölgesi kontrollü şekilde genişlemektedir.



(a)

(b)



(c)

şekil 5.19. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testi a) maksimum kuvvet b) maksimum yer değişirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

şekil 5.19’da sunulan grafikler, polyester-cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin kayma yüklemesi altındaki mekanik davranışını hem kuvvet hem deformasyon hem de gerilme açısından çok boyutlu ve birbirini tamamlayan biçimde analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Grafiklerde, dokuma tipi (Tip I, Tip II, Tip III) değişkeninin, aynı filament sistemiyle (polyester-cam) retilmiş numuneler üzerindeki etkisi net biçimde ayırt edilebilmekte, böylece dokuma mimarisinin yalnızca mekanik dayanım düzeyinde değil, aynı zamanda malzemenin enerji sönümleme kapasitesi, süneklik düzeyi, çatlak başlatma direnci ve kırılma öncesi deformasyon profili gibi çok sayıda

yapısal parametre üzerindeki belirleyici etkisi daha rasyonel ve karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiş olmaktadır. Grafiklerden elde edilen deneysel veriler, kompozit tasarım parametrelerinin ötesinde; dokuma mimarisi, filament yönelimi, elyaf-matris ara yüzey bağ mekanizmaları, elyaf hacim oranı gibi alt yapısal faktörlerin nihai mekanik performans üzerindeki ağırlığını doğrudan açığa çıkarmaktadır.

Şekil 5.19.a grafiğinde yer alan maksimum kuvvet verileri değerlendirildiğinde, Tip II dokuma yapısına sahip numunelerin, ~2500 N’lik ortalama maksimum yük taşıma kapasitesi ile dikkat çektiği görülmektedir. Bu durum, yüksek elyaf yoğunluğu, düzgün elyaf yönelimi ve elyafların yüke paralel hizalanmasının sonucu olarak ara yüzeydeki kesme yüklerinin etkin şekilde absorbe edildiği, böylece yükün yalnızca matrise değil, aynı zamanda elyaf iskeletine homojen biçimde dağıtılabildiği bir yapının varlığına işaret etmektedir. Aynı şekilde Tip III dokuma yapıları da benzer şekilde ~2400–2500 N bandında dayanım sergileyerek, üç boyutlu dokuma konfigürasyonlarının yük aktarım performansı açısından son derece verimli olduğunu göstermektedir. Bu iki dokuma tipi ile karşılaştırıldığında, Tip I dokuma örnekleri ~1800 N seviyelerinde kalmakta; bu da dokuma sıklığının ve elyafların yönelme optimizasyonunun yeterli olmaması durumunda, yük taşıma kapasitesinde ~%30 civarında bir düşüş yaşandığını göstermektedir. Bu bağlamda Tip I dokuma yapılarının, yük taşıyıcılığı bakımından zayıf ancak deformasyon toleransı yüksek sistemler sunduğu söylenebilir; bu ise onları ikincil taşıyıcı elemanlar ya da darbe enerjisini emen iç tabakalar için uygun kılmaktadır. Diğer yandan, Tip II ve III yapılar ise birincil taşıyıcı yüklemelerde, özellikle de yüksek kesme gerilmesine maruz kalan uygulamalarda tercih edilmesi gereken optimum yapılarıdır.

Şekil 5.19.b grafiğinde sunulan maksimum yer değiştirme verileri, kuvvet verileri ile birlikte ele alındığında malzemenin deformasyon kapasitesi ve süneklik potansiyeli hakkında doğrudan bilgi sunmaktadır. Tip I dokuma yapısı ~8.5–9 mm seviyelerinde maksimum yer değiştirme sergileyerek hem yüksek mukavemeti hem de yüksek deformasyon kapasitesini bir arada sunan bir yapı sergilemektedir. Bu özellik, sünek kırılmaya yatkın bir davranış profiliyle ilişkilidir ve çatlak ilerlemesini geciktiren, enerji emici sistemler açısından önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Tip II dokuma örnekleri de benzer şekilde ~8–8,5 mm yer değiştirme kapasitesine ulaşmakta ancak bu deformasyon yüksekliği düşük dayanımla birlikte gerçekleştiğinden, plastik deformasyonun daha erken evrelerde başladığını ve bu nedenle malzemenin elastik sınırının daha dar olduğunu göstermektedir. Bu yapıların gerilim konsantrasyonlarına karşı daha hassas olması, yüklem altındaki çatlak başlama noktalarının mikroyapı içinde erken aktive olmasına yol açmaktadır. Tip III yapılar ise ~5.5 mm’lik daha düşük bir maksimum yer değiştirme sergileyerek, mukavemet açısından yüksek bir performans sunmakla birlikte, deformasyon sünekliğinin sınırlı olduğunu ve bu nedenle çatlak ilerlemesinin daha kısa deformasyon zonunda, nispeten daha hızlı gerçekleştiğini düşündürmektedir. Bu, Tip III’ün yüksek rijitlik, düşük uzama karakteriyle, elastik limit içinde

maksimum dayanım sunma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle otomotiv veya havacılık endüstrisinde, yüksek frekanslı titreşim ve anlık yükleme altında kararlı kalması gereken yapılar için Tip III yapılar bu anlamda öne çıkmaktadır. Buna karşın Tip I yapılar, sismik izolasyon sistemleri, darbe sönümleyici levhalar ve enerji yayılımı gerektiren koruyucu paneller gibi uygulamalarda büyük avantaj sağlayabilir.

Şekil 5.19.c grafiğinde sunulan maksimum gerilme değerleri ise, kesit alanı normalizasyonu üzerinden elde edilmiş olup, tüm malzemeler arasında gerçek mukavemet kıyaslamasını mümkün kılmaktadır. Tip III yapılar burada ~40 MPa'lık maksimum gerilme değeri ile açıkça en yüksek dayanımı sergileyen sistem olarak öne çıkmaktadır. Bu, dokuma yönelimi sayesinde liflerin yük yönüne en uygun biçimde yerleştirildiğini, ayrıca elyafların matris içindeki dağılımında homojenlik ve yük transferinde verimliliğin maksimum düzeye çıkarıldığını ortaya koymaktadır. Tip II yapılar da ~38 MPa'lık değerle yüksek performans sunmakla birlikte, bu yapıların deformasyon kapasitesi daha yüksek olduğundan, gerilme tepe noktasına ulaşmadan önce daha geniş bir plastik deformasyon bölgesinden geçmektedir. Bu da onları mukavemeti optimize edilmiş ancak sünekliği de koruyan ara çözüm olarak mühendislik açısından değerli hale getirmektedir. Tip I yapılar ise ~33 MPa bandında gerilme değeri sergileyerek hem kuvvet hem deformasyon hem de gerilme bakımından diğer iki yapıya göre düşük mekanik performans sunmaktadır. Bu değerler, sadece mukavemet düşüklüğü değil, aynı zamanda mikro ölçekte elyaf-matris bağlanmasının zayıflığını, düşük dokuma sıklığını, boşluk oranının yüksekliğini ve yük aktarım yollarında süreksizlikleri de işaret etmektedir. Dolayısıyla, Tip I yapıların yapısal uygulamalarda ancak ikincil, yük taşımayan katmanlar olarak değerlendirilmesi; buna karşın Tip II ve III yapıların birincil taşıyıcı sistemlerde, yük altında uzun vadeli deformasyon takibi yapılacak tasarımlarda aktif biçimde kullanılmaları önerilmektedir.

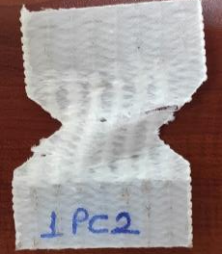
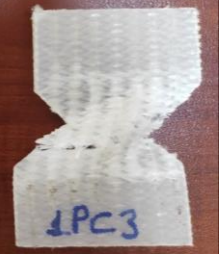
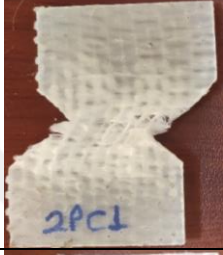
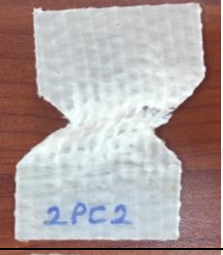
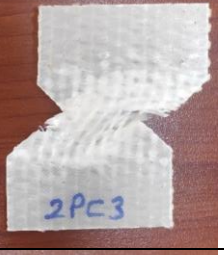
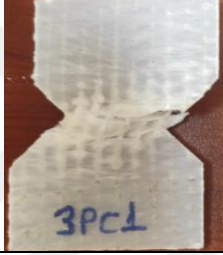
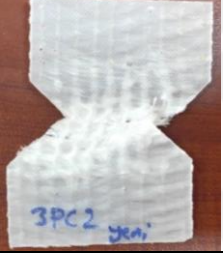
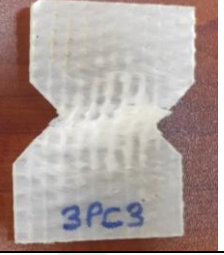
Genel olarak değerlendirildiğinde, Şekil 5.19'da yer alan üç temel mekanik parametre (maksimum kuvvet, maksimum yer değiştirme ve maksimum gerilme) arasındaki ilişkiler, kompozit malzeme tasarımında dokuma tipinin yalnızca bir üretim detayı değil, doğrudan nihai ürün performansını belirleyen bir mühendislik parametresi olduğunu ortaya koymaktadır. Dokuma yapısının, mikro ölçekteki elyaf hizalanmasından, makro ölçekteki yük transfer yollarına kadar tüm mekanik davranışı etkileyen çok katmanlı bir faktör olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 5.19'da yer alan kayma test verileri, dokuma tipi farklılıklarının malzemenin kayma rijitliği ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir. Tip III yapıdaki elyaf konfigürasyonu, kayma sırasında yön değiştiren ve kompleks bağ yapıları sayesinde çatlak ilerlemesini geciktiren bir deformasyon profili sunmaktadır. Bu sonuç, Zhang ve ark. (2024)'ın kayma-ön sıkıştırma test sonuçları ile benzerlik göstermekte olup, dokuma yapısının yük altındaki davranışa yön verdiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, kayma açısı-veri karşılaştırması yapıldığında, hiperelastik enerji modelinin fiziksel doğruluğu teyit edilmektedir.

Şekil 5.19’da kayma testlerine ilişkin, özellikle PC-Tip II ve Tip III dokuma yapılarının ~2500 N seviyesine ulaşan maksimum kuvvet taşıdığı ve deformasyon altında yüksek süneklik ve enerji sönümleme davranışı sergilediği görülmektedir. Bu davranış, Wu ve ark. (2025)’in SBS (Short Beam Shear) testlerinde çözgü yönlü numunelerin ani kırılma yerine daha fazla şekil değiştirme gösterdiği bulgularıyla doğrudan paralellik göstermektedir (Şekil 10.a-b). Ayrıca makalede, kayma altındaki deformasyonun başlangıcında mikro düzeyde ara yüzey ayrışmaları olduğu, bu bölgelerde fiber oryantasyonu ve sıklığına bağlı olarak kırılmanın geciktiği belirtilmiştir. Bu bağlamda, tezdeki dokuma tipi varyasyonları ile gözlemlenen kayma davranışları aynı yapısal kökene dayanmaktadır.

Şekil 5.19’da sunulan veriler, özellikle Tip II ve Tip III yapıların gösterdiği yüksek taşıma kapasitesi ve deformasyon sünekliği bakımından 3B dokuma yapının katmanlar arası kayma davranışını ayrıntılı şekilde ortaya koymaktadır. Yang ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada, 3B dokuma preformlar özel bir fikstürle katmanlar arası kayma testine tabi tutulduğu ve bu testlerde üç aşamalı bir deformasyon rejimi gözlemlendiği belirtilmiştir: (I) başlangıç lineer bölge, (II) kayma düzlemleri boyunca elyaflar arası temas ve kayma, (III) yükte artış ile birlikte stabil deformasyon bölgesi. Tezdeki Şekil 5.19’da yer alan Tip III yapıların ~2500 N seviyelerine ulaşan kuvvet değerleri ve deformasyon süresi boyunca ani yük düşüşlerinin olmaması, Yang ve ark.’ın literatürde belirttiği mikro düzeyde elyaf sıkışması, çözgü/atkı filamentlerin arasında kayma ve elyaf burkulması gibi deformasyon mekanizmaları ile örtüşmektedir. Ayrıca, Yang’ın sunduğu Mikro-CT analizinde gözlemlenen z-yönünde oluşan elyaf yığılmaları ve kalınlık yönlü elyaf yer değişimleri, tezdeki Tip III yapıların daha fazla enerji absorbe etmesini ve kayma altında deformasyonu geciktirmesini açıklamaktadır. Bu bağlamda, Tip II ve III dokuma yapıların kayma altında gösterdiği davranışlar, yalnızca elastik modül farklılıklarına değil; aynı zamanda dokuma sıklığı, bağ noktası yoğunluğu ve elyafların kalınlık yönünde yerleşimi gibi parametrelere dayalı olarak katmanlar arası kayma direncini artırmaktadır. Özellikle Yang ve ark.’ın geliştirdiği “sanal elyaf modeli” kullanılarak yapılan benzetimlerde, en fazla deformasyonun bağlayıcı filamentler etrafında yoğunlaştığı tespit edilmiş, bu da PC-Tip II ve CC-Tip III gibi bağ noktası yoğunluğu yüksek örneklerde gözlemlenen dirençli deformasyon davranışlarıyla örtüşmektedir.

Tablo 5.13. Polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	2. Numune	3. Numune
PC-Tip I			
PC-Tip II			
PC-Tip III			

Tablo 5.13'te sunulan polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilmiş kompozit numunelere ait kayma testi sonrası hasar görüntüleri, dokuma tipine bağlı olarak gelişen farklı hasar mekanizmalarını ortaya koymakta ve her bir yapı tipi için özgün deformasyon karakteristiklerinin, yük aktarım yollarının ve çatlak gelişim senaryolarının nasıl değiştiğini doğrudan görsel olarak desteklemektedir. Kompozit malzemelerin yükleme altındaki davranışları yalnızca elastik veya plastik deformasyon sınırlarıyla değil, aynı zamanda yükün mikroyapı boyunca ne şekilde ilerlediği, hangi bölgelerde biriktiği, hangi ara yüzeylerde çözülme yarattığı ve hangi elyaf-matris kesitlerinde kopma veya kayma gibi lokal hasar mekanizmalarını tetiklediği ile anlaşılabilir. Bu bağlamda, her bir dokuma tipine ait üç ayrı numune üzerinde gözlemlenen makroskobik hasar morfolojileri, sistematik bir analizle birleştirildiğinde yalnızca yapısal bozulma biçimlerini değil, aynı zamanda bu bozulmaların arkasındaki fiziksel ve mikromekanik nedenleri de ortaya koymaktadır. Bu yönüyle görseller, hem deneysel verilerin yorumlanmasını destekleyen nitel analiz aracıdır hem de malzeme mühendisliğinde tasarım parametrelerinin belirlenmesinde doğrudan referans kabul edilebilecek nitelikte bilgi sağlamaktadır.

PC-Tip I dokuma yapısına sahip kompozit numunelerde gözlemlenen hasar profili, tipik bir gevrek kırılma senaryosunu yansıtmaktadır. Numunelerin her biri incelendiğinde, hasarın merkezi bir

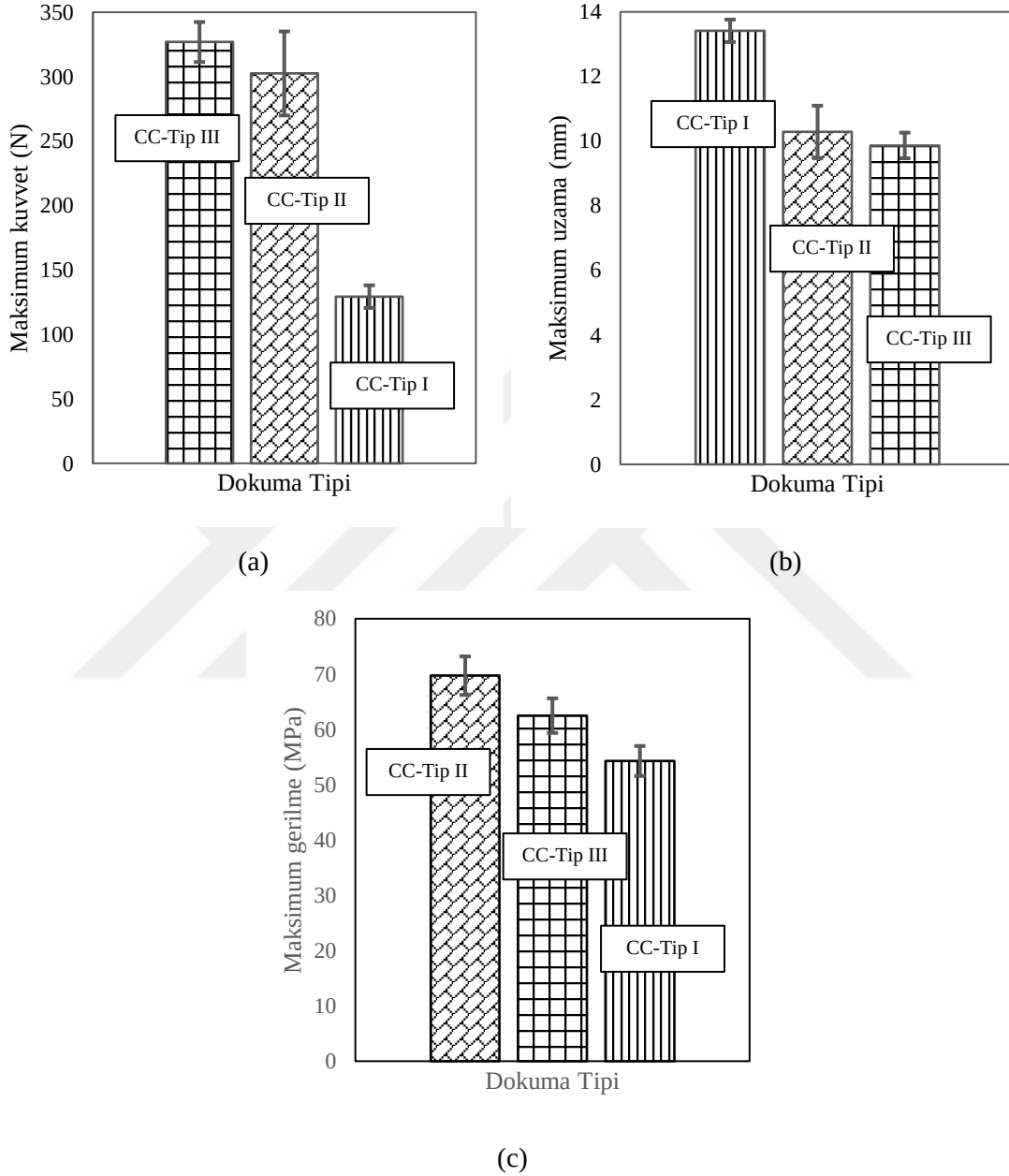
bölgede yoğunlaştığı, kırılmanın oldukça ani geliştiği ve kırılma hattının keskin ve düzensiz olduğu açıkça gözlemlenmektedir. Bu durum, yükün elyaf boyunca düzenli bir şekilde aktarılamadığını, ara yüzeyde gerilme yığılmalarının meydana geldiğini ve matrisin yerel çatlamları absorbe edemeyerek çatlak ilerlemesine karşı zayıf kaldığını göstermektedir. Tip I dokuma, elyafların daha az yoğunlukta olduğu, dokuma yöneliminin yüke karşı daha az paralel yerleştiği bir yapıdır. Bu nedenle uygulanan kayma yükü altında, elyafların yükü taşıyamadan ara yüzden ayrılması, yükün doğrudan matrise binmesine neden olmakta; bu da gevrek bir çatlama ve hızlı kırılma sürecini tetiklemektedir. Elyaf kırıkları oldukça düzensiz ve dağınık olup, bu da kompozit içinde oluşan mikroskobik çatlakların birleşerek kısa sürede makroskobik kırılmaya dönüştüğünü göstermektedir. Bu tür davranış, özellikle gerilme konsantrasyonu oluşturan geometrilerde, yani kenar bölgelerinde veya kesit değişimlerinin olduğu yapılarda, kırılma riskini daha da artırabilir. Hasar şekli, Tip I dokumanın düşük elyaf yoğunluğu, düşük elyaf-matris bağlanma alanı ve yönsüz dokuma karakteristiği nedeniyle yük altındaki yapısal bütünlüğü koruyamayan bir sistem olduğunu doğrulamaktadır. Bu yapı tipi, yapısal yük taşıma gereksinimi olmayan, sadece dolgu ya da koruyucu tabaka gibi ikincil fonksiyona sahip parçalarda değerlendirilebilir; çünkü yük taşıma, enerji yayma ve şekil koruma gibi birincil mühendislik gereksinimlerini karşılamaktan uzaktır. PC-Tip II dokuma yapısına sahip kompozit numunelerde ise kayma testi sonrası ortaya çıkan hasar biçimi çok daha farklıdır. Bu yapıdaki hasar morfolojisi, elyaf-matris etkileşiminin etkinliğini ve yük aktarımının yapısal verimliliğini açıkça göstermektedir. Hasar çizgileri daha düzgün ve yönlü olup, deformasyonun sadece tek bir noktada değil, geniş bir bölgeye yayıldığı görülmektedir. Numunelerin kırılma bölgeleri incelendiğinde, liflerin birbiriyle hizalanmış olduğu, bükülmeye ve kaymaya dirençli davranışlar sergilediği, ancak kırılma anında dahi ara yüzeyden kopmak yerine deformasyonla yükü taşımaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu yapı, yüksek elyaf yoğunluğu, elyaf yöneliminin yüke paralel oluşu ve ara yüzey bağ kalitesinin yüksekliği gibi üç temel parametrenin eş zamanlı etkileşimiyle yükün elyaflara eşit ve kontrollü biçimde dağıldığını ve bu nedenle matrisin aşırı gerilmeye maruz kalmadan, çatlak ilerlemesini geciktirebildiğini ortaya koymaktadır. Tip II dokuma, kompozit malzemelerde en çok tercih edilen konfigürasyonlardan biri olup, yük taşıma kapasitesiyle birlikte deformasyon toleransı yüksek olan, sünek kırılma karakteristiği sergileyen bir yapı oluşturur. Elyafların yönlü deformasyon sergilemesi, malzemenin yalnızca kuvvet değil aynı zamanda enerji absorpsiyon kapasitesi açısından da üst düzey bir performans sunduğunu göstermektedir. Bu yapı, yapısal taşıyıcı elemanlar, darbe emici kompozit paneller veya titreşim altında çalışan yüksek mukavemetli parçalar için ideal bir çözümdür. Aynı zamanda hasarın merkezde kalması, yapının kenar bölgelerde yük transferini başarıyla gerçekleştirdiğini ve lokal gerilme yığılmalarını minimuma indirdiğini göstermektedir ki bu durum, yorulma ömrü ve güvenlik katsayısı açısından kritik önem taşır.

PC-Tip III dokuma yapısına sahip kompozit numunelerde gözlemlenen hasar ise oldukça karmaşık ve üç boyutlu etkilerin yoğun olduğu bir yapıyı yansıtmaktadır. Görsellerde, kırılmanın simetrik olmadığı, ancak yüksek elyaf organizasyonuna sahip bölgelerde hasarın sönümlendiği ve elyafların yük altında yön değiştirerek deformasyona karşı direnç oluşturduğu gözlemlenmektedir. Elyafların birbiri etrafında dönerek yükü çevresel olarak yayması, Tip III yapının üç boyutlu dokuma karakteristiğinin avantajını ortaya koymaktadır. Bu tür yapılarda, uygulanan kesme kuvveti yalnızca yüke paralel eksende değil, elyaflar arası çapraz bağlantılar üzerinden çevresel olarak da aktarılmakta ve bu da çatlak ilerlemesini yönsüzleştirerek geciktirmektedir. Bu yapıdaki elyafların hasar bölgesine olan tepkisi, çatlamanın yavaş geliştiğini, kopma öncesi deformasyonun daha kontrollü ve yaygın olduğunu göstermektedir. Elyaflar arasında gözlemlenen kaymalar, yapının şekil değişimini tolere edebildiğini; buna karşın matrisin korunduğunu ve ana deformasyonun elyaf organizasyonu içinde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu, enerji yayma açısından son derece değerli bir özellik olup, darbe yükleri altında şekil koruma ve çatlak yayılımını sınırlama gibi mühendislik hedeflerine ulaşmak için ideal bir davranıştır. Tip III dokumanın hasar morfolojisi, rijitlik ve enerji absorpsiyonunun optimum dengesini sunduğunu, elyaf mimarisinin yük altındaki geometrik stabiliteye katkı sağladığını ve çatlakların yön değiştirmesini sağlayarak kontrollü kırılma sağladığını göstermektedir. Bu yapı, yüksek darbe dayanımı, şekil sabitliği ve çok eksenli yük altında çalışan yapılar için oldukça avantajlıdır ve çok yönlü performans beklentilerinde mühendislik tasarımı açısından üst sınıf bir seçenek oluşturur.

Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, Tablo 5.13'te yer alan hasar görüntüleri, yalnızca görsel gözlem değil; aynı zamanda malzemenin mikromekanik davranışlarının ve yük altında gelişen yapısal bozulma mekanizmalarının nitel birer göstergesidir. Dokuma tipi, bu noktada yalnızca bir üretim parametresi değil, doğrudan mekanik performansı belirleyen ve hasarın yönünü, şiddetini, yayılım hızını ve deformasyon şekillerini belirleyen anahtar bir değişkendir. Tip I kırılma ve zayıf bağlanma, Tip II yönlü deformasyon ve süneklik, Tip III ise çevresel yük aktarımı ve enerji dağılımı üzerinden şekillenen hasar karakteristiğiyle tanımlanmaktadır. Bu durum, kompozit malzeme tasarımında dokuma tipinin rastgele değil, uygulama şartlarına ve yükleme senaryosuna özel olarak seçilmesi gerektiğini ve bu seçimin mühendislik hesaplarıyla birlikte, mikroyapısal deformasyon analizlerine dayanması gerektiğini açıkça göstermektedir. Bu bağlamda, hasar morfolojisi yalnızca test sonrası gözlem değil, aynı zamanda ileri malzeme modelleme, sonlu eleman simülasyonları ve mikroyapı tabanlı yaşam döngüsü tahminlerinin temel verisidir ve bu nedenle bilimsel değerlendirme sürecinde vazgeçilmez bir parametredir.

Tablo 5.13'te yer alan kırılma görselleri ve yorumlar, özellikle elyafların kopma davranışı, çatlak yönelimi ve yük dağılımı açısından Liu ve ark. (2025), yaptığı çalışmada yer alan, Fig. 21-23'teki makroskobik ve mikroskobik kırılma yüzeyleriyle birebir örtüşmektedir. Liu ve ark.'nın gözlemlerinde, y-tipi kırıklar, elyaf bükülmeleri ve bağ filamentlerinin delaminasyonu önleyici

etkileri net şekilde gözlemlenmiştir. Bu durum, Tip III'teki çevresel yük aktarımı ve çatlak yön kontrolüyle birebir paralellik göstermektedir



Şekil 5.20. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testi a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 5.20’de sunulan deneysel veriler, cam elyaf dokuma esaslı kompozit yapıların (cam-cam sistemleri) kayma yükleri altındaki mekanik davranışlarını üç temel parametre üzerinden çok boyutlu bir şekilde incelememizi sağlamaktadır: (a) maksimum kuvvet, (b) maksimum yer değiştirme ve (c) maksimum gerilme. Bu üç ayrı grafik, yalnızca kompozitlerin dayanım düzeyleri

hakkında bilgi vermekle kalmamakta; aynı zamanda malzemenin enerji sönümleme kapasitesi, yük transfer etkinliği, deformasyon süreci, ara yüzey bağ kalitesi ve çatlak ilerleme direnci gibi çok kritik mühendislik parametrelerinin dokuma tipi temelinde nasıl farklılık gösterdiğini derinlemesine analiz etmemize olanak tanımaktadır. Özellikle cam-cam kombinasyonları gibi aynı elyaf sistemi ile oluşturulmuş kompozitlerde sadece dokuma tipi değiştirilerek bu kadar çarpıcı davranış farklılıklarının elde edilmesi, dokuma mimarisinin malzeme performansında ne derece belirleyici bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

İlk olarak, Şekil 5.20.a grafiğinde gösterilen maksimum kuvvet verileri, üç dokuma tipi arasında belirgin performans farklarını ortaya koymaktadır. CC-Tip III dokuma tipi, ~330 N seviyesinde ölçülen maksimum kuvvet değeri ile en yüksek kayma dayanımına ulaşmakta ve bu özelliğiyle özellikle rijitlik, yük taşıma kapasitesi ve kısa sürede yüksek kesme yüklerini absorbe etme gerektiren yapısal uygulamalarda öne çıkmaktadır. Bunu izleyen CC-Tip II dokuma tipi, ~300 N ile benzer düzeyde dayanım gösterirken; CC-Tip I dokuma tipi yalnızca ~130 N seviyelerinde kalarak oldukça düşük mukavemet sunmaktadır. Bu farkların temel nedeni, liflerin dokuma yönelimi ve yerleşim geometrisidir. Tip III dokuma mimarisi, yük yönüne dik ve çapraz yönlerde yerleştirilmiş daha sıkı bağlantılar içerdiğinden, sadece elyaf-matris ara yüzeyine yük binmemekte, aynı zamanda elyaf-elyaf temas alanlarında da yük paylaşımı gerçekleşmektedir. Bu durum, yük aktarım yollarının yalnızca doğrusal değil, çok eksenli şekilde çalışmasını sağlamakta ve bu sayede lokal gerilme yığılmaları minimize edilmektedir. Bu, “çok eksenli yük aktarım etkinliği” kavramı olarak tanımlanmakta ve özellikle yüksek darbe altında çalışan, anizotropik yüklemeye maruz kalan yapılar için kritik bir mekanik avantaj sunmaktadır. Buna karşın Tip I dokumalar, yüke paralel olmayan elyaf yönelimi, düşük elyaf yoğunluğu ve zayıf ara yüzey sürekliliği nedeniyle yükleri sadece matrise yüklemekte ve bu da matris odaklı çatlakların daha hızlı ilerlemesine neden olmaktadır. Bu da düşük kırılma tokluğu ve düşük kayma dayanımıyla sonuçlanmaktadır.

Şekil 5.20.b grafiğinde yer alan maksimum yer değiştirme verileri, deformasyon davranışının sünekliliğe yakınlığını ve malzemenin enerjiyi absorbe etme yeteneğini yansıtmaktadır. CC-Tip I dokuma yapısı, ~13.5 mm'lik maksimum yer değiştirme ile en yüksek deformasyon kapasitesini göstermekte, ardından CC-Tip II (~10.5 mm) ve CC-Tip III (~10 mm) gelmektedir. Bu değerler, yapının kayma yükleri altında ne ölçüde şekil değiştirebildiğini, dolayısıyla enerjiyi plastik deformasyonla ne kadar yayabildiğini ortaya koymaktadır. Tip I yapılar, düşük mukavemete rağmen yüksek deformasyon kapasitesi sunarak sünek davranışa eğilimli olduklarını göstermektedir. Ancak bu deformasyon, yüksek enerji absorpsiyonu değil, matris merkezli çatlak yayılımı ve ara yüzeyden ayrılma nedeniyle kontrolsüz deformasyon olarak değerlendirilmelidir. Tip II dokumalar ise yüksek deformasyonla birlikte yüksek kuvvet kapasitesi göstererek yük taşıma ile enerji yayma arasında optimal denge sunan sistemler olarak öne çıkmaktadır. Bu yapı, kayma yüküyle birlikte liflerin matris içerisinde kontrollü kaymasını ve ara yüzeyden kopmadan

deformasyonu tolere etmeyi başarmaktadır. Tip III yapılar ise rijit karakterleri nedeniyle düşük yer değiştirme sunmakla birlikte, yüksek gerilme seviyelerine ulaştıklarından bu deformasyonun tamamı yüksek dirençle gerçekleşmektedir. Bu da onların şekil korunumunun kritik olduğu uygulamalarda, örneğin bağlantı parçaları, rijit bağlantı yüzeyleri ya da yönlendirilmiş yük taşıyıcılarında kullanılmasını önermektedir. Ayrıca burada unutulmaması gereken önemli bir faktör, deformasyon miktarının kırılma şekliyle doğrudan ilişkili olmasıdır. Tip I’lerde ani kırılma olmadan geniş deformasyon gerçekleşmekteyken, Tip III yapılar kısa deformasyonla yüksek direnç gösterip ani kırılmaya gitmektedir; bu da farklı mühendislik uygulamalarında farklı güvenlik faktörlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5.20.c grafiğinde sunulan maksimum gerilme verileri, kompozit numunelerin yük taşıma kapasitesinin kesit alanından bağımsız, özgül bir ölçüsü olarak değerlendirilir ve gerçek mekanik mukavemetin karşılaştırılması açısından en kritik parametreyi temsil eder. Verilere göre, en yüksek maksimum gerilme değeri CC-Tip II dokuma tipinde elde edilmiştir (~70 MPa), ardından CC-Tip III (~65 MPa) ve CC-Tip I (~55 MPa) gelmektedir. Bu durum oldukça dikkat çekicidir çünkü CC-Tip III, maksimum kuvvet açısından en yüksek değeri göstermesine rağmen, maksimum gerilmede ikinci sıraya düşmüştür. Bu, Tip III dokumalarda yükün geniş alana dağıtılmasıyla ilgili olabilir: yani yüksek kuvvet taşısa bile bu kuvvet daha fazla kesite yayıldığı için özgül gerilme değeri daha düşüktür. Öte yandan Tip II yapılar hem yüksek kuvvet hem yüksek deformasyon hem de yüksek gerilme sergileyerek en dengeli kompozit davranışı ortaya koymaktadır. Bu dokuma mimarisi, elyafların yüke maksimum uyumla hizalanmasını, ara yüzey sürekliliğinin artırılmasını ve yük dağılımının simetrik gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Özellikle elyafların yük yönüne göre açısız yerleşimi, burada gerilme değerlerinin optimize edilmesini sağlamaktadır. Gerilme aktarım verimliliği bakımından Tip II dokuma, yükün elyaf yönünde maksimum doğrusal aktarım ile taşındığı, ancak aynı zamanda matrisin de enerji yayılımında destekleyici olduğu hibrid bir davranış sergilemektedir. Tip I yapı ise düşük özgül dayanımı nedeniyle yapısal uygulamalar için sınırlı potansiyel taşımaktadır ve yalnızca darbe enerjisinin emildiği, birincil yük taşıma gereksinimi bulunmayan uygulamalarda değerlendirilebilecek niteliktedir.

Sonuç olarak, Şekil 5.20’deki deneysel bulgular, aynı cam elyaf bazlı malzemeye üretilmiş kompozit sistemlerin yalnızca dokuma mimarisindeki farklılıklarla ne denli farklı mekanik performanslar sergileyebileceğini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Tip I dokumalar, yüksek deformasyon fakat düşük dayanım karakteriyle sünek ancak zayıf sistemler olarak tanımlanırken; Tip II dokumalar, yüksek gerilme ve yeterli deformasyon ile en dengeli yapılar arasında öne çıkmakta; Tip III dokumalar ise yüksek dayanım fakat sınırlı şekil değişimi ile rijit ve kontrollü kırılma davranışı sergileyen sistemler olarak mühendislikte farklı fonksiyonel alanlara hitap etmektedir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, cam-cam kompozit malzemelerin uygulama

sahaları; Tip I için darbe emici yardımcı yapılar, Tip II için çok eksenli yük taşıyıcı sistemler ve Tip III için rijitlik ve mukavemetin kritik olduğu primer taşıyıcı elemanlar olarak belirlenebilir.

Şekil 5.20’de yer alan veriler, cam-cam (CC) elyaf takviyeli kompozit yapıların üç farklı dokuma tipi (Tip I, II, III) altında gösterdiği maksimum kayma gerilmesi değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Blais ve ark. (2025) tarafından yapılan çalışmada, delik etrafı bölgelerde gelişen matris çatlakları ve elyaf-matris ara yüzey ayrışmaları, kayma dayanımını azaltan başlıca hasar tipleri olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.20’de, CC-Tip II yapısının ulaştığı yüksek maksimum kayma gerilmesi (~70 MPa), bu dokuma tipinin yüksek bağ yoğunluğu sayesinde lokal gerilme yığılmalarını azaltarak çatlak ilerlemesini geciktirdiğini göstermektedir. Bu durum, Blais ve arkadaşlarının AWJ ile hazırlanan örneklerde gözlemlediği düşük delaminasyon ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi ile doğrudan uyumludur. Buna karşılık, CC-Tip I yapısındaki daha düşük kayma gerilmesi değeri (~55 MPa civarı), hem düşük bağ sıklığı hem de elyaf yöneliminin kayma düzlemiyle tam örtüşmemesi nedeniyle ortaya çıkmakta; bu da Blais ve ark.’ın CD kesimli numunelerdeki düzensiz yük dağılımı ve erken kırılma bulgularıyla paralellik göstermektedir.

Şekil 5.20’de yer alan maksimum kayma gerilmesi değerleri, dokuma tipine bağlı olarak cam-cam elyaf takviyeli 3B kompozit yapıların içsel kayma stabilitesini kıyaslamaktadır. Bu bağlamda, Jang ve ark. (2024) tarafından yapılan örgü açısı varyasyonlarına dayalı mekanik performans analizleri, kayma dayanımı açısından en yüksek sonuçların yüksek açılı (60°) dokuma yapılarında elde edildiğini göstermektedir. Bu durum, CC-Tip II ve özellikle CC-Tip III yapılarında gözlemlenen yüksek kayma gerilmesi değerleri ile uyumludur. Jang ve arkadaşları, 60° örgü açısıyla üretilen kompozitlerde, örgü filamentlerinin elyaflar arasındaki boşlukları daha verimli doldurduğunu, bu sayede kayma sırasında elyaf-matris ara yüzeyinde daha az yerel kayma biriktiğini ve yük aktarımının daha stabil gerçekleştiğini belirtmiştir. Tezdeki CC-Tip III yapısında bu yapı özelliği, çok yönlü elyaf geçişi ve sıkı bağ yapısı sayesinde kesme gerilmesinin daha homojen dağılmasına olanak sağlamaktadır. Bu yapı, Jang ve ark.’ın tabakalar arası kesme stabilitesini en yüksek seviyede gözlemlediği 60° dokuma yapısının niteliksel değerlendirilmesi olarak benzerlik göstermektedir. Düşük kayma değerine sahip CC-Tip I yapı ise, Jang ve arkadaşlarının düşük açılı örgü desenlerinde gözlemlediği elyaf yönelimi eksiklikleri ve ara yüzey ayrışmalarının kayma dayanımını zayıflattığı bulgularla uyumludur.

Tablo 5.14. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	2. Numune	3. Numune
CC-Tip I			
CC-Tip II			
CC-Tip III			

Tablo 5.14’te sunulan cam-cam elyaf kumaş esaslı kompozit numunelere ait hasar görüntüleri, her biri farklı dokuma mimarisine (Tip I, Tip II, Tip III) sahip numunelerin kayma yükü altındaki mekanik performanslarını yalnızca dayanım ya da deformasyon kapasiteleri açısından değil, bu yükler altında gelişen mikroyapısal hasar oluşum, yayılım ve sonlanma mekanizmaları açısından değerlendirmemize olanak sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin yükleme altındaki davranışı, klasik olarak elastik modül, maksimum yük taşıma kapasitesi ya da deformasyon miktarı gibi makroskobik parametreler ile tanımlansa da, gerçekte bu davranışlar kompozitin mikro düzeydeki organizasyonu, elyaf-matris ara yüzey bütünlüğü, dokuma yönelimi, elyaf yoğunluğu, yük eksenine dokuma mimarisi arasındaki açıl uyum, ara yüzeydeki bağ kuvvetlerinin yoğunluğu ve mikro çatlak başlatma enerjisi gibi oldukça kompleks parametrelerin birleşik etkisi altında şekillenmektedir. Bu nedenle, Tablo 5.14’teki görseller yalnızca kırılma yüzeyinin şekli hakkında değil, aynı zamanda dokuma mimarisinin yük altındaki başarımını ve hasarın enerjetik evrimini görsel olarak deşifre eden birer mühendislik verisi niteliği taşımaktadır. Yani bu görüntüler, sadece deneysel çıktı değil; aynı zamanda elyaf yönelimi ile yük hizası arasındaki bağıl sapma açısının hasar tipi üzerindeki etkisini, elyaflar arası kayma davranışını, çatlağın elyaf boyunca mı yoksa ara yüzeyden mi ilerlediğini, elyaf kırılma–elyaf çekme–matris çatlama oranlarını ve yükün elyaf-matris sistemine yayılma verimliliğini doğrudan ortaya koymaktadır.

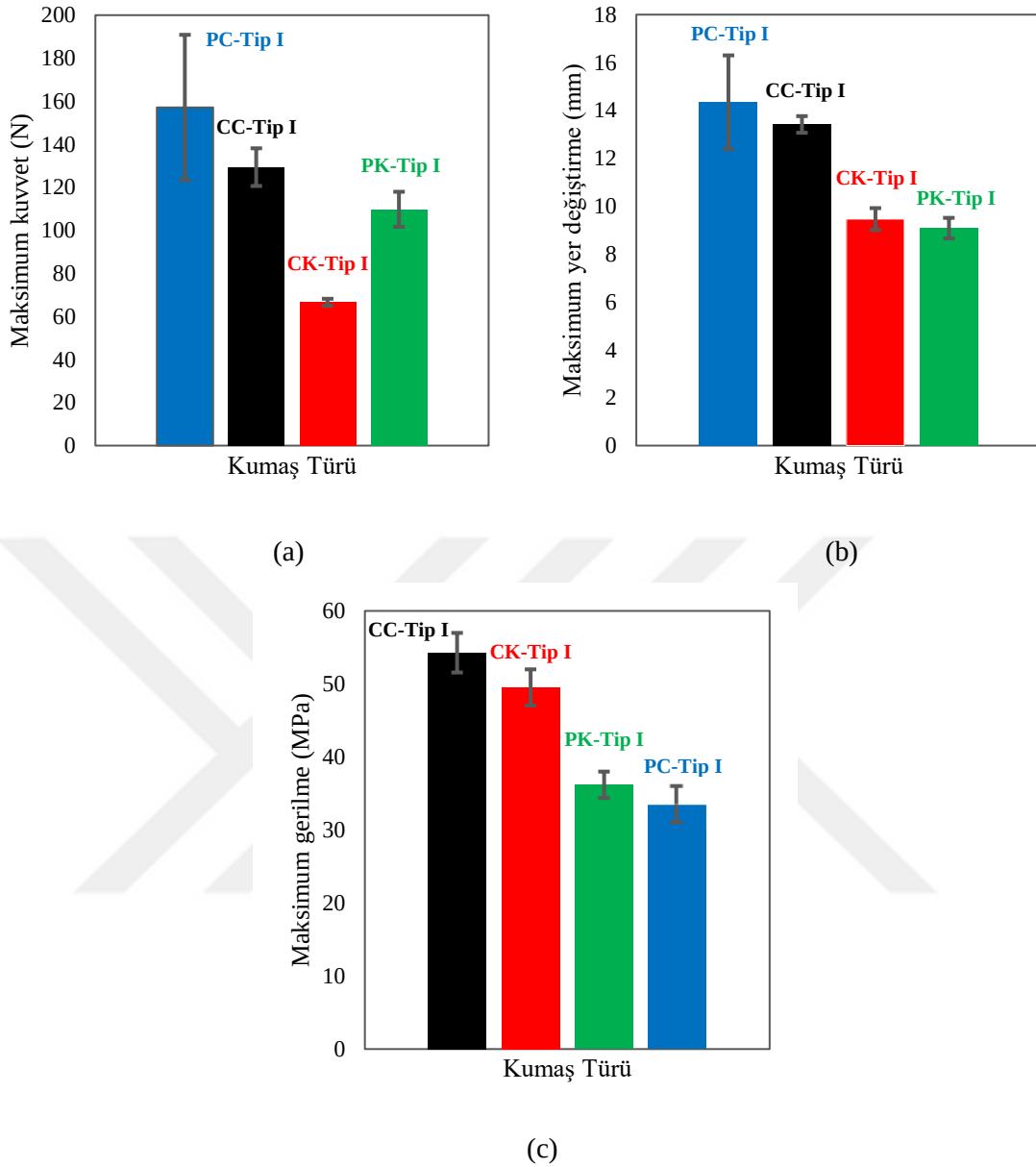
CC-Tip I dokuma tipine sahip numunelerde gözlenen hasar biçimi, genel anlamda düzensiz, asimetrik ve gevrek karakterde bir kırılmayı yansıtmaktadır. Hasar görüntüleri dikkatlice incelendiğinde, kırılma yüzeylerinin merkezden kaymış olduğu, kopmanın elyaf hizasında değil çoğunlukla elyaflar arası zayıf bağlanmış ara yüzeylerden başladığı ve kırılmanın yük yönüyle doğrudan örtüşmeyen bölgelerde yoğunlaştığı açıkça görülmektedir. Bu durum, mikroyapısal olarak ara yüzey bağ dayanımının düşük olduğunu ve dokuma yöneliminin yük eksenine yeterince uyumlu yerleştirilmediğini göstermektedir. Bu da yük aktarım yollarının elyaflar yerine doğrudan matrise yönlendiği, dolayısıyla yükün elyaflar arasında geçiş yapamadan, matriste lokal gerilme yığılmaları oluşturduğu ve bu gerilmelerin erken çatlak başlatma bölgelerine dönüştüğü anlamına gelmektedir. Literatürde bu tür kırılma mekanizmaları “matrisin hâkim olduğu ara yüzey ayrılması” olarak adlandırılır ve genellikle düşük dokuma yoğunluğuna, düşük elyaf-matris bağ enerjisine ve yüksek ara yüzey porozitesine sahip sistemlerde görülür. Ayrıca kırılma sonrası yüzeyde gözlemlenen elyaf-kalıntı yoğunluğunun azlığı, elyafların yük altında kırılmadan ara yüzeyden sıyrıldığını ve böylece yapının enerjiyi elyaf deformasyonu ile değil, doğrudan matris çatlamasıyla absorbe ettiğini göstermektedir. Bu, Tip I yapının yüksek şekil değişimi kapasitesine sahip olmasına rağmen, yük taşıma açısından zayıf ve gevrek bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Yapısal anlamda bu tür kompozitler, düşük frekanslı ve düşük şiddetli darbe uygulamalarında, ikincil koruma katmanlarında veya enerji yayılımı gerektiren destekleyici yapılarda değerlendirilebilir. Ancak, birincil taşıyıcı görev üstlenmeleri halinde çatlak ilerlemesi çok yönlü kontrolsüz olacağından, kırılma riski mühendislik güvenliği açısından önemli bir zafiyet doğurur.

CC-Tip II dokuma mimarisine sahip numunelerde kayma testi sonrası ortaya çıkan hasar morfolojisi, oldukça yönlü, simetrik ve kontrollü bir çatlama davranışı göstermektedir. Görsellerde açıkça fark edilen durum, kırılmanın elyaf hizasına paralel düzlem üzerinde geliştiği, hasarın merkezde lokalize kaldığı ve özellikle elyafların hem ara yüzden ayrılmadan deformasyon sergilediği hem de bazı bölgelerde doğrudan çekme ile kırıldığıdır. Bu, klasik mekanik literatürde “elyaf hizalanmış çekme kırılması ve ara yüzey direnci” olarak tanımlanan bir kırılma senaryosunu işaret eder. Bu tür davranış, hem elyaf-matris ara yüzey bağ dayanımının yüksek olduğunu hem de elyafların yük eksenine yakın açılarla yönlendirildiğini göstermektedir. Tip II dokumanın bu düzeyde dengeli kırılma sergilemesinin temel nedeni, dokuma sıklığının optimum olması, elyafların yük eksenine hizalanmış olması ve elyaf-matris bağ kalitesinin çatlak ilerlemesini yavaşlatacak kadar güçlü fakat enerjiyi yayacak kadar esnek bir yapıya sahip olmasıdır. Bu sayede yük altında oluşan mikro çatlaklar elyaf yönünde ilerlemekte, bu da hasarın kontrollü bir düzlem boyunca yayılmasını ve yapının ani değil, kademeli olarak kırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca dikkat çeken bir diğer husus, bazı kırılma bölgelerinde elyafların tamamen kopmadan bükülerek enerji emmesi; bu, yapının sünek davranış gösterdiğinin en açık kanıtıdır. Yük aktarımı açısından bu yapı,

yükü sadece doğrusal elyaflar boyunca değil, elyaf-elyaf geçiş bölgeleri ve matris katkısıyla çok yönlü olarak dağıtmaktadır. Bu, “dağıtılmış kayma akması” olarak adlandırılan mikromekanik bir fenomendir ve gelişmiş kompozitlerde özellikle darbe altı enerjiyi dağıtmak için tercih edilir. Sonuç olarak, Tip II dokuma mimarisi, hasarın yayılım yönü ve enerjiyi elyaf düzlemi boyunca yayma başarımı açısından optimum çözüm sunmakta, yüksek mukavemet ile sünekliğin ideal bir dengede birleştirildiği mühendislik sistemleri için kritik avantajlar sağlamaktadır.

CC-Tip III dokuma mimarisiyle üretilen numuneler, en karmaşık ancak en çok yönlü yük aktarım stratejisini barındıran sistemlerdir ve bu yapıların kayma yükü altındaki hasar morfolojisi, ileri düzey kompozit mimarisinin başarısını doğrudan ortaya koymaktadır. Görsellerde net biçimde görülen özellik, kırılma yüzeyinin merkezde lokalize olmadığı, bazı bölgelerde elyafların bükülerek yön değiştirdiği, bazı bölgelerde ise elyafların kırılmadan önce kayarak çatlak ilerlemesini geciktirdiğidir. Bu yapı, mikromekanik olarak “kayma yükü altında elyafların köprüleme yapması ve yeniden yönelmesi” davranışına karşılık gelir. Yani elyaflar yük altında sadece koparak değil, kayarak, yön değiştirerek ve ara yüzeyde dönerek enerjiyi absorbe eder. Bu mekanizma, çatlak yayılımını doğrudan engellemekte ve hasarın merkezden kenara doğru yönelmesini sağlayarak kırılmayı yapının en zayıf değil, en dirençli bölgelerinde sonlandırmaktadır. Elyafların çok eksenli dokuma düzleminde yer alması, yük eksenine dik, çapraz ve eğik yönlerde çok sayıda yük aktarım yolu yaratmakta; bu da yapının lokal zayıflıklarını dengeleyen bir etki oluşturmaktadır. Ayrıca bu yapıda oluşan kırılma yüzeylerinin dalgalı olması, yüklerle birlikte elyafların yeniden yönlendiğini ve ara yüzey kopmasının ani değil, sürekli ve kontrollü olarak geliştiğini göstermektedir. Bu yapılar, yüksek rijitlik, yüksek enerji sönümleme kabiliyeti ve çok yönlü çatlak yönlendirme avantajı nedeniyle zırh sistemleri, havacılık panelleri, helikopter rotor bileşenleri ve yüksek hızlı darbe sistemlerinde stratejik olarak kullanılabilecek kompozit mimarilerdir.

Sonuç olarak Tablo 5.14’te sunulan bu hasar görüntüleri, sadece görsel bir veri değil, kompozit malzeme mühendisliğinde dokuma tipi–yük aktarımı–hasar gelişimi üçlüsünün nasıl optimize edilebileceğini gösteren bir mühendislik haritasıdır. Tip I yapılar gevrek ve zayıf; Tip II yapılar dengeli, yönlü ve sünek; Tip III yapılar ise rijit, çok yönlü ve çatlak yönlendirme kabiliyetine sahip olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 5.21. Farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen kompozit numunelerin kayma mukavemetlerinin dokuma tipine göre karşılaştırılması a) maksimum kuvvet, b) maksimum yer değiştirme ve c) maksimum gerilme

Şekil 5.21'de sunulan deneysel veriler, farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen ve aynı dokuma tipi (Tip I) altında sınıflandırılan dört ayrı kompozit numunenin kayma mukavemeti, deformasyon karakteristiği ve özgül gerilme düzeylerini karşılaştırmalı olarak analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Bu veriler, her bir kombinasyonun taşıma kapasitesi, deformasyon sünekliği ve mikroyapısal yük aktarım etkinliği gibi parametreleri doğrudan yansıtan mühendislik çıktıları sunmakta; böylece kompozit yapı tasarımında filament seçim kriterlerinin yalnızca statik mukavemet değil, aynı zamanda enerji yayılımı, çatlak gelişim hızı, ara yüzey bağ dayanımı, gerilme dağılım geometrisi ve kırılma morfolojisi üzerinden de değerlendirilmesi gerektiğini

bilimsel olarak göstermektedir. Özellikle cam elyaf, karbon elyaf ve polyester kombinasyonlarının farklılıkları, malzemenin çekme elastisitesi, elyaf-matris bağlanma karakteri, elyaf kesiti etrafındaki stres aktarım profili ve elyafın matrisle olan yüzey pürüzlülüğü gibi çok sayıda faktörün eş zamanlı etkileşimiyle oluşan yapısal davranışlara dönüşmektedir.

Şekil 5.21.a maksimum kuvvet değerleri üzerinden yapılan değerlendirmede, numunelerin kayma yükleri altında yük taşıma kapasitesini doğrudan ortaya koymakta ve sistemin toplam kırılma noktasına kadar yük aktarımındaki yapısal bütünlüğünü ifade etmektedir. Grafiklerde en yüksek maksimum kuvvet değerinin PC-Tip I yapısına ait olduğu görülmektedir (~160 N), bunu CC-Tip I (~135 N), PK-Tip I (~115 N) ve CK-Tip I (~70 N) sistemleri takip etmektedir. Bu durum, polyester-cam kombinasyonunun, cam elyafın yüksek yüzey pürüzlülüğü ve polyester matrisin onunla yüksek ara yüzey kohezyon göstermesi nedeniyle kayma yüklerini oldukça etkin biçimde taşıyabildiğini göstermektedir. Cam elyaflar, yük altında matris içinde sabitlenmiş halde kalabilmekte ve stresin elyaf boyunca dağılmasına olanak sağlayan yüksek ara yüzey sürtünme katsayısı ve bağ kuvveti sunmaktadır. Buna karşılık karbon elyaf içeren sistemlerde (PK ve CK), karbon elyafların yüzey enerjisinin cam elyaflara göre daha düşük olması, matrisle bağ kuvvetinin sınırlı olması ve elyaf-matris ara yüzeyinde stres aktarım bölgesinin dar olması gibi nedenlerle maksimum taşıma kapasitesi düşmektedir. Özellikle karbon elyafların yüksek modül ve gevrek karaktere sahip olması, matrisle deformasyon uyumunu azaltmakta ve ani stres yığılmaları nedeniyle yük artışı sırasında erken ara yüzey kopmaları ile sonuçlanabilmektedir. Bu, karbon takviyeli sistemlerin kayma yükleri altında kısa sürede kırılma moduna geçmesine, dolayısıyla maksimum kuvvete ulaşmadan yapı bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır. Bu analiz, cam elyafın yük aktarımına olan katkısının karbon elyafa kıyasla kayma gerilmelerinde daha yüksek olduğunu ve bunun özellikle ara yüzey sürtünme katsayısı, elyaf-matris bağ yapısı ve enerji yayılım geometrisi ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

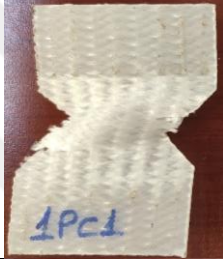
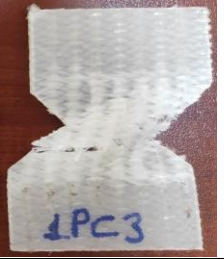
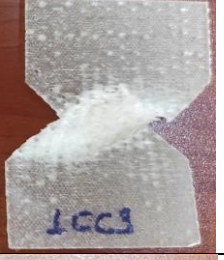
Şekil 5.21.b maksimum yer değiştirme değerleri, kompozit sistemlerin deformasyon sünekliliğini, kırılmadan önce şekil değiştirme kapasitesini ve enerjiyi plastik deformasyon yoluyla yayabilme potansiyelini yansıtmaktadır. En yüksek yer değiştirme değeri PC-Tip I sisteminde (~15 mm) görülmekte, onu CC-Tip I (~14 mm), ardından CK-Tip I (~10 mm) ve PK-Tip I (~9 mm) takip etmektedir. PC ve CC sistemlerinin yüksek deformasyon kapasitesi, cam elyafların deformasyon altında yön değiştirme ve matris içinde sürtünme yoluyla hareket etme özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Cam elyaflar, mikromekanik düzeyde matris ile bütünleşerek, elyaf boyunca yükü yaymakta ve matrisin çatlamasını geciktirmektedir. Ayrıca cam elyafların daha düşük modül değerine sahip olması, onların yüklerle birlikte belirli ölçüde esneyerek deformasyon bölgesinin genişlemesine katkı sağlamasına neden olmaktadır. Buna karşın karbon elyafların yüksek elastik modülü, deformasyon bölgesinde fazla esneme olmadan yükün doğrudan ara yüzeye binmesine ve böylece kısa deformasyonla ani kırılmaya neden olmaktadır. Özellikle karbon elyaf içeren PK ve

CK sistemlerinde deformasyon bölgesi daha dardır çünkü karbon elyaf, düşük yüzey pürüzlülüğü nedeniyle matrisle sınırlı bağlanmakta, elyaf-matris ara yüzeyi erken kopmakta ve sistem kırılmaya direnç gösterememektedir. Bu durum, PK-Tip I ve CK-Tip I sistemlerini deformasyon yayma açısından daha az avantajlı hale getirmekte, bu nedenle darbe ve sismik yükler gibi enerji absorpsiyon gerektiren senaryolarda sınırlı performans göstermelerine yol açmaktadır. Sonuç olarak bu grafik, yalnızca sünekliği değil aynı zamanda enerjiyi yayma alanı kavramı üzerinden malzeme başarımını analiz etmeye olanak sağlar.

Şekil 5.21.c maksimum gerilme değerleri, taşıma kapasitesinin kesit alanına oranlanmış özgül ifadesi olup, mukavemetin gerçek mühendislik düzeydeki karşılığıdır. Bu parametre, yük taşıma kapasitesini sadece mutlak kuvvetle değil, aynı zamanda elyaf yerleşimi, yük dağılım geometrisi ve kırılma düzlemi büyüklüğü ile normalize ederek karşılaştırma yapılmasını sağlar. En yüksek maksimum gerilme değeri CC-Tip I yapısında (~55 MPa) görülmekte, ardından CK-Tip I (~52 MPa), PK-Tip I (~37 MPa) ve PC-Tip I (~35 MPa) sıralanmaktadır. Burada dikkat çekici bir durum söz konusudur: PC-Tip I en yüksek kuvvet ve deformasyon değerlerine sahip olmasına rağmen, gerilme bakımından en düşük performansı göstermektedir. Bu durum, taşıma kapasitesinin daha geniş deformasyon ve kesit bölgesine yayılması ile ilişkilidir. Diğer bir ifadeyle, yük elyaflar ve matris arasında geniş bir alanda dağılmakta ve bu yayılım, kesit başına düşen gerilme seviyesini düşürmektedir. Tersine olarak, CK-Tip I sisteminde deformasyon alanı dar olduğundan yük, dar bir bölgede toplanmakta ve lokal gerilme değeri yükselmektedir. Bu durum, karbon elyaflarının mukavemet açısından daha iyi sonuç verebildiğini ancak bu yüksek gerilmenin lokalize olduğunu, dolayısıyla kırılmanın ani gerçekleşebileceğini göstermektedir. Özellikle CC-Tip I yapısının yüksek kuvvet ve yüksek gerilmeyi birlikte sunması, yük aktarım yollarının simetrik ve sürekli olduğu, dokuma yapısının yüke paralel hizalanmış elyaflarla desteklendiği ve matrisin yükü elyaf boyunca taşıyabilecek kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Bu yapı, mekanik açıdan hem rijitlik hem mukavemet hem de yük aktarım sürekliliği açısından üstün bir karakter sergilemektedir. Genel sonuçlara bakıldığında, cam elyaf takviyeli sistemler (PC-Tip I ve CC-Tip I), kayma yükleri altında hem deformasyon kapasitesi hem de yük taşıma kapasitesi açısından daha kontrollü ve güvenli bir davranış sunarken; karbon elyaf takviyeli sistemler (PK-Tip I ve CK-Tip I), yüksek gerilme dayanımı sunmalarına rağmen deformasyon kapasitesi açısından daha sınırlı ve kırılğan karakterdedir. Cam elyafların yüzey morfolojisi, matrisle bağ kurma kapasitesi ve deformasyon altında enerji yayılımına katkı sağlaması, onları kayma dayanımı açısından avantajlı hale getirmektedir. Karbon elyaflar ise yüksek rijitlik ve çekme mukavemeti sayesinde daha çok çekme yönlü yüklemelerde ideal sonuçlar verirken, kayma altında ani kırılmaya eğilimlidir. Bu nedenle, sistemin dayanım, süneklik, deformasyon yayılımı ve çatlak geciktirme performansı göz önünde bulundurularak filament kombinasyonunun uygulamaya özgü olarak seçilmesi gereklidir. Örneğin PC-Tip I sistemleri darbe emici sandviç panellerde, CC-Tip I sistemleri yüksek mukavemetli

taşıyıcı tabakalarda, PK-Tip I sistemleri hafiflik öncelikli alt parçalarda, CK-Tip I sistemleri ise yüksek rijitlik gerektiren ama düşük deformasyon toleransı kabul eden hassas yüzeylerde kullanılabilir. Bu grafikler yalnızca deneysel çıktı değil, aynı zamanda mikromekanik modelleme, ara yüzey bağ dayanımı optimizasyonu, yük aktarım sürekliliği hesaplamaları, çatlak sapma analizleri, femto-mikro ölçekte kırılma mekaniği benzetimleri ve tasarım-aşırı yükleme güvenlik katsayısı tayini gibi mühendislik düzeyde hesaplamalar için de doğrudan referans verisi niteliğindedir.

Tablo 5.15. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testi hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	1. Numune	1. Numune	1. Numune
PC-Tip I			
CC-Tip I			
CK-Tip I			
PK-Tip I			

Tablo 5.15'te sunulan hasar görüntüleri, farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen Tip I dokuma tipi kompozit numunelerin kayma yükleri altındaki kırılma karakteristiğini açık biçimde yansıtmaktadır. Görseller, yalnızca makroskopik kırılma yüzeylerini değil; aynı zamanda elyaf-

matris ara yüzey etkileşimlerini, mikromekanik enerji yayılım yollarını ve çatlak ilerleme dinamiklerini çözümleyebilmek için kritik mühendislik verisi sunmaktadır. 3B dokuma mimarisi sayesinde, klasik 2B sistemlerden farklı olarak elyafların z-yönünde (kalınlık yönünde) yerleşimi, yük aktarım sürekliliğini artırmakta; ancak bu avantajın etkinliği, kullanılan filamentlerin yüzey morfolojisi, ara yüzey bağ dayanımı, deformasyon kapasitesi ve kırılma esnekliği gibi parametrelerle doğrudan bağlantılıdır.

PC-Tip I numuneleri, görsellerde dikkat çekici biçimde merkez bölgesinde lokalize olmuş, simetrik ve nispeten düzgün bir kırılma yüzeyi sergilemektedir. Üç numunenin de ortak özelliği, kırılma düzleminin çoğunlukla elyaf hizasına paralel ilerlemesi ve kırılma sırasında matris yüzeyinde belirgin bir yırtılma bölgesi oluşmasıdır. Bu durum, polyester matris ile cam elyaf arasındaki yüksek ara yüzey bağ kuvvetinin etkisiyle açıklanabilir. Cam elyafın yüzey pürüzlülüğü, matrisin iç yapısına tutunmayı artırırken; polyester matrisin deformasyon kapasitesi, elyafın kırılmadan önce bükülmesine ve enerji absorbe etmesine olanak tanımaktadır. Özellikle PC1 ve PC2 numunelerinde çatlak hattının daha keskin ve simetrik olması, yük aktarımının homojen gerçekleştiğini; PC3'te ise hafif dalgalı bir kırılma çizgisi, yerel ara yüzey zayıflıklarına işaret etmektedir. Bu yapıların mühendislik yorumu, yüksek deformasyon kapasitesi ve çatlak ilerleme sünekliği sayesinde darbe emici ve enerji yayılımı gereken sistemlerde başarılı performans sunacağı yönündedir.

CC-Tip I numuneleri, tamamen cam elyaf kullanımı sayesinde yüksek rijitlik ve güçlü yük aktarımı sağlamaktadır. Görsellerde tüm numunelerin (CC1, CC2, CC3) simetrik ve temiz bir kırılma hattı sunduğu, özellikle çatlakların matris değil doğrudan elyaf boyunca ilerlediği açıkça görülmektedir. Bu durum, cam elyafların matrisle yüksek bağ kuvvetine sahip olması ve yükün büyük ölçüde elyaflar tarafından taşındığını göstermektedir. Mikromekanik açıdan, bu tip kırılma "elyaf-dominant kırılma" olarak tanımlanabilir ve ara yüzeyin değil doğrudan elyafların yük altında koptuğunu işaret eder. Görsellerde elyaf köprüleme izleri belirgindir; bu, çatlak ilerlemesinin elyaflar tarafından geciktirildiğini ve yapı bütünlüğünün yüksek mukavemet gereksinimlerinde sürdürülebildiğini göstermektedir. Ancak, bu yapıların sünekliği PC-Tip I'e kıyasla sınırlıdır, çünkü cam elyaf gevrek karakterlidir. Sonuç: Yüksek mukavemet ve rijitlik gereken uygulamalarda tercih edilmesi gereken güçlü bir yapı.

CK-Tip I numuneleri (CK1, CK2, CK3), karbon ve cam elyaflarının kombinasyonundan kaynaklı hibrit karakter sergilemektedir. Görsellerde dikkat çekici biçimde, kırılma düzlemlerinin oldukça net ve keskin olduğu, kırılmanın daha düzensiz bölgeler içerdiği ve elyaf hizasında belirgin ayrışmalar gözlemlendiği görülmektedir. Bu yapıların karbon elyaf içeriği nedeniyle yüksek elastik modüle sahip olduğu ve ara yüzey bağ dayanımının cam elyaflara kıyasla daha düşük kaldığı açıktır. Mikromekanik olarak, karbon elyafların matrisle sınırlı bağ kurması nedeniyle yük altında ani ve kontrollü olmayan kopmalar meydana gelmektedir. Görsellerde özellikle CK3'te matrisin

yer yer soyulduğu ve elyafların kırılmadan sıyrıldığı görülmektedir; bu durum, ara yüzey kopmasının aktif olduğunu ve çatlağın hızla yayıldığını göstermektedir. Sonuç olarak CK-Tip I yapıları, yüksek rijitlik ve çekme mukavemeti sunar ancak sünek deformasyon kapasitesi sınırlıdır; darbe veya ani yük altında kırılmalık gösterebilir.

PK-Tip I numuneleri (PK1, PK2, PK3), karbon ve polyester kombinasyonunun temsilcisidir ve görsellerde en düzensiz, en fazla yüzey deformasyonu gösteren kırılma izlerini sunmaktadır. Hasar yüzeylerinin dalgalı ve karışık olması, kırılmanın çoğunlukla ara yüzeyden başladığını ve enerji yayılımının elyaf yerine matris tarafından karşılandığını göstermektedir. Karbon elyafların düşük yüzey enerjisi ve matrisle zayıf bağlanma kapasitesi nedeniyle çatlaklar daha erken başlamakta ve kontrollü olmayan bir yayılım göstermektedir. Özellikle PK2 numunesinde gözlenen geniş çatlak bölgesi, deformasyon sırasında ara yüzey bağlarının kolayca koptuğunu ve sistemin yük altında ani boşalma yaşadığını göstermektedir. Bu yapıların mühendislik yorumu: Deformasyon kapasitesi düşük, mukavemet orta seviye; dolayısıyla ikincil destek yapılarında veya rijitliği ön planda tutmayan hafif konstrüksiyon elemanlarında tercih edilebilir.

Görseller, yalnızca kırılma yüzeylerinin biçimini değil; aynı zamanda mikromekanik düzeyde elyaf-matris ara yüzey bağlarının, filamentlerin mekanik özelliklerinin ve dokuma deseninin yük aktarımına nasıl etki ettiğini doğrudan göstermektedir. Tüm numunelerde ortak olarak görülen durum, 3B dokuma sayesinde yük aktarım yollarının kalınlık yönünde artırılmasına rağmen, nihai davranışın esas olarak kullanılan filamentlerin yüzey morfolojisi ve ara yüzey bağ kuvveti tarafından belirlendiğidir.

Cam elyaf takviyeli sistemler (PC-Tip I ve CC-Tip I), özellikle yüksek yüzey pürüzlülüğü ve polyester matrisle uyumlu kimyasal yapı sayesinde güçlü ara yüzey bağları oluşturmuş; bu da sünek deformasyon kapasitesini artırmış ve kırılmanın kontrollü, merkezde lokalize ve çoğunlukla elyaf hizasında ilerlemesini sağlamıştır. Bu yapıların dikkat çekici avantajı, çatlakların ani yayılmaktan çok kademeli olarak ilerlemesi ve enerji absorpsiyonunun deformasyon yoluyla gerçekleşmesidir. Özellikle CC-Tip I sistemlerinde, elyaf-dominant kırılma mekanizmaları gözlemlenmiş ve yüksek rijitlik ile mukavemetin bir arada sunulduğu yapılar ortaya çıkmıştır. Bu kombinasyonlar, darbe dayanımı, enerji sönmeme ve uzun ömür gibi kriterlerin öncelikli olduğu mühendislik uygulamalarında üstün performans vaat etmektedir.

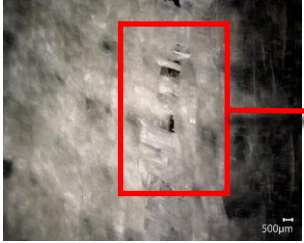
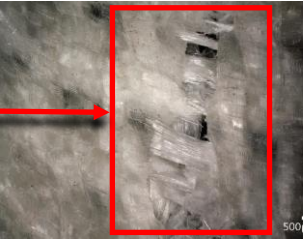
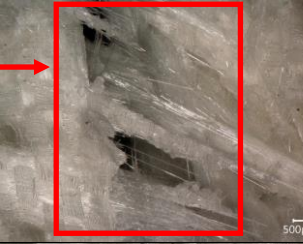
Karbon elyaf içeren sistemler (CK-Tip I ve PK-Tip I) ise yüksek elastik modülleri ve mukavemet avantajlarına rağmen, matrisle olan sınırlı bağlanma kapasiteleri nedeniyle kırılmalık karakter sergilemiştir. Görsellerde dikkat çeken hızlı çatlak ilerleme ve ani ara yüzey kopmaları, bu sistemlerde çatlak kontrolünün zayıf, deformasyon kapasitesinin ise düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle CK-Tip I numuneleri, rijit ama sünekliği sınırlı yapılar olarak tanımlanırken, PK-Tip I sistemleri daha dağınık kırılma izleri ve düzensiz deformasyon bölgeleriyle matris baskın kopma mekanizmalarını sergilemiştir. Bu sistemlerin kullanımı, yüksek

mukavemet gereksinimi olan ama deformasyonun minimal tutulduğu uygulamalarla sınırlı kalmalıdır.

Bütün bu değerlendirmeler ışığında, kompozit yapıların tasarımında sadece filament tipi veya dokuma deseni değil; ara yüzey bağ dayanımı, elyaf-matris uyumu, elyaf yönlenmesi, deformasyon kapasitesi ve çatlak ilerleme dinamiklerinin birlikte ele alınması gerekmektedir. 3B dokuma teknolojisi, çok eksenli yük aktarım yolları ve daha bütünlüklü bir yapısal dayanım sağlasa da bu avantajı etkin biçimde kullanabilmek için özellikle ara yüzey mühendisliği ve filament-matris uyumu kritik rol oynamaktadır. Sonuç olarak; cam elyaflı sistemler, yüksek deformasyon toleransı ve güvenli çatlak yayılımı sunarken; karbon elyaflı sistemler yüksek mukavemet sağlamakta ancak kırılma riski nedeniyle daha sınırlı kullanım alanına sahiptir. Bu analizler, mühendislik tasarımında filament seçiminden dokuma tipine kadar her adımda, sadece statik dayanım değil; deformasyon sünekliği, enerji yayılım potansiyeli ve uzun ömür gibi parametrelerin de göz önüne alınması gerektiğini güçlü biçimde vurgulamaktadır.

Tablo 5.13'te sunulan maksimum kayma gerilmesi ve deformasyon değerleri, farklı filament konfigürasyonlarının ve dokuma tiplerinin kayma davranışını nasıl etkilediğini göstermektedir. Özellikle Tip III dokumalar, z-yönlü bağların yoğunluğu sayesinde daha yüksek kayma şekil değiştirme kapasitesi sergilemiştir. Al-Nadhari ve ark. (2025) çalışmasında üç farklı 3B dokuma hibrit yapı (B, H1, H2) karşılaştırılmış ve özellikle E-cam içeriği arttıkça kayma modülünde artış (%16–26), ancak kayma dayanımında düşüş (%4–10) gözlenmiştir. Bu davranış, tezdeki cam elyaf katkılı yapıların sünekliği artırmasına rağmen mukavemet değerlerinde karbon takviyelilere kıyasla biraz daha düşük kalmasıyla paralellik göstermektedir. Her iki çalışmada da cam elyafın bağlayıcı görev üstlenmesi sayesinde deformasyonun daha yaygın bölgelere dağılması ve yükün daha düzgün aktarılması sağlanmıştır. Bu durum hem şekil değiştirme kapasitesini hem de kırılma öncesi enerji yayılımını artırmaktadır. Tezdeki PC-Tip I ve CC-Tip I yapılarındaki deformasyon değerleri, Al-Nadhari'nin H1 ve H2 yapılarına benzer kayma davranışlarını temsil etmektedir.

Tablo 5.16. Cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	Elyaf Yönü Boyunca Hasar
CC-Tip I			
CC-Tip II			
CC-Tip III			

Tablo 5.16'da sunulan cam-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin mikroskobik hasar görüntüleri, kırılma sonrası malzeme içerisinde meydana gelen hasarların, sadece makroskobik deformasyon ve çatlak açılmalarıyla sınırlı kalmadığını; bunun ötesinde mikroyapı seviyesinde oldukça yönlü, belirli düzlemlerde ilerleyen ve filament-matris ara yüzey etkileşimiyle doğrudan ilişkili kompleks hasar mekanizmalarının aktif olarak çalıştığını ortaya koymaktadır. 50X ve 100X büyütme seviyelerinde incelenen kırılma bölgeleri, her bir dokuma tipi için karakteristik bir mikrohasar paterni sunarken; tabloya eklenen “Elyaf Yönü Boyunca Hasar” görüntüleri bu kırılmaların elyaf hizasında nasıl yönlendiğini, ne tür kopma şekilleriyle ilerlediğini ve ara yüzey boyunca enerjinin nasıl yayıldığını net biçimde ortaya koymaktadır. Buradaki görüntüler, yalnızca görsel kayıt değil; aynı zamanda malzeme mekaniği, kompozit yapılar mekaniği, mikroskobik kırılma mekaniği ve kompozit ara yüzey fiziği açısından değerlendirildiğinde, son derece zengin bilgi taşımaktadır. Mikromekanik düzeyde gözlemlenen bu tür hasar türleri, yalnızca yük taşıma kapasitesinin değil, aynı zamanda çatlağın başlama eşiğinin, yayılma hızının, yönlenme eğiliminin ve nihai kırılma senaryosunun tahmin edilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

CC-Tip I numunelerine ait mikroskobik görüntüler, özellikle 100X büyütmede, elyaf-matris ara yüzeyinden başlayan ve elyaf eksenine boyunca ilerleyen çoklu çatlak dizilimlerini göstermektedir. Görselde belirgin şekilde görülen bu paralel çatlaklar, ara yüzey bağ kopması ile başlayıp, elyaf

sıyrılması ve ardından gelen matris çatlağı süreçlerini tetikleyen bir kırılma silsilesiyle karakterize edilmiştir. Elyaf lar arasındaki boşlukların çatlaklarla dolması, enerjinin difüz şekilde yayılmasını engellemiş; bunun yerine enerjinin yoğun olarak belirli düzlemlerde birikmesine ve bu bölgelerden elyaf hizasına paralel çatlakların ilerlemesine neden olmuştur. Bu çatlakların yük doğrultusuyla yüksek oranda hizalanması, yük aktarımının doğrusal, tek yönlü ve sınırlı elyaf sayısı üzerinden gerçekleştiğini, bu nedenle yük altındaki bölgesel gerilme yığılmalarının ara yüzeyi zayıflattığını göstermektedir. Bu yapı, kırılma bir ara yüzey mekanizmasını temsil etmektedir. Özellikle cam elyafın yüksek elastik modülü ve düşük deformasyon kapasitesi, matrisin plastik deformasyon sürecine katılamamasıyla birleştiğinde, kırılma enerjisinin elyaf eksenini boyunca hızla yayılarak çatlağın ani ve doğrusal biçimde gelişmesini beraberinde getirmektedir. Bu hasar tipi, yüksek rijitlik ve düşük süneklik karakterine sahip yapılar için tipiktir. Hasar ilerledikten sonra yapının enerji absorpsiyon kapasitesi ciddi oranda düşer ve kırılma sonrası yük taşıma olasılığı zayıflar.

CC-Tip II numunelerinde gözlemlenen mikroyapısal hasar biçimi, Tip I'e göre daha dağılmış, daha yayımlı ve daha karmaşık bir morfolojiye sahiptir. 100X büyütme altında elde edilen görüntüde, elyaf ların belirli bir düzlemde değil, çapraz yönlerde de hasara maruz kaldığı görülmektedir. Bu yapı, elyaf yöneliminin yük doğrultusuna göre daha açılı yerleştiği, yani yükün yalnızca tek bir yönden değil, çoklu elyaf yönleri boyunca paylaşıldığı bir yapı tipini işaret etmektedir. Bu tip kırılma, çok eksenli yük aktarımı sonucu gelişen “çapraz elyaf ara yüzey kırılması” şeklinde adlandırılan bir mikromekanik hasar türüdür. Özellikle cam elyaf ların matris içinde daha sık ve daha çapraz yerleşmiş olması, enerjinin belirli bir düzlemde toplanmasını önleyerek çatlağın yön değiştirmesine, yani kırılmanın gecikmesine neden olur. Bu yapıların avantajı, yük altındaki sürekliliklerinin daha yüksek olmasıdır. Yani çatlak ilerlemeye çalışırken sürekli olarak yeni elyaf bariyerleriyle karşılaşır ve bu bariyerler çatlağı sapmaya zorlar. Bu sayede hasar birikimi zamana yayılır, sistem aniden kırılmaz ve deformasyon bölgesi genişletilmiş olur. Enerji yayılımının kontrollü olması sayesinde bu yapılar yüksek enerji absorpsiyonu gösterir. Elyaf-matris ara yüzeyinde görülen kısmi elyaf sıyrılmaları, sistemin sünekleştiğini, ancak yine de taşıyıcı özelliklerini koruduğunu gösterir. Bu özellikler, mühendislikte hem darbe hem de sismik yükleme altında performans gösterebilecek hibrit yapılar için kritik avantajlar sunmaktadır.

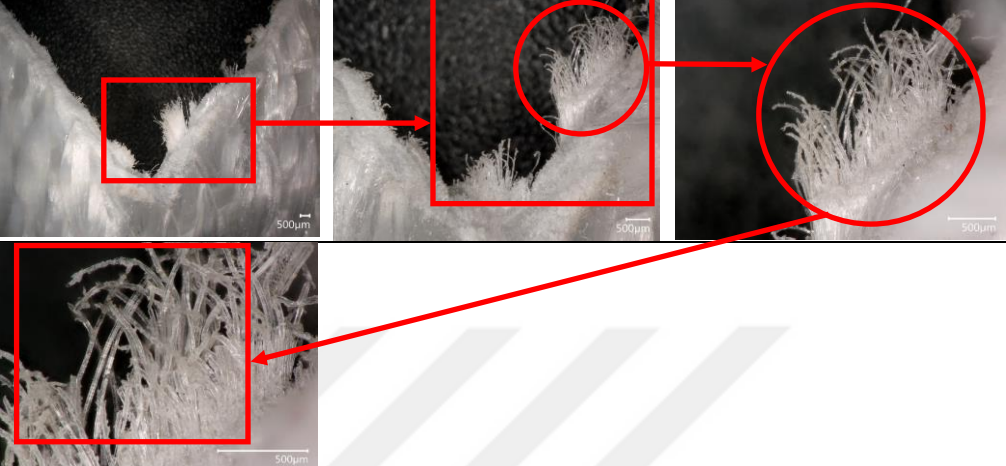
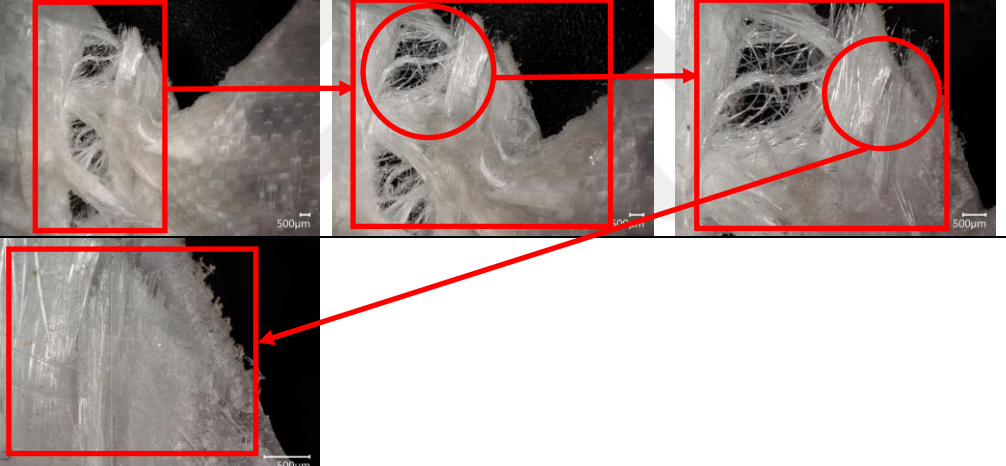
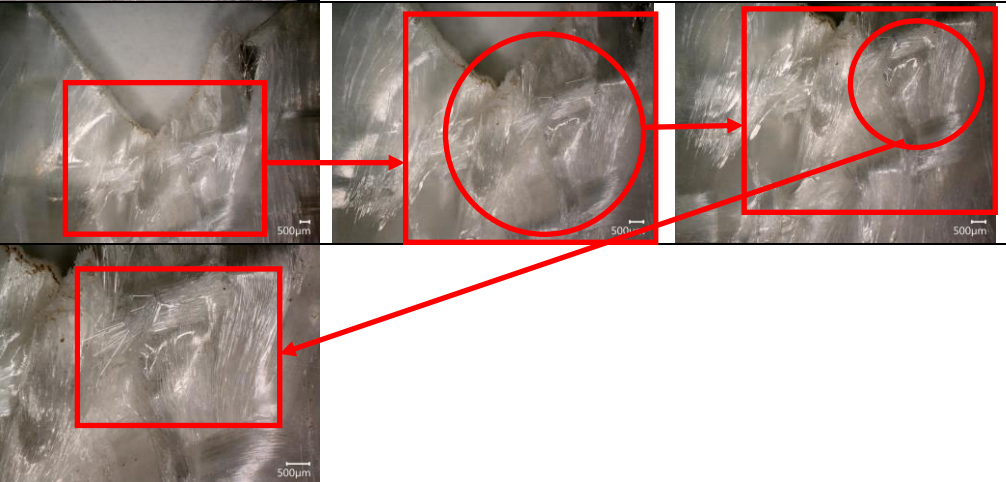
CC-Tip III numunelerinde ise hasar görüntüleri, en kompleks fakat en dengeli mikromekanik kırılma yapısını yansıtmaktadır. 50X ve 100X büyütme seviyelerinde, elyaf ların matris içerisinde farklı yönlerde dağıldığı, çatlakların başlangıç noktasının daha az belirgin olduğu ve elyaf-matris ara yüzeyinde kopma yerine yön değiştirme davranışının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapı, klasik kırılma mekaniği yaklaşımının ötesine geçen bir davranışa, yani mikroskobik çatlak geciktirme ve elyaf köprüleme mekanizmalarının aktif biçimde çalıştığı bir kompozit yapıya işaret etmektedir. Çatlak ilerlemeye çalıştığında, elyaf lar onun yoluna girerek hem yönünü değiştirir hem de çatlağın enerji kazanmasını engeller. Bu yapı, kırılma enerjisinin büyük bir kısmını elyaf lar arası

sürtünme, yön değiştirme ve lokal bükülme yoluyla absorbe eder. Bu nedenle Tip III dokuma yapısı, 3B dokumanın sunduğu en iyi performansı sergileyen sistemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Özellikle çatlak yönünün karmaşık ve düzensiz olması, enerjinin sistem içinde dağıtıldığını ve kırılmanın sistematik olmadığını göstermektedir; bu, sistemin dinamik yük altında daha uzun süre dayanabileceğini gösterir. Elyaf-matris ara yüzeyinde belirgin kopma izlerinin olmaması, bağ kuvvetlerinin yeterli olduğunu ve hasarın daha çok elyaf içinde ya da yön değişiminde gerçekleştiğini ortaya koyar. Bu yapı, yüksek dayanım ile birlikte sünek deformasyonun aynı anda sağlandığı, mukavemet-süneklik dengesi optimum hale getirilmiş sistemlerin temel temsilcisidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Tablo 5.16'daki mikroskobik görüntüler, cam-cam esaslı kompozit numunelerde dokuma tipinin sadece elyaf yönelimini değil; aynı zamanda yük aktarım sürekliliğini, ara yüzey bağ kalitesini, çatlak ilerleme hızını ve nihai kırılma karakterini belirleyici temel parametre olduğunu göstermektedir. Tip I dokuma yapıları, doğrusal kırılmalar, ani çatlak gelişimi ve yüksek lokal gerilme yığılmaları ile karakterize olurken; Tip II dokumalar, çapraz elyaf düzeni sayesinde kırılma gecikmesi ve yön değiştirme eğilimleri sergilemekte; Tip III yapılar ise elyaf yöneliminin maksimum düzeyde dağıldığı, yükün üç boyutlu olarak elyaf boyunca aktarılabildiği ve çatlağın ilerlemesinin maksimum düzeyde kontrol altına alındığı sistemler olarak tanımlanabilir. Bu yapıların her biri farklı uygulamalar için özelleştirilebilir potansiyele sahiptir. Tip I sistemler kısa süreli yüklerde rijitlik avantajı sunarken, Tip II sistemler darbe altında direnç sergileyebilir; Tip III sistemler ise sürekli yük taşıma ve darbe-soğurma özelliklerini birlikte sunarak ileri mühendislik uygulamaları için ideal çözümler ortaya koymaktadır.

Kayma testine ilişkin sayısal veriler, yapıların süneklik, rijitlik ve deformasyon toleransı açısından doğrudan karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Özellikle CC-Tip III yapısının hem kuvvet hem de deformasyon kapasitesinin yüksek oluşu, Aranda-Iglesias ve ark. (2020)'nın RUC düzeyinde geliştirdiği modeldeki "doğrusal olmayan kayma homojenizasyonu" ile tam olarak örtüşmektedir. Bu model, kayma sırasında bağ noktalarının enerji dağılımını sağlayarak ani kırılmaları engellediğini öngörmektedir.

Tablo 5.17. Yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf kumaşlardan üretilen kompozit numunelerin kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi			
PC-Tip I			
PC-Tip II			
PC-Tip III			

Tablo 5.17'de sunulan mikroskobik görüntüler, yüksek mukavemetli polyester-cam elyaf takviyeli 3B dokuma kompozit sistemlerin kayma yükü altındaki hasar davranışını çok katmanlı bir

perspektiften ortaya koymaktadır. Bu görüntüler, yalnızca kırılma sonrası hasarın nerede ve nasıl oluştuğuna dair bir mikrografik temsil değil; aynı zamanda kırılmanın hangi mikromekanik mekanizmalarla, hangi enerji yutma yolları ile ve hangi yük aktarım süreksizlikleri nedeniyle oluştuğunun görsel haritasıdır. İncelenen yapıların her biri, farklı dokuma tipleri (Tip I, II ve III) altında değerlendirilmiş olup, bu dokuma çeşitliliği, sadece mekanik davranış farkı değil, aynı zamanda çatlağın yönlenmesi, elyaf sıyrılması, ara yüzey kopması, elyaf kırılması ve çatlak yön değiştirmesi gibi kırılma parametrelerini de etkilemiştir. Bu bağlamda her dokuma tipi, kendi içinde farklı kırılma senaryolarını tetiklemekte ve malzemenin ömrü, enerji absorpsiyonu ve güvenlik katsayısı üzerinde farklı etkiler oluşturmaktadır.

PC-Tip I yapısına ait mikroskobik hasar görüntüleri, özellikle çatlak başlangıç bölgesinde yoğun elyaf sıyrılması, belirgin elyaf kümelenmeleri ve matrisin mikroyapısal olarak ayrılması gibi karakteristikleri içermektedir. Görsellerde çok sayıda elyaf demetinin matris yapısından sıyrıldığı ve elyaf uçlarının dışarıya doğru açıldıkları net biçimde izlenebilmektedir. Bu tür hasar morfolojisi, literatürde sıklıkla “elyaf sıyrılmasının hâkim olduğu kırılma” olarak tanımlanmakta ve ara yüzey bağ kuvvetinin yük altında zayıflamasıyla ortaya çıkan bir hasar türünü yansıtmaktadır. Özellikle yüksek mukavemetli cam elyafların polyester matris ile oluşturduğu ara yüzey, belirli bir yük seviyesinden sonra kohezyonel bağını yitirerek elyafların gövde boyunca değil, uçlarından sıyrılmasına sebep olmaktadır. Bu tür sıyrılmalar enerji açısından avantajlıdır çünkü kırılma sırasında sistem enerji yutar, ancak bu aynı zamanda sistemin yapısal bütünlüğünü hızlıca kaybetmesine de neden olur. Görüntüdeki düzensiz elyaf yerleşimi ve yığılmaları, yükün anizotropik olarak elyaflar üzerinde dağılmadığını ve bu nedenle belirli bölgelerde lokal yük konsantrasyonlarının çatlağı tetiklediğini göstermektedir. Elyaf hizasında çok sayıda paralel çatlak görülmesi, yapının özellikle elyaf-matris bağ kuvveti zayıf bölgelerinde yükü doğrudan elyaf eksenine boyunca aktarmak yerine, matris boyunca gerilme biriktirdiğini ve bu birikimin ara yüzey yırtılmasıyla sonuçlandığını göstermektedir.

PC-Tip II yapısına ait mikroskobik analiz, hasarın daha yönlü, daha düzenli ve daha homojen bir ilerleme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu yapı, elyaf sıyrılmasına rağmen bu sıyrılmanın sistematik şekilde elyaf eksenine boyunca gerçekleştiği, mikroyapıdaki yük aktarımının daha yönlendirilmiş olduğu ve çatlak başlangıcının daha geç bir yük seviyesinde oluştuğu anlamına gelmektedir. Görsellerde yer alan dairesel işaretlemeler, özellikle ara yüzeyden elyaf ayrılmalarının ardından ortaya çıkan elyaf deformasyonlarını göstermekte ve bu yapı elyafların yalnızca ayrılmadığını, aynı zamanda çekmeye maruz kalarak büküldüğünü de göstermektedir. Bu davranış, “elyaf köprülenmesi” ve “matrisin bağ bölgelerinde akma” olarak adlandırılan iki önemli mikromekanik enerji yutma mekanizmasının aynı anda çalıştığına işaret eder. Köprüleme, elyafların çatlağın iki ucunu birleştirerek çatlağın ilerlemesini geciktirdiği bir mekanizmadır. Bu iki mekanizma birlikte çalıştığında, sistem sadece daha yüksek mukavemet değil, aynı zamanda

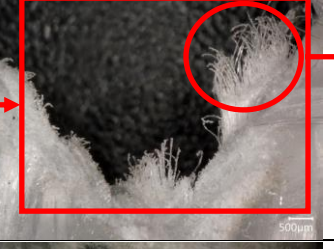
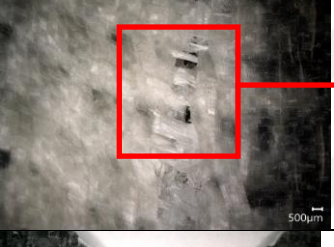
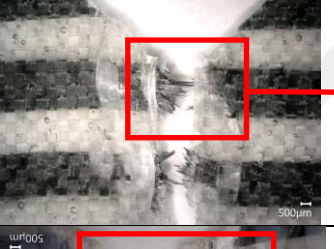
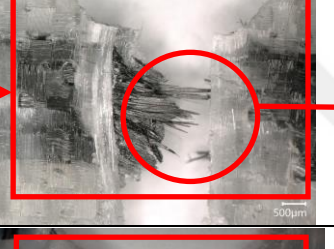
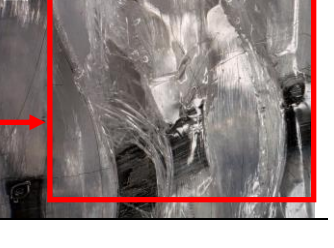
daha yüksek tokluk da sergiler. Görsellerdeki düzgün elyaf hizalaması, çatlak yönünün elyaf eksenine çakışmaması ve sıyrılmaların yön değiştirmesi, çatlak sapması etkisinin devreye girdiğini ve böylece enerjinin sistem içinde daha geniş bir alana yayıldığını göstermektedir. Bu yapı, çatlak ilerleme hızının yavaşladığı, kırılmanın daha yüksek bir enerji eşik değerine ulaşmadan tamamlanmadığı ve sistemin yapısal bütünlüğünü daha uzun süre koruduğu anlamına gelir.

PC-Tip III dokuma yapısına ait mikroskobik kırılma morfolojisi, en kompleks ve çok yönlü hasar dağılımını sunmaktadır. Görüntülerde çok sayıda yön değiştirmiş elyaf, matris ile iç içe geçmiş deformasyon bölgeleri ve farklı düzlemler boyunca gelişmiş çatlak yüzeyleri izlenmektedir. Bu yapı, mikromekanik olarak “çok eksenli yönlendirilmiş elyafların sapması ve ara yüzeyde mikro akma” olarak tanımlanabilecek bir kırılma senaryosunu temsil eder. Elyafar yalnızca çekilerek ayrılmamakta, aynı zamanda yön değiştirerek çatlak ilerleme yönünü saptırmakta ve bu sayede çatlağın ilerleme hızı yavaşlatılmaktadır. Bunun yanında, cam elyafların yüksek sertliğine rağmen dokuma yönüne bağlı olarak matris içerisinde kayabilen segmentler oluşturması, yük taşıma süresini uzatmakta ve kırılmanın daha çok ara yüzey deformasyonu ile gerçekleşmesini sağlamaktadır. Elyafarın matris içerisinde birbirine göre yön değiştirmiş olması, enerji yayılımının sadece tek eksenle değil, çoklu düzlemler boyunca gerçekleştiğini göstermekte; bu da sistemin enerji sönümleme kapasitesini maksimize eden bir mekanizmadır. Ayrıca elyafların bükülerek yön değiştirmesi, klasik “elyafların düzgün şekilde matristen çıkması” senaryosunun dışında “delamine olmuş elyafların dönmesi” gibi daha karmaşık mikrohasar modlarının devreye girdiğini gösterir. Görsellerde özellikle dikkat çeken nokta, çatlak başlangıç noktalarının belirgin olmaması ve çatlak yüzeyinin yüksek dalgalılık içermesidir. Bu yapı, kırılmanın sistematik değil, dağıtılmış karakter taşıdığını ve kırılmanın tekil bir olaydan çok, zaman içinde gelişen ve eş zamanlı enerji yayımıyla ilerleyen bir süreç olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, Tablo 5.17’de yer alan mikroskobik kırılma görüntüleri, her bir dokuma tipinin kırılma mekaniği açısından özgün bir karakteristik sunduğunu; bu karakteristiklerin, yalnızca mukavemet değil, aynı zamanda deformasyon toleransı, çatlak yönelme kontrolü ve hasar enerjisi yayma kabiliyeti gibi çok sayıda kritik mühendislik parametresini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Tip I dokuma yapısı, daha düzensiz ve ani elyaf sıyrılması odaklı hasar gelişimine sahiptir. Tip II yapısı, elyaf eksenine yönlü, daha dengeli ve kontrollü kırılma davranışı ile öne çıkarken; Tip III yapısı, kırılmanın elyaf yönünde sapmalara uğradığı, yük dağılımının daha homojen gerçekleştiği ve çatlağın çok eksenli ilerleyerek sistemin yapısal bütünlüğünü daha uzun süre koruduğu bir mikromorfoloji sergilemektedir. Elyaf sıyrılmaları, elyaf bükülmeleri, yön değiştirmeler, ara yüzey deformasyonları ve matris çatlaklarının bir arada gözlenmesi; bu yapının ileri mühendislik uygulamalarında çok yönlü yükleme altında güvenli çalışabilecek hibrit kompozitler için ideal bir kırılma profili sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu analiz, sadece

görüntülerin yorumu değil; aynı zamanda mühendislik tasarım kararları için temel teşkil edecek nitelikte bir mikroyapıdan makroyapıya geçiş odaklı değerlendirme sistematiğidir.

Tablo 5.18. Farklı filament kombinasyonlarıyla dokunan 3B kumaşlardan üretilen kompozit numunelere ait kayma testine ilişkin mikro hasar görüntüleri

Dokuma Tipi	50X	100X	200X
PC-Tip I			
CC-Tip I			
CK-Tip I			
PK-Tip I			

Tablo 5.18’de sunulan mikroskobik hasar görüntüleri, kompozit numunelerin yalnızca makroskobik dayanım ya da süneklik gibi geleneksel parametrelerle değil; aynı zamanda kırılma öncesi ve sonrası malzeme içerisinde gelişen mikroskobik hasar biçimleri üzerinden de karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Görseller 50X, 100X ve 200X büyütme ölçeklerinde sunulmuş olup, her bir kompozit sistemin (PC-Tip I, CC-Tip I, CK-Tip I, PK-Tip I) kırılma düzlemlerinde oluşan elyaf sıyrılması, ara yüzey ayrılması, elyaf kopması, elyaf demeti deformasyonu, çatlak yönelmesi, elyaf köprüleme ve mikro delaminasyon gibi hasar mekanizmaları detaylı biçimde gözlemlenebilmiştir. Bu yapıların her biri farklı filament kombinasyonlarına sahip olduğundan, kırılma modları yalnızca dokuma tipi ile değil, aynı zamanda filamentlerin modüler elastisitesi, çekme dayanımı, yüzey morfolojisi, ara yüzey bağ enerjisi ve matrisle kimyasal/tribolojik

etkileşimi gibi parametrelerle de şekillenmiştir. Bu nedenle, görüntülerin değerlendirilmesi yalnızca yapısal değil, aynı zamanda malzemenin mikroskobik karakterine dair kapsamlı bilimsel yorumlar gerektirmektedir.

PC-Tip I numunelerinde 50X büyütmede ilk olarak göze çarpan unsur, elyaf sıyrılmasının oldukça yoğun ve düzensiz bir biçimde geliştiği alanlardır. 100X ve 200X büyütmelerde bu sıyrılmaların detaylı morfolojisi gözlemlendiğinde, elyafların matris içerisinden büyük kümeler halinde çekilip çıktığı, bu sırada yüzeylerinde kırık izleri, bükülmeler ve yön değiştirmeler olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, klasik bir elyaf çekilip çıkmasının baskın olduğu kırılma türü senaryosuna işaret eder. Cam elyafların yüksek rijitliği ve yüzey pürüzlülüğünün polyester matrisle yüksek sürtünme teması oluşturması, kırılma anında enerji absorpsiyonunu sıyrılma üzerinden sağlamaktadır. Ancak dikkat çekici nokta, elyafların büyük kütleler halinde kopmadan sıyrılmasıdır ki bu, sistemin çatlağı geciktirmeden hızlı bir şekilde ara yüzden ayırdığını ve taşıma kapasitesini aniden kaybettiğini göstermektedir. Mikromekanik olarak bu davranış, düşük ara yüzey bağ dayanımı ve yüksek elyaf deformasyon enerjisi kombinasyonunun sonucu olarak yorumlanabilir. Ayrıca elyafların kopmadan sıyrılması, düşük gerilme konsantrasyonu altında bile sistemin bütünlüğünün bozulabileceğini ve kırılmanın yayılmacı değil, patlamalı şekilde geliştiğini gösterir. CC-Tip I numunelerinde kırılma sonrası oluşan hasarın daha çok elyaf hizasında, paralel düzlemler boyunca ilerleyen çatlaklarla karakterize olduğu gözlemlenmektedir. 100X ve 200X büyütmelerde, cam elyafların kopmadan önce matris ile sıkı bir temas içinde olduğu ve kopmaların daha çok elyaf içinde ya da elyafların matris içinde kaldığı ara yüzeylerden geliştiği izlenmiştir. Bu durum, yüksek yüzey pürüzlülüğüne ve yüzey enerjisine sahip cam elyafların, diğer cam elyaflarla birlikte kullanıldığında çok daha yüksek bir kohezyonel bağ enerjisi oluşturduğunu göstermektedir. Mikroyapıda görülen çoklu düzlem çatlakları, hasarın yalnızca bir noktadan değil, sistematik ve çok yönlü bir şekilde yayıldığını; yani enerji birikiminin tek bir bölgede lokalize olmayıp, tüm yapıya homojen dağıldığını göstermektedir. Bu yapı, yüksek mukavemet–yüksek rijitlik ile karakterize edilmekle birlikte, kırılma sonrası yapının enerji sönümleme kapasitesi düşüktür çünkü çatlaklar doğrusal ilerlemekte ve elyaf kırılmaları sistemin deformasyon toleransını azaltmaktadır. Ancak, özellikle 200X büyütmede görülen bazı bölgelerde elyafların delaminasyon sonrası yön değiştirmesi, elyaf sapması–çatlak yolu sapması etkisinin sistemin enerji yayılımını bir miktar esneklettiğini de göstermektedir. Bu yapı hem yapısal güvenlik hem de dayanım açısından tercih edilebilir, ancak süneklik yönünden sınırlı davranış göstermektedir.

CK-Tip I sisteminde gözlemlenen hasar morfolojisi, literatürde "çift faz uyumsuzluğu kırılması" olarak geçen bir yapıya oldukça yakındır. Çünkü cam ve karbon elyafların farklı elastik modüllere ve yüzey etkileşim özelliklerine sahip olmaları, elyaf-matris–elyaf üçlü ara yüzeyinde gerilme çakışmaları yaratmakta ve bu da çatlakların daha karmaşık düzlemlerde ilerlemesine neden olmaktadır. 100X ve 200X büyütmelerde görülen çok eksenli elyaf sıyrılmaları, özellikle karbon

elyafların cam elyafa göre daha erken sıyrıldığını ve çatlakların daha sonra cam elyaf üzerinden ilerlediğini göstermektedir. Bu davranış, sistemdeki yük aktarım sürekliliğinin zayıf olduğunu ve elyaflar arası bağın zayıflığının çatlak yönünü değiştirdiğini göstermektedir. Ayrıca bazı bölgelerde karbon elyafların kütle halinde bükülmesi, ara yüzeyin gerilmeye değil, bükülme momentlerine daha fazla maruz kaldığını ve bu nedenle enerji absorpsiyonunun doğrusal değil, yön değiştiren şekil değişimi ile gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Bu yapı, rijitliğin yüksek ancak deformasyon yayılımının kontrolsüz olduğu kırılma senaryolarında görülür ve tasarım açısından çok yönlü gerilme dağılımına sahip ancak ani kırılma riski taşıyan sistemler olarak sınıflandırılır.

PK-Tip I yapısında gözlemlenen kırılma davranışı, özellikle 100X ve 200X büyütmelerde, karbon elyafların matrisle bağının oldukça zayıf olduğu ve elyafların yüzeyde belirgin olarak soyulduğu bir morfoloji sergilemektedir. Bu yapı, klasik “elyafların düzgün şekilde matristen sıyrılması” senaryosunu temsil eder. Karbon elyafların yüzey enerjisinin düşük olması, polyester matrisle kimyasal bağ geliştirememesi ve özellikle elyaf yüzeyinin düzgün yapısı, ara yüzey bağ kuvvetini ciddi biçimde zayıflatır. Bu nedenle kırılma anında çatlak, karbon elyaf ile matris arasındaki zayıf bölgede başlar ve elyaflar matrisin içinde deformasyona uğramadan çekilerek çıkar. Bu, kırılma enerjisini minimal hale getirir ve sistemin enerji sönümleme kapasitesini düşürür. Ayrıca elyaf yüzeyinde görülen pürüzsüzlük, deformasyon yoluyla değil, doğrudan yapışma zayıflığı ile ayrılmanın gerçekleştiğini gösterir. Bu yapı, mekanik dayanım açısından en zayıf, kırılma kontrolü açısından en düşük performansa sahip sistemlerden biri olarak değerlendirilir. Uygulamada, sadece düşük deformasyon gerektiren, hafiflik öncelikli ama rijitlik önemsiz alanlarda kullanılabilir.

Tablo 5.18’de sunulan veriler bütüncül olarak değerlendirildiğinde, mikroskobik hasar yapılarının yalnızca filament kombinasyonlarına değil, aynı zamanda dokuma mimarisi, matris uyumluluğu, ara yüzey enerjisi ve elyaf-matris deformasyon eşleşmesine bağlı olarak şekillendiği açıkça görülmektedir. En yüksek enerji sönümleme ve yön değiştiren çatlak davranışı PC-Tip I yapısında gözlemlenirken, en rijit ve kırılma yapıları CC-Tip I ve CK-Tip I sistemlerinde görülmüştür. En zayıf ara yüzey etkileşimi ise PK-Tip I yapısında meydana gelmiştir. Bu karşılaştırmalar, ileri düzey mühendislik uygulamaları için sistem seçimi yapılırken yalnızca maksimum dayanım değil, aynı zamanda mikroskobik kırılma morfolojisi ve çatlak ilerleme davranışlarının da değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Kayma testi sonrası hasar görüntüleri, bağ simetrisi ve dokuma yoğunluğunun çatlak sapma davranışı üzerindeki etkisini net şekilde göstermektedir. Tip III yapılarda gözlenen yön değiştiren çatlak yapısı, sistemin bağlar arasında enerji yayılma kapasitesini ortaya koymaktadır. Trofimov ve ark. (2020)’nin z-yönlü bağ deformasyonu modeline göre, makaslama deformasyonu, bağ sayısının artışıyla sınırlanabilir. Bu yapılar, yüksek makaslama gerilmesine karşı direncin artırılması gereken uygulamalarda ideal birer adaydır.

Tablo 5.18’de sunulan kayma testi sonrası hasar görselleri, özellikle CC-Tip III yapıların çatlak yönlenmesindeki çok yönlülüğü ve hasarın mikromekanik olarak z-yönlü bağlar çevresinde yayılmasını net biçimde göstermektedir. Al-Nadhari ve ark. (2025)’de DIC ile analiz edilen gerinim dağılımı haritaları da benzer şekilde, cam elyaf katkılı H1 ve H2 yapıların daha homojen gerilme yayılımı sağladığını ve çatlakların sadece atkı yönü değil, çözgü yönünde de geniş bir alana yayıldığını göstermiştir. Tezdeki PC ve CC yapılarında da kayma sonrası çatlakların elyaf hizasında sapmalar göstermesi, bağ yapı mimarisinin deformasyon yönüne etkisini birebir desteklemektedir. Her iki çalışmada da ara yüzey sürtünmesi, bağ yapısı ve filament hizalanması çatlak yönlenmesinde temel belirleyici rol oynamıştır.



6. SONUÇLAR

Bu doktora tezinde, 3B dokuma kumaşların kompozit malzeme üretiminde kullanımı kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve dokuma yapı tipleri ile filament kombinasyonlarının mekanik performans üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için özelleştirilebilen, farklı mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerin tasarımı ve üretimine ışık tutmayı amaçlamıştır. Bu bağlamda, üç farklı dokuma yapısı (Tip I, Tip II ve Tip III) ve çeşitli filament kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilen test sonuçları, malzeme performansını etkileyen kritik parametreler hakkında değerli bilgiler sunmuştur.

Çekme Testleri

Çekme testleri kapsamında incelenen kuvvet-yer değiştirme ve gerilme-yüzde uzama grafikleri, farklı filament kombinasyonlarının ve dokuma tiplerinin kompozit malzemelerin çekme dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle Tip III dokuma yapısında, elyafların homojen dağılımı ve yoğun çapraz bağlantılar sayesinde hem çekme mukavemeti hem de gerilme dayanımı diğer dokuma tiplerine kıyasla anlamlı derecede yükselmiştir. Bu durum, Tip III yapısının, enerji transferini daha etkili bir şekilde gerçekleştirdiğini ve yük altında oluşan gerilme dağılımının daha dengeli olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, Tip I ve Tip II dokuma yapılarında, elyaf dağılımındaki dengesizlik ve daha sınırlı arayüz bağlanması, çekme testi sırasında daha erken kopma ve ani çatlak ilerlemelerine neden olmuş, bu da malzemenin dayanım kapasitesini sınırlayan önemli bir faktör olarak gözlemlenmiştir. Her üç dokuma tipinde de cam-cam dokuma gevrek kırılma sergilerken, polyester-cam dokuma maksimum yük sonrası, bir dalgalanmayla yataya paralel yük taşımaya devam etmiştir. Maksimum gerilme açısından yapılacak değerlendirmeler, çekme mukavemeti ile paralellik göstermektedir. Cam-cam dokuma tip dokuma tiplerinde, üstünlük gösterirken Tip-III dokuma, diğer dokuma tiplerine göre bu homojen filament yapısında en iyi eğilme rijitliği performansı göstermiştir. Tip-I dokuma ise hem polyester-cam hem de cam-cam filament kombinasyonunda en düşük gerilme değerlerine sahiptir.

Grafiksel verilerde, çekme mukavemeti açısından özellikle cam elyaf ve polyester fiberin hibrit kullanımıyla üretilen numunelerin, yüksek maksimum gerilme ve deformasyon özellikleri sergilediği, karbon içeren kombinasyonlarda ise CC ve PC 'ye göre daha düşük gerilme ve uzama oranlarının gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, filament türlerinin malzeme dayanımına olan katkısının hem dayanım hem de süneklik gibi mekanik özelliklerin optimize edilmesi açısından kritik olduğunu göstermektedir. Ayrıca, maksimum gerilme ve deformasyon parametreleri bakımından elde edilen veriler, kompozit malzemenin kullanım alanına yönelik olarak tasarım kriterlerinin belirlenmesinde önemli referans noktaları oluşturabilir.

Eğilme Testleri

Eğilme testlerine ilişkin analizler, kompozit numunelerin düzlem dışı yükleme altında dayanım ve deformasyon davranışlarının filament kombinasyonları ve dokuma tiplerine bağlı olarak nasıl farklılaştığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Polyesterin sunduğu yüksek uzama kapasitesi, cam ve karbon elyafın sağladığı yüksek mukavemet ile dengelenirken; cam-cam kombinasyonlarında, yüksek gerilme dayanımına rağmen süneklik oranlarının daha düşük kalması, malzemenin kırılma eğilimini artırdığı gözlemlenmiştir. Eğilme testlerinden elde edilen maksimum gerilme ve yer değiştirme değerleri, numuneler arası karşılaştırmada, dokuma tipinin yapı içindeki enerji absorpsiyon kapasitesini ve elastik-plastik geçiş bölgesini doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Kayma Testleri

Çekme ve eğilme testlerinden elde edilen mukavemet sonuçları, kayma testleri ile paraleldir. Homojen yapı sağlaması açısından cam-cam filament kombinasyonu tüm dokuma tiplerinde diğer hibrit yapılara göre üstün performans sergilemiştir. Cam/cam ve polyester camın hasar yer değiştirmesi eşittir. Bu durum cam/karbon ve polyester/karbon için de geçerlidir. Ancak bu ikilinin yer değiştirme değerleri cam-cam ve polyester camdan daha düşüktür. Dolayısıyla 3B dokuma avantajı özellikle kayma testinde deformasyon açısından CC ve PC'ye üstünlük sağlamaktadır. Kayma dayanımı açısından bu dört filament kombinasyonu açısından bariz bir fark yoktur. Tip I'in kayma testlerinde de daha düşük bir performans sergilediği söylenebilir.

Hasar Mekanizmaları ve Mikro Yapısal İncelemeler

Mikro hasar görüntüleri ile desteklenen mikroyapısal analizler, kompozit malzemelerin çekme ve eğilme testleri sırasında ortaya çıkan hasar mekanizmalarını ayrıntılı olarak belgelemiştir. Tip I dokuma yapısına sahip numunelerde, elyaf-matris arayüzeyinde homojen bir gerilme dağılımının sağlanması, düzenli çatlak ilerlemesi ve kontrollü kopma mekanizmaları gözlemlenirken; Tip II yapıda, enerjinin lokalize olarak yoğunlaşması sonucu, ani kopmalar ve geniş çaplı çatlak oluşumuna yol açan, daha düzensiz bir hasar profili tespit edilmiştir. Tip III dokuma ise, karmaşık elyaf yerleşimi ve yoğun çapraz bağlantılar sayesinde, yüksek enerji absorpsiyonu sağlamakla birlikte, belirli bölgelerde aşırı gerilme birikimi sonucu lokal kopmaların meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, farklı filament kombinasyonlarıyla üretilen numunelerde, cam elyafın homojen dağılımı ve karbon fiberin mukavemet artırıcı etkisinin, malzemenin hasar davranışını optimize ettiği; polyesterin ise esnekliği artırırken saf cama göre çekme mukavemetini sınırladığı belirlenmiştir. Bu durum, malzemenin kullanım alanına göre filament kombinasyonunun ve dokuma tipinin kritik olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen kapsamlı deneysel veriler, kompozit malzemelerin mekanik performansını optimize etmek için; doğru filament kombinasyonunun yanı sıra, uygun dokuma tipinin de belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Çekme, eğilme ve kayma testleri sırasında gözlemlenen mukavemet,

esneklik ve deformasyon kapasiteleri, malzeme tasarımında uygulama gereksinimlerinin doğru analiz edilmesi halinde; yapı, havacılık, otomotiv gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde kullanılacak kompozitlerin ömrünü ve verimliliğini artırma potansiyelini göstermektedir. Hasar mekanizmalarının mikroskobik düzeyde detaylandırılması, yük transferi ve enerji absorpsiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, gelecekteki tasarım çalışmalarında dokuma geometrisinin, filament yöneliminin ve elyaf-matris arayüz bağlanmasının optimize edilmesi hususunda önemli öneriler sunmaktadır.

Sonuç olarak, araştırmanın bulguları, kompozit malzemelerin mekanik performansının sadece kullanılan hammadde özelliklerine değil; aynı zamanda üretim aşamasında uygulanan dokuma yöntemi, filament kombinasyonu ve mikro yapısal düzenlemelere de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, uygulama gereksinimlerine yönelik malzeme seçimi ve tasarım sürecinde, yüksek çekme ve eğilme dayanımı, esneklik ile enerji absorpsiyon kapasitesinin dengeli bir şekilde sağlanması için, özellikle Tip III gibi daha karmaşık dokuma yapılarının tercih edilmesi; hibrit filament kombinasyonlarının ise istenilen performansa göre optimize edilerek (mekanik dayanım ve esneklik) verimliliği artırmada kilit rol oynayabileceği görülmektedir. İleri mühendislik uygulamalarında, bu kapsamlı deneysel verilerin ışığında, malzeme optimizasyonu ve tasarım stratejilerinin belirlenmesi, ürün ömrünün uzatılması ve sistem performansının artırılması açısından önemli katkılar sağlayacaktır.

ÖNERİLER

Araştırmada ulaşılan bulgular ve sonuçlar ışığında, kompozit malzemelerin mekanik performanslarının artırılması ve üretim süreçlerinin optimize edilmesine hazırlanmış ayrıntılı öneriler sunulmaktadır:

- Araştırmada, farklı filament kombinasyonlarının (polyester-cam, cam-cam, cam-karbon ve polyester-karbon) kompozit malzemenin çekme ve eğilme mukavemeti ile deformasyon davranışları üzerinde belirleyici etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda üretimde, uygulamanın gerektirdiği mekanik performans parametrelerine göre, fiberlerin oranı optimize edilerek hibrit filament kombinasyonlarının kullanılması; bu sayede hem mukavemet hem de esneklik arasında istenilen denge sağlanabilir. Laboratuvar ölçeğinde yapılan deneysel çalışmaların ardından, optimum filament oranlarının açılı yönlenmesi ve yoğunluğunun belirlenmesi, pilot üretim süreçlerinde uygulanarak endüstriyel üretime entegre edilebilir.
- Araştırma sonuçları, farklı dokuma tiplerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli farklar yarattığını göstermiştir. Tasarım aşamasında, kompozit malzemenin kullanım amacı göz önünde bulundurularak, yüksek enerji absorpsiyonu ve deformasyon kapasitesi gerektiren durumlarda Tip III benzeri daha karmaşık dokuma düzenlerinin tercih edilmesi; daha az kritik uygulamalarda ise daha basit ve ekonomik dokuma tiplerinin kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılabilir.
- Kompozit malzemelerin mekanik performansının yalnızca hammadde seçiminden değil, aynı zamanda üretim sürecinde uygulanan ısıtma işlemi, presleme ve kütleme gibi adımlardan da etkilendiği anlaşılmıştır. Araştırmada, dokuma tipi ve filament kombinasyonunun yanı sıra, üretim aşamasındaki parametrelerin de nihai mekanik özellikler üzerinde kritik rol oynadığı saptanmıştır. Üretim sürecinin her aşamasında, işlem parametrelerinin (kür süresi, pres basıncı ve sıcaklık) optimize edilerek, elyaf-matris arayüz bağlanmasının güçlendirilmesi ve hasar mekanizmalarının minimize edilmesi sağlanabilir. Deneysel üretim denemeleri ve proses kontrol sistemleri ile parametre optimizasyonu gerçekleştirilebilir; ayrıca, süreç izleme ve kalite kontrol teknikleri kullanılarak üretim esnasında oluşabilecek sapmalar minimize edilebilir.
- Yapılan mikro yapısal analizler, farklı dokuma ve filament kombinasyonlarının hasar davranışları üzerinde belirleyici olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Özellikle, elyaf-matris arayüzündeki çatlakların ve kopma mekanizmalarının detaylı incelenmesi, malzemenin enerji absorpsiyon kapasitesinin artırılmasında yol gösterici niteliktedir. Hasar mekanizmalarının daha detaylı ve kapsamlı analizlerinin yapılması, kompozit malzemenin kritik yükler altındaki davranışının anlaşılması açısından önem arz etmektedir. Bu

doğrultuda, ileri görüntüleme teknikleri ve sayısal modellemeler kullanılarak, hasar yayılımı ve enerji absorpsiyon süreçleri detaylandırılabilir. X-ışını mikrotomografi vb. diğer görüntüleme yöntemleri ile hasar mekanizmaları kapsamlı olarak analiz edilebilir; elde edilen veriler, sayısal simülasyonlar ve mekanik modellemelerle desteklenerek, malzemenin tasarım aşamasına entegre edilebilir.

- Gelecek çalışmalarda, yalnızca mevcut filament kombinasyonları ve dokuma tipleri değil, aynı zamanda nano-takviyeler, darbe testi ve dinamik yükleme gibi yenilikçi yaklaşımların da araştırılması önerilmektedir. Bu tür yaklaşımlar, malzemenin dinamik dayanımını artırırken, ağırlık optimizasyonu, çevresel dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi ek performans kriterlerini de iyileştirebilir. Endüstriyel iş birlikleri ve akademik araştırmalar aracılığıyla, yeni nesil malzeme geliştirme projeleri başlatılabilir; bu projelerde hem deneysel hem de sayısal analiz yöntemleri entegre edilerek, kompozit malzemelerin uygulama alanlarına yönelik spesifik tasarım kriterleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Abd-Elaziem, W., Khedr, M., Abd-Elaziem, A. E., Allah, M. M. A., Mousa, A. A., Yehia, H. M., ... El-Baky, M. A. A. (2023). Particle-reinforced polymer matrix composites (PMC) fabricated by 3D printing. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 33(12), 3732-3749.
- Abtew, M.A., Boussu, F., Bruniaux, P., Bruniaux, P., Liu, H. (2020). Fabrication and Mechanical Characterization of Dry Three-Dimensional Warp Interlock Para-Aramid Woven Fabrics: Experimental Methods toward Applications in Composite Reinforcement and Soft Body Armor. *Materials*, 13(19):4233-. doi: 10.3390/MA13194233.
- Al-Nadhari, A., Ulus, H., Topal, S., & Yildiz, M. (2025). Analyzing stiffness variations in 3D woven composites: A multi-instrumental study on Glass/Kevlar hybridization effects under tensile and shear loads. *Composites: Part A*, 191, 108722. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108722>
- Annamalai, S., Anand Ronald, B., Ebenezer, D. (2023). The Effect of Processing Techniques and Operating Parameters on the Erosion Wear Behavior of Particle-Reinforced Metal Matrix and Surface Composites: A Review. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 9(4), 73.
- Aranda-Iglesias, D., Giunta, G., Peronnet-Paquin, A., Sportelli, F., Keniray, D., & Belouettar, S. (2020). Multiscale modelling of the mechanical response of 3D multi-axial knitted 3D spacer composites. *Composite Structures*, 253, 113139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113139>
- Bai, R., Colmars, J., Naouar, N., & Boisse, P. (2020). A specific 3D shell approach for textile composite reinforcements under large deformation. *Composites: Part A*, 139, 106135. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106135>
- Bai, J., Sun, J., Yu, S., Bai, J., Wade-Zhu, J., Chen, X., Binner, J., Bai, J. (2021). 5. 3B printing of layered ceramic/carbon fiber composite with improved toughness. *Additive manufacturing*, doi: 10.1016/J.ADDMA.2021.102543
- Baitab, D. M., Majid, D. L., Abdullah, E. J., & Hamid, M. F. (2020). Tensile behavior of multilayer 3D smart woven composites embedded with shape memory alloy (SMA) wires. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10876–10885. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.035>
- Blais, P., Toubal, L., & Zitoune, R. (2025). Damage created by abrasive waterjet and conventional drilling in open-hole and assembled 3D interlock woven carbon fiber-reinforced plastic composites examined by fatigue testing and linear regression analysis. *Engineering Failure Analysis*, 168, 109099. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109099>
- Boroomand, M.H., Yazdi, A.A., Ahmadi, M.S. (2023). Numerical simulation of tensile, flexural, and impact behavior of three dimensional orthogonal hybrid jute/HTPET woven fabric composites. *Journal of The Textile Institute*, 1-13. doi: 10.1080/00405000.2023.2272789.
- Cariaga, M.L. (2022). Three-dimensional, multiscale homogenization for hybrid woven composites with fiber-matrix debonding. *Composites Science and Technology*, 218, 109204-109204. doi: 10.1016/j.compscitech.2021.109204.

- Carolyn, Oddy. (2022). Modelling 3B-woven composites on the macroscale: Predicting damage initiation and inelastic phenomena. Licentiate Thesis, Chalmers University Of Technology, Department of Industrial and Materials Science, Göteborg, Sweden.
- Chang, Y., Hu, H. (2022). 3B fabrics with negative Poisson's ratio: a review. *Applied Composite Materials*, 29(1), 95-108.
- Cherif, C., Krzywinski, S., Lin, H., Schulz, C., & Haasemann, G. (2013). New process chain for realisation of complex 2D/3D weft knitted fabrics for thermoplastic composite applications. *Procedia Materials Science*, 2, 111–129. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2013.02.018>
- Chowdhury, I. R., Summerscales, J. (2024). Woven Fabrics for Composite Reinforcement: A Review. *Journal of Composites Science*, 8(7), 280.
- Cong, Wang., Xiaoping, Gao., Yonggui, Li. (2019). Mechanical Properties Improvement of Nanoclay Addition Epoxy 3B Orthogonal Woven Composite Material. *Fibers and Polymers*, 20(7), 1495-1503. doi: 10.1007/S12221-019-9116-4
- Dahale, M., Neale, G., Garrigle, C.M., Kelly, J., Archer, E., Harkin-Jones, E., McIlhagger, A. (2019). Influence of Textile Architecture on the Mechanical Properties of 3B Woven Carbon Composites. s. 1-12, *Twenty-Second International Conference on Composite Materials (ICCM22)*, Melbourne, Australia.
- Dejene, B. K., Gudayu, A. D. (2024). Exploring the potential of 3B woven and knitted spacer fabrics in technical textiles: A critical review. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241253614.
- Dejene, B. K., Gudayu, A. D. (2024). Exploring the potential of 3B woven and knitted spacer fabrics in technical textiles: A critical review. *Journal of Industrial Textiles*, 54, 15280837241253614.
- Dong, K., Peng, X., Cheng, R., Ning, C., Jiang, Y., Zhang, Y., Wang, Z. L. (2022). Advances in high-performance autonomous energy and self-powered sensing textiles with novel 3B fabric structures. *Advanced Materials*, 34(21), 2109355.
- El Aal, M. I. A., Awd Allah, M. M., Abd El-baky, M. A. (2023). Carbon-glass reinforced epoxy hybrid composites for crashworthy structural applications. *Polymer Composites*, 44(5), 2910-2924.
- Garcia, C., Hurmane, A., Irisarri, F.-X., Laurin, F., Leclercq, S., & Desmorat, R. (2021). Experimental analysis and damage modeling of the shear-out failure mode of a 3D woven composite lug. *Composite Structures*, 261, 113522. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113522>
- Goud, V., Singh, D., Singh, D., Ramasamy, A., Das, A., Kalyanasundaram, D., Kalyanasundaram, D. (2020). Investigation of the mechanical performance of carbon/polypropylene 2D and 3D woven composites manufactured through multi-step impregnation processes. *Composites Part A-applied Science and Manufacturing*, 130, 105733. doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2019.105733.
- Guo, Q., Zhang, Y., Guo, R., Ma, M., & Chen, L. (2019). Influences of weave parameters on the mechanical behavior and fracture mechanisms of multidirectional angle-interlock 3D woven composites. *Materials Today Communications*, 23, 100886. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100886>
- Guo, L., Liao, F., Xu, Y., Wang, T., Yang, C., & Yuan, J. (2020). Experimental method and failure mechanisms investigation for out-of-plane shear fatigue behavior of 3D woven composites. *International Journal of Fatigue*, 134, 105501. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105501>

- Guo, L., Huang, J., Zhang, L., & Sun, X. (2021). Damage evolution of 3D woven carbon/epoxy composites under tension-tension fatigue loading based on synchrotron radiation computed tomography (SRCT). *International Journal of Fatigue*, 142, 105913. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105913>
- Gupta, S., Pal, S., Ray, B. C. (2023). An overview of mechanical properties and failure mechanism of FRP tabakaes with hole/cutout. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(20), e53862.
- He, E., Sun, Y., Wang, X., Chen, H., Sun, B., Gu, B., & Zhang, W. (2020). 3D angle-interlock woven structural wearable triboelectric nanogenerator fabricated with silicone rubber coated graphene oxide/cotton composite yarn. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108244. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108244>
- He, N., Seyam, A. F., Gao, W. (2024). Two-Dimensional Materials in Textiles. *Advanced Fiber Materials*, 1-27.
- Hu, P.W., Shan, Z., Zhang, Z., Sun, Z., Wang, S., Huang, H. (2022). Compaction behavior of 3B woven preforms with hybrid fibers and under different process parameters. *Polymer Composites*, 43(11), 8192-8201. doi: 10.1002/pc.26987.
- Hu, Q., Zhang, Y., Mao, Y., Memon, H., Qiu, Y., Wei, Y., Liu, W. (2019). A Comparative Study on Interlaminar Properties of L-shaped Two-Dimensional (2B) and Three-Dimensional (3B) Woven Composites. *Applied Composite Materials*, 26(3), 723-744. doi: 10.1007/S10443-018-9745-6.
- Huang, C., Norton, M., Joosten, M. (2023). Investigating the tensile properties of 3B printed semi-woven intraply hybrid composites reinforced with carbon/glass continuous fibres. *Composites Part A-applied Science and Manufacturing*, 177, 1-16. doi: 10.1016/j.compositesa.2023.107924.
- Ivanov, D., Lomov, S.V. (2020). Modeling of 2B and 3B woven composites. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 23-57. doi: 10.1016/B978-0-08-102679-3.00002-2.
- Izquierdo, S.F., Semeraro, F.M., Acin, D.C. (2022). Multi-Scale Analysis of Effective Mechanical Properties of Porous 3B Woven Composite Materials. *AIAA SCITECH 2022*, Forum doi: 10.2514/6.2022-2281.
- Jabbar, A., Karahan, M., Zubair, M., Karahan, N. (2019). Geometrical Analysis of 3B Integrated Woven Fabric Reinforced Core Sandwich Composites. *Fibres Textiles in Eastern Europe*, 27, 45-50. doi: 10.5604/01.3001.0012.7507.
- Jain, N.B., Kathuria, S. (2024). 1. Hybrid Composite Materials. *Advances in chemical and materials engineering book series*, doi: 10.4018/979-8-3693-3993-0.ch001.
- Jang, Y., Kim, J.-H., Lee, D., Chon, J. S., Lee, S., & Kwon, D.-J. (2024). Comprehensive analysis of the effect of braiding angle on the wettability and mechanical properties of 3D braided carbon fiber fabric-reinforced composites. *Materials Today Communications*, 41, 110798. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110798>
- Jiang, B., Liu, C., Dai, B., Pei, Z., Liu, B., Wang, Y. (2024). Improved strength-plasticity-conductivity of graphene/copper layered composites by vacuum hot rolling. *Journal of Materials Research and Technology*, 31, 1991-2002.

- Kamynina, O., Vadchenko, S.G., Kovalev, I.D., Prokhorov, D.V. (2023). 1. Layered Composite Materials Based on Ti/Ta/Hf/Ceramic to Solve Tasks under Extreme Conditions. *Поверхность. Физика, химия, механика*, doi: 10.31857/s1028096023090054.
- Kanakannavar, S., Pitchaimani, J. (2024). Relation between water absorption and mechanical properties of flax 3B braided yarn woven fabric PLA bio-degradable composites. *Plastics Rubber and Composites*, 53(1), 3-12. doi: 10.1177/14658011231215986.
- Khalid, M. Y., Al Rashid, A., Arif, Z. U., Ahmed, W., Arshad, H., Zaidi, A. A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering*, 11, 100263.
- Korkmaz, M. (2023). Investigation of the bending and quasi-static indentation properties of three-dimensional (3B) textile-reinforced composites. *Polymer Composites*, 45, 1703-1714, doi: 10.1002/pc.27883.
- Korkmaz, M., Okur, A. (2022). The review about the numerical modelling and analysis of 3B woven fabrics. *Journal of The Textile Institute*, 114(3), 496-522. doi: 10.1080/00405000.2022.2048517.
- Kumar, D., Seetharam, R., Ponappa, K. (2024). A review on microstructures, mechanical properties and processing of high entropy alloys reinforced composite materials. *Journal of Alloys and Compounds*, 972, 172732.
- LeMahieu, M. (2023). 5. Solid particle erosion of particulate-reinforced epoxy composites. doi: 10.32920/23523477.v1
- Li, D., Yang, Y., Wang, Z., Jiang, L. (2020). Experimental investigation on mechanical response and failure analysis of 3B multi-axial warp knitted hybrid composites. *Composite Structures*, 246, 112340. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112340.
- Li, M., Wang, P., Boussu, F., Soulat, D. (2022). A review on the mechanical performance of three-dimensional warp interlock woven fabrics as reinforcement in composites. *Journal of Industrial Textiles*, 51(7), 1009-1058.
- Lin, X., Li, X., Yang, N., Li, X., Yao, J., Zhang, W., Komarneni, S. (2023). Design and construction of 1D/2B/3B fabric-based wearable micro-supercapacitors. *Journal of Power Sources*, 560, 232712.
- Liu, G., Zhang, X., Liu, H., He, Z., Show, P. L., Vasseghian, Y., Wang, C. (2023). Biochar/layered double hydroxides composites as catalysts for treatment of organic wastewater by advanced oxidation processes: a review. *Environmental Research*, 116534.
- Liu, G., Huang, K., Zhong, Y., Li, Z., Yu, H., Guo, L., & Li, S. (2023). Investigation on the off-axis tensile failure behaviors of 3D woven composites through a coupled numerical-experimental approach. *Thin-Walled Structures*, 192, 111176. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111176>
- Liu, S., Zhang, W., He, J., Lu, Y., Wu, Q., Xing, M. (2024). Fabrication techniques and sensing mechanisms of textile-based strain sensors: from spatial 1D and 2B perspectives. *Advanced Fiber Materials*, 6(1), 36-67.
- Liu, Z., Ge, J., He, C., Liu, C., Zhang, B., Liu, K., & Liang, J. (2024). A direct prediction method for 3D woven composites bending properties based on unit-cell finite element model. *Composites Science and Technology*, 248, 110474. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110474>

- Liu, L., Jin, F., Ji, J., Zhu, X., Xie, Z., & Chen, W. (2025). Research on the quasi-static/dynamic mechanical properties and impact resistance of 3D woven composites under salt spray aging. *Composites: Part A*, 194, 108923. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108923>
- Liu, Z., Ge, J., Sun, Y., Zhang, B., Liu, X., & Liang, J. (2025). A comparative study of 3D woven variable-thickness composite structures with reduced yarns and varied weft sizes under cantilever loading. *Composites: Part A*, 190, 108675. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108675>
- Lu, Z., Chen, W., Luo, Y., Kong, L., Zou, H., & Zhou, S. (2025). Experimental evaluation and modeling of the tensile and ablative behavior of 3D-knitted fabric reinforced silicone rubber composites. *Composites Science and Technology*, 261, 111049. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2025.111049>
- Majumdar, A., Rathi, A., Mawkhlieng, U. (2023). 3. Augmenting the mechanical performance of three-dimensional woven composites by the synergistic effect of fabric architecture and interfacial interaction of carbon nanotubes. *Polymer Composites*, doi: 10.1002/pc.27944.
- Majumdar, A., Rathi, A., Mawkhlieng, U. (2023). Augmenting the mechanical performance of three-dimensional woven composites by the synergistic effect of fabric architecture and interfacial interaction of carbon nanotubes. *Polymer Composites*, 45(3), 2629-2645. DOI: 10.1002/adet.27944.
- Miryuk, O.A. (2023). 2. Magnesia composite materials for layered products. *Комплексное использование минерального сырья*, doi: 10.31643/2024/6445.01
- Mishra, R., Petru, M., Behera, B.K., Behera, P. (2022). 3B Woven Textile Structural Polymer Composites: Effect of Resin Processing Parameters on Mechanical Performance. *Polymers*, 14(6), 1134-1134. doi: 10.3390/polym14061134.
- Natrayan, L., Kaliappan, S. (2023). *Mechanical Assessment of Carbon–Luffa Hybrid Composites for Automotive Applications* (No. 2023-01-5070). SAE Technical Paper.
- Pankow, M., Riosbass, M., Justusson, B., Zhang, D., Waas, A. M., & Yen, C. F. (2023). Effect of fiber hybridization on tensile fracture of 3D woven textile composites. *Composites: Part A*, 165, 107306. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107306>
- Patel, B., Bisen, A.M., Sai, J.V., Kumar, P. (2014). 5. Hybrid composites- a concept of ecological, bio inspired and synergistic strengthening material.
- Perera, Y.S., Muwanwella, R.M.H.W., Fernando, P.R., Fernando, S., Thantrige, Sanath, Siroshana, Jayawardana. (2021). 5. Evolution of 3B weaving and 3B woven fabric structures. *Fashion and Textiles*, doi: 10.1186/S40691-020-00240-7
- Qi, L., Jingyan, L., Xiaoxu, W., Xiaodong, L., Diantang, Z., Kun, Q. (2022). Flexural progressive failure mechanism of hybrid 3B woven composites: Combination of X-ray tomography, acoustic emission and digital image correlation. *Composite Structures*, 280, 114894. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114894.
- Qiu, S., Cui, H., & Zhang, H. (2025). Investigation on fatigue behavior and failure mechanism of quasi-3D woven composites under combined high and low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 193, 108768. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108768>

- Ram Vishal, G., Dalbir, S., Srikanth, H.V. (2023). Characterization of 3B Orthogonal Woven Carbon/Kevlar Composite Under Tensile Loading. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(5), 167-178, doi: 10.30880/ijie.2023.15.05.018.
- Rashid, B., Sadeq, A., Ebraheem, M., Aymen, R.M. (2019). Mechanical properties of hybrid woven roving and chopped strand mat glass fabric reinforced polyester composites. *Materials Research Express*, 6(10), 105208-. doi: 10.1088/2053-1591/AB4085
- Rubino, M., Mendoza, A., Wielhorski, Y., Parvathaneni, K.K., Roux, S. (2024). 2. Alignment of 3B woven textile composites towards their ideal configurations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, doi: 10.1016/j.cma.2023.116559
- Saeed, K., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., McGarrigle, C., Dixon, D., & Archer, E. (2022). Elastic Modulus and Flatwise (Through-Thickness) Tensile Strength of Continuous Carbon Fibre Reinforced 3D Printed Polymer Composites. *Materials*, 15. <https://doi.org/10.3390/ma15031002>.
- Shabberhussain, S. (2024). Unidirectional glass/epoxy composite cylindrical shells with graphene nanoplatelets subjected to internal pressure and thermal loading. Part II: finite element analysis. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-29.
- Shao, M., Cai, D., Yu, Q., Qi, H., Xing, D.Y., Hu, F., Kuang, N.N., Zhou, G. (2022). Mechanical properties of single-sided-loop 2B woven tabakaed composites. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-14. doi: 10.1080/15376494.2022.2098429.
- Shao, T., Zhang, S., Liu, W., Liu, R., & Xu, W. (2025). High-fidelity architecture modeling and compressive strength prediction of 3D woven composite material. *Composite Structures*, 354, 118775. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118775>
- Shubham, Ray, B.R. (2024). 2. Fiber Reinforcements. *Engineering materials*, doi: 10.1007/978-981-99-9746-6_3
- Siddgonde, N., & Ghosh, A. (2020). Thermo-mechanical modeling of C/C 3D orthogonal and angle interlock woven fabric composites in high temperature environment. *Mechanics of Materials*, 148, 103525. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103525>
- Singh, A., Verma, N., Kumar, K. (2019). 2. Hybrid composites: a revolutionary trend in biomedical engineering. doi: 10.1016/B978-0-12-818431-8.00002-7.
- Su, S., Xu, Z., Miao, Q., Li, W., Wang, L. (2023). 4. Advanced Composite Materials for Structure Strengthening and Resilience Improvement. *Buildings*, doi: 10.3390/buildings13102406
- Sun, C., Xie, C., Bu, G. L., Zhong, L. Y., Zeng, M. S. (2022). Molecular characteristics, immune evasion, and impact of SARS-CoV-2 variants. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 7(1), 202.
- Sun, Y., Yao, T., Yang, X., Li, D., Jiang, L., Zuo, H., Lomov, S. V., & Desplentere, F. (2025). Parametric modeling on warp and weft tensile strength prediction and progressive damage evolution of 3D angle-interlock woven composites. *Composite Structures*, 362, 119072. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.119072>
- Szary, J., Barburski, M., Świniarski, J. (2023). Mechanical Properties of Textile-Reinforced Composites with a 3B Printed Core. *FIBRES TEXTILES in Eastern Europe*, 31(4), 38-45.

- Thierry, V., Mesnil, O., & Chronopoulos, D. (2020). Experimental and numerical determination of the wave dispersion characteristics of complex 3D woven composites. *Ultrasonics*, 103, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106068>
- Trofimov, A., Le-Pavic, J., Ravey, C., Albouy, W., Therriault, D., & Lévesque, M. (2020). Multi-scale modeling of distortion in the non-flat 3D woven composite part manufactured using Resin Transfer Molding. *Composites: Part A*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106145>
- Turpin, L., Neggers, J., Mendoza, A., Schneider, J., Pannier, Y., Roux, S. (2023). Identification of the effective interface between the homogenized phases of a dual-weave 3B composites. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 103, 1-9. doi: 10.1016/j.euromechsol.2023.105166.
- Valente, M., Rossitti, I., Sambucci, M. (2023). Different production processes for thermoplastic composite materials: sustainability versus mechanical properties and processes parameter. *Polymers*, 15(1), 242.
- Verma, V., Majumdar, A. (2024). Structure-property relationships of 3B woven fabric composites: A critical review through bibliometric and content analyses. *Journal of Composite Materials*, 00219983241302171.
- Wan, L., Ismail, Y., Sheng, Y., Ye, J., Yang, D. (2023). A review on micromechanical modelling of progressive failure in unidirectional fibre-reinforced composites. *Composites Part C: Open Access*, 10, 100348.
- Wang, Z., Zhao, W.H., Wang, F., Teng, X., Cai, C., Xiao, J., Zhang, Y. (2022). Tensile behavior and failure mechanism of 3B woven fabric reinforced aluminum composites. *International Journal of Mechanical Sciences*, 244, 108043-108043. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.108043.
- Wang, Y., Guo, J., Li, X., Krugl, S., Jiao, Y., Wang, P. (2024). Towards yarn-to-yarn friction behavior in various architectures during the manufacturing of engineering woven fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 108363.
- Waskitho, A. (2024, May). An overview of fiber reinforced composites as material for the treatment of posterior missing teeth. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3127, No. 1). AIP Publishing.
- Wei, Z., Chen, X. (2024). Effect of crossing warp architecture on tear strength of 3B orthogonal woven T-shaped reinforcements. *Textile Research Journal*, 94(9-10), 1190-1201.
- Wu, H., Huang, M., Xia, Y., Li, X., Li, R., Liu, C., Fan, G. (2023). The importance of interfacial stress-affected zone in evading the strength-ductility trade-off of heterogeneous multi-layered composites. *International Journal of Plasticity*, 160, 103485.
- Wu, Z. Y., Fu, Y., Guo, H., Xu, L. M., Gu, H. J., Chen, X. P., Liu, J. (2023). A multiscale homogenization iterative algorithm of 2B orthogonal prepreg carbon/aramid/epoxy woven-ply. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 36(12), 5052-5077.
- Wu, T., Li, G., Huang, S., Fang, J., Gu, B., & Sun, B. (2025). Structural effect of warp yarns on electromechanical behavior of 3D woven carbon fiber composites for aviation applications. *Aerospace Science and Technology*, 159, 109986. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.109986>

- Xiaochuan, W., Zhongde, S., Liu, F., Yuan, W. (2020). Mechanical properties of 3B-woven composites with guide sleeves. *Journal of Composite Materials*, 54(12), 1571-1578. doi: 10.1177/0021998316636461.
- Xu, F., Zheng, L., Zhang, K., Aouraghe, M.A., Saleemi, S., Yanhong, C., Qiu, Y. (2020). Mechanical Properties and Failure Analysis of 3B-Woven Copper Wire/Glass Fiber Hybrid Composites. *American Journal of Roentgenology*, 7(5), 17-24. doi: 10.14504/AJR.7.5.3.
- Xu, L. Z., Ren, W. K., Wang, J. B., Wang, X. D., Gao, G. F. (2023). An experimental investigation into ballistic performance of woven fabrics with single and multiple layers. *Textile Research Journal*, 93(9-10), 2394-2408.
- Xu, F., Long, J., Sun, B., Sha, Z., Wang, C. H., Zhang, J., & Gu, B. (2025). Thermo-oxidative ageing effect on the anisotropic compressive properties of 3D angle-interlock woven composites. *Composites Science and Technology*, 262, 111063. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.111063>
- Yan, S., Zeng, X., & Long, A. (2020). Effect of fibre architecture on tensile pull-off behaviour of 3D woven composite T-joints. *Composite Structures*, 242, 112194. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112194>
- Yan, Y. F., Kou, S. Q., Yang, H. Y., Shu, S. L., Qiu, F., Jiang, Q. C., Zhang, L. C. (2023). Ceramic particles reinforced copper matrix composites manufactured by advanced powder metallurgy: Preparation, performance, and mechanisms. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(3), 032006.
- Yang, Z., Jiao, Y., Zhu, W., Xie, J., Jiao, W., & Chen, L. (2023). Experimental and numerical investigation of inter-ply shear behavior of 3D woven preform. *Composite Structures*, 304, 116480. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116480>
- Yang, X., Zheng, L., Ma, H., Lu, Z., & Xu, F. (2023). 3D orthogonal woven carbon fiber/PEEK composites with superior bending and flame-retardant properties. *Composite Structures*, 324, 117559. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117559>
- Yasith, Sanura, Perera., Rajapaksha, Mudiyansele, Himal, Widooshaka, Muwanwella., Philip, Roshan, Fernando., Sandun, Fernando., Thantirige, Sanath, Siroshana, Jayawardana. (2021). Evolution of 3B weaving and 3B woven fabric structures. *Fashion and Textiles*, 8(1), 1-31. doi: 10.1186/S40691-020-00240-7.
- Zhang, X., Zhang, S., Zhang, H., Liu, C., Zhou, Y., Dong, C., Gao, X., Wang, F., & Song, Y. (2024). A hyperelastic model considering the coupling of shear-compression for the forming simulation of 3D orthogonal composite preforms. *Composites Science and Technology*, 258, 110884. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110884>
- Zhang, J., Zhang, X., Qian, M., Jia, Z., Imran, M., Geng, L. (2024). Recent progress in particulate reinforced aluminum composites fabricated via spark plasma sintering: Microstructure and properties. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 49(3), 408-463.
- Zhang, R.J., Liu, Y. (2024). 1. Size Effect of Yielding of Particle-Reinforced Composites. *Journal of Applied Mechanics*, doi: 10.1115/1.4065007.
- Zhang, Y., You, M., Guo, Q., Li, C., Zhang, D., Shi, D., Chen, L. (2024). A review of the formability of woven fabrics for composite materials. *Polymer Composites*. 45(16), 14498-14520.

Zhang, Y., Feng, J., Yan, J., Guo, Q., Sun, Z., Zhang, D., Guo, J., An, L., Wu, X., & Chen, L. (2025). Effect of weave pattern on the low-velocity impact properties of 3D woven composites. *Thin-Walled Structures*, 209, 112969. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.112969>



ÖZGEÇMİŞ

Sümeyye ERDEM KORKMAZ

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri :
Doğum Yılı :
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Adres :
E-posta :
Yabancı Diller :

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID : 0000-0002-5518-2716
Danışman Orcid ID : 0000-0003-0178-6079

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Üç Boyutlu Dokuma Cam Fiber/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”
Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2019
Danışman: Prof. Dr. Mete Onur KAMAN
Lisans : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2015
Lise : Antalya Anadolu İ.H. Lisesi, Antalya, 2011

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Çekme, Basma ve Kayma Test Düzeneği, Charpy Deneyi, Sertlik Ölçme Deneyi, Yarı Otomatik Dokuma Tezgahı
- ✓ AutoCAD, SolidWorks, Ansys Workbench

İŞ DENEYİMİ

B. YIL – ... :2020 – Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi / Öğretim Görevlisi

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

1. Erdem, S., & Kaman, M. O. (2022). Pin loading effect on 3D spacer fabric-laminated composites produced vacuum infusion. Journal of Composite Materials, 56(1), 3–16. <https://doi.org/10.1177/00219983211018265>
2. Erdem, S., Özdemir, M., Rafeighi, M., & Yavuz, M. (2023). 1.2367 sıcak iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerinde etkisi. Politeknik Dergisi, 26(3), 1071–1077. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1059568>

Bildiriler:

1. Erdem, S., & Kaman, M. O. (2024, May 31). 3D woven composite materials and their meso-mechanical modelling. In Proceedings of the 28th International Scientific Conference MECHANIKA 2024 (p. 57). Kaunas University of Technology. <https://doi.org/10.5755/e01.2783-5677.2024>

2. Erdem, S., & Kaman, M. O. (2019, October 18). Notch type effect on three dimensional spacer fabric composites. In Proceedings of the 4th International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC 2019). Kızılcahamam, Ankara, Turkey.

Projeler:

1. Havacılık ve Savunma Sanayi için Üç Boyutlu Kompozit Üretimi

