



T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATMANLAR ARASI DOKUSUZ YÜZEY
TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLER
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

TEBERNUŞ TİYEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2023

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KATMANLAR ARASI DOKUSUZ YÜZEY
TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLER
GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

TEBERNUŞ TİYEK

Bu tez,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2023

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tebernuş TİYEK



Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 2021/3-5 YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

KATMANLAR ARASI DOKUSUZ YÜZEY TAKVİYELİ HİBRİT KOMPOZİTLER GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

TEBERNUŞ TİYEK

ÖZET

Kompozit malzemelerde düşük enerjili darbeler sonucu meydana gelen hasarlar, lif takviyeli termoset polimerik kompozitlerin dayanımlarını büyük oranda düşürmekte ve havacılık gibi kullanım alanlarında güvenlik sorunları ortaya çıkarmaktadır. Fark edilemeyen bu hasarlar kullanım esnasında aniden bir dayanım kaybına yol açarak yapısal bütünlüğü bozmaktadır. Tekstil yapısal kompozitlerde kullanılan cam ve karbon gibi yüksek modüllü lifler, düşük uzama eğilimlerinden dolayı kırılğan bir yapı sergilemekte, bu da düşen süneklik ile birlikte artan delaminasyona neden olmaktadır. Delaminasyonun azaltılması ve sünekliğin artırılması için uygulanabilir yöntemlerden biri de termoplastik nonwoven (dokusuz yüzey) takviyesidir. Bu çalışmada, polipropilen çözgü, cam ve karbon atkı iplikleri kullanılarak hibrit preformlar üretilmiştir. Üretilen bu preformlar, katlar arası hibritleme yöntemi ile farklı konfigürasyonlarda düzenlenmiş ve katmanlar arasına polipropilen nonwoven yerleştirilmiştir. Kompozitler, epoksi reçine ile vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Takviyesiz ve polipropilen nonwoven takviyeli cam/karbon/epoksi hibrit kompozitlerin eğme, basma, darbe ve darbe sonrası basma dayanımları incelenerek kırılma analizleri mikroskobik ve ultrasonik yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Nonwoven takviyesi, kompozit yapıların eğme dayanım ve modüllerinde düşüşe sebep olurken, uzama özelliklerini arttırarak yapıyı daha sünek hale getirmiştir. Katmanlar arasındaki nonwoven takviyesi sayesinde Charpy darbe testinde kompozit yapıların enerji absorpsiyonu artmıştır. Düşen ağırlık darbe testi sonuçları incelendiğinde, nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların enerji absorpsiyonuna önemli bir etkide bulunmamakla birlikte, maksimum kuvvet değerlerini arttırdığı ve deformasyon değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Delaminasyon eğilimi, katmanlar arası nonwoven takviyesinin bariyer görevi görmesinden dolayı azalmış ve bu sayede kompozit yapıların hasar toleransını arttırıcı bir etki olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kompozit yapı, Katmanlar arası nonwoven takviyesi, Delaminasyon, Hasar toleransı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Ocak/2023

Danışman: Doç. Dr. Gaye KAYA

Sayfa Sayısı: 66

**DEVELOPMENT OF INTERLAYER NONWOVEN REINFORCED HYBRID
COMPOSITES AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES
(MASTER THESIS)**

TEBERNUŞ TİYEK

ABSTRACT

Low-energy impact damages considerably reduce the strength of fiber reinforced thermoset polymeric composites that creates security problems in some usage areas as aviation. These unnoticeable damages cause a sudden strength loss during the usage and disrupt the structural integrity. High modulus fibers such as glass and carbon used in textile structural composites exhibit a brittle behavior due to their low elongation tendency and cause increased delamination with reduced ductility. One of the methods is toughening the thermoset composites with thermoplastic nonwovens to reduce delamination and increase ductility. In this study, hybrid preforms were produced using polypropylene warp, glass and carbon weft fibers. These preforms were arranged in different configurations by interlayer hybridization and polypropylene nonwoven structures were placed between the layers. Composites were manufactured by using vacuum infusion method with epoxy resin. The bending, compression, impact and post-impact compressive strengths of non-reinforced and polypropylene nonwoven reinforced glass/carbon/epoxy hybrid composites were examined and fracture analyzes were performed using microscopic and ultrasonic methods. While the nonwoven reinforcement caused a decrease in the flexural strength and modulus of the composite structures, it increased the elongation and made the structure more ductile. The energy absorption of the composite structures in the Charpy impact test increased by the nonwoven reinforcement between the layers. It was determined that the nonwoven reinforcement did not have a significant effect on the energy absorption of the composite structures, but increased the maximum force values and decreased the deformation values during the drop-weight impact test. The delamination tendency has decreased due to the barrier function of the interlayer nonwoven reinforcement and has been evaluated as an effect increasing the damage tolerance of composite structures.

Keywords: Hybrid composite structure, Interlayer nonwoven reinforcement, Delamination, Damage tolerance

Kahramanmaraş Sutcu Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering, January/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gaye KAYA

Page Numbers: 66

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi birikimini ve desteğini esirgemeyen Yüksek Lisans Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Gaye KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın deneysel aşamasında yardımları ile katkı sağlayan Yüksek Lisans öğrencisi Pınar ÇAM'a, Doktora öğrencisi Arzu ATICI'ya teşekkür ederim. Tekstil Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ ve bütün jüri üyelerine katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ve son olarak hayatımın her anında hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, hayatım boyunca elde ettiğim başarıların en önemli destekçisi olan anneme, eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tebernuş TİYEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Önemi.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı.....	2
1.3. Çalışmanın Özgün Değeri	2
1.4. Tekstil Yapısal Kompozitlerde Kullanılan Preformlar	3
1.4.1. İki Boyutlu (2D) Preformlar	3
1.4.1.1. 2D Dokuma Preformlar	3
1.4.1.2. 2D Örme Preformlar	4
1.4.1.3. 2D Saç Örgü Preformlar	4
1.4.1.4. 2D Nonwoven Preformlar	4
1.4.2. Üç Boyutlu (3D) Preformlar	6
1.4.2.1. 3D Kesişmesiz Preformlar	6
1.4.2.2. 3D Dikişli Preformlar	6
1.4.2.3. 3D Ortogonal Dokuma Preformlar	7
1.4.2.4. 3D Çok Eksenli Dokuma Preformlar.....	7
1.4.2.5. 3D Nonwoven Preformlar	7
1.4.3. Hibrit ve Çok Katmanlı Preformlar	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
3. MATERYAL VE METOT	21
3.1. Hibrit Preformların Üretimi	21
3.2. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretilmesi.....	22
3.3. Hibrit Preformlara Uygulanan Testler.....	24

3.3.1. Kalınlık	25
3.3.2. Gramaj	25
3.3.3. Sıklık.....	25
3.3.4. Krimp.....	25
3.3.5. Lif Miktarı	25
3.4. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlere Uygulanan	
Testler.....	26
3.4.1. Kompozit Kalınlığı.....	26
3.4.2. Kompozit Yoğunluğu	26
3.4.3. Kompozit Lif Miktarı	27
3.4.4. Eğme testi	28
3.4.5. Charpy darbe testi.....	29
3.4.6. Düşen ağırlık darbe testi.....	29
3.4.7. Basma ve Darbe Sonrası Basma (CAI) Testleri	30
3.4.8. Tahribatsız Muayene (Ultrasonik C-Scan).....	31
3.4.9. Mikroskopik Analiz.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. Hibrit Preformların Özellikleri.....	32
4.2. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Özellikleri	32
4.3. Kompozit Yapıların Eğme Testi Sonuçları	34
4.4. Kompozit Yapıların Charpy Darbe Testi Sonuçları.....	38
4.5. Kompozit Yapıların Düşen Ağırlık Darbe Testi Sonuçları.....	40
4.6. Kompozit Yapıların Basma ve CAI Test Sonuçları	46
4.7. Hasar Analizi Sonuçları	48
4.7.1. Kompozit Yapıların Eğme Testi Sonrası Hasar Analizi.....	48
4.7.2. Kompozit Yapıların Charpy Darbe Testi Sonrası Hasar Analizi	52
4.7.3. Kompozit Yapıların Düşen Ağırlık Darbe Testi Sonrası Hasar Analizi	54
4.7.4. Kompozit Yapıların CAI Testi Sonrası Hasar Analizi	56
5. SONUÇLAR.....	58
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Hibrit preformların konstrüksiyon özellikleri	21
Çizelge 3.2. Katmanlar arası takviye için kullanılan nonwoven kumaşın yapısal özellikleri	22
Çizelge 3.3. Kompozitlerin tanımlanması	23
Çizelge 3.4. Hibrit preformlara uygulanan testler ve kullanılan test standartları.....	25
Çizelge 3.5. Kompozit yapılara uygulanan testler ve kullanılan test standartları	26
Çizelge 4.1. Hibrit preformların özellikleri.....	32
Çizelge 4.2. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin özellikleri	33
Çizelge 4.3. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme sonuçları	34
Çizelge 4.4. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları	39
Çizelge 4.5. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları	40
Çizelge 4.6. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI test sonuçları	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Kumaş katmanları ile nonwoven yapı arasında oluşan ara-yüz bağlarının köprüleme etkisi (Tzetzis ve Hogg, 2006).....	10
Şekil 2.2. Fenoksi liflerinin erimesiyle birlikte epoksi reçine içerisinde oluşan faz ayrımı damlacık şeklinde morfolojik yapı (Wong ve ark., 2010).....	10
Şekil 2.3. Mod-I yükleme sonrası kırılma yüzeylerinin görüntüleri (Nash ve ark., 2015) .	11
Şekil 2.4. Kompozit yapılarda katmanlar arasında kullanılan nonwoven yüzeylerin çatlak ilerlemesini durdurması (Zhu, 2013)..	12
Şekil 2.5. Kompozit yapıların katmanlar arasındaki lif kırılmaları ve lif demetleri (Sohn ve ark., 2000)	13
Şekil 2.6. Unidirectional karbon/epoksi kompozitlerin şematik gösterimi, (a); referans numune, (b); katmanları arasına PA nonwoven yerleştirilen yapı (Beylergil ve ark., 2018).....	15
Şekil 2.7. Kompozit katmanları arasına yerleştirilen PA ve PET nonwoven yüzey (Orozco ve ark., 2017).....	15
Şekil 2.8. Nonwoven takviyesiz (sol) ve takviyeli /sağ) kompozit yapıların Mod-I kırılma yüzeyleri (Miller ve ark., 2015)	16
Şekil 2.9. Kompozitlerin katlararası ayrılma görünüşleri (Quan ve ark., 2020).....	17
Şekil 2.10. Kırılma yüzeyindeki lif ve CNT kaplama görüntüsü (Lee ve ark., 2012)	18
Şekil 2.11. Kompozitlerin katlararası ayrılma testi sonrası kırılma yüzeyleri (Kuwata ve Hogg, 2011a).....	18
Şekil 2.12. Aramid nonwoven takviyeli kompozit yapılarda boşluk oluşumu (Beylergil ve ark., 2019).....	20
Şekil 3.1. Cam/PP ve karbon/PP hibrit preformların dokunması.....	21
Şekil 3.2. Hibrit preformlarda çözgü ve atkı ipliklerinin kesişme bölgeleri, (a); Cam/PP, (b); Karbon/PP ($\times 1,5$ büyütme oranı).....	22
Şekil 3.3. Katmanlar arası takviye için kullanılan nonwoven kumaşın mikroskopik görüntüsü ($\times 1,5$ büyütme oranı)	22
Şekil 3.4. Kompozit yapıların vakum infüzyon metoduna göre üretim aşamaları.....	24
Şekil 3.5. Kompozit yapıların kesit görüntüleri	24
Şekil 3.6. Yoğunluk ölçer cihazında kompozit yoğunluğu ölçümü	27
Şekil 3.7. Kül fırınında lif miktarı tayini.....	27

Şekil 3.8. Kompozit yapıların eğme testi görüntüleri	28
Şekil 3.9. Kompozit yapıların charpy darbe testi görüntüleri	29
Şekil 3.10. Düşen ağırlık darbe test cihazı	30
Şekil 3.11. Kompozit yapıların basma ve CAI testi görüntüleri	30
Şekil 3.12. Ultrasonik C-Scan cihazının görüntüsü.	31
Şekil 4.1. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin lif miktarı ve yoğunluk sonuçları.....	33
Şekil 4.2. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme dayanımı değerleri, (a); atkı yönü, (b); çözgü yönü	35
Şekil 4.3. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme modülü değerleri, (a); atkı yönü, (b); çözgü yönü	36
Şekil 4.4. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin atkı yönü eğme dayanımı-deformasyon eğrileri.....	37
Şekil 4.5. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin çözgü yönü eğme dayanımı-deformasyon eğrileri.....	38
Şekil 4.6. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları	39
Şekil 4.7. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi maksimum kuvvet değerleri	41
Şekil 4.8. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi deformasyon değerleri	42
Şekil 4.9. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi absorplanan enerji değerleri.....	42
Şekil 4.10. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-zaman eğrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.....	43
Şekil 4.11. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi absorplanan enerji-zaman eğrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.....	44
Şekil 4.12. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi absorplanan kuvvet-deformasyon eğrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.....	45

Şekil 4.13. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI dayanımı değerleri..	47
Şekil 4.14. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI modülü değerleri.....	47
Şekil 4.15. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin residual CAI dayanım değerleri..	48
Şekil 4.16. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik yüzey görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).....	49
Şekil 4.17. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik atkı kesit görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).....	50
Şekil 4.18. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik çözgü kesit görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).....	51
Şekil 4.19. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin atkı yönü normali doğrultusunda uygulanan eğme yükü altındaki çatlak ilerleme oranları .	52
Şekil 4.20. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası kırılma fotoğrafları..	52
Şekil 4.21. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri ($\times 0.8$ büyütme oranı).....	53
Şekil 4.22. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli cam hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.	55
Şekil 4.23. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli karbon hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri..	55
Şekil 4.24. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli cam hibrit kompozitlerin CAI testi sonrası mikroskobik görüntüleri.....	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
ASTM	: Amerikan Standartlar Kurumu
b	: Numune eni
CAI	: Darbe sonrası basma
d	: Numune kalınlığı
D	: Numunenin merkezindeki maksimum deformasyon
E	: Eğilme modülü
ϵ	: Deformasyon
g/m^2	: Kumaşın birim alan ağırlığı
ISO	: International Organization for Standardization
L	: Destek mesafesi
m	: Yük-uzama eğrisinin eğimi
P	: Yük
PA	: Poliamid
PET	: Polietilen-tereftalat
PP	: Polipropilen
PPS	: Polietilen-sülfid
S	: Eğme dayanımı
TS	: Türk Standartları
W	: Kompozit ağırlığı
w	: Lif ağırlığı

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Önemi

Yüksek performanslı cam, karbon, p-aramid gibi lifler ile takviye edilen polimerik kompozitler sahip oldukları hafiflik ve yüksek spesifik mukavemetten dolayı uzun bir süredir metal malzemelerin yerini almaya başlamışlardır. Bu avantajların en önemlileri sağlamış oldukları hafiflik ve yüksek spesifik mukavemettir (Mazumdar, 2001). Lif takviteli polimerik kompozitlerin birçok üstün özelliğine karşın, düşük darbe dayanımları ve kolayca delaminasyona uğramaları istenmeyen bir durumdur (Hull ve Shi 1993, Sierakowski ve Newaz 1995). Kompozit malzemelerin darbe dayanımlarını artırmak ve delaminasyon eğilimlerini azaltmak için matris malzemelerin modifiye edilmesi, termoplastik matris malzeme kullanılması, üç boyutlu preformlar kullanılması, yapının kalınlığı boyunca dikiş ile takviye edilmesi veya nonwoven takviyesi uygulanan yöntemler arasındadır (Kim ve ark., 1993, Ghasemi Nejhad ve Parvizi-Majidi 1990, Chen ve Jang 1995, Bilisik ve Yolacan, 2014, Hogg, 2005).

Nonwoven takviyeli kompozit yapılar ile ilgili literatürde karşılaşılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Karbon kumaş katları arasına yerleştirilen nonwoven takviyesinin darbe davranışı ve basma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nonwoven takviyeli kompozitlerde düzlem dışı deformasyon ve darbe merkezinden delaminasyon yayılımının oldukça kısıtlandığı görülmüştür. Bu kısıtlama, yüksek enerjili darbe testinde yaklaşık %51'dir. Basma dayanımları ise yaklaşık %40'lık bir artış göstermiştir (Yuan ve ark., 2019). Termoplastik poliüretan dokusuz yüzeyler, cam/epoksi kompozit katmanları arasına yerleştirilmiştir. Kompozit yapıların Mod I ve Mod II kırılma tokluğu ve erozif aşınma dayanımları incelenmiştir. Nonwoven takviyesiz cam/epoksi kompozitler ile karşılaştırıldığında, nonwoven takviyesi ile kompozit yapıların aşınma direnci önemli oranda iyileştirilmiştir. Mod I kırılma tokluğunda %78, Mod II kırılma tokluğunda ise %115 artış sağlanmıştır (Lv ve ark., 2018). Farklı özelliklerdeki polifenilensülfür (PPS) liflerinden oluşan nonwoven yapılar, tek yönde doğrultulanmış karbon/epoksi kompozit katmanlarına yerleştirilmiş ve Mod I ve Mod II kırılma tokluğu davranışları incelenmiştir. Nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların kırılma tokluğu davranışları üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Ramirez ve ark., 2015). Dokusuz yüzey takviyeli cam kompozitlerin özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, 3 tip karbon kumaş ve 5 tip dokusuz yüzey

kullanılmıştır. Matris malzeme olarak epoksi ve vinilester kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerin Mod-I kırılma tokluğu değerleri, polyester nonwoven takviyesinde artış göstermiştir (Kuwata ve Hogg 2011a). Karbon kompozit katmanları arasına polyester dokusuz yüzey yerleştirilerek Mod-II kırılma tokluğu araştırılmıştır. İnce ve düşük gramajlı nonwoven takviyesinde Mod-II kırılma tokluğunda önemli artış elde edilmiştir. Bazı nonwoven takviyelerinde, kompozit performansındaki tutarsızlıklar ve varyasyonların, nonwoven yapıdaki düzensizlikler ve reçineye bağlı olduğu ifade edilmiştir (Kuwata ve Hogg 2011b). Havacılık sektöründe kullanılan karbon lifi takviyeli polimerik kompozitlerin performanslarını arttırmak üzere katmanlar arasına farklı tipte dokusuz yüzey yerleşimi yapılmıştır. Bunlar; Polietilen-tereftalat (PET), Polietilen-sülfid (PPS) ve Poliamid-12 (PA) lif esaslı nonwoven yapılarıdır. Karbon kumaşlar ise tek yönde doğrultulanmış, non-krimp kumaş ve 5'li saten dokuma kumaş olarak belirlenmiştir. Kompozitlerin sıcak kürleşme işlemi sırasında PET ve PPS dokusuz yapılar lifli halde kalırken PA örtüler eriyik hale gelmiştir. Bu durum, kompozit yapılarda farklı kırılma mekanizmalarına neden olmuştur. PET ve PPS nonwoven yapılar, delaminasyona karşı köprüleme yaparken, PA yapılar ise epoksi matrisin kırılma tokluğunu iyileştirmiştir (Quan, 2020). Termoplastik dokusuz yüzey takviyesi ile üretilen kompozit yapıların hasar toleransının arttığı belirlenmiştir. Termoplastik lifler, ısıyla sertleşen matris kullanıldığında lif esaslı kompozitin tokluğunu önemli ölçüde arttırmaktadır (Hogg, 2005).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, polipropilen (PP) çözgü, cam ve karbon atkı iplikleri kullanılarak tek yönde doğrultulanmış özgün preformlar üretilmesi, üretilen bu preformların katmanlar arası hibritleme ile düzenlenerek, bu katmanlar arasına polipropilen nonwoven takviyesi ile enerji absorpsiyonu artırılmış, sünek ve düşük katlararası delaminasyon özelliği gösteren kompozit yapılar geliştirilmesidir. Geliştirilen kompozit yapıların darbe dayanımları ve enerji absorpsiyon kabiliyetleri farklı test yöntemleri ile (drop ve charpy) incelenmiştir. Ayrıca, temel mekanik özellikleri belirlenerek kullanım alanına yönelik performans değerlendirmesi yapılmıştır.

1.3. Çalışmanın Özgün Değeri

Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda, yüksek performanslı liflerden üretilen kompozitlerin nonwoven takviyesine dayanan çalışmalar bulunmaktadır. Ancak, özgün

tasarım ve üretim yöntemi ile geliştirilecek tek yönde doğrultulanmış preformların hibrit yapı düzeninde ve farklı katmanlarında nonwoven takviyesine sahip bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, çalışmanın özgün değeri oldukça yüksektir. Dokunan cam/karbon kumaşların çözgüsü polipropilen lifi yüksek elastikiyet göstermektedir. PP lifi, karbon ve cam liflerine kıyasla çok daha düşük oranda kullanılmıştır. Böylece, tek yönde doğrultulanmış yapı, düşük krimp oranlarında üretilmiştir. Kompozit yapıda katlararası delaminasyon istenmeyen bir durumdur. Özellikle havacılık ve savunma alanlarında, darbe esaslı yüklemelerde yapı bütünlüğünü bozan ve hasar toleransını düşüren bir etkiye sahiptir. Bu tez çalışması ile, delaminasyonun azaltılması ve hibritleme ile dengeli bir yapı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dokusuz yüzey takviyesi ile, kompozit yapıların sünekliği ve dolayısıyla enerji absorpsiyonunun artırılması, bu sayede de darbe esaslı yüklemelerde hasar toleransı yüksek/delaminasyonu sınırlandırılmış kompozit malzemelerin geliştirilmesi mümkündür.

1.4. Tekstil Yapısal Kompozitlerde Kullanılan Preformlar

Lif takviyeli polimerik kompozitlerin birçok üstün özelliğine karşın, düşük darbe dayanımları ve kolayca delaminasyona uğramaları istenmeyen bir durumdur (Hull ve Shi 1993, Sierakowski ve Newaz 1995). Delaminasyon problemi, özellikle hava taşıtlarında ölümcül kazalara sebebiyet vermektedir. Kompozit malzemelerin darbe dayanımlarını artırmak ve delaminasyon eğilimlerini azaltmak için matris malzemelerin modifiye edilmesi, termoplastik matris malzeme kullanılması, üç boyutlu (3D) preformlar kullanılması, yapının kalınlığı boyunca dikiş ile takviye edilmesi veya nonwoven takviyesi uygulanan yöntemler arasındadır (Kim ve ark., 1993, Ghasemi Nejhad ve Parvizi-Majidi 1990, Chen ve Jang 1995, Bilisik ve Yolacan, 2014a, Hogg, 2005).

1.4.1. İki Boyutlu (2D) Preformlar

1.4.1.1. 2D Dokuma Preformlar

2D dokuma kumaşların katmanlı olarak kullanılmasıyla üretilen polimerik kompozitlerde, kalınlık boyunca Z-ipliklerinin olmaması ve buna bağlı olarak iki eksendeki yüksek hacimsel lif miktarından dolayı, 3D dokuma kompozitlere göre düzlemsel özellikleri daha üstündür. 2D dokuma kumaşlar, yüksek örtme ve stabil bir davranış sergilemektedirler. Buna karşın, yapının kalınlığı boyunca Z-ipliklerinin olmaması nedeniyle düzlem-dışı

özellikleri 3D dokuma kompozitlere kıyasla düşüktür. Kompozit sektöründe, 2D dokuma kumaşlar ekonomik olması nedeni ile tercih edilen yapılardır (Bilisik ve ark., 2016).

1.4.1.2. 2D Örme Preformlar

2D örme kumaşlar, ilmek oluşumu nedeniyle kaba bir yapıya sahiptir. Bu preformlar, gerilimi kumaş yapısı boyunca dağıtan ve oldukça esnek bir yapıya sahiptir. Ayrıca daha düşük eğilme rijitliği göstermektedir. Örme kumaş yapıların özelliklerinin, lif dayanım ve modülünden, örgü yapısından ve ilmek yoğunluğundan etkilendiği görülmüştür (Miravete, 1999). Deformasyon davranışı, örme kumaşların ilk yük anında uzama özellikleri ile belirlenmektedir. Yüksek performanslı ipliklerin örülebilirliği, ipliklerin sürtünme özelliklerine, eğilme rijitliğine ve iplik mukavemetine bağlıdır (Padaki ve ark., 2006). İplik eğilme rijitliği ve iplikler arası sürtünme katsayısının ilmeğin şekli için belirleyici olduğu, yüksek performanslı ipliklerin özellikle cam ipliklerin ilmek uzunluğunun iğne çapı, kam ayarı ve makine ayarı ile değiştiği belirlenmiştir (Cherif ve ark., 2012; Ciobanu, 2011; Padaki ve ark., 2006).

1.4.1.3. 2D Saç Örgü Preformlar

2D saç örgü kumaş yapısının, proses ile değişebilen özelliklerinin kompozit formundaki etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna göre, örgü açısı düşük olduğunda lifler arası geçirgenliğin ve gözenekliliğin fazla olduğu görülmüştür (Long, 2001). 2D saç örgülü kumaş yapılarının kompozitte kullanılmasın, kompozit yapının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelendiğinde, 2D saç örgülü kompozitlerin eğme dayanım ve modülünün, örgü açısının artmasıyla azaldığı ifade edilmiştir (Nasu ve ark., 2010).

1.4.1.4. 2D Nonwoven Preformlar

2D nonwoven kumaş yapısının özellikleri, lif tipine, lif boyutuna, hacimsel lif miktarına, gözenek boyutuna, lif hacmindeki dağılıma ve yüzeydeki lif oryantasyonuna bağlıdır (Chapman, 2010). Nonwoven kumaşın mekanik özellikleri, tüm kompozit yapısal uygulamalar için önemli bir yere sahiptir. Nonwoven kumaşlar liflerden oluşan anizotropik yapılardır. Dayanım özellikleri, lif ve lifler arasındaki bağlanma mukavemetinden doğrudan etkilenmektedir. Bunun yanı sıra, yönsel dayanım, ağısı yapıdaki lif oryantasyon dağılımı ve

liflerinin paketlenme yoğunluğu da kompozit özelliklerinde belirleyici bir rol oynamaktadır (Bilisik ve Karaduman, 2016).

2D nonwoven kumaş üretimi, kuru serme, ıslak serme ve eğirme gibi çeşitli üretim tekniklerinin kullanılmasıyla lifsi yüzeyin oluşturulmasıyla meydana gelmektedir. Bu lifsi yüzey oluşturulduktan sonra birbirlerine sağlam tutunmaları için çeşitli teknikler kullanılır. Mekanik teknikler; iğneleme, dikiş ve su jeti, kimyasal teknikler; emprenye, kaplama ve püskürtme, kohezyona dayalı teknikler ise; hava üfleme ve ultrasonik birleştirme olarak sıralanabilir (Bilisik ve Karaduman, 2016). İğneleme yönteminde, kısa lifli ağlar, lifleri hem düzlemsel hem de düzlem dışı yönlerde yönlendirmek için mekanik iğnele işlemiyle bağlanmaktadır (Albrecht ve ark., 2006). İşlem sırasında yapıya uygulanan basınç artmakta ve bu da önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Elyafar arasında sürtünme, ağsı yapıdaki bağlanma derecesini belirlemektedir. İğneleme sırasında önemli parametreler, iğne tasarımı, kumaş genişliğine düşen iğne yoğunluğu, vuruş sıklığı, çıkış hızları ve çalışma genişliğidir. İğneleme yönteminin temel prensibi, kumaşın düzlem dışı (kalınlık) yönünde hizalanmalarını sağlamak için yatay liflerin bir kısmını tekrar yönlendirmektir. Bundan dolayı dikenli iğneler kullanılır. Lifin yeniden oryantasyonu sırasında, lifler iğne tarafından tutulduğundan ağsı yapı içinde lif hareketi meydana gelir ve konumları değişir. Bu lif hareketi ile, ağsı yapıda belirli bir alan kütlelerini etkileyen boyutsal değişiklikler görülür (Albrecht ve ark., 2006). Nonwoven kumaş yapısının dikişle bağlama yönteminde, lif ağları, ağın kalınlık yönünde ilmekler oluşturularak güçlendirilir. Dikiş yönteminde ana unsurlar, bileşik iğne, kapama teli, bileşik iğne kancası ve iğne kılavuzudur (Bilisik ve Karaduman, 2016). Nonwoven kumaş birleştirme yöntemlerinden olan su jeti yönteminde, jet hareketi sırasında bazı lifler, iğneleme işlemine benzer şekilde kalan lifleri kilitlemek için düzlem dışı yönünde yeniden yönlendirilir. Ağsı yapı ancak ağ yoğunlaştırma kısmını nötralize eden jetleri geçtikten sonra alt taraftan ısıtılır (Albrecht ve ark., 2006; Tausif ve Russell, 2012). Su jeti birleştirme yönteminde, yapıştırma verimini belirleyen ana parametre jet hızıdır (Bilisik ve Karaduman, 2016). Termal bağlama işlemi nonwoven kumaşların sıcak hava ile bağlanmasını içerirken, kimyasal bağlama bağlayıcı dispersiyonların uygulanmasını ardından emprenye edilmiş ağsı yüzeylerin kürlenmesini ve kurutulmasını içermektedir (Albrecht ve ark., 2006).

1.4.2. Üç Boyutlu (3D) Preformlar

1.4.2.1. 3D Kesişmesiz Preformlar

3D kesişmesiz tek katmanlı ve çok katmanlı, tek eksenli, çift eksenli ve çok eksenli kompozit yapılar incelenmiştir. E-cam/polyester yapıların çekme ve eğme dayanımlarının iplik yönüne ve katman sayısına bağlı olduğu görülmüştür. Preformların yoğunluğu arttığında, E-cam/polyester yapıların çekme ve eğme dayanımlarının arttığı ve aynı zamanda kompozit yapıların çekme ve eğme özelliklerinin toplam lif hacimleri ile orantılı olduğu görülmüştür. E-cam/polyester yapılar aynı preform yoğunluklarında üretildiğinde, ince liflerden üretilen yapılara göre kalın liflerden üretilen yapılar daha yüksek çekme ve eğme dayanımı göstermiştir. 3D kesişmesiz kompozit yapılarda, uygulanan çekme yüküne bağlı olarak, katmanlar arası ayrılmanın düzlem-dışı yönde meydana gelen bir mod-I delaminasyon kırılması görülmüştür. Bunun nedeninin, katmanlar arasında Z-ipliklerinin bulunmaması olduğu ifade edilmesidir (Bilisik ve Yılmaz, 2012). Yapılan başka bir çalışmada ise, yapının yoğunluğuna dayalı spesifik enerji absorpsiyonunun, 3D dokuma karbona kıyasla, kesişmesiz E-cam/polyester kompozit yapılarda daha iyi olduğu ifade edilmiştir. 3D dokuma kompozitlerdeki darbe esaslı hasar yayılımının, kesişmesiz çok eksenli yapıya göre daha az ve darbe hasarının Z-lifi ile sınırlandığı görülmüştür (Bilisik, 2011).

1.4.2.2. 3D Dikişli Preformlar

Dikiş işlemi esnasında meydana gelen lif kırılmalarından dolayı, dikişli kompozit yapıların düzlemsel dayanımları, dikişli kompozitlere kıyasla daha düşüktür. Dikişli yapılarda dikiş yönü, dikiş sayısı ve dikiş yoğunluğu arttıkça çözgü ve atkı yönündeki çekme dayanım ve modüllerinin azaldığı tespit edilmiştir. 2D dikişsiz dokuma E-cam/polyester kompozit yapıların çözgü ve atkı yönünde uygulanan çekme kuvveti sonucunda yüzeylerinde matris kırılmaları, kısmi elyaf kırılmaları, kesitlerinde delaminasyon şeklinde bozunmalar gözlemlenmiştir. Çok eksenli dikişli 3D E-cam/polyester kompozit yapılarda ise, yüzeyde matris kırılmaları, kısmi filament kopmaları şeklinde hasar gerçekleşmiştir. Kesitlerinde ise kısmi delaminasyon belirlenmiş fakat dikiş nedeniyle delaminasyonun geniş alanlara yayılması engellendiği görülmüştür. Dikişli yapılarda dikiş nedeniyle hasar tolerans performansının arttığı ifade edilmiştir (Bilisik ve Yolacan, 2014b). Ayrıca, dikişli 3D E-

cam/polyester dokuma kompozitlerin eğilme özellikleri de dikiş parametrelerinden etkilenmektedir (Bilisik ve Yolacan, 2015).

1.4.2.3. 3D Ortogonal Dokuma Preformlar

3D karbon/epoksi kompozitlerde, 3D ortogonal dokuma preformdaki Z-ipliği miktarının ve yerleşiminin, 3D ortogonal dokuma yapının düzlemsel özelliklerini etkilediği görülmüştür. Z-ipliklerin hacimsel lif oranı arttırıldığında, 3D ortogonal dokuma yapısının düzlemsel özellikleri azalmıştır. Ancak, 3D ortogonal dokuma kumaşın birim alanına yerleştirilen Z-ipliğinin azalmasıyla birlikte, kompozit yapıda meydana gelen delaminasyon eğiliminin de arttığı ifade edilmiştir (Dickinson, 1990). Darbe yükü altında, 3D ortogonal dokuma veya 3D dikişli kompozitlerin yapının kalınlığı boyunca yerleştirilen Z-ipliği nedeniyle darbe enerjisini sınırlandırıldığı görülmüştür (Babcock ve Rose, 2001).

1.4.2.4. 3D Çok Eksenli Dokuma Preformlar

3D çok eksenli dokuma kompozit ve 3D dikişli kompozitlerin çekme ve basma testi sonuçları karşılaştırıldığında, 3D çok eksenli dokuma kompozit yapının 3D dikişli kompozit yapıya göre çekme ve basma dayanım ve modüllerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, 3D dikişli kompozitlerin darbe sonrası basma dayanımları, 3D çok eksenli dokuma kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Ayrıca, 3D çok eksenli dokuma kompozit yapının darbe sonrası basma yükü altındaki hasarlı alanının, 2D dikişli kompozitlere göre daha küçük olduğu gözlemlenmiştir (Uchida et al., 2008).

1.4.2.5. 3D Nonwoven Preformlar

İğneleme yöntemine dayalı geliştirilen 3D nonwoven preform üretim prosesi, çoklu nonwoven yüzeylerin katmanlı olarak serilmesi ve bazı liflerin yapının kalınlığı boyunca doğrultulanmasını sağlamak amacıyla çoklu iğnelerin kullanılması prensibine dayanmaktadır. Diğer bir 3D nonwoven yapı ise çözgülü örme prensibi ile üretilmektedir. Çözgü iplikleri bir veya daha fazla kılavuz çubuk tarafından beslenirken, atkı iplikleri çözgü iplikleri ile dokunmamış ağ arasına girer. Ağ, çözgü iplikleri ve atkı iplikleri dikiş iplikleri tarafından birleştirilir (Albrecht ve ark., 2006; Chapman, 2010).

1.4.3. Hibrit ve Çok Katmanlı Preformlar

Hibrit preformlar, düzlemsel ve düzlem dışı yönlerde çeşitli lif türleri içeren yapılar olarak tanımlanmaktadır. Hibrit preformlar, geniş bir malzeme yelpazesinin yanı sıra düşük yoğunluk, yüksek mekanik ve darbe direnci gibi iyileştirilmiş özellikler sağlamaktadır. Ayrıca, preformun hibridizasyonu, seramik ve karbon gibi pahalı elyafların yerine daha az maliyetli elyafların değiştirilmesiyle uygun maliyetli malzemelerin geliştirilmesini sağlamak ve bu da çoğu zaman tercih edilen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Karbon, bor, cam, para-aramid, seramik ve doğal lifler gibi yüksek modüllü lifler kullanılarak dokuma, örme ve nonwoven prosesi gibi çeşitli tekstil teknolojileri ile tek katmanlı veya çok katmanlı hibrit kumaş preformların üretilmesi mümkündür (Vandeuren ve ark., 1999). Yüksek teknolojik uygulamalardaki kompleks malzeme gereksinimleri, izotropik malzemelerin istenilen özellikleri yeterince karşılayamamasından dolayı, hibrit yapıların kullanımlarının artmasına neden olmuştur (Choi ve ark., 1999; Kretsis, 1987).

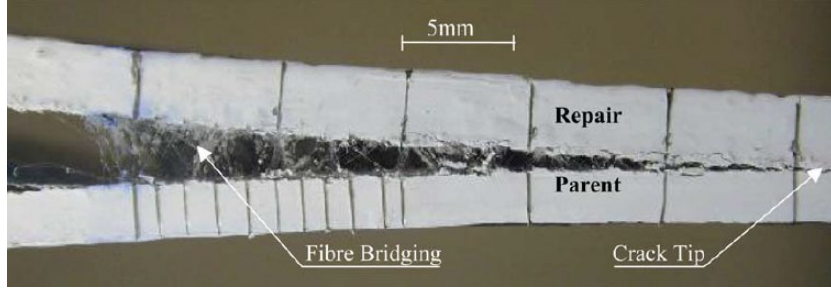
2D dokuma kumaşta karbon liflerinden oluşan çözgü iplikleri yüksek modül sağlayabilirken, cam liflerden oluşan atkı ipliği yüksek uzama özellikleri sağlamaktadır. Bu nedenle 2D kompozit yapının düzlemsel özellikleri iyileştirilmiştir. Karbon liflerinden çözgü ipliği kullanılarak S-camdan atkı iplikleri ve z-ipliklerin para-aramidden oluşan çok katmanlı bir dokuma preform yapının belirli termo-mekanik yükler için düzlemsel ve düzlem dışı özellikleri iyileştirilebilmektedir (Bilisik ve Karaduman, 2016).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2D kompozitlerin, yapının kalınlığı boyunca nonwoven kumaşlar ile takviye edilmesi ve bu sayede delaminasyon eğiliminin azaltılması hakkındaki çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

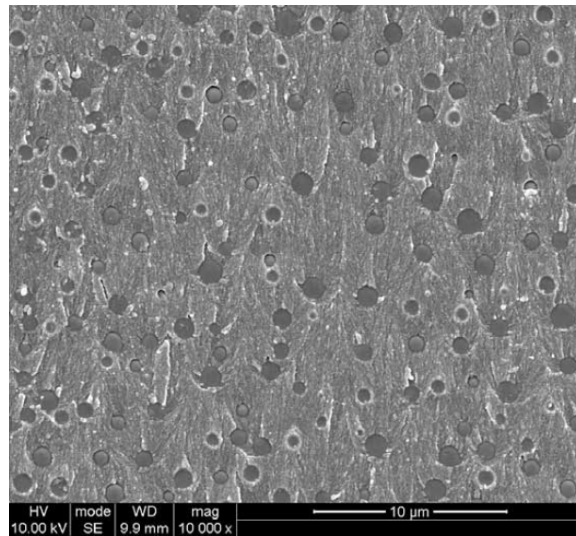
Walker ve ark. (2002), karbon/epoksi kompozitlerin katmanlar arası takviye yoluyla darbe direncinin iyileştirilmesini hedeflemiştir. Darbe direncini iyileştirmek için katmanlar arası kısa lif takviyesi ile güçlendirme teknikleri kullanılmıştır. Katmanlar arası takviyenin etkilerini değerlendirmek için görüntü teknikleri ve absorplanan enerji miktarları değerlendirilmiştir. Düşük enerji seviyelerinde kısa lif takviyeli ve takviyesiz kompozitler benzer enerji absorpsiyonları gösterirken, daha yüksek enerji seviyelerinde ise kısa elyaf takviyesinin katmanlarda hasarı azalttığı ve enerji absorpsiyonunu arttığı görülmüştür. Takviyesiz kompozitlerde darbe kuvveti neticesinde meydana gelen hasarın daha fazla olduğu ve delaminasyon esaslı hasar miktarının arttığı belirlenmiştir.

Tzetzis ve Hogg (2006), karbon kumaş takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun iyileştirilmesi için katmanlar arasına nonwoven kumaş takviyesi kullanmıştır. Kırılma tokluğunu iyileştirmek için kullanılan nonwoven kumaşlar, karbon lifli, polyester lifli ve karbon-polyester lifli kombinasyonlardan oluşmaktadır. Nonwoven kumaşın, kompozit yapının katları arasındaki boşlukları doldurması sayesinde kırılma tokluğunda önemli bir artış görülmüştür. Çatlak başlangıcı gereken enerji miktarı, nonwoven takviyeli kompozitlerde artmıştır. Nonwoven takviyesi bulunmayan kompozitlerde ise önemli ölçüde çatlak ilerlemesi meydana gelmiştir. Nonwoven takviyesi ile lifler arasındaki çatlak oluşumunun ilerlememesi, kumaş katmanları ile nonwoven yapı arasında oluşan ara-yüz bağlarının köprüleme etkisinden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.1). Polyester nonwoven takviyesinin ara-yüz bağının karbon-polyester kombinasyonlu nonwoven kumaşa göre köprüleme etkisi düşük olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuç, nonwoven yapıda karbon lifi bulunmasının ara-yüz bağ özelliklerini iyileştirerek kırılma tokluğunda önemli bir artış sağladığını göstermiştir.



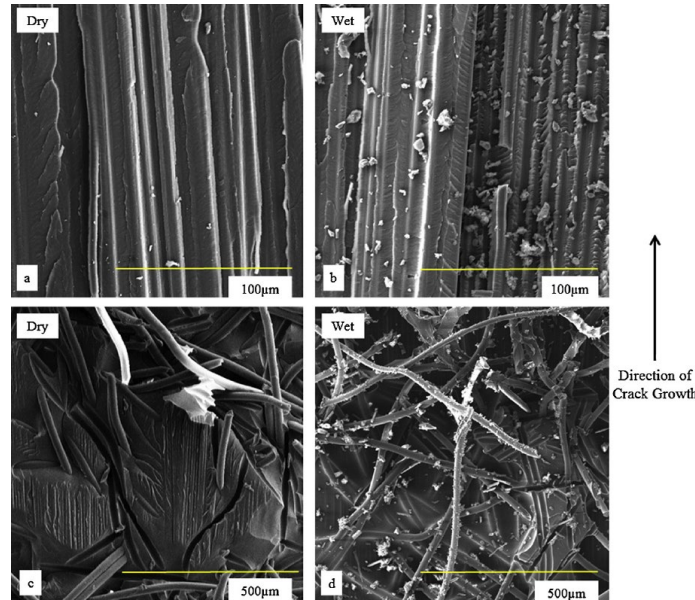
Şekil 2.1. Kumaş katmanları ile nonwoven yapı arasında oluşan ara-yüz bağlarının köprüleme etkisi (Tzetzis ve Hogg, 2006).

Wong ve ark. (2010), karbon lif/epoksi kompozitlerin katmanlar arasına termoplastik fenoksi lifleri eklenerek infüzyon yöntemiyle kompozit üretilmiştir. Termoplastik fenoksi lifi, yüksek sıcaklıklarda kürleşme sırasında epoksi içerisinde eriyerek farklı bir morfoloji oluşturmuştur. Ortalama Mod-I kırılma tokluğunun, ağırlıkça %10 (toplam matris içeriğine göre) fenoksi lifi eklenmesiyle yaklaşık 10 kat arttığı görülmüştür. Gerilme dayanımı, modülü ve termal stabilite gibi özelliklerde olumsuz etkilenme görülmemiştir. Darbe sonrası basma testi sonuçlarında ağırlıkça %10 fenoksi içeren kompozit yapıların hasar toleransının arttığı belirlenmiştir. Kompozit yapıların morfolojik yapısı incelendiğinde, fenoksi liflerinin erimesiyle birlikte epoksi reçine içerisinde faz ayrımı olduğu ve fenoksi oranının artmasıyla birlikte damlacık şeklinde morfolojik yapı olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.2). Eriyebilen liflerin, nonwoven yüzeylerin veya film kullanımının, hasara eğimli bölgelerde epoksi reçinede lokalize tokluk meydana getirdiği, bunun da kırılma tokluğu ve beraberinde hasar toleransını arttırdığı belirtilmiştir.



Şekil 2.2. Fenoksi liflerinin erimesiyle birlikte epoksi reçine içerisinde oluşan faz ayrımı damlacık şeklinde morfolojik yapı (Wong ve ark., 2010).

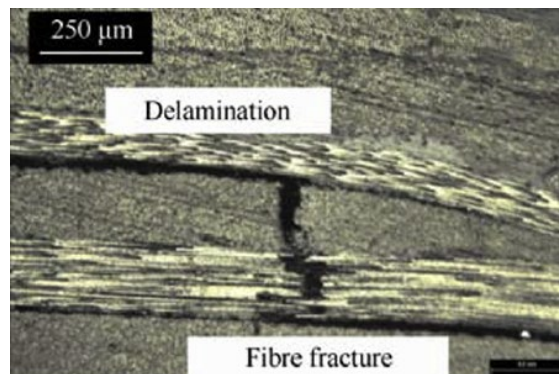
Nash ve ark. (2015), 0°/90° non-krimp karbon kumaş katmanları arasına termoplastik poliamid (PA) lifli nonwoven ekleyerek, benzoksazin reçine sistemi ile VARTM yöntemine göre kompozit yapılar üretmiştir. Katmanlar arası termoplastik nonwoven yapıların, kompozit yapıların Mod-I kırılma tokluğu, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve su emme davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Maksimum nem içeriğindeki artışa ve eğilme dayanımındaki düşüşe rağmen nonwoven yapılar, PA liflerinin lif köprülemesindeki artıştan dolayı kırılma tokluğunu (G_{IC}) büyük oranda arttırdığı görülmektedir. PA nonwoven yapının karbon/ benzoksazin kompozit yapının katmanları arasına eklenmesinin, kompozit yapıların performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Poliamid liflerinin ara katmanlarda olması, yapıda nem miktarının artmasına neden olmuş, bu da lif/matris ara-yüz dayanımında azalmaya, moleküler degradasyona ve matris malzemenin plastikleşmesine bağlı olarak kompozit yapının eğilme modülünü önemli ölçüde azaltmıştır. Ayrıca, T_g 'nin de yaklaşık %25 oranında düştüğü belirlenmiştir. Nonwoven yapıların katmanlar arasında bulunmasının delaminasyona karşı direnci arttırdığı sonucuna varılmıştır. Nonwoven yapının kullanılması sonucu Mod-I yüklemesinde çatlak büyümesine karşı direncin ve G_{IC} değerinin iki katına kadar arttığı, bununla birlikte hem suyun varlığından dolayı lif/matris ara-yüz dayanımındaki azalmaya hem de kompozit yapıdaki karbon lifinin hacimsel lif miktarındaki azalmaya bağlı olarak eğilme modülünün yaklaşık %17 oranında azaldığı görülmüştür (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Mod-I yükleme sonrası kırılma yüzeylerinin görüntüleri (Nash ve ark., 2015).

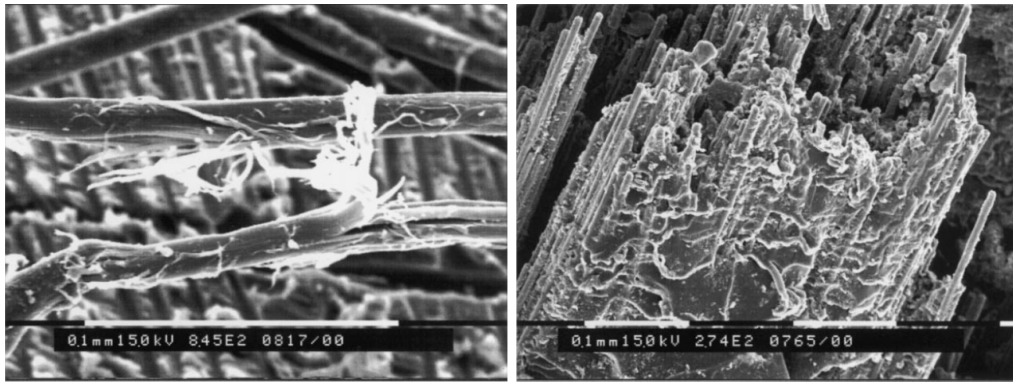
Sohn ve Hu (2000), karbon/epoksi kompozit yapının katmanlar arası delaminasyon direncini arttırmak için kırpıntı Kevlar lifleri kullanmıştır. Katmanlar arası Kevlar lifi takviyesi olan kompozit yapılar ile takviyesiz karbon/epoksi kompozitlerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Kevlar lifi ile takviye edilen kompozit yapılarda delaminasyon direncinin %100'ün üzerinde arttığı belirlenmiştir. Kompozit yapılara Kevlar liflerinin eklenmesinden dolayı kalınlığı 30-100 μm arasında artış göstermiştir. Bu nedenle, Kevlar lifli katmanların sayısı arttığında kompozit yapıların basma dayanımlarının yaklaşık %15 azaldığı görülmüştür. Diğer yöntemlere göre karşılaştırıldığında bu yöntemin en belirgin avantajı malzeme işleme esnekliği, basitliği ve düşük maliyetli olmasıdır. Diğer karmaşık ve yüksek maliyetli yöntemler ile karşılaştırıldığında %100-200 oranında gerçekleşen delaminasyon direncindeki artış, basma dayanımındaki düşüşü kompanse edebilmektedir.

Zhu (2013), karbon dokuma kumaş katmanları arasına farklı kalınlık ve gramajlarda nonwoven takviyesi yaparak kompozit yapıların hasar direncini iyileştirmeyi amaçlamıştır. Epoksi reçine sistemi ve vakum infüzyon yöntemiyle kompozit yapılar üretilmiştir. Kompozit yapılara darbe, darbe sonrası basma (CAI) ve basma testleri uygulanmıştır. Nonwoven kullanılan kompozit yapılarda hasar direnci önemli ölçüde artış göstermiştir. CAI dayanımında ise %32'lik bir artış belirlenmiştir. Delaminasyon eğilimi, katmanlar arası nonwoven eklenen karbon kompozit yapılarda, nonwoven kumaşın bariyer görevi görmesinden dolayı önemli ölçüde azalmıştır. Kompozit yapıda meydana gelen çatlakların, katmanlar arasında kullanılan nonwoven yüzeylerin oluşturduğu bariyer sayesinde durdurulduğu belirlenmiştir (Şekil 2.4). Ayrıca, katmanlar arasına konulan nonwoven yüzeylerin kalınlıkları arttıkça, kompozit yapıların delaminasyon direncinin de arttığı ifade edilmiştir.



Şekil 2.4. Kompozit yapılarda katmanlar arasında kullanılan nonwoven yüzeylerin çatlak ilerlemesini durdurması (Zhu, 2013).

Sohn ve ark. (2000), $[0^\circ/90^\circ]_5$ karbon/epoksi prepreglerin katmanları arasına farklı lif, film ve nonwoven takviyesi yaparak kompozit yapıların darbe direncini arttırmayı amaçlamıştır. Kevlar lifleri, 15 mm ve 5-7 mm uzunluğunda kırpıntı formunda ağırlıkça %0,4 ve %0,8 oranında katmanlar arasına dağıtılmıştır. İki farklı tipteki Zylon lifi, 6 mm uzunluğunda kırpıntı formunda ağırlıkça %0,8 oranında katmanlar arasına dağıtılmıştır. PEEA (poli(etilen-ko-akrilik asit) film ve PA nonwoven yüzeyler ise diğer takviye materyalleri olarak katmanlar arasına yerleştirilmiştir. Üretilen kompozit yapıların, düşük hız darbe testleri, farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapılar çeşitli kırılma tipleri göstermektedir. Ara katman malzemelerine bağlı olarak delaminasyon, kat içi çatlama, matris çatlaması, lif kırılması ve hasarlar farklılık göstermektedir. PEEA film, kompozit yapıların darbe sonrası bozulan alanında önemli bir düşüş saplamıştır. Ancak, bu filmlerin epoksi ile zayıf yapışma özelliklerinden dolayı özellikle darbe sonrası basma dayanımlarında düşüş gerçekleşmiştir. Zylon lifinin epoksi ile iyi ara-yüz bağ kuvveti, lif köprüleme etkisini arttırmakta ve böylece katmanlar arası delaminasyon direncini arttırmaktadır. Kırpıntı Kevlar lif takviyesinde, özellikle 5-7 mm uzunluğunda ve ağırlıkça %0,4 takviye oranının, diğer Kevlar lif takviyelerine kıyasla daha iyi darbe direnci sergilediği belirlenmiştir. Katmanlar arasındaki kırılma bölgelerinde yapılan mikroskopik incelemelerde, Kevlar ve Zylon lifi takviyeli kompozitlerde bu takviye liflerinde kırılmaların gerçekleştiği görülmüştür. PEEA film takviyeli kompozit yapılarda ise, katmanlar arasına kaynaşmış polimer tarafından güçlü bir şekilde yapışan lif demetleri görülmüştür (Şekil 2.5).



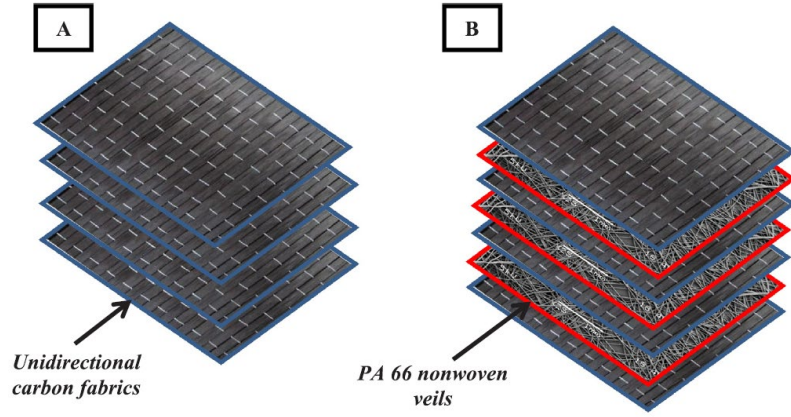
Şekil 2.5. Kompozit yapıların katmanlar arasındaki lif kırılmaları ve lif demetleri (Sohn ve ark., 2000).

Seung ve ark. (2008), karbon nonwoven takviyesi ile hibrit kompozit malzemeler geliştirilmesi ve bu sayede lif esaslı polimerik kompozitlerin mekanik özelliklerinin

iyileştirmesini amaçlamıştır. Hibrit kompozit malzemeler, kompozit yapıda güçlü ara katman oluşturmak için tasarlanmıştır. Unidirectional karbon/epoksi prepreg katmanları arasına yerleştirilen karbon nonwoven katmanların kompozit yapıların boyuna yönde çekme dayanımı ve modülünün nonwoven takviyesiz kompozit yapıdan daha düşükken, enine yönde çekme dayanım ve modülünün ise dağılımın takviyesiz kompozit yapıdan daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Nonwoven takviyeli hibrit kompozit yapıların $\pm 45^\circ$ yöndeki çekme dayanımlarının da, takviyesiz kompozit yapılara kıyasla bir miktar düşük olduğu belirlenmiştir. Ancak, nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların sünekliğini arttırdığı ifade edilmiştir. Ayrıca, nonwoven takviyeli kompozit yapıların çekme test sonuçları incelendiğinde, sapmaların çok daha az olduğu ifade edilmiştir.

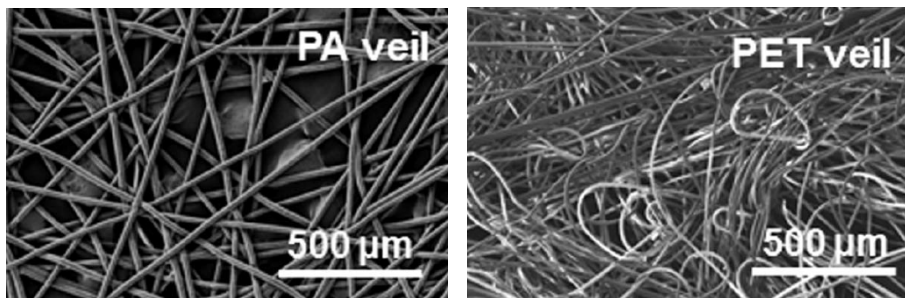
Seung ve ark. (2002), unidirectional karbon/epoksi prepreg katmanları arasına yerleştirilen karbon nonwoven katmanların kompozit yapıların Mod-II katmanlar arası ayrılma özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Uç çentikli eğme (ENF) testi kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, üst kısımda çatlak bulunan nonwoven takviyeli kompozit yapının kırılma tokluğu, takviyesiz kompozit yapıdan yaklaşık %26 daha yüksektir. Nonwoven yapıdaki karbon liflerin köprü oluşturması nedeni ile orta kısımda çatlak ve alt kısımda çatlak ihtiva eden kompozit yapıların ortalama G_{IIC} değerlerinin, takviyesiz kompozit yapıdan sırasıyla yaklaşık %260 ve %205 daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Kompozit yapıların kırılma yüzeyleri ve kesitlerindeki kırılma görüntüleri mikroskopik olarak incelendiğinde, kırılma yüzeyindeki çatlakların boyutu ve aralığının, nonwoven tabakasındaki kısa karbon liflerinin hem uzunluğundan hem de lif hacminden etkilendiği ifade edilmiştir.

Beylergil ve ark. (2018), unidirectional karbon/epoksi kompozit katmanları arasına, kompozit yapıların delaminasyon direncini arttırmak için iki farklı gramajda (17 ve 50 gsm) poliamid-6,6 nonwoven yüzey kullanmıştır (Şekil 2.6). Kompozitlerin başlangıç ve ilerleme Mod-I kırılma tokluğu değerleri referans numune ile karşılaştırıldığında, PA 66-17 gsm nonwoven yapı yerleştirilen kompozit yapılarda sırasıyla %84 ve %171 oranında artış görülmüştür. Katmanlar arası bölgede daha yoğun PA 66-50 gsm nonwoven kullanılması, kırılma tokluğu değerlerinde başlangıç için %349 ve yayılma için %718 daha artış sağlamıştır. PA 66-50 gsm nonwoven yapının kompozit yapıya ilave edilmesi ile ILSS ve Charpy darbe dayanımları, sırasıyla %25 ve %15 artmıştır. PA 66 nonwoven kullanılması daha düşük karbon lif hacim oranı ve artan kalınlık nedeniyle kompozitlerinin düzlemsel mekanik özelliklerini düşürmüştür.



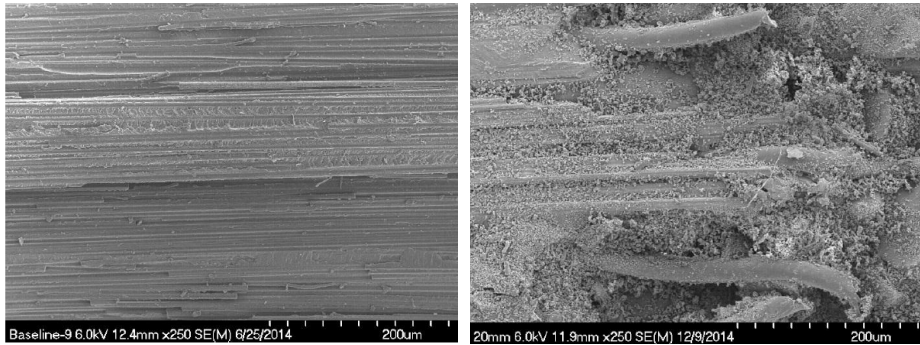
Şekil 2.6. Unidirectional karbon/epoksi kompozitlerin şematik gösterimi, (a); referans numune, (b); katmanları arasına PA nonwoven yerleştirilen yapı (Beylergil ve ark., 2018).

Orozco ve ark. (2017), poliamid (PA) ve polietilen teraftalat (PET) nonwoven yapının cam/vinilester (GE/VE) kompozit yapının tabakalar arasına yerleştirilmesi ile kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (Şekil 2.7). PA nonwoven yapının kompozit yapıya yerleştirilmesi ile artan bir GIC değeri kaydedilirken, PET nonwoven yapının yerleştirildiği kompozit yapılarda önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. SEM ile kompozitleri kırılma yüzeyinin analizi, Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunun arttırılmasında PA nonwoven yerleştirilen kompozit numunelerde, katlar arasında lif köprüsünü ortaya çıkarmıştır. Ayrıca katmanlar arasında bulunan PET nonwoven yapı, delaminasyon sırasında herhangi bir sönümleme göstermemiştir ve dolayısıyla kompozit malzemenin G_{IC} değerini etkilememiştir. PA yerleştirilen kompozit numuneler plastik deformasyon göstermiştir ve kompozitin başlangıç ve ilerleme kırılma tokluğu değerlerinin, nonwoven yerleştirilmeyen kompozitlere göre sırasıyla %59 ve %90'a arttığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre, PA nonwoven yapının GF/VE kompozit malzemenin katmanlar arasına yerleştirilmesiyle hasar dayanımı yüksek kompozit yapılar elde edilebileceği ifade edilmiştir.



Şekil 2.7. Kompozit katmanları arasına yerleştirilen PA ve PET nonwoven yüzey (Orozco ve ark., 2017).

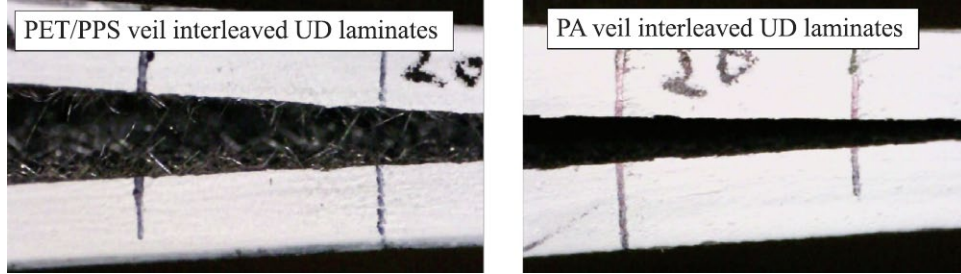
Miller ve ark. (2015), farklı gramajlardaki (15 ve 45 gsm) termoplasik poliüretan nonwoven yüzeyleri karbon/epoksi prepreg katmanları arasına yerleştirilerek kompozit performansını değerlendirilmiştir. Kompozitlerin hem statik testleri yapılmış, hem de balistik darbe hasarına karşı dirençleri belirlenmiştir. Katmanlar arasına nonwoven yüzey yerleştirilmesi, kompozit malzemede kalınlık artışına ve lif miktarlarında düşüşe/boşluk miktarında artışa sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak da, kompozitlerin çekme dayanımları 15 gsm nonwoven takviyeli kompozitlerde %13, 45 gsm nonwoven takviyeli kompozitlerde ise %40 azalma göstermiştir. Ayrıca, kompozit yapı içerisine yerleştirilen termoplastik nonwoven yüzeylerin düşük dayanım özelliği göstermesi, epoksi reçine ile zayıf ıslanma ve karbon lifleri ile zayıf yapışma göstermesi de statik özelliklerinde düşüşe neden olmaktadır. Basma dayanımlarındaki düşüş ise, bunların yanı sıra, lifi çevreleyen polimerik matrisin rijitliğinin ve buna bağlı modül değerlerinin düşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, basma testi sonrasında kompozit yapılarda buckling esaslı bozunma gerçekleşmiştir. Katmanlar arası nonwoven takviyesi, Mod-I tokluğunda %40 oranında bir artış sağlamıştır. Bu artış, nonwoven yapının çatlakların yayılmasında izlediği yolu arttırmamasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, kırılma görüntülerinde nonwoven takviyesiz kompozitlerin gösterdiği pürüzsüz kırılma yüzeyine karşın, nonwoven takviyeli kompozitlerdeki pürüzlü kırılma yüzeyinden anlaşılmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Nonwoven takviyesiz (sol) ve takviyeli /sağ) kompozit yapıların Mod-I kırılma yüzeyleri (Miller ve ark., 2015).

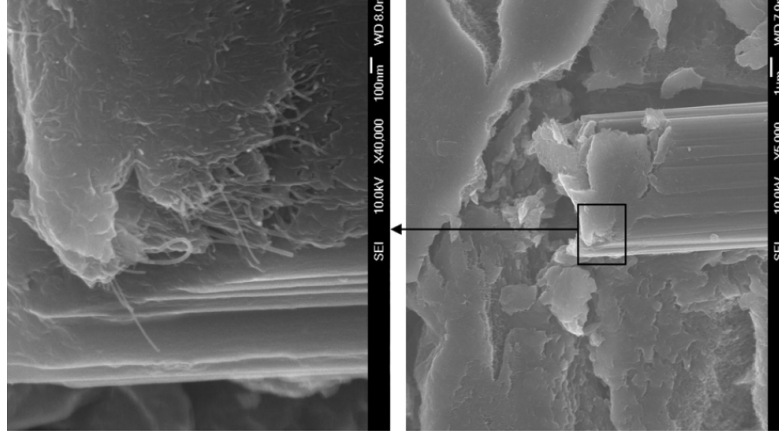
Quan ve ark. (2020), havacılık alanında kullanılan karbon/epoksi kompozitlerin hasar toleransı iyileştirmek için termoplastik nonwoven yapıları ara katmana ilave ederek sonuçları değerlendirmişler. Unidirectional, non-crimp ve saten dokuma karbon/epoksi kompozitlerin katmanları arasına, polietilen-tereftalat (PET), Polifenilen-sülfür (PPS) ve Poliamid 12 (PA) nonwoven yüzeyler yerleştirilmiştir. Laminatların sıcak kürleme işlemi sırasında PET ve PSS yapılar lifli formda kalırken PA yapıların eridiği gözlemlenmiştir.

PA nonwoven yapı, erimesinden dolayı PPS ve PET nonwoven yapılara göre epoksi matrisinin kırılma tokluğunu iyileştirirken, PPS ve PET nonwoven yüzeyler ise katlararası ayrılma dayanımlarını arttırmıştır (Şekil 2.9).



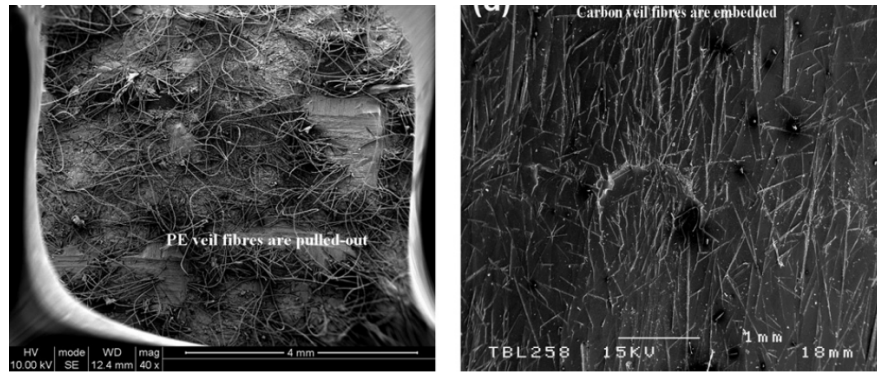
Şekil 2.9. Kompozitlerin katlararası ayrılma görünümüleri (Quan ve ark., 2020).

Lee ve ark. (2012), tek yönde doğrultulanmış $[0]_{24}$ karbon/epoksi prepreg katmanlarının arasına takviye edilmek amacıyla, karbon liflerinden oluşan nonwoven yüzeyi karbon nanotüp (CNT) ile kaplamıştır. CNT ile kaplanan nonwoven yüzey, kompozit katmanları arasına yerleştirilerek kırılma tokluğu davranışları incelenmiştir. Karbon lif takviyeli kom görülmüştür. CNT ile kaplanan nonwoven yüzey takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin Mod-I ve Mod-II katmanlar arası kırılma tokluğu değerlerinde artış belirlenmiştir. CNT ile kaplanmış nonwoven yüzey takviyeli karbon epoksi kompozitlerin GIC değeri, takviyesiz karbon/epoksi kompozitlerden %353 daha yüksektir. CNT kaplanmayan nonwoven yüzey takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin GIC değerinin, takviyesiz karbon/epoksi kompozitlere kıyasla %5 daha düşük GIC değeri sergilediği dikkate alındığında, CNT kaplaması kırılma tokluğu değerinin önemli bir artış gösterdiği belirlenmiştir. CNT ile kaplanan nonwoven yüzey takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin GIIC değeri, takviyesiz karbon/epoksi kompozitlerden %246 daha yüksektir. NWCT numuneleri için ölçülen %194'lük artışa göre önemli bir gelişmedir. Artan GIIC kırılma tokluğu, esas olarak nonwoven yüzeydeki karbon lifi morfolojisi tarafından sağlanan çatlak köprüleme yoluyla elde edilmiştir. CNT ile kaplanmış nonwoven takviyeli numunelerinin GIC değerindeki artış ise, nonwoven lif yüzeylerinin yakınında reçinenin lokal olarak CNT takviyesinden kaynaklanmıştır. Mikroskobik analiz, reçineden NWCT arayüzüne yapışmanın, kısa lif kırılmasının ve kırılma yüzeylerinde CNT sıyrılmasının iyileştiğine dair kanıtlar göstermektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Kırılma yüzeyindeki lif ve CNT kaplama görüntüsü (Lee ve ark., 2012).

Kuwata ve Hogg (2011), karbon/epoksi kompozit katmanları arasına nonwoven takviye ederek Mod-I kırılma tokluğundaki değişimi araştırmışlardır. Unidirectional, saten ve bezayağı dokuma karbon kumaş katları arasına, karbon, polyester ve poliamid nonwoven yüzeyler yerleştirilmiştir. Karbon liflerinden üretilen nonwoven yapı takviye edilen kompozitlerin Mod-I katmanlar arası tokluğu zayıflamıştır. Termoplastik liflerden oluşan nonwoven takviyeli kompozitler ise katmanlar arası kırılma tokluğu artış göstermiştir. Mod-I yükleme koşulları altında yapının tokluğu, katmanlar arasına yerleştirilen lif köprüleme etkilerine bağlıdır ve termoplastik liflerin karbon liflerinden bu anlamda daha etkili olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Kompozitlerin katlararası ayrılma testi sonrası kırılma yüzeyleri (Kuwata ve Hogg, 2011a).

Kuwata ve Hogg (2011), karbon/epoksi ve karbon/vinilester kompozit katmanları arasına nonwoven takviye ederek Mod-II kırılma tokluğundaki değişimi araştırmışlardır. Unidirectional, saten ve bezayağı dokuma karbon kumaş katları arasına, karbon, polyester, poliamid ve karbon/polyester hibrit nonwoven yüzeyler yerleştirilmiştir. En zayıf Mod-II

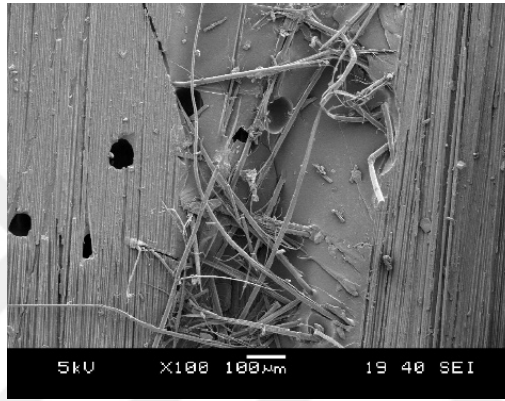
kırılma tokluğu karbon nonwoven takviyeli kompozitlerde görülmüştür. Mod-II yüklemesindeki tokluk mekanizmasının, Mod-I’de test edildiğinde gözlemlenenenden daha karışık ve lif köprülemeyle alakalı olmayıp reçinenin özelliklerinden daha fazla etkilendiği ifade edilmiştir (Kuwata ve Hogg, 2011b).

Hamer ve ark. (2011), elektrospun nanofibril Nylon 66 ve spunbond Nylon 66 nonwoven yapıların, karbon/epoksi kompozitlerin ara katmanlarına takviyesi ile Mod-I kırılma toklukları incelenmiştir. Karbon/epoksi kompozit yapıya elektrospun nanofibril takviyesi ile Mod-I kırılma tokluğu değerinde, takviyesiz kompozit yapı ile karşılaştırıldığında 3 kat artış görülmüştür. Elektrospun nanofibril takviyesi ile termoplastik nanolifler tarafından köprüleme yapılarak enerjini dağıtılması söz konusuysa, spunbond nonwoven takviyesinde ise çatlak ucunun yakınında bir plastik bölgenin oluşturulmasına bağlı olarak kırılma tokluğunda artış meydana geldiği belirtilmiştir.

Gheryani ve ark. (2019), kompozit yapının ara katmanlarına yüksek tokluk sağlayan polyester nonwoven yapı eklemiştir. Karbon/epoksi kompozitler, el yatırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Polyester nonwoven yapının Mod-I katmanlar arası kırılma tokluğunu önemli ölçüde arttırdığını ve yayılma sırasında emilen enerjiyi arttırdığı görülmüştür. Darbe testinde, takviyesiz kompozit numunelerin hasar alanının, polyester nonwoven takviyeli kompozit numunelere göre daha büyük olduğu belirtilmiştir.

Fitzmaurice ve ark. (2016), cam elyaf takviyeli polyester reçine ile üretilen kompozitlerinin katmanlar arası kırılma tokluğunu arttırmak için PET nonwoven yapı yerleştirmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit numunelere, %7’lik oranda nonwoven yapısı eklenerek el yatırma yöntemiyle üretilmiştir. PET nonwoven yapılarının, kompozit ara katmanlarına eklenmesiyle katlararası ayrılma dayanımı, eğme dayanımı, eğme modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve Mod-I katmanlar arası kırılma tokluğu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. PET liflerinin polyester reçine ile bağlanmasının, tabakalar arası çatlak ilerlemesi sırasında enerji absorpsiyonunu kontrol eden önemli bir faktör olduğu görülmüştür. PET/reçine yapışma özellikleri gelişmiş olsa da, alternatif bir çatlak ilerleme yolu sağlayan daha zayıf cam/reçine arayüzü nedeniyle kırılma tokluğundaki artış beklendiği kadar fazla olmamıştır. Diğer tüm özelliklerin gelişmesi ile birlikte, nonwoven takviyesiyle eğme modülü ve camsı geçiş sıcaklığında düşüşe neden olmuştur.

Beylergil ve ark. (2019), karbon/epoksi kompozitlere, Mod-I kırılma tokluklarını iyileştirmek için yoğunluğu 8,5 g/m² olan aramid nonwoven takviyesi yapmıştır. Takviyesiz ve aramid takviyeli kompozitler VARTM üretim yöntemiyle üretilmiştir. Mod-I kırılma tokluğunda, aramid nonwoven takviyeli kompozitlerde yaklaşık %72 artış görülmüştür. Katlararası ayrılma dayanımı ve Charpy darbe dayanımının, aramid takviyeli kompozitlerde sırasıyla %10 ve %16,5 artmıştır. Karbon esaslı kompozit yapılara aramid takviyesinden dolayı artan kompozit kalınlığı, düşen karbon lif miktarı ve artan boşluk miktarından dolayı (Şekil 2.12), çekme, basma ve eğme dayanımı gibi düzlemsel özelliklerde düşüş görülmüştür.



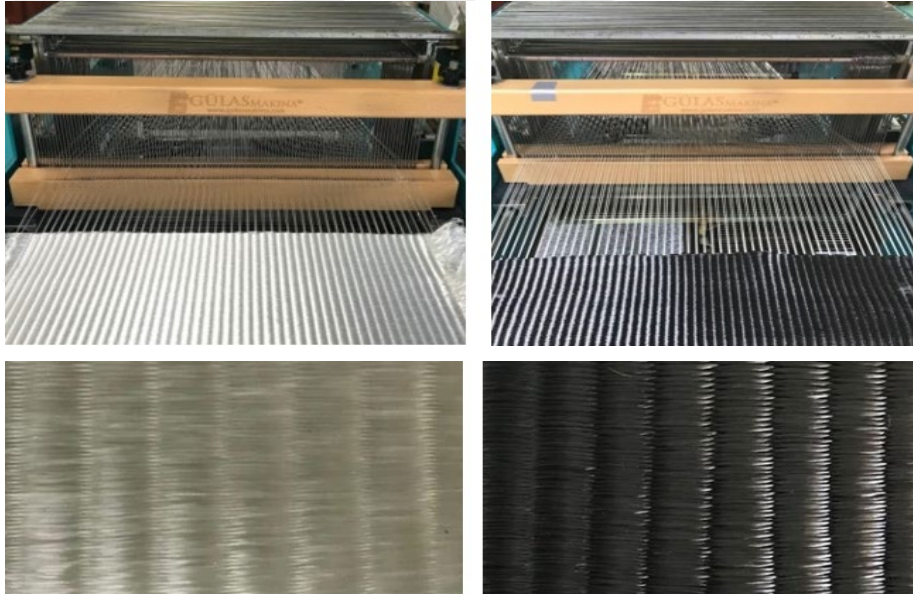
Şekil 2.12. Aramid nonwoven takviyeli kompozit yapılarda boşluk oluşumu (Beylergil ve ark., 2019).

O'Donovan ve ark. (2015), cam elyaf takviyeli polyester reçine ile üretilmiş kompozitlerin katmanlar arası tokluğunu arttırmak için Nylon 66 nonwoven yapılar ile takviye etmiştir. Kompozit yapıların katları arasına yerleştirilen Nylon 66 nonwoven miktarı ağırlıkça %0 ve %4 arasında değişmiştir. Nonwoven takviyesi, kompozitlerin katmanlar arası tokluğunu iyileştirmiştir. Nonwoven takviyeli kompozit yapının GIC değeri neredeyse %170 artmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Hibrit Preformların Üretimi

Hibrit preformlarda, çözgü ipliği olarak BCF (Bulk Continuous Filament) polipropilen (150 tex, Eruslu Tekstil, Türkiye), atkı ipliği olarak ise E-cam (410 tex, Cam Elyaf, Türkiye) ve Karbon (3K, Aksa, Türkiye) lifleri kullanılmıştır. Preformlar, manuel dokuma tezgâhında (GARM-55, Gülas Makine, Türkiye) bezayağı örgüde dokunmuştur. Çözgü sıklığının, atkı sıklığına göre oldukça düşük kullanılması sayesinde, yüksek performanslı cam ve karbon liflerinin düşük krimple tek yönde doğrultulanması sağlanmıştır. Dokuma prosesinde, cam/PP yapıda her ağızlık açıldığında 2 adet cam ve karbon/PP yapıda her ağızlık açıldığında 4 adet karbon iplik atılmıştır. Şekil 3.1’de, cam/PP ve karbon/PP hibrit preformların dokunması esnasındaki görüntüler verilmiştir.

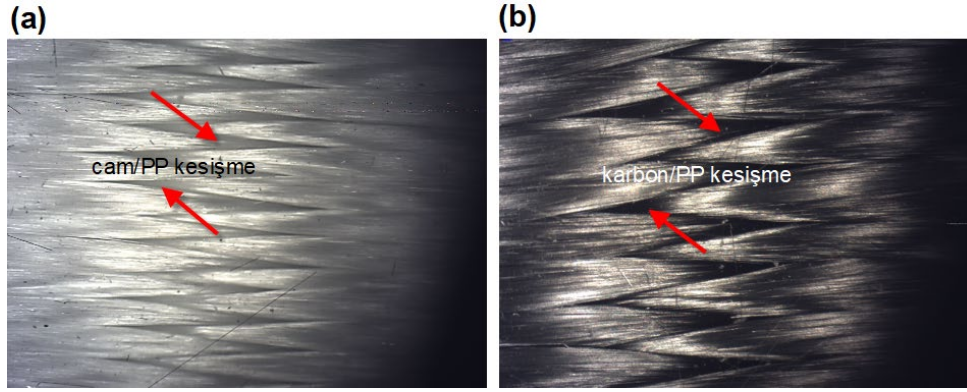


Şekil 3.1. Cam/PP ve karbon/PP hibrit preformların dokunması.

Çizelge 3.1’de, cam/PP ve karbon/PP hibrit preformların konstrüksiyon özellikleri verilmiştir. Şekil 3.2’de ise cam/PP ve karbon/PP hibrit preformlarda çözgü ve atkı ipliklerinin kesişme bölgeleri mikroskopik görüntüler ile sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Hibrit preformların konstrüksiyon özellikleri.

Preform tipi	Örgü	İplik setleri		İplik dayanımı (cN/tex)		Lif çapı (µm)	
		Çözgü	Atkı	Cam	Karbon	Cam	Karbon
Cam/PP	Bezayağı	PP	2 Cam	15,54	33,63	15,83	28,60
Karbon/PP	Bezayağı	PP	4 Karbon	(±1,28)	(±1,25)	(±0,89)	(±1,10)



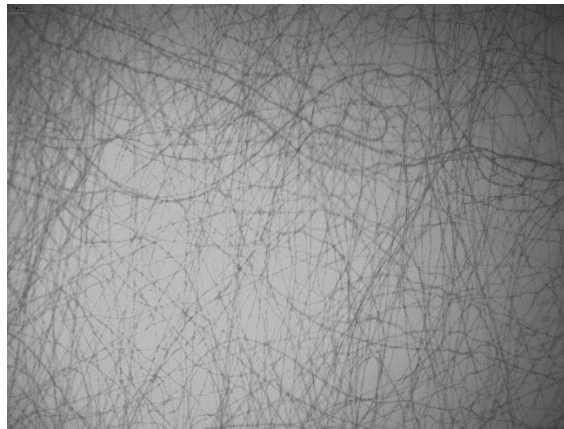
Şekil 3.2. Hibrit preformlarda çözgü ve atkı ipliklerinin kesişme bölgeleri, (a); Cam/PP, (b); Karbon/PP ($\times 1,5$ büyütme oranı).

3.2. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretilmesi

Kompozit üretiminde, kumaş katman sayısı hem takviyesiz hem de dokusuz yüzey takviyeli yapılarda 3 kat olarak belirlenmiştir. Serim işlemi, $[0^\circ]_3$ oryantasyonunda gerçekleştirilmiştir. Nonwoven takviyesi, 1.-2. ve 2.-3. arasına katmanlar arasına 1'er kat olacak biçimde yapılmıştır. Katmanlar arası takviye amacıyla kullanılan nonwoven yüzeyin yapısal özellikleri ve mikroskopik görüntüsü sırasıyla, Çizelge 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Katmanlar arası takviye için kullanılan nonwoven kumaşın yapısal özellikleri.

Nonwoven yüzey	Lif tipi	Kalınlık (mm)	Gramaj (g/m^2)
Meltblown	Polipropilen	0,10	10,41



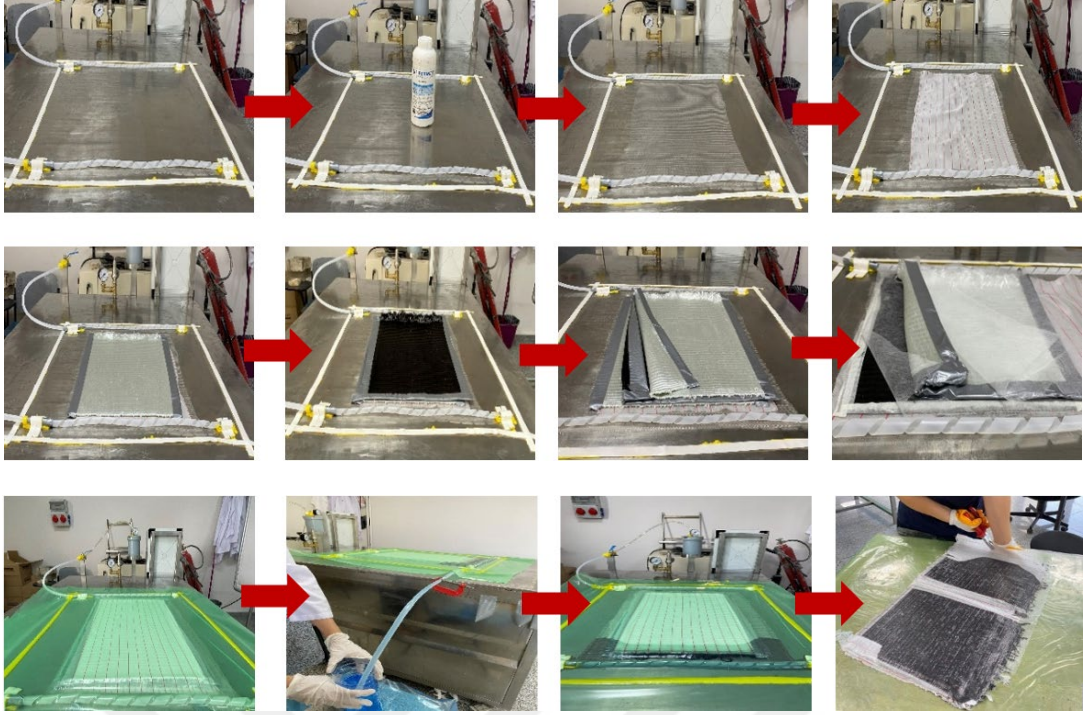
Şekil 3.3. Katmanlar arası takviye için kullanılan nonwoven kumaşın mikroskopik görüntüsü ($\times 1,5$ büyütme oranı).

Çizelge 3.3'te, üretilen kompozit yapılar tanımlanmıştır. Bu tanımlamada, G: cam/PP kumaşı, C: karbon/PP kumaşı, W: nonwoven takviyesini ifade etmektedir. Kompozit üretimi, epoksi reçine (Hexion MGS L160 reçine/Hexion MGS H160 sertleştirici, 100/25) ile vakum infüzyon metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Kompozit yapıların kürleşme işlemi 80°C'de 1 saat yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Kompozitlerin tanımlanması.

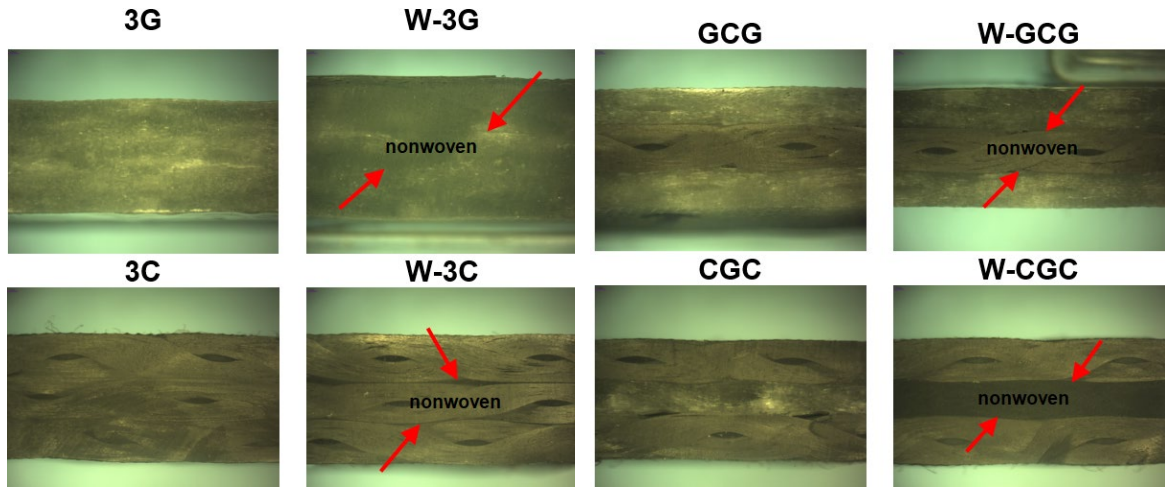
Kod	Oryantasyon/ Kat sayısı	Kat dizilimi	Nonwoven takviyesi	Şematik gösterim
3G	[0°] ₃	1.Cam/2.Cam/3.Cam	-	
3C	[0°] ₃	1.Karbon/2.Karbon/3.Karbon	-	
GCG	[0°] ₃	1.Cam/2.Karbon/3.Cam	-	
CGC	[0°] ₃	1.Karbon/2.Cam/3.Karbon	-	
W-3G	[0°] ₃	1.Cam/2.Cam/3.Cam	+	
W-3C	[0°] ₃	1.Karbon/2.Karbon/3.Karbon	+	
W-GCG	[0°] ₃	1.Cam/2.Karbon/3.Cam	+	
W-CGC	[0°] ₃	1.Karbon/2.Cam/3.Karbon	+	

Kompozit yapıların vakum infüzyon metoduna göre üretim aşamaları Şekil 3.4'te verilmiştir. Buna göre; aseton ile temizlenen metal masa üzerine kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Vakum hortumu, spiral hortum ve sızdırmazlık bandı belirlenen alan etrafına yerleştirilmiştir. Daha sonra sırasıyla, infüzyon filesi ve soyma kumaş yerleştirilmiştir. Soyma kumaşın üzerine üretilen kumaşların ilk katı yerleştirilip, ardından nonwoven yüzey takviyesi olan numunelerde 1.-2. katın arasına ve 2.-3. katın arasına nonwoven serilmiştir. Numunedeki kumaş katları tanımlanan kodlara göre yerleştirildikten sonra vakum poşeti sızdırmazlık bandı ile metal masaya hava kaçağı olmayacak şekilde sabitlenmiştir. Vakum masasının vanaları açılıp, içerisinde hava kaçağı olmadığından emin olduktan sonra epoksi reçine ve sertleştirici tartılıp homojen şekilde karıştırıldıktan sonra vakum hortumu ile reçine girişi sağlanmıştır. Kürleşme tamamlandıktan sonra kompozit yapı vakum masasından çıkartılarak soyma kumaşı sayesinde çıkartılmıştır.



Şekil 3.4. Kompozit yapıların vakum infüzyon metoduna göre üretim aşamaları.

Şekil 3.5'te, kompozit yapıların kesit görüntüleri verilmiştir. Çözümlü kesitlerinde, cam ve karbon liflerinin PP lifleriyle yaptığı kesişmeler ve nonwoven takviyesi görülmektedir.



Şekil 3.5. Kompozit yapıların kesit görüntüleri.

3.3. Hibrit Preformlara Uygulanan Testler

Çizelge 3.4'te, hibrit preformlara uygulanan testler ve kullanılan test standartları verilmiştir.

Çizelge 3.4. Hibrit preformlara uygulanan testler ve kullanılan test standartları.

No	Uygulanan test	Test standardı
1	Kalınlık	ISO 5084
2	Gramaj	ISO 6348
3	Sıklık	TS 250 EN 1049-2
4	Krimp	ISO 7211-3
5	Lif miktarı	-

3.3.1. Kalınlık

Hibrit preformların kalınlık değeri, SDL Atlas, J200 kalınlık ölçer kullanılarak, ISO 5084 test standardına göre yapılmıştır. Kalınlık ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

3.3.2. Gramaj

Hibrit preformların gramaj değeri, hassas terazi (Denver Instrument, Almanya) kullanılarak ISO 6348 test standardına göre gerçekleştirilmiştir. Gramaj ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

3.3.3. Sıklık

Hibrit preformların çözgü ve atkı yönündeki sıklık ölçümleri, TS 250 EN 1049-2 test standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sıklık ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

3.3.4. Krimp

Hibrit preformların çözgü ve atkı yönündeki krimp değeri, ISO 7211-3 test standardı kullanılarak belirlenmiştir. Kalınlık ölçümleri, 10'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

3.3.5. Lif Miktarı

Hibrit preformların ağırlıkça lif miktarları, birim alan ağırlığının ölçümü ve ardından preformu oluşturan PP ve cam/karbon liflerinin yapıdan sökülerek ayrı ayrı tartımının sağlanması yoluyla ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri hassas terazi (Denver Instrument,

Almanya) ile gerçekleştirilmiş ve ölçüm sonuçlarına göre her bir lifin preformdaki ağırlıkça oranı (%) hesaplanmıştır.

3.4. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlere Uygulanan Testler

Çizelge 3.5'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlere uygulanan testler ve kullanılan test standartları verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kompozit yapılara uygulanan testler ve kullanılan test standartları.

No	Uygulanan test	Test standardı
1	Kompozit kalınlığı	-
2	Kompozit yoğunluğu	ASTM D792-13
3	Kompozit lif miktarı tayini	ASTM D3171-15
4	Eğme testi	ASTM D790-17
5	Charpy darbe testi	ISO 180:2000
6	Düşen ağırlık darbe testi	Prichard ve Hogg (1990)
7	Basma ve CAI testleri	Prichard ve Hogg (1990)
8	Ultrasonik C-Scan	-
9	Mikroskopik Analiz	-

3.4.1. Kompozit Kalınlığı

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin kalınlık ölçümleri, dijital kumpas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalınlık ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.

3.4.2. Kompozit Yoğunluğu

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin yoğunluk ölçümleri ASTM D792-13 test standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Precisa® XP205 model yoğunluk ölçer cihazında numunelerin önce havada sonra da sudaki ağırlığı oda sıcaklığında ölçülerek yoğunlukları belirlenmiştir. Şekil 3.6'da yoğunluk ölçer cihazında yoğunluk ölçümü verilmiştir. Yoğunluk ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.6. Yoğunluk ölçer cihazında kompozit yoğunluğu ölçümü.

3.4.3. Kompozit Lif Miktarı

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin lif miktarı tayini kül fırını (Protherm Furnaces) kullanılarak ASTM D3171-15 test standardına göre yapılmıştır. Numuneler, kodlandırılan seramik krezeler içerisine koyularak kül fırınına yerleştirilmiştir. Kül fırınında 600°C’de 60 dak. işlem gördükten sonra kül fırınının kapağı açılmadan 24 saat boyunca numuneler fırın içerisinde bekletilmiştir. Şekil 3.7’de kül fırınına yerleştirilen numuneler ve işlem sonrası numune görüntüleri gösterilmiştir. Lif tayini, 3’er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir.



Şekil 3.7. Kül fırınında lif miktarı tayini.

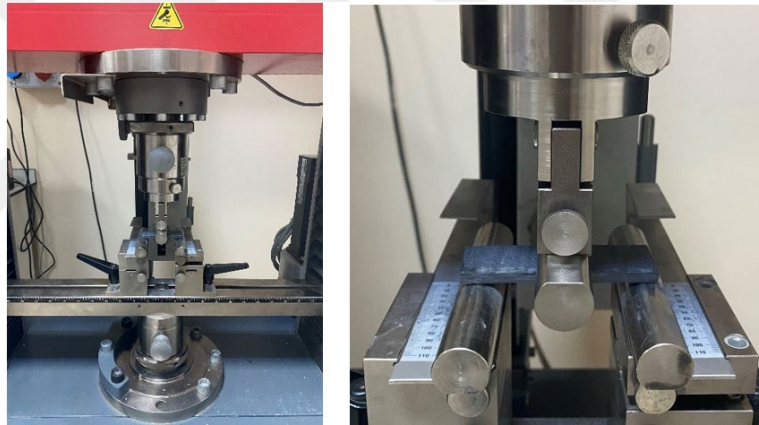
Isıl bozunma ile reçinenin uzaklaşması sonrası kalan lif miktarları tartılmıştır. Hibrit numunelerde karbon ve cam lifleri ayrı ayrı saat camında tartılarak lif miktarı hesaplanmıştır. Lif miktarı tayini ağırlık esaslı olarak aşağıda verilen formül (3.1) kullanılarak yapılmıştır.

$$\% \text{ Ağırlık Esaslı Lif Hacmi} = (W / w) \times 100 \quad (3.1)$$

Burada; W : Lif ağırlığı (g), w : Kompozit ağırlığı (g).

3.4.4. Eğme testi

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testleri, ASTM D790-17 test standardına uygun olarak 3-nokta eğme test prensibine göre Zwick-Roell test cihazında yapılmıştır. Test hızı 6 mm/dak. olarak belirlenmiştir. Destek mesafesi ise 50 mm olarak ayarlanmıştır. Numune boyutları 25 × 80 mm olarak kesilmiştir. Her tip numunenin kalınlığı ve eni farklı bölgelerden 3'er tekrarlı olarak ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Eğme testi, kompozit yapıların hem çözgü ve atkı yönünün normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Eğme testleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir. Şekil 3.8'de, kompozit yapıların eğme testi görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Kompozit yapıların eğme testi görüntüleri.

ASTM D790-90 test standardında belirtilen formüller kullanılarak, eğme dayanımı (3.2), eğme modülü (3.3) ve uzama (3.4) değerleri hesaplanmıştır.

$$S = 3PL / 2bd^2 \quad (3.2)$$

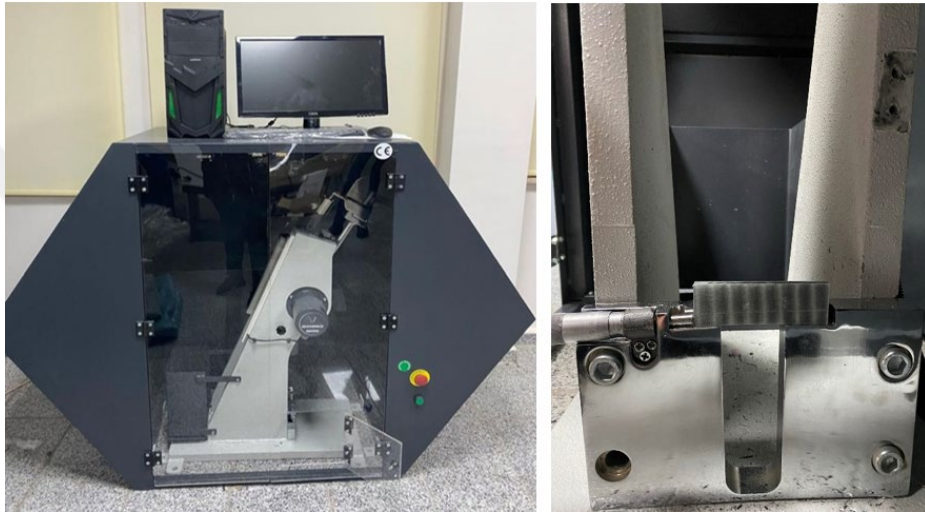
$$E = L^3 m / 4bd^3 \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = 6Dd / L^2 \quad (3.4)$$

Burada; S : eğme dayanımı (N/m²), P : yük (N), L : destek mesafesi (m), b : numune eni (m), d : numune kalınlığı (m), E : eğilme modülü (N/m²), m : yük-uzama eğrisinin eğimi (N/m), ε : deformasyon (mm/mm), D : numunenin merkezindeki maksimum deformasyon (mm).

3.4.5. Charpy darbe testi

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testleri, Microanaliz Charpy darbe test cihazı kullanılarak ISO 180:2000 standardına uygun olarak yapılmıştır. Numune boyutları 25 × 80 mm olarak kesilmiştir. Charpy darbe testi, kompozit yapıların hem çözgü (uzun kenar çözgü) ve atkı (uzun kenarı atkı) yönüne uygulanmıştır. Charpy darbe testleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmış ve sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak belirtilmiştir. Şekil 3.9'da, kompozit yapıların charpy darbe testi görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.9. Kompozit yapıların charpy darbe testi görüntüleri.

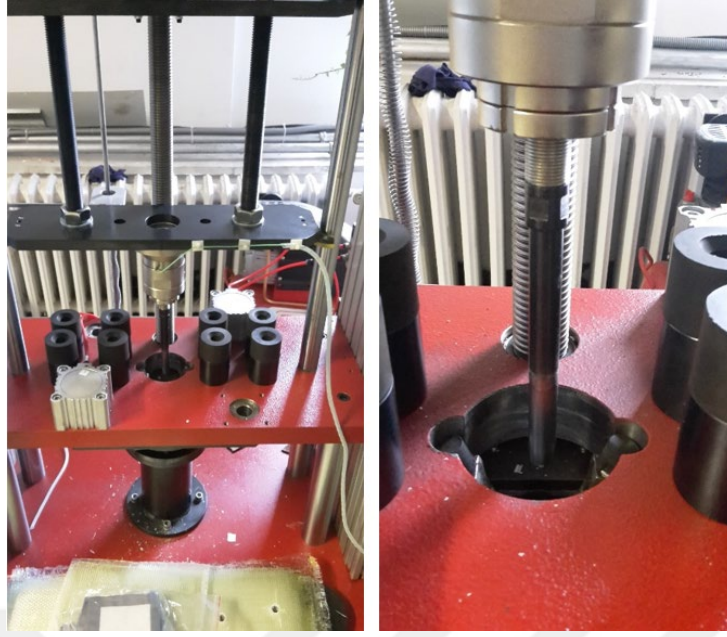
Charpy darbe dayanımı değerleri, ISO 180:2000 test standardında belirtilen formül (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$A = \frac{Ec}{h.b} \times 10^3 \quad (3.5)$$

Burada; A : Charpy darbe dayanımı (kJ/m^2), E_c : numunenin kırılması esnasında absorplanan enerji (J), h : numune kalınlığı (mm), b : numune eni (m).

3.4.6. Düşen ağırlık darbe testi

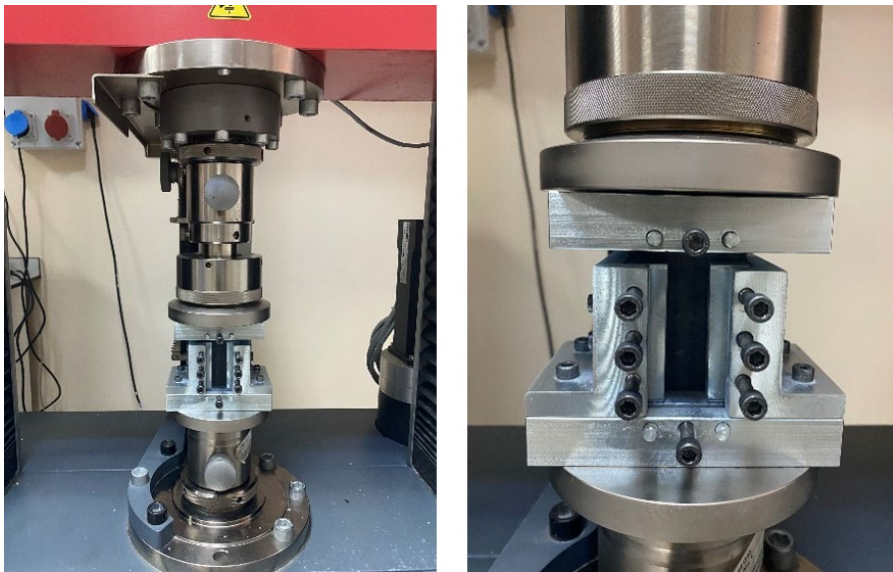
Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi, Prichard ve Hogg (1990) test metodolojisine göre 50 J enerji seviyesinde her numune tipi için 3'er tekrarlı yapılmıştır. BESMAK test cihazında gerçekleştirilen testlerde, 16 mm çapındaki yarı-küresel uç geometrisindeki vurma ucu kullanılmıştır. Numune boyutları 55 × 89 mm (uzun kenarı çözgü) olarak kesilmiştir. Şekil 3.10'da düşen ağırlık darbe test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Düşen ağırlık darbe test cihazı.

3.4.7. Basma ve Darbe Sonrası Basma (CAI) Testleri

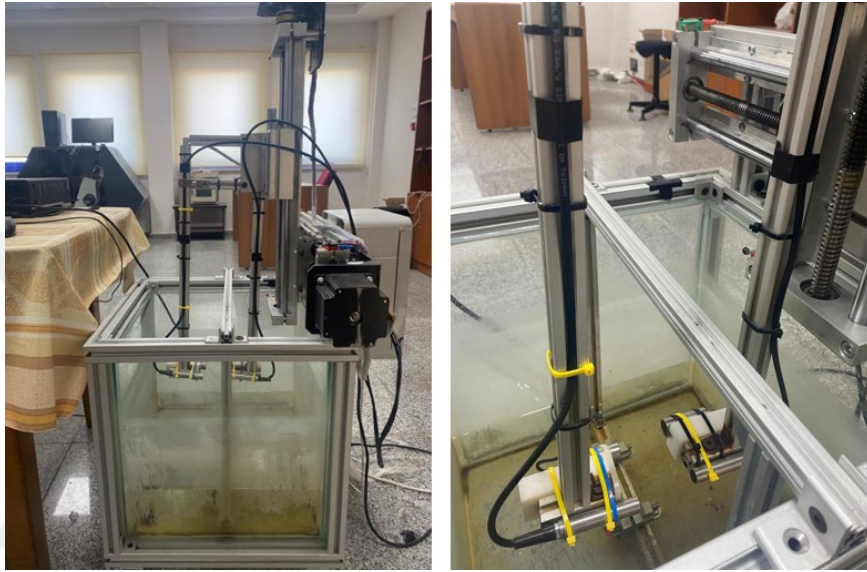
Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve darbe sonrası basma dayanımı testleri, Prichard ve Hogg (1990) test metodolojisine uygun olarak Zwick-Roell test cihazında yapılmıştır. Numune boyutları 55×89 mm (uzun kenarı çözüğü) olarak kesilmiştir. Basma testi, düşen ağırlık darbe testi uygulanmamış numunelere, darbe sonrası basma dayanımı testi ise 50J enerji seviyesinde düşen ağırlık basma testine maruz kalan numunelere 3'er tekrarlı olarak uygulanmıştır. Şekil 3.11'de, kompozit yapıların basma ve CAI testi görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Kompozit yapıların basma ve CAI testi görüntüleri.

3.4.8. Tahribatsız Muayene (Ultrasonik C-Scan)

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin hasar analizi, 50J enerji seviyesinde düşen ağırlık darbe yüküne maruz kaldıktan sonra ultrasonik C-Scan yöntemi ile yapılmıştır. Tahribatsız muayenede, 1 MHz frekansa sahip prob çifti ile through transmission (TTU) yöntemine göre US100 daldırma tipi ultrasonik görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Ultrasonik C-Scan görüntüleri üzerinden bozunma alanı ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.12’de ultrasonik C-Scan cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.12. Ultrasonik C-Scan cihazının görüntüsü.

3.4.9. Mikroskobik Analiz

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin test öncesi ve test sonrası görüntüleri, optik mikroskop ve görüntü işleme yazılımı (Bs200DOC, Türkiye) kullanılarak incelenmiştir. Mikroskobik görüntüler, eğme testi sonrasında test numunelerin yüzey ve her iki (sağ ve sol) kesitinden, Charpy testi sonrası numune kesitinden, CAI testi sonrası ise kesitteki kırılma bölgesinden alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Hibrit Preformların Özellikleri

Hibrit preformların özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Buna göre, cam/PP ve karbon/PP preformların çözgü sıklıkları aynı olmakla birlikte, karbon/PP yapının atkı (karbon) sıklığının cam/PP yapının atkı sıklığından (cam) daha yüksektir. Bunun nedeni, atkı ipliği olarak kullanılan karbon lifinin iplik lineer yoğunluğunun, cam lifinden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Buna bağlı olarak, cam/PP hibrit preformun gramajının, karbon/PP hibrit preformdan daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki hibrit preformun da düşük çözgü sıklığından dolayı, PP lif miktarı oldukça düşüktür. Bu durum, yapıda çözgü yönü boyunca oluklu bir görünüm ortaya çıkararak, düşük atkı krimpine ulaşılmasını sağlamış ve yüksek performanslı cam/karbon liflerinin tek yönde doğrultulanması mümkün olmuştur (Dinçer ve Kaya, 2021).

Çizelge 4.1. Hibrit preformların özellikleri.

Preform tipi	Sıklık (tel/cm)		Krimp (%)		Gramaj (g/m ²)	Kalınlık	Lif miktarı (ağırlıkça, %)	
	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı			Cam Karbon	PP
Cam/PP	2	15 × 2= 30	2,71	1,31	5600	2,61	96	4
Karbon/PP	2	21 × 4= 84	2,68	2,38	3800	2,48	96,5	3,5

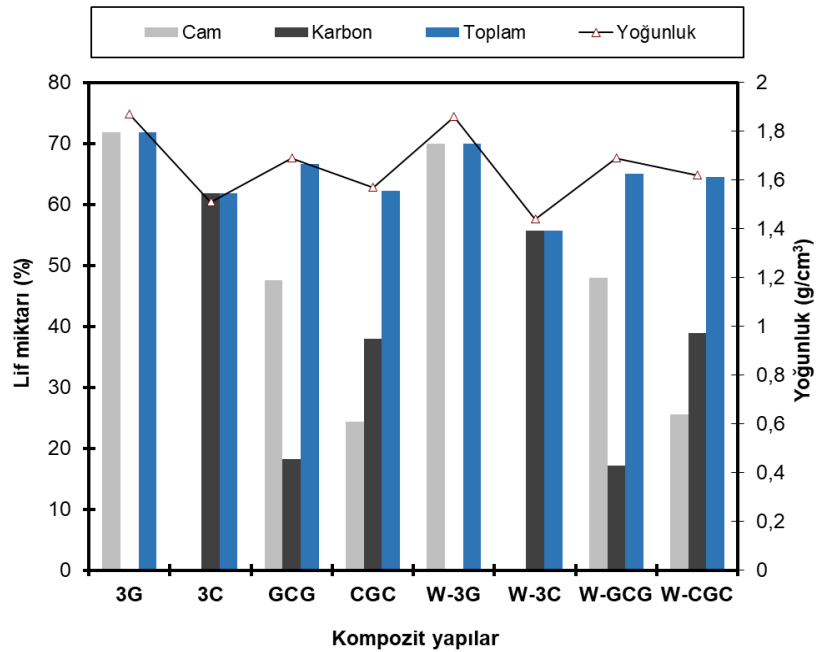
4.2. Katmanlar Arası Dokusuz Yüzey Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Özellikleri

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin kalınlık, yoğunluk ve lif miktarı (ağırlıkça, %) sonuçları verilmiştir. Lif miktarları, yalnızca yüksek performanslı cam ve karbon lifleri için hesaplanmış, PP çözgü ipliği ve PP nonwoven yapılar kompozit yapının ağırlıkça çok düşük bir kısmını oluşturduğundan bu yapılara ait lif miktarları belirtilmemiştir. Kompozit kalınlıkları 6,89 mm ile 8,99 mm arasındadır. Kompozit yoğunlukları ise 1,44 g/cm³ ile 1,87 g/cm³ arasında değişmektedir. 3G kompozit yapıda kullanılan cam lifinin yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı, en yüksek yoğunluk değeri de 3G kompozit yapıda görülmüştür. Kompozit yapılarıdaki cam lifi miktarı arttıkça, cam lifinin karbon lifine kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı, kompozit yapıların da yoğunluk değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Lif miktarı değerleri incelendiğinde, genel olarak tüm kompozit yapıların lif miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. 3G kompozit yapının lif miktarı

değerinin 3C kompozit yapıdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, cam/PP preformlarda kullanılan iplik lineer yoğunluğunun, karbon/PP preformlarda kullanılan iplik lineer yoğunluğundan daha yüksek olmasıdır. Hibrit kompozitlerde ise beklenildiği gibi, cam/PP preform katmanlarının daha fazla kullanıldığı kompozit yapılarda cam lifi miktarı karbon lifi miktarından daha yüksek belirlenmiştir. Benzer biçimde, karbon/PP preform katmanlarının daha fazla kullanıldığı kompozit yapılarda karbon lifi miktarı cam lifi miktarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, cam/PP preform katmanlarının daha fazla kullanıldığı yapılarda toplam lif miktarının da daha fazla olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin özellikleri.

Kod	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Lif miktarı (ağırlıkça, %)		
			Cam	Karbon	Toplam
3G	6,89	1,87	71,90	-	71,90
3C	8,28	1,51	-	61,78	61,78
GCG	7,35	1,69	47,60	18,19	66,59
CGC	7,77	1,57	24,39	37,94	62,30
W-3G	8,04	1,86	70,01	-	70,01
W-3C	8,99	1,44	-	55,67	55,67
W-GCG	7,32	1,69	47,91	17,14	65,05
W-CGC	8,26	1,62	25,55	38,93	64,48



Şekil 4.1. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin lif miktarı ve yoğunluk sonuçları.

4.3. Kompozit Yapıların Eğme Testi Sonuçları

Çizelge 4.3'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Buna göre, hem takviyesiz hem de nonwoven takviyeli kompozit yapıların atkı yönü eğme dayanımları, çözgü yönüne kıyasla çok daha yüksektir. Bunun nedeni, çözgü yönünde PP, atkı yönünde ise yüksek performanslı cam ve karbon liflerinin kullanılmasıdır. Atkı yönü eğme testinde, nonwoven takviyeli/takviyesiz hibrit olmayan cam (3G ve W-3G) ve dış yüzeyde cam preformların kullanıldığı hibrit (GCG ve W-GCG) kompozitlerin eğme dayanımlarının, karbon kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Cam liflerinin, karbon liflerine kıyasla daha yüksek lineer yoğunluk ve buna bağlı olarak daha yüksek lif miktarında kullanılması ve yapıdaki hem PP çözgü ipliği hem de PP nonwoven ile yapışma özelliklerinin daha iyi olmasından dolayı, atkı yönünde doğrultulanmış karbon liflerinin eğme yüküne karşı dayanımları, cam liflerine kıyasla daha düşüktür. Ancak, hibrit karbon kompozitlerin (CGC ve W-CGC) eğme modülleri ise, hibrit cam kompozitlere (GCG ve W-GCG) kıyasla daha yüksektir.

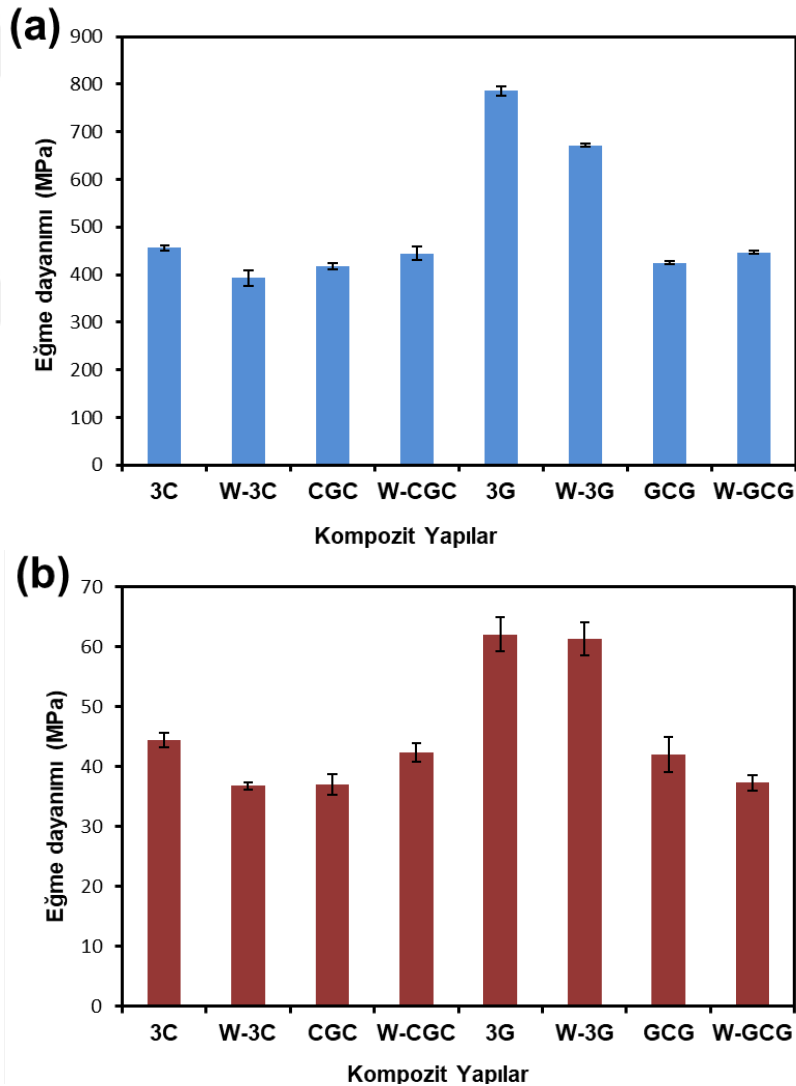
Çizelge 4.3. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonuçları.

Test yönü	Kod	Eğme dayanımı (MPa)	Eğme modülü (GPa)	Deformasyon (%)
Atkı	3C	456,13 ($\pm 5,19$)	12,88 ($\pm 0,63$)	3,05 ($\pm 0,03$)
	W-3C	392,72 ($\pm 16,77$)	12,35 ($\pm 1,78$)	3,86 ($\pm 0,25$)
	CGC	417,37 ($\pm 6,70$)	11,42 ($\pm 0,65$)	3,55 ($\pm 0,62$)
	W-CGC	444,34 ($\pm 13,81$)	11,64 ($\pm 0,04$)	3,60 ($\pm 0,02$)
	3G	785,92 ($\pm 9,76$)	35,17 ($\pm 1,94$)	1,90 ($\pm 0,11$)
	W-3G	672,01 ($\pm 3,19$)	23,36 ($\pm 1,79$)	2,43 ($\pm 0,29$)
	GCG	424,88 ($\pm 2,54$)	8,72 ($\pm 0,57$)	4,37 ($\pm 0,47$)
	W-GCG	447,03 ($\pm 3,77$)	7,50 ($\pm 0,35$)	5,03 ($\pm 0,45$)
Çözgü	3C	44,41 ($\pm 1,23$)	1,51 ($\pm 0,06$)	2,19 ($\pm 0,39$)
	W-3C	36,76 ($\pm 0,61$)	0,84 ($\pm 0,06$)	2,54 ($\pm 0,71$)
	CGC	37,01 ($\pm 1,74$)	1,18 ($\pm 0,09$)	1,90 ($\pm 0,06$)
	W-CGC	42,36 ($\pm 1,51$)	1,19 ($\pm 0,02$)	2,08 ($\pm 0,12$)
	3G	62,07 ($\pm 2,83$)	8,51 ($\pm 0,48$)	0,59 ($\pm 0,14$)
	W-3G	61,32 ($\pm 2,72$)	7,45 ($\pm 0,92$)	0,70 ($\pm 0,06$)
	GCG	41,95 ($\pm 2,89$)	2,22 ($\pm 0,05$)	1,66 ($\pm 0,21$)
	W-GCG	37,26 ($\pm 1,33$)	1,46 ($\pm 0,07$)	1,43 ($\pm 0,09$)

Nonwoven takviyesi, tüm kompozit yapıların eğme dayanım ve modüllerinde düşüşe sebep olurken, uzama özelliklerini arttırarak yapıyı daha sünek hale getirmiştir (Seung ve

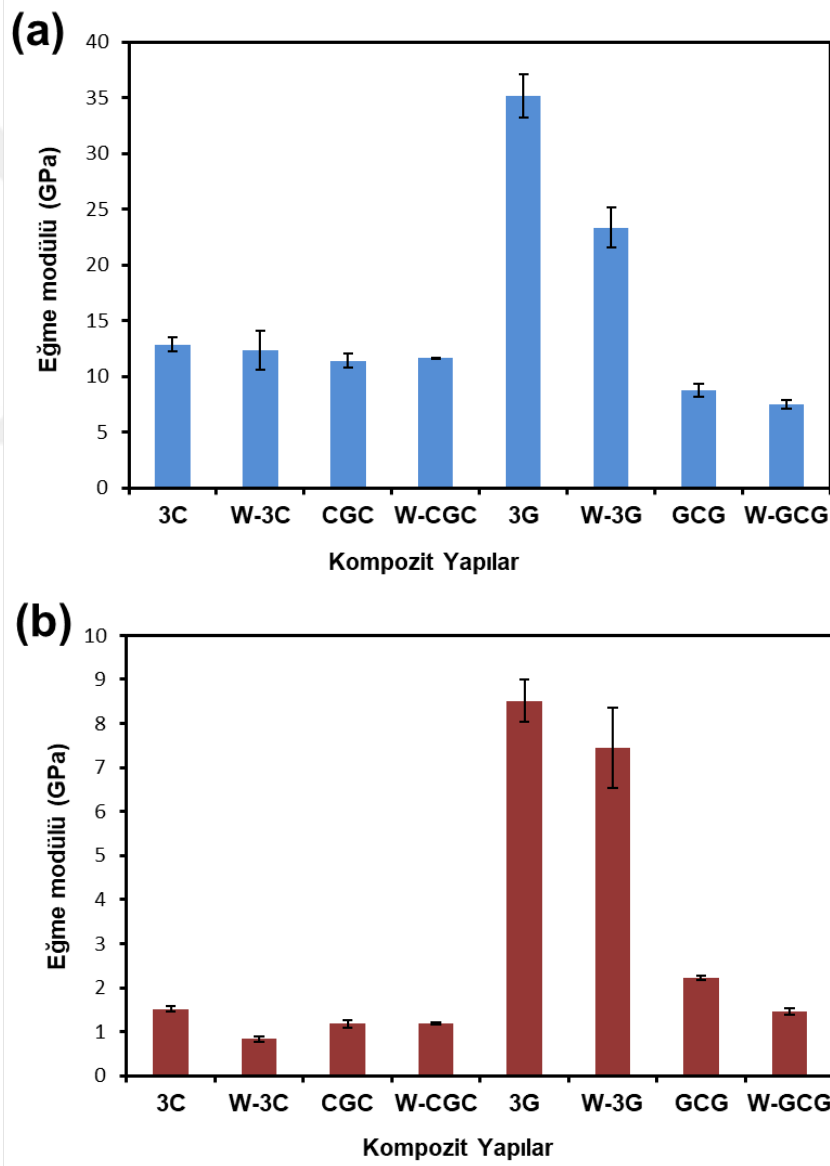
ark., 2008). Kompozit katmanları arasında kullanılan termoplastik nonwoven yüzeylerden dolayı, artan kalınlık kompozit kalınlığı, cam/karbon lif miktarlarında düşüş, yapıda oluşan boşluklar ve matris malzemenin plastikleşmesine bağlı olarak eğme dayanım ve modüllerinde düşüş gerçekleşmektedir (Nash ve ark., 2015; Beylergil ve ark., 2018).

Şekil 4.2’de, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme dayanımı değerleri verilmiştir. Genel olarak, hem hibritleme hem de katmanlar arası dokusuz yüzey takviyesi, atkı ve çözgü yönü eğme dayanımlarında bir miktar düşüşe neden olmuştur. Bu durum, katmanlar arası ara-yüz özelliklerinin değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, dış yüzeyde karbon preformun kullanıldığı hibrit kompozitlerde nonwoven takviyesi, hem atkı hem de çözgü yönündeki eğme dayanımlarını arttırmıştır.



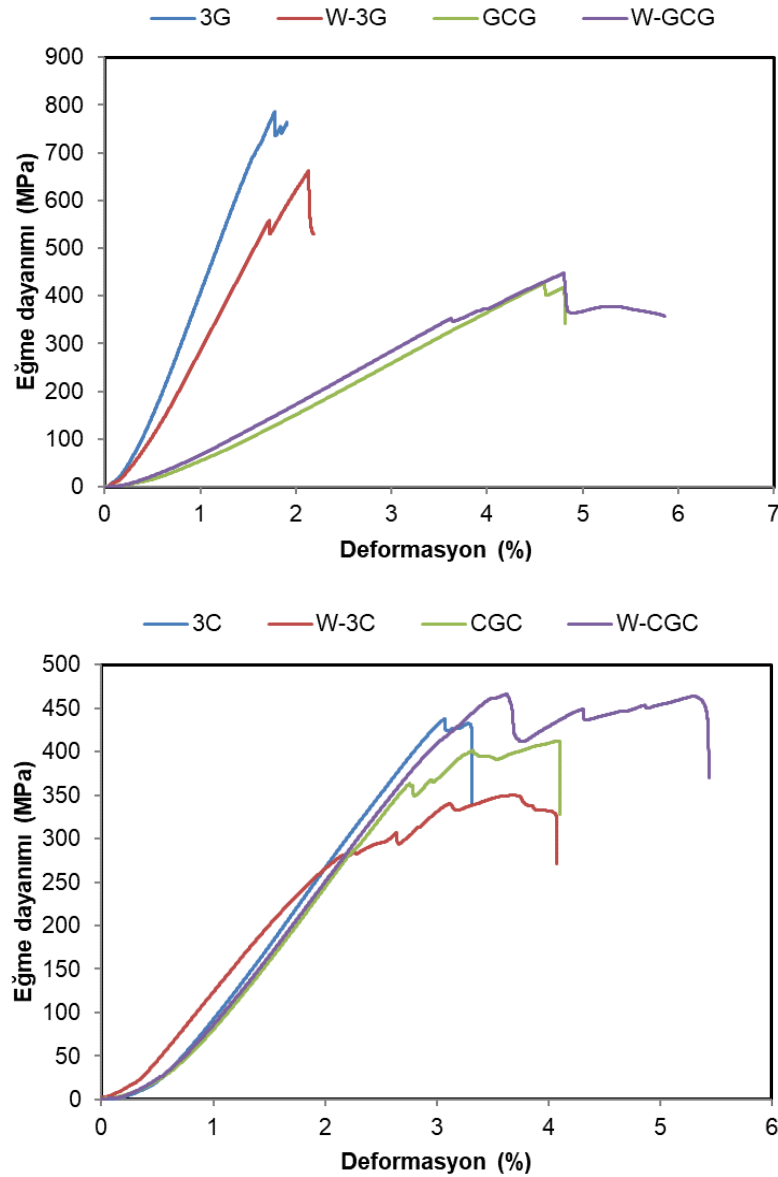
Şekil 4.2. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme dayanımı değerleri, (a); atkı yönü, (b); çözgü yönü.

Şekil 4.3'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme modülü değerleri verilmiştir. Genel olarak, hem hibritleme hem de katmanlar arası dokusuz yüzey takviyesi, atkı ve çözgü yönü eğme modüllerinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, katmanlar arası ara-yüz özelliklerinin değişkenlik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Eğme modülü en yüksek kompozit yapı, hem atkı hem de çözgü yönünde 3G kompozit yapıdır. Dış yüzeyde karbon preformun kullanıldığı dokusuz yüzey takviyeli/takviyesiz hibrit kompozitlerin (CGC ve W-CGC) atkı yönü eğme modülü, cam hibrit kompozitlerden (GCG ve W-GCG) daha yüksektir. Bu durum, karbon lifinin cam lifine kıyasla daha yüksek elastik modüle sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.3. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme modülü değerleri, (a); atkı yönü, (b); çözgü yönü.

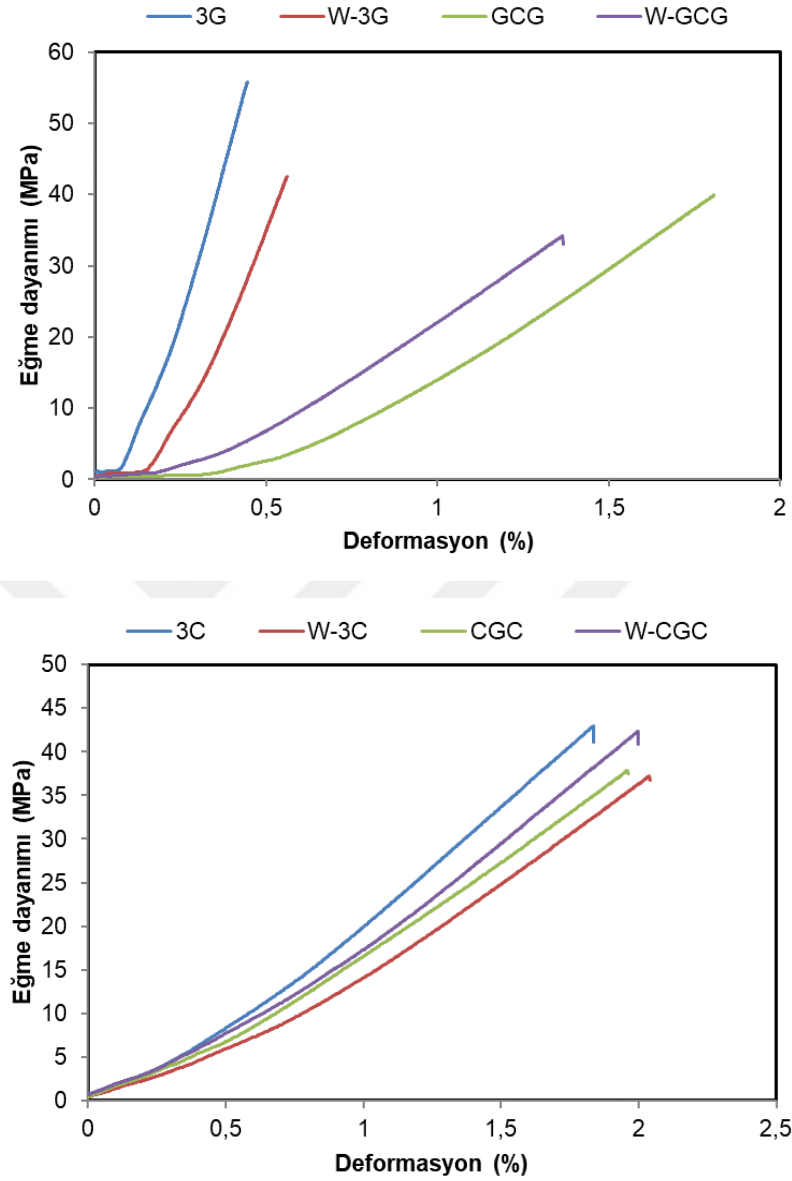
Şekil 4.4'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin atkı yönü eğme dayanımı-uzama eğrileri verilmiştir. Buna göre, hibritleme ve nonwoven takviyesi, cam kompozitlerin eğme dayanımlarını düşürürken sünekliklerini arttırmıştır. Karbon kompozitlerde ise, hibritleme ve nonwoven takviyesi sinerjik etki göstererek kompozit yapının sünekliğini bir miktar artırırken eğme dayanımında da artış sağlamıştır.



Şekil 4.4. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin atkı yönü eğme dayanımı-deformasyon eğrileri.

Şekil 4.5'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin çözgü yönü eğme dayanımı-uzama eğrileri verilmiştir. Buna göre, hibritleme ve nonwoven takviyesi, cam kompozitlerin eğme dayanımlarını düşürürken sünekliklerini arttırmıştır.

Karbon kompozitlerde ise, hibritleme ve nonwoven takviyesi sinerjik etki göstererek kompozit yapının sünekliğini bir miktar artırırken eğme dayanımında da artış sağlamıştır.



Şekil 4.5. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin çözümlü yönü eğme dayanımı-deformasyon eğrileri.

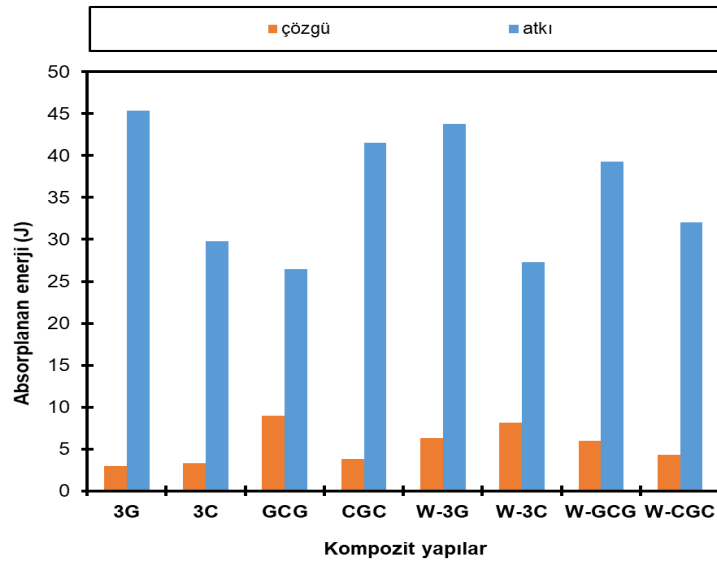
4.4. Kompozit Yapıların Charpy Darbe Testi Sonuçları

Çizelge 4.4 ve Şekil 4.6'da, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonucu absorplanan enerji değerleri verilmiştir. Buna göre, hem takviyesiz hem de nonwoven takviyeli kompozit yapıların çözümlü yönü absorplanan enerji değerleri, atkı yönüne kıyasla çok daha düşüktür. Bunun nedeni, çözümlü yönünde PP, atkı yönünde ise yüksek performanslı cam ve karbon liflerinin

kullanılmasıdır. Hibrit olmayan 3G ve 3C yapıları kıyaslandığında, cam lifi takviyeli 3G yapısının, karbon lifi takviyeli 3C yapısına kıyasla daha fazla enerji absorpladığı ve Charpy darbe dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, cam lifinin karbon lifine kıyasla uzama özelliğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Daha kırılğan özellikteki karbon lifi, daha az enerji absorplamıştır. Katlar arası hibrit CGC kompozit yapının enerji absorpsiyonu ise GCG kompozit yapıya göre daha yüksektir. Dış katmanlarda karbon, orta katmanda ise cam preformların kullanılması yapıyı dengeleyerek hibritlemenin sinerjik etkisini ortaya koymuştur. Bu sayede daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir. Katmanlar arasına nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların atkı yönündeki enerji absorpsiyonlarına belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ancak, nonwoven takviyesi ile birlikte, çözgü yönündeki enerji absorpsiyonlarında önemli ölçüde artış gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.4. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları.

Kod	Absorplanan enerji (J)		Charpy darbe dayanımı (kJ/m ²)	
	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı
3G	3,00	45,40	0,02	0,24
3C	3,30	29,80	0,01	0,14
GCG	9,00	26,45	0,04	0,14
CGC	3,80	41,55	0,02	0,20
W-3G	6,30	43,80	0,03	0,21
W-3C	8,10	27,25	0,03	0,12
W-GCG	5,95	39,30	0,03	0,20
W-CGC	4,30	32,05	0,02	0,15



Şekil 4.6. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları.

4.5. Kompozit Yapıların Düşen Ağırlık Darbe Testi Sonuçları

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Kompozit yapıların düşen ağırlık darbe testi maksimum kuvvet, deformasyon ve absorplanan enerji değerleri ise sırasıyla, Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da sunulmuştur. Genel olarak, nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların maksimum kuvvet değerlerini arttırırken, deformasyon değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Nonwoven takviyesi, enerji absorpsiyonuna önemli bir etkiye bulunmamakla birlikte, kompozit yapıların genel olarak sünekliğini arttırmıştır.

Hibrit olmayan 3G ve 3C yapıları kıyaslandığında, cam lifi takviyeli 3G yapısının, karbon lifi takviyeli 3C yapısı ile enerji absorpsiyonlarının çok yakın olmakla birlikte, 3G yapısının daha fazla enerji absorpladığı görülmektedir. Bunun nedeni, cam lifinin karbon lifine kıyasla uzama özelliğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Daha kırılğan özellikteki karbon lifi, daha az enerji absorplamıştır. Ancak, 3C yapısının maksimum kuvvet değerinin, karbon lifinin cam lifine kıyasla daha yüksek dayanım ve modül göstermesinden dolayı daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Katlar arası hibrit CGC ve GCG kompozit yapıların enerji absorpsiyon değerleri çok yakın olmakla birlikte, GCG yapısının daha fazla enerji absorpladığı görülmektedir.

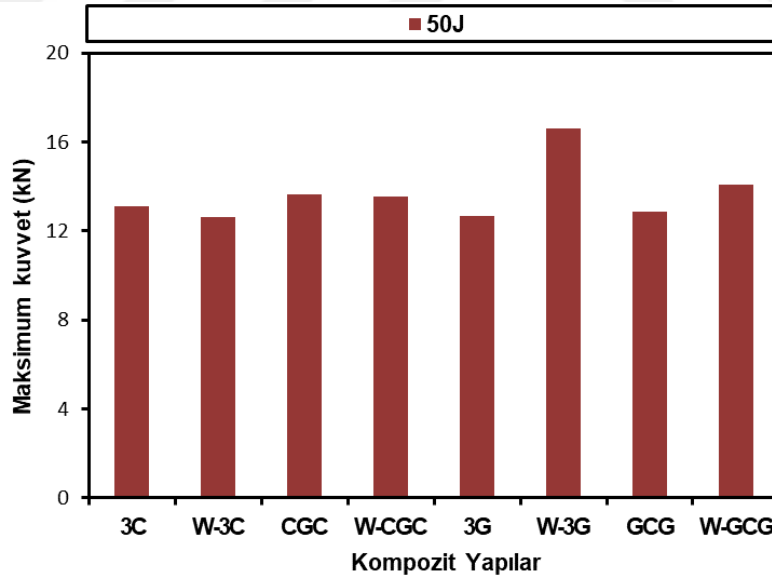
Çizelge 4.5. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonuçları.

Darbe enerjisi	Kod	Maksimum kuvvet (kN)	Deformasyon (mm)	Absorplanan enerji (J)
50J	3G	12,659 ($\pm 0,554$)	6,275 ($\pm 0,193$)	46,802 ($\pm 0,591$)
	3C	13,130 ($\pm 0,129$)	5,870 ($\pm 0,075$)	46,776 ($\pm 0,467$)
	GCG	12,852 ($\pm 0,374$)	6,787 ($\pm 0,543$)	46,889 ($\pm 0,630$)
	CGC	13,652 ($\pm 0,410$)	5,918 ($\pm 0,027$)	46,461 ($\pm 0,301$)
	W-3G	16,623 ($\pm 0,285$)	5,364 ($\pm 0,084$)	46,931 ($\pm 0,521$)
	W-3C	12,614 ($\pm 0,194$)	6,065 ($\pm 0,033$)	46,724 ($\pm 0,171$)
	W-GCG	14,068 ($\pm 0,099$)	5,739 ($\pm 0,028$)	45,860 ($\pm 0,213$)
	W-CGC	13,563 ($\pm 0,095$)	5,625 ($\pm 0,236$)	46,103 ($\pm 0,383$)

Dış katmanlarda karbon, orta katmanda ise cam preformların kullanıldığı CGC yapısının maksimum kuvvet değerinin dış katmanlarda cam, orta katmanda ise karbon preformların kullanıldığı GCG yapısından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun

nedeninin, karbon lifinin cam lifine kıyasla daha yüksek dayanım ve modül göstermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Nonwoven takviyesi, özellikle hibrit olmayan 3G ve dış katmanlarda cam preformların kullanıldığı hibrit kompozitlerde (GCG) maksimum kuvveti daha fazla arttırmıştır.

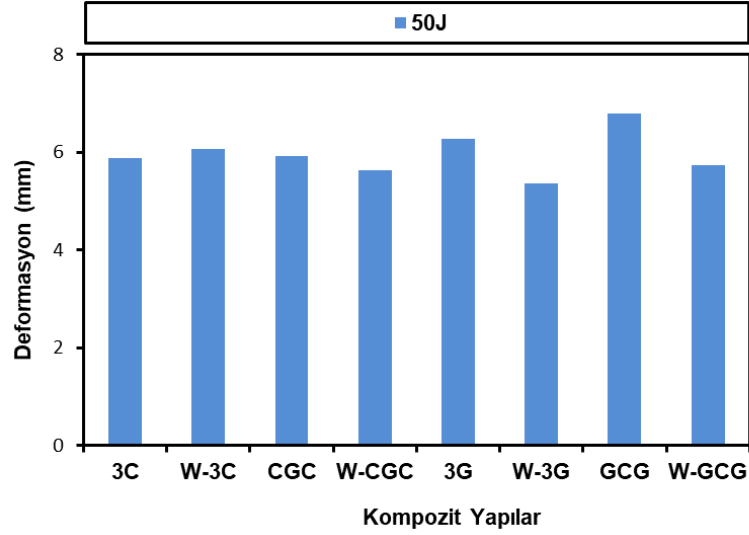
Şekil 4.7’de sunulan maksimum kuvvet değerleri incelendiğinde, katmanlar arası nonwoven takviyeli ve takviyesiz hibrit kompozit yapıların (CGC/W-CGC ve GCG/W-GCG) maksimum kuvvet değerlerinin, hibrit olmayan (3G/W-3G ve 3C/W-3C) kompozit yapılara kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu da hibritlemenin sinerjik etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca, hibritlemede dış yüzeyin karbon preformdan oluştuğu nonwoven takviyeli (W-CGC) ve takviyesiz (CGC) yapıların, dış yüzeyi cam preformdan oluşan nonwoven takviyeli (W-GCG) ve takviyesiz (GCG) yapılara kıyasla darbe yükü altında daha yüksek maksimum kuvvet sergilediği belirlenmiştir. Dokusuz yüzey takviyesinin genel olarak kompozit yapıların darbe yükü altındaki maksimum kuvvet değerlerini arttırdığı ve bu artışın en belirgin olarak W-3G yapısında ortaya çıktığı görülmüştür. PP dokusuz yüzeyin cam lifleri ile yapışma özelliklerinin karbon liflerine kıyasla iyi olmasının bu artışa sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.7. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi maksimum kuvvet değerleri.

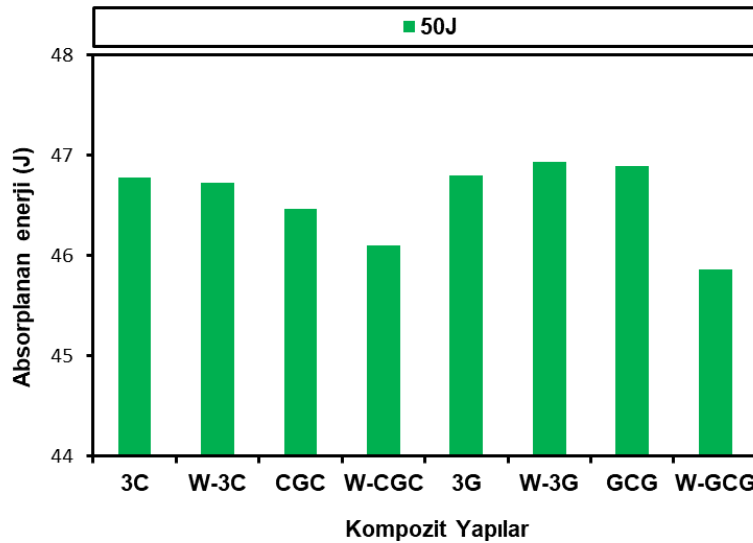
Şekil 4.8’de sunulan deformasyon değerleri incelendiğinde, genel olarak nonwoven takviyesinin kompozit yapıların deformasyon değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Özellikle cam preformlar ile PP dokusuz yüzeyin yapışma özelliğinin iyi olmasından

dolayı, hem hibrit olmayan (3G) hem de dış yüzeylerde cam preformun kullanıldığı hibrit kompozitlerde (GCG), nonwoven takviyesi (W-3G, W-GCG) deformasyon değerlerinde önemli bir düşüş sağlamıştır. Hibrit olmayan karbon preformda (3C) ise, nonwoven takviyesi (W-3C) deformasyon değerinde artışa neden olmuştur. Bu durumun, karbon ve PP nonwoven yapının zayıf yapışma özelliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



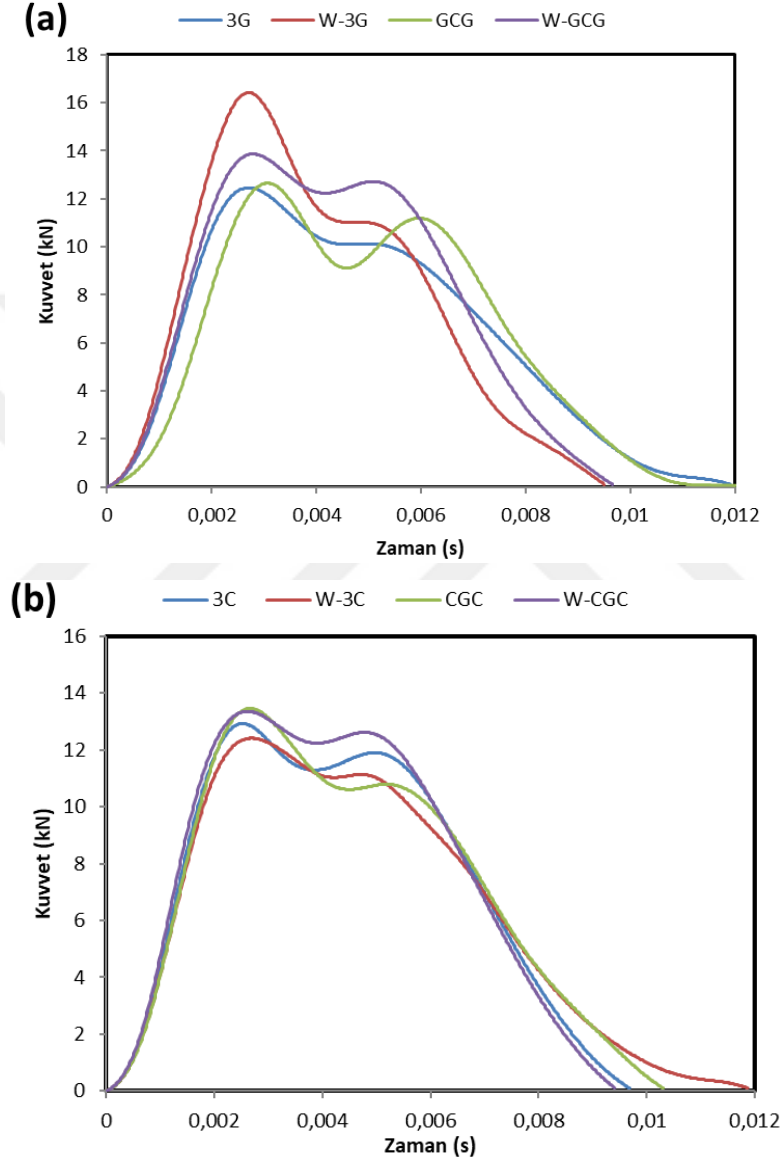
Şekil 4.8. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi deformasyon değerleri.

Şekil 4.9’da sunulan absorplanan enerji değerleri incelendiğinde, nonwoven takviyesinin, karbon preformların kullanıldığı hibrit olmayan (W-3C) ve hibrit (W-CGC ve W-GCG) kompozit yapıların enerji absorpsiyonlarını düşürdüğü belirlenmiştir. Ancak, nonwoven takviyesi, cam preformların kullanıldığı hibrit olmayan (W-3G) kompozit yapının enerji absorpsiyonunu arttırmıştır.



Şekil 4.9. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi absorplanan enerji değerleri.

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin 50J enerji seviyesindeki kuvvet-zaman eğrileri Şekil 4.10'da verilmiştir. Cam preformun hibrit olmayan ve hibrit kompozitlerinde (Şekil 4.10(a)), en yüksek maksimum kuvveti nonwoven takviyeli hibrit olmayan kompozit yapı (W-3G) göstermiş ve bu yapıyı nonwoven takviyeli hibrit W-GCG yapısı takip etmiştir.

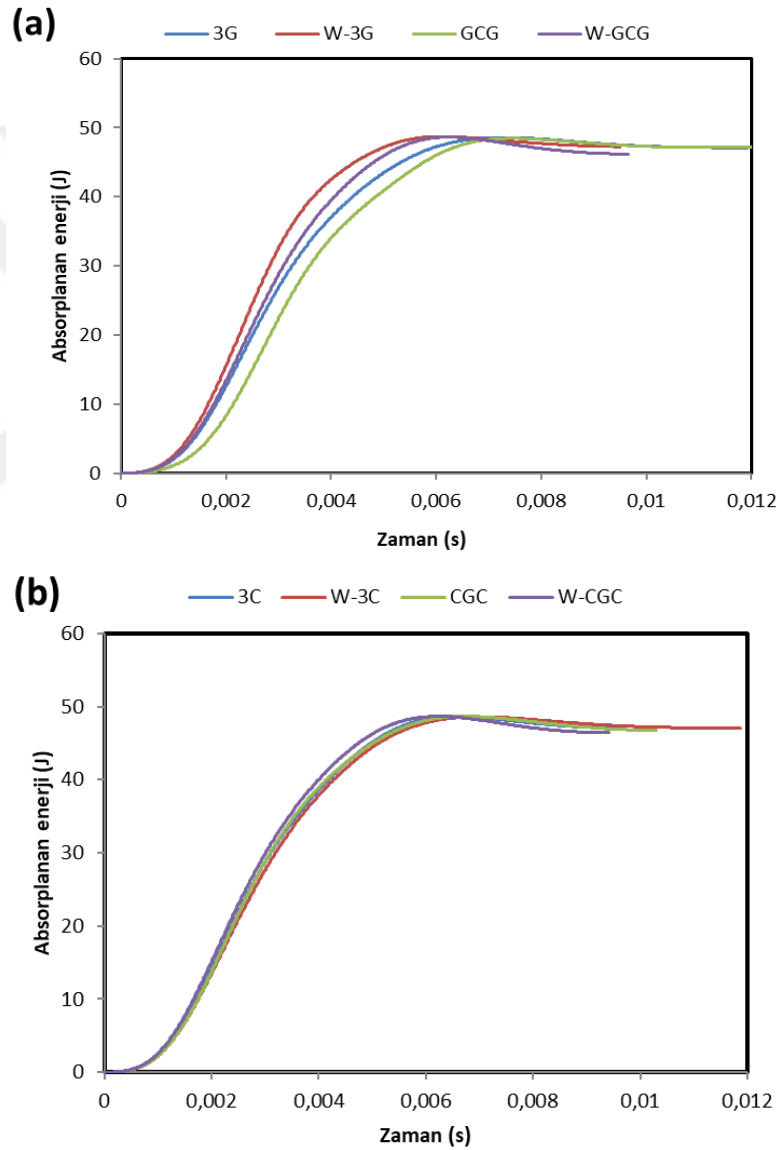


Şekil 4.10. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi kuvvet-zaman eğrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.

Nonwoven takviyesinin, cam preformların kullanıldığı kompozit yapıların darbe esaslı yüklemde maksimum kuvvet değerini artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Karbon preformun hibrit olmayan kompozitlerinde ise, nonwoven takviyesinin (W-3C) maksimum

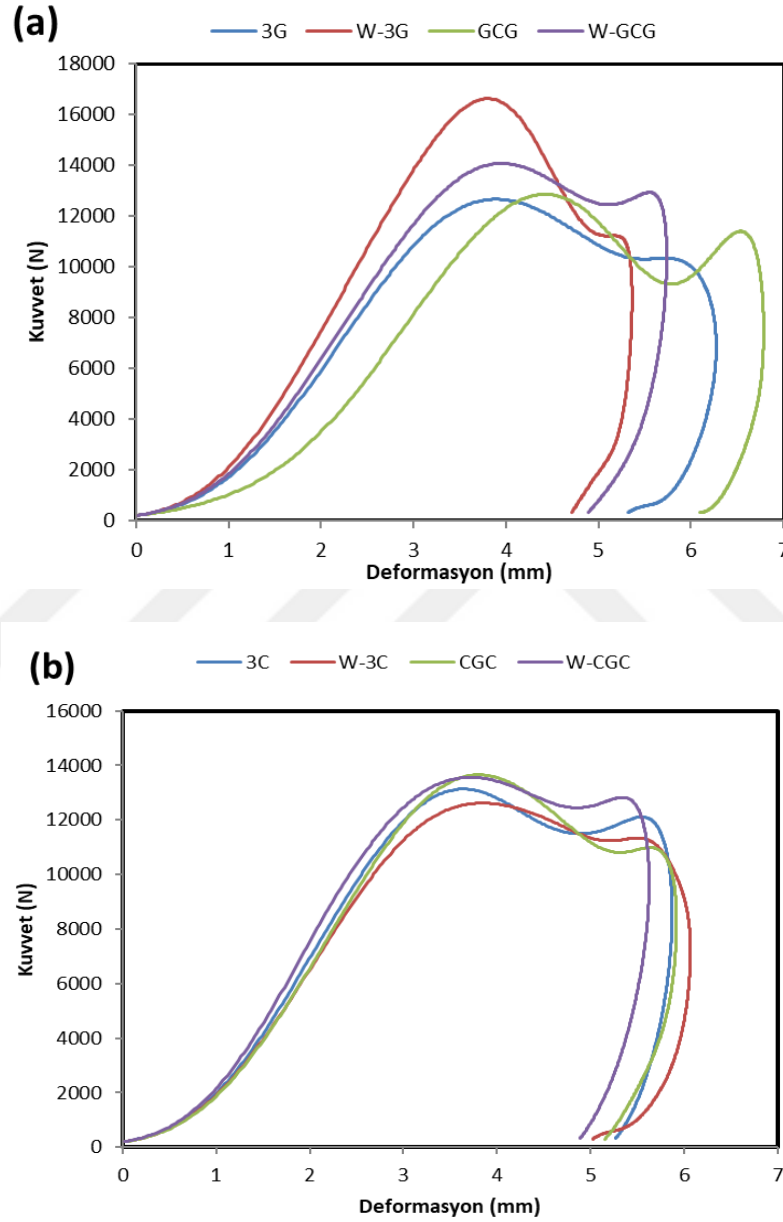
kuvvet deęerini dūřurdūęu belirlenmiřtir. Karbon preformun hibrit kompozitlerinde ise nonwoven takviyesi (W-CGC), cam lifinin yapıda bulunması ve dokusuz yūzeyle iyi yapıřma ۆzelliklerinden dolayı maksimum kuvvet deęerinde artış saęlamıřtır.

Katmanlar arası dokusuz yūzey takviyeli hibrit kompozitlerin 50J enerji seviyesindeki absorplanan enerji-zaman eęrileri řekil 4.11’de verilmiřtir. Nonwoven takviyesi, cam (W-3G) ve hibrit (W-GCG ve W-CGC) kompozit yapılarda bir miktar elastik toparlanma saęlamıřtır. Bunun dıřındaki tūm kompozit yapılarda ise kalıcı deformasyon gۆrūlmūřtır.



řekil 4.11. Katmanlar arası dokusuz yūzey takviyeli hibrit kompozitlerin dūřen aęırlık darbe testi absorplanan enerji-zaman eęrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin 50J enerji seviyesindeki kuvvet-deformasyon eğrileri Şekil 4.12’de verilmiştir. Nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların deformasyonlarını düşürdüğü belirlenmiştir. Bu etki, cam (W-3G) ve dış yüzeylerde cam preformun kullanıldığı hibrit (W-GCG) kompozitlerde daha belirgin bir biçimde ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.12. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi absorplanan kuvvet-deformasyon eğrileri, (a); cam preform ve hibritleri, (b); karbon preform ve hibritleri.

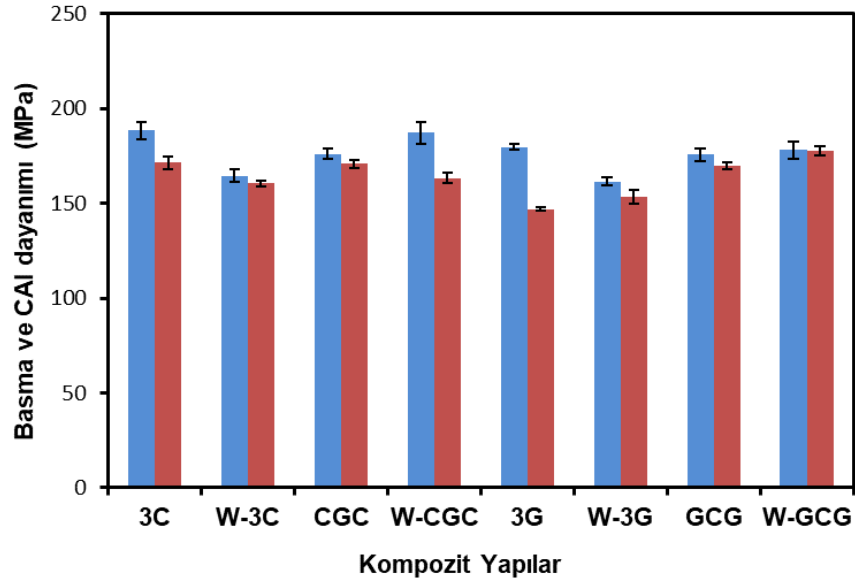
4.6. Kompozit Yapıların Basma ve CAI Test Sonuçları

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI test sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Genel olarak cam ve karbon kompozitlerin basma dayanımlarının birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Hibritleme ve nonwoven takviyesi genel olarak, kompozit yapıların basma dayanım ve modüllerinde artış sağlamıştır. 50J darbe enerjisi uygulanan kompozit yapıların basma dayanım ve modülleri, beklenildiği gibi düşüş göstermiştir.

Çizelge 4.6. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI test sonuçları.

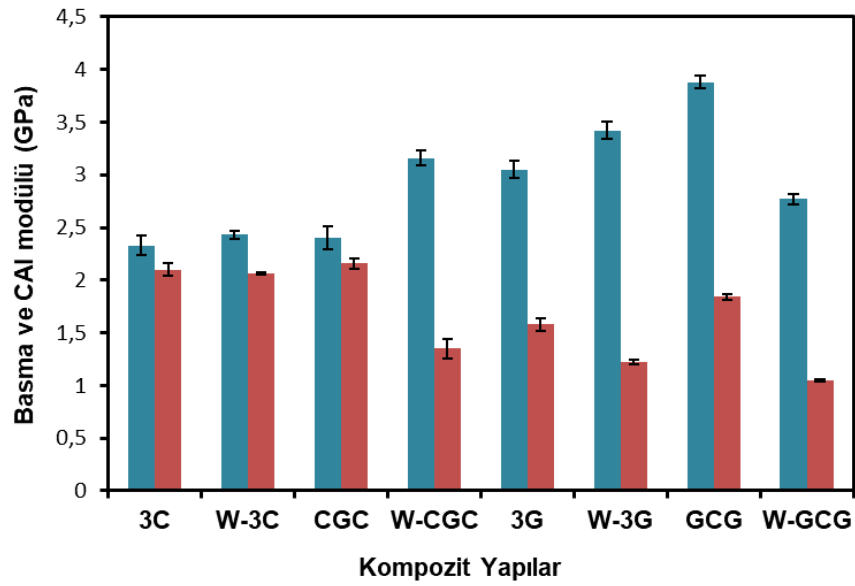
Darbe enerjisi	Kod	Basma ve CAI dayanımı (MPa)	Basma ve CAI modülü (GPa)
0J	3C	188,49 ($\pm 4,56$)	2,33 ($\pm 0,09$)
	W-3C	164,48 ($\pm 3,41$)	2,43 ($\pm 0,04$)
	CGC	175,99 ($\pm 2,71$)	2,40 ($\pm 0,11$)
	W-CGC	187,23 ($\pm 5,90$)	3,16 ($\pm 0,07$)
	3G	179,63 ($\pm 1,51$)	3,05 ($\pm 0,08$)
	W-3G	161,54 ($\pm 2,30$)	3,42 ($\pm 0,08$)
	GCG	175,82 ($\pm 3,36$)	3,88 ($\pm 0,06$)
	W-GCG	178,07 ($\pm 4,56$)	2,77 ($\pm 0,05$)
50J	3C	171,39 ($\pm 3,35$)	2,10 ($\pm 0,06$)
	W-3C	160,71 ($\pm 1,51$)	2,06 ($\pm 0,01$)
	CGC	170,90 ($\pm 2,13$)	2,16 ($\pm 0,05$)
	W-CGC	163,47 ($\pm 2,58$)	1,35 ($\pm 0,09$)
	3G	146,94 ($\pm 0,86$)	1,58 ($\pm 0,06$)
	W-3G	153,20 ($\pm 3,65$)	1,22 ($\pm 0,02$)
	GCG	169,83 ($\pm 1,81$)	1,84 ($\pm 0,03$)
	W-GCG	177,91 ($\pm 2,39$)	1,05 ($\pm 0,01$)

Şekil 4.13’te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI dayanımı değerleri verilmiştir. 50J darbe enerjisi uygulanan kompozit yapılarda meydana gelen CAI dayanımındaki düşüşün, hibrit ve nonwoven takviyeli kompozitlerde daha az olduğu belirlenmiştir. Özellikle cam kompozitlerde nonwoven takviyesi, cam lifi ve PP dokusuz yüzeyin iyi yapışma özelliklerinden dolayı daha etkili sonuçlar sağlayarak, darbe sonrası dayanım kayıplarını azaltmıştır.



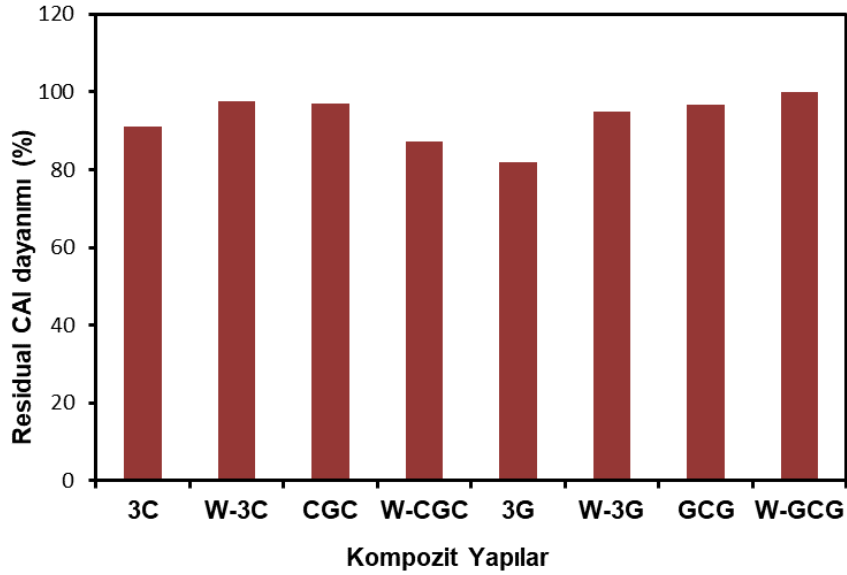
Şekil 4.13. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI dayanımı değerleri.

Şekil 4.14’te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI modülü değerleri verilmiştir. 50J darbe enerjisi uygulanan kompozit yapılarda meydana gelen CAI dayanımındaki düşüşün, cam kompozitlerde çok daha belirgin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.14. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin basma ve CAI modülü değerleri.

Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin, 50J darbe enerjisine maruz kalması sonrasında hesaplanan ‘Residual CAI dayanımı’ Şekil 4.15’te verilmiştir. W-GCG kompozit yapı, 50J darbe enerjisi sonrası dayanım değerini korumuştur. Bu yapıyı, W-3C, GCG, CGC ve W-3G yapıları izlemiştir. Genel olarak, hibritleme ve nonwoven takviyesinin kompozit yapıların hasar toleransını arttırdığı belirlenmiştir.



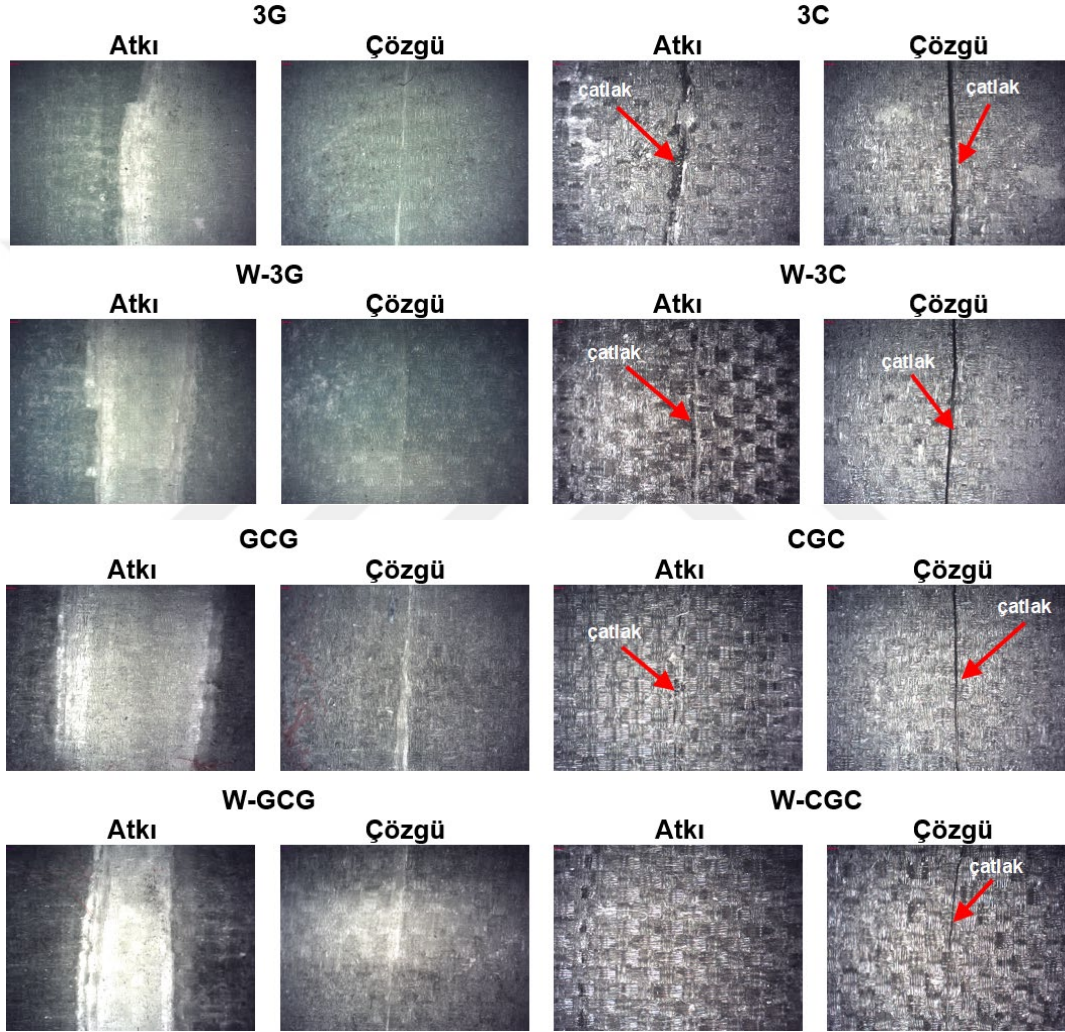
Şekil 4.15. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin residual CAI dayanım değerleri.

4.7. Hasar Analizi Sonuçları

4.7.1. Kompozit Yapıların Eğme Testi Sonrası Hasar Analizi

Şekil 4.16’da, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskopik yüzey görüntüleri sunulmuştur. Eğme yükü, çözümlü yönündeki numunelere PP lifinin normali doğrultusunda, atkı yönündeki numunelere ise cam ve karbon liflerinin normali doğrultusunda uygulanmıştır. PP liflerinin, cam ve karbon liflerine kıyasla dayanım özelliklerinin düşük olmasından dolayı, eğme yükü uygulanan çözümlü numunelerinin yüzeyinde, atkı numunelerine göre lif/matris kırılmaları sonucu meydana gelen daha belirgin çatlaklar görülmektedir. Hibrit olmayan cam (3G) ve dış yüzeylerde cam preformun kullanıldığı hibrit (GCG) kompozitlerin yüzeylerinde meydana gelen çatlakların, hibrit olmayan karbon (3C) ve dış yüzeylerde karbon preformun kullanıldığı hibrit (CGC) kompozitlerden daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, karbon liflerinin cam liflerine kıyasla daha kırılgan olmasından kaynaklanmaktadır.

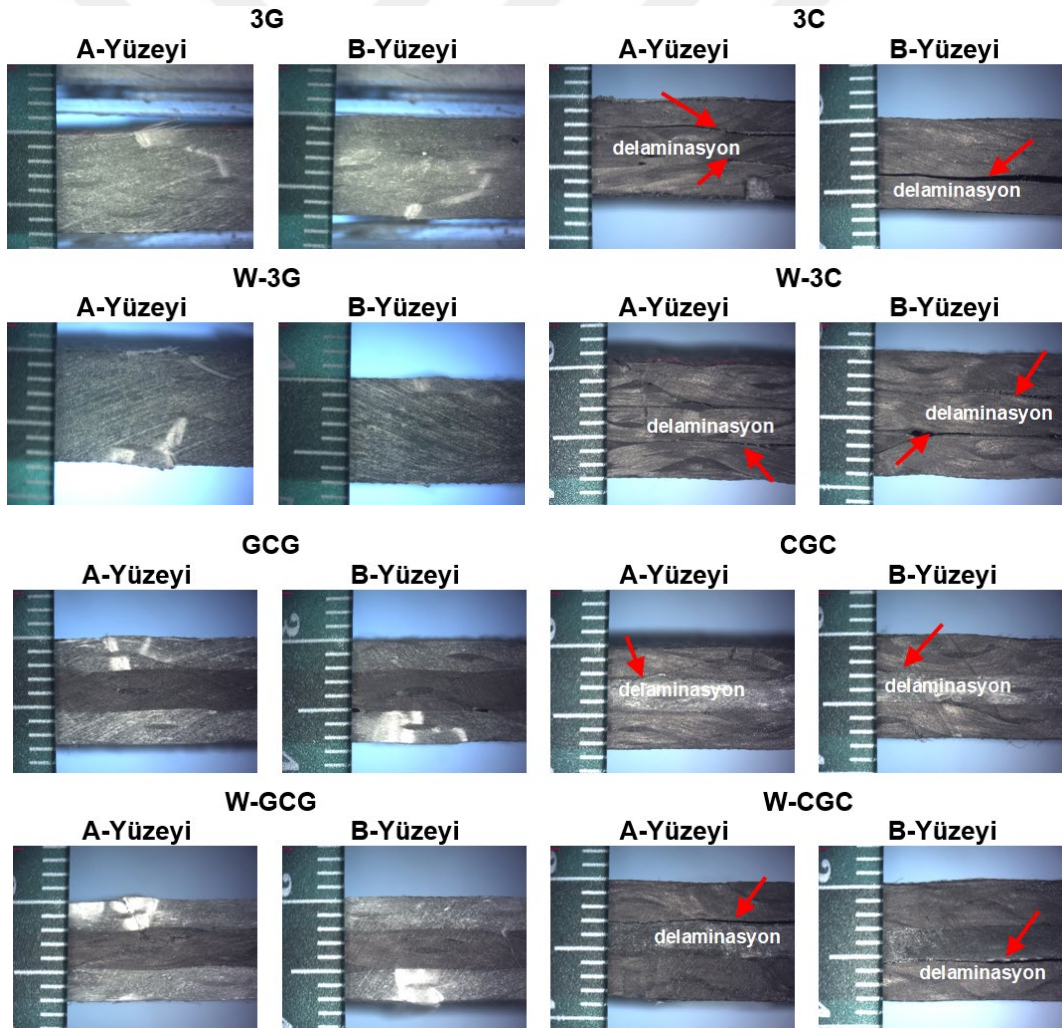
Ayrıca, nonwoven takviyeli/takviyesiz hibrit olmayan cam (3G ve W-3G) ve dış yüzeylerde cam preformun kullanıldığı hibrit (GCG ve W-GCG) kompozit yapıların atkı yönünde yüzeyde herhangi bir çatlak gözlemlenmemiş, matris kırılması ve minör lif kırılmalarına dayanan opak bir görüntü oluşmuştur. Nonwoven takviyesi, tüm kompozit yapılarda yüzeyde oluşan çatlağı azaltmış veya yüzeydeki çatlak oluşumunu tamamen engellemiştir.



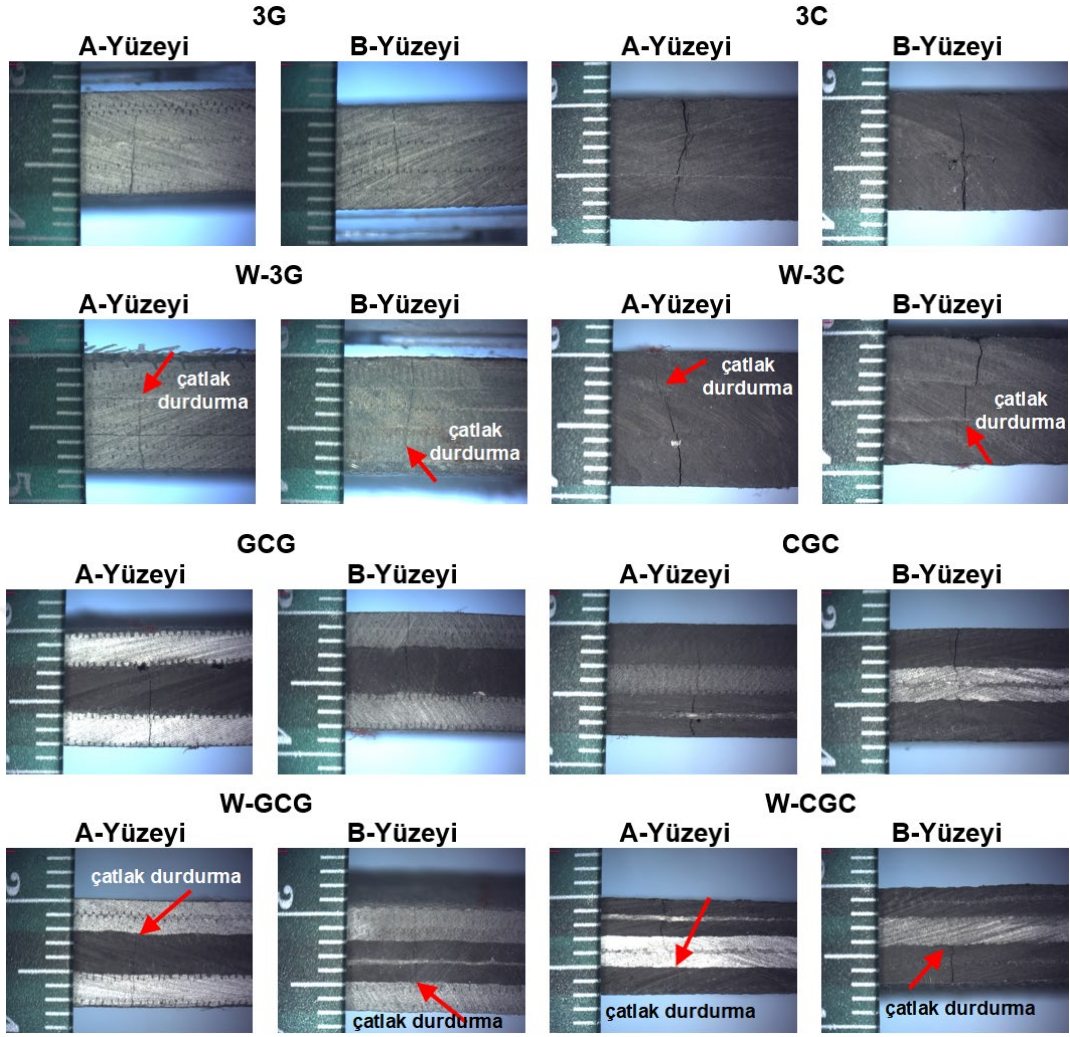
Şekil 4.16. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik yüzey görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).

Şekil 4.17 ve 4.18’de, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi, atkı yönü eğme numunelerinde, yapının kalınlığı boyunca izlenebilir çatlaklar yerine, katlar arası delaminasyon gözlemlenmiştir. Atkı yönü eğme numunelerinde, cam ve karbon liflerinin normal doğrultusunda uygulanan eğme yükü, bu liflerin eğme yükü karşısında

gösterdiği yüksek dayanımdan dolayı yapının kalınlığı boyunca çatlak oluşumu yerine delaminasyon hasarına neden olmuştur. Çözgü yönü eğme testi numunelerinde ise (Şekil 4.18) PP lifinin normali doğrultusunda uygulanan eğme yükü, PP liflerinin düşük dayanım özelliğinden dolayı yapının kalınlığı boyunca çatlak oluşumuna neden olmuştur. Hibrit olmayan karbon (3C) ve dış yüzeylerde karbon preformun kullanıldığı hibrit (CGC) kompozitlerde, 3G ve GCG kompozit yapılarına kıyasla atkı yönünde daha fazla katlar arası delaminasyon gerçekleşmiştir. Nonwoven takviyesi, atkı yönünde delaminasyonu azaltmış, çözgü yönünde ise yapının kalınlığı boyunca oluşan çatlakları ilerleyişini durdurucu bir etki göstermiştir. Bu etkilerin, cam lifleri ile PP nonwoven yapının yapışma özelliklerinin daha iyi olmasından dolayı, bu yapılarda daha fazla ortaya çıktığı görülmüştür. Delaminasyon eğilimi, katmanlar arası nonwoven eklenen kompozit yapılarda, nonwoven kumaşın bariyer görevi görmesinden dolayı önemli ölçüde azalmıştır (Zhu, 2013).

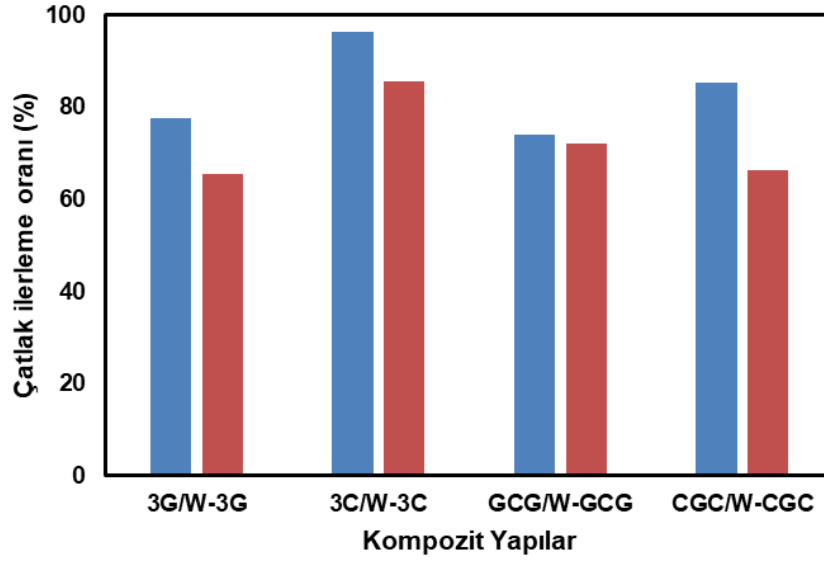


Şekil 4.17. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskopik atkı kesit görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).



Şekil 4.18. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik çözgü kesit görüntüleri ($\times 1,5$ büyütme oranı).

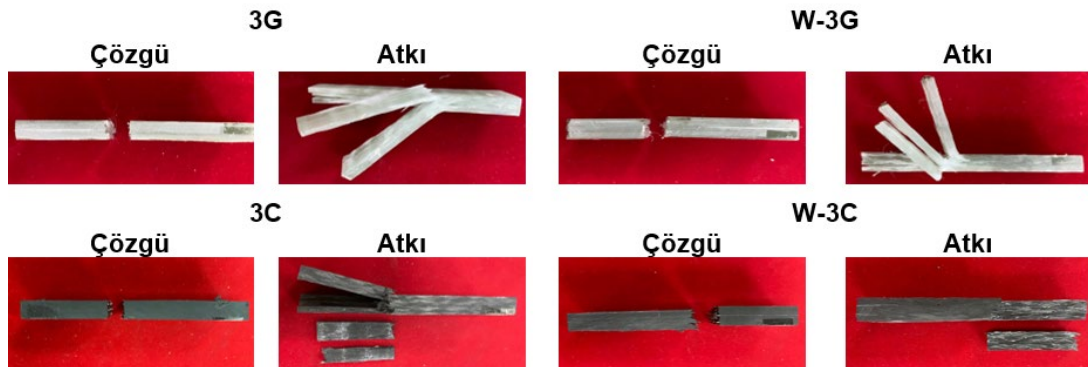
Çözgü yönü eğme testi numunelerinin sağ (A-yüzeyi) ve sol (B-yüzeyi) kesitlerinde oluşan çatlak boyu ölçülerek, kompozit yapının kalınlığı boyunca çatlak ilerleme oranı (%) her iki kesitin ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama ile, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyesinin, kompozit yapıların eğme yükü altında kalınlığı boyunca çatlak ilerlemedeki etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.19’da, kompozit yapıların eğme yükü altındaki çatlak ilerleme oranları sunulmuştur. Nonwoven takviyesi, tüm kompozit yapıların çatlak ilerleme oranlarını düşürmüştür. Nonwoven takviyeli/takviyesiz karbon (3C ve W-3C) ve dış yüzeylerde karbon preformun kullanıldığı hibrit (CGC ve W-CGC) kompozitlerin çatlak ilerleme oranlarının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, karbon liflerinin cam liflerine göre daha kırılkan olmasından kaynaklanmaktadır.



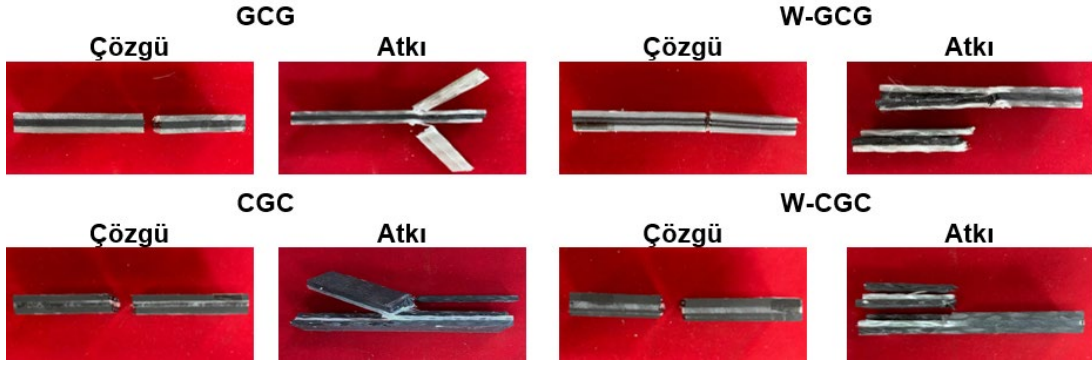
Şekil 4.19. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin atkı yönü normal doğrultusunda uygulanan eğme yükü altındaki çatlak ilerleme oranları.

4.7.2. Kompozit Yapıların Charpy Darbe Testi Sonrası Hasar Analizi

Şekil 4.20’de, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası kırılma fotoğrafları verilmiştir. Burada, kompozit yapıların çözgü yönünde darbe yüküne maruz kalmaları durumunda yapının tamamen kırıldığı görülmektedir. Atkı yönünde darbe yüküne maruz kalan kompozitlerde ise parçalı kırılma ve delaminasyon gözlemlenmiştir. Cam lifi takviyeli kompozit yapılar da delaminasyon gözlenirken, karbon lifi takviyeli kompozitlerde ise daha pürüzsüz bir kırılma ve parçaların ayrılması gerçekleşmiştir. Bunun nedeninin, PP dokusuz yüzeyin cam lifleri ile yapışma özelliklerinin karbon liflerine kıyasla daha iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Nonwoven takviyeli kompozitlerde, yapı bütünlüğünün korunduğu ve delaminasyonun görece daha düşük olduğu belirlenmiştir.

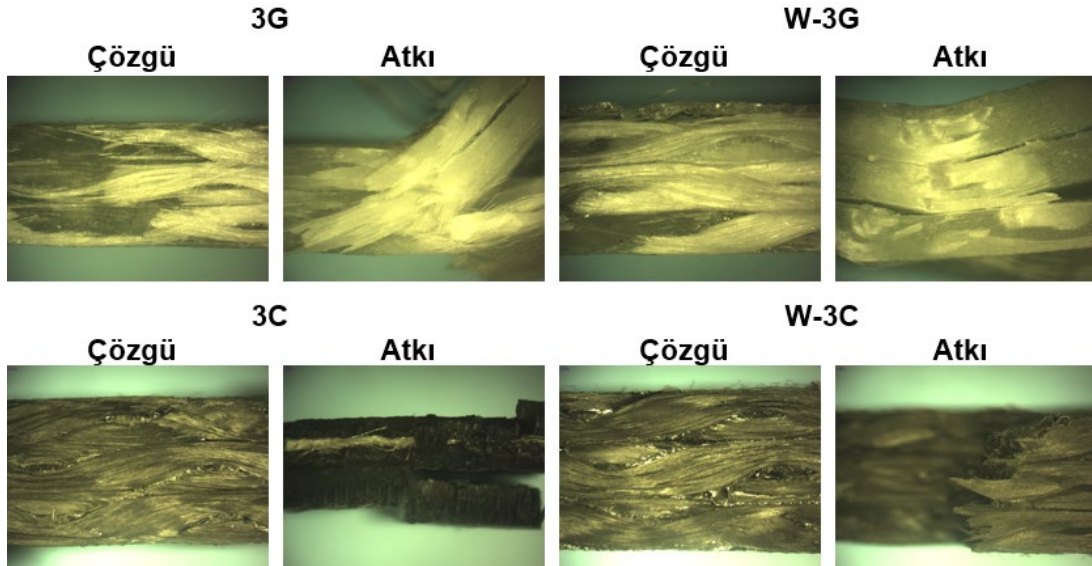


Şekil 4.20. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası kırılma fotoğrafları.

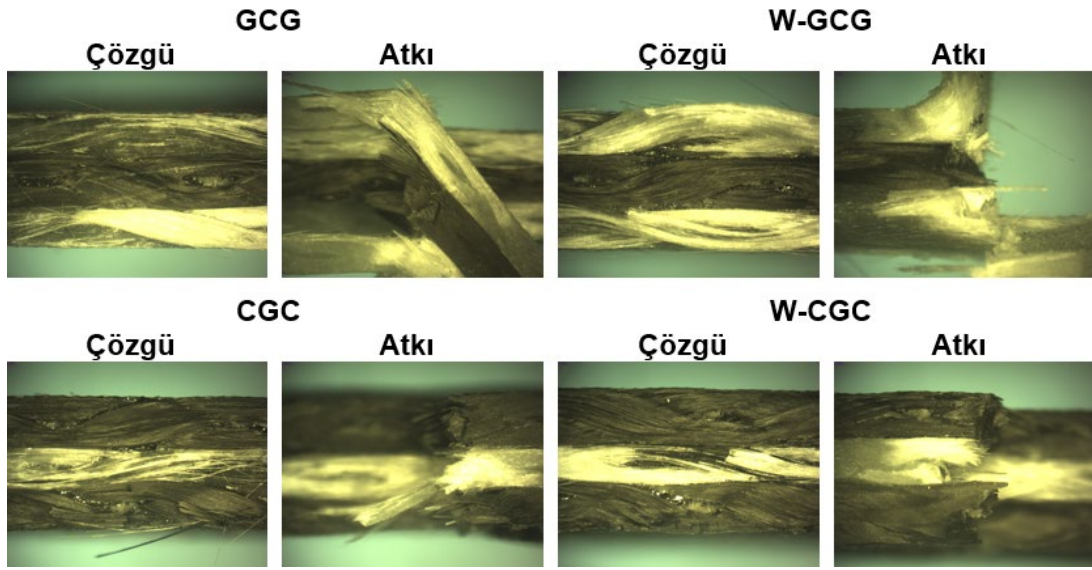


Şekil 4.20. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası kırılma fotoğrafları (Devamı).

Şekil 4.21’de, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin darbe testi sonrası kırılma yüzeylerinin mikroskobik görüntüleri verilmiştir. Kırılma fotoğrafları ile uyumlu olarak, çözgü yönünde tamamı ile kırılma gerçekleşmiş ve burada takviye lifi olarak yer alan PP çözgü lifleri kırılmış ve atkı yönündeki cam ve karbon liflerinde büyük bir hasar gerçekleştirmemiştir. Atkı yönündeki kırılma yüzeylerinde ise, yoğun çoklu lif ve matris kırılmaları, lif/matris ayrılmaları ve katlar arası delaminasyon gözlemlenmiştir. Nonwoven takviyesi ile özellikle atkı yönünde gerçekleşen katlar arası delaminasyon esaslı kırılmanın sınırlandırıldığı sonucuna varılmıştır.



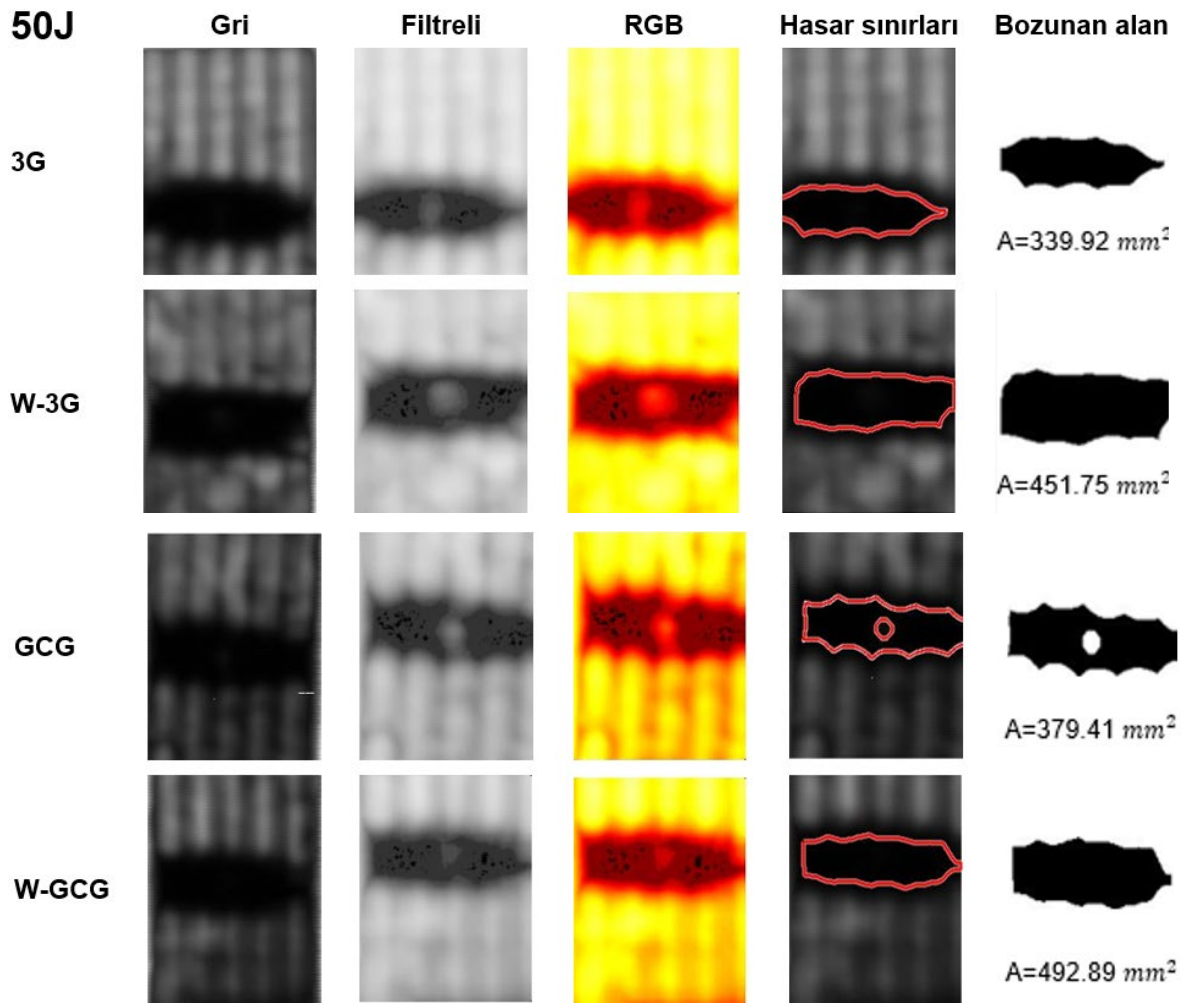
Şekil 4.21. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri ($\times 0.8$ büyütme oranı).



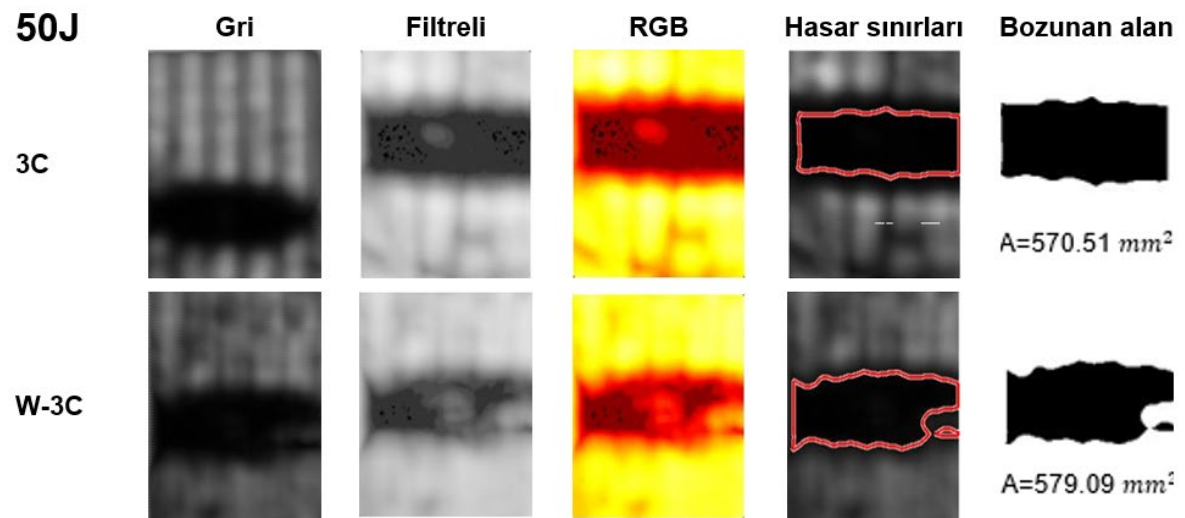
Şekil 4.21. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri ($\times 0.8$ büyütme oranı) (Devamı).

4.7.3. Kompozit Yapıların Düşen Ağırlık Darbe Testi Sonrası Hasar Analizi

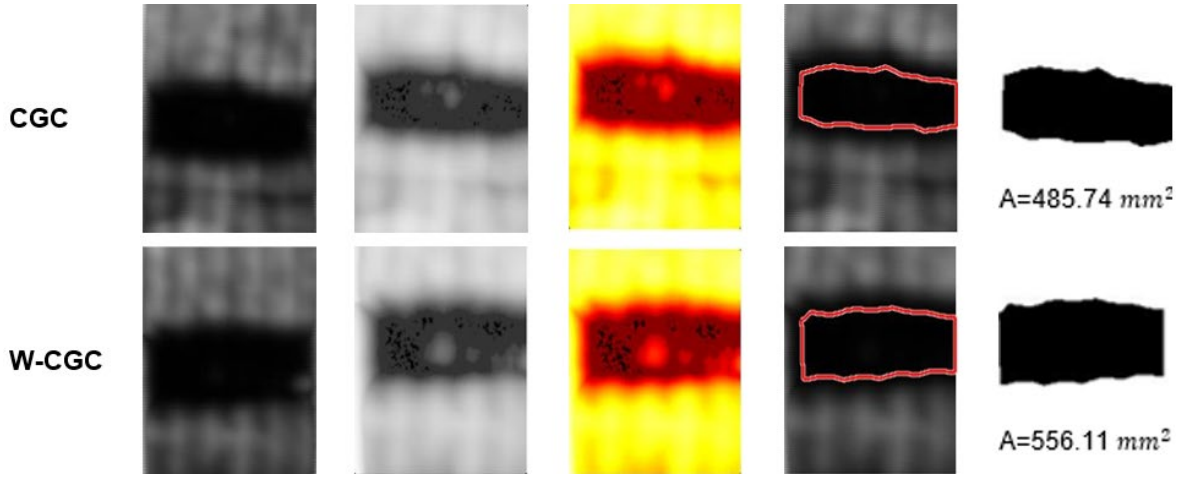
Şekil 4.22 ve 4.23'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası ultrasonik C-Scan görüntüleri ve C-Scan görüntüleri üzerinden hesaplanan bozunan alan değerleri verilmiştir. Hibrit olmayan cam (3G) ve dış yüzeylerde cam preformun kullanıldığı hibrit kompozitlerin (GCG) bozunan alan değerlerinin, hibrit olmayan karbon (3C) ve dış yüzeylerde karbon preformun kullanıldığı hibriy (CGC) kompozitlerin bozunan alan değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Karbon liflerinin cam liflerine kıyasla uzama özelliklerinin daha düşük olması ve kırılgan olmalarından dolayı, kompozit yapılar darbe yükü altında daha fazla bozunma göstermiştir. Nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların bozunan alan değerlerini arttırdığı görülmüştür. Darbe testi esnasında uygulanan 50J enerji seviyesi, kompozitlerin tümünde yapının sınır koşullarını aşan bir bozunmaya neden olmuştur. Ultrasonik C-Scan yönteminde, yapının derinliğindeki hasarın belirlenememektedir. Nonwoven takviyesi, hasarın yapının kalınlığı boyunca ilerleyişini durdurduğu ancak, yapının yüzeyinde daha katastrofik lif/matris kırılmalarına sebebiyet verdiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, nonwoven yüzeyin, katmanlar arasında darbe kuvvetinin ilerleyişini durduran bir bariyer etkisi yaptığı belirlenmiştir (Zhu, 2013). Bu da, kompozit yapıların hasar toleransını artırıcı bir etki olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4.22. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli cam hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.



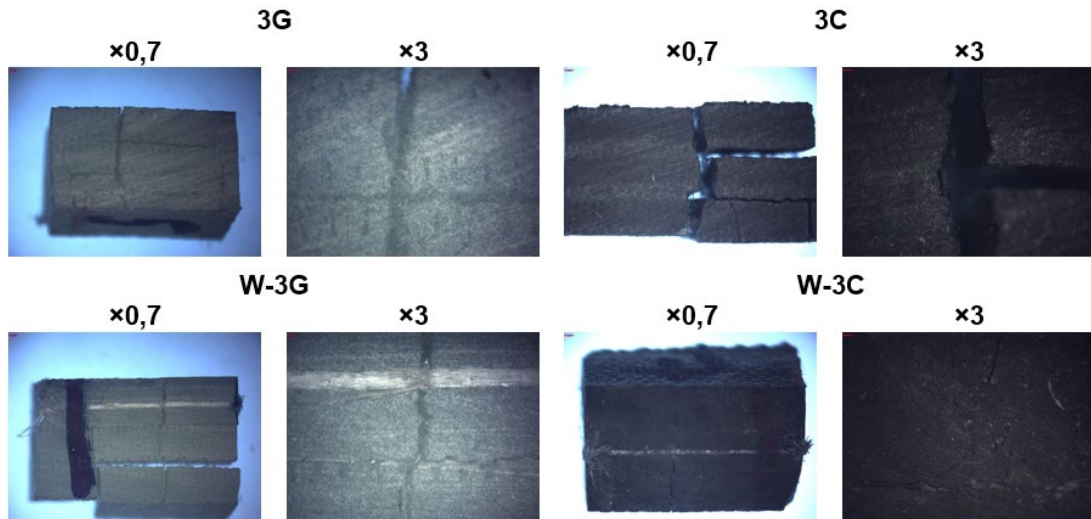
Şekil 4.23. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli karbon hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.



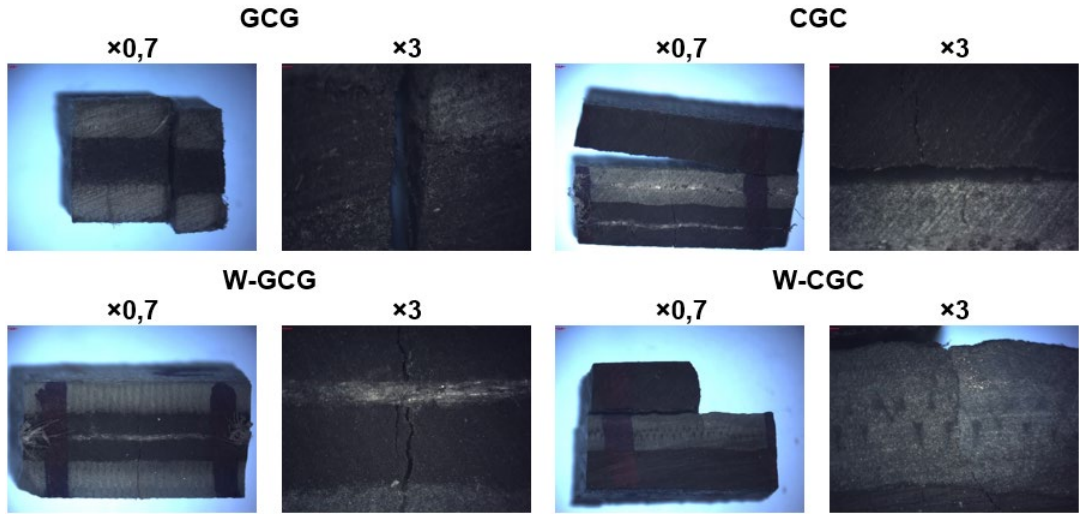
Şekil 4.23. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli karbon hibrit kompozitlerin düşen ağırlık darbe testi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri (Devamı).

4.7.4. Kompozit Yapıların CAI Testi Sonrası Hasar Analizi

Şekil 4.24'te, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli hibrit kompozitlerin CAI testi sonrası mikroskopik görüntüleri sunulmuştur. 50J darbe enerjisine maruz kalan kompozit yapıları CAI testi yapıldıktan sonra basma yükünün normali doğrultusunda alınan yan-yüz görüntüleri incelendiğinde, karbon kompozitlerde katların tamamen ayrıldığı belirlenmiştir. Cam kompozitlerde ise kısmen daha az gerçekleşen katların tamamen ayrılması durumu, nonwoven takviyesi ile azaltılmıştır. Delaminasyon eğilimi, katmanlar arası nonwoven eklenen kompozit yapılarda, nonwoven kumaşın bariyer görevi görmesinden dolayı önemli ölçüde azalmıştır. Kompozit yapıda meydana gelen çatlakların, katmanlar arasında kullanılan nonwoven yüzeylerin oluşturduğu bariyer sayesinde durdurulduğu belirlenmiştir (Zhu, 2013).



Şekil 4.24. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli cam hibrit kompozitlerin CAI testi sonrası mikroskopik görüntüleri.



Şekil 4.24. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyeli cam hibrit kompozitlerin CAI testi sonrası mikroskopik görüntüleri (Devamı).

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, polipropilen çözgü, cam ve karbon atkı iplikleri kullanılarak tek yönde doğrultulanmış özgün preformlar üretilmiştir. Bu preformların katmanlar arası hibritleme ile düzenlenerek, bu katmanlar arasına polipropilen nonwoven takviyesi yapılmıştır. Geliştirilen kompozit yapıların, temel mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve hasar toleransları belirlenmiştir. Katmanlar arası dokusuz yüzey takviyesinin kompozit yapıların performansına etkileri incelenerek aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Cam/PP ve karbon/PP preformların çözgü sıklıkları aynı olmakla birlikte, karbon/PP yapının atkı (karbon) sıklığının cam/PP yapının atkı sıklığından (cam) daha yüksektir. Bunun nedeni, atkı ipliği olarak kullanılan karbon lifinin iplik lineer yoğunluğunun, cam lifinden daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.
- Kompozit yapılardaki cam lifi miktarı arttıkça, cam lifinin karbon lifine kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmasından dolayı, kompozit yapıların da yoğunluk değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Lif miktarı değerleri incelendiğinde, genel olarak tüm kompozit yapıların lif miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. 3G kompozit yapının lif miktarı değerinin 3C kompozit yapıdan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, cam/PP preformlardaki iplik lineer yoğunluğunun, karbon/PP yapılardaki iplik lineer yoğunluğundan daha yüksek olmasıdır.
- Hem takviyesiz hem de nonwoven takviyeli kompozit yapıların atkı yönü eğme dayanımları, çözgü yönüne kıyasla çok daha yüksektir. Bunun nedeni, çözgü yönünde PP, atkı yönünde ise yüksek performanslı cam ve karbon liflerinin kullanılmasıdır. Atkı yönü eğme testinde, nonwoven takviyeli/takviyesiz hibrit olmayan cam (3G ve W-3G) ve dış yüzeyde cam preformların kullanıldığı hibrit (GCG ve W-GCG) kompozitlerin eğme dayanımlarının, karbon kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Cam liflerinin, karbon liflerine kıyasla daha yüksek iplik lineer yoğunluğu ve buna bağlı olarak daha yüksek lif miktarında kullanılması ve yapıdaki hem PP çözgü ipliği hem de PP nonwoven ile yapışma özelliklerinin daha iyi olmasından dolayı, atkı yönünde doğrultulanmış karbon liflerinin eğme yüküne karşı dayanımları, cam liflerine kıyasla daha düşüktür.

- Nonwoven takviyesi, tüm kompozit yapıların eğme dayanım ve modüllerinde düşüşe sebep olurken, uzama özelliklerini arttırarak yapıyı daha sünek hale getirmiştir (Seung ve ark., 2008). Kompozit katmanları arasında kullanılan termoplastik nonwoven yüzeylerden dolayı, artan kalınlık kompozit kalınlığı, cam/karbon lif miktarlarında düşüş, yapıda oluşan boşluklar ve matris malzemenin plastikleşmesine bağlı olarak eğme dayanım ve modüllerinde düşüş gerçekleşmektedir (Nash ve ark., 2015; Beylergil ve ark., 2018). Nonwoven takviyesi, atkı yönünde delaminasyonu azaltmış, çözgü yönünde ise yapının kalınlığı boyunca oluşan çatlakları ilerleyişini durdurucu bir etki göstermiştir. Delaminasyon eğilimi, katmanlar arası nonwoven eklenen kompozit yapılarda, nonwoven kumaşın bariyer görevi görmesinden dolayı önemli ölçüde azalmıştır (Zhu, 2013).
- Charpy darbe testi sonucu absorplanan enerji değerleri incelendiğinde, Dış katmanlarda karbon, orta katmanda ise cam preformların kullanılması yapıyı dengeleyerek hibritlemenin sinerjik etkisini ortaya koymuştur. Bu sayede daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir. Katmanlar arasına nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların atkı yönündeki enerji absorpsiyonlarına belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ancak, nonwoven takviyesi ile birlikte, çözgü yönündeki enerji absorpsiyonlarında önemli ölçüde artış gerçekleşmiştir. Nonwoven takviyesi ile özellikle atkı yönünde gerçekleşen katlar arası delaminasyon esaslı kırılmanın sınırlandığı sonucuna varılmıştır.
- Düşen ağırlık darbe testi sonuçları incelendiğinde, nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların maksimum kuvvet değerlerini arttırırken, deformasyon değerlerini düşürdüğü belirlenmiştir. Nonwoven takviyesi, enerji absorpsiyonuna önemli bir etkide bulunmamakla birlikte, kompozit yapıların genel olarak sünekliğini arttırmıştır. PP dokusuz yüzeyin cam lifleri ile yapışma özelliklerinin karbon liflerine kıyasla iyi olmasından dolayı, cam liflerinin daha fazla kullanıldığı hibrit kompozitlerde bu etkinin de daha belirgin olduğu sonucuna varılmıştır.
- Nonwoven takviyesinin, kompozit yapıların darbe sonrası bozulan alan değerlerini arttırdığı görülmüştür. Darbe testi esnasında uygulanan 50J enerji seviyesi, kompozitlerin tümünde yapının sınır koşullarını aşan bir bozunmaya neden olmuştur. Nonwoven takviyesinin, yapının kalınlığı boyunca hasarın

ilerleyişini durdurduğu ancak, yapının yüzeyinde daha katastrofik lif/matris kırılmalarına sebebiyet verdiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle, nonwoven yüzeyin, katmanlar arasında darbe kuvvetinin ilerleyişi durduran bir bariyer etkisi yaptığı belirlenmiştir (Zhu, 2013). Bu da, kompozit yapıların hasar toleransını arttırıcı bir etki olarak dikkate alınmıştır.

- Hibritleme ve nonwoven takviyesi genel olarak, kompozit yapıların basma dayanım ve modüllerinde artış sağlamıştır. 50J darbe enerjisi uygulanan kompozit yapılarda meydana gelen CAI dayanımındaki düşüşün, hibrit ve nonwoven takviyeli kompozitlerde daha az olduğu belirlenmiştir. Özellikle cam kompozitlerde nonwoven takviyesi, cam lifi ve PP dokusuz yüzeyin iyi yapışma özelliklerinden dolayı daha etkili sonuçlar sağlayarak, darbe sonrası dayanım kayıplarını azaltmıştır.

Bu tez çalışmasında, katmanlar arası dokusuz yüzey takviyesinin kompozit yapıların mekanik ve darbe dayanımlarına etkisi belirlenmiştir. Kompozit yapılarda kullanılan lif tipinin ve bu lifin dokusuz yüzey ile yapışma özelliklerinin, bu performanslara etki eden önemli faktörlerden birisi olduğu sonucuna varılmıştır. İleriki çalışmalarda, farklı nonwoven yüzeylerin kompozit yapılara takviyesi ve buna bağlı olarak katlararası ayrılma dayanımlarının incelenmesine yönelik çalışmalar yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Albrecht, W., Fuchs, H., & Kittelmann, W. (2006). *Nonwoven Fabrics: Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*. John Wiley & Sons, 101-149.
- Babcock, W., & Rose, D. (2001). Composite preforms. *AMPTIAC Newsletter*, 5(1), 7-11.
- Beylergil, B. (2019). Mode-I fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites interleaved by aramid nonwoven veils Mode-I fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites interleaved by aramid nonwoven veils. *Steel and Composite Structures*, 31(2), 113-123.
- Beylergil, B., Tanoğlu, M., & Aktaş, E. (2018). Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites. *Composite Structures*, 194, 21-35.
- Bilisik, K. (2011). Experimental determination of ballistic performance of newly developed multiaxis non-interlaced/non-Z E-glass/polyester and 3D woven carbon/epoxy composites with soft backing aramid fabric structures. *Textile Research Journal*, 81(5), 520-537.
- Bilisik, K., & Yilmaz, B. (2012). Multiaxis multilayered non-interlaced/non-Z E-glass/polyester preform and analysis of tensile properties of composite structures by statistical model. *Textile Research Journal*, 82(4), 336-351.
- Bilisik, K., & Yolacan, G. (2014a). Low-velocity impact characterization of multistitched woven E-glass/polyester nano/micro composites. *Textile Research Journal*, 84(13), 1411-1427.
- Bilisik, K., & Yolacan, G. (2014b). Warp and weft directional tensile properties of multistitched woven fabric E-glass/polyester nano composites. *Fibers and Polymers*, 15(5), 1051-1061.
- Bilisik, K., & Yolacan, G. (2015). Warp-weft directional bending properties of multistitched biaxial woven E-glass/polyester nano composites. *Journal of Industrial Textiles*, 45(1), 66-100.
- Bilisik, K., Karaduman, N., & Bilisik, N.E. (2016). Fibre Architectures for Composite Applications, In: *Fibrous and Textile Materials for Composite Applications*, Eds. Rana, S., Figueiro, R., Springer, 75-134.
- Chapman, R. (2010). *Applications of Nonwovens In Technical Textiles*. Elsevier, 136-200.
- Chen, H. P., & Jang, B. Z. (1995). Failure mechanisms of 2-D and 3-D woven fiber reinforced polymer composites. *Polymer Composites*, 16(2), 125-134.

- Cherif, C., Krzywinski, S., Diestel, O., Schulz, C., Lin, H., Klug, P., & Trümper, W. (2012). Development of a process chain for the realization of multilayer weft knitted fabrics showing complex 2D/3D geometries for composite applications. *Textile Research Journal*, 82(12), 1195-1210.
- Choi, B.-D., Diestel, O., & Offermann, P. (1999). Commingled CF/PEEK hybrid yarns for use in textile reinforced high performance rotors. *12th International Conference on Composite Materials (ICCM)*, 796-806.
- Ciobanu, L. (2011). Development of 3D knitted fabrics for advanced composite materials. In: *Advances in Composite Materials-Ecodesign and Analysis*, Ed. Attaf, B., IntechOpen, 161-191.
- Dickinson, L. C. (1990). *Evaluation of 3-D Woven Carbon/Epoxy Composites*. North Carolina State University, 16-98.
- Donovan, K. O., Ray, D., & McCarthy, M. A. (2015). Toughening effects of interleaved nylon veils on glass fabric/low-styrene-emission unsaturated polyester resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(7), 1-9.
- Fitzmaurice, K., Ray, D., & McCarthy, M. A. (2016). PET interleaving veils for improved fracture toughness of glass fibre/low-styrene-emission unsaturated polyester resin composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(3), 1-8.
- Ghasemi Nejhad, M. N., & Parvizi-Majidi, A. (1990). Impact behaviour and damage tolerance of woven carbon fibre-reinforced thermoplastic composites. *Composites*, 21(2), 155-168.
- Gheryani, A. A., Fleming, D. C., & Reichard, R. P. (2019). Nonwoven polyester interleaving for toughness enhancement in composites. *Journal of Composite Materials*, 53(28-30), 4349-4367.
- Hamer, S., Leibovich, H., Green, A., Intrater, R., Avrahami, R., Zussman, E., Siegmann, A., & Sherman, D. (2011). Mode I Interlaminar fracture toughness of nylon 66 nanofibrilmat interleaved carbon/epoxy laminates. *Polymer Composites*, 32(11), 1781-1789.
- Hogg, P. J. (2005). Toughening of thermosetting composites with thermoplastic fibres. *Materials Science and Engineering: A*, 412(1), 97-103.
- Hull, D., & Shi, Y. B. (1993). Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigations. *Composite Structures*, 23(2), 99-120.
- Kim, J.K., MacKay, D.B., & Mai, Y.W. (1993). Drop-weight impact damage tolerance of CFRP with rubber-modified epoxy matrix. *Composites*, 24(6), 485-494.
- Kretsis, G. (1987). A review of the tensile, compressive, flexural and shear properties of

- hybrid fibre-reinforced plastics. *Composites*, 18(1), 13-23.
- Kuwata, M., & Hogg, P. J. (2011a). Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 2- Mode-II testing. *Composites Part A*, 42(10), 1560-1570.
- Kuwata, M., & Hogg, P. J. (2011b). Interlaminar toughness of interleaved CFRP using non-woven veils: Part 1- Mode-I testing. *Composites Part A*, 42(10), 1551-1559.
- Lee, S. H., Kim, H., Hang, S., & Cheong, S. K. (2012). Interlaminar fracture toughness of composite laminates with CNT-enhanced nonwoven carbon tissue interleave. *Composites Science and Technology*, 73(1), 1-8.
- Lee, S. H., Noguchi, H., Kim, Y. B., & Cheong, S. K. (2002). Effect of interleaved non-woven carbon tissue on interlaminar fracture toughness of laminated composites: Part I - Mode II. *Journal of Composite Materials*, 36(18), 2153-2168.
- Lee, S., Lee, J., Cheong, S., & Noguchi, H. (2007). A toughening and strengthening technique of hybrid composites with non-woven tissue. *Journal of Materials Processing Technology*, 7, 21-29.
- Lee, S.H., Noguchi, H., Kim, Y.B., Cheong, S.K. (2002). Effect of interleaved non-woven carbon tissue on interlaminar fracture toughness of laminated composites : Part II- Mode I. *Journal of Composite Materials*, 36(18), 2169-2181.
- Long, A. C. (2001). Process modelling for liquid moulding of braided preforms. *Composites Part A*, 32(7), 941-953.
- Lv, G., Zhang, N., Huang, M., Shen, C., Castro, J., Tan, K., Liu, X., & Liu, C. (2018). The remarkably enhanced particle erosion resistance and toughness properties of glass fiber/epoxy composites via thermoplastic polyurethane nonwoven fabric. *Polymer Testing*, 69, 470-477.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering*. CRC Press, 40-178.
- Miravete, A. (1999). *3D Textile Reinforcements In Composite Materials*. Woodhead Publishing, 169-196.
- Nash, N. H., Ray, D., Young, T. M., & Stanley, W. F. (2015). The influence of hydrothermal conditioning on the Mode-I, thermal and flexural properties of Carbon/Benzoxazine composites with a thermoplastic toughening interlayer. *Composites Part A*, 76, 135-144.
- Nasu, S., Ohtani, A., Nakai, A., & Hamada, H. (2010). Deformation behavior and mechanical properties of braided rectangular pipes. *Composite Structures*, 92(3), 752-756.

- Padaki, N. V, Alagirusamy, R., & Sugun, B. S. (2006). Knitted preforms for composite applications. *Journal of Industrial Textiles*, 35(4), 295-321.
- Prichard, J.C. & Hogg, P.J. (1990). The role of impact damage in post-impact compression testing. *Composites*, 21(6), 503-511.
- Quan, D., Bologna, F., Scarselli, G., Ivankovic, A., & Murphy, N. (2020). Interlaminar fracture toughness of aerospace-grade carbon fibre reinforced plastics interleaved with thermoplastic veils. *Composites Part A*, 128, 105642.
- Quan, D., Bologna, F., Scarselli, G., Ivanković, A., & Murphy, N. (2020). Mode-II fracture behaviour of aerospace-grade carbon fibre/epoxy composites interleaved with thermoplastic veils. *Composites Science and Technology*, 191, 108065.
- Ramirez, V. A., Hogg, P. J., & Sampson, W. W. (2015). The influence of the nonwoven veil architectures on interlaminar fracture toughness of interleaved composites. *Composites Science and Technology*, 110, 103-110.
- Ruggeri, R., Martin, R. E., & Mccorkle, L. S. (2015). Impact Behavior of Composite Fan Blade Leading Edge Subcomponent with Thermoplastic Polyurethane Interleave. *20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen*, 19-24.
- Saz-orozco, D., Ray, D., & Stanley, W. F. (2017). Effect of thermoplastic veils on interlaminar fracture toughness of a glass fiber/vinyl ester composite. *Polymer Composites*, 38(11), 2501-2508.
- Sierakowski, R. L., & Newaz, G. M. (2018). *Damage Tolerance In Advanced Composites*. Routledge, 68-144.
- Sohn, M. S., Hu, X. Z., Kim, J. K., & Walker, L. (2000). Impact damage characterization of carbon fibre/epoxy composites with multi-layer reinforcement. *Composites Part B*, 31(8), 681-691.
- Sohn, Min Seok, & Hu, X. Z. (1998). Processing of carbon-fibre/epoxy composites with cost-effective interlaminar reinforcement. *Composites Science and Technology*, 58(2), 211-220.
- Tausif, M., & Russell, S. J. (2012). Characterisation of the z-directional tensile strength of composite hydroentangled nonwovens. *Polymer Testing*, 31(7), 944-952.
- Tzetzis, D., & Hogg, P. J. (2006). Bondline toughening of vacuum infused composite repairs. *Composites Part*, 37(9), 1239-1251.
- Uchida, H., Yamamoto, T., & Takashima, H. (2008). Development of low cost damage resistant composites. *Muratec Murata Machinery Ltd*, 14.

- Vandeurzen, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (1999). Mechanical modelling of solid woven fabric composites. Woodhead Publishing, 47-89.
- Walker, L., Sohn, M. S., & Hu, X. Z. (2002). Improving impact resistance of carbon-fibre composites through interlaminar reinforcement. *Composites Part A*, 33(6), 893-902.
- Wong, D. W. Y., Lin, L., McGrail, P. T., Peijs, T., & Hogg, P. J. (2010). Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres. *Composites Part A*, 41(6), 759-767.
- Yuan, B., Tan, B., Hu, Y., Shaw, J., & Hu, X. (2019). Improving impact resistance and residual compressive strength of carbon fibre composites using un-bonded non-woven short aramid fibre veil. *Composites Part A*, 121, 439-448.
- Zhu, L. (2013). Investigations on damage resistance of carbon fiber composite panels toughened using veils. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(3), 807-813.