

Karbon/Kenevir/Polipropilen Hibrit Kompozitlerde Katman Diziliminin Mekanik ve Hasar Davranışına Etkisi

Burak ÖZTAŞ^{1,a}, Gaye KAYA^{1,b}, Banu YILMAZ AKYÜREK^{2,c}, Tuğrul AKSOY^{1,d}

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

²Mersin Üniversitesi, Güzel Sanatlar Fakültesi, Tekstil ve Moda Tasarımı Bölümü, Mersin, Türkiye

^aORCID: 0000-0002-8789-155X; ^bORCID: 0000-0003-1866-4799; ^cORCID: 0000-0003-3526-5343;

^dORCID: 0009-0000-0615-675X

Makale Bilgileri

Geliş : 31.03.2026

Kabul : 21.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1919970

Sorumlu Yazar

Burak ÖZTAŞ

burakoztas46@gmail.com

Anahtar Kelimeler

Hibrit kompozitler

Kenevir lifi

Karbon lifi

Katman dizilimi

Ultrasonik hasar analizi

Atf şekli: ÖZTAŞ, B., KAYA, G., YILMAZ AKYÜREK, B., AKSOY, T., (2026). Karbon/Kenevir/Polipropilen Hibrit Kompozitlerde Katman Diziliminin Mekanik ve Hasar Davranışına Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(2), 445-456.

ÖZ

Bu çalışmada Karbon/Kenevir/Polipropilen dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hibrit kompozitlerin özellikleri, atkı ve çözgü yönlerinde gerçekleştirilen 3-nokta eğme ve çentiksiz Charpy darbe testleri ile belirlenmiştir. Eğme testi sonrası kompozit yapılarda oluşan iç hasarların belirlenmesi amacıyla ultrasonik C-tarama analizleri uygulanmıştır. Karbon kumaş katmanlarının dış yüzeylerde yer aldığı dizilimlerde eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri artmıştır. Buna karşılık, Kenevir/Polipropilen katmanlarının dış yüzeylerde bulunduğu kompozitlerde ise deformasyonda artış ve daha sünek bir davranış gözlenmiştir. Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmeleri kompozit yapının dış yüzeylerinde olduğundan, dış katmanlarda bulunan lif türü eğme dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Ultrasonik analizler, hasar alanlarının katman dizilimine ve atkı/çözgü yönlerinde bulunan lif türlerine bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Bulgular, hibrit dokuma kompozitlerin tasarımında katman diziliminin mekanik performans ve hasar davranışı üzerinde belirleyici bir parametre olduğunu göstermiştir.

Effect of Stacking Sequence on the Mechanical and Damage Behavior of Carbon/Hemp/Polypropylene Hybrid Composites

Article Info

Received : 31.03.2026

Accepted : 21.04.2026

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1919970

Corresponding Author

Burak ÖZTAŞ

burakoztas46@gmail.com

Keywords

Hybrid composites

Hemp fiber

Carbon fiber

Stacking sequence

Ultrasonic damage analysis

How to cite: ÖZTAŞ, B., KAYA, G., YILMAZ AKYÜREK, B., AKSOY, T., (2026). Effect of Stacking Sequence on the Mechanical and Damage Behavior of Carbon/Hemp/Polypropylene Hybrid Composites. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(2), 445-456.

ABSTRACT

In this study, the effects of stacking sequence on the mechanical behaviour and damage evolution of Carbon/Hemp/Polypropylene woven fabric reinforced hybrid composites were investigated. The mechanical properties of the hybrid composites were determined by 3-point bending and unnotched Charpy impact tests at the warp and weft directions. Ultrasonic C-scan analyses were performed to characterize the internal damage induced after bending tests. Carbon fabric layers positioned on the outer surfaces exhibited higher flexural strength and flexural modulus values. In contrast, composites with Hemp/Polypropylene layers located at the surfaces demonstrated increased deformation and a more ductile behaviour. Under flexural loads, tensile and compressive stresses are localized at the outer surfaces of the composites in which the fibre type and stacking sequence in the outer layers exert a dominant influence on the flexural strength of the composite structures. Ultrasonic analyses revealed that the extent and distribution of damage areas varied depending on the stacking sequence and the fibre types aligned in the warp and weft directions. It was concluded that stacking sequence is a critical design parameter on the mechanical performance and damage behaviour of hybrid woven composites.

1. GİRİŞ

Son yıllarda çevresel sürdürülebilirlik ve ekolojik farkındalığın artmasıyla birlikte doğal lif takviyeli kompozit malzemelere olan ilgi önemli ölçüde artmıştır [1,2]. Özellikle kenevir, sisal ve jüt gibi doğal lifler [3] kolay temin edilebilir olmaları ve nispeten düşük maliyetleri nedeniyle kompozit malzemelerde potansiyel takviye elemanları olarak öne çıkmaktadır [4]. Bu avantajlar sayesinde doğal lif takviyeli kompozitler, otomotiv ve yapı sektörleri başta olmak üzere birçok mühendislik uygulamasında giderek daha yaygın şekilde kullanılmaktadır [5-8]. Ancak, doğal lif takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri genel olarak karbon veya cam lifi gibi sentetik liflerle takviye edilen kompozitlere kıyasla daha düşüktür [9-10]. Karbon lifi takviyeli kompozitler yüksek dayanım ve rijitlik gibi önemli avantajlara sahip olmalarına rağmen, yüksek maliyetleri ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri nedeniyle kullanım alanları bazı uygulamalarda sınırlanabilmektedir [11]. Bu nedenle doğal lif takviyeli kompozitler, karbon esaslı kompozitlere göre daha düşük mekanik performans sergilemelerine rağmen, biyo-bozunurluk, çevre dostu olma ve ekonomik avantajları sayesinde endüstriyel uygulamalarda dikkat çekici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [12]. Tüm bu süreçler göz önüne alındığında araştırmaların odağı doğal ve sentetik lif takviyelerinin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitler üzerine yoğunlaşmaktadır [13]. Farklı lif türlerinin aynı kompozit içerisinde kullanılması, her bir lif tipinin dezavantajlarını azaltırken avantajlarını korumayı amaçlamaktadır [14,15]. Ayrıca farklı katman dizilimlerine sahip kompozitlerin hasar oluşumu ve kırılma mekanizmaları üzerinde önemli etkiler oluşturabildiği bilinmektedir [16]. Özellikle eğilme yükleri altında dış katmanlarda yer alan takviye türü, kompozitin dayanım ve rijitlik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir [17].

Literatürde kenevir lif takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Kenevir lifi, kompozit takviyesinin yanı sıra sürdürülebilir tekstil endüstriyel uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [18,19]. Bhoopathi ve arkadaşları [20] kenevir ve cam liflerinden oluşan hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiş ve hibrit kompozitlerin çekme, eğilme ve darbe dayanımlarında iyileşme sağlayabildiğini ifade etmiştir. Benzer şekilde [21] kenevir lif takviyeli epoksi ve polyester kompozitleri karşılaştırmış ve epoksi matrisli kompozitlerin daha yüksek çekme ve eğme dayanımı sergilediğini göstermiştir. Rouison ve arkadaşları [22] ise kenevir ve cam lifi takviyeli kompozitlerin mekanik davranışını incelemiş ve lif oranındaki artışın kompozitteki mekanik özellikler üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Biyo-kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar da doğal lif içeriğinin mekanik performans üzerindeki önemli rolünü ortaya koymaktadır. Ochi [23], manila keneviri takviyeli biyo-bozunur kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemiş ve lif takviyesinin artmasıyla birlikte çekme ve eğme dayanımlarında artış gözlemlendiğini bildirmiştir. Benzer şekilde Mohanavel ve arkadaşları [24] kenevir ve pamuk liflerinden oluşan biyo-kompozitlerin mekanik davranışını incelemiş ve kenevir lifi takviyesindeki artışın kompozit malzemelerin çekme dayanımını artırdığını ifade etmiştir. Son yıllarda doğal ve sentetik liflerin birlikte kullanıldığı hibrit kompozitler üzerine yapılan çalışmalar da artmaktadır. Ahmad ve arkadaşları [15] kenevir ve polietilen liflerinden oluşan hibrit dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin yalnızca kenevir içeren kompozitlere kıyasla daha yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımı sergilediğini belirtmiştir. Benzer şekilde Pulleti ve Singh [25] kenevir liflerinin karbon ve cam lifleri ile hibritlenmesi sonucu elde edilen kompozitlerde lif diziliminin eğilme dayanımı ve katlar arası kayma dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Ayrıca De Fazio ve arkadaşları [26] kenevir ve karbon liflerinden oluşan hibrit kompozitlerin darbe davranışını incelemiş ve hibrit kompozitlerin karbon kompozitlere kıyasla daha sünek bir davranış sergileyebildiğini belirtmiştir. Pinto ve arkadaşları [14] ise kenevir ve karbon dokuma kumaşların birlikte kullanıldığı hibrit kompozitlerde karbon liflerin gevrek kırılma davranışının kenevir liflerinin sünek deformasyonu ile birleşmesi sonucunda kompozit malzemelerin hasar toleransının arttığını göstermiştir.

Literatürdeki bu çalışmalar kenevir lifi takviyeli kompozitlerde lif türü, matris yapısı ve hibritleşmenin mekanik performans üzerinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ancak, Kenevir liflerinin Polipropilen (PP) lifleri ile hibrit dokunduğu ve geliştirilen bu hibrit dokuma kumaşların Karbon lifleri ile katmanlar arası hibritlendiği bir çalışmaya rastlanamamıştır. Ayrıca, katman diziliminin hibrit dokuma kompozitlerin mekanik davranışı ve hasar gelişimi üzerindeki etkisinin tahribatsız muayene yöntemleri ile birlikte değerlendirildiği çalışmalar sınırlıdır.

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, çözgü yönünde PP ve atkı yönünde Kenevir liflerinin kullanıldığı hibrit dokuma kumaşlar geliştirilmiştir. Bu kumaşlar, Karbon dokuma kumaşlar ile

farklı katman dizilimlerinde hibritlenerek epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemine göre kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Hibrit kompozitlerin özellikleri, atkı ve çözgü yönlerinde gerçekleştirilen 3-nokta eğme ve çentiksiz Charpy darbe testleri ile belirlenmiştir. Eğme testi sonrası kompozit yapılarda oluşan iç hasarların belirlenmesi amacıyla ultrasonik C-tarama analizleri uygulanmıştır.

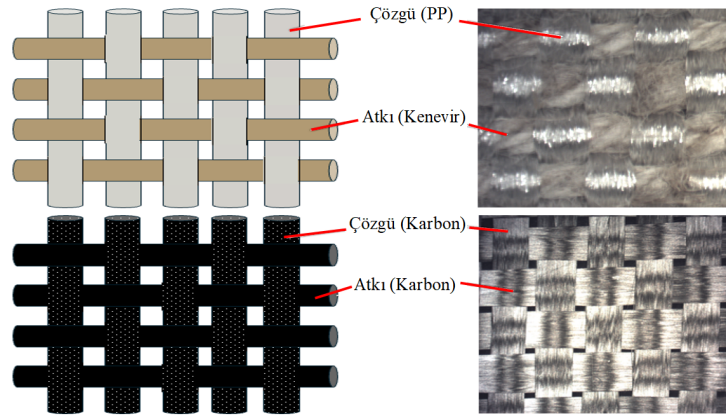
2. YÖNTEM

2.1. Kumaş Yapıları ve Özellikleri

Hibrit kompozitlerde kullanılan kumaşların özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur. Kenevir/PP hibrit dokuma kumaşlar, manuel dokuma tezgâhı kullanılarak (GARM-55, Türkiye) üretilmiştir. Çözgü yönünde PP lifleri (150 tex), atkı yönünde ise Kenevir lifleri (Nm 2,7) lifleri kullanılmıştır. Bezayağı örgü tipinde dokunan Kenevir/PP kumaşın kalınlığı 1,37 mm, gramajı ise 420 g/m² olarak belirlenmiştir. Kenevir/PP dokuma kumaşın kenevir lifi oranı ağırlıkça %65, PP oranı ise ağırlıkça %35’tir. Karbon dokuma kumaş (Dost Kimya, Türkiye) hem atkı hem de çözgü yönünde 3K Karbon lifinden oluşan, 0,31 mm kalınlık ve 225 g/m² gramaja sahiptir. Kenevir/PP kumaşın çözgü krimp, atkı krimpinden yüksektir. Bu da çözgü yönünde kullanılan polipropilen ipliğin tekstüre yapısından ve atkı yönündeki kenevir ipliğin görece rijitliğinden kaynaklanmaktadır. Karbon kumaşa ise hem çözgü hem de atkı yönündeki krimp olanları, karbon lifinin rijit yapısından dolayı Kenevir/PP kumaşa kıyasla daha düşüktür. Şekil 1’de, her iki kumaşın şematik ve mikroskopik görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 1. Kumaşların özellikleri

Kumaş tipi	Örgü tipi	İplik		Sıklık (tel/cm)		Krimp (%)		Gramaj (g/m ²)	Kalınlık (mm)
		Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı		
Kenevir/PP	Bezayağı	PP	Kenevir	4,5	5	21	7	420	1,37
Karbon	Bezayağı	Karbon	Karbon	2,5	3	1	3	225	0,31



Şekil 1. Kumaşların şematik ve mikroskopik görüntüleri (×10 büyütme oranı)

2.2. Kompozit Üretimi

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitler vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Matris malzemesi olarak Hexion MGS L160 epoksi reçinesi ve Hexion MGS H160 sertleştiricisi kullanılmış olup reçine ve sertleştirici üretici tavsiyelerine uygun olarak 100:25 ağırlık oranında karıştırılmıştır. Reçine infüzyon işlemi oda sıcaklığında vakum altında gerçekleştirilmiş ve ardından kompozit yapılar 80 °C’de 2 saat süreyle kürlenmiştir. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen kompozit yapılar CNC kesim makinesi kullanılarak kompozit testlerine uygun boyutlarda deney numuneleri halinde hazırlanmıştır. Deneyisel çalışma kapsamında farklı katman dizilimlerine sahip kompozitler üretilmiştir. Referans olarak yalnızca Karbon dokuma kumaştan oluşan (C) ve yalnızca Kenevir/PP kumaştan oluşan (H) kompozitler üretilmiştir. Kompozit yapıların katman dizilimleri Çizelge 2’de gösterilmiştir. Karbon kumaşın dış katmanda kullanıldığı (CHC) ve Kenevir/PP kumaşın dış katmanda kullanıldığı (HCH) farklı katman dizilimleri, referans kompozitlerle karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2. Kompozit yapıların katman dizilimlerinin tanımlanması

Kod	Katman dizilimi	Şematik gösterim
C	6C	
H	3H	
CHC	3C/1H/3C	
HCH	1H/3C/1H	

2.3. Kompozit Yoğunluğu ve Lif Miktarı Tayini

Hibrit kompozitlerin yoğunlukları, ASTM D792-13 standardına uygun olarak Precisa® XP205 densimetre kullanılarak ölçülmüştür. Hibrit kompozitlerin lif miktarı tayini, farklı lif tiplerini içermesinden dolayı mekanik ayırma yöntemi ile yapılmıştır. Hibrit dokuma kumaşlar 3 × 3 cm boyutlarında kesilmiş ve tartılmıştır. Kenevir/PP dokuma kumaşı oluşturan Kenevir ve PP lifleri mekanik olarak ayrılmış ve ayrı ayrı tartılmıştır. Kompozit yapılar da 3 × 3 cm boyutlarında kesilmiş ve kompozit yapılardaki matris miktarının belirlenmesi için tartılmıştır. Yoğunluk ve lif miktarı tayinleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

2.4. Eğme Testi

Hibrit kompozitlerin eğme testleri, ASTM D790 standardına uygun olarak 3-nokta eğme düzeneğinde Hounsfield H5KS universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 2 mm/dak. hızda yapılmıştır. Numune boyutları 80 × 25 mm olarak hazırlanmış ve mesnet açıklığı 50 mm olarak ayarlanmıştır. Eğme testleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak hem atkı hem de çözgü yönünün normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Eğme dayanımı ve eğme modülü değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S = 3PL/2bd^2 \quad (1)$$

$$E = L^3m/4bd^3 \quad (2)$$

Burada; S eğilme dayanımını (MPa), E eğme modülünü (MPa), P maksimum yükü (N), L mesnetler arası mesafeyi (mm), b numune genişliğini (mm), d numune kalınlığını (mm) ve m yük sehmi eğrisinin başlangıç eğimini (N/mm) ifade etmektedir.

2.5. Charpy Darbe Testi

Hibrit kompozitlerin Charpy darbe testleri, ISO 180:2000 standardına uygun olarak çentiksiz numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 55 × 10 mm olarak hazırlanmış olup darbe enerjisi 22 J kapasiteli Charpy darbe test cihazı ile ölçülmüştür. Charpy darbe testleri, her bir kompozit tipi için üçer tekrarlı olarak hem atkı hem de çözgü yönünün normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Charpy darbe dayanımı değerleri, aşağıdaki Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

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

Burada; A Charpy darbe dayanımını (kJ/m^2), Ec numunenin kırılması sırasında absorbe edilen enerjiyi (J) h numune kalınlığını (mm) ve b numune genişliğini (mm) ifade etmektedir.

2.6. Ultrasonik C-Tarama

Hibrit kompozitlerde eğme testi sonra oluşan hasar bölgelerini belirlemek amacıyla ultrasonik C-tarama testleri uygulanmıştır. Ölçümler TTU (Through Transmission Ultrasonic) prob kullanılarak gerçekleştirilmiş ve taramalar 3.5 MHz frekansta yapılmıştır. Geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile test öncesi ve sonrası hasarlı alan oranı karşılaştırılarak hasar gelişimi değerlendirilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Kompozit Yoğunluğu ve Lif Miktarı Sonuçları

Hibrit kompozitlerin yoğunluk ve lif miktarı sonuçları Çizelge 3'te sunulmuştur. Buna göre; Karbon kompozitlerin (C) kompozit yoğunluğu, Kenevir/PP (H) kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Karbon lifinin, Kenevir lifine kıyasla daha düşük lif yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, Kenevir/PP kumaşa %35 oranında bulunan polipropilen liflerinin düşük yoğunluğu, Kenevir/PP kumaşın kullanıldığı kompozit yapıların yoğunluk değerlerinde düşüşe sebebiyet vermiştir. Buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitlerin yoğunluk değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kenevir/PP kompozitlerin (H) ağırlıkça lif miktarı değerleri, Karbon (C) kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitleri lif miktarı değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. CHC hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranı %33,66 iken, HCH hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranı %22,03 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3. Kompozitlerin özellikleri

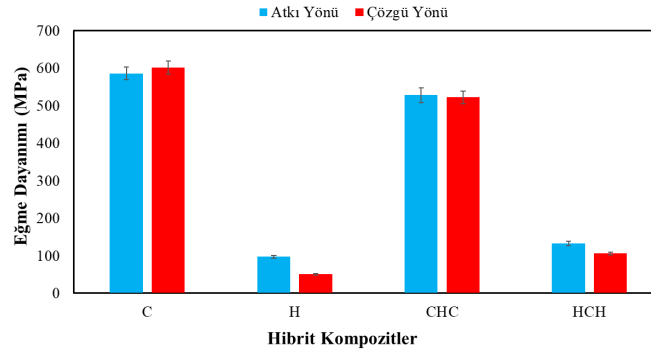
Kod	Yoğunluk (g/cm^3)	Karbon (Ağırlıkça, %)	Kenevir/PP (Ağırlıkça, %)	Toplam lif miktarı (Ağırlıkça, %)	Kalınlık (mm)
C	1,42 ($\pm 0,06$)	47,34 ($\pm 0,12$)	-	47,34 ($\pm 0,08$)	1,49($\pm 0,02$)
H	1,18 ($\pm 0,04$)	-	61,42 ($\pm 0,16$)	61,42 ($\pm 0,11$)	3,22($\pm 0,03$)
CHC	1,32 ($\pm 0,07$)	33,66 ($\pm 0,09$)	12,67 ($\pm 0,09$)	46,33 ($\pm 0,13$)	2,60($\pm 0,03$)
HCH	1,24 ($\pm 0,05$)	22,03 ($\pm 0,11$)	33,16 ($\pm 0,13$)	55,19 ($\pm 0,09$)	2,98($\pm 0,07$)

3.2. Eğme Testi Sonuçları

Hibrit kompozitlerin eğme testi sonuçları Çizelge 4'te sunulmuştur. Şekil 2'de, atkı ve çözgü yönü eğme dayanımı değerleri verilmiştir. Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme dayanımı değerlerini sergilediği görülmüştür. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme dayanımı değerlerinin hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerin dokuma yapısı dikkate alındığında, atkı yönünde kenevir liflerinin, çözgü yönünde ise PP liflerinin bulunduğu görülmektedir. Bu nedenle mekanik özelliklerde yönelime bağlı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Kenevir liflerinin PP liflerine kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle atkı yönünde elde edilen eğme dayanımı değerleri çözgü yönüne göre daha yüksek gerçekleşmiştir. Farklı katman dizilimlerindeki hibrit kompozitlerde ise, CHC kompozit yapıların eğme dayanımının, Karbon kompozitlere (C) oldukça yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum, karbon katmanlarının kompozit içerisinde önemli bir yük taşıma rolü üstlenmesinin yanı sıra, üst yüzeyde kullanılmasının eğme dayanımını artırdığını göstermektedir. Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozit yapılarda daha yüksek eğme dayanımı değerleri elde edilirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde bu değerlerin daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Ancak, HCH numunelerinde dış yüzeylerde Kenevir/PP katmanlarının bulunması nedeniyle eğme dayanımı daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir. CHC hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranının, HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha fazla olması, eğme dayanım değerlerindeki artışa katkı sağlamıştır. Katman diziliminin kompozitlerin eğme davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir [5,27].

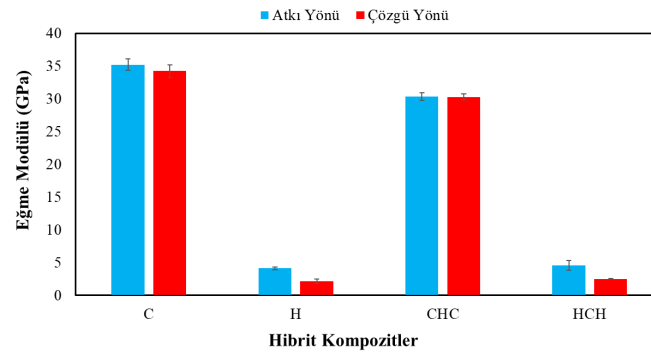
Çizelge 4. Kompozitlerin eğme testi sonuçları

Test yönü	Kod	Eğme dayanımı (MPa)	Eğme modülü (MPa)
Atkı	C	586,29 ($\pm 16,99$)	35,23 ($\pm 0,90$)
	H	97,72 ($\pm 3,68$)	4,11 ($\pm 0,19$)
	CHC	528,26 ($\pm 19,82$)	30,36 ($\pm 0,57$)
	HCH	132,70 ($\pm 5,48$)	4,55 ($\pm 0,74$)
Çözü	C	601,51 ($\pm 18,09$)	34,27 ($\pm 0,96$)
	H	50,42 ($\pm 2,35$)	2,12 ($\pm 0,33$)
	CHC	522,49 ($\pm 17,06$)	30,30 ($\pm 0,46$)
	HCH	106,44 ($\pm 3,57$)	2,50 ($\pm 0,027$)



Şekil 2. Kompozitlerin atkı ve çözgü yönü eğme dayanımı değerleri

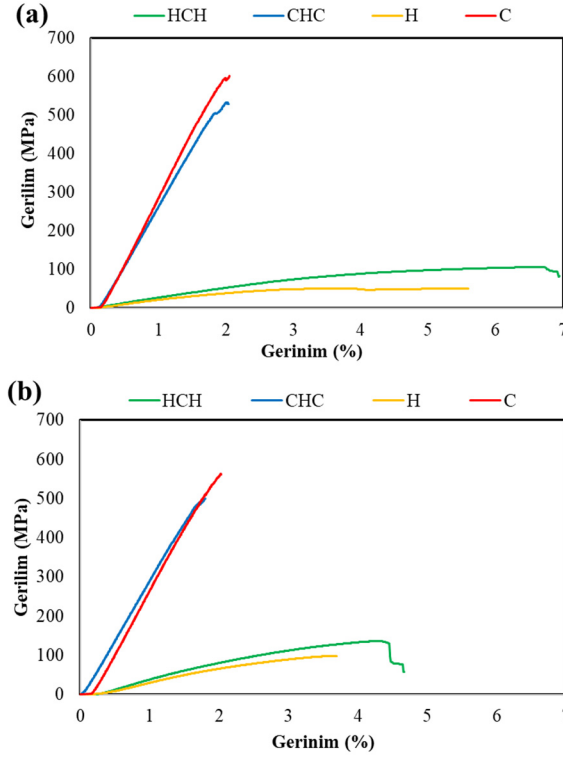
Şekil 3'te, atkı ve çözgü yönü eğme modülü değerleri verilmiştir. Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme modülü değerlerini sergilediği, bu yapıyı CHC hibrit kompozitlerin izlediği görülmüştür. Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme modülü değerlerinin hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. HCH hibrit kompozitlerin eğme modülü, H kompozitlere kıyasla daha yüksektir. Bu durum karbon liflerinin yük altında daha sınırlı şekil değişimine uğraması ve yük aktarımını daha etkin şekilde gerçekleştirmesi ile ilişkilendirilebilir. Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmeleri kompozit yapının dış yüzeylerinde olduğundan, dış katmanlarda bulunan lif türü eğme dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.



Şekil 3. Kompozitlerin atkı ve çözgü yönü eğme modülü değerleri

Şekil 4'te, hibrit kompozitlerin çözgü ve atkı yönü eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri sunulmuştur. Kenevir/PP (H) kompozitlerin deformasyon kapasitesinin daha yüksek olduğu ve sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, Kenevir ve PP liflerinin yüksek şekil değiştirme kabiliyetinden kaynaklanmaktadır. Karbon kompozitler (C) ise deformasyon daha sınırlı kalmakta ve kırılmanın daha ani bir şekilde gerçekleştiği gevrek davranış meydana gelmektedir. Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozitlerde (CHC) daha gevrek davranış izlenirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde (HCH) daha sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Ancak, HCH numunelerinde dış yüzeylerde Kenevir/PP katmanlarının bulunması nedeniyle eğme dayanımı daha düşük değerlerde

gerçekleşmiştir. HCH hibrit kompozitlerde Karbon lifi oranının, HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha fazla olması, kompozit yapıların yük altındaki davranışını etkilemiştir. Eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin eğme davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Karbon katmanlarının dış yüzeyde konumlanması eğme dayanım/modülünü artırırken, Kenevir/PP katmanlar, kompozit yapının deformasyon kapasitesinin artmasına katkı sağlamaktadır.



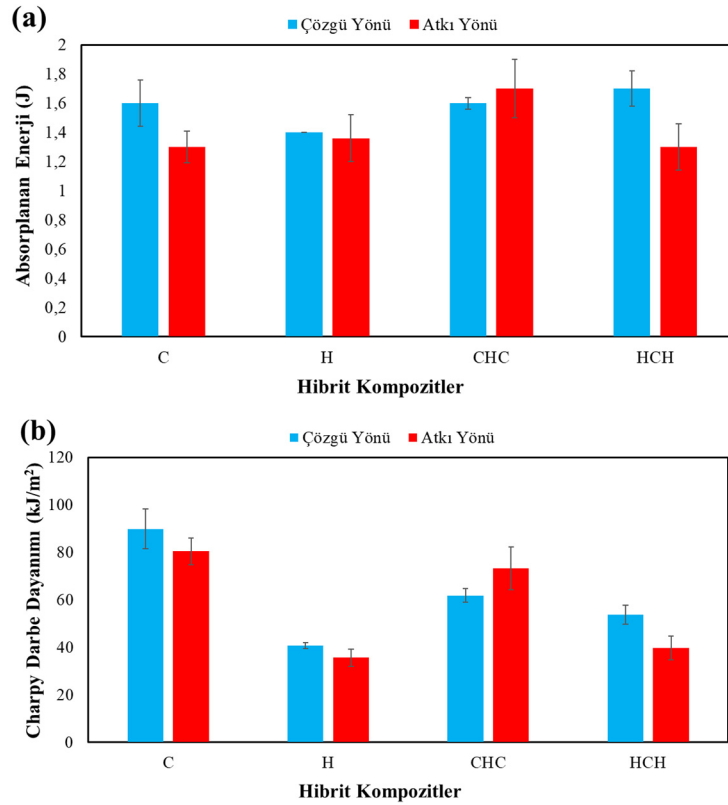
Şekil 4. Kompozitlerin çözü (a) ve atkı (b) yönü eğme dayanımı gerilim-gerinim eğrileri

3.3. Charpy Darbe Testi Sonuçları

Hibrit kompozitlerin Charpy darbe testi absorplanan enerji ve darbe dayanımı değerleri Çizelge 5 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Hibrit kompozitlerin darbe davranışının lif türü ve katman dizilimine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Karbon kompozitler (C) hem atkı hem de çözü yönünde de en yüksek darbe dayanımı değerlerini göstermiştir. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mukavemet özellikleri sayesinde darbe sırasında oluşan yükleri daha etkin şekilde taşıyabilmesi ile ilişkilendirilebilir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde darbe dayanımı değerleri karbon içeren kompozitlere kıyasla daha düşük bulunmuştur. Hibrit kompozitler incelendiğinde, CHC numunelerinde darbe dayanımı değerlerinin HCH numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum CHC kompozit yapıda, Karbon kumaşın dış yüzeyde bulunması ve Karbon lif miktarının daha yüksek olması, bu liflerin sahip olduğu yüksek dayanım/modül özelliklerini darbe esaslı yüklemde etkin bir biçimde ortaya çıkarmıştır. Buna karşılık HCH kompozitlerde, dış yüzeyde Kenevir/PP kumaşın bulunması ve düşük Karbon lif miktarından dolayı darbe dayanımı da daha düşük değerlerde gerçekleşmiştir.

Çizelge 5. Kompozitlerin Charpy darbe testi sonuçları

Kod	Absorplanan enerji (J)		Charpy darbe dayanımı (kJ/m ²)	
	Çözü	Atkı	Çözü	Atkı
C	1,6 (±0,16)	1,30 (±0,11)	89,86 (±8,42)	80,46 (±5,56)
H	1,4 (±0,00)	1,36 (±0,16)	40,76 (±1,29)	35,61 (±3,71)
CHC	1,6 (±0,04)	1,70 (±0,20)	61,88 (±2,97)	73,28 (±9,11)
HCH	1,7(±0,12)	1,30 (±0,16)	53,81 (±3,97)	39,75 (±4,94)



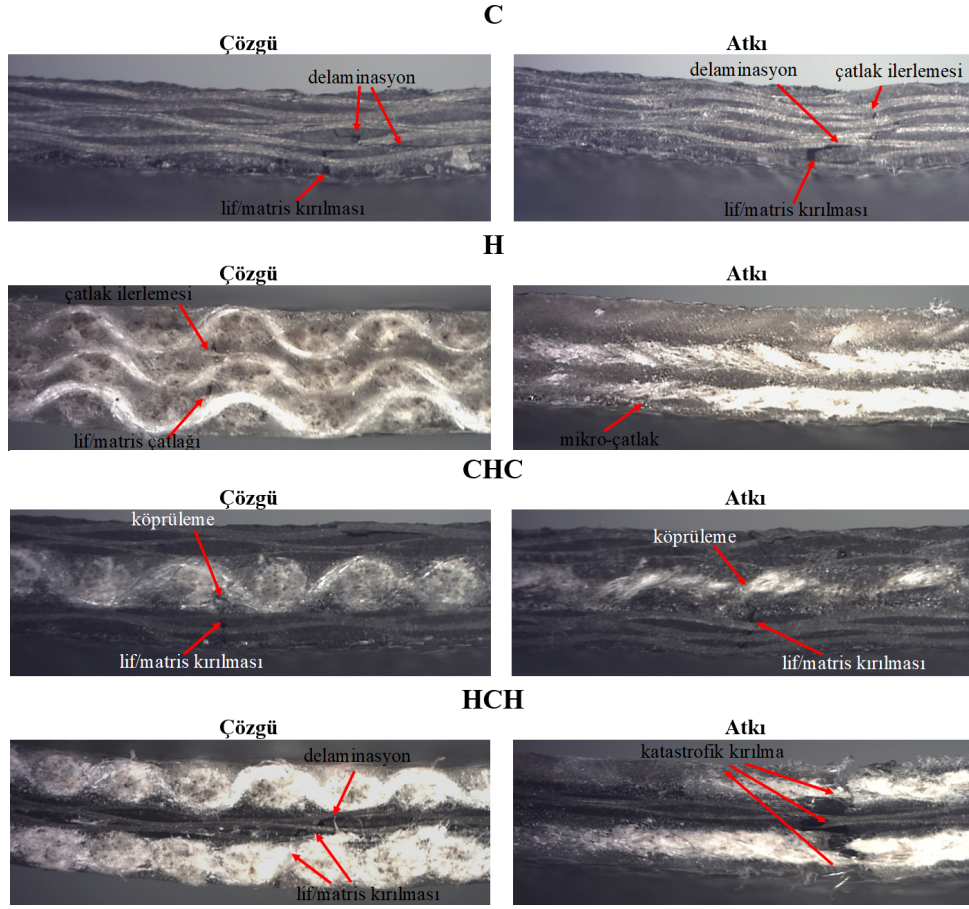
Şekil 5. Kompozitlerin Charpy darbe testi absorplanan enerji (a) ve darbe dayanımı (b) değerleri

Hibrit kompozitlerin absorplanan enerji değerlerinin de benzer bir eğilim gösterdiği görülmektedir. En yüksek enerji absorpsiyonu CHC kompozit yapıda atkı yönünde elde edilmiştir. Bu durum, Karbon liflerinin dayanımı ile Kenevir liflerinin deformasyon kabiliyetinin birlikte etkili olmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir ve hibrit kompozitlerde sünek ve gevrek davranışın birlikte bulunması enerji absorplama kapasitesini artırmıştır [4]. HCH numunelerinde ise özellikle çözgü yönünde daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir.

3.4. Hasar Analizi Sonuçları

3.4.1. Eğme Testi Sonrası Mikroskobik Hasar Analizi

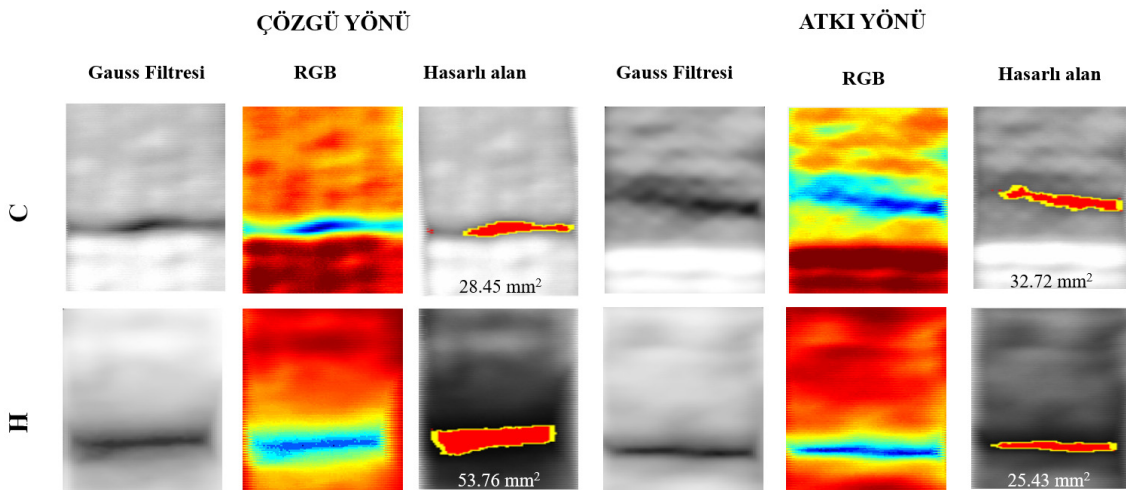
Eğme testi sonrası hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyleri mikroskobik olarak incelenmiş ve elde edilen görüntüler Şekil 6'da sunulmuştur. Karbon kompozitler (C), eğme yükü altında çekme yükünün gerçekleştiği alt yüzeyde hem çözgü hem de atkı yönünde lif ve matris kırılmalarına rastlanmıştır. Bu kırıkların katmanlar arasında ilerleyerek orta katmana ulaştığı ve burada delaminasyon hasarına yol açtığı görülmüştür. Bu durum, Karbon lifinin yük altındaki rijit davranışından kaynaklanmaktadır. Atkı yönünde, basma yüzeyine doğru çatlak ilerlemesine rastlanmıştır. Benzer kırılma davranışı, Karbon katmanlarının dış yüzeyde yer aldığı CHC kompozit yapılarında da oluşmuştur. Ancak, orta katmanda bulunan Kenevir/PP kumaş, özellikle çözgü yönünde köprüleme davranışı yaparak hasarın kalınlık boyunca ilerlemesini önleyerek lokalize etmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde, atkı yönünde kalınlık boyunca ilerleyen lif/matris çatlağı gerçekleşmiştir. Çözgü yönünde ise polipropilen lifinin sünek davranışından dolayı belirgin bir lif/matris kırılmasına rastlanmamış olup, delaminasyon esaslı mikro çatlaklar tespit edilmiştir. Kenevir/PP katmanlarının dış yüzeyde yer aldığı HCH kompozit yapılarında ise, çözgü yönündeki polipropilen liflerinin sünek yapısından dolayı yükü Karbon lifinden oluşan orta katmana iletmekle birlikte, katastrofik lif/matris kırılması gerçekleşmemiş olup delaminasyona sebebiyet vermiştir. Ancak, atkı yönündeki Kenevir liflerinin, polipropilen liflerine kıyasla görece gevrek davranışı, yükün yapının kalınlığı boyunca ilerlemesine sebebiyet vermiş ve katastrofik lif/matris kırılmaları meydana gelmiştir. Hibrit kompozitlerde, katman diziliminin hasar gelişimi üzerinde belirleyici bir rol oynadığı anlaşılmaktadır.



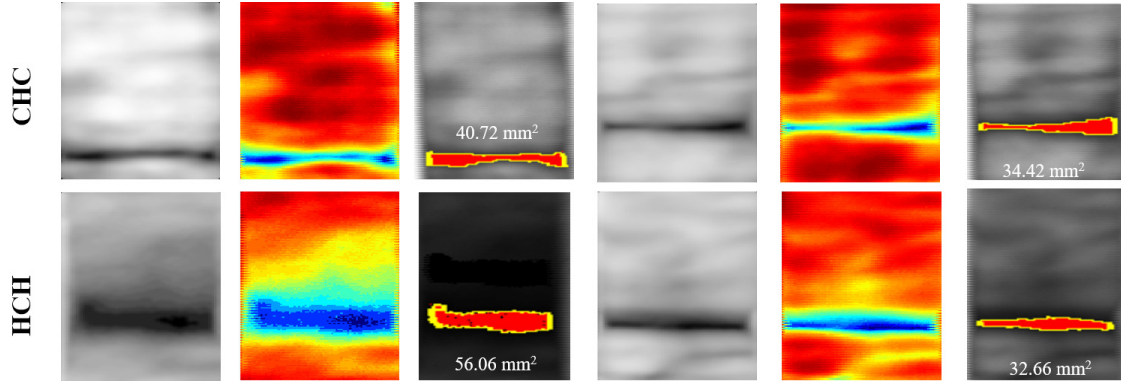
Şekil 6. Eğme testi sonrası kompozitlerin kırılma yüzeylerinin mikroskobik analizi ($\times 10$ büyütme oranı)

3.4.2. Eğme Testi Sonrası Ultrasonik C-Tarama Hasar Analizi

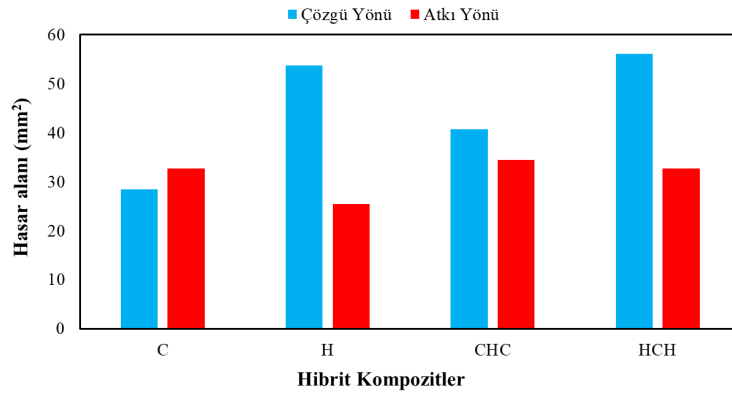
Hibrit kompozitlerin eğme testi sonrasında oluşabilecek iç hasarları belirlemek amacıyla Ultrasonik C-tarama analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen C-tarama görüntüleri, geliştirilen görüntü işleme algoritması ve Image J yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve hasarlı bölgelerin alanları mm^2 cinsinden hesaplanmıştır. Hasar alanlarının belirlenmesinde görüntüler üzerinde filtreleme ve eşikleme işlemleri uygulanarak hasarlı bölgeler piksel bazında tespit edilmiş, ardından bu değerler gerçek alan değerlerine dönüştürülmüştür. Ultrasonik C-tarama görüntüleri ve hasar alanı değerleri, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 7. Eğme testi sonrası kompozitlerin Ultrasonik C-tarama görüntüleri



Şekil 7. (devamı)



Şekil 8. Eğme testi sonrası kompozitlerin hasar alanı değerleri

Ultrasonik C-tarama görüntüleri incelendiğinde, hasar alanının kompozitlerdeki katman dizilimine ve yükleme yönüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Karbon kompozitlerde (C), atkı yönünde yaklaşık 32,72 mm², çözgü yönünde ise 28,45 mm² hasar alanı tespit edilmiştir. Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanımı nedeniyle eğme yükü altında sınırlı bir hasar alanı olduğu gözlenmiştir. Kenevir/PP (H) kompozitlerde ise, atkı yönündeki hasar alanı Karbon kompozitlerden (C) daha düşük olup 25,43 mm², çözgü yönündeki hasar alanı ise 53,76 mm² olarak belirlenmiştir. Atkı yönünde bulunan Kenevir lifleri hasarın daha sınırlı kalmasına katkı sağlamış olup, çözgü yönünde bulunan polipropilen liflerinin daha düşük mekanik özellikleri nedeniyle iç hasarın daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür. CHC hibrit kompozitlerde atkı yönünde 34,42 mm², çözgü yönünde ise 40,72 mm² hasar alanı ölçülmüştür. Karbon katmanlarının dış yüzeylerde bulunması eğme yükleri altında hasarın sınırlı kalmasına katkı sağlamış ve hasar alanının nispeten daha dengeli bir dağılım göstermesine neden olmuştur. HCH hibrit kompozitlerde ise atkı yönünde 32,66 mm², çözgü yönünde 56,06 mm² hasar alanı belirlenmiştir. HCH kompozit yapının dış katmanların Kenevir/PP kumaştan oluşması ve çözgü yönünde polipropilen liflerinin bulunması nedeniyle özellikle çözgü yönünde daha geniş hasar alanının olduğu görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, Karbon liflerinin dış katmanlarda bulunduğu kompozitlerde hasarın daha sınırlı kaldığı, buna karşılık doğal lif içeren kompozitlerin özellikle yöne bağlı olarak daha geniş hasar bölgeleri oluşturabildiği görülmektedir. Ultrasonik C-tarama sonuçları, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin hasar gelişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ayrıca elde edilen Ultrasonik C-tarama sonuçlarının, kompozit yapıların mekanik davranışı genel olarak uyumlu olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Karbon/Kenevir/PP dokuma kumaş takviyeli hibrit kompozitlerde katman diziliminin mekanik davranış ve hasar gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitlerin yoğunluk değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

- Kenevir/PP kompozitlerin (H) ağırlıkça lif miktarı değerlerinin, Karbon (C) kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu ve buna bağlı olarak, katman dizilimlerinde Karbon kumaşın daha fazla oranda kullanıldığı CHC hibrit kompozitleri lif miktarı değerlerinin, daha az oranda kullanıldığı HCH hibrit kompozitlere kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.
- Karbon kompozitlerin (C) hem atkı hem de çözgü yönünde en yüksek eğme dayanım ve modülünü sergilediği görülmüştür. Bu durum Karbon liflerinin yüksek mekanik dayanım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Buna karşılık, Kenevir/PP (H) kompozitlerde eğme dayanımı ve modülünün hem atkı hem de çözgü yönünde, Karbon kompozitlere (C) kıyasla oldukça düşük olduğu belirlenmiştir.
- Karbon liflerinin dış yüzeyde yer aldığı kompozit yapılarda (CHC) daha yüksek eğme dayanımı ve modülü elde edilirken, Kenevir/PP liflerinin dış yüzeyde bulunduğu kompozitlerde (HCH) daha düşük eğme dayanım ve modülü görülmüştür.
- Eğme yükü altında, çekme ve basma gerilmelerinin kompozit yapının dış yüzeylerinde oluşmasından dolayı, dış katmanlarda bulunan lif türünün eğme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir.
- En yüksek enerji absorpsiyonu CHC kompozit yapıda atkı yönünde elde edilmiştir. Bu durum, Karbon liflerinin dayanımı ile Kenevir liflerinin deformasyon kabiliyetinin birlikte etkili olmasıyla hibrit kompozitlerde sünek ve gevrek davranışın birlikte bulunmasının, kompozitlerin enerji absorplama kapasitesini artırdığını göstermiştir. HCH kompozit yapılarda ise özellikle çözgü yönünde daha yüksek enerji absorpsiyonu elde edilmiştir.
- Karbon liflerinin dış katmanlarda bulunduğu kompozitlerde hasarın daha sınırlı kaldığı, buna karşılık doğal lif içeren kompozitlerin özellikle yöne bağlı olarak daha geniş hasar bölgeleri oluşturabildiği görülmektedir. Ultrasonik C-tarama sonuçları, katman diziliminin ve kullanılan lif türünün kompozitlerin hasar gelişimi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.
- Sonuçlar hibrit kompozitlerde lif türü ve katman diziliminin mekanik ve darbe davranışı üzerinde etkili olduğunu ve hibritlemenin sinerjik etkisinin, kompozit yapısal tasarımında kullanılmasının bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Siouta, L., Apostolopoulou, M. & Bakolas, A. (2024). Natural fibers in composite materials for sustainable building: A state-of-the-art review on treated hemp fibers and hurds in mortars. In *Sustainability (Switzerland)*, 16(23), 10368, 1-26.
2. Meredith, J., Ebsworth, R., Coles, S. R., Wood, B. M. & Kirwan, K. (2012). Natural fibre composite energy absorption structures. *Composites Science and Technology*, 72(2), 211-217.
3. Silva, F. de A., Filho, R.D.T., Filho, J. de A.M. & Fairbairn, E. de M.R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 24(5), 777-785.
4. Ramesh, M., Palanikumar, K. & Reddy, K.H. (2013). Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites. *Composites Part B: Engineering*, 48, 1-9.
5. Malkapuram, R., Kumar, V., & Singh Negi, Y. (2009). Recent development in natural fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(10), 1169-1189.
6. Wambua, P., Ivens, J. & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63(9), 1259-1264.
7. Li, X., Tabil, L.G., Panigrahi, S. & Crerar, W.J. (2013). The Influence of Fiber Content on Properties of Injection Molded Flax Fiber-HDPE Biocomposites. *The Canadian Society for Bioengineering*, 1-10.
8. Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoo, N. & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856-873.
9. Mohanty, A.K., Misra, M. & Drzal, L.T. (2002). Sustainable Bio-Composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(1-2), 19-26.
10. Pickering, K.L., Efendy, M.G.A. & Le, T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.
11. Hegde, S., Satish Shenoy, B. & Chethan, K.N. (2019). Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance. *Materials Today: Proceedings*, 19, 658-662.

12. Mohammed, L., Ansari, M.N.M., Pua, G., Jawaaid, M. & Islam, M.S. (2015). A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications. In *International Journal of Polymer Science*, 1-15.
13. Boccarusso, L., Pinto, F., Myronidis, K., De Fazio, D. & Durante, M. (2023). Thin hybrid hemp/carbon fiber composites: Manufacturing, flexural, and impact behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(9), 3914-3922.
14. Pinto, F., Boccarusso, L., De Fazio, D., Cuomo, S., Durante, M. & Meo, M. (2020). Carbon/hemp bio-hybrid composites: Effects of the stacking sequence on flexural, damping and impact properties. *Composite Structures*, 242, 1-16.
15. Ahmad, M.A.A., Majid, M.S.A., Ridzuan, M.J.M., Firdaus, A.Z.A. & Amin, N.A.M. (2017). Tensile properties of interwoven hemp/PET (Polyethylene Terephthalate) epoxy hybrid composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 908(1), 1-6.
16. Ramesh, M., Palanikumar, K. & Hemachandra Reddy, K. (2016). Evaluation of Mechanical and Interfacial Properties of Sisal/Jute/Glass Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 69(10), Technical Paper 1-9.
17. Gujjala, R., Ojha, S., Acharya, S.K. & Pal, S.K. (2014). Mechanical properties of woven jute-glass hybrid-reinforced epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, 48(28), 1-12.
18. Doba Kadem, F. ve Özdemir, G. (2023). Sürdürülebilir tekstil liflerinden dokunmuş dijital baskılı kumaşların dikilebilirlik performansı üzerine deneysel bir çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(2), 433-440.
19. Palabıyık, İ., Körlü, A. ve Özçelik Kayseri, G. (2024). Kenevir içeren denim giysilerin terbiyesinde çevre dostu bir yöntem: ozon ile yıkama. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(4), 881-895.
20. Bhoopathi, R., Ramesh, M., Naveen Kumar, M., Sanjay Balaji, P. & Sasikala, G. (2018). Studies on mechanical strengths of hemp-glass fibre reinforced epoxy composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1), 1-8.
21. Neves, A.C.C., Rohen, L.A., Mantovani, D.P., Carvalho, J.P.R.G., Vieira, C.M.F., Lopes, F.P.D., Simonassi, N.T., Luz, F.S.D. & Monteiro, S.N. (2020). Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1-9.
22. Rouison, D., Sain, M. & Couturier, M. (2006). Resin transfer molding of hemp fiber composites: Optimization of the process and mechanical properties of the materials. *Composites Science and Technology*, 66(7-8), 895-906.
23. Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using Manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(11), 1879-1883.
24. Mohanavel, V., Sathish, T., Ravichandran, M., Ganeshan, P., Kumar, M.M.R. & Subbiah, R. (2021). Experimental investigations on mechanical properties of cotton/hemp fiber reinforced epoxy resin hybrid composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2027(1), 1-11.
25. Pulleti, S.S. & Singh, S.B. (2024). Development and characterization of hemp/carbon and hemp/glass hybrid and novel functionally graded hybrid composites for structural applications. *Polymer Composites*, 45(12), 11178-11199.
26. De Fazio, D., Cuomo, S., Boccarusso, L., Pinto, F., Durante, M. & Meo, M. (2019). Design and characterization of hybrid hemp/carbon laminates with improved impact resistance. *Materials Today: Proceedings*, 34, 194-201.
27. Karaçor, B. & Özcanlı, M. (2021). Effect of various matrix materials on mechanical properties of basalt/jute/glass fiber reinforced hybrid composites. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(4), 941-954.