

Karbon-Aramid/Epoksi Reçine Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe ve Darbe Sonrası Davranış Mekanizmaları Üzerine Sayısal ve Deneysel Çalışma

Umut ÇALIŞKAN^{*1}, İrem BAŞLI², Cihan BEZEN²

^{*1}Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

¹Havacılık Çalışmaları Uygulama ve Araştırma Merkezi, Erciyes Üniversitesi, KAYSERİ

²Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, KAYSERİ

(Alınış / Received: 28.01.2025, Kabul / Accepted: 20.04.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2025)

Anahtar Kelimeler

Karbon fiber kompozit,
Aramid,
Sonlu elemanlar metodu,
Düşük hızlı darbe

Öz: Bu çalışma, hibrit yapıya sahip karbon ve aramid fiber takviyeli kompozit malzemelerin dinamik yükler altındaki mekanik davranışlarını incelemektedir. 3 farklı vurucu hızında yapılan deneyler neticesinde temas kuvveti değişimleri, deformasyon durumları ve darbe sonrası hasar mekanizmaları araştırılmıştır. 200 gr/m² alansal yoğunluğa sahip fiber dokumalar vakum infüzyon yöntemi ile laboratuvar ortamında üretilmiş ve deneysel boyutlara getirilmiştir. Hibrit kompozitlerin üstün özellikleri, farklı fiber türlerinin birleşimi sayesinde elde edilmekte ve bu durum, mekanik dayanım ve hasar ilerlemesi gibi kritik performans kriterlerinde iyileşme sağlamaktadır. Araştırmada karbon-aramid kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışı sayısal olarak da modellenerek araştırılmış ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen kompozit yapıda Hashin ilerleyen hasar modeli kullanılmıştır.

Numerical and Experimental Study on Low Velocity Impact and Post Impact Behavior Mechanisms of Carbon-Aramide/Epoxy Resin Layered Composites

Keywords

Carbon fiber composite,
Aramid fiber
Finite element method,
Low-velocity impact

Abstract: This study investigates the mechanical behavior of hybrid carbon and aramid fiber reinforced composite materials under dynamic loads. At 3 different impact velocities, contact force variations, deformation states and post-impact damage mechanisms were investigated. Fiber fabrics with 200 g/m² areal density were produced in the laboratory by vacuum infusion method and brought to experimental dimensions. The superior properties of hybrid composites are achieved through the combination of different fiber types, which leads to improvements in critical performance criteria such as mechanical strength and damage progression. In this study, the low-speed impact behavior of carbon-aramid composites was investigated by numerically modeling and compared with experimental results. Hashin progressive damage model was used in the composite structure modeled by finite element method.

*İlgili Yazar, email: ucaliskan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Mühendislik kompozitlerindeki araştırma ve gelişmeler, geçtiğimiz on yıllara kıyasla daha yüksek bir hızla ilerlemektedir. Havacılık ve yüksek enerji uygulamaları için çeşitli yapısal uygulamalarda iyi özgül mukavemete sahip hafif malzemelere olan talep, karbon fiber bazlı kompoziti birincil tercih haline getirmektedir. İnsansız Hava Araçları (İHA), polimer kompozitleri farklı yapısal bileşenlerde, özellikle de gövde, gövde, rotor kanatlarında

yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle savunma ve enerji sektörlerinde kullanılan mikro/mini İHA'ların zorlu operasyonel koşulları, mükemmel darbe, özgül mukavemet ve özgül modül özelliklerine sahip kompozit malzemeler gerektirmektedir. Ancak karbon elyafın kırılğan yapısı, Karbon Elyaf Takviyeli kompozitin başarısız olmasına neden olmaktadır. Karbon fiber kompozitlerin düşük darbe ve ani arıza davranışının üstesinden gelmek için kompozitlerde özellik uyarılmanın çokça bildirilen avantajından yararlanılması tavsiye edilir. Hibridizasyon yaklaşımı, uygulama alanıyla ilgili özellik özelleştirmesinde polimer kompozitler için köklü bir tekniktir.

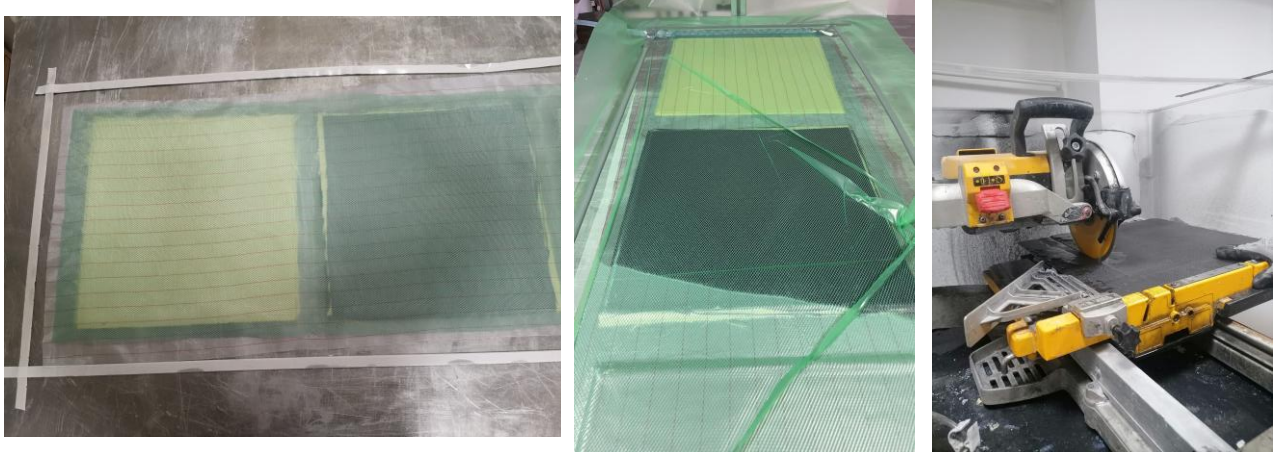
Kalaycı ve ark. [1], çalışmasında polibenzimidazol liflerinin üretimine, özelliklerine ve kullanım alanlarına yer vermiştir. Bu çalışmada aramid liflerinden de yararlanılmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda, PBI lifleri ile aramid liflerinin karışım halinde kullanılması sonucu kumaş dayanımında artış sağlamakla birlikte fiyatında optimize edildiğine atıfta bulunmuşlardır. Crown ve ark. [2], uçuş giysileri için katmanlı kumaş arayışı çalışmaları yapmışlardır. 35 farklı kumaş sisteminin termal koruma performansını incelemişlerdir. İç yüzeyde kullanılan kumaş katmanına aramid de ilave etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda en mükemmel uygulama aramid içeren uçuş kıyafeti olmuştur. Çalgül ve ark. [3], karbon, cam, aramid tabaka kompozitleri üzerinde balistik dayanımı göstermek adına mekanik testler yapmışlardır. Bu testler neticesinde, 3 noktalı basma testi sonucunda kırılma gerilimi $1,18 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuş, gerçek kırılma gerilimi $1,22 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur. Karbon-cam-aramid hibrit tabaka kompozit malzeme burkulma testi sonucunda $0,9 \text{ N/mm}^2$ 'de kırılma göstermiştir. Hibrit tabaka kompozit numuneye MP5 Otomatik Silah, Sig Sauer ve G3 Piyade Tüfeği kullanılarak atışlar yapılarak, MP5 Otomatik silah testinde başarı elde etmişlerdir. Onal ve ark. [4], karbon, cam, aramid fiberlerle çeşitli açılarda takviyelendirilen hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri ve hasar oluşumları üzerine çalışmalar yapmışlardır ve cam elyaf yüzdesi yüksek numunenin düşük hızlı darbe testinde daha iyi sonuçlar aldığı görülmüştür. %77 ve üzeri cam elyaf takviyeli hibrit yapılarda aynı performans gözlenmiştir. Elyaf takviye artışı etki etmemiştir. Priyanka ve ark. [5], karbon ve aramid içeren düzlem dışı kompozit kumaşlarda mekanik performans üzerine çalışmalar yapmışlardır. Aramid destekli karbon hibrit yapıların aramid yapılara göre %30 daha fazla elastikiyet modülüne, %57 daha fazla basınç artışına dayandığını gözlemlemişlerdir. Shen ve ark. [6], grafen oksit ve aramid elyaf üzerine yaptıkları çalışmalarda, grafen oksitin aramid elyaf/epoksi kompozit eğilme mukavemeti üzerine araştırma yapmışlardır. Numune olarak oransal %0,1-0,7 ağırlık oranında grafen oksit ve aramid elyaf kullanmışlardır. Kompozitin eğilme mukavemeti saf epoksi reçineninkinden yaklaşık %40,86 daha yüksek düzeylere ulaşarak $1054,7 \text{ MPa}$ olarak ölçülmüştür. Xiao ve ark. [7], dört farklı yapıda hibrit kompoziti düşük hızlı darbe testine tabii tutarak mekanik özelliklerini incelemek adına bir çalışma yapmıştır. Hibrit tabakaları SC-15 epoksi reçine sistemli çapraz örgü karbon ve düz örgü cam elyaf kumaş kullanarak üretmiştir. Yapılan testler sonucunda, hibrit kompozitler daha rijit ve yük taşıma kabiliyeti daha yüksek çıkmıştır. Zhang ve ark. [8], karbon fiberler, aramid fiberler ve bunların katman içi hibritleri ile güçlendirilmiş kompozitlerin elastik davranışları ve kırılma davranışlarına yönelik testler gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre boyuna uzanan elyaflarla desteklenen hibrit yapıların, enine uzuna elyaflarla desteklenen yapılara göre daha dayanıklı olduğunu göstermiştir. Katman içi aramid içeren hibrit kompozitlerin mukavemet dayanımı karbon ve aramid içeren kompozit yapılara oranla sırasıyla %138,4; %36,4 daha yüksek çıkmıştır. Yapılan testler sonucunda katman içi hibrit yapıların yüksek dayanım ve mukavemet için tercih edilebilirliğini göstermiştir. Oruç ve ark. [9], çalışmalarında, karbon aramid hibrit yapıların düşük hızlı darbe tepkisi ve interlaminer kesme mukavemeti üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmalarında iki tip sandviç yapısı üzerinden ilerlemişlerdir. Saf karbon ve saf aramid kompozitlerin hibrit yapılara göre daha az yük taşıyabildiğini ancak daha fazla enerji absorbe edebildiğini gözlemlemişlerdir. Yük ve enerji değerleri karşılaştırıldığında dış katmanı karbon olan karbon aramid hibrit yapıların, kalınlıkları 3,15 ve 3,25 mm olarak değişen numunelerinde en iyi sonuçlar alınmıştır. Dış katmanı aramid olan 2,95 mm kalınlığında numunede ise en iyi interlaminer kesme mukavemetini gözlemlemişlerdir.

Bu çalışma, hibrit karbon-aramid takviyeli epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe altındaki davranışlarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle bütüncül olarak ele alması açısından literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır. Özellikle Hashin hasar kriteri ile katman bazlı hasar haritalamasının gerçekleştirilmesi ve bu haritaların tüm katmanlardan üst üste bindirilerek genel hasar yapısının değerlendirilmesi, literatürde nadir rastlanan bir yaklaşımdır. Ayrıca, farklı darbe enerjilerine karşı kompozit yapının tepkisinin hem ön hem de arka yüzeylerde detaylı olarak analiz edilmesi ve deneysel sonuçların sayısal modelle doğrulanması, çalışmanın özgünlüğünü artıran temel unsurlar arasında yer almaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Yöntem

Bu çalışmada, karbon (plain dokuma tipinde Tenax-E HTA 40 3k ipinden üretilmiş çift yönlü düz dokuma, yüzey yoğunluğu 200 g/m²) ve aramid (Kevlar Fiber Kumaş 400 gr/m² -plain CT709 çift yönlü düz dokuma) dokuma kumaşlar kullanılmıştır. Havacılık ve uzay sınıfı epoksi reçine Araldite LY1564 ve sertleştirici Aradur 3486 Huntsman şirketinden satın alınmış ve matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Kompozit laminatların imalatı için Vakum Destekli reçine infüzyonu (Vacuum-Assisted resin infusion, VARIM) kullanılmıştır. Şekil 1 üretim kurulumunu göstermektedir.



Şekil 1. Vakum Destekli reçine infüzyonu (Vacuum-Assisted resin infusion, VARIM) ve numunelerin uygun boyutlara getirilmesi

Numune kalınlıkları benzer olacak şekilde istifleme yapılmıştır ve katman sayıları belirlenmiştir. Hibrit yapı 4 katman aramid 4 katman karbon fiber, yeypare yapılar ise 6 katman aramid, 12 katman karbon fiber olacak şekilde oluşturulmuştur. 50x50 cm boyutlarında üretilen levhalar, 10x10 cm boyutlarında deneye uygun hale getirilmiştir.



Şekil 2. Düşük hızlı darbe test cihazı

2.2. Sayısal Yöntem

Şekil 3’de karbon/aramid fiber takviyeli tabakalı kompozit plakanın sayısal modelini gösteren 0/90 fiber oryantasyonuna sahip model verilmiştir. Vurucu küresel uç geometrisine sahiptir, çapı 20 mm ve kütlesi 7.2950 kg’dır. Deneysel testler ve analizler 12.5, 25, 50 ve 75 J darbe enerjileri için gerçekleştirilmiştir. Analizler için sonlu eleman tiplerinin hesaplama başarımı önemlidir. Analizler kabuk (shell) elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modelinde hasar ve bozunum modeli uygulanmış ve elastik sabitlerin bozunum katsayılarına karar verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar, temas kuvveti değişimi, kinetik enerji değişimi ve hasar tipleri bakımından irdelenmiştir. Tablo 1’de sayısal modelde kullanılan karbon ve aramid kompozitlerin mekanik ve hasar özellikleri verilmiştir.

2 boyutlu Hashin [10] hasar kriterleri genel formda şu şekilde ifade edilir:

Fiber çekme hasarı ($\widehat{\sigma}_{11} \geq 0$)

$$F_f^t = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (1)$$

Fiber basma hasarı ($\widehat{\sigma}_{11} < 0$)

$$F_f^c = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{11}}{X^C}\right)^2 \quad (2)$$

Matris çekme hasarı ($\widehat{\sigma}_{22} \geq 0$)

$$F_m^t = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (3)$$

Matris basma hasarı ($\widehat{\sigma}_{22} < 0$)

$$F_m^c = \left(\frac{\widehat{\sigma}_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^C}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\widehat{\sigma}_{22}}{Y^C} + \left(\frac{\widehat{\tau}_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (4)$$

$\widehat{\sigma}_{11}, \widehat{\sigma}_{22}, \widehat{\tau}_{12}$ efektif gerilme tensörleridir, $\widehat{\sigma}$, hasar kriterini hesaplamada kullanılan gerilme bileşenidir ve şu ifade ile hesaplanır [11]:

$$\widehat{\sigma} = M\sigma \quad (5)$$

σ gerçek gerilme bileşenidir ve hasar operatörü şu şekilde tariflenir:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-d_f)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(1-d_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-d_s)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

d_f, d_m, d_s fiber, matris ve kayma hasarını karakterize eden ve d_f^t, d_f^c, d_m^c hasar değişkenlerinden türetilen iç hasar değişkenleridir ve daha önce bahsedilen dört hasar kriterine şu şekilde karşılık gelmektedir [11]:

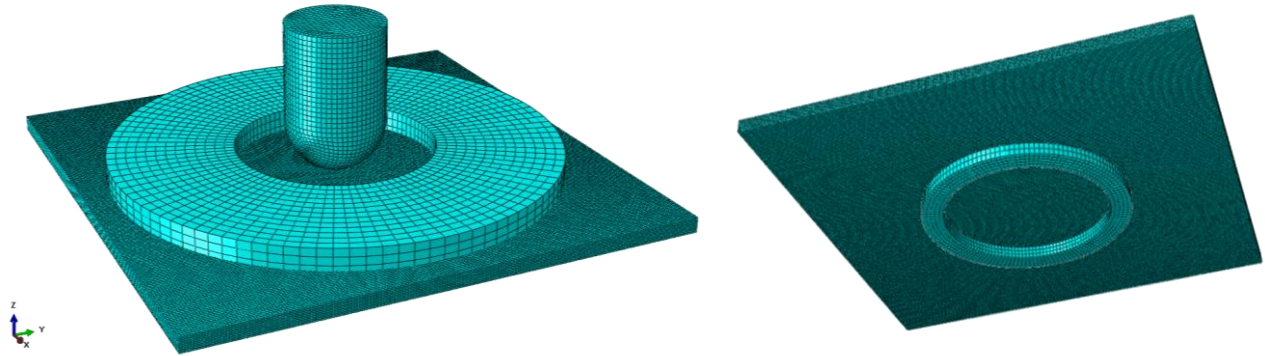
$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{if } \widehat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$d_s = 1 - (1 - d_f^t)(1 - d_f^c)(1 - d_m^t)(1 - d_m^c) \quad (9)$$

Tablo 1. Kompozit malzemelerin (Aramid fiber/epoksi ve Karbon fiber/epoksi) mekanik özellikleri [12,13]

Özellik	Karbon fiber/epoksi	Aramid fiber /epoksi
Boyuna elastisite modülü, E_{11}	150.9 (GPa)	67 (GPa)
Enine elastisite modülü, $E_{22} = E_{33}$	11.2 (GPa)	4.7 (GPa)
Düzlem içi kayma modülü, $G_{12} = G_{13}$	5.3 (GPa)	2.0 (GPa)
Düzlem dışı kayma modülü, G_{23}	1.4 (GPa)	1.586 (GPa)
Poison oranı, $\mu_{12} = \mu_{13}$	0.29	0.34
Poison oranı, μ_{23}	0.33	0.45
Boyuna çekme mukavemeti, X_T	1858.3 (MPa)	1420 (MPa)
Enine çekme mukavemeti, $Y_T = Z_T$	25.4 (MPa)	36 (MPa)
Boyuna basma mukavemeti, X_C	576.8 (MPa)	312 (MPa)
Enine basma mukavemeti, $Y_C = Z_C$	107.3 (MPa)	145 (MPa)
Düzlem içi kayma mukavemeti $S_{12} = S_{13}$	79.5 (MPa)	53 (MPa)
Interlaminar kayma mukavemeti, S_{23}	22.9 (MPa)	53 (MPa)

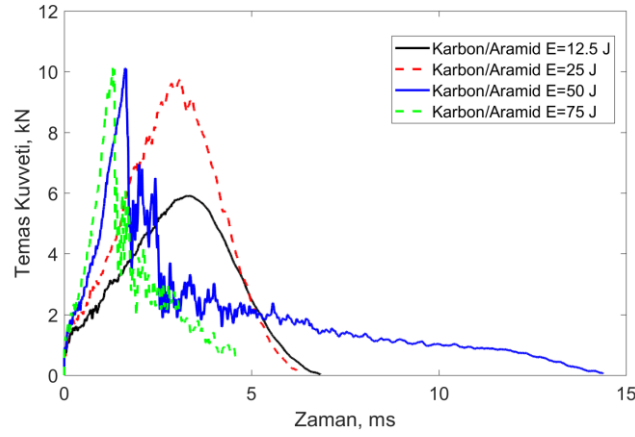

Şekil 3. Sonlu elemanlar modeli

3. Bulgular

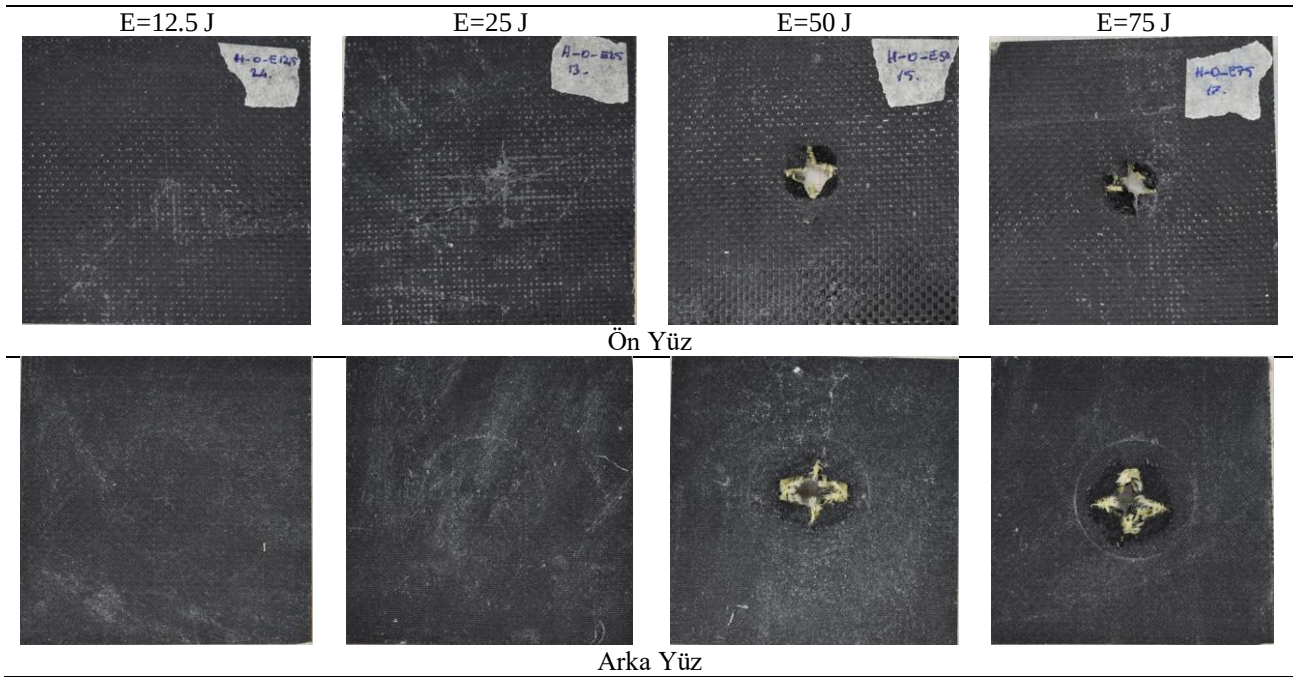
Bu bölümde, hibrit karbon/aramid takviyeli epoksi kompozit plakalara uygulanan düşük hızlı darbe testlerinden ve sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Farklı darbe enerjileri altında yapının temas kuvveti-zaman tepkisi, hasar yayılımı ve gerilme dağılımları detaylı şekilde değerlendirilmiş; deneysel veriler ile sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 4'te, karbon/aramid takviyeli hibrit kompozit yapıların farklı darbe enerjileri (12.5, 25, 50, 75 J) altında gösterdiği deneysel temas kuvveti-zaman tepkileri sunulmaktadır. Grafikte, artan darbe enerjisiyle birlikte tepe kuvveti, temas süresi ve hasar karakteristikleri arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir.

12.5 J darbe enerjisinde yaklaşık 6 kN en ybüyük temas kuvveti elde edilirken, darbe enerjisinin 25 J'ye kadar artmasıyla, yapı tepe noktasında yaklaşık 10 kN gibi yüksek bir kuvvet taşıyabilmiş ve daha rijit bir tepki sergilemiştir. Ancak 50 J ve 75 J enerjilerinde temas kuvvetinde ani düşüşler meydana gelmiş; bu durum, hasar oluşumu (delaminasyon, matris çatlağı ve fiber kırılması) ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle 75 J seviyesinde yapının hasarı daha erken başlamış ve enerji absorpsiyonu deformasyon ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4. Hibrit kompozit yapıların düşük hızlı darbe temas kuvveti-zaman grafiği

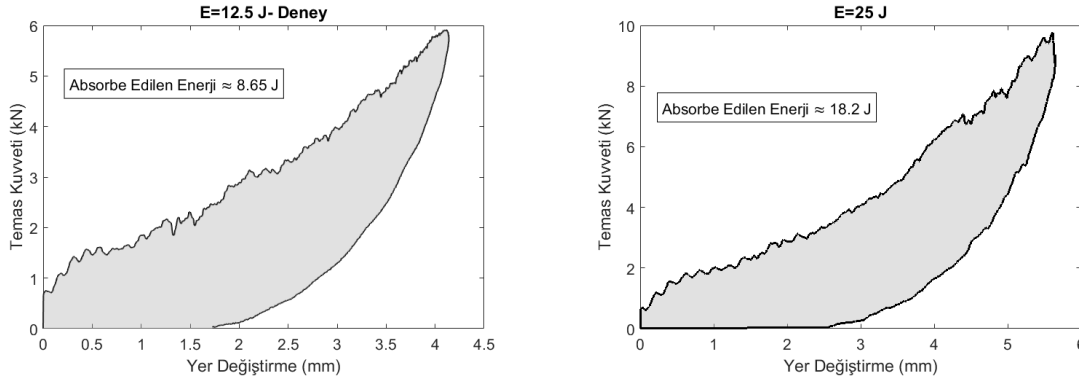


Şekil 5. Hibrit karbon/aramid epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe sonrası deformasyon görüntüleri

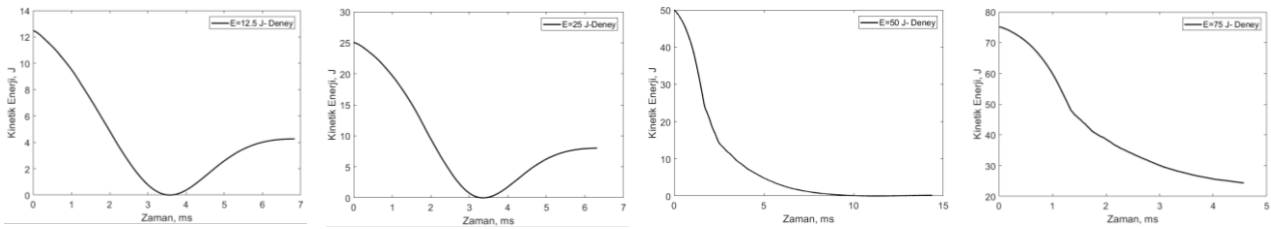
Buna ek olarak, düşük darbe enerjilerinde (12.5 J ve 25 J) temas süresi sınırlı kalmış (~5–6 ms), sistem kontrollü bir sönümlenme göstermiştir. Buna karşılık, 50 J seviyelerinde temas süresi yaklaşık 15 ms'ye ulaşmış ve grafiklerde belirgin titreşim davranışları görülmüştür. Bu durum, darbe sonrası sistemde yeterli sönümlenme gerçekleşmediğini ve iç yapının hasar ile yük taşımada etkinliğini kaybettiğini göstermektedir.

Artan darbe enerjisiyle birlikte kompozit yapının taşıdığı maksimum kuvvet seviyesinin dalgalandığı, hasar yayılımının ise daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, hibrit kompozit yapıların enerjiye bağlı mekanik performans değişimlerini ortaya koymakta ve sayısal modellerle karşılaştırmalar için temel oluşturmaktadır.

Şekil 5'te, hibrit karbon/aramid epoksi kompozit plakaların farklı darbe enerjileri (12.5, 25, 50, 75 J) altında maruz kaldıkları düşük hızlı darbe sonrası ön ve arka yüzeylerindeki makroskobik deformasyonlar sunulmuştur. Görseller, darbe enerjisi arttıkça hasarın yayılımında ve şiddetinde gözle görülür bir artış olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. 12.5 J ve 25 J seviyelerinde, ön ve arka yüzeylerde ciddi bir delinme veya kırılma gözlemlenmemiş, yüzeysel deformasyonlar sınırlı kalmıştır. Bu durum, kompozit yapının bu seviyedeki enerjiyi fiber kırığı veya delaminasyon gibi mikro hasar mekanizmalarıyla absorbe ettiğini göstermektedir. Ancak 50 J ve 75 J enerjilerinde, özellikle arka yüzeylerde belirgin delaminasyon izleri, yerel fiber kopmaları ve katman ayrılmaları gözlemlenmiştir. Aramid fiberlerin yüksek tokluk özelliği sayesinde deformasyon enerjisinin bir kısmı absorbe edilse de, bu seviyelerde enerjinin büyüklüğü yapısal bütünlüğün korunmasını engellemiştir.



Şekil 6. 12.5 ve 25 J darbe enerjisi altındaki hibrit kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri ve absorbe edilen enerji değerleri

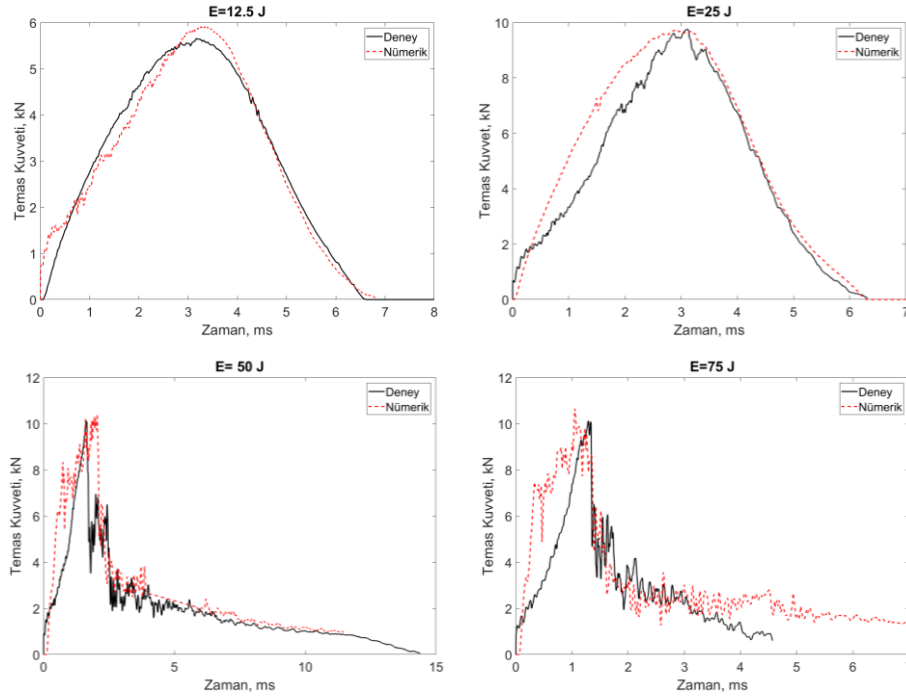


Şekil 7. Hibrit kompozit yapıların düşük hızlı darbe altındaki kinetik enerji-zaman grafikleri

Şekil 6'da, 12.5 J ve 25 J darbe enerjisi altındaki hibrit karbon/aramid kompozit plakaların temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri ve absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Her iki darbe seviyesinde de, temas kuvveti uygulanan yer değiştirme ile birlikte artmakta ve maksimum kuvvete ulaştıktan sonra düşüş göstermektedir. 12.5 J enerjisinde maksimum temas kuvveti yaklaşık 6 kN seviyesinde gerçekleşirken, 25 J darbesinde bu değer yaklaşık 9.5 kN'ye ulaşmıştır. Bu artış, daha yüksek darbe enerjisi ile malzeme içinde daha yoğun bir deformasyonun meydana geldiğini göstermektedir. Elastik yer değiştirme değerleri de benzer şekilde artış göstermekte olup, 12.5 J darbesinde yaklaşık 4 mm olan maksimum yer değiştirme, 25 J darbesinde yaklaşık 5.7 mm'ye ulaşmıştır.

Enerji absorpsiyon analizine göre, 12.5 J darbe altında yaklaşık 8.65 J'lik bir enerji absorbe edilirken, 25 J darbe altında bu değer 18.2 J'ye yükselmiştir. Bu durum, daha yüksek darbe enerjilerinde yapının artan deformasyon kapasitesiyle birlikte daha fazla enerjiyi sönümleyebildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, her iki durumda da darbe sonrası tam kırılma gerçekleşmemiş olup, bu enerji düzeylerinde yapı önemli ölçüde plastik deformasyon ve muhtemel mikroyapısal hasar mekanizmaları (matris çatlaması, fiber kırığı, delaminasyon vb.) geliştirerek darbe etkisini absorbe edebilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, hibrit takviyeli kompozit yapının darbe dayanımına katkı sunduğunu ve artan darbe enerjilerine karşı enerji absorpsiyon kapasitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. 50 ve 75 J enerji seviyelerinde tam perforasyon ve numunelerde kırılma meydana geldiği için tüm enerji harcanmıştır.

Şekil 7'de, 12.5 J, 25 J, 50 J ve 75 J darbe enerjisi seviyelerinde hibrit karbon/aramid kompozit numunelerin darbe sırasında izlenen kinetik enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Her bir grafik, darbe anında numunenin enerjiyi nasıl sönümlediğini ve kalan kinetik enerjinin zamanla nasıl değiştiğini göstermektedir. Düşük enerjili darbeler (12.5 J ve 25 J) için eğrilerde, kinetik enerjinin belirli bir süre boyunca azaldıktan sonra tamamen sıfırlanmadığı, belirli bir miktarının geri yansiyarak sistemde kaldığı görülmektedir. Bu durum, numunenin tamamen delinmediği, yapısal bütünlüğünü kısmen koruduğu ve bir miktar enerjiyi geri ilettiğini göstermektedir. Özellikle 12.5 J darbesinde kinetik enerji yaklaşık 0 J seviyesine indikten sonra tekrar artış eğilimi göstermekte ve yaklaşık 4 J seviyesine kadar geri kazanım yaşanmaktadır. Bu durum, darbe anında enerjinin bir kısmının elastik deformasyon yoluyla geri yansıdığını ve yapının tamamen absorpsiyon gerçekleştirmediğini ifade eder. Benzer şekilde, 25 J darbesinde de yaklaşık 7-8 J civarında bir kinetik enerji geri kazanımı gözlemlenmiştir. Bu, düşük darbe enerjileri altında yapının absorbe edebileceği maksimum enerjiye ulaşamadığını ve sistemin geri tepkisinin belirgin olduğunu göstermektedir.



Şekil 8. Hibrit karbon/aramid kompozit plakanın farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) deneysel ve sayısal temas kuvveti-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

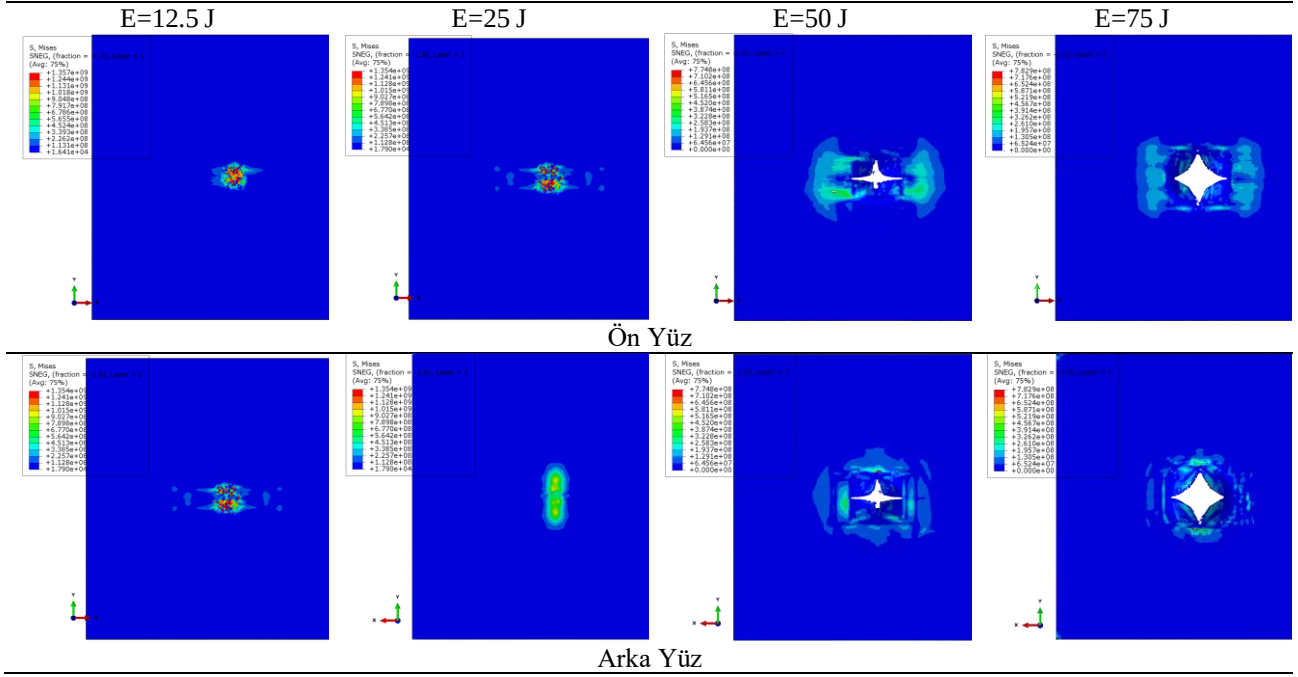
Yüksek darbe enerjilerinde (50 J ve 75 J) kinetik enerji eğrileri oldukça hızlı bir şekilde sıfıra yakın değerlere inmektedir ve herhangi bir geri yansıma izlenmemektedir. Bu durum, bu darbe seviyelerinde kompozit numunelerin tam hasar aldığı, büyük oranda enerji absorbe ettiği ve elastik geri tepkisinin ortadan kalktığı anlamına gelmektedir. Özellikle 50 J ve 75 J seviyelerinde kinetik enerji neredeyse tamamen sönmülmüş ve sistemin tamamı enerjiyi yapısal deformasyon ve kırılma yoluyla absorbe etmiştir. Bu da yapıların kritik darbe eşiğini aştığını ve tamamen delindiğini göstermektedir.

Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte değerlendirildiğinde, hibrit kompozit yapıların darbe altındaki mekanik tepkileri ile enerji sönmüleme davranışları arasında doğrudan bir ilişki olduğu görülmektedir. Şekil 6'da yer alan temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri, malzemenin darbe sırasında gösterdiği mekanik direnç ve deformasyon kapasitesini yansıtırken; Şekil 7'de sunulan kinetik enerji-zaman grafikleri, darbe anında uygulanan enerjinin ne ölçüde absorbe edildiğini ve yapının bu enerjiyi nasıl dağıttığını ortaya koymaktadır. Düşük enerjili darbelerde (12.5 J ve 25 J), Şekil 6'daki eğrilerin altında kalan alan sınırlı olup yapının büyük ölçüde elastik-plastik deformasyonla darbe enerjisini sönmülediği gözlemlenmiştir. Bu durum, Şekil 7'de kinetik enerjinin tam olarak sıfırlanamayıp belirli oranda geri kazanılmasıyla da desteklenmektedir. Sönmülenen enerji miktarları birbirlerini doğrulamaktadır.

Şekil 8, hibrit karbon/aramid kompozit plakanın düşük hızlı darbe yüklemeleri altında (12.5, 25, 50 ve 75 J) deneysel ve sayısal olarak elde edilen temas kuvveti-zaman verilerinin karşılaştırmalı grafiklerini sunmaktadır. Grafikler, sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sayısal modelin düşük darbe enerjilerinde fiziksel davranışları başarılı şekilde temsil ettiğini göstermektedir.

Özellikle 12.5 ve 25 J enerji seviyelerinde, deneysel ve sayısal eğriler yüksek bir örtüşme göstermekte olup; tepe kuvveti, temas süresi ve eğri formu açısından uyum tatmin edicidir. Bu durum, sayısal modelde kullanılan malzeme parametrelerinin ve hasar kriterlerinin bu enerji seviyelerinde etkili olduğunu göstermektedir. Ancak 50 J ve 75 J seviyelerinde, sayısal model ile deneysel veriler arasında belirgin sapmalar gözlenmiştir. Özellikle tepe kuvvetinin hemen ardından sayısal modelin daha erken ve keskin bir kuvvet düşüşü tahmin ettiği, deneysel eğrinin ise daha uzun süreli salınım içerdiği dikkat çekmektedir.

Bu farklılıklar, yüksek darbe enerjilerinde kompozit yapıda meydana gelen karmaşık hasar mekanizmalarının (delaminasyon, matriks yırtılması, fiber kırılması) sayısal olarak tam anlamıyla modellenememesinden kaynaklanabilir.

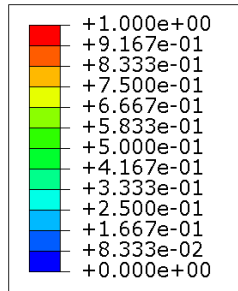


Şekil 9. Farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakanın ön ve arka yüzlerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımları.

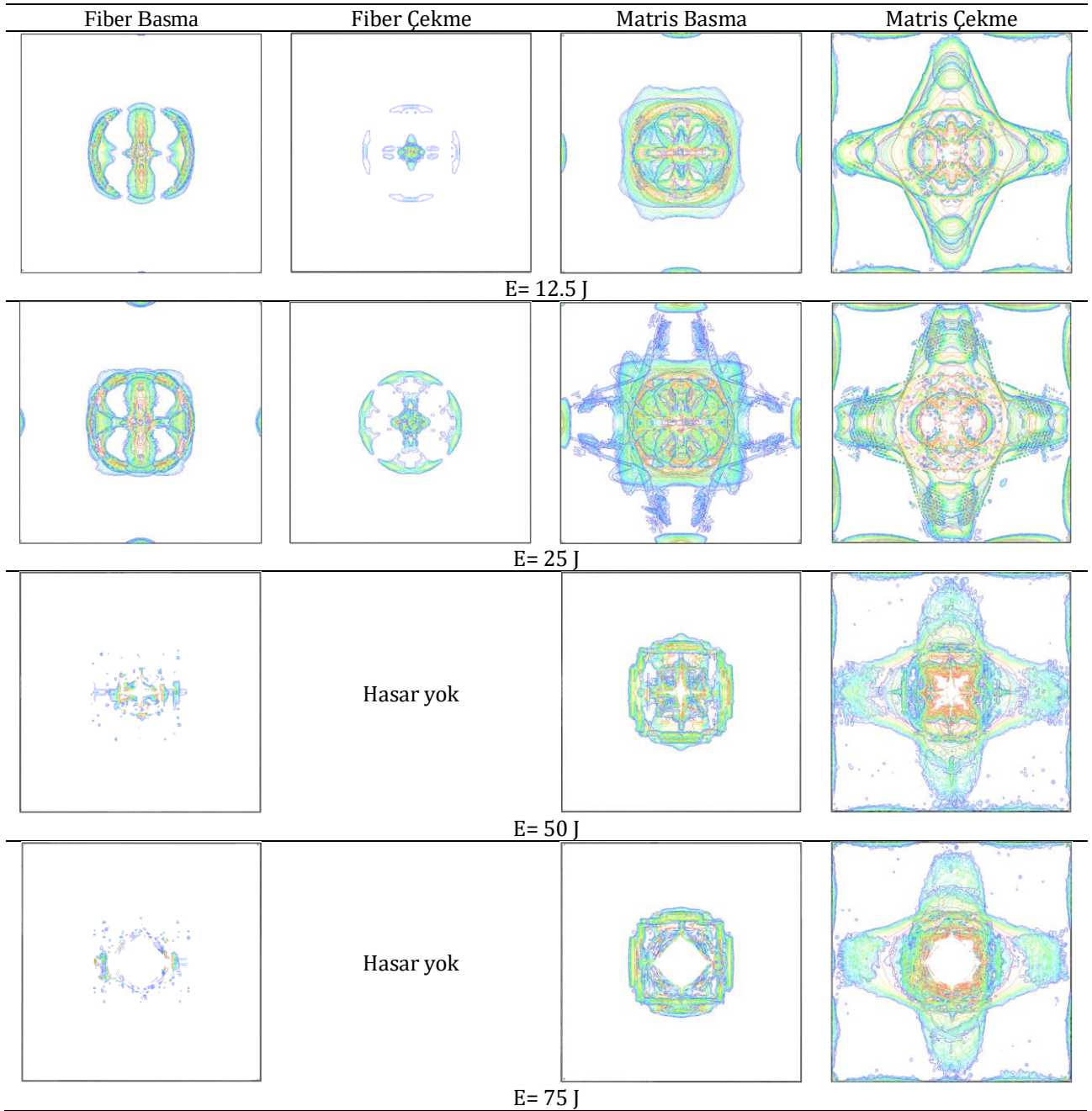
Ayrıca, temas yüzeyi, sürtünme etkileri ve katman ayrılmaları gibi parametrelerin doğruluğu yüksek enerjilerde daha kritik hale gelmektedir. Sayısal model düşük enerjili darbelerde yeterli doğruluğa sahipken, yüksek enerjili darbelerde fiziksel süreci tam olarak temsil edememektedir. Bu durum, ileri düzey hasar modellerinin (örneğin Cohesive Zone Model veya 3D Hashin) dahil edilmesiyle geliştirilebilir.

Şekil 9’de, hibrit karbon/aramid takviyeli kompozit plakanın farklı darbe enerjileri altında ön ve arka yüzlerinde oluşan Von Mises gerilme dağılımları sunulmaktadır. Gerilme seviyeleri, malzeme içerisindeki lokal yük yoğunlaşmalarını ve hasar potansiyel bölgelerini tanımlamak açısından önemli bilgiler sağlamaktadır. Düşük darbe enerjileri olan 12.5 J ve 25 J seviyelerinde, gerilme dağılımı dar bir alanda sınırlı kalmakta ve ön yüzeyde merkezde yoğunlaşan simetrik bir yayılım göstermektedir. Bu durumda oluşan deformasyon elastik sınırlar içerisinde kalmakta ve hasar gelişimi kısıtlıdır. Enerji seviyesi 50 J ve 75 J’ye çıkarıldığında, gerilme alanı genişlemekte ve özellikle arka yüzeylerde belirgin bir yayılım göstermektedir. Bu durum, darbenin arka katmanlara iletilmesini ve yapının enerji sönmeme kapasitesinin zorlandığını göstermektedir. Özellikle 75 J darbe enerjisinde, Von Mises gerilmesinin malzeme

merkezinden çevresine doğru yayıldığı, yüksek stres konsantrasyonlarının oluştuğu ve bunun da yerel delaminasyon ve fiber kırıkları ile ilişkilendirilebileceği görülmektedir. Ayrıca, ön ve arka yüzeylerdeki gerilme dağılımı asimetrik hale gelmiş ve bu durum yapısal bütünlüğün bozulduğuna işaret etmiştir. Sayısal modelde elde edilen bu gerilme konsantrasyonları, Şekil 5’te verilen deneysel deformasyon izleriyle büyük oranda örtüşmekte, bu da model doğrulamasını güçlendirmektedir. Şekil 10’da ise sayısal analizlerde kullanılan Hashin hasar modelinin farklı hasar türlerinin hesaplandığı hasar indeksini vermektedir. Bu sayede tüm hasar türlerindeki görseller için aynı değişim kullanılmıştır.



Şekil 10. Hashin hasar indeksi



Şekil 11. Farklı darbe enerjilerinde (12.5, 25, 50, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakada oluşan Hashin hasar kriterine göre fiber basma, fiber çekme, matris basma ve matris çekme hasar dağılımları.

Şekil 11’de, farklı darbe enerjilerinde (12.5 J, 25 J, 50 J, 75 J) hibrit karbon/aramid kompozit plakanın katmanlarında oluşan hasar türlerinin (fiber basma, fiber çekme, matris basma, matris çekme) Hashin hasar kriterlerine göre dağılımları sunulmaktadır. Bu analizde, her bir hasar türü için tüm katmanlardan elde edilen hasar çıktıları üst üste bindirilerek, yapının genel (3D) hasar davranışını temsil edilmektedir.

Düşük darbe enerjileri (12.5 ve 25 J) için özellikle matris çekme ve matris basma kaynaklı hasarlar ön planda yer almaktadır. Bu hasarların dairesel ve simetrik yayılım göstermesi, darbe enerjisinin çoğunlukla reçine fazında sönümlendiğini ve fiberlerin göreceli olarak yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 25 J darbe enerjisinde fiber basma ve çekme hasarlarında da artış gözlemlenmiş, yapının yük taşıma kapasitesinin sınırlarına yaklaşmaya başladığı anlaşılmıştır.

50 J ve 75 J enerji seviyelerinde, fiber çekme hasarının görülmemesi ve baskın olarak matris hasarlarının devam etmesi dikkat çekicidir. Bu durum, fiber yöneliminin darbe yönüne paralel olması halinde, çekme yerine basma etkilerinin hakim olduğunu ve dolayısıyla fiber çekme hasarının gelişmediğini düşündürmektedir.

Özellikle 75 J seviyesinde, matris çekme hasarının çok katmanlı ve yaygın biçimde dağılması, yapının bu bölgelerde rijitliğini kaybettiğini ve enerji sönmüleme görevini büyük ölçüde matris yapının üstlendiğini göstermektedir.

Bu durumlara ek olarak, şekil boyunca gözlemlenen simetrik ve merkezden çevreye yayılan hasar biçimi, darbe yüklemesinin düzgün uygulandığını ve yapının elyaf oryantasyonu ile hasar şekli arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Katmanlar arası hasarların üst üste bindirilmesiyle elde edilen bu bütüncül yaklaşım, sayısal modelin detaylı hasar takibi açısından yeterliliğini ve doğrulayıcılığını desteklemektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, hibrit karbon/aramid takviyeli epoksi kompozit plakaların düşük hızlı darbe altındaki mekanik tepkisi deneysel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testleri ve sayısal simülasyonlar sonucunda; temas kuvveti-zaman eğrileri, deformasyon biçimleri, gerilme dağılımları ve hasar mekanizmaları detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Elde edilen deneysel veriler, düşük darbe enerjilerinde (12.5 J ve 25 J) kompozit yapının darbe yüklerini başarılı şekilde sönmüleyebildiğini ve hasarın büyük oranda matriks içinde sınırlı kaldığını göstermiştir. 50 J ve 75 J enerjilerinde ise, özellikle arka yüzde delaminasyon ve yerel fiber kırılmaları gibi ilerleyici hasar mekanizmalarının aktif hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yapının enerji absorpsiyon kapasitesinin sınırlarına ulaştığını ve aramid fiberlerin tok davranışına rağmen yapısal bütünlüğün bozulduğunu göstermektedir.

Sayısal modellemeler, düşük enerji seviyelerinde (12.5 J ve 25 J) deneysel sonuçlarla yüksek uyum sağlamış; tepe kuvveti, temas süresi ve eğri şekli açısından başarılı bir tahmin sağlamıştır. Ancak 50 J ve 75 J seviyelerinde model ile deneysel veriler arasında sapmalar meydana gelmiştir. Bu sapmaların temelinde, hasar ilerlemesinin karmaşık doğası, ara yüzey etkileri ve katmanlar arası ayrılmaların modellenmesindeki sınırlılıklar yatmaktadır. Yine de, sayısal model tarafından elde edilen Von Mises gerilme dağılımları ve Hashin hasar haritaları, deneysel deformasyon izleri ile genel olarak örtüşmektedir.

Hashin hasar kriterine dayalı analizlerde, özellikle matris çekme ve basma kaynaklı hasarların darbe enerjisine bağlı olarak sistematik şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Fiber çekme hasarının sadece düşük enerjilerde görülmesi, fiber oryantasyonunun darbe doğrultusuna etkisini ortaya koymuştur. Ayrıca, tüm katmanlardan elde edilen hasar indekslerinin üst üste bindirilmesiyle oluşturulan bütüncül hasar haritaları, kompozit yapının global hasar davranışının anlaşılması açısından önemli katkılar sunmuştur.

Benzer şekilde, Atmaca vd. [14] çalışmasında da karbon/aramid hibrit kompozitlerde katman diziliminin darbe davranışı ve ILSS üzerinde belirleyici etkisi olduğu gösterilmiştir. Özellikle karbon merkezli yapıların yüksek yük taşıma kapasitesi ve enerji absorpsiyon performansı sunduğu, mevcut çalışmadaki sayısal analizlerle de doğrulanmıştır. Ancak, bu çalışmanın aksine, bizim çalışmamızda hasar dağılımı katman düzeyinde modellenmiş ve Hashin hasar kriteri ile mekanizmalar ayrıntılı olarak sınıflandırılmıştır. Ayrıca, [A3C3]s gibi karbon merkezli yapılarda 8.14 kN tepe kuvveti ve 25.46 J enerji absorpsiyonu değerleri raporlanmışken, bu çalışmada benzer hibrit konfigürasyonda elde edilen sayısal verilerde tepe kuvveti 10 kN seviyelerine kadar ulaşmakta ve darbe enerjisi arttıkça hasar bölgesi daha net biçimde tanımlanabilmektedir. Bu da modelin hem yük taşıma davranışını hem de hasar yayılımını daha detaylı öngörebildiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, karbon ve aramid fiberlerin birlikte kullanıldığı hibrit yapı, düşük ve orta seviyedeki darbe enerjilerinde oldukça başarılı bir performans göstermiştir. Yüksek darbe enerjilerinde ise matrisin enerji emme kapasitesi sınırlanmış ve hasar yayılımı hızlanmıştır. Bu durum, ileri seviye uygulamalar için katman dizilimlerinin ve malzeme kombinasyonlarının yeniden optimize edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Sayısal modelleme açısından, mevcut modelin darbe başlangıcını ve düşük-orta seviye hasarları başarıyla temsil ettiği; ancak yüksek enerjili darbe sonrası kompleks hasar ilerlemelerinde geliştirilmiş hasar modellerine ihtiyaç duyduğu sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

- [1] Kalaycı, E., Avinç, O., Yavaş, A. 2014. Polibenzimidazol (PBI) lifleri. Tekstil ve Mühendis, 21(96), 52-67.
- [2] Crown, E. M., Ackerman, M. Y., Dale, J. D., Tan, Y.-b. 1998. Design and evaluation of thermal protective flightsuits. Part II: instrumented mannequin evaluation. Clothing and Textiles Research Journal, 16(2), 79-87.

- [3] Çalığülü, U., Kejanlı, H., Durmuş, H. Investigation of ballistic performances of composite sheets with hybrid layer. *New Horizons in Science (NWSA Academic Journals)*, YEE Pristine Turkish Culture Center, Kosovo, 129-140.
- [4] Onal, L., Adanur, S. 2002. Effect of sequence on the mechanical properties of glass-carbon hybrid composites before and after impact. *Journal of Industrial Textiles*, 31(4), 255-271.
- [5] Priyanka, P., Mali, S. H., Dixit, A. 2023. Karbon-kevlar intraply hybrid fabric polymer composites: mechanical performance. *Iranian Polymer Journal*, 32(5), 1-14.
- [6] Wu, Y., Tang, B., Liu, K., Zeng, X., Lu, J., Zhang, T., Shen, X. 2019. Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide. *Nanotechnology Reviews*, 8, 1-9.
- [7] Gillespie, J. W. Jr., Gama, B. A., Xiao, R. J. 2007. Progressive damage and delamination in plane weave S-2 glass/SC-15 composites under quasi-static punch-shear loading. *Composite Structure*, 78(2), 182-196.
- [8] Zhang, Q., Cai, D., Zhang, N., Long, L., Zhou, G. 2024. Experimental and numerical study on the mechanical properties of carbon/aramid intralayer hybrid composites. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 43(11-12), 657-670.
- [9] Oruç, R., Polat, Y., Ekici, B. 2021. Mechanical performance of carbon-aramid fiber reinforced laminated composites under impact and shear loading. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 22, 19-27.
- [10] Hashin, Z., 1980. Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of Applied Mechanics*, 47(2):329–334.
- [11] ABAQUS/Explicit (Version 6.14), User's manual, Finite Element Software. Available from <http://www.simulia.com>
- [12] Yang, L., Yan Y., Kuang, N. 2013. Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact, *Polymer Testing*, 32(7), 1163-1173.
- [13] Liu, P.F., Liao, B.B., Jia, L.Y., Peng, X.Q. 2016. Finite element analysis of dynamic progressive failure of carbon fiber composite laminates under low velocity impact, *Composite Structures*, 149, 408-422.
- [14] Atmaca, B.N., Oruç, R., Aşçı, G., Yiğit, K., Yüzer, S., Polat, Y., Ekici, B., 2021. Mechanical performance of carbon-aramid fiber-reinforced laminated composites under impact and shear loading. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering*, 22, 19–27.