

## TABAKALI KOMPOZİTLERDE DÜŞÜK HIZLI DARBEYE BAĞLI HASARIN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Miraç Onur Bozkurt<sup>1</sup>, Demirkan Çöker<sup>2</sup>, Levend Parnas<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü  
<sup>1,2</sup> Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM)  
<sup>3</sup> TED Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

<sup>1</sup> onurboz@metu.edu.tr

<sup>2</sup> coker@metu.edu.tr

<sup>3</sup> levend.parnas@tedu.edu.tr

### ÖZET

Geleneksel malzemelere kıyasla yüksek dayanım – ağırlık oranı sunan karbon elyaf esaslı kompozit malzemelerin rüzgâr türbin kanatlarında kullanımı giderek artmaktadır. Ancak, tabakalı kompozit yapıların kalınlık yönündeki düşük mukavemetleri halen mevcut olan bir sorundur. Türbin kanatlarına dolu düşmesi, kuş çarpması ve montaj sırasında oluşan çarpmalar gibi öngörülemeyen ve kontrolü sağlanamayan düşük hızlı darbe olayları, serim yönündeki bu zayıflığı matris kırılması, tabaka ayrışması ve elyaf kopması olmak üzere üç ana hasar formunda ortaya çıkarmaktadır. Hasar mekanizmalarının çeşitliliği ve malzemenin doğrusal olmayan dinamik davranışı, darbe hasarının oluşum sekansını iyi anlamayı ve ilgili deney ve simülasyonları doğru modellemeyi gerektirmektedir.

Bu çalışmada, tek yönlü [0/90] karbon/epoksi kompozit kirişlerde düşük hızlı darbe (DHD) sonucu oluşan hasar sayısal olarak modellenmiştir. ABAQUS/Explicit'te, DHD deneylerini temsil eden 3 boyutlu bir model geliştirilmiştir. Simülasyonlar, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Matris ve elyaf hasarı mekanizmaları, Hashin hasar başlatma kriterinin kullanıldığı sürekli ortam hasar mekaniği temelli bir kompozit hasar modelinin kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT altprogramı aracılığıyla programa uygulanmasıyla simüle edilmektedir. Yapışkan ara yüzler, kümelenmiş katlar arasına yapışkan elemanların yerleştirilmesiyle modellenmiştir ve delaminasyon hasarının simülasyonu için yapışkan elemanlara ikidoğrusal traksiyon-ayırılma davranışı tanımlanmıştır. Sonuçlar, hasarın ortada kümelenmiş 90° katmanları boyunca kesme çatlağı ile başladığını ve hasar oluşum sekansının ilgili literatürde sunulan deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 3. boyutun çizgisel darbe olayında meydana gelen hasar şeması üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmuştur.

### 1. GİRİŞ

Karbon elyaf esaslı kompozit malzemelerin rüzgâr türbini yapılarındaki kullanımı, yüksek düzlemci mukavemeti ve yüksek sertlik-ağırlık oranları gibi tercih edilir mekanik özellikleri sayesinde gitgide daha avantajlı hale gelmektedir. Buna karşın, kompozit laminatların kalınlık yönündeki düşük mukavemeti halen mevcut olan bir sorundur. Rüzgâr türbin yapılarında da gözlemlenen kuş çarpması ve dolu düşmesi gibi kontrolü sağlanamayan düşük hızlı darbe olayları bu zayıflığı ortaya çıkarmaktadır [1]. Ayrıca açık deniz rüzgâr türbinlerinin kurulumunda, kanatların vinçlerle kaldırılarak türbin göbeğine montaj edilmesi esnasında türbin kanatlarının kök bölgeleri düşük hızlarda darbeye maruz kalabilmektedir [2, 3].

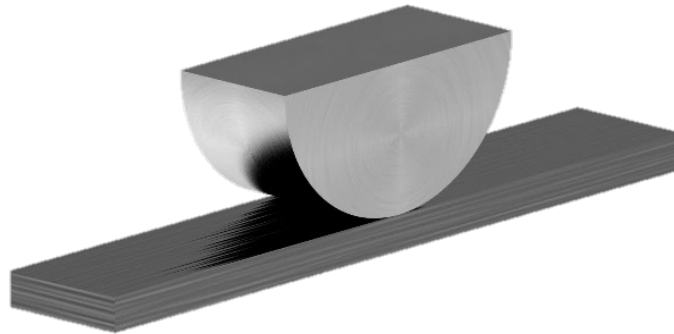
Türbin kanatlarında meydana gelen düşük hızlı darbe olayları, kompozit laminatların serim yönündeki zayıflığının üç ana hasar mekanizması biçiminde ortaya çıkmasına neden olmaktadır: matris kırılması, delaminasyon ve elyaf kopması. Hasar mekanizmalarının çeşitliliği ve

malzemenin doğrusal olmayan dinamik davranışı, darbe hasarının oluşum sekansını iyi anlamayı ve ilgili deney ve simülasyonları doğru modellemeyi gerektirmektedir. Geçmişte yapılan deneysel çalışmalarda [4, 5], hasar sürecinin matris çatlakları ile başladığı ve ardından sırasıyla delaminasyon ve elyaf kırılmaları ile devam ettiği gözlemlenmiştir. Çok yönlü kompozit laminatların mühendislik yapılarının tasarımında uygun şekilde kullanılabilmesi amacıyla, yakın dönemdeki çalışmalarda darbeye bağlı hasar mekanizmalarını doğru tahmin edecek sayısal simülasyonların modellenmesi hedeflenmiştir. Sayısal yöntemlere dayanan simülasyonlar yoluyla sanal deney düzeneklerinin geliştirildiği araştırmalara, deney sayılarının azaltılması amacıyla, ayrı bir önem verilmektedir. Lopes ve ark. [6, 7], sürekli ortam hasar mekaniği temelli kompozit katman hasarı modeli ve yapışkan bölge metodu kullanarak dağınık dizilimli laminatlardaki darbe hasarını simüle etmiştir. Daha sonra Lopes ve ark. [8, 9], simülasyonlardaki darbe hasarını daha gerçekçi şekilde ortaya koyan modeller üretmek üzere bu konudaki çalışmalarını sürdürmüşlerdir. González ve ark. [10], laboratuvar kuponlarının basma yükü altındaki kalıntı gücünün belirlenmesi amacıyla kompozit laminatların tasarımında standart olarak yapılan ağırlık düşürmeli darbe testleri ve darbe sonrası basma testlerinin ardışık simülasyonlarını gerçekleştirmiş ve her iki sanal test türünde de katman hasarı ve delaminasyonu hesaba katan bir malzeme modeli kullanmışlardır. Soto ve ark. [11] ince katmanlı laminatlardaki düşük hızlı darbe hasarını araştırmışlardır. İnce tabaka laminatlar için matris çatlama etkilerinin önemsiz olduğu, buna karşın delaminasyon ve elyaf hasarlarının baskın hasar modları olduğu sonucuna varmışlardır. Topac ve ark. [12] DHD'ye maruz kalan  $[0/90]_s$  kompozit kırışteki yerinde hasar sürecini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, kompozit kırışteki hasar LaRC04 başlatma kriterlerine sahip sürekli ortam hasar mekaniği temelli bir katman hasar modeli ve yapışkan bölge yöntemi temelli bir delaminasyon modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, hasar başlama zamanı, yeri ve hasar modlarının etkileşimi açısından deneylerle tutarlılık göstermektedir.

Bu çalışmada, kompozitlerdeki düşük hızlı darbe hasarı süreci, karbon/epoksi tek yönlü katmanlar kullanılarak üretilmiş bir  $[0_5/90_3]_s$  kırış üzerinde incelenmiştir. Çalışmanın amacı, 2 boyutlu çizgisel darbe yöntemiyle farklı hasar mekanizmalarını gözlemlemek ve bunlar arasında bir korelasyon oluşturmaktır. Burada sunulan çalışma, yüksek doğrulukta hesaplama modeline sahip bir sanal darbe test düzeneği oluşturma yolundaki ilk adım olarak kabul edilebilir.

## 2. SAYISAL MODEL

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan simülasyon tekniği ve hasar modelleri bu bölümde sunulmaktadır. Şekil 1'de görülen model iki boyutlu bir modele basitleştirilebilir gibi görünse de, deneylerde gözlemlenen boyut etkilerinin araştırmak için sonlu elemanlar modeli 3B ortamda ABAQUS/Explicit programı kullanılarak oluşturulmuştur.  $[0_5/90_3]_s$  kompozit kırışte meydana gelecek darbe hasarını simüle etmek amacıyla katman içi ve katmanlar arası hasar modelleri geliştirilmiş ve hasar modelleri sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır.



Şekil 1. 2B çizgisel darbe modeli.

## 2.1. KATMAN İÇİ HASAR MODELİ

Kompozit katman seviyesindeki hasar mekanizmalarının simüle edilebilmesi için Maimi [13] tarafından geliştirilen sürekli ortam hasar mekaniği esaslı malzeme modeli, üzerinde bazı modifikasyonlar yapılarak kullanılmıştır. Malvern'in [14] 3 boyutlu katman tamamlayıcı serbest enerji yoğunluğu fonksiyonunun hasarlı versiyonu, hasar değişkenleri, gerilme durumu ve elastik katsayılar cinsinden ifade edilmektedir ve malzemenin denklem (1)'de verilen hasarlı esneklik tensörünü belirlemek için bu fonksiyonun türevi alınmaktadır [15]. Malzemenin mevcut elyaf, matris ve kesme hasarı seviyesi sırasıyla  $d_F$ ,  $d_M$  ve  $d_S$  hasar değişkenleri ile temsil edilmektedir.

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{v_{21}}{E_2} & -\frac{v_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ E_1(1-d_F) & \frac{1}{E_2(1-d_M)} & -\frac{v_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2(1-d_M)} & -\frac{v_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{13}}{E_1} & -\frac{v_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3(1-d_M)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}(1-d_S)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}(1-d_S)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}(1-d_S)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Konstitütif modelde, malzeme davranışının hasar başlangıcına kadar elastik olduğu varsayılmaktadır. Herhangi bir modda hasar başladığında, kırılğan malzemede yumuşama meydana gelir. Fiber ve matris modlarında çekme ve basma hasarlarının başlatılması, maksimum gerilme ve 3B Hashin hasar kriterleri ile kontrol edilmektedir. Her hasar modu için 1 değerine ulaştığı andaki hasar başlangıcını öngören yüklem fonksiyonları denklem (2) ile (5)'te verilmiştir [16]. Bu denklemlerde,  $X_T$ ,  $X_C$  ve  $Y_C$ , bir katmanın sırasıyla elyaf yönünde çekme, elyaf yönünde basma ve elyafa dik yönde basma yükleri altındaki mukavemetleridir. Matris kırılması ile alakalı mukavemetler geometri ve dizilime bağlı olduğu için malzeme özellikleri olması beklenmez [17]. Bu nedenle, Hashin'in matris hasarı başlatma kriterleri içinde yer alan enine gerilme, düzlem içi ve düzlem dışı uzunlamasına kesme ve enine kesme mukavemeti terimleri [17, 18] 'deki kalın gömülü katmanlar için kullanılması önerilen yerinde mukavemetlerle değiştirilmiştir:  $Y_{T,is} = 1.12\sqrt{2} Y_T$ ,  $S_{12,is} = \sqrt{2} S_{12}$ ,  $S_{13,is} = \sqrt{2} S_{13}$  ve  $S_{23,is} = \sqrt{2} S_{23}$ .

- Elyaf çekme modu (eğer  $\sigma_{11} > 0$ )

$$\Phi_{FT} = \frac{\sigma_{11}}{X_T} \quad (2)$$

- Elyaf basma modu (eğer  $\sigma_{11} < 0$ )

$$\Phi_{FC} = \frac{-\sigma_{11}}{X_C} \quad (3)$$

- Matris çekme modu (eğer  $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$ )

$$\Phi_{MT} = \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_{T,is}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23,is}^2} + \left( \frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{S_{12,is}} \right)^2 \quad (4)$$

- Matris basma modu (eğer  $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ )

$$\Phi_{MC} = \left[ \left( \frac{Y_C}{2S_{23,is}} \right)^2 - 1 \right] \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{Y_C} + \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23,is}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23,is}^2} + \left( \frac{\sigma_{12} + \sigma_{13}}{S_{12,is}} \right)^2 \quad (5)$$

Yükleme fonksiyonu herhangi bir modda 1 değerine ulaştığında malzemenin sertliği indirgenir. Hasar görmüş bir malzemenin yüklem fonksiyonunun değerinin 1'in altına düşmesi mümkün olsa da, hasar başlangıcından dolayı malzemenin yumuşaması ilgili modda kalıcıdır ve malzemenin davranışı bozulmuş sertlik derecesinde elastiktir. Bu koşulu sağlamak için, elastik eşik parametresi ve hasar aktivasyon fonksiyonları sırasıyla denklemler (6) ve (7) 'de tanımlanmıştır [13]. Bu denklemlerde,  $N$  hasar modlarını temsil eder ve  $\phi_{N,max}$ ,  $\phi_N$  değerinin o zamana kadarki maksimum değeridir.  $R_N$ 'nin tanımından yola çıkarak, hasar aktivasyon fonksiyonu negatif iken, malzeme davranışının elastik alanda olduğu söylenebilir.  $F_N$  sıfır olduğunda ise hasar gelişimi meydana gelmektedir.

$$r_N = \begin{cases} 1 & \text{hasar başlangıcından önce} \\ \phi_{N,max} & \text{hasar başlangıcından sonra} \end{cases} \quad (6)$$

$$F_N = \phi_N - r_N \quad (7)$$

Hasarın gelişimi, Şekil 2'de gösterildiği gibi eşdeğer gerilme-gerinim yaklaşımı ile doğrusal bir yumuşama tepkisi şeklinde modellenmektedir. Hasarın başladığı A noktasından C noktasına kadar hasar gelişimi meydana gelir. Eğrinin altındaki alan birim hacim başına dağıtılan enerjiye karşılık gelmektedir ve  $g_N = G_C^N / L^*$  olarak tanımlanır. Burada  $L^*$  sonlu elemanların karakteristik uzunluğudur. Karşılık gelen hasar modları için eşdeğer gerilme ve gerinim ifadeleri, denklemler (8) ila (11)'de görülmektedir.

- Elyaf modları

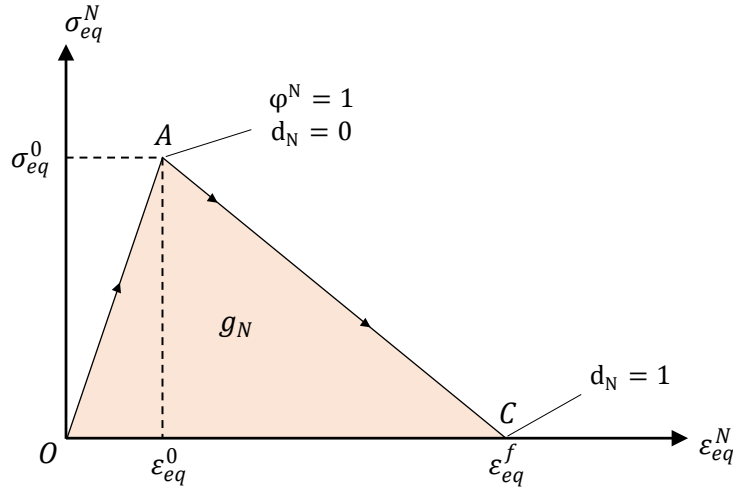
$$\sigma_{eq}^{FT,FC} = |\sigma_{11}| \quad (8)$$

$$\varepsilon_{eq}^{FT,FC} = |\varepsilon_{11}| \quad (9)$$

- Matris modları

$$\sigma_{eq}^{MT,MC} = \frac{\langle \pm \sigma_{22} \rangle \langle \pm \varepsilon_{22} \rangle + \langle \pm \sigma_{33} \rangle \langle \pm \varepsilon_{33} \rangle}{\varepsilon_{eq}} + \frac{\tau_{12}\varepsilon_{12} + \tau_{13}\varepsilon_{13} + \tau_{23}\varepsilon_{23}}{\varepsilon_{eq}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{eq}^{MT,MC} = \sqrt{\langle \pm \varepsilon_{22} \rangle^2 + \langle \pm \varepsilon_{33} \rangle^2 + \varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2} \quad (11)$$



Şekil 2. Hasarın gelişimi esnasında malzemenin doğrusal yumuşama davranışı.

$d_N$  hasar değişkeni, hasarlı malzemenin doğrusal yumuşama davranışını sağlamak amacıyla denklem (12)'de de ifade edildiği gibi elyaf ve matris hasarı modları için doğrusal olmayan doyumluk tipinde bir davranışa sahiptir. Bu ifadede,  $\varepsilon_{eq}^0$  ve  $\varepsilon_{eq}^f$ , sırasıyla hasar başlangıcındaki ve tamamlanmış hasar anındaki eşdeğer gerinimlerdir. Kesme hasarı durumunun, dört moddaki hasar durumundan da etkilendiği varsayılmaktadır ve buna göre kesme hasarı değişkeni  $d_S$  denklem (13)'teki gibi tanımlanmaktadır.  $\sigma_{11} > 0$  için  $d_F = d_F^T$ ,  $\sigma_{11} < 0$  için  $d_F = d_F^C$ ,  $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$  için  $d_M = d_M^T$  ve  $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$  için  $d_M = d_M^C$  olduğuna dikkat edilmelidir.

$$d_N = \frac{\varepsilon_{eq}^f (\varepsilon_{eq}^{\max} - \varepsilon_{eq}^0)}{\varepsilon_{eq}^{\max} (\varepsilon_{eq}^f - \varepsilon_{eq}^0)} \quad (12)$$

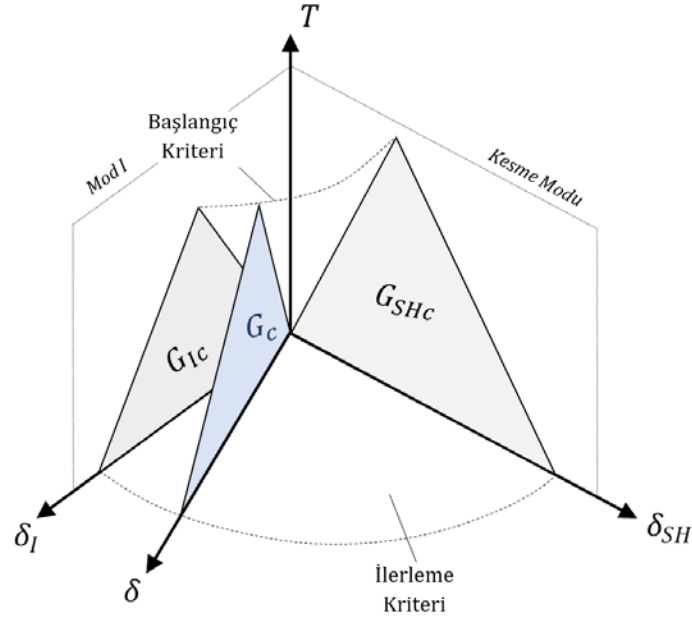
$$d_S = 1 - (1 - d_F^T)(1 - d_F^C) - (1 - d_M^T)(1 - d_M^C) \quad (13)$$

Yukarıda bahsedilen malzeme modeli ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar çözücüsüne kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT altyordamı aracılığıyla aktarılmaktadır.

## 2.2. KATMANLAR ARASI HASAR MODELİ

Delaminasyon hasarını simüle etmek için, Topac ve ark.'ın [12] tutarlı deney sonuçlarına uygun olarak, kümelenmiş  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  tabakaları arasına sıfır kalınlıkta yapışkan elemanlar yerleştirilmiştir. Şekil 3'te görülen kırılma mekaniği temelli ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışı, her bir yapışkan elemana atanmıştır. Delaminasyon genellikle ara yüze etkiyen çok eksenli gerilme durumundan kaynaklandığı için, yapışkan madde davranışı modellenirken mod karışması dikkate alınmaktadır. Katmanlar arası hasarın başlangıcı, denklem (14)'te verilen ikinci dereceden nominal gerilme kriteri ile kontrol edilir. Bu denklemde,  $T_i$  ve  $T_{o,i}$  ( $i = I, II, III$ ), sırasıyla yüzeye uygulanan traksiyonlar ve karşılık gelen kırılma modları için katmanlar arası mukavemetlerdir. Mod I'de, sadece pozitif traksiyon başlangıç kriterine dahil edilir, çünkü basma yönündeki normal gerilmeler çatlakın açılmasına katkıda bulunmaz.

$$\left(\frac{\langle T_I \rangle}{T_{o,I}}\right)^2 + \left(\frac{T_{II}}{T_{o,II}}\right)^2 + \left(\frac{T_{III}}{T_{o,III}}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

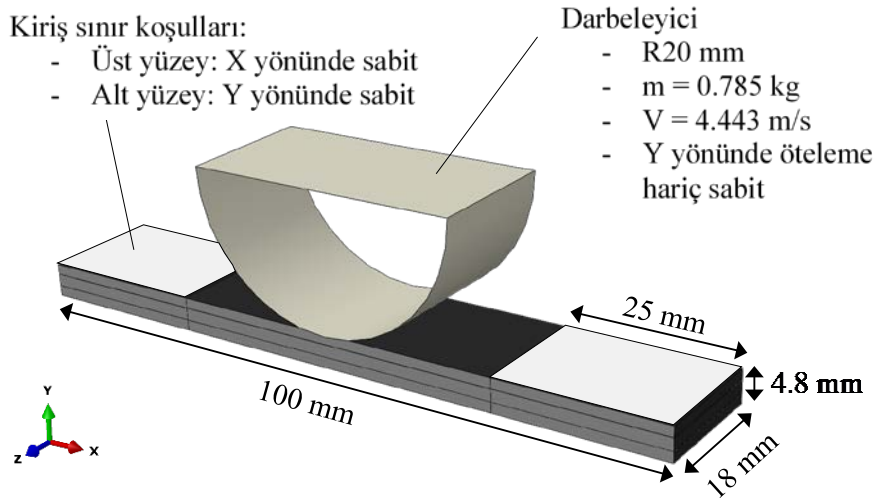


**Şekil 3.** Yapışkan malzemenin karışık moddaki ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışı. Katmanlar arası hasar başladığında, hasarın karışık moddaki gelişiminin modellenmesinde, denklem (15)'te verilen Benzeggagh-Kenane kriteri kullanılmaktadır. Bu denklemde,  $G_{SH}$  kesme modu traksiyonları ve  $G_T$  tüm saf mod traksiyonları tarafından yapılan işlerin toplamını ifade eder.  $G_{SHc}$ ,  $G_{SHc} = G_{IIC} = G_{IIIc}$  olarak tanımlanmaktadır. Doğrusal yumuşama davranışı, hasar başlangıcının gerçekleştiği düzlemdeki yapışkan elemanlara atanmaktadır.

$$G_c = G_{Ic} + (G_{SHc} - G_{Ic}) \left( \frac{G_{SH}}{G_T} \right)^\eta \quad (15)$$

### 2.3. SONLU ELEMENLAR MODELİ

Topac ve ark. [12] çalışmasında sunulan düşük hızlı darbe deneylerini simüle etmek için ABAQUS/Explicit'te üç boyutlu sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Geometrisi Şekil 4'te gösterilen kompozit kiriş, üç boyutlu deforme olabilen bir katı olarak modellenmiştir. Kompozit kiriş, gerçekte 0.3 mm eşit kalınlığa sahip 16 tek yönlü kompozit katmandan oluşmaktadır. Modelde ise kümelenmiş katmanlar tek bir homojen kalın kat olarak kabul edilmektedir.



**Şekil 4.** Sonlu elemanlar modelinin geometrisi, başlangıç koşulları ve sınır koşulları.

Kiriş geometrisi, azaltılmış integrasyona sahip ve kum saati kontrolü olan (ABAQUS kütüphanesinde C3D8R) 8 düğümlü doğrusal tuğla elemanları ile düzgün bir şekilde ayrıklaştırılmıştır. Elemanlar, 0.2 x 0.2 x 0.3 mm boyutlarındadır ve her bir kompozit katmanı bir eleman ile modellenmiştir. Farklı açılı katmanların arayüzlerine eklenen yapışkan bölgeler, sıfır kalınlıkta 0.2 x 0.2 mm yapışkan elemanlardan oluşur. Kirişin katman malzemesi olarak kullanılan karbon/epoksinin mekanik ve arayüz özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Karbon/epoksi malzemenin mekanik özellikleri

Özkütle	1590 kg/m <sup>3</sup>
Elastik	$E_1 = 142$ GPa; $E_2 = 9.4$ GPa; $E_3 = 9.4$ GPa $\nu_{12} = 0.3$ ; $\nu_{13} = 0.3$ ; $\nu_{23} = 0.45$ $G_{12} = 5.2$ GPa; $G_{13} = 5.2$ GPa; $G_{23} = 4.2$ GPa
Mukavemet	$X_T = 1642$ MPa; $X_C = 1060$ MPa $Y_T = 66$ MPa; $Y_C = 220$ MPa $S_{12} = 75$ MPa; $S_{13} = 75$ MPa; $S_{23} = 70$ MPa;
Kırılma Tokluğu	$G_C^{FT} = 81500$ N/m; $G_C^{FC} = 106300$ N/m $G_C^{MT} = 280$ N/m; $G_C^{MC} = 1430$ N/m

**Tablo 2.** Karbon/epoksi malzemenin arayüz özellikleri

Arayüz Mukavemeti	$T_{o,I} = T_{o,II} = T_{o,III} = 115$ MPa
Kırılma Tokluğu	$G_{I,c} = 280$ N/m; $G_{II,c} = G_{III,c} = 860$ N/m
B-K Kriteri Sabiti	$\eta = 1.45$
Sertlik	$E_o = 5 \times 10^{14}$ N/m <sup>3</sup>

Kompozit kirişin üst ve alt yüzeylerinde deneylere uygun olarak her bir uçtan 25 mm boyunca sınır koşulları tanımlanmıştır. Alt yüzeyin ötelenmesi X ve Y yönlerinde sınırlandırılmışken, üst yüzey, basma yükü altında Poisson etkisinden dolayı şekil değişimine müsaade etmek için sadece X yönünde sabitlenmiştir.

Yarım silindirik çelik darbeleyici, 20 mm yarıçapa ve 0.785 kg kütleyle sahip analitik rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Darbeleyiciye, 4,43 m/s'lik bir başlangıç hızı (1 m yükseklikten serbest düşüşe karşılık gelir) verilir ve kompozit kirişin merkezinin biraz yukarısına yerleştirilir. Darbeleyicinin düşey yöndeki öteleme hareketi dışındaki tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır.

Modelde, ABAQUS / Explicit'in genel temas algoritması kullanılarak iki farklı temas etkileşimi tanımlanmıştır: (i) darbeleyici ile kirişin üst yüzeyi arasında, (ii) kirişin içinde. Kiriş içerisinde bir temasın tanımlanmasının nedeni, bir delaminasyon hasarını takiben arayüzlerde oluşan serbest yüzeyler arasındaki temastır. Her iki durumda da normal yöndeki etkileşimler için sert temas tanımlanmıştır. Teğetsel hareket için, metal-kompozit ve kompozit-kompozit temas için sırasıyla sürtünme katsayıları 0.3 ve 0.5 olan Coulomb sürtünme modeli tanımlanmıştır.

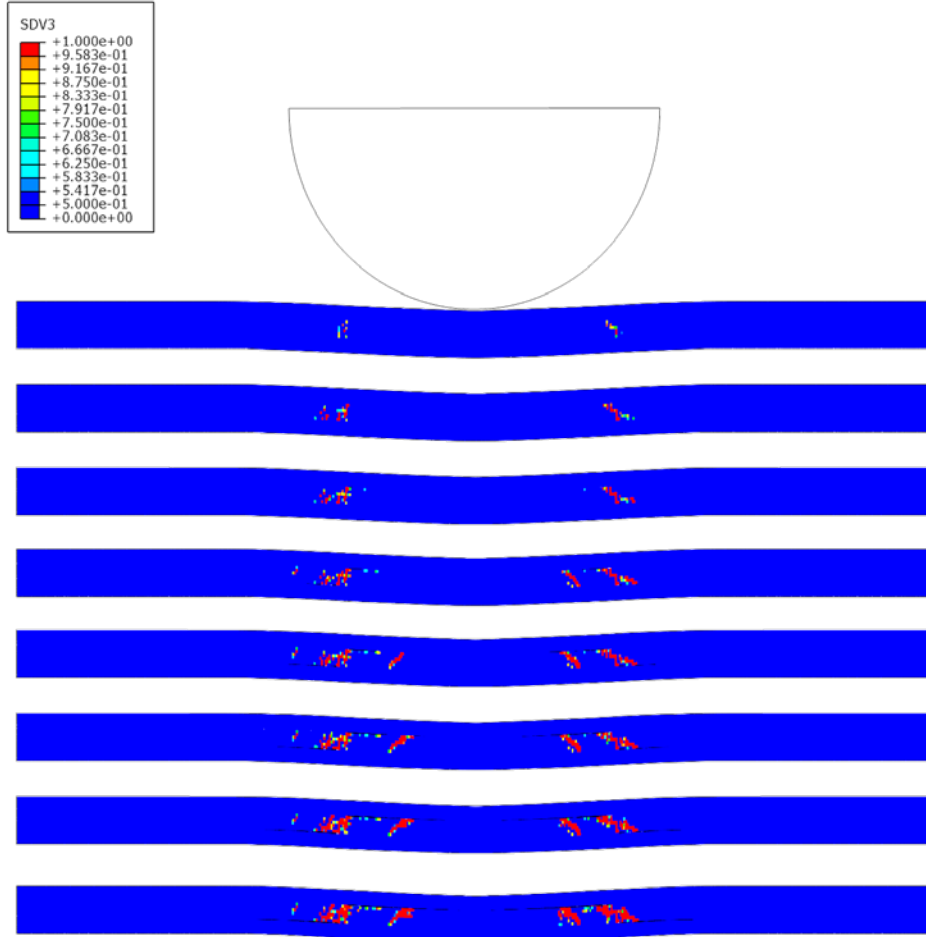
### 3. ANALİZ SONUÇLARI

Şekil 6'da kompozit kirişin 1  $\mu$ s zaman aralığı ile alınmış sekiz ardışık görüntüsü görülmektedir. Matris çekme hasarının orta 90 ° katmanlardaki dağılımına bakarak, deneysel sonuçlarla [12] iyi bir uyum elde edildiği söylenebilir. Hasar oluşum sekansı şu şekilde özetlenebilir: Kirişin her

iki tarafında da kalın gömülü  $90^\circ$  tabakaların içinde tek bir kesme çatlağı meydana gelir, eğimli bir açıyla arayüzlere doğru büyür ve ardından üst ve alt arayüzlerin her birinde bir delaminasyon görülür. Bu ana matris çatlaklarına ek olarak, ilk hasardan sonra gerilmelerin yeniden dağıtılmasıyla ikincil çatlaklar gözlenmektedir. İkincil çatlakların bazıları, arayüzlere ulaştıklarında yeni delaminasyonlara neden olmaktadır.

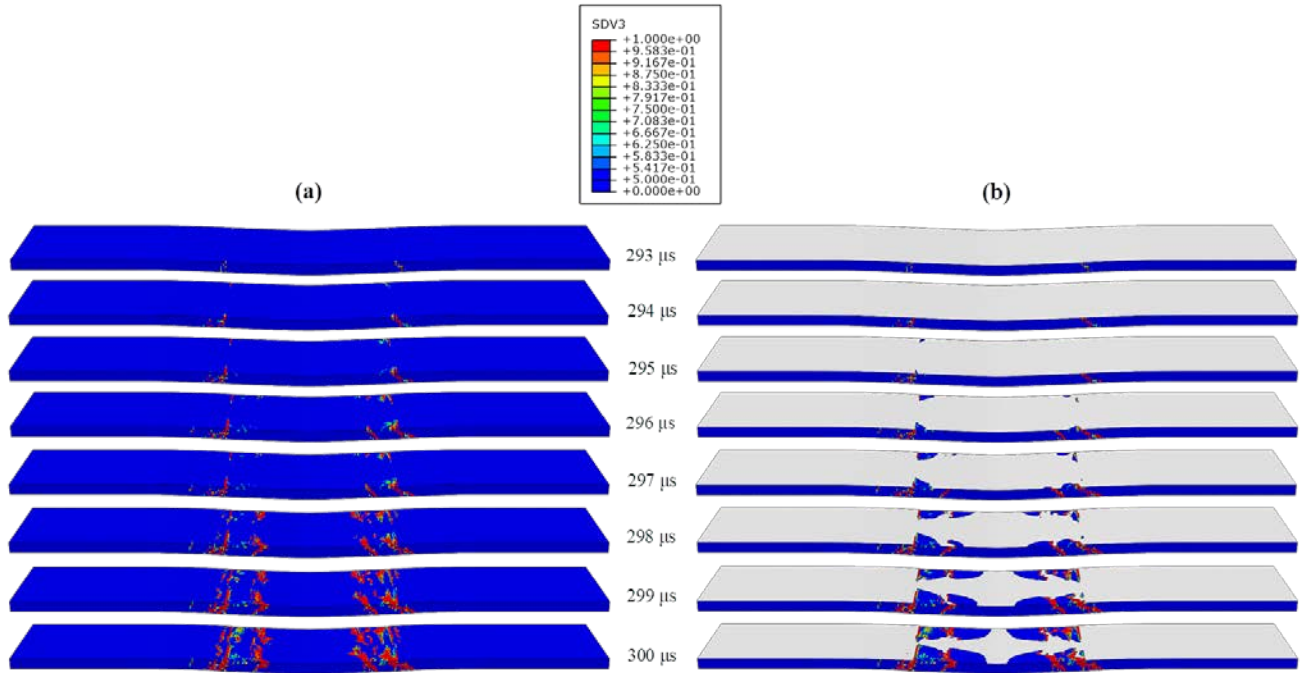
Sonlu elemanlar analizinin sonuçları, geometrinin üç boyutlu uzayda modellenmesinin hem katman içi hem de katmanlar arası hasar oluşumu sekanslarını oldukça etkilediğini göstermektedir. Şekil 7a'da, kiriş içerisindeki matris hasarının, üst  $[0/90]$  arayüzündeki dağılımı numune genişliği boyunca  $1 \mu\text{s}$  aralıklarla alınmış görüntülerle sunulmaktadır. Kümelenmiş  $90^\circ$  katmanlar içinde oluşan matris çatlaklarının, ilk olarak kirişin serbest kenarlarında oluştuğu ve kirişin ortasına doğru yayıldığı görülmektedir. Aynı zamanda, ikincil çatlaklar da serbest kenarda oluşmakta ve benzer şekilde kirişin içerisine doğru büyümektedir. Matris çatlaklarının serbest kenarda başlayıp içeri doğru yayılması, çizgisel darbe olayının iki boyutlu bir problem olarak idealleştirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kompozit kirişin üst  $[0/90]$  arayüzdeki delaminasyon oluşum sekansı,  $1 \mu\text{s}$  aralıklarla alınmış görüntülerle Şekil 7b'de sunulmaktadır. Delaminasyonların,  $90^\circ$  katmanlarda oluşan kesme tipi matris çatlaklarının, serbest kenarlarda arayüzlere ulaşması ile başladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.  $[0/90]$  karbon/epoksi kirişte darbe hasarı oluşum sekansı.





**Şekil 6. (a) Matris hasarı ve (b) delaminasyonun üst [0/90] arayüzünde kiriş derinliği boyunca dağılımı.**

Darbe ve kiriş arasındaki ilk temastan 295  $\mu$ s sonra, kirişin serbest kenarlarında mevcut olan 4 ana kesme çatlaklarından 2'si delaminasyon oluşturmaktadır. Bundan 1  $\mu$ s sonra, kalan iki çatlak da arayüze ulaşarak yeni delaminasyonları tetiklemektedir. Arayüze ulaşan matris çatlaklarının yol açtığı delaminasyonlar, ilk temastan yaklaşık 298-300  $\mu$ s sonra birleşmektedir. Sonuçlar, darbe yüküne maruz kalan kompozitlerdeki delaminasyon oluşum dizisinin karmaşık bir üç boyutlu olay olduğunu göstermektedir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, tek yönlü [0/90] karbon/epoksi kompozit kirişte düşük hızlı darbe sonucu meydana gelen hasarın oluşum süreci sayısal yöntemlerle araştırılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ABAQUS/Explicit'te gerçekleştirilmiştir.

- Hashin hasar başlatma kriterine sahip sürekli ortam hasar mekaniği temelli kompozit katman hasar modeli, ABAQUS/Explicit çözücüsüne kullanıcı tarafından yazılmış bir VUMAT alt yordamıyla başarıyla uygulandı. Bu model ile matris ve elyaf hasarı mekanizmaları simüle edildi.
- Delaminasyon hasarı, yapışkan elementlere ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışının tanımlandığı yapışkan bölge modeliyle simüle edildi.
- Sonuçlar, kirişteki hasarın serbest kenarlarda, kümelenmiş 90° katmanların ortasındaki kesme çatlakları ile başladığını ve bu çatlakların [0/90] arayüzlerine doğru büyüdüğünü göstermektedir. Arayüze ulaşan her bir matris çatlakının, bir delaminasyon başlattığı görülmüştür.
- Bu sonuçlar, literatürdeki deneysel gözlemlerle [12] yüksek seviyede tutarlıdır. Bu uyum, kompozit kirişteki darbeye bağlı hasar sürecinin, Hashin hasar başlatma kriterlerine sahip üç boyutlu kompozit hasar modeli kullanılarak doğru bir şekilde simüle edildiğini göstermektedir.
- Çizgisel darbe olayında, 3B etkilerin matris hasarı ve delaminasyon oluşum sekansları üzerindeki varlığı açıkça gösterilmiştir.

Sayısal modelin daha da geliştirilmesi amacıyla, farklı ebat ve dizilimlere sahip kompozit laminatlardaki hasar oluşum süreçleri incelenecektir. Bu amaçla, kompozit kirişlerin ve

plakaların düşük hızlı darbe testi üzerine deneysel bir program geliştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, darbe hasarını test kuponlarının geometrisinden ve malzemesinden bağımsız olarak yüksek kalitede öngörebilen bir sayısal model ile sanal bir test düzeneğinin oluşturulması hedeflenmektedir.

#### 4. TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. ve ODTÜ – Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (RÜZGEM) teşekkür eder.

#### KAYNAKLAR

- [1] Ullah, H., and Silberschmidt, V. V., “Analysis of impact induced damage in composites for wind turbine blades,” In Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET). Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- [2] Verma, A. S., Vedvik, N. P., & Gao, Z., “Numerical assessment of wind turbine blade damage due to contact/impact with tower during installation,” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 276, IOP Publishing.
- [3] Verma, A. S., Jiang, Z., Vedvik, N. P., Gao, Z., & Ren, Z., “Impact assessment of a wind turbine blade root during an offshore mating process,” *Engineering Structures*, Vol. 180, 2019, pp. 205-222.
- [4] Choi, H. Y., Downs, R. J., and Chang, F. K., “A new approach toward understanding damage mechanisms and mechanics of laminated composites due to low-velocity impact: Part I—experiments,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, (8), 1991, pp. 992-1011.
- [5] Rechak, S., and Sun, C. T., “Optimal use of adhesive layers in reducing impact damage in composite laminates,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 9, (6), 1990, pp. 569-582.
- [6] Lopes, C., Gurdal, Z., Camanho, P., Maimi, P., and Gonzalez, E., “Simulation of low-velocity impact damage on composite laminates,” 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 17th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, California, May 2009.
- [7] Lopes, C. S., Camanho, P. P., Gürdal, Z., Maimí, P., and González, E. V., “Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations,” *Composites Science and Technology*, Vol. 69, (7-8), 2009, pp. 937-947.
- [8] Lopes, C. S., Sádaba, S. S., Camanho, P. P., and González, C., “Advanced simulation of low velocity impact on fibre reinforced laminates,” 4th International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures, Cape Town, South Africa, 2014.
- [9] Lopes, C. S., Sádaba, S., González, C., Llorca, J., and Camanho, P. P., “Physically-sound simulation of low-velocity impact on fiber reinforced laminates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 92, 2016, pp. 3-17.
- [10] González, E. V., Maimí, P., Camanho, P. P., Turon, A., and Mayugo, J. A., “Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates,” *Composite Structures*, Vol. 94, (11), 2012, pp. 3364-3378.
- [11] Soto, A., González, E. V., Maimí, P., de la Escalera, F. M., de Aja, J. S., and Alvarez, E., “Low velocity impact and compression after impact simulation of thin ply laminates,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 109, 2018, pp. 413-427.
- [12] Topac, O. T., Gozluclu, B., Gurses, E., and Coker, D., “Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 92, 2017, pp. 167-182.
- [13] Maimí, P., Camanho, P. P., Mayugo, J. A., and Dávila, C. G., “A continuum damage model for composite laminates: Part I—Constitutive model,” *Mechanics of Materials*, Vol. 39, (10), 2007, pp. 897-908.

- [14] Malvern, L. E., *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1969.
- [15] Matzenmiller, A., Lubliner, J., and Taylor, R. L., "A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites," *Mechanics of materials*, Vol. 20, (2), 1995, pp. 125-152.
- [16] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fiber composites," *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, (2), 1980, pp. 329-334.
- [17] Pinho, S. T., Darvizeh, R., Robinson, P., Schuecker, C., and Camanho, P. P., "Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, (19-20), 2012, pp. 2313-2341.
- [18] Pinho, S. T., Davila, C. G., Camanho, P. P., Iannucci, L., and Robinson, P., "Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity," NASA/TM-2005-213530, 2005.