

RÜZGAR TÜRBİN KANATLARINDA YAPIŞTIRICI AYRILMA HASARININ KANAT YAPISAL BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİ

Onur Ali Batmaz¹, Can Muyan², Demirkan Çöker³

^{1,2,3} Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Ankara
^{1,2,3} RÜZGEM - Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara
¹ onur.batmaz@metu.edu.tr, ² can.muyan@metu.edu.tr, ³ coker@metu.edu.tr

ÖZET

Rüzgar türbin kanatlarının operasyonları boyunca yapısal bütünlüklerini koruyacak şekilde tasarlanması adına, yaşanması muhtemel hasar mekanizmalarının anlaşılması önemlidir. Bu kapsamda, kanat üretimi ve yapısal test aşamalarına geçmeden önce hasar oluşumunun ve ilerleyişinin sanal ortamda nümerik simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, tasarımların bir ölçüde validasyonlarının sağlanması için gereklidir. Bu çalışmada, ODTÜ RÜZGEM bünyesinde bulunan 5 metrelik cam elyaf takviyeli polimer rüzgar türbin kanadının sonlu elemanlar modeli, ABAQUS/Standard ortamında oluşturulmuştur ve test koşullarını simüle eden kelebekleme (flapwise)-minimum yükü altında, yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzünde kohezif bölge modeline dayanan yapıştırıcı ayrılma hasarı analizi gerçekleştirilmiştir. Belirtilen yük mertebesinde gerçekleşen yapıştırıcı ayrılma hasarının, kanadın yapısal bütünlüğünü yıkımsal boyutta etkilemediği gözlenmiştir. Sonuçlar, kanadın Puck ilerlemeli hasar analizi sonuçları ile karşılaştırıldığında, yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzünde yaşanacak yapıştırıcı ayrılma hasarından önce kök-geçiş bölgesinde yaşanan kompozit katmanlarında görülen hasar kanadın yapısal bütünlüğü bozduğu görülmüştür.

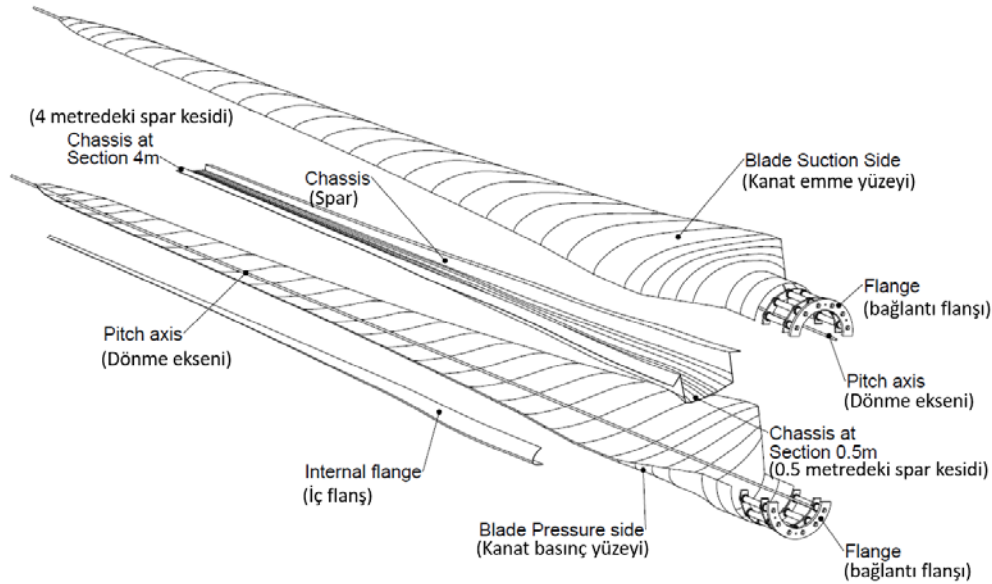
GİRİŞ

Rüzgar türbinleri, yirmi seneyi aşkın bir süre boyunca faaliyette olacak şekilde tasarlanan yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Canlı sağlığını veya yaşamını tehdit etmeyecek, maddi zararlara sebep olmayacak ve aynı zamanda belirlenen operasyonel isterleri karşılayacak rüzgar türbin kanatları tasarlanması adına yapısal güvenilirliği sağlamak önem teşkil etmektedir [1]. Yapısal güvenilirliğin temini, hasar mekanizmalarının kapsamlı şekilde anlaşılması ile mümkün olmaktadır. Operasyonel yükler, çevresel koşullar, malzeme özellikleri, tasarım farklılıkları, üretim süreçleri ve bu faktörlerin birbirleriyle etkileşimi kanat hasar mekanizmalarını belirleyen ana unsurlardır [2]. Yapısal testler gerçekleştirmek ile birlikte sağlam temeller üstüne kurulmuş analiz metodolojileri geliştirmek, hasar mekanizmalarını anlamak için izlenmesi gereken yollardır. Tasarım ve üretim süreçleri özelinde, yüksek ve alçak basınç yüzeylerinin iki ayrı parça olarak imal edilmesine takiben montajında yapıştırıcıların kullanılması yaygın bir yöntemdir [3] ve yapısal yıkıma neden olan hasar kaynaklarından biri de bahsi geçen yapıştırıcı arayüzlerindeki hasar oluşumlarıdır [4].

Kompozit rüzgar türbin kanatlarının mukavemet analizlerini sayısal yöntemlerle gerçekleştirerek kırılma mekanizmalarını inceleyen araştırmalar literatürde mevcuttur. Kanatların yapısal bütünlüklerini yıkıma uğratan hasar tipleri kabuk-spar arasındaki veya hücum/fırlar kenarındaki yapıştırıcı hasarı, sandviç panellerde yüzey-petek ayrılması, kabuk veya spar yapılarında burkulma olayını takiben delaminasyon, yapıştırıcı arayüzünde ayrılma hasarı, çekme gerilmesi altında fiber ve basma gerilmesi altında laminat hasarı olarak kategorize edilebilir [5]. Bahsedilen hasar tipleri kanat geometrisine ve uygulanan yüklere bağlı olarak değişebilmektedir. Spar katmanları arasındaki delaminasyon kaynaklı burkulma hasarı, Overgaard ve ark.'larının çalışmasında [6] kanadın yapısal yıkımının sebebi olarak belirlenmiştir. Kompozit delaminasyonunu gözlemleyebilmek için katmanların arasında kohezif bölge tanımlanmıştır. Benzer şekilde Chen ve ark.'ları [7], inceledikleri 52.3 metrelik kanatta

kök-geçiş bölgesinde görülen delaminasyonun kanadın yapısal bütünlüğünü bozan ana hasar mekanizması olarak belirlemişlerdir. Haselbach ve ark.'ları [8], 34 metre uzunluğundaki rüzgar türbin kanadının statik testlerinde firar kenarında yaşanan burkulma davranışının kanadın mukavemetine etkisini ve firar kenarı kaynaklı hasarları ilerlemeli analiz yöntemleriyle incelemiştir. Firar kenarındaki yapışma yüzeyini modellemede kohezif bölge içeren yenilikçi bir teknik önerilmiştir.

ODTÜ RÜZGEM bünyesinde gerçekleştirilmiş, 5 metrelik cam elyaf takviyeli polimer RÜZGEM rüzgar türbini kanadını yapısal anlamda incelemiş çeşitli çalışmalar mevcuttur. RÜZGEM kanadının genel görünümü Şekil 1'de gösterilmektedir [9]. Özyıldız ve ark.[10] Puck hasar kriterleri kullanılarak RÜZGEM kanadının doğrusal (linear) mukavemet analizini ve ilerlemeli hasar modelinin kullanıldığı doğrusal olmayan (nonlinear) mukavemet analizini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, doğrusal olmayan modelin kanadın mukavemet ve kırılma davranışını daha isabetli saptadığı ortaya konulmuştur. Muyan ve Çöker [11], çalışmalarında aynı kanadın kelebekleme(flappwise)-maksimum, kılıçlama (edgewise)-minimum, ve kelebekleme (maksimum) artı kılıçlama (minimum) birleşik yükleme durumları altında Puck ilerlemeli hasar analiziyle kırılma mekanizmalarını incelemiştir. Bahsi geçen yüklemelere karşılık gelen hasar bölgeleri tespit edilmiştir. İlerleyen çalışmalarında Muyan ve Çöker [12], kelebekleme-minimum yüklemesi altında yüksek basınç yüzeyi-spar arasında oluşmuş ayrılma hasarının statik mukavemetine ve yorulma dayanımına etkisini hasar içermeyen model ile karşılaştırarak, ayrılma hasarının kanadın yapısal ömrüne ve mukavemetine olan etkileri saptanmıştır. En güncel çalışmada, Muyan ve ark.'ları [13] kanadın sonlu elemanlar modelini titreşim analiz deneyleri ile karşılaştırılarak modelin validasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Titreşim analizleriyle yüksek oranda tutarlılık sağlayan sonlu elemanlar modeli, Puck ilerlemeli hasar analizi ile incelenmiş ve kanadın kök-geçiş bölgesinde kompozit katmanları delaminasyonunu işaret eden kırılma modunda hasar gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, kanadın yine kök-geçiş bölgesinde bulunan yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzünde yaşanabilecek yapıştırıcı ayrılma hasarının kritik olduğu öngörülmüştür.



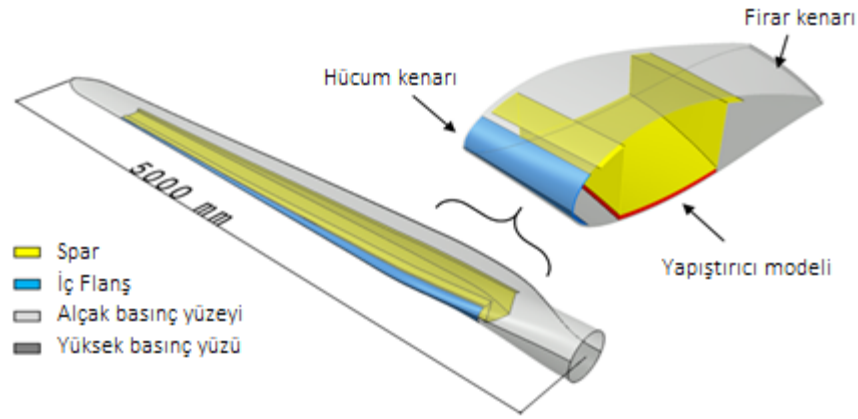
Şekil 1. 5-metrelik RÜZGEM rüzgar türbin kanadının montaj şeması [9]

Bu çalışmada, Puck ilerlemeli hasar analiz sonuçlarında belirlenen kritik bölgede yapıştırıcı ayrılma hasarı, iki-doğrusal (bilinear) kohezif bölge modeli kullanılarak incelenmiştir. Kullanılan iki-doğrusal kohezif bölge modeli, Alfano ve Crisfield tarafından önerilen modele dayanmaktadır [14]. Bu modelde, yapışkan tabakalarda açılmanın başlaması ve yayılması, kohezyonlu traksiyon-ayrılma yasaları ile simüle edilir. Kesme ve normal traksiyonlarıyla karşılık gelen deplasmanlar, hasar parametresi gözetilerek doğrusal olarak ilişkilendirilir.

Çalışmanın amacı, kohezif bölge modelini içeren 5 metrelik RÜZGEM rüzgar türbini kanadının yapıştırıcı ayrılma hasar sonuçları ile Puck ilerlemeli hasar analiz sonuçlarını karşılaştırmalı olarak incelemek ve nihayetinde kanadın yapısal bütünlüğüne etki eden basınç hasar mekanizmasını anlamak ve rüzgar türbin kanatları tasarım girdilerine katkı sağlamaktır.

SAYISAL MODEL

Rüzgar türbinin sonlu elemanlar simülasyon modelinin çeşidi, özellikleri ve hasar modelleri bu bölümde sunulmaktadır. Şekil 2’de görülen kanadın sayısal modeli, 3B ortamda ABAQUS/Implicit [15] programı kullanılarak oluşturulmuştur. Kanadın yapısal bütünlüğünü bozacağı öngörülen yapıştırıcı ayrılma hasarı, ilerlemeli hasar analiz sonuçlarında kritik olarak belirlenen bölgede kohezif model kullanılarak tanımlanmıştır.



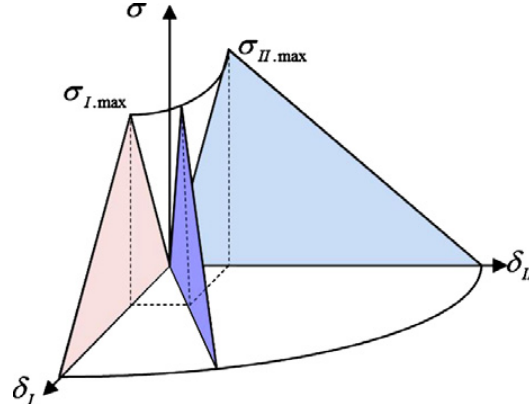
Şekil 2. 5-metrelik RÜZGEM rüzgar türbin kanadının sayısal modeli

ARAYÜZ HASAR MODELİ

Hasar oluşumu, malzeme özelliklerinde indirgemenin başladığını ifade eder. Malzeme özelliklerindeki indirgeme, seçilen hasar kriteri sağlandıktan sonra gözlenmeye başlar. Hasar kriteri sağlanana kadar, lineer traksiyon-ayrılma davranışı ile modellenir. Denklem (1)’de verilen ikinci dereceden nominal gerilme kriteri kullanılarak yapıştırıcı ayrılma hasarının başlaması belirlenebilir. Bu denklemdeki t_n , t_s ve t_t sırasıyla yüzeye uygulanan düzlemsel açılma, düzlemsel kesme ve düzleme dik kesme modlarının traksiyonlarıdır ve t_n^0 , t_s^0 , t_t^0 değerleri karşılık gelen kırılma modları için arayüz mukavemetleridir. Düzlemsel açılma modunda basma yönündeki gerilmeler çatlak ilerlemesine katkıda bulunmadığı için sadece pozitif traksiyon değerleri kritere dahil edilir.

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Hasar ilerlemesi, hasar oluşumu sebebiyle açığa çıkan enerji cinsinden tanımlanabilir. Bu enerjiye kırılma tokluğu denir ve G_c sembolü ile tanımlanır. Eğer düzlemsel açılma, düzlemsel kesme ve düzleme dik kesme modlarının eşzamanlı yaşanması (karışması) söz konusu ise, kırılma enerjisi mod karışma etkisi göz önüne alınarak hesaplanması gerekmektedir. Şekil 3’te görülen ikidoğrusal traksiyon-ayrılma davranışı, karışık moddaki yapıştırıcı ayrılma hasarının görülmesi beklenen kohezif bölgede tanımlanmıştır.



Şekil 3. Kohezif bölgenin karışık moddaki iki doğrusal traksiyon-ayrılma davranışı [16]

Kanat geometrisinin doğrusal olmaması, kanat yüklerinin karmaşıklığı ve benzeri faktörler göz önüne alındığında, kohezif bölge davranışı modellenirken mod karışması dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı ayrılma hasarı gözlenmeye başladığında, hasarın karışık modlardaki ilerleyişinin modellenmesi denklem (2)'de verilen Benzeggagh-Kenane kriteriyle sağlanır [17]. Denklemden verilen G_{equ} değeri tüm modlardaki kırılma tokluğu toplamalarını geçtiğinde çatlak ilerlemesi gözlenir. Hasar oluşumu gözlenen elemanlara lineer yumuşama davranışı atanır.

$$G_{equ} = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^n \quad (2)$$

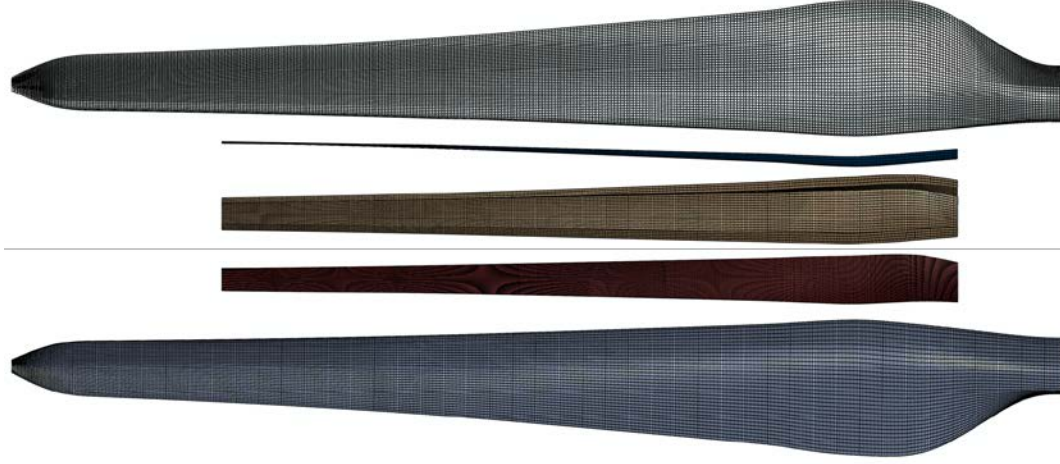
SONLU ELEMENLAR MODELİ

Rüzgâr türbin kanadının dış geometrisini tanımlayan veter uzunluğu, burulma açısı gibi parametreleri içeren teknik resimler Patras Üniversitesi'nden Core Team tarafından sağlanmıştır [9]. Tablo 1'de kanadın malzemelerinin özellikleri ve statik analizde kullanılmak üzere mukavemet değerleri listelenmiştir. Çizelgedeki mukavemet değerleri, GL 2015 standartlarında [18] tavsiye edilen emniyet katsayıları dahil edilerek hesaplanmıştır.

Tablo 1. Malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri [10]

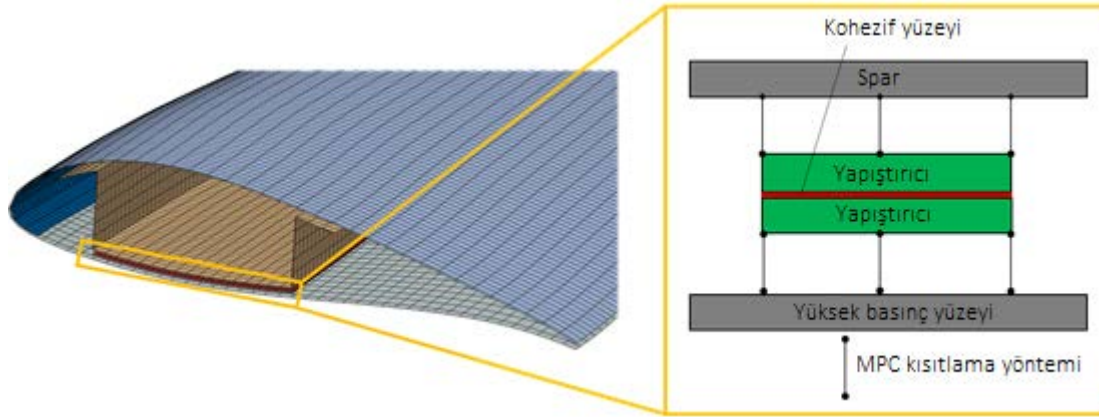
	Özkütle (kg/mm ³)	Elastik (GPa)	Mukavemet (MPa)	Poisson Oranı
Lamina	1896	$E_1 = 24.84$ $E_2 = 9.14$ $G_{12} = 2.83$	$S_{XT} = 191.73$	0.29
			$S_{XC} = 101.16$	
			$S_{YT} = 16.86$	
			$S_{YC} = 50.41$	
			$S_{SH} = 11.29$	
Çelik	7850	$E = 210$	$S = 581.80$	0.30
Jel Kaplama	1200	$E = 3.98$	$S = 35.29$	0.34
CSM 300	1896	$E = 9.14$	$S = 16.86$	0.29
Divinycell H45	48	$E_1 = 55E-03$ $E_2 = 55E-03$ $G_{12} = 15E-03$	$S_T = 1.40$	0.40
			$S_C = 0.60$	
			$S_{SH} = 0.56$	
Yapıştırıcı	1400	$E = 3.00$ $G_{12} = 1.59$	$S = 7.8$	0.30

Kanadın sonlu elemanlar kompozit modelleri 50169 adet iki boyutlu kabuk elemanları (S4R), yapıştırıcı modeli ise 26334 adet sürekli kabuk elemanları (SC8R) kullanılarak oluşturulmuştur. Aşağıdaki Şekil 4'te kanadın tam ölçekteki sonlu elemanlar modeli görülmektedir.



Şekil 4. Kanat parçalarının sayısal modeldeki eleman yoğunlukları (yukarıdan aşağıya: yüksek basınç yüzeyi, iç flaş, spar, yapıştırıcı, alçak basınç yüzeyi)

Yapıştırıcı ayrılma hasarını simüle etmek için, Haselbach ve ark.'ın [8] çalışmalarında firar kenarındaki yapıştırıcıyı modelledikleri yöntemle tutarlı olacak şekilde, uygulanan kanat yükü altında öngörülen yapıştırıcı ayrılma hasarı bölgesinde (yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzü) yapıştırıcı modelleri oluşturulmuştur. Şekil 5'te görülebileceği üzere, oluşturulan yapıştırıcı modellerinin arasında kohezif bölge tanımlanmıştır. Kohezif bölge tanımlanırken kohezif yüzey method kullanılmıştır. Yapıştırıcı ve kompozit parçalar arasındaki bağlantı çoklu kısıtlama (Multi-Point-Constraint) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem köle (slave) düğümlerinin tüm serbestlik derecelerini efendi (master) düğümlerinin serbestlik derecelerine eşitlenir ve analiz süresince yapıların aynı şekilde deforme olmaları sağlanır.



Şekil 5. Öngörülen ayrılma hasarı bölgesinde oluşturulan yapıştırıcı modelinin şeması

Yapıştırıcı modelleri arasında oluşturulan kohezif bölgenin arayüz özelliklerinin belirlenmesinde kanadın boyutları, malzeme özellikleri ve operasyonel koşulları göz önünde bulundurularak literatürden faydalanılmıştır. Haselbach ve ark.'ın [19] kullandıkları ve RÜZGEM kanadı analizinde kullanılan arayüz değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Kohezif bölge arayüz özellikleri

	Arayüz Mukavemeti (MPa)	Kırılma Tokluğu (N/m)	Kohezif Sertliği (N/m^3)	B-K Kriteri
Haselbach ve Branner [19]	$\tau_n = 7.5$ $\tau_{sh} = 15$	$G_{Ic} = 200$ $G_{IIc} = 1000$ $G_{IIIc} = 1000$	$K_{nn} = 3E14$ $K_{ss} = 1.15E14$ $K_{tt} = 1.15E14$	$\eta = 3.8$
Batmaz, Muyan, Çöker	$\tau_n = 1.2$ $\tau_{sh} = 2.4$	$G_{Ic} = 40$ $G_{IIc} = 200$ $G_{IIIc} = 200$	$K_{nn} = 3E14$ $K_{ss} = 1.15E14$ $K_{tt} = 1.15E14$	$\eta = 3.8$

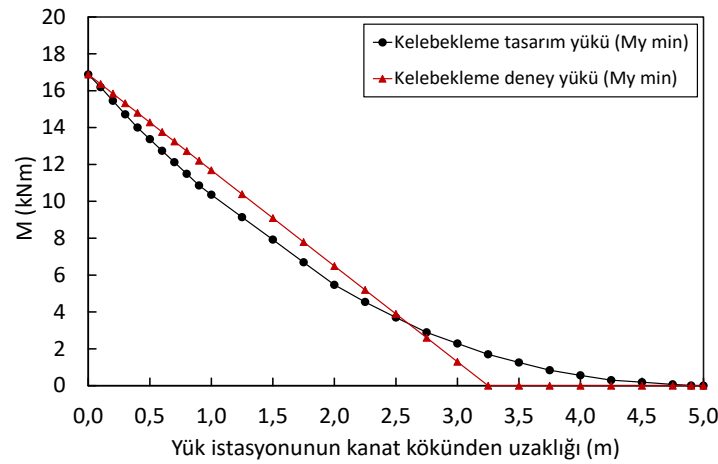
Haselbach ve ark.'ın kullandıkları arayüz mukavemet ve kırılma tokluğu değerleri, 2.5 olan emniyet katsayısı dahil edilerek Tablo 2'deki değerler elde edilmiştir. Kohezif sertlik değerlerinin tabiatıyla simülasyon sonuçlarına etkisi olmaması ve simülasyonun yakınsaması için görece yüksek değerler belirlenmektedir. Bu sebeple, referansta verilen değerler değiştirilmeden analizde kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar modelinde tanımlanan sınır koşulları ve uygulanan deplasman Şekil 6'da gösterilmiştir. Kanadın kök kısmında bulunan düğümler, tasarlanan cıvatalı bağlantıyı temsil edecek şekilde tüm serbestlik derecelerinde sabitlenmiştir.



Şekil 6. Sınır koşulu ve deplasman uygulanan bölgeler

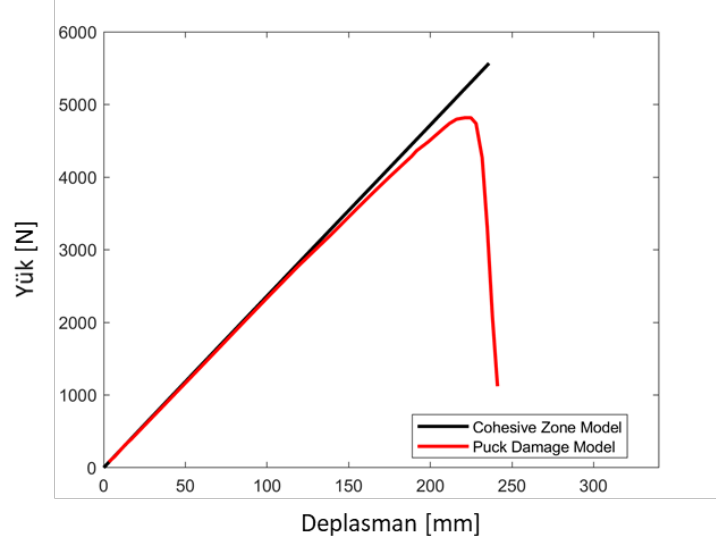
Kanat üzerindeki aerodinamik ve atalet yüklerinin oluşturduğu moment dağılımı ve bu moment dağılımını kabul edilebilir bir hata payı içerisinde oluşturan kelebekleme-minimum yönündeki deplasmanın moment dağılımı Şekil 7'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7. Kelebekleme-minimum yönündeki tasarım ve test yüklerinin oluşturdukları eğilme moment dağılımı

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Şekil 8’de sonlu elemanlar modeli kullanılarak elde edilen yükleme-deplasman eğrileri yapıştırıcı ayrılma hasarı içeren ve Puck ilerlemeli hasar analizi içeren modeller için verilmiştir. Grafiklerden görülebileceği üzere, yüksek basınç yüzü-spar arayüzünde bulunan yapıştırıcı ayrılma hasarının kanadın yapısal bütünlüğüne yıkımsal etkisi olmazken, kompozit katmanları arasında delaminasyon yaşandığını ifade eden Puck ilerlemeli hasar modunda limit yükün %93’ünde yapısal yıkım gözlenmiştir [13].

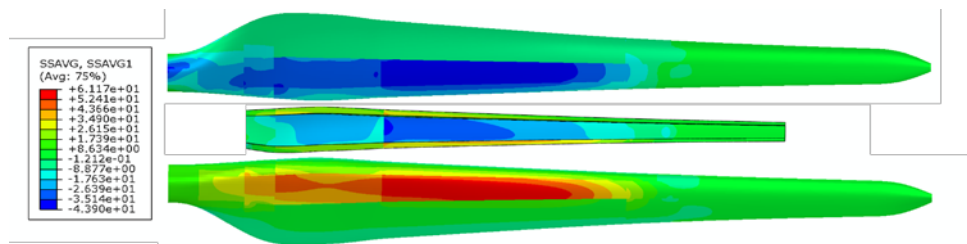


Şekil 8. Yapıştırıcı ayrılma hasarı ve Puck ilerlemeli hasar modellerinin yük-deplasman eğrileri
Yapıştırıcı ayrılma hasar modeli içeren kanadın yükleme altındaki deforme olmuş hali Şekil 9’da gösterilmiştir. En yüksek deplasman değeri kanat ucunda 522.1 mm olarak bulunmuştur.



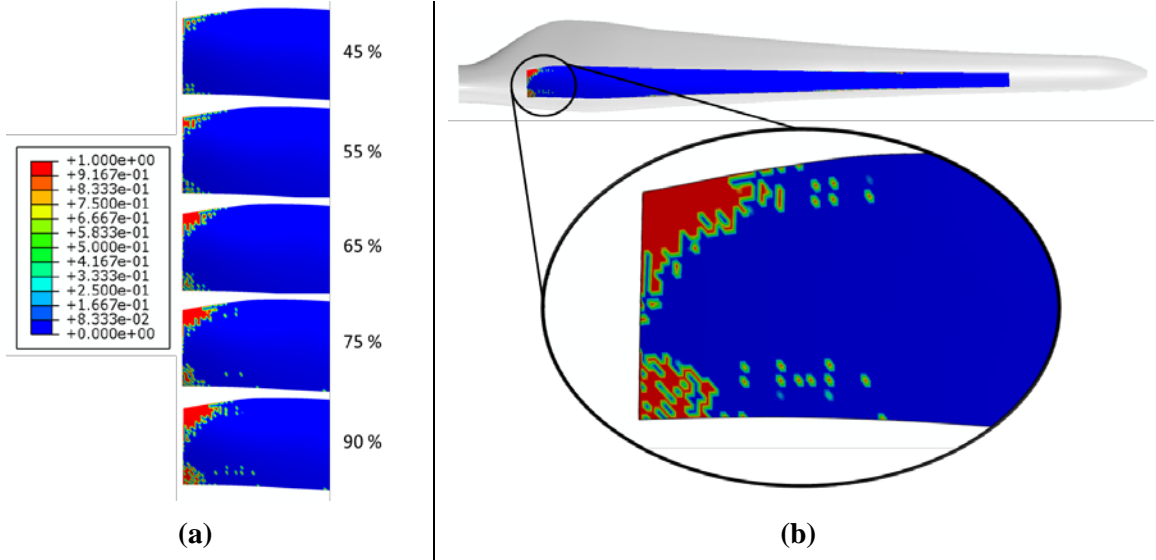
Şekil 9. RÜZGEM kanadının keblekleme-minimum yönündeki yük altında deforme olmuş şekli

Sırasıyla yüksek basınç yüzeyi, spar ve alçak basınç yüzeyi için fiber yönündeki ortalama laminat gerilme dağılımları Şekil 10’da sunulmuştur. Beklendiği üzere, kanadın yüksek basınç yüzü basma, alçak basınç yüzü ise çekme gerilmelerine maruz kalmıştır. Yüksek gerilmelerin spar etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. En yüksek ortalama laminat basma ve çekme gerilmeleri sırasıyla 43.90 ve 61.17 MPa mertebelerinde bulunmuştur.



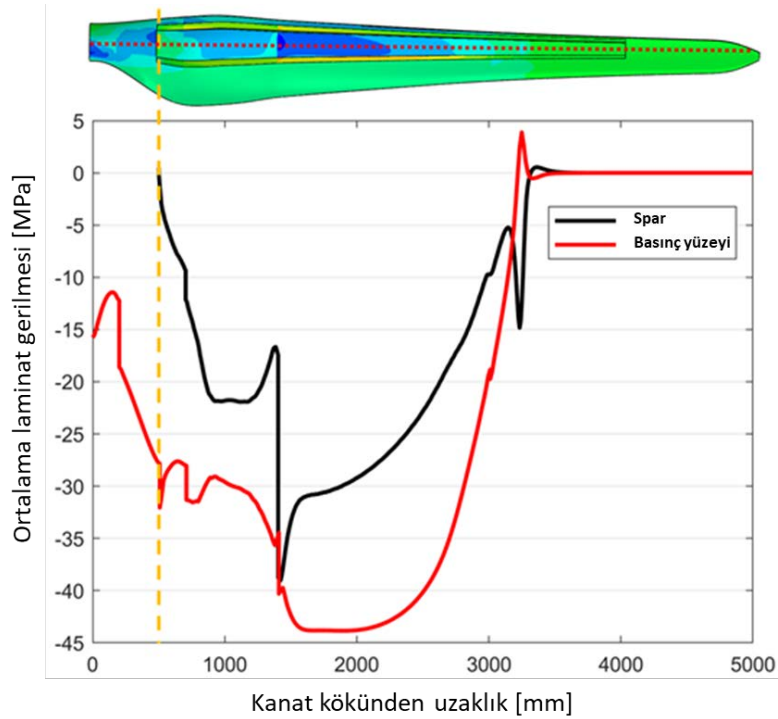
Şekil 10. Yüksek basınç, spar ve alçak basınç yüzeyleri için fiber yönündeki ortalama gerilme dağılımları

Şekil 11.a'da yapıştırıcı yüzeyi üzerindeki ayrılma hasarı oluşum sekansı, Şekil 11.b'de ise tam yüklemeye sonucunda oluşan nihai hasar dağılımı sunulmuştur. Ayrılma hasarı, spar yapısının yapıştırıcısıyla birleştiği köşe noktalardan başlayıp, uygulanan yük arttıkça merkeze ve kanat ucuna doğru ilerlemiştir. Ayrılma hasarının göreceli düşük yüklemelerde gözlenmiş olması referans literatür değerlerine nazaran zayıf özellikler atanmasının bir sonucudur.



Şekil 11. Yapıştırıcı yüzeyindeki ayrılma hasarının (a) farklı yük yüzdelerindeki oluşum sekansı ve (b) limit yük değerindeki nihai hasar dağılımı

Şekil 12'de kanat görselinin üzerinde kırmızı noktalarla tasvir edilen düğüm patikası boyunca, spar ve yüksek basınç yüzeyleri için sırasıyla 0-5000 mm ve 500-4000 mm arasındaki ortalama laminat gerilme eğrileri sunulmuştur. Düğüm patikası spar yapısının tam orta noktalarından geçecek şekilde seçilmiştir. Gerilme değerlerindeki ani değişimler kompozit katmanlarındaki eksiltme yapılan konumları (ply drop) göstermektedir.



Şekil 12. Spar ve yüksek basınç yüzeyi laminatlarının ortalama gerilme eğrileri

Yüksek basınç yüzü ve spar gerilme eğrilerine bakarak, yapıların taşıdıkları yükler hakkında yorum yapabilmek için kesit özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu bağlamda, hasar oluşumu gözlenen bölgede yüksek basınç yüzeyi ve spar için et kalınlıkları sırasıyla 8.674 mm ve 9.590 mm'dir. Kalınlıkların aynı mertebelerde olmasına karşın yapıştırıcı ayrılmasının görüldüğü bölgenin uç noktasında (600 mm konumu) yüksek basınç yüzeyi ve spar basma gerilme değerleri sırasıyla 28 MPa ve 6.5 MPa'dır. Bu gerilme değerlerine karşılık gelen, birim veter uzunluğuna düşen kuvvetler ise yüksek basınç ve spar için sırasıyla 242.9 N/mm ve 62.3 N/mm olarak bulunabilir. Bu bağlamda, hasar oluşumu ve ilerleyişinin gözlemlendiği spar başlangıç istasyonu özelinde, yük akışının spardan ziyade yüksek basınç yüzeyinden gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada 5 metrelik RÜZGEM rüzgar türbini kanadının yapıştırıcı ayrılma hasarı oluşum süreci sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi ABAQUS/Implicit kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı hasar oluşumu, Muyan ve ark.'larının çalışmasındaki ilerlemeli hasar analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Yüksek basınç yüzü ve spar arayüzüne kohezif bölge modeli uygulanmıştır. Bu model ile yapıştırıcı ayrılma hasarı simüle edilmiştir.

- Yapıştırıcı ayrılma hasarının öncelikle mukavemet değişiminin ani yaşandığı spar köşelerinden başladığını ve hasarın kök-geçiş bölgesini kapsayacak şekilde ilerlediği görülmektedir.
- Mevcut geometri, malzeme özellikleri ve uygulanan yük altında, ilerlemeli hasar analizi sonuçlarında kritik olarak belirlenen bölgede yapıştırıcı ayrılma hasarının gözlenmesinin tek başına kanadın yapısal bütünlüğüne yıkımsal etkisi olmadığı görülmüştür.
- Spar tasarımının kanadın kök kısmına kadar devam etmiyor oluşu sebebiyle, spar başlangıç istasyonu olan 0.5 metre yakınlarında spardan ziyade kabuk yapılarının daha çok yük taşıdığı ve daha yüksek gerilmelere maruz kaldığı saptanmıştır. Spar yapısının efektif olarak yük taşımaya başladığı bölgenin, ayrılma hasarı gözlenen bölgeden daha sonraki istasyonlara denk geldiği görülmüştür. Bu sebeple, ilerlemeli hasar analizinde yüksek basınç yüzünde kompozit katmanlarında görülen hasar, yüksek basınç yüzeyi-spar arayüzünde gözlenen yapıştırıcı ayrılmasından daha yıkımsal olmuştur.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı destekleyen ODTÜ – Rüzgâr Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi'ne (RÜZGEM) teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] **Holmes, J. W., Sørensen, B. F., Brøndsted P.**, 2007. Reliability of wind turbine blades: an overview of materials testing, Wind Power Shanghai.
- [2] **Chen, X., Eder, M.A.** 2020. A Critical Review of Damage and Failure of Composite Wind Turbine Blade Structures, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 942 (012001).
- [3] **Eder, M. A., and Bitsche, R. D.**, 2015. Fracture analysis of adhesive joints in wind turbine blades. Wind Energ., 18, 1007– 1022.
- [4] **Zuo, Y., Montesano, J., Singh, C.V.** 2017. Assessing Progressive Failure in Long Wind Turbine Blades Under Quasi-Static And Cyclic Loads, Renewable Energy, 119 (2018), p754-766.

- [5] **Sørensen, B.F., Jørgensen, E., Debel, C., Jensen, H.M., Halling, K.M., Møllevej, R., & Vej, E.F.** 2004. Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1) - Summary Report.
- [6] **Overgaard, L C, Lund, E, & Thomsen, O T.,** 2010. Structural collapse of a wind turbine blade.
Part A: Static test and equivalent single layered models Compos. Part A Applied Science and Manufacturing 41 (2)
- [7] **Chen, X, Zhao, W, Zhao, X L, and Xu, J Z.,** 2014. Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading Energies 7(4), 2274-2297
- [8] **Haselbach, P U and Branner, K.,** 2016. Initiation of trailing edge failure in full-scale wind turbine blade test Engineering Fracture Mechanics 162 136-154
- [9] **Philippidis, T and Roukis, G.,** 2013, Structure design report of METUWIND small rotor Blade, Confidential Interim Report
- [10] **Ozyildiz, M., Muyan, C., Coker, D.** 2018. Strength analysis of a composite turbine blade using puck failure criteria. In Journal of Physics: Conference Series (Vol.1037, No. 4, p. 042027). IOP Publishing.
- [11] **Muyan, C., Coker, D.** 2020. Finite element simulations for investigating the strength characteristics of a 5 m composite wind turbine blade. Wind Energy Science,5(4), 1339-1358.
- [12] **Muyan, C., Coker, D.** 2020. Strength analysis of a 5-m composite wind turbine blade under static and fatigue loading conditions. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 942, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- [13] **Muyan, C., Batmaz, O., Coker, D.** 2021. 5-m Kompozit Rüzgar Türbini Kanadi Sonlu Elemanlar Modelinin Doğrulanması ve İlerlemeli Intralaminar Hasar Analizi, 6. İzmir Rüzgar Sempozyumu.
- [14] **Alfano, G., Crisfield, M.A.,** 2001. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues, Int. J. Numer. Methods Eng., Volume 50, no. 7, pp. 1701-1736.
- [15] ABAQUS CAE, 2019. Version 2.7.3. Dassault Systemes Simulia Corp.
- [16] **May, M., Hallett, S. R.** 2010. A combined model for initiation and propagation of damage under fatigue loading for cohesive interface elements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41(12), 1787–1796.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.08.015>
- [17] **Kenane M, Benzeggagh ML.** 1997. Mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading. Composites Science and Technology 1997; 57: 597–605
- [18] **Germanischer Lloyd Guidelines,** Edition 2015. Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines.
- [19] **Haselbach, P., Bitsche, R., & Branner, K.,** 2016. The effect of delaminations on local buckling in wind turbine blades. Renewable Energy, 85, 295–305.