

5-m KOMPOZİT RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI SONLU ELEMANLAR MODELİNİN DOĞRULANMASI VE İLERLEMELİ İNTRALAMİNAR HASAR ANALİZİ

Can Muyan¹, Onur Ali Batmaz², Demirkan Çöker³

^{1,2,3}ODTÜ Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Ankara
¹can.muyan@metu.edu.tr, ²onur.batmaz@metu.edu.tr, ³coker@metu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma kompozit 5-m RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modelinin deneysel titreşim analizi sonuçlarına dayalı doğrulanması ve statik kelebekleme (flapwise) yüklemesi altındaki ilerlemeli hasar analizi ile ilgilidir. Deneysel titreşim analizi ve RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modelinin ilk dört titreşim frekansı arasındaki fark %7'nin altında olup, burulma olan beşinci titreşim frekansı için deneysel titreşim frekansı ile sonlu elemanlar modeli farkı %11 olarak belirlenmiştir. Deneyler ve simülasyon ile elde edilen titreşim mod'ları aynı bulunmuştur. Sonlu elemanlar modelinin doğrulanmasının ardından, kanadın kelebekleme yüklemesi altındaki kırılma mekanizmasının anlaşılabilmesi için tam ölçekli test simülasyonu yapılmıştır. Bu amaçla kanat sonlu elemanlar modeline Puck ilerlemeli hasar modeli algoritması ANSYS APDL programlama dili kullanılarak entegre edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre kelebekleme yükü altında kanadın kırılması kanadın kök geçiş bölgesinde başlamaktadır ve kelebekleme yükünün %93'ünden itibaren yük-yer değiştirme eğrisinde düşüş gözlemlenmektedir.

1. GİRİŞ

Kanatlar rüzgar türbinin en önemli bileşenleri arasındadırlar. Türbin kanatları hasara maruz kalmaya müsait olup, tamir edilmeleri gerektirecek hasarlar oluşursa, bu durum türbinin uzun süre çalışmamasına sebep olur [1]. Bu nedenle kanadın dizayn yüklemelerine karşı hasar görmeyecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Kanatlar, sertifika alabilmeleri için tasarım aşamasının sonunda tam ölçekli testlere tabi tutulurlar. Ancak tam ölçekli kanat testleri masraflı ve zaman alıcıdır. Dolayısıyla kanat testinden önce kanat tasarımında kullanılacak sonlu elemanlar modelinin hızlı oluşturulabilmesi ve sonlu elemanlar modelinin doğruluğu önem taşımaktadır [2]. Tam ölçekli testi sırasında kanadın kırılmasına sebep olan ana hasar mekanizmalarının anlaşılabilmesi kanat testlerinin ilerlemeli hasar modellerini içeren sonlu elemanlar modelleri ile simüle edilmesi ve hasar mekanizmalarının incelenmesi ile mümkündür [3].

Literatürde, son yirmi yılda kompozit türbin kanatlarının yapısal davranışı üzerine birçok çalışma yayınlanmıştır ve çalışmaların çoğu büyük rüzgar türbini kanatları için yapılmıştır. Jensen ve ark. [4], kelebekleme (flapwise) yüklemesi altında 34 metrelik bir kompozit rüzgar türbini kanadının tam ölçekli testleri ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. Hem testlerde hem de simülasyonlarda, kanadın havayı emdiği yüzeyde bulunan spar keplerinin doğrusal olmayan bir şekilde eğildiğini ve kesitsel ovalleşmeyi, yani Brazier etkisini gözlemlenmiştir. Dolayısıyla kanadın ana kırılma nedeninin Brazier etkisinin olduğunu öne sürmüşlerdir. Overgaard ve ark. [5] çalışmalarında, kelebekleme yüklemesine maruz kalan 25 metrelik bir kompozit rüzgar türbini kanadının tam ölçekli kırma testi ve yapısal analizi hakkında bilgi vermişlerdir. Çalışmalarında, Overgaard ve ark. [5], Jensen ve ark. [4]

tespitlerinden farklı olarak, kanadın kırılmasına yol açan ana hasar mekanizmasının delaminasyon ve bunun local burkulma ile etkileşimi olduğunu iddia etmişlerdir.

Yang ve ark. [6] 40 m'lik bir rüzgar türbini kanadın kırılmasını araştırmışlardır ve tam ölçekli test sonuçlarına dayanarak, kanadın kırılmasının temel nedeninin yapışma yüzeylerinin ayrılması olduğunu göstermişlerdir. Kim ve ark. [7], 3D Puck hasar modelini ve lineer burkulma analizini kullanarak Multi-MW sınıfı bir rüzgar türbini kanadının yapısal davranışını incelemişlerdir. Sonuçlara göre kanat yeterli yapısal mukavemet ve burkulmaya karşı dayanım göstermektedir. Laminat hasarı bakımından ise kanadın en zayıf noktası kabukta veter uzunluğunun maksimum olduğu yerde bulunmaktadır. Başka bir çalışmada Chen ve ark. [8], 52,3 m'lik bir rüzgar türbini kanadının tam ölçekli bir kırılma testini yapmışlardır. Spar keplerindeki delaminasyonun ve kök geçiş bölgesinde bulunan spar ağlarında (web)'lerinde oluşan hasarın, kanadın kırılması açısından ana kırılma mekanizmalarını oluşturduğunu belirtmişlerdir. Lokal burkulma, düzleme dik deformasyonu kolaylaştırarak ana hasar mekanizmasına katkıda bulunmaktadır. Büyük kanatlarda kanat kök geçiş bölgesinde görülen yapışkan ayrılması ve delaminasyon hasarına sebep olan kanadın kalınlığı yönündeki gerilmelerin sonlu elemanlar analizinde dikkate alınması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Haselbach ve Branner [9] 34 metrelik rüzgar türbini kanadının tam ölçekli kırılma testi esnasında kanadın firar kenarın başlayan yapışkan ayrılması hasarı ve hasarın ilerlemesini incelemektedirler. Çalışmalarında firar kenarında ve sandviç panellerde görülen hasar başlangıcında burkulmanın etkisini vurgulamaktadırlar. Çalışmanın bir diğer sonucu olarak, kırılma mekaniğinin (kohesif elemanlar) kullanıldığı modelleme tekniğinin deneyler ile uyumlu sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Montesano ve ark. [10] hasar kriterlerini içeren ilerlemeli kompozit hasar modellerinin mikroskobik intralaminar hasarın gelişimini içermediğini belirtmişlerdir. Ancak mikroskobik intralaminar hasar modellerinin makroskopik düzeyde hasar başlangıcını tahmin edilebilmesi için büyük önem taşıdığını belirtmişlerdir. Bu nedenle çalışmalarında Montesano ve ark. [10] statik ve yorulma yüklemesi altında 33.25m rotor kanadında oluşacak hasar mekanizmalarını açıklayabilmek için geliştirdikleri fiziksel temellere dayalı çok ölçekli hasar modeli kullanmışlardır. Mikroskobik çatlaklarının gelişimini tahmin eden çok ölçekli hasar modellerini kullanarak, kanat kök bölgesinde veter uzunluğunun maksimum olduğu yerde bulunan spar ağları (web)'leri arasındaki aerodinamik yüzeylerin olduğu bölgede hasar başlangıcını gözlemlenmişlerdir.

Literatürde büyük ölçekli rüzgar türbini kanatlarının aksine, küçük ölçekli rüzgar türbini kanatlarının yapısal analiziyle ilgili daha az çalışma mevcuttur. Chen ve ark. [11] çalışmalarında 10,3 m rüzgar türbin kanadının lokal burkulma karşı dayanımına odaklanmışlardır. Sonlu elemanlar analizi ile keskin kenarlı kanat konfigürasyonların lokal burkulmalara karşı daha az direnç gösterdiğini ortaya koymuşlardır. 10,3 m kanadın testi sırasında spar ağları, düz sırta sahip kabuk yüzeylerde lokal burkulma gözlemlenmesine rağmen, bu lokasyonlarda kompozit laminat hasarı gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlar, farklı kanat boyutları için farklı hasar mekanizmalarının olasılığını göstermektedir. Bir başka çalışmada 9-m rüzgar türbini kanadının yapısal mukavemetinin artırılabilmesi için Paquette ve Veers [12] bir kanat tasarım çalışması yapmışlardır. Kanatta düz sırt, büyük kök çapı ve karbon kep'ler gibi yapısal iyileştirmeler tanıtılmış ve yapısal tasarım açısından sağladıkları avantajlar ortaya konmuştur. Kanatların statik mukavemeti, gerinimlerin hasar oluncaya kadar ölçülmesi ve sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, kanatların lineer burkulma analizi yapılmıştır.

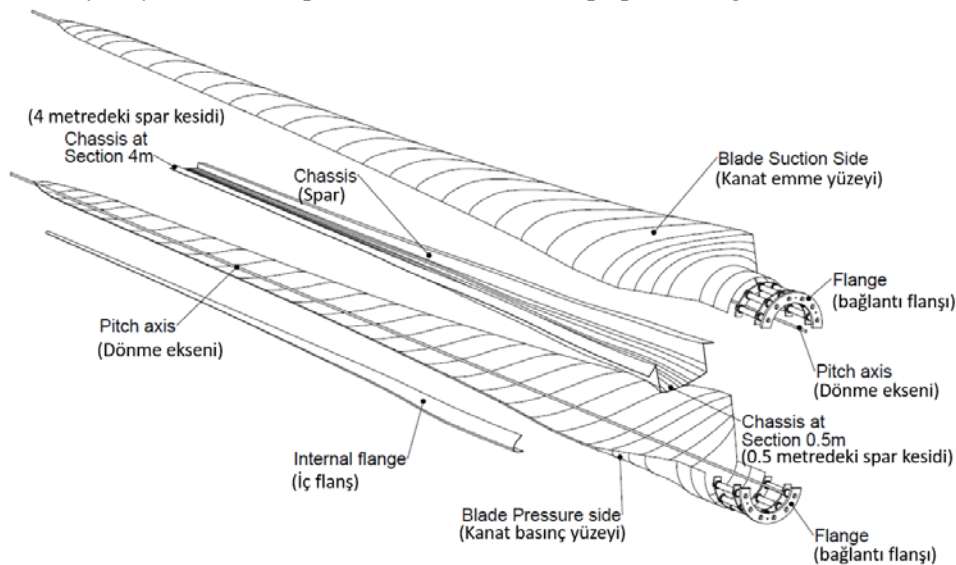
Noever-Castelos, Haller ve Balzani [2]'in yeni çalışmasında 20m kompozit rüzgar türbin kanadının sonlu elemanlar modelinin deney sonuçlarıyla doğrulama çalışması yapılmıştır. Doğrulama çalışmasında kanat kütlesi, kanat kütle merkezi, yük altında kanadın deformasyonu, gerinim seviyesi, doğal frekansı ve titreşim mod'ları gibi simülasyon sonuçları deney

sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Araştırmada, genel olarak simülasyon ve deney sonuçları uyumlu olup, burulma yük durumu için simülasyon sonuçlarının iyileştirilmesi gerekliliği belirtilmiştir.

ODTÜ RÜZGEM bünyesinde, Özyıldız ve ark. [13], Muyan ve Çöker [14] kelebekleme (maksimum) yükü altında 5-m RÜZGEM kanadının dayanımı konusunda araştırmalar yapmışlardır. Özyıldız ve ark. [13] Puck hasar kriterleri kullanılarak RÜZGEM kanadının doğrusal (linear) mukavemet analizini ve ilerlemeli hasar modelinin kullanıldığı doğrusal olmayan (nonlinear) mukavemet analizini karşılaştırmışlardır. Çalışma, ilerlemeli hasar analizi tekniğinin kullanıldığı doğrusal olmayan modelin, doğrusal modele oranla kırılma mekanizmalarını daha gerçekçi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bir sonraki çalışmalarında Muyan ve Çöker [15] Puck ilerlemeli hasar modelini kullanarak RÜZGEM kanadının kelebekleme (flapwise) (maksimum), kılıçlama (edgewise) (minimum) ve kelebekleme (maksimum) artı kılıçlama (minimum) birleşik yükleme durumlarına karşı mukavemet karakteristiklerini incelemişlerdir. En son çalışmalarında Muyan ve Çöker [16] spar-yüksek basınç yüzeyi arasında yapıştırıcı ayrılma hasarı bulunan ve hasarsız RÜZGEM kanadının kelebekleme (minimum) yüklemesi altında statik ve yorulma dayanımlarını nümerik analizlerle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre içerisinde yapıştırıcı hasarı bulunan RÜZGEM kanadının statik ve yorulma yüklemelerine karşı gösterdiği mukavemet hasarsız kanada oranla önemli ölçüde azalmaktadır.

Bu çalışmanın kapsamı imal edilmiş olan cam elyaf takviyeli 5-m rüzgâr türbin kanadının sonlu elemanlar modelinin deneysel titreşim analizinin doğrulanması ve statik kelebekleme yüklemesi altındaki yapısal davranışının ilerlemeli kompozit hasar analizi ile sınırlıdır. Kanadın hasar analizinde kullanılan 2-boyutlu Puck modeli ile hasar mekanizmalarının daha detaylı ve kapsamlı incelenebilmesi için araştırmanın devamında hangi yönde ilerlenmesi gerektiği gösterilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan imalatı tamamlanmış olan kanat Yunanistan'ın Patras Üniversitesi'nden Core Team ve ODTÜ Rüzgâr Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (RÜZGEM) tarafından yürütülen ortak proje çerçevesinde üretilmiştir. Kanat 10 ms⁻¹ rüzgâr hızında 30 kW nominal güç üretecek türbin için tasarlanmıştır. Adı geçen kanat Şekil 1'de görüldüğü üzere beş ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar kanat alçak basınç yüzeyi, kanat yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, şapka şeklinde keşide sahip spar ve bağlantı flanşıdır.



Şekil 1. 5-metre RÜZGEM kanadı montaj şeması [17].

2. METOT

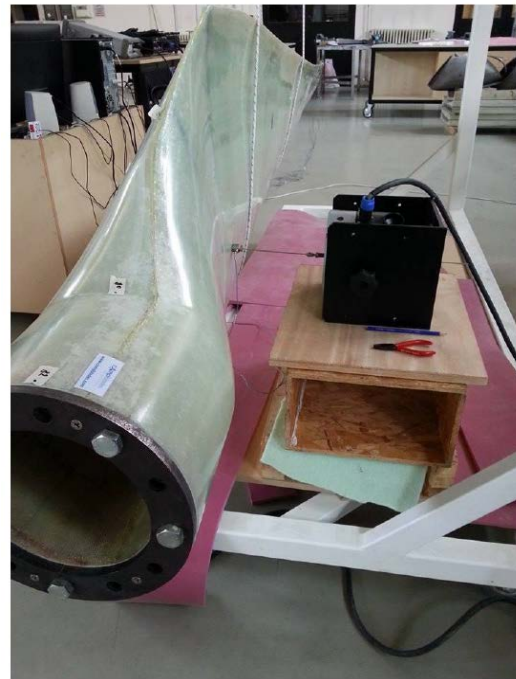
Öncelikle 5-m RÜZGEM kanadının ANSYS [18] ortamında sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Ardından sonlu elemanlar modelinin deneysel titreşim sonuçlarına dayalı doğrulama çalışması yapılmıştır. Daha sonra ise Puck ilerlemeli hasar modeli kullanılarak, kanadın kelebekleme yükü altında hasar karakteristiği incelenmiştir. Kanadın sonlu elemanlar modelinin doğrulanması ve hasar analizinde kullanılan metot ile ilgili detaylı bilgilere aşağıdaki başlıklardan ulaşılabilir.

2.1 RÜZGEM Kanadı Sonlu Elemanlar Modeli Doğrulama Çalışması

Rüzgem kanadı sonlu elemanlar modelinin doğrulama çalışması için deneysel titreşim analizinden faydalanılmıştır. Deneysel mod analizlerinde sinyal jeneratörü kullanarak farklı sinyaller ve titreşimler için tahrikler yaratabilen Shaker isimli cihazlardan faydalanılır. Shaker ile yapılan deneylerde sinyal jeneratörü tarafından rastgele bir sinyal yaratılır ve bu sinyal yapıya 'stringer' adı verilen çubuğun bağlı olduğu kuvvet transdüzeri tarafından aktarılır. Titreşim analizi yapılacak yapının geometrisinin ve geometri üzerinde ölçüm yapılacak noktaların yazılım programına girilmesinin ardından FFT (Fast-Fourier-Transform) analiz setup'ı tamamlanmıştır. RÜZGEM kanadı titreşim analizinde kanat üzerinde ölçüm için 87 değişik nokta kullanılmıştır [19]. Ölçüm için toplamda 5 adet 4508 tipi ivme ölçer kullanıldığı için 18 adet ölçüm yapılmıştır. Şekil 2 (a)'da RÜZGEM kanadı titreşim testinde kullanılan ivme ölçerlerin yeri ve Şekil 2 (b)'de ise Shaker cihazının RÜZGEM kanadına monte edilmiş hali görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. RÜZGEM kanadı titreşim testleri (a) kanat üzerine yerleştirilen ivme ölçerlerin yeri (b) Shaker cihazının kanada monte edilmesi [19].

2.2 RÜZGEM Kanadı İlerlemeli Hasar Analizi

Kanadın statik yük altındaki ilerlemeli hasar analizi için fiziksel temellere dayalı Puck [20] fenomenolojik modeli kullanılmıştır. Puck teorisine göre elyaf (FF) ve matris (IFF) kırılma

modlarının ayrı ayrı incelenir. Bu durumda 2-boyutlu analizlerde elyaf kırılması için aşağıdaki denklemler kullanılır:

$$f_{E(F)}^T = \frac{\sigma_1}{X_T} = 1 \text{ eğer } \sigma_1 > 0 \quad (1)$$

$$f_{E(F)}^C = \frac{\sigma_1}{X_C} = 1 \text{ eğer } \sigma_1 < 0 \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde $f_{E(F)}^T$ ve $f_{E(F)}^C$ sırasıyla çeki ve bası gerilmeleri altında elyaf hasar indeksi olarak tanımlanmıştır. Değerleri 1'i aştığında hasar meydana geleceği sonucuna varılır. σ_1 fiber yönündeki gerilme değeridir. X_T ve X_C ise sırasıyla laminanın fiber yönündeki çeki ve bası dayanımını gösteren değerlerdir.

İki eksenli lamina hasar diyagramında bulunan bölgeye göre hasar indeksini hesaplamak için aşağıda uygun olan denklemlerden biri kullanılır:

$$f_{E(FF)}^A = \left[\left(\frac{\sigma_6}{S} \right)^2 + \left(1 - p_{\perp H}^{(+)} \frac{Y_T}{S} \right)^2 \left(\frac{\sigma_2}{Y_T} \right)^2 \right]^{1/2} + p_{\perp H}^{(+)} \frac{\sigma_2}{S} = 1 \text{ eğer } \sigma_2 \geq 0 \quad (3)$$

$$f_{E(FF)}^B = \frac{1}{S} \left\{ \left[(\sigma_6)^2 + (p_{\perp H}^{(-)} \sigma_2)^2 \right]^{1/2} + p_{\perp H}^{(-)} \sigma_2 \right\} = 1 \text{ eğer } \begin{cases} \sigma_2 < 0 \\ \left| \frac{\sigma_2}{\sigma_6} \right| \leq \frac{R_{\perp\perp}^A}{\tau_{21C}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f_{E(FF)}^C = \left[\left(\frac{\sigma_6}{2(1 + p_{\perp\perp}^{(-)})S} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y_C} \right)^2 \right] \frac{Y_C}{(-\sigma_2)} = 1 \text{ eğer } \begin{cases} \sigma_2 < 0 \\ \left| \frac{\sigma_2}{\sigma_6} \right| \geq \frac{R_{\perp\perp}^A}{\tau_{21C}} \end{cases} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde $p_{\perp H}^{(+)}$, $p_{\perp H}^{(-)}$ and $p_{\perp\perp}^{(-)}$ hasar diyagramında eğimi belirleyen parametrelerdir. σ_2 matris yönündeki gerilme değeri olup, Y_T ve Y_C sırasıyla laminanın matris yönündeki çeki ve bası mukavemet değerleridir. Kayma gerilmesi ve kayma mukavemeti sırasıyla σ_6 ve S ile gösterilmiştir. Eğer hasar endeksi 1'i geçerse hasar meydana gelir. Mode A çeki ve kayma gerilmeleri sonucu oluşan kırılma modudur. Mod B ise bası ve kayma gerilmeleri altında oluşur. Mod C daha ileri derece bası ve kayma gerilmeleri sonucu oluşabilecek tehlikeli bir kırılma modu olup, delaminasyona sebep olabilir ve nihai kırılmayı tetikleyebilir. 2-boyutlu Puck ilerlemeli hasar modelinin RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modeline adapte edilebilmesi için ANSYS APDL [18] programlama dilinden faydalanılmıştır. Puck hasar modeline göre ilerlemeli hasar analizi çerçevesinde RÜZGEM sonlu elemanlar modelini oluşturan iki boyutlu gerilme elemanlarına malzeme elastik özelliklerini kötüleştirme kuralları uygulanır. Puck ilerlemeli hasar modeli algoritması hakkında detaylı bilgi Muyan ve Çöker [15] çalışmasında bulunabilir.

3. RÜZGEM KANADI SONLU ELEMANLAR MODELİ

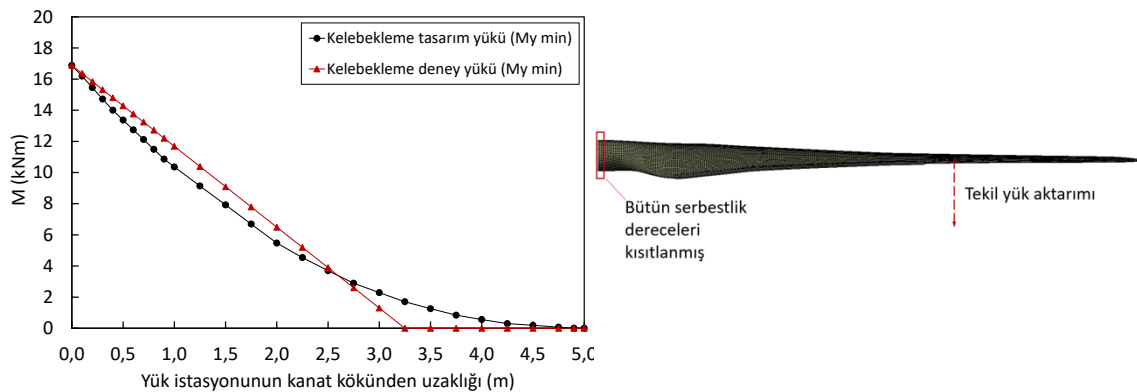
Cam elyaf takviyeli 5-m RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modeli ilerlemeli hasar analizi için kullanılan malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri Çizelge 1'de listelenmiştir [17]. Çizelgedeki mukavemet değerleri Germanischer Lloyd [21]'a göre öngörülen emniyet katsayısı 2.4 alınarak hesaplanmıştır.

Tam ölçekli kanat mukavemet testi için kullanılan kelebekleme (min) yönündeki yük dağılımı Weinzierl ve Pechlivanoglou [22] teknik raporundan alınmış olup, **Şekil 3.** (a)'da görülmektedir. Deney koşullarını simüle edebilmek için kanat sonlu elemanlar modelinde yük (**Şekil 3.** (a) ve (b)) kanadın uzunluğu yönündeki eksen üzerinde 3.25 m'de tekil yük deplasman kontrollü olarak uygulanmıştır. Kelebekleme (min) yönündeki yük dağılımında kullanılan emniyet katsayıları IEC 61400-23 uluslararası standartlarına [23] uygun şekilde 1.35 olarak seçilmiştir. **Şekil 3.** (b)'de gösterilen 3.25 istasyonunda deplasman olarak tanımlanan tekil yük aktarımı bu noktada kanat kesitindeki aero-elastik merkezinde oluşturulan tek bir düğüm noktası üzerinden istasyondaki sonlu elemanlar modeli düğüm noktalarına dağıtılmıştır. Kanat kök bölgesinden ankastre şekilde sabitlenmiştir. Kanat sonlu elemanlar modeli ANSYS ortamında kabuk (SHELL 181) elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Kabuk elemanların boyutu ağ yakınsama (mesh convergence) çalışması yapıldıktan sonra 15x15 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Kanadı oluşturan, alçak basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve yüksek basınç yüzeyi komponentlerinin yapıştırıcı ile olan bağlantıları Muyan ve Çöker [15] çalışmalarında kullandıkları yapıştırıcı kontakt (bonded contact) tekniği yerine bir sonraki çalışmalarında çoklu nokta kısıtları (Multi Point Constraint) [16] tekniğini kullanılarak sağlanmıştır.

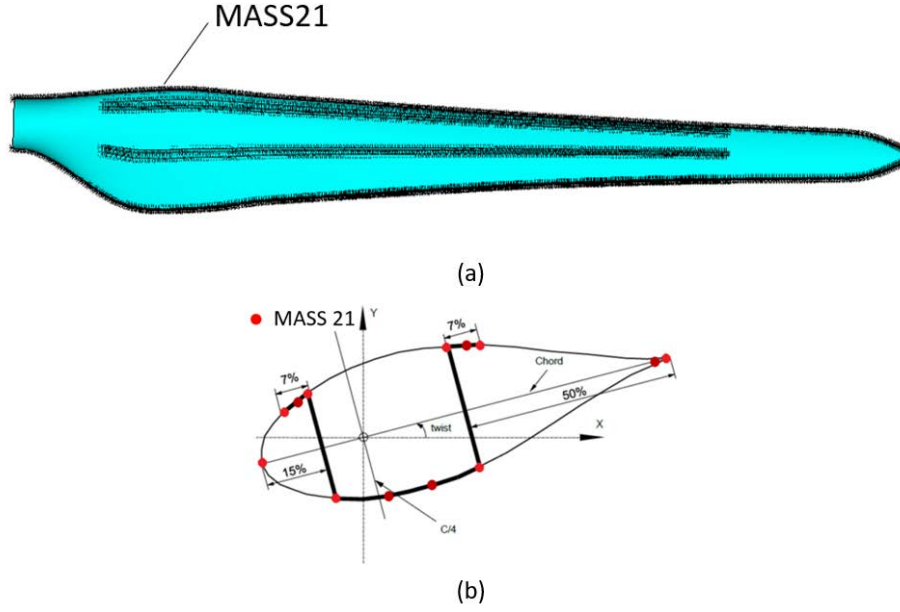
Kanadın titreşim analizi için ise kanadın gerçek ağırlığı ve sonlu elemanlar modelindeki ağırlığının aynı olması gerekmektedir. Kanat gerçekte 81.5 kg olmasına karşın kanat sonlu elemanlar modelinde yapıştırıcı ağırlığı modellenmemiş olduğundan kütlesi 71,4 kg'dır. Bu fark kanatta yapıştırıcıların olduğu bölgeler **Şekil 4.**'de gösterildiği gibi MASS 21, topak kütle elemanları konularak kapatılmıştır.

Çizelge 1. RÜZGEM kanadı statik analizi için malzeme özellikleri ve mukavemet değerleri[17].

Malzeme Özellikleri		Tek yönlü lamina (Unidirectional lamina)	Çelik (Steel)	Jel kaplama (Gel Coat)	CSM 300	Divinycell H45 köpük
Yoğunluk, ρ	[kg/mm ³]	1896	7850	1200	1896	200
Kalınlık, h	[mm]	0,716	5,3	0,9	0,358	5 veya 10
E ₁	[GPa]	24,84	210	3,98	9,14	55x10 ⁻³
E ₂	[GPa]	9,14				55x10 ⁻³
ν_{12}		0,29	0,3	0,34	0,29	0,4
G ₁₂	[GPa]	2,83				15 x10 ⁻³
X _T	[MPa]	191,73	581,8	35,29	16,86	1,4
X _C	[MPa]	101,16				0,6
Y _T	[MPa]	16,86				1,4
Y _C	[MPa]	50,41				0,6
S	[MPa]	11,29				0,56



Şekil 3. (a) Kelebekleme (min) yönündeki eğilme momentinin kanat boyunca dağılımı (b) RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modeline uygulanan sınır koşulları ve yükleme.



Şekil 4. Topak kütle elemanlarının (MASS 21) kanat boyunca dağılımı (b) MASS 21 elemanlarının kanat kesiti boyunca dağılımının şematik gösterimi.

4. BULGULAR VE YORUMLAR

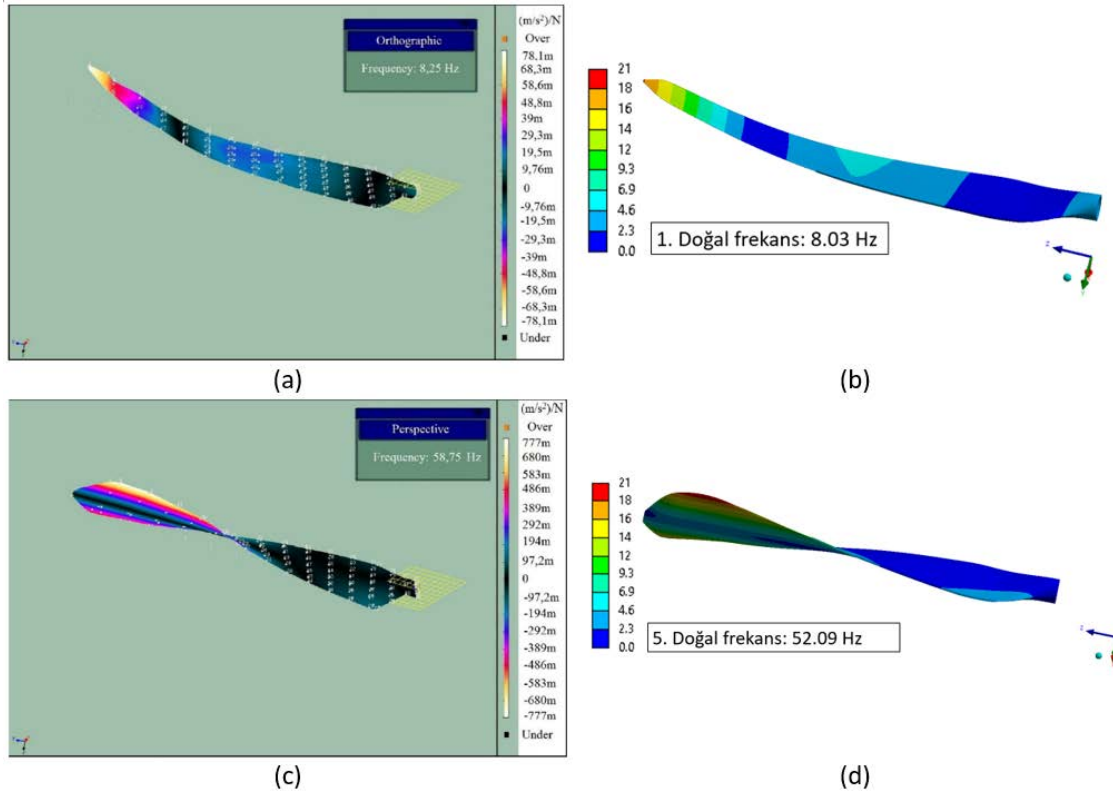
Bu bölümde RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modelinin titreşim analizi bulgularına dayanan doğrulama çalışması sonuçları açıklanmaktadır. Sonrasında RÜZGEM kanadının kelebekleme yüklemesi altında Puck modeli kullanılarak ilerlemeli hasar analizi bulguları sunulmaktadır.

4.1 RÜZGEM kanadı titreşim analizi bulguları

Çizelge 2’de RÜZGEM kanadının ilk beş doğal titreşim modunun deneysel [19] ve nümerik metotlarla elde edilen bulgularının karşılaştırılması özetlenmiştir. Çizelgeye göre ilk dört titreşim modu için deneyler ve nümerik analiz arasındaki fark %7’nin altındadır. Burulma titreşim modu olan beşinci titreşim modu için simülasyon ve deney arasındaki fark %11 olarak bulunmuştur. Burulma modu için titreşim modları arasındaki farkın ilk dört moda göre daha fazla olmasının nedeni kanat sonlu elemanlar modelinde kullanılan kabuk elemanların burulma modu için üç boyutlu katı elemanlara göre daha az mukavim olmasına bağlanmaktadır [2]. Ayrıca kanadın deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen titreşim mod şekilleri karşılaştırılmış ve titreşim mod’larının aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bildiri Şekil 5’de sadece birinci ve beşinci titreşim frekanslarındaki doğal titreşim mod’larının karşılaştırılması gösterilmiştir. Böylece kanadın titreşim analiz bulgularına dayalı doğrulama çalışması tamamlanmıştır.

Çizelge 2. 5-m RÜZGEM kanadı deneysel ve sayısal titreşim analizi bulguları karşılaştırılması.

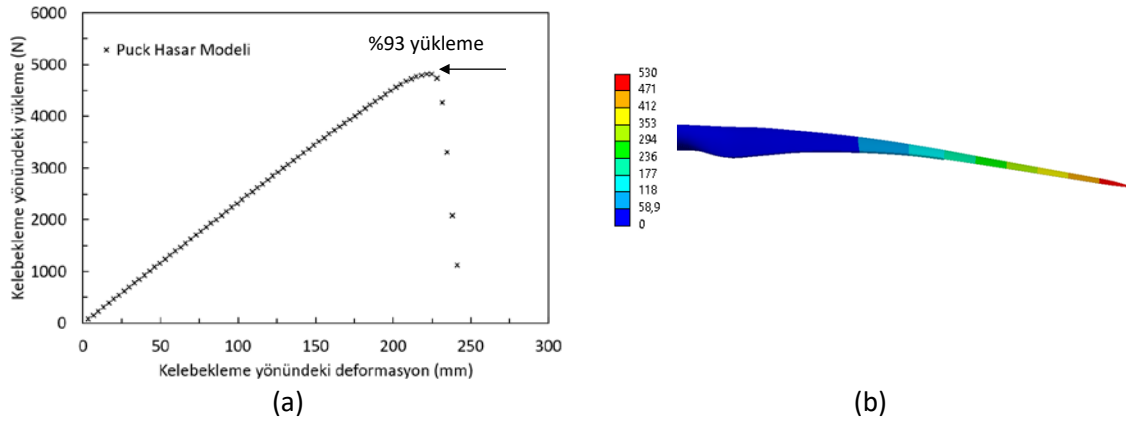
Titreşim modu	Shaker modal analiz testi	RÜZGEM kanadı ANSYS Modeli	Shaker modal analiz testi ile % cinsinden fark
1	8,25	8,03	-3%
2	23,75	22,02	-7%
3	41,75	41,17	-1%
4	46,75	45,96	-2%
5	58,75	52,09	-11%



Şekil 5. (a) ve (b) RÜZGEM kanadı deneyel ve nümerik analizinden elde edilen 1. titreşim modu (c) ve (d) RÜZGEM kanadı deneyel ve nümerik analizinden elde edilen 5. titreşim modu.

4.2 RÜZGEM kanadı kelebekleme (min) yüklemesi altında ilerlemeli hasar analizi bulguları

Doğrusal olmayan geometri ve malzeme hasar modelini içeren RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar yük-deplasman eğrisi Şekil 6 (a) görülmektedir. Yük-deplasman eğrisinden anlaşılacağı üzere kanat %93 yüklemenin üzerinde kelebekleme yükünü taşıyamamaya başlamakta ve yıkıma uğramaktadır. Şekil 6 (b)'de ise RÜZGEM kanadının %93 kelebekleme yüklemesi altında toplam deformasyonu görülmektedir.



Şekil 6. (a) Kelebekleme yönündeki yük-deplasman eğrisi (b) %93 kelebekleme (min) yönündeki yüklenme durumunda kanatta görülen toplam deformasyon.

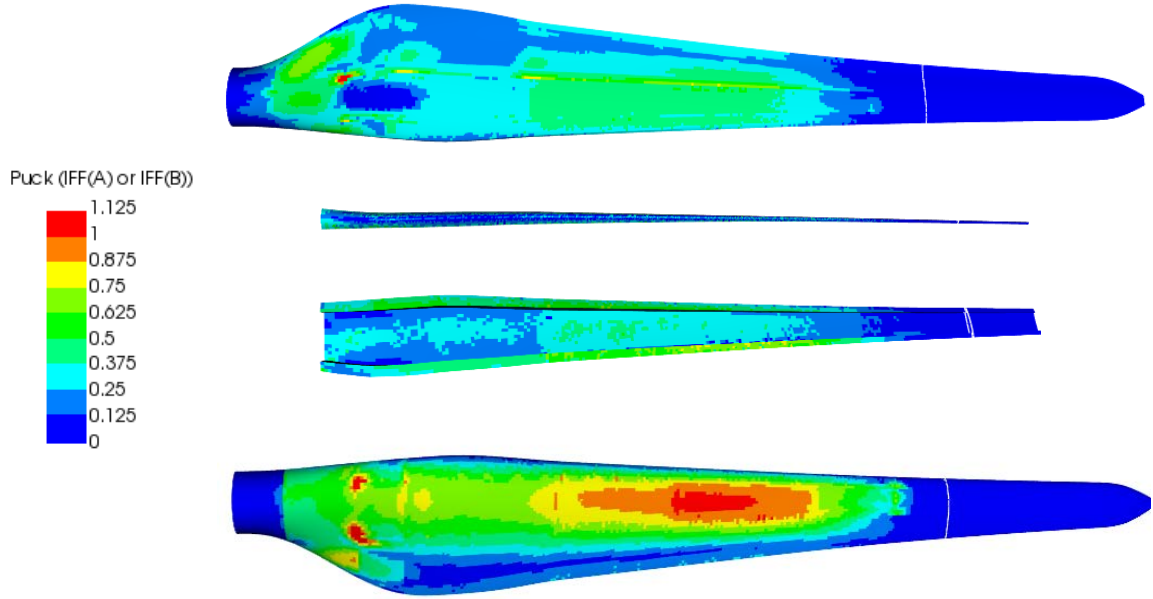
Şekil 7’de %64 yükleme durumu için RÜZGEM kanadının alçak basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve yüksek basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck IFF(A) ve IFF(B) hasar modları görülmektedir. IFF (A) veya IFF (B) hasar modları görüldüğünde sonlu elemanlar modelinde elemanların elyafa dik yöndeki elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranı Puck modelinde belirtilen kurallara göre düşürülür [15]. Ancak, bu hasar modları tespit edildiğinde elemanların elastisite özelliklerinin sıfırlanması söz konusu değildir. Dolayısıyla bu yükleme seviyesinde kanadın yük-deplasman eğrisinde herhangi bir ani düşüş görülmektedir. Şekil 7’de IFF(A) ve IFF(B) hasar modları en yüksek olduğu bölge kanadın kök bölgesinde olup, spar’ın yüksek basınç yüzeyine bağlandığı yerde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Aynı zamanda spar’ın alçak basınç yüzeyinde bağlandığı kök bölgesinde ve spar keplerin arasında IFF(A) ve IFF(B) hasar modlarını gösteren hasar indeksinin değeri kanadın diğer bölgelerine oranla yüksektir.

Şekil 8’de %64 yükleme durumu için RÜZGEM kanadının alçak basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve yüksek basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck FF ve IFF(C) hasar modları görülmektedir. Elyafın kırılma modunu gösteren FF, IFF (C) laminatı oluşturan katmanların en az yüzde otuzunda görülecek olursa sonlu elemanlar modelindeki elemanın elastik özellikleri sıfırlanır [15]. FF ve IFF(C) hasar modları %64 yükleme seviyesinde kanadın yapısal bütünlüğünü bozacak şekilde ilerlemiş olmadığından yük-deplasman eğrisinde herhangi bir ani düşüş görülmektedir. Şekil 8’de FF veya IFF(C) hasar modları en yüksek olduğu bölge kanadın kök bölgesinde olup, spar’ın yüksek basınç yüzeyine bağlandığı köşede en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bunun yanısıra spar’ın alçak basınç yüzeyinde bağlandığı kök bölgesinde ve spar keplerin arasında FF veya IFF(C) hasar mod’larını gösteren hasar indeksinin değeri kanadın diğer yerlerine göre yüksektir.

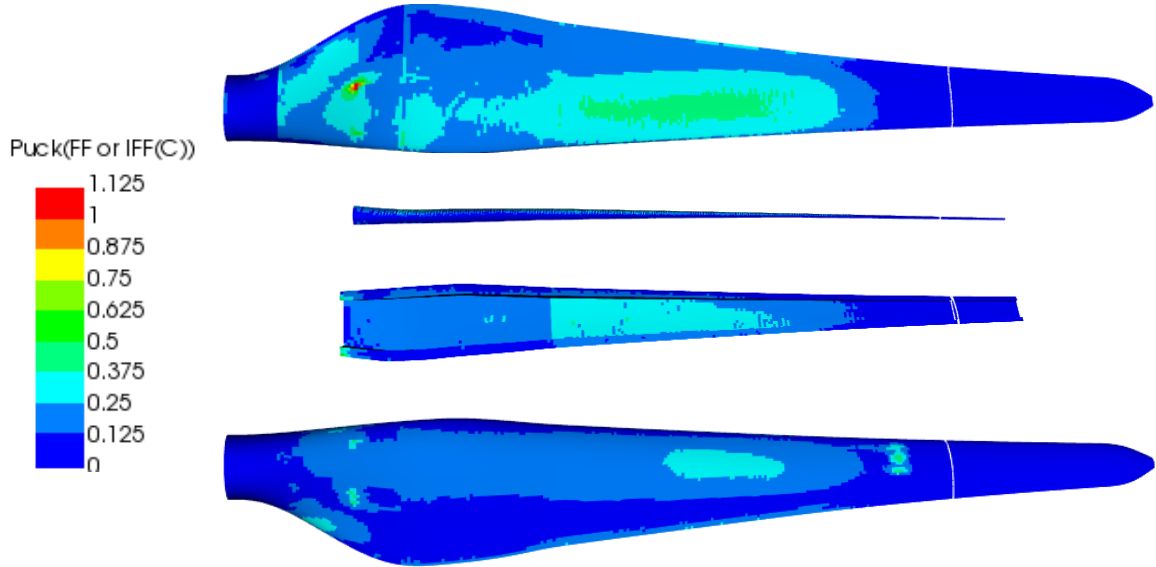
Dikkat edilebilecek bir diğer nokta, kritik olarak sınıflandırılan FF ve IFF(C) hasar modlarının görüldüğü lokasyonları ile kritik altı olarak nitelendirilen IFF(A) ve IFF(B) hasar modların görüldüğü hasar lokasyonlarıyla aynı olduğudur. IFF (A) ve IFF (B)’nin FF ve IFF (C)’ye göre daha önceden ortaya çıktıkları dikkate alınır, IFF (A) ve IFF (B) delaminasyon habercisi IFF (C) ve elyaf kırılması gösteren FF hasar mod’larına öncelik etmektedirler. Benzer şekilde Montesano ve ark. [10] çok ölçekli hasar modelleri ile yaptıkları çalışmada mikroskopik seviyede gözlemedikleri kritik altı laminat çatlaklarının delaminasyon ve yapıyı ayırıcı ayrılması gibi kritik hasar mod’larının habercisi olduğunu belirtmişlerdir.

Kelebekleme yüklemesinin %93’ünde RÜZGEM kanadında görülen Puck FF ve IFF(C) hasar modları gelişimi Şekil 9’de görülmektedir. Şekil 9’den anlaşılacağı üzere hasar başlangıcı ve ilerlemesi kanadın kök bölgesinde spar komponentinin kanadın yüksek basınç yüzeyine bağlandığı kesişim bölgesinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç Chen ve ark. [3] 52,3 m kanat tam ölçekli testinde gözlemedikleri hasar başlangıç yeri ile benzerlik göstermektedir. FF ve IFF(C) hasar modları sonlu elemanlar modelini oluşturan elemanların elastisite özellikleri sıfırlandığından, %93 yükleme seviyesinden itibaren oluşan hasar sonucu kanadın yük deplasman eğrisine ani düşüş gözlenmektedir. Ayrıca spar’dan aerodinamik kabuğa geçişin olduğu yerde ani kalınlık/rijitlik değişimi söz konusudur. Bu bölgede laminat kalınlık değişiminden kaynaklanan eksantrite, eğilme momentinden kaynaklanan gerilme değerlerinin ani artışına ve hasara sebep olmaktadır. Bu durum da Marin ve ark. [24] 300 kW rüzgâr türbin kanadı hasar başlangıç bölgesiyle benzerlik göstermektedir.

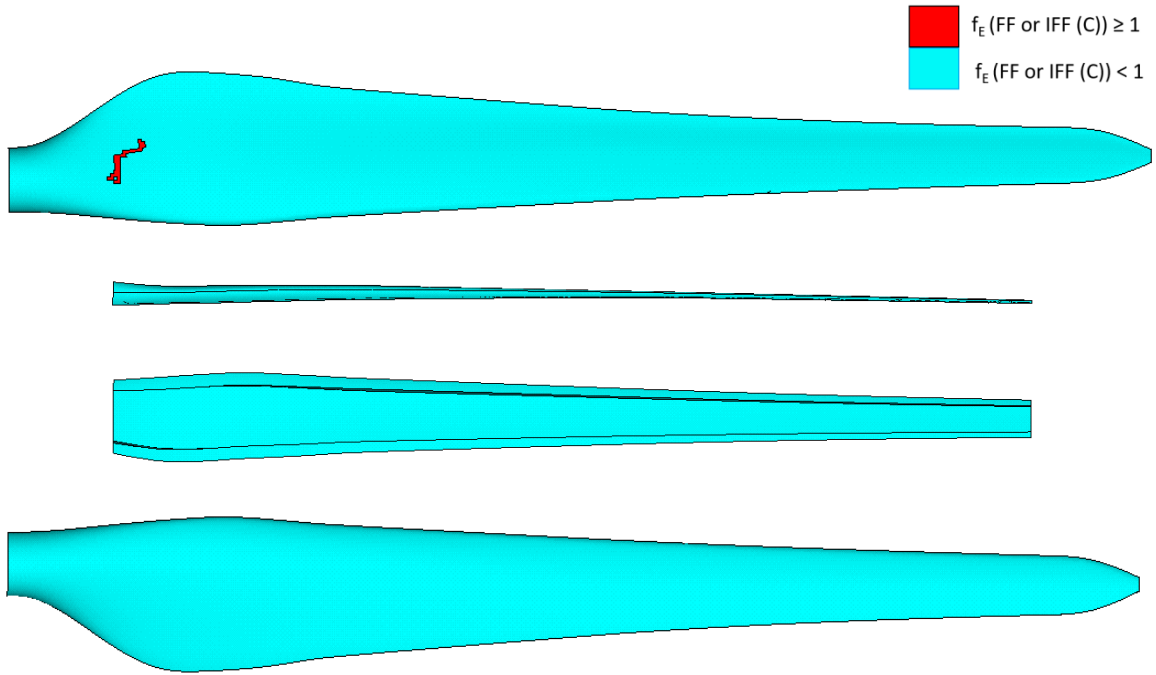
Kelebekleme yüklemesi %93’den üzerine çıkarıldığında FF ve IFF(C) hasar modları kanat üzerinde yayılacak ve bu durum kanadın yıkımıyla sonuçlanmaktadır. Şekil 10’da kanadın yıkımının öncesinde kanadı oluşturan parçalardaki FF ve IFF(C) hasar modlarının gelişimi görülmektedir. Şekilden gözlemlendiği üzere kelebekleme yüklemesi altında kök bölgesinde kanadı oluşturan bütün parçalarda görülen hasar kanadın yıkımına sebebiyet vermiştir.



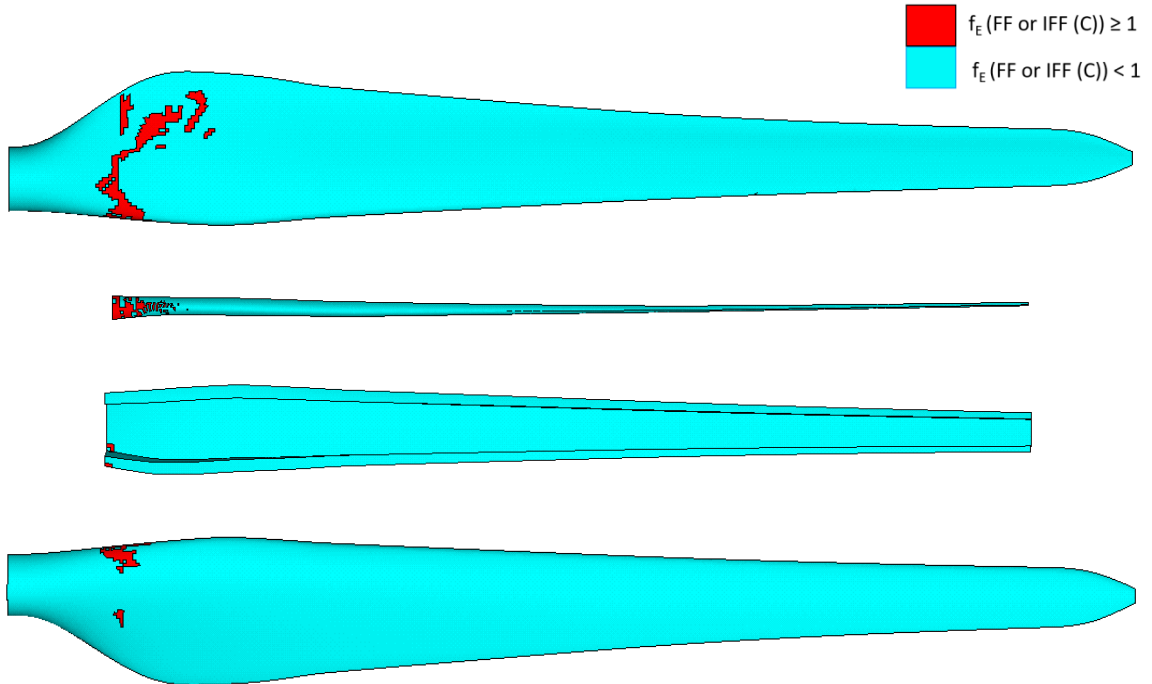
Şekil 7. 64% kelebekleme (min) yüklemesi durumunda kanadın (yukarıdan aşağı) yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve alçak basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck IFF(A) ve IFF(B) hasar modlarının gelişimi.



Şekil 8. 64% kelebekleme (min) yüklemesi durumunda kanadın (yukarıdan aşağı) yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve alçak basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck FF ve IFF(C) hasar modlarının gelişimi.



Şekil 9. 93% kelebkleme (min) yüklemesi durumunda kanadın (yukarıdan aşağı) yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve alçak basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck FF ve IFF(C) hasar modlarının gelişimi.



Şekil 10. Kanadın yıkımı öncesi kelebkleme (min) yüklemesi durumunda kanadın (yukarıdan aşağı) yüksek basınç yüzeyi, iç flanş, spar ve alçak basınç yüzeyi parçalarında görülen Puck FF ve IFF(C) hasar modlarının gelişimi.

5. SONUÇLAR

5-m RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modelinin doğrulanması ve kelebekleme yüklemesi altındaki ilerlemeli hasar analizinden çıkarılacak en önemli sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- RÜZGEM kanadı sonlu elemanlar modelinin doğrulanması maksadıyla, modal analiz yapılmış ve deneysel titreşim bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre deneyler ve simülasyon arasında ilk dört titreşim frekansı arasındaki fark %7'nin altında olup, burulma modu olan beşinci frekansı için bu fark %11'dir. Deneyler ve sonlu elemanlar simülasyonundan elde edilen titreşim mod'ları aynıdır. Böylece kanadın sonlu elemanlar modeli doğrulanmıştır.
- Puck ilerlemeli hasar modeli ile elde edilen sonuçlara göre laminat hasarı kanadın kök geçiş bölgesinde spar'ın kanadın aerodinamik kabuk yüzeyiyle birleştiği kesişim bölgesinde başlamaktadır ve ağırlıklı olarak aerodinamik kabukta yayılmaktadır. Spar'dan aerodinamik kabuğa geçişin olduğu bu bölgede ani kalınlık/rijitlik değişimi söz konusudur. Bu nedenle bu bölgede laminat kalınlık değişiminden kaynaklanan eksantrisite, eğilme momentinden kaynaklanan gerilme değerlerinin ve dolayısıyla hasar indeksleri ani artışına sebep olmaktadır.
- Kritik hasar mod'ları olarak sınıflandırılan Puck FF, IFF(C) ve kritik altı olarak nitelendirilen IFF (A) ve IFF (B) hasar mod'ları ile aynı bölgelerde ortaya çıkmaktadırlar. IFF (A) ve IFF (B)'nin FF ve IFF (C)'ye göre daha önceden ortaya çıktıkları dikkate alınırsa, IFF (A) ve IFF (B) delaminasyon habercisi IFF (C) ve elyaf kırılması gösteren FF hasar mod'larına öncelik etmektedirler.

TEŞEKKÜR

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

KAYNAKLAR

- [1] **Reder, M. D., Gonzalez, E., Melero, J. J.**, 2016. Wind turbine failures-tackling current problems in failure data analysis. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 753, No. 7, p. 072027). IOP Publishing.
- [2] **Noever-Castelos, P., Haller, B., Balzani, C.**, 2021. Validation of a modelling methodology for wind turbine rotor blades based on a full scale blade test. *Wind Energy Science Discussions*, s. 1-32.
- [3] **Chen, X., Zhao, X., and Xu, J.**, 2017. Revisiting the structural collapse of a 52.3 m composite wind turbine blade in a full-scale bending test, *Wind Energy*, 20, s. 1111–1127, <https://doi.org/10.1002/we.2087>.
- [4] **Jensen, F., Falzon, B., Ankersen, J., and Stang, H.**, 2006. Structural testing and numerical simulation of a 34m composite wind turbine blade, *Composite Structures*, 76, s. 52 – 61, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.06.008>, 2006.
- [5] **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, *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 41(2), s. 257-270, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.10.011>, 2010.

- [6] **Yang, J., Peng, C., Xiao, J., Zeng, J., Xing, S., Jin, J., Deng, H.**, 2012. Structural investigation of composite wind turbine blade considering structural collapse in full-scale static tests, *Composite Structures*, 97, s. 15-29, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.055>, 2013.
- [7] **Kim, S. H., Bang, H. J., Shin, H. K., and Jang, M. S.**, 2014. Composite structural analysis of flat-back shaped blade for multi-MW class wind turbine, *Applied Composite Materials*, 21(3), s. 525-539, <https://doi.org/10.1007/s10443-013-9362-3>.
- [8] **Chen, X., Zhao, W., Zhao, X. L., Xu, J. Z.**, 2014. Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading, *Energies*, 7(4), s. 2274-2297, <https://doi.org/10.3390/en7042274>.
- [9] **Haselbach, P. U., Branner, K.**, 2016. Initiation of trailing edge failure in full-scale wind turbine blade test, *Engineering Fracture Mechanics*, 162, s. 136-154, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.04.041>.
- [10] **Montesano, J., Chu, H., Singh, C. V.**, 2016. Development of a physics-based multi-scale progressive damage model for assessing the durability of wind turbine blades, *Composite Structures*, 141, s. 50-62, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.011>.
- [11] **Chen, X., Qin, Z., Yang, K., Zhao, X., Xu, J.**, 2015. Numerical analysis and experimental investigation of wind turbine blades with innovative features: Structural response and characteristics, *Science China Technological Sciences*, 58(1), 1-8, <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5741-8>.
- [12] **Paquette, J. A., Veers, P. S.**, 2007. Increased Strength in Wind Turbine Blades through Innovative Structural Design (No. SAND2007-2632C). *Sandia National Lab.(SNL-NM)*, Albuquerque, NM (United States).
- [13] **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.
- [14] **Muyan, C., Coker, D.**, 2019. Kompozit Rüzgâr Türbini Kanadi Mukavemet Özelliklerinin İlerlemeli Hasar Analizi Yardımıyla İyileştirilmesi, 5. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*.
- [15] **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), s. 1339-1358.
- [16] **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.
- [17] **Philippidis, T., Roukis, G.**, 2013. Structure design report of METUWIND small rotor Blade, *Confidential Interim Report*.
- [18] **ANSYS Inc.**, 2017. <http://www.ansys.com>, Release17.2.
- [19] **Amer, C.**, 2015. Development of a high fidelity finite element model of a wind turbine blade via modal testing (*Master's thesis, Middle East Technical University*).
- [20] **Puck, A. and Schürmann, H.**, 1998. Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models, *Composites Science and Technology*, 58, s. 1045-1067, [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(96\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(96)00140-6).
- [21] **Germanischer Lloyd Guidelines**, 2010. Rules and Guidelines Industrial Services, Guideline for the Certification of Wind Turbines.
- [22] **Weinzierl G., Pechlivanoglou G.**, 2013. Blade Design Loads METU-5.0, Rev. 1.5, SMART BLADE GmbH Internal Technical Specification, 2013.
- [23] **IEC 61400-23:2002: Part 23 Full-Scale Structural Testing of Rotor Blades**.
- [24] **Marin, J. C., Barroso, A., Paris, F., & Canas, J.**, 2009. Study of fatigue damage in wind turbine blades. *Engineering failure analysis*, 16(2), s. 656-668.