

T.C.
İZMİR DEMOKRASİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARI İÇİN HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ VE
ONARIM SÜREÇLERİ

Görkem Berkay Ergeç

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mert Sinan TURGUT

II. Danışman
Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN



İZMİR-2026

**Görkem Berkay
ERGEÇ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARI İÇİN HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ VE
ONARIM SÜREÇLERİ**

2026

TEZ ONAYI

Görkem Berkay ERGEÇ tarafından hazırlanan “**RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARI İÇİN HASAR TESPİT YÖNTEMLERİ VE ONARIM SÜREÇLERİ**” adlı tez çalışması 16/06/2026 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde İzmir Demokrasi Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mert Sinan TURGUT
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Uğur ÇAVDAR
İzmir Demokrasi Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Mustafa ASKER
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin İzmir Demokrasi Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Görkem Berkay ERGEÇ



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	2
1.2 Literatür Araştırması.....	3
2. RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARINDA HASAR MEKANİZMALARI.....	5
2.1 Hasar Tespit Teknikleri.....	5
2.2 Arıza Göstergeleri.....	5
2.3 Rüzgar Türbini Kanat Arızalarının Nedenleri.....	5
2.4 Dengesiz Buz Birikimi Nedeniyle Oluşan Kanat Arızaları.....	6
2.5 Hatalı Üretimden Kaynaklanan Kanat Arızaları.....	7
2.6 Kanat Hasarlarının Türleri ve Kritik Bölgeler.....	7
2.7 Hasara Eğilimli Kanat Bölgeleri.....	8
3. TÜRBİN KANATLARINDAKİ HASAR TESPİTİNDE KULLANILAN SENSÖRLER: PRENSİPLERİ VE UYGULAMALARI.....	10
3.1 Geleneksel Gerinim Ölçerler.....	10
3.2 İvmeölçerler.....	11
3.3 Taramalı Lazer Doppler Vibrometre (SLDV) Sensörleri.....	12
3.4 Rüzgar Türbini Kanatlarında Hasar Tespiti İçin NDT Yöntemleri.....	13
3.5 Ultrasonik Test (UT).....	13
3.6 Manyetik Parçacık Testi (MT).....	13
3.7 Görüntüleme Yöntemleri (RT, CT).....	13
3.8 Termal İmajlama (TI).....	13
3.9 Akustik Emisyon Testi (AE).....	14
4. HASAR TÜRLERİ VE ONARIM YAKLAŞIMLARI.....	15
4.1 Arka Kenar Çatlak Hasarı (TE Crack Damage).....	15
4.1.1 Arka Kenar Çatlak Hasar Onarımı (TE Crack Damage Repair).....	16
4.1.2 Hasarın Değerlendirilmesi.....	16
4.1.3 Onarım Planının Hazırlanması.....	16
4.1.4 Onarım Süreci.....	16

4.1.5 Son Kontrol ve Test	17
4.1.6 Bakım ve İzleme	17
4.1.7 Hasarın Değerlendirilmesi	18
4.1.8 Taşlama (Kat Açımı) İşlemi	19
4.1.9 Laminasyon Öncesi Kat Açımı	21
4.1.10 Laminasyon	21
4.1.11 Dış Katların Laminasyonu ve Macun, Boya İşlemi	22
4.2 Ön Kenar Erozyon Hasarı (LE Erosion Damage)	23
4.2.1 Ön Kenar Erozyon Hasarı Onarımı (LE Erosion Damage Repair)	23
4.2.2 Gözlem ve Değerlendirme	24
4.2.3 Hasar Tespiti	24
4.2.4 Onarım Yöntemi:	24
4.2.5 Malzeme Uygulaması:	24
4.2.6 Önleyici Bakım	25
4.2.7 LEP Boya Uygulaması	25
4.3 Yıldırım Hasarı (Lightning Damage)	26
4.3.1 Yıldırımın Rüzgar Kanatlarına Etkisi	26
4.3.2 Hasar Türleri	26
4.3.3 Önleme Yöntemleri	27
4.3.4 Onarım ve Bakım	27
4.3.5 Yıldırım Hasarı Onarım Süreci	27
4.3.6 Hasarın Tespiti	27
4.3.7 Onarım Planı Hazırlama	28
4.3.8 Temizlik ve Hazırlık	28
4.3.9 Onarım İşlemi	28
4.3.10 Kürlleme Süresi	29
4.3.11 Son Kontrol	29
4.3.12 Yıldırım Hasarı Onarım Süreci Görselleri	30
4.4 Yüzey Cam Elyaf Onarımı (Glass Laminate Repair)	32
4.5 Yıldırım Koruma Sistemi Hasarları (LPS Damage Repair)	34
4.5.1 LPS Sisteminin Amaçları	34
4.5.2 LPS Bileşenleri	34
4.5.3 LPS'nin Avantajları	34
4.5.4 Uygulama ve Bakım	35
4.5.5 LPS Onarım Süreci Hasarın Denetlenmesi	35
4.5.6 Planlama	35

4.5.7 Onarım İşlemleri	36
4.5.8 Kaboların ve Bağlantıların Kontrolü	36
4.5.9 Son Kontrol	36
4.5.10 Önleyici Bakım	36
4.5.11 LPS Onarım Süreci Görselleri	37
4.6 Vortex Hasarları (Vortex Generators Damage)	38
4.6.1 Vortexlerin Özellikleri ve Etkileri	38
4.6.2 Onarım Süreci	39
5. GERÇEK SAHA VERİLERİNE DAYALI VAKA ANALİZİ	40
5.1 Vaka Tanımı	40
5.2 Hasarın Tespiti ve İlk Değerlendirme	40
5.3 Onarım Kararı ve Mühendislik Değerlendirmesi	41
5.4 Onarım Süreci ve Kullanılan Malzemeler	41
5.4.1 Hasarlı Bölgenin Hazırlanması:	41
5.4.2 Yapısal Güçlendirme:	41
5.4.3 Laminasyon	42
5.4.4 Retrofit Güçlendirmesi:	42
5.5 Onarım Sonrası Sonuçlar ve Değerlendirme	42
6. EKONOMİK DEĞERLENDİRME	43
6.1 Varsayımlar ve Kabul Edilen Parametreler	43
6.2 Türbinin Enerji Üretimi ve Günlük Gelir Kaybı	43
6.3 Onarım Senaryosu	43
6.4 Kanat Değişimi Senaryosu (Varsayımsal)	44
6.5 Toplam Ekonomik Etki Karşılaştırması	44
6.6 Türbin Kanadı Üzerinde Arka Kenar Çatlağının Görüntü İşlemeyle Tespiti	44
6.7 Vaka Analizi Değerlendirme ve Sonuç	46
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

CT	Bilgisayarlı Tomografi (Computed Tomography)
DF	Hasar Konum Oranı (Damage Fraction)
FBG	Fiber Bragg Izgarası (Fiber Bragg Grating)
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer)
LE	Ön Kenar (Leading Edge)
LPS	Yıldırım Koruma Sistemi (Lightning Protection System)
MW	Megavat (Megawatt)
MWh	Megavat saat (Megawatt hour)
NDT	Tahribatsız Muayene (Non-Destructive Testing)
OEM	Orijinal Ekipman Üreticisi (Original Equipment Manufacturer)
PS	Basınç Yüzeyi (Pressure Side)
PZT	Piezoelektrik Dönüştürücü (Piezoelectric Transducer)
RES	Yenilenebilir Enerji Sistemi (Renewable Energy System)
RT	Radyografik Testler (Radiographic Testing)
SLDV	Taramalı Lazer Doppler Vibrometre (Scanning Laser Doppler Vibrometer)
SS	Emme Yüzeyi (Suction Side)
TE	Arka Kenar (Trailing Edge)
UD	Tek Yönlü Elyaf (Unidirectional Fiber)
CLAHE	Uyarlamalı Histogram (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)
HSV	Ton–Doygunluk–Parlaklık (Hue–Saturation–Value)
ROI	İlgi Bölgesi (Region of Interest)
PCA	Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.3.1. (a) Kanat kırılması; (b) parçalanan kanat.....	6
Şekil 2.4.1. Bir rüzgar türbininde buz birikmesi ve düşmesi.	7
Şekil 2.5.1. (a) kırılan 66,5 m'lik bir türbin kanadı; (b) parçalanan iki kanat.	7
Şekil 2.6.1. Bir rüzgar türbini kanadının maruz kalabileceği hasar türleri:.....	8
Şekil 3.1.1. Bir rüzgar türbini kanadı içindeki FBG'lerin konumlandırılması.	11
Şekil 3.3.1. (a) PZT sensörüyle donatılmış rüzgar türbini kanadı (b) lazer vibrometresi.	12
Şekil 3.9.1. Piezoelektrik sensörlerin yerleşimi.	14
Şekil 4.1.6.1. Arka kenar çatlak hasarı	17
Şekil 4.1.6.2. TE bölgesinin gösterimi	18
Şekil 4.1.7.1. Arka kenar çatlak hasarı	18
Şekil 4.1.8.1. Taşlama işlemi.....	19
Şekil 4.1.8.2. Kanat onarımına ilişkin örnek talimat.....	20
Şekil 4.1.8.3. Katmanların gösterimi.....	20
Şekil 4.1.9.1. Laminasyon öncesi kat açımı	21
Şekil 4.1.10.1. Laminasyon ve sonrası	21
Şekil 4.1.11.1. Son katlar.....	22
Şekil 4.2.6.1. Ön kenar erozyon hasarları	25
Şekil 4.2.7.1 Onarım alanı toleransları.....	25
Şekil 4.3.2.1. Yıldırım hasarı.....	26
Şekil 4.3.11.1. Boroscope ile kanat içi muayene.....	29
Şekil 4.3.12.1. Yıldırım hasarı tespiti.....	30
Şekil 4.3.12.2. Yüzey taşlama ve kat açma işlemi	30
Şekil 4.3.12.3. Laminasyon işlemi ve ısı battaniyesi ile kütleme	31
Şekil 4.3.12.4. Macun ve boya işlemi	31
Şekil 4.4.1. Onarım prosedürü	32
Şekil 4.4.2. Kumaşlara ve yöne göre katman başına pah genişliği (A marka kanatlara göre) .	33
Şekil 4.4.3 Kumaşlara ve yöne göre katman başına pah genişliği (B marka kanatlara göre) ..	33
Şekil 4.4.4. Kademeli pah kırma (Biax X g/m ²)	33
Şekil 4.5.11.1. Yıldırım sonrası hasar görmüş LPS sistemine ait tip reseptör hasarı.....	37
Şekil 4.5.11.2. Onarılan LPS kablusunun bağlantısı	37
Şekil 4.5.11.3. Macun uygulaması ve boya işlemi	37
Şekil 4.6.1.1. Vortexler	38
Şekil 4.6.2.1. Vortex onarım adımları.....	39
Şekil 6.6.1. Arka kenar çatlağının görüntü işleme yöntemleriyle tespiti	53
Şekil 6.6.2. Görüntü işleme algoritmalarıyla arka kenar çatlağının detaylı analiz sonuçları...	54

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde danışmanlığımı yürüten, bilgi ve tecrübeleri ile katkı sağlayan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mert Sinan TURGUT' a; tez konusunun belirlenmesi ve çalışmanın şekillenmesi aşamalarında bilgi ve deneyimleriyle değerli katkılar sunan Sayın Prof. Dr. Zuhal OKTAY COŞKUN' a; lisansüstü eğitimim ve yüksek lisans çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleri ile akademik gelişimime katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Can COŞKUN' a; tez sürecim boyunca sabrı, anlayışı ve manevi desteği ile her zaman yanımda olan Didem Sena AKSU' ya; öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan, beni bugünlere getiren sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Görkem Berkay ERGEÇ
İzmir, 2026



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Rüzgar Türbini Kanatları İçin Hasar Tespit Yöntemleri ve Onarım Süreçleri

Görkem Berkay ERGEÇ

İzmir Demokrasi Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mert Sinan TURGUT

II. Danışman: Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN

Rüzgar türbini kanatları, sistem performansında kritik rol oynamakla birlikte karmaşık yüklemeler nedeniyle hasara açık yapılardır. Bu hasarlar, türbin ömrünü ve enerji üretim verimliliğini azaltırken bakım maliyetlerini ve güvenlik risklerini artırmaktadır. Bu nedenle kanat hasarlarının erken ve doğru tespiti büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarında görülen tipik hasarlar ile bu hasarların nedenleri incelenmiş; gerinim ölçerler, optik fiber sensörler, ivmeölçerler, taramalı lazer Doppler vibrometre (SLDV) ve tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri gibi başlıca hasar tespit teknikleri ele alınmıştır. Ayrıca buzlanma, üretim hataları ve kritik hasar bölgeleri kapsamında; arka kenar çatlakları, ön kenar erozyonu, yıldırım ve vortex kaynaklı hasarlar değerlendirilmiş ve onarım yaklaşımları incelenmiştir. Çalışmada özellikle arka kenar çatlakları (TE Crack) üzerine odaklanılarak, gerçek saha verilerine dayalı detaylı bir vaka analizi ve ekonomik değerlendirme sunulmuştur. Ayrıca, tek bir saha görüntüsü üzerinde klasik görüntü işleme teknikleri uygulanarak arka kenar çatlağı yaklaşık %74 süreklilikle tespit edilmiş ve temel geometrik özellikleri piksel cinsinden elde edilmiştir. Bu derlemenin, kanat onarım uygulamalarına rehberlik etmesi ve hasar tespit yöntemleri için araştırma perspektifi sunması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: rüzgar enerjisi, rüzgar türbini kanadı, kanat tamiri, arka kenar hasarı, hasar tespiti

2026, 60 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Damage Detection Methods and Repair Processes for Wind Turbine Blades

Görkem Berkay ERGEÇ

**İzmir Demokrasi University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Mert Sinan TURGUT

Co-Supervisor: Prof. Dr. Zuhale OKTAY COŞKUN

Wind turbine blades play a critical role in system performance but are highly susceptible to damage due to complex loading conditions. Such damage not only reduces the turbine's lifespan and power generation efficiency but also increases maintenance costs and safety risks. Therefore, early and accurate detection of blade damage is of great importance. This study reviews typical damage types observed in wind turbine blades and examines their underlying causes. Various damage detection techniques, including strain gauges, optical fiber sensors, accelerometers, scanning laser Doppler vibrometer (SLDV), and non-destructive testing (NDT) methods, are discussed. In addition, blade failures caused by ice accretion, manufacturing defects, and critical damage-prone regions are analyzed, with a focus on major damage types such as trailing edge cracks, leading edge erosion, lightning damage, and vortex-induced damage, along with corresponding repair approaches. The study particularly focuses on trailing edge cracks (TE crack), presenting a detailed case study and economic assessment based on real field data. In addition, by applying classical image processing techniques on a single field image, the trailing edge crack was detected with approximately 74% continuity and its basic geometric properties were obtained in pixels. This review aims to provide practical guidance for blade repair applications and to offer insights for future research in damage detection techniques.

Keywords: wind energy, wind turbine blade, blade repair, trailing edge damage, damage detection

2026, 60 pages

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında hızla büyüyen ve hem endüstriyel hem de evsel elektrik üretiminde önemli rol oynayan bir teknolojidir [1–3]. Artan enerji talebi, karbon emisyonlarının azaltılması gerekliliği ve fosil yakıtların sınırlı olması, rüzgar enerjisini stratejik bir alternatif haline getirmiştir. 2023 yılı itibarıyla küresel rüzgar enerjisi kapasitesinin 1 TW seviyesini aştığı, Türkiye’de ise toplam yenilenebilir enerji üretiminin %11,1’ini oluşturduğu rapor edilmiştir [4,5].

Rüzgar türbinlerinin boyutlarının artmasıyla birlikte, yapısal güvenilirlik önemli bir mühendislik problemi haline gelmiştir. Türbin kanatları, sistemin en kritik bileşenlerinden biri olup performansı doğrudan etkilemektedir [7,8]. Nitekim türbin kazalarının %15–20’sinin kanat arızalarından kaynaklandığı bilinmektedir. Ayrıca kanat üretim ve bakım maliyetleri toplam maliyetin önemli bir kısmını oluşturmakta, özellikle açık deniz türbinlerinde bu oran daha da artmaktadır [6,9–11].

Kanatlar; değişken rüzgar yükleri, yorulma etkileri, çevresel faktörler ve üretim kusurları nedeniyle çeşitli hasar mekanizmalarına maruz kalmaktadır. Bu hasarlar enerji verimliliğini düşürmekte, bakım maliyetlerini artırmakta ve güvenlik riskleri oluşturmaktadır. İşletme ve bakım maliyetlerinin türbin ömrü boyunca toplam maliyetin %20–25’ine ulaşabildiği ve yaşla birlikte %35’e kadar çıkabildiği rapor edilmiştir [6].

Literatürde rüzgar türbini kanatlarında hasar tespitine yönelik sensör tabanlı izleme sistemleri ve tahribatsız muayene teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çalışmaların büyük kısmı hasar tespitine odaklanırken, onarım süreçleri sınırlı düzeyde ele alınmaktadır. Oysa hasarların yalnızca tespit edilmesi değil, aynı zamanda etkin ve ekonomik şekilde onarılması da büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, kanat hasarlarının erken tespiti ve uygun onarım yöntemlerinin geliştirilmesi, güvenli ve sürdürülebilir enerji üretimi açısından kritik bir gerekliliktir [7].

Bu bağlamda, rüzgar türbini kanatlarında hasar oluşum mekanizmalarının bütüncül olarak incelenmesi, tespit yöntemlerinin karşılaştırılması ve onarım süreçlerinin değerlendirilmesi literatürde önemli bir ihtiyaç olarak öne çıkmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez, rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen hasarların tespit edilmesi ve onarım süreçlerinin geliştirilmesi üzerine odaklanmaktadır. Rüzgar türbini kanatları, değişken yükler ve zorlu çevresel koşullar altında çalışmaları nedeniyle arka kenar çatlakları, ön kenar erozyonu ve yıldırım hasarları gibi çeşitli yapısal problemlere maruz kalmaktadır. Bu hasarlar, türbin performansını düşürmekte, bakım maliyetlerini artırmakta ve güvenlik riskleri oluşturmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, rüzgar türbini kanatlarındaki hasarların erken aşamada tespit edilmesini sağlamak ve etkin onarım yöntemleri geliştirerek türbinlerin çalışma ömrünü uzatmaktır. Bu doğrultuda sensör tabanlı izleme sistemleri ve tahribatsız muayene teknikleri incelenmekte, farklı hasar türlerine yönelik onarım yöntemleri teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmektedir.

Bu çalışma ayrıca, hasar türlerinin sistematik olarak sınıflandırılması, tespit yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi, seçilen bir hasar türü için saha uygulamasına dayalı vaka incelemesi ve onarım-değişim senaryolarının ekonomik karşılaştırmasını içermektedir. Bu yönüyle tez, yalnızca teorik bir inceleme sunmakla kalmayıp, aynı zamanda uygulamaya yönelik bütüncül bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Rüzgar türbini kanatlarında hasar tespiti ve yapısal sağlık izleme (Structural Health Monitoring, SHM) sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, genel olarak sensör tabanlı ölçüm teknikleri ve tahribatsız muayene yöntemleri çerçevesinde gelişmiştir. Literatürde, gerinim ölçümü, titreşim analizi, akustik emisyon, termografi ve makine görüşüne dayalı tekniklerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir [6–8]. Yapılan çalışmalar, özellikle çoklu sensör kullanımının hasar tespit doğruluğunu artırdığını ortaya koyarken, tekil yöntemlerin çevresel gürültüye duyarlılık ve sınırlı hassasiyet gibi dezavantajlar içerdiğini göstermektedir [14, 15]. Bu durum, hibrit ve entegre izleme sistemlerine olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Rüzgar türbini kanatlarında hasar oluşumuna yönelik çalışmalar incelendiğinde, yıldırım çarpması, buzlanma, partikül erozyonu ve yorulma yüklerinin başlıca hasar nedenleri olduğu görülmektedir [9, 18]. Bu çalışmalar, çevresel etkilerin kanat ömrü üzerindeki kritik rolünü vurgulamakta; ancak hasar oluşumu ile onarım süreçleri arasındaki ilişki çoğunlukla sınırlı düzeyde ele alınmaktadır.

Kompozit malzemelerin onarımına yönelik literatürde, rüzgar türbini kanat onarımlarının havacılık sektöründeki uygulamalara kıyasla daha az sistematik olduğu belirtilmektedir [11]. Yapıştırıcı davranışı, yüzey hazırlığı ve küreme parametrelerinin onarım kalitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiş; ancak bu bilgilerin saha uygulamalarına entegrasyonu sınırlı kalmıştır [12]. Bu durum, teorik bilgi ile pratik uygulama arasında bir boşluk olduğunu göstermektedir.

Hasar tespit teknikleri açısından değerlendirildiğinde, ultrasonik muayene, fiber Bragg ızgara sensörleri, görüntüleme sistemleri ve akustik emisyon yöntemlerinin hem yüzey hem de iç hasarların belirlenmesinde etkin olduğu ortaya konmuştur [8, 10]. Özellikle fiber optik ve piezoelektrik sensörlerin mikro hasarların tespitinde yüksek hassasiyet sağladığı belirtilmektedir [13, 28]. Bununla birlikte, bu yöntemlerin saha koşullarındaki uygulanabilirliği, maliyet ve veri işleme gereksinimleri açısından bazı sınırlamalar içermektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, çok sensörlü sistemlerin ve yapay zeka tabanlı analiz yöntemlerinin hasar tespitinde önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Zaman serisi analizi ve makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak geliştirilen modellerin erken arıza

tespitinde yüksek doğruluk oranlarına ulaştığı rapor edilmiştir [14]. Ancak bu yaklaşımların büyük ölçekli türbin sistemlerine entegrasyonu ve gerçek zamanlı uygulamaları hâlen gelişim aşamasındadır.

DeneySEL ve sayısal çalışmalar, kompozit kanatların farklı hasar türlerine karşı farklı davranışlar sergilediğini göstermektedir. Özellikle tam ölçekli yorulma testlerinde belirli bölgelerde beklenmeyen çatlak oluşumları gözlemlenmiş ve kritik gerilme bölgelerinin yeniden değerlendirilmesi gerektiği ortaya konmuştur [21, 22]. Bu bulgular, kanat tasarımı ve bakım stratejilerinin optimize edilmesi açısından önemli veriler sunmaktadır.

Bununla birlikte, mevcut literatür incelendiğinde çalışmaların büyük çoğunluğunun ya hasar tespitine ya da malzeme davranışına odaklandığı, hasar tespiti ile onarım süreçlerini entegre şekilde ele alan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, gerçek saha verilerine dayalı vaka analizlerinin ve ekonomik değerlendirmelerin literatürde yeterince yer bulmadığı dikkat çekmektedir.

Bu bağlamda, rüzgar türbini kanatlarında hasar oluşumu, tespiti ve onarım süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması; saha uygulamaları ile desteklenen analizlerin gerçekleştirilmesi ve ekonomik etkilerin değerlendirilmesi literatürde önemli bir araştırma boşluğu olarak öne çıkmaktadır.

2. RÜZGAR TÜRBİNİ KANATLARINDA HASAR MEKANİZMALARI

Rüzgar türbini kanatlarındaki hasarlar, sürekli çalışma sırasında çeşitli nedenlerden kaynaklanabilir [14]. Örneğin rüzgar, şiddetli yağış, yıldırım düşmesi, buz birikmesi, yetersiz kanat malzemesi mukavemeti, yorulma yükleri, üretim, kurulum vb. sırasındaki kişisel hatalar. Bu tür hasarlar, aerodinamik verimlilik kaybına yol açarak güç üretimini azaltmakta ve türbinin kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Ayrıca, gürültü emisyonlarında da artışa neden olurlar. [6, 9, 14].

2.1 Hasar Tespit Teknikleri

Hasar tespitinin temel amacı, rüzgar türbinlerinde meydana gelen hasarların, ciddi arızalara ya da felaketlere yol açmadan önce izlenmesini sağlamaktır. Bu tespitler, kanadın hâlâ güvenli ve işlevsel şekilde çalışıp çalışmadığını doğrulamak için kullanılır. Aynı zamanda, hasarın temel nedenini tanımlamaya yardımcı olur ve bu sayede etkili bakım stratejileri geliştirilebilir [14]. Bu kapsamda yıldırım dedektörleri, özellikle kanatların açıldığı alanlarda doğrudan yıldırım etkisini önlemek amacıyla rüzgar türbinlerine entegre edilmektedir [9].

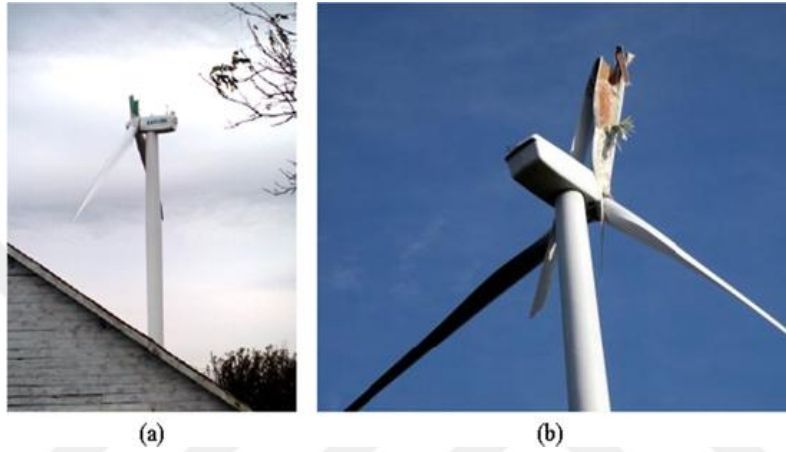
2.2 Arıza Göstergeleri

Rüzgar türbini kanatları için tipik bir durum izleme ve arıza teşhis sistemi, çeşitli sensör temelli yöntemlerin birleşimiyle oluşturulur. Bunlar arasında gerilim ölçümü, akustik emisyon, ultrason, titreşim analizi, termografi ve makine görüşü gibi teknikler yer alır. Bu yöntemler, hasarın erken teşhisinde ilk adımı oluşturur. Tespit edilen sinyallerden karakteristik veriler çıkarılır ve bunlar arıza göstergelerine dönüştürülerek arızanın türü ve derecesi hakkında bilgi sağlanır [7, 14].

2.3 Rüzgar Türbini Kanat Arızalarının Nedenleri

Normal çalışma koşullarında, rüzgar türbini kanatları, elektrik üretimini sağlayan rotorları tahrik etmek için titreşimli rüzgar yüklerini taşır. Ancak uzun süreli çalışmalarda, bu kanatlar döngüsel yükler nedeniyle yorulma kaynaklı bozulmalar yaşar ve zamanla malzeme çatlakları oluşur. Uygun olmayan çevresel koşullarda bu çatlaklar hızla büyüyerek, kanadın arızalanmasına hatta tüm türbin sisteminin çökmesine yol açabilir. Kuvvetli rüzgarlar, yıldırım düşmeleri, buzlanma ya da kuşlarla çarpışmalar gibi faktörler, bu tür hasarların ve çatlakların başlıca nedenleri arasında yer alır [9].

23 Ekim 2008'de, Illinois eyaletinin Wyanet kenti yakınlarındaki küçük ölçekli bir rüzgar çiftliğinde yer alan dört türbinden birinin kanadı kırılmıştır. Kırılan kanat, türbinin tabanından yaklaşık 100–150 feet uzaklıktaki bir mısır tarlasında bulunmuştur. Kanadın yaklaşık 140 feet uzunluğunda ve en geniş noktasında 15 feet genişliğinde olduğu rapor edilmiştir. Benzer bir olay, 2009 yılında Wessington Springs Rüzgar Çiftliği'nde meydana gelmiş ve şiddetli rüzgarlar sonucunda bir General Electric 1,5 MW rüzgar türbininin kanadı parçalanmıştır [9].



Şekil 2.3.1. (a) Wyanet'te kanat kırılması; (b) şiddetli rüzgarlar nedeniyle parçalanmış kanat [9].

2.4 Dengesiz Buz Birikimi Nedeniyle Oluşan Kanat Arızaları

Rüzgar türbini kanatlarının yüzeyinde buz birikmesi, özellikle uç noktalarındaki yüksek dönüş hızları (180 mil/saat üzerinde) nedeniyle önemli güvenlik ve operasyonel riskler oluşturur. Kanatların dönmesiyle oluşan büyük santrifüj kuvvetleri, biriken buzları yüksek hızlarda fırlatacak kadar güçlü olabilir. Örneğin, bir vakada kanat yüzeyinde yaklaşık iki inç kalınlığında buz birikimi gözlenmiş ve bu birikim kanat boyunca çıkıntı oluşturmuştur [9]. Ayrıca buz, kanatlar arasında eşit dağılmayabilir, bu da rotorun dengesiz dönmesine yol açar. Dengesizlik rotor göbeğine fazladan stres bindirir ve bazı koşullar altında, mod lokalizasyonu adı verilen bir durum meydana gelebilir. Bu durumda, kanatlardan biri çok daha büyük genlikte titreşerek ciddi yapısal arızalara neden olabilir.



Şekil 2.4.1. Wachusett Rüzgar Enerjisi'ndeki bir rüzgar türbininde buz birikmesi ve düşmesi [9].

2.5 Hatalı Üretimden Kaynaklanan Kanat Arızaları

Rüzgar türbini kanat arızalarının başlıca nedenleri arasında çevresel etkenler ve insan kaynaklı müdahaleler yer alsa da, hatalı üretim süreçleri de beklenmeyen yapısal arızalara neden olabilir. Örneğin, Ohio'daki bir türbinde meydana gelen arıza, kanadın ana taşıyıcı bileşeni olan kirişte kullanılan karbon fiberdeki üretim kaynaklı bir kırışıklık nedeniyle ortaya çıkmıştır. Kanat, yüksek rüzgar yüklerine tekrar tekrar maruz kaldıkça bu kırışıklık ilerlemiş ve sonunda ciddi bir yapısal arızaya yol açmıştır [29].

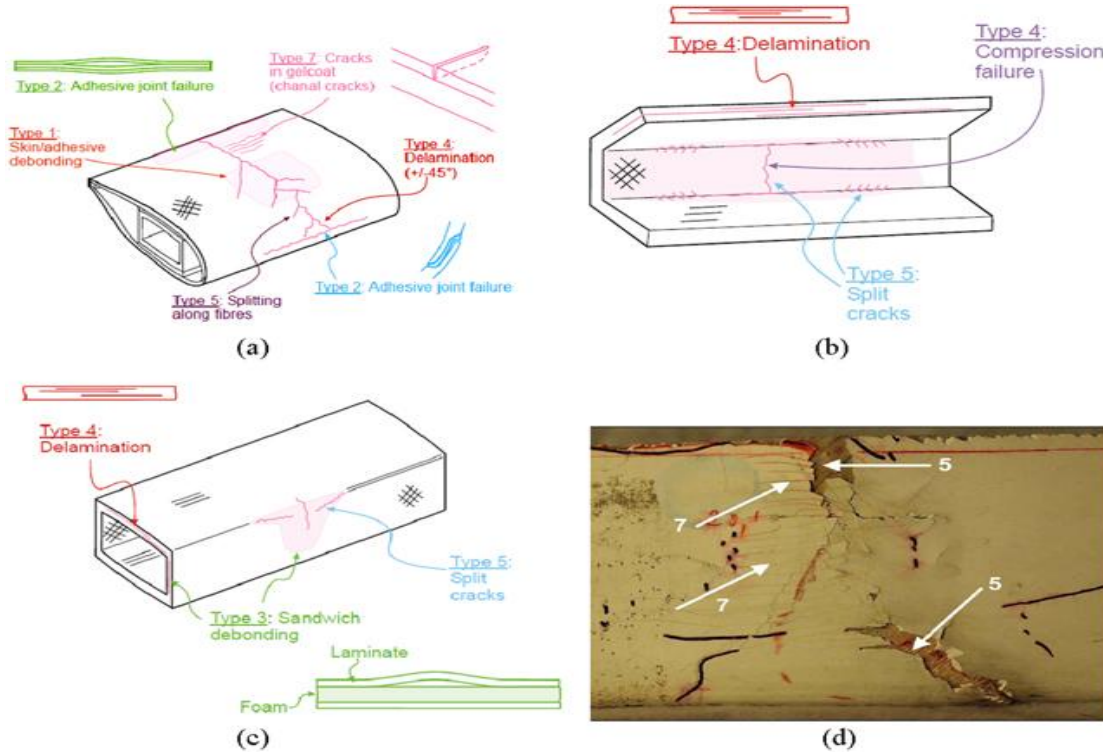


Şekil 2.5.1. (a) 2008'de Kirkheaton'da kırılan 66,5 m'lik bir türbin kanadı; (b) 25 Nisan 2012'de Ohio'da parçalanan ve enkazın etrafa dağıldığı iki kanat [30, 31].

2.6 Kanat Hasarlarının Türleri ve Kritik Bölgeler

Görüldüğü gibi, çok sayıda faktör rüzgar türbini kanadının arızalanmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca, rüzgar türbini kanatlarının maruz kalabileceği hasar türlerini ve özelliklerini anlamaya yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, 25 metrelik bir rüzgar türbini kanadının test edilmesi ve arıza sonrası analizine odaklanan çalışmada, türbin kanatlarında

meydana gelebilecek yedi farklı hasar türü sistematik biçimde kategorilere ayrılmıştır [20]. Bu yedi tip kanat hasarı, 2.6.1 (a)–(d)'de (1) deri/yapıştırıcı ayrılması, (2) yapıştırıcı bağlantı arızası, (3) sandviç ayrılması, (4) delaminasyon, (5) lifler boyunca ayrılma, (6) burkulumaya bağlı deri/yapıştırıcı ayrılması (tip 1'in özel durumu) ve (7) jelkotta çatlaklar olarak gösterilmiştir. Birkaç tipik hasar türü Şekil 2.6.1 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6.1. Bir rüzgar türbini kanadının maruz kalabileceği hasar türleri: rüzgar altı yüzeyi (a), ana kirişin içi (b) ve dış (c) yüzeyleri; (d) bir rüzgar türbini kanat yüzeyinde gözlemlenen belirli hasar türlerinin örnek görüntüleri (not: 7 numara jelkottaki çatlakları, 5 numara ise lifler boyunca oluşan ayrılmaları temsil etmektedir) [20].

2.7 Hasara Eğilimli Kanat Bölgeleri

Bir rüzgar türbini kanadında hasarın yoğun olarak görüldüğü tipik bölgeler dört ana başlık altında toplanabilir [15]:

- (A) Kanat kökünden itibaren akor uzunluğunun %30-35'i ve %70'i,
- (B) kanadın kökü,
- (C) maksimum akor ve,
- (D) sparın üst kiriş kapağı/flanşı.

Şekil 2.6.1'de gösterildiği gibi, birçok araştırma, kanat uzunluğunun kök bölümünden itibaren yaklaşık %30–35 ve %70'lik bölgelerinin hasara daha yatkın olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarla desteklenmiştir [15, 22, 23]. Ancak TX-100 kanadı üzerinde gerçekleştirilen yorulma testlerinde, beklenmedik şekilde yüksek basınç tarafındaki arka kenara yakın bölgelerde çok sayıda çatlak olduğu gözlemlenmiştir [21].



3. TÜRİN KANATLARINDAKİ HASAR TESPİTİNDE KULLANILAN SENSÖRLER: PRENSİPLERİ VE UYGULAMALARI

Geleneksel olarak, elektriksel gerinim ölçerler belirli kanat bölgelerinin gerilim dağılımını ölçmek için kullanılırken ivmeölçerler dinamik tepkileri ve tüm bir kanadın modal analizini ölçmek için kullanılır. Teknik gelişmeler, örneğin optik fiber sensörler ve kurşun zirkonyum titanatlar (PZT'ler) gibi yeni ortaya çıkan sensörlerin hasar tespiti için bir türbin kanadının diğer doğal özelliklerini ölçmesine olanak tanır. Bu bölümde, bu sensörler kanat hasarı tespiti için çalışma prensipleri ve uygulamalarıyla kısaca tanıtılmaktadır [7, 13, 26].

3.1 Geleneksel Gerinim Ölçerler

Geleneksel gerinim ölçerler, esnek iletken olmayan bir desteğe bağlanmış metal folyo deseninden oluşur ve yaygın olarak kullanılır. Metal folyoyu taşıyan destek, genellikle siyanoakrilat yardımıyla ölçüm yapılan yapıya bağlanır. Yapıdaki gerinimler metal folyoya aktarılır ve bu da elektriksel direnç değişikliklerine neden olur. Bu direnç değişikliği, çoğunlukla Wheatstone köprüsü aracılığıyla bağlı veri toplama sistemi tarafından ölçülür [20]. Rüzgar türbini kanatları için sertifikasyon sürecinin bir parçası olan statik ve yorulma testleri, aşırı yüklere karşı bu kanatların dayanıklılığını değerlendirir [21]. Test kanadının jel kaplama yüzeyine yerleştirilen çok sayıda metal folyo gerinim ölçer ile ölçümler gerçekleştirilmiş ve boş yükte sıfırlama işlemi uygulanmıştır [21]. Benzer şekilde, kanadın yüksek basınç tarafında yerleştirilen gerinim ölçerler ile gerinim dağılımı izlenmiştir [22]. Ayrıca, eksenel gerilimi ölçmek amacıyla tam ölçekli kanatlara çok sayıda rozet tipi gerinim ölçer monte edilmiştir [23].

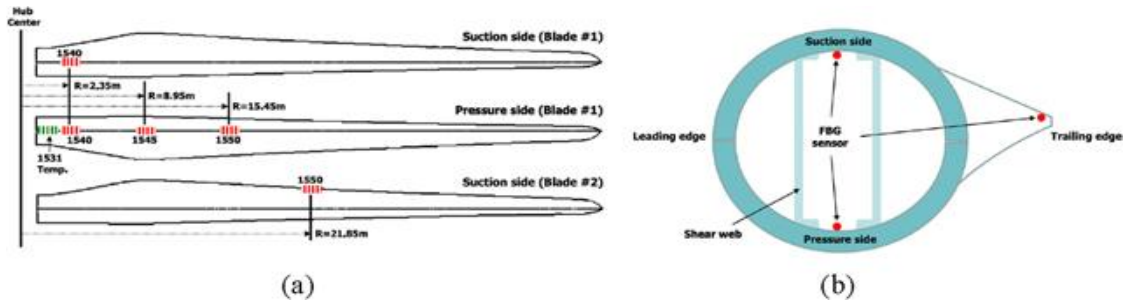
Geleneksel gerinim ölçerlerin dezavantajları arasında, kanat köküne yerleştirildiklerinde bile uzun vadede arızalanmaya eğilimli olmaları, bakır kablolanmanın yıldırım düşmesi gibi elektriksel bozulmalara karşı hassas olması ve ortam gürültüsüne karşı duyarlılıkları yer alır. Ayrıca, belirli kanat hasarlarını gösterecek kadar hassas değildir; örneğin yapılan bir çalışmada, gerinim ölçerlerin ancak kanadın deri bükülmesine kadar net bir hasar göstergesi vermediği belirtilmiştir [19].

Geleneksel gerinim ölçerlerin aksine, optik fiber sensörler elektriksel ve manyetik girişimlere karşı hassas değildir ve türbin kanatlarında sıkça görülen yıldırım düşmesi etkilerine karşı doğal bir bağışıklık sağlar. Ayrıca çoklama (multiplexing) yetenekleri sayesinde yapısal elemanlara kolayca entegre edilebilirler. Bu özellikleri ile optik fiber sensörler doğru, güvenilir

ve kararlı ölçümler yapabilen sistemler olarak kabul edilmektedir [13]. Optik fiber sensörlerin çalışma prensibi, çevresel etkiler nedeniyle optik fiberlerin geometrik (boyut ve şekil) ve optik (kırılma indisi ve mod dönüşümü) değişimlerinin, iletilen ışığın genlik, faz, frekans, dalga boyu ve polarizasyon gibi özelliklerinde karşılık gelen değişimlere dönüştürülmesi ya da kodlanmasına dayanır. Uygun demodülasyon sistemleriyle bu kodlanmış ışık sinyalleri, fiber boyunca gerinim, sıcaklık, nem, korozyon ve ivme gibi dış ortam parametrelerinin ölçümünde kullanılabilir.

Fiber optik sensörler, ölçülen fiziksel parametrelere ve çalışma prensiplerine göre birçok türe ayrılabilir. Günümüzde türbin kanatlarındaki hasarların tespitinde fiber Bragg kafes (FBG) sensörü ve optik fiber mikro büküm yer değiştirme sensörü olmak üzere iki çeşit fiber optik sensör kullanılmaktadır.

FBG sensörleri, periyodik olarak değişen kırılma indisinin fiber çekirdeği üzerinde oluşturulmasıyla elde edilir. Kırılma indisindeki her tepe, lazer girişim deseni veya faz maskesi kullanılarak oluşturulan bir Bragg ızgarasını temsil eder. Her Bragg ızgarası ışığı kısmen kaynağa doğru geri yansıtır ve bu ızgaraların periyodik aralığına bağlı olarak, iletilen ışık spektrumunun belirli bir dalga boyu bandı yansıtılır (Şekil 3.1.1) [13].



Şekil 3.1.1. (a) Bir rüzgar türbininin kanatları boyunca FBG sensörlerinin çeşitli konumlandırılmaları; (b) bir rüzgar türbini kanadı içindeki FBG'lerin konumlandırılması [26].

3.2 İvmeölçerler

İvmeölçerler genellikle bir yay üzerine bağlı sönümlenmiş bir kütle olarak modellenir ve klasik Newton mekaniği prensiplerine dayanarak bağlı oldukları nesnenin ivmesini ölçer. Nesne ivme yaptığında, yay içerisindeki kütleyi yerinden oynatan bir kuvvet oluşur ve bu durum ikinci dereceden toplu fiziksel bir sistem davranışı oluşturur. Belirli sönümleme

koşulları ve frekans aralığında, kütle ivmesi nesnenin ivme genliği ile neredeyse doğrudan orantılıdır [25]. Ticari ivmeölçerlerde piezoelektrik, piezodirençli ve kapasitif bileşenler mekanik ivmeyi elektrik sinyaline dönüştürmek için kullanılır ve böylece nesnenin ivmesi orantılı olarak ölçülür. İvmeölçerler, dinamik test ve modal analizde yapısal tepkileri ölçmek için kullanılan geleneksel sensörlerdir. Çoğu araştırmacı ivmeölçerlere aşınadır ve bu sensörler yalnızca eksiksizlik amacıyla burada ele alınmıştır. Genellikle ivme ölçümü için yüksek hassasiyetli üç eksenli ve düşük frekanslı kapasitif ivmeölçerler tercih edilmektedir.

3.3 Taramalı Lazer Doppler Vibrometre (SLDV) Sensörleri

SLDV (Tarama Lazer Doppler Vibrometresi), kanada temas etmeden geniş bir frekans aralığında çok sayıda noktanın titreşim verisini hızlı şekilde ölçebilir [26]. SLDV'den yayılan lazer ışını, Doppler etkisi prensibiyle kanat yüzeyine yönlendirilir ve yüzeyin lazer kaynağına göre hareketi nedeniyle yansıyan lazer ile kaynak lazer arasındaki frekans farkı ölçülür. Dahili bir lazer interferometresi, yansıyan lazer ve referans lazer arasında girişim oluşturarak bu frekans değişimini saptar. Fotodedektör, ışık yoğunluğundaki değişimleri kaydeder ve bu değişimlerin frekansı Doppler kaymasıyla ilişkilendirilir. Bu sayede kanat hareketlerinin titreşim genliği ve frekansı analiz edilebilir. Örneğin, 8 ft uzunluğundaki bir fiberglas rüzgar türbini kanadının 114 noktasındaki hızlar, hasar tespiti için operasyonel sapma şekilleri ve geçirgenlik fonksiyonlarını hesaplamakta kullanılmıştır [27]. Deneylerde, yansıyan lazer sinyalinin yoğunluğunu artırmak için çıplak fiberglas kanat üzerine geri yansıtıcı malzeme uygulanmıştır (Şekil 3.3.1).



Şekil 3.3.1. (a) Birkaç PZT sensörüyle donatılmış bir rüzgar türbini kanadının üzerine yerleştirilmiş lazer noktaları dizisi; **(b)** kanadın sapmalarını ölçmek için kullanılan lazer vibrometresi [27].

3.4 Rüzgar Türbini Kanatlarında Hasar Tespiti İçin NDT Yöntemleri

Rüzgar enerjisi, sürdürülebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Rüzgar türbinlerinin verimliliği ve güvenliği, özellikle kanatların yapısal bütünlüğüne bağlıdır. Bu nedenle, kanatlarda meydana gelebilecek hasarların zamanında tespit edilmesi kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Non-Destructive Testing (NDT) yani tahribat olmayan test yöntemleri kullanılmaktadır [6, 7].

3.5 Ultrasonik Test (UT)

Ultrasonik test, yüksek frekanslı ses dalgalarının malzeme içerisinde yayılması prensibine dayanan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemde malzemeye gönderilen ses dalgaları, malzeme içerisindeki hasar veya kusurlarla karşılaştığında yansıyarak geri döner ve bu yansımaların analizi sayesinde içsel hatalar tespit edilebilir. Türbin kanatları üzerinde yapılan uygulamalarda ise genellikle endüstriyel ultrasonik cihazlar kullanılarak yüzeyden belirli bir derinliğe ses dalgaları gönderilir ve elde edilen geri yansıma sinyalleri değerlendirilerek malzeme içerisindeki hasar durumu hakkında bilgi edinilir.

3.6 Manyetik Parçacık Testi (MT)

Bu yöntem, manyetik alan kullanılarak yüzeyde ve yüzeye yakın alt katmanlarda bulunan kusurların tespit edilmesine olanak sağlayan bir tahribatsız muayene tekniğidir ve genellikle demir esaslı malzemelerde tercih edilmektedir. Uygulama sırasında kanat yüzeyi öncelikle temizlenir, ardından yüzeye manyetik bir akım uygulanır. Oluşan manyetik alan, yüzeydeki süreksizliklerden etkilenerek bu bölgelerde kaçak akı oluşturur ve manyetik parçacıklar bu alanlarda toplanarak kusurların görünür hale gelmesini sağlar.

3.7 Görüntüleme Yöntemleri (RT, CT)

Radyografik test (RT) ve bilgisayarlı tomografi (CT), malzemenin iç yapısının görselleştirilmesine olanak sağlayan tahribatsız muayene yöntemleridir. Bu yöntemlerde radyasyon kaynakları kullanılarak türbin kanadının iç yapısı X-ışınları ile incelenir. X-ışınları, malzeme içerisinden geçerken farklı yoğunluklara bağlı olarak zayıflamaya uğrar ve bu sayede iç yapıda bulunan süreksizlikler ile kusurlar tespit edilebilir.

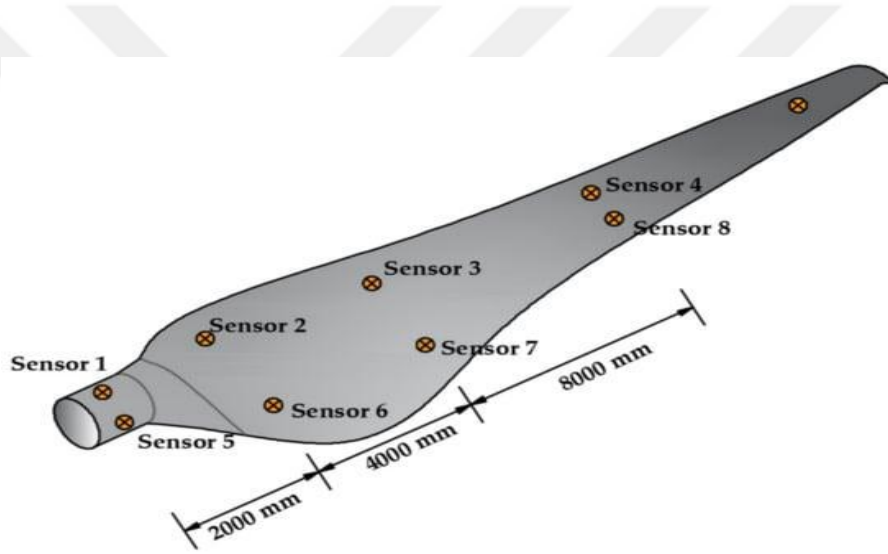
3.8 Termal İmajlama (TI)

Termal imajlama, yüzey sıcaklığını ölçerek malzeme içerisindeki anormalliklerin belirlenmesine olanak sağlayan bir tahribatsız muayene yöntemidir. Bu yöntemde hasarlı

bölgeler, çevrelerine kıyasla genellikle daha düşük veya daha yüksek sıcaklık değerleri göstermektedir. Uygulama aşamasında ise bir termal kamera kullanılarak türbin kanadının yüzeyi taranır ve elde edilen sıcaklık dağılımları analiz edilerek olası hasar bölgeleri tespit edilir.

3.9 Akustik Emisyon Testi (AE)

Bu yöntem, malzeme içerisinde meydana gelen deformasyonlar sırasında oluşan ses dalgalarının tespit edilmesine dayanan bir tahribatsız muayene tekniğidir. Yüzey altındaki çatlaklar veya diğer hasarlar, malzeme gerilim altındayken akustik emisyon sinyalleri üretir. Uygulama aşamasında ise kanat yapısına yerleştirilen sensörler bu akustik emisyonları kaydeder ve elde edilen veriler analiz edilerek hasarların konumu ve büyüklüğü belirlenir.



Şekil 3.9.1. Akustik emisyon tekniği ile arıza veya hasar tespiti için piezoelektrik sensörlerin yerleşimi [28].

4. HASAR TÜRLERİ VE ONARIM YAKLAŞIMLARI

4.1 Arka Kenar Çatlak Hasarı (TE Crack Damage)

Rüzgar türbinlerinin kanatlarında “trailing edge crack damage” (arka kenar çatlak hasarı), kanatların uç kısmında, yani rüzgar akışının kanattan ayrıldığı bölümde ortaya çıkan çatlaklardır. Bu çatlaklar, türbin kanatlarının yapısal bütünlüğünü etkileyebilir ve türbinin performansını düşürebilir. Bunların nedenleri şunlardır;

Kanatlarda meydana gelen hasarların başlıca nedenleri arasında materyal yorgunluğu, hava koşulları, yapı hataları ve bakım süreçlerindeki yetersizlikler yer almaktadır. Uzun süreli stres veya aşırı yüklemeler sonucunda malzeme yapısında zamanla yorgunluk oluşabilmekte ve bu durum çatlakların ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır. Bununla birlikte aşırı sıcaklık, düşük sıcaklık, şiddetli rüzgâr ve buzlanma gibi olumsuz çevresel koşullar, kanat malzemesi üzerinde ilave gerilimler oluşturarak hasar riskini artırmaktadır. Üretim aşamasında meydana gelen kalite kontrol eksiklikleri veya tasarım hataları da yapısal zayıflıklara neden olarak çatlak oluşumunu tetikleyebilmektedir. Ayrıca yetersiz bakım ve hatalı onarım uygulamaları, mevcut hasarların ilerlemesine ve daha ciddi yapısal problemlere dönüşmesine yol açabilmektedir.

Çatlakların kanat yapısı üzerindeki etkileri, performans, güvenlik ve maliyet açısından önemli sonuçlar doğurmaktadır. Öncelikle çatlaklar, kanatların aerodinamik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek enerji üretim verimliliğinde düşüşe neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra çatlakların ilerlemesi, yapısal bütünlüğün zayıflamasına yol açarak kanat kopması gibi ciddi arızalara sebebiyet verebilir ve bu durum önemli bir güvenlik riski oluşturur. Ayrıca oluşan hasarların onarılması ya da kanatların tamamen değiştirilmesi, yüksek bakım maliyetleri ve operasyonel zaman kaybı ile sonuçlanabilmektedir.

Çatlak oluşumunun önlenmesi ve bakım süreçlerinin etkin şekilde yürütülmesi, kanatların güvenli ve verimli çalışması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda kanatların düzenli olarak incelenmesi ve belirli periyotlarla gerçekleştirilen muayeneler (inspections), çatlakların erken aşamada tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca kanat performansını değerlendirmek amacıyla yapılan yük testleri, olası yapısal zayıflıkların belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte daha dayanıklı malzemelerin kullanılması, onarım süreçlerinde mukavemeti artırmaya yönelik iyileştirmeler yapılması ve tasarımın bu tür hasarları önleyecek şekilde revize edilmesi, çatlak oluşum riskinin

azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Rüzgar türbini kanatlarında TE Damage, çok önemli bir hasardır; dolayısıyla, türbinlerin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamak için dikkatle ele alınması gerekir. Bu hasarda türbin durdurulmalı ve kanat onarımı sağlanana kadar kullanılmamalıdır. Kritik hasarlardan biri olduğu için kanatta daha fazla hasara yol açma olasılığı muhtemeldir.

4.1.1 Arka Kenar Çatlak Hasar Onarımı (TE Crack Damage Repair)

Rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen "trailing edge crack damage" (arka kenar çatlak hasarı) onarımı, dikkatli bir planlama ve uygulama gerektiren bir süreçtir.

4.1.2 Hasarın Değerlendirilmesi

Çatlakların tespit edilmesi sürecinde ilk aşamada görsel muayene yöntemi uygulanarak kanat yüzeyi incelenir ve çatlakların boyutu ile konumu belirlenir. Bu işlemler genellikle yetkili saha ekipleri tarafından gerçekleştirilen muayene (inspection) çalışmaları ve drone destekli kontroller ile sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra çatlakların derinliği ve yayılımı hakkında daha detaylı bilgi elde edebilmek amacıyla ultrasonik testler veya X-ışını (X-Ray) kontrolleri gibi tahribatsız ve bazı durumlarda tahribatlı muayene yöntemlerinden de faydalanılmaktadır.

4.1.3 Onarım Planının Hazırlanması

Onarım sürecine başlamadan önce gerekli ekipman ve malzemelerin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Kanat tipine bağlı olarak epoksi veya polyester reçineler, cam elyafı, köpük ve balsa gibi dolgu ve takviye malzemeleri ile boya ve koruyucu kaplama gibi çeşitli kimyasal ürünler kullanılmaktadır. Ayrıca yüzey hazırlığı için zımpara malzemeleri de sürecin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bununla birlikte uygulama sırasında uygun havalandırmanın sağlanması, kişisel koruyucu ekipmanların kullanılması ve gerekli tüm iş güvenliği önlemlerinin alınması hem çalışan sağlığı hem de işlemin güvenli bir şekilde yürütülmesi açısından kritik öneme sahiptir.

4.1.4 Onarım Süreci

Onarım süreci, hasarlı bölgenin uygun şekilde hazırlanması ve yeniden yapılandırılması adımlarını içermektedir. İlk olarak çatlak bölgesi temizlenerek yüzeydeki kir, yağ ve diğer kalıntılar giderilir. Ardından hasarın ilerlediği seviyeye kadar gerekli durumlarda cam elyaf ve çekirdek malzeme taşıma işlemi ile uzaklaştırılır. Yüzey, yeni uygulanacak

malzemeye uygun hale getirilmesi amacıyla zımparalanarak pürüzlendirilir ve böylece aderansın artırılması sağlanır. Sonrasında, kaldırılan kompozit malzemenin yerine kanat talimatlarına ve tasarımına uygun olarak cam elyaf ve/veya çekirdek malzeme ile laminasyon işlemi gerçekleştirilir. Çatlağın büyük olduğu durumlarda ise bölgenin kapatılması ve mukavemetin artırılması amacıyla kompozit veya fiber takviye materyalleri kullanılabilir. Uygulanan cam elyaf ve reçine sisteminin ardından, malzemenin uygun şekilde sertleşmesi için ısıtıcı battaniyeler kullanılarak yaklaşık iki saat süreyle kürlenme işlemi gerçekleştirilir. Bu süreçte reçine ve cam elyaf birleşerek homojen ve dayanıklı bir yapı oluşturur. Kürlenme süreci, ısıtıcı battaniyeye bağlı bir sıcaklık veri ölçer (data logger) cihazı ile izlenerek sıcaklık değişimleri grafiksel olarak kontrol altında tutulur.

4.1.5 Son Kontrol ve Test

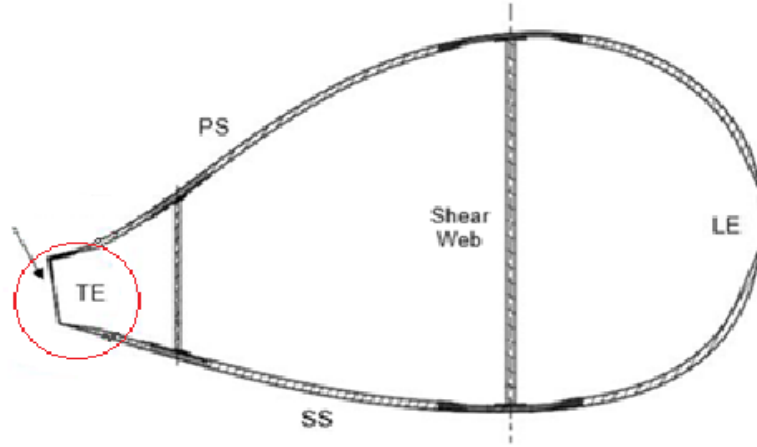
Onarım işleminin tamamlanmasının ardından, gerçekleştirilen müdahalenin doğruluğunu ve etkinliğini değerlendirmek amacıyla çeşitli kontroller yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda öncelikle onarılan bölge görsel olarak incelenerek yüzey kalitesi, düzgünlük ve olası hatalar kontrol edilir. Ardından rüzgar türbini, normal çalışma koşulları altında performans testlerine tabi tutulur ve bu süreçte enerji üretim verimliliği ile sistemin genel fonksiyonları değerlendirilerek onarımın başarı durumu doğrulanır.

4.1.6 Bakım ve İzleme

Onarım sonrasında kanadın düzenli olarak izlenmesi ve belirli periyotlarla incelenmesi, olası yeniden hasar oluşumlarının erken aşamada tespit edilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu tür izleme ve bakım faaliyetleri, yapısal bütünlüğün korunmasına katkı sağlarken olası arızaların büyümeden kontrol altına alınmasına da olanak tanır. Ayrıca bu süreç, profesyonel ekipler ve ilgili mühendislik bilgisine sahip uzman kişiler tarafından yürütülmesi gereken, teknik bilgi ve deneyim gerektiren karmaşık bir faaliyet olarak değerlendirilmektedir.

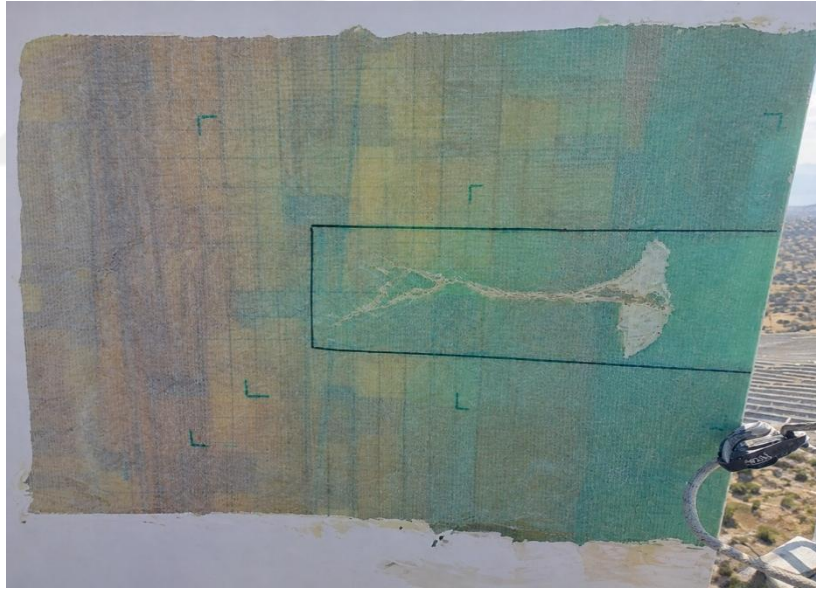


Şekil 4.1.6.1. Arka kenar çatlak hasarı



Şekil 4.1.6.2. TE bölgesinin gösterimi

4.1.7 Hasarın Değerlendirilmesi



Şekil 4.1.7.1. Arka kenar çatlak hasarı

Görsel muayene sonucu işaretli alanda arka kenar çatlak hasarı (TE crack) hasarı görülmekte, buradaki işlem çatlağın ulaştığı derinliğe kadar yüzey temizlendikten sonra taşlamak olacaktır. Çatlağın son bulunduğu konumdan itibaren onarım işlemi için hazırlıklar yapıp ölçüler alınır.

4.1.8 Taşlama (Kat Açımı) İşlemi



Şekil 4.1.8.1. Taşlama işlemi

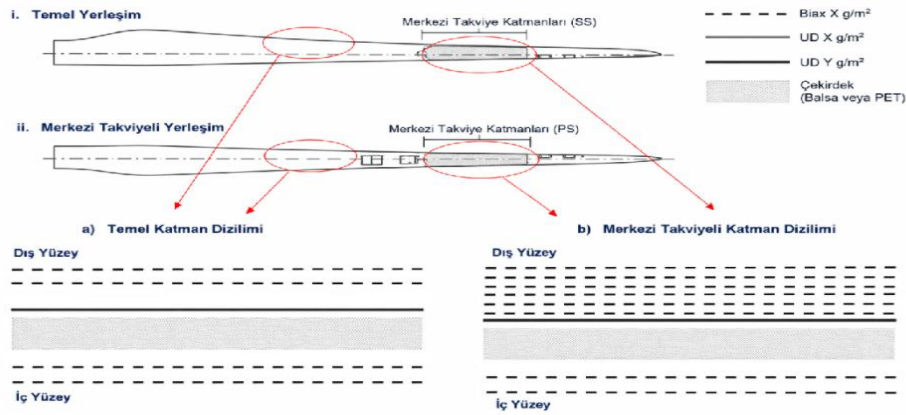
Hasarın ilerlediği kat boyunca taşlama yapılarak buradaki onarım hazır hale getirilmiştir. Mukavemet farklılıkları oluşmaması için taşlanıp kaldırılan malzemeyle eşdeğer malzeme kullanılır.

Onarımda dikkat edilmesi gereken konulardan biri de kanat tipine göre ve arka kenar çatlak (TE crack) hasarının kanadın hangi metrajında bulunduğudır. Bunun sebebi kanadın aerodinamiğine göre farklı bölgelerinde farklı yoğunlukta, sayıda malzeme kullanılmasıdır. Görseldeki hasar kanadın DF 30.3 metresinde bulunup uç (Tip) kısma uzunluğu 35 metredir. Laminasyon işlemi öncesinde talimata bakıldığında buradaki gereklilikleri incelenmesi ve bu doğrultuda onarım işlemi yapılması çok büyük önem arz etmektedir.

Katman	Sıra No	Malzeme Türü	Metraj Başlangıcı (mm)	Metraj Bitimi (mm)	Yüzey Uygulaması	Offset (Bindirme) Değerleri
Dış Yüzey (Outer Shell)	6	Biax X g/m ²	0	56,7	SS & PS	DF 24,3 – 39,4 mm: 10 mm DF 39,4 – 57,3 mm: 35 ± 5 mm
	5	Biax X g/m ²	0	56,7	SS & PS	
Çatlak Durdurucu (Crack Stopper)	4	UD X g/m ²	4,9	48,7	SS & PS	DF 38,9 – 48,7 mm: 18 mm DF 14,7 – 20,7 mm: 31 ± 5 mm DF 20,7 – 54,0 mm: 59 ± 9 mm
Çekirdek Malzeme (Core Material)	3(a)	Balsa X g/m ²	1,17	14,9	SS & PS	DF 2,1 – 6,3 mm: 212 ± 17 mm DF 6,3 – 14,9 mm: 30 ± 6 mm
	3(b)	PET X	14,9	55,2	SS & PS	DF 1,2 – 5,8 mm: 228 ± 21 mm DF 5,8 – 14,9 mm: 28 ± 5 mm
İç Yüzey (Inner Shell)	2	Biax X g/m ²	0	56,7	SS & PS	DF 0 – 38,9 mm: 0 ± 9 mm DF 38,9 – 57,3 mm: 40 mm
	1	Biax X g/m ²	0	56,7	SS & PS	DF 43,9 – 55,4 mm: 9 mm DF 55,4 – 57,3 mm: 20 mm

Şekil 4.1.8.2. Kanat onarımına ilişkin örnek talimat

İşaretlenmiş alan içerisinde bulunan metrajlara göre kullanılacak malzemenin konumu ve türü onarım talimatında tablodaki gibi verilmiştir. Örneğin iç kabuğa (inner shell) kadar taşlama yapıldıysa onarım işlemi bu katla başlayacaktır. Örnekteki TE Crack hasarı DF 30.3 metrajda bulunduğundan tabloda 0-56,7 metrajları arasında Biax X cam elyafı kullanılması gerektiği sonucuna ulaşırız. Tablonun sağ kısmında gösterilen offset değerleri kumaş ve çekirdek malzemelerinin bindirmelerinde dikkat edilmesi gereken değerlerdir.

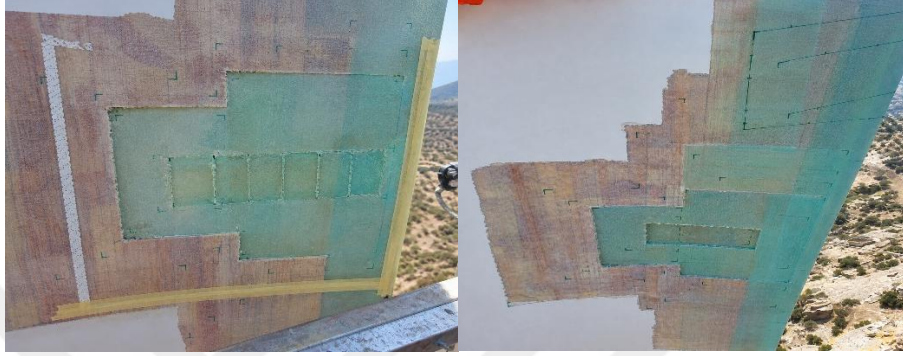


Şekil 4.1.8.3. Katmanların gösterimi

Şekil 4.1.8.3.' de ilgili metrajda kullanılacak malzemenin bilgisi ve kaç kat uygulanması gerektiğiyle ilgili bilgi verilmiştir.

Reinforcement olarak belirtilen kısım onarımlı bölgenin güçlendirilmesi ile ilgili katların gösterimidir. Örneğin; iç kabuk kısmında 2 kat Biax X cam elyafı sonrasında çekirdek malzeme (balsa ya da köpük), 1 kat UD Y ve ardından 6 kat Biax X kullanılması gerektiği yönündedir.

4.1.9 Laminasyon Öncesi Kat Açımı



Şekil 4.1.9.1. Laminasyon öncesi kat açımı

Laminasyon işlemi öncesi katlar gösterildiği gibi taşlama yardımı ile açılıp laminasyona hazır hale getirilmiştir. Soldaki görselde krema (sert reçine) yöntemiyle kumaş serimi (laminasyon) öncesi yüzey düzlüğü oluşturulmuştur.

4.1.10 Laminasyon



Şekil 4.1.10.1. Laminasyon ve sonrası

Şekil 4.1.10.1’ de sırasıyla iç katlara laminasyon (kumaş serimi) işlemi talimata göre yapılmıştır. Ardından çekirdek malzeme olan balsa malzemesi onarıma ilave edilip vakumlanarak ısıtıcı battaniye ile kürlemeye bırakılmıştır. Vakumlamanın sebebi balsa’nın tamamen yapışması ve laminasyonun içerisinde havanın tamamen uzaklaştırılmasıdır.

4.1.11 Dış Katların Laminasyonu ve Macun, Boya İşlemi



Şekil 4.1.11.1 Son katlar

Şekil 4.1.11.1’de sırasıyla gösterildiği gibi dış katların laminasyonu yapılır ardından iç katlarda olduğu gibi ısıtıcı battaniye yardımı ile kürleme işlemi yapılır. Kürleme işleminden sonra macun uygulaması yapılır. Bunun sebebi yüzeydeki dalgalanmayı minimuma indirmek boya öncesi pürüzsüz bir yüzey yaratmaktır. Macun zımparalandıktan sonra onarımın son işlemi olan boya işlemi yapılır.

4.2 Ön Kenar Erozyon Hasarı (LE Erosion Damage)

Rüzgar türbinlerinde ön kenar aşınması (erozyon), kanatların rüzgarla ilk temas eden ön kenar bölgelerinde meydana gelen aşınma süreçlerini ve bu süreçlerin etkilerini ifade etmektedir. Kanatların dönmesi sırasında rüzgarın taşıdığı toz, kum ve diğer partiküller yüzeye çarparak zamanla malzeme kaybına ve yüzey bozulmalarına neden olur. Bu durum özellikle rüzgarın hızının ve yoğunluğunun yüksek olduğu koşullarda daha belirgin hale gelmekte, ayrıca yağmur, kar ve fırtına gibi çevresel etkiler de aşınma sürecini hızlandırmaktadır. Bununla birlikte kanat tasarımı ve kullanılan malzemenin özellikleri, aşınmaya karşı direnci belirleyen önemli faktörler arasında yer almaktadır.

Ön kenar aşınmasının en önemli sonuçlarından biri, kanatların aerodinamik yapısının bozulması nedeniyle türbin verimliliğinde meydana gelen düşüştür. Yüzeyde oluşan pürüzlülükler, rüzgar akışını olumsuz etkileyerek enerji üretiminde kayıplara yol açabilmektedir. Ayrıca aşınmanın ilerlemesi, bakım ve onarım ihtiyacını artırarak işletme maliyetlerinin yükselmesine neden olurken, uzun vadede kanat ömrünü kısaltarak yapısal bütünlük ve güvenlik açısından risk oluşturabilmektedir.

Bu tür hasarların önlenmesi amacıyla, kanat tasarımında aşınmaya dayanıklı malzemelerin tercih edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra kanat yüzeyine uygulanan koruyucu kaplamalar da aşınma direncini artıran etkili yöntemler arasında yer almaktadır. Özellikle ön kenar koruma (LEP) boyaları, rüzgarın doğrudan temas ettiği bölgede porselenimsi bir yapı oluşturarak uzun süreli koruma sağlayabilmektedir. Alternatif olarak kullanılan ön kenar folyoları ise belirli bir süre aşınmaya karşı koruma sağlamakla birlikte zamanla yıpranarak yenilenme gerektirmektedir. Tüm bunlara ek olarak türbinlerin düzenli olarak kontrol edilmesi, aşınmanın erken aşamada tespit edilmesine ve gerekli bakım müdahalelerinin zamanında yapılmasına olanak tanımaktadır.

4.2.1 Ön Kenar Erozyon Hasarı Onarımı (LE Erosion Damage Repair)

Rüzgar kanadı ön kenar aşınması (erozyon) onarımı, türbinin verimliliğini ve ömrünü korumak için önemlidir. Aşağıda bu onarım sürecinin adımları ve dikkate alınması gereken faktörler sıralanmıştır.

4.2.2 Gözlem ve Değerlendirme

Ön kenar aşınmasının etkin şekilde yönetilebilmesi için ilk olarak türbin kanadının durumu düzenli olarak izlenmeli ve aşınma seviyeleri belirlenmelidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen görsel muayene sırasında aşınma, çatlak ve diğer yüzey hasarları detaylı bir şekilde incelenir. Gözlem sürecinde, gerekli durumlarda özel ölçüm ekipmanları kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı gibi parametreler değerlendirilerek hasarın boyutu ve ilerleme durumu hakkında daha kapsamlı bilgi elde edilir.

4.2.3 Hasar Tespiti

Aşınmanın yalnızca yüzeydeki etkileriyle sınırlı kalmayıp iç yapıya da zarar verip vermediğini belirlemek amacıyla ultrasonik muayene yöntemlerinden yararlanılabilir. Bu sayede malzeme içerisinde oluşabilecek gizli hasarlar tespit edilebilmektedir. Bunun yanı sıra aşınmanın kanadın aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için rüzgar akışı analizleri yapılmakta, bu kapsamda rüzgar tüneli testleri veya sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak kanat yüzeyindeki bozulmaların hava akışı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmektedir.

4.2.4 Onarım Yöntemi:

Aşınmanın şiddetine bağlı olarak, uygulanacak onarım yöntemi belirlenmeli ve yüzey kaplaması, dolgu veya kapsamlı tamir işlemlerini içeren uygun bir plan oluşturulmalıdır. Aşınmanın ileri seviyede olduğu durumlarda reçine takviyesi uygulanarak malzemenin dayanımı artırılabilir ve ilave olarak cam elyaf takviyesi ile yapısal güçlendirme sağlanabilir. Onarım öncesinde ise yüzey hazırlığı kapsamında zımparalama işlemi gerçekleştirilerek pürüzlü bölgeler giderilir ve yüzey düzgün hale getirilir; bu sayede uygulanacak yeni kaplamanın yüzeye daha iyi tutunması sağlanır.

4.2.5 Malzeme Uygulaması:

Aşınmanın önlenmesi ve kanat ömrünün uzatılması amacıyla farklı koruyucu uygulamalar tercih edilebilmektedir. Bu kapsamda, ön kenar bölgesini kapsayacak şekilde LEP (Leading Edge Protection) boya uygulaması yapılarak yüzeyde aşınmaya karşı dayanıklı bir koruyucu tabaka oluşturulabilir. Alternatif olarak, yüzeye uygulanan koruyucu folyo ile de aşınmaya karşı geçici bir koruma sağlanabilmekte, ancak bu tür uygulamaların belirli bir kullanım süresi sonrasında yenilenmesi gerekmektedir.

4.2.6 Önleyici Bakım

Onarım sonrasında kanatların düzenli aralıklarla kontrol edilmesi ve aşınmanın tekrar oluşmasını önlemeye yönelik stratejilerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu süreçte gerçekleştirilen periyodik izleme faaliyetleri, olası hasarların erken aşamada tespit edilmesine ve gerekli müdahalelerin zamanında yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte bakım ekiplerinin aşınma ve onarım süreçleri hakkında düzenli olarak eğitim alması ve güncel en iyi uygulamaları takip etmesi, yapılan çalışmaların kalitesini artırarak türbin performansının sürdürülebilirliğine katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.2.6.1. Ön kenar erozyon hasarları

4.2.7 LEP Boya Uygulaması

Orijinal olarak LEP kaplamayla donatılmış kanatlardaki nokta onarımları tolere edilir. Bununla birlikte, aerodinamik sorunların yanı sıra kenar erozyonu nedeniyle erken arızayı önlemek amacıyla, ön kenardan her birine 60 mm mesafedeki onarım uçları (kenarlar) tolere edilmez (ayrıca bkz. Şekil 4.2.7.1)



Şekil 4.2.7.1 Onarım alanı toleransları

4.3 Yıldırım Hasarı (Lightning Damage)

Rüzgar kanatlarında yıldırım hasarı, rüzgar türbinlerinin maruz kalabileceği ciddi bir sorundur. Yıldırımlar, rüzgar türbinlerinin yüksek yapıları nedeniyle sıklıkla hedef alır ve bu, çeşitli hasara neden olabilir.

4.3.1 Yıldırımın Rüzgar Kanatlarına Etkisi

Rüzgar türbinleri, yüksek ve iletken yapıları nedeniyle yıldırım düşmesi açısından riskli yapılar arasında yer almaktadır. Yıldırımın bu tür yapılara yönelmesi sonucunda ortaya çıkan yüksek akım, kanatların yapısal bütünlüğünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Özellikle yıldırım akımının oluşturduğu ani ve yüksek enerji, kompozit kanat malzemesinde hasara yol açarak yapısal zayıflamalara neden olabilmektedir.

4.3.2 Hasar Türleri

Yıldırım düşmesi, rüzgar türbini kanatlarında hem yüzeysel hem de yapısal açıdan çeşitli hasarlara yol açabilmektedir. Yüzeyde meydana gelen yanık izleri veya delikler, kanadın aerodinamik özelliklerini olumsuz etkileyerek performans kaybına neden olabilir. Bunun yanı sıra yıldırımın oluşturduğu yüksek enerji, kanat içerisindeki kompozit malzeme tabakalarını etkileyerek yapısal bütünlüğün zayıflamasına ve uzun vadede daha ciddi mekanik problemlerin ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Ayrıca yıldırım, türbinin elektriksel sistemlerine de zarar vererek kontrol sistemleri, sensörler ve diğer elektrik bileşenlerinde arızalara neden olabilir. Yıldırım sonrası oluşan çatlak ve delikler ise su ve benzeri dış etkenlerin kanat içerisine sızmasına imkan tanıyarak hasarın ilerleyip problem oluşmasına sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 4.3.2.1. Yıldırım hasarı

4.3.3 Önleme Yöntemleri

Yıldırım kaynaklı hasarların önlenmesi ve etkilerinin en aza indirilmesi amacıyla rüzgar türbinlerinde çeşitli koruma yöntemleri uygulanmaktadır. Bu kapsamda türbinlerde yıldırıma karşı koruma sağlamak için LPS (Lightning Protection System) sistemleri kullanılmakta ve yıldırım akımının güvenli bir şekilde yönlendirilmesi hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra türbin yapısının uygun şekilde topraklanması, yıldırım etkisi altındaki yapısal elemanların iletkenliğini artırarak oluşabilecek hasar riskini azaltmaktadır. Ayrıca türbinlerin periyodik olarak kontrol edilmesi, yıldırım sonrası oluşabilecek hasarların erken tespit edilmesine ve gerekli müdahalelerin zamanında yapılmasına olanak sağlamaktadır. Malzeme seçimi de bu süreçte önemli bir rol oynamakta olup, yıldırım hasarına karşı dayanıklı malzemelerin, özel kaplamaların ve güçlendirilmiş kompozit yapıların kullanılması kanatların dayanıklılığını artırarak olası hasarların etkisini azaltmaktadır.

4.3.4 Onarım ve Bakım

Yıldırım düşmesi sonrasında oluşabilecek hasarların etkili bir şekilde yönetilebilmesi için öncelikle detaylı bir hasar tespiti yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda kanat yüzeyi gözlemlenerek oluşabilecek yanık izleri, delikler ve diğer yapısal bozulmalar incelenmeli, gerekli durumlarda daha kapsamlı analiz yöntemlerine başvurulmalıdır. Tespit edilen hasarların giderilmesi amacıyla, yüzeyde meydana gelen deformasyonlar uygun onarım malzemeleri kullanılarak düzeltilmeli, hasarın boyutuna bağlı olarak gerekli görülen durumlarda kanat değişimi de değerlendirilmelidir. Bununla birlikte yıldırımın türbinin elektriksel sistemleri üzerindeki olası etkilerini belirlemek amacıyla kontrol panelleri, sensörler ve diğer elektrik bileşenleri kapsamlı bir muayeneden geçirilerek sistemin güvenli ve sağlıklı çalıştığından emin olunmalıdır.

4.3.5 Yıldırım Hasarı Onarım Süreci

Yıldırım hasarı, rüzgar türbinlerinin kanatlarında ciddi sorunlara yol açabilir. Bu nedenle, onarım işlemleri titizlikle ve uygun yöntemlerle yapılmalıdır.

4.3.6 Hasarın Tespiti

Yıldırım sonrası kanatların durumunun değerlendirilmesi amacıyla öncelikle görsel kontrol gerçekleştirilerek yüzeyde oluşabilecek yanık izleri, delikler ve çatlaklar incelenir. Bu ilk incelemenin ardından gerekli görülmesi durumunda daha detaylı muayene

yöntemlerine başvurularak kanadın iç yapısında, özellikle anakuşak ve omurga gibi kritik bölgelerde meydana gelebilecek hasarlar ultrasonik testler veya benzeri tahribatsız muayene teknikleri kullanılarak tespit edilir.

4.3.7 Onarım Planı Hazırlama

Yıldırım kaynaklı hasarın giderilmesi sürecinde öncelikle hasarın boyutu ve etkileri değerlendirilerek uygun bir onarım planı oluşturulmalıdır. Hasarın yüzeysel veya yapısal olmasına bağlı olarak uygulanacak yöntemler değişiklik gösterebilmekte, bu nedenle her durum için farklı onarım yaklaşımları benimsenmesi gerekmektedir. Onarım aşamasında kullanılacak malzemelerin seçimi de büyük önem taşımakta olup, tercih edilecek kompozit kaplamalar, epoksi reçineler ve benzeri malzemelerin hem mekanik dayanımının yüksek olması hem de elektriksel iletkenliği sınırlayıcı özellikler taşıması, kanadın uzun vadeli performansı ve güvenliği açısından kritik rol oynamaktadır.

4.3.8 Temizlik ve Hazırlık

Onarım sürecine başlamadan önce yüzey hazırlığı büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, onarım yapılacak bölgeler öncelikle toz, kir ve yağ gibi yabancı maddelerden arındırılarak temizlenir; böylece uygulanacak malzemelerin yüzeye daha iyi tutunması sağlanır. Ardından aşınmış veya hasar görmüş alanlarda zımparalama işlemi gerçekleştirilerek yüzeydeki pürüzler giderilir ve daha düzgün bir yüzey elde edilir. Bu hazırlık adımları, onarım kalitesini ve uygulanan malzemelerin dayanımını doğrudan etkileyen kritik aşamalardır.

4.3.9 Onarım İşlemi

Onarım sürecinde hasarlı bölgenin yeniden yapılandırılması amacıyla öncelikle taşıma işlemi uygulanarak yüzeydeki hasarlı katmanlar kontrollü bir şekilde kaldırılır ve sağlam yapıya ulaşılır. Hasarın iç katmanlara kadar ilerlediği durumlarda ise laminasyon işlemi gerçekleştirilir; bu kapsamda iç katmanlardan başlanarak cam elyaf kumaş serimi yapılır ve reçine ile birlikte kürlenmesi sağlanır. Ardından gerekli durumlarda çekirdek malzeme (köpük veya balsa) yerleştirilir ve vakum uygulaması ile aderans artırılarak daha homojen bir yapı elde edilir. Sonrasında üst katmanların kumaş serimi yapılarak tekrar kürlenme işlemi uygulanır ve onarım bölgesi tamamlanır. Kürlenme sonrası yüzey zımparalanarak düzgün bir form kazandırılır, ardından macun uygulaması ile yüzey hataları giderilir ve kanat geometrisi istenilen seviyeye getirilir. Macunun kürlenmesinin ardından yüzey yeniden zımparalanır ve son aşamada boya işlemi gerçekleştirilerek onarım süreci tamamlanır.

4.3.10 K rleme Süresi

Onarım sürecinde uygulanan malzemelerin istenilen mekanik özellikleri kazanabilmesi için belirlenen süre boyunca uygun koşullarda sertle meye bırakılması gerekmektedir. Bu kürlenme süreci boyunca onarılan yüzeyin dış etkenlerden korunması büyük önem taşımakta olup, sıcaklık, nem ve  vresel koşulların kontrol altında tutulması, uygulamanın kalitesi ve dayanımı açısından kritik rol oynamaktadır.

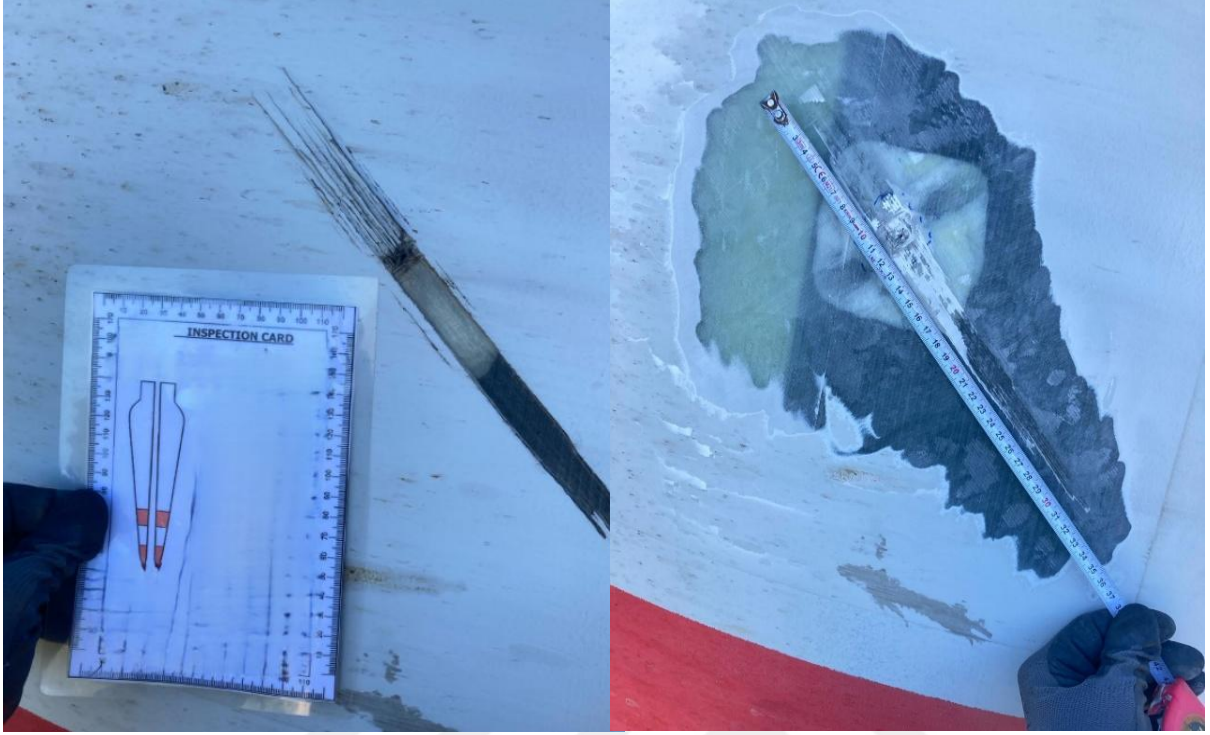
4.3.11 Son Kontrol

Onarım işleminin tamamlanmasının ardından, yüzeyin düzgünlüğü ve genel kalitesi detaylı bir şekilde kontrol edilmelidir. Bu kapsamda gerekli görülmesi durumunda ek zımparalama ve düzeltme işlemleri uygulanarak yüzey istenilen forma getirilebilir. Ardından türbinin yeniden devreye alınmasından önce uygun test ve muayene süreçleri gerçekleştirilmelidir. Bu süreçte enerji üretim verimliliği ve sistemin genel performansı değerlendirilerek yapılan onarımın başarı durumu doğrulanır.



Şekil 4.3.11.1. Boroscope ile kanat içi muayene

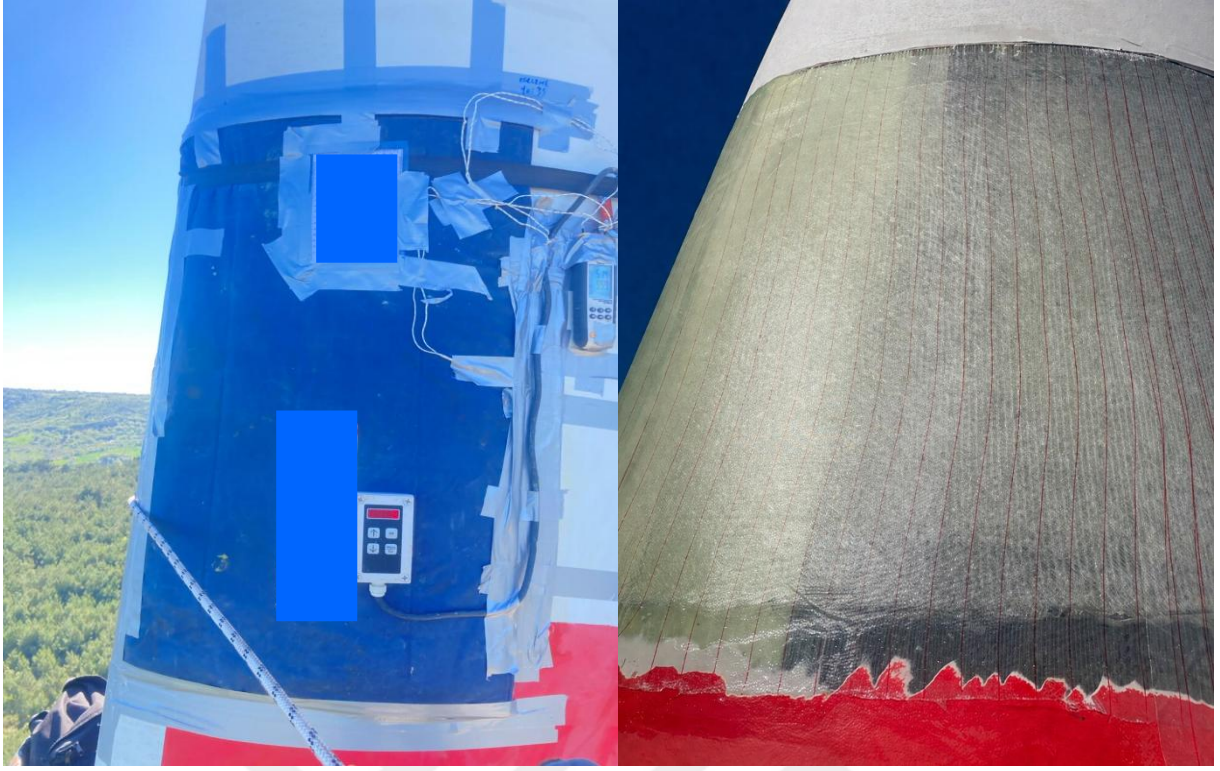
4.3.12 Yıldırım Hasarı Onarım Süreci Görselleri



Şekil 4.3.12.1. Yıldırım hasarı tespiti



Şekil 4.3.12.2. Yüzey taşlama ve kat açma işlemi

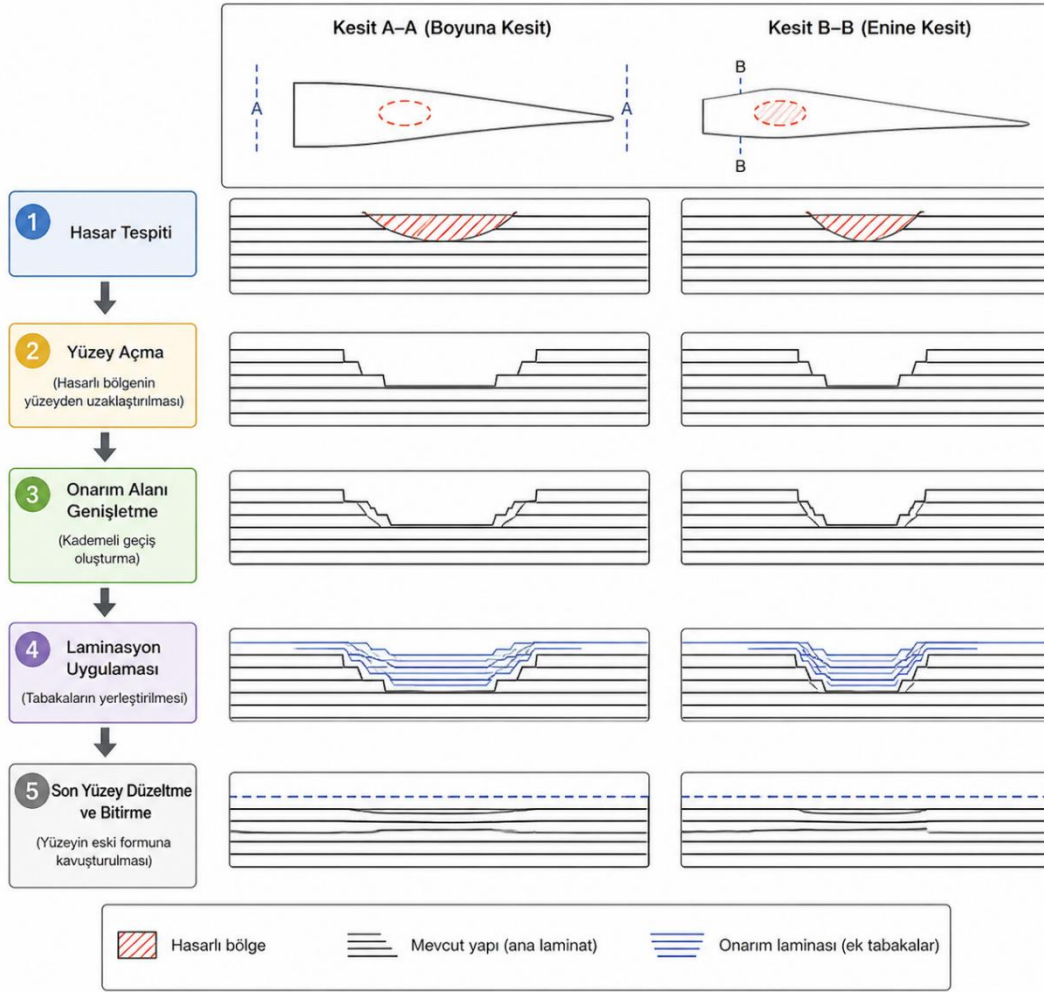


Şekil 4.3.12.3. Laminasyon işlemi ve ısı battaniyesi ile kürleme



Şekil 4.3.12.4. Macun ve boya işlemi

4.4 Yüzey Cam Elyaf Onarımı (Glass Laminate Repair)



Şekil 4.4.1. Onarım prosedürü – Genel bakış (şematik; oluklu laminat onarımı gösterilmiştir.)

Prensip olarak hasarlı laminatın onarım prosedürü dört temel unsurdan oluşur: İnceleme, iş hazırlığı, laminasyon ve son iş adımları.

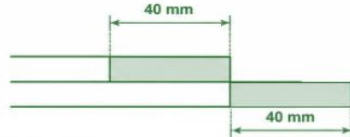
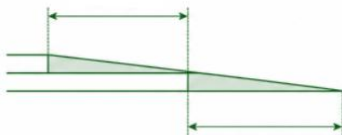
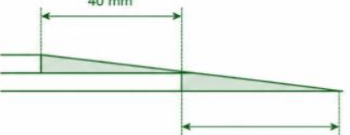
Onarım işinin kapsamı, inceleme sırasındaki hasarın boyutuna göre tahmin edilir. İş hazırlığı sırasında hasar ortaya çıkarılır ve uygulanabilir pah oranları dikkate alınarak onarım alanı sonraki laminasyon çalışmalarına hazırlanır. Ayrıca, ilk olarak en büyük laminat katmanının yerleştirilmesi gerektiğini de dikkate alın. Ayrıca laminasyon işlemine göre gerekli tamir malzemesinin ayarlanması gerekmektedir. Onarımın sonlandırılması için yüzeyin taşlanması ve daha sonra eski haline getirilmesi gerekmektedir.

Fiber yönü		Triax ±45°/0° ±45°/90°	Biax ±45° 0°/90°		Unidirectional UD 0°	
Birim alan kütlesi [g/m ²]		tümü	≤1010	1590	≤1200	2320
Yönlendirme genişliği	Boyuna (uzunlamasına) bıçak yönü 	70 mm 2.76 in	45 mm 1.77 in	70 mm 2.76 in	105 mm 4.13 in	205 mm 8.07 in
	Enine (kesitsel) bıçak yönü 	45 mm 1.77 in	45 mm 1.77 in	70 mm 2.76 in	0 mm 0 in	0 mm 0 in

Şekil 4.4.2. Kumaşlara ve yöne göre katman başına pah genişliği (A marka kanatlara göre)

Fiber yönü		Triax ±45°/0° ±45°/90° tümü	Biax ±45° 0°/90°		Unidirectional UD 0°	
Birim alan kütlesi [g/m²]			400	≤1200	600	800
Pah genişliği	Boyuna (uzunlamasına) bıçak yönü 	120 mm	40 mm	60 mm	90 mm	90 mm
	Enine (kesitsel) bıçak yönü 	60 mm	40 mm	60 mm	0 mm	0 mm

Şekil 4.4.3 Kumaşlara ve yöne göre katman başına pah genişliği (B marka kanatlara göre)

	Prensip gösterimi	Biax örnek uygulama
1. Kademe		
2. Kademe		

Şekil 4.4.4. Kademeli pah kırma (Biax X g/m²)

4.5 Yıldırım Koruma Sistemi Hasarları (LPS Damage Repair)

LPS, "Lightning Protection System" yani "Yıldırım Koruma Sistemi"nin kısaltmasıdır. Rüzgar türbini kanatlarında kullanılan LPS, türbinlerin yıldırım çarpmalarına karşı korunmasını sağlamak için tasarlanmış sistemlerdir.

4.5.1 LPS Sisteminin Amaçları

Rüzgar türbinleri, sahip oldukları yükseklik nedeniyle yıldırımların sıkça hedef aldığı yapılar arasında yer almaktadır. Bu nedenle türbinlerde kullanılan yıldırım koruma sistemleri (LPS), yıldırım etkilerine karşı koruma sağlamak amacıyla kritik bir rol üstlenmektedir. Yıldırımın oluşturduğu yüksek enerji, türbinin hem yapısal bileşenlerine hem de elektrik sistemlerine zarar verebilmekte olup, LPS sistemleri bu enerjiyi güvenli bir şekilde yönlendirerek olası hasarların önlenmesine katkı sağlamaktadır.

4.5.2 LPS Bileşenleri

Yıldırım koruma sistemleri (LPS), rüzgar türbini kanatlarını yıldırım etkilerine karşı korumak amacıyla farklı bileşenlerden oluşan bütüncül bir yapı sunmaktadır. Bu sistemin temel elemanlarından biri olan yıldırım çarpma plakaları (reseptörler), yıldırımın ilk temas ettiği noktalar olup genellikle kanat uçlarında (tip) ve belirli kritik bölgelerde konumlandırılmaktadır. Yıldırım akımının güvenli bir şekilde iletilmesi için kullanılan metal parçalar, iletken yapı malzemeleri sayesinde akımın kanat içerisinden kontrollü bir şekilde taşınmasına katkı sağlamaktadır. Bu süreçte iletkenler, yıldırımın çarpma noktasından başlayarak belirlenen güvenli boşaltma noktalarına, yani topraklama sistemine kadar iletimini gerçekleştirir ve bu amaçla genellikle bakır veya alüminyum malzemeler tercih edilmektedir. Topraklama sistemi ise yıldırım enerjisinin güvenli bir şekilde yeryüzüne aktarılmasını sağlayan elektrotlar ve iletken ağlardan oluşarak sistemin en kritik bileşenlerinden biri olarak görev yapmaktadır. Bunun yanı sıra bazı türbinlerde kullanılan özel koruyucu kaplamalar, malzemenin elektriksel etkilenimini azaltarak yıldırımın oluşturabileceği hasar riskini düşürmeye yardımcı olmaktadır.

4.5.3 LPS'nin Avantajları

Yıldırım koruma sistemleri, rüzgar türbinlerinin hem yapısal hem de operasyonel güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler sayesinde türbin kanatları yıldırım kaynaklı hasarlara karşı korunarak yapısal bütünlükleri muhafaza

edilmektedir. Aynı zamanda elektronik sistemler ve sensörler gibi kritik bileşenlerin zarar görmesi engellenerek türbinin işlevselliği ve operasyonel sürekliliği artırılmaktadır. Yıldırım hasarlarının azaltılması, bakım ve onarım ihtiyacını da düşürerek işletme maliyetlerinin azalmasına katkı sağlamakta ve türbinlerin hizmet ömrünün uzamasına yardımcı olmaktadır.

4.5.4 Uygulama ve Bakım

Yıldırım koruma sistemlerinin (LPS) etkin ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için düzenli aralıklarla muayene edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda sistem bileşenlerinin performansı kontrol edilerek olası arızalar veya zayıflıklar erken aşamada tespit edilebilir. Ayrıca iletkenler ve topraklama sistemleri zamanla aşınma, korozyon veya mekanik hasarlara maruz kalabileceğinden, bu bileşenlerin periyodik bakım ve gerekli durumlarda onarım işlemlerinin gerçekleştirilmesi sistemin sürekliliği ve güvenilirliği açısından kritik rol oynamaktadır.

4.5.5 LPS Onarım Süreci Hasarın Denetlenmesi

Yıldırım koruma sisteminin (LPS) etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla öncelikle sistem bileşenleri detaylı bir görsel muayeneden geçirilmelidir. Bu kapsamda özellikle yıldırım çarpma noktaları, iletkenler ve topraklama sistemi incelenerek yanık izleri, erime, gevşeme veya deformasyon gibi hasar belirtileri tespit edilmeye çalışılır. Bunun yanı sıra sistemin elektriksel bütünlüğünü doğrulamak amacıyla elektrik testleri gerçekleştirilir; iletkenlerin ve topraklama sisteminin iletkenliği ölçülerek bağlantıların sağlıklı ve süreklilik gösterir durumda olduğu kontrol edilir.

4.5.6 Planlama

Yıldırım koruma sisteminde yapılacak onarım çalışmalarına başlamadan önce gerekli araç ve gereçlerin eksiksiz bir şekilde hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda iletken kablolar, topraklama elektrotları ve kalite kontrol ekipmanları gibi ihtiyaç duyulan tüm malzemeler temin edilmelidir. Ardından hasarın türü ve kapsamı değerlendirilerek uygun onarım yöntemi belirlenmelidir. Hasarın yüzeysel veya yapısal olmasına bağlı olarak uygulanacak işlemler değişiklik gösterebilmekte olup, bu süreçte yüzeysel hasar onarımları, iletken kablo değişimi veya topraklama sisteminin yenilenmesi gibi farklı müdahale yöntemleri tercih edilebilmektedir.

4.5.7 Onarım İşlemleri

Yıldırım koruma sisteminde meydana gelen hasarların giderilmesi sürecinde, öncelikle yıldırım çarpma noktalarının durumu değerlendirilerek hasar görmüş reseptörlerin değiştirilmesi gerekmektedir. Gerekli durumlarda bu bölgeler uygun metal iletken malzemeler ile yenilenmeli ve yeni bileşenler mevcut sistemle uyumlu olacak şekilde monte edilmelidir. Bunun yanı sıra hasar görmüş iletkenler değiştirilerek yeni iletkenlerin bağlantıları sağlam ve güvenli bir şekilde yapılmalı, bağlantı noktaları koruyucu kaplamalar ile izole edilerek su sızdırmazlığı sağlanmalıdır. Ayrıca topraklama sisteminde meydana gelen hasarlar da giderilmeli; hasarlı elektrotlar yenilenmeli ve tüm topraklama bağlantıları kontrol edilmelidir. Kurulacak yeni topraklama elemanları, türbinin bulunduğu bölgenin toprak yapısı dikkate alınarak uygun derinlikte ve standartlara uygun şekilde yerleştirilmelidir.

4.5.8 Kaboların ve Bağlantıların Kontrolü

Tüm kablo bağlantılarının sağlamlığı kontrol edilmelidir. Korozyona uğramış veya hasarlı bağlantılar değiştirilmelidir. Bağlantı noktaları, su ve hava koşullarına karşı koruma altında olmalı.

4.5.9 Son Kontrol

Onarım işlemlerinin tamamlanmasının ardından yıldırım koruma sisteminin genel durumu kapsamlı bir şekilde gözden geçirilmelidir. Bu aşamada yıldırım çarpma noktaları, iletkenler ve topraklama sistemi yeniden incelenerek tüm bileşenlerin doğru şekilde çalıştığından emin olunmalıdır. Ayrıca sistemin işlevselliğini doğrulamak amacıyla elektriksel testler gerçekleştirilmelidir. Bu kapsamda yapılan iletkenlik ve süreklilik testleri sayesinde sistemde oluşabilecek olası hatalar veya zayıf bağlantılar tespit edilerek gerekli düzeltmeler yapılabilir.

4.5.10 Önleyici Bakım

Yıldırım koruma sisteminin etkinliğinin sürdürülebilmesi için düzenli aralıklarla muayene ve bakım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda sistem bileşenleri periyodik olarak kontrol edilerek olası arızalar ve zayıflıklar erken aşamada tespit edilebilir.

4.5.11 LPS Onarım Süreci Görselleri



Şekil 4.5.11.1. Yıldırım sonrası hasar görmüş LPS sistemine ait tip reseptör hasarı



Şekil 4.5.11.2. Onarılan LPS kablosunun bağlantısı



Şekil 4.5.11.3. Macun uygulaması ve boya işlemi

4.6 Vortex Hasarları (Vortex Generators Damage)

Rüzgar kanatlarındaki vortexler, rüzgar akışında meydana gelen döngüsel akım yapılarıdır. Bu yapılar, rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik performansını etkileyebilir. Vortexlerin oluşumu, rüzgar kanatlarının tasarımından ve çalışma koşullarından kaynaklanır. Rüzgar kanatlarında iki ana tür vortex bulunabilir:

- a) Plastik Vortexler
- b) Metal Vortexler

4.6.1 Vortexlerin Özellikleri ve Etkileri

Rüzgar türbini kanatlarında oluşan vortex yapıları, aerodinamik performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu vortexler, kanatların kaldırma kuvvetini etkileyebilmekte olup özellikle emme yüzeyi (SS – suction side) üzerinde oluşan akış yapıları, hava akışının kanat yüzeyine daha iyi tutunmasına yardımcı olarak kanadın verimli çalışmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte vortex oluşumları her zaman olumlu sonuçlar doğurmayabilir; artan türbülans seviyesi, zamanla yüzey aşınmasına ve gürültü oluşumuna neden olabilmektedir. Ayrıca aerodinamik açıdan uygun şekilde kontrol edilmeyen vortex yapıları, akış ayrılmasına ve hava akışının yüzeyden kopmasına yol açarak performans kayıplarına neden olabilir. Bu tür durumlar uzun vadede kanat yüzeyinde deformasyonlara ve çevresel etkilerle birlikte korozyon benzeri hasarların ortaya çıkmasına zemin hazırlayabilmektedir.

Rüzgar kanatlarındaki vortexler, hem olumlu hem de olumsuz etkilere yol açabilecek önemli aerodinamik yapılar olarak göze çarpar. Bu nedenle, türbin tasarımı ve işletme süreçlerinde vortexlerin dikkate alınması, rüzgar türbinlerinin verimliliğini artırmak ve sorunları minimize etmek için hayati öneme sahiptir.



Şekil 4.6.1.1. Vortexler

4.6.2 Onarım Süreci



Şekil 4.6.2.1. Vortex onarım adımları

5. GERÇEK SAHA VERİLERİNE DAYALI VAKA ANALİZİ

5.1 Vaka Tanımı

Bu vaka analizi, Türkiye’de kara tipi (onshore) bir rüzgar enerji santralinde bulunan yaklaşık 3 MW gücündeki bir rüzgar türbinine ait kanatta meydana gelen hasar ve onarım sürecini kapsamaktadır. Türbine ait kanatların her biri yaklaşık 65,5 m uzunluğunda olup, cam elyaf takviyeli kompozit yapıdan imal edilmiştir.

İncelenen hasar, türbinin C kanadında, kanat kökünden itibaren yaklaşık 36 m mesafede, yani kanadın orta bölgesine yakın bir konumda tespit edilmiştir. Hasar türü, literatürde ve saha uygulamalarında yüksek riskli olarak sınıflandırılan arka kenar çatlağı (Trailing Edge Crack – TE Crack) olup, yaklaşık 40 cm uzunluğunda diyagonal bir çatlak şeklinde gelişmiştir. Ayrıca, vakanın saha incelemesi sırasında elde edilen görüntülerden biri üzerinde klasik görüntü işleme yöntemleri kullanılarak arka kenar çatlağının tespiti gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar vaka analizini destekleyici ek bir bölüm olarak sunulmuştur.

Bu tür hasarlar, aerodinamik dengesizliklere, ilerleyici yapısal bozulmalara ve nihai olarak kanat kopmasına kadar varabilecek ciddi riskler barındırdığından, vakada hızlı ve kontrollü bir müdahale süreci izlenmiştir.

5.2 Hasarın Tespiti ve İlk Değerlendirme

Hasar, müşteri tarafından belirli periyotlarla gerçekleştirilen drone tabanlı görsel inspeksiyonlar sırasında ilk kez tespit edilmiştir. Tespit sonrasında, müşteri talebi doğrultusunda sahaya intikal eden servis ekipleri tarafından askılı platform kullanılarak detaylı saha inspeksiyonu gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada kanat yüzeyinde bulunan boya tabakası kaldırılarak, çatlağın kompozit laminasyon katmanları ve çekirdek malzemeye olan etkisi gözlemlenmiş ve detaylı fotoğraflamalar yapılmıştır. Yapılan incelemelerde, çatlağın yalnızca yüzey laminasyonlarıyla sınırlı olmadığı, çekirdek malzemeye kadar ilerlediği belirlenmiştir. Elde edilen görsel ve teknik veriler müşteriyle paylaşılmış ve hasarın yüksek kritiklik seviyesinde olduğu değerlendirilmiştir.

TE Crack tipi hasarlar, OEM ve sektör standartlarında yüksek kategorili hasarlar arasında yer almakta olup, bu tür durumlarda türbinin gecikmeden durdurulması ve onarım sürecinin başlatılması önerilmektedir. Bu vaka kapsamında da hasarın tespit edilmesini takiben türbin müşteri tarafından durdurulmuş ve onarım süreci planlanmıştır.

5.3 Onarım Kararı ve Mühendislik Değerlendirmesi

Hasarın lokal bir bölgede sınırlı olması, ana taşıyıcı spar yapısına ilerlememesi ve OEM onarım prosedürlerinin bu tip hasarlar için tanımlı olması nedeniyle kanat değişimi yerine onarım seçeneği tercih edilmiştir.

Kanat değişimi; yüksek parça maliyeti, vinç ve lojistik gereksinimleri, uzun tedarik süresi ve yüksek üretim kaybı gibi nedenlerle bu vaka özelinde ekonomik ve operasyonel açıdan uygun bulunmamıştır. Yaklaşık 40 cm uzunluğundaki arka kenar çatlağının, mevcut kompozit yapı sökülerek ve aynı özelliklerde malzemelerle restore edilmesi mümkün görülmüştür.

Bu doğrultuda onarım süreci, OEM onarım talimatları ve saha tecrübesine dayalı standart prosedürler esas alınarak planlanmıştır.

5.4 Onarım Süreci ve Kullanılan Malzemeler

Onarım süreci toplamda 7 gün sürmüş ve aşağıdaki adımları içermiştir:

5.4.1 Hasarlı Bölgenin Hazırlanması:

Çatlağın bulunduğu bölgede hasarlı laminasyon katmanları kontrollü şekilde kaldırılmış, çatlağın ilerlediği çekirdek malzeme temizlenmiştir.

5.4.2 Yapısal Güçlendirme:

Çatlak bölgesine mukavemeti artırmak amacıyla sert kıvamlı reçine uygulanmış, ardından çekirdek malzeme (balsa) ve cam elyaf takviyeleri OEM talimatlarına uygun şekilde yerleştirilmiştir.

5.4.3 Laminasyon, Vakum ve Kürleme:

İç kat laminasyonları sonrası vakum ve kürleme uygulaması yapılmış, çekirdek malzeme uygulamasında vakum ve ısıtıcı battaniye ile kürleme gerçekleştirilmiş, dış kat laminasyonlarında da aynı vakum ve kürleme prosedürleri tekrarlanmıştır.

5.4.4 Retrofit Güçlendirmesi:

Çatlağın tekrar oluşmasını önlemek amacıyla, “retrofit” olarak tanımlanan ilave UD 1200 ve Biax 1010 kumaş katmanları ile bölge ekstra olarak desteklenmiştir.

Onarım sırasında kullanılan kimyasal ve kompozit malzemeler miktar bazında aşağıda özetlenmiştir;

Reçine + sertleştirici: Toplam ~4,5 kg

Krema (sert reçine) + sertleştirici: Toplam ~1,5 kg

Yapısal macun + sertleştirici: Toplam ~5 kg

Boya, sertleştirici ve tiner: Toplam ~1 kg

5.5 Onarım Sonrası Sonuçlar ve Değerlendirme

Onarım tamamlandıktan sonra, saha ekipleri ve müşteri tarafından nihai görsel inspeksiyon gerçekleştirilmiş, hazırlanan detaylı onarım raporu OEM firmaya iletilmiştir. OEM tarafından yapılan değerlendirme sonucunda onarım prosedürünün uygunluğu onaylanmış ve müşteri kabulü alınmıştır.

Onarımın ardından türbin tekrar devreye alınmış ve tam kapasiteyle çalışmaya devam etmiştir. Onarım sonrası izleme sürecinde, aynı bölgede herhangi bir tekrar hasar gözlemlenmemiştir. Retrofit uygulamaları sayesinde çatlak oluşumuna yatkın bölge yapısal olarak güçlendirilmiş, aynı zamanda kaldırılan ve yeniden uygulanan malzemelerin eşdeğer özellikte olması nedeniyle kanat balansında herhangi bir olumsuzluk oluşmamıştır.

Bu vaka, doğru hasar sınıflandırması, OEM prosedürlerine uygun onarım ve sahaya özgü mühendislik çözümleri ile yüksek kritiklik seviyesindeki arka kenar çatlak hasarlarının güvenli ve ekonomik şekilde onarılabileceğini göstermektedir.

6. EKONOMİK DEĞERLENDİRME

6.1 Varsayımlar ve Kabul Edilen Parametreler

- Türbin nominal gücü: 3 MW
- Kapasite faktörü: %35
- Elektrik birim satış fiyatı: 0,10 USD/kWh
- Yıllık toplam saat: 8760 saat

6.2 Türbinin Enerji Üretimi ve Günlük Gelir Kaybı

Yıllık enerji üretimi:

$$E_{yillik} = 3 \times 8760 \times 0,35 = 9.198 \text{ MWh/yıl}$$

Günlük enerji üretimi:

$$E_{günlük} = \frac{9.198}{365} \approx 25,2 \text{ MWh/gün}$$

Günlük gelir kaybı:

$$K_{günlük} = 25.200 \times 0,10 = 2.520 \text{ USD/gün}$$

6.3 Onarım Senaryosu

- Türbin duruş süresi: 7 gün
- Onarım hizmet bedeli (müşteriye yansıtılan): 17.000 USD

• Üretim Kaybı:

$$K_{üretim,onarım} = 7 \times 2.520 = 17.640 \text{ USD}$$

• Toplam Onarım Maliyeti:

$$K_{toplam,onarım} = 17.640 + 17.000 = 34.640 \text{ USD}$$

6.4 Kanat Değişimi Senaryosu (Varsayımsal)

- Türbin duruş süresi: en az 45 gün

- Üretim Kaybı:

$$K_{\text{üretim,değişim}} = 45 \times 2.520 = 113.400 \text{ USD}$$

Bu değere kanat satın alma bedeli, vinç mobilizasyonu, lojistik, montaj/demontaj ve saha operasyon maliyetleri dahil değildir. Literatürde bu maliyetlerin tek bir kanat için 150.000–300.000 USD seviyelerine ulaşabildiği bildirilmektedir.

6.5 Toplam Ekonomik Etki Karşılaştırması

Senaryo	Duruş Süresi (gün)	Üretim Kaybı (USD)	Operasyon / Servis (USD)	Toplam Kayıp (USD)
Onarım	7	17.640	17.000	34.640
Kanat Değişimi	≥45	≥113.400	≥150.000*	≥263.400

* Tahmini literatür ve saha verilerine dayalı minimum değer.

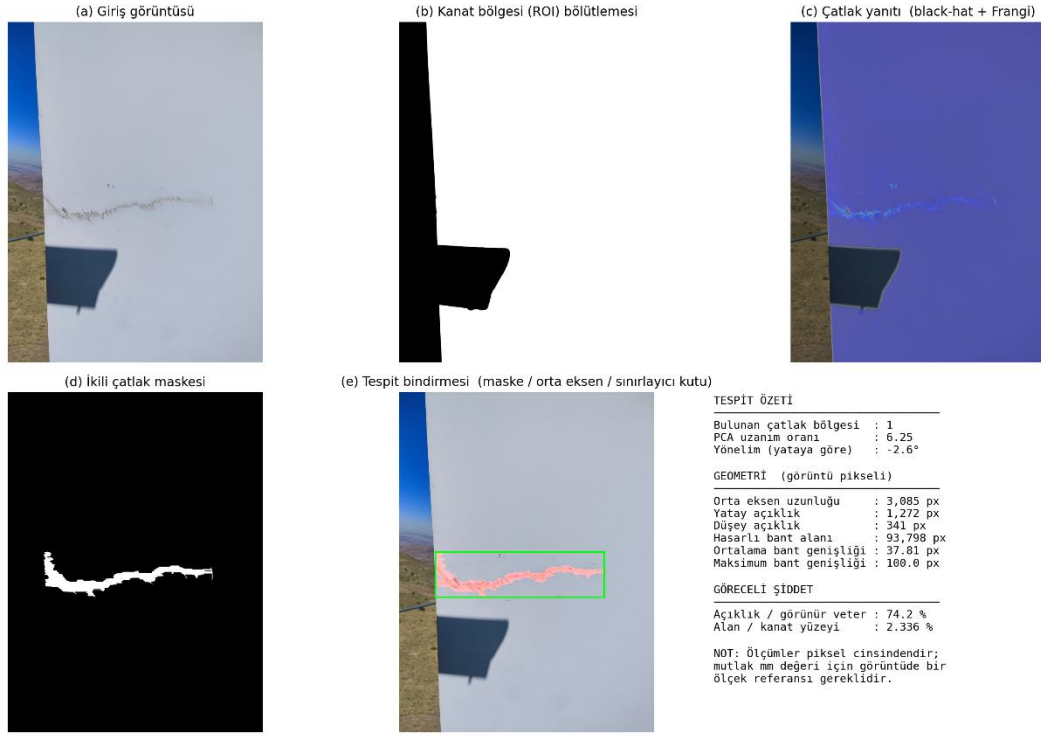
6.6 Türbin Kanadı Üzerinde Arka Kenar Çatlağının Görüntü İşlemeyle Tespiti

Bu çalışmada, bir rüzgâr türbini kanadının sahada çekilmiş tek bir muayene fotoğrafı üzerinde, eğitim verisi gerektirmeyen klasik görüntü işleme tabanlı bir yüzey çatlağı tespit yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen işlem hattında öncelikle kanat yüzeyi, parlaklık ve doygunluk eşiklemesi (HSV) ile arka plandan (gökyüzü, arazi, korkuluk ve gölge) ayrıştırılarak ilgi bölgesi (ROI) belirlenmiş, ardından CLAHE yöntemiyle aydınlatma düzeltmesi uygulanmıştır. Çatlağa ait koyu ve eğrisel yapılar, black-hat morfolojik dönüşümü ile Frangi sırt (ridge) süzgecinin birleştirilmiş yanıtı kullanılarak belirginleştirilmiş; kontrastı boyunca değişen çatlağın sürekliliği histerezis eşikleme ile korunmuştur. Elde edilen aday bölgeler, temel bileşen analizine (PCA) dayalı uzanım oranı ve doluluk ölçütleriyle sınıflandırılarak çatlak; gölge ve yüzey işaretlemeleri gibi yanıltıcı yapılardan ayırt edilmiştir. Geliştirilen yöntem, kanat yüzeyinde görünür veterin yaklaşık %74'ünü kateden ve yataya göre $-2,6^\circ$ eğime sahip tek bir

enine çatlağı başarıyla tespit etmiş; çatlağın orta eksen uzunluğu, açıklığı, yönelimi ve hasarlı bant genişliği gibi geometrik büyüklükleri piksel cinsinden elde edilmiştir.



Şekil 6.6.1. Arka kenar çatlağının görüntü işleme yöntemleriyle tespiti



Şekil 6.6.2. Görüntü işleme algoritmalarıyla arka kenar çatlağının detaylı analiz sonuçları

6.7 Vaka Analizi Değerlendirme ve Sonuç

Yapılan hesaplamalar, vaka kapsamında uygulanan onarım yönteminin yalnızca teknik açıdan değil, ekonomik açıdan da açık ara üstün olduğunu göstermektedir. Onarım senaryosunda toplam maliyet, kanat değişimi senaryosuna kıyasla yaklaşık 7–8 kat daha düşük seviyede kalmaktadır.

Bu sonuçlar, rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen lokal ve onarıma uygun hasarlarda, doğru hasar sınıflandırması ve OEM talimatlarına uygun onarım yaklaşımlarının, santral işletmecileri için önemli ölçüde maliyet avantajı sağladığını ortaya koymaktadır.

Bunun yanı sıra, vaka kapsamında değerlendirilen arka kenar çatlağına ait saha görüntüsü üzerinde gerçekleştirilen klasik görüntü işleme tabanlı analiz, çatlağın tek bir görüntü üzerinden başarıyla tespit edilebildiğini ve temel geometrik özelliklerinin belirlenebildiğini göstermiştir. Bu analiz, vaka bulgularını destekleyici nitelikte olup, görüntü işleme yöntemlerinin kanat hasarlarının dokümantasyonu ve ön değerlendirilmesinde tamamlayıcı bir araç olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen hasar mekanizmaları, hasar tespit yöntemleri ve onarım süreçleri bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Rüzgar türbini kanatlarının, değişken çevresel koşullar ve döngüsel yüklemeler altında çalışan kritik yapısal bileşenler olduğu; bu nedenle hem performans hem de güvenlik açısından hasar yönetiminin büyük önem taşıdığı ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, kanat hasarlarının büyük ölçüde çevresel etkiler (buzlanma, yağmur erozyonu, yıldırım) ve yorulma yükleri sonucu oluştuğunu göstermektedir. Bu hasarlar arasında özellikle arka kenar çatlakları, ön kenar erozyonu ve yıldırım kaynaklı hasarlar, türbin performansı üzerinde doğrudan ve belirgin etkiye sahip kritik hasar türleri olarak öne çıkmaktadır. Bu tür hasarların ilerlemesi, yalnızca enerji üretiminde verim kaybına değil, aynı zamanda yapısal bütünlüğün zayıflamasına ve ciddi güvenlik risklerine yol açabilmektedir. Hasar tespit yöntemleri açısından değerlendirildiğinde, sensör tabanlı sistemler ile tahribatsız muayene tekniklerinin birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğu belirlenmiştir. Gerinimölçerler, fiber optik sensörler ve ivmeölçerler gibi yöntemler sürekli izleme imkânı sunarken; ultrasonik test, akustik emisyon ve termal görüntüleme gibi teknikler hasarın detaylı karakterizasyonunda daha etkin sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, tek bir yöntemin tüm hasar türleri için yeterli olmadığı, bu nedenle çok sensörlü ve entegre yaklaşımların daha güvenilir sonuçlar sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında detaylı olarak incelenen arka kenar çatlak hasarı (TE crack), hem yaygınlığı hem de ilerleme potansiyeli nedeniyle kritik bir hasar türü olarak değerlendirilmiştir. Bu hasara yönelik onarım sürecinin; hasarın doğru değerlendirilmesi, uygun malzeme seçimi, laminasyon tekniklerinin doğru uygulanması ve kontrollü kürleme süreçlerinin yürütülmesi ile doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir. Saha uygulamalarına dayalı analizler, uygun şekilde gerçekleştirilen onarımların kanat performansını büyük ölçüde geri kazandırabildiğini ortaya koymaktadır. Gerçek saha verilerine dayalı vaka analizi, hasar tespiti ile mühendislik değerlendirmesi ve onarım sürecinin entegre bir şekilde ele alınmasının önemini açıkça göstermiştir. Vaka analizi kapsamında ayrıca, arka kenar çatlağına ait saha görüntüsü üzerinde klasik görüntü işleme yöntemleri kullanılarak destekleyici bir analiz gerçekleştirilmiştir. Tek bir saha görüntüsü üzerinden gerçekleştirilen bu analizde, çatlak başarıyla tespit edilmiş ve çatlağa ilişkin temel geometrik özellikler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, klasik görüntü işleme tekniklerinin görsel muayene süreçlerini destekleyici ve hasarın sayısal olarak dokümanite edilmesine katkı sağlayabilecek bir araç olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Özellikle hasarın erken aşamada tespit edilmesi durumunda, daha düşük maliyetli ve daha kısa süreli onarım müdahaleleri ile sistem

performansının korunabildiği belirlenmiştir. Ekonomik değerlendirme sonuçları, kanat onarımının çoğu durumda kanat değişimine kıyasla daha maliyet etkin bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Türbinin devre dışı kalma süresinin (downtime) maliyet üzerindeki belirleyici etkisi dikkate alındığında, hızlı ve doğru planlanmış onarım stratejilerinin işletme maliyetlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu durum, hasar tespit ve bakım süreçlerinin optimize edilmesinin yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da kritik olduğunu göstermektedir. Tüm bu bulgular ışığında, rüzgar türbini kanatlarında etkin bir hasar yönetimi için erken tespit, doğru teşhis ve uygun onarım süreçlerinin entegre bir şekilde yürütülmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bakım stratejilerinin reaktif yaklaşımdan proaktif ve kestirimci bakım anlayışına doğru evrilmesi, türbin ömrünün uzatılması ve işletme maliyetlerinin azaltılması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu doğrultuda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Çok sensörlü ve yapay zeka destekli yapısal sağlık izleme sistemlerinin geliştirilmesi ve saha uygulamalarının artırılması, erken hasar tespitinde önemli katkılar sağlayacaktır.
- Hasar tespit yöntemlerinin saha koşullarına uygunluğu, maliyet etkinliği ve uygulanabilirliği üzerine daha fazla deneysel çalışma yapılmalıdır.
- Kompozit kanat onarım süreçlerinin standartlaştırılması ve havacılık sektöründeki ileri onarım tekniklerinin rüzgar enerjisi sektörüne uyarlanması önerilmektedir.
- Farklı hasar türleri için optimize edilmiş bakım ve onarım stratejilerinin geliştirilmesi, türbin performansının sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir.
- Gerçek saha verilerine dayalı uzun dönemli performans analizleri ile onarım sonrası davranışın daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Görsel muayene sırasında elde edilen saha görüntülerinin klasik görüntü işleme ve bilgisayarlı görü yöntemleri ile desteklenmesine yönelik çalışmaların artırılması, hasarların daha objektif şekilde belgelenmesine ve bakım süreçlerinin desteklenmesine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency. Global Wind Report 2023. Paris, 2023.
- [2] REN21. Renewables 2022 Global Status Report. Paris, 2022.
- [3] Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2022. Brussels, 2022.
- [4] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye Elektrik Enerjisi İstatistikleri. Ankara, 2023.
- [5] Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2023. Brussels, 2023.
- [6] Shohag, M. A. S., Islam, M. M., Sultana, N. A review of damage detection methods for wind turbine blades. *Renewable Energy*. 2019, 138, 620–635.
- [7] Du, Y., Deng, Z., Hou, R., He, C. Structural health monitoring of wind turbine blades: Challenges and damage detection techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020, 141, 106445.
- [8] Ahmed, R., Mohamed, A., Rehman, S. Review of blade damage detection techniques for wind turbines. *Energies*. 2021, 14(18), 5974.
- [9] Katsaprakakis, D. A., Christakis, D. G., Papageorgiou, C. Wind turbine blade failures: Causes and prevention. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021, 211, 104537.
- [10] Li, D., Wang, H., Zhang, X. Damage detection methods for wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, 52, 1470–1483.
- [11] Katnam, K. B., Da Silva, L. F. M., Young, T. M. Bonded repair of composite structures: A review. *Progress in Aerospace Sciences*. 2014, 61, 26–42.
- [12] Mishnaevsky, L. Repair methods for wind turbine blades: A review. *Renewable Energy*. 2019, 140, 828–839.
- [13] Li, C., Li, X., Chen, Y. Optical fiber sensors for wind turbine blade monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004, 112(2–3), 279–284.
- [14] Zhang, C., Tavner, P., Feng, Y. Condition monitoring and fault detection of wind turbines. *Energy Conversion and Management*. 2020, 214, 112792.
- [15] Ciang, C. C., Lee, J. R., Bang, H. J. Structural health monitoring for wind turbine systems: A review. *Measurement Science and Technology*. 2008, 19(12), 122001.
- [16] Sørensen, B. F., Jørgensen, E., Debel, C. P., Jensen, F. M., Jensen, H. M., Jacobsen, T. K., Halling, K. Improved design of large wind turbine blade of fibre composites based on studies of scale effects (Phase 1). Risø National Laboratory, 2002.

- [17] Rumsey, M. A., Paquette, J. A. Structural test results for the TX-100 wind turbine blade. Sandia National Laboratories Report, SAND2008-4809, 2008.
- [18] Shokrieh, M. M., Rafiee, R. Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade. *Composite Structures*. 2006, 74(3), 332–342.
- [19] Sundaresan, M. J., Schulz, M. J., Ghoshal, A. Structural health monitoring of composite materials using frequency response methods. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2002, 21(3), 111–124.
- [20] International Electrotechnical Commission. IEC 61400-23: Wind turbine generator systems - Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades. IEC, 1999.
- [21] Kong, F., Qiao, H., Xu, Y. Static and fatigue tests on wind turbine blades. *Wind Engineering*. 2006, 30(3), 197–214.
- [22] Sutherland, H. J., Veers, P. S., Ashwill, T. D., Bir, G. S. Strain gauge data acquisition for full-scale fatigue testing of wind turbine blades. Sandia National Laboratories Report, SAND94-2445, 1994.
- [23] Jørgensen, B. N., Johansen, T. T., Branner, K. Strain measurement and fatigue testing on wind turbine blades. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004, 92(7), 659–672.
- [24] Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., Inman, D. J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*. 2011, 43(6), 451–463.
- [25] Clough, R. W., Penzien, J. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 1995.
- [26] Siringoringo, D. C. K., Fujino, Y. Remote vibration measurement and damage detection of a rotating wind turbine blade using scanning laser Doppler vibrometer. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006, 20(7), 1650–1665.
- [27] Ghoshal, A., Ananthasuresh, G. K., Keoleian, G. A. Damage detection in fiberglass wind turbine blades using laser vibrometry. *Engineering Structures*. 2000, 22(5), 506–515.
- [28] Li, X., Wang, J., Zhang, Y., Liu, H. Damage detection and localization of wind turbine blades based on piezoelectric sensors and artificial neural networks. *Energies*. 2021, 14(18), 5974.
- [29] Gebert, G. Wind turbine blade failure due to manufacturing defect. *Windpower Engineering & Development*. 2012.
- [30] Connellan, G. Wind turbine blade failure in Kirkheaton. BBC News. 2008.
- [31] Martin, T., Trent, V. Wind turbine blade failure incident in Ohio. *Renewable Energy World*. 2012.