

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI YÖNTEMLERLE RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT
HASARLARININ BELİRLENMESİ VE HASAR ALANININ HESAPLANMASI**

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUTAY AKBULUT

TEMMUZ 2025

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI YÖNTEMLERLE RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT
HASARLARININ BELİRLENMESİ VE HASAR ALANININ HESAPLANMASI**

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kutay AKBULUT

DANIŞMAN: Doç. Dr. Tuğba Özge ONUR

ZONGULDAK
Temmuz 2025

KABUL:

Kutay AKBULUT tarafından hazırlanan “Görüntü İşleme Tabanlı Yöntemlerle Rüzgar Türbini Kanat Hasarlarının Belirlenmesi ve Hasar Alanının Hesaplanması” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 18/07/2025

Danışman: Doç. Dr. Tuğba Özge ONUR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Ali NARİN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Kenan ÖZEL

Ankara Üniversitesi, Gama Meslek Yüksek Okulu, Elektrik ve Enerji Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

..../..../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Kutay AKBULUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖRÜNTÜ İŞLEME TABANLI YÖNTEMLERLE RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT HASARLARININ BELİRLENMESİ VE HASAR ALANININ HESAPLANMASI

Kutay AKBULUT

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Tuğba Özge ONUR

Temmuz 2025, 85 sayfa

Rüzgar türbinleri, bulundukları ortamlar nedeniyle zorlu çevresel koşullara ve dinamik yüklere maruz kaldıklarından dolayı zamanla çeşitli yapısal hasarlara uğramaktadır. Özellikle türbin kanatlarında meydana gelen hasarlar, aerodinamik performansı düşürerek enerji verimliliğini olumsuz etkilemekte ve uzun vadede daha büyük yapısal problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle, türbin kanatlarındaki hasarların etkin ve hızlı bir şekilde tespit edilmesi oldukça önemlidir. Günümüzde türbin hasarları genel olarak fiziksel müdahalenin yetkili personel tarafından gerçekleştirilmesiyle veya drone gibi yüksek çözünürlüklü kameralara sahip cihazlar yardımıyla tespit edilmektedir. Ancak, rüzgar türbinlerinin genellikle erişimi zor bölgelerde olması, özellikle de açık deniz (offshore) alanlarında konumlandırılması, bu süreçleri hem zaman alıcı ve hem de daha maliyetli bir hale getirmektedir.

Yapılan tez çalışmasında, rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespiti ve onarımının daha hızlı, güvenli ve düşük maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla drone tabanlı bir görüntüleme yöntemi önerilmektedir.

ÖZET (devam ediyor)

Bu kapsamda, Rass Wind Enerji'den temin edilen hasarlı kanat görüntüleri kullanılarak, görüntü işleme teknikleriyle hasarlı bölgeler belirlenmiş ve hasar boyutları tespit edilmiştir. Tespit edilen hasarlı alanın tipine hasar tanımı yapılarak, hasara göre onarım malzemeleri belirlenmiş ve onarım sürecinde takip edilecek adımlar verilmiştir. Tez çalışması ile önerilen yöntem, hasar analizi sürecinde fiziki müdahaleyi en aza indirgeyerek, hasarlı türbin kanadı onarımını kolaylaştırmayı ve hızlı bir şekilde yapılmasını hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbini, Kanat hasarlarının tespiti, Görüntü işleme, Derin Öğrenme, Hasarlı alan hesaplama, Otomatik bakım

Bilim Kodu: 608.02.05.Enerji Sistemleri Koruması (Bilim Dalı)

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DETERMINATION OF WIND TURBINE BLADE DAMAGES AND CALCULATION OF DAMAGE AREA USING IMAGE PROCESSING BASED METHODS

Kutay AKBULUT

Zonguldak Bülent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Tuğba Özge ONUR

July 2025, 85 pages

Wind turbines are exposed to harsh environmental conditions and dynamic loads due to the environments in which they are located, and as a result, they experience various structural damages over time. Damage occurring particularly on turbine blades can reduce aerodynamic performance, negatively affect energy efficiency, and lead to more significant structural problems in the long term. Therefore, effective and rapid detection of damage on turbine blades is of great importance.

Currently, turbine damages are generally detected through physical inspection by authorized personnel or with the help of high-resolution camera-equipped devices such as drones. However, the fact that wind turbines are often located in hard-to-reach areas, especially in offshore environments, makes these processes both time-consuming and more costly.

In this thesis study, a drone-based imaging method is proposed to enable faster, safer, and more cost-effective detection and repair of damage on wind turbine blades.

ABSTRACT (continued)

Within this scope, damaged blade images obtained from Rass Wind Energy were utilized, and the damaged areas were identified using image processing techniques, followed by the measurement of the damage dimensions. Based on the type of the detected damage, a classification was made, appropriate repair materials were selected, and the steps to be followed during the repair process were outlined.

With this thesis study, the proposed method aims to minimize physical intervention during the damage analysis process, thereby facilitating and accelerating the repair of damaged wind turbine blades.

Keywords: Wind turbine, Blade damage detection, Image processing, Deep learning, Damaged area calculation, Automatic maintenance

Science Code: 608.02.05.Energy Systems Protection (Branch of Science)

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle her aşamada yol gösteren, akademik rehberliği ve desteğiyle çalışmamı tamamlamamda büyük katkı sağlayan değerli danışmanım Doç. Dr. Tuğba Özge ONUR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez kapsamında ihtiyaç duyulan görsellerin temin edilmesinde destek sağlayan ve bu verilerin kullanılmasına izin veren Rass Wind Enerji firmasına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olarak desteğini esirgemeyen, akademik hayatım boyunca bana inanan ve bu süreçte manevi desteğiyle yanımda olan sevgili aileme minnettarım.

Tez süresince göstermiş olduğu anlayış, sabır ve moral desteğiyle bana güç veren değerli eşim Havva Pınar AKBULUT'a içten teşekkürlerimi sunarım.

.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 RÜZGAR TÜRBİNLERİ	 9
 2.1 RÜZGAR TÜRBİNİ İÇ YAPISI.....	 9
2.2 RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI.....	12
2.2.1 Rüzgar Türbini Yapısal Kanat Hasarları.....	13
2.2.1.1 Arka Kenar Çatlaması	13
2.2.1.2 Yıldırım Hasarı.....	14
2.2.1.3 Ön Kenarda Korozyon Kirliliği.....	14
2.2.1.4 Buzlanma.....	15
2.2.1.5 Deleminasyon.....	15
2.2.2 Kompozit Rüzgar Türbini Kanat Malzemeleri	16
2.2.2.1 Takviye Malzemeleri.....	19
 2.3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	 21

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1 GRİ SEVİYEYE DÖNÜŞTÜRME	30
3.2 FİLTRELEME	31
3.3 KENAR BELİRLEME	34
3.4 EŞİKLEME	37
3.5 MORFOLOJİK İŞLEMLER	41
3.6 HİSTOGRAM EŞİTLEME	43
3.7 RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT HASARLARININ TESPİT EDİLMESİ.....	45
3.7.1 MobileNetV2 Mimarisi.....	47
3.7.2 MobileNetV2 Mimarisi Parametrelerinin Belirlenmesi.....	48
3.7.3 Veri Setinin Elde Edilmesi.....	52
BÖLÜM 4 ELDE EDİLEN SONUÇLAR	55
4.1 MODEL EĞİTİMİ.....	55
4.2 ALAN HESAPLAMA.....	63
4.3 HASARLI ALANI ONARMA.....	68
4.3.1 Kanat Onarım Süreci.....	69
BÖLÜM 5 TARTIŞMA VE YORUM.....	75
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Rüzgar türbininin drone ile izlenmesi.....	4
Şekil 2.1 Rüzgar türbini iç yapısı.....	11
Şekil 2.2 Ön kenarda korozyon kirliliği.....	15
Şekil 2.3 Rüzgar türbin kanadının kesitleri.....	17
Şekil 3.1 Rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespiti için kullanılan algoritma.....	30
Şekil 3.2 Yüzey hasarlı görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesi.....	31
Şekil 3.3 Yumuşatma filtresi uygulanmış arka kenar çatlaması.....	32
Şekil 3.4 Keskinleştirme filtresi uygulanmış arka kenar çatlaması.....	32
Şekil 3.5 Keskinleştirme filtresi.....	33
Şekil 3.6 Kanat yüzey hasarına uygulanan kenar belirleme işlemi.....	37
Şekil 3.7 Görüntüye eşikleme uygulaması.....	38
Şekil 3.8 Otsu eşikleme uygulaması.....	39
Şekil 3.9 Adaptif eşikleme uygulaması.....	40
Şekil 3.10 Adaptif eşik uygulamasında farklı sabit değerleri.....	41
Şekil 3.11 Görüntüye uygulanan morfolojik işlemler.....	42
Şekil 3.12 Görüntüye histogram eşitleme yöntemi.....	44
Şekil 3.13 MobileNetV2 mimarisi.....	49
Şekil 3.14 Eğitilen MobileNetV2 mimarisi.....	52
Şekil 4.1 Derin öğrenme doğruluk grafiği.....	56
Şekil 4.2 15 iterasyon için derin öğrenme doğruluk grafiği.....	57
Şekil 4.3 MobileNetV2 test sonuçları.....	60
Şekil 4.4 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması.....	61
Şekil 4.5 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması.....	61
Şekil 4.6 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması.....	62
Şekil 4.7 Hasarlı olarak doğru sınıflandırılan veri.....	62
Şekil 4.8 Hasarsız olarak doğru sınıflandırılan veri.....	63
Şekil 4.9 Ele alınan birinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.....	66
Şekil 4.10 Ele alınan ikinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.....	66



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Rüzgar türbin kanatlarında en çok tercih edilen takviye elemanları.....	18
Çizelge 2.2 Malzemelerin mekanik özellikleri..	19
Çizelge 3.1 MobileNetV2 mimarisi blok katmanları..	50
Çizelge 3.2 Eğitilen MobileNetV2 mimarisi.....	51
Çizelge 4.1 30 ve 50 iterasyon için eğitim ve doğruluk sonuçları.	59
Çizelge 4.2 Test doğruluk sonuçları.....	59
Çizelge 4.3 Kanat genişliği 3 metre alındığı durumda oluşan değerler.	67
Çizelge 4.4 Kanat genişliği 4 metre alındığı durumda oluşan değerler.	67
Çizelge 4.5 Hasarlı alanın literatürdeki tipik yüzey hasarlarına göre karşılaştırılması.....	68
Çizelge 4.6 Verilen görüntülerdeki hasar türlerine göre onarım adımları.	72



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

σ	: Sigma
e	: Euler Sayısı
θ	: Teta
∇	: Nabla
∂	: Kısmi Türev
$\ominus$	: Piksel Kümesi
$\subseteq$	: Alt Küme
$\oplus$	: Genişleme Kümesi
α	: Genişlik Katsayısı

KISALTMALAR

AEP	: Annual Energy Production (Yıllık Enerji Üretimi)
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CNN	: Convolutional Neural Networks (Konvolüsyonel Sinir Ağları)
DERT	: Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer
HSV	: Hue, Saturation, Value (Renk Tonu, Doygunluk, Değer)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
RGB	: Renkli Görüntü Boyutu
UV	: Ultraviyole
YERT	: Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri
YSİ	: Yapı Sağlığı İzlenmesi
2B	: İki Boyutlu
3B	: Üç Boyutlu



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Nüfusun artması ve sanayinin gelişmesiyle birlikte enerjiye duyulan ihtiyaç artmıştır. Talep edilen ihtiyacın bir kısmı fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Doğalgaz, kömür, petrol, nükleer enerji fosil yakıtlar olarak kullanılmaktadır. Ancak bu fosil kaynaklar sınırlı bir kaynak olduğu için zamanla tükenmektedir ve fosil kaynaklar sera gazı üreterek doğaya zarar vermektedir. Bu sebeplerden dolayı, yenilebilir enerjiye olan talep artmaktadır. Enerjiye olan ihtiyacı karşılamak için fosil kaynaklar yerine yenilebilir enerji kaynaklarına olan yatırımlar artmaktadır. Teknoloji geliştikçe yenilebilir enerji kaynaklarının kurulum maliyetleri azalmakta, bu kaynaklardan elde edilen verim ise artmaktadır. Yenilebilir enerji kaynakları, hidroelektrik, güneş, rüzgar, dalga, hidrojen, gelgit ve biyokütle enerjileri olarak ortaya çıkmaktadır [1].

Ülkemizde rüzgar enerjisinin büyük bir potansiyeli olmasına rağmen, fosil yakıtlar ve hidrolik kaynaklar enerji üretiminin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Rüzgar enerjisi tükenmeyen yenilebilir bir enerji olduğu ve potansiyeli keşfedilmeye başlandığından dolayı rüzgar enerji santralleri kurulumu giderek artmaktadır [1]. Küresel rüzgar enerjisi GWEC|2022 raporuna göre küresel rüzgar enerjisi pazarının, önümüzdeki beş yıl içinde yıllık ortalama %6,6 oranında büyümesi beklenmektedir [2]. Küresel kara rüzgar enerjisinin bileşik yıllık büyüme oranı %6,1'dir. Gelecek beş yılda küresel offshore rüzgar enerjisinin yıllık bileşik büyüme oranı %8,3'tür. Dünyanın offshore elektrik üretim kapasitesinde 2022'den 2026'ya kadar 90 GW'lık bir artış görmesi beklenmektedir. Karadaki rüzgar enerjisine göre açık denizdeki rüzgar enerjisi daha yüksek bir rüzgar hızına sahip olup, daha az türbülansa neden olmaktadır. Açık deniz rüzgar enerjisi santralleri, daha küçük bir arazi kaynağı kaplayarak çevre üzerinde nispeten az bir etkiye sahiptir. Aynı türdeki açık deniz rüzgar santrallerinin enerji üretimi, karadaki rüzgar santrallerine göre %50 daha fazladır. Deniz rüzgar enerjisi santralleri son yıllarda bu sebeplerden dolayı hızla gelişme göstermektedir [3].

Rüzgar enerji üretiminin dünyada hızlı gelişmesiyle beraber rüzgarı yakalayıp enerjiye dönüştürmek için gerekli ekipman olan rüzgar türbini ünitesinin kapasitesi daha da büyümüştür.

Bu sebeple, türbinin rüzgar enerjisini yakalayan kısmı olan pervane kanatlarının boyutları da artmış olup tek bir kanadın boyutu 100 m'yi aşmıştır. Türbinlerin ana bileşeni olan kanat maliyetleri tek bir rüzgar türbininin %20 maliyetine sahiptir [3]. Şu anda üretilen rüzgar türbini kanatlarının çoğu, cam elyaf takviyeli polimerden (GFRP) yapılmakta olup, bazı önemli parçalarda da karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kullanılmaktadır.

Rüzgar türbinleri çevresel kısıtlamalar nedeniyle şehirden uzak bölgelere kurulmaktadır. Bu alanlar zorlu koşullara sahip olduğundan dolayı rüzgar türbinleri kanatları bu zorlu ortamlarda çeşitli testlere maruz kalmaktadır. Rüzgar türbinlerinde arızaların %19,4'ünü kanat arızaları oluşturmaktadır [4]. Kanat arızalarını oluşturan başlıca sebepler, insan faktörlerinden kaynaklı kusurlar ve kanat üretimi sürecinin sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan kanatların çalışması sırasında düzensiz yük, yorgunluk, buzlanma, nem emme, dolu, ultraviyole radyasyon, atmosferik korozyon, fırtına, şimşek gibi kanatların maruz kaldığı çeşitli zor koşullar da hasara neden olmaktadır.

Rüzgar türbinleri kanatları arızalandığında bakımlarının zamanında yapılmaması durumu daha yüksek işletme ve bakım maliyetlerine neden olacaktır. Jeneratör seti böyle bir durumda ciddi bir şekilde hasar görebilir ve daha fazla ekonomik kayıplar yaşanabilir. Açık deniz rüzgar türbinleri için işletme ve bakım maliyetleri toplam maliyetin yaklaşık %15-35'ini oluşturur [5]. Bu sebeple gerçek zamanlı izlemek, kanatlarda oluşabilecek tehlikeleri önlemek ve daha fazla zarar görmesini engellemek için oldukça önemlidir.

Rüzgar türbini kanatlarının sağlığının izlenmesi, esas olarak kanatlarda oluşan hasarların ve potansiyel güvenlik tehlikelerinin zamanında tespit edilmesi, ciddi felaket kazalarının önlenmesi ve rüzgar türbinlerinin güvenli ve sağlıklı çalışmasının sağlanmasına olanak sağlar. Zamanında gerçekleştirilen bakım faaliyetleri, oluşabilecek arızalar ve potansiyel güvenlik risklerine karşı önlem alınmasını sağlayarak işletme ve bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir, arıza süresini kısaltabilir, enerji üretim verimliliğini artırabilir ve olası ekonomik kayıpların önüne geçebilir.

Rüzgar türbini kanatlarının yapısal sağlığının izlenmesi süreci; öncelikle kanatta herhangi bir hasarın meydana gelip gelmediğinin belirlenmesi, hasarın bulunduğu konumun tespiti, hasarın ciddiyetinin değerlendirilmesi ve uygun onarım yönteminin belirlenmesi şeklinde sıralanmaktadır. Türbinlerin çalışma koşulları altında, kanatlarda meydana gelen hasarlar tespit

edilebilir ve bu hasarlar gerçek zamanlı olarak erken uyarı sistemleriyle bildirilebilir. Bu sayede, ciddi ekonomik kayıpların önüne geçilmesi ve olası yıkıcı kazaların engellenmesi mümkün hale gelmektedir.

Rüzgar türbini kanatlarının yapısal sağlığını izlemek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler temel olarak; titreşim analizi, akustik emisyon izleme, gerinim (strain) ölçümü, ultrasonik testler, termal görüntüleme ve makine görüşü (computer vision) gibi teknikleri kapsamaktadır.

Her ne kadar rüzgar türbini kanatlarının tespiti ve izlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmış olsa da, bu alanda halen yanıtlanması gereken bazı temel sorular bulunmaktadır. Bu kapsamda, türbin kanatlarında en sık karşılaşılan arıza türlerinin neler olduğu, bu arızaların oluşum mekanizmaları, farklı algılama teknolojilerinin temel çalışma prensipleri ile gelecekteki potansiyel araştırma yönleri ve eğilimlerinin detaylı biçimde incelenmesi gerekmektedir. Bunları göz önünde bulundurarak rüzgar türbini kanatlarının ana hasar türlerini ve oluşma mekanizmasını kapsamlı bir şekilde özetlemeye, analiz etmeye ve çalışmaya acil bir ihtiyaç vardır. Bu şekilde daha detaylı olarak hasar türleri ortaya çıkabilir.

Görsel muayene, çeşitli alanlarda kullanılan bir tespit teknolojisidir. İnsan gözüne benzer şekilde, iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) görüntüler alınarak kanatta oluşan çatlak, çizik, delik, buz vb. durum bilgisi elde edilebilmektedir. Rüzgar türbinlerinde drone ile kanatların görüntüleri alınarak sahip olduğu yüksek çözünürlüklü kameralar yardımıyla görsel izlenmesi de yapılmaktadır. Şekil 1.1’de rüzgar türbininin drone ile izlenmesine ait görsel verilmiştir. Optik ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte görsel izleme teknolojisi, statik algılamadan dinamik izlemeye doğru bir sıçrama gerçekleştirmiştir. Görüntü tanıma teknolojisi günümüzde kullanılan önemli bir teknoloji haline gelmiştir ve kanatların 2B veya 3B görüntülerinden deformasyon, çatlama ve diğer özellikleri çıkarmak için birçok algoritma önerilmiştir [6].



Şekil 1.1 Rüzgar türbininin drone ile izlenmesi [2].

Bu tez çalışmasında, hasarlı olan rüzgar türbin kanatlarının görüntü işleme ile tespit edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgar türbinleri şehirlerden uzak veya offshore gibi yerlere kurulabilmektedir. Böylece yetkili personelin fiziki müdahalesi gerekmeden, görüntü üzerinde tespit edilerek zaman ve maliyet yönünden kazanç sağlanacaktır. Yapılan tez çalışmasında kullanılan görüntüler Rass Wind Enerji'den temin edilmiş olup, bu görüntülere gerekli görüntü işleme teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler uygulanarak, kanat yüzeyindeki hasarlı bölge ön plana çıkarılmaktadır. Böylelikle, türbin kanatlarında hasar tespiti yapılabilmesi ve hasar boyutunun belirlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, önerilen yöntemle türbin kanadındaki tespit edilen hasarlı alanın onarım sürecinin hızlandırılabilmesi için gerekli malzeme ve onarım adımlarının belirlenebilmesi amaçlanmaktadır.

Rüzgar türbini kanatlarında oluşan hasarların onarımı, türbinin yapısal bütünlüğünün, performansının ve güvenliğinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle yüzeysel ya da yapısal çatlakların zamanında ve uygun yöntemlerle tamir edilmemesi, hem enerji üretiminde kayıplara yol açmakta hem de uzun vadede ciddi yapısal arızaların oluşmasına neden olabilmektedir.

Onarım sürecinde izlenecek adımların doğru şekilde planlanması, hasarın tipi ve derinliğine göre uygun müdahalenin yapılmasını sağlar. Yüzeyin hazırlanmasından, dolgu malzemelerinin uygulanmasına ve son kat koruyucularının seçimine kadar her adımın belirli bir teknik ve sıraya göre yürütülmesi gerekir. Bu sıranın dışına çıkılması ya da uyumsuz malzeme kullanımı, onarımın ömrünü kısaltabilir ya da yeni hasarların oluşmasına neden olabilir.

Malzeme seçimi bu sürecin en önemli bileşenlerinden biridir. Epoksi reçineler, dolgu macunları, cam elyaf takviyeleri ve UV dayanımlı yüzey kaplamaları, hem mekanik mukavemetin hem de dış ortam dayanımının sağlanması için tercih edilmektedir. Her malzeme, kanadın üretildiği kompozit yapılarla kimyasal ve fiziksel olarak uyumlu olmalıdır. Bu durum, özellikle aerodinamik formun korunması ve uzun vadeli performansın sürdürülebilmesi açısından hayati önemdedir.

Rüzgar türbini kanatlarındaki hasarlı bölgelerin doğru şekilde analiz edilmesi, onarım adımlarının teknik sıralamayla yürütülmesi ve uygun malzemelerin kullanılması, hem sistemin güvenliği hem de enerji üretim verimliliği açısından vazgeçilmezdir. Bu süreçte yapılan hatalar, yüksek bakım maliyeti ve enerji üretiminde ciddi kayıplar doğurabileceğinden, her aşamanın dikkatle planlanması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, görüntü işleme tabanlı yöntemler kullanılarak hasar tespit işleminin gerçekleştirilmesi, fiziksel müdahale ile gerçekleştirilen yöntemlere göre daha etkin ve hızlı sonuç alınmasını sağlayabilir.

Görüntü işleme; dijital ortamda alınan görüntünün çeşitli işlemler uygulanarak iyileştirilmesini ve geliştirilmesini sağlayarak, analizlerinin yapılmasına olanak tanıyan bir teknolojidir. Görüntü işleme kullanılarak görüntünün yapısı, boyutu, rengi, parlaklığı gibi özellikleri gerekli algoritmalar kullanılarak istenilen hale getirilebilir, böylece görüntü üzerinde analiz yapılabilir. Farklı formatlarda görüntüler ile her sektörün ihtiyaç duyduğu çözümlerin üretilmesini görüntü işleme sağlamaktadır. Son yıllarda elektronik veri işleme ciddi bir ilerleme kaydetmiştir. Bu ilerlemeler teknolojiye gelişmelerle paralel olarak meydana gelmiştir. Bilgisayar boyutlarının küçülmesi, bellek kapasitelerindeki ve veri işleme hızlarındaki artış, görüntü işleme teknolojisindeki ilerlemeleri arttırmaktadır. Günümüzde güvenlik, astronomi, savunma sanayi, kalite kontrol gibi birçok alanda görüntü işleme kullanılmaktadır [7].

Görüntü işleme tabanlı hasar tespit ve ölçüm sistemlerinin geleneksel yöntemlere göre birçok avantajı bulunmaktadır. Yetkili personelin fiziksel müdahalesine gerek kalmadan uzaktan hasar tespiti yapılmasına olanak tanıyarak, rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde incelenmesini sağlar. Görüntü işleme teknikleri manuel ölçümlere kıyasla daha hızlı ve otomatik analiz gerçekleştirilmesine imkan sağlar. Ayrıca, bilgisayarla görüntü işleme algoritmaları ile insan hatası minimize edilerek yüksek hassasiyet ve tutarlılık sağlanır ve daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Erişimi zor olan bölgelerde manuel inceleme gerekliliğini ortadan kaldırarak iş güvenliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Bunun yanı sıra, hasar verileri saklanarak uzun vadeli

analizler yapılabilir ve yapay zeka destekli sistemler sayesinde hasar türleri sınıflandırılabilir. Geleneksel fiziksel ölçüm yöntemlerine göre daha düşük maliyet ortaya çıkabilir ve daha az insan gücü gerektirerek operasyonel verimliliği artırır. Son olarak, ölçekleme yöntemi ile piksel tabanlı ölçümler cm^2 veya m^2 cinsine dönüştürülerek gerçek dünya mühendislik hesaplamalarına doğrudan entegre edilebilir. Bu avantajlar sayesinde, görüntü işleme tabanlı ölçüm sistemleri, rüzgar türbinleri ve benzeri büyük yapılar için hızlı, güvenli ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu tez çalışmasında, hasar alanının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için öncelikle görüntü işleme adımları uygulanarak gri tonlama ve gürültü azaltma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kenar belirleme algoritmaları ile hasarlı bölgenin sınırları tespit edilmiş, ardından ölçekleme işlemiyle piksel/cm dönüşüm faktörü kullanılarak gerçek alan hesaplanmıştır. Bu çalışma, rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespit sürecini daha güvenli, hızlı ve verimli hale getirmek amacıyla görüntü işleme teknikleri ile temassız bir ölçüm yöntemi geliştirmeyi hedeflemektedir.

Tez çalışmasının giriş bölümünde, yenilebilir enerji ve rüzgar türbinleri hakkında bilgiler verilmiş olup, rüzgar türbin kanatları hakkında yapılan araştırmalara değinilmiş ve görsel muayenenin öneminden bahsedilmiştir.

Rüzgar türbinleri bölümünde, rüzgar türbinleri ile türbinlerin iç yapısı ile ilgili çalışmalar incelenmiş olup tez için gerekli çıkarımlar yapılmıştır. Rüzgar türbini kanat yapısı ve kanat hasarları anlatılmıştır. Rüzgar türbini kanat malzemeleri ile kanatlarda kullanılan takviye malzemeleri de çalışmada sunulmuştur. Literatür araştırması yapılarak rüzgar türbinleri ve oluşabilecek hasarlar hakkında bilgi verilmiştir. Görüntü işleme ile yapılan çalışmalar da incelenip detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Materyal ve yöntem bölümünde, görüntü işlemeyle ilgili genel bilgiler verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan görüntüler için gerekli olan görüntü işleme tekniklerinden olan gri seviyeye dönüştürme, filtreme, kenar belirleme, eşikleme, morfolojik işlemler gibi işlemler görüntülere uygulanarak rüzgar türbin kanadındaki hasarın belirginleştirilmesi sağlanmıştır.

Elde edilen sonuçlar bölümünde, görüntü işleme ile elde edilen rüzgar türbini kanat görüntülerine ait görselleri içeren veri setine hasar tespiti yapılmıştır. Veri seti hasarlı ve hasarsız görüntülerden oluşmaktadır. Veri seti, derin öğrenme tabanlı bir model olan MobileNetV2 algoritması kullanılarak eğitilmiştir. Bu sayede, eğitim sürecinde rüzgar türbini

kanatları hasarlı ve hasarsız olmak üzere iki sınıfa ayrılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tekniklerinin uygulanmasının ardından elde edilen yüksek sınıflandırma başarı oranları, modelin doğru ve etkili bir şekilde eğitildiğini göstermektedir.

Hasarlı rüzgar türbini kanatları tespit edildikten sonra, bu görüntüler üzerinde yer alan hasarlı bölgelerin görüntü işleme tabanlı olarak ölçülebilmesi amacıyla gerekli analizler gerçekleştirilmiştir. Fiziksel ölçüme ihtiyaç duyulmadan, görüntü üzerinden yapılan ölçümler ile hasarlı alanlar hızlı, güvenli ve etkili bir şekilde belirlenmiştir.

Hasarlı bölgenin alanı belirlendikten sonra, bu bölgenin onarımı için izlenmesi gereken adımlar detaylı şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, tespit edilen hasar tipine bağlı olarak onarım sürecinde kullanılacak malzeme türleri ve miktarları da belirlenmiştir.



BÖLÜM 2

RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek ardından elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir.

Rüzgar türbini jeneratör, kule, şanzıman, elektrik-elektronik elemanlar ve kanatlardan oluşmaktadır. Rotor, rüzgarın sağlamış olduğu kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürmektedir. Jeneratörde bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Elde edilen elektrik enerjisi aküler aracılığıyla depolanır veya şebekeye aktarılır [8].

2.1 RÜZGAR TÜRBİNİ İÇ YAPISI

Bir rüzgar türbininin kanatlar, kule, jeneratör, ve elektronik aksamlar olarak 4 adet ana parçası bulunmaktadır .

- **Rotor**

Rüzgar türbini rotoru genellikle kanatlar (blade) ve göbek (hub) olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır [9].

- **Kanatlar (Blade)**

Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren kısımdır. Genellikle hafif ama dayanıklı kompozit malzemelerden (cam elyafı, karbon fiber vb.) üretilmektedir. Sayıları genellikle 2 veya 3'tür ancak bazı rüzgar türbinlerinde daha fazla olabilir [9].

- **Göbek (Hub)**

Kanatları birbirine bağlamaktadır ve döner hareketi ana mile iletir. Hub'lar sabit veya hareketli olabilirler. Hareketli (pitch control) olan göbek kısımları kanat açılarını değiştirerek güç kontrolü yapabilmektedirler.

Rotorun çalışma prensibine bakarsak; Rüzgar, kanatlar üzerine etki ederek aerodinamik kaldırma kuvveti ile (lift) gerekli olan dönme hareketinin oluşturur. Kanatların döndürülmesiyle üretilen mekanik enerji ana mil aracılığıyla jeneratöre iletilir [9].

- **Jeneratör**

Rüzgar türbinlerinde jeneratör rotorun mekanik enerjisini elektrik enerjisine çeviren bileşendir. Senkron, indüksiyon ve doğru akım şönt olmak üzere rüzgar türbinlerinde 3 çeşit jeneratör kullanılmaktadır [9].

- **Şanzıman (Dişli Kutusu)**

Düşük hızda çalışan rotor hareketini jeneratörün çalışabileceği yüksek hıza çıkarmaktadır [9].

- **Fren**

Rotoru acil durumlarda durduran bölümdür. Rüzgar türbinlerinde mekanik, hidrolik ve elektriksel olmak üzere 3 çeşit fren bulunmaktadır [9].

- **Transformatör**

Jeneratörde üretilen elektrik enerjisi transformatör aracılığıyla uygun voltaj seviyesine dönüştürülür ve şebekeye aktarılır [9].

- **Nacelle**

Jeneratör, kontrol sistemi ve şanzıman gibi ana kısımların bulunduğu bölümdür [9].

- **Kule**

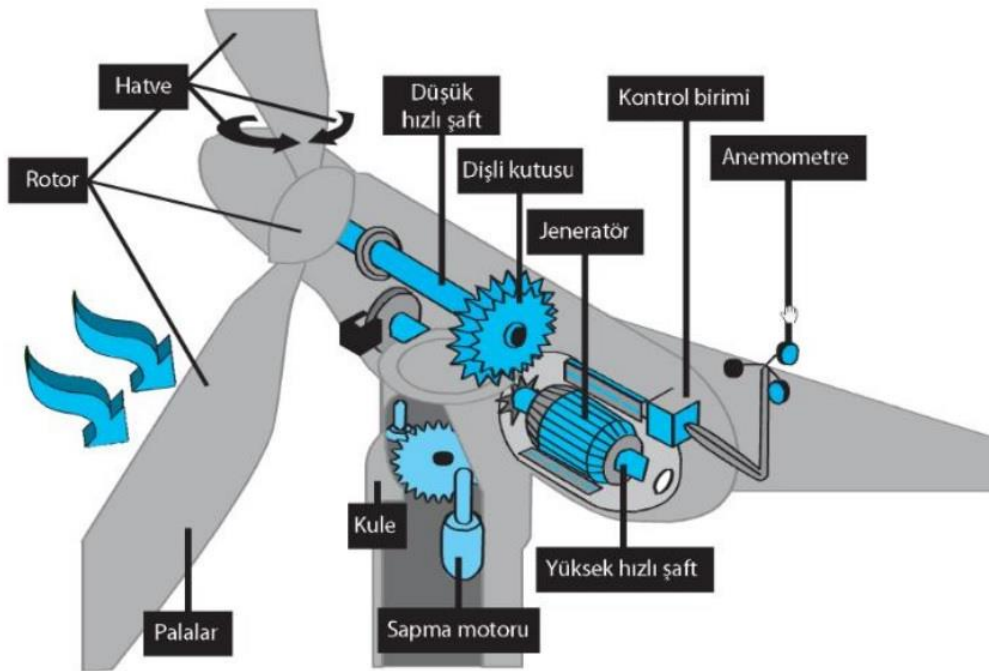
Rüzgar türbinini kule taşımaktadır. Rüzgar türbin kuleleri genel olarak silindirik formda ve çelik, beton veya hibrit malzemelerden üretilir. Nedeni yetkili personelin, türbine daha güvenli bir biçimde erişmesini sağlamaktır [9].

- **Kontrol Sistemleri**

Kanat Açısı Ayarı (Pitch Control) rüzgarın hızına göre kanat açısını ayarlar. Yönlendirme Sistemi (Yaw Control) ise türbini en verimli rüzgar yönüne döndürür [9].

- **Şebeke Bağlantı Sistemleri**

Santrallerde rüzgar ile üretilen elektrik enerjisini şebekeye aktaran sistemdir [9]. Şekil 2.1’de rüzgar türbini iç yapısına ait görsel verilmiştir.



Şekil 2.1 Rüzgar türbini iç yapısı [10].

2.2 RÜZGAR TÜRBİNİ KANADI

Rüzgar türbin kanatlarının rüzgarı yakalayıp, daha fazla enerji üretmesi için kanatlar uzun ve esnek yapılardan imal edilmektedir. Yapılan son araştırmalarda, rüzgar türbin kanatlarının alanı genişledikçe daha fazla rüzgar yakalayıp enerjiye dönüştürebileceği açığa çıkmıştır [11].

Türbinlerin kanatlarına etki eden yükler incelendiğinde, yerçekimi yüklerinden kaynaklanan kanadın ağırlığı, rüzgarın neden olduğu aerodinamik yükler, merkezkaç kuvvetleri ve jiroskop kuvvetler olarak ortaya çıkmaktadır [12]. Rüzgar türbin kanatları üzerine etkiyen yükler tamamen statik olmadığından rüzgar türbin kanatlarının öngörülen ömür (20-25 yıl) boyunca tekrarlayan sürekli yükler kanadın yorulma ömrüne etki eder. Yorulma yüklerine sebep olan yerçekimi ve aerodinamik yüklerdir [13]. Türbinin maruz kaldığı statik ve dinamik yükler, türbinlerin tasarımını etkilemektedir. Bundan dolayı ilk olarak etkisi altında kaldığı yükleri belirlemek gerekmektedir. Kanatlarda ve kulede aerodinamik yükler, zaman içerisinde yorulmaya sebep olurken, hasarın başlıca sebebi rüzgar türbin kanadında meydana gelen bu yorulmalardır [14]. Türbinlerin kanatlarının hasara uğraması durumu veya ekonomik ömürlerinin beklenenden daha kısa süre olması yatırımcıların zarar etmesine sebep olur ve ekonomik kayıplar getirir.

Büyük ölçekli hasarlar yorulmadan kaynaklanmaktadır ve başlangıçta meydana gelen tek çatlak bu hasarlara neden olmaktadır. Hasar tipleri, tabaka sıklığına, malzeme özelliğine ve yükleme şekline göre değişik tiplerde oluşabilir [15]. Kanatlarda yorulmanın sebep olduğu hasarlar, şiddetli dinamik yüklerin etkisiyle daha kısa sürelerde oluşabilmektedir [48].

Kanat dayanıklılığının korunması için aerodinamik açıdan malzemenin tüm dış etkilere karşı yüzey kalitesini ve bütünlüğünü kaybetmeden hafif ve ekonomik olması gibi seçenekler kullanılacak malzemede önemli konulardır. Kanadın her bir kesitinde kullanılacak malzemenin doğru seçimi, yüksek verim elde edilebilmesini mümkün kılmaktadır [16-17].

Kullanılan malzemelerin çalışma süresi boyunca çalışma ortamından dolayı maruz kaldığı aşınma etkilerine, zorlu hava koşulları gibi olumsuz etkilerine karşı malzemelerin dayanıklı olması gerekmektedir [9]. Bundan dolayı, geniş yapılarda iyi bir tercih olarak görülen polimer esaslı kompozit malzemeler rüzgâr türbin kanatlarında da kullanılmaktadır. Yüksek güç-

yoğunluk ve yoğunluk-sertlik oranları ile tokluk ve yorulma performanslarının iyi olduğundan dolayı kompozit malzemeler tercih edilmektedir [18].

2.2.1 Rüzgar Türbini Yapısal Kanat Hasarları

Rüzgar türbini kanatlarının hasar görmesinin iki ana sebebi bulunmaktadır. Bu sebeplerden birincisi, rüzgar türbini zorlu bir dış ortamda olmasından kaynaklanmaktadır ve hasar arızaları doğrudan kuvvetli rüzgar, yağmur veya kar, tuzlu sis, yıldırım çarpması, donma, kum fırtınası, böcekler vb. gibi dış faktörler etkilidir. Diğer sebebi ise insan yapımı olan rüzgar türbinleri üretim teknolojisindeki süreç problemlerinden sebep olan kusurlardır. Bu kusurlar, rüzgar türbininin kurulumu ve işletimi sırasında tekrarlanan yüksek yüklere ve sert dış ortamlara tabidir.

Görünmez kusurların kademeli olarak genişlemesi hasara yol açmaktadır. Üretim sürecindeki farklı kusurlar ve farklı çalışma koşulları, farklı hasar türlerine neden olduğundan dolayı tipik hasar türleri ve ana hasar mekanizmaları arka kenar çatlaması, yıldırım hasarı, ön kenarda korozyon kirliliği, buzlanma, delemantasyondur [6].

2.2.1.1 Arka Kenar Çatlaması

Rüzgar türbin kanatlarının ana üretim malzemeleri GFRP ve CFRP şeklindedir. Kanadın bu iki malzemeden üretilen iki yarım kabuğu, tam bir kanat oluşturacak şekilde birleştirilir. Rüzgar türbini kanadının arka kenarı, iki yarım kabuğun birleştiği yerdir. Bu alanda çeşitli hasar çeşitleri vardır ve esas olarak boyuna çatlak ve enine çatlak olarak ayrılan ana hasar türü olan çatlamadır [19]. Bu tür çatlaklar esas olarak kanadın kökünde ve ucunda oluşur. Ucun arka kenarındaki uzunlamasına çatlak, esas olarak kabuğun kalınlığındaki azalmasından dolayı oluşmaktadır. Bu nedenle kanadın sertliğinde bir azalmaya neden olur. Bu düşük sertlik, uçta kabuk ve bağlayıcı malzeme üzerinde daha yüksek kesme gerilimi oluşturur ve artan bıçak yüküne yol açar.

Üretim aşamasında kanadın iki kabuğu arasındaki asimetriyi ortadan kaldırmak için kanadın bir tarafının cilalanması gerekmektedir. Bu durum ise bir taraftaki cam elyafın azalmasına neden olup bu tür çatlamaların kanadın yüksek yükü veya durması nedeniyle oluşmasından kaynaklanabilir. Ayrıca iki ölçümde bıçağın arka kenarının kabuğundan geçen enine bir çatlak

da vardır. Bu çatlak kanadın diğer tarafına başlangıç tarafından yavaşça nüfuz etmiş olabilir. Aynı zamanda bu alandaki yükün fazla olması çatlağı oluşturmaktadır. Oluşan çatlak nispeten tehlikelidir çünkü arka kenarın yüksek yük alanını tamamen kesmektedir [20].

2.2.1.2 Yıldırım Hasarı

Rüzgar türbini sistemleri için halihazırda bir IEC61400-24 yıldırımdan korunma standardı olmasına rağmen, yıldırımdan korunma sistemlerine sahip rüzgar türbinlerinde bile yıldırım türbinlere zarar verebilmektedir. Karadaki rüzgar çiftliklerinin çoğu, rüzgar kaynakları açısından zengin olan ancak aynı zamanda rüzgar türbinlerine yıldırım çarpması riskini de artıran nispeten uzak, yüksek sırtlar üzerine kurulmuştur [21].

Rüzgar kanatları yıldırıma karşı korunumlu olarak inşa edilmektedir. Yıldırımın fiziksel olarak ısı etkisi kanatlar için geri döndürülemez sonuçlar doğurabilir. Rüzgar türbinlerinde yıldırımdan korumak için kanatlara reseptör adı verilen iletkenler yerleştirilmiş olup bu bakır iletkenler kanat boyunca alüminyum iletkenlerle desteklenir. Rüzgar türbinlerinde topraklama olabildiğince uzun yıllar özelliğini koruyabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Korozyon riski, topraklama direncinin zaman içerisinde yükselmesinde oldukça fazla rol oynamaktadır. Bu nedenle temel topraklamada kullanılacak galvaniz şeritlerin paslanmaz çelikten yapılmış olması ve bu şeritlerin kalınlıklarının DIN EN 50164-2 standartına uyum göstermesi gerekmektedir. Santral boyunca eş potansiyel oluşturulması da önemlidir. Eş potansiyel sistem, oldukça önemlidir. Bu sistem türbinler arasında ve türbin çevresinde kesinlikle sağlanmalıdır. Böylece ani darbe geçişleri ile atlamaların önüne geçilmiş olacaktır.

2.2.1.3 Ön Kenarda Korozyon Kirliliği

Türbin kanatlarının ön kenarındaki korozyon ve kirlenme, rüzgar enerjisi üretimindeki temel sorunlardan birini oluşturmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalar, kanatların ön kenarındaki korozyon kirliliğinin yıllık enerji üretimini (AEP) %2 ila %3,7 oranında azaltabileceğini göstermiştir [22]. Şiddetli şekilde aşınmış bıçaklar, %25'e varan AEP'ye neden olmaktadır [23].

Ön kenarda korozyon kirliliği, rüzgar türbin kanatlarında gürültüye sebep olmaktadır. Rüzgar türbin kanatlarının korozyon ve kirlenme derecesi, sıcaklık, nem, atmosferdeki kirlleticiler ve

rüzgar hızı gibi çevresel koşullar etkili olmaktadır [24]. Şekil 2.2’de ön kenarda korozyon kirliliğine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 2.2 Ön kenarda korozyon kirliliği.

2.2.1.4 Buzlanma

Rüzgar türbini kanatlarında buzlanma, büyük bir sorun oluşturmaktadır. Rüzgar türbini kanatları hassas aerodinamik bileşenler olduğundan, kanatlarda oluşan hafif buzlanma bile kanat şeklinde hafif değişikliklere neden olabilir. Bu hafif buzlanmalar sürtünme katsayısını artırır ve türbülans yaratır; nihayetinde kanatların aerodinamik performansını etkiler ve bu da güç üretimi üzerinde olumsuz bir etkiye neden olur. Yapılan bir araştırmada, 682 MW üreten 517 rüzgar türbini analiz edilmiştir ve 29 ayda, üretilen toplam güçte 18.966 MWh'lik bir kayıp olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu nedenle buzun tespit edilebilmesi ve buz çözme işlemine zamanında başlanması oldukça önemlidir [25-26].

2.2.1.5 Deleminasyon

Rüzgar türbin kanatları kompozit malzemelerden imal edilmektedir. Kompozit malzemede yapışma iyi olmayabilir veya yapışma olmayan, delaminasyon kusurlarına eğilimli alanlar oluşabilir. Bu çalışma koşulları, türbin kanadının bükülmesine neden olup, kanat yüksek bir aerodinamik yük taşıyacaktır. Delaminasyon, kanadın kritik burkulma yükünü azaltabilir ve kanadın genel sertliğini ve gücünü azaltabilir [27]. Delaminasyon farklı burkulma modlarına neden olur. Delaminasyonun, kanadın dış veya iç yüzeyine yakın olması durumunda yerel burkulma, kanat laminatının merkezine yakın olması durumunda ise, genel bükülme

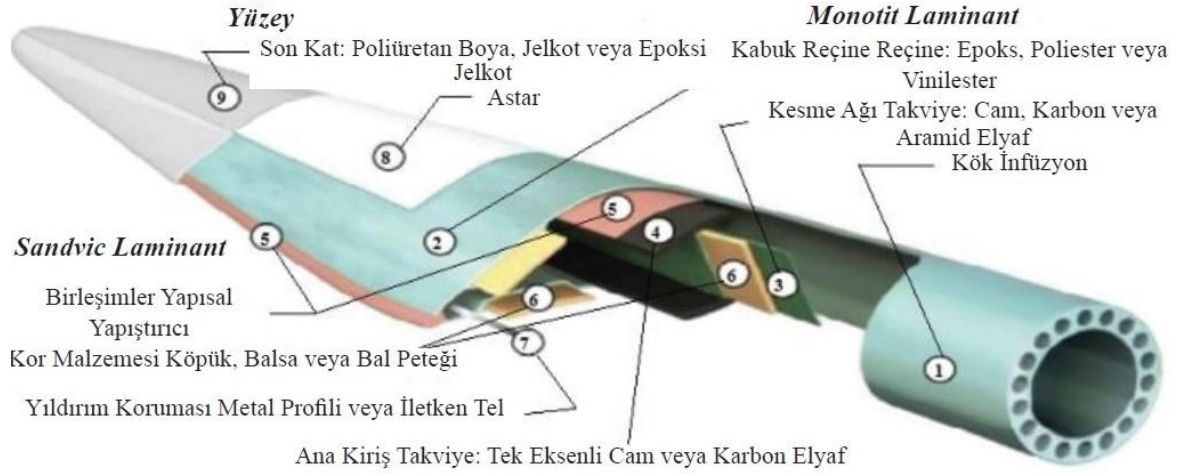
oluşacaktır. Burkulma, yapı için değişen derecelerde tehlike oluşturan kanadın gücünü azaltacaktır. Bununla birlikte, yerel burkulma ve delaminasyonun oluşturduğu birleşik etki belirli bir dereceye ulaştığında, kanat aniden kırılacaktır [28-29].

2.2.2 Kompozit Rüzgar Türbini Kanat Malzemeleri

Kanatlar rüzgar türbinlerinin önemli kısımlarından biri olup çalıştığı zaman boyunca çeşitli dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Türbin kanatlarında oluşabilecek bir problem sistemi de etkilemektedir. Bu nedenle kullanılan malzemenin, yüksek eğilme dayanımına sahip olması oldukça önemlidir. Kanatlar üretilirken mukavemet ve sertlik özelliklerinin iyi olması sebebiyle fiber takviyeli plastik (Fiber Reinforced Plastics-FRP) kompozitler tercih edilmektedir [30-31].

Kompozit malzeme üretimi son yıllarda artış göstermiştir. Kompozit malzemenin en fazla kullanıldığı sektör enerji sektörüdür. Kompozit malzeme kullanım oranı 2002 yılına kıyasla beş kat artış göstermiş olup, enerji sektöründe 320 bin ton ile oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Kullanım oranı dünya genelinde ağırlıkça %7'ye ulaşmış olup, piyasa hacmi 3,6 milyar euro seviyesine yükselmiştir. Ülkemizde rüzgar enerjisinin önümüzdeki dönemlerde yıllık %18-20 civarında bir artış göstermesi planlanmaktadır. Rüzgar enerjisine paralel olarak türbin kanatlarında da hızlı bir ilerleme olacağı düşünülmektedir [32-33].

Kanatların kesitlerine bakıldığında oldukça farklı malzemelerden meydana geldiği görülmektedir. Farklı malzemeler seçilmesinin nedeni, kanadın her kesiti için maruz kaldığı kuvvetlere bağlı olarak malzeme seçimi yapılması olup o kuvvete karşı koyabilecek (açı, yön ve vektörel büyüklük) mukavemet değerlerine sahip malzemedan üretilmektedir. Böylelikle kanat ağırlığının daha hafif bir hale gelmesi sağlanır [34]. Şekil 2.3'te rüzgar türbin kanat kesidine ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 2.3 Rüzgar türbin kanadının kesitleri [34].

Laminat sandviç yapısı incelendiğinde, malzemenin üç ana bileşenden oluştuğu Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Kanat yapısının alt ve üst yüzeyleri ile orta kısmında yer alan çekirdek (kor malzemesi) ve bu bileşenleri birbirine bağlayan yapıştırma yüzeyinden meydana geldiği görülmektedir. Alt ve üst yüzeyler arasındaki mesafeyi korumak, orta kısımdaki çekirdek malzemenin temel görevidir. Alt ve üst yüzeylerinin arasında mesafe olması, sandviç malzemeye ait kesit alanı atalet momenti ile bükülme rijitliğinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Yüzeylerde seçilen malzemenin dayanımının yüksek olup buna karşın ince olması, çekirdek malzemedeki tercih düşük mukavemetli ve hafif olması yönündedir. Yapıların böylece rijit ve yüksek dayanımlı oluşturulması sağlanarak, konstrüktif olarak minimum ağırlıklarla bir eleman üretilmiştir [35].

Fiber takviyeli plastik kompozitler, alt ve üst yüzeyleri oluşturmaktadır. Profil kiriş uzunluğu 3 metreye kadar olan türbin kanatlarında kullanılacak kompozitlerin ana malzemesinde polyester reçineler tercih edilirken, daha fazla profil kiriş uzunluğuna sahip kanatlar için ise sonra vinilester veya epoksi reçineler ana malzeme olarak seçilmektedir [36]. Cam fiber, karbon fiber ya da aramid fiber düşük yoğunluğa ve yüksek gerilme mukavemetine sahip olmaları nedeniyle takviye elemanı olarak tercih edilmektedir [37-39]. Çizelge 2.1'de rüzgar türbin kanatlarında en çok tercih edilen takviye elemanlarına ait değerler verilmiştir.

Çizelge 2.1 Rüzgar türbin kanatlarında en çok tercih edilen takviye elemanları [49].

Fiber Çeşidi	Yoğunluğu (Mgm^{-3})	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastisite Modülü (GPa) Boy-En	Kırılma Deformasyo nu (%)	Termal İşlem Değeri ($10^{-6}K^{-1}$) Boy-En
Cam					
E	2,60	2,4	73-73	3,8	5-5
R	2,53	3,5	86-86	4,1	4-4
Aramid					
HM	1,45	3	130-5,4	2,1	-2-17
LM	1,44	2,8	65	4,3	
Karbon					
HM1	1,96	1,75	500-5,7	0,35	-1,5-30
HM2	1,8	3	300	1	-0,2
HT	1,78	3,6	240-15	1,5	-0,5-10
HST	1,75	5	240	2,1	-0,1
IM	1,77	4,7	290	1,6	

Çizelge 2.1’ de kanatlarda kullanılan takviye elemanları olan cam, aramid ve karbon fiberlerin mekanik özellikleri gösterilmiştir. HM,1,2; yüksek modül değerini, LM; düşük modül değerini, HT; yüksek gerilme mukavemetini, HST; yüksek gerinimi, IM; orta seviyeyi ifade etmektedir.

Çizelge 2.2 rüzgar türbini kanatları için kullanılan malzemelere ait değerleri içermektedir. Türbinlerde malzeme seçimini etkileyen birden fazla etken bulunmaktadır. Malzemenin güvenilirliği, emniyeti, performans gereklilikleri ve çevreye fiziksel olarak etkisi, erişebilirliği ve ekonomik faktörler malzeme seçimini etkilemektedir. Kullanılacak malzemenin seçiminde, mühendislik tasarımının yapılabilmesi için malzemenin mekanik, termal ve kimyasal gibi özellikleri en önemli etkindir [40]. Türbin kanatlarının performanslarını arttırabilmesi ve maliyetleri düşürebilmesi amacıyla takviye elemanları ile matris elemanları üzerinde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Çizelge 2.2 Malzemelerin mekanik özellikleri [49].

Özellikler	Polyester	Vinilester	Epoksi
Yoğunluk(mg m^{-3})	1,1-1,46	1,15	1,11-1,4
Sertlik (Rockwell M)	70-115		80-110
Çekme Mukavemeti (MPa)	42-91	73	28-91
Çekme Modülü (GPa)	2-4,5	3,5	2,4
Eğilme Mukavemeti (MPa)	103		80
Eğilme Modülü (GPa)	4,2		3,5
Kırılma Deformasyonu (%)	1,25		4-7
Termal İşlem Katsayısı ($10^{-6}K^{-1}$)	9,9-18	53	8,1-11,7
Isıl Çarpılma Sıcaklığı	100-125		110-150

2.2.2.1 Takviye Malzemeleri

Takviye elemanı olarak özellikle E-cam ekonomik olarak düşük maliyetli olması ve istenilen mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [41]. Türbin kanatlarında geleneksel cam elyaf polimer kompozitler yaygın kullanılmasına karşın, daha yüksek mukavemet değerlerine sahip ve daha hafif kompozit elyaf çeşidi olan karbon elyaflara olan ilgi artmaktadır [42]. Karbon ve cam elyaflar, hibrid kanatların üretiminde ana malzemelerdir [41].

Karbon fiberler çoğunluğun saf karbonların oluşturduğu, grafit adı verilen hekzagonal biçiminde bar kafes şeklindedir. Türbin kanatlarının son zamanlarda alanlarının genişlemesi ile birlikte artan mukavemet değerlerini karşıladığından ve daha az bir maliyete sahip olduğundan dolayı karbon fiber kompozitler daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Karbon fiber

kompozitler, yüksek mukavemet, çok yüksek sertlik, düşük yoğunluk ve hafiflik sağlamaktadır [40].

Yaygın olarak kullanılan bir diğer elyaf çeşidi aramiddir. Bu elyafların sahip olduğu kristal yapısı yüksek spesifik tokluk oranı yüksek güç ve termal stabilite imkanı sunmaktadır. Bundan dolayı diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha yüksek performans vermektedirler[43-44]. Aramid elyaflar, kompozit malzeme üzerinde zayıf arayüzey yapışmasının nedeni polimer matrisin etkin gruplarına kimyasal direnç göstermeleridir [45-46]. Hibrit kullanımı bu durumu azaltarak daha olumlu etkiler alınmaktadır. Yapılan bir araştırmada, aramid-karbon hibrit malzemelerinde delaminasyon görülmezken cam-karbon hibrit malzemelerinde ise önemli ölçüde delaminasyon olduğu gözlemlenmiştir [47]. Ayrıca karbon ve aramid fiberlerin hibrid kompozitlerinin üretilmesinin nedeni, karbon fiber kompozit malzemelerin darbe direncini artırmasıdır [40].

Rüzgar türbin kanatlarının sürekli olarak aerodinamik kuvvetlere maruz kalması hasara neden olabilmektedir. Hasarların oluşmasının başlıca sebebi kanatlarda oluşan yorulmadır. Genelde kanatların kök bölgesine bağlanmış olduğu kısımlarda hasarlar meydana gelmektedir. Yorulmanın neden olduğu bu hasarlar, yüksek yorulma yüklerinde daha kısa bir sürede oluşabilir [48]. Oluşabilecek hasarları önlemek amacıyla kullanılan malzemeler büyük bir öneme sahiptir. Malzemelerin zorlu hava koşullarına ve korozyon gibi aşınmalara karşı dayanıklı olmaları gerekmektedir [13]. Bu nedenle geniş yapılarda polimer esaslı kompozit malzemeler türbin kanadında tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin geniş yapıları uygulamalarda yüksek güç-yoğunluk ve yoğunluk sertlik oranları ile tokluk, yorgunluk performansları verimli olması nedeniyle kullanılmaktadır [18].

Kompozit malzemeler teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yapıların verimliliğine katkı sağlaması ve ürüne ilişkin sorunlara çözüm olabilmesi gibi faydaları nedeniyle önemli bir ölçüde dinamik bir yapı elde etmiştir. Bu da kompozit malzemelerin kullanımını arttırarak farklı sektörlere girebilmesini sağlamıştır. Rüzgar enerjisi, bu sektörlerden bir tanesi olup yenilebilir enerjinin önemli bir noktaya gelmesi, güvenilirliğinin ve ürettiği enerjiye göre düşük maliyetinden dolayı rüzgar türbin sayısı ve kapasitesi artmaktadır. Rüzgar enerjisindeki firmaların ürettikleri güç miktarları son yıllarda yükselmiş olduğu ve bu üretimin önemli bir unsuru olan türbin kanadını oluşturan malzemeler, üretim şekli, tasarımı ile daha çok çalışılan

bir AR-GE konusudur. Rüzgar türbin kanatlarının, türbin verimliliğinde oldukça önemli bir oranda etkisi olduğu kabul edilmiştir [49].

Türbin kanatlarındaki gelişmeler ile kompozit teknolojisi paralel olarak devam etmektedir. Rüzgâr türbin kanatlarının uzun yıllar boyunca hizmet verebilmesi için kanat yapısı, dayanımı ve yüzey kalitesinin artırılması amacıyla hammaddelerin yapısal özellikleri ile üretim yöntemlerinde iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu nedenle, matris ve takviye malzemelere çeşitli maddeler ilave edilmesi veya elyafların hibrit kullanılması gibi üstün özellikli kompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [49].

Takviye elemanlarının cam-karbon ve karbon-aramid gibi hibrit kullanılması konusunda birçok çalışma bulunmaktadır. Mekanik özelliklerin geliştirilmesini amaçlayan hibrit elyaflar karbon elyafların maliyetlerinin de aşağı çekilmesini amaçlamaktadır. Hibrit kompozit olan cam-karbon malzemenin cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerle kıyaslandığında mekanik olarak daha iyi bir seviyededir. Deleminasyon olarak incelenirse, karbon-aramid hibrit kompozit malzemesinin cam-karbon hibrit kompozit malzemelerine göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hammadde olan bazaltın takviye malzeme olarak kullanıldığı görülmektedir. Bazalt, epoksi güçlendirilmesinde de kullanılır. Kompozit rüzgar türbin kanat malzemelerinde epoksi reçine yaygın olarak kullanılmaktadır ve epoksi reçinelerin güçlendirilmesiyle alakalı kalsiyum karbonat ve silisyum karbür uygulamasıyla alakalı çalışmalar devam etmektedir. Epoksi reçine için gerçekleştirilen çalışmalarda malzemeler genel olarak oldukça ufak tozlar halinde kullanılmıştır. İlave malzame kullanımı en fazla %25 oranında tercih edilmiştir [49].

2.3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tez kapsamında, rüzgar türbinleri ile ilgili yapılmış çalışmalar ve görüntü işleme alanındaki kapsamlı araştırmalar incelenmiştir. Literatürde, rüzgar türbini ve görüntü işleme teknikleri üzerine gerçekleştirilmiş önemli çalışmalar detaylı şekilde ele alınmıştır.

Zou ve Cheng, 2022 yılında yaptıkları çalışmada geliştirilmiş evrişim sinir ağı tabanlı rüzgar türbini kanat yüzey hasarı tanımlaması üzerine araştırması yapılmıştır. Rüzgar türbinlerin her türlü hava koşullarına göre çalışabilmesi gerekmektedir ancak kanatlara yıldırımlar, kum fırtınaların, kuvvetli rüzgarlar, yağmur ve kar gibi etkenler zarar verebilmektedir. Kanat

arızalarının tüm rüzgar türbini arızalarına göre önemli bir kısmı kapladığı yapılan çalışmalarla istatistiksel olarak ortaya çıkarılmıştır. Bu sebeple rüzgar türbini kanatlarını düzenli olarak incelemek gerekmektedir. Kanatların bakımını zamanında yapılması oluşan küçük hasarların büyümesini ve oluşabilecek maliyetlerin önüne geçilmesini sağlayacaktır. Bu nedenle türbin kanadındaki hasarı tespit etmek için hızlı ve doğru bir yaklaşım araştırmak önemli bir mühendislik konusudur. Yapılan bu çalışmada, rüzgar türbinlerinde oluşan hasar özelliklerini belirlemek için geliştirilmiş bir evrişimli sinir ağı modeli olan ED Net önerilmiştir. Evrişim sırasında özellik çıkarımını güçlendiren geliştirilmiş asimetrik evrişime dayalı EAC bloğu tanıtılmıştır. Hasarın konumunu belirlemek için ise DPCI_SC bloğu yerleştirilmiştir. Kanatlardaki hasarı belirlemek için üç dizi deney yapılmıştır. İlk deneyde ED Net'in hasarlı rüzgar türbin kanatlarındaki hasarı belirlemedeki etkinliğini doğrulamıştır. Yapılan ikinci deneyde çalışmada önerilen iyileştirmelerin önemini ortaya çıkarmıştır. Son deneyde ise Ed NET modelinin %99 üzerinde bir performansla sahip olduğu ortaya çıkmıştır [50].

Martinez ve arkadaşları, 2019 yılında yaptıkları yapılan çalışmada makine öğrenmesi kullanarak rüzgar türbini kanat erozyonunun tahmini konusu üzerine araştırma yapılmıştır. Rüzgar türbinleri hareketli parçalara sahip karmaşık, gelişmiş makinelerdir. Türbinlerin nacelle kısımları içinde dönen bileşenlerin çoğu sıcaklık ve titreşim sensörlerine sahip olup sensörler anormal ekipman durumunda kontrol sistemini uyarmaktadır. Kanatların ise uzunlukları 50 metre uzunluğunda veya daha fazla uzunluğa sahip olduğundan benzer izleme sistemlerine sahip değildir. Rüzgar türbinlerinde drone veya yetkili personel yardımıyla periyodik denetleme yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar büyük yapılı olan rüzgar türbini kanatları için oldukça zaman alan yöntemlerdir. Flodaki tüm türbinleri fiziksel olarak incelemek insan hatasınada açık olduğundan bu yöntem etkili bir yöntem olmayacaktır. Bu çalışmada asıl olarak incelenen hasar ön uçtaki kenar aşınmasıdır. Bu hasar cam kanattaki jel kaplamayıda aşındırabilmektedir. Bu aşınmalara yıldırım gibi ani olaylar ile zamanla küçük darbeler neden olmaktadır. Bu hasar türünü hızlı bir şekilde tespit etmek türbinin güç üretiminin devam etmesi açısından önemlidir.

Zaman serisi verileri ve türbin kanat muayene değerlendirmeleri ile türbin kanat ömrünü tahmin etmek için bir regresyon modeli sunulmaktadır. Türbin kanat ömürlerinin doğru ve maliyet açılarından etkili tahminleri onarımlarda etkili bir yöntem sunar ve genel performansı iyileştirir. Drone fotoğrafçılığıyla elde edilen otomatik kanat muayenesi insan hatasını azaltarak tutarlı sonuçlar verebilir. Drone ile elde edilen görüntüler işlenerek görüntü sınıflandırma yapay zeka tekniği kullanılarak otomatik olarak sınıflandırılmıştır [51].

Batmaz ve arkadaşları, 2021 yılında yaptıkları çalışmada rüzgar türbin kanatlarında yapıştırıcı ayrılma hasarının kanat yapısal bütünlüğüne olan etkisi araştırılmıştır. Kompozit rüzgar türbin kanatlarının mukavemet analizleri ve kırılma mekanizmalarını inceleyen araştırmalar bulunmaktadır. Kanatların yapısal olarak bütünlüklerine zarar veren hasarlar kabuk-spar arasındaki ya da hücum/fırar kenarındaki yapıştırıcı hasarları, sandviç panellerde olan yüzey-petek ayrılmaları, kabuk veya spar yapılarında burkulma olayı ile devamında delaminasyon, yapıştırıcı arayüzünde ayrılma hasarı, çekme gerilmesi içinde ile fiber ve basma gerilmesi içinde laminat hasarı olarak kategorilere ayrılmaktadır. Bu hasar tipleri uygulanan yüklere ve kanat geometrisine göre değişebilmektedir. ODTÜ Rüzgem'e ait beş metrelik cam elyaf takviyeli polimer rüzgar türbini kanadının sonlu elemanlar modeli simülasyona sokularak çeşitli testlere maruz bırakılmıştır. Türbin kanadının, yüksek basınç ve yük altında yapıştırıcı ayrılma hasarı incelenmiştir. Belirlenen yük altında yapıştırıcı ayrılma hasarının kanadın yapısal bütünlüğünü önemli bir miktarda etkilemediği tespit edilmiştir. Yüksek basınç arayüzünde oluşan yapıştırıcı ayrılma hasarının kanadın yapısal bütünlüğüne önemli bir etkisi olmazken kompozit katmanlar arasında ise bir delaminasyon olduğu gözlemlenmiştir [52].

Yılmaz tarafından 2024 yılında yatay eksenli, üç kanatlı, yunulama açısı kontrollü, 4,8MW gücündeki rüzgar türbininde yapay zeka aracılığıyla bir arıza tespit çalışması yapılmıştır. Rüzgar türbin sistemlerinden alınan veriler, yapay sinir ağları kullanılarak eğitilmiştir. Çalışmada rüzgar türbininde oluşan arızalar sınıflandırılarak, arızaların meydana geldiği bölümlerin jeneratör, göbek, kanatlar ve elektrik sistemi olduğuna değinilmiştir. Türbinden elde edilen veriler yapay sinir ağları ile kullanılarak dokuz farklı arıza senaryosunda arıza tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmada rüzgar türbin sisteminin arızalı olup olmadığı belirlenmiştir [53].

Genç ve arkadaşları tarafından yapılan 2023 yılındaki çalışmada, rüzgar türbini temellerinde sık karşılaşılan yapısal problemler incelenerek kule–temel bağlantısı hasar mekanizmasının arızası irdelenmiştir. Karasal rüzgar türbinlerinin bağlantıları, gömülü halka, ankraj kafesi ve adaptör(hibrit) bağlantısıdır. Gömülü-halka olan rüzgar türbin temel bağlantısında, kule ve temel arasındaki yük aktarımı kesintisiz olarak sağlanması için kule ve temel arasında bir bağlantı oluşturmak gerekmektedir. Kule temel bağlantıları, yükleri taşıyan temele ileten bir bağlantı birimi olduğundan dolayı burada ortaya çıkabilecek hasar büyük bir probleme neden olabilir. Türkiye ve dünyada hali hazırda kullanılmakta olan karasal rüzgar türbin temellerinin birçoğu eski tip model olarak ifade edilen gömülü halka bağlantı şekline sahiptir. Karasal rüzgar

türbin temellerinde bir çok sebepten çatlak olabilmektedir. Bu sorun düzgün tasarım, uygun malzeme seçimi gibi iyileştirmelerle ile en aza indirgenebilir. Rüzgar türbin temelinde oluşan ufak boyuttaki çatlaklar veya hasarlar zamanla büyüyerek kulenin göçmesine sebep olabilir. Bu sebeple temelde oluşan çatlaklar ve bu çatlakların yayılımı rüzgar türbininin dinamik tepkisini değiştiren faktörlerdir. Mevcutta bulunan rüzgar temellerinin birçoğu eski tip bağlantı noktasına sahiptir. Bu temel sistemlerinin durumunun belirlenmesi ve yapısal olarak uygun bir yöntemle iyileştirilmesi Yapı Sağlığı İzlenmesi (YSİ) ile izlenebilmektedir. Rüzgar türbin kulesine konan deplasman ölçerler ile kuleye bir uyarı sistemi konur ve kulenin yapısal durumu hakkında bilgi alınabilmektedir. Bu uyarı sistemi üç seviyeye sahiptir; kule 1-3 mm arasında düşey deplasman yapıyorsa kulede olumsuz bir durum olmadığı, 3-5 mm arasında düşey deplasman durumunda ise kulede detaylı olarak bir inceleme gerektiği, 5 mm'den fazla düşey deplasman durumunda ise detaylı bir inceleme ile birlikte güçlendirme çalışması gerektiği anlaşılmaktadır. Büyük yapısal kusurları bulunan rüzgar türbinlerinde hasarın onarımı mümkün olmadığı için türbinlerde YSİ önemli bir mekanizmadır. Böylece rüzgar türbinlerinde hasar tespit edilip gerekli güçlendirmeler yapılabilir [54].

Emeksiz ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde karşılaşılan arızaları inceleyerek, uygulanan prognostik yaklaşımları ele almışlardır. Rüzgar türbinlerinin en yaygın arıza bileşenleri kanatlar, generatör, yaw sistemi, dişli kutusu gibi elemanları ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen arızalar ekstra bakım maliyetlerine ve tasarımlarda önlem alıcı yaklaşımlara sebep olmaktadır. Rüzgar türbini kanatlarında rotor dengesizliği, korozyon gibi hasarlar olabileceği gibi kanadın kalıptan çıkarılması, yüklenmesi, taşınması sırasında bağlantı noktalarında oluşan hasarlar da oluşabilmektedir. İklim koşulları ve aerodinamik yükler bu durumu daha da tetiklemektedir. Arıza teşhisi için kullanılan prognostik yöntemler bulunmaktadır. Prognostik bir mühendislik sisteminin veya ekipmanlarının gelecekteki durumlarını yeterince güvenilir ve doğru tahmin edebilmesi anlamına gelmektedir. Kanat arıza teşhisinde titreşim bazlı takip yöntemleri hareketli sistemlerde durum izleme için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan ve durağan sinyallerle çalışmak ve durum analizlerini yapabilmek için zaman-frekans analiz yöntemi dalgacık dönüşümü, deneysel mod ayrıştırma ve Wigner-Ville dağılımı yöntemi tercih edilmektedir. Deneysel mod ayrıştırma yöntemi rüzgar türbin kanatlarında meydana gelen çatlakların teşhisinde daha uygundur. Yapısal takip sistemleri ile uzun olan rüzgar türbini kanatlarını takip etmek için çevrim içi sensörler kullanılmaktadır. Akustik emisyon takibi ve zorlanma takibi yöntemleri ile de rüzgar türbin kanatları izlenmektedir [55].

Atmaca tarafından 2005 yılında yapılan çalışmada, örme kumaşların üretim sırasındaki ortaya çıkan hataların görüntü işleme yöntemleri ile tespit edilmesi ve sınıflandırılması yapılmıştır. Kumaştaki hatanın periyodik yapıyı bozacağı için Fourier Spektrumu'nda ortaya çıkması beklenir. Fourier dönüşümüyle elde edilen bu veriler yapay sinir ağları ve bulanık mantık yöntemleri ile kumaş hataları sınıflandırılmıştır [56].

Neccaroğlu tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, rüzgar enerji santallerinin kurulumunda önemli olan yüzey pürüzlülük parametresinin tespit edilmesi için sayısal görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Rüzgar santrallerinin kurulacağı alanlar için baskın rüzgar yönünü referans almak gerekmektedir. Türbinlerin kurulacağı arazide en az 1 yıl boyunca ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu ölçümlerin yanında arazinin eğimi, büyüklüğü, bitki örtüsü, yerleşim yerlerine olan uzaklığı ve arazi pürüzlülüğü önemli olan konulardır. Arazi içinde yüksek yapılaşma veya bitki örtüsü bulunuyorsa rüzgar profilini etkileyen en önemli nokta arazi pürüzlülüğü olacaktır. Bitki örtüsü çeşitleri, bulunan yapıların yükseklikleri ve sıklığı rüzgar akışı yönünü farklı bir şekilde etkileyebilir. Bu farklılıklar pürüzlülük uzunluk birimi ile hesaplanabilmektedir. Arazi için yüzey pürüzlülük parametresi WAsP yazılımı ile gerçekleştirilir ve bunu gerçekleştirmek için arazide yapılan gözlemler ile edinilen bilgiler kullanılır ancak bu bilgiler her zaman gerçek arazi bütününe yansıtmamaktadır.

Yapılan çalışmada rüzgar enerji santrali kurulumu için yüzey pürüzlülük haritası bölgeye ait güncel hava fotoğrafları kullanılarak görüntü işleme teknikleri ile belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük haritasının belirlenmesinde çalışmalar üç farklı algoritma ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ise ERDAS Imagine yazılımı kullanılarak gerçeğe uygunluğu değerlendirilmiştir [57].

Uçar tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, silindirik cisimlerin görüntü işleme ile hata tespiti yapılmıştır. Yapılan çalışmada silindirik yapıda olan metal cisimlerin üretim hatalarını bulmak ve biçimsel ölçülerini yapmak için bir kamera düzeneği ile görüntü işleme yazılımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen görüntüler 2B olmasına rağmen döndürme yolu ile 3B olarak hatalar tespit edilebilmektedir. Böylece cisimler kendi eksenleri etrafında tam tur döndürülerek görüntüleri alınmış ve kontrolü ve ölçümü yapılacak olan cisim 60° aralıklarla döndürülmüş ve altı adet görüntü elde edilmiştir. Sabit bir boyut ve şekle sahip cisimlerin farklı boyut ve şekillere sahip cisimlere göre ölçümlerinin yapılması daha kolaydır. Bu nedenle, değişken boyutlar ve şekiller için kullanılan parametreler de değiştirilmelidir. Geliştirilen arayüz ile

kullanıcı parça numarasını belirttiğinde ölçümlerini kolay bir biçimde gerçekleştirebilmektedir. Kullanıcı parçalara numaralar vererek oluşturmaktadır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak silindirik cisimleri ölçümleri ve üretimde oluşan hatalar belirlenmiştir. Silindirik cisimlerin görüntülerini almak için 2 adet servo motora sahip kamera tasarlanmıştır. Alınan görüntüler MATLAB programı üzerinde ölçümler yapılmış morfolojik işlem ve filtreler ile kenar ve köşe belirlemesi yapılmıştır. Böylece görüntüler üzerindeki eğrilikle, açı ölçümü, kenar uzunluğunun bulunması, kalibrasyon gibi bir arayüz elde edilmiştir [58].

Bayram tarafından 2019 yılında metal sektöründe görüntü işleme tabanlı bir kusurlu ürün tespit sistemi yapılmıştır. Sac kesim işlemlerinde operatör kaynaklı hataları azaltmak ve ürünlerdeki hata tespit kontrollerinin hassas bir şekilde yapılmasını sağlamak için görüntü işleme yöntemleriyle bir kusurlu veya hatalı ürün tespit sistemi gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme tekniklerinden olan morfolojik işlemler ve hough dönüşümü ile ürünlerdeki hata tespit başarımları karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Yapılan deneyler ile %80 üzerinde bir başarı olduğu görülmüştür. Sonraki aşamada gömülü sistem olan Raspberry Pi Model 3 B+ seçilmiş ve ilk aşamada kullanılan yöntem olan dairesel Hough dönüşümü seçilerek farklı kamera çözünürlüklerinin başarıma etkileri incelenmiştir. Ürün olarak dairesel boşluklar içeren sac levhalar belirlenmiştir. Dairesel boşluklara ait bilgiler görüntü işleme yöntemleri ile belirlenmiştir [59].

Dere 2023 yılında yapmış olduğu çalışmada, görüntü işleme tekniklerini kullanarak porselen izalatörlerde kusur tespiti yapmıştır. İzalatörler dağıtım merkezleri, şalt sahaları, enerji nakil hatları gibi yerlerde bulunan iletkenleri yalıtın ve taşıyan bileşenlerdir. İzalatörlerin delinmesi veya çatlama sonucu bir kaçak meydana gelmesi ile izalatör görevini yerine getiremez. İzalatörler iletkenler ile kar, buz, rüzgar gibi yüklerde izalatörleri etkileyebilmektedir. İzalatörler imal edilirken bu gibi tüm faktörler hesaba katılması gerekmektedir. Hasarlı izalatörler ile oluşan kısmi deşarjlardan dolayı yıldırıma karşı dayanım düşebilir, kısa devre ve kaçak akım gibi sonuçlar oluşturarak enerji nakil hatlarında istenmeyen enerji kesintilerine yol açmaktadır. Bu sebeple izalatörlerdeki hasarların kısa sürede tespit edilmesi gerekmektedir.

Dere tarafından yapılan tez çalışmasında elde edilen görüntülerden oluşturulan bir veri setine görüntü işleme teknikleri uygulanarak izalatör yüzeyindeki hasarın tespit edilmesi

gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme uygulamaları MATLAB programı üzerinden yapılmıştır. Görüntüyü iyileştirme, keskinleştirme, filtreme, belirginleştirme gibi uygulamalar görüntülere uygulanmıştır. İzalatör yüzey hasarlarının insan gözüyle fark edilmemesi durumunda görüntü işleme ile çatlak ve kırıkların belirginleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. İzalatör üzerinde istenilen bölge açığa çıkarılarak hasar tespiti için uygun hale getirilmiştir. Elde edilen bu görüntüler görüntü işleme sonucu elde edilen veriler ile veri seti oluşturulup destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, derin öğrenme ile sınıflandırılarak her eğitimin başarı yüzdesi elde edilmiştir. Destek vek makineleri, yapay sinir ağları ve derin öğrenme yöntemleri ile gerçekleştirilen sınıflandırma sonucu test doğruluk yüzdeleri karşılaştırılıp gerekli olan çıkarımlar yapılmıştır [60].

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ise Dere tarafından 2023 yılında gerçekleştirilen çalışmadan farklı olarak, rüzgar türbin kanatlarının hasarlı olup olmadığı belirlendikten sonra hasarlı olan bölgenin alan hesaplaması yapılmıştır. Hasarlı olan bölge konturlanıp ön plana çıkarılarak hasar alanı hesaplanmıştır. Ayrıca, belirlenen hasarlı alanın onarılabilmesi için gerekli olan adımlar listelenmiştir. Hasarlı türbin kanat görüntülerinde hasarın yüzeysel ve yapısal durumuna bakılarak işlem adımları belirlenmiştir. İşlem adımlarında gerekli olan malzeme türleri ile hasarlı olan yerlere kullanılabilecek dolgu malzemeleri de belirlenmiştir.



BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında, rüzgar türbini kanat hasarlarını tespit etme sürecinde kullanılacak görüntüler Rass Wind Enerjiden izin alınarak kullanılmıştır. Temin edilen bu görüntülere hasarların ön plana çıkarılması için belirli işlemler uygulanmıştır. Görüntü işleme tekniklerinde, görüntüler öncelikle gri seviye dönüşümü ve filtreleme gibi ön işleme adımlarından geçirilir. Ön işleme tabi tutulan görüntülere, işlem amacına bağlı olarak kenar belirleme, morfolojik işlemler, eşikleme ve histogram eşitleme gibi çeşitli teknikler uygulanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, rüzgar türbini kanatlarının hasarlı olup olmadığını tespit edebilmek amacıyla derin öğrenme tabanlı bir model kullanılarak, görüntüler "hasarlı" ve "hasarsız" olarak sınıflandırılmıştır. Kanadın hasarlı olduğu belirlendikten sonra, ilgili bölgenin alanı görüntü üzerinden hesaplanmaktadır.

Rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespiti sürecinde kullanılan algoritmaya ait akış diyagramı, Şekil 3.1’de adım adım sunulmaktadır.



Şekil 3.1 Rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespiti için kullanılan algoritma.

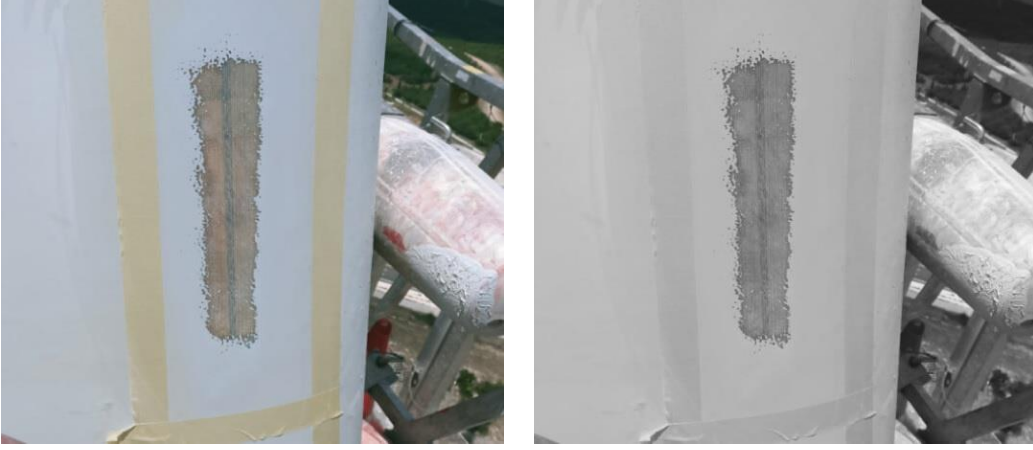
3.1 GRİ SEVİYEYE DÖNÜŞTÜRME

Görüntülerde her bir renk 8 bitten oluşmaktadır. Üç temel rengi ifade eden RGB (Red, Green, Blue) kodları tüm renklerin oluşturulduğu bir ışık uzayıdır. Gri seviyedeki görüntüler ise gri, beyaz ve siyah renklerinden oluşmaktadır. Grileştirme işlemi için Eşitlik 3.1 kullanılarak renkli görüntüler gri seviyeye dönüştürülmektedir.

$$Gri\ seviye = 0.2989 * R + 0.5870 * G + 0.1140 * B \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de kırmızı (R) bileşeni 0.2989 ağırlığında, yeşil (G) bileşeni 0.5870 ağırlığında, mavi (B) bileşeni 0.1140 ağırlığında kullanılır.

Şekil 3.2’de RGB olan görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesi işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.2 Yüzey hasarlı görüntünün gri seviyeye dönüştürülmesi.

3.2 FİLTRELEME

Görüntü üzerindeki istenmeyen noktaların veya gürültülerin giderilmesi amacıyla filtreleme işlemleri uygulanmaktadır. Filtreleme işlemleri; keskinleştirme, yumuşatma ve bulanıklaştırma gibi çeşitli türlere ayrılmaktadır. Özellikle bulanıklaştırma işlemlerinde, integral fonksiyonları kullanılmaktadır.

Yumuşatma işlemi, görüntü üzerindeki gürültüleri azaltarak daha düzgün bir yapı elde edilmesini sağlar; ancak bu işlem sonucunda görüntüde bulanıklaşma meydana gelebilir. Yumuşatma filtreleri yardımıyla görüntüdeki istenmeyen detaylar ve parazitler etkin bir şekilde giderilebilmektedir.

Ortalama(mean) ve Gauss en yaygın kullanılan yumuşatma filtreleridir. Gauss(Gaussian) filtresi, ortalama filtresinden farklı olarak komşu piksellere Gaussian dağılımına göre ağırlıklar verir. Böylece uzak olan komşuların etkisi azalır ve daha doğal bir bulanıklaştırma işlemi sağlanır. Bulanıklaştırma işleminde Eşitlik 3.2 ile verilen Gauss filtresi kullanılarak filtreleme işlemi yapılmaktadır.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2’de $G(x,y)$ bulanıklaştırılmış piksel değeri, σ , Gaussian dağılımının standart sapması, x,y pikselin merkeze olan uzaklıklarını göstermektedir.

Şekil 3.3’te çatlak bölgeye bulanıklaştırma işlemi uygulanmıştır. Görüntü üzerinde gerçekleştirilen bulanıklaştırma filtresi ile arka kenardaki çatlamaya bulanıklaştırma işlemi uygulanmıştır. Hasarlı bölgelerin görüntü üzerinde daha belirsiz hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, filtreleme işlemleri arasında yer alan keskinleştirme yöntemi, bu tez çalışması kapsamında daha etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır [60]. Şekil 3.4’te ise görüntüdeki hasarlı alanı keskinleştirme filtresi(Sharpening) uygulanarak arka kenar hasarı daha belirgin hale getirilmiştir.



Şekil 3.3 Yumuşatma filtresi uygulanmış arka kenar çatlaması [6].



Şekil 3.4 Keskinleştirme filtresi uygulanmış arka kenar çatlaması [6].

Şekil 3.5'te Rass Wind Enerji'den alınan bir türbin kanadının görüntüsüne keskinleştirme filtresi uygulanmıştır. Uygulanan keskinleştirme filtresi ile görüntüdeki hasar daha belirgin hale getirilmiştir.



Şekil 3.5 Keskinleştirme filtresi.

Keskinleştirme filtresi, bir görüntüdeki kenarları ve detayları vurgulamak için kullanılan bir konvolüsyon işlemidir. Bu işlem genellikle bir kernel (çekirdek matris) ile görüntünün konvolüsyonundan oluşur. Bu filtre, merkez pikselin değerini güçlendirirken komşu pikselleri bastırır. Böylece kenarlar daha belirgin hale gelir.

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Bu çekirdekler, görüntü üzerine konvolüsyon yöntemiyle uygulanarak yeni bir görüntü oluşturur. Matematiksel olarak bir piksel üzerindeki yeni değer Eşitlik 3.4 ile hesaplanır.

$$G(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 K(m, n) * I(i + m, j + n) \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'te $G(i, j)$ keskinleştirilmiş görüntüdeki piksel değeri, $I(i, j)$ orijinal görüntüdeki piksel değeri, $K(m, n)$ keskinleştirme çekirdeğidir [61-62].

3.3 KENAR BELİRLEME

Kenar belirleme, görüntüde ani parlaklık değişimlerini tespit ederek nesnelerin sınırlarını ortaya çıkaran temel görüntü işleme tekniklerinden biridir. Rüzgar türbin kanat hasarlarını tespit gibi uygulamalarda kenar belirleme tekniği çatlaklar, çizikler gibi hasarları belirginleştirmek için oldukça önemlidir.

Kenar belirleme yöntemleri;

- Sobel Filtresi
 - X ve Y yönlerinde türev alarak kenarları belirleme işlemini yapar.
 - Gürültüye karşı hassastır ama hızlıdır.
- Prewitt Filtresi
 - Sobele benzer ama ağırlıklandırma faktörü yoktur.
 - Gürültüye biraz daha hassastır.
- Laplacian Filtresi
 - İkinci türev yöntemi kullanılarak kenar belirleme işlemi yapılır.
 - Görüntüdeki gürültüyü arttırabilir.
 - Çatlaklar gibi ince olan detayları ortaya daha iyi çıkarabilir.
- Canny Kenar Algoritması
 - Gürültüye daha dayanıklıdır ve hassas kenar tespiti için kullanılır.
 - Rüzgar türbin kanatlarında hasarların tespitinde en etkili yöntemlerinden biridir.

Yapılan tez çalışmasında, Canny ve Laplacian kenar belirleme yöntemleri kullanılarak görüntülerdeki hasarlar belirlenmiştir.

Canny kenar belirleme algoritması, kenarları belirlemek için çok aşamadan oluşan bir görüntü işleme tekniğidir. Canny algoritması, kenar tespitinden önce görüntüdeki gürültüyü azaltmak için bir Gauss filtresi uygular. Orjinal görüntü $I(x, y)$ ile Gauss filtresi $G(x, y)$ arasında konvolüsyon işlemi uygulanarak elde edilir.

$$I_s(x, y) = G(x, y) * I(x, y) \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5'te $G(x,y)$ Eşitlik 3.2'deki Gauss filtresidir. $I_s(x,y)$ ise filtrelenmiş görüntüyü ifade etmektedir. $I_s(x,y)$ Gaussian filtresi uygulanmış ve gürültüsü azaltılmış görüntüdür.

Canny algoritması, gradyan hesaplayarak yatay ve dikey kenar dağışimlerini belirlemek için kullanılır. Görüntünün x ve y yönlerindeki türevleri Eşitlik 3.6a ve 3.6b ile hesaplanmaktadır:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_s(x,y) \quad (3.6a)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_s(x,y) \quad (3.6b)$$

Eşitlik 3.6a ve 3.6b'de $G_x(x,y)$ x yönündeki gradyan – yatay kenarlardır. Görüntünün x eksenini boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir. $G_y(x,y)$ y yönündeki (gradyan, dikey) kenarlardır. Görüntünün y eksenini boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir.

Gradyan büyüklüğü – kenar kuvveti ise Eşitlik 3.7 ile hesaplanmaktadır.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3.7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'de $\theta(x,y)$ gradyan açısı, kenar yönünü ifade etmektedir.

Kenarı daha belirgin hale getirmek için maksimum olmayan değerler kaldırılarak kenar inceltilmesi uygulanır. Canny kenar belirlemenin son aşaması olarak güçlü kenarların ayırt edilebilmesi amacıyla iki eşik değeri belirlenlenmektedir.

$$\text{Eğer } G(x,y) > T_{high} = \text{Kesin Kenar} \quad (3.9a)$$

$$\text{Eğer } T_{low} < G(x,y) < T_{high} = \text{Zayıf Kenar} \quad (3.9b)$$

$$\text{Eğer } G(x,y) < T_{low} = \text{Kenar değil} \quad (3.9c)$$

Laplacian kenar belirleme işlemi, ikinci türev tabanlı bir yöntemdir ve bir görüntüdeki ani yoğunluk değişimlerini (kenarları) belirlemek için kullanılır. Sürekli uzayda matematiksel olarak laplacian operatörü, bir skaler fonksiyonun (görüntüdeki yoğunluk gibi) ikinci türevlerinin toplamıdır.

$$\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3.10)$$

Eşitlik 3.10'da $f(x,y)$, görüntüdeki piksel yoğunluğunu ifade eder.

Ayrık (Discrete) uzayda laplacian operatöründe görüntü işleme uygulamalarında bu sürekli türev ifadelerinde ayrık bir konvolüsyon çekirdeği (kernel) ile yaklaşık olarak uygulanır. En sık kullanılan laplacian çekirdeği Eşitlik 3.11a'da gösterilmiştir.

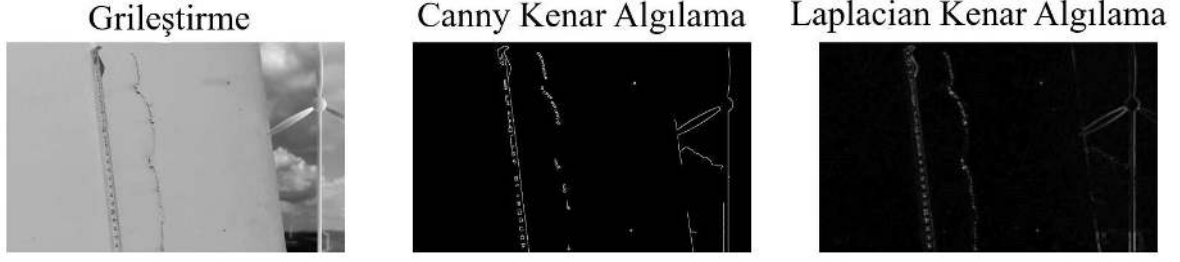
$$K = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11a)$$

$$G(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 K(m, n) * I(i + m, j + n) \quad (3.11b)$$

Eşitlik 3.11b'de $I(i,j)$ orijinal görüntüdeki piksel, $G(i,j)$ laplacian filtresi uygulanmış yeni değer, K laplacian çekirdeğini ifade eder.

Dijital görüntülerde sürekli fonksiyonlar yerine piksel matrisleri ile çalışıldığı için türev işlemleride farklılık (difference) yaklaşımlarıyla hesaplanır. İkinci türev hesaplanırken karmaşık işlemleri sadeleştirmek için hazır konvolüsyon çekirdekleri(kernel) tanımlanır. Laplacian çekirdeği ikinci türevin karşılığıdır. Canny birinci türev tabanlı, laplacian ise doğrudan ikinci türev tabanlıdır.

Şekil 3.6'da Canny ve Laplacian kenar belirleme teknikleri kullanılmıştır. Canny kenar algılama tekniği ile türbin kanat yüzeyindeki çatlaklar ve kenarlar daha belirgin hale getirilmiştir. Laplacian kenar algılama ile daha ince detaylar yakalanmıştır [61, 63-65].



Şekil 3.6 Kanat yüzey hasarına uygulanan kenar belirleme işlemi.

3.4 EŞİKLEME

Eşikleme (Thresholding), nesneleri arka plandan ayırmak için kullanılan bir işlemdir. En basit bölütleme (segmentation) yöntemidir. Bu işlemi kullanarak nesneleri arka plandan ayırmada en basit yol histogramdan göreceli olarak belirlenen bir T eşik değeri ile görüntüde piksel değerlerini karşılaştırmaktır. Görüntüdeki herhangi bir (i,j) pikseli için; $f(i,j) > T$ ise (i,j) pikseli nesneye ait bir nokta $f(i,j) \leq T$ ise (i,j) arka plan olarak kalacaktır.

Temel Eşikleme Yöntemleri (Global Binarization Methods) ve Yerel Uygulamalı Eşikleme Yöntemleri (Locally Adaptive Binarization Methods) olmak üzere iki temel eşikleme yöntemi bulunmaktadır. RGB görüntüler üç katmandan oluşmaktadır, bundan dolayı görüntüler gri seviyeye dönüştürülerek tek katmanlı hale getirilir. Üç renk katmanından oluşan RGB görüntülerde eşikleme işlemi yapılabilir ancak görüntünün her bir katmanı için bir eşik değeri belirlenmelidir. Gri seviyeli görüntüler için ise tek katmanı bulunduğu için bir adet eşik değeri belirlemek yeterlidir. Seçilecek eşik değeri görüntüden görüntüye değişeceği için bu değer belirlenmesinde birkaç yöntem bulunmaktadır. Histogramlar sayesinde eşik değeri deneme yanılma yöntemi kullanılarak seçilebilir, otsu eşikleme ya da adaptive eşikleme yöntemi kullanılarak farklı eşik değerleri ile istenilen görüntü elde edilebilir. Eşitlik 3.12’de verildiği gibi tüm görüntüye tek bir eşik değeri (threshold) uygulanarak eşik değerinden daha düşük olan değerler siyah olarak, eşik değerinden daha büyük olan değerler beyaz olarak görüntülenecektir [60, 66].

$$g(x,y)=\begin{cases} 255, & f(x,y) > T \\ 0, & f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (3.12)$$

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere, eşikleme işlemi ile Rass Wind Enerjiden alınan hasarlı kanat yüzeyine eşikleme uygulanmıştır. Tüm görüntüye tek bir eşik değeri (T) uygulanır. Eğer bir pikselin değeri T’den büyükse beyaz (255), küçükse siyah (0) yapılır.

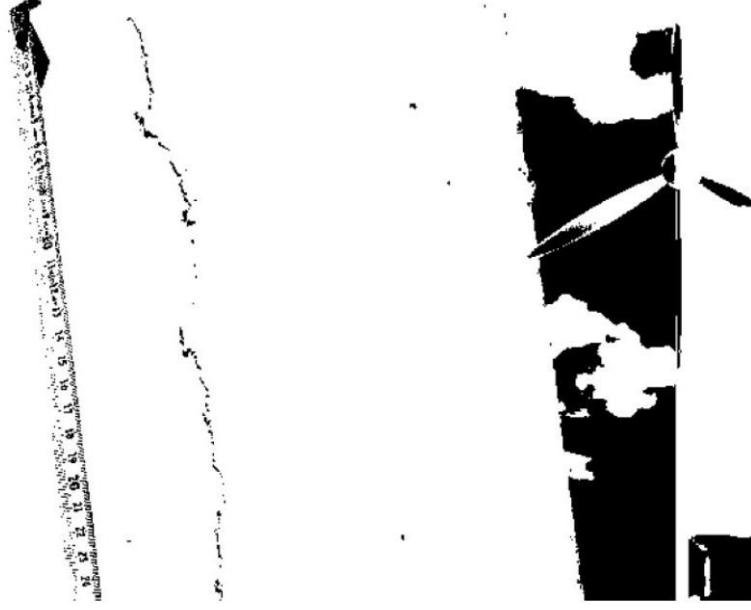


Şekil 3.7 Görüntüye eşikleme uygulaması.

Görüntüye temel eşikleme uygulanmış ve $T=127$ seçilmiştir. Belirlenen bu eşik değeri ile piksel değeri 127’den büyük olanlar beyaz (255), küçük olanlar siyah (0) haline dönüşmüştür. İşlem sonucunda çatlaklar daha da belirginleşerek arka plandaki önemsiz detaylar kaybolmuştur.

Şekil 3.8’de kullanılan görüntüye Otsu eşikleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, tüm görüntü için otomatik olarak tek bir eşik değeri seçilerek binarizasyon yapılmıştır. Otsu yöntemiyle otomatik seçilen eşik değeri 166 olarak hesaplanmıştır. Bu değer görüntüde arka plan ve nesne (örneğin çatlak) ayrımını en iyi yapacak gri seviye eşik olarak belirlenmiştir.

Otsu Eşikleme



Şekil 3.8 Otsu eşikleme uygulaması.

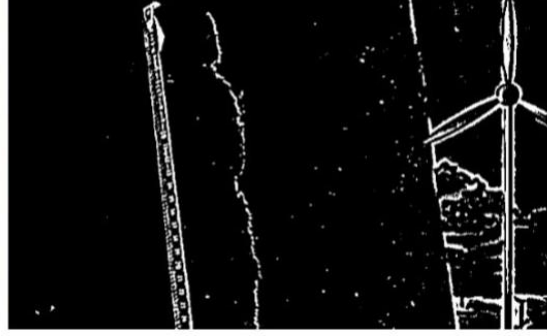
Otsu eşikleme uygulaması küresel (global) bir yöntemdir. Tüm görüntü için tek bir eşik değeri belirler. Piksel yoğunluk histogramını analiz ederek sınıflar arası varyansı maksimize eden ideal eşik değerini otomatik bulur. Adaptif eşikleme ise yerel (local) bir yöntemdir. Görüntüyü küçük parçalara (örneğin 11*11 bloklar) böler, her blok için farklı bir eşik değeri hesaplar. Özellikle ışık koşulları eşit olmayan görüntülerde tercih edilir [67].

Şekil 3.9’da hasarlı olan görüntüye Gaussian tabanlı adaptif eşikleme uygulanmıştır. Bu yöntem görüntüdeki yerel parlaklık değişimlerine duyarlı olduğu için çatlak gibi ince detayları başarı bir şekilde ortaya çıkarmaktadır.

Orijinal Görüntü



Adaptif Eşikleme



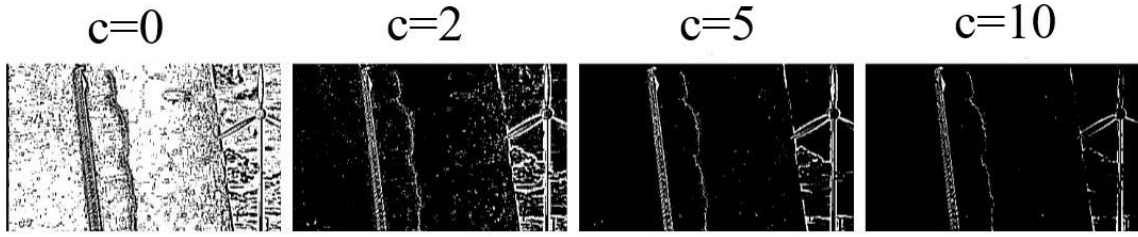
Şekil 3.9 Adaptif eşikleme uygulaması.

Adaptif işikleme yönteminde, klasik sabit bir eşik değeri yerine her bir pikselin komşuluk bölgesine göre dinamik bir eşik değeri hesaplanır. Bu nedenle tek bir eşik değeri yerine, her piksel için farklı bir değer belirlenir. Adaptive eşikleme yönteminde her bir piksel için eşik değeri, o pikselin çevresindeki küçük bir bölge (örneğin 11*11 komşuluk alanı) üzerinden hesaplanır. Bu hesaplama, ortam değeri olan(mean veya gaussian mean) bir pikselin çevresindeki küçük bir alanın parlaklık değeri ile c sabiti gibi iki temel bileşene dayanır.

$$Eşik = Ortam Değeri - c \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13'te c sabiti hesaplanan ortam değerinden çıkarılan sabittir. Bu sabit sayesinde eşik değeri biraz daha düşürülür veya yükseltilir. C sabitindeki amaç parazitleri baskılamak veya çatlak gibi ince detayların daha net çıkmasını sağlamaktır. Şekil 3.8'de her piksel için eşik değeri, çevresindeki 11*11 komşuluk penceresinde ortalama parlaklık değerinden 2 çıkarılarak belirlenmiştir.

Şekil 3.10'da farklı c değerleriyle uygulanan adaptif eşikleme çıktıları bulunmaktadır. Görüntüdeki çatlak değerlerini en net şekilde ortaya çıkaran c değeri genellikle görselin kontrastına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.10 Adaptif eşik uygulamasında farklı sabit değerleri.

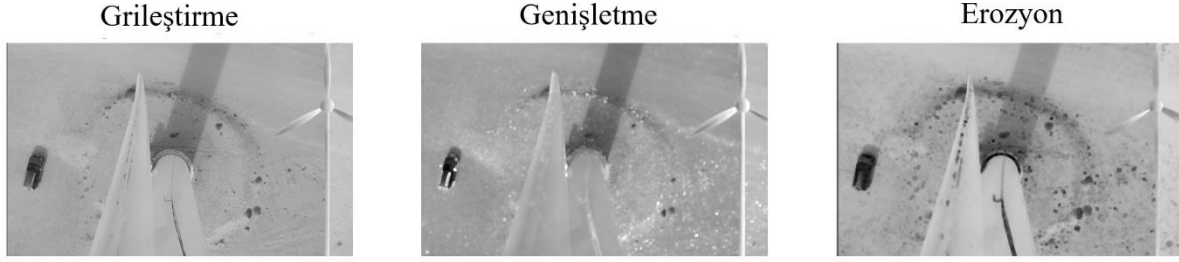
Uygulanan c değeri yerel ortalama değerden çıkarılan sabittir ve eşik değerini aşağı çekmektedir.

- $C=0$: Çok fazla detay ve gürültü oluşmaktadır.
- $C=5$: Genellikle dengeli sonuç verir.
- $C=10$: Daha az detay, daha kalın konturlar olur [67-68].

3.5 MORFOLOJİK İŞLEMLER

Morfolojik işlemler bilgisayarla görme ve özellikle görüntü işlemede kullanılan nesnelerin yapısal özelliklerini incelemek, iyileştirmek veya amacına göre değiştirmek için kullanılan matematiksel işlemler bütünüdür. Gri seviyeli görüntülere uygulanabileceği gibi genel olarak ikili görüntülere uygulanmaktadır. Temel morfolojik işlemleri incelersek iki adet morfolojik işlem bulunmaktadır. Erozyon işlemi (erosion) veya aşındırma işlemi görüntüdeki nesneleri küçülterek ince detayları ortadan kaldırır. Böylece gürültüler temizlenmiş olur. Genişletme (dilation) nesneleri büyütmek görüntüde istenmeyen boşlukları doldurmak için kullanılmaktadır. Erozyon işleminin tersi olup görüntüdeki nesne kenarlarını genişletir.

Şekil 3.11’ de görüntü üzerinde Genişletme (Dilation) ve Erozyon (Erosion) gibi temel işlemler uygulanmıştır. Görüntü önce gri seviyeye çekilerek genişletme ve erozyon işlemleri yapılmıştır. Yapılan uygulamada morfolojik işlemleri uygulamak için kernel (yapılandırma elemanı) kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Görüntüye uygulanan morfolojik işlemler.

Erozyon ve genişletme gibi morfolojik işlemleri yaparken kullanılan küçük bir matrisdir. Genel olarak dikdörtgen ve kare şeklindedir ve işlem sırasında hareket ettirilerek belirli pikselleri değiştirmeye yarayan bir araçtır. Kullanılan kernel matrisi 5*5 boyutunda tamamen 1'lerden oluşan bir matrisdir. Daha büyük boyutta (örneğin 7*7) matris seçilmemesinin nedeni büyük matris daha agresif işlem yaparak küçük detayları yok eder. Küçük kernel (örneğin 3*3) ise daha az etkili olabilir nedeniyle 5*5 bir matris seçilmiştir. Genişletme işleminde bu kernel beyaz (parlak) bölgeleri genişletilerek küçük boşlukları kapatır. Erozyon işleminde ise beyaz (parlak) alanları anca aşındırarak ince çizgileri ve küçük detayları ortadan kaldırır.

Kullanılan kernel matrisi Eşitlik 3.14'te verilmiştir.

$$\text{Kernel} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.14'te kullanılan kernel ile morfolojik işlemler sırasında görüntüdeki pikseller üzerinde 5*5'lik bir bölgeyi etkiler. Dilation işleminde beyaz bölgeleri büyütme işlemi yaparken erosion işleminde beyaz bölgeleri küçültme işlemi yapmaktadır.

Genişletme işleminde görüntüde boşluklar doldurulmuş olup hasarlar ortadan kalktığı için yapılan çalışma için uygun olmadığı görülmektedir. Bu tez çalışmasında hasarlı bölgeler daha belirginleştikten erozyon işleminin daha kullanışlı bir yöntem olduğu görülmektedir.

Verilen bir ikili görüntü A ve yapısal eleman B için erozyon işlemi eşitlik 3.15'te verilmiştir.

$$A \ominus B = \{z \in E \mid B_z \subseteq A\} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15'te A, görüntüdeki beyaz (1) piksellerin kümesi, B, yapısal eleman (structuring element), B_z , yapısal elemanın z konumuna kaydırılmış hali, $A \ominus B$, erozyon sonucu oluşan piksel kümesini ifade etmektedir. $\subseteq$, yapısal elemanın tüm pikselleri görüntüde "1" olan alana tam olarak oturmalıdır.

Verilen bir ikili görüntü A ve yapısal eleman B için dilation işlemi Eşitlik 3.16'da verilmiştir.

$$A \oplus B = \{z \in E \mid (B^I)_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (3.16)$$

Eşitlik 3.16'da B^I , yapısal elemanın orijine göre yansıması, $(B^I)_z$, B^I 'nin z konumuna kaydırılmış hali, $A \oplus B$, genişleme sonucu elde edilen küme, $\cap$ kesişim işlemidir.

İkili mantık olarak erozyon her komşu piksel de 1 ise merkez piksel 1 kalır; aksi halde 0 yapılır, Dilation işleminde ise komşulardan herhangi biri 1 ise merkez piksel 1 yapılmaktadır [61, 69].

3.6 HİSTOGRAM EŞİTLEME

Histogram eşitleme, görüntünün kontrastını artırmak için kullanılan bir görüntü işleme tekniğidir. Özellikle düşük kontrastlı görüntülerde detayları daha iyi bir şekilde ortaya çıkarmak için kullanılır. İlk olarak görüntünün histogramı oluşturularak piksel yoğunluklarının dağılımı hesaplanır. Piksel değerlerinin dağılımı normalize edilerek yeni parlaklık değerleri atanır. Böylece daha dengeli bir dağılım elde edilmiş olur.

- Histogram eşitleme kontrastı arttırarak karanlık veya aydınlık bölgeleri dengeler.
- Düşük kontrastlı olan veya bulanık olan görüntülerin görsel detayları daha belirgin hale gelmesini sağlar.

Şekil 3.12’de görüntüde hasarlı olan görüntüye histogram eşitleme yöntemi kullanılmıştır. Görüntü ilk olarak gri tonlamaya çevrilmiştir, daha sonra histogram eşitleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Görüntüye histogram eşitleme yöntemi.

Renkli görüntüler rgb formatında olduğu için her kanal ayrı ayrı eşitlenmelidir. Doğrudan renkli bir görüntüye histogram eşitlemesi yapmak doğal olmayan renk değişimlerine sebep olabilir. Bu nedenle gri tonlamaya çevrilerek tek bir kanal üzerinden işlem yaparak görüntünün kontrastı arttırabilir. Rüzgar türbinindeki kanat hasarı net bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Histogram eşitleme matematiksel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. Histogram eşitleme (PDF) ile normalize edilir. Kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) alınır. Son adımda ise piksel değerleri bu dağılımla yeniden haritalanır. Verilen bir gri seviye görüntü $f(x,y)$, L farklı gri ton değerine sahip olsun (genellikle $L=256$). Olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) her gri seviye değeri için r_k (örneğin $k=0,1,\dots,L-1$) değeri eşitlik 3.17 ile tanımlanır.

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.17’de n_k , r_k gri seviyesine sahip piksel sayısı, N , toplam piksel sayısı (genellikle $n=M*N$), $p(r_k)$, r_k seviyesinin görülme olasılığı (normalized histogram) ifade etmektedir.

Kümülatif dağılım fonksiyonu (CDF) ise eşitlik 3.18 ile verilmiştir.

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p(r_j) \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.18 her gri tonunun kümülatif olasılık değerini vermektedir. Bu kümülatif dağılım, kontrastı eşitleyen dönüşüm fonksiyonudur.

Görüntüdeki her piksel r_k gri seviyesi, Eşitlik 3.19 ile yeni bir değeri dönüştürülür.

$$s'_k = (L - 1) * T(r_k) = (L - 1) * \sum_{j=0}^k p(r_j) \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19' da s'_k eşitlenmiş görüntüdeki yeni piksel değeridir (0-255 arasında) [61, 64, 70-71].

3.7 RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT HASARLARININ TESPİT EDİLMESİ

Geleneksel yöntemlerle yapılan görsel kontroller, genellikle insan gözüne ve uzman tecrübesine bağlıdır. Bu tür denetimler hem zaman alıcı hem de yüksek maliyetlidir. Ayrıca, insan hatasına açık olmaları ve bazı mikro düzeydeki hasarları tespit etmekte yetersiz kalmaları gibi dezavantajlara sahiptir.

Derin öğrenme tabanlı görüntü işleme tekniklerinin kullanılması, bu sorunlara etkin ve akıllı çözümler sunmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları, çok sayıda rüzgar türbini görüntüsünü analiz ederek, hasar belirtilerini otomatik olarak tanıyabilir ve sınıflandırabilir. Bu algoritmalar kanat yüzeyindeki ince detayları yüksek doğrulukta tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Bu sayede hasarlar erken aşamada fark edilerek bakım süreçleri planlanabilir, arıza kaynaklı üretim durmaları önlenir ve genel sistem ömrü uzatılabilir. Derin öğrenme sistemleri sayesinde uzaktan ve gerçek zamanlı denetim mümkün hale gelmekte, insan müdahalesi en aza indirgenerek iş güvenliği artmaktadır. Rüzgar türbini kanat hasarlarının derin öğrenme ile tespit edilmesi; bakım maliyetlerini azaltan, enerji üretim verimliliğini artıran ve sistem güvenliğini sağlayan yenilikçi bir yaklaşım olarak enerji sektöründe büyük önem taşımaktadır.

Rüzgar türbin kanatlarını hasarlı veya hasarsız olarak sınıflandırabilmek için bir veri seti oluşturulmuştur. Derin öğrenme yöntemi ile veri seti eğitilerek rüzgar türbin kanatları hasarlı

veya hasarsız olarak sınıflandırılması sağlanmıştır. Kullanılan MobileNetV2 model yapısı Python programlama dili ile Google Colabs üzerinden eğitilmiştir.

Derin öğrenme, insan beyninin çalışma biçiminden esinlenen yapay sinir ağlarını kullanarak verilerden temsil öğrenmeyi amaçlayan bir makine öğrenmesi alanıdır. Özellikle çok katmanlı sinir ağları (deep neural networks) sayesinde, ham veriden (örneğin ses, görüntü, ses veya metin) otomatik olarak anlamlı özellikler çıkarabilir. Bu katmanlı yapı, her bir seviyede daha soyut ve karmaşık temsillerin öğrenmesini sağlar.

Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinde genellikle özellik mühendisliği uzmanlık gerektirirken, derin öğrenme sistemleri bu özellikleri otomatik olarak öğrenebilir. Bu yönüyle, özellikle büyük veri setlerinde ve karmaşık görevlerde (örneğin görüntü tanıma, doğal dil işleme, otonom araçlar) yüksek başarı sağlamaktadır [72].

Derin öğrenme, açık kaynak kodlu kütüphanelerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte yaygınlaşmıştır. Derin öğrenmenin en çok kullanılan aracı olan TensorFlow derin sinir ağları ve makine öğrenimi uygulamalarında kullanılmak için Google tarafından geliştirilmiştir. TensorFlow anlama, keşfetme, sınıflama, öngörü alanlarında kullanılan açık kaynak kodlu bir derin öğrenme ve yapay zeka kütüphanesidir. TensorFlow veri akış grafikleri oluşturarak modeller oluşturan önemli bir araçtır. Görüntü işlemede derin öğrenme algoritmalarının kullanılması ile tezde kullanılan hasarlı ve hasarsız rüzgar türbin kanatları görüntülerinin sınıflandırılması sağlanacaktır [60].

Bu tez çalışmasında Google tarafından geliştirilmiş MobileNetV2 algoritması kullanılmıştır. MobileNetV2, özellikle mobil ve gömülü cihazlar gibi sınırlı kaynaklara sahip ortamlarda çalışmak üzere optimize edilmiş, verimli bir derin sinir ağı mimarisidir. Bu mimari yüksek doğruluk ve düşük hesaplama maliyetiyle derin öğrenme uygulamaları gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Rüzgar türbini kanatlarının hasarlı ya da hasarsız olarak sınıflandırılması gibi görsel analiz görevlerinde, hem doğruluk oranı hem de işlem verimliliği büyük önem taşımaktadır.

Tez çalışmasında MobileNetV2 kullanılmasının avantajları şunlardır:

1. Hafif ve Verimli Mimari: MobileNetV2, parametre sayısı ve hesaplama maliyeti açısından oldukça düşük bir yapıya sahiptir. Bu sayede, yüksek donanım gücü gerektirmeyen ortamlarda bile hızlı ve etkili sonuçlar alınabilir.
2. Transfer Öğrenmeye Uygunluk: MobileNetV2, önceden eğitilmiş ağırlıklarla kullanıldığında farklı veri kümelerine kolayca uyarlanabilir. Bu da küçük veri kümeleriyle çalışırken bile yüksek performans elde edilmesini sağlar.
3. Verimli Katman Yapısı (Inverted Residual ve Linear Bottleneck): Bu yapı sayesinde hem modelin derinliği artmakta hem de bilgi kaybı minimumda tutulmaktadır. Böylece model, detaylı özellikleri daha etkin bir şekilde öğrenebilir.
4. Derinlik Ayırık Evrişim Kullanımı: Bu teknik sayesinde modelin işlem yükü önemli ölçüde azaltılmıştır. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalar için büyük bir avantaj sağlar.
5. Yüksek Doğruluk / Maliyet Oranı: Geleneksel ağır mimarilere(ResNet,VGG vb.) kıyasla daha az kaynak kullanırken benzer doğruluk seviyelerine ulaşabilmesi, MobileNetV2'Yİ bu çalışma için ideal kılmıştır.

MobileNetV2, derinlik ayırık evrişim (depthwise separable convolution) kullanarak klasik CNN'lere kıyasla parametre sayısını ve işlem maliyetini önemli ölçüde azaltır. Bu da daha hızlı eğitim ve daha az donanım gereksimi anlamına gelir. Ancak çok karmaşık görevlerde veya büyük veri kümelerinde doğruluk açısından klasik, daha büyük CNN mimarilerinin (ResNet, VGG vb.) gerisinde kalmasına neden olabilir. Sonuç olarak, MobileNetV2 mimarisi, sınırlı veri setleriyle çalışabilme, düşük kaynak tüketimi ve yüksek sınıflandırma başarımı gibi avantajlarıyla bu çalışmada etkili bir çözüm sunmaktadır [73].

3.7.1 MobileNetV2 Mimarisi

MobileNetV2, geleneksel CNN katmanlarından farklı olarak yapı taşları kullanmaktadır.

1. Derinlik Ayırık Evrişim (Depthwise Seperable Convolution)

Normal evrişim katmanları, her filtreyi tüm giriş kanallarına uygular. Ancak MobileNetV2 bu işlemi ikiye ayırmaktadır.

- Derinlik Ayırık Evrişim: Her giriş kanalına ayrı ayrı filtre uygulanır.
- Noktasal Evrişim (Pointwise Convolution, 1×1 evrişim): Sonuçlar tüm kanallar arasında birleştirilir. Bu yöntem, hem parametre sayısını hem de işlem maliyetini ciddi şekilde azaltır.

2. Tersine Artık Blok (Inverted Residual Block)

Geleneksel artık bloklarda giriş geniştir ve çıkış daha dardır. MobileNetV2 ise bu yapıyı tersine çevirir.

- Giriş önce genişletilir (1×1 conv ile).
- Ardından deptwise conv uygulanır.
- Son olarak tekrar daraltılır ve doğrusal olarak çıkışa aktarılır. Bu yapı, bilgi kaybını önlerken parametreleri minimumda tutar.

3. Doğrusal Darboğaz (Linear Bottleneck)

4. Genellikle sinir ağlarında her katman sonunda bir aktivasyon fonksiyonu (örneğin ReLU) bulunur. Ancak MobileNetV2'nin çıkışında bu kullanılmaz; çünkü küçük boyutlu temsil üzerinde ReLU, bilgi kaybına neden olabilir. Bunun yerine doğrusal (linear) dönüşüm tercih edilir.

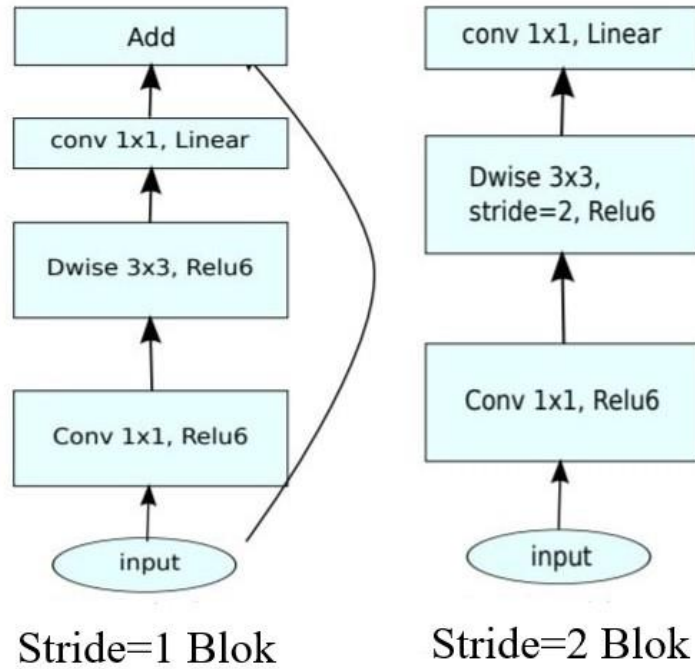
3.7.2 MobileNetV2 Mimarisi Parametrelerinin Belirlenmesi

MobileNetV2'nin bazı temel parametreleri vardır ve bu parametreler uygulama amacına ve donanım kısıtlarına göre ayarlanabilir. Mimarideki parametreler, doğruluk, hız ve donanım kapasitesi arasında dengeli bir seçim yapmayı mümkün kılmaktadır.

1. Genişlik Katsayısı (Width Multiplier, α) modelin katmanlarındaki kanal sayısını kontrol eder.
 - $\alpha=1$: Tam modeli (varsayılan) ifade eder.
 - $\alpha<1$: Daha hafif, daha hızlı ama daha az doğruluğu ifade eder.
 - $\alpha>1$: Daha büyük model, daha yüksek doğruluk ama daha fazla hesaplama demektir.
2. Giriş Boyutu (Input Resolution) görüntünün boyutu (örneğin 224×224 , 160×160) doğruluğu ve işlem süresini etkiler.
 - Daha büyük boyutlar daha fazla bilgi içermektedir ancak daha maliyetlidir.
 - Daha küçük boyutlar hız sağlar, fakat bazı detaylar kaybolabilir.
3. Genişletme Faktörü (Expansion Factor)
 - Inverted residual bloklarda, girişin kaç katına genişletileceğini belirler (6 olarak belirlenir). Bu faktör, katmanın bilgi işleme kapasitesini etkilemektedir.
4. Blok Sayısı ve Katman Derinliği

- Modelin derinliği (kaç adet blok içerdiği), görev karmaşıklığına göre belirlenir. Görüntü sınıflandırma, nesne tespiti gibi görevlerde farklı derinlikte versiyonlar kullanılabilir [73, 74].

Şekil 3.13'te verilen şema MobileNETV2'nin temel yapı taşlarını göstermektedir. Görselde, girişten çıkışa kadar olan katmanlar ve her bir katmanın işlevi belirtilmiştir. Özellikle Tersine Artık Blok yapısı ve Derinlik Ayrık Evrişim katmanları vurgulanmıştır. Bu yapı sayesinde model, düşük hesaplama maliyetiyle yüksek doğruluk elde etmektedir.



Şekil 3.13 MobileNetV2 mimarisi [75].

MobileNETV2 mimarisinde Stride=1 Blok ve Stride=2 Blok, ağdaki katmanların uzamsal çözünürlüğü(görüntü boyutu) ile nasıl çalıştığını ifade eder. Stride, bir evrişim (convolution) filtresinin giriş üzerinde ne kadar adım atarak ilerlediğini belirtmektedir.

- Stride = 1: Filtre, giriş üzerinde bir piksel kayarak ilerler. Çıktının boyutu girişe yakındır.

- Stride =2: Filtre, giriş üzerinde iki piksel kayarak ilerler. Bu uzamsal çözünürlüğü yarıya düşürmektedir. Örneğin 64*64'lük girişten 32*32'lik çıktı üretmektedir.

MobileNETV2 mimarisinde Stride=1 bloğu;

- Çözünürlüğü korumaktadır.
- Özellik çıkarımına odaklanarak görüntüden daha fazla anlamlı bilgi çıkarır.
- Genellikle art arda uygulanarak daha derin, ancak aynı boyutta (örneğin 28*28) özellik haritaları üretmektedir.

MobileNETV2 mimarisinde Stride=2 bloğu;

- Giriş görüntüsünün boyutunu yarıya indirmektedir.
- Amacı daha düşük boyutta daha anlamlı temsiller üretmektir.
- Genel olarak evrişim ağı boyunca daha ileri seviyelere geçerken kullanılır, böylece model daha soyut özellikler öğrenebilir.

Çizelge 3.1'deki bloklar, MobileNetV2'nin verimli ve derin öğrenme mimarisi oluşturken hesaplama yükünü azaltarak katmanlar arası anlamlı bilgi geçişini sağlamaktadır [73, 75].

Çizelge 3.1 MobileNetV2 mimarisi blok katmanları.

Blok Türü	Görev	Çıktı Boyutu
Stride=1 Blok	Bilgi çıkarımı(özellik koruma)	Girişle aynı
Stride=2 Blok	Çözünürlük azaltma, soyutlama	Girişin yarısı

Yapılan tez çalışmasında, rüzgar türbini kanatlarının hasarlı ve hasarsız olarak sınıflandırılması amacıyla eğitilmiş MobileNetV2 mimarisi temel alınmıştır. Oluşturulan MobileNetV2 mimarisi Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 Eğitilen MobileNetV2 mimarisi.

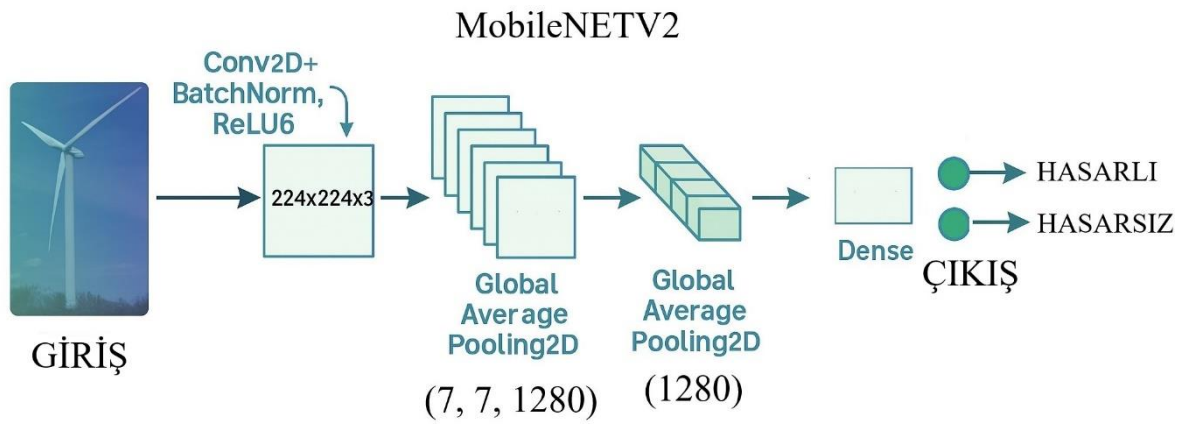
Katman No	Katman Adı	Çıkış Boyutu	Filtre / Nöron Sayısı	Aktivasyon	Açıklama
1	Input	(224, 224, 3)	-	-	RGB giriş görüntüsü
2	Conv2D + BD + Relu6	(112, 112, 32)	32	ReLU6	İlk evrişim katmanı
3-18	Inverted Residual Blokler	(112 → 7, 7, 320)	16-320	ReLU6 / Linear	MobileNetV2'nin çekirdek yapısı
19	Conv2D 1*1 + BN + ReLU6	(7, 7, 1280)	1280	ReLU6	Son genişletici katman
20	Global Average Pooling	(1280)	-	-	Özellikleri sadeleştirir
21	Dropout (opsiyonel)	(1280)	-	-	Aşırı öğrenmeyi azaltır
22	Dense (Çıkış Katmanı)	(2)	2	Softmax	Hasarlı / Hasarsız sınıflaması

Modelin girişine, yeniden boyutlandırılmış ve normalize edilmiş RGB formatındaki (224*224*3) görüntüler verilmiştir. İlk katman, klasik bir evrişim (Conv2D) işlemi uygulayarak görüntüden temel kenar ve renk bilgilerini çıkarmaktadır. Devamında yer alan gövde yapısı, Tersine Artık Blok olarak adlandırılan ve her biri bir adet 1*1 daraltıcı evrişim, bir adet 3*3 derinlik ayrık (depthwise) evrişim ve yine 1*1 genişletici evrişim içeren modüllerden oluşmaktadır. Bu bloklar, geleneksel evrişimli yapılara göre daha az parametre kullanarak benzer doğruluk düzeylerine ulaşmayı mümkün kılar. Bu yapı sayesinde hem model boyutu küçülmekte hem de işlem yükü önemli ölçüde azalmaktadır.

MobileNetV2' nin son katmanında yer alan 1*1 evrişim bloğu ile elde edilen (7*7*1280) boyutundaki öznitelik haritaları, Küresel Ortalama Havuzlama (Global Average Pooling) katmanı ile birer skalar değere indirgenmiş ve bu sayede modelin aşırı öğrenme (overfitting) eğilimi azaltılmıştır. Takip eden seyreltme katmanı (dropout katmanı) (örneğin 0,3 oranında),

eğitim sırasında belirli n6ronların rastgele devre dışı bırakılması yoluyla modelin genelleme kabiliyetini arttırmayı hedeflemektedir.

Son olarak sınıflandırma işlemi, iki n6ronlu bir tam bağlantılı (Dense) katman aracılığıyla ger6ekleştirilmiştir. Bu katman, aktivasyon fonksiyonu (softmax) kullanarak hasarlı ve hasarsız sınıflarına ait olasılık değerlerini 6retmektedir. şekil 3.14'te eğitilen model mimarisi g6sterilmiştir.



şekil 3.14 Eğitilen MobileNetV2 mimarisi.

3.7.3 Veri Setinin Elde Edilmesi

Veri setinin oluşturulması i6in hasarlı ve hasarsız r6zgar t6rbini kanatlarına ait g6r6nt6ler Rass Wind Enerji'den temin edilmiştir. Bu g6r6nt6ler sınırlı sayıda olup diğer g6r6nt6ler halka a6ık olarak yayınlanan yerlerden alınmıştır. G6r6nt6ler JPG formatında olup hepsi farklı boyutlardadır.

MobilNETV2 algoritması ile ger6ekleştirilecek sınıflandırma işleminde kullanılan veri seti toplam 101 g6r6nt6den oluşmaktadır. Bu veri setinde, 50 adet hasarlı ve 51 adet hasarsız r6zgar t6rbini kanadı g6r6nt6s6 yer almaktadır. Veri setindeki b6t6n g6r6nt6ler 224*224 boyutuna getirilmiştir. Eğitim 5 dakika 15 saniye boyunca s6rm6řt6r.

Modelin performansını değerlendirmek amacıyla, eğitim süreci sonrasında oluşturulan model ile sınıflandırma işlemlerinin gerçekleştirileceği bir test seti oluşturulmuştur. Test amacıyla ayrılan görüntüler, eğitim veri setine dahil edilmemiş olup, veri setinin %30'u test için ayrılmıştır.

Görüntü işleme tekniklerinin uygulanması, görüntülerin daha başarılı bir şekilde sınıflandırılmasına katkı sağlamış ve bu durum görüntü işlemenin önemini bir kez daha ortaya koymuştur.





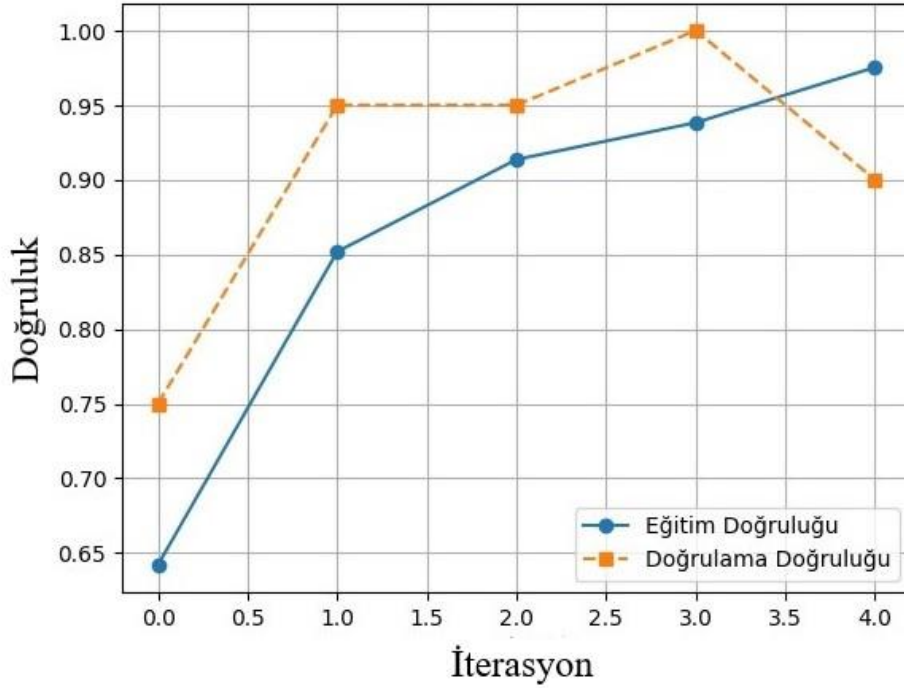
BÖLÜM 4

ELDE EDİLEN SONUÇLAR

4.1 MODEL EĞİTİMİ

Görüntü işleme teknikleri ile elde edilen rüzgar türbini kanatlarına ait görseller ile görüntü işleme gerektirmeyen net görsellerden oluşan bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setindeki görüntüler, "hasarlı" ve "hasarsız" olarak etiketlenmiş; her bir sınıf için ayrı klasörler oluşturulmuştur. Hazırlanan bu veri seti kullanılarak, tez çalışmasında önerilen MobileNetV2 modeli ile rüzgar türbini kanatlarının sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme eğitimde eğitim doğruluğu %98,5'e kadar çıkmıştır. Doğrulama doğruluğu ise 4. epoch'ta %100 olmuştur. Veri miktarının artırılmasının modelin doğrulama başarımını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. İlk aşamalarda 30 adet gibi düşük veriyle modelleme yapılmış ve %85'te sabit kaldığı görülmekteydi. Daha sonra kullanılan veri sayısının artmasıyla modelin doğrulama başarımının arttığı ve doğrulama doğruluğunun %90'ı aştığı görülmüştür. Şekil 4.1'de modelin eğitimi sırasında eğitim ve doğrulama doğruluklarının iterasyonlara bağlı olarak gösterimi yer almaktadır.

Model Doğruluk Grafiği



Şekil 4.1 Derin öğrenme doğruluk grafiği.

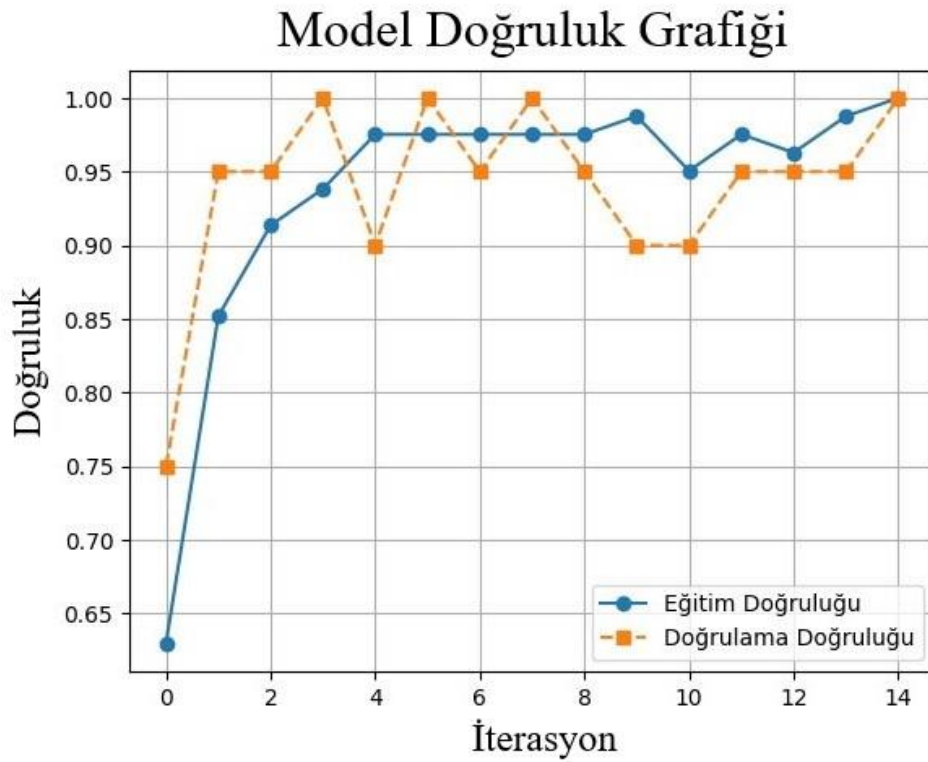
Modeli denemek amacıyla 5 iterasyonluk eğitim yapılmıştır. Modelin eğitim doğruluğu artan iterasyon sayısı ile birlikte istikrarlı bir şekilde yükselmiş ve beşinci iterasyon seviyesinde yaklaşık %98,5 seviyesine ulaşmıştır. Doğrulama doğruluğu ise ilk iterasyonlarda artış göstermiş, dördüncü iterasyonda %100 seviyesine ulaşmış ve son iterasyonda %90 seviyesine gerilemiştir. Bu durum, modelin eğitim verilerini oldukça iyi öğrendiğini ancak bazı doğrulama örneklerinde sınırlı genelleme başarısı sergileyebildiğini göstermektedir.

Doğrulama kaybının (validation loss) düşük seviyelerde seyretmesi ve doğrulama doğruluğunun yüksek olması modelin öğrenme sürecinin başarılı olduğunu ve aşırı öğrenme (overfitting) probleminin sınırlı düzeyde kaldığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, veri setine eklenen yeni görüntülerin modelin genel performansını olumlu etkilediği, sınıflandırma başarımını arttırdığı ve öğrenme eğrisini daha kararlı hale getirdiği söylenebilir.

Sonuç olarak, modelin hem eğitim hem de doğrulama verisindeki yüksek doğruluk oranları, derin öğrenme yaklaşımının rüzgar türbini kanat hasarlarının sınıflandırılmasında etkili bir

yöntem olduğunu göstermektedir. Modelin performansı, ilerleyen çalışmalarda veri artırımı, hiperparametre optimizasyonu ve daha ileri görüntü işleme teknikleri ile geliştirilebilir.

İterasyon sayısının model doğruluğu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, iterasyon sayısı 15'e çıkarılmış ve elde edilen model doğruluğu grafiği Şekil 4.2'de sunulmuştur. Şekil 4.2'de modelin eğitim doğruluğu, ilk iterasyondan itibaren istikrarlı bir şekilde artış göstermektedir. Özellikle 5. iterasyon sonrasında doğruluk %95'in üzerine çıkmış, 14. iterasyon itibariyle ise %100'e ulaşmıştır. Bu durum, modelin eğitim verisi üzerinde öğrenme kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.2 15 iterasyon için derin öğrenme doğruluk grafiği.

Doğrulama doğruluğu da benzer bir eğilim sergilemekte, ancak eğitim doğruluğuna kıyasla daha dalgalı bir seyir izlemektedir. Başlangıçta düşük olan doğrulama doğruluğu, 2. iterasyondan itibaren %95 seviyelerine ulaşmış bazı iterasyonlarda %100 seviyesini geçici olarak yakalamıştır. Bununla birlikte, ara iterasyonlarda %90 seviyelerine kadar düşüşler gözlenmiştir.

Bu dalgalanmalar, modelin henüz tüm doğrulama örneklerinde tam genelleme sağlayamadığını, ancak genel olarak yüksek doğruluk seviyesine eriştiğini göstermektedir.

Model ilk aşamada 5 iterasyon boyunca eğitilmiştir, ancak bu sayının düşük olması modelin öğrenmesini sınırlamıştır. Bu nedenle epoch sayısı 15'e çıkarılmıştır. Uzun süren eğitim, özellikle hasarlı sınıfa ait örneklerin öğrenilmesini ve model güveninin arttırmasını sağlamıştır. Eğitim sonunda modelin doğruluk değerleri gözlemlenmiş, hem eğitim hem doğrulama kümelerinde yüksek doğruluk elde edilmiştir. Ek olarak, modelin hasarlı sınıfına ait görseller üzerinde önceden düşük güvenle yaptığı tahminlerin uygulanan veri çoğullama (augmentation) tekniklerinin ve dengeleme parametresi (class_weight) ile sağlanan sınıf dengesi iyileştirmesinin model performansı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca iterasyon sayısının 15'e çıkarılması, modelin daha iyi genelleme yapmasına olanak tanımış ve doğrulama doğruluğunun yüksek seviyelerde seyretmesini sağlamıştır.

MobileNetV2 mimarisi kullanılarak yapılan sınıflandırma çalışmasında model, 30 ve 50 iterasyonda yüksek eğitim doğruluğuna ulaşmıştır. Çizelge 4.1'de bu eğitimlerin sonuçları verilmiştir. Ancak 50 iterasyonluk eğitimde doğrulanma doğruluğundaki dalgalanmalar artarak overfitting işaretleri göstermiştir. Bu nedenle, eğitim süresinin uzaması performansı arttırmak yerine doğrulama güvenilirliğini azaltabileceğinden 30 iterasyon civarında yapılan eğitimler daha dengeli sonuçlar sağlamaktadır.

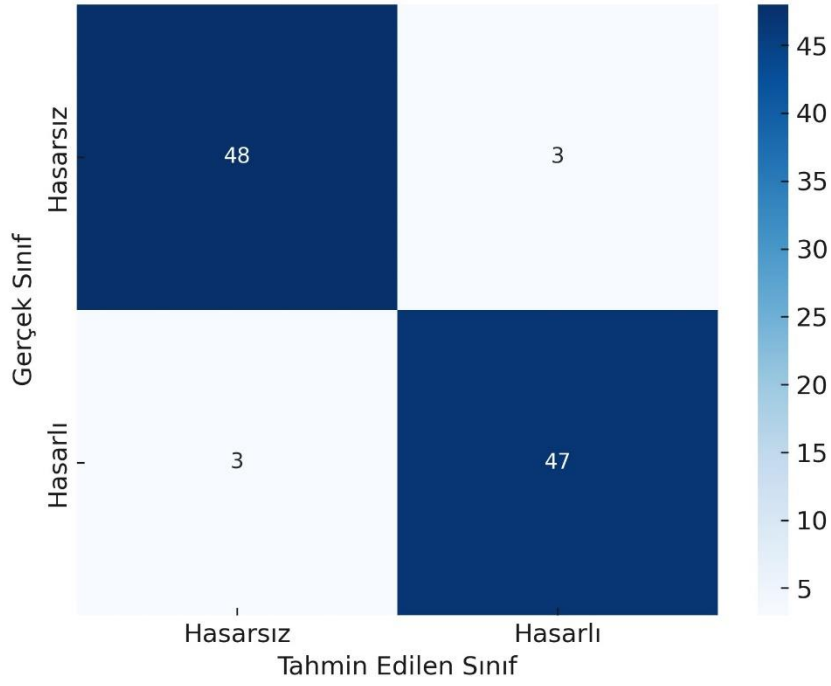
Çizelge 4.1 30 ve 50 iterasyon için eğitim ve doğruluk sonuçları.

Epoch	Eğitim Doğruluğu (30 Epoch)	Doğrulama Doğruluğu (30 Epoch)	Eğitim Doğruluğu (50 Epoch)	Doğrulama Doğruluğu (50 Epoch)
1	0,63	0,75	0,63	0,75
5	0,97	0,96	0,97	0,96
10	0,96	0,90	0,96	0,90
15	0,98	0,96	0,97	0,95
20	1,00	0,97	1,00	0,98
25	1,00	1,00	1,00	1,00
30	1,00	1,00	1,00	1,00
40	-	-	1,00	1,00
50	-	-	1,00	0,95

101 adet bulunan veri setinde derin öğrenme ile MobileNETV2 algoritması kullanılarak eğitilen modelde test doğruluk oranları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.3’te ise modelin performansını değerlendirmek için karışıklık matrisi (confusion matrix) verilmiştir.

Çizelge 4.2 Test doğruluk sonuçları.

Görüntü Sayısı	Test Doğruluk Oranı	Doğru Tahmin	Yanlış Tahmin
101	%94	95	6



Şekil 4.3 MobileNetV2 test sonuçları.

Test için ayrılan veriler ile model test edilmiştir. Ayrıca, görüntü işleme tekniklerinin model performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de hem işlenmemiş (ham) bir görüntü hem de görüntü işlenmiş hallerine yer verilmiştir. Şekil 4.4'te kontrast artırma işlemi uygulanmış bir görüntü görülmektedir. Derin öğrenme eğitimi sonucunda, işlenmemiş görüntü Şekil 4.4a %56 doğruluk oranı ile hasarlı olarak doğru şekilde sınıflandırılmıştır. Öte yandan, kontrast artırma işlemi uygulanan görüntü Şekil 4.4b ise %85 doğruluk oranı ile hasarlı olarak sınıflandırılmıştır. Bu sonuçlar, kontrast artırma gibi görüntü işleme tekniklerinin modelin sınıflandırma performansını önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadır.



a) Efekt Uygulanmamış Görüntü



b) Kontrast Arttırma Efekt Uygulanmış Görüntü

Şekil 4.4 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması [76].

Şekil 4.5a'da görüntü işleme uygulanmamış fotoğraf ile Şekil 4.5b'de verilen hassas keskinleştirme uygulanmış görüntüye MobilNETV2 model yapısı uygulanmış ve sınıflandırma yapılmıştır. Efekt uygulanmamış görüntü hasarsız olarak yanlış sınıflandırılırken hassas keskinleştirme uygulanmış görüntü hasarlı olarak doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır.



a) Efekt uygulanmamış Görüntü



b) Hassas keskinleştirme uygulanmış görüntü

Şekil 4.5 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması [76].

Şekil 4.6'da hasarsız olan rüzgar türbin kanadı ön kenar aşınması görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 4.6a'daki görüntüye görüntü işleme uygulanmadan modele sokulmuş ve hasarsız olarak %71 oranında yanlış bir şekilde sınıflandırma yapılmıştır. Şekil 4.6b'de ise görüntü

işleme ile histogram eşitleme işlemi uygulanmış olan görüntü ise %99 oranında hasarlı olarak doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır.



a) Efekt uygulanmamış görüntü



b) Histogram eşitleme uygulanmış görüntü

Şekil 4.6 Görüntü işleme uygulanmamış ve uygulanmış görüntünün sınıflandırılması [77].

Eğitilen modelin ham olan ancak net görüntüler üzerindeki performansını değerlendirmek amacıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilen görüntüler teste sokulmuştur. Şekil 4.7’de hasarlı olan rüzgar türbini görüntüsü MobilNETV2 model yapısı ile sınıflandırma işlemi yapılması istenmiş ve %100 oranında hasarlı olarak sonuç çıktısı alınmıştır.



Şekil 4.7 Hasarlı olarak doğru sınıflandırılan veri [6].

Şekil 4.8’de hasarsız rüzgar türbini bulunmaktadır. Görüntü modele sokularak sınıflandırılma yapılması istenmiş ve %98 hasarsız olarak doğru bir şekilde sınıflandırılmıştır.



Şekil 4.8 Hasarsız olarak doğru sınıflandırılan veri.

4.2 ALAN HESAPLAMA

Rüzgar türbinleri, bulundukları zorlu çevresel koşullardan dolayı zamanla hasara uğramaktadır. Türbin kanatlarında oluşan hasarlar, zamanında tespit edilmezse ciddi maliyetlere ve enerji üretiminde aksamalara neden olabilir. Bu nedenle hasarın tespit edilmesi ve hasarlı alanın büyüklüğünün doğru bir şekilde hesaplanması da oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasında, görüntü işleme teknikleri kullanılarak türbin kanatlarının hasarlı bölgeleri belirlenmiş ve alan hesaplaması yapılarak hasarın boyutu nicel olarak değerlendirilmiştir.

Hasarlı bölge belirlendikten sonra ölçekleme yapılarak piksel/cm cinsinden dönüşüm faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Böylece gerçek alan hesaplanabilir. Şekil 4.9’da fiziksel uzunluk olarak cetvelde görülen 24 cm kullanılacaktır. Cetvelin görselde kapladığı tahmini piksel uzunluğu ise 800 piksel alınmıştır. Eşitlik 4.1 ile verilen piksel/cm ölçekleme faktörü;

$$Px/cm = \frac{\text{Fiziksel uzunluk(cm)}}{\text{Piksel cinsinden uzunluk}} \quad (4.1)$$

Hasarlı bölge alanı ise Eşitlik 4.2 ile piksel cinsinden hesaplanmaktadır.

$$A_{px} = \Sigma \text{Konturların Alanı}(\text{piksel}^2) \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de $\Sigma \text{Konturların Alanı}$, çatlak bölgenin alanı konturların kapladığı piksel alanı toplamını ifade etmektedir.

Gerçek dünyadaki alanı ise (cm^2) olarak Eşitlik 4.3 ile hesaplanmıştır.

$$A_{cm^2} = A_{px} * (px * cm)^2 \quad (4.3)$$

Şekil 4.9’da verilen görüntüde yüksekliği 800 piksel olduğundan, Eşitlik 4.1 ile ölçekleme faktörü $0,03 \text{ piksel}/cm$ olarak elde edilmiştir. Görüntüdeki çatlak bölgenin piksel alanı ise 6200 px^2 olarak tespit edildiğinden Eşitlik 4.3 kullanılarak hasarlı bölge alanı $5,58 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.10’da verilen Rass Wind Enerji’den alınan görüntüde ise kameranın tam ölçek bilgisi bilinemediğinden bu görüntüde rüzgar türbinini standart rüzgar türbin kanadı boyutu olduğu varsayılarak gerçek alan hesaplaması yapılmıştır. Çoğu modern rüzgar türbin kanadı 50 ila 80 metre uzunluğundadır ve kanat genişliği genellikle 3-4 metre civarındadır [78-79]. Ölçek belirleme işleminde türbin kanadı genişliğinin yaklaşık 3 metre olduğu varsayılmıştır. Görüntüdeki konturlu alanın toplam piksel sayısı 168,912 olarak tespit edilmiştir. Görüntüde kanat genişliğine göre ölçek hesaplanması Eşitlik 4.4a, 4.4b, 4.4c kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntüde kanat genişliği tam ölçülemediğinden, görüntü genişliğinin %60’ını kapladığı varsayılmıştır.

$$\text{Kanat Genişliği}(\text{piksel}) = 0,6 * \text{Görüntü Genişliği} \quad (4.4a)$$

$$\text{Görüntü Genişliği} = 1024 \text{ (Örnek bir değer)} \quad (4.4b)$$

$$\text{Kanat Genişliği}(\text{piksel}) = 0,6 * 1024 = 614 \text{ piksel} \quad (4.4c)$$

Kanat uzunluğunun ölçek (bir pikselin gerçek dünyadaki uzunluğu) faktörü ise Eşitlik 4.5a-4.5b kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ölçek}(m/px) = \frac{\text{Gerçek Kanat Genişliği}(m)}{\text{Kanat Genişliği}(px)} \quad (4.5a)$$

$$\text{Ölçek}(m/px) = \frac{3}{614} = 0,00489 \text{ metre/piksel} \quad (4.5b)$$

Bir pikselin kapladığı alan Eşitlik 4.6a kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Piksel Alanı}(m\hat{A}^2) = (\text{Ölçek}(m/px))^2 \quad (4.6a)$$

$$\text{Piksel Alanı} = (0,00489)^2 = 2,39 * 10^{-5} (m/px)^2 \quad (4.6b)$$

Toplam hasarlı alanı bulmak için Eşitlik 4.7a kullanılır.

$$\text{Hasarlı Alan}(m\hat{A}^2) = \text{Hasarlı Alan}(piksel\hat{A}^2) * \text{Piksel Alanı}(m\hat{A}^2/piksel\hat{A}^2) \quad (4.7a)$$

$$\text{Hasarlı Alan}(m\hat{A}^2) = 168,912 * 2,39 * 10^{-5} = 0,00404 m\hat{A}^2 \quad (4.7b)$$

Hasarlı bölge alanı $0,00404 m\hat{A}^2$ olarak bulunmuştur.

Kanat genişliğini 4 metre olarak alırsak;

$$\text{Hasarlı Alan}(piksel\hat{A}^2) = 168,912 \quad (4.8)$$

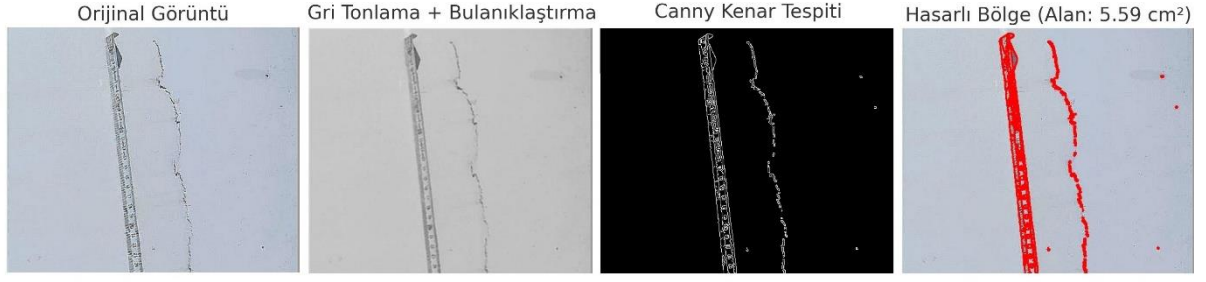
$$\text{Ölçek}(m/px) = \frac{4}{614} = 0,00651 \text{ metre/piksel} \quad (4.9)$$

Bir piksel alanı hesaplamak için Eşitlik 4.6a kullanılır.

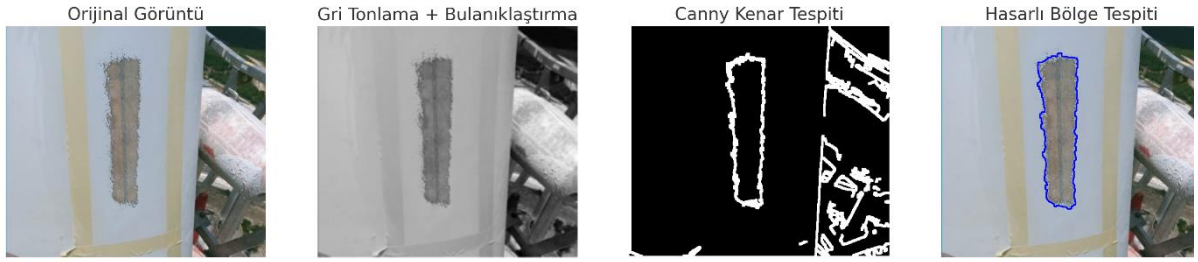
$$\text{Piksel Alanı} = (0,00651)^2 = 4,24(m/px)^2 \quad (4.10)$$

$$\text{Hasarlı Alan}(m\hat{A}^2) = 168,912 * 4,24 * 10^{-5} = 0,00716 m\hat{A}^2 \quad (4.11)$$

Toplam hasarlı alanı bulmak için Eşitlik 4.7a kullanılarak hasarlı bölge alanı $0,00716 m\hat{A}^2$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.9 Ele alınan birinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.



Şekil 4.10 Ele alınan ikinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.

Rüzgar türbinlerinde kanatlarda oluşan hasarın belirlenip alanının ölçülebilmesi için standart rüzgar türbin kanadı genişlikleri baz alınarak yapılan ölçümler Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir. Enercon GmbH ve Siemens Gamesa gibi türbin üreticilerinin teknik dökümanları incelendiğinde, türbin kanatlarının genişlikleri model bazında değişmekte birlikte örnek olarak Enercon E-70 modeli 3,5 metre Siemens Gamesa SG 3,4-132 modeli ise 4 metre boyutundadır. Eğer analiz yapılan görselin ait olduğu türbin modelinin üretici ölçüleri bilinmiyorsa, bu hesaplamaların yaklaşık olduğu kabul edilmelidir [80-81].

Bu çalışmada, hasarlı alanın piksel cinsinden bulunabilmesi için görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Görüntüde hasarlı alanın konturu algılanıp HSV (Hue, Saturation Value) renk uzayına dönüştürülmüştür. Mavi kontur belirli bir HSV aralığında yer aldığından dolayı bu aralık kullanılarak maskeleme yapılmıştır. Böylece bu aralıkta yer alan alt sınır ve üst sınır matrisleri kullanılarak binary maske (siyah-beyaz görüntü) oluşturulmuştur. Daha sonra maskelenmiş görüntüde, mavi konturu çevreleyen alan tespit edilmiştir. Bulunan konturların kapladığı alanlar hesaplanarak toplam hasarlı alan elde edilmiştir. Ayrıca, görüntüdeki kanat genişliği piksel cinsinden belirlenerek ölçek oranı bulunmuştur ve bu ölçekle hasarlı alan m^2 'ye çevrilmiştir. Bu alanın kanat genişliği arttıkça hasarlı alanın büyüdüğü görülmektedir. 3

metre kanat genişliği olan rüzgar türbininde hasarlı alanın $0,00404 \text{ m}^2$ olduğu hesaplanmıştır. Kanat genişliği 4 metre yapıldığında elde edilen ölçek değerinin değiştiği, genişlik arttığı için ölçek oranının da arttığı ve buna bağlı olarak hesaplanan hasarlı alanın da arttığı görülmüştür. Bu durumda, hasarlı alanın büyüklüğü $0,00716 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3 Kanat genişliği 3 metre alındığı durumda oluşan değerler.

Özellik	Değer	Açıklama
Hasarlı Alan(px^2)	168,912	Mavi kontur içindeki toplam piksel alanı
Kanat Genişliği(m)	3	Standart bir rüzgar türbini kanadı genişliği
Kanat Genişliği(px)	614	Görüntü üzerinden tahmini kanat genişliği
Ölçek(m/px)	0,00489	Piksel başına düşen gerçek uzunluk
Piksel Alanı(m^2 / px^2)	$2,39 * 10^{-5}$	Bir pikselin kapladığı alan
Hasarlı Alan(m^2)	$0,00404 \text{ m}^2$	Gerçek dünyada hasarlı bölgenin büyüklüğü

Çizelge 4.4 Kanat genişliği 4 metre alındığı durumda oluşan değerler.

Özellik	Değer	Açıklama
Hasarlı Alan(px^2)	168,912	Mavi kontur içindeki toplam piksel alanı
Kanat Genişliği(m)	4	Standart bir rüzgar türbini kanadı genişliği
Kanat Genişliği(px)	614	Görüntü üzerinden tahmini kanat genişliği
Ölçek(m/px)	0,00651	Piksel başına düşen gerçek uzunluk
Piksel Alanı(m^2 / px^2)	$4,24 * 10^{-5}$	Bir pikselin kapladığı alan
Hasarlı Alan(m^2)	$0,00716 \text{ m}^2$	Gerçek dünyada hasarlı bölgenin büyüklüğü

Gerçek dünyada rüzgar türbini kanatlarındaki tipik yüzey hasarları, üreticilerin bakım kayıtlarına ve akademik çalışmalara göre bakıldığında $0,002 \text{ m}^2$ ile $0,01 \text{ m}^2$ aralığında değişmektedir [80-82]. Bu değer referans alınarak karşılaştırma metrikleri hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamaların literatürdeki aralıkla uyumlu sonuçlar ürettiği Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Bu durum, görüntü işleme yoluyla elde edilen alan ölçümünün temel düzeyde güvenilir olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5 Hasarlı alanın literatürdeki tipik yüzey hasarlarına göre karşılaştırılması.

Kanat Genişliği	Hesaplanan Alan (m^2)	Literatür Aralığı İle Uyumu	Yüzde Sapma
3 m	0,00404	Uyumlu (Düşük Sınırdaki)	-32,7 %
4 m	0,00716	Uyumlu (Üst Sınırdaki)	+19,2 %

Çizelge 4.5'te Literatür Aralığı= $0,002 \text{ m}^2$ ile $0,01 \text{ m}^2$, Yüzde Sapma=Referans Orta Değer: $0,006 \text{ m}^2$ ((Hesaplanan-Referans) / Referans) * 100 şeklindedir.

Kanat genişliği 3 metre referansıyla yapılan hesaplama, hasar alanını olduğundan küçük gösterebileceğinden dolayı küçük boyutlu hasarların tespiti için güvenli kabul edilebilir. 4 metre genişlik referansıyla yapılan hesaplama ise daha büyük hasarların tespiti için uygundur. Bu durumda ise aşırı tahmin olasılığı mevcuttur. Bu nedenle, kullanılan türbin modeline ait üretici teknik dökümanlarından alınan net ölçümler temel alınmalı ve hesaplamalar bu doğrultuda revize edilmelidir.

4.3 HASARLI ALANI ONARMA

Rüzgar türbini kanatlarındaki hasarları onarmak için kullanılan malzemeler, hasarın türüne ve büyüklüğüne bağlı olarak değişse de genellikle temel olan malzemeler kullanılmaktadır.

- Epoksi Reçineler

- Hasarlı bölgeyi doldurmak, yapıyı güçlendirmek ve yapışmayı sağlamaktadır. Yüksek dayanımı, UV ve çevresel etkilere karşı dirençli bir yapısı bulunmaktadır
- Cam Elyaf Kumaş (Fiberglass)
 - Kanadın kompozit yapısını yeniden oluşturarak onarımı sağlamaktadır. Woven roving, chopped strand mat gibi farklı yoğunlukta ve yönde lifler içeren çeşitleri bulunmaktadır.
- Karbon Elyaf Kumaş
 - Yüksek dayanım gereken alanlarda kullanılır. Daha hafif ve güçlü olup cam elyafa göre daha maliyetlidir.
- Jelcoat (Jel Kaplama)
 - Kanat yüzeyinin dış koruyucu tabakasını oluşturur, UV ışınları ve çevresel etkenlere karşı koruma sağlamaktadır.
- Dolgu Malzemeleri (Putty)
 - Küçük çatlakları, oyukları ve yüzey pürüzlerini düzeltmek için kullanılan onarım malzemesidir. Mikro baloncuk katkılı epoksi dolgular dolgu malzemesine örnek olarak verilebilir.
- Yapıştırıcılar (Structural Adhesives)
 - Katmanları veya yamalar yapıştırıcılar ile birleştirilmektedir. 3M, Sika gibi markalar özel yapıştırıcıları bulunmaktadır.
- Zımpara ve Temizlik Malzemeleri
 - Yüzey hazırlığı için gerekli olup zımpara kağıtları, aseton, yüzey temizleyiciler örnek olarak verilebilmektedir.

4.3.1 Kanat Onarım Süreci

1. Hasarın Değerlendirilmesi
 - Görsel ve termal görüntüleme, ultrasonik testler yada darbeli testler ile hasarın tipi (yüzeysel, yapısal, delemantasyon vb.) ve derinliği belirlenir.
 - Hasar yüzey çatlakları, katman ayrılması(delemantasyon), delikler veya kırık bölgeler olarak sınıflandırılır.
2. Güvenlik ve Hazırlık
 - Rüzgar türbini durdurulur ve kilitlenir (LOTO prosedürü).
 - Erişim için platform, vinç veya halatlı iniş sistemleri hazırlanır.
 - Hasarlı alanın çevresi, zımpara veya taşlama ile temizlenir.

3. Hasarlı Alanın Açılması ve Temizliği

- Hasar sandviç yapısının iç kısımlarına kadar dikkatli bir şekilde açılır.
- İçerideki hasarlı cam elyaflar, köpük ya da bal peteği yapı (honeycomb) temizlenip çıkarılır.
- Temizlenen alan, solvent (genellikle aseton) iyice silinir.

4. Yapısal Onarım

- Gerekirse iç yapı (core malzeme) değiştirilir veya doldurulur (örneğin köpük çekirdek).
- Katman katman cam elyaf kumaş kesilerek epoksi reçine ile birlikte yerleştirilir.
- Her kat hava kabarcığı kalmayacak şekilde rulo veya vakum torbası ile bastırılır.
- Elyaf yerleştirme işlemi, orijinal kanat yapısına uygun olarak fiber yönleri dikkate alınarak yapılır.

5. Sertleşme (Kürleme)

- Reçine, ortam sıcaklığına göre termal veya ortam kürlenmesiyle sertleşir.
- Gerekirse ısıtıcı pedler ile desteklenir.

6. Yüzey Düzeltme ve Son Kat

- Onarılan alan zımparalanarak orijinal formuna getirilir.
- Üzerine dolgu malzemesi (putty) uygulanarak yüzey düzgünlüğü sağlanır.
- Son kat olarak jelcoat veya UV dayanımlı dış boya uygulanır

7. Son Kontrol ve Testler

- Onarılan alan göz, termal kamera veya ultrasonik olarak test edilir.
- Kanadın yeniden dengesi kontrol edilir.
- Türbin tekrar devreye alınır [83-88].

Şekil 4.9’da verilen rüzgar türbin kanadındaki hasarlı alanda uzunlamasına bir yüzey çatlağı bulunmaktadır. Bu tür çatlaklar genellikle jelkot ve dış tabaka cam elyafı şeklinde görülmektedir; ancak derinliğinden emin olmak için kontrol gerekmektedir. Bu tür bir hasarın onarımı için standart bir yöntem kullanılır.

Onarım Adımları:

1. Tap test veya termografi/ultrasonik test ile derinlik kontrolü yapılır.
2. Çatlağın her iki yanı 2-3 cm taşacak şekilde V şeklinde taşlanır.
3. Çatlak ucuna matkapla $\varnothing 3\text{mm}$ durdurma delikleri açılır.
4. Elyaf tabakaları hasar boyuna uygun şekilde kesilir.

5. Epoksi reçine ile kat kat uygulanarak elyaf yerleştirilir.
6. Reçine uygun ortam sıcaklığında kürleşmeye bırakılır.
7. Kür sonrası yüzey aerodinamik forma ulaşacak şekilde zımparalanır.
8. Epoksi bazı dolgu malzemesi ile yüzey pürüzsüz hale getirilir.
9. Zımpara sonrası, UV dayanımlı boya ile boyanır.
10. Gerekirse şeffaf son kat (jelkot) uygulanır.

Şekil 4.10'da hasarlı alanın onarılması için hasarlı alan dikkatlice incelenerek boyanın zarar görüp görmediği veya kompozit katmanlara kadar hasarın ulaşp ulaşmadığı belirlenmelidir. Görüntüde ilk olarak hasar tanımı yapıp daha sonra onarım adımlarına geçilmelidir.

Hasar tanımı:

- Boya tabakası açılmış.
- Cam elyaf katmanları görünmektedir.
- Hasar lokal ve sınırlı bir alanda gözükmemektedir.

Onarım adımları:

1. Hasar alanı 5-10 cm taşacak şekilde zımparalanır.
2. Yüzey aseton veya izopropil alkol kullanarak temizlenir.
3. Cam elyaf kumaş kat kat yerleştirilir.
4. Her kat, epoksi reçine ile doyurularak uygulanır.
5. Reçine 8-24 saat aralığında kürleşmeye bırakılır.
6. Zımpara ile aerodinamik forma getirilir.
7. Eğer çukur oluşmuşsa, epoksi dolgu uygulanır ve dolgu kuruduktan sonra zımparalanır.
8. UV dayanımlı boya uygulanır.
9. Gerekirse şeffaf koruyucu kat uygulanır.

Çizelge 4.6’da Şekil 4.9’de verilen boylamasına yüzelsel çatlak ve Şekil 4.10’da verilen yüzeyel elyaf görünümlü hasar için onarım adımları ve bu onarımda kullanılacak malzeme türleri verilmiştir.

Çizelge 4.6 Verilen görüntülerdeki hasar türlerine göre onarım adımları.

Adım	Şekil 4.9’ daki Boylamasına Yüzey Çatlağı	Şekil 4.10’ daki Yüzeyel Elyaf Görünümlü Hasar
Hasar Tespiti	Uzun çatlak, derinlik belli olmadığından termografi veya tap testi ile incelenmelidir.	Boya tabakası soyulmuş, cam elyaf görünür. Lokal yüzey hasarı bulunmaktadır.
Yüzey Hazırlığı	V şeklinde taşlama ile çatlak boyunca açılır.	Zımpara ile hasar 5-10 cm dışına kadar açılıp temizlenir.
Çatlak Durdurma	Çatlak uçlarına küçük matkapla delik açılır. (yakl. 3mm)	Gerekmez.
Elyaf Uygulaması	Elyaf şeritler çatlak boyuna uygun kesilir. Epoksi ile uygulanır.	Elyaf yamalar kesilir. Epoksi ile kat kat uygulanır.
Kürleşme	Aynı şekilde reçinenin tamamen sertleşmesi beklenir.	Oda sıcaklığında 8-24 saat beklenir.
Yüzey Tesviyesi	Zımpara ile yüzey düzgünleştirilir.	Zımpara ile aerodinamik forma getirilir.
Dolgu ve Boya	Aynı şekilde dolgu ve boya işlemleri yapılır.	Epoksi bazlı dolgu yapılır. UV dayanımlı boya uygulanır.
Kontrol	Tap test veya NDT ile onarım sonrası control önerilir.	Tap test gerekmez, görsel control yeterlidir.

Yapılan tez çalışmasında, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sunulan hasar türleri için gerekli onarım malzemeleri miktarı hesaplanmıştır. Onarım süreçlerinde kullanılan epoksi ve boya miktarları, hasar alanı ve uygulanacak tabaka kalınlıkları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Epoksi için (elyafla birlikte) 1 mm (0,001 m), boya için ise 0.1 mm (0,0001 m) kalınlık esas alınmıştır. Malzeme yoğunlukları literatürdeki ortalama değerlere göre, epoksi için 1150 kg/m^3 , boya için ise 1250 kg/m^3 olarak kabul edilmiştir [89].

Hasarlı alanlarda kullanılacak epoksi ve boya miktarları Eşitlik 4.12a ve Eşitlik 4.12b’de verilmiştir.

$$\text{Epoksi Hacmi (mA}^3\text{)} = \text{HasarAlanı} * \text{Epoksi Kalınlığı} \quad (4.12a)$$

$$\text{Boya Hacmi (mA}^3\text{)} = \text{HasarAlanı} * \text{Boya Kalınlığı} \quad (4.12b)$$

Şekil 4.9 için kullanılacak epoksi ve boya hesaplamaları Eşitlik 4.13’te gösterilmiştir.

$$\text{Epoksi Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,000558 * 0,001 = 5,58 * 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (4.13a)$$

$$\text{Kütle} = 5,58 * 10^{-7} * 1150 = 6,417 * 10^{-4} \text{ kg} = 0,642 \text{ gr} \quad (4.13b)$$

$$\text{Boya Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,000558 * 0,0001 = 5,58 * 10^{-8} \text{ m}^3 \quad (4.13c)$$

$$\text{Kütle} = 5,58 * 10^{-8} * 1250 = 6,975 * 10^{-5} \text{ kg} = 0,0698 \text{ gr} \quad (4.13d)$$

Şekil 4.10’da kanat genişliği 3 metre olarak alındığında, kullanılacak epoksi ve boya hesaplamaları Eşitlik 4.14’te gösterilmiştir.

$$\text{Epoksi Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,00404 * 0,001 = 4,04 * 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.14a)$$

$$\text{Kütle} = 4,04 * 10^{-6} * 1150 = 4,646 * 10^{-3} \text{ kg} = 4,65 \text{ gr} \quad (4.14b)$$

$$\text{Boya Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,00404 * 0,0001 = 4,04 * 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (4.14c)$$

$$\text{Kütle} = 4,04 * 10^{-7} * 1250 = 5,05 * 10^{-4} \text{ kg} = 0,505 \text{ gr} \quad (4.14d)$$

Şekil 4.10’da kanat genişliği 4 metre olarak alındığında ise kullanılacak epoksi ve boya hesaplamaları Eşitlik 4.15’te gösterilmiştir.

$$\text{Epoksi Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,00716 * 0,001 = 7,16 * 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.15a)$$

$$\text{Kütle} = 7,16 * 10^{-6} * 1150 = 8,234 * 10^{-3} \text{ kg} = 8,24 \text{ gr} \quad (4.15b)$$

$$\text{Boya Hacmi (mA}^3\text{)} = 0,00716 * 0,0001 = 7,16 * 10^{-7} \text{ m}^3 \quad (4.15c)$$

$$\text{Kütle} = 7,16 * 10^{-7} * 1250 = 8,95 * 10^{-4} \text{ kg} = 0,895 \text{ gr} \quad (4.15d)$$

Gerçek uygulamalarda, yüzey kayıpları, zımpara işlemi ve emilim gibi faktörler göz önünde bulundurularak yaklaşık %20-30 oranından fazla malzeme stoklanması önerilmektedir [90-91].



BÖLÜM 5

TARTIŞMA VE YORUM

Yapılan tez çalışmasında rüzgar türbin kanatlarına ait olan görüntülerde görüntü işleme teknikleri olan grileştirme, filtreleme, keskinleştirme, eşikleme yöntemleri, histogram eşitleme, morfolojik işlem adımları uygulanarak derin öğrenme yöntemi ile eğitilen model ile sınıflandırma işlemi yapılmıştır. Modeli eğitmek için MobileNETV2 mimarisi kullanılmıştır. Kullanılan teknik ve yöntemlerle ilgili detaylı bir kaynak araştırması yapılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Sınıflandırma işlemi için veri seti oluşturularak gerekli olan görüntüler elde edilmiştir. Elde edilen bu görsellerde gerekli olan görüntülere görüntü işleme teknikleri uygulanmış ve hasar belirginleştirilmiştir. Bazı görüntüler için efekt uygulanmamış ham hali ile veri setine dahil edilmiştir. Veri seti hasarlı ve hasarsız olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır. Görüntüler eğitime sokulmadan önce farklı boyutlarda olup eğitim sırasında tüm görseller 224*224 boyutuna dönüştürülmüştür. MobileNETV2 algoritması kullanılarak eğitilen model kullanılarak modelin doğruluğu test edilmiştir. Eğitilen model %94 oranında başarıya ulaşmıştır. Görüntü işleme teknikleri kullanılan görüntülerin orijinal hallerine göre sınıflandırma doğruluk oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan tez çalışmasında hasarlı olan görüntülerin hasar bölgelerinin ortaya çıkarılması için kullanılan görüntü işleme teknikleri görüntüye göre değişiklik göstermektedir. Özellikle alan çalışmasında, hasarlı olan görüntülere grileştirme ve Canny kenar belirleme işlemi uygulanarak görüntülerdeki hasarlı olan bölge veya çatlak daha net bir hale getirilmiştir. Belirginleşen hasarlı alanın çevresi konturlanarak alan hesaplaması gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, tez kapsamında, rüzgar türbini kanatlarında tespit edilen hasarlı alanların türü ve boyutuna göre uygun onarım adımları belirlenmiş ve kullanılacak malzemeler detaylandırılmıştır. Oluşan hasarlar, yüzeysel veya yapısal nitelikte olup olmamalarına göre ele alınmıştır. İncelenen görüntülerde, yüzeysel çatlaklar ve boylamasına yüzey çatlakları gibi farklı hasar türlerine odaklanılmıştır. Bu iki hasar tipi için gerekli onarım aşamaları ayrıntılı şekilde açıklanmış; her bir adım için gerekli malzeme türleri ve miktarları çıkarılarak kapsamlı bir malzeme listesi oluşturulmuştur. Böylece, hasar tespiti sonrasında uygulanacak onarım süreci sistematik bir yapıya kavuşturulmuştur.

Tez çalışmasında kullanılan görüntüler, görüntü işleme teknikleriyle analiz edilerek hasarlı bölgeler başarılı bir şekilde tespit edilmiş ve ardından ilgili alanların hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem, hasarın tespiti ile birlikte eş zamanlı olarak alan ölçümünün de yapılmasını sağlayarak sistemin daha hızlı ve etkin çalışmasına olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca hasar tespitiyle sınırlı kalmayıp; sonrasında uygulanacak onarım adımlarını ve kullanılacak malzemeleri otomatik olarak belirleyebilecek bir algoritma ile entegre edildiğinde, sistemin tam otomasyonla çalışması sağlanarak süreç önemli ölçüde hızlandırılabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yavuz İ** (2021) Rüzgar Türbini Dönüştürücülerinin Esnek Hesaplama Yöntemi İle Denetimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Nevşehir, 123 s.
- [2] **Global Wind Report**. (2022) *Global Wind Energy Council*. Adres: URL <<https://www.nextias.com/current-affairs/13-04-2022/global-wind-report-2022-gwec>>, Ziyaret tarihi:01.05.2025.
- [3] **Zhao Q, Yuan Y, Sun W, Fan X, Fan P, Ma Z** (2020). Reliability analysis of wind turbine blades based on non-Gaussian wind load impact competition failure model. *Measurement*, 164: 107950.
- [4] **Chou J S, Chiu C K, Huang I K, Chi K N** (2013). Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads. *Eng. Fail. Anal*, 27: 99–118.
- [5] **Ruiz M, Mujica L E, Alferez S, Acho L, Tutivén C, Vidal Y, Rodellar J, Pozo F** (2018). Wind turbine fault detection and classification by means of image texture analysis. *Mech. Syst. Signal Process*, 107: 149–167.
- [6] **Wang W, Xue Y, He C, Zhao Y** (2022) Review of the Typical Damage and Damage-Detection Methods of Large Wind Turbine Blades. *Energies*, 15(15): 5672.
- [7] **Peker M** (2009) Görüntü İşleme Tekniği Kullanılarak Gerçek Zamanlı Hareketli Görüntü Tanıma. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi, Sakarya, 12 s.
- [8] **Tesisat.org** (t.y) *Rüzgar Türbini Nedir? Rüzgar Türbini Çalışma Prensibi Nasıldır?* Adres: URL <<https://www.thesisat.org/ruzgar-turbini-nedir-ruzgar-turbini-calisma-prensibi-nasildir.html>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [9] **Işık M C, Kaya O, Türk V, Aydemir F** (2021) Model Rüzgar Türbini Projesi. *Bitirme Projesi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Trabzon, 59 s.
- [10] **Öztürk H K** (2020) Rüzgar Türbinlerinde İşletme ve Bakım. *Engineer and Machinery*, 61(727): 262-279.
- [11] **Ma P, Zhang Y** (2014) Perspectives of Carbon Nanotubes/Polymer Nanocomposites for Wind Blade Materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 651-660.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Hau E** (2006) Wind Turbines Fundamentals, Technology. Application, Economics. Second Edition, *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg, Germany.
- [13] **Kensche, C. W** (2006) Fatigue of Composites for Wind Turbines. *International Journal of Fatigue*, 28: 1363-1374.
- [14] **Çivi, C, Köksal, N. S** (2011) Rüzgâr Türbinlerinde Oluşan Hasarların İncelenmesi. *Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 16(2): 45-56.
- [15] **Khashaba, U A** (2003) Fatigue and Reliability Analysis of Unidirectional GFRP Composites Under Rotating Bending Loads. *Journal of Composites Materials*, 4(37): 317-331.
- [16] **Ronold, K O, Christensen, C J** (2001) Optimization of a Design Code for Wind Turbine Rotor Blades in Fatigue. *Engineering Structures*, 23: 993 -1004.
- [17] **Liao, C C, Zhao, X L, Xu, J Z** (2012) Blade Layers Optimization of Wind Turbines Using FAST and Improved PSO Algorithm. *Renewable Energy*, 42: 227-233.
- [18] **Kam, T, Tsai, S, Chu, K** (1997) Fatigue Reliability Analysis Composite Laminates Under Spectrum Stress. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 34: 1441-1461.
- [19] **Ataya S, Ahmed MM** (2013) Damages of wind turbine blade trailing edge: Forms, location, and root causes. *Eng. Fail. Anal.*, 35: 480–488.
- [20] **Schaarup, J** (2002) Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd ed.; Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark.
- [21] **Zhou Q, Liu C, Bian X, Lo K L, Li D** (2018) Numerical analysis of lightning attachment to wind turbine blade. *Renew. Energy*, 116: 584–593.
- [22] **Han W, Kim J, Kim B** (2018) Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. *Renew. Energy*, 115: 817–823.
- [23] **Mishnaevsky L, Hasager C B, Bak C, Tilg A M, Bech J I, Rad S D, Fæster S** (2021) Leading edge erosion of wind turbine blades: Understanding, prevention and protection. *Renew. Energy*, 169: 953–969.
- [24] **Corten G, Veldkamp H** (2001) Insects can halve wind-turbine power. *Nature*, 412: 41–42.
- [25] **Madi E, Pope K, Huang W, Iqbal T** (2019) A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 103: 269–281.
- [26] **Pérez J M P, Márquez F P G, Ruiz Hernández D** (2016) Economic viability analysis for icing blades detection in wind turbines. *J. Clean. Prod.*, 135: 1150–1160.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [27] PHaselbach P U, Bitsche R D, Branner K (2016) The effect of delaminations on local buckling in wind turbine blades. *Renew. Energy*, 85: 295–305.
- [28] Toft H, Branner K, Berring P, Sørensen J D (2011) Defect distribution and reliability assessment of wind turbine blades. *Eng. Struct.*, 33: 171–180.
- [29] Zhou H, Dou H, Qin L, Chen Y, Ni Y Q, Ko J (2014) A review of full-scale structural testing of wind turbine blades. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 33: 177–187.
- [30] Hua Y, Kasavajhala A R M, Gu L (2013) Elasticeplastic Analysis and Strength Evaluation of Adhesive Joints in Wind Turbine Blades. *Compos Part B Eng.*, 44: 650-656.
- [31] Hayman B, Wedel Heinen J, Brøndsted P (2008) Materials Challenges in Present and Future Wind Energy. *MRS Bull*, 33: 343-353.
- [32] Karabağ S (2015) Rüzgâr Türbini Kanadı İmalatı. 3. *İzmir Rüzgâr Sempozyumu*, Ekim 2015, İzmir, 8-10.
- [33] Hacıaloğlu İ H (2013) Türkiye 10. Kalkınma Planı Projeksiyonunda Kompozit Sektörü Genel Değerlendirmesi. *Türk Kompozit -Kompozit Zirvesi*, 3-5 Ekim 2013, İstanbul, 2-14.
- [34] Avcı B, Yılmaz T B (2012) Rüzgâr Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi. *Bitirme Projesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 49 s.
- [35] Başdemir C, Elibol M (2012) Sandviç Kompozit Plakalarda Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Gerilme Analizi. *Bitirme Projesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, 81 s .
- [36] Veers P S, Ashwill T D, Sutherland H J, Laird D L, Lobitz D W, Griffin D A et al (2003) Trends in The Design, Manufacture and Evaluation of Wind Turbine Blades. *Wind Energy*, 6: 245-259.
- [37] Uysal, A (2008) Rüzgâr Türbini Kanat Malzemelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul, 98 s.
- [38] Bassyouni M, Iqbal,N, Iqbal S S, Abdel Hamid S M S, Abdel Aziz, M H, Javaid U, et al. (2014) Ablation and Thermo-Mechanical Investigation of Short Carbon Fiber Impregnated Elastomeric Ablatives for Ultrahigh Temperature Applications. *Polym Degrad Stab.*, 110: 195-202.
- [39] Griffin D A, Ashwill T D (2003) Alternative Composite Materials for Megawatt- Scale Wind Turbine Blades: Design Considerations and Recommended Testing. *Journal of Solar Energy Engineering* , 125: 515-521.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [40] Babu K S, Subba Raju N V, Srinivasa Reddy, M, Nageswara Rao D (2006). The Material Selection for Typical Wind Turbine Blades Using a Madm Approach & Analysis of Blades. *MCDM*, June 2006, Chania, Greece, 19-23.
- [41] Brondsted P, Lilholt H, Lystrup A (2005) Composite Materials for Wind Power Turbine Blades. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 35: 505-538
- [42] Mishnaevsky Jr L, Brondsted P, Nijssen R, Lekou D J, Philippidis T P (2012) Materials of Large Wind Turbine Blades: Recent Results in Testing and Modelling. *Wind Energy*, 15: 83–97.
- [43] Daniel I M, Ishai O (2006) Engineering Mechanics of Composite Materials. 2nd ed., *Oxford University Press*, New York.
- [44] Garcia J M, García F C, Serna F, Peña J L de la (2010) High-Performance Aromatic Polyamides. *Prog. Polym. Sci.*, 35: 623–686.
- [45] Ehlert G J, Sodano H A (2009) Zinc Oxide Nanowire Interphase for Enhanced Interfacial Strength in Lightweight Polymer Fiber Composites. *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, 1: 1827–1833.
- [46] Wang W, Li R, Tian M, Liu L, Zou H, Zhao X, Zhang L (2013) Surface Silverized Meta- Aramid Fibers Prepared by Bio-Inspired Poly (Dopamine) Functionalization. *ACS. Appl. Mater. Interfaces*, 5: 2062–2069.
- [47] Song H J (2015) Pairing Effect and Tensile Properties of Laminated High-Performance Hybrid Composites Prepared Using Carbon/Glass and Carbon/Aramid Fibers. *Composites Part B*, 79: 61-66.
- [48] Marin J, C Barroso A, Paris F, Cañas J (2008) Study of Damage and Repair of Blades of a 300 kW Windn Turbine. *Energy*, 33 (7): 1068-1083.
- [49] Yağlıkçı M ve Çeliktaş M S (2018) Kompozit Rüzgâr Türbin Kanatlarının Yorulma Ömrüne ve Dayanımına Bağlı Olarak Malzeme Seçimi ve Gelecek Projeksiyonu. *Engineer and Machinery*, 59(690): 39-40.
- [50] Zou L ve Cheng H (2022) Research on Wind Turbine Blade Surface Damage Identification Based on Improved Convolution Neural Network. *Applied Sciences*, 12: 9338. Adres: URL <<https://doi.org/10.3390/app12189338>>, Ziyaret tarihi: 02.07.2025.
- [51] Martinez C, Yeboah F A, Herford S, Brzezinski M VE Puttagunta V (2019). Predicting Wind Turbine Blade Erosion Using Machine Learning. *SMU Data Science Review*, 2(2): 17.
- [52] Batmaz O A, Muyan C, Çöker D (2021) Rüzgar Türbin Kanatlarında Yapıştırıcı Ayrılma Hasarının Kanat Yapısal Bütünlüğüne Etkisi. 6. İzmir Rüzgar Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 1-2.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [53] **Yılmaz O.** (2024) Rüzgar Türbinlerinde Yapay Zeka Tabanlı Arıza Teşhisi Mekanizması. *Yüksek Lisans Tezi*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Bilecik, 72 s .
- [54] **Genç M, Gündoğan M, Girgin Ö** (2023). Rüzgar Türbini Temellerinde Sık Karşılaşılan Yapısal Problemler. 7. İzmir Rüzgar Sempozyumu, İzmir, Türkiye, 1-3.
- [55] **Emeksiz C, Doğan Z, Akbulut A** (2015) Rüzgar Türbinlerinde Karşılaşılan Temel Arızalar ve Prognostik Yöntemler. 3. Anadolu Enerji Sempozyumu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Türkiye, 677-682.
- [56] **Atmaca V** (2005) Örme Kumaşlardaki Üretim Hatalarının Görüntü İşleme Teknikleri İle Otomatik Tespiti ve Sınıflandırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği, İstanbul, 47 s.
- [57] **Neccaroğlu V** (2016) Rüzgar Enerjisi Çalışmalarında Yüzey Pürüzlülüğünün Sayısal Görüntü İşleme Yöntemleri İle Analizi ve Uygulaması. *Yüksek Lisans Tezi*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Bilecik, 55 s.
- [58] **Uçar K** (2018) Silindirik Cisimlerin Görüntü İşleme İle Hata Tespiti. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Konya, 76 s.
- [59] **Bayram R B** (2019) Metal Sektörü İçin Görüntü İşleme Tabanlı Bir Kusurlu Ürün Tespit Sistemi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği, Bursa, i-ii.
- [60] **Dere E** (2023) Görüntü İşleme İle Porselen İzalatör Hasarlarının Tespiti. *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Konya, 74 s.
- [61] **Gonzales R C ve Woods R E** (2018) Digital Image Processing, 4th ed. *Pearson*, Bölüm 3-10.
- [62] **OpenCV.** (t.y.) Canny Edge Detection. *OpenCV Documentation*. Adres: URL https://docs.opencv.org/4.x/da/d22/tutorial_py_canny.html, Ziyaret tarihi : 10.03.2025.
- [63] **Szeliski R** (2022) Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed., *Springer*.
- [64] **Sonka M, Hlavac V, Boyle R** (2014) Image Processing Analysis, and Machine Vision, 4th ed., *Cengage Learning*, Bölüm 5.
- [65] **Canny J** (1986). A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6): 679-698.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [66] **İstanbul Ticaret Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü.** (t.y) *Bilgisayar Sistemleri Laboratuvarı Görüntü Üzerinde Eşikleme(Thresholding)*. Adres: URL <<https://ww3.ticaret.edu.tr/mckasapbasi/files/2015/09/G%C3%B6r%C3%BCnt%C3%BC-%C3%9Czerinde-E%C5%9Fikleme-Thresholding.pdf>>, Ziyaret tarihi: 09.04.2025.
- [67] **Singh D, Gupta P** (2012) A Comparative Study of Otsu, Iterative and Adaptive Thresholding Techniques in Image Segmentation. *International Journal of Computer Applications*, 54: 15.
- [68] **N Otsu**, (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66.
- [69] **Soille P** (2003) *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. (2nd ed.), Springer.
- [70] **Wang Z, Bovik A C** (2002) A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3): 81-84.
- [71] **Jain A K** (1989) *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall.
- [72] **Goodfellow I, Bendigo Y, Courville A** (2016) *Deep Learning*. MIT Press. Adres: URL <<https://doi.org/10.7551/mitpress/10438.001.0001>>, Ziyaret tarihi: 05.05.2025.
- [73] **Sandler M, Howard A, Zhu M, Zhmoginov A, & Chen L C.**(2018) MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and pattern Recognition (CVPR)*, 4510-4520.
- [74] **Howard A G** (2017) MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Mobile Vision Applications. *arXiv preprint*, arXiv:1704.0404861.
- [75] **Opengenus IQ.** (2020) MobileNETV2 Architecture. Adres: URL <<https://iq.opengenus.org/mobilenetv2-architecture/>>, Ziyaret tarihi: 05.05.2025.
- [76] **Aird J A, Barthelmie R J, Pryor S C** (2023) Automated Quantification of Wind Turbine Blade Leading Edge Erosion from Field Images. *Energies*, 16: 2820.
- [77] **Katsaprakakis D A, Papadakis N, Ntintakis L** (2021) A Comprehensive Analysis of Wind Turbine Blade Damage. *Energies*, 14(18): 5974.
- [78] **Siemens Gamesa Renewable Energy.** (2022) Turbine technical specifications. Adres: URL <<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/wind-turbines>> Ziyaret tarihi: 16.06.2025.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [79] **Enercon GmbH.** (2021) Technical data: Rotor blades and components. *Enercon*. Adres: URL <<https://www.enercon.de/en/products/technical-data/>>, Ziyaret tarihi: 16.06.2025.
- [80] **Siemens Gamesa Renewable Energy.** (2021) Maintenance and Repair Manual for Rotor Blades: Onshore Wind Turbines. *Siemens Gamesa*, Rev.2.
- [81] **Enercon GmbH.** (2020) Technical Description: Rotor Blade Damage Patterns and Service Recommendations. *Enercon GmbH Technical Service Division*.
- [82] **International Energy Agency Wind.** (2022) Task 33: Reliability Data – Rotor Blades. *IEA Wind TCP*. Adres: URL <<https://www.ieawind.org/task-33>>, Ziyaret tarihi: 17.06.2025.
- [83] **DNV.** (2021) Rotor blades for wind turbines. *DNV-ST-0376*. Adres: URL <<https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ST/2021-06/DNV-ST-0376.pdf>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [84] **3M.** (2020) 3M Wind Blade Bonding Adhesives Technical Datasheet. *3M Energy Division*. Adres: URL <https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b00038856/>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [85] **Henkel.** (2019) LOCTITE Epoxy Adhesive Systems for Wind Energy. *Henkel Corporation*. URL <<https://www.henkel-adhesives.com/>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [86] **Gurit.** (2018) T-Paste and SPRIT Repair Systems Datasheet. *Gurit Composite Materials*. Adres: URL <<https://www.gurit.com/en/solutions/wind-energy>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [87] **Hempel.** (2017) Protective Coatings for Wind Turbine Blades. *Hempel Group*. Adres: URL <<https://www.hempel.com>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [88] **LM Wind Power.** (2020) Blade Maintenance Best Practices. *Whitepaper*. Adres: URL <<https://www.lmwindpower.com/en/stories-and-press>>, Ziyaret tarihi: 06.05.2025.
- [89] **ASTM D2990-17** (2017) Standart Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics. *ASTM International*.
- [90] **Baker A A, Dutton S ve Kelly D** (2004). Composite Materials for Aircraft Structures. *VA American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2nd ed., Reston.
- [91] **Ogin S L ve Potter K D** (2018) Surface Preparation and Bonding Techniques for Repair of Composite Structures. *Journal of Composite Structure*, 202: 112-121.



ÖZGEÇMİŞ

. 2014

yılında başladığım Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2019 yılında mezun oldum. 2022 yılında başladığım Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği tezli yüksek lisansına devam etmekteyim. 2018 yılında Zonguldak Merkez İlçe Seçim Kurulunda Teknisyen olarak göreve başladım.

İLETİŞİM BİLGİLERİ: