



RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT HASARLARININ GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ VE HASAR ALANININ HESAPLANMASI

Kutay AKBULUT^{1*}, Tuğba Özge ONUR¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

Özet: Rüzgar türbinleri, maruz kaldıkları zorlu çevresel koşullar ve dinamik yükler nedeniyle 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 yol açabilmektedir. Bu nedenle, türbin kanatlarındaki hasarların hızlı ve etkin bir şekilde tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Günümüzde türbin hasarları genellikle periyodik bakım süreçleri kapsamında, uzman ekiplerin yerinde görsel incelemeleriyle veya teleskopik kameralar yardımıyla tespit edilmektedir. Ancak, rüzgar türbinlerinin genellikle erişimi zor bölgelerde, özellikle de açık deniz (offshore) alanlarında konumlandırılması, bu süreçleri hem zaman alıcı hem de maliyetli hale getirmektedir. Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespitinin daha hızlı, güvenli ve düşük maliyetli bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla insansız hava araçları (İHA) veya drone tabanlı bir görüntüleme yöntemi önerilmektedir. Bu kapsamda, Rass Wind Enerji'den temin edilen hasarlı kanat görüntüleri kullanılarak, görüntü işleme teknikleriyle hasarlı bölgeler belirlenmiş ve hasar boyutları tespit edilmiştir. Önerilen yöntem, yetkili personelin doğrudan türbine çıkmasına gerek kalmadan, uzaktan hasar analizi yapılmasını sağlayarak bakım süreçlerini kolaylaştırmayı ve onarım sürecini hızlandırmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: Rüzgar türbini, Kanat hasar tespiti, Görüntü işleme, Hasarlı alan hesaplama, Otomatik bakım

Detection of Wind Turbine Blade Damages and Calculation of Damage Area Using Image Processing Methods

Abstract: Wind turbines are subjected to harsh environmental conditions and dynamic loads, which can lead to structural damage over time. In particular, damage to turbine blades reduces aerodynamic efficiency, negatively affecting energy production and potentially causing significant structural failures in the long run. Therefore, it is crucial to detect blade damage quickly and effectively. Currently, turbine damage is typically identified through periodic maintenance inspections conducted by expert teams or using telescopic cameras. However, since wind turbines are often located in remote areas, especially offshore, these inspection processes are time-consuming and costly. In this study, a drone- or unmanned aerial vehicle (UAV)-based imaging method is proposed to detect wind turbine blade damage more efficiently, safely, and cost-effectively. For this purpose, damaged blade images obtained from Rass Wind Energy were analyzed using image processing techniques to identify damaged regions and determine the extent of the damage. The proposed method enables remote damage assessment without requiring personnel to climb the turbine, thereby facilitating maintenance processes and expediting repair operations.

Keywords: Wind turbine, Blade damage detection, Image processing, Damaged area calculation, Automated maintenance

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Zonguldak Bülent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 67100, Zonguldak, Türkiye

E mail: kutayakbulut@gmail.com (K. AKBULUT)

Kutay AKBULUT  <https://orcid.org/0000-0001-9911-4769>

Tuğba Özge ONUR  <https://orcid.org/0000-0002-8736-2615>

Gönderi: 24 Mart 2025

Kabul: 26 Ağustos 2025

Yayınlanma: 15 Kasım 2025

Received: March 24, 2025

Accepted: August 26, 2025

Published: November 15, 2025

Cite as: Akbulut K, Onur TÖ. 2025. Detection of wind turbine blade damages and calculation of damage area using image processing methods. BSJ Eng Sci, 8(6): 1715-1722.

1. Giriş

Fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye saldıgı sera gazlarının iklim değişikliğine olan olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynakları gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Bu kaynaklar arasında rüzgar enerjisi, yüksek potansiyeli ve sürdürülebilir yapısıyla öne çıkmaktadır. Rüzgar türbini, rüzgar enerjisini mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemdir (Yavuz, 2021). Bir rüzgar türbini kanatlar, jeneratör, nacelle, kule ve dişli kutusu

(gearbox) ve kontrol sisteminden oluşmaktadır. Rüzgar, türbin kanatlarına çarparak aerodinamik kuvvetler sayesinde gerekli olan dönme hareketi oluşturulmuş olur. Bu dönme hareketi jeneratöre aktarılarak elektrik üretilir. Üretilen elektrik, şebekeye aktarılır veya doğrudan kullanılabilir. Rüzgar türbinleri dönme eksenlerine göre Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri (YERT) ve Düşey Eksenli Rüzgar Türbinleri (DERT) olarak iki gruba ayrılmıştır (Işık vd., 2021).

Küresel ölçekte rüzgar enerjisinden yararlanma oranı



hızla artarken, rüzgar türbinlerinin kapasitesi ve boyutları da büyümektedir. Günümüzde modern rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatların uzunluğu 100 metreyi aşabilmekte ve bu durum üretim maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Tek bir rüzgar türbininin maliyetinin yaklaşık %20'si kanatlardan kaynaklanmaktadır. Günümüzde üretilen rüzgar türbini kanatlarının büyük çoğunluğu cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) malzemeden yapılmakta olup, bazı kritik bileşenlerde karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) de kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri genellikle şehir merkezlerinden uzak, zorlu çevresel koşullara sahip bölgelere özellikle açık deniz (offshore) sahalarına kurulmaktadır. Bu bölgelerdeki ekstrem hava koşulları, kanatların sürekli olarak değişken yüklere, aşınmaya ve doğal afetlere maruz kalmasına neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar, kanat arızalarının tüm rüzgar türbini arızalarının %19,4'ünü oluşturduğunu göstermektedir.

Rüzgar türbini kanatlarında meydana gelen hasarların başlıca nedenleri arasında üretim sürecindeki kusurlar, insan faktörleri, düzensiz yük dağılımı, yorgunluk, buzlanma, nem emilimi, dolu, ultraviyole radyasyon, atmosferik korozyon, fırtına ve yıldırım çarpmaları bulunmaktadır. Bu tür hasarların erken tespit edilmemesi durumunda, onarım maliyetleri artmakta ve türbinin genel verimliliği düşmektedir. Hatta bazı durumlarda jeneratör seti gibi kritik bileşenler de zarar görebilmekte ve ciddi ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Özellikle offshore rüzgar türbinlerinde bakım ve işletme maliyetleri toplam maliyetin %15-35'ini oluşturduğundan, hasarların zamanında tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Geleneksel yöntemlerle rüzgar türbin kanatlarının incelenmesi, çoğunlukla bakım ekiplerinin doğrudan fiziksel müdahalesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu süreç, hem yüksek iş gücü gerektirmekte hem de ulaşım ve güvenlik açısından ciddi zorluklar barındırmaktadır (Wang vd., 2022).

Batmaz vd. (2021), tarafından yapılan çalışmada rüzgar türbin kanatlarında yapıştırıcı ayrılma hasarının kanat yapısal bütünlüğüne etkisi araştırılmıştır. 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 boyutta 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.

Yılmaz (2024) tarafından yatay eksenli, üç kanatlı, yunuslama açısı kontrollü, 4,8 MW 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 değerlendirilmiştir. Türbinden elde edilen veriler yapay sinir ağları ile kullanılarak dokuz farklı arıza senaryosunda arıza teşhisi yapılmaya çalışılmıştır. Çalışmada rüzgar türbin sisteminin arızalı olup olmadığı belirlenmiştir.

Kaewniam vd. (2022) rüzgar türbinlerini yapısal sağlık izleme ile hasar tespiti konusunu incelemiştir. Özellikle rüzgar türbin kanatlarını çeşitli çevresel etkiler, yorulma yükleri gibi etkenler oldukça etkilemektedir. Bundan dolayı türbin kanatlarında hasarları tespit etmek amacıyla yapısal sağlık izleme ve tahribatsız test teknikleri kullanılmıştır. Sinyal tepkileri, sensörler, özellikler, NDT teknikleri, test yöntemleri gibi araştırmalar incelenmiştir.

Gohar vd. (2023) yaptıkları çalışmada insansız hava araçları ile elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntüler ile rüzgar türbini kanatlarının yüzeyindeki küçük ve orta ölçekli hasarlar için dilim destekli çıkarımın avantajlarından faydalanarak hasar tespit araştırması yapılmıştır. Rüzgar türbini kanat görüntülerindeki yüzey hasarlarının tespiti için derin sinir ağı teknolojisiyle karşılaştırmasını sağlamaktadır. Dilim destekli hasar tespiti kullanılmasının faydalarını ve dronelerden elde edilen yüksek çözünürlüklü görüntü veri setinde yaptığı önemli iyileştirmeleri kapsamaktadır.

Genç, Gündoğan, Girgin (2023) tarafından yapılan çalışmada rüzgar türbini temellerinde sık karşılaşılan yapısal problemler incelenerek kule-temel bağlantısı hasar mekanizmasının arızası irdelenmiştir. Büyük yapısal kusurları bulunan rüzgar türbinlerinde hasarın onarımı mümkün olmadığı için türbinlerde yapı sağlığı izleme (YSİ) önemli bir mekanizmadır. Böylece rüzgar türbinlerinde hasar tespit edilip gerekli güçlendirmeler yapılabilmektedir.

Emeksiz vd. (2015), yaptıkları çalışmada yatay eksenli rüzgar türbinlerinde karşılaşılan arızaları inceleyerek, uygulanan prognostik yaklaşımları ele almışlardır. 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. Bu yöntemler arasında, dişli kutusu için kullanılan titreşim ve zaman-frekans analizleri, çift beslemeli asenkron jeneratörler için karşılaşılan sargı arızalarında spektral analiz yöntemi gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır.

Wang vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada rüzgar türbin kanat hasarlarının tespit edilmesi için görsel muayene, termal izleme, ultrasonik test, titreşim izleme, akustik emisyon gibi yöntemler vurgulanmıştır.

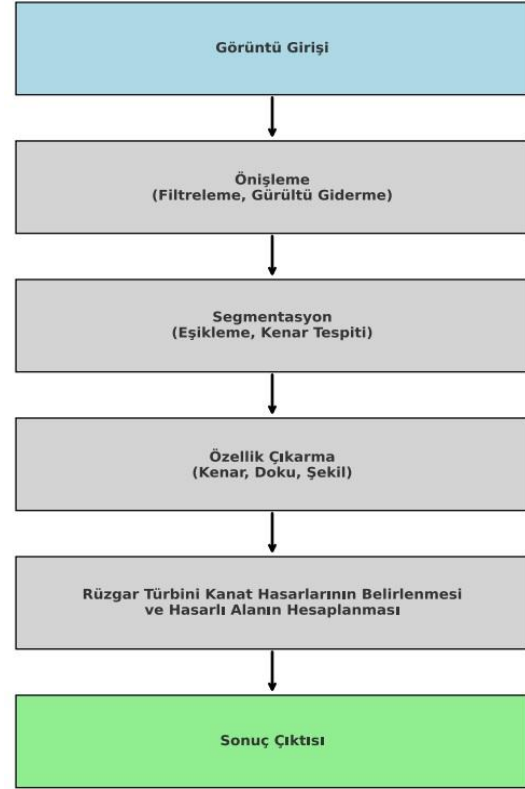
Bu çalışmada, rüzgar türbini kanatlarındaki hasarlı bölgelerin tespit edilmesi amacıyla drone veya insansız hava araçları (İHA) ile görüntüleme yöntemi

önerilmektedir. Elde edilen görüntüler üzerinde görüntü işleme yöntemleri uygulanarak hasar tespiti yapılabilmesi ve hasar boyutunun belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, Rass Wind Enerji'den temin edilen rüzgar türbini kanat görüntüleri üzerinde görüntü işleme teknikleri uygulanarak, hasarlı alanlar belirlenmiş ve boyut hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Python programlama dili kullanılarak geliştirilen görüntü işleme algoritmaları ile hasarlı bölgeler tespit edilerek alan ölçümleri yapılmıştır.

Görüntü işleme tabanlı hasar tespit ve ölçüm sistemleri, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Öncelikle, yetkili personelin fiziksel müdahalesine gerek kalmadan uzaktan hasar tespiti yapılmasına olanak tanır ve rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde incelenmesini sağlar. Görüntü işleme teknikleri manuel ölçümlere kıyasla daha hızlı ve otomatik analiz gerçekleştirilerek zaman tasarrufu elde edilir. Ayrıca, bilgisayarla görüntü işleme algoritmaları insan hatasını minimize ederek yüksek hassasiyet ve tutarlılık sağlar, böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Ulaşılmaması zor bölgelerde manuel inceleme gerekliliğini ortadan kaldırarak iş güvenliği açısından önemli bir avantaj sunar. Bunun yanı sıra, hasar verileri saklanarak uzun vadeli analizler yapılabilir ve yapay zeka destekli sistemler sayesinde hasar türleri sınıflandırılabilir. Geleneksel fiziksel ölçüm yöntemlerine kıyasla daha düşük maliyetle uygulanabilir ve daha az müdahale gerektirerek operasyonel verimliliği artırmaktadır. Son olarak, ölçekleme yöntemi ile piksel tabanlı ölçümler cm^2 veya m^2 cinsine dönüştürülerek gerçek dünya mühendislik hesaplamalarına doğrudan entegre edilebilir. Görüntü işleme tabanlı ölçüm sistemleri, rüzgar türbinleri ve benzeri büyük yapılar için hızlı, güvenli ve maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Hasar alanının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için öncelikle görüntü işleme adımları uygulanarak gürültü azaltma ve gri tonlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kenar belirleme algoritmaları ile hasarlı bölgenin sınırları tespit edilmiş, ardından ölçekleme işlemiyle piksel/cm dönüşüm faktörü kullanılarak gerçek alan hesaplanmıştır. Çalışma, rüzgar türbini kanatlarındaki hasar tespit sürecini daha güvenli, hızlı ve verimli hale getirmek amacıyla görüntü işleme teknikleri ile temassız bir ölçüm yöntemi geliştirmeyi ve geleneksel yöntemlere göre yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada, Rass Wind Enerji şirketinden temin edilen hasarlı rüzgar türbin kanat görüntülerinden yararlanılmıştır. Şekil 2'de kullanılan görüntü 612*467 çözünürlüğünde olup jpg formatındadır. Şekil 3'de kullanılan görüntü ise 698*429 çözünürlüğünde olup jpg formatındadır. Tespit süreci Şekil 1'de verilen akış diyagramı aşamalarından oluşmaktadır:



Şekil 1. Görüntü işleme akış diyagramı.

2.1. Görüntü Ön İşleme

Görüntüyü iyileştirerek, onarma gibi işlemler ile görüntü daha iyi bir seviyeye çekilir. Dönüştürme, veri temizleme ve ayrıştırma görüntü işlemenin ana temeline oluşturmaktadır. Yapılan çalışmada görüntü gri seviyeye dönüştürülerek filtreleme işlemleri uygulanmıştır.

2.1.1. Gri seviyeye dönüştürme

Görüntülerde her bir renk 8 bitten oluşmaktadır. Üç temel rengi ifade eden RGB kodları tüm renklerin oluşturulduğu bir ışık uzayıdır. Gri seviyedeki görüntüler ise gri, beyaz ve siyah renklerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada eşitlik 1 kullanılarak renkli görüntüler gri seviyeye dönüştürülmüştür:

$$\text{Grayscale} = 0.2989 \cdot R + 0.5870 \cdot G + 0.1140 \cdot B \quad (1)$$

Eşitlik 1'de kırmızı (R) bileşeni 0.2989 ağırlığında, yeşil (G) bileşeni 0.5870 ağırlığında, mavi (B) bileşeni 0.1140 ağırlığında kullanılır.

2.1.2. Filtreleme

Görüntü üzerindeki istenmeyen noktaların veya gürültülerin giderilmesi için filtreleme işlemleri kullanılır.

Ortalama (mean) ve Gauss en yaygın kullanılan yumuşatma filtreleridir. Gauss (Gaussian) filtresi, ortalama filtresinden farklı olarak komşu piksellere Gaussian dağılımına göre ağırlık verir. Böylece uzak olan komşuların etkisi azalır ve daha doğal bir bulanıklaştırma işlemi sağlanır (Gonzales ve Woods, 2018). Bu çalışmada da bulanıklaştırma eşitlik 2 ile verilen Gauss filtresi kullanılarak sağlanmıştır.

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

Eşitlik 2’de $G(x, y)$ bulanıklaştırılmış piksel değeri, σ , Gaussian dağılımının standart sapması, x, y , pikselin merkeze olan uzaklıklarını göstermektedir.

2.2. Kenar Belirleme

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 amacıyla Sobel, Prewitt, Laplacian filtreleri ve Canny kenar algoritması sık kullanılan yöntemlerdir. Sobel filtresi, X ve Y yönlerinde türev alarak kenarları belirleme işlemini yapar ve gürültüye karşı hassas ama hızlıdır. Prewitt filtresi, Sobele benzer ama ağırlıklandırma faktörü yoktur ve gürültüye biraz daha hassastır. Laplacian filtresinde ise ikinci türev yöntemi kullanılarak kenar belirleme işlemi yapılır. Görüntüdeki gürültüyü arttırılabilir. Ancak çatlaklar gibi ince olan detayları ortaya daha iyi çıkarabilir. Canny kenar algoritması ise gürültüye daha dayanıklıdır ve hassas kenar tespiti için kullanılır.

Bu çalışmada, rüzgar türbin kanatlarında hasarların tespitinde Canny kenar belirleme algoritması kullanılmıştır. 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 (Canny, 1986).

$$I_s(x, y) = G(x, y) * I(x, y) \quad (3)$$

Eşitlik 3’te $G(x, y)$ eşitlik 2’deki gauss filtresidir. $I_s(x, y)$ ise filtrelenen görüntüyü ifade etmektedir. 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 4-5 ile hesaplanmaktadır:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_s(x, y) \quad (4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * I_s(x, y) \quad (5)$$

Eşitlik 4-5’te $G_x(x, y)$ 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 6 ile hesaplanmaktadır.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (7)$$

Eşitlik 7’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 belirlenmiştir.

$$\text{Eğer } G(x, y) > T_{high} = \text{Kesin Kenar} \quad (8)$$

$$\text{Eğer } T_{low} < G(x, y) < T_{high} = \text{Zayıf Kenar} \quad (9)$$

$$\text{Eğer } G(x, y) < T_{low} = \text{Kenar değil} \quad (10)$$

2.3. Alan Hesaplama

Rüzgar türbinleri, maruz kaldıkları zorlu çevresel koşullar nedeniyle zamanla hasar görebilir. Türbin kanatlarında oluşan bu hasarlar, zamanında tespit edilmese ciddi maliyetlere ve enerji üretiminde aksamalara yol açabilir. Bu nedenle, yalnızca hasarın tespit edilmesi değil, aynı zamanda hasarlı alanın büyüklüğünün doğru bir şekilde hesaplanması da kritik bir öneme sahiptir. Yapılan çalışmada, görüntü işleme teknikleri kullanılarak türbin kanatlarının hasarlı bölgeleri belirlenmiş ve ardından alan hesaplaması yapılarak hasarın boyutu nicel olarak değerlendirilmiştir. Şekil 1’de verilen akış diyagramı adımları kullanılarak hasarlı bölge belirlenmektedir. Daha sonra ölçekleme yapılarak piksel/cm cinsinden dönüşüm faktörünün belirlenmesi gerekmektedir. Böylece gerçek alan hesaplanabilir. Şekil 3’te fiziksel uzunluk olarak cetvelde görülen 24 cm kullanılacaktır. Cetvelin görselde kapladığı tahmini piksel uzunluğu ise eşitlik 11-12 ile 800 piksel olarak elde edilmiştir. Eşitlik 11 ile verilen piksel/cm ölçekleme faktörü;

$$Px/cm = \frac{\text{Fiziksel uzunluk(cm)}}{\text{Piksel cinsinden uzunluk}} \quad (11)$$

Hasarlı bölge alanı ise eşitlik 12 ile piksel cinsinden hesaplanmaktadır.

$$A_{px} = \Sigma \text{Konturların Alanı (piksel} \hat{A}^2) \quad (12)$$

Eşitlik 12’de $\Sigma \text{Konturların Alanı}$, çatlak bölgenin alanı konturların kapladığı piksel alanı toplamını ifade etmektedir.

Gerçek dünyadaki alanı ise (cm^2) olarak eşitlik 13 ile hesaplanmıştır.

$$A_{cm\hat{A}^2} = A_{px} * (px * cm)^2 \quad (13)$$

Şekil 2’de 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 (Anon., 2021a; Anon., 2022).

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 14-16 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntüde kanat genişliği tam ölçülemediğinden, görüntü genişliğinin %60'ını kapladığı varsayılmıştır.

$$\text{Kanat Genişliği (piksel)} = 0,6 * \text{Görüntü Genişliği} \quad (14)$$

$$\text{Görüntü Genişliği} = 1024 \text{ (Örnek bir değer)} \quad (15)$$

$$\text{Kanat Genişliği (piksel)} = 0,6 * 1024 = 614 \text{ piksel} \quad (16)$$

Kanat uzunluğunun ölçek (bir pikselin gerçek dünyadaki uzunluğu) faktörü ise eşitlik 17-18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ölçek (m/px)} = \frac{\text{Gerçek Kanat Genişliği (m)}}{\text{Kanat Genişliği (px)}} \quad (17)$$

$$\text{Ölçek (m/px)} = \frac{3}{614} = 0,00489 \text{ metre/piksel} \quad (18)$$

Bir pikselin kapladığı alan eşitlik 19 kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Piksel Alanı (m}^2\text{)} = (\text{Ölçek (m/px)})^2 \quad (19)$$

$$\text{Piksel Alanı} = (0,00489)^2 = 2,39 * 10^{-5} \text{ (m/px)}^2 \quad (20)$$

Toplam hasarlı alanı bulmak için eşitlik 21 kullanılır.

$$\text{Hasarlı Alan (m}^2\text{)} = \text{Hasarlı Alan (piksel}^2\text{)} * \text{Piksel Alanı (m}^2\text{/piksel}^2\text{)} \quad (21)$$

$$\text{Hasarlı Alan (m}^2\text{)} = 168,912 * 2,39 * 10^{-5} = 0,00404 \text{ m}^2 \quad (22)$$

Hasarlı bölge alanı 0,00404 m² olarak bulunmuştur. Kanat genişliğini 4 metre olarak alırsak;

$$\text{Hasarlı Alan (piksel}^2\text{)} = 168,912 \quad (23)$$

$$\text{Ölçek (m/px)} = \frac{4}{614} = 0,00651 \text{ metre/piksel} \quad (24)$$

Bir piksel alanı hesaplamak için eşitlik 25 kullanılır.

$$\text{Piksel Alanı} = (0,00651)^2 = 4,24 \text{ (m/px)}^2 \quad (25)$$

Toplam hasarlı alanı bulmak için eşitlik 26 kullanılır.

$$\text{Hasarlı Alan (m}^2\text{)} = 168,912 * 4,24 * 10^{-5} = 0,00716 \text{ m}^2 \quad (26)$$

Hasarlı bölge alanı 0,00716 m² olarak bulunmuştur. Şekil 3'te verilen görüntüde yükseklik 800 piksel olduğundan, eşitlik 11 ile ölçekleme faktörü 0,03 piksel/cm olarak elde edilmiştir. Görüntüdeki çatlak bölgenin piksel alanı ise 6200 px² olarak tespit edildiğinden eşitlik 13 kullanılarak hasarlı bölge alanı 5,58 cm² olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Rüzgar türbinlerinde kanatlarda oluşan hasarın belirlenip alanının ölçülebilmesi için standart rüzgar türbin kanadı genişlikleri baz alınarak yapılan ölçümler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada hasarlı alanın piksel cinsinden bulunabilmesi için görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Görüntüde hasarlı alanın

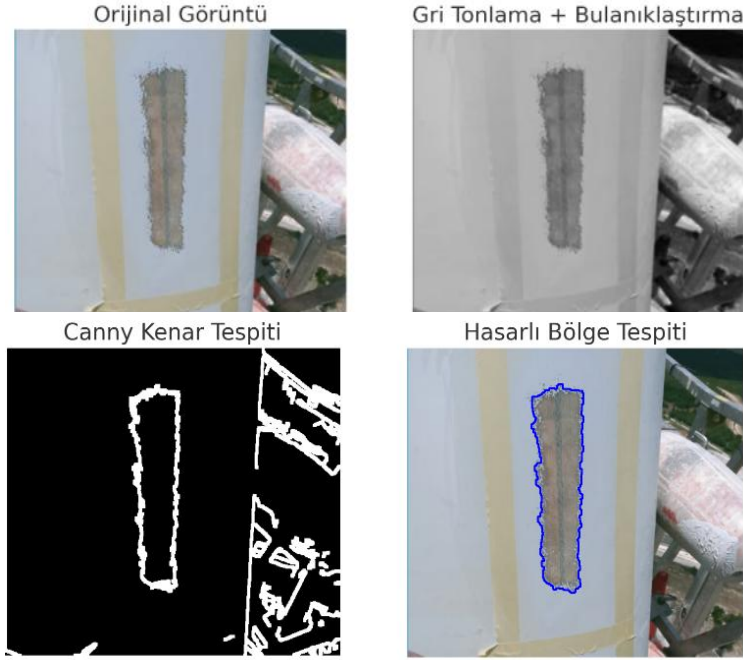
konturu algılanıp HSV (Hue, Saturation Value) renk uzayına dönüştürülmüştür. Mavi kontur belirli bir HSV aralığında yer aldığından dolayı bu aralık kullanılarak maskeleme yapılmıştır. Böylece bu aralıkta yer alan alt sınır ve üst sınır matrisleri kullanılarak binary maske (siyah-beyaz görüntü) oluşturulmuştur. 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 m²'ye çevrilmiştir. Bu alanın kanat genişliği arttıkça hasarlı alanın büyüdüğü görülmektedir. 3 metre kanat genişliği olan rüzgar türbininde hasarlı alanın 0,00404 m² 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 m² olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuç

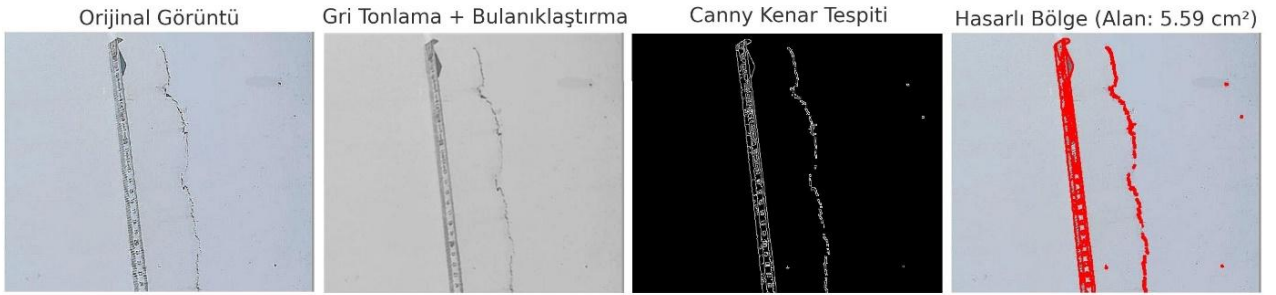
Yapılan çalışmada, rüzgar türbin kanatlarında oluşan hasarların tespit edilmesi ve hasarlı bölgelerin alanlarının belirlenmesi amacıyla görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Geleneksel yöntemlere kıyasla, görüntü işleme tabanlı analizler, hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, elde edilen görüntüler çeşitli ön işleme adımlarından geçirilmiş, kenar tespiti uygulanarak hasarlı bölgeler belirlenmiş ve alan hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlar, görüntü işleme yöntemlerinin yüksek doğrulukla hasar tespiti yapabildiğini ve alan hesaplamalarının hassasiyetini artırdığını göstermektedir. Elde edilen veriler, rüzgar türbinlerinin bakım ve onarım süreçlerini optimize etmek için kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntemin otomatikleştirilmesi, yetkili personelin fiziksel müdahalesine gerek kalmadan uzaktan ve güvenli bir şekilde denetim yapılmasını sağlayarak iş güvenliğini artırmaktadır.

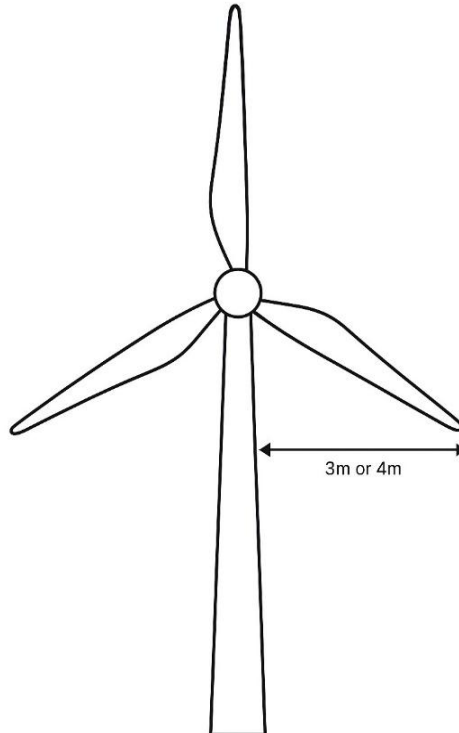
Gelecekte, yapay zeka destekli analizlerin entegrasyonu ile sistemin doğruluğunun ve etkinliğinin daha da artırılması hedeflenmektedir.



Şekil 2. Ele alınan birinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.



Şekil 3. Ele alınan ikinci görüntüde alan hesaplaması için yapılan işlem adımları.



Şekil4. Kanat genişliği 3m veya 4m olarak verilen türbin yapısı.

Tablo 1. Kanat genişliği 3 metre alındığında elde edilen 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 m^2	Gerçek dünyada hasarlı bölgenin büyüklüğü

Tablo 2. Kanat genişliği 4 metre alındığında elde edilen 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 m^2	Gerçek dünyada hasarlı bölgenin büyüklüğü

Tablo 1 ve Tablo 2’de elde edilen değerler kanat genişliği 3 metre ve 4 metre üzerinden hesaplanmıştır. Enercon GmbH ve Siemens Gamesa gibi türbin üreticilerinin teknik dokümanları 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.

Gerçek dünyada rüzgar türbini kanatlarındaki tipik yüzey hasarları, üreticilerin bakım kayıtlarına ve akademik çalışmalara göre bakıldığında 0,002 m^2 ile 0,01 m^2 aralığında değişmektedir (Anon., 2020; Anon., 2021b; IEA Wind, 2022). Bu değer referans alınarak karşılaştırma metrikleri hesaplanmıştır.

Tablo 3. Hesaplanan hasarların literatür hasar aralığı ile karşılaştırılması

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

Literatür aralığı= 0,002 m^2 ile 0,01 m^2 , Yüzde Sapma= referans orta değer: 0,006 m^2 ((Hesaplanan-Referans) / Referans) * 100

Tablo 3’de görüldüğü üzere, yapılan hesaplamalar literatürdeki aralıkla uyumlu sonuçlar üretmiştir. Bu durum, görüntü işleme yoluyla elde edilen alan ölçümünün temel düzeyde güvenilir olduğunu göstermektedir. Ancak kanat genişliği 3 metre referansıyla yapılan hesaplama, hasar alanını olduğundan

küçük gösterebilir. Bu nedenle küçük boyutlu hasarların tespiti için güvenli kabul edilebilir. 4 metre genişlik referansıyla yapılan hesaplama ise daha büyük hasarların tespiti için uygundur. Ancak bu durumda aşırı tahmin olasılığı mevcuttur. Bu nedenle, kullanılan türbin modeline ait üretici teknik dokümanlarından alınan net ölçümler temel alınmalı ve hesaplamalar bu doğrultuda revize edilmelidir.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	K.A.	T.Ö.O.
K	50	50
T	40	60
Y	30	70
VTI	70	30
VAY	50	50
KT	60	40
YZ	50	50
KI	40	60
GR	60	40

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Teşekkür

Bu araştırmada alan hesaplaması için kullanılan görüntüler Rass Wind Enerji'den temin edilip, izin alınarak kullanılmıştır.

Kaynaklar

- Anonymous. 2020. Technical description: Rotor blade damage patterns and service recommendations. In: Enercon GmbH Technical Service Division, Aurich, Germany, pp: 1-4.
- Anonymous. 2021a. Enercon GmbH Technical data: Rotor blades and components. Enercon. URL: <https://www.enercon.de/en/products/technical-data/> (accessed date: June 16, 2025).
- Anonymous. 2021b. Siemens Gamesa Renewable Energy Maintenance and repair manual for rotor blades. In: Onshore wind turbines, Rev. 2, 4-8.
- Anonymous. 2022. Siemens Gamesa Renewable Energy Turbine technical specifications. URL: https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/wind-turbines_ (accessed date: June 16, 2025).
- Batmaz OA, Muyan C, Çöker D. 2021. Rüzgar türbin kanatlarında yapıştırıcı ayrılma hasarının kanat yapısal bütünlüğüne etkisi. 6. İzmir Rüzgar Sempozyumu, İzmir, Türkiye, ss: 1-2.
- Canny J. 1986. A Computational approach to edge detection. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, PAMI, 8(6): 679-698.
- Dere E. 2023. Görüntü işleme ile porselen izalatör hasarlarının tespiti. PhD Thesis, Konya Techn Univ, Faculty Eng, Department Electric Electron Eng pp: 39-42. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.13091/4519> (accessed date: March 10, 2025).
- Emeksiz C, Doğan Z, Akbulut A. 2015. Rüzgar türbinlerinde karşılaşılan temel arızalar ve prognostik yöntemler. 3. Anadolu Enerji Sempozyumu, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Türkiye, ss: 677-682.
- Genç M, Gündoğan M, Girgin Ö. 2023. Rüzgar türbini temellerinde sık karşılaşılan yapısal problemler. 7. İzmir Rüzgar Sempozyumu, 21-22 Eylül, İzmir, Türkiye, ss: 1-3.
- Gohar I, Halimi A, See J, Yew WK, Yang C. 2023. Slice-aided defect detection in ultra high-resolution wind turbine blade images. Machines, 11(10): 953.
- Gonzales RC, Woods RE. 2018. Digital image processing, 4th ed. Pearson, New York, USA, pp: 26-28.
- Işık MC, Kaya O, Türk V, Aydemir F. 2021. Model rüzgar türbini projesi. Undergraduate Project, Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Trabzon, Türkiye, pp: 2-3.
- Kaewniam P, Cao M, Alkayem NF, Li D, Manoach E. 2022. Recent advances in damage detection of wind turbine blades. In: A state-of-the-art review. Renewable Sustainable Energy Rev, 167: 112470.
- Wang W, Xue Y, He Ca, Zhao Y. 2022. Review of the typical damage and damage-detection methods of large wind turbine blades, Energies, 15(15): 5672.
- Yavuz İ. 2021. Rüzgar türbini dönüştürücülerinin esnek hesaplama yöntemi ile denetimi. PhD Thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Nevşehir, Türkiye, pp: 1-6.
- Yılmaz O. 2024. Rüzgar türbinlerinde yapay zeka tabanlı arıza teşhisi mekanizması. PhD Thesis, Bilecik Şeyh Edebali University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Bilecik, Türkiye, pp: 1-5.