

RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KESTİRİMCİ BAKIM UYGULAMALARI

Uğur Yayan¹, Caner Demir², Sezai Taşkın³

^{1,2} Siemens Gamesa Renewable Enerji, İzmir

³ Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Manisa

ugur.yayan@siemensgamesa.com¹

caner.demir@siemensgamesa.com²

sezai.taskin@cbu.edu.tr³

ÖZET

Rüzgar enerji santrali yatırımcıları için bakım ve onarımlara yönelik kestirimci bakım önlemlerini artırma kabiliyetine sahip teknolojileri ve araçları kullanarak operasyonlarını iyileştirme, bakım ve işletme maliyetlerini azaltma, ürün yaşam döngüsünü artırma konusundaki çözümler çok daha önemli hale gelmiştir. Rüzgar türbinlerinde kestirimci bakım, veri analizi ve öngörü modelleri kullanarak türbinlerin performansını izlemeyi ve olası arızaları önceden tahmin etmeyi amaçlayan bir yaklaşımdır. Rüzgar türbini ekipmanlarından titreşim, sıcaklık, basınç vb. değişkenlerin izlenmesi ve bu sinyallerin yorumlanması yoluyla ekipmanlarda oluşabilecek risklerin türbin plansız duruşa gitmeden önce tespit edilip ortadan kaldırılması, doğru planlama ve minimum duruşla gerekli parça değişiminin yapılması ve verimin artırılması sağlanır.

Bu çalışma, rüzgar türbinlerinde oluşabilecek riskleri önceden tespit ederek daha büyük arızaları ve plansız ani duruşları önleyerek sektördeki önemli bir sorunu ele almakta ve verimlilik artırıcı bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada, kestirimci bakımın rüzgar türbinlerinin performansı ve işletme sürekliliği üzerindeki etkisi ile ilgili örneklere yer verilmiştir.

1. GİRİŞ

Rüzgar türbinleri günümüzde sürdürülebilir enerji üretiminde önemli rol oynamaktadır. Rüzgar enerjisi, elektrik enerjisi üretimi için en hızlı büyüyen yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer almaktadır [1]. Ancak, rüzgar türbinlerinin sürekli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için düzenli bakım ve onarım gerekmektedir.

Modern rüzgar türbinleri minimum 20 yıllık ömür ve 120.000 saat işletme süresi esasına göre tasarlanmaktadır. Ancak türbinlerin gerçek ömrü, türbinin kalitesine ve bölgenin hava şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Deneyimler, türbinler henüz yeni iken bakım masraflarının çok düşük olduğunu, işletmede kaldıkları süre arttıkça da bakım maliyetlerinin arttığını göstermektedir. Bu durum zorlu hava koşulları, zamanla aşınmalar, mekanik arızalar ve operasyonel sorunlar gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

İşletme ve bakım (O&M) maliyetleri türbin operatörleri için her zaman ciddi bir yük oluşturmuştur. Karasal rüzgar türbin projeleri için işletme ve bakım maliyetleri servis ziyaretleri, sigorta maliyetleri ve yedek parçalar da hesaba katıldığında toplam yaşam döngüsü maliyetlerinin %20-30'unu oluşturmaktadır [2]. Ayrıca açık deniz rüzgar türbin projeleri için işletme ve bakım maliyetleri, denizdeki zorlu işletme koşulları, saha erişimi, karmaşık bakım görevleri ve iletim altyapısı maliyetleri nedeniyle daha yüksektir [3]. Bu yüzden bakım sürecinde, kesintisiz enerji üretiminin sağlanması amacıyla türbinlerin optimum performansının korunması hedeflenir.

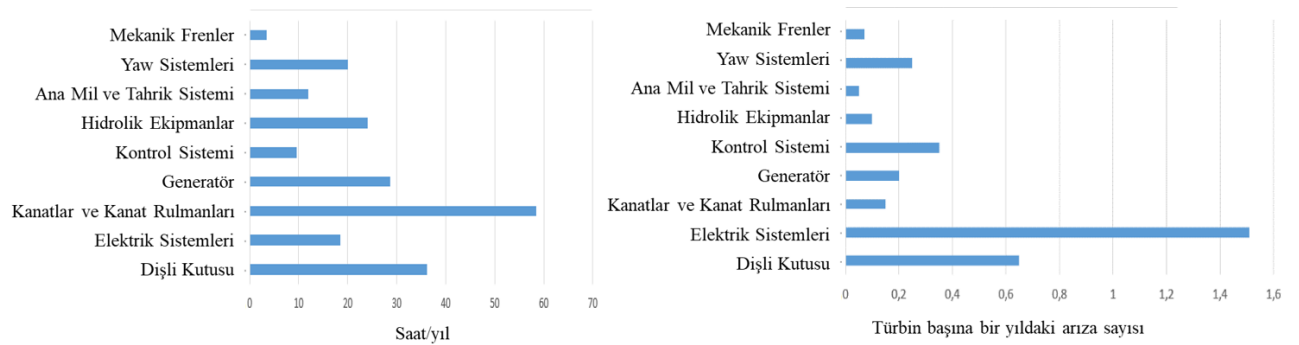
Kestirimci bakım, türbinlerin durumunu izlemek ve olası arızaları önceden tahmin ederek önleyici önlemler almayı amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, gelişmiş izleme teknolojileri kullanılarak türbinlerin çalışma verilerinin toplanması, analiz edilmesi ve gelecekteki problemlerin öngörülmesi esasına dayanmaktadır. Plansız türbin duruşları ile işletme ve bakım maliyetleri dikkate alındığında kestirimci bakım yaklaşımı, her geçen gün daha çok önem kazanmaktadır.

Bu çalışma, rüzgar türbinlerinde kestirimci bakımın önemi ve örnek uygulamaları üzerinedir. İlk olarak, rüzgar türbinlerinin yaygın arızaları hakkında bir genel bakış sunulmuştur. Ardından, kestirimci bakımın nasıl gerçekleştirildiği, hangi verilerin toplandığı ve hangi yöntemlerin kullanıldığı açıklanmış, kestirimci bakımın rüzgar türbinlerinin verimliliği, güvenilirliği ve ömrü üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDEKİ ARIZA ÇEŞİTLERİ

Rüzgar türbini ve ana ekipmanlarının ilk satın alma ile işletme ve bakım maliyetleri yüksektir. Dolayısıyla kestirimci bakım, maliyet etkinliği kanıtlanmış en iyi yöntemdir. Rüzgar türbinlerinde kestirimci bakımın en verimli şekilde yapılabilmesi için öncelikle yüksek maliyetli ve üretim süresi uzun olan ekipmanların doğru analiz edilmesi gerekmektedir ve bu ekipmanların türbin üretimini ne derecede etkilediği tespit edilmelidir. Örneğin, dişli kutusu ve kanatlar gibi bazı bileşenlerin arızalanma oranları düşük olmasına rağmen bir arıza meydana geldiğinde türbinin uzun süre hizmet dışı kalmasına yol açabilirler. Diğer yandan, elektrik sistemi gibi diğer bileşenler daha sık arızalanabilir. Ancak elektrik sistemi kaynaklı arıza türleri genellikle daha kısa hizmet dışı kalma sürelerine neden olur. Bu bilgiler, bakım ve onarım stratejileri geliştirilirken sistemin hem ekipman maliyeti bakımından hem de uzun süre duruşuna neden olabilecek ekipmanlara öncelik verilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır.

C. Dao ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada [4], Rüzgar türbinlerine ait 18 farklı veritabanı kullanılarak ve saha analizi sonuçları derlenerek Şekil 1'deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre arızanın oluşma olasılığı ve arızanın giderilme süresi kullanılarak risk analizi yapılması yukarıda bahsedilen ekipmanların önceliklendirilmesinin daha doğru yapılmasını sağlayarak daha verimli bir planlama yapılmasını sağlar.



Şekil 1. Ana ekipmanlardaki yıllık arızalar ve ortalama arıza giderme süreleri

3. KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMLERİ

Kestirimci bakım, ekipman bozulmasının veya yaklaşan arızaların erken belirtilerini tespit etmek için gerçek zamanlı operasyonel verilerin toplanmasını ve analiz edilmesini içerir. Tahmine dayalı algoritmalar ve makine öğrenimi modelleri kullanılarak bakım görevleri proaktif olarak planlanabilir ve böylece kesinti süresi en aza indirilebilir. Böylece maliyetler düşürülür ve genel sistem güvenilirliği en üst düzeye çıkarılır [5]. Son yıllarda odak noktası planlı ve aralıklı bakım

uygulamalarından gelişmiş veri analitiği ve durum izleme tekniklerinden yararlanılarak bakım faaliyetlerini optimize etmeyi amaçlayan kestirimci bakım yöntemlerine doğru kaymıştır.

Bu bölümde rüzgar türbinlerinde farklı kestirimci bakım uygulamaları hakkında özet bilgiler verilmiştir.

3.1. Titreşim İzleme

Türbinlerde meydana gelen titreşimler, türbinin mekanik sağlığı ve performansı hakkında değerli bilgiler sağlayan önemli bir gösterge olarak kabul edilir. Titreşim analizi, türbinlerde meydana gelen titreşimlerin ölçülmesi, izlenmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Türbinlerin dinamik davranışını anlamak, yapısal bütünlüğünü değerlendirmek ve operasyonel verimliliği optimize etmek için kullanılır [6].

Titreşim analizi için öncelikle titreşim ölçümleri yapılması gerekmektedir. Bu ölçümler genellikle türbinin ana bileşenlerine yerleştirilen titreşim sensörleri veya ivmeölçerler aracılığıyla gerçekleştirilir. Veri toplama süreci, titreşim sensörlerinden alınan analog veya dijital verilerin kaydedilmesini ve depolanmasını içerir [7]. Bu sensörler, türbinin rotoru, generatörü, şanzımanı ve diğer önemli bileşenleri üzerine monte edilir ve titreşim verilerini sürekli olarak kaydeder. Ölçümler genellikle belirli zaman aralıklarında veya rüzgar hızındaki değişiklikler, türbin duruşları gibi belirli olaylar sırasında gerçekleştirilir. Gelişmiş izleme sistemleri, genellikle yüksek örnekleme hızlarıyla büyük miktarda veri toplayabilir. Bu veriler daha sonra analiz ve yorumlama için kullanılır.

Elde edilen titreşim verilerinin analizi, farklı yöntemler ve teknikler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu analizler, genellikle titreşim frekans spektrumu, zaman etki alanı ve frekans etki alanı gibi farklı analiz yöntemlerini içerir [8]. Frekans spektrumu analizi, titreşim verilerini frekans bileşenlerine ayırarak türbinin rezonans frekanslarını ve diğer önemli titreşim karakteristiklerini belirlemek için kullanılır. Zaman etki alanı analizi, titreşim verilerinin zamanla nasıl değiştiğini değerlendirirken frekans etki alanı analizi ise titreşim verilerinin frekans bileşenlerini ve bunların zamanla değişimini incelemek için kullanılır.

Titreşim izleme literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Endüstride ölçüm ekipmanlarının bir kısmı vibrasyonun efektif değerine bakarak alarm üretirken bir kısmı da analiz yapma yeteneğine sahip cihazlardır. Sensörlerden toplanan veriler bilgisayar ortamına aktararak titreşim seviyelerinin değişim trendi oluşturulur. Bu değişim grafiği arızanın seyri ve ilerleme hızı hakkında önemli bilgiler verir. Rüzgar endüstrisinde genellikle titreşim tabanlı analiz yapma yeteneği olan otomatize edilmiş izleme sistemleri kullanılır.

Titreşim analizi, özellikle rüzgar türbini dönen parçalarının arıza teşhisinde uygulanabilecek yaygın ve etkili bir yoldur[10]. Analiz sonuçları, türbinin mekanik bileşenlerinde oluşabilecek hasarların erken teşhisini sağlar ve kestirimci bakım süreçlerini yönlendirir. Örneğin, titreşim verilerinde anormal bir artış veya değişiklik tespit edildiğinde, bakım ekipleri hemen harekete geçerek potansiyel bir arıza noktasını belirleyebilir ve kestirimci bakım çalışmalarını planlayabilir. Bu yöntem ile başlıca aşağıdaki ekipmanlardaki arızalar bulunabilir.

- Dişli kutusu
- Ana şaft
- Ana şaft rulmanı
- Generatör rulmanları

Sonuç olarak titreşim analizi, türbinlerin izlenmesinde ve kestirimci bakım süreçlerinin yönlendirilmesinde önemli bir rol oynayan güçlü bir araçtır. Doğru ve düzenli titreşim analizi, türbinlerin güvenilirliğini artırır, işletme maliyetlerini azaltır ve türbin ömrünü uzatır. Bu nedenle, türbin işletmecileri ve bakım ekipleri için titreşim analizi, etkili bir izleme ve bakım stratejisi oluşturmanın ayrılmaz bir parçasıdır.

3.2. Sıcaklık İzleme

Sıcaklık izleme, en önemli kestirimci bakım uygulamalarından birisi olarak görülmektedir. Sıcaklık izleme ile hem mekanik aksamların aşırı ısınması veya soğuması hem de elektriksel bileşenlerdeki termal anormallikler tespit edilebilir. Bunlara örnek aşağıda verilmiştir.

- **Kanatlar:** Zorlu hava koşulları ya da mekanik sorunlar sebebiyle kanatlarda sıcaklık değişiklikleri/dengesizlikleri görülebilir. Özel fiber sensörler kullanılarak anormal sıcaklık okumaları ile kanatlardaki dengesizlikler, hizalama sorunları ve ekipmanlarda yapısal bozulmalar görülebilir.
- **Mekanik aksamlar:** Mekanik aksamlar çalışma ya da sürtünme sebebiyle aşırı ısınmalara maruz kalabilir. Bu anormal sıcaklık artışları yetersiz yağlanma, aşırı yüklenme ya da mekanik arızaların göstergesi olabilir.
- **Dişli kutusu:** Dişlilerdeki sürekli mekanik hareket sebebiyle ısının en çok ortaya çıktığı önemli ekipmanlardan birisi dişli kutusudur. Tüm mekanik aksamlarda olduğu gibi burada anormal sıcaklık değerleri yetersiz yağlanma, yüzey aşınmaları, hatalı hizalama ya da dişli bozulmalarının göstergesi olabilir.
- **Generatör ve transformatör:** Yüksek elektrik akımları sebebiyle ısınmanın olduğu bu elektrik ekipmanlarında aşırı ısınmalar izolasyon problemleri, aşırı yüklenmeyi ya da sargılardaki farklı elektriksel sorunları gösterebilir.
- **Dönüştürücü ve elektrik panoları:** Yüksek frekanslı anahtarlama yapan ekipmanlarla dolu elektrik panolarındaki ısınmalar, hatalı kablolamayı, aşırı yüklenmeyi, yetersiz soğutmayı ya da bileşen arızalarını gösterebilir.

Bu yöntem erken uyarı sistemi olarak kullanılarak tüm ekipmanlardaki ısı ile sonuçlanan arızaların önlenmesine yardımcı olur.

3.3. Yağ / Kir İzlemesi

Rüzgâr türbinlerinde yağ hem elektrik hem de mekanik aksamlarda fazlasıyla kullanılmaktadır. Yağ kullanımının elektriksel izolasyon, ısı dağıtımı, mekanik sürtünmelerin azaltılması ve basınç iletimi gibi görevleri bulunmaktadır. Genel olarak dişli kutusu, yaw dişlileri, rulmanlar gibi dönen ekipmanlarla bağlantılı olan tüm parçalarda sürtünme ve bundan doğan kayıpları azaltmak ve ısıyı yaymak için kullanılır. Dolayısıyla sürtünme ya da temas kaynaklı mekanik yüzey aşınmalarından çıkan mekanik parçacıklar yağ içerisinde bulunabilmektedir.

Yağ, generatör ve transformatörlerde elektriksel yalıtımı sağlamak ve ısınan sargıları soğutmak amacıyla da kullanılır. Sargılarda ya da herhangi bir izolasyon ekipmanında meydana gelebilecek aşırı ısınma ya da kısa devre kuvvetlerinin sonucu olarak kopan parçalar yağ içerisinde bulunabilir. Ek olarak bu ekipmanlarda yine arıza kaynaklı ya da hatalı tasarım sonucu meydana gelen kısmi deşarjlar bir miktar yağı yakarak buharlaştırabilir. Bu gibi arızalarda ortaya çıkan arıza gazlarının fark edilememesi durumunda ilgili ekipmanı tamamen kullanılmaz hale getirecek hasarlar daha büyük arızalar ortaya çıkabilir.

Bu sebeplerle kullanıldığı yere göre yağın elektriksel ya da mekanik özelliklerinin izlenmesi kullanıldığı ekipmandaki arızaların önceden görülebilmesi ya da tahmin edilebilmesi için çok önemlidir.

3.4. Akustik Emisyon İzlemesi

Akustik emisyon izleme yöntemi ile mekanik stres altındaki çatlaklı ya da deforme olmuş mekanik bölümlerden yayılan akustik sinyaller izlenir. Dişli kutusu ve rulmanlarda standart mekanik süreçler ve sürtünmedeki ses sinyalleri ile hasar kaynaklı ses sinyalleri bu yöntemle birbirinden ayrılarak erken hasar teşhisi kolaylaşır. Kanatların ana gövdesinde ve kulede meydana gelebilecek yapısal bozulmalar, delaminasyonlar ve çatlaklar bu izleme yönteminin başlıca hedef noktasıdır.

Özellikle her geçen gün artan türbin güçleriyle rüzgar türbini kanatlarının boyutları daha da büyümekte, bu sebeple de kanatların etkili bir şekilde izlenmesi daha da önem kazanmaktadır. Buna bağlı olarak kanatlardaki akustik emisyon izleme yöntemi ile arıza konumu ve çeşidinin tespiti üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır.

3.5. Tork İzleme

Rüzgar türbinlerinde tork izleme, türbin performansını izleyerek potansiyel sorunları belirlemek için kullanılan önemli araçlardan biridir. Tork izleme özellikle ana şaft, dişli kutusu ve generatör mili üzerinden yapılır. Tork kontrolü normal çalışma esnasında da generatör hızının ve çıkış gücünün belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Tork izleme, ilgili ekipmanlara yerleştirilecek tork sensörleri yardımıyla yapılabilir. Bu sistem aşırı yük durumlarını, hizalama sorunlarını, dişli arızalarını veya mekanik aşınmaları belirlemekte kullanıldığından kestirimci bakımın önemli araçlarından biridir [11]. Ancak, tork izlemenin başarısı, sensör yerleştirme, veri toplama ve analiz gibi bir dizi faktöre bağlıdır.

3.6. Güç/Akım İzleme

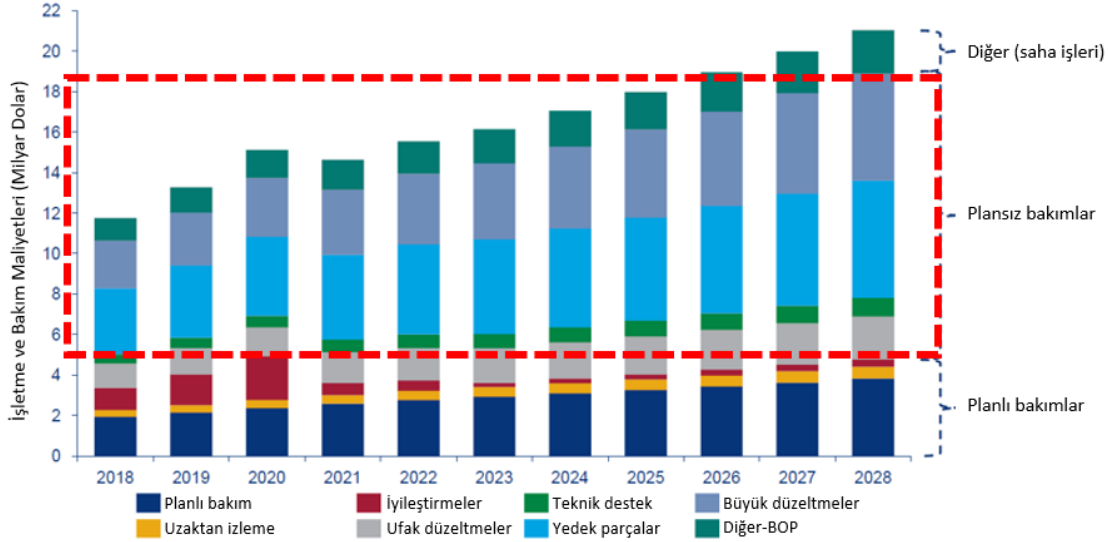
Rüzgar türbinlerinde güç/akım izlemesi genel olarak tüm elektriksel parametrelerin izlenmesini kapsar ve türbinin genel performansının ve durumunun anlaşılmasındaki en önemli değişkenlerdendir. Özellikle elektriksel ekipmanların durumunu izlemekte yardımcı olan güç/akım izlemesi, türbinin çeşitli bölümlerindeki elektrik panolarında gerçekleştirilebilir. Elektriksel parametrelerdeki ani değişimler, aşırı yüklenmeler ilgili ekipmanlarda meydana gelen ya da beklenen arızaların göstergesi olabilir.

Bu teknoloji, yüksek kaliteli sensörler ve veri analizi tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte, türbin durumunun kapsamlı bir resmini çizmeye yardımcı olabilir. Bu durum bakım gereksinimlerini daha doğru bir şekilde belirlemeye, beklenmedik duruş sürelerini azaltmaya ve genel türbin verimliliğini artırmaya yardımcı olabilir [12].

4. KESTİRİMCİ BAKIMIN ÖNEMİ

Rüzgar türbinlerinin artan güç kapasiteleri ve işletme süreleri, bakım ve onarım maliyetlerinde bir artışa neden olmuştur. Rüzgar türbinlerinin yüksek güç üretimine yönelik tasarım ve işletme gereklilikleri, karmaşık sistemlerin daha zorlu şartlarda çalışmasını ve daha fazla mekanik stres altında olmasını gerektirir. Bu da doğal olarak, türbinlerin daha sık arızalanmasına ve bakım maliyetlerinin artmasına yol açar. İşletme ve bakım maliyetlerinde plansız bakımların toplam bakım maliyetleri içerisindeki payı Şekil 2’de gösterilmiştir [13]. Bu grafikte planlı bakım olarak

ifade edilen kısım, ekipman üreticilerinin servis programlarında belirtildiği şekilde standart bakım ve ekipman kontrolleri için harcanan maliyeti, plansız bakım ise işçilik maliyetleri ve ekipman kiralama dahil olmak üzere türbin ve kanat ekipmanı arızası için onarım ve/veya değiştirme çalışmaları için harcanan maliyeti göstermektedir. Öngörülen bakım maliyetlerinin yaklaşık %70'ini plansız bakımlar oluşturmaktadır. Bu bağlamda, kestirimci bakımın gelişmiş sensör teknolojileri ve veri analizi yöntemleri kullanarak türbinlerin durumunu sürekli olarak izlemesi büyük önem teşkil etmektedir.



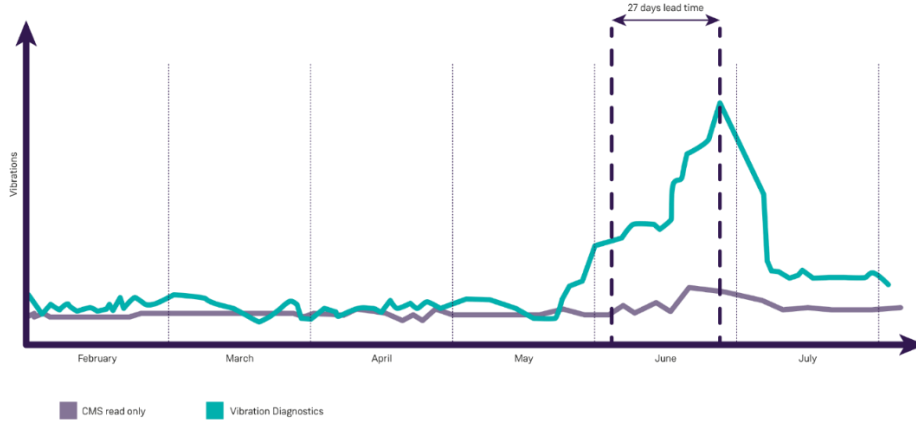
Şekil 2. İşletme ve Bakım maliyetlerinin dağılımı

Kestirimci ve izlenebilir sistemlerin olmadığı türbinlerde karşılaşılabilecek bazı sorunlar aşağıda özetlenmiştir.

- Plansız duruş nedeniyle türbinin uzun süre durması ve üretim kaybı,
- Acil planlamalar yapılması nedeniyle tedarik zincirinde yüksek maliyetler ve uzun termin süreleri ile karşılaşılmaması,
- Çalışan ekip üzerinde baskı ve strese bağlı olarak olası iş kazaları.

4.1. CAPEX & OPEX maliyet etkisi

Durum izleme sistemlerinin ilk yatırım maliyeti yüksek olmasına karşın duruş sürelerinde iyileştirme ve bakım maliyetlerindeki düşüş ile birlikte avantajlı bir hale gelmektedir. Şekil 3'te rüzgâr türbininin zamana bağlı titreşim grafiği verilmiştir. Yatay eksen 2020 yılının aylarını temsil ederken dikey eksen titreşim düzeyini temsil etmektedir. Mor grafik, durum izleme sistemine ait titreşim değerini göstermektedir. Yeşil grafik ise titreşim teşhisi değerini göstermektedir. Mayıs ayının sonlarına doğru gerçekleşmiş olan titreşim artışının teşhisi sayesinde rüzgâr türbini işletmecisine türbinin dişli kutusunda oluşma riski yüksek bir arıza için önden uyarıda bulunmak mümkün olmuştur. Erken uyarı ile birlikte, dişli kutusunun tamamen arızalanmadan önce gerekli yedek parçaların sipariş edilmesi ve onarımın yapılması için yeterli zaman sağlanmıştır. Dişli kutularının bakımları, bu erken teşhis sayesinde önden yapılmıştır ve böylece dişli kutusunun değişimini gerektirecek herhangi olumsuz bir durum engellenmiş olup sadece rulmanların yerinde ve zamanında değiştirilmesi ile toplamda 300.000 € tasarruf sağlanmıştır.



Şekil 3. Titreşim teşhisi - örnek uygulama

2019 yılında yapılmış olan benzer bir çalışmada [13] ortaya çıkan sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre kestirimci bakım maliyetlerinin arıza değişim maliyetlerinden çok daha düşük olduğu görülebilmektedir. Örnek olarak rotor ekipmanı incelendiğinde kestirimci bakım maliyeti 28.000 € iken kestirimci bakım olmadığı durumda komponent arızalanırsa değişim maliyetininin 112.000€ olduğu görülmektedir.

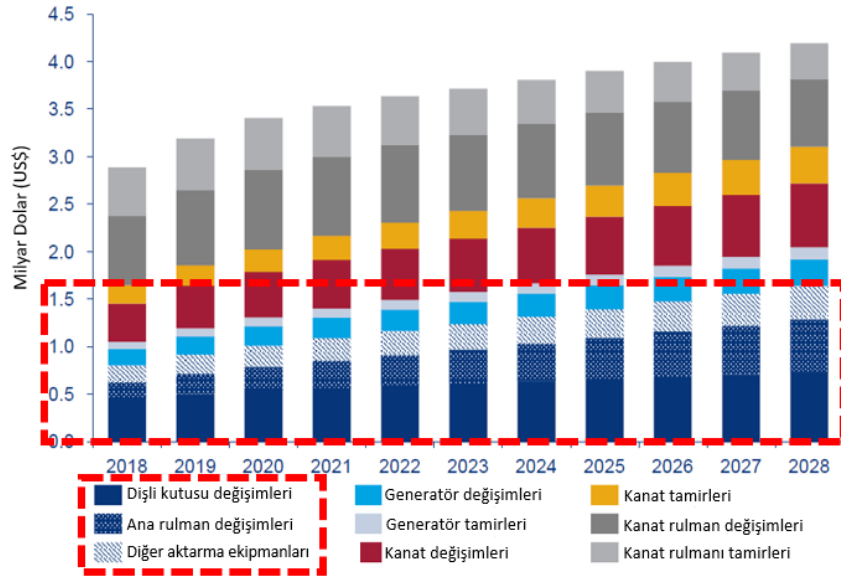
Tablo 1. Kestirimci bakım maliyeti örnekleri

Component j	Shape parameter β	Scale parameter α (days)	Failure replacement cost C_{ij}^F (\$k)	Cost of preventive replacement C_{ij}^P (\$k)	Fixed cost of a maintenance cycle C_{fixed} (\$k)	Turbine access cost C_i^A (\$k)
Rotor	3	3000	112000	28000	50000	10000
Bearing	2	3750	60000	15000		
gearbox	3	2400	152000	38000		
generator	2	3300	100000	25000		

4.2. Pazar Eğilimleri

Küresel bir perspektiften bakıldığında pazar, rüzgar türbininin aktarma organları içindeki bileşen onarımları ve değiştirmeleriyle ilgili maliyetlerin önümüzdeki yıllarda kademeli olarak artacağını öngörmektedir. Kanatlar en büyük maliyet etkeni olmaya devam ederken, dişli kutusu değiştirmeleri, ana rulman değiştirmeleri ve diğer aktarma ekipmanları onarımlarının büyük bir maliyet etkeni olmaya devam etmesi beklenmektedir. Rüzgar türbinlerindeki ekipmanların onarım ve değişim maliyetleri ile ilgili önceki yıllarda yapılan harcamalar ve önümüzdeki yıllara ait öngörüler Şekil 4’de gösterilmiştir [14]. Grafikten görüleceği üzere dişli kutusu, ana rulman, generatör gibi yüksek maliyetli ve uzun duruş sürelerine neden olan kritik ekipmanların değişimleri için yapılacak olan harcamaların ilerleyen yıllarda artması beklendiği için rüzgar türbini durum izleme yönteminde bu ekipmanlara odaklanılır. Titreşim analizi, rüzgar türbinlerinde kullanılan en yaygın durum izleme yöntemidir.

Kestirimci bakımın önemi her geçen yıl daha da çok artmaktadır. Rüzgar endüstrisinde enerji üretiminin devamlılığı, bakım zorlukları ve maliyetleri, uzun ekipman tedarik süreleri dikkate alındığında kestirimci bakım uygulamaları çok kritik bir yere sahiptir. Bu bakımdan kestirimci bakım uygulamaları rüzgar endüstrisinde her zaman en sık kullanılan bakım yöntemi olarak yerini koruyacaktır.



Şekil 4. Onarım ve değişim maliyet tahminleri (yedek parça maliyetleri hariç)

5. SONUÇ

Bu çalışma, rüzgar türbinlerinde kestirimci bakımın önemini ve uygulama yöntemlerini sunmaktadır. Rüzgar türbinleri, sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir yer tutmakla birlikte türbinlerin verimli ve sürekli çalışabilmesi için düzenli bakım ve onarım gerekmektedir. Bu bakım sürecinde, devamlı enerji üretiminin sağlanması amacıyla türbinlerin optimum performansta çalışması hedeflenmektedir.

Rüzgar türbinlerinde meydana gelebilecek arıza tipleri, süreleri ve maliyet açısından etkileri dikkate alındığında, kestirimci bakım eksikliğinde, arızaların, duruş sürelerinin ve buna bağlı maliyetlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca, acil planlama ihtiyacı ile çalışanlar ve şirketler üzerindeki baskının artması beklenmedik ilave hata, arıza ve iş kazalarının oluşmasına neden olabilmektedir.

Kestirimci bakım yöntemleri, rüzgar türbinlerinin verimli ve sürekli çalışmasının sağlanmasında kullanılan önemli araçlardan birisidir. İyi planlanmış ve uygulanmış bir kestirimci bakım süreci, türbinlerin güvenilirliğini artırır, işletme maliyetlerini azaltır ve türbin ömrünü uzatır. Türbin işletmecileri ve bakım ekipleri için kestirimci bakım, etkili bir izleme ve bakım stratejisi oluşturmanın ayrılmaz bir parçasıdır.

6. KAYNAKLAR

[1] Pure Power: Wind energy targets for 2020 and 2030. The European Wind Energy Association. 2011; Available online: <http://www.ewea.org>.

[2] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2017. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2018

[3] Lazard, Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis. Version 11.0; November 2017

- [4] Dao, C, Kazemtabrizi, B, Crabtree, C. Wind turbine reliability data review and impacts on levelised cost of energy. *Wind Energy*. 2019; 22: 1848–1871. <https://doi.org/10.1002/we.2404>
- [5] Rausch, M., Schmitt, M., Döbrich, M., & Mütze, A. (2018). A concept for predictive maintenance using digital twins. In 2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) (pp. 1-8). IEEE.
- [6] Randall, R. B. (2011). *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*. John Wiley & Sons.
- [7] Pineda Serna, L. (2014). *Vibration monitoring and analysis handbook*. Condition Monitoring Services Inc.
- [8] Stein, G. J., & Girdhar, P. (2010). *Essential practical vibration analysis*. Industrial Press Inc.
- [9] Rockwell Automation Condition monitoring application note "A Flexible and Cost Saving Condition Monitoring System for Wind Turbine Manufacturers"
- [10] W.Y. Liu, The vibration analysis of wind turbine blade–cabin–tower coupling system, *Engineering Structures*, Volume 56, 2013, Pages 954-957, ISSN 0141-0296,
- [11] Tavner, P. J., Jiangping Xiang, and Fabio Spinato. Reliability analysis for wind turbines. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology* 10.1 (2007): 1-18.
- [12] Hameed, Z., Hong, Y.S., Cho, Y.M., Ahn, S.H., Song, C.K. (2010). Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [13] Zhou, P., & Yin, P. T. (2019). An opportunistic condition-based maintenance strategy for offshore wind farm based on predictive analytics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109.
- [14] Wood Mackenzie – Winds of change in Onshore Wind O&M (2019)