
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ VE ÖRNEK OLAY İNCELEMESİ

Şevval ŞENGÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şevval ŞENGÜL

10/06/2022

RÜZGÂR TÜRBİNLERİNDE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMİ VE ÖRNEK OLAY İNCELEMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şevval ŞENGÜL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Rüzgâr enerjisinin küresel enerji dengesindeki payı artmaya devam ettikçe, rüzgâr türbinlerinin güvenilirlik gereksinimleri de önem kazanmaktadır. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin yıldırımdan korunması, modern rüzgâr türbinlerinin konumu ve boyutu göz önüne alındığında önem arz eden bir konu haline gelmiştir. Uluslararası standartlarda rüzgâr türbindeki elemanlar risk durumuna göre bölgelere ayırmıştır. Türbin üreticisi olan firmalar, yıldırımdan korunma sistemlerinin ilgili IEC standartlarında belirtilen en yüksek koruma seviyelerine uygunluğunu esas alarak kurulum yapmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde yıldırımdan korunma bölgeleri incelenmiştir. Bu çalışmada, işletmede bulunan bir rüzgâr türbininin yıldırım hasarı aldığında; operasyon süreci ve ekonomik analizi incelenmiştir. Sahadaki operasyon süreci detaylandırılarak yorumlanmıştır, yıldırımın kanat uç bölgesinden girdiği ardından içerde çatallanarak bir kısmı kanat üzerinden bir kısmı da kablo üzerinden ilerlediği görülmüştür. Hasar alan kanada ait elektronik yıldırım kartı raporunda %95,1 doğruluk oranıyla 46 +/- 4 (42 ila 50) kA şiddetinde akım geçmiş olduğunu göstermiştir. Türbinin, yıldırım darbesi aldığındaki SCADA'daki alarm kodları ve üretim değerleri analiz edilmiştir. Yeni kanat, hasarlı kanadın kesilme işlemi, diğer iki kanadın tamiratı ve işçilik için €505 628 bedel ortaya çıkmıştır. Hasarlı türbine ait yaklaşık enerji üretimi hesaplanarak kâr kaybı hesaplanmıştır. Enerji üretemediği için kâr kaybı ise €201 151 olarak hesaplanmıştır. Böylece, yıldırım hasarı alan bir rüzgar türbindeki toplam ekonomik kayıp €706 779 olarak hesaplanmıştır. Yıldırım hasarı sebebiyle rüzgar enerji santralinden üretilemeyen enerji 2250 MWh'tir. Bu enerji doğal gaz çevrim santralinden elde edilseydi 211 397 metreküp doğal gaz kullanılarak atmosfere 462 050 kilogram karbon salınacaktı. Termik santralden elde edilseydi 585 744 kilogram kömür (linyit) kullanılarak 1 716 230 kilogram karbon atmosfere salınacaktı. Enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanarak çevrenin korunması için yıldırımdan korunma sistemlerine gereken önem verilmelidir. Yıldırım hasarlarını önlemek için mevcut sistemlerin geliştirilme çalışmaları devam etmektedir.

Bilim Kodu	:	92806
Anahtar Kelimeler	:	Rüzgâr Enerjisi, Türbin, Yenilenebilir Enerji, Yıldırım koruma
Sayfa Adedi	:	57
Danışman	:	Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

LIGHTNING PROTECTION SYSTEM IN WIND TURBINES AND CASE STUDY

(M. Sc. Thesis)

Şevval ŞENGÜL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

As the share of wind energy in the global energy balance continues to increase, the reliability requirements of wind turbines are essential. Therefore, lightning protection of wind turbines has become an important issue considering the location and size of modern wind turbines. In international standards, the equipments in the wind turbine is divided into zones according to the risk rate. Turbine manufacturers make installations based on the compliance of their lightning protection systems with the highest protection levels specified in the relevant IEC standards. Lightning protection zones in wind turbines were analyzed. In this study, a wind turbine in operation is damaged by lightning. The operation process and economic analysis are examined. The operation process in the field was interpreted in detail, it was observed that the lightning entered from the blade tip area, then gave off inside, moved partly over the blade and the cable. The electronic lightning card measures the peak current. The lightning card report of the damaged blade showed that a current of 46 +/- 4 (42 to 50) kA had flowed with an accuracy of 95.1%. The alarm logs and production values in SCADA when the turbine receives a lightning strike were analyzed. A price of €505 628 was incurred for the new blade, the cutting of the damaged blade, the repair of the other two blades and the labor. Profit loss is calculated by calculating the approximate energy production of the damaged turbine. Since it could not produce energy, the loss of profit was calculated as €201 151. Thus, the total economic loss in a wind turbine damaged by lightning was calculated as €706 779. The energy that cannot be produced from the wind power plant due to lightning damage is 2250 MWh. If this energy was obtained from the natural gas cycle power plant, 462 050 kilograms of carbon would be released into the atmosphere by using 211 397 cubic meters of natural gas. If it was obtained from a thermal power plant, 1 716 230 kilograms of carbon would be released into the atmosphere by using 585 744 kilograms of coal (lignite). Lightning protection systems should be given due importance in order to protect the environment by providing energy from renewable energy sources. In order to prevent lightning damage, the development of existing systems continues.

Science Code	:	92806
Key Words	:	Wind Energy, Turbine, Renewable Energy, Lightning Protection
Page Number	:	57
Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecimde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım bana her konuda destek olup anlayış gösteren Sayın Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye tüm kalbi duygularımla şükranlarımı sunarım. Yapılan çalışmada verileri kullanmama izin veren RT&Türkerler Adi Ortaklığı yönetimine ve akademik çalışmalara daima destek veren Yönetim Kurulu Üyesi Sayın Av. Bekir KORKMAZ'a teşekkür ederim. Her zaman bana destek olan ve yol gösteren hayatımın her anında beni sürekli teşvik ederek pozitif enerji veren annem Ayşe ŞENGÜL ve babam Sedat ŞENGÜL'e tüm minnet duygularımla teşekkür ederim. Manevi desteğini üzerimde hissettiğim sevgili ablam ve kıymetli eşine teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ 11

3.1. Rüzgâr Türbini Ekipmanları 12

3.1.1. Göbek (Hub) 12

3.1.2. Kanatlar 12

3.1.3. Kule 13

3.1.4. Makine dairesi (Nacelle) 14

3.1.5. Ana şaft 15

3.1.6. Dişli kutusu (Gearbox) 15

3.1.7. Hidrolik sistem 16

3.1.8. Jeneratör 17

3.1.9. Sapma mekanizması (Yaw sistem) 17

3.1.10. Fren sistemi 18

3.1.11. Elektronik kontrolör 19

3.1.12. Soğutma ünitesi 20

3.1.13. Kontrol sistemi 21

Sayfa

3.1.14. Anemometre 22
3.2. Rüzgâr Türbinlerinde Yıldırımdan Korunma 23
3.2.1. Yıldırım oluşumu 23
3.2.2. Rüzgâr türbinlerinde yıldırımdan korunma bölgeleri 24
3.3. Santraldeki Rüzgâr Türbinindeki Bağlantılar 27
3.3.1. Toprak bağlantısı 27
3.3.2. Kulenin korunması 27
3.3.3. Kontrol kablolarının korunması 28
3.3.4. Türbin elektrik sisteminin aşırı gerilim koruması 28
3.3.6. Makine dairesinin doğrudan darbeye karşı korunması 30
4. TEORİK ANALİZ 31
5. MATERYAL VE METOT 33
5.1. Örnek Olay Analizi 33
5.2. Ekonomik Analiz 42
5.3. İş Sağlığı ve Güvenliği 44
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 47
6.1. Sonuçlar 47
6.2. Öneriler 49
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 57

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Kanat tamiri ve yeni kanat fiyatı 43

Çizelge 5.2. Kâr kaybı hesabı 44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Rüzgârın bir enerji kaynağı olarak kullanımının tarihsel gelişimi 11

Şekil 3.2. Göbek (hub) 12

Şekil 3.3. Rüzgâr türbini kanadı 13

Şekil 3.4. Kule 144

Şekil 3.5. Makine dairesi (Nacelle) 14

Şekil 3.6. Ana şaft 15

Şekil 3.7. Dişli kutusu 16

Şekil 3.8. Hidrolik sistem 16

Şekil 3.9. Jeneratör 17

Şekil 3.10. Sapma mekanizması 18

Şekil 3.11. Fren 19

Şekil 3.12. Elektronik kontrolör 20

Şekil 3.13. Soğutma ünitesi 21

Şekil 3.14. Santral SCADA ekran görüntüsü 21

Şekil 3.15. Anemometre 22

Şekil 3.16. Makine dairesinin içindeki komponenetler 23

Şekil 3.17. Yıldırım deşarj oluşumu 24

Şekil 3.18. Kanattaki reseptörler 29

Şekil 5.1. SCADA alarm loglar 33

Şekil 5.2. Yıldırım çarpma anı 34

Şekil 5.3. Sahadaki kanat parçası 35

Şekil 5.4. Güvenlik şeridi ile kapatılan yol 36

Şekil 5.5. Yıldırım çarpması sonucu hasarlı kanat 36

Şekil 5.6. Hasarlı kanadı kesme süreci 37

Şekil 5.7. Hasarlı kanadın kesilmiş durumu 38

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.8. Hasarlı kanadın yere indirilmiş hali 38

Şekil 5.9. Branda ile kapatılan kanat kökü 39

Şekil 5.10. Hasarlı kanat parçası 39

Şekil 5.11. Hasarlı kanadı inceleme çalışması 40

Şekil 5.12. Parçalanan kanadın hasar alan nokta tespiti 40

Şekil 5.13. Yıldırım nedeniyle kanat içinde hasar gören kablo 41

Şekil 5.14. Dış kanat kontrol çalışması 41

Şekil 5.15. SCADA alarm loglar 42

Şekil 5.16. Yıldırım takip uygulaması 45

Şekil 6.1. Yıldırım kartı sonuçları 48

Şekil 6.2. Yıldırım saptırıcı sistem 51

Şekil 6.3. Kanat içine yerleştirilen sistem 52

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
%	Yüzde
C	Coulomb
E	Enerji
I	Akım
kA	Kiloamper
kg	Kilogram
kV	Kilovolt
kWh	Kilowattsaat
MW	Megawatt
P	Güç

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
EUR	Euro
IEC	International electrotechnical commission
LPS	Lightning protection system
LPZ	Lightning protection zone
PLC	Programmable logic controller
SCADA	Supervisory control and data acquisition
TL	Türk Lirası
USD	Dolar
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

1. GİRİŞ

Enerji, yaşamın temel bir gerekliliğidir. Artan nüfus ile küresel enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayan fosil yakıtlar yavaş yavaş azalmaktadır. Fosil yakıtların sonlu bir enerji kaynağı olması ve yanma tepkimesinde atmosfere zararlı gazlar salması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim vardır. Doğadaki kısıtlı kaynaklar, fosil yakıtlara dayalı enerji tüketimini sürdürülemez kılmaktadır. Bunun sonucunda yenilenebilir enerjiye yönelim gün geçtikçe artmaktadır.

Yenilenebilir enerji mühim bir konudur ve dünya çapında gelecekte de önemli olmaya devam edeceği düşünülmektedir. Tüm ülkeler politikalarını büyütmekte ve bu alanda erişilebilir hedefler belirlemeye çalışmaktadır. Ülkelerin enerji ihtiyaçlarının yerli kaynaklarla karşılanmasında, dış ülkelere bağlılığın azalmasında, sürdürülebilir enerji kullanımının artmasına ve çevreye verilen zararların olabildiğince aza indirgenmesinde yenilenebilir enerji önemli bir yere sahiptir.

Yenilenebilir enerji son yirmi yılda hızlı bir şekilde geliştirilmiştir. Birçok ülke termik santrallerden kaynaklanan karbondioksit salınımını azaltmayı taahhüt etmektedir ve yenilenebilir enerjiye yatırım yapılmasında dünya çapında artan bir eğilim vardır. Uluslararası Enerji Ajansı'na göre kaynak açısından zengin olmayan ülkeler; enerji ithalatına bağımlılığı azaltarak enerji maliyetlerini azaltmaktadır [1]. Türkiye'nin toplam gücünde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı her yıl artmaktadır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'ne bağlı Yük Tevzi Dairesi'nin 2022 yılı Mart ayı verilerine göre Türkiye'nin kurulu gücü 100 334 MW'tır [2].

İklim değişikliğinin, dünya ekosistemi ve canlıların hayatı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Enerji ve iklim değişikliği ile ilgili uluslararası taahhütler yenilenebilir enerji kaynakları için büyük bir öneme sahiptir. 2021 yılı Küresel Rüzgâr Raporu verilerine göre dünya çapında 743 GW rüzgâr enerji kapasitesi vardır [3]. Türkiye'de ise Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'ne bağlı Yük Tevzi Dairesi'nin 2022 yılı Mart ayı verilerine göre, rüzgâr enerji santrallerinin toplam gücü 10 861 MW'tır [2].

Güneş rüzgârın oluşmasında etkendir. Güneşin, yeryüzünü ve atmosferi farklı oranlarda ısıtması sebebiyle hava akımı ve rüzgâr oluşur. Rüzgâr enerjisi temiz bir enerji kaynağıdır.

Rüzgâr enerji santralleri karbondioksit üretimi oluşturmaz. Elektrik üretimi; çevre dostu, sera gazı salınımına yol açmayan, radyoaktif etki yaratmayan bir metottur [4].

Bunlar;

- Hammadde problemi yoktur ve yenilenebilirdir,
- Güç rüzgâr hız değerinin küpü ile orantılıdır,
- Jeneratör yüksek verim ile tasarımlanabilir,
- Üretilen enerji yüksek verimle ve düşük maliyetle iletilir (diğer enerji kaynaklarına göre),
- Atmosferi kirletici etkiye sahip gazları salmaz, temizdir
- Santrallerin inşası ve işletmesi kolaydır (diğer enerji santrallerine kıyasla),
- Enerji üretim maliyetleri düşüktür,
- Fosil kaynakların kullanımını azaltır,
- Türbinlerin yerleştirildiği alanın yatay olarak küçük olması ve türbinler arası alanların kullanımına imkân sağlar,
- Ömrü dolan türbinlerin transfer edilmesinin kolay olması ve arazinin tekrar kullanıma açılabilmesi,
- Türbinlerin bakımının kolay olması [5],

Rüzgâr atmosferde doğal bir kaynak olarak bulunur. Santralden üretilen enerji doğal kaynaklar ile sağlanır. Böylece yurt dışına milli gelir çıkışı oldukça azalır. Rüzgâr enerji santrallerinde kullanılan teknolojinin diğer santrallerden farkı, kullanılan rüzgârın üzerinde kimyasal etkiye neden olmadan enerji üreterek ulusal ekonomiye katkı sağlar.

Rüzgâr enerji santralleri genellikle dağların tepelerinde bulunur. Bu tür yüksek rakımlı konumlar doğrudan yıldırım tehlikesine maruz kalabilirler. Ayrıca, yüksek alanlar genellikle yıldırımdan korunma gerekliliklerini artıran kayalardan ve yüksek dirençli topraklardan oluşur. Rüzgârdan elektrik enerji üretiminde verimliliği arttırmak amacıyla türbinler yüksek kuleler ve uzun kanatlar ile tasarlanmaktadır. Bu durum ise yıldırım çarpma ihtimalini yükseltmektedir.

Rüzgâr enerjisinin küresel enerji dengesindeki payı artmaya devam ettikçe, rüzgâr türbinlerinin güvenilirlik gereksinimleri daha da önem kazanmaktadır. Yıldırım, rüzgâr enerji santralinin güvenli çalışmasını etkileyen ana nedenlerden biridir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin yıldırımdan korunması, modern rüzgâr türbinlerinin konumu ve boyutu göz önüne alındığında büyük önem arz eden bir konu haline gelmiştir. Rüzgâr türbinleri genelde yüksek irtifa, yüksek rüzgâr hızı, yüksek nem, yüksek toprak direnci olan bölgelere inşa edilir. Etkili ve kapsamlı bir yıldırım risk değerlendirme modeli ile koruma sağlanabilir [6].

Rüzgâr türbinlerine yıldırım çarpma riski, rüzgâr türbini üreticileri için önemli bir sorun olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Santrallerde yaşanan olaylar, rüzgâr türbinlerinin yalıtkan malzemelerle üretilseler bile yıldırımı çektiğini ve ciddi hasara yol açtığını göstermiştir. Bu nedenle, farklı bileşenlerin bütünlüğünü korumak için rüzgâr türbinini yıldırımdan korumak esastır. Rüzgâr türbinlerinin yıldırımdan korunmasına ilişkin uluslararası standart IEC 61400-24, rüzgâr türbininin farklı bileşenleri için yıldırım risk değerlendirmesi, yıldırımdan korunma tasarımı için gereksinimleri ve önerileri sağlamaktadır [7]. Operasyonel güvenilirlik düzeyine ulaşmak için rüzgâr türbinlerinin sektörde kullanılan koruma sistemlerini ve güvenlik standartlarını karşılaması önemlidir.

Bu çalışmada, rüzgâr türbinindeki yıldırım koruma sistemlerinden bahsedilmiştir. Uluslararası standartlarda bir rüzgâr türbininde bulunan ekipmanların yıldırımdan nasıl korunduğu açıklanmıştır. Kurulu ve işletmede olan bir rüzgâr enerji santralinde yaşanan yıldırım kaynaklı kanat hasarında saha deneyimi derlenmiştir. Buna ek olarak hasarın neden olduğu kaybın ekonomik analizi yapılmıştır. İş sağlığı ve güvenliği kapsamında da konu irdelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde rüzgâr enerji santrallerinde yıldırım olaylarını kapsayan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar genellikle deneysel ölçümlere dayanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmaların değerlendirmesi yapılmıştır.

Cotton ve diğerleri (2001) rüzgâr enerji santrallerinde yıldırım kaynaklı meydana gelen hasarların güç ve elektronik sistemini kapsayarak santrallerde enerji kesintisine neden olduğu belirtilmiştir. Rüzgâr türbininden yıldırım akımının geçişi, diğer ekipmanlara da hasar verebilir. Çalışmada yüksek voltaj ve yüksek akım ile deneysel testler yapılmıştır. Kanatlar, yıldırımın en yaygın çarpma noktası olduğundan dolayı etkili bir şekilde korunmaları gerekir. Kanatların boyutu arttıkça, riski azaltmak için harici yıldırımdan korunma sistemlerinin veya birden fazla yıldırım alıcısının kullanılması gerektiği belirlenmiştir [8].

Muto ve diğerleri (2010) Japonya'da rüzgâr enerji santrallerinde yıldırımın sıklıkla yaşandığı koşullarda kanatları korumak için farklı yıldırım alıcıları geliştirilmiştir. Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinde kullanılan çeşitli yıldırım alıcıları ile deneyler yapılmıştır. Her alıcının farklı performansı olduğu belirlenmiştir. Metal uç tipi ve çubuk tipi alıcı, yuvarlak disk tipi alıcı ile karşılaştırıldığında daha iyi performansa sahiptir. Kanat üzerindeki bir yıldırım çarpma noktasını tahmin etmek için elektrik alan gücü analizinin uygulanabileceği doğrulanmıştır. Geliştirilmiş uç tipi alıcı için deneysel sonuçlardan, bir yıldırım noktasını kontrolü kapsamında bir elektrik alanı konsantrasyonu yapmak için tasarlanmış seramik veya pim kullanılarak reseptör performansının iyileştirilebileceği önerilmiştir [9].

Peesapati ve diğerleri (2011) bu çalışmada, Danimarka'daki ve dünyadaki rüzgâr türbinlerinden elde edilen yıldırım verileri gözden geçirilmiştir. İşletmede olan rüzgâr türbinlerinde ölçülen yıldırım akım aralığı standartlar dâhilinde gerekli koruma seviyeleri ile karşılaştırılmıştır. Yıldırım kartı raporunda elde edilen sonuçlar, 41 kA'lik tepe akımları kaydeden kartların aslında 30 ila 50 kA arasında değişen akımlara sahip yıldırım çarpmaları olduğunu ortaya koymuştur. Kullanılan iletkenler olması gereken boyutta değilse bu aralık daha yüksek olabilmektedir. Yıldırımın akım değeri, 15 kA'in altında çok sayıda tepe akımı olduğunu göstermiştir [10].

Jiang ve diğerleri (2012), rüzgâr santrali ile enerji sisteminin modellenmesi, yıldırım sırasında geçici enerji dağılımı Elektro Manyetik Geçişler Programı kullanılarak araştırılmıştır. Bir güç sistemine bağlı rüzgâr türbinlerine yıldırım düşmesinin neden olduğu olaylar, üç farklı durum üzerinden açıklanmıştır. Simülasyon ve analiz sonuçları ile yıldırım sırasında rüzgâr santrallerinin ve bağlı güç sisteminin etkilenmesini en aza indirmek veya önlemek için önerilerde bulunulmuştur [11].

Yokoyama (2013) rüzgâr türbini kanatlarının yıldırım hasarlarının nedenlerini; yıldırım gözlemi ve yüksek voltajlı yıldırım üreteci deneyleri ile incelemiştir. Yıldırım alıcıları olsa dahi kanada yıldırım çarpabilir, bu da kanadın tahrip olması, düşmesi gibi ciddi hasarlara neden olabilir. Yıldırım alıcıları, rüzgâr türbini kanatlarının yıldırımdan korunması için faydalı olsa da tamamen kusursuz olmadığı sonucuna varılmıştır [12].

Zeng ve diğerleri (2016) yıldırım çarpmasının, rüzgâr türbini bileşenlerinde büyük hasarlara neden olabileceği ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Rüzgâr enerjisi sisteminde yıldırım hasarını önlemek için koruma sisteminin analizi ve kulenin topraklama direncindeki değişiklikleri tartışmıştır. Yıldırım tespiti, gözlemi, elektromanyetik geçişleri ve çeşitli sistemler için yıldırımdan korunma kapsamında son gelişmeler hakkında bilgi vermiştir [13].

Garolera ve diğerleri (2016), Amerika'daki farklı rüzgâr enerji santrallerinde rapor edilen rüzgâr türbini kanatlarında 304 adet yıldırım hasarı vakasına dayanan istatistiksel verilere göre, yıldırım hasarının çoğunluğunun kanadın ucunda yoğunlaştığını göstermiştir. Ayrıca, türbin kanatları üzerindeki yıldırım bağlantı noktalarının özelliklerinin yanı sıra yıldırım bağlantı bölgelerinin öneminden bahsedilmiştir [14].

Nguyen ve diğerleri (2016) çalışmada Vietnam'daki rüzgâr türbinlerine yıldırım çarpmasını yıllık değerlendirmesi elektro geometrik model kullanılarak hesaplamıştır. Üç adet rüzgâr enerji santralinde bildirilen yıldırım olayları özetlenmiştir. Olayların nedenleri irdelenerek simülasyon yapılmıştır. Simülasyonlar, gelecekteki rüzgâr santrallerinde yıldırımın neden olduğu hasarı azaltmak için iyileştirilmiş topraklama sistemini önermektedir [15].

Yan ve diğerleri (2017) farklı kanat yapılarına ve malzemelerine yıldırım voltajı uygulayarak kanadın içindeki ark yolunu incelemiştir. Deney sonuçları, çoğu hasar noktasının sandviç yapıda ve daha ince cam elyaf kaplamada meydana geldiğini

göstermiştir. Yüzey nemi ve deneysel elektrot pozisyonu önemli bir etkiye sahiptir. Araştırma bulguları; tipik kanat üzerindeki zayıf alanları, kanat malzemelerinin ve tüm yapının yıldırımdan korunma tasarımı için rehberlik sunacak olası ark yollarını ortaya çıkarmıştır [16].

Zhang ve diğerleri (2017) bu çalışmada, rüzgâr türbini kanadı için elektriksel geometrik analiz modeli incelenmiştir. Yıldırımdan korunma için, elektriksel geometrik yöntemi ile kanadı koruma verimliliğinin hesaplama yöntemi incelenmiştir. Kanadın uzun aralıklı arıza deneyi, modelin verimini doğrulamak için tasarlanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin yerleşim mesafesi, yıldırımdan korunma perspektifinden analiz edilmiştir [17].

Wang ve diğerleri (2017) farklı şekil ve boyutlardaki alıcıların yıldırımdan korunma sistemi üzerindeki etkilerini araştırmak için, bir rüzgâr türbini modelinin kanadına beş farklı alıcı tipi uygulanmıştır. Sonuçlar, disk şeklindeki alıcının, diğer alıcılardan daha uygun yakalama verimliliği sunduğunu göstermiştir. Disk alıcısının boyutunun arttırılması ve çift disk alıcılarının kullanılması da müdahale verimliliğini artırabilir. Ancak ek ağırlığın, maliyet artışına ve mekanik performansta olası bir soruna yol açabileceği belirlenmiştir [18].

March (2018), rüzgâr santralleri için yıldırım riski değerlendirmesinin yöntemini açıklamıştır. Yerel arazi koşulları ve sınırlı bir alanda birden fazla yüksek yapıya sahip olmanın etkisi araştırılmıştır. Yıldırım risk yüzdesi, yıldırımın mevsimsel değişimi incelenmiştir. Yıldırım riskinde çevresel faktörlerin ve mevsimlerin etken olduğu saptanmıştır [19].

Zhang ve diğerleri (2018) rüzgâr türbinlerinde yıldırım analizi için bir modelleme çalışması yapmıştır. Modelleme kanat, kule gövdesi ve topraklama sistemi için yapılmıştır. Deneysel ölçüm laboratuvar ölçeğinde türbin modeli ile yapılmıştır. Yapılan modelleme, hesaplanan sonuçlar ile ölçülen sonuçlar karşılaştırılarak kontrol edilmiştir. Hesaplanan sonuçlar, ölçülen sonuçlarla örtüşmüştür. Değerler eski yaklaşımlara göre daha yüksek hassasiyet gösterdiği belirlenmiştir. 2 MW güce sahip gerçek bir türbinin yıldırım geçişi hesaplaması da uygulanmıştır [20].

Zhou ve diğerleri (2018) rüzgâr türbini kanatlarının yıldırım çarpma karakteristiğini incelemek için elektrostatik simülasyon yöntemini kullanmıştır. Bir türbin kanadı ve aşağı

yönlü bir yıldırım karakteristiğini araştırmak için modelleme yapılmıştır. Sonuçlara göre kanadın ucunun, yıldırımın çarpma noktası olması daha olası olduğu sonucuna varılmıştır. Kanadın tek bir alıcısının kesit alanı, uluslararası standartlarda önerilen minimum 50 milimetrekare değerine uygun olduğunda durdurma daha etkili olmuştur. Reseptör sayısı arttığında yıldırımı durdurma etkisinin önemli ölçüde değişmediği saptanmıştır. Kanatların dönüşü sırasında rüzgâr türbini kanat alıcılarının durdurma verimliliği tartışılmıştır [21].

Guo ve diğerleri (2019) bu çalışmada, farklı durumlarda kanada yıldırım çarpma şeklini araştırmak için 1,5 MW rüzgâr türbini kanatlarında uç alıcıları olan 5 metrelik bir kanat numunesi kullanılarak deneyler yapılmıştır. Pozitif ve negatif yıldırım çarpmaları altındaki deşarj yolları türlerinin farklı olduğu bulunmuştur. Türbin kanadı için pozitif deşarjların negatif olanlardan daha tehlikeli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uç alıcının koruma aralığı oldukça sınırlıdır. Uç alıcısı ile kanat gövdesinin bağlantısı, yıldırım çarpmalarından en çok etkilenen bölgedir. Sonuçlar, rüzgâr türbini kanadının yıldırımdan korunma sisteminin en uygun tasarımına faydalı bir referans sunmuştur [22].

Alipio ve diğerleri (2020) aşağı ve yukarı yönlü darbeleri temsil eden yıldırım akımlarına maruz kalan rüzgâr türbinlerinin performansı incelenmiştir. Bu çalışmada, rüzgâr türbinlerinin izole ve birbirine bağlı topraklama sistemlerinin performansını karşılaştırarak topraklama sistemlerinin kapsamlı bir analizi sunulmuştur. Ara bağlantı ile topraklama sisteminin verdiği tepkiyi iyileştirdiğini göstermiştir. Topraklama sistemlerinin birbirine bağlanması, her bir rüzgâr türbini toprak sonlandırmasının topraklama direncini büyük ölçüde azalttığı tespit edilmiştir [23].

Mucsi ve diğerleri (2020) bu çalışmada rüzgâr türbini kanatları için yıldırımdan korunma sistemi kapsamında yeni bir yaklaşım sunmuştur. Biri konvansiyonel tip iniş iletken sistemli ve diğeri hibrit iletken sistemli olmak üzere iki model geliştirilmiştir. Kaydedilen bulgulara göre hibrit iletken sistemin rüzgâr türbini kanatları için yıldırımdan alternatif koruma sağlayabileceği tespit edilmiştir [24].

Androvitsaneas ve diğerleri (2021) Hellenic bölgesindeki rüzgâr santrallerinde 2011-2020 yılları arası yıldırım ölçümleri incelenmiştir. Ülkedeki çeşitli coğrafi bölgelerin yıldırım özellikleri hakkında faydalı bilgiler ve istatikler içerir. Rüzgâr türbinlerinde yıldırımdan korunma seviyesi için topraklama sistemlerini tasarlama ve geliştirme teknikleri

açıklanmıştır. Bu çalışma, rüzgâr santrali sahası seçimi, uygun ve derinlemesine risk değerlendirmesi gibi çeşitli proje aşamaları hakkında bilgi verir. Yunanistan'da yıldırım oluşumu ve özellikleri hakkında sonuçlar sunmaktadır [25].

Katsaprakakis ve diğerleri (2021) rüzgâr türbini kanat hasarlarına yol açabilecek potansiyel nedenleri araştırmıştır. Rüzgâr türbini kanatlarındaki hasar nedenleri, büyük ölçüde çevreye ve iklim koşullarına bağlıdır. Uygun kurulum yerinin seçilmesi kanat hasarı olasılığını en aza indirmek için en etkili önlemdir. Kanat hasarını önlemek için çeşitli teknikler ve yöntemler uygulanmakta veya geliştirilmekte olup, riskin ortadan kaldırılması mümkün değilse de azaltılması hedeflenmektedir. Hasar önleme stratejilerinin bir SCADA sistemi ile birlikte uygulanmasının en uygun yaklaşım olduğu belirlenmiştir [26].

Matsui ve diğerleri (2021) Japonya'da yıldırım çarpmalarının rüzgâr türbini kanatlarına zarar verdiğine dair birçok rapor bulunmaktadır. Bu vakaların bazılarında, yıldırımın çarptığı kanatlar dönmeye devam ederek daha ciddi ikincil hasara neden olmuştur. Sistem bir yıldırım çarpması tespit ederse rüzgâr türbinini hemen durdurur. Bu araştırmada, SCADA sistem verilerine dayalı makine öğrenimini kullanarak türbin kanatları için bir hasar tespit modeli oluşturulmuştur. Bu modelleme ile rüzgâr türbini kanatlarının sağlamlığının otomatik olarak doğrulanması değerlendirilmiştir [27].

3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

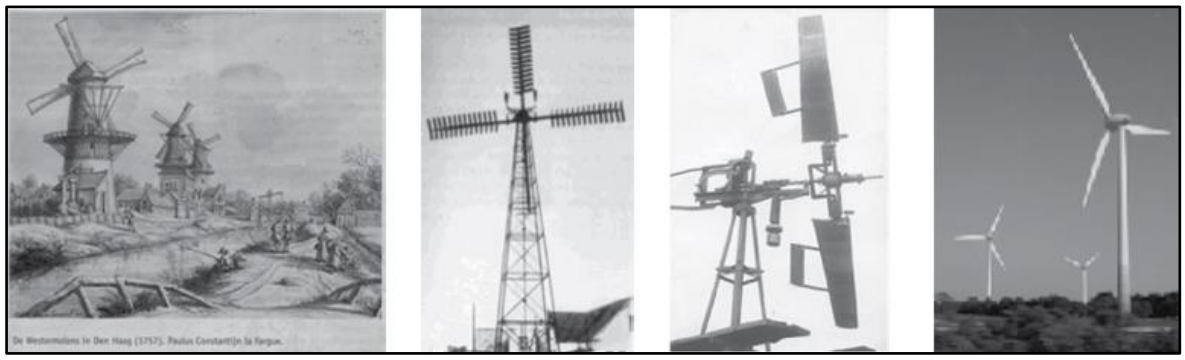
Eski yıllarda rüzgâr enerjisinden yel değirmenleri ve yelkenli gemilerde yararlanılıyordu. Rüzgârın kinetik enerjisi gemilerin hareketi için kullanılmıştır. Yel değirmenlerinde ise tahılların öğütülmesi amacıyla kullanılmıştır. Modern rüzgâr güç endüstrisi 1979 yılında Danimarka merkezli Kuriant, Vestas, Nordtank ve Bonus şirketlerinin rüzgâr türbinlerini seri üretime geçmesiyle başladı. Bugünkü standartlara göre türbinler küçüktü ve güç değeri 20-30 kW'tı [28]. Rüzgâr türbinlerinin tarihçesi incelenecek olursa;

600–1890 yılları arası klasik dönemdir. Kuzeybatı Avrupa'da 100.000'den fazla yel değirmeni kullanılmıştır. Dönem, buhar makinesinin keşfedilmesiyle ve odun ve kömürün kullanılmaya başlamasıyla sonlanmıştır [28].

1890–1930 yılları arası elektrik üreten rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi dönemidir. Elektrik üretimi için yel değirmenlerinin kullanılmasına yol açmıştır. Dönem, daha ucuz fosil kaynaklar nedeniyle sona erdi [28].

1930–1960 yılları arası yeniliğin ilk aşamasıdır. Kırsal alanlara elektriğin ulaştırılması gereksinimi ve İkinci Dünya Savaşı sırasında yaşanan enerji kıtlığı yeni gelişmeleri ortaya çıkardı. Dönem, daha ekonomik petrol nedeniyle sona erdi [28].

1973'ten sonra ise ikinci yenilik aşaması ve seri üretim dönemidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte enerji krizi ve çevre sorunları ortaya çıkmıştır. Şekil 3.1.'de rüzgârın bir enerji kaynağı olarak kullanımının tarihsel gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Rüzgârın bir enerji kaynağı olarak kullanımının tarihsel gelişimi [28]

3.1. Rüzgâr Türbini Ekipmanları

Bir rüzgâr türbini aşağıdaki ekipmanlardan oluşmaktadır.

3.1.1. Göbek (Hub)

Rotorun göbeği, rüzgâr türbininin düşük hızlı miline bağlıdır. Rotor hızı, kanat açısı ayarı ve jeneratör/konvertör tork kontrolü kombinasyonu ile düzenlenir. Rotor, rüzgâra karşı konumdan bakıldığında normal çalışma koşulları altında saat yönünde döner. Tam kanat açısı aralığı, kanat hâkim rüzgâra göre düz olacak şekilde sıfır derece konumu ile yaklaşık 90 derecedir. Kanatları yaklaşık 90 derecelik tam eğim açısına getirmeye yarayan pitch motorlar ile kanadın aerodinamik frenlemesini sağlar, böylece rotor hızını düşürür [29]. Şekil 3.2.'de türbinde göbeğin montaj süreci gösterilmiştir.



Şekil 3.2.Göbek (hub)

3.1.2. Kanatlar

Kanatlar rüzgârı yakalar ve gücünü rotor göbeğine aktarır. Rüzgâr kanat boyunca estiğinde, kanadın bir tarafındaki hava basıncı azalır. Kanadın iki tarafındaki hava basınç farkı,

kaldırma ve sürükleme yaratır. Şekil 3.3.'te bir rüzgâr türbini kanadı gösterilmiştir. Rüzgâr türbini kanatları; cam elyaf takviyeli plastik, ahşap, ahşap laminat ve karbon elyaf takviyeli plastik gibi kompozit malzemelerden üretilen büyük içi boş yapılardır. Bir kanadın iki yanı veya yüzey kaplaması, ön ve arka kenarlar boyunca birbirine yapıştırılmıştır. Reçine döküm teknikleri kullanılarak üretilir [30].



Şekil 3.3. Rüzgâr türbini kanadı

3.1.3. Kule

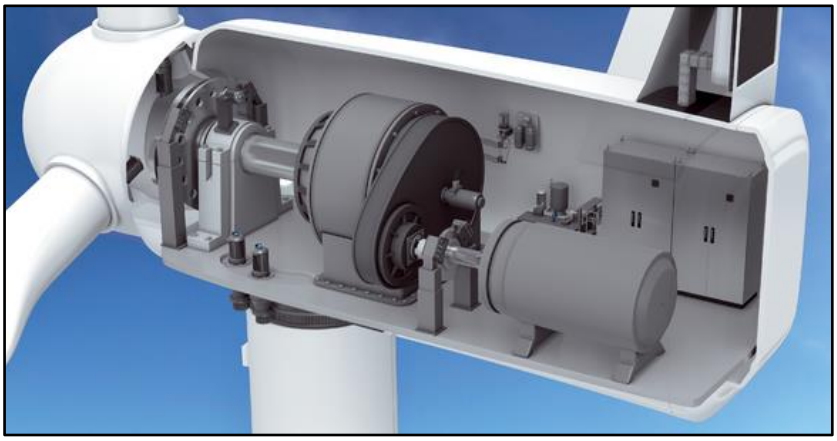
Makine dairesini ve rotoru taşır. Kule boyu kanat uzunluğu ile orantılıdır. Rüzgâr hızı yerden yükseldikçe arttığı için genellikle kulenin yüksek olması avantajdır. Çelik boru kule standart yapıdır ve en yaygın olanıdır. Kule bölümleri yassı çelik levhalardan birbirine kaynaklanır. Kullanılan çeliğin kalitesi, çelik mukavemet sınıflandırması gibi kalınlığa ve kullanım gereksinimlerine bağlıdır. Borulu kuleler rüzgâr türbinleri için standart tip kuledir ve en yaygın olanıdır. Kafes kuleler çok yaygın değildir. Tasarım taşıma sınırlaması olmadığı için avantajlıdır. Gergili kule halatlar ile yere sabitlenir ve kolayca taşınabilir [28]. Dezavantajı, monte edilmesi gereken çok sayıda bileşeni olmasıdır. Şekil 3.4.'te çelik kulenin montaj aşaması gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Kule

3.1.4. Makine dairesi (Nacelle)

Dişli kutusu, jeneratörü, ana şaft, kontrol sistemleri, sapma mekanizması, dişli kutusu soğutma sistemi, ana yatak gibi temel bileşenlerini içerir. Şekil 3.5.'te makine dairesi gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Makine dairesi (Nacelle) [29]

3.1.5. Ana şaft

Rotor rüzgâr türbininin ana şaftı üzerinde çok güçlü bir diske cıvata ile sabitlenmiştir. Dişli kutusu ana şaftın diğer ucuna yerleştirilmiştir. Düşük hızlı şaft, rotor göbeğini dişli kutusuna bağlamaktadır. Şaft, aerodinamik ikincil fren için hidrolik fren sistemi kullanılmaktadır [31].

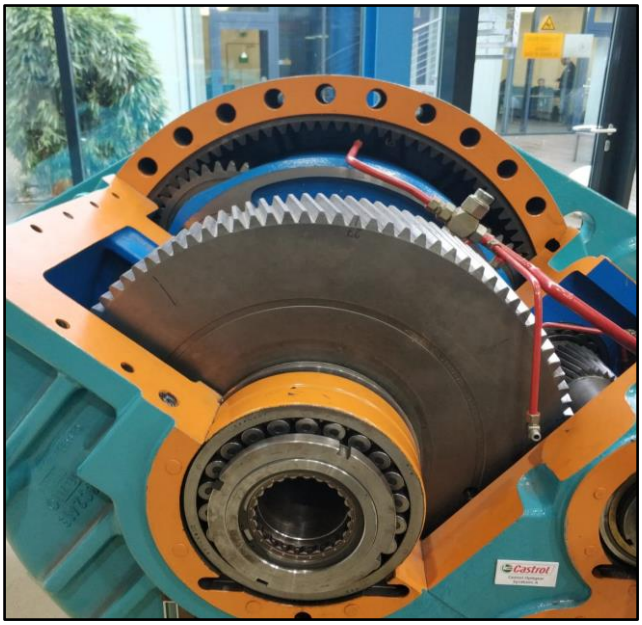
Yüksek Hızlı Şaft: jeneratörü dişli kutusuna bağlar. Rüzgâr hızına göre devir sayısı değişkenlik göstermektedir. Optimum rüzgâr hızlarında (12-14 metre/saniye) dakikada 1780 devir ile dönmektedir. Bir şaft ile jeneratöre bağlıdır. Acil durumda ikincil hidrolik disk fren sistemi bulunmaktadır [31]. Şekil 3.6.'da ana şaft gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Ana şaft

3.1.6. Dişli kutusu (Gearbox)

Jeneratörün üretim yapabilmesi için düşük hızlı şaftın devir sayısını yükselten dişli sistemidir. Ana şaft yavaşça döner ve dişli kutusuna çok fazla dönüş kuvveti uygular. Dişli kutusu daha sonra dönüş kuvvetini değiştirir, bu nedenle her devirde çok fazla kuvvetle yavaşça dönmek yerine, her devirde daha az kuvvetle daha hızlı dönmesi gerekir. Şekil 3.7.'de dişli kutusu gösterilmiştir. Tasarımda bir yağlama sistemi, soğutma sistemi ve yağın temizliğini korumak için bir filtre bulunur [32].



Şekil 3.7. Dişli kutusu

3.1.7. Hidrolik sistem

Sapma mekanizmasında ve ikincil frende kullanılmaktadır. Rüzgâr türbininin aerodinamik frenlerini sıfırlamak için kullanılır. Şekil 3.8.'de hidrolik sistem gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Hidrolik sistem

3.1.8. Jeneratör

Jeneratör elektrik üretir. Jeneratörün içinde mıknatıslar ve çok sayıda bakır tel vardır. Genellikle sabit mıknatıslı, çift beslemeli endüksiyon jeneratörü veya asenkron jeneratör olarak adlandırılır. Şekil 3.9.'da jeneratör gösterilmiştir [29].



Şekil 3.9. Jeneratör

3.1.9. Sapma mekanizması (Yaw sistem)

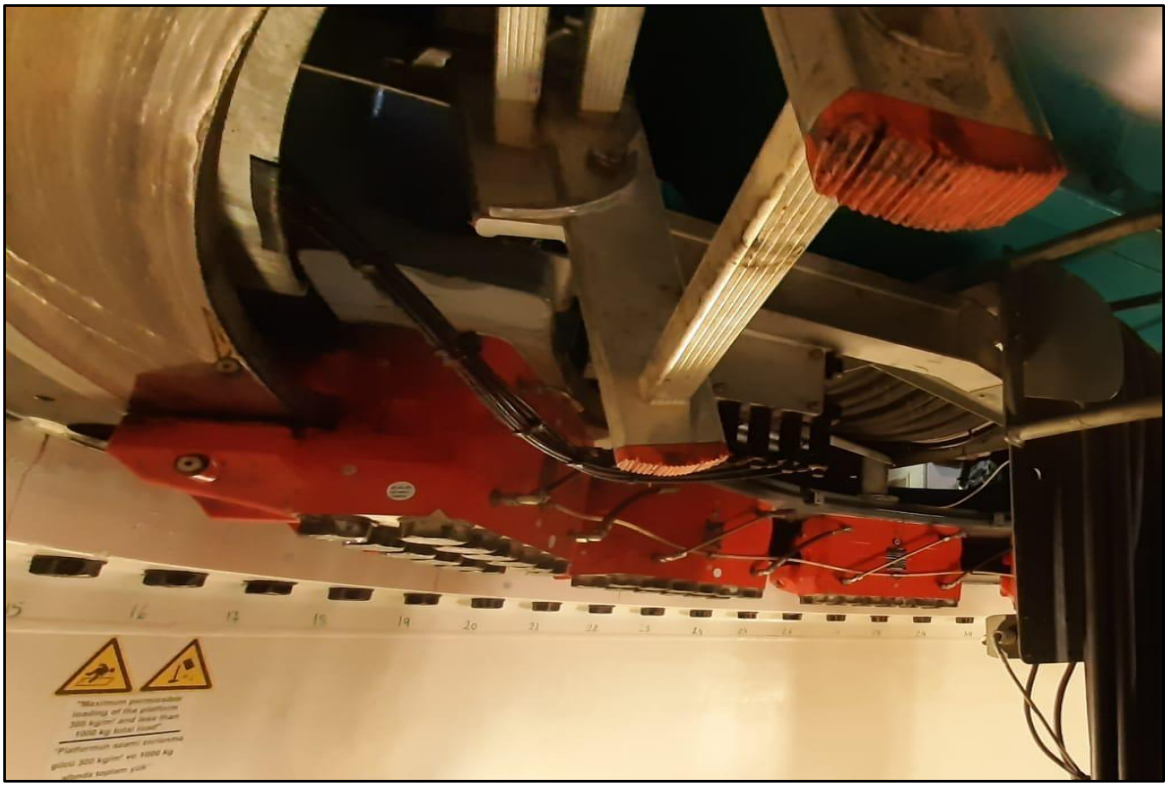
Makine dairesini rüzgâra karşı döndürmek için elektrik motorlarını kullanır. Rüzgâr yönünü algılayan elektronik kontrolör tarafından çalıştırılır. Rotor her zaman rüzgâra bakmalıdır, böylece rüzgâr türbini mümkün olduğunca fazla elektrik üretir. Sapma motoru, rotorun hâkim rüzgâr yönüne makine dairesini döndürür. Sapma motorunun altında, sapma yatağının çarkını tutan küçük bir dişli vardır. Şekil 3.10.'da sapma mekanizmasının donanımları gösterilmiştir [33].



Şekil 3.10. Sapma mekanizması [1:makine çerçevesi, 2:sapma sürücüsü, 3:sapma yatağı, 4:fren kaliperi] [32]

3.1.10. Fren sistemi

Bir rüzgâr türbininde iki farklı fren türü vardır. Biri aerodinamik frenidir. Diğeri mekanik frendir. Mekanik fren, dişli kutusu ile jeneratör arasındaki yüksek hızlı mile yerleştirilmiştir. Aerodinamik freninin arızalanması durumunda sadece acil durum freni olarak kullanılır [34]. Şekil 3.11.'de sapma mekanizması fren sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Fren

3.1.11. Elektronik kontrolör

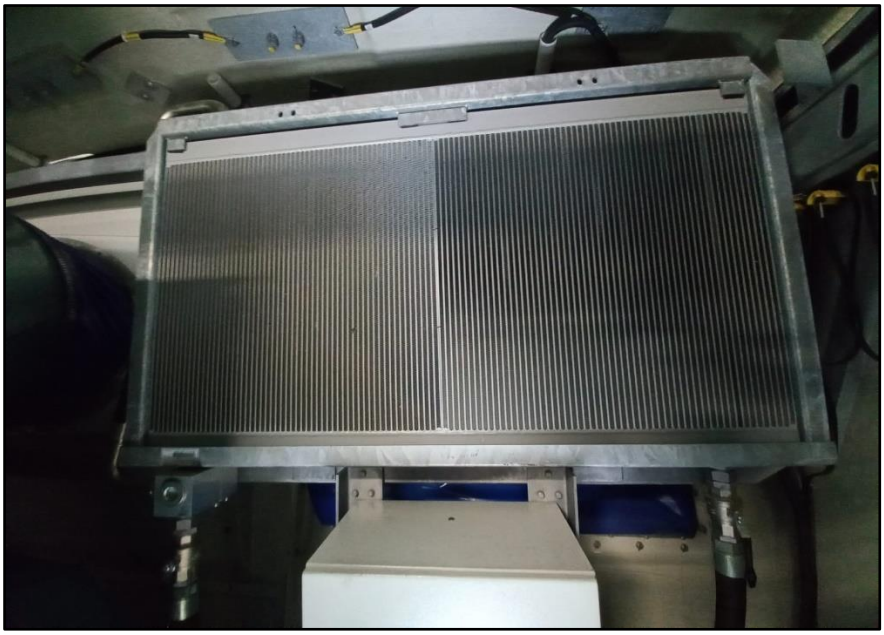
Rüzgâr türbinlerini kesintisiz olarak izleyen ve sapma mekanizmasını kontrol eden bir bilgisayar vardır. Olası bir arıza durumunda rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur ve modem bağlantısı üzerinden kumanda operatörünün bilgisayarına veri aktarır. Türbin ayarlarında değişiklik yapılması görevi kontrolör içerisindeki parametrelere aittir. Kontrolör her zaman rüzgâr türbinindeki her şeyin olması gerektiği gibi çalışıp çalışmadığını kontrol eder [33]. Şekil 3.12.'de elektronik kontrolör gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Elektronik kontrolör

3.1.12. Soğutma ünitesi

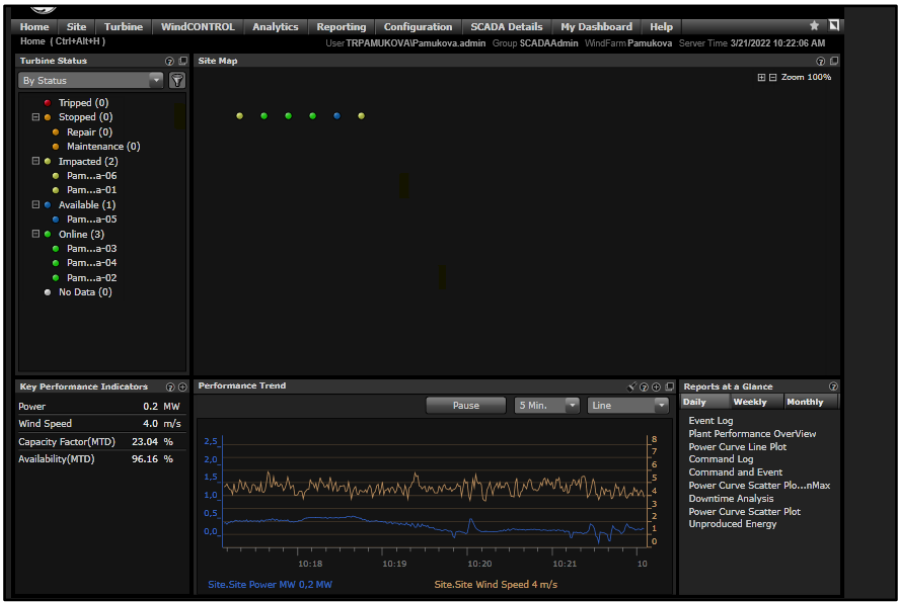
Jeneratörü soğutmak için kullanılan bir elektrikli fan içerir. Buna ek olarak dişli kutusundaki yağı soğutmak için kullanılan bir yağ soğutma ünitesi vardır. Bazı türbinlerde su soğutmalı jeneratörler de bulunur. Şekil 3.13.'te dişli kutusuna ait soğutma ünitesi gösterilmiştir. Bazı türbin modellerinde radyatör ve fan beraber kullanılmaktadır. Bazı türbinlerde ise sadece radyatör koyularak doğal sirkülasyon yapılmaktadır.



Şekil 3.13. Soğutma ünitesi

3.1.13. Kontrol sistemi

Kontrol sinyalleri, türbin kontrolöründe sağlanan yerel kilitleme özelliği ile bir Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (SCADA) aracılığıyla uzak bir bilgisayardan da gönderilebilir. Herhangi bir rüzgâr türbinini, acil bir durumda durdurmak için kule tabanında ve makine dairesinde bulunan acil durdurma düğmeleri etkinleştirilebilir. Santralin SCADA ana ekran görüntüsü Şekil 3.14.'te gösterilmiştir.



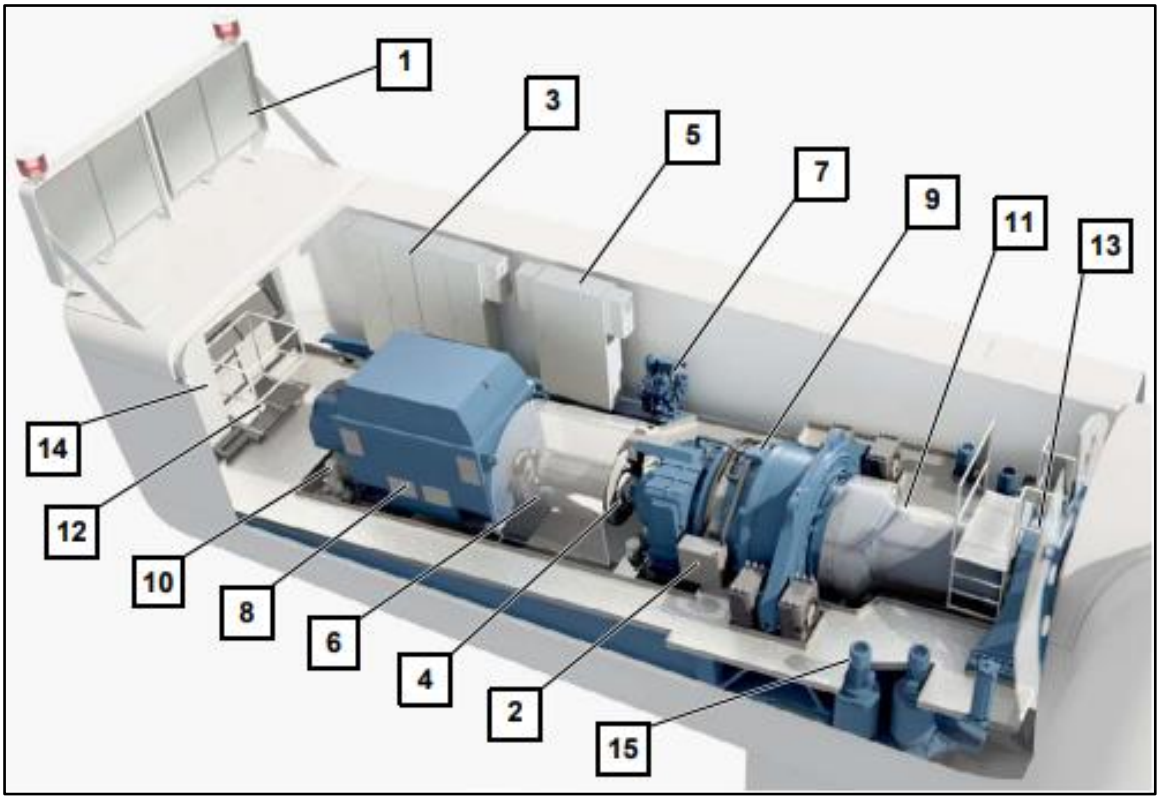
Şekil 3.14. Santral SCADA ekran görüntüsü

3.1.14. Anemometre

Rüzgârın hızını ve yönünü ölçmek için kullanılır. Anemometreden gelen elektronik sinyaller, rüzgâr hızı saniyede yaklaşık 3,5-4 metreye ulaştığında rüzgâr türbinini başlatmak için rüzgâr türbininin elektronik kontrolörü tarafından kullanılır. Türbini korumak için rüzgâr hızı saniyede 25 metreyi aşarsa SCADA sistemi rüzgâr türbinini otomatik olarak durdurur. Sinyaller rüzgâr türbininin elektronik kontrolörü tarafından rüzgâr türbinini sapma mekanizmasını kullanarak rüzgâra karşı döndürmek için kullanılır [33]. Şekil 3.15.'te anemometre gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Anemometre



Şekil 3.16. Makine dairesinin içindeki komponenetler. [1:ısı dönüştürücü, 2: yağ soğutucu,3-5 14:anahtar kabinleri, 4:rotor freni, 6:bağlantı noktası, 7:hidrolik ünite, 8:jeneratör, 9:dişli kutusu, 10:soğutucu su pompası, 11: rotor şaft, 12:vinç kapakları, 13: rotor rulman,15:sapma mekanizması] [32]

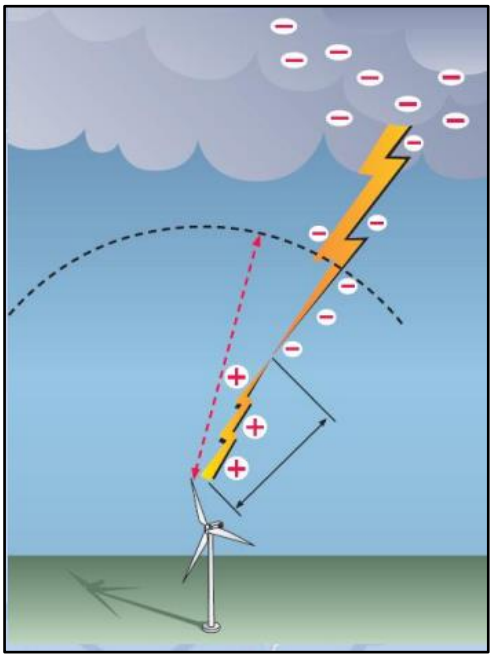
3.2. Rüzgâr Türbinlerinde Yıldırımdan Korunma

Bu bölümde yıldırım ile ilgili teknik bilgiler ve rüzgâr türbinindeki yıldırımdan korunma bölgeleri irdelenmiştir.

3.2.1. Yıldırım oluşumu

Şimşek çakması, bir saniyeden fazla sürebilen iyonize olaydır. Her bir yıldırım darbesinin uzunluğu ve süresi değişir, ancak ortalama 30 mikrosaniyedir. Ortalama tepe gücü yaklaşık 10^{12} watt'tır. Yıldırım deşarjları, aşağı veya yukarı doğru başlatılan iki türe ayrılır. Aşağıya doğru başlatılan bir deşarj, gök gürültüsü bulutunda başlar ve dünyaya doğru yönelir. Yukarıya doğru başlatılan bir deşarj, atmosfere açık olan yüksek bir yapıda başlar [35].

Yıldırım deşarjları, deşarjın zıt şarj bölgeleri arasında gerçekleştiği bulut içi olabilir. Bulut içi yıldırım enerjisi, parlak ışık ve gök gürültüsü üretilmeye devam eder. Şekil 3.17. yıldırım deşarj oluşumunu göstermektedir.



Şekil 3.17. Yıldırım deşarj oluşumu [36]

Küçük parçacıkların pozitif yük alma eğiliminde olduğu, büyük parçacıkların ise daha fazla negatif yük kazandığı düşünülmektedir. Bu parçacıklar, bulutun üst kısmı net bir pozitif yük elde edene ve bulutun alt kısmı negatif yüklü hale gelene kadar yukarı doğru hareketlerin ve yerçekiminin etkileri altında ayrılma eğilimindedir. Bu yük ayrımı, hem bulut içinde hem de bulut ile yer arasında elektrik potansiyeli üretir. Milyonlarca volta kadar çıkabilir ve yıldırım başlar [36]. Rüzgâr türbinlerinde yıldırım bağlantı noktaları olması muhtemel tüm parçaların darbeye dayanabilmesini sağlamak için yıldırımdan korunma sistemlerinin yapının farklı bölümlerine tam olarak entegre edilmesi gerekir. Yıldırım akımı, sistemlerde ağır hasara neden olmadan bağlantı noktalarından toprağa güvenli bir şekilde iletilmelidir.

3.2.2. Rüzgâr türbinlerinde yıldırımdan korunma bölgeleri

Rüzgâr türbinleri, yıldırım düşmesinin o bölgedeki bileşenler üzerindeki etkisinin seviyesini tanımlayan fiziksel alanlara ayrılmıştır. Türbinin yıldırımdan korunma bölgelerine ayrılarak yıldırım maruziyetinin tanımlanması, rüzgâr türbininin tüm bileşenlerinin sistematik ve yeterli korunmasını sağlar. Bu yıldırımdan korunma bölgeleri, doğrudan yıldırım

bağlantısının mümkün olup olmamasına, yıldırım akımının büyüklüğüne ve o bölgedeki manyetik ve elektriksel alanların büyüklüğüne bağlı olarak tanımlanmaktadır. Örneğin kanat, motorlar, elektrik sistemleri veya kontrol sistemleri gibi bileşenlerin manyetik ve elektrik alanların etkilerine bağlıdır. Bölgeye girebilecek tam veya kısmi yıldırım akımına dayanabilmesini sağlamak için yıldırımdan korunma yöntemleri uygulanır. İki koruma bölgesi arasındaki geçişlerde daha yüksek koruma bölgesi gerekliliklerine uyulmaktadır.

Rüzgâr türbininin yıldırım çarpma riski en yüksek olan bileşeni kanattır. Yıldırımdan kaynaklanan kanat hasarı, genellikle yapısal arıza nedeniyle yüksek onarım maliyeti ile sonuçlanmaktadır. Hollanda Enerji Araştırma Merkezi'nden elde edilen verilere göre kanatlar; jeneratör, kontrolör, makine dairesi arasında en riskli bileşendir ve en yüksek yıldırım çarpma oranı yaklaşık %75 olarak belirlemiştir [21].

Etkili bir yıldırımdan korunma sistemi için ilgili gereksinimler IEC standardında belirtilmiştir. IEC standardına göre bir rüzgâr türbininin yıldırımdan korunma sisteminin tasarlanması için, korunan alanı yıldırım elektromanyetik ortamının bir yuvarlanan küre modeli aracılığıyla tanımlandığı yıldırımdan korunma bölgelerine ayırır. Gerçek yıldırım olaylarını simüle etmek için yıldırımdan korunma sisteminin yüksek voltaj testleriyle doğrulanması da önerilmektedir [7].

Rüzgâr türbinlerinde bulunan yıldırımdan korunma sistemleri, yıldırım çarpmalarından kaynaklanan yıldırım akımlarını ve yıldırımın içerdiği enerjiyi kontrollü bir şekilde toprağa yönlendirme görevi için tasarlanmıştır. Yüksek akım, uygun seviyelere indirilir. Elektrik ekipmanlarında oluşan aşırı gerilimler paratoner veya parafudr ile sisteme zarar vermeyecek hale getirilir. Rüzgâr türbini içindeki tüm elektrikli ekipmanlar, doğrudan yıldırım çarpmasının etkilerine karşı korunur ve yıldırımdan korunma bölgeleri 1, 2 veya 3'te bulunur.

Yıldırımdan korunma bölgesi 0’dan yıldırımdan korunma bölgesi 1’e geçiş, trafo istasyonundan kuledeki alçak gerilim dağıtımına giden besleme kablolarının girişinde bulunur. Bu noktada yıldırım akımını iletebilen ve koruma seviyesi özelliği 50 kA (toplam deşarj kapasitesi 200 kA) olan enerjiyi boşaltma cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazlar, kontrol panosu içindeki aşırı gerilimleri 1,5 kV’luk bir gerilimle sınırlayabilir. Ancak bu, alçak gerilim bölümündeki tüm elektrikli ekipmanlar için yeterli değildir.

Bu nedenle 15 kA'da aşırı gerilim koruyucular, paratonerlerden ayrılmış olarak monte edilir. Bunlar, ortaya çıkan aşırı gerilim değerini 1 kV ile sınırlamaktadır. Türbin üretici firmalarının belirlediği özelliklere uygun olarak, kullanılan tüm bileşenler toprağa karşı bu aşırı gerilim ile korunur. Bu parafudrların aşağı akışında düzenlenen bileşenler, yıldırımdan korunma bölgesi 2'de bulunur.

Kontrol panosunda kullanılan cihazlarda (motor kontrolörü, güç kaynağı gibi) hassas elektronik bileşenler bulunur. Uygun giriş devresi, endüktif veya optik tip galvanik dekuplaj, ilgili güç kaynağı ünitelerinde (yıldırımdan korunma bölgesi 3) aşırı gerilim arestörleri ile aşırı gerilimlere karşı korunurlar. Fiderlerin ve sinyal hatlarının elektriksel izolasyonu ile önlenir. PLC ve güç kaynağının koruması için metal bir muhafaza ile sağlanır.

Yıldırımdan korunma sınıfı 0A; nesnelerin doğrudan yıldırım çarpmalarına maruz kaldığı ve bu nedenle yıldırım akımını tamamen iletmek zorunda olduğu alanlardır [7]. Bu alanlar; kanatlar, rotor, makine dairesi koruması ve kulenin dış tabakasıdır.

Yıldırımdan korunma sınıfı 0B; nesnelerin doğrudan yıldırım çarpmasına maruz kalmadığı ancak sönümlenmemiş bir elektromanyetik alanın oluştuğu alanlar için seçilir [7]. Örnek olarak makine dairesi ve anemometre verilebilir.

Yıldırımdan korunma bölgesi 1; rüzgâr türbinleri için yıldırımdan korunma, rüzgâr türbinleri sertifikasyonu IEC 61400-24'e göre koruma seviyesi 1 için ve 10 MJ/Ohm ve 300 Coulomb'luk yıldırım çarpmasına karşı koruma sağlamak üzere tasarlanmıştır. Nesnelerin doğrudan yıldırım çarpmalarına maruz kalmadığı ve bu bölgedeki tüm bileşenlerdeki akımların 0A ve 0B bölgelerine kıyasla azaltıldığı alanlar için geçerlidir [7]. Elektromanyetik alan, perdelemeye bağlı olarak bu bölgede de sönümlenebilir. Bu alanlar kulenin içi ve motor bölmesindeki kontrol kabinlerinin içidir.

Yıldırımdan korunma bölgesi 2; girişim seviyesinin daha da azaltılması için ek tarama önlemlerinin uygulandığı bir bölgedir [7]. Bu, boru şeklindeki çelik kulede bulunan kontrol kabinlerindeki alanlar için geçerlidir.

3.3. Santraldeki Rüzgâr Türbinindeki Bağlantılar

Rüzgâr türbinlerinin, hasar ve gelir kaybından kaynaklanan ekonomik kayıplara karşı bir önlem olarak, etkili bir yıldırımdan korunma sistemi kullanılması gerekmektedir. Bu bölümde santraldeki rüzgâr türbinindeki bağlantılar ve koruma sisteminin mevcut durumu açıklanmıştır.

3.3.1. Toprak bağlantısı

Türbin temelindeki toprak bağlantısının işlevi, yıldırım sonucunda oluşan elektrik akımını mümkün olan en az direnç ile en geniş alan boyunca toprağa yönlendirmektir. Temel toprak bağlantısı ile çevreleyen toprak arasındaki direnç ne kadar yüksek olursa, toprak bağlantısının çevredeki toprak potansiyeline ve dolayısıyla kuleye giren fiderlere karşı voltajı o kadar yüksek olur. Yıldırım çarpması sırasında önemli konu; sadece topraklama sisteminin direnci değil, aynı zamanda endüktansıdır. Bir yıldırım akımı birden çok frekans bileşeni içerdiğinden, çok yüksek geçici empedanslar üretmek için herhangi bir topraklama sistemi endüktansı ile etkileşime girer [29]. Bu nedenle, kurulan bir topraklama sistemi yaklaşık 50 metre uzunluğunda yatay elektrotların kullanılması, çok düşük bir toprak direncine ve yüksek bir geçici empedansa sahip olabilir. Örneğin, 60 metrelik ek yatay elektrot gerekiyorsa, bir uzun iletken yerine daha kısa uzunlukta birden fazla elektrot kullanmak daha etkili olmaktadır. Aşırı toprak direnci nedeniyle fiderler ile kule potansiyeli arasındaki voltaj çok yüksekse, fider ile kuleye bağlı parçalar arasında parlama veya ark oluşabilir.

3.3.2. Kulenin korunması

Kule, çelik betonarme parçalı çelik boru olarak tasarlanmıştır, buna hibrit kule denir. Yıldırım akımını boşaltmaya uygundur. Kuledeki elektrik donanımı bir Faraday kafesi içindedir ve doğrudan yıldırım etkilerinden korunur. Kafes kulenin içini doğrudan yıldırım çarpmasına karşı korur ve yıldırım elektromanyetik alanında bir miktar azalma sağlar, bu nedenle kulenin içindeki boşluk IEC 61400-24'e göre LPZ 0B olarak tanımlanır [7].

3.3.3. Kontrol kablolarının korunması

Seri veri iletimi için kullanılan kontrol kabloları çift bükümlüdür. Yıldırımın kesişen noktalarındaki kabloların koruma bölgeleri ise kabloların; aşırı gerilim ve aşırı akım koruma bileşenleri ile sağlanmaktadır.

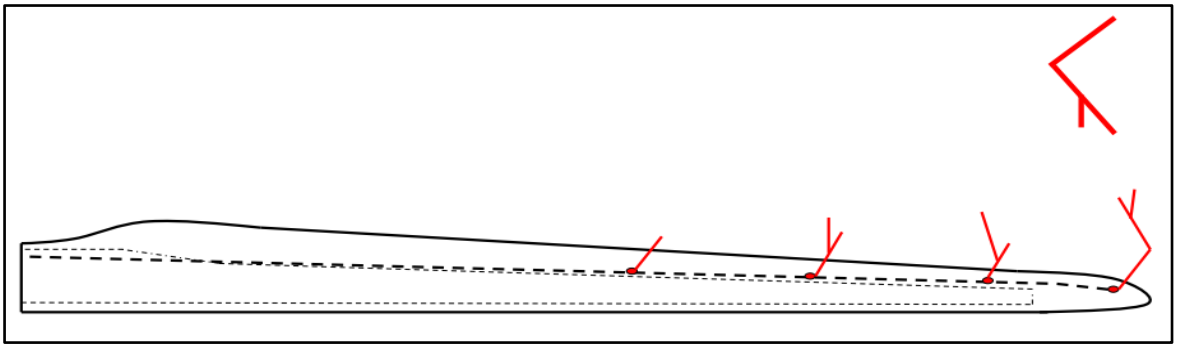
3.3.4. Türbin elektrik sisteminin aşırı gerilim koruması

Aşırı gerilim korumasının ve transformatörün güç dağıtım panosunun içine montajı ile yıldırım düşmesi durumunda eş potansiyel bir bağlantı sağlanmaktadır. Yıldırım akımlarını iletebilen ve koruma seviyesi karakteristiğine sahip durdurma cihazları alçak gerilim baralarında 50 kA olarak kullanılır. Enerjiyi aktarma cihazlarının toplam deşarj kapasitesi, 1,5 kV koruma seviyesinde 200 kA'dir. Genellikle orta gerilim kesicilerin aşırı gerilim korumasına ihtiyaç duyulmaktadır.

3.3.5. Kanatların ve rotorun korunması

Rüzgâr türbini kanatları yüksekliği ve atmosfere açık olması nedeniyle hizmet ömrü boyunca birçok kez yüksek elektrik alana maruz kalmaktadır. Yüksek statik elektrik alan, bulutlar tarafından üretilir ve kanada elektriksel olarak uygulanır. Yaklaşan yıldırım, kanadı daha yüksek elektrik alana maruz bırakır. Elektrik alan, zamanla iletken olmayan kompozit malzemelerin yalıtım özelliklerini bozabilir. Bu nedenle yıldırımdan korunma sistemleri yüksek voltajlı yalıtım tasarım ilkeleri dikkate alınarak tasarlanmıştır.

Kanatlar polimerlerden yapılmış olsalar bile, yıldırımın en yaygın çarptığı noktadır. Yağmur sebebiyle ıslandıklarında iletken hale gelirler. Kanat yüzeyinde bulunan alıcılar, IEC61400-24'e göre yıldırım çarpması hasarını en aza indirecek şekilde düzenlenmiştir. Yıldırım çarpma olasılığının en yüksek olduğu alan olan kanadın ucunda bulunan bir alıcı ile yapılandırılmıştır. Şekil 3.18.'de kanattaki reseptörler gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Kanattaki reseptörler [14]

Kanattaki iletken bileşenler; karbon elyaf takviyeli plastik, ağırlıklar, uç fren kabloları, sensörler için elektrik kabloları, ısıtma, uyarı lambaları vb. donanımlardır. Bu malzemeler yıldırımı çekebilmektedir. Bu bileşenlerin montajının koruma sistemi ile koordine edilmesi gerekmektedir. Koordinasyon, yalıtım veya ayırma mesafesi ile sağlanabilir. Yalıtım veya ayırma ile bağlantı sağlanamıyorsa, uygun eş potansiyel kuşaklama uygulanmalıdır. Tasarım tarafından belirlenen akım dağılımının yalıtım koordinasyonu ve değerlendirmesi, mühendislik analizi, sayısal modelleme veya test yoluyla sağlanmaktadır. Mühendislik analizinin ve sayısal modellemenin doğrulanması, karşılaştırmalı testler ile sağlanır [14].

Rüzgâr türbinlerinin rotoru birkaç metre çapında içi boş bir demir küredir. Doğrudan darbelere ve rotor kanadına çarpan yıldırım akımlarının neden olduğu manyetik alanlara karşı tesisatı korur. Rotor kanatlarına açılan açıklıklar, eksen ayarlı kontrol kabinlerinin özel çelik koruma ile kapatılmıştır. Koruma, rotor göbeğine iletken bir kiriş ile bağlıdır. Bu nedenle yüksek frekanslı akımlara karşı yalnızca ihmal edilebilir bir direnç sunar. Yıldırım akımı, rotor şaftı ve rotor şaftına monte edilmiş deşarj cihazları aracılığıyla göbekten taban çerçevesine iletilir. Akım, temel çerçeveden kuleye topraklama kabloları veya paralel olarak yıldırım akımlarını iletebilen sapma yatağı vasıtasıyla deşarj edilir [29].

Rotor, kanatlara ve makine dairesine doğru göbekteki açıklıklarda manyetik koruma sağlanarak bir Faraday kafesi haline getirilmelidir. Genelde bu açıklıklar, çok etkili manyetik koruma olarak kabul edilebilecek kanat flanş plakaları ve ana şaft flanşı ile kapatılır. Açıklıklar etkili manyetik koruma ile kapatıldığında, göbeğin içeriği özel bir yıldırımdan korunma gerektirmez. Göbeğin yıldırımdan korunması, göbeğin dışına uzanan devrelere bağlı göbekteki elektrik ve kontrol sistemlerinin eş potansiyel bağlanması ve geçici koruması ile sınırlıdır.

Rüzgâr türbinindeki her kanatta tepe akım sensörünü içeren kartlar bulunmaktadır. Bunlara yıldırım kartı denir. Bu kartlar, manyetik bir şeride sahiptir. Kart üretici firmanın programı yardımı ile yıldırım çarpmasının büyüklüğü hakkında bilgi verir. Yalnızca bir tepe akımını (gözlenen en yüksek) kaydetme özelliğine sahiptir. Sadece en yüksek tepe akımını kaydedebilme özelliğine sahip olmaları nedeniyle, değerlerin hepsini kaydetmezler. Yıldırım kartlarının 3 ile 120 kA arasındaki tepe akımlarını kaydetmektedir [10].

3.3.6. Makine dairesinin doğrudan darbeye karşı korunması

Taban çerçevesi, topraklama kabloları ve eş potansiyel kuşaklama şeritleri aracılığıyla kule tabanına bağlanır. Kuleye yıldırım akımları paralel olarak deşarj edilebilmektedir. Jeneratör ve dişli kutusu kauçuk elemanlarla yalıtılmıştır. Topraklama bakır topraklama şeritleri ile yapılır. Orta gerilim trafosu, ana kabin, alçak gerilim dağıtım ve orta gerilim devre kesicinin yanı sıra konvertör ve jeneratör kutusunun tümü doğrudan hatta bağlıdır. Transformatör, orta gerilim kontrol kabini ve dönüştürücü, eş potansiyel kuşaklama şeritlerine bağlanmıştır. Tüm kabinetler genel topraklama sistemine bağlıdır. Rüzgâr hızı ölçüm cihazını koruyan paratoner, makine dairesinin taban çerçevesine bağlıdır.

4. TEORİK ANALİZ

Türbinin hasar alarak duruşundan devreye alınana kadar elektrik satışı yapamamıştır. Türbinin üretim yapamadığından dolayı oluşan bu kayba kâr kaybı denir. Kâr kaybı hesaplarında, santralde hasar alan türbine konum ve rakım olarak en yakın olan iki türbin seçilir. Santralde hasar alan 1 numaralı türbine en yakın olan türbinler 2 ve 3 numaralı türbinlerdir. SCADA'dan diğer iki türbinin on dakikalık üretim değerleri analiz edilmiştir. Güç "P'' değeri kilowatt birimindedir. Eşiklik 3.3'te görüldüğü üzere güç değerinin enerjiye çevrilmesi için zaman "t" ile çarpılır. Santral piyasaya elektrik satış işlemlerinde 2020 yılından itibaren Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM)'e tabiidir. Satış birim fiyatı MWh başına 94 USD'dır. Eşitlik 3.4'te görüldüğü üzere enerji miktarı birim satış miktarı ile çarpılarak satışta ne kadar kazanç elde edileceği bulunur.

$$E = P \times t \tag{4.1}$$

$$\text{Satış} = E \times \text{Satış birim fiyatı} \tag{4.2}$$

Yıldırım hasarı sebebiyle rüzgâr enerji santralinden üretilemeyen enerji 2250 MWh'tir. Üretilemeyen enerjinin, doğal gaz çevrim santrali ve kömür tipi olarak linyitin kullanıldığı bir termik santralden sağlandığı varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bir metreküp doğalgazın yakılması ile 10,64 kWh enerji elde edilmektedir [37]. Bir metreküp doğal gazın yakılması ile atmosfere 2,18 kilogram karbon salınımı gerçekleşmektedir [38]. Bir kilogram kömür (linyit) yakılmasıyla 2,84 kWh enerji elde edilmektedir [37]. Bir kilogram kömürün yakılması ile atmosfere 2,93 kilogram karbon salınımı gerçekleşmektedir [38]. Eşitlik 3.5.'te üretilemeyen enerji doğal gaz çevrim santralinden ve termik santralden elde edildiğinde tüketilen fosil yakıt miktarı bulunmuştur. Eşitlik 3.6.'da hesaplanan fosil yakıt miktarı ile atmosfere kaç kilogram atmosfer salınacağı hesaplanmıştır.

$$m = E \times \text{alt ısıl değeri} \tag{4.3}$$

$$m = E \times \text{kütle (karbon)} \tag{4.4}$$

5. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde santralde yaşanan örnek olaydaki operasyon süreci adım adım açıklanmıştır. Buna ek olarak yıldırım hasarının neden olduğu ekonomik kayıp hesaplanmıştır. Santralde görev yapan personel için iş sağlığı ve güvenliği kapsamında önlemlerden bahsedilmiştir.

5.1. Örnek Olay Analizi

Sakarya'nın Geyve ilçesinde bulunan rüzgâr enerji santralinde bir numaralı rüzgâr türbinin 539 numaralı kanadı 18.09.2021 tarihinde saat 20:48'de yıldırım darbesi almıştır. Olay anı videoları izlenerek türbinin bir dakika boyunca operasyona devam ettiği gözlenmiştir. SCADA alarmları incelendiğinde kule titreşimi alarmından ötürü duruşa geçtiği belirlenmiştir. Şekil 5.1.'de olayın meydana geldiği saatte SCADA sisteminde verilen alarmlar yer almıştır.

Event Log

Start Time:18.09.2021 **End Time:**11.12.2021

Selected Systems:

* The value for the below 3 fields 'Power, WindSpeed and Gen.Speed' will be displayed as '-' when the data is missing

System	Timestamp	Status	Name	Description	Category	Event Type	Power (kW)	Wind Speed (m/s)	Gen. Speed (Rpm)	CCU Event
Turbine-01	18.09.2021 20:07:47	ON	EVENT_181	Spinning position	No Fault	Information	-3	0,2	323	No
Turbine-01	18.09.2021 20:08:47	ON	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	-7	0,6	51	No
Turbine-01	18.09.2021 20:08:47	OFF	EVENT_181	Spinning position	No Fault	Information	-7	0,6	51	No
Turbine-01	18.09.2021 20:19:24	ON	EVENT_183	Load operation	No Fault	Information	28	3,6	1127	No
Turbine-01	18.09.2021 20:19:24	OFF	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	28	3,6	1127	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:31	OFF	EVENT_183	Load operation	No Fault	Information	-128	6,1	1006	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:31	ON	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	-128	6,1	1006	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:50	ON	EVENT_177	Tower vibration	Multiple	Fault	-15	6,8	929	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:50	OFF	EVENT_002	No Errors	No Fault	Information	-12	6,5	850	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:50	OFF	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	-12	6,5	850	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:50	ON	EVENT_3014	Hydraulic Brake Applied	Unused	Information	-12	6,5	850	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:50	OFF	EVENT_006	System OK	No Fault	Information	-12	6,5	850	No
Turbine-01	18.09.2021 20:49:51	OFF	EVENT_3014	Hydraulic Brake Applied	Unused	Information	-7	7,0	809	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:43	ON	EVENT_310	Fault reset	No Fault	Information	-4	6,6	1	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:43	ON	EVENT_308	Idling command	User	Information	-4	6,6	1	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:43	OFF	EVENT_152	Aviation light failure	No Fault	Warning	-4	6,6	1	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:43	OFF	EVENT_177	Tower vibration	Multiple	Fault	-4	6,6	1	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:43	ON	EVENT_002	No Errors	No Fault	Information	-4	6,6	1	No
Turbine-01	18.09.2021 20:52:44	OFF	EVENT_310	Fault reset	No Fault	Information	-4	6,6	1	No

Şekil 5.1. SCADA alarm loglar

Yıldırım hasarının meydana geldiği türbinde yıldırımdan korunma sistemi IEC 61400-24 standardına göre tasarlanmıştır. Bu türbin tipine ait korumada, yıldırım enerjisinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla oluşabilecek hasarları minimize eder. Yıldırım düştüğü anı belirten ve buna göre rüzgâr türbinini durduracak algılama sistemi bulunmamaktadır. IEC 61400-24 standardına göre sertifikalandırılan bu türbin tipi için böyle bir özellik söz

konusu değildir. Dolayısıyla türbin yıldırım düşme anından kule titreşimi olayına kadar geçen süreçte bir aksiyon alması beklenmemektedir. Şekil 5.2.'de yıldırım çarpma anına ait kamera görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 5.2. Yıldırım çarpma anı

19.09.2021 sabahı hava durumunun güvenilir hale gelmesiyle saha ekibi tarafından türbin çevresi kontrol edilmiştir. Türbin kanadının parçalanarak etrafa savrulduğu, kulede boya kalıntıları olduğu tespit edilmiştir. Analizde yanık, delinme, kanat yapısının delaminasyonu, kabukların ayrılması ve kanadın bir kısmının koptuğu belirlenmiştir. Ayrıca boyanın soyulması ve yüzeysel izleri kapsayan kozmetik hasarlar da bulunmaktadır. Sahadaki ilk izlenime göre türbin kanadına reseptörlerden farklı noktaya yıldırım darbesi aldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.3.'te kanadın uç kısmında bulunan reseptör gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Sahadaki kanat parçası

Türbin yolu halkın kullanımına da açık olan kamu yoludur. Bölge halkı tarafından aktif olarak kullanılmaktadır. Kanadın düşme ya da türbinin devrilme ihtimali nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği tedbirleri gereği olarak ilgili kamu kurumlarına resmi yazı ile yolun kapatılması için talepte bulunulmuştur. Güvenlik tedbiri kapsamında türbin çevresi güvenlik bandıyla çevrilerek gerekli uyarı levhaları asılmıştır. Kamu kurumları tarafından onay alınması ile yolun kullanımı geçici olarak kapatılmıştır. Şekil 5.4.'te türbin çevresinin güvenlik şeridi ile kapatıldığı görüntü yer almıştır.



Şekil 5.4. Güvenlik şeridi ile kapatılan yol

Türbin tedarik firması tarafından kanat kesme cihazının tedariği yurt dışından sağlanmıştır. 06.10.2021 tarihinde kanat kesme cihazı sahada kurularak operasyona hazır hale getirilmiştir. Şekil 5.5.'te yıldırım sonrası hasar alan kanat gösterilmiştir.



Şekil 5.5.Yıldırım çarpması sonucu hasarlı kanat

07.10.2021 tarihi itibariyle kanat kesim işlemi başlamıştır. Spiral taşı ile kanat kesme operasyonu üç gün boyunca sürmüştür. Kanat kesim işlemi ile kanat açısı değiştirme işlemi paralel olarak yürütülerek kanadın en kısa sürede yere indirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 5.6.'da kanat kesme operasyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Hasarlı kanadı kesme süreci

Kanat kesim işlemi devam ederken kanat açısını değiştirmeye yarayan pitch motor ve konvertör arızası meydana gelmiştir. Konvertör parça değişimi santral idari binasına stoklanan malzemeden yapılmıştır. Pitch motor için ise hasarsız kanattaki pitch motor ile değişim sağlanmıştır. Pitch motor kütlece ağır olduğundan motor değişim çalışması bir iş günü sürmüştür. Kanat kesim ve kanat açısı değiştirme operasyonu eşzamanlı olarak sürdürülmüştür. Hasarlı kanat; 09.10.2021 tarihinde saat 18:01'de düşürülmüştür. Kanadın zemine düşürülmesinde, hasarı en aza indirgemek hedeflenmiştir. Hasarlı kanadın düşerken kuleye veya trafoya çarpma riskine kıyasla merdivene verilecek hasar türbin tedarik firmasının mühendislik ve iş güvenliği ekibi tarafından göze alınmıştır. Şekil 5.7. kanadın kesilerek düşürüldüğü ana aittir. Şekil 5.8. ise hasarlı kanadın düşürülmüş haline ait görüntülerdir.



Şekil 5.7. Hasarlı kanadın kesilmiş durumu



Şekil 5.8. Hasarlı kanadın yere indirilmiş hali

10.10.2021 tarihinde kesim işleminin ardından kalan kanadın kök kısmındaki parçalar da spiral taşıyla kesilmiştir. Göbek kısmında bulunan pitch motor, aksis kabinler ve terminal baks ekipmanları izolasyon malzemesi ile kaplanarak dış ortamdaki olumsuzluklardan korunmuştur. Şekil 5.9.'da görüldüğü üzere kanat kökü branda ile kapatılmıştır.

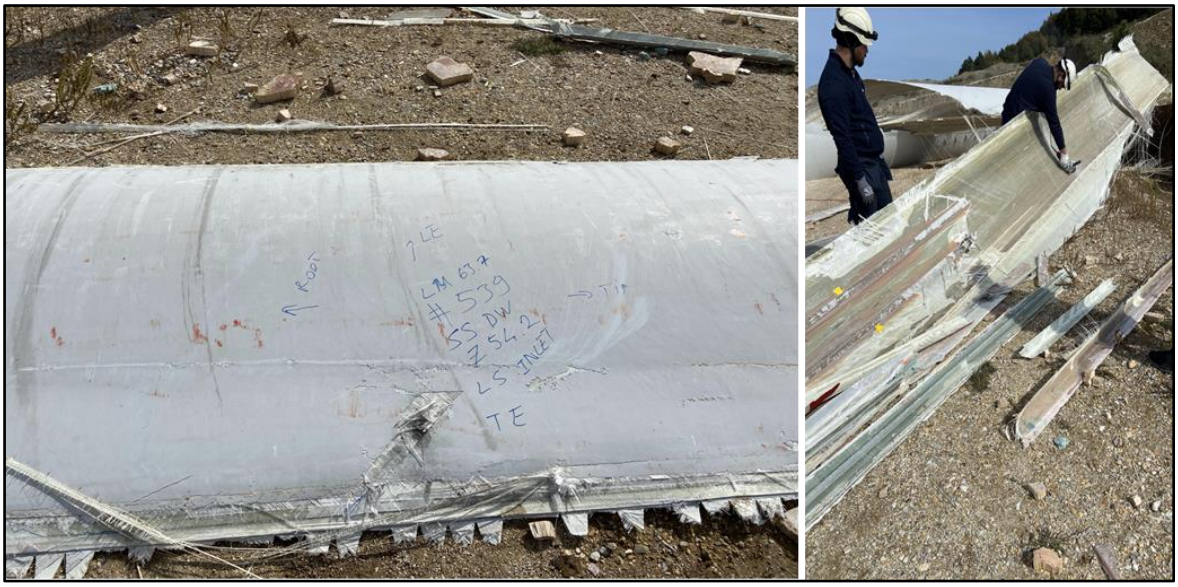


Şekil 5.9. Branda ile kapatılan kanat kökü

Zeminde parçalanarak etrafa savrulan ve kesilen kanat parçaları toplanarak bir araya getirilmiştir, Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. Detaylı inceleme için hasarlı parçalardan keserek numune alınmıştır. Şekil 5.11.'de hasarlı kanadın inceleme çalışması gösterilmiştir. Buna ek olarak, parça incelemelerinde kanatta yıldırım verisini kaydeden elektronik yıldırım kartı da bulunmuştur.



Şekil 5.10. Hasarlı kanat parçası



Şekil 5.11. Hasarlı kanadı inceleme çalışması

Yıldırımın açtığı delik iki yöne ayrılarak kanattaki omurgada zarara neden olarak parçalanmaya neden olmuştur. 14.10.2021 tarihinde iç kanatlarda inceleme yapılmıştır, tamirat işlemi yapılması gerektiği belirlenmiştir. Şekil 5.12.'de yıldırım nedeniyle hasar gören ilk nokta gösterilmiştir. Şekil 5.13.'de yıldırım nedeniyle patlayan kanat içindeki kablo gösterilmiştir. Analiz verisi; yanık, delinme, kanat yapısının delaminasyonunu, kabukların ayrılması ve kanadın bir kısmının ayrılmasını kapsamaktadır.



Şekil 5.12. Parçalanan kanadın hasar alan nokta tespiti



Şekil 5.13. Yıldırım nedeniyle kanat içinde hasar gören kablo

Kanat ekibi iple erişim sağlayarak 15.10.2021 tarihinde dış kanatları kontrol etmiştir. Kanatta boya darbesi olduğu tespit edilmiş olup serrationda kırıklar vardır. Şekil 5.14.'te görüldüğü üzere iple erişim ekibi kuledeki kontrolünde ezik tespit etmemiştir, boya ile düzeltilebilecek küçük çaplı hasarlar bulunmaktadır.



Şekil 5.14. Dış kanat kontrol çalışması

Sahada on gün boyunca süren detaylı kontrol çalışması yapılmıştır. Hasarlı bölgeler belirlenerek tamirat çalışması planlanmıştır. Yıldırım darbesiyle parçalanan kanadın yerine yeni kanat siparişi verilmiştir. 10.12.2021 tarihinde tamirat işlemi tamamlanmış olup yeni kanadın montajı yapılarak 83 günlük duruş süresinin ardından devreye alınmıştır. Şekil 5.15.'te devreye alındığına dair SCADA alarm loglarının ekran görüntüsü yer almaktadır.

Event Log

Start Time:10.12.2021 **End Time:**11.12.2021

Selected Systems:

* The value for the below 3 fields 'Power, WindSpeed and Gen.Speed' will be displayed as '-' when the data is missing

System	Timestamp	Status	Name	Description	Category	Event Type	Power (kW)	Wind Speed (m/s)	Gen. Speed (Rpm)	CCU Event
Turbine-01	10.12.2021 18:54:28	OFF	EVENT_156	Repair	User	Information	-13	8,8	77	No
Turbine-01	10.12.2021 18:58:26	OFF	EVENT_308	Idling command	User	Information	-50	25,6	92	No
Turbine-01	10.12.2021 18:58:26	ON	EVENT_006	System OK	No Fault	Information	-50	25,6	92	No
Turbine-01	10.12.2021 18:58:26	ON	EVENT_181	Spinning position	No Fault	Information	-50	25,6	92	No
Turbine-01	10.12.2021 18:58:30	ON	EVENT_640	Drivetrain pre-check active	No Fault	Information	-16	13,8	205	No
Turbine-01	10.12.2021 18:59:26	OFF	EVENT_181	Spinning position	No Fault	Information	-10	17,6	334	No
Turbine-01	10.12.2021 18:59:26	ON	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	-10	17,6	334	No
Turbine-01	10.12.2021 18:59:26	ON	EVENT_091	Gearbox warm up	Gearbox	Information	-10	17,6	334	No
Turbine-01	10.12.2021 18:59:58	OFF	EVENT_640	Drivetrain pre-check active	No Fault	Information	-12	13,4	399	No
Turbine-01	10.12.2021 19:05:26	ON	EVENT_183	Load operation	No Fault	Information	-17	21,9	1163	No
Turbine-01	10.12.2021 19:05:26	OFF	EVENT_182	Start-up	No Fault	Information	-17	21,9	1163	No
Turbine-01	10.12.2021 19:15:59	OFF	EVENT_091	Gearbox warm up	Gearbox	Information	2148	16,2	1671	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:17	ON	EVENT_530	Voltage Asymmetry Warning from CCU	Weather	Warning	2158	19,3	1696	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:18	ON	EVENT_357	Grid voltage drop detected by converter	Grid	Information	2199	14,6	1709	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:18	ON	EVENT_279	Low voltage ride through	Grid	Information	2199	14,6	1709	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:18	OFF	EVENT_183	Load operation	No Fault	Information	2199	14,6	1709	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:18	ON	EVENT_183	Load operation	No Fault	Information	2199	14,6	1709	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:20	OFF	EVENT_279	Low voltage ride through	Grid	Information	2189	11,8	1720	No
Turbine-01	10.12.2021 23:05:23	OFF	EVENT_530	Voltage Asymmetry Warning from CCU	Weather	Warning	2191	18,9	1729	No

Şekil 5.15. SCADA alarm loglar

5.2. Ekonomik Analiz

Yıldırım kaynaklı hasarlar, hem üretim kaybı hem de hasarlı malzemeler nedeniyle maddi olarak santral sahiplerine zarar vermektedir. Saha gözlemlerine göre, rüzgâr türbinleri ömürleri boyunca çoğunlukla kanatlara olmak üzere önemli sayıda yıldırım çarpması yaşarlar. Yıldırım akımı, türbindeki yapısal malzemelere ciddi hasar verir. Malzeme, tamirat, işçilik gibi önemli onarım maliyetlerini içermektedir. Malzemenin tedarik süresi de ekstra bir duruş süresi çıkmasına neden olabilmektedir. Türbindeki parçalar genelde yurt dışından gelmektedir.

Çizelge 5.1. Kanat tamiri ve yeni kanat fiyatı

	İş Tanımı	Adet	Birim	Satış Birim Fiyatı (€)	Toplam Fiyat (€)
Yeni Kanat İçin	Yeni kanat bedeli	1	Set	322 000	322 000
	İşçilik (özel uzman teknisyen)	36	Adam saat	121	4 356
	İşçilik (saha teknisyeni)	108	Adam saat	91	9 828
	8 personel ve 3 kanat ekibinin harcırah bedeli	11	Set	400	4 400
	Vinç hizmeti	1	Set	45 000	45 000
	Günlük vinç hizmeti	5	Gün	6 000	30 000
	Nakliye	1	Set	15 000	15 000
	Kanadın fabrikadan sahaya nakliyesi	1	Set	10 000	10 000
Kanat Kesim İşlemi	Kanat kesim işlemi (özel uzman teknisyen)	54	Adam saat	121	6 534
	Kanat kesim işlemi (saha teknisyeni)	72	Adam saat	91	6 552
	Vinç bekleme süresi (opsiyon)	1	Gün	3 000	
Diğer İki Kanadın Tamirat İşlemi	Hasar incelemesi	18	Adam saat	121	2 178
	2 kanadın özel teknisyen ile tamirat işlemi	180	Adam saat	121	21 780
	Sepetli vinç hizmeti	2	Set	2 000	4 000
	Günlük sepetli vinç hizmeti	12	Gün	2 000	24 000
	Vinç bekleme süresi (opsiyon)	1	Gün	2 000	
Temizlik	Kanat parçalarının bertaraf edilmesi	1	Set	15 000	
TOPLAM					505 628

Yıldırım hasarı alan türbinde 83 gün boyunca enerji üretimi olmadığından elektrik satışı yapamamıştır. Santralde hasar olan 1 numaralı türbine en yakın olan türbinler 2 ve 3 nolu türbinlerdir. Diğer iki türbinin üretimleri analiz edilmiştir. 83 gün süreli olarak SCADA'dan on dakikalık üretim verileri sistemden kaydedilmiştir. Üretim değerleri enerjiye çevrilmiştir. Santralde MWh başına satış değeri €89,43'dır. Enerji miktarı satış miktarı ile çarpılarak 2 ve 3 nolu türbinlerin enerji üretim miktarları bulunmuştur. 2 nolu türbinin toplam enerji üretimi 2056,35 MWh, 3 nolu türbinin ise 2442,17 MWh'tir. 2 nolu türbinin toplam satış miktarı €183 899'dur. 3 nolu türbinin ise €218 403'tür. İki türbine ait verilerin ortalaması alınarak değerlendirilirse yaklaşık olarak toplam enerji üretimi 2249,26MWh, enerji satış miktarı ise €201 151 olarak hesaplanarak Çizelge 5.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Kâr kaybı hesabı

	Duruş Süresi		83 gün
KÂR KAYBI HESABI	Türbin-02	Toplam Enerji Üretimi (MWh)	2 056
		Toplam Satış (EUR)	183 899
	Türbin-03	Toplam Enerji Üretimi (MWh)	2 442
		Toplam Satış (EUR)	218 403
	Türbin-01 Tahmini Üretim Kaybı	Ortalama Enerji Üretimi (MWh)	2 250
		Ortalama Enerji Satışı (EUR)	201 151

Bu durumda yeni kanat, kanat kesim işlemi, diğer iki kanadın tamirat işlemi için €505 628 bedel tespit edilmiştir. Kar kaybı ise €201 151 olarak hesaplanmıştır. Toplam ekonomik kayıp €706 779 olarak hesaplanmıştır.

5.3. İş Sağlığı ve Güvenliği

İş sağlığı ve güvenliği kapsamında rüzgâr türbinine yıldırım düşerse insan hayatı önemli ölçüde etkilenme riski altındadır. Bu nedenle yıldırım ile ilgili güvenlik prosedürleri oluşturulmalıdır [23]. Bu tür prosedürler şunları içermelidir:

- Yerel hava tahminlerinin düzenli kontrolü (örneğin her sabah)
- Yıldırım yaralanmaları ve elektrik kazalarından kaynaklanan yaralanmalara ilişkin personel için ilk yardım eğitimi
- Ara topraklama sistemi bağlantılarının mümkün olan en kısa sürede uygulanması
- Güvenli yerlerin belirlenerek santraldeki çalışanlara yıldırım uyarı sinyali gönderilmesi [7].

Rüzgar türbinlerinde yıldırım riski 50 kilometrenin altında ise türbine girilmemektedir. Ancak sisli ve yağışlı havalarda risk durumu gözlemlenerek kilometrenin hızla düştüğü gözlenirse çalışma sonlandırılabilir. Şekil 5.16.'da yıldırım uyarı sistemi uygulamasına ait bir ekran görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 5.16. Yıldırım takip uygulaması

Tüm personelin kişisel güvenlikleri için yıldırım tehlikesinden haberdar olmaları esastır. İnşaat çalışmaları sırasında vinç, jeneratör vb. topraklama sistemine bağlantıları en kısa sürede yapılmalıdır. Rüzgâr türbini kulesinden dışarı adım atılması, kulenin yanında durulması, merdiven tırmanılması, elektrik devrelerine ve kablolu iletişim sistemine temas edilmesi tehlikeli durumlardır. Ya da makine dairesinin dışında ve kanatlarda çalışma yapılması kesinlikle güvenli değildir. Kule mükemmele yakın bir Faraday kafesi olduğu için boru şeklindeki kulelerin içindeki platformlar genel olarak güvenli yerler olarak kabul edilir. Bu nedenle, tehlike geçene kadar çalışanlara işi durdurmaları ve güvenli yerlere gitmeleri talimatı verilmelidir [7]. Ayrıca arabalar ve metal konteynerlar da güvenlidir.

Sahada etkili bir şekilde iletişim kurmak zor olabileceğinden, bir tür akustik uyarı sinyali veya etkili uyarı cihazı kullanılması faydalı olmaktadır. Rüzgâr türbini dokümantasyonu, gerekli güvenlik mesafeleri ve güvenli yerdeyken alınması gereken diğer önlemler de dâhil olmak üzere rüzgâr türbini içindeki güvenli yerleri tanımlamaktadır. Örneğin platformlarda ayakta durma, oturma ve dikey olarak uzanan elektrik ileten sistemlere dokunmaktan kaçınma gibi. Ayrıca, rüzgâr türbinlerinin içindeki ve çevresindeki insanlar, adım/dokunma geriliminden veya yıldırım düşmesinin neden olduğu patlama ve yangınlardan kaynaklanan tehlikelere maruz kalabilmektedir [7].

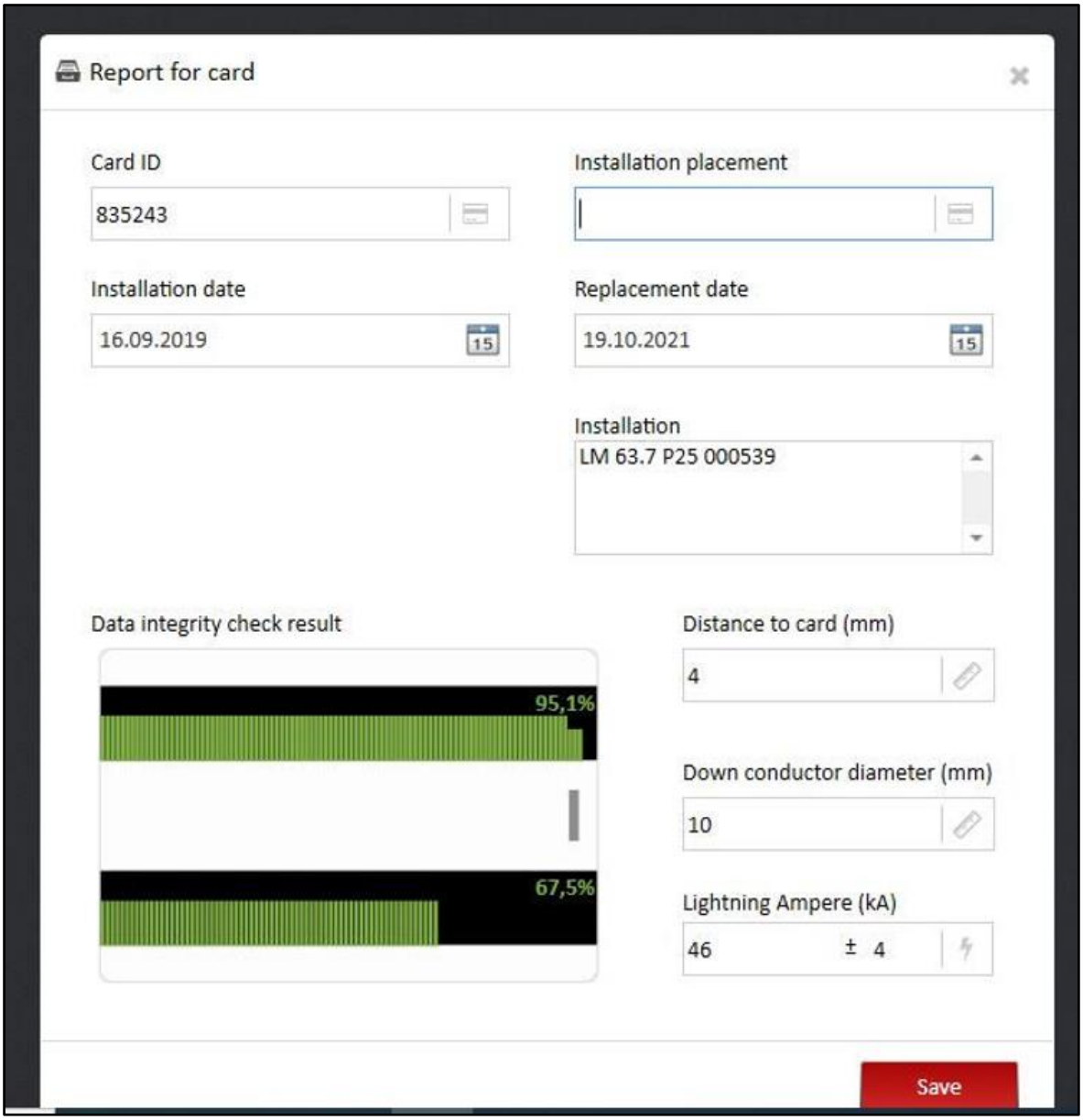
6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışma, türbindeki yıldırımdan korunma sistemini ve rüzgâr enerji santralinde yıldırım kaynaklı kanat hasarının incelemesini içermektedir. Analiz sonuçları, rüzgâr türbinlerinin yıldırım etkisine maruz kaldığındaki operasyon süreci hakkında bilgi vererek koruma sistemini değerlendirmiştir. Yıldırım olayının neden olduğu ekonomik kayıp hesaplanmıştır.

Çalışmada incelenen bu türbinde; kanadın üzerinde bulunan alıcılar ile yıldırım akımı çekilmektedir. Kanat ucundan köküne kadar uzanan iletkenler sayesinde akım, kanat köküne iletilerek yıldırım akımlarını iletebilen rulman yataklarından göbeğe aktarılır. Yıldırım akımı, iletken karbon fırçalar vasıtasıyla rotor milinden türbinin temel çerçevesine iletilir. Bu tasarım ile makine dairesi içinde yer alan elektronik ve mekanik donanımlar yıldırım akımından korunmuştur. Çelik kule, kule tabanı alanındaki eş değer baraya bağlanmıştır. Paratoner vasıtasıyla gerçekleşen yıldırım deşarjları türbin temeline bu toprak barası sayesinde iletilir. Böylece sistem tamamen yıldırım akımlarından korunmuş olur. Tüm koruma sisteminin yaklaşık olarak maliyeti €60 000'dur. Rüzgâr türbininin imalatı ve montajı sırasında yıldırımdan korunma ile ilgili tüm tesisat ve tedbirlerin usulüne uygun olarak yapılmış olması bu yüzden önemlidir.

Kanadın yerdeki incelemesinde yıldırımın kanada uç bölgesinden girdiği belirlendi. Sonra içerde çatallanarak bir kısmı kanat üzerinden bir kısmı da bakır iletken kablo üzerinden ilerlediği tespit edildi. Şekil 6.1.'de türbinde bulunan yıldırım kartı sonuçları yer almaktadır. Kartta okunan değer kablo üzerinden deşarj olan kısmı ile ilgilidir. Sistemde aynı kart defalarca okunarak sonuç edilmektedir. Bu kanadın kablo üzerinden deşarj olmuş olan %95,1 doğruluk oranıyla 46 +/- 4 (42 ila 50) kA şiddetinde akım geçmiş olduğunu, bu okuma aralığının da kanadın üretim tarihi ile kartın kanat üzerinden alındığı tarihler arasında olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.1. Yıldırım kartı sonuçları

Analiz edilen rüzgâr türbininde kullanılan yıldırım kartı kanadın inşa edildiği tarihten itibaren kaydedilen en yüksek yıldırım akım değerini göstermektedir. 2019'dan 2021'e kadar en yüksek 46 kA olarak göstermektedir. Ancak kart verileri; bu değerin hangi tarihte hangi zaman diliminde olduğunu göstermemektedir.

Rüzgâr türbinlerindeki tüm koruma önlemlerine rağmen tam koruma sağlanamadığından santrallerde yıldırım hasarları meydana gelmektedir. Santralde yaşanan yıldırım hasarı ile ilgili göz önünde bulundurulması gereken ihtimaller vardır. Bunlardan ilki, kanat ucunda bulunan yıldırım reseptörünün işlevini yerine getirememesi veya zarar görmüş olma

ihtimalidir. İkincisi, kanat içindeki akımın aktarıldığı kablonun imalat sürecindeki kusurlu işçilik ihtimalidir. Üçüncü ihtimal, kanat içindeki bu kablo zamanla kopmuş ya da delinmiş olabilir. Son ihtimal ise kanat ile kule arasındaki topraklama bağlantı noktasının zamanla korozyona uğrama ihtimalidir. Bu sebepten dolayı belirli dönemlerde topraklama ölçümleri yapılması önem arz etmektedir.

Türbin tedarik firması, koruma sisteminin muayene edilmesi gereken farklı parçaları için bir muayene planı sağlamalıdır. Plan, farklı bölümlerin ne sıklıkta, nasıl gözle ve/veya ölçüm yoluyla muayene edileceğini tanımlamaktadır. Koruyucu önlemlerin gerekliliği, fiziksel hasar veya aşırı gerilim sonucu elektronik sistemlerde meydana gelen arızaları dikkate alan bir risk değerlendirmesini kapsar.

Servis sözleşmelerinde yıldırım hasarı mücbir sebep olarak yer almaktadır. Dolayısıyla garanti ve servis kapsamında değildir. Türbindeki yıldırımdan korunma sisteminin düzgün bir şekilde çalıştığının takip edilmesi faydalı olacaktır. Zira yeni kanat satın alma süreci, tamirat işlemleri ve türbinin duruşta olması ekonomik açıdan ciddi kayba uğratmaktadır. Çalışmada incelenen hasarda tamirat için €505 628, üretim kaybı için ise €201 151 olarak hesaplanmıştır. Toplam maddi zarar €706 779 olarak hesaplanmıştır. Etkili bir korunma sisteminin kurulması ve düzenli kontrolü ile türbinde meydana gelebilecek daha büyük bir hasarın önüne geçmek mümkün olmaktadır.

Yıldırım hasarı sebebiyle rüzgâr enerji santralinden üretilemeyen enerji 2250 MWh'tir. Bu enerji doğal gaz çevrim santralinden elde edilseydi 211 397 metreküp doğal gaz kullanılarak atmosfere 462 050 kilogram karbon salınacaktı. Bu enerji termik santralden elde edilseydi 585 744 kilogram kömür (linyit) kullanılarak 1 716 230 kilogram karbon atmosfere salınacaktı. Enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanarak çevrenin korunması için yıldırımdan korunma sistemlerine gereken önem verilmelidir. Yapılan çalışmalar ve kullanılan sistemler yıldırım hasarını minimize edilmesini içermektedir, tam korumanın sağlanmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir [39].

6.2. Öneriler

SCADA sisteminde çalışmada incelenen türbinin, duruş alarm kodu kule titreşimi nedeniyle olduğu belirlenmişti. Hasar alan kanadın kulede yarattığı balans hatası ile titreşim sensörünü

uyararak bu alarm kodu ile duruşa geçmiştir. Gerekli yazılım güncellemeleri ve mühendislik çalışması ile kanada yıldırım darbesi SCADA'ya alarm kodu ile aktarabilir. Böylece kanada yıldırım darbesi isabet ettiğinde türbin kendini korumaya alarak durdurabilir.

Topraklama sisteminin periyodik olarak kontrol edilerek test yapılmalıdır. Periyodik kontrolün zaman aralığı bir yıldır. Ancak bu periyot altı ay gibi daha kısa zaman aralığına düşürülmesi faydalı olabilir.

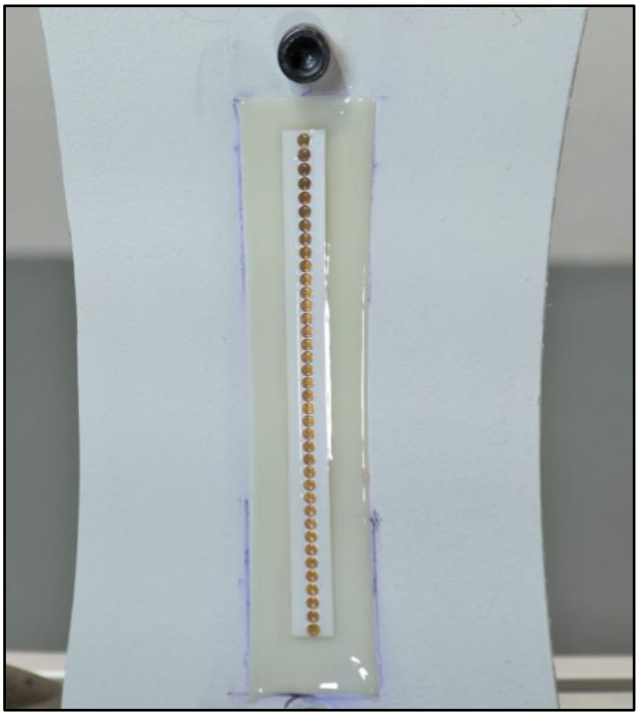
Türbinde meydana gelen kılcal ya da yüzeysel küçük çaplı yıldırım olayı SCADA sisteminde alarm olarak düşmediği için fark edilemez. Türbin işletme aşamasına geçtikten sonra da türbin kanatlarının periyodik olarak santralde görev yapan personel tarafından drone ile kontrol edilmesi faydalı olacaktır. Özellikle şarjlı havalardan sonra kontrol edilmesi elzemdir. Tespit edilen olası bir şüpheli görüntüde ivedilikle önlem alınarak, hasar daha büyük sorunlara ve duruşa sebebiyet vermeden çözülebilmektedir. Drone ile kanat kontrolü yapan firmalar bir kanadı €5 000 ücret karşılığında kontrol ederek raporlama yapmaktadır. Çoğu türbin tedarik firmasının servis sözleşmesinde yılda bir kez kanat kontrol çalışması yapması için yükümlülüğü vardır.

Bu türbin modelinde kullanılan yıldırım kartında anlık bilgi akışı sağlayan özellik yoktur. Ancak bazı türbin modellerindeki yıldırım kartlarından çevrimiçi özellik bulunmaktadır. Bu çevrimiçi özellik sayesinde yıldırım çarptığında, anlık olarak tarih, akım değeri gibi verilere ulaşılmaktadır. Bu sistemin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Çeşitli uygulamalar ile yıldırım takibi yapılmaktadır. İşletmelerin bu uygulamaları kullanması iş sağlığı ve güvenliği açısından faydalı olmaktadır. Sistem, yıldırım yaklaştığında gerek e-mail ile gerek mobil uygulamalardan uyarı vermektedir. Şarjlı havalarda, idari binada bulunan teknisyenler ve güvenlik çalışanları gerekli önlemleri alarak santralde herhangi bir iş kazasına neden olmadan sistemin devamlılığını sağlamalıdır.

Kanada uygulanan yıldırım testleri fabrikada yapılmaktadır. Fabrika ortamında planlanan testlerde saha koşulları büyük ölçüde bilinmemektedir. Koruma sisteminin sağladığı koruma düzeyini kanıtlamak için saha verilerine ihtiyaç duyulur. Belirli bir türbin kurulumunun, birden fazla yıllık veri toplanana kadar yerel yıldırım koşullarına ne kadar iyi dayanacağını öngörebilmek zordur.

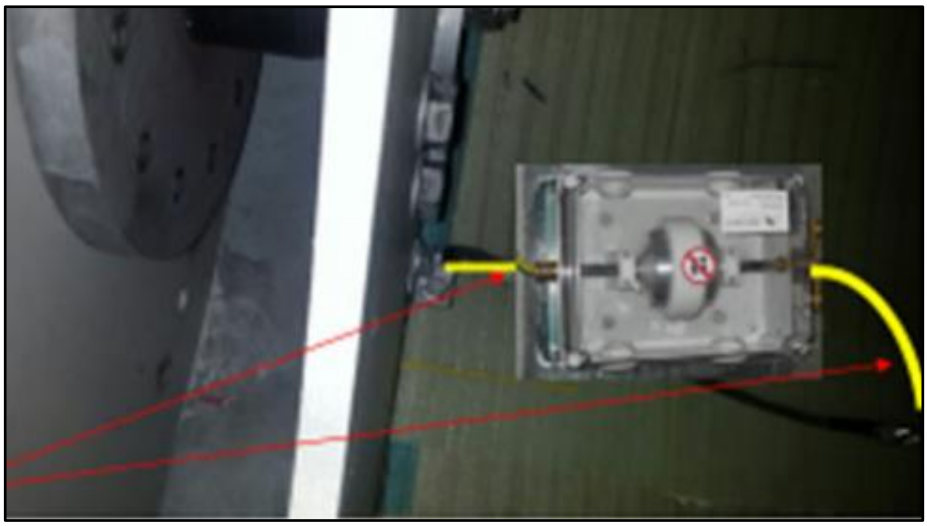
Kanat ucuna yerleştirilen reseptörü destekleyen yıldırım saptırıcı sistemler de endüstride kullanılmaktadır. Bu sistem kanadın üzerine ek olarak yerleştirilmektedir, Şekil 6.2.'de gösterilmiştir. Türbinin aerodinamik performansı etkilememe durumu kesinlik kazanmamıştır. Yapılan testte aerodinamik kaybın performansı %0,05 oranında düşürdüğü saptandı [40]. Yıldırım hasarındaki ekonomik kayıp düşünüldüğünde korumayı desteklemek için alternatif bir çözümdür.



Şekil 6.2. Yıldırım saptırıcı sistem [40]

Rüzgâr türbinleri karlı, yağmurlu havalarda, yüksek ve düşük sıcaklıklarda sürekli çalışmaktadır. Yıldırım koruma ve topraklama sisteminin zamanla verimi düşer. Kanat kullanıldıkça daha gözenekli hale gelir. Cam elyafı, epoksi, reçine sistemi zamanla bozulur. Kanat elektriksel olarak gözenekli hale gelir. Bu da yıldırımdan tam koruma sağlanmamasına neden olabilir.

Kanatta reseptörden gelen kablo ile kanat kök bağlantısı arasına Şekil 6.3.'teki gösterilen şekilde kanat içine yerleştirilerek bağlantı yapılıyor. Kanatlara ürünün uygulanması ile kanatın elektrik yükü çevresindeki elektrik alan ile aynı olması sağlanıyor, bu sayede kanatlara yıldırım düşme riskinin azaltıldığı iddia edilmektedir [41]. Sistem ayrıca makine dairesi ve türbin temelinde de ek bir ekipman bağlantısı yapılır. Bir türbin için yaklaşık maliyet €30 000'dur.



Şekil 6.3. Kanat içine yerleştirilen sistem [41]

Uluslararası standartlarda azami kabul edilen akım değeri 200 kA'dır [7]. Dünyada 600 kA ve üzeri yıldırım akımları görülmektedir. Türkiye'de bazı santrallerde yapılan yıldırım raporlarında çevreye düşen yıldırımların 200 kA'den yüksek olduğu belirlenmiştir. Tasarlanan yıldırıma karşı koruma sistemleri esas alındığında koruma yetersiz kalabilmektedir.

Bu çalışma rüzgâr enerji santralindeki yıldırım olayları ile ilgili araştırma yapanlara, santral sahiplerine, mühendislere, uygulamanın tatbikinde ve geliştirilmesi sürecinde eksikleri gözden geçirmelerine olanak tanıyarak, alınacak aksiyonlarla daha etkin korunma sağlanmasına imkân sağlayacak ve bu alanda yapılacak akademik çalışmalara ışık tutacaktır.

KAYNAKLAR

1. İnternet: World Energy Outlook (2020). Web: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

2. İnternet: TEİAŞ Kurulu Güç Raporları (2022). Web: https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

3. İnternet: GWEC – Global Wind Energy Report (2021). Web: https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

4. Attig-Bahar, F., Ritschel, U., Akari, P., Abdeljelil, I. and Amairi, M. (2021). Wind energy deployment in Tunisia: status, drivers, barriers and research gaps—A comprehensive review. *Energy Reports*, 7, 7374–7389.

5. İlkılıç, Z. (2016). Türkiye'de rüzgar enerjisi ve rüzgar enerji sistemlerinin gelişimi. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 6(2/2), 1–13.

6. Yang, Y., Wang, S., Wang, S., Wang, Q., Xie, W., Ye, L., Tu, J., Zhang, X., Li, G. and Xiang, N. (2022). Lightning trip-out risk assessment and differential lightning protection of 35 kV transmission lines in mountain wind farm. *Energy Reports*, 8, 581–588.

7. The International Electrotechnical Commission IEC TR61400-24 (2019) 2.0 Edition 2019-07– Wind turbine generation systems, Part 24 Lightning Protection. *IEC*. Geneva, Switzerland. 11-198.

8. Cotton, I., Jenkins, N. and Pandiaraj, K. (2001). Lightning protection for wind turbine blades and bearings. *Wind Energy*, 4(1), 23–37.

9. Muto, A. Suzuki, and J. Ueda,T. (2010). *Performance comparison of wind turbine blade receptor for lightning protection.* 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, İtalya. 1263-1269

10. Peesapati, V., Cotton, I., Sorensen, T., Krogh, T. and Kokkinos, N. (2011). Lightning protection of wind turbines - a comparison of measured data with required protection levels. *IET Renewable Power Generation*, 5(1), 48–57. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2008.0107

11. Jiang, J. L., Chang, H. C. and Kuo, C. C. (2012). Analysis of transient energy affection for wind farm under lightning. *Energy*, 48(1), 292–297.

12. Yokoyama, S. (2013). Lightning protection of wind turbine blades. *Electric Power Systems Research*, 94, 3–9.

13. Zeng, R., Zhuang, C., Zhou, X., Chen, S., Wang, Z., Yu, Z. and He, J. (2016). Survey of recent progress on lightning and lightning protection research. *High Voltage*, 1(1), 2–10.

14. Garolera, A. C., Madsen, S. F., Nissim, M., Myers, J. D. and Holboell, J. (2016). Lightning damage to wind turbine blades from wind farms in the U.S. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(3), 1043–1049.

15. Nguyen, T., Pham, T., Tran, T. V. and Huu Tran, T. (2017). Lightning protection for wind turbines in Vietnam. J*ournal of International Council on Electrical Engineering*, 7(1), 29–33.

16. Yan, J., Li, Q., Guo, Z., Ma, Y., Wang, G., Zhang, L. and Yan, J. D. (2017). Puncture position on wind turbine blades and arc path evolution under lightning strikes. *Materials and Design*, 122, 197–205.

17. Zhang, W., Zhang, L., Cui, J., Wang, G., Zhao, T., Zou, L. and Wang, X. (2017). Optimal layout of wind farm for lightning protection based on lightning leader development model. *The Journal of Engineering*, 2017(13), 2261–2265.

18. Wang, Y. and Hu, W. (2017). Investigation of the effects of receptors on the lightning strike protection of wind turbine blades. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(4), 1180–1187.

19. March, V. (2018). Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms. *Electric Power Systems Research*, 159, 50–57.

20. Zhang, X., Zhang, Y. and Xiao, X. (2018). An improved approach for modeling lightning transients of wind turbines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 101, 429–438.

21. Zhou, Q., Liu, C., Bian, X., Lo, K. L. and Li, D. (2018). Numerical analysis of lightning attachment to wind turbine blade. *Renewable Energy*, 116, 584–593.

22. Guo, Z., Li, Q., Ma, Y., Ren, H., Fang, Z., Chen, C. and Siew, W. H. (2019). Experimental study on lightning attachment manner to wind turbine blades with lightning protection system. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47(1), 635–646.

23. Alipio, R. Barros, M.T.C.d. Schroeder, M.A.O. and Yamamoto, K. (2020). Analysis of the lightning impulse and low-frequency performance of wind farm grounding systems. *Electric Power Systems Research*, 180, 106068.

24. Mucsi, V., Ayub, A. S., Muhammad-Sukki, F., Zulkipli, M., Muhtazaruddin, M. N., Saudi, A. S. M. and Ardila-Rey, J. A. (2020). Lightning protection methods for wind turbine blades: An alternative approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10, 2130.

25. Androvitsaneas, V. P., Damianaki, K. D., Nicolopoulou, E. P. and Gonos, I. F. (2021). Statistical analysis of lightning flashes over wind parks in Greece. *Energies*, 14(19), 48-57.

26. Katsaprakakis, D. Al, Papadakis, N. and Ntintakis, I. (2021). A comprehensive analysis of wind turbine blade damage. *Energies*, 14(18), 5974.

27. Matsui, T., Yamamoto, K. and Ogata, J. (2022). Study on improvement of lightning damage detection model for wind turbine blade. *Machines*, 10(9), 1-21.

28. Schaffarczyk, A. ve Roth, G. (Editörler) (2014). *Understanding wind power technology theory, deployment and pptimisation*, Kiel: Wiley Yayıncılık, 1-43.

29. İnternet: General Electric (2021). Web: https://www.ge.com/renewableenergy/sites/default/files/related_documents/3MW-Onshore-Platform-Brochure-33172-LTR-202103-R002.pdf Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

30. Rachidi, F., Rubinstein, M., Montanyà, J., Bermudez, J., Sola, R.R., Sola, G. and Korovkin, N.V. (2008). A review of current issues in lightning protection of new-generation Wind-Turbine Blades. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55, 2489-2496.

31. İnternet: Wind Turbine Parts and Functions (2021). Web: https://electricalacademia.com/renewable-energy/wind-turbine-parts-functions/ Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

32. İnternet: Nordex brochure (2006). Web: http://windturbine.co.kr/homepage/data/file/submenu4_1/1346264786_BrtRAfMq_Nordex_2500kw_spec.pdf Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

33. İnternet: Danish Wind Power Association (2003). Web: http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/core.htm Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

34. İnternet: Siemens brochure (2012)- Web: https://pdf.archiexpo.com/pdf/siemens-gamesa/lightning-protection-system/88089-134497.html Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

35. İnternet: GHCC Earth Science Office NASA (2020). Web: https://weather.msfc.nasa.gov/GOES/Son Erişim Tarihi: 24.04.2022

36. Lo, P. M. (2008). *A Simplified Model For Lightning Exposure of Wind Turbines*, Yüksek Lisans Tezi, McGill Üniversitesi, Montreal.

37. İnternet: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Raporlar (2017). Web: https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=GVFBoxSqsNM Son Erişim Tarihi: 08.05.2022

38. İnternet: Karbon Ayak İzi Ölçümü (2015). Web: https://yeniinsanyayinevi.com/karbon-ayak-izi-olcumu/ Son Erişim Tarihi: 08.05.2022

39. İnternet: Whether Guard (2021). Web: https://weatherguardwind.com/siemens-wind-turbine-lightning-repair/ Son Erişim Tarihi: 08.05.2022

40. İnternet: Gaudern, N. (June, 2021). Aerodynamic assessment: striketape does not impact AEP. Web: https://weatherguardwind.com/striketape-lps-aerodynamic-assessment/ Son Erişim Tarihi: 08.05.2022

41. İnternet: Dinnteco lightning off technical documentation (2019). Web: https://www.dinnteco.com/gb/products Son Erişim Tarihi: 10.05.2022



GAZİ GELECEKTİR..