



## Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi <https://dergipark.org.tr/tr/pub/vyuyumfd>



### Rüzgâr Enerjisi Tesislerinde Başlıca Tehlikelerin HTEA Risk Analiz Yöntemi İle Değerlendirilmesi

Ali Kemal Eyüboğlu<sup>a,\*</sup>, Muharrem Kemal Özfirat<sup>b</sup>

<sup>a</sup>İş Sağlığı ve Güvenliği Böl., Meslek Yüksekokulu, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, ORCID: 0000-0001-7637-2327

<sup>b</sup>Maden Mühendisliği Böl., Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, ORCID: 0000-0003-4074-1965

#### ÖZET

Ege Bölgesi, zengin rüzgâr kaynaklarıyla bilinen ve rüzgâr enerjisi üretimi için ideal konumu olan bir bölgedir. Ancak, bu bölgede bir rüzgâr enerjisi tesisi işletmek de çeşitli tehlikeleri beraberinde getirir ve bunların etkili bir şekilde tespit edilip yönetilmesi güvenli ve güvenilir operasyonların sağlanması için gereklidir. Bu çalışma, ülkemizde Ege bölgesinde bulunan 68 adet rüzgâr türbinine sahip bir işletmede gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, rüzgâr türbinlerinin kurulum ve bakım süreçlerinde ortaya çıkan riskler tespit edilmiş ve toplamda 38 adet risk belirlenmiştir. Bu riskler, hem çalışanlar hem de işletme açısından potansiyel tehlikeleri temsil etmektedir. Çalışmada, tüm iş kollarında sıkça kullanılan L tipi risk değerlendirme yöntemi yerine Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) risk analiz yöntemi kullanılmıştır. Hata Türü Etki Analizi (HTEA)'nde olasılık ve şiddet parametrelerinin yanı sıra farkedilebilirlik parametresi, tehlike unsurunu saptamada ve gereken önlemleri almada iş güvenliği uzmanına geniş bir görüş açısı sağlamakta ve bu tehlikelerin nasıl değerlendirileceği ve yönetileceği üzerine odaklanmaktadır. HTEA, tehlikeli görev ve olayları tanımlayarak, olası riskleri önceden belirleyen sistematik bir yaklaşımdır. Bu çalışma, Türkiye'deki bir rüzgâr enerjisi santralindeki tehlikelerin HTEA yöntemiyle değerlendirilmesinin önemini vurgulamakta ve güvenli bir çalışma ortamının sağlanması için etkili bir risk yönetimi stratejisi sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Risk değerlendirilmesi, HTEA, Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Türbinleri

### Assessment of Major Hazards in Wind Energy Plants Using FMEA Risk Analysis Method

Ali Kemal Eyüboğlu<sup>a,\*</sup>, Muharrem Kemal Özfirat<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of OHS, Vocational School, Maltepe University, Istanbul, Turkey, ORCID: 0000-0001-7637-2327

<sup>b</sup>Department of Mining Eng., Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey, ORCID: 0000-0003-4074-1965

#### ABSTRACT

The Aegean region is known for its abundant wind resources, making it an ideal location for wind energy production. However, operating a wind energy facility in this area also comes with various risks that must be effectively identified and managed to ensure safe and reliable operations. This study was conducted at an enterprise with 68 wind turbines located in the Aegean region of our country. As a result of the analyses, risks that emerge during the installation and maintenance processes of wind turbines have been identified, with a total of 38 risks determined. These risks represent potential hazards for both the workers and the enterprise. Instead of using the commonly employed L-type risk assessment method, this study employed the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) for risk assessment. In FMEA, in addition to the parameters of likelihood and severity, the detectability parameter provides safety experts with a broader perspective for identifying hazards and taking necessary precautions. FMEA is a systematic approach that identifies hazardous tasks and events by anticipating potential risks in advance. This study emphasizes the importance of evaluating the hazards at a wind energy facility in Turkey through the FMEA method, offering an effective risk management strategy for ensuring a safe working environment.

**Keywords:** Risk assessment, FMEA, Wind Energy, Wind Turbines

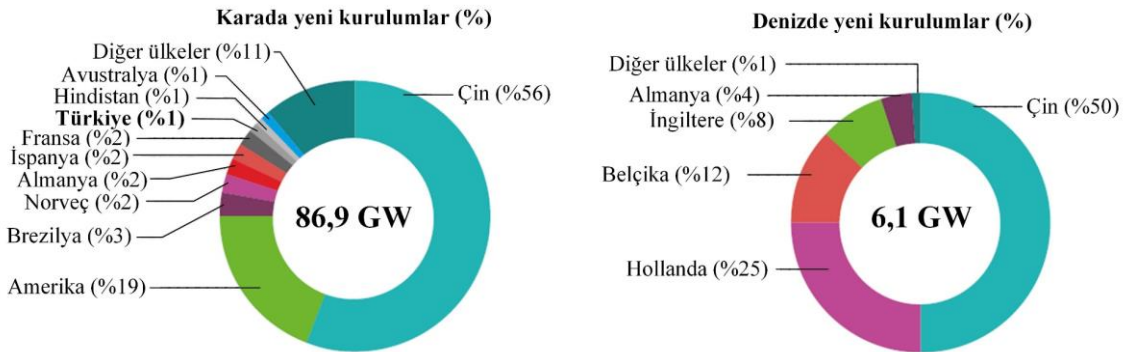
## 1. Giriş

Rüzgâr enerjisi, dünya genelinde hızla büyüyen ve çevresel sürdürülebilirlik sağlama kapasitesi açısından yüksek bir enerji kaynağıdır. Türkiye, özellikle Ege Bölgesi ile bu alandaki potansiyelini kanıtlamış bir ülkedir. Ege Bölgesi'nin benzersiz coğrafi konumu, yüksek rüzgâr hızları ve sıklığı ile rüzgâr enerjisi üretimi için oldukça uygun bir alan oluşturmaktadır [1]. Ancak, bu tür enerji üretim tesislerinin işletilmesi sadece teknik ve çevresel zorlukları değil, aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliği açısından da bir dizi riski beraberinde getirmektedir.

Bu bağlamda, risk analizi ve yönetimi kritik bir öneme sahiptir. Özellikle rüzgâr enerjisi santrallerinde, mekanik arızalar, operasyonel hatalar ve doğal afetler gibi faktörler, çalışanların güvenliği için ciddi tehlikeler oluşturabilir [2]. HTEA yaklaşımı, olası riskleri sistematik bir şekilde analiz ederek, önlem alınması gereken alanlara odaklanmayı sağlar [3].

Türkiye'nin enerji sektöründe yaşanan hızlı dönüşüm, rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynakların önemini her geçen gün artırmaktadır. Ülke genelinde çeşitli bölgeler, rüzgâr enerjisi potansiyeli açısından ciddi bir potansiyele sahiptir, fakat Ege Bölgesi bu alanda öne çıkmaktadır [4]. Türkiye'de rüzgâr enerjisi üretimi, ülkenin enerji ihtiyacını karşılamada ve enerji bağımsızlığını sağlamada kilit bir rol oynamaktadır [5]. Türkiye'nin mevcut enerji politikaları, rüzgâr enerjisinin öne çıkışını hızlandırmayı hedeflemekte ve bu alandaki yatırımları teşvik etmektedir. Özellikle Ege Bölgesi'ndeki rüzgâr enerjisi tesisleri, bu stratejinin bir parçası olarak büyük bir öneme sahiptir [6].

2020 yılında dünya genelinde eklenen 93 GW'lık rüzgâr enerjisi kapasitesi, toplam kapasiteyi 743 GW'a ulaştırmıştır. Bu durum, yıllık olarak 1,1 milyar ton karbon dioksit emisyonunun azalmasına yardımcı olmuştur. Özellikle kara rüzgâr enerjisi kapasitesinde 2019 yılına kıyasla %59'luk bir büyüme (86,9 GW) kaydedilmiştir. Türkiye, yeni rüzgâr enerjisi projeleri açısından küresel düzeyde ilk on ülke arasına girmiştir. 2019 yılında Türkiye'de 686 MW'lık bir kapasite artışı yaşanmışken, 2020 yılında bu rakam 1224 MW'a çıkarak önceki yıla göre neredeyse iki katına ulaşmıştır. Türkiye'nin 2020 yılındaki toplam rüzgâr enerjisi kapasitesi ise 9280 MW seviyesine yükseltilmiştir [7]. Şekil 1'de görüldüğü gibi Türkiye, dünya genelinde rüzgâr enerjisi kurulumunda ilk on ülke arasına girmiştir. 2019 yılında Türkiye'de rüzgâr enerjisi kapasitesi 686 MW artmışken, 2020 yılında bu artış 1224 MW'a yükselerek bir önceki yıla oranla yaklaşık iki katına çıkmıştır. Ayrıca, 2020 itibarıyla Türkiye'deki toplam rüzgâr enerjisi kapasitesi 9280 MW'a ulaşmıştır. Ancak, bu olumlu gelişmelere rağmen, rüzgâr enerjisi projelerinin çeşitli zorluklar ve risklerle karşı karşıya olduğu da bir gerçektir [8]. Bu bağlamda, iş sağlığı ve güvenliği, çevresel etkiler ve mevzuatın gerekleri gibi konulara dikkatli bir şekilde yaklaşılmalıdır.



Şekil 1. Dünyada kara ve deniz üzerinde gerçekleştirilen yeni rüzgâr enerjisi projeleri [8].

Rüzgâr enerjisi tesislerinin etkin ve güvenli bir şekilde işletilmesi için kurulum ve bakım süreçleri büyük önem taşır. Fakat bu süreçler, birçok risk etmeni içerir [9]. Özellikle yüksek yapılar olan rüzgâr türbinlerinde, işçilerin düşme ve yüksekte çalışma riskleri önemli bir konudur [10]. Türbinler

karmaşık mekanik ve elektrik sistemlerine sahiptir. Bu nedenle elektrik çarpması, mekanik arızalar ve yangın riskleri özellikle dikkat edilmesi gereken risk etmenleridir [11].

Hava koşullarının değişkenliği, özellikle rüzgâr hızının ani değişimleri, türbinlerin stabilitesi için risk oluşturabilir. Ayrıca, çalışma koşullarını da olumsuz etkileyebilecek bir faktördür [12]. Bakım süreçlerinde kullanılan kimyasal maddeler ve aletler, deri yanıkları ve zehirlenmeler gibi işçi sağlığı için riskler yaratmaktadır. Bu tür risklerin etkin bir şekilde yönetilmesi gerekmektedir [13]. Sonuç olarak, türbin kurulumu ve bakımı, işletmeler ve işçiler için çeşitli tehlike ve riskler içermektedir. Bu risklerin etkin bir şekilde yönetilmesi, projenin başarısı için hayati öneme sahiptir.

Bu çalışmada, Ege Bölgesinde faaliyet gösteren bir rüzgâr enerjisi santralinde, Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) yöntemi kullanılarak, kurulumda ve enerji üretimi esnasında oluşan risklerin analizi yapılmış ve önlemlerin alınmasıyla risklerin kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi sağlanmıştır.

## 2. Materyal

Bu çalışmada ülkemizde Ege bölgesinde faaliyet gösteren, toplamda 68 adet rüzgâr türbininin yer aldığı iki farklı rüzgâr enerjisi üretim tesisi, yürütülen montaj, kurulum ve bakım işlemleri, iş sağlığı ve iş güvenliği parametreleri dikkate alınarak gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, kapsamlı bir veri seti oluşturmak ve HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) risk değerlendirmesi modelinin etkinliğini test etmek için kullanılmıştır.

Bu modelleme yaklaşımı sayesinde, montaj ve bakım süreçlerinde karşılaşılabilecek iş kazaları veya mesleki hastalıkların yol açabileceği riskler saptanmış, bu risklerin minimize edilebilmesi için stratejik önlemler geliştirilmiştir. Elde edilen veriler ve analiz sonuçları, HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) risk değerlendirmesi metodolojisinin iş güvenliği açısından etkin bir araç olabileceğini göstermektedir.

## 3. Metot

Bu çalışmada, HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi) risk analizi metodolojisi, mevcut risk değerlendirme stratejilerinin hassas noktalarından biri olan uzman görüşlerine bağlı hataların en aza inmesini sağlayan bir yöntem olduğu için tercih edilmiştir. Bu çerçevede, kantitatif, objektif ve matematiksel olarak doğrulanabilir bir risk değerlendirmesi yapılabilmesi amaçlanmıştır.

HTEA ile yürütülen risk değerlendirme süreçleri, iş güvenliği uzmanlarına, işlemleri ve olası sorunları özgün bir şekilde incelemeleri olanağını sağlar. Bu metot, uzman görüşlerini, olmuş kazaları ve uygulanan çalışmaları esas alarak, tehlikeli bölgeleri belirlemeye ve bu riskler için hedeflenmiş çözüm önerileri geliştirmeye dayanır [14]. İş kazalarının olasılığı ve potansiyel etkileri gibi değişkenler kullanılarak tehlikeli faktörler detaylı bir şekilde incelenir. Risk değerlendirme, tehlikelerin tanımlanması, olası hataların ve sonuçlarının belirlenmesi, olasılık ve şiddet gibi faktörlerin değerlendirilmesi ve Risk Öncelik Sayısının (RÖS) hesaplanması aşamalarından oluşur [15-22].

$$RÖS = O \times \text{Ş} \times F \quad (1)$$

RÖS: Risk öncelik sayısı

O: Riskin oluşma olasılığı

Ş: Meydana gelebilecek zararın şiddeti

F: Tehlikenin önceden farkedilebilirliği

Uzmanlar, riskin oluşma olasılığı, meydana gelirse etkisinin ne kadar ciddi olacağı ve bu risklerin ne kadar kolay fark edilebileceği gibi kriterleri 1 ile 10 arasında bir değerle sınıflandırır. Elde edilen Risk Öncelik Sayıları, Denklem 1'de gösterildiği üzere hesaplanır (Tablo 1,2,3,4). Risk Öncelik

sayıları, olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik değerlerinin çarpımı ile oluşturulur ve belirlenen riskler özel bir düzenlemeye tabi tutulur. Bu düzenleme, tehlikeli faktörlerin önceliklendirilmesini sağlar ve böylece uygun koruyucu tedbirlerin alınmasına ve risklerin yeniden değerlendirilmesine yol açar. Bu, iş güvenliği açısından karmaşık ve çok aşamalı bir süreç olabilir, ancak etkili bir şekilde uygulandığında iş kazalarının proaktif yaklaşımla önlenmesine önemli katkıda bulunur.

Tablo 1. Olasılık [15-22]

Puan	Açıklama
1-2	Çok düşük, nadiren görülür
3-4	Düşük, ancak mümkün
5-6	Orta, dikkat gerektirir
7-8	Yüksek, sıkça rastlanır
9-10	Çok yüksek, hemen hemen kesin

Tablo 2. Şiddet [15-22]

Puan	Açıklama
1-2	Zararsız veya hafif zararlı
3-4	Orta düzeyde zararlı
5-6	Ciddi, acil önlem gerekebilir
7-8	Yıkıcı, hayati tehlike yaratabilir
9-10	Felaket sonuçlar, toplu zarar riski

Tablo 3. Farkedilebilirlik [15-22]

Puan	Açıklama
1-2	Çok kolaylıkla fark edilir
3-4	Dikkatle bakıldığında anlaşılır
5-6	Detaylı inceleme gerektirir
7-8	Uzman gözlemi gerektirir
9-10	Spesifik test veya araçlar gereklidir

Tablo 4. Risk öncelik sayısı (RÖS) değerlendirmesi [15-22]

RÖS Değeri	Önlem
$RÖS < 40$	Önlem almaya gerek yok
$40 \leq RÖS \leq 100$	Önlem alınabilir
$RÖS > 100$	Önlem alınması gereklidir

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Türbin elemanlarının boyut ve ağırlıklarının büyük olması, inşaat sahalarına ulaşımı sağlayan yol altyapısının yetersizliği ve taşıma işlemlerinde kullanılan araçların standart yük taşıma araçlarından çok daha büyük olması gibi faktörler, taşıma aşamasında ciddi iş sağlığı ve güvenliği riskleri oluşturmaktadır. Saha çalışmaları esnasında, türbin parçalarının inşaat alanına transferi sırasında meydana gelebilecek iş kazası ve mesleki hastalıklar için toplamda 6 adet risk unsuru tespit edilmiş ve bu riskler Tablo 5’te listelenmiştir. Türbin parçalarını taşıyan aracın devrilmesi ( $288 > 100$ ), Yanlış yüklenen ekipmanın devrilmesi ( $280 > 100$ ), Taşınan yükün yerde sürüklenmesi ( $240 > 100$ ), Diğer taşıtlarla kaza riski ( $294 > 100$ ), Elverişsiz yol koşulları ( $280 > 100$ ) ve Sürekli sürüşle bağlantılı riskler ( $210 > 100$ ) şeklinde hesaplanmıştır. Şekil 2’de görüldüğü gibi rüzgâr türbin ve kanatlarının karayolunda tırlar ile taşınması ve montaj yerinde vinçlerle kurulması esnasında olabilecek risklerin analizi yapılmış ve 100 puandan büyük olarak bulunmuştur. Tablo 4’te verilen RÖS değerlendirmesine göre tüm riskler önlemler ile kontrol altına alınmalıdır. Yük dengesi analizi, düzenli sürücü eğitimleri yapılmalıdır. Doğru bağlantı talimatları, denetimler, dar yol navigasyonu eğitimi, rota planlaması, yük taşıma limitlerine uygunluk, zamanlı mola takvimi ve yorgunluk izleme sistemleri önlemler olarak mutlaka yapılmalıdır. Alınan önlemler sonrası risklerin RÖS değerleri Tablo 5’te görüldüğü gibi 30 ile 80 puan aralığına düşürülmüştür. Düşürülen risklerin alınan önlemler ile izlenmesi ve yönetiminin sağlanması kazaların önlenmesi açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2. Rüzgâr türbini ve kanatlarının taşınması ve tesis edilmesi [23]

Rüzgâr enerji türbinlerinin kurulum aşaması, iş güvenliği açısından en kritik safhadır. Türbin kurulum aşamasında, çok büyük ve yüksek tonajda olan türbin parçalarının yükseltilmesi, monte edilmesi, yüksek rakımlı işlerin icra edilmesi ve sıkışık veya kapalı alanlarda yürütülen çalışmalar gibi, iş kazası veya meslek hastalıkları riskini barındıran çoklu operasyonlar içermektedir (Şekil 2). Yapılan saha araştırmaları sayesinde, rüzgâr türbinlerinin kurulum süreciyle ilişkilendirilebilecek iş kazası veya meslek hastalıkları yaratma potansiyeline sahip toplamda 18 adet risk faktörü tanımlanmıştır. Bu faktörlerin kapsamlı değerlendirmesi ve sınıflandırması, Tablo 6’da ayrıntılı biçimde verilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin kurulum süreci tamamlandıktan sonra, periyodik incelemeler veya mekanik arızalar nedeniyle devamlı bir bakım süreci başlar. Kurulum evresine kıyasla, bakım faaliyetlerinde yer alan işçi sayısı genellikle daha az olsa da, bu aşamada da iş kazası veya mesleki hastalıklarının ortaya çıkabileceği çok sayıda risk faktörü mevcuttur. Yapılan saha çalışmaları incelendiğinde, rüzgâr türbinlerinin bakım süreçleriyle ilgili olarak risk faktörleri saptanmıştır. Bu risklerin detaylı incelemesi ve sınıflandırması Tablo 7’de kapsamlı bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 5: HTEA Risk Analizi - Sevkiyat Süreçleri (O: Olasılık 1-10, Ş: Şiddet 1-10, F: Farkedilebilirlik 1-10, RÖS: Risk Öncelik Sayısı)

Hata Türü	O	Ş	F	RÖS	Önlem	O	Ş	F	RÖS
Önlemler öncesi					Önlemler sonrası				
Türbin parçalarını taşıyan aracın devrilmesi	8	9	4	288	Yük dengesi analizi, düzenli sürücü eğitimi	5	8	2	80
Yanlış yüklenen ekipmanın devrilmesi	7	8	5	280	Doğru bağlantı talimatları, denetim	4	7	2	56
Taşınan yükün yerde sürüklenmesi	5	8	6	240	Bağlantıların tekrar kontrolü, güvenlik denetimi	3	7	2	42
Diğer taşıtlarla kaza riski	6	7	7	294	Dar yol navigasyonu eğitimi, taşıma planlaması	3	5	3	45
Elverişsiz yol koşulları	7	8	5	280	Rota analizi, yük taşıma limitlerine uygunluk	4	5	2	40
Sürekli sürüşle bağlantılı riskler	5	7	6	210	Zamanlı mola takvimi, yorgunluk izleme sistemleri	3	5	2	30

Tablo 6’da kurulum süreçlerinde oluşabilecek risklerin hesaplamaları yapılmıştır. Tüm risklerin RÖS değerlerinin 100’den büyük olması önlemlerin çok dikkatli şekilde alınmasını ve yönetiminin iyi yapılmasını gerektirir. Analize göre; Kule üzerinde yüksekte düşme ( $400 > 100$ ), Ekipmanların kaldırma esnasında yüksekte düşmesi ( $378 > 100$ ), Türbin parçalarının montaj sırasında düşmesi ( $378 > 100$ ), Vinç halatlarının kopması ( $300 > 100$ ), Yürüyüş alanında takılma/kayma ( $210 > 100$ ), Aşırı ağırlıklı yük taşıma ( $240 > 100$ ), Vinç kullanımında parçaların çarpması ( $270 > 100$ ), Montaj esnasında vücut uzuvlarının sıkışması ( $270 > 100$ ) bulunan önemli risklerdir. Özellikle vinçlerle montaj yapılması sırasında çok ağır ve biçimsiz olan yüklerin kaldırılmasında vinçlerin devrilmesi, taşınan yükün devrilmesi veya halat kopmaları burada beklenen önemli risklerdir. Özellikle vinç halat kopmaları veya yükün halattan kurtulması Özfirat vd., [24] tarafından yapılan olay ağacı analizinde önemli risk olarak modellenmiştir. Halatların periyodik bakımının yapılması, yağlanması ve gözlem altında tutulması önlemler olarak yapılmalıdır.

Ayrıca bu tür çalışmalarda, çalışmadan önce çalışma alanı ve etrafında güvenli alanın oluşturulması sağlanmalıdır. Özellikle 2012’de Samsun’da gerçekleşen olayda 300 tonluk amonyak tankı kapağının düşmesi sonucu kaza çok ağır sonuçlar meydana getirmiştir. Bu olayda gerçekleşen olayın güvenli alan oluşturulmaması nedeniyle gerçekleştiği düşünülürse büyük ekipmanların montaj ve naklinde çalışma alanında güvenli alan oluşturulmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılır. Bu alan güvenlik şeridi ile ayrılmalı ve bu alana tehlikeli çalışma bitirilinceye kadar hiçbir çalışanın girmesine izin verilmemelidir. Ayrıca tehlikeli çalışmalarda yapılan risk analizleri ve önlemleri oldukça önemlidir ve detaylı şekilde çalışma öncesinde yapılmalıdır [25].

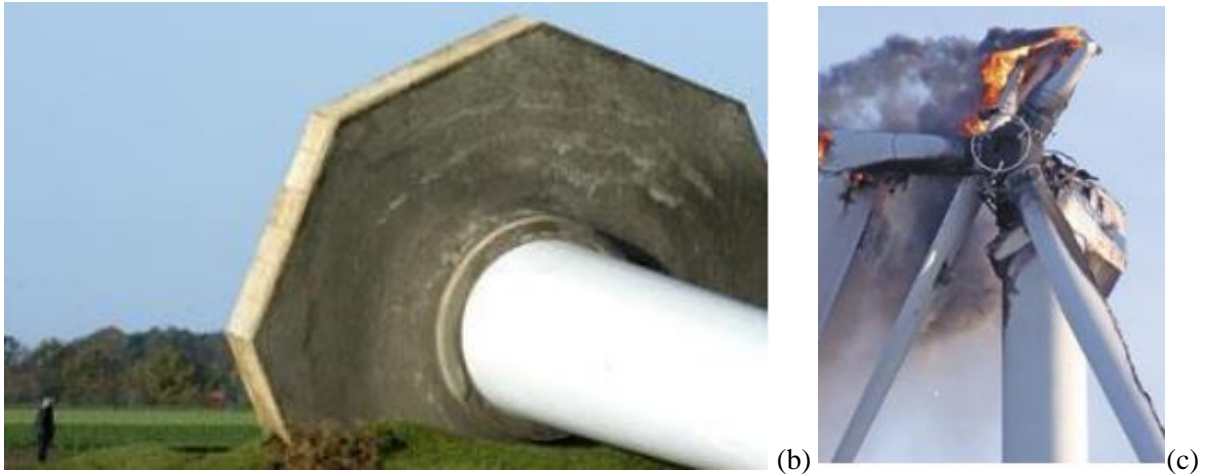
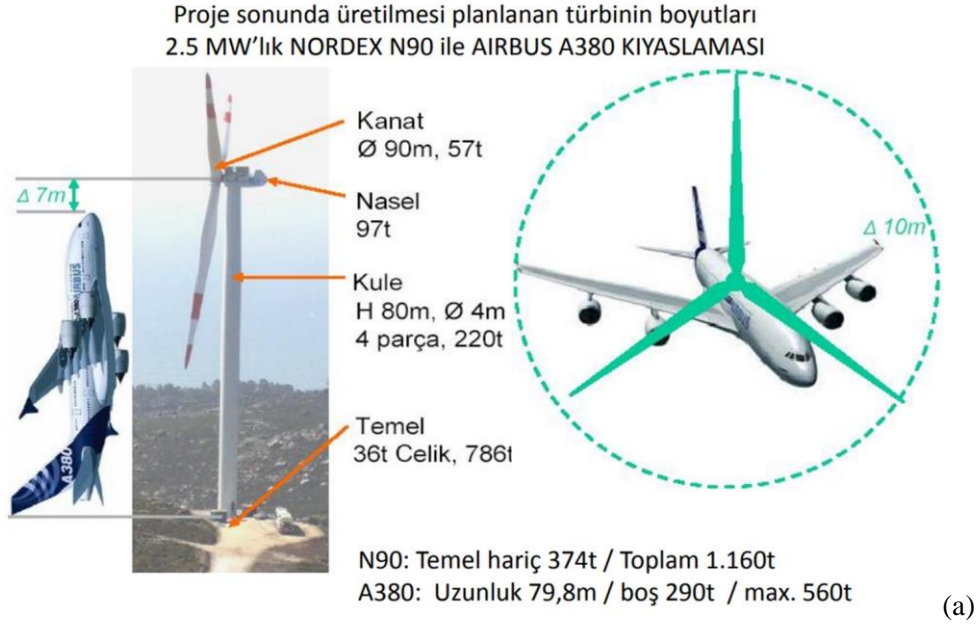
Tablo 6’da verilen önlemler düşünüldüğünde güvenli alanın oluşturulması ve planlı çalışmaların gerçekleştirilmesi bu tür kazaları önleyecektir ve analizlerde risk öncelik sayısını düşürecektir. Tablo 6’da verilen önlemlerden sonra RÖS değerleri 24-84 puanları arasına düşürülmüş ve riskler kontrol altına alınmıştır.

Tablo 6: HTEA Risk Analizi - Rüzgâr Türbini Kurulum Süreçleri (O: Olasılık 1-10, Ş: Şiddet 1-10, F: Farkedilebilirlik 1-10, RÖS: Risk Öncelik Sayısı)

Hata Türü	O	Ş	F	RÖS	Önlem	O	Ş	F	RÖS
Önlemler öncesi						Önlemler sonrası			
Ekipmanların kaldırma esnasında yüksekte düşmesi	7	9	6	378	Güvenli alan oluşturulması, planlı çalışma, düşmeyi önleyici ekipman	4	7	2	56
Kule üzerinde yüksekte düşme	8	10	5	400	Düşmeyi engelleyici sistemler, kule güvenliği	6	7	2	84
Türbin parçalarının montaj sırasında düşmesi	7	9	6	378	Güvenli alan oluşturulması, planlı çalışma, dengeleyici ekipmanlar, yük sabitleyiciler	5	7	2	70
Vinç halatlarının kopması	6	10	5	300	Halat kalitesi, kontrolü, düzenli bakım	4	5	3	60
Yürüyüş alanında takılma/kayma	6	5	7	210	Zemin düzenlemesi, kablo yönetimi	4	3	2	24
Aşırı ağır yük taşıma	5	8	6	240	Ağırlık limit uyarıları, uygun ekipman	3	6	2	36
Vinç kullanımında parçaların çarpması	6	9	5	270	Vinç operatörü eğitimi, yük dengesinin sürekli izlenmesi	3	7	3	63
Montaj esnasında vücut uzuvlarının sıkışması	5	9	6	270	Parça sabitleyiciler, emniyet protokolleri	3	7	2	42
Elektrikle ilgili kazalar	7	10	4	280	Elektrik güvenliği eğitimi, güvenlik ekipmanı, yalıtım	3	7	2	42
Dar ve kapalı alanlarda çalışma	6	8	5	240	Havalandırma sistemleri, mekan büyüklüğüne uygun ekipman	4	6	3	72
Kule Merdiveni Düşmeleri	6	9	5	270	Yaşam hattı denetimleri, emniyet kemeri kullanımı	4	7	2	56
Yangın ve patlama riski	8	10	3	240	Elektrik sistemlerinin düzenli bakımı, yıldırım koruma sistemleri	6	7	2	84
Acil durumlara hızlı müdahale edilememe	5	9	7	315	Acil durum planlaması, eğitim ve tatbikatlar	3	7	3	63
Vincin Devrilmesi	5	9	5	225	Rüzgâr hızı izlemesi, vinç sabitleyiciler, uygun kapasite	3	7	3	63
Sabit nesnelere çarpma	6	8	6	288	Alan düzenlemesi, gözetleme	3	6	2	36
Kişisel koruyucu donanımın (KKD) uygun olmaması	5	9	5	225	KKD uyumluluğu kontrolü, ekipman eğitimi	3	7	2	42
Bağlantı elemanlarının kopması	6	9	4	216	Bağlantı elemanı kalitesi kontrolü, periyodik denetimler	3	7	2	42
Türbin sahasının yerleşim alanlarına uzak olması	4	9	3	108	Ulaşım planlaması, acil durum tahliye planları	2	7	2	28

Tablo 7’de Rüzgâr Elektrik Santralinde (RES) yapılacak bakımlar sırasında oluşabilecek riskler hesaplanmıştır. Kötü hava koşulları (336>100), Yüksekte çalışma (432>100), Takılma ve kayma sonucu düşme (240>100), Elektrik çarpması (225>100), Arazi koşulları (140>100) olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.a’da görüldüğü gibi bir RES tesisinin türbin boyutlarının bir Airbus A380 uçağı ile karşılaştırması

verilmiştir. Böylece yapının boyutlarının devasa olduğu ve kısım ağırlıklarının 220 t'a kadar ulaşabildiği görülmektedir. Dolayısıyla yapılan risk analizi ile oluşabilecek risklere yönelik önlemler çok dikkatli şekilde çalışmalıdır. Tablo 7'de verilen önlemlerden sonra RÖS değerleri 24-84 puanları arasına düşürülmüş ve riskler kontrol altına alınmıştır.



Şekil 3. 2,5 MW'lık bir RES boyutları (a), 2002 Almanya: 70 m'lik türbinin aşırı rüzgârla devrilmesi (b), 2007 Sunderland: RES'te yangın (c) [23]

Şekil 3.b'de görülen olay Almanya'da 2007 yılında gerçekleşmiştir. Olayda kötü hava koşulları sebebiyle oluşan aşırı rüzgâr etkisiyle türbin devrilmiştir. Bu nedenle RES tesisinin kurulması sırasında rüzgâr kaynağına dayalı elektrik üretimi başvurularının teknik değerlendirmesi hakkındaki yönetmeliğin ek kısmındaki rüzgâr hâkim yönlerinin hesaplamalarına göre hareket edilmesi oldukça önemlidir [26]. Diğer bir olayda ise Sunderland'te bir RES'te oluşan yangın nedeniyle rüzgâr türbini zarar görmüştür (Şekil 3.c). Özellikle santrallerin yanmasının tüm mühendislik önlem ve çalışmalarına rağmen yapısal olarak geliştiği ve çözüm geliştirmekte zorlanıldığı RES çalışma ve projelerinde yer almaktadır. Burada alınacak önlem olarak söndürme sistemlerinin bulunması ve RES'in kurulduğu coğrafyada etrafa yangın riskinin önlenmesi sağlanmalıdır.



Tablo 7: HTEA Risk Analizi - Bakım Süreçleri (O: Olasılık 1-10, Ş: Şiddet 1-10, F: Farkedilebilirlik 1-10, RÖS: Risk Öncelik Sayısı)

Hata Türü	O	Ş	F	RÖS	Önlem	O	Ş	F	RÖS
Önlemler öncesi						Önlemler sonrası			
Kötü hava koşulları	7	8	6	336	Mevsimsel hava koşullarını izleme, uygun güvenlik ekipmanı	4	7	2	56
Yüksekte çalışma	8	9	6	432	Güvenlik kemerleri, yüksekte çalışma eğitimi	6	7	2	84
Vinç halatlarının kopması	6	10	5	300	Halat kalitesi, kontrolü, düzenli bakım	4	5	3	60
Takılma ve kayma sonucu düşme	6	8	5	240	Düzenli alan denetimi, kaymaz zemin malzemeleri	4	7	1	28
Elektrik çarpması	5	9	5	225	Elektrik güvenliği eğitimi, güvenlik ekipmanı, yalıtım	3	7	2	42
Arazi koşulları	5	7	4	140	Yol bakımı, arazi koşullarına uygun araçlar	3	5	2	30
Hareket eden parçalar	5	8	5	200	Koruyucu barikatlar, dikkatli işlem protokolleri	3	6	3	54
Yıldırım	3	9	4	108	Yıldırım koruma sistemleri, hava durumu izleme	2	7	3	42
Kule merdiveninden düşme	7	9	3	189	Yaşam hattı kontrolü, güvenlik ekipmanı	5	7	2	70
Elle taşıma işleri	5	7	4	140	Yük taşıma ekipmanı, ağırlık sınırlamaları	3	5	2	30
Haberleşme eksikliği	6	7	5	210	Anlık iletişim araçları, eğitim	3	5	2	30
Buzlanma	3	8	3	72	Buz eritici madde kullanımı, kış ayları için özel eğitim	2	6	2	24
Kule içi vinci ile yapılan kaldırma işlemleri	5	9	4	180	Vinç kontrolü, yük taşıma ekipmanı	3	7	2	42
Yetersiz aydınlatma	4	7	5	140	İyi aydınlatma ekipmanı, dikkatli planlama	2	5	3	30

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, Ege Bölgesi'nde faaliyet gösteren bir rüzgâr enerjisi üretim santralinde ortaya çıkan başlıca tehlikelerin HTEA risk analiz yönetimi ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Toplamda 38 adet risk tespit edilmiş olup, bunların arasında en yüksek RÖS puanına sahip risklerin yönetimi ele alınmıştır.

Rüzgâr enerjisi üretim santrallerinde mevcut riskler kapsamlı bir şekilde hesaplanmış ve en yüksek RÖS puanına sahip riskler üzerinde özellikle çalışılarak, hem çalışanların hem de işletmenin güvenliği için yol gösterici önlemler sunulmuştur. Böylece, HTEA yönteminin uygulanması ile bir RES tesisinde risklerin daha etkin bir şekilde proaktif yaklaşımla yönetilebileceği gösterilmiştir.

Çalışmada elde edilen veriler değerlendirilerek önlemleri çalışmaları aşağıdaki şekilde verilmiştir;

- Kritik Risk Yönetimi:** En yüksek RÖS puanına sahip riskler için acil müdahale planları oluşturulmalı ve bu planlar tüm çalışanlara öğretilmelidir.
- Özel Eğitim Programları:** Yüksek RÖS puanına sahip risk faktörlerini minimize etmeye yönelik özel eğitim programları düzenlenmelidir.
- Dinamik Risk Değerlendirmesi:** HTEA yöntemini kullanarak sürekli ve dinamik bir risk değerlendirme süreci oluşturulmalı, bu süreç periyodik olarak gözden geçirilmelidir.

4. **Yüksek RÖS Faktörleri için Teknolojik Çözümler:** En yüksek risk faktörlerini azaltacak teknolojik yeniliklerin araştırılması ve uygulanması gerekmektedir.
5. **Yasal Düzenlemeler ve Denetim:** En yüksek RÖS puanına sahip riskler için yasal düzenlemeler yapılmalı ve denetim süreçleri güçlendirilmelidir.
6. **Toplumsal Farkındalık:** Özellikle yüksek RÖS puanlı riskler hakkında, santral ve çevresinde yaşayan toplum bilgilendirilmelidir.

## Kaynaklar

- [1] M. Gökçek, A. Bayülken, (2010). A review of connection problems of Turkey's wind power to electrical grids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(2), 489-501.
- [2] P.J. Tavner, (2012). *Offshore wind turbines: Reliability, availability and maintenance*, The Institution of Engineering and Technology, USA.
- [3] A.K. Eyüboğlu, M.K. Özfırat, (2015). Yeraltı metal madeni ocaklarındaki başlıca tehlikelerin HTEA risk analiz yönetimi ile değerlendirilmesi. *Uluslararası maden işletmelerinde işçi sağlığı ve iş güvenliği sempozyumu*, 95-103.
- [4] S.A. Akdag, Ö. Guler, (2010). Evaluation of wind energy investment interest and electricity generation cost analysis for Turkey, *Energy Policy*. 38(8), 5013-5022.
- [5] C. Seckin, A. Micallef, A. Tezcan, (2017). Wind energy for a sustainable future: Case studies in Turkey. *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2017 International Conference on, 60-72.
- [6] N. Altın, A. Ozdemir, S. Bilgen, (2011). Economic analysis of stand alone and grid connected hybrid energy systems, *Renewable Energy*. 36(7), 1931-1943.
- [7] B. Saatçioğlu, (2019). Challenges and opportunities in Turkish wind energy markets: A policy analysis, *Renewable Energy Law and Policy Review*. 2(3), 111-120.
- [8] Dünya Enerji Konseyi Türkiye, (2021). 2021 Küresel Rüzgar Raporu. <https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2021/04/2021-Kuresel-Ruzgar-Raporu.pdf>. Erişim tarihi: 23 Eylül 2023.
- [9] G. Stewart, D. Tackle, (2012). Safety risks and mitigation in wind farm operations, *Renewable Energy*. 45, 451-460.
- [10] Z. Dong, P. Zhang, W. Song, Y. Feng, (2015). A study of the safety issues of large-scale wind turbines operation and maintenance based on HFACS-Wind, *Safety Science*. 73, 145-152.
- [11] F. Dinçer, P. Acar, A. Vardar, (2018). An examination of the risk factors associated with wind turbine installations, *Renewable Energy*. 118, 310-320.
- [12] Y. Zhang, J. Wang, S. Ma, Y. Zhang, (2019). Occupational health risk assessment and management in wind power plants, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 11(4), 23-30.
- [13] R. Jones, M. Kavanagh, (2020). A systematic review of accident causation in wind farm operations, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 120, 75-85.
- [14] A.K. Eyüboğlu, M.K. Özfırat, B. Kahraman, (2016). Açık işletme madenciliğinde şev ve basamaklarda oluşan risklerin hata türü etki analizi (HTEA) yöntemiyle sınıflandırılması. *Uluslararası 8. İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı*, 332-335.
- [15] Ö. Özkılıç, (2005). İş Sağlığı ve Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri. TİSK Yayınları, Ankara, Yayın no: 338, pp. 140-142.
- [16] J.R. Ribas, J.C. Ribas Severo, L.F. Guimarães, K. Parente, C. Perpetuo, (2021). A fuzzy FMEA assessment of hydroelectric earth dam failure modes: A case study in Central Brazil, *Energy Reports*. 7, 4412-4424.
- [17] E. Bartolome, P. Benitez, (2022). Failure mode and effect analysis (FMEA) to improve collaborative project-based learning: Case study of a Study and Research Path in mechanical Engineering, *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 50(2), 291-325.
- [18] J.J. Cardiel-Ortega, R. Baeza-Serrato, (2023). Failure mode and effect analysis with a fuzzy logic approach, *Systems*. 11, 348.

- [19] S.W. Lin, H.W. Lo, (2023). An FMEA model for risk assessment of university sustainability: using a combined ITARA with TOPSIS-AL approach based neutrosophic sets, *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05250-4>.
- [20] N. Kök, M.S. Yıldız, (2023). New generation FMEA method in automotive industry: an implementation, *Journal of Turkish Operations Management*. (7)1, 1630-1643.
- [21] S. Cox, (1997). Risk assessment models in health and safety, *Safety Science*. 26(3), 201-209.
- [22] M.K. Özfırat, M.E. Yetkin, P.M. Özfırat (2019). Risk management for Truck-LHD machine operations in underground mines using failure modes and effects analysis, *International Journal of Industrial and Operations Research*. 2(1), 003.
- [23] İTÜ, (2013). Yüksek güçlü rüzgâr türbinlerinin yapıları, Güç elektroniği ve kontrol sistemleri, Elektrik Mühendisliği Kulübü, İstanbul.
- [24] M.K. Özfırat, E. Özkan, B. Kahraman, B. Şengün, M. Yetkin, (2017). Integration of risk matrix and event tree analysis: A natural stone plant case, *Sādhanā*. 42(10), 1741–1749.
- [25] Ş. Yılmaz, M. Bilici, (2020). Üniversitelerin mühendislik fakülteleri bünyesinde bulunan laboratuvarlarda iş sağlığı ve güvenliği. *OHS Academy*, 3(2), 102-113.
- [26] Rüzgâr kaynağına dayalı elektrik üretimi başvurularının teknik değerlendirmesi hakkında yönetmelik, (2015). Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Resmi gazete sayısı: 29508.